

Taajuusmuuttajien vaikutus muuntajan kuormitettavuuteen

Joakim Engström

Joakim Engström

Opinnäytetyö
Informations- ja medieteknik

2012

OPINNÄYTE	
Arcada	
Koulutusohjelma:	Informations- och medieteknik
Tunnistenumero:	3792
Tekijä:	Joakim Engström
Työn nimi:	Taajuusmuuttajien vaikutus muuntajan kuormitettavuuteen
Työn ohjaaja (Arcada):	DI Kim Rancken
Toimeksiantaja:	Neste Oil Oyj
Asiantuntijaohjaaja:	Kimmo Muttonen
<p>Tiivistelmä:</p> <p>Taajuusmuuttajia käytetään laajalti teollisuudessa moottorien ohjauksena niiden tuoman hyödyn vuoksi. Taajuusmuuttajien haittapuolena ovat niiden tuottamat yliaallot sähköverkkoon. Yliaalloilla on paljon haitallisia vaikutuksia sähköverkkoon ja sen komponentteihin. Tässä työssä tutkitaan yliaaltojen vaikutusta muuntajiin kuormitettavuuden kannalta. Työssä tullaan perehtymään siihen miten vähitellen lisääntyvät taajuusmuuttajakuormat tulisi ottaa huomioon Neste Oilin Porvoossa sijaitsevassa tuotantolaitoksessa tulevaisuudessa uuden laitteiston kannalta, sekä miten olemassa olevan kaluston kuormitettavuus määritetään.</p> <p>Yliaallot ovat sähköverkon 50 Hz perusaallon monikertoja eli korkeataajuisempia. Muuntajan kuormitushäviöt perustuvat pyörrevirtoihin, mitkä ovat taajuusriippuvaisia. Muuntajan altistuessa korkeampitaajuiselle virralle syntyy muuntajan käämeissä ja muissa rakenteissa lisähäviöitä lämpöhäviöiden muodossa. Lisähäviöiden vuoksi muuntajan kuormitettavuus laskee.</p> <p>Kuormien tuottamat yliaallot on suunnitteluvaiheessa selvitettävä tietokonesimuloinnin avulla, esim. ABB:n DriveSize ohjelmalla. Eri kuormien tuottamat yliaallot summautuvat geometrisesti. Olemassa olevissa asennuksissa virta- ja jänniteyliaallot voidaan selvittää tekemällä mittauksia. Eri standardointiliitot ovat julkaisseet käytännön menetelmiä mittausten ja muuntajien kuormitettavuuden päättämisen vuoksi.</p> <p>Jos uusien asennuksien myötä yliaaltotasot nousevat liian suuriksi on toimenpiteitä tehtävä, toimenpiteet voi olla muuntajan vaihto, eri taajuusmuuttajien käyttö tai yliaaltosuodattimien asennus. Epälineaaristen kuormien lisääminen laitokseen suurentaa yliaaltoja, sen takia on aina tehtävä yliaaltoselvitys jotta uusi asennus ei johda komplikaatioihin.</p>	
Avainsanat:	muuntaja, taajuusmuuttaja, yliaalto, Neste Oil
Sivumäärä:	33
Kieli:	suomi
Hyväksymispäivämäärä:	13.6.2012

EXAMENSARBETE	
Arcada	
Utbildningsprogram:	Informations- och medieteknik
Identifikationsnummer:	3792
Författare:	Joakim Engström
Arbetets namn:	Taajuusmuuttajien vaikutus muuntajan kuormitettavuuteen
Handledare (Arcada):	DI Kim Rancken
Uppdragsgivare:	Neste Oil Oyj
Experthandledare:	Kimmo Muttonen
<p>Sammandrag:</p> <p>Frekvensomriktare används idag i stor utsträckning i industrin för varvtalsreglering av motorer. Frekvensomriktarstyrningen har många fördelar. Nackdelar är ändå att de producerar övertoner i elnätet. Övertonerna har många oönskade effekter på elnätets komponenter. I det här arbetet undersöks hur övertonerna inverkar på transformatorernas belastningskapacitet. I arbetet kommer det att tas ställning till hur man skall handskas med möjliga övertonsproblem, då man på Neste Oils produktionsanläggning i Borgå i framtiden utökar frekvensomriktardriften. Arbetet kommer också att gå in på hur man fastställer belastningskapaciteten på de befintliga installationerna.</p> <p>Övertonerna är multiplar av grundtonen, vilken i Finlands elnät är 50 Hz. Transformatorernas belastningsförluster baserar sig på virvelströmmar, vilka är frekvensberoende. Övertonerna gör att transformatorn utsätts för högre frekvenser, vilket höjer förlusterna. Förlusterna omvandlas till värme, vilket gör att transformatorns kapacitet måste sänkas. Då nya installationer med omriktare planeras måste man med datorsimulation utreda hurdana övertoner kan väntas uppstå. Det kan t.ex. göras med ABB:s DriveSize. Övertonerna från olika omriktare summeras geometriskt med varandra. För befintliga installationer kan övertonsströmmar och -spänningar bestämmas genom mätningar. Standardiseringsorganisationer har gett ut olika praxis för övertonsmätningar och bestämmande av transformatorers belastningskapacitet.</p> <p>Om övertonsnivåerna vid nya installationer blir för höga måste de åtgärdas. Åtgärder kan vara att byta ut transformatorn, installera övertonsfilter eller använda sig av omriktare som förorsakar mindre övertoner. Då nya olinjära laster monteras till en anläggning kommer övertonerna att öka. För att undvika övertonsrelaterade problem måste en utredning angående de nya installationernas medverkan till övertonsdistorsionen göras.</p>	
Nyckelord:	transformator, frekvensomriktare, övertoner, Neste Oil
Sidantal:	33
Språk:	finska
Datum för godkännande:	13.6.2012

DEGREE THESIS	
Arcada	
Degree Programme:	Informations- och medieteknik
Identification number:	3792
Author:	Joakim Engström
Title:	Taajuusmuuttajien vaikutus muuntajan kuormitettavuuteen
Supervisor (Arcada):	M.Sc. Kim Rancken
Commissioned by:	Neste Oil Oyj
Expert Supervisor:	Kimmo Muttonen
Abstract:	
<p>Variable-speed drives are commonly used in facilities because of the many benefits. The drawback with the use of VSD:s is that they inject harmonics to the supplying network. Harmonics affect power network and its components in a number of ways. This thesis will study how harmonics affect on the transformers loading capability. The thesis will deal with how the increasing VSD loads at Neste Oils facility in Porvoo will have to be taken into consideration when new installations are planned. Determining the loading capability of existing installations will also be dealt with.</p> <p>Harmonics are multiples of the fundamental frequency, which in Finland is 50 Hz. The transformers load losses are based on the frequency dependant eddy currents. Because of harmonics the transformer will be exposed to higher frequencies that lead to greater losses. The losses convert to heat hence must the transformers loading be de-rated. When planning new VSD installations, computer simulation must be involved to estimate the harmonic injection of the installation. This can be done with ABB:s DriveSize software. The harmonics from different non-linear loads add up geometrically. For existing installations the voltage and current harmonics levels can be measured. Standards organizations publish practices for harmonics measurement and determine transformer loading capability.</p> <p>If harmonic levels in installations exceed recommended limits correcting actions are needed. Actions can involve exchange of transformer, installation of harmonics filter or change to use of VSD with low harmonic injection. Installation of new non-linear loads will increase the harmonic levels. To prevent harmonics related problems when new non-linear loads are installed, a study of how the new component will affect the overall harmonic levels must be done.</p>	
Keywords:	transformer, variable-speed drive, harmonics, Neste Oil
Number of pages:	33
Language:	Finnish
Date of acceptance:	13.6.2012

SISÄLTÖ

Tiivistelmä

Sammandrag

Abstract

1	Johdanto	10
1.1	Porvoon jalostamo.....	10
2	Tehomuuntajat	11
2.1	Sijaiskytkentä.....	12
2.2	Muuntajahäviöt	13
2.2.1	<i>Tyhjäkäyntihäviöt</i>	13
2.2.2	<i>Kuormitushäviöt</i>	14
2.3	Muuntajakytkennät	14
3	Taajuusmuuttaja	15
3.1	Taajuusmuuttajan teoria	15
3.1.1	<i>Välipiirilliset taajuusmuuttajat</i>	16
3.2	Taajuusmuuttajan käyttö	18
4	Yliaallot	19
4.1	Yliaaltolähteet	20
4.1.1	<i>Suuntaajat</i>	20
4.2	Yliaaltojen summautuminen	21
4.3	Yliaaltojen vaikutus.....	21
5	Muuntaja taajuusmuuttajakuormalla	22
5.1	Muuntajan kytkennän vaikutus yliaaltoihin	22
5.2	Verkon yliaaltojen määrittäminen	23
5.2.1	<i>Yliaaltojen arvioiminen</i>	23
5.2.2	<i>Simulointi DriveSize-ohjelmalla</i>	24
5.2.3	<i>Yliaaltomittaus</i>	25
6	Muuntajan kuormitettavuus yliaaltopitoisessa verkossa	27
6.1	CENELEC standardin mukaan laskeminen	27
6.2	IEEE standardin mukaan laskeminen	28
7	Taajuusmuuttajakuorman lisääminen	30

7.1 Yliaaltosuodatus	31
8 Yhteenveto	32
Lähteet.....	34

Kuvat

Kuva 1. Yksivaihemuuntajan täydellinen sijaiskytkentä. /25/	12
Kuva 2. Hystereesikäyrä. /5/	13
Kuva 3. YNd-kytkentä. /19/	15
Kuva 4. 6-pulssi diodisilta.	16
Kuva 5. IGBT-transistorivaihtosuuntaaja. /12/.....	17
Kuva 6. Pulssileveysmodulaatio. /13/	17
Kuva 7. Perusaallon ja yliaallon summa-aalto. /22/	19
Kuva 8. Fluke 43B yliaaltoanalyysinäkymä. /24/.....	26
Kuva 9. Sijaiskytkentä suodatetusta verkosta. /17/	31

Taulukot

Taulukko 1. IEEE laatimat virtasärörajat.	24
--	----

ESIPUHE

Haluan osoittaa kiitokseni Neste Oilin kunnossapitoinsinööri Timo Pietiäiselle sekä sähköverkonvalvoja Kimmo Muttoselle haasteellisesta ja todella mielenkiintoisesta opinnäytetyön aiheesta sekä työn asiantuntijaohjauksesta.

Kiitokset myös työn ohjaajalle DI Kim Ranckenille.

Helsinki 13.6.2012

Joakim Engström

LYHENTEET

PWM = Pulse-width modulation

THD = Total harmonic distortion

IGBT = Insulate gate bipolar transistor

IEEE = Institute of Electrical and Electronics Engineers

IEC = International Electrotechnical Commission

PCC = Point of Common Coupling

TRMS = True RMS (Root mean square), tehollisarvo

CENELEC = European Committee for Electrotechnical Standardization

1 JOHDANTO

Neste Oil Oyj on öljytuotteita valmistava yhtiö. Yhtiö keskittyy polttoaineiden jalostukseen ja markkinointiin. Yhtiö on perustettu vuonna 1948 ja pääkonttori sijaitsee Espoossa. Suomen valtio omistaa yli puolet yhtiön osakkeista. Vuonna 2011 yhtiön liikevaihto oli noin 15,4 miljardia euroa ja se työllisti noin 5000 työntekijää.

Yhtiö tuottaa tuotantolaitoksissaan mm. bensiiniä, dieselpolttoaineita, polttoöljyjä, voiteluaineita, liuottimia, nestekaasua sekä bitumia. Jalostamoita ja tuotantolaitoksia on viidessä maassa: Suomessa, Ruotsissa, Alankomaissa, Bahrainissa ja Singaporessa. Suomen jalostamot sijaitsevat Porvoossa sekä Naantalissa. /1/

Tässä työssä tullaan tutkimaan olemassa olevien ja tulevien taajuusmuuttajakuormien vaikutusta muuntajiin Neste Oilin Porvoossa sijaitsevassa jalostamossa. Työssä käsitellään teoriaa joka on taustana taajuusmuuttajien ei-toivotuille vaikutuksille etenkin jake-lumuuntajien kannalta. Työssä tullaan selvittämään miten tulisi edetä kun tuotantolaitoksen taajuusmuuttajakuormat kasvavat ja miten tulisi määrittää nykyisten asennusten kuormitettavuutta taajuusmuuttajakuormilla. Taajuusmuuttajat vaikuttavat sähköverkkoon ja sen komponentteihin monella eri tavalla, tämän työn päätarkoitus on kuitenkin vain tarkastella vaikutuksia muuntajiin.

1.1 Porvoon jalostamo

Neste Oilin jalostamo Porvoossa sijaitsee Kilpilahden teollisuusalueella. Alue on pinta-alaltaan 13 neliökilometriä ja on Pohjoismaiden suurin öljynjalostuksen ja kemianteollisuuden keskus. Kymmenellä eri yrityksellä on tuotantoa alueella, esim. Gasum, AGA, Borealis Polymers, Innogas, StyroChem Finland ja Neste Oil. Lisäksi alueella on runsaasti muita toimitsijoita.

Porvoon Neste Oilin jalostamolla tuotetaan yli 150 tuotetta ja tuotekomponenttia. Tuotanto tehdään neljässä eri tuotantolinjassa ja yli 40 prosessiyksikössä. Suuri määrä eri tuotteita on mahdollista tehdä monipuolisen krakkauksen ansiosta, tällaista jalostamoa

kutsutaan complex-jalostamoksi. Porvoon jalostamo pystyy jalostamaan noin 200 000 barreliä raakaöljyä päivässä. /2/

Jokaisella tuotantolinjalla on omat sähköasemat ja muuntamot. Tuotantolinjoissa on paljon kriittisiä prosesseja jotka eivät saa pysähtyä virheen tai sähkökatkoksen vuoksi. Kriittiset laitteet ovat varustettu varamuuntajilla. Alueella on myös kaksi dieselvoimalaitosta jotka takaavat sähkönsyötön sähkökatkosten aikana. Neste Oilin alueella on yhteensä yli 100 eri kytkentäkeskusta.

2 TEHOMUUNTAJAT

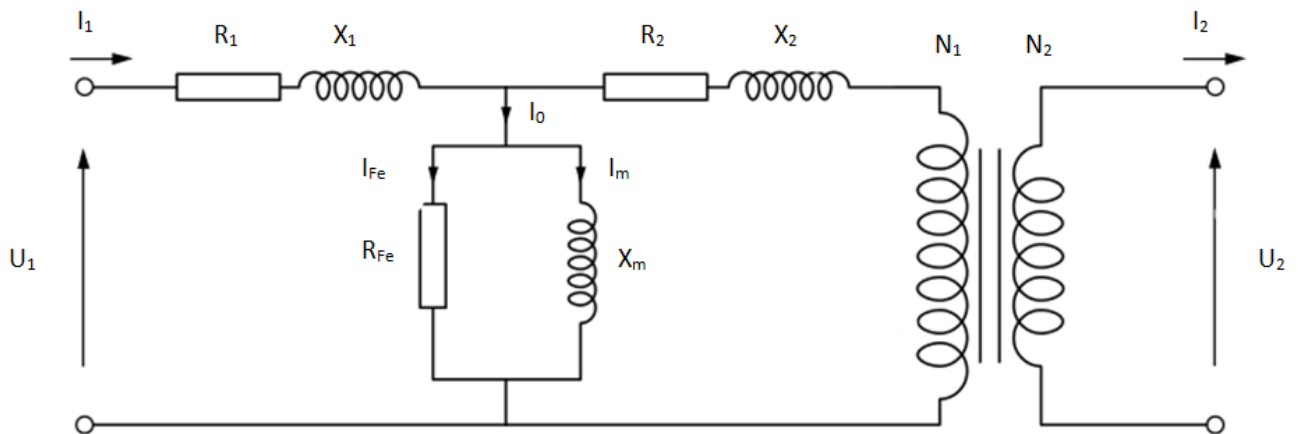
Muuntajia tarvitaan sähköjakeluverkoissa jotta jakeluverkon korkeampi jännite voidaan muuntaa käyttäjän haluamaan jännitteeseen. Korkeampaa jännitetasoa käytetään pitkissä siirtoissa häviöiden pienentämiseksi. Muuntajan toiminta perustuu siihen että energia siirtyy ensiökäämistä toisiokäämiin magneettisesti muuntajan rautasydämen kautta. Kolmivaiheiset sähkönjakelumuuntajat toteutetaan yleensä kolmella pylväällä. Käämit on sijoitettu pylväiden ympäri. Saman vaiheen sekä ylä- että ala-jännitekäämi ovat samalla pylväällä. Pylväät ovat yhdistetty toisiinsa ikeillä, näin muodostaen suljetun magneettipiirin. Kun muuntajan toiseen käämiin kytketään vaihtojännite, rautasydämeen syntyy muuttuva magneettivuo. Muuntajia valmistetaan myös lisäkäämillä eli ns. tertiäärikämillä. Tertiäärikämin tarkoitus voi olla otto lisäjännitetasolle pienille tehoille tai se tehdään muuntajan stabilointia varten.

Häviöitä syntyy muuntajan käämissä ja rautasydämessä, nämä häviöt tuottavat lämpöä mikä pitää johtaa pois. Yleisin jäähditys tapa on öljyjäähditys. Öljyjäähdetyssä muuntajassa rautasydän ja käämit on upotettu muuntajaöljyllä täytettyyn säiliöön. Öljyn kautta lämpö siirtyy käämistä säiliön seinämiin. Säiliöstä lämpö siirtyy ilmaan. Suuritehoinen muuntaja tuottaa paljon lämpöä jolloin tehostettu jäähditys voi olla tarpeen. Jäähdytystä tehostetaan silloin tuulettimilla ja radiaattoreilla. Öljyjäähdettyjen muuntajien säiliö voi olla hermeettinen tai paisuntasäiliöllinen.

Räjähdyks- ja palovaarallisissa tiloissa käytetään monesti ns. kuivamuuntajia joissa jäähdytysaineena käytetään pelkästään ilmaa paloturvallisuuden takia. /3/,/4/

2.1 Sijaiskytkentä

Yksivaiheisen muuntajan täydellinen sijaiskytkentä on esitetty kuvassa 1. Sijaiskytkennällä kuvataan muuntajan komponentit jotka johtavat jännitteenalennemaan ja häviöihin. Usein käytetään yksinkertaistettua sijaiskytkentää. Siinä ensiön ja toision resistanssit ja reaktanssit on yhdistetty oikosulkuresistanssiksi ja oikosulkureaktanssiksi. Yksinkertaistetussa sijaiskytkennässä tyhjäkäyntivirtaa kuvaavat komponentit jätetään myös pois tyhjäkäyntivirran pienen vaikutuksen vuoksi.



Kuva 1. Yksivaihemuuntajan täydellinen sijaiskytkentä. /25/

U_1 = ensiöjännite

U_2 = toisiojännite

I_1 = ensiövirta

I_2 = toisiovirta

R_1 = ensiökäämin resistanssi

R_2 = toisiokäämin resistanssi

R_{Fe} = rautahäviöresistanssi

X_1 = ensiökäämin hajareaktanssi

X_2 = toisiokäämin hajareaktanssi

X_m = magnetointireaktanssi

I_0 = tyhjäkäyntivirta

I_m = magnetoimisvirta

N_1 = ensiökäämin kierrosluku

N_2 = toisiokäämin kierrosluku

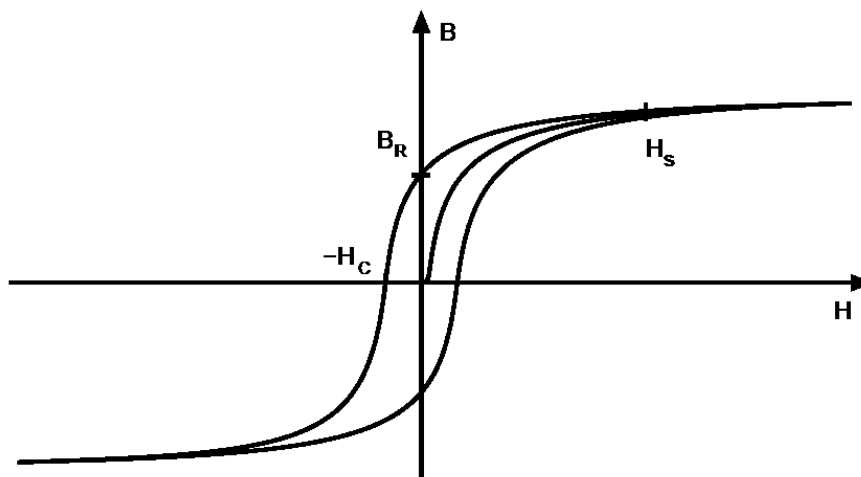
2.2 Muuntajahäviöt

Koska muuntajan komponentit eivät ole ideaalisia, erilaisia häviöitä esiintyy. Muuntajas-
sa esiintyvät häviöt jaetaan yleensä tyhjäkäynti- sekä kuormitushäviöihin.

2.2.1 Tyhjäkäyntihäviöt

Muuntajan sanotaan olevan tyhjäkäynnissä silloin kun ensiökäämi on kytketty vaihto-
jännitteeseen ja toisiokäämiin ei ole kytketty kuormaa, eli se on virraton. Tyhjäkäynti-
häviöt (P_0) ovat rautahäviöitä jotka syntyvät muuntajan epäideaalisuudesta. Rautahäviöt
perustuvat hystereesi-ilmiöön sekä pyörrevirtoihin.

Pyörrevirrat syntyvät muuttuvan magneettivuon vaikutuksesta muuntajan rautasydä-
meen. Magneettivuo vaihtelee syöttävän vaihtojännitteen taajuuden mukaan. Ensiökää-
min muuttuva magneettikenttä indusoi pyörrevirtoja muuntajan sydämeen, mikä aiheut-
taa sydämen lämpenemistä. Hystereesihäviöt liittyvät raudan magneettisiin ominaisuuks-
siin. Vaikka ulkoinen magneettikenttä häviäisikin, rauta jää vielä magneettiseksi. Jotta
raudasta tulisi magneettisesti neutraali, se tarvitsee negatiivisen ulkoisen magneettiken-
tän. Ilmiötä on kuvattu kuvassa 2.



Kuva 2. Hystereesikäyrä. /5/

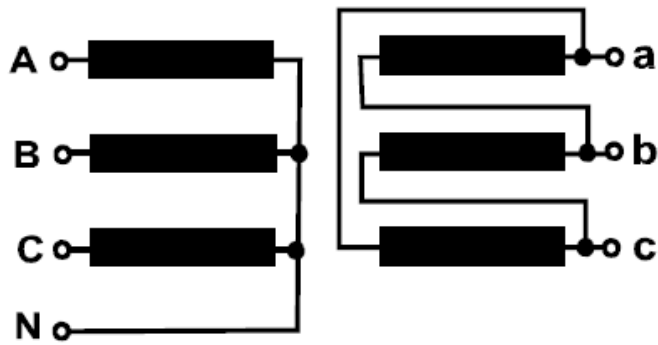
2.2.2 Kuormitushäviöt

Muuntaja kuormittuu kun toisiokäämiin kytketään kuorma, käämissä kulkee silloin virta. Muuntajan kuormitushäviöt (P_k) johtuvat käämien resistiivisyydestä. Häviöihin vaikuttaa myös virranahtoilmiö johtimissa. Pyörrevirtojen vaikutuksesta virta ahtautuu johtimen pinnalle. Kuormitushäviöt muuttuvat neliöllisesti kuormitusvirran mukaan. /3/,/4/

2.3 Muuntajakytkennät

Ensiö- ja toisiovaihekäämit kolmivaihemuuntajassa voidaan kytkeä toisiinsa eri kytkennöillä: tähti-, kolmio- tai hakatähtikytkenällä. Tähtikytkeyssä muuntajassa, joka merkitään Y:llä, saadaan nolllapiste käämien yhteiskytkentäpisteessä. Tämä piste merkitään N:llä. Jakelumuuntajissa joskus käytetty hakatähtikytkenä on kytketty yhdistettynä tähtikytkenällä ja kolmiokytkenällä koska siinä vaihekäämit on jaettu kahteen yhtä suureen osaan, jolloin kahden eri pylvään kääminpuolikasta voidaan kytkeä yhteen. Kytkentä merkitään Z:lla. Kolmiokytkenä merkitään kirjaimella D. Jos muuntajan ensiöpuoli on kolmiokytkenä ja toisiopuoli tähtikytkenä ja nolllapiste on käytettävissä, muuntaja merkitään Dyn. Muuntajalle ilmoitetaan yleensä myös toisiopuolen vaihesiirto verrattuna ensiöpuoleen kellotaulun mukaan. Jos vaihesiirtoa on 30°, se ilmoitetaan luvulla 11 joka kuvaa analogisen kellon näyttämää aikaa. Tämä merkitään esim. Dyn11.

Muuntajan kytkentä vaikuttaa mm. muuntajan vinokuormasietoisuuteen. Epäsymmetriaa syntyy jos on kuormia jotka on kytketty vaihe- ja nolllajohtimen väliin. Dyn, Yzn ja Dzn-kytkettyjä muuntajia voidaan kuormittaa epäsymmetrisellä kuormalla jatkuvasti 100 %. Yyn-kytketyissä muuntajissa vinokuormasieto on huono. Näitä muuntajia voidaan kuormittaa jatkuvasti vai 10 % vinokuormalla. Nämä Yyn-kytkettyjen muuntajien ongelmat voidaan ratkaista lisäämällä kolmioon kytketyn tertiäärikäämin, mikä tasaa muuntajan pylväiden väliset erisuuruiset kuormat. /6/,/7/



Kuva 3. YNd-kytkentä. /19/

3 TAAJUUSMUUTTAJA

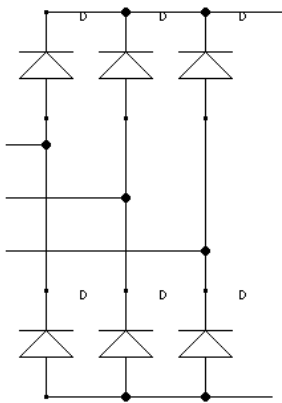
Oikosulkumoottori on nykyään käytetyin sähkömoottorityyppi. Oikosulkumoottorin etuja on sen kestävyys ja vähäinen huollon tarve. Järkevin tapa toteuttaa oikosulkumoottorin nopeudensäätö on taajuusmuuttajalla. Energiaa säästyy kun moottorin nopeutta ja momenttia voidaan säätää tarpeen mukaan. Suurin taloudellinen hyöty taajuusmuuttajista saadaan pumppu- ja puhallinkäytössä. Näissä sovelluksissa energian tarve on suhteessa nopeuden kolmanteen potenssiin. Kun moottorin nopeus ja momentti on säädettävissä, se voidaan optimoida tietylle sovellukselle. Prosessi, johon moottori kuuluu, on taajuusmuuttajalla säädettävissä.

3.1 Taajuusmuuttajan teoria

Taajuusmuuttajan toiminta perustuu puolijohdetekniikkaan. Taajuusmuuttajat jaetaan yleisesti kahteen ryhmään; välipiirillisiin ja suoriin. Välipiirilliset taajuusmuuttajat ovat yleisimmät, niissä taajuuden muuttaminen tapahtuu kahdessa vaiheessa. Ensin verkon syöttämä vaihtosähkö muutetaan tasasähköksi tasasuuntaajalla välipiiriin. Välipiiristä sähkö muutetaan vaihtosuuntaajalla taas vaihtosähköksi halutun taajuiseksi. Suorat taajuusmuuttajat, ns. syklokonvertterit, muodostavat halutun vaihtosähkön ilman tasasuuntausta tyristoripareilla.

3.1.1 Välipiirilliset taajuusmuuttajat

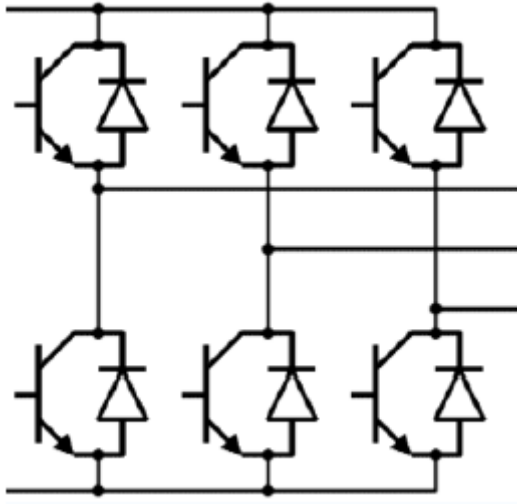
Tasasuuntaajat jaetaan ohjattuihin ja ohjaamattomiin, riippuen siitä minkälaisia puolijohteita käytetään. Ohjatuissa tasasuuntaajissa käytetään tyristoreita tai muita ohjattavia puolijohteita. Verkkokommutoiduilla tyristorisilloilla varustetuilla tasasuuntaajilla moottorin tuottama jarrutusenergia on mahdollista syöttää takaisin verkkoon. Ohjaamattomissa tasasuuntaajissa käytetään diodeja. Taajuusmuuttajissa yleisin käytetty tasasuuntaaja on 6-pulssinen diodisilta (kuva 4) joka toimii pulssileveysmodulointiperiaatteella. Tasasuuntaajia toteutetaan myös 12- ja 24-pulssisina. 12-pulssinen suuntaaja saadaan kytkemällä yhteen kaksi rinnan kytkettyä 6-pulssista diodisiltaa. 12- ja 24-pulssiset tasasuuntaajat tarvitsevat lisäksi erikoismuuntajia tai useamman muuntaajan toimiakseen oikein. /8/,/9/



Kuva 4. 6-pulssi diodisilta.

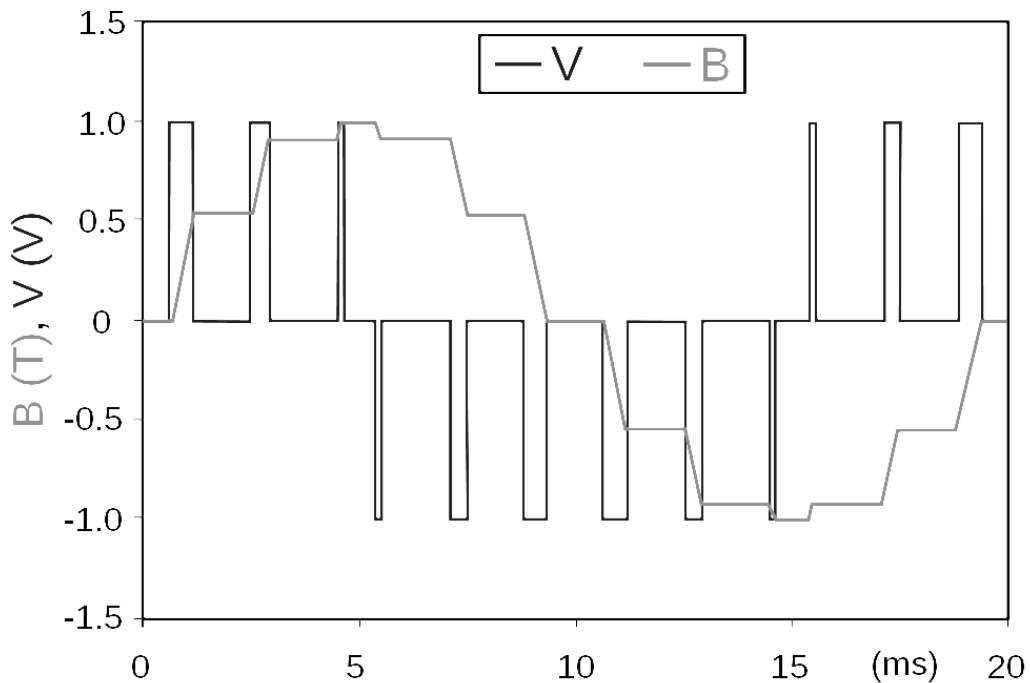
Välipiirin tehtävä on toimia vaihtosuuntaajan energiavarastona. Välipiirin komponenttien perusteella taajuusmuuttaja luokitellaan joko jännite- tai virtaohjatuksi. Yleisin toimintaperiaate on jänniteohjaus. Jännitevälipiiri koostuu kondensaattoripatterista ja induktanssista eli ns. kuristimesta. Yhdessä ne toimivat suodattimena mikä tasoittaa tasavirran.

Vaihtosuuntaaja muuttaa välipiirin tasasähkön kolmivaiheiseksi vaihtosähköksi halutulle taajuudelle. Vaihtosuuntaajissa kytkiminä käytetään nykyään yleensä IGBT-transistoreita (kuva 5).



Kuva 5. IGBT-transistorivaihtosuuntaaja. /12/

Pulssileveysmoduloinnilla (kuva 6) vaihtosuuntaaja muuttaa tasasähkön vaihtosähköksi. Vaihtosuuntaajan tekemä vaihtosähkö koostuu eripituisista tasasähköpulsseista. Kaikilla pulsseilla on kuitenkin sama amplitudi vaikka taajuusmuuttajasta moottorille syötetty jännite ja taajuus vaihtelevat. /10/,/11/



Kuva 6. Pulssileveysmodulaatio. /13/

Vaihtosuuntaajan ohjaamiseen käytetään nykyään kolmea eri menetelmää:

- Skalaarisäätö, joka on yksinkertaisin menetelmä. Moottorin nopeutta muutetaan säätämällä sille syötetty jännite ja taajuus. Menetelmä ei ota huomioon moottorin ominaisuuksia.
- Vektorisäätö, joka perustuu laskennalliseen moottorimalliin. Taajuusmuuttaja tarvitsee tiedon staattorin virrasta ja roottorin pyörimisnopeudesta. Vektorisäädöllä pystytään säätämään sekä moottorin nopeutta että vääntöä. /12/
- DTC (Direct Torque Control) jossa moottorin käämivuota ja momenttia säädetään. Menetelmä perustuu adaptiiviseen moottorimalliin joka verrataan moottorin virtaan ja jännitteeseen. Laskenta suoritetaan joka 25. millisekunti. /14/

3.2 Taajuusmuuttajan käyttö

Moottorin kierrosnopeudensäädön lisäksi taajuusmuuttajasta riippuen voidaan myös helposti vaihtaa moottorin kiertosuuntaa ja jarruttaa moottoria. Taajuusmuuttajalla moottori voidaan käynnistää pehmeästi, jolloin moottori ei rasitu yhtä paljon. Erilliselle pehmokäynnistimelle ei silloin ole tarvetta. Moottorin momenttia voidaan säätää eri kuormatilanteille sopivaksi muuttamalla moottorin momenttikäyrää. Kun taajuusmuuttaja tarkkailee moottorin momenttia, vahinkoja voidaan välttää esim. tilanteessa jossa moottori on jumittunut.

Taajuusmuuttajia valmistetaan moneen eri käyttöön, eri taajuusalueille ja tehoille. Käyttökohteesta riippuen niitä valmistetaan eri koteloinnilla, jäähdytystavoilla, asennustavoilla ja lisävarusteilla.

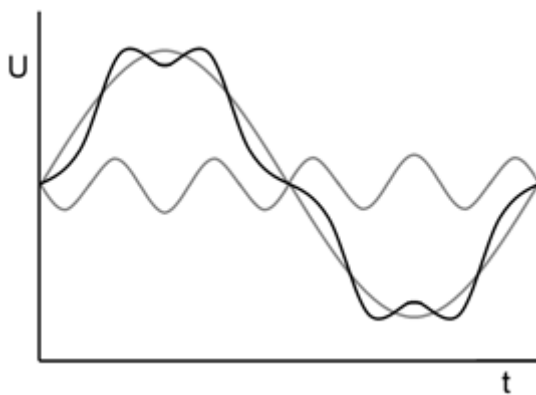
Teollisuuden kaappiasennettavia taajuusmuuttajia on mahdollista syöttää yhtenäisestä tasasähköväylästä, jolloin tasasuuntaajien määrä laskee. Moottorien mahdollinen jarrutusenergia syötetään silloin takaisin yhtenäiseen tasasähköväylään.

Teollisuuden taajuusmuuttajat ovat usein integroitu laitoksen automaatiojärjestelmään jonkun kenttäväylän kautta. /9/

4 YLIAALLOT

Yliaallot ovat perusaallon monikertoja. Jakeluverkon 50 Hz perusaallon ensimmäinen yliaalto on 100 Hz, toinen yliaalto 150 Hz jne. Kuva 7 kuvaa perusaallon ja yliaallon yhdessä muodostamaa summa-aaltoa. Yliaaltoja syntyy verkkoon kytketyistä epälineaarisista kuormista, eli kuormasta mikä ei ota verkosta sinimuotoista virtaa.

Virtayliaallot aiheuttavat epäsinimuotoisen jännitehäviön verkkoimpedanssin kanssa, jolloin muodostuu jänniteyliaaltoja. Niin sanotut ”jäykät” verkot pystyvät siirtämään enemmän virtayliaaltoja ilman korkeaa jännitesäröä. Verkon jäykkyys perustuu maksimikuormitusvirran suhteeseen oikosulkuvirtaan.



Kuva 7. Perusaallon ja yliaallon summa-aalto. /22/

Yliaallot jaetaan harmonisiin ja epäharmonisiin yliaaltoihin. Sähköverkon yliaallot ovat useimmiten harmonisia, eli perusaallon kokonaisia monikertoja.

Yliaaltojen suuruus ilmoitetaan tavallisesti prosentteina suhteessa perusaaltoon, jossa perusaalto on 100 %. Kun ilmoitetaan virran tai jännitteen yliaaltojen kokonaissärö, laskeaan särön THD (Total Harmonic Distortion) (kaava [1]). /8/,/15/

[1]

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}$$

I_1 = perustaajuden virta(RMS), 100% jos suhteellisia arvoja

n = yliaallon järjestysluku

I_n = yliaalto, n suuruus

4.1 Yliaaltolähteet

Tavallisimmat yliaaltolähteet ovat puolijohdetekniikalla toteutetut suuntaajat. Kotitaloksissa tavalliset yliaaltolähteet ovat elektroniikkalaitteet kuten tietokoneet, televisiot ja elektroniset valonsäätimet. Teollisuudessa yliaaltolähteitä ovat mm. valokaariuunit, taajuusmuuttajat ja loisteputkivalaisimet. Tässä työssä tarkastellaan vain taajuusmuuttajakuormia yliaaltolähteinä. Taajuusmuuttajat ovat teollisuudessa merkittäviä yliaaltolähteitä.

4.1.1 Suuntaajat

Sekä taajuusmuuttajan tasasuuntaaja että vaihtosuuntaaja tuottavat yliaalloja. Suuntaajan tuottamat yliaallot riippuvat pulssiluvusta. Teoriassa kolmivaiheinen 6-pulssinen tasasuuntaaja tuottaa parittomia virtayliaalloja jotka eivät ole jaollisia kolmella. Syntyvät yliaallot lasketaan kaavan [2] mukaan.

[2]

$$n = 6k \pm 1$$

n = yliaallon järjestysluku

$$k = 1, 2, 3 \dots$$

Tämän mukaan syntyvät yliaallot $n=5,7,11,13,17,19,23,25\dots$ mutta 12-pulssisella tasasuuntaajalla yliaallot $n=5,7,17,19$ jäävät pois. Se siis tuottaa paljon vähemmän pientaajuksisia yliaalloja. Yliaaltojen suuruudet ideaalitapauksessa ovat laskettavissa kaavan [3] mukaan. Ideaalitapauksessa syöttävä vaihtovirtaverkko on symmetrinen, sinimuotoinen ja sen impedanssi on nolla.

[3]

$$I_n = \frac{I_1}{n}$$

I_n = yliaalto, n suuruus

I_1 = perusaallon suuruus

n = yliaallon järjestysluku

Taajuusmuuttajan vaihtosuuntaaja aiheuttaa myös yliaaltosäröä. Vaihtosuuntaajan tuottama moottorille syötettävä kanttiaalto synnyttää korkeataajuisia yliaaltoja. Tässä työssä tarkastellaan vain taajuusmuuttajan verkon puoleiset yliaallot. Taajuusmuuttajan välipiirissä oleva suodatin vähentää vaihtosuuntaajan verkkoon päin aiheutetut yliaallot. /8/,/15/,/16/

4.2 Yliaaltojen summautuminen

Jos verkossa on useampia yliaaltolähteitä, eri lähteiden yliaallot summautuvat. Yliaaltojen summautumista on kuitenkin vaikea arvioida koska ne eivät tavallisesti summaudu aritmeettisesti vaan geometrisesti, eli summa on jokaisen yliaaltotaajuuden geometrinen summa. Tämä johtuu siitä että eri yliaaltolähteiden yliaalloilla on eri vaihekulmat ja amplitudit. Tietyissä vaihekulmissa yliaallot kumoavat toisensa. /17/

4.3 Yliaaltojen vaikutus

Yliaallot kasvattavat häviöitä sähköjohtimissa, mikä johtaa ylimääräiseen lämpenemiseen. Tämä johtuu siitä että virranahauma ja pyörrevirrat ovat taajuusriippuvaisia. Lisälämpenemistä esiintyy mm. kaapeleissa, muuntajissa, moottoreissa, keloissa ja kondensaattoreissa. Näissä verkkokomponenteissa sähkön yliaaltokomponentit pitää ottaa huomioon mitoituksessa, jotta vältetään ylikuumentumisesta. Mitä korkeampi taajuus ja amplitudi yliaaltokomponentilla on, sitä suurempi vaikutus sillä on lämpöhäviöihin.

Jos verkossa esiintyy yliaaltokomponentteja jotka ovat jaollisia kolmella, nämä virrat kulkevat nollajohtimessa, mikä saattaa johtaa nollajohtimen ylikuormittumiseen. Nollajohtimessa virtaavien kolmansienylyliaaltojen vaikutuksesta jännitteen nollapiste voi muuttua, mikä aiheuttaa häiriöitä esim. ohjaus- ja mittauslaitteissa. Näissä laitteissa sekä viestiliikenteessä häiriöitä saattaa myös ilmetä johtojen välisen indusoinnin tuloksena. Korkeataajuinen virta ja jännite indusoituvat helpommin.

Resonanssiipiirejä voi syntyä yliaaltojen vaikutuksesta. Jos verkossa on kompensointikondensaattoriparistoja, resonansseja syntyy muuntajan impedanssin ja kondensaattorin välille. Resonanssiipiirit voivat suurentaa yliaaltoja moninkertaisiksi. /17/

5 MUUNTAJA TAAJUUSMUUTTAJAKUORMALLA

Yliaallot vaikuttavat monella tavalla sähköverkkoon ja sen eri komponentteihin. Tässä työssä keskitytään kuitenkin vain yliaaltojen vaikutuksiin muuntajiin.

Sähköverkon yliaallot lisäävät lämpöhäviöitä johtimissa, minkä syystä muuntaja lämpiää enemmän yliaaltopitoisessa verkossa. Jotta muuntajan lämpötila pysyisi suositusten rajoissa, on muuntajan kuormitusrajaa laskettava. Korkeammat lämpötilat johtavat muuntajan eliniän lyhenemiseen.

Muuntajan tyhjäkäyntihäviöt perustuvat hystereesi- ja pyörrevirtahäviöihin. Nämä ovat taajuusriippuvaisia ja häviöt nousevat jänniteyliaaltojen vaikutuksesta. Nämä häviöt ovat kuitenkin suhteellisen pienet, eikä niitä tarvitse ottaa huomioon muuntajan mitoituksessa taajuusmuuttajakuorman suhteen. /4/

Taajuusriippuvaisia ilmiöitä, jotka vaikuttavat muuntajan kuormitushäviöihin, ovat virranahdo ja pyörrevirrat. Muuntajan käämien pyörrevirtahäviöt ovat suhteessa kuormitusvirran neliöön ja taajuuden neliöön. Häviöt muuntajan muissa osissa kuten rautasydämessä ja virtakiskoissa ovat myös suhteessa kuormitusvirtaan. Näissä osissa taajuuden eksponentti on kuitenkin 0,8 tai vähemmän./18/ Käämien resistanssi suurenee taajuuden myötä virranahdon seurauksena. Kuormitushäviöihin vaikuttavat virtayliaallot. Taajuusmuuttajakäytössä virtayliaaltojen tuomat häviöt ovat niin merkittävät että muuntajan kuormitettavuus yleensä laskee merkittävästi. /19/

5.1 Muuntajan kytkennän vaikutus yliaaltoihin

Tähtikytketyissä muuntajissa joissa nollapiste on otettu käyttöön ja maadoitus tai nollajohdin on kytketty siihen, vaiheiden kolmas yliaaltovirta kulkee nolla- tai maadoitusjohdissa jos on kytketty kuormia jotka tuottavat kolmansia yliaaltoja. Kolmansissa yliaalloissa ei ole vaihekulmaeroja eivätkä ne sen takia nollaudu. Dyn-kytketyissä muuntajassa toisiopuolen mahdolliset nollajohdinten yliaaltovirrat heijastuvat ensiöpuolen kolmiokytkettyihin vaihekkäämiin. Toisiopuolen kolmioon kytketyissä käämissä syntyy kiertävä kolmas yliaaltovirta.

Kolmioon kytketyllä tertiäärikäämityksellä voidaan vähentää kolmansia yliaaltoja vaihejännitteistä. Jos jakelumuuntajista puolet on kytketty tähteen ja puolet kolmioon, eri kytkentäryhmien muuntajien välinen vaihesiirto on 30 astetta, jolloin 5. ja 7. yliaalto kumoutuu. /18/,/15/

5.2 Verkon yliaaltojen määrittäminen

Jotta muuntajan kuormitettavuutta voisi arvioida, pitää olla tietämys tai arvio verkon yliaaltokomponenttien taajuuksista ja amplitudeista. Yliaaltosärön arvioiminen voi olla vaikeaa koska niiden geometristä summautumista on hankala laskea. Verkon resistiiviset kuormat vaimentavat yliaaltoja. Vaimennusta voi kuitenkin olla myös hankala arvioida ja verkon kaikista komponenteista ei aina ole tarkkaa tietoa. Laskemalla verkolle eri yllähteiden kokonaisvaikutusta saadaan usein vain varovainen olettaus yliaaltokomponenteista. Verkon yliaaltokomponentteja analysoidaan usein tietokonesimuloinnilla. Simuloinnin tuloksen tarkkuus riippuu siitä miten hyvin verkon kaikkien komponenttien ominaisuudet ja taajuusriippuvuudet on kuvattu. Tekemällä verkon yliaaltomittaukset saadaan parhaimmat arviot yliaaltokomponenteista. Mittauksien tekeminen on suositeltavaa jos se on mahdollista. Kun uusia asennuksia suunnitellaan, yliaaltojen vaikutukset on arvioitava tietokonesimuloinnilla. Uudelle laitteistolle tehdään tarkistusmittaukset kun asennukset on tehty.

5.2.1 Yliaaltojen arvioiminen

IEEE-järjestö on julkaissut käytännön prosessin jonka avulla voidaan arvioida, onko tarkemmille yliaaltotutkimuksille tarvetta oppaassa ”Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems”. Käytäntö perustuu IEEE 519–1992 Harmonic Limits-standardiin.

Teollisuuslaitoksille joissa yleensä on paljon epälineaarista kuormaa ja kompensointikondensaattoreita, suositellaan oppaassa aina tarkempaa tutkimusta mittauksien ja simuloinnin muodossa. Tämä johtuu siitä että monien eri yliaaltolähteiden, eri kuormien ja muuntajien vaikutusta yliaaltojen vaimennukseen ja toistensa kumoamiseen on hyvin vaikea arvioida. Vain suuntaa-antavia arvioita voidaan laskea kuormatietojen ja laittei-

den yliaaltopäästöoletusten perusteella kaavan [4] mukaan. Verkon oikosulkusuhdetta/jäykkyyttä tarkastamalla voidaan arvioida verkon virtayliaaltosietoa vertailemalla taulukon 1 arvoja. Arvot ovat suosituksia. /20/

[4]

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} * 100\%$$

I_h = yliaaltokomponentin suuruus (I_{RMS})

h = yliaallon järjestysluku

I_L = maksimi kuormitusvirta (I_{RMS})

Taulukko 1. IEEE laatimat virtasärörajat.

IEEE Table 10.3 Current Distortion Limits for General Distribution Systems (120 V through 69 kV)

Maximum Harmonic Current Distortion in % of I_L Individual Harmonic Order (Odd Harmonics) ^[1,2]						
I_{SC}/I_L	<11	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h$	TDD
<20 ^[3]	4.0	2.0	1.5	.6	.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

[1] Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

[2] Current distortions that result in a DC offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

[3] All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{SC}/I_L , where I_{SC} = maximum short circuit current at PCC and I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

5.2.2 Simulointi DriveSize-ohjelmalla

Drive Size on ABB:n ilmainen ohjelma moottorin taajuusmuuttajan ja muuntajan valitsemiseen. Ohjelma laskee ja ilmoittaa esim. optimaalisen taajuusmuuttajan annettujen moottoritietojen perusteella. Tiedot ABB:n vakiomoottoreista ja taajuusmuuttajista löytyvät valmiiksi.

Ohjelmalla voidaan laskea järjestelmän yliaaltokomponentit sekä erilaisia häviöitä ja kuormia. Yliaaltolaskennassa ohjelma ottaa huomioon eri yliaaltolähteiden geometristä summautumista. Tulokset saadaan sekä IEC- että IEEE-standardin mukaan laskettuna. IEEE-standardin mukaisille tuloksille saadaan järjestelmän lasketulle oikosulkusuhteelle annetut standardin yliaaltorajat. Yliaaltokomponentit saadaan sekä jakelumuuntajan ensiö- että toisiopuolelta. Ohjelmasta saadaan tulostettua raportti kuvaaman verkon yliaaltosisältöä. Jotta simuloinnista saadaan hyvät tulokset, on moottoreista, johtopituuksista sekä kuormien ajallisesta vaihtelusta oltava tiedot. Liitteessä 1 on DriveSizen päänäkyvä ja liitteessä 2 esimerkkinä yliaaltoraportti. /21/

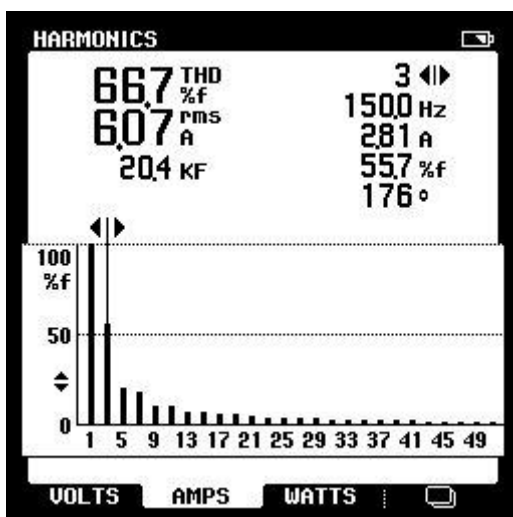
5.2.3 Yliaaltomittaus

Yliaaltomittauksia suoritettaessa on muutamia näkökohtia mitkä pitää ottaa huomioon. Yksi harkinnan aihe on se missä verkon pisteessä mittaukset suoritetaan. Mittauspiste riippuu siitä mitä mittauksilla halutaan selvittää. IEEE-519 standardissa suositellaan että mittaukset suoritetaan ns. PCC-pisteessä. PCC:llä tarkoitetaan yleensä pistettä josta muille sähköverkon asiakkaille voidaan syöttää sähkö. IEEE:n kuvaus 519 standardissa on herättänyt jonkun verran mielipiteitä kuvauksen tulkinnanvaraisuudesta. Mittauksella PCC-pisteessä saadaan tietää yliaaltotasot jotka laitos syöttää yleiseen sähkönjakeluverkkoon. Laitoksen tarkempaa yliaaltokartoitusta varten neuvotaan standardissa kuitenkin tekemään mittauksia myös laitoksen sisäisen verkon eri pisteissä.

Mittauspisteiden harkinnassa kannattaa myös ottaa huomioon eri kuormitustilanteet ja miten ne vaikuttavat yliaaltotasoihin. Mittauspisteellä lähellä epälineaarista kuormaa voidaan selvittää kuorman yliaaltopäästöjen ajallista vaihtelua. Mittaamalla kokonaista verkonhaaraa saadaan selville miten eri yliaaltolähteiden yliaallot kumoavat toisensa ja miten lineaariset kuormat vaimentavat yliaaltoja. Korkeajännitemuuntajan toisiopuolelta mittaamalla voidaan selvittää miten jakelumuuntajien mahdollinen vaihe-ero kumoo yliaaltoja. Jotta eri kuormatilanteet saadaan kartoitettua, kannattaa suorittaa useampia mittauksia samassa pisteessä. Jos on paljon yksivaiheista kuormaa, on myös nollajohtimen mittausta harkittava.

Kun mittauksilla halutaan selvittää yliaaltojen vaikutusta muuntajaan, on mittaukset suoritettava muuntajan toisiopuolella mahdollisimman lähellä muuntajaa yhteiskykensä tapisteessa jotta saadaan selville kaikkien muuntajantakaisten kuormien yhteisvaikutus. Sopiva mittauspiste voisi olla muuntajan syöttämä keskus. Keskuksessa virtayliaallot tulisi mitata keskuksen syötöstä jokaisesta vaiheesta ja jänniteylyiaallot kiskostosta. Virtayliaaltokomponentit tulisi mitata absoluuttiarvoina 50. yliaaltoon ja jänniteylyiaallot kokonaissärönä % THD_U. Mittaukset on suoritettava mittamuuntajilla korkeimmilla jännitetasoilla. /17/,/20/

Kuvassa 8 on näkymä sähkönlaadun analysaattorin yliaaltoanalyysitulasta. Näkymä on Fluken laitteesta 43B. Yliaaltoanalyysistä käy mm. ilmi erillisen yliaaltokomponentin taajuus, amplitudi ja vaihekulma sekä kokonaissärö. Laite mittaa jännitteen, virran ja tehon yliaallot.



Kuva 8. Fluke 43B yliaaltoanalyysinäkymä. /24/

6 MUUNTAJAN KUORMITETTAVUUS YLIAALTOPITOISESSA VERKOSSA

Kun verkon yliaaltosisällöstä löytyy tietoa tai varteenotettavaa arviota, voidaan muuntajan kuormitettavuutta päätellä. Epälineaarisilla kuormilla kuormitetun muuntajan kuormitettavuuslaskelmiin löytyy erilaisia kaavoja eri standardien mukaan. Jotkut kaavat tarvitsevat tarkkoja tietoja ja arvoja käämistä, ja ovat sen takia periaatteessa vain muuntajasuunnittelijoiden käytettävissä. Uuden muuntajan hankinnassa yliaaltosimuloinnilla saadut tulokset edesauttavat, kun muuntajatoimittaja saa tiedon siitä minkälaisille yliaaltotasoille muuntaja tulee altistumaan. Tarkkoja laskelmia yliaaltojen aiheuttamista lisähäviöistä on vaikea tehdä. Tähän liittyy mm. se että pyörrevirtahäviöt eivät ole yhtä suuret koko käämissä eivätkä käämien kesken, vaan häviöt ovat suuremmat lähempänä rautasydäntä.

6.1 CENELEC standardin mukaan laskeminen

Laskemalla muuntajan kuormitettavuutta yksinkertaistetun kaavan [5] mukaan joka noudattaa CENELEC standardi HD 538.3 S1:1997, muuntajasta ei tarvita tarkkoja tietoja. Kaavassa q arvo riippuu muuntajan käämien rakenteesta. Muuntajissa missä on lankakäämitykset käytetään arvoa 1,7 ja foliokäämisissä muuntajissa arvoa 1,5.

[5]

$$K = \left[1 + \frac{e}{1+e} \left(\frac{I_1}{I} \right)^2 \sum_{n=2}^{n=N} \left(n^q \left(\frac{I_n}{I} \right)^2 \right) \right]^{0,5}$$

K = muuntajan kuormitus arvo, $\frac{1}{K} * 100$ = muuntajan kuormitettavuus (%)

e = virranahtauman aiheuttamat häviöt perusaallolla

I = perusaallon ja kaikkien yliaaltojen yhteen laskettu RMS arvo

$$I = \left(\sum_{n=1}^{n=N} (I_n)^2 \right)^{0,5}$$

I_1 = virran perusaalto

I_n = yliaaltokomponentin n suuruus

n = yliaallon järjestysluku

q = virranahauman aiheuttama käämiresistanssin

lisäyksen taajuusriippuvuus

Virranahauman aiheuttamia häviöitä perusaallolla kuvaava e arvo voidaan arvioida muuntajan nimellistehon ja toisiojännitteen perusteella kaavan [6] mukaan.

[6]

$$e = 0,04 \frac{S_N}{U_2}$$

S_N = muuntajan nimellisteho, ≤ 4 MVA

U_2 = muuntajan toisiojännite, $\leq 1,1$ kV

CENELEC-standardin tapaa arvioida muuntajan kuormitettavuutta käytetään yleisesti Euroopassa. K-arvojen laskemisen helpottamiseksi CDA (Copper Development Association) on tuottanut helppokäyttöisen ilmaisen K-Factor Calculator-nimisen PC-ohjelmiston. Yliaaltokomponentit voidaan syöttää ohjelmistoon joko absoluutti- tai suhteellisarvoina. /19/,/23/

6.2 IEEE standardin mukaan laskeminen

IEEE-standardin kaava muuntajan kuormitettavuuslaskelmiin yliaaltopitoisessa verkossa kutsutaan ”Harmonic Loss Factor” (F_{HL}) -kaavaksi, kaava [7]. Kaava laskee suhteen pyörrevirtahäviöistä tietyllä yliaaltotasolla ja pyörrevirtahäviöistä ilman yliaaltoja. Kaava huomioi sellaisenaan vain käämien häviöt. Häviöt muuntajan muissa rakenteissa on laskettavissa käyttämällä samaa kaavaa, mutta käyttämällä h muuttujalle eksponenttia 0,8. Etenkin öljytätetyissä muuntajissa näillä häviöillä on merkitystä, koska nekin aiheuttavat öljyn lisälämpenemistä.

Koska kaava perustuu häviöiden suhteeseen, on mahdollista laskea yliaaltojen aiheuttamien lisähäviöiden tuoma lämpötilanousu. Lämpötilalaskelmat edellyttävät että saata-
vissa on muuntajan mittausraportti josta häviöt on laskettavissa tehoina. Laskelmat on
kuitenkin standardissa suositeltu käytettäväksi siinä tilanteessa että vain osa muuntajan
kuormasta on epälineaarista. Mittalaitteistosta riippuen sulun $[I_h/I_1]$ arvo voidaan lukea
suoraan mittarista.

[7]

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-O}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2}$$

P_{EC} = pyörrevirtahäviöt epäsinimuotoisella virralla (W)

P_{EC-O} = pyörrevirtahäviöt sinimuotoisella virralla (W)

h = yliaallon järjestysluku

I_h = yliaaltokomponentin h suuruus

I_1 = perusaallon virta

7 TAAJUUSMUUTTAJAKUORMAN LISÄÄMINEN

Tutkinnan kohteena tässä työssä on myös taajuusmuuttajakuorman vähittäinen lisääntyminen tuotantolaitoksien huolto- ja lisärakennustöiden yhteydessä. Taajuusmuuttajakuormia lisätessä laitoksen yliaallotkin suurenevat. Uuden asennuksen vaikutusta yliaaltotasoihin voi ennustaa tietokonesimuloinnilla. Siinä tapauksessa että simulointi osoittaisi että uusi asennus korottaisi yliaaltotasoa yli suositusten, on yliaalloille tai niiden vaikutuksille tehtävä toimenpiteitä.

Yliaaltojen vaikutuksesta muuntajan kuormitettavuus laskee ja jos verkossa on merkittävät yliaaltotasot on muuntaja vaihdettava. Muuntaja voidaan vaihtaa isompaan, jossa teho riittäisi vastaamaan yliaaltojen aiheuttamia häviöitä. On kuitenkin suositeltavaa vaihtaa erikoismuuntajaan joka on tarkoitettu korkeille yliaaltotasaille.

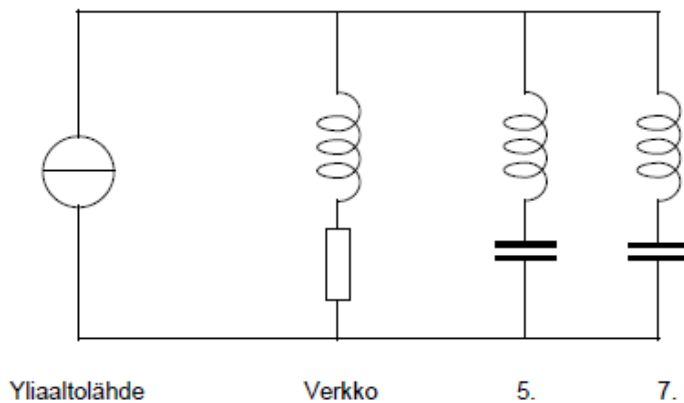
Yliaaltojen syntymistä voi vähentää käyttämällä 12- tai useampipulssisia taajuusmuuttajia. Nämä kuitenkin tarvitsevat erikoismuuntajia. 12-pulssisen taajuusmuuttajan tasasuuntaaja syötetään joko kahdella muuntajalla tai yhdellä kolmikäämisellä muuntajalla, jotta toisioiden välinen vaihe-ero on 30 astetta. 24-pulssinen tasasuuntaaja syötetään kahdella kolmikäämisellä muuntajalla. Tavallisten 6-pulssisten taajuusmuuttajien yliaaltopäästöt voidaan pienentää käyttämällä isompaa kuristinta.

IGBT-tasauuntajasillalla varustetut taajuusmuuttajat aiheuttavat vain pieniä määriä yliaaltoja. Niillä on myös mahdollista kompensoida muiden rinnakkaisten kuormien tuottamat yliaaltovirrat sekä tuottaa loistehoa. IGBT-transistorin korkean kytkentätaajuuden takia nämä taajuusmuuttajat on varustettava syöttöpuolen LCL-suodattimella suodattamaan korkeataajuiset häiriöt pois. Verrattuna tavalliseen 6-pulssiseen taajuusmuuttajaan IGBT-sillalla varustetuilla taajuusmuuttajilla hankintahinta on melko korkea.

7.1 Yliaaltosuodatus

Yliaaltosuodatuksella verkon yliaaltoja voidaan vähentää. Yliaaltosuodatin toimii yliaaltojen imupiirinä. Suodatusta käytetään yleisesti kun epälineaarista kuormaa on lisätty vähitellen ja yliaaltosärö kasvanut sen mukaan. Suodatus käy myös yliaalto-ongelman kokonaisratkaisuksi uusissa laitoksissa.

Yliaaltosuodattimet voivat olla aktiivisia tai passiivisia suodattimia. Passiiviset suodattimet voivat olla joko yhdelle tai useammalle taajuudelle viritettyjä. Yhdelle taajuudelle viritetyt imupiirit ovat sarjaresonansseja jotka ovat viritetty tietyn yliaallon taajuudelle. Yliaallot vaimentuvat viritetyn taajuuden yläpuolella mutta vahvistuvat sen alapuolella. Passiiviset suodattimet viritetty monelle taajuudelle sisältävät useampia haaroja jotka on viritetty tietyille yliaalloille. Kuva 9 kuvastaa 5. ja 7. yliaallon imupiirejä. Perusverkon rinnalle kytketyt imupiirit poistavat siis ne yliaallot joita varten ne on mitoitettu.



Kuva 9. Sijaiskytkentä suodatetusta verkosta. /17/

Aktiiviset suodattimet tuottavat tehoelektronikalla samat yliaaltokomponentit mitkä virtaavat verkossa, mutta vastakkaisessa vaiheessa. Näin yliaallot kompensoituvat. Aktiiviset suodattimet pystyvät myös kompensoimaan loistehoa sekä tasaamaan kuormia. /8/,/17/

8 YHTEENVETO

Työssä tutkittiin teoriaa joka on taustana tuotantolaitoksissa paljon käytössä olevien taajuusmuuttajien vaikutuksille jakelumuuttajien kuormitettavuuteen.

Taajuusmuuttajien tuomien hyötyjen ja säästöjen vuoksi taajuusmuuttajakäytöt lisääntyvät tuotantolaitoksissa. Lisääntynyt taajuusmuuttajien käyttö kuitenkin aiheuttaa ongelmia yliaaltojen muodossa. Yliaaltojen aiheuttamat lisähäviöt aiheuttavat lisälämpenemistä muuntajissa. Yliaaltojen geometrisen summautumisen ja vaimennusefektien takia on vaikea arvioida tarkkaan miten yliaaltotasot muuttuvat lisääntyneiden taajuusmuuttajakäyttöjen vuoksi. Suunnitteluvaiheessa on käytettävä tietokonemallinnusta jotta saadaan arvio tulevista yliaaltotasosta. Mallinnuksesta saatujen tuloksien luotettavuus riippuu siitä miten tarkasti verkon komponentit on mallinnettu.

Yliaaltojen aiheuttama lisälämpeneminen muuntajissa liittyy pyörrevirtojen taajuusriippuvuuteen. Koska yliaallot ovat perusaallon monikertoja, muuntajan käämit, rautasydän ja muut rakenteet altistuvat suunniteltua korkeammille taajuuksille, mikä taas aiheuttaa lisälämpenemistä joka lyhentää muuntajan elinikää.

Tehdessä tarkkoja laskelmia yliaaltojen vaikutuksesta muuntajien kuormitettavuuteen tarvitaan riittävän tarkkoja tietoja muuntajan rakenteesta sekä teoreettisia arvoja. Nämä laskelmat ovat sen takia periaatteessa vain muuntajavalmistajien tehtävissä. Käyttäjille suunnatut laskukaavat ovat yksinkertaistettuja ja sisältävät joskus karkeitakin oletuksia. Jos uutta muuntajaa tilatessa on tiedossa että muuntaja tulee altistumaan korkeille yliaaltotasolle, on suositeltavaa että muuntajatoimittajalle tiedotetaan millaiselle verkonspektrille muuntaja on tarkoitettu. Olemassa olevien asennusten yliaaltotasot saadaan tietää tekemällä yliaaltomittauksia. Virtayliaalloista ei riitä tieto kokonaissäröistä, vaan jokaisesta virtayliaallosta tulee mitata taajuus ja amplitudi.

Kun verkkoon lisätään merkittäviä epälineaarisia kuormia, on aina syytä tutkia mitä seurauksia sillä on. Työssä on esitetty yliaaltomittauksia koskevia harkinnanaiheita sekä muuntajakäyttäjille suunnattuja laskukaavoja joilla voidaan määrittää muuntajan kuormitettavuutta yliaaltopitoisessa verkossa.

Työssä tarkasteltiin myös tulevaisuuden kannalta huomionaiheita taajuusmuuttajakuorman vähittäisestä lisääntymisestä. Yliaaltojen tai yliaaltoihin liittyvien ei-toivottujen ilmiöiden vähentämiseen on monta eri ratkaisua. Eri ratkaisujen kustannustehokkuus ja hyöty riippuu laitoksen asennuksista ja käyttökohteesta. Laitoksissa jossa taajuusmuuttajakuorma on lisääntynyt vähitellen, yliaaltosuodatus on usein järkevä ratkaisu. Uusille asennuksille jotka lisäävät epälineaarista kuormaa, kannattaa aina suorittaa yliaaltojen tarkistusmittausta jotta varmistutaan siitä että uudet asennukset eivät aiheuta muuntajien ylikuormitusta tai muita komplikaatioita.

Koska mittalaitteistoa, mikä olisi sopeutunut yliaaltomittauksiin jakelumuuntajan kuormasta Neste Oilin Porvoon jalostamolla, ei ollut käytettävissä, tämä työ ei sisällä mittauksia. Laskelma muuntajan kuormitettavuudesta olisi voita suorittaa mahdollisilla mitaustuloksilla. Opinnäytetyötä voisi vielä kehittää vertailemalla erilaisia yliaaltojensimulointiin pystyviä tietokoneohjelmistoja sekä käytön että tulosten kannalta. Eri standardiliittojen ohjeistukset ja laskentakaavat voisi myös vertailla enemmän käytännön näkökulmasta.

LÄHTEET

- /1/ Neste Oil, *Yritysinfo*, julkaistu 3.12.2010 Saatavissa:
<http://www.nesteoil.fi/default.asp?path=35,52,62> Viitattu: 8.4.2012
- /2/ Kilpilahti.fi, julkaistu 2.4.2012 Saatavissa: <http://www.kilpilahti.fi/kilpilahti/> Viitattu: 8.4.2012
- /3/ Mogensen, Hans. 1989 *Elmaskiner*, 2 painos, Arlöv: Almqvist & Wiksell Förlag AB s. 61–76
- /4/ Korpinen Leena. julkaistu: 14.10.1998 *Sähkövoimatekniikkaopus, Muuntajat ja sähkölaitteet* Saatavissa:
http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/9muuntajat_ja_sahkolaitteet.pdf Viitattu: 9.4.2012
- /5/ Wikimedia Commons, *Hysteresiskurve*, julkaistu: 16.7.2010 Saatavissa:
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hysteresiskurve.svg?uselang=fi> Viitattu: 24.4.2012
- /6/ Alfredsson, Alf. 1994 *Elkraft*, 1 painos, Fallköping: Liber Utbildning AB s. 41–43
- /7/ Mogensen, Hans. 1989 *Elmaskiner*, 2 painos, Arlöv: Almqvist & Wiksell Förlag AB s. 77–79
- /8/ ABB Tekninen opas nro 6, *Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas*
- /9/ ABB Tekninen opas nro 4, *Nopussäädettyjen käyttöjen opas*
- /10/ Mogensen, Hans. 1989 *Elmaskiner*, 2 painos, Arlöv: Almqvist & Wiksell Förlag AB s. 161–197
- /11/ Alfredsson, Alf. 1994 *Elkraft*, 1 painos, Fallköping: Liber Utbildning AB s. 73–115
- /12/ ABB esitelmä, Antti Hedman, *Taajusmuuttajat*, julkaistu: 9.11.2009 Saatavissa:
<http://www.pkky.fi/Resource.phx/pkky/projektit/taitaja-osaaminen/sahko.htx.i2025.pdf>
Viitattu: 3.5.2012

- /13/ Wikimedia Commons, *PWM 3-level*, julkaistu: 24.3.2007 Saatavissa:
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PWM,_3-level.svg Viitattu: 9.5.2012
- /14/ ABB Product Guide, *Direct torque control*, julkaistu: 29.12.2003 Saatavissa:
<http://www.abb.com/product/ap/seitp322/c1256c84007b2e7ec12569000036ed05.aspx>
Viitattu: 8.5.2012
- /15/ Korpinen Leena. julkaistu: 4.7.2008 *Yliaalto-opus* Saatavissa:
<http://leenakorpinen.fi/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf> Viitattu: 9.4.2012
- /16/ Alfredsson, Alf. 1994 *Elkraft*, 1 painos, Fallköping: Liber Utbildning AB s.116–117
- /17/ ABB Teknisiä tietoja ja taulukoita–käsikirja 2000–07 luku 9.4
- /18/ IEEE Std C57.110-1998, *Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents*
- /19/ ABB Teknisiä tietoja ja taulukoita–käsikirja 2000–07 luku 11
- /20/ IEEE-P519A/D5 Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems
- /21/ ABB esitys, *DriveSize* julkaistu 16.3.2010 Saatavissa:
[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/7b2093820571ca96c12576e80032bc52/\\$file/DriveSize.ppt](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/7b2093820571ca96c12576e80032bc52/$file/DriveSize.ppt) Viitattu: 21.5.2012
- /22/ Sähköala uutisarkisto, Puhtaampaa sähköä sarja-aktiivisuotmine avulla, *Yliaalto* julkaistu: 20.5.2009 Saatavissa: http://www.sahkoala.fi/ajankohtaista/uutisarkisto/2009/5-2009/fi_FI/200509_puhtaampaa_sahkoa/ Viitattu: 9.5.2012
- /23/ Copper Development Association publication 144, *Harmonics, Transformers and K-Factors* julkaistu: 9/2000 Saatavissa: <http://www.copperinfo.co.uk/power-quality/downloads/pub-144-harmonics-transformers-k-factors.pdf> Viitattu: 1.6.2012
- /24/ Fluke tuotteet, *43B Power Quality Analyzer* julkaistu: 3.6.2012 Saatavissa:
<http://www.fluke.com/Fluke/fifi/Testerit/Power-Meters/Fluke-43B-Series.htm?PID=56081> Viitattu:3.6.2012

/25/ Wikimedia Commons, *Transformer equivalent circuit* julkaistu 11.5.2007 Saatavis-
sa:

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d1/Transformer_equivalent_circuit.s
vg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d1/Transformer_equivalent_circuit.svg) Viitattu: 28.5.2012

Liite 1.

The screenshot shows a software interface for configuring a transformer. The interface is divided into several sections:

- System configuration:** A tree view showing the configuration hierarchy. The selected item is **CTMP 12 H_ 500-500**. Below it are several ACS800-01-xxxx-3 units, each with associated M2QA or M3BP components.
- Network data:** Frequency [Hz] is set to 50. Short-circuit power [MVA] is set to 200.
- Transformer load:** Primary voltage [V] is 10000. Secondary voltage [V] is 400.
- Fundamental power [kVA]:** Calculated. DSU load is 310, resulting in a calculated value of 310.
- Specifications:** A table with the following data:

Name	[undefined]
Type	Oil
No of windings	2
IP class	IP00 with bushings
- Selected transformer data:** Selection: DriveSize. Type code: CTMP 12 H_ 500-500. A table with the following data:

Vector group	Dyn11
Frequency	50
Winding No	2
Rated power [kVA]	500
Prim volt class [V]	12000
No load losses [kW]	0.8
Zk	4.4
Zkst	0

DriveSize päänäkymä



Network check		CTMP 12 H_ 500-500					
Secondary side							
Network and Transformer data		Supply unit data		DC /			
Primary voltage [V]	10000	Cable length [m]	60				
Secondary voltage [V]	400	Ldc [uH]	999.9999				
Frequency [Hz]	50	Cdc [mF]	18.17				
Network Sk [MVA]	200	Udc [V]	524.7				
Transformer Sn [kVA]	500	Pdc [kW]	289.3				
Transformer Pk kW	7						
Transformer Zk [%]	4.4						
Supply cable type	Cable						
Cable quantity	7						
Cable impedance [uOhm/m]	70						
DSU Load [kVA]	310						
ISU Load [kVA]	0						
Result		calc/limit					
Cos ø1	0.986	THDCurrent	26.1 %	TDD Current	0 %/0%		
Tot. power factor	0.954	THDVoltage	5.5 %	THD Voltage	0 %/0%		
n	f [Hz]	Current [A]	In/I1	Voltage[V]	Un/U1	IEEE Currents	IEEE Voltage
1	50	432.9	100.0 %	396.7	100.0 %	0.0 %/0.0 %	0.0 %/0.0 %
5	250	88.4	20.4 %	10.9	2.7 %	0 %/0 %	0 %/0 %
7	350	52.3	12.1 %	9.0	2.3 %	0 %/0 %	0 %/0 %
11	550	32.4	7.5 %	8.7	2.2 %	0 %/0 %	0 %/0 %
13	650	24.1	5.6 %	7.7	1.9 %	0 %/0 %	0 %/0 %
17	850	15.8	3.6 %	6.6	1.7 %	0 %/0 %	0 %/0 %
19	950	12.3	2.9 %	5.7	1.5 %	0 %/0 %	0 %/0 %
23	1150	7.9	1.8 %	4.4	1.1 %	0 %/0 %	0 %/0 %
25	1250	6.2	1.4 %	3.8	1.0 %	0 %/0 %	0 %/0 %
29	1450	4.1	0.9 %	2.9	0.7 %	0 %/0 %	0 %/0 %
31	1550	3.3	0.8 %	2.5	0.6 %	0 %/0 %	0 %/0 %
35	1750	2.7	0.6 %	2.3	0.6 %	0 %/0 %	0 %/0 %
37	1850	2.4	0.6 %	2.2	0.6 %	0 %/0 %	0 %/0 %
41	2050	2.3	0.5 %	2.3	0.6 %	0 %/0 %	0 %/0 %
43	2150	2.0	0.5 %	2.1	0.5 %	0 %/0 %	0 %/0 %
47	2350	1.8	0.4 %	2.1	0.5 %	0 %/0 %	0 %/0 %

