

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Sähkövoimatekniikka

Tutkintotyö

Tuomas Virtanen

JÄNNITTEENNOSTOMUUNTAJAN MITOITUS SÄHKÖKONEKORJAAMON  
KOEKENTÄLLE

Työn ohjaaja  
Työn teettäjä

Tampere 2005

DI Lauri Hietalahti  
ABB Oy, Service Nokian huoltokeskus,  
valvojina DI Jarkko Iisakkala ja tekn. Veikko Kivelä

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Sähkövoimatekniikka

Virtanen, Tuomas

Tutkintotyö

Työn ohjaaja

Työn teettäjä

Jännitteennostomuuntajan mitoitus sähkökonekorjaamon koekentälle

48 sivua + 7 liitesivua

DI Lauri Hietalahti

ABB Oy, Service Nokian huoltokeskus,  
valvojina DI Jarkko Iisakkala ja tekn. Veikko Kivelä

Toukokuu 2005

Hakusanat

taajuusmuuttaja, tehomuuntaja, yliaallot

## TIIVISTELMÄ

Tämän tutkintotyön tarkoituksena on selvittää taajuusmuuttajan ja tehomuuntajan perusteoria ja käsitellä niitä asioita, joita pitää huomioida rakennettaessa tehomuuntaja taajuusmuuttajakäyttöön ja esitellä lisäksi taajuusmuuttajan aiheuttamia häiriöitä sekä moottorille että verkolle. Teorian pohjalta suunnitellaan ja mitoitetaan teknisesti ja taloudellisesti järkevin ratkaisu, jolla saadaan koestettua suurjännitemoottoreita, kun tarjolla on vain 400 voltin jännite ja siinä rajallisesti kuormitusvaraa.

Muuntajia mitoitettaessa selvitetään kokonaiskuormitusvirta, joka tulee kuormittamaan muuntajia. Muilta osin muuntajien valmistaja suunnittelee muuntajat omille valmistusmenetelmillensä sopiviksi. Muuntajien mitoitukseen tarvittavat kuormitusvirrat on ensin laskettu teoriaosuudessa ja sitten tarkistettu mallintamalla käyttö ja simuloimalla se. Lasketut ja simuloituvat arvot ovat riittävän lähellä toisiaan ja näin ollen luotettavat.

Suurjännitemoottoreiden koestus on järkevintä toteuttaa taajuusmuuttajakäytöllä niin, että muuntaja, joka nostaa jännitteen suurjännitemoottorille sopivaksi, on taajuusmuuttajan ja suurjännitemoottorin välissä.

Suoritettujen mitoitusperusteella tilataan sopivat muuntajat ABB Servicen Nokian toimipisteeseen koestuspaikalle.

TAMPERE POLYTECHNIC

Degree Programme in Electrical Engineering

Electric Power Engineering

Virtanen, Tuomas

Dimensioning of a Step-Up Transformer for a testing site of an electrical equipment workshop.

Engineering Thesis

48 pages + 7 appendices

Thesis Supervisor

Lauri Hietalahti (MSc)

Commissioning Company

ABB Oy, Service Nokian huoltokeskus,

Supervisors: Jarkko Iisakkala (MSc) and Veikko Kivelä (Tech.)

May 2005

Keywords

converter, transformer, harmonic

## **ABSTRACT**

The purpose of the study is to clarify the basic theories of the frequency converters and the power transformers are based on, and furthermore, to process the important matters for building and implementing the frequency converters and the power transformers for a motor drive. This study also introduces the interferences the frequency converters are generating towards the both the motor and the network. On the basis of the introduced theories the most prudent and economical solution for testing arrangements for high voltage motors is established, as the technical restrictions set by the available power and voltage level of 400 V are taken into account.

The transformers are dimensioned only for a suitable loading current which they should be designed for. The currents required for the dimensioning are first calculated in the theory section and confirmed later on by modelling and simulating the drive. The results from the calculations and the simulations are considered to be close enough to each other and therefore reliable.

The most sensible way of realizing the frequency converter testing arrangement for high voltage motors is executed by setting up the required voltage level with the help of a step-up transformer placed between the frequency converter and the high voltage motor to be tested.

On the basis of these dimensionings the suitable transformers are to be ordered to the testing site of ABB Service's unit in Nokia.

## ALKUSANAT

Tämä tutkintotyö on tehty ABB Servicen Nokian huoltokeskukselle. Työn aiheen olen saanut sähkökonekorjaamon päälliköltä, Jarkko Iisakkalalta.

Kiitän ABB Servicen Nokian huoltokeskusta mielenkiintoisesta ja monipuolisesta työstä. Kiitän työni valvojia Tampereen ammattikorkeakoulun sähkövoimatekniikan linjanjohtajaa Lauri Hietalahtea ja ABB Servicen Nokian huoltokeskuksen sähkökonekorjaamon päällikköä Jarkko Iisakkalaa ja työnjohtaja Veikko Kivelää. Kiitokset myös kaikille niille, jotka ovat osaltaan edistäneet työni valmistumista.

Erityiskiitokset haluan esittää Hannalle, joka oli vahvana tukena tässä työssä ja yleisestikin opiskeluissani.

Tampereella 3. huhtikuuta 2005

Tuomas Virtanen

## SISÄLLYSLUETTELO

### TIIVISTELMÄ

### ABSTRACT

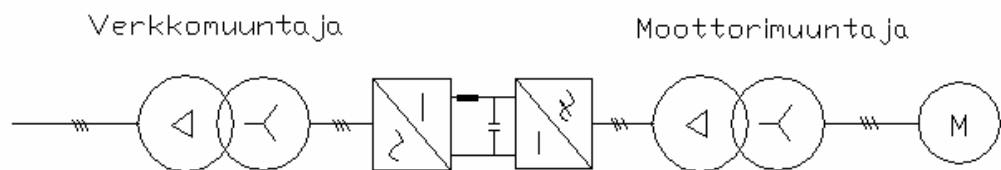
### ALKUSANAT

1	JOHDANTO.....	6
2	TAAJUUSMUUTTAJA.....	8
2.1	Toimintaperiaate.....	8
2.1.1	Tasasuuntaaja.....	9
2.1.2	Välipiiri.....	9
2.1.3	Vaihtosuuntaaja.....	10
2.1.3.1	Vaihtosuuntaajan kytkimien asentoyhdistelmien määrittäminen.....	11
2.1.3.2	Pulssinleveysmodulointi (PWM).....	12
2.1.3.3	NPC-vaihtosuuntaaja.....	14
2.2	Yliaallot.....	15
2.2.1	Harmonisten yliaaltojen selvittäminen Fourier-sarjakehitelmällä.....	18
2.2.2	Yliaaltojen ehkäisy.....	19
2.2.3	Yliaaltojen suodatus.....	19
2.2.3.1	Passiivisuodatin.....	20
2.2.3.2	Aktiivisuodatin.....	22
3	TEHOMUUNTAJA.....	23
3.1	Muuntajan toiminta.....	24
3.2	Muuntajan sydän.....	25
3.2.1	Pylväiden ja ikeiden väliset liitokset.....	26
3.3	Muuntajan häviöt ja niiden minimoiminen.....	27
3.3.1	Kuparihäviöt.....	28
3.3.2	Pyörrevirtahäviöiden laskeminen.....	29
3.3.3	Hystereesihäviöt.....	29
3.3.4	Rautahäviöiden riippuvuus taajuudesta.....	32
3.3.5	Tasakomponentti.....	32
3.4	Kuiva ja -öljymuuntaja.....	33
4	MUUNTAJA TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTISSÄ.....	33
4.1	Taajuuden muuttumisen ja yliaaltojen vaikutukset muuntajaan.....	34
4.1.1	Käämitys.....	35
4.2	Muuntajan kytkennät taajuusmuuttajakäytössä.....	35
4.2.1	Maadoitus.....	35
4.2.2	Ensiö.....	35
4.2.3	Toisio.....	36
5	SÄHKÖKONEKORJAAMON KOEKENTÄLLE TULEVA KÄYTTÖ.....	36
5.1	Muuntajien näennäistehon mitoitus.....	37
5.2	Yliaaltojen aiheuttama lisäkuormitus.....	39
5.2.1	Verkon puoleisten yliaaltojen aiheuttamat lisäkuormitukset ja niiden suodattaminen.....	39
5.2.2	Taajuusmuuttajan moottorin puoleiset häiriöt ja niiden suodattaminen.....	41
5.3	Muuntajien valinnat.....	41
5.3.1	Verkkomuuntajan valinta.....	42
5.3.2	Moottorimuuntajan valinta.....	43
5.4	Kaapelien valinta.....	43
6	YHTEENVETO.....	45
	LÄHTEET.....	46
	LIITTEET	

## 1 JOHDANTO

ABB Oy, Service Nokian huoltokeskuksen tavoitteena on parantaa palvelutasoaan suurjännitekoneiden huoltojen osalta. Yrityksessä huolletaan suurjännitekoneita säännöllisesti, mutta koneiden koestusmahdollisuudet ovat olleet osin puutteellisia. Suurten yli 2 MW:n koneiden koeajo ei ole ollut mahdollista, koska käytettävissä ei ole ollut riittävän suurta jännitettä. 400 V:n syöttöjännitteellä saatava vuo on liian heikko saadaakseen suurimassaisen roottorin pyörimään. Tämän takia moottoreiden huoltojen jälkeiset koeajot on osin jouduttu tekemään moottoreiden käyttöpaikalla takaisinasennuksen jälkeen. Entistä laajempi syöttöjänniteskaala parantaisi merkittävästi yrityksen asiakaspalvelumahdollisuuksia suurjännitekoneiden huoltojen osalta.

Entistä suurempi jännite saadaan aikaan tehomuuntajalla. Jotta päästään ohjailemaan muuntajan perässä olevaa moottoria, on taajuusmuuttajan käyttö tähän paras ratkaisu. Taajuusmuuttaja ottaa verkosta lähes pelkästään pätötehoa ja tuottaa itse moottorin tarvitseman loistehon. Lisäksi taajuusmuuttajalla voidaan laskea tarvittava käynnistysvirta lähelle moottorin nimellisvirtaa. Nämä pienentävät verkosta otettavaa virtaa ja ovat ratkaisevia tekijöitä, kun halutaan koestaa mahdollisimman isoja koneita ja käytettävissä oleva virta on rajallinen. Kuva 1 havainnollistaa tarvittavaa ratkaisua.



**KUVA 1. Suunniteltu laitteisto.**

Taajuusmuuttajan verkon puolelle tulee muuntaja, joka nostaa verkon 400 voltin jännitteen taajuusmuuttajan nimellisjännitteeksi 690 voltia. Taajuusmuuttajan ja moottorin väliin puolestaan tulee muuntaja, joka nostaa jännitteen suurjännitemoottorille sopivaksi. Tämän muuntajan toisiojännitevaihtoehtoja on 3, 6 ja 10 kV.

Aluksi työssä selvitetään taajuusmuuttajan perusteoriaa ja niitä haittoja, joita se aiheuttaa verkon ja moottorin kannalta. Lisäksi käsitellään keinoja, miten näitä haittoja voidaan vähentää. Seuraavaksi tutustutaan tehomuuntajan perusteoriaan ja niihin seikkoihin, joita tulisi huomioida, kun suunnitellaan tehomuuntajaa taajuusmuuttajakäyttöihin. Lopuksi mitoitetaan käyttöön tulevat muuntajat työssä käsiteltyjen asioiden pohjalta ja selvitetään käytön mahdolliset suodatustarpeet. Taajuusmuuttajan syöttämiä yliaaltoja tarkastellaan mallintamalla ne OrCad-ohjelmalla. Taajuusmuuttajana käytetään käyttöön tulevan tyyppistä ratkaisua, jossa tasasuuntaussiltana on diodisilta ja vaihtosuuntaajana on IGBT-transistoreilla toteutettu vaihtosuuntaaja.

## 2 TAAJUUSMUUTTAJA

Taajuusmuuttajasta käytetään yleisnimitystä suuntaaja. Suuntaajaan kuuluu puolijohdekytkimiä sekä tarvittavia lisälaitteita. Suuntaajaa käytetään sähkön jännitteen, virran tai taajuuden muuttamiseen. Mikäli tehon suunta suuntaajan läpi on vaihtosähköverkosta tasasähköverkkoon päin, puhutaan tasasuuntauksesta. Jos taas teho virtaa tasasähköverkosta vaihtosähköverkkoon päin, puhutaan vaihtosuuntaajasta. Taajuusmuuttaja muuttaa vaihtosähkön taajuuden, jännitteen ja joskus myös vaiheluvun toiseksi vaihtosähköksi. /6/

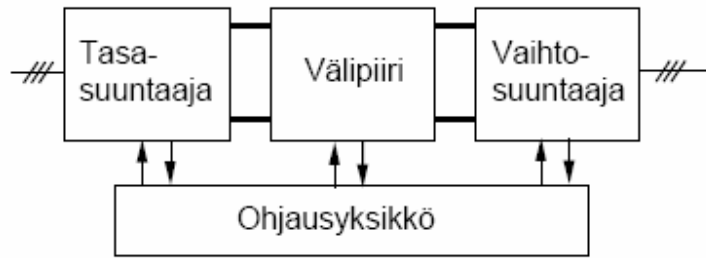
Taajuusmuuttajat voidaan jakaa kahteen päätyyppiin: välipiirillisiin ja suoriin. Välipiirillisissä taajuusmuuttajissa sähkö muutetaan ensin tasasähköksi ja sitten välipiirin jälkeen vaihtosuuntaajassa taas vaihtosähköksi. Suorissa taajuusmuuttajissa syöttävän vaihtosähköverkon sähkö katkotaan puolijohdekytkimillä suoraan halutun taajuiseksi ja jännitteiseksi vaihtosähköksi. /12/

Välipiirilliset taajuusmuuttajat voidaan edelleen jakaa jännite- ja virtavälipiirillisiin. Tässä työssä käsitellään ainoastaan jännitevälipiirillistä taajuusmuuttajaa. Jännitevälipiirillisissä taajuusmuuttajissa käytetään useimmiten ohjauksena pulssinleveysmodulointia (PWM). NPC-kytkentää (Neutral Point Clamped) käytetään suuritehoisissa jännitevälipiirillisissä taajuusmuuttajissa.

### 2.1 Toimintaperiaate

Taajuusmuuttaja muodostuu kuvan 2 mukaisesti neljästä osasta: tasasuuntaajasta, välipiiristä, vaihtosuuntaajasta ja niiden toimintoja ohjaavasta ohjausyksiköstä.





KUVA 2. Taajuusmuuttajan lohkokaavio. /3/

### 2.1.1 Tasasuuntaaja

Verkon puolelta ensimmäisenä osana taajuusmuuttajassa on tasasuuntaaja. Tasasuuntaaja muuttaa syöttöverkon kolmivaiheisen vaihtojännitteen sykkiväksi tasajännitteeksi. Tasasuuntaajia on kahta päätyyppiä: ohjattuja ja ohjaamattomia. Ohjatuissa tasasuuntaajissa puolijohteenä on jokin ohjattavissa oleva puolijohdekytkin ja ohjaamattomassa diodi. /16/

Perinteiset diodi- ja tyristoritasasuuntaussillat aiheuttavat syöttöverkkoon pienitaajuisia yliaaltoja. Lisäksi esimerkiksi tyristorisillan syöttöverkosta ottama loisteho riippuu sillan sytytyskulman arvosta. Näiden häiriöiden eliminoimiseksi on tasasuuntaajista kehitetty hilakommutoidun vaihtosuuntaussillan tapaisia moduloituja verkkosuuntaajia, joilla pystytään palauttamaan myös moottorin jarrutusenergia takaisin syöttöverkkoon. /27/

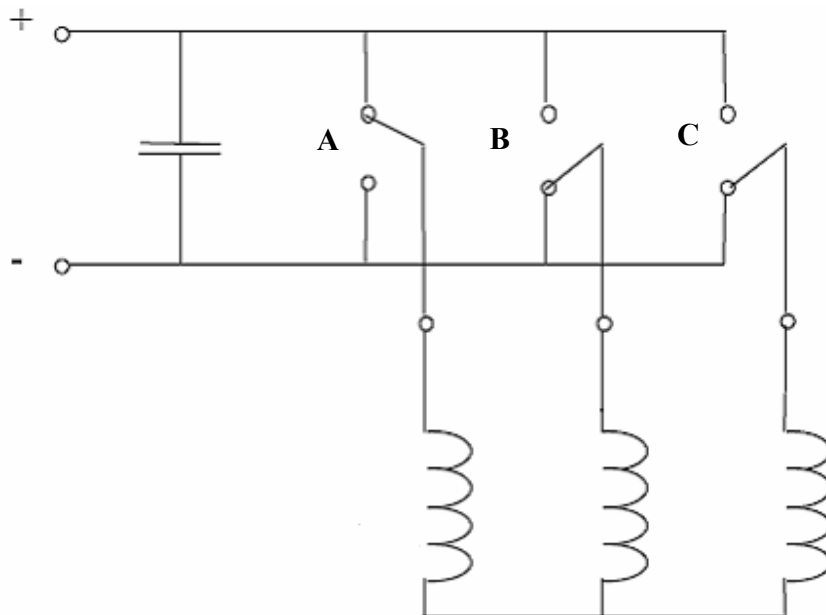
### 2.1.2 Välipiiri

Välipiiri rakentuu yleisimmin käämin ja kondensaattorin muodostamasta alipäästösuodattimesta. Tämän välipiirityypin etuna on, että se voidaan yhdistää molempiin tasasuuntaajatyyppeihin. Suodatin tasaa tasasuuntaajan tasajännitteen. Jos tasasuuntaaja on ohjattu, jännite pysyy vakiona tietyllä taajuudella. Vaihtosuuntaajaan johdettu jännite on siten amplitudiltaan vaihteleva tasoitettu tasajännite. Jos taas tasasuuntaaja

on ohjaamaton, vaihtosuuntaajan sisäänmeno-jännite on tasajännite, jonka amplitudi on vakio. /16/

### 2.1.3 Vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaajan tehtävänä on muuntaa kiinteästä välipiirin tasajännitteestä symmetrinen kolmivaiheinen, suuruudeltaan ja taajuudeltaan ohjattavissa oleva jännite. Kuva 3 havainnollistaa vaihtosuuntaajan toimintaa kytkinmallilla. Todellisessa vaihtosuuntaajassa vaihtokytkinten tilalla ovat puolijohdekytkimet. Nykyisin transistorit ovat pääosin syrjäyttäneet vaihtosuuntaajien tyristorit. Transistorin etuna on, että se voi vaihtaa tilaa, ennen kuin jännite seuraavan kerran käy nollassa. Näin vaihtosuuntaajan kytkentätaajuutta on saatu suurennettua huomattavasti, jopa 15 kHz:iin. /16, 3/



**KUVA 3. Vaihtosuuntaajan kytkinmalli**

Ohjauspiirin tehtävänä on katkoa sopivasti vaihtosuuntaajan puolijohdekytkimiä. Näin saadaan moottorille näennäisesti sinimuotoista virtaa siten, että sopivan suodatuksen

jälkeen virta sisältää pääasiassa haluttua taajuutta. Vaihtosuuntaajan toimiessa kytkinten on oltava jommassa kummassa asennossa. Väliasennossa kytkin voi olla vain kytkimen käännön aikana. Kääntöjen asennosta toiseen ajatellaan tapahtuvat äkillisesti.

### 2.1.3.1 Vaihtosuuntaajan kytkimien asentoyhdistelmien määrittäminen

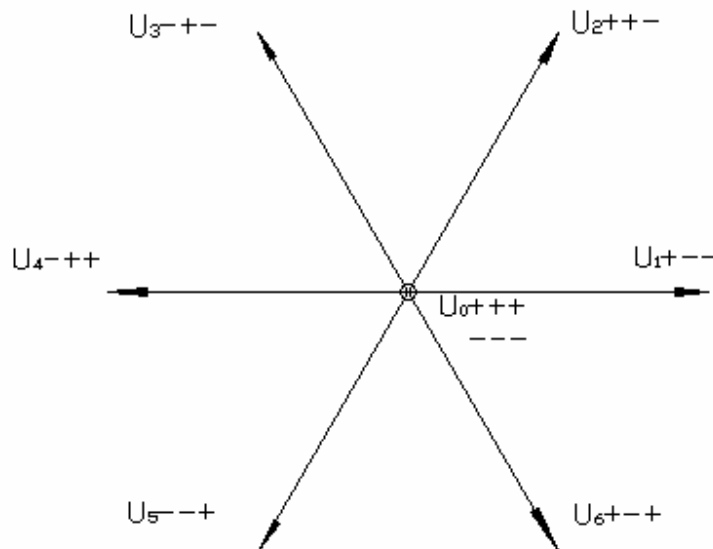
Vaihtosuuntaajan puolijohdekytkimien ohjaaminen tavanomaisessa pulssia kuvaavassa amplitudi-aikatasossa on hankalaa ja sovellutuksissa, joissa lähtöjännitteen eri ominaisuuksille asetetaan monia vaatimuksia, se on mahdotonta. Tästä syystä asiaa tarkastellaan kolmivaihejärjestelmän paikanosoitinkuvauksella, jonka muodostaminen perustuu avaruusvektoriteoriaan.

Lähtöjännitteen ohjaaminen perustuu kuuden nollasta poikkeavan vektorin ja kahden nollavektorin ohjaamiseen. Nollavektorit saadaan, kun kaikki vaihtokytkimet on käännetty joko plus- tai miinuskiskoon. Vaihtokytkimen tilaa on merkitty +:lla, kun se on kytketty positiiviseen tasajännitteeseen ja -:lla, kun se on miinuskiskossa. Jännitteen vektorit eri kytkinkombinaatioilla on esitetty taulukossa 1.

**TAULUKKO 1. Vaihtosuuntaajan eri kytkentäkombinaatiot.**

A	B	C	Jännitevektorin suunta	Jännitevektorin nimi
+	-	-	$= 1 / 0^\circ$	$= U_1$
+	+	-	$= 1 / 60^\circ$	$= U_2$
-	+	-	$= 1 / 120^\circ$	$= U_3$
-	+	+	$= 1 / 180^\circ$	$= U_4$
-	-	+	$= 1 / 240^\circ$	$= U_5$
+	-	+	$= 1 / 300^\circ$	$= U_6$
+	+	+	$= 0$	$= U_0$
-	-	-	$= 0$	$= U_0$

Jännitevektorit muodostavat kuvaan 4 piirretyn jännitetähden.



**KUVA 4. Jännitevälipiirisuuntaajan jännitetähti.**

Tasaisesti pyörivä vuo saadaan, kun kussakin sektorissa käytetään kahta vierekkäistä vektoria ja nollavektoria vuorotellen. Jännitevektoreihin perustuvan vaihtosuuntaajan ideana on, että näitä seitsemää erilaista vektoria käytetään niin, että moottorin saama vuo vastaa riittävän hyvin kosinimuotoisen jännitteen tuottamaa vuota. Tämä merkitsee sitä, että vuovektori on vakio pituinen ja pyörii tasaisesti halutun taajuuden määrämällä kulmanopeudella. /22/

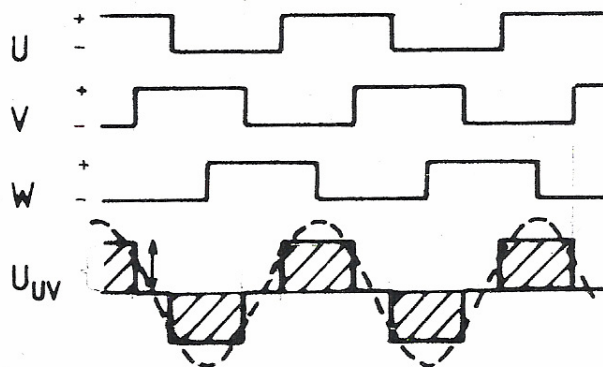
### 2.1.3.2 Pulssinleveysmodulointi (PWM)

PWM-taajuusmuuttajassa vaihtosuuntaaja muuttaa lähtöjännitteen amplitudia, ja taajuutta asetellaan tai säädetään muuttamalla lähtöjännitteen pulssikuviota. Muuttamista kutsutaan pulssinleveysmoduloinniksi eli PWM:ksi (Pulse Width Modulation). Pulssinleveysmoduloinnissa moottoriin vaikuttava jännite koostuu erilevyisistä jännitepulsseista (kuva 5). Lähtöjännitettä ohjataan viemällä välipiirin jännite moottoriin ly-

hempinä tai pidempinä jaksoina. Ohjaus perustuu sinimuotoiseen vertailujännitteeseen taajuusmuuttajan kaikissa ulostuloissa. /3/

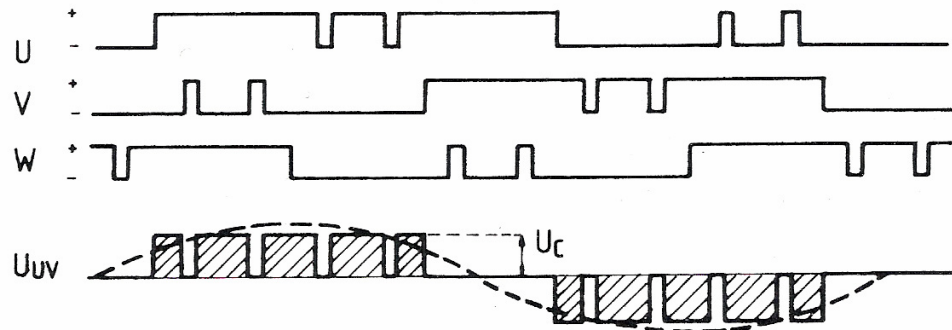
Pulssinleveysmoduloinnin tarkoituksena on pienentää taajuusmuuttajan lähtöjännitteen ja siten myös moottorivirran yliaaltosisältöä. Näin yliaaltojen vaikutus moottorissa syntyvään ääneen ja virtalämpöhäviöihin jää mahdollisimman pieneksi.

Kuvassa 5 on esitetty yksinkertaisin jännitekuvio, joka saadaan pitämällä kytkimiä puoli jaksoa ylhäällä ja puoli jaksoa alhaalla. Lisäksi kytkimien asentojen tulee olla 120 asteen vaihesiirrossa toisiinsa nähden. Tällaista pulssikuviota voidaan käyttää syöttäessä oikosulkumoottoria vakiojännitteellä.



**KUVA 5.** Kytkimien asennot ja pääjännite  $U_{UV}$  pulssiluvulla yksi. /3/

Perustaajuuden jännitteen tehollisarvoa asetellaan säätämällä yksittäisten pulssien leveyttä suhteessa jakson pituuteen. Kuvasta 6 näkyy pulssikuvion muodostuminen viidellä pulssilla puolijaksoa kohden.



**KUVA 6.** Kytkimien asennot ja pääjännite  $U_{UV}$  pulssiluvulla viisi. /3/

Taajuutta alennettaessa on perusaallon tehollisarvoa pienennettävä taajuuteen verrannollisesti moottorin vuon pitämiseksi vakiona. Jotta päästään säätämään taajuutta ja jännitettä, tulee jännitepulsseja puolijaksoa kohden lisätä. Jännitteen pulssimäärällä puolijaksoa kohden voidaan vaikuttaa virran yliaaltosisältöön. Mitä suurempi jännitteen pulssimäärä on, sitä pienempi on virran yliaaltosisältö. Jännitteen pulssimäärän valinta on optimointikysymys. Mitä korkeammalle perustaajuudelle kukin vaihtokohta sijoitetaan, sitä pienemmät ovat moottorin häviöt, mutta sitä suuremmat ovat toisaalta vaihtosuuntaimen häviöt korkeamman kytkentätaajuuden vuoksi. /20/

### 2.1.3.3 NPC-vaihtosuuntaaja

Taajuusmuuttajan aiheuttamia yliaaltoja saadaan vähennettyä valitsemalla muuttaja, jossa on käytössä NPC-vaihtosuuntaaja tavanomaisen kaksitasoisen PWM-invertterin sijaan. NPC-invertterissä on 27 erilaisia kytkimen asennon kombinaatiota. Näistä syntyy 18 paikanosoitinta. Kun tätä lukua verrataan PWM-invertterin vastaavaan lukuun 7, havaitaan, kuinka paljon monipuolisemmin NPC-invertteriä voidaan moduloida. Tämän ansiosta päästään huomattavasti parempaan jännitekuvioon ja pienempään särröön. Lisäksi kolmitasoisien vaihtosuuntaajan käytöllä päästään moottorin eristeiden entistä pienempiin jänniterasituksiin.

## 2.2 Yliaallot

Yliaaltoja on harmonisia ja epäharmonisia. Harmoniset yliaallot aiheuttavat jännitteen tai virran käyrämuodon vääristymisen samalla tavalla jokaisen jakson aikana. Epäharmoniset yliaallot puolestaan aiheuttavat jännitteen tai virran käyrämuodon jaksoihin epäsymmetriaa. Tässä työssä käsitellään ainoastaan harmonisia yliaaltoja, sillä epäharmonisia yliaaltoja ilmenee huomattavasti harvemmin. Työssä puhutaan lyhyesti yliaalloista, kun tarkoitetaan harmonisia yliaaltoja.

Nykyiset pienjännitetaajuusmuuttajat, jotka eivät ole verkkoon jarruttavia, toteutetaan dioditasasuuntaussillalla ja vaihtosuuntaus IGBT-transistoreilla. IGBT-transistoreiden korkeiden kytkentätaajuuksien ansiosta taajuusmuuttajan moottoriin päin syöttämien yliaaltojen sisältö on hyvin vähäinen. Liitteessä 3, jossa simuloidaan OrCad-ohjelmalla taajuusmuuttajan syöttämiä yliaaltoja moottorille päin, tilanne hahmottuu selvästi. Tässä kappaleessa käsitelläänkin ainoastaan diodeilla toteutetun tasasuuntaussillan aiheuttamia yliaaltoja verkkoon päin.

Jokainen aaltomuoto, virta tai jännite voidaan ilmaista perustaajuisen komponentin (50 Hz) ja tämän monikertojen summana. Suuntaajista verkkoon päin aiheutuvien yliaaltojen järjestysluku  $n$  voidaan laskea kaavalla 1.

$$n = k \cdot p \pm 1, \text{ missä} \quad (1)$$

$k$  = jokin kokonaisluku ja

$p$  = suuntaajan pulssiluku.

Ideaalitapauksessa yliaaltojen suuruudet  $I_n$  ovat

$$I_n = I_1 / n, \text{ missä} \quad (2)$$

$I_n$  =  $n$ . yliaaltovirta,

$I_1$  = perusaaltovirran suuruus ja

$n$  = yliaallon järjestysluku.

6-pulssinen taajuusmuuttaja aiheuttaa verkkoon päin virtaan siis yliaallot  $n = 5, 7, 11, 13, \dots$  ja niiden amplitudit ovat vastaavasti ideaalitapauksessa 20 %, 14,1 %, 9,1 %, 7,7 % perusaallosta. Ideaalitapauksessa oletetaan, että suuntaajaa syötetään jäykästä symmetrisestä kolmivaiheverkosta ja että tasavirta on välipiirissä täysin tasoittunutta. Syöttävän verkon reaktanssi loiventaa lisäksi virtapulssin reunoja (diodisillan kommutointi), jolloin korkeiden järjestyslukujen yliaallot ovat käytännössä pienempiä kuin kaava 2 antaa. /2/

Kiinnostavin asia on eritaajuisien yliaaltojen yhteisvaikutus eli särö. Särö on kaikkien perustaajuutta suurempitaajuisien komponenttien tehollisarvojen summa. Koska eri taajuisilla yliaalloilla on eri vaihesiirtokulma, ne osittain kumoavat tai vahvistavat toisiaan. Eri yliaaltojen yhteisvaikutuksesta käytetään nimitystä THD-arvo ja se lasketaan kaavan 3 mukaan. Kaavasta nähdään, että muita huomattavasti suuremmalla yliaallolla on ratkaiseva vaikutus särön arvoon. Jos esimerkiksi särö muodostuisi neljästä yliaallosta, joista yhden suuruus on 5 % ja kolmen muun suuruudet 0,5 % perusaallosta, niin suurimman yliaallon osuus särön arvosta on 98,5 %.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}, \text{ missä} \quad (3)$$

$I_1$  = virran tehollisarvo eli 100 %.

6-pulssisen taajuusmuuttajan aiheuttama yliaaltovirtasärö verkkoon päin on täten:

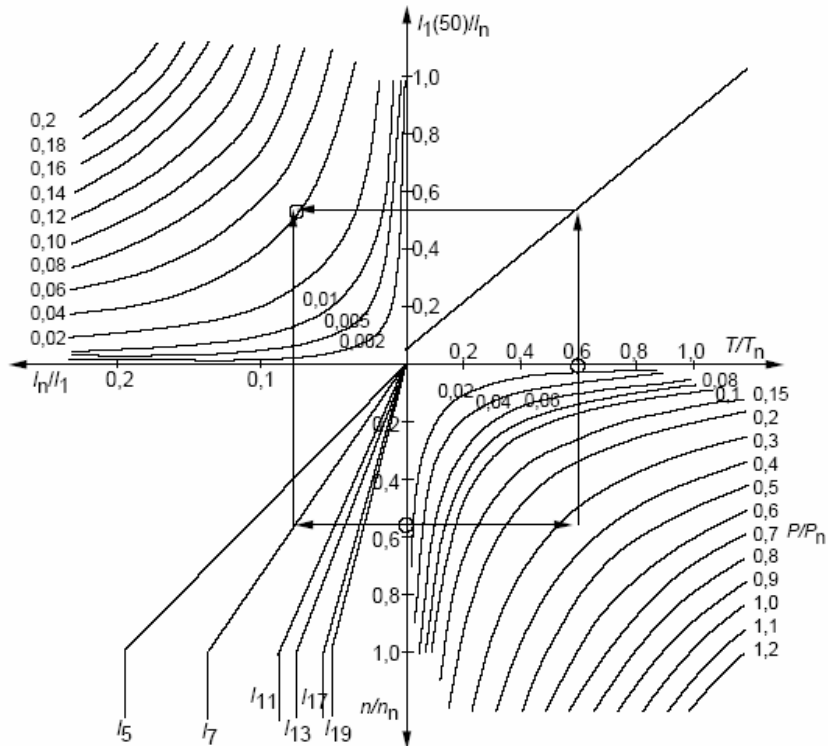
$$THD = \frac{\sqrt{20^2 + 14,1^2 + 9,1^2 + 7,7^2 + 5,9^2 + 5,3^2 + 4,4^2 + 4^2}}{100}$$

$$THD = 29\%$$

Yliaaltovirrat ovat siis suoraan verrannollisia perusaaltovirtaan. Kuvan 7 nomogramista nähdään 6-pulssisen PWM-taajuusmuuttajan yliaaltovirtojen suuruudet ideaalitapauksessa eri pyörimisnopeuksilla ja vääntömomenteilla tai tehoilla. Tämä nomogrammi näyttää 6-pulssisen PWM-taajuusmuuttajan yliaaltosisällön moneen tilanteeseen.



seen riittävällä tarkkuudella. Yliaaltojen vielä tarkempaan selvittelyyn käytetään Fourier-analyysia, jota esitellään seuraavassa kappaleessa. Yliaaltovirrat ovat suurimmiltaan nimellisnopeudella ja maksimimomentilla. Vakiokuormitusmomentilla pyörimisnopeuden laskiessa yliaaltovirrat pienenevät, koska perusaaltovirta pienenee. /3/



**KUVA 7.** Nomogrammista nähdään verkkovirran yliaaltovirran suuruus suhteessa moottorin nimellisvirtaan, kun pyörimisnopeus ja teho tai vääntömomentti tunnetaan. /3/

Yliaaltovirtojen suuruus pienenee kertaluvun kasvaessa. Yliaaltovirrat eivät siirrä tehoa, vaan aiheuttavat kaapeleiden lisäkuormitusta lisävirtana. Yliaaltovirtojen vaikutuksesta muuntajan käämit ylikuormittuvat.

Yliaaltojen teoreettisen tarkastelun lähtökohtana voidaan pitää virtalähdejattelua. Virtalähdejattelun mukaan esimerkiksi puolijohdetekniikalla toteutettu suuntaaja syöttää verkkoon yliaaltovirtaa. Kun yliaaltovirrat kohtaavat verkossa taajuutensa perusteella määräytyvän yliaaltoimpedanssin, aiheutuu tietty jännitehäviö. Näin syntyvät jännitteen yliaallot, jotka summautuessaan perusaaltoon aiheuttavat jännitteen käyrämuodon

vääristymisen eli säröytymisen. Jännitteen yliaallon järjestysluku  $n$  on siis sama kuin virtayliaallon, joka sen on aiheuttanut, mutta amplitudi riippuu virtayliaallon suuruuden lisäksi yliaaltoimpedanssista. /23/

### 2.2.1 Harmonisten yliaaltojen selvittäminen Fourier-sarjakehitelmällä

Kun jännitteen tai virran käyrämuoto poikkeaa sinimuodosta, voidaan ajatella sen olevan muodostunut useasta eritaajuisesta sinimuotoisesta signaalista. Funktio voidaan hajottaa komponentteihinsa käyttämällä Fourier-analyysiä, johon yliaaltojen matemaattinen käsittely perustuu /24/. Jokainen jaksollinen funktio, joka on muotoa  $f(t) = f(t + T)$ , voidaan kehittää Fourier-sarjaksi,

$$f(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos n\omega t + b_n \cdot \sin n\omega t), \text{ missä} \quad (4)$$

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t, \quad (5)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos n\omega t \rightarrow d\omega t, n = 1, 2, 3, \dots \text{ ja} \quad (6)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin n\omega t \rightarrow d\omega t, n = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

/9

Kertoimet  $a_0, a_n$  ja  $b_n$  ovat Fourier-kertoimia. Jos funktio  $f(\omega t)$  on parillinen eli symmetrinen y-akselin suhteen,  $f(\omega t) = f(-\omega t)$ , ovat kertoimet  $b_n$  nollia. Sarja sisältää mahdollisen tasakomponentin  $a_0$  ja kosinitermejä. Jos funktio  $f(\omega t)$  on pariton eli symmetrinen origon suhteen,  $f(-\omega t) = -f(\omega t)$ , ovat kertoimet  $a_0$  ja  $a_n$  nollia ja sarja sisältää vain sinitermejä. /20/

Jos funktio on täyssymmetrinen,  $f(\omega t + \pi) = -f(\omega t)$ , se sisältää vain parittomia termejä, jolloin kertoimet  $a_0, a_{2n}$  ja  $b_{2n}$  ovat nollia. Täyssymmetrian tunnistaa parhaiten siitä, että sen puoliaallot ovat x-akselin suhteen toistensa peilikuvia. Fourier'n sarjakehitel-

män avulla voidaan siis jaksollinen epäsinimuotoinen funktio esittää perustaajuisen komponentin, tasakomponentin ja harmonisten yliaaltojen summana. Harmoniset yliaallot ovat taajuudeltaan perustaajuuden kokonaisia monikertoja. Yliaallot voidaan tunnistaa järjestyslukunsa  $n$  perusteella, joka saadaan jakamalla yliaallon taajuus perustaajuudella  $f_1$ .

### 2.2.2 Yliaaltojen ehkäisy

Yliaallot aiheuttavat muun muassa häiriöitä suuntaajalaitteiden toimintaan, lämpenemistä, ylimääräisiä häviöitä sähkökoneissa ja ylijännitteitä resonanssien yhteydessä. Näiden asioiden takia yliaaltoja tulee seurata ja tarpeen tullen vähentää.

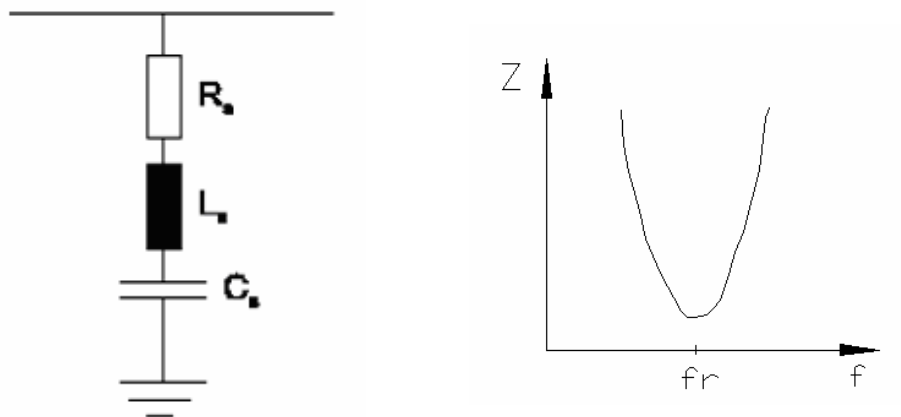
Yliaaltojen haittavaikutuksien vähentämiseen yksinkertaisin tapa on liittää verkkoon suodatin, joka muodostuu kuristimen ja kondensaattorin sarjakytkennästä. Suodatin muodostaa hyvin pienen impedanssin halutulle yliaallolle, jolloin kyseinen yliaaltovirta tulee pääosin "imetyksi" suodatimeen. Vaihtosähköpuolelle asennetulla kuristimella on lisäksi verkkohäiriöitä vaimentava vaikutus. Tätä suodatustyyliä kutsutaan passiiviseksi suodatukseksi. Toinen vaihtoehto vähentää yliaaltoja on käyttää 6-pulssisuuntaajan sijaan 12-pulssisuuntaajaa. Kuten yhtälöstä 1 havaitaan, eliminoidaan näin 5- ja 7-kerrannainen yliaalto. Kolmas tapa on käyttää aktiivisia suotimia, jotka kompensoivat epälineaaristen kuormien aiheuttamat harmoniset virrat. On myös mahdollista yhdistää passiivi- ja aktiivisuodattimia. Seuraavassa kappaleessa käsitellään passiivi- ja aktiivisuodattimia lisää.

### 2.2.3 Yliaaltojen suodatus

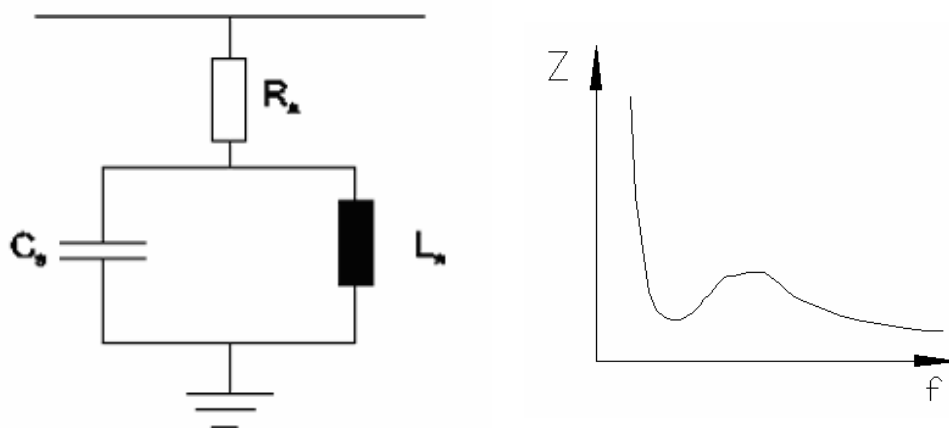
Yliaaltoja voidaan kompensoida paljon käytetyillä yliaaltosuotimilla, joiden ensisijainen tehtävä on alentaa paikallisen yliaaltolähteen haittavaikutuksia, jännitetasoja ja leviämistä muualle verkkoon.

### 2.2.3.1 Passiivisuodatin

Passiivisuodatin muodostaa suodatettavalle yliaaltovirralle pieni-impedanssisen sulkeutumistien. Passiivisuodattimet valmistetaan yleensä kompensointikondensaattorin, kuristimen sekä resistanssin sarjaan- tai rinnankytkennällä, jolloin komponentit voidaan kytkeä alla olevien kuvien osoittamalla tavalla. Kuvan 8 kapeakaistasuodatinta käytetään tietyille taajuuksille viritetyissä imupiireissa ja kytkentää kuvassa 9 taas laajakaistasuodattimissa.



KUVA 8. Kapeakaistasuodattimen imupiiri ja sen impedanssikäyrä.



KUVA 9. Laajakaistasuodattimen imupiiri ja sen impedanssikäyrä.

Kapeakaistaisella suodattimella voidaan poistaa lähes kokonaan jokin yksittäinen yliaaltotaajuus, kun taas laajakaistasuodattimella saadaan vain vähennettyä kaikkia tiettyä taajuutta suurempia taajuuksia.

Tyypillisesti yliaaltosuodatin muodostuu kolmelle yleisimmälle yliaaltotaajuudelle (5., 7. ja 11.) viritetystä imupiiristä, jolloin suodatin koostuu kolmesta kapeakaistaisesta suotimesta. Laajakaistasuodattimia ei juuri käytetä. Yleensä suodattimen taajuudet asetetaan hieman alle harmonisen yliaaltotaajuuden, jolloin kondensaattorin mitoitustoleranssien vaihtelut eivät vaikuta suodatukseen. /13/

Passiivisuodatin vähentää jännitteen tai virran aaltoilua. Sovelluksissa, jotka vaativat suurta jännitteen tai virran aaltoilun vaimentamista, passiivisuodattimen koko kasvaa suureksi. Passiivisuodattimen suuresta koosta taas seuraa järjestelmän hetkellisen vasteen kasvaminen. Toisin sanoen, jotta saataisiin entistä suurempi aaltoilun vaimentaminen tehosyöttöön, täytyy passiivisuodattimen aikavakioita suurentaa. Passiivisuodattimen koon kasvu maksaa ja vie tilaa, joten pitkiä aikavakioita tulisi myös välttää. /4/

Yhä parempia suodatusjärjestelmiä kehitetään, koska passiivisuodattimella on eräitä heikkouksia:

- ne eivät suodata tehokkaasti taajuudeltaan muuttuvia yliaaltoja,
- suodatusominaisuudet ovat riippuvaisia verkon ominaisuuksista (taajuus, impedanssi) sekä komponenttien ominaisuuksista,
- resonanssit verkon ja suodattimen välillä voivat vahvistaa tietyn taajuisia yliaaltoja,
- kullekin yliaallolle on viritettävä oma suodattimensa,
- ylikuormittumisvaara,
- suuri tilantarve ja
- mahdolliset ylijännitteet, mikäli suodatin tuottaa enemmän loistehoa kuin kuorma kuluttaa. /19/

### 2.2.3.2 Aktiivisuodatin

Nykyään käytetään myös lisääntyvässä määrin aktiivisuodattimia. Aktiivisuodatin toimii virtalähteenä, joka syöttää verkkoon yliaaltojen vaikutuksen kumoavan virran eli yliaaltovirran kanssa 180 asteen vaihesiirrossa olevaa virtaa. Aktiivisuodatin mahdollistaa suuren aaltoilun vaimentamisen ilman, että se heikentää ulostulon vastetta.

Yliaaltojen mittaussuodattimen mukaan aktiivisuodattimet voidaan jakaa kahteen osaan, aikatason säätöön ja taajuustason säätöön. Aikatason säädössä suodatinta ohjataan siten, että se generoi suoraan mitatut yliaaltovirrat vastakkaismerkkisinä. Taajuustason säädössä taas pyritään kompensoimaan lasketun Fourier-analyysin avulla suodatimen ohjauspulssikuviota. Aikatason säädön etuna on yksinkertaisuus ja vasteen nopeus, kun taas taajuustason säätö mahdollistaa entistä pienemmän kytkentätaajuuden käytön. Lisäksi Fourier-menetelmään perustuvassa käytössä voidaan suodatettavat yliaallot valikoida entistä paremmin. /19/

Aktiivisuodattimen päävirtapiirin rakenne on lähellä hilakommutoidulla puolijohdekomponenteilla toteutetun loistehokompensaattorin rakennetta. Niinpä nykyisissä toteutuksissa yliaaltojen suodatuksen ohella aktiivisuotimella voidaan kompensoida loistehoa /8/. Yliaaltojen ja loistehon kompensoinnin lisäksi aktiivisuotimella voidaan suorittaa jännitteenvaihteluiden kompensointia /18/. Aktiivisuotimella pyritään seuraaviin etuihin verrattuna passiivisuodattimiin:

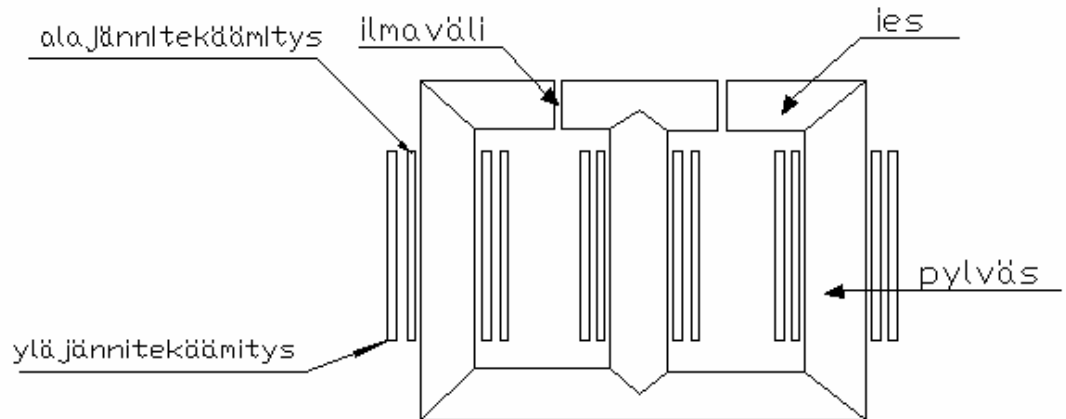
- taajuudeltaan ja suuruudeltaan muuttuvien yliaaltojen ja loistehon kompensointi on tehokasta,
- yhdellä suotimella voidaan suodattaa useita yliaaltoja,
- voidaan vaimentaa resonansseja verkon ja passiivisuodattimien tai verkon ja tehokertoimen parantamiseen käytettävän kondensaattorin välillä,
- nopea vaste ja
- pieni tilantarve. /19/

Mitä korkeammalle tehoalueelle mennään, sitä suuremmaksi tulee aktiivisuodattimen hinta verrattuna passiivisuodattimeen. Tämän johdosta korkeilla tehoalueilla raakasuodatus on hyvä tehdä passiivisuodattimilla ja hienosäätö aktiivisuodattimilla.

### 3 TEHOMUUNTAJA

Tehomuuntaja on staattinen sähkölaite. Sen aktiiviset osat ovat ensiö- ja toisiokäämit sekä rautasydän. Nämä suorittavat muuntajan varsinaisen tehtävän. Käämit ovat muuntajissa yleensä emalilla eristettyä kuparia tai alumiinia. Passiivisia osia ovat muun muassa tukirakenteet, eristimet, muuntajaöljy ja jäähdytyslaitteet. Perinteisesti muuntaja on koottu muuntajalevyistä valmistetun rautasydämen ympärille. Rautasydän rakentuu pylväistä ja niitä yhdistävistä ikeistä. Nämä yhdessä muodostavat suljetun magneetti-piirin. Tehon kulkusuunta määrittelee sen, kumpi käämityksistä on ensiö- ja kumpi toisiokäämitys.

Käämitykset kasataan sydänrakenteen päälle niin, että alajännitekäämitys käämitään lähelle rautasydäntä. Näin suurin osa ensiössä syntyneestä magneettikentästä saadaan kulkemaan sydämen kautta. Toinen perustelu tälle järjestykselle löytyy valmistusteknisestä syystä. Yläjännitekäämitys vaatii paksumman eristyksen kuin alajännitekäämitys ja se on helpompi toteuttaa yläjännitteen ollessa pinnassa. Alajännitekäämityksen päälle käämitään normaalisti yläjännitekäämitys, jolloin käämityksien läpi kulkeva yhteinen magneettivuo muodostuu mahdollisimman suureksi, minkä ansiosta suurin osa muuntajan läpi siirrettävästä tehosta päättyy muuntajan toisiokäämitykseen ja siitä kulumuskojeelle. Kuvassa 10 on kolmivaiheinen sydänmuuntaja. /1/



**KUVA 10.** Kolmivaiheinen sydänmuuntaja.

Kuvassa 10 yläikeellä näkyviä ilmvälejä käytetään, kun halutaan minimoida tasakomponenttia. Taajuusmuuttaja aiheuttaa tasakomponenttia. Tasakomponentista kerrotaan lisää kappaleessa 3.3.5.

### 3.1 Muuntajan toiminta

Muuntajan toiminta perustuu siihen, että ensiökäämiin syötetään vaihtosähköä. Muuntaja ei toimi tasasähköllä, koska se tarvitsee toimiakseen muuttuvan magneettikentän. Vaihtosähkö saa aikaan muuttuvan magneettivuon rautasydämeen, josta se indusoituu toisiokäämiin. Toisiokäämistä saadaan sama teho kuin ensiökäämiin on syötetty, mikäli muuntaja on häviötön. Käytännössä sydämessä ja käämeissä syntyy häviöitä, joita käsitellään seuraavissa kappaleissa. Muuntajan toisiokäämiin indusoituva jännite ( $e$ ) riippuu käämissä olevien kierrosten lukumäärästä ( $N$ ) sekä sen läpi kulkevan magneettivuon muutosnopeudesta seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (8)$$

Yhtälöstä nähdään jännitteiden verrannollisuus kierrosten suhteen. Lisäksi, jos käämien läpi kulkeva päävuoto on sama molemmille käämeille, on myös  $df/dt$  sama ensiö- ja toisiokäämille, joten

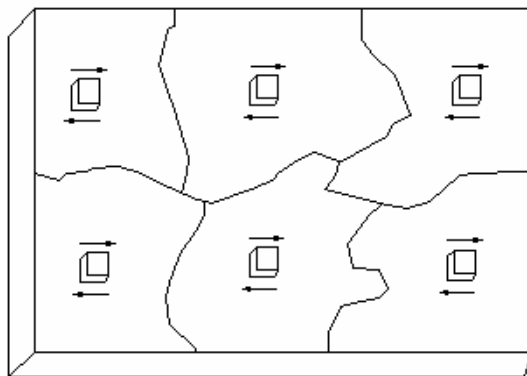


$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (9)$$

Toiseksi nähdään, että korkea jännite voidaan saavuttaa joko käyttämällä paljon kierroksia tai suurta muutosnopeutta. Suuri muutosnopeus voidaan toteuttaa käyttämällä korkeaa taajuutta.

### 3.2 Muuntajan sydän

Muuntajan sydämen tehtävänä on siirtää magneettivuo eri käämien välillä mahdollisimman tehokkaasti. Se valmistetaan limittämällä useita ohuita levyjä päällekkäin. Näin saadaan vähennettyä merkittävästi pyörrevirtahäviöitä. Yleisimmin käytetty sydänmateriaali on muuntajateräs, joka on piiterässeosta. Muuntajateräksen erikoisversio on kidesuunnattu teräs, jota kuva 11 havainnollistaa. Siinä alkeismagneetit ovat samansuuntaisia, minkä ansiosta magneettivuon aikaansaamiseksi tarvittava magneettikentän voimakkuus on pieni. Kidesuunnattu teräs tehdään kylmävalssaamalla. Se on noin kolme kertaa kalliimpaa kuin tavallinen, mutta sen huomattavasti parempien sähköisten ominaisuuksien takia sitä käytetään paljon varsinkin taajuusmuuttajakäyttöihin tulevissa muuntajissa. /15/



**KUVA 11. Kidesuunnattu muuntajalevy.**

Muuntajan magneettisiin ominaisuuksiin vaikuttaa merkittävästi kuinka sen levyt on valssattu sekä lämpö- ja jäähdytyskäsittely. Tällaisilla materiaaleilla kyllästymiseen tarvittava magneettikentän voimakkuus on pieni ja niillä on suuri remanenssivuoto.

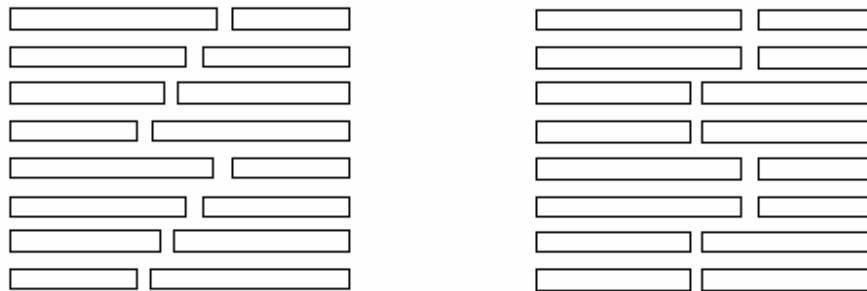
Muuntajalevy on molemmilta puolilta varustettu eristävällä oksidi- tai lakkakerroksella. Laminointi ja eristävä kerros ovat tarpeen, jotta pyörrevirtahäviöt pysyisivät riittävän pieninä. Permeabiliteetit ja vuontiheydet ovat vain suuntaa antavia, sillä ne hieman vaihtelevat valmistajien mukaan. /21/

Muuntajassa energia siirtyy ensiöstä toisioon magneettikentän välityksellä. Muuntajan sydämessä kulkee päävuoto, jonka vuontiheys on korkea, puhtaalla raudalla jopa 2.12 T. Rautaan lisätyt lisäaineet alentavat hieman kyllästysvuontiheyttä.

Magnetointihäviöt voidaan jakaa hystereesihäviöihin ja pyörrevirtahäviöihin. Hystereesihäviöihin vaikuttaa kiteiden suuntaus, epäpuhtaudet raudassa ja levyn sisäiset jännitykset. Pyörrevirtahäviöihin vaikuttavat puolestaan levymateriaalin magneettinen vastus, kidekoko, levyn pinnan eristys sekä levyn paksuus. Kidesuunnatun muuntajalevyn, jonka permeabiliteetti on korkea ( $\mu_r \cong 30\,000$ ), ansiosta vain pieni osa päävuosta kulkee sydämen ulkopuolella, eikä siksi ole merkittävä lähde ulkoiselle vuolulle. Käämien kuormavirta indusoi hajavuon, joka pääasiassa sulkeutuu sydämen ulkopuolitse. /17, 11/

### 3.2.1 Pylväiden ja ikeiden väliset liitokset

Sydämen liitokset pylväiden ja ikeiden välillä ovat muuntajan häviöiden kannalta kriittisiä kohtia. Edullisin liitos saadaan leikkaamalla levyt 45 asteen kulmaan ja latomalla ne limittäin. Liitosvaihtoehtoina käytetään lähinnä kahta limitystapaa, askellimitystä ja juoksulimitystä. Juoksulimitys on hankalampi tehdä koneellisesti, mutta se on häviöiden kannalta edullisempi. /14/



**KUVA 12. Juoksu- ja askellimitys.**

### 3.3 Muuntajan häviöt ja niiden minimoiminen

Sydämen edestakaisesta magnetoitumisesta syntyy hystereesihäviöitä, joka voidaan minimoida ainoastaan sydänmateriaalin valinnalla. Pyörrevirtahäviöt riippuvat sydänmateriaalista ja sydämen rakenteesta. Sydänmateriaalien näennäinen permeabiliteetti riippuu myös taajuudesta. Rautahäviöitä eli hystereesi- ja pyörrevirtahäviöitä mitataan wateissa kuutiometriä kohden ( $W/m^3$ ) käyttötaajuudella. Ideaalimuuntajassa kaikki vuo on päävuota. Todellisuudessa kuitenkin esiintyy aina jonkin verran hajavuota. Tehoa tarvitaan myös tämän vuon ylläpitämiseen, joten se edustaa hajavuohäviöitä. Hajavuo saadaan minimoitua kytkemällä käämit tiukasti ja sulkemalla magneettipiiri hyvin. /21/ Suunnittelematon hajavuo voi kytkeytyä lähellä oleviin johtimiin ja näin aiheuttaa tehohäviöitä sekä muita haitallisia sivuvaikutuksia.

Sekä ensiö- että toisiokäämit ovat resistiivisiä, joten molemmissa syntyy  $i^2R$ -häviöitä. Näitä kutsutaan kuparihäviöiksi, eroten yllä mainituista sydänhäviöistä. Kaikki häviöt päätyvät lopulta lämmöksi. Toinen kuparihäviöiden lähde on virranahtoilmiö. Virranahtoilmiö syntyy, koska johteen vaihtovirtaresistanssin on suurempi kuin tasavirtaresistanssin. Tämä on seurauksena siitä, että vaihtovirta johtuu pääasiassa johtimen pinnalla, koska johtimen keskustaa ympäröi suurempi magneettivuo ja sillä on näin ollen suurempi induktanssi kuin johtimen ulommilla osilla. Virranahtoilmiö riippuu taajuudesta ja on näin merkityksellinen tekijä mitoitettaessa taajuusmuuttajan perään tulevaa muuntajaa. Normaalilla 50 Hz taajuudella toimivaa muuntajaa mitoitettaessa,

virranahtoa ei tarvitse huomioida. Eräs tapa vähentää taajuusmuuttaja käyttöön tulevan muuntajan virranahdosta johtuvia häviöitä on käyttää käämityksissä Litz-johdinta. Litz-johdimessa johdin on tehty useista toisistaan eristetyistä säikeistä. Toinen keino on käyttää litteää kuparinauhaa tai alumiinifoliokäämitystä. /10/

Tehohäviöt sydämessä voidaan laskea hyvällä tarkkuudella eri materiaaleille, joilla on erilaiset vuontiheydet tai taajuudet, häviöistä mitattujen käyrien perusteella. Tavallisesti käytetään hystereesi- ja pyörrevirtahäviökäyriä.

### 3.3.1 Kuparihäviöt

Kuparihäviöihin vaikuttaa lähinnä kuormitusvirta. Kuormitusvirran kasvatus lisää nelillisesti kuparihäviöitä, kuten kaavasta 10 nähdään. Lisäksi lämpötilan vaikutus käämien resistanssien suuruuteen riippuu käytettävästä käämimateriaalista, sillä se määrää käämitysten ominaisresistiivisyyden. /13/ Koska nämä häviöt koostuvat lähinnä muuntajan käämitysten resistansseissa muodostuvista häviöistä, voidaan ne kirjoittaa muotoon

$$P_R = 3(R_1 + R_2')I_1^2, \text{ missä} \quad (10)$$

$R_1$  = ensiökäämityksen aiheuttama resistanssi

$R_2'$  = toisiokäämityksen aiheuttamaresistanssi redusoituna ensiöön

$I_1$  = ensiövirran tehollisarvo.

Resistanssin riippuvuus lämpötilasta voidaan taas kirjoittaa muotoon

$$R = \rho_{RES} \frac{l}{A}, \text{ missä} \quad (11)$$

$\rho_{RES}$  = aineen ominaisresistiivisyys,

$l$  = kappaleen pituus ja

$A$  = kappaleen pinta-ala.

Aineen ominaisresistiivisyyden vaikuttaa lämpötila yhtälön 12 mukaisesti

$$\rho_{RES} = \rho_{RES0}(1 + \alpha_{RES}\Delta T), \text{ missä} \quad (12)$$

$\rho_{RES0}$  = aineen ominaisresistivisyys normaaliolosuhteissa,

$\rho_{RES}$  = aineen resistivisyyskerroin ja

$\Delta T$  = lämpötilan muutos normaaliolosuhteisiin nähden.

### 3.3.2 Pyörrevirtahäviöiden laskeminen

Hajavuon aiheuttamat pyörrevirtahäviöt johtimissa ovat yleensä paljon pienemmät kuin virran aiheuttamat häviöt, mutta taajuusmuuttajan syöttämä epäsinimuotoinen virta muuntajaan voi kasvattaa ne merkittäviksi. AC-virralla syntyvä vaihtomagneettivuo indusoi hyvin sähköä johtavaan materiaaliin induktiovirran, jota kutsutaan pyörrevirraksi. Pyörrevirta aiheuttaa ympärilleen magneettivuon ja magneettikentän. Pyörrevirran suunta on Lenzin lain mukaisesti sellainen, että syntynyt magneettikenttä pyrkii kumoamaan aineeseen tunkeutuvaa indusoivaa magneettikenttää. /26/

Muuntajan sydämen pyörrevirtoja tarkasteltaessa jokaisella levyllä on yz-tasossa samat magneettiset olosuhteet. Tarkastelu voidaan siten rajoittaa yksikkölevyyn. Pyörrevirrat voidaan laskea esimerkiksi kaavan 13 mukaan.

$$P_e = \frac{V_s (\pi f d B_{MAX})^2}{6\rho}, \text{ missä} \quad (13)$$

$V_s$  = sydämen tilavuus,

$f$  = taajuus,

$B_{max}$  = magneettivuontiheyden maksimiarvo,

$d$  = muuntajasydämen leveys ja

$\rho$  = muuntajasydämen ominaisresistivisyys.

### 3.3.3 Hystereesihäviöt

Raudan magneettisten ominaisuuksien epälineaarisuus aiheuttaa hystereesihäviöitä, sillä rautaan jää ulkoisen kentän vaikutuksesta remanenssivuo, joka on poistettava vas-

takkaissuuntaisen ulkoisen magneettikentän avulla raudassa vaikuttavan jäännösvuon eliminoimiseksi. Jäännösvuo aiheutuu, koska aiemmin vaikuttaneen magneettikentän vaikutuksesta raudan alkeismagneetit ovat kääntyneet kentän suuntaisiksi ja ulkoisen kentän hävitessä jää osa alkeismagneeteista silti hävinneen kentän suuntaisiksi muodostaen jäännösvuon. Alkeismagneettien kääntyminen ulkoisen kentän suuntaisiksi synnyttää häviöitä raudassa, mikä puolestaan lämmittää muuntajan sydänrakenteita. Häviöiden pienentämiseksi käytetäänkin usein kidesuunnattua terästä, jonka avulla syntyviä häviöitä voidaan pienentää. /5/

Pelkkien hystereesihäviöiden suuruus voidaan laskea yhtälön 14 avulla:

$$P_h = \eta V_s f (B_{\max})^g, \text{ missä} \quad (14)$$

$\eta$  = sydämen ominaisuuksista riippuva vakio

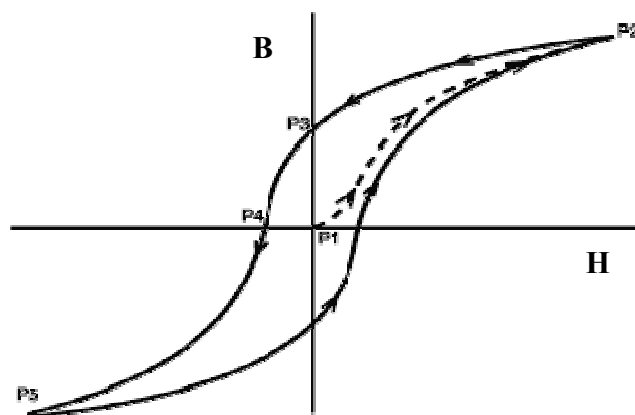
$V_s$  = sydämen tilavuus

$f$  = taajuus

$B_{\max}$  = magneettivuontiheyden maksimiarvo ja

$g$  = Stenmetzin vakio, jonka arvo vaihtelee eri materiaalien välillä 1,6...2,5

Kuvasta 13 voidaan nähdä hystereesin vaikutus ferromagneettisissa materiaaleissa.

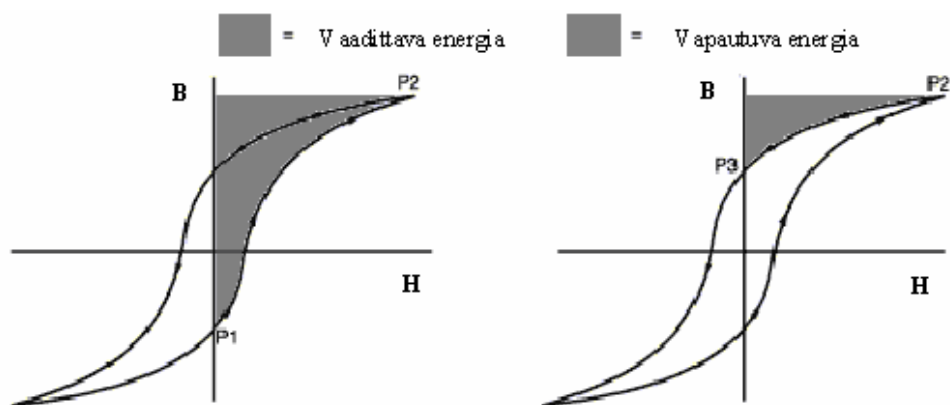


KUVA 13. Hystereesisilmukka. /25/

Pisteessä 1 magneettivuon tiheys ja magneettikentän voimakkuus ovat nolla. Kun magneettikentän voimakkuus kasvaa, kasvaa vuo kuvassa katkoviivaa pitkin kunnes

saavutetaan esimerkiksi P2. Tätä käyrää kutsutaan alkuperäiseksi magnetisaatiokäyräksi (*initial magnetization curve*). Jos pisteestä 2 kentän voimakkuutta vähennetään vastaavasti kuin sitä aiemmin kasvatettiin, niin vuon arvo ei tipu yhtä nopeasti kuin alkuperäisellä magnetisaatiokäyrällä. Näin ollen, kun käytetty kenttä palautetaan nolnaan, niin vuon arvo ei vastavuoroisesti palaudukaan nolnaan, vaan jää tasolle P3. Ilmiötä kutsutaan jäännösmagnetismiksi ja tähän perustuu myös kestmagneetti. Jotta vuo saataisiin takaisin arvoon nolla, kuvassa P4, on kentän voimakkuuden käännättävä.

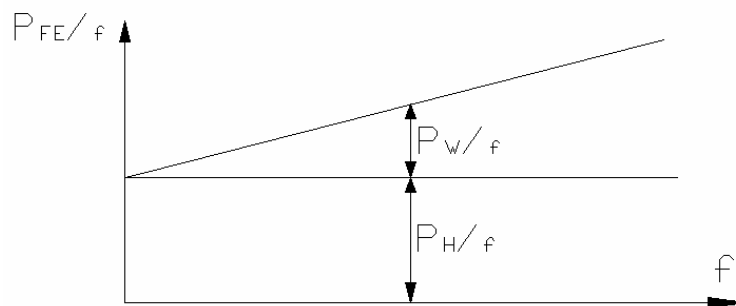
Hystereesisilmukka näyttää, kuinka paljon energiaa on käytettävä jäännösmagnetismin kumoamiseen. Kuvassa 14 vasemmanpuoleinen silmukka osoittaa, kuinka paljon on kulutettava energiaa, jotta magneettikenttä pysyisi vakaana. Oikeanpuoleinen silmukka vuorostaan osoittaa, paljonko energiaa vapautuu, kun magneettikentän voimakkuus tippuu nolnaan. Näiden erotuksena siis muodostuu hystereesihäviö. Mitä pienempi silmukan pinta-ala on, sitä pienempi on hystereesihäviö ja päinvastoin. Pieneen pinta-alaan päästään käyttämällä muuntajan sydänmateriaalina magneettisesti pehmeitä aineita, kuten piillä seostettua rautaa. Lisäksi häviö on karkeasti verrannollinen vuon tiheyden neliöön. /25/



KUVA 14. Hystereesihäviön määrittelmä. /25/

### 3.3.4 Rautahäviöiden riippuvuus taajuudesta

Hystereesi- ja pyörrevirtahäviöiden suhteellinen osuus kokonaishäviöistä riippuu taajuudesta ja vuontiheydestä. Osuudet voidaan määrittää mittaamalla kokonaishäviöt kullakin vuontiheydellä usealla taajuudella. Tuloksista piirretään kuvan 15 mukainen kuvaaja, jossa pystyakselilla on häviöt jaettuna taajuudella ja vaaka-akselilla taajuus.



KUVA 15. Hystereesi- ja pyörrevirtahäviöiden erottaminen.

Kuvasta 15 nähdään kuinka hystereesihäviöt ovat vakiot riippumatta taajuudesta ja pyörrevirta häviöt kasvavat lineaarisesti taajuuden kasvaessa.

### 3.3.5 Tasakomponentti

Taajuusmuuttajassa syntyvä pieni jännitteen tasakomponentti yhdessä muuntajan käämin pienen tasavirtaresistanssin kanssa synnyttää suuren tasavirran, joka kyllästää muuntajan rautasydäntä. Muuntajien magneetioimisvirtaan syntyy lisää yliaaltoja, joiden joukossa on myös parillisia yliaaltoja. Muuntaja toimii tällöin ikään kuin tasakomponentin ohjaamana yliaaltoja synnyttävänä magneettisena vahvistimena. Vuon tasakomponentti suurentaa magneetointihäviöissä nimenomaan raudan hystereesihäviöitä, sillä tasakomponentti muuttaa hystereesisilmukoita epäsymmetrisiksi ja tällöin niiden pinta-ala kasvaa. /14, 20/ Katkaistulla yläikeellä saadaan pienennettyä taajuusmuutta-



jan jännitteen sisältämän tasakomponentin aiheuttaman tasavirran vaikutuksia muuntajan sydämessä.

### 3.4 Kuiva ja -öljymuuntaja

Öljyeristeinen muuntaja tarjoaa hyvän teknisen ja taloudellisen ratkaisun, mutta öljyn aiheuttamasta paloturvallisuus- ja ympäristöriskistä johtuen on kuivamuuntaja ratkaisu suositeltavampi sisätiloihin. Kuivamuuntajan jäähtyminen perustuu ilman, joko vapaaseen tai puhaltimella tehostettuun, jäähdytykseen. Kuivamuuntaja valmistetaan palamattomista tai vaikeasti syttyvistä materiaaleista, joiden palokuorma on hyvin pieni. Eräs paljon käytetty materiaali on epoksi-lasikuitueriste, joka voidaan mitoittaa kestämään samat koestusjännitteet kuin öljymuuntaja.

## 4 MUUNTAJA TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTTÖISSÄ

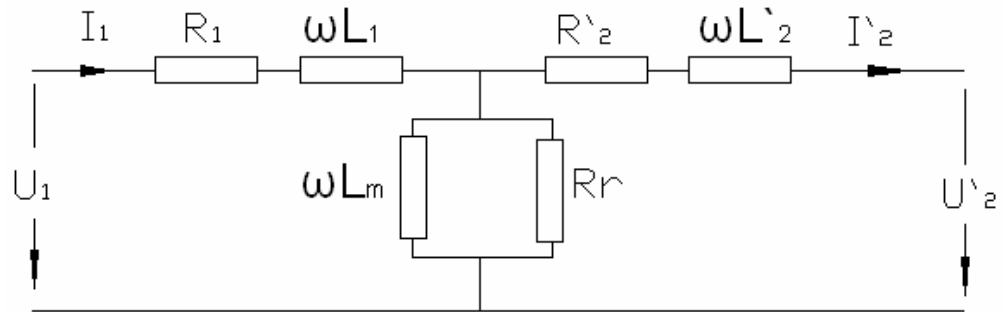
Aiemmin on esitelty erikseen taajuusmuuttajaa ja muuntajaa sekä niitä haittoja, mitä taajuusmuuttaja aiheuttaa syöttämälleen sähkölle. Tässä kappaleessa käsitellään joitakin asioita, joita on huomioitava taajuusmuuttajakäyttöön tulevia muuntajia suunniteltaessa.

Taajuusmuuttajan jännitteet ja virrat sisältävät perusaallon ohella yliaalloja ja joissakin tapauksissa myös tasakomponenttia. Näiden vaikutuksesta muuntajan häviöt kasvavat huomattavasti:

- jännitteen yliaallot aiheuttavat rautahäviöitä muuntajan sydämessä,
- virran yliaallot aiheuttavat häviöitä käämityksissä ja muuntajan metallisissa rakenneosissa ja
- jännitteen tai virran tasakomponentti kasvattaa rautahäviötä muuntajan sydämessä. /20/

#### 4.1 Taajuuden muuttumisen ja yliaaltojen vaikutukset muuntajaan

Muuntajan yksivaiheinen sijaiskytkentä on esitetty kuvassa 16.



**KUVA 16. Muuntajan yksivaiheinen sijaiskytkentä.**

Kuvassa

$U_1, I_1$  = ensiökäämin jännite ja virta,

$U'_2, I'_2$  = toisiokäämin redusoitu jännite ja virta,

$R_1, \omega L_1$  = ensiön resistanssi ja reaktanssi,

$R_r, \omega L_m$  = rautahäviöitä vastaava resistanssi ja magnetointi reaktanssi ja

$R'_2, \omega L'_2$  = toision redusoitu resistanssi ja reaktanssi.

Sijaiskytkennän kaikki parametrit ovat taajuudesta riippuvia. Taajuusriippuvuudet ovat hankalia käsitellä laskennallisesti niiden epälineaarisuudesta johtuen. Lisäksi komponenttien arvot riippuvat lämpötilasta ( $R_1$  ja  $R'_2$ ) ja kyllästystilan muutoksista ( $X_m$  ja  $R_r$ ). /4/ Laskentaa hankaloittaa vielä virran ja jännitteen yliaallot. Suositeltava tapa ratkaista yliaaltojen vaikutukset muuntajaan on käsitellä kukin yliaalto erikseen ja summata lopuksi eritaajuisten komponenttien vaikutukset yhteen. Jännitekäyrän yliaallot suurentavat muuntajan tyhjäkäyntihäviöitä. Tämän vaikutusta ei yleensä huomioi-da, mutta käytöissä, missä muuntaja on taajuusmuuttajan ja moottorin välissä, jännitteen epäsinimuotoisuus vaikuttaa rautasydämen mitoitukseen, ja tarvitaan joko erikoismuuntaja tai riittävät suodattimet taajuusmuuttajan perään.

### 4.1.1 Käämitys

Käämityksien resistanssi riippuu voimakkaasti taajuudesta, koska hajavuon indusoimat pyörrevirrat aiheuttavat virranahtoa johtimelle. Taajuusmuuttajakäyttöihin tulevat muuntajat, joissa esiintyy huomattavia yliaaltoja, käämitään herkemmin alumiinifolio- tai lattakupari-käämityksellä verrattuna saman tehoalueen jakelumuuntajiin. Alumiinifolio- ja lattakuparikäämityksillä ei tapahdu niin suurta virranahtoa kuin pyörölankakäämityksessä.

## 4.2 Muuntajan kytkennät taajuusmuuttajakäytössä

Taajuusmuuttajakäytössä on muuntajan kytkennöissä huomioitava tiettyjä seikkoja, joita esitellään seuraavaksi.

### 4.2.1 Maadoitus

Kun muuntajaa syöttävä syöttöverkko on maadoitettu, ei muuntajan ensiötä voida maadoittaa tähtipisteestä. Tämä johtuu siitä, että taajuusmuuttajan vuoksi kuorman tähtipiste on jännitteinen syöttävän verkon tähtipistettä vastaan. Mikäli syöttöverkko on maasta erotettu, ei muuntajan ensiön tähtipistettä tule maadoittaa, koska tällöin muutetaan syöttöverkko maadoitetuksi. Jos moottorin tähtipiste on esillä, se voidaan yhdistää muuntajan toision tähtipisteeseen. Tästä voi olla tosin enemmän haittaa kuin hyötyä, koska näin muodostuu kulkutie kolmella jaollisille virtayliaalloille. /20/

### 4.2.2 Ensiö

Muuntajan ensiön kytkennällä ei ole merkitystä jännitteiden yliaaltosisällön amplitudiin, mutta vaihekulmat riippuvat kytkennästä ja siten myös jännitteiden käyrämuoto vaihtelee kytkennän mukaan. Tällä seikalla ei ole kuitenkaan huomattavaa merkitystä yliaaltojen aiheuttamiin haittoihin muuntajassa, joten yliaaltojen osalta ei ole merkitys-

tä onko ensiö kytketty tähteen vai kolmioon. Kolmiokytkennällä saadaan kuitenkin pienempi vuontiheys samalla mitoituksella verrattuna tähtikytkentään. Näiden seikkojen johdosta ensiö kannattaa kytkeä kolmioon. /14, 20/

#### **4.2.3 Toisio**

Toisio kytkennällä ei ole merkitystä muuntajan toiminnan kannalta. Mikäli muuntajan perään tulisi kiinteästi jokin moottori, niin muuntajan toisio kytkettäisiin samaksi kuin moottorin kytkentä. Näin moottoriin saadaan periaatteessa pienempi vuontiheyden huippuarvo. /20/

## **5 SÄHKÖKONEKORJAAMON KOEKENTÄLLE TULEVA KÄYTTÖ**

Tässä kappaleessa mitoitetaan molemmat käyttöön tulevat muuntajat. Teholtaan riittävä taajuusmuuttaja löytyi sitä vastoin jo valmiina yrityksen varastolta. Näin taajuusmuuttajaa ei ole varta vasten suunniteltu tähän käyttöön, jonka johdosta joudutaan tekemään joitakin erityisratkaisuja. Taulukossa 2 on taajuusmuuttajan tiedot.

**TAULUKKO 2. Taajuusmuuttajan kilpiarvot.**

Type	ACS607-0610-6
Code	58984418
No	1355EFD13 2/2
Date	05 / 1998
Class	IP 22
U1	690 V
I1	511 / 434
f1	48-69 Hz
Ik1s	50 kA
U2	0-U1
I2	504 / 428 A
f2	0-300 Hz

Taajuusmuuttaja on jännitteeltään 690 voltia ja sitä syöttävä verkko on 400 voltia. Koska taajuusmuuttajaan tuleva jännite ei saa alittaa 60 %:a sen nimellisjännitteestä, on taajuusmuuttajan eteen laitettava muuntaja, joka nostaa verkon 400 voltin jännitteen 690 volttiin. Molempia muuntajia mitoitettaessa on huomioitava taajuusmuuttajan taseasuuntaussillan aiheuttamien yliaaltojen lisäkuormitukset.

Taajuusmuuttaja on tavallinen 6-pulssi-ratkaisu. Jos taajuusmuuttaja olisi suunniteltu varta vasten tähän käyttöön, olisi harkittu myös 12-pulssi-ratkaisua. 12-pulssi-järjestelmä vähentää verkon virtavääristymiä noin 50 % ja jännitevääristymiä noin 30 % verrattuna 6-pulssi-järjestelmään.

## 5.1 Muuntajien näennäistehon mitoitus

Muuntajien mitoituksessa ei lähdetä hakemaan tehoalueeltaan lähintä standardimuuntajaa, vaan muuntajat suunnitellaan ja toteutetaan yksilöinä. Näin toimitaan, koska

muuntajat toteutetaan paloturvallisuussyistä kuivamuuntajaratkaisulla ja taajuusmuuttajakäyttöön tulevat kuivamuuntajat suunnitellaan yksilöinä tapauskohtaisesti.

Kiinteistön pääsulakkeet ovat 500 ampeerin suuriset, mutta muuntajat mitoitetaan 630 ampeerin pääsulakkeiden mukaan. Jos pääsulakkeiden kokoa kasvatetaan myöhemmin 630 ampeeriin, niin muuntajia ei tarvitse vaihtaa tällöin isompiin. Pieni muuntajien ylimitoittaminen ei nosta ratkaisevasti paketin kokonaishintaa, mutta antaa toisaalta suojaa muuntajien ylikuormittumista vastaan.

Muuntajien mitoittamisessa pitää huomioida myös kiinteistön muu kuormitus, joka pitää vähentää pääsulakkeiden suurimmasta mahdollisesta 630 ampeerin virrasta. Kiinteistön muuta kuormitusta ei ole laskettu tässä raportissa, mutta se mitattiin virtapihtimittarilla pääkeskuksesta kiinteistön ollessa tyypillisessä työajan kuormituksessa. Kiinteistössä on kaksi kuivausuunia ja yksi polttouuni. Mittauksen aikana näistä oli päällä vain pienempi kuivausuuni. Muita isompia kuormituksia kiinteistössä ei ole. Suositeltavaa on, että isompaa kuivausuunia ja polttouunia käytettäisiin eri aikaan suurjännitemoottoreiden testauksen kanssa. Vaiheiden kuormitusvirrat näkyvät taulukossa 3.

**TAULUKKO 3. Kiinteistön mitatut kuormitukset vaiheittain tyypillisessä työajan kuormituksessa.**

Vaihe L1 I / [A]	Vaihe L2 I / [A]	Vaihe L3 I / [A]
149	122	132

Muun kiinteistön kuormitukselle olisi hyvä jättää vähän liikkumavaraa ylöspäin. Pääsulakkeiden koosta 630 ampeerista tulisikin vähentää 160 ampeeria muulle kuormitukselle ja näiden erotuksesta saamaa 470 ampeerin virtaa käyttää mitoitettaessa muuntajia.

Muuntajien näennäistehon mitoituksen periaatteena on selvittää muuntajaa suurimmillaan kuormittava virta, joka koostuu syötönvirrasta ja taajuusmuuttajan tasasuuntaus-

sillan aiheuttamien yliaaltojen lisäkuormituksesta. Kun kuormittava virta on selvitetty, voidaan näennäisteho laskea kaavalla 15.

$$S_N = \sqrt{3}UI_{kok} \quad , \text{ missä} \quad (15)$$

$U$  = syötön jännite 400 V ja

$I_{kok}$  = kokonaistehollisvirta.

## 5.2 Yliaaltojen aiheuttama lisäkuormitus

Taajuusmuuttaja syöttää erilaista yliaaltosisältöä verkkoon ja moottorille päin. Seuraavaksi käsitellään näitä yliaaltosisältöjä tarkemmin.

### 5.2.1 Verkon puoleisten yliaaltojen aiheuttamat lisäkuormitukset ja niiden suodattaminen

Taajuusmuuttajan diodisilta ei aiheuta jännitepiikkejä verkkoon, mutta sen sijaan yliaaltojen määrä on suhteellisen suuri. Yliaaltoja käsittelevässä kappaleessa 2.2 todettiin, että 6-pulssisen PWM-taajuusmuuttajan syöttämä yliaaltovirtasärö verkkoon päin on noin 29 %. Laskettu yliaaltovirtasärö verkkoon päin ei kerro kuitenkaan tarkasti, paljonko yliaallot kuormittavat lisää muuntajaa, koska samansuuruinen korkeampi taajuisen yliaaltokomponentti rasittaa enemmän muuntajan käämejä kuin matalampi taajuisen yliaaltokomponentti. Tarkempi yliaaltojen lisäkuormitus selviää kaavalla 16. Se kertoo, kuinka suurelle sinimuotoiselle virralle muuntaja tulisi mitoittaa, jotta se vastaisi samaa rasitusta mitä taajuusmuuttajan virran perusaallon kuormitus lisättynä yliaaltojen aiheuttamalla lisäkuormituksella on.

$$\frac{I_1}{I_N} \leq \sqrt{\frac{1 + a_1}{\left[ \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{I_n}{I_1} \right)^2 + \sum_{n=1}^{\infty} n^q \left( \frac{I_n}{I_1} \right)^2 \right]}}, \text{ missä} \quad (16)$$

$I_1$  = virran perusaalto 470 A,

$n$  = yliaallon järjestysluku 5, 7, 11, 13, ...,

$I_n$  = n. yliaaltovirta,

$a_1$  = virranhahtautuman aiheuttama käämiresistanssin lisäyskerroin perusaallolla 50 Hz  
ja

$q$  = virranhahtautuman aiheuttama käämiresistanssin lisäyksen taajuusriippuvuus.

$a_1$ -lisäyskerroin määräytyy muuntajan koon ja toisiojännitteen mukaan. Tehon ollessa 400 kVA ja toisiojännitteen ollessa 690 volttia lisäyskerroin on 0,05. Virranhahtautuman taajuusriippuvuus on muuntajan rakenteellinen muuttuja, jonka arvoon vaikuttaa se, missä kohtaa muuntajaa lisähäviöt syntyvät. Foliokäämisellä muuntajalla arvo on noin 1,5 ja lankakäämein varustetulla muuntajalla noin 1,7. Tässä tapauksessa, kun ei tiedetä muuntajan käämityyppiä, käytetään huonompaa arvoa 1,7.

Taajuusmuuttajan diodisillalla toteutetun tasasuuntaussillan syöttämät yliaallot ideaalitalanteessa verkkoon päin esiteltiin kappaleessa 2.2 ja todistettiin likiarvillisesti oikeaksi liitteissä 4-7. Näillä arvoilla laskettuna, kaavalla 16 saadaan virta-arvo, joka vastaa sinimuotoisen virran aiheuttamaa 900 ampeerin kuormitusta.

Yliaaltojen aiheuttaman suuren lisäkuormituksen takia on syytä miettiä yliaaltojen suodattamista. Yliaaltojen suodatusta voidaan toteuttaa kappaleessa 2.2.3 esiteltyjen ratkaisujen avulla. Yliaaltojen suodatus voidaan toteuttaa joko passiivisuodatuksella, aktiivisuodatuksella tai näiden yhdistelmällä. Kyseisessä käytössä teho on niin suuri, että aktiivisuodatus tulisi huomattavasti kalliimmaksi ja vaadittava suodatustarkkuus ei vaadi aktiivisuodatusta, joten valinta kohdistuu passiivisuodattimeen.

Tarkastellaan seuraavaksi, paljonko passiivisuodatin jossa on 5-, 7- ja 11-yliaallon suodatukset, vähentävät muuntajaan kohdistuvaa kuormitusta. Passiivisuodatin muodostaa pieni-impedanssisen sulkeutumistien sille yliaallolle, joka halutaan suodattaa. Näin yliaalto kulkeutuu lähes kokonaan suodattimeen, eikä kuormita muuntajaa ja siitä edelleen verkkoa. Pieni osa suodatetusta yliaallosta kuitenkin ohjautuu muuntajalle. Tämä osa vaihtelee hieman riippuen muuntajan impedanssista ja suodattimen impe-



danssista suodatettavalle yliaallolle. Tässä käytetään arviota, että 10 % suodatettavista yliaalloista kuormittaa muuntajaa. Passiivisuodattimen kanssa kaavalla 16 laskettuna diodisillan syöttämät yliaallot yhdessä 470 ampeerin perustaajuisen komponentin kanssa kuormittavat muuntajaa 670 ampeerin sinimuotoisella kuormituksella.

## 5.2.2 Taajuusmuuttajan moottorin puoleiset häiriöt ja niiden suodattaminen

Nykyisillä IGBT-transistoreilla toteutettujen vaihtosuuntaajien, joiden kytkentäaajuudet ovat kilohertsien luokkaa, ongelma ei ole yliaaltojen aiheuttama lisäkuormitus vaan jännitepiikit, jotka esiintyvät kytkentäaajuudella ja sen monikerroilla. Tämä todettiin myös liitteessä 3. näkyvässä OrCad-ohjelmalla tehdyssä simuloinnissa. IGBT-transistorit aiheuttavat pienen jännitteiden epäsymmetrian, mutta se voidaan katsoa merkityksettömän pieneksi muuntajia mitoitettaessa.

Jännitepiikkejä varten taajuusmuuttajassa on du/dt-suodatin. Lisäksi du/dt-suodatin pyöristää vaihtosuuntaajan luoman sakaramuotoisen jännitteen reunoja sekä loiventaa taajuusmuuttajan tehoelektroniikkakomponenttien suurista kytkentäaajuuksista aiheutuvia suuria jännitteen nousunopeuksia. Tämä suodatin riittääkin suodattamaan taajuusmuuttajan luoman lähtöjännitteen niin, että taajuusmuuttajan ja moottorin väliin tuleva jännitteennostomuuntaja voidaan mitoittaa huomioiden vain sinimuotoinen 470 ampeerin virta.

## 5.3 Muuntajien valinnat

Tässä kappaleessa mitoitetaan muuntajat edellä laskettujen sekä simuloitujen arvojen pohjalta. Lisäksi valitaan sopivat jännitteet muuntajiin.

### 5.3.1 Verkkomuuntajan valinta

Taajuusmuuttajan verkon puoleiseen muuntajaan laskettiin kohdistuvan diodisillan syöttämien yliaaltojen johdosta 900 ampeerin sinimuotoinen kuormitus 470 ampeerin perustaajuisella virralla. Taajuusmuuttajan perään asennettaessa passiivisuodatin, jossa on 5-, 7- ja 11-yliaallon suodatus, laskettiin muuntajaan kohdistuvan 670 ampeerin kuormitus. Näissä laskuissa käytettiin kuitenkin diodisillan ideaalilanteessa syöttämiä yliaaltojen suuruuksia, koska on hyvin hankalaa laskea diodisillan syöttämää tarkkaa yliaaltosisältöä, kun ei tiedetä tarkasti esimerkiksi tulevaa muuntajaa.

Simulointituloksissa liitteissä 6 ja 7 näkyy, että diodisillan aiheuttamat yliaaltovirrat verkkolle ovat hyvin lähellä teoriassa esitettyjä arvoja. Simuloinnin lähtökohtana oli, että sillä ei yritetä hakea tarkkoja käytön yliaaltojen suuruuksia vaan varmistaa teorias- sa laskettujen tuloksien likiarvo oikeaksi. Näin simuloinnissa käytettyjen komponenttien arvot eivät ole tarkasti sitä mitä ne mallintavat, mutta ovat suuruusluokaltaan oikeat. Liitteitä on tämän takia kaksi ja toiseen on vaihdettu hieman komponenttien arvoja, jotta kävisi ilmi, ettei yliaaltosisältö muutu merkittävästi vaikka komponenttien arvot hieman vaihtelevat. Ainoa merkittävä komponentti oli vastus  $R_{load}$ , jolla mallinnettiin kuormitusta. Siinä isommalla vastusarvolla, eli pienemmällä kuormitusvirralla oli suurempi suhteellinen yliaaltosisältö ja päinvastoin.

Tässä työssä ei anneta tarkkoja taajuusmuuttajan verkkolle aiheuttamia yliaaltosisältöjä, koska parhaaseen lopputulokseen päästään, kun tyydytään tässä vaiheessa pelkkiin likiarvomääriin ja mitoitetaan niillä muuntaja niin, että siinä on passiivisuodatin 5-, 7- ja 11-yliaallolle käyttäen edellä laskettua 670 ampeerin virtaa. Sitten kun suurjännitemoottoria ajetaan, mitataan diodisillan syöttämä tarkka yliaaltosisältö. Tästä mitatusta arvosta lasketaan millaisella perustaajuisella virralla muuntajaa voidaan kuormittaa ja asetellaan tämän mukaan taajuusmuuttajaan virtaraja. Mikäli tätä rajaa halutaan nostaa, hankitaan käyttöön passiivisuodatin, jossa on haluttu määrä suodatettavia yliaaltoja. Näin ollen muuntajan näennäistehoksi 400 voltin jännitteellä kaavalla 15 laskettuna saadaan 464 kVA.

Muuntajan ensiön jännitteeksi valitaan verkon jännite 400 voltia ja toision jännitteeksi taajuusmuuttajan nimellisjännite 690 voltia. Muuntajan ja taajuusmuuttajan väliin mahdollisesti tuleva imupiiri laskee jännitettä hieman, mutta on merkityksetön seikka.

### 5.3.2 Moottorimuuntajan valinta

Kuten kappaleessa 5.2.2 todettiin, jännitteennostomuuntaja, joka tulee taajuusmuuttajan lähtöpuolelle, voidaan mitoittaa virran perustajuisen komponentin 470 ampeerin mukaan. Tällöin muuntajan näennäistehoksi 400 voltin jännitteellä kaavalla 15 lasketuna saadaan 326 kVA.

Muuntajan ensiön jännitteeksi valitaan taajuusmuuttajan nimellisjännite 690 voltia ja toision jännitteeksi suurjännitemoottoreiden tyypillisimmät jännitteet 3-, 6- ja 10 kV.  $du/dt$  suodatin laskee jännitettä suurimmillaan 2-3 %, mutta se katsotaan merkityksettömäksi seikaksi. Jännitteet saadaan yhdellä väliotolla muuntajasta niin, että muuntajan ollessa kolmioon kytkettynä toisista saadaan väliotona 3 kV ja normaaliotona 6 kV. 10 kV saadaan normaaliotona vaihtamalla muuntajan kytkentä tähteen.

### 5.4 Kaapelien valinta

Käyttöön tulevat Pirellin MCCMK-tyyppiset kaapelit ovat häiriösuojattuja kaapeleita, jotka on tarkoitettu ympäristöihin, joissa esiintyy suurtaajuisia häiriövirtoja ja -kenttiä. Näitä häiriöitä aiheuttaa tässä tapauksessa yleisin häiriöiden aiheuttaja teollisuusympäristössä eli taajuusmuuttaja. Kaapelit on mitoitettu suurimman mahdollisen nimellisvirran ja -jännitteen mukaan. Muuntajan ja testattavan moottorin väliin tulevaa kaapelia on tarkoitus käyttää kaikilla tarjolla olevilla toisiojännitteillä ja siksi se on mitoitettu 3000 voltin jännitteen aiheuttaman virran ja 10 kV jännitteen mukaan. Kaapelit on vähän ylimitoitettuja, koska nämä kaapelityypit olivat kaapelin valmistajan pienimpiä sarjatuotannossa olevia kaapeleita näille jännitteille. Pieni ylimitoitus on merkityksetön kaapeleiden ollessa näin lyhyitä. Taulukossa 4 on valitut kaapelit.

**TAULUKKO 4. Kaapeleiden valinta**

<b>Välille</b>	<b>Kaapeli tunnus</b>
Pääkeskus – Muuntaja 1	MCCMK 3*25/16 AN 1 kV
Muuntaja 1- Taajuusmuuttaja	MCCMK 3*25/16 AN 1 kV
Taajuusmuuttaja – Muuntaja 2	MCCMK 3*25/16 AN 1 kV
Muuntaja 2 – Testattava moottori	AHXCМК-WTC 3*50Al/16Cu 10 kV

## 6 YHTEENVETO

Suurjännitemoottoreiden koestus, kun tarjolla on vain 400 voltin jännite, on järkevintä toteuttaa jännitteennostomuuntajalla ja ohjata moottoria taajuusmuuttajalla. Taajuusmuuttajan ansiosta moottorin verkosta ottama virta laskee huomattavasti verrattuna moottorin suoraan käyttöön. Lisäksi moottori on taajuusmuuttajan ansiosta helposti ohjattavissa. Taajuusmuuttajan haittapuolena ovat sen syöttämät yliaallot verkkoon päin ja jännitepiikit moottorille päin. Näitä varten on taajuusmuuttajan ja moottorin väliin laitettava suodatin, jotta moottorin ja muuntajan käämityksille vaaralliset jännitepiikit suodattuvat. Verkkoon päin lähteviä yliaaltoja on myös tarvittaessa suodatettava.

Työssä päädyttiin siihen lopputulokseen, että taajuusmuuttajan lähtöpuolelle laitettava jännitteennostomuuntaja voidaan mitoittaa virralla, mikä saadaan suurimmillaan syötöstä, eikä siinä tarvitse välittää yliaaltojen aiheuttamasta lisäkuormituksesta. Taajuusmuuttajan lähtöpuolen syöttämiä jännitepiikkejä suodatetaan  $du/dt$  suodattimella. Taajuusmuuttajan etupuolelle laitettava muuntaja mitoitetaan niin, että siinä huomioidaan osittain taajuusmuuttajan aiheuttamat yliaallot verkkoon päin ja sitten kun laitteisto on käytössä mitataan yliaaltojen tarkka sisältö. Mitatun yliaaltosisällön mukaan, joko hankitaan sopiva suodatin tai säädetään taajuusmuuttajan virtaraja riittävän pieneksi, jotta muuntaja ei ylikuormitu.

# LÄHTEET

## Painetut lähteet

- 1 Jakelumuuntajat. Esite. ABB Strömberg.
- 2 ABB Guide to Harmonics with AC Drives. ABB Technical Guide No. 6. 2002.
- 3 Suomalainen ABB-yhtiöt. Teknisiä tietoja ja taulukoita, 10. painos. Ykkös-Offset Oy. Vaasa 2000.
- 4 Bong-Hwan, Kwon – Jae-Hak, Suh – Sung-Hun, Han, Novel Transformer Active Filters. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 40, No. 3, June 1993, s. 385-388.
- 5 Fitzgerald, AE. Electric Machinery. Fifth Edition. McGraw-Hill, 1992. 599 s.
- 6 Kyyrä, Jorma, Suuntaajatekniikka. Luentomateriaali. TKK, Espoo. Espoo 1995. 328 s.
- 7 Lehmusvirta, Juhani, Yliaallot Tampereen kaupungin sähkölaitoksen verkossa. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Sähkötekniikan osasto. Tampere 1982.
- 8 Moran, L.T. – Ziogas, P.D. – Joos, G., Analysis and design of a novel 3- $\phi$  solid-state power factor compensator and harmonic suppressor system. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 25, No. 4, July/August 1989, s. 609-619.
- 9 Nahvi M. – Edminister J., Electric circuits, Third Edition. McGraw-Hill, 1997, s. 404-407.
- 10 Napieralska-Juszczak, E. – Grzybowski, R. – Brudny J.F. Modelling of losses due to eddy currents and hysteresis in converter transformer cores during failure. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 31, No. 3, May 1995, s. 1718-1721.
- 11 Technical data on domain retined ORIENTCORE HI-B ZDKH. Nippon Steel Corporationin julkaisu. Tokio 1991.
- 12 Niiranen, Jouko, Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus. Otatieto Oy. Helsinki 1999. 379 s.

- 13 Pylvänäinen, Jouni, Jakelumuuntajan seurantamenetelmien kehittäminen. TESLA raportti 68/2002. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere 2002.
- 14 Saarinen, Mika, Jänniteennostomuuntajan magnetointi ja ylijännitteet taajuusmuuttajakäytössä. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Sähkötekniikan osasto. Tampere 1993.
- 15 Moottori- ja muuttajakäämitykset. Suomen Sähköurakoitsijaliitto ry:n julkaisu, 1987.
- 16 Taajuusmuuttaja. Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry:n julkaisu. 1997.
- 17 EMC ja rakennusten sähkötekniikka. Sähkötieto ry. 1997, s. 72-73.
- 18 Takeda, M. – Ikeda, K. – Teramoto, A. – Aritsuka, T., Harmonic current and reactive power compensation with an active filter. IEEE PESC 1988, s. 1174-1179.
- 19 Tuusa Heikki – Pallaste Isto, Yliaaltojen kompensointi aktiivisuotimilla. Raportti 1/21 1991. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Sähkötekniikan osasto. Tehoelektroniikka. Tampere 1991.
- 20 Virtanen Esa, Taajuusmuuttajan huomioonottaminen moottorin jänniteennostomuuntajan mitoittamisessa. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Sähkötekniikan osasto. Tampere 1981.

## Sähköiset lähteet

- 21 Helsingin teknillinen korkeakoulu. [sähköinen dokumentti] [viitattu 23.1.2005] Saatavissa:  
<http://lightinglab.fi/VL/Teaching/250/Lightingcontrol/Luku%206%20magneettiset%20liitantalaitteet.pdf>
- 22 Kyyrä, Jorma, Jännitevälipiirillä varustetun vaihtosuuntaajan analysointi avaruusvektorilla. [sähköinen dokumentti] [viitattu 11.12.2004] Saatavissa:  
<http://www.hut.fi/~jkyyra/tehoelektroniikka/jannitevektori.pdf>
- 23 Yliaallot sähköverkossa. Tampereen teknillinen yliopisto. [sähköinen dokumentti] [viitattu 8.1.2005] Saatavissa:  
<http://leeh.ee.tut.fi/laajakaista/vaesto/luku3.html>
- 24 Yliaalloteoria. Tampereen teknillinen yliopisto. [sähköinen dokumentti] [viitattu 12.1.2005] Saatavissa:  
<http://leeh.ee.tut.fi/yliaalto/1.htm>

- 25 Hysteresis loss. University of Surrey, Department of Electronic Engineering. [sähköinen dokumentti] [viitattu 12.2.2005] Saatavissa: [http://www.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/power\\_loss.html#hyst](http://www.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/power_loss.html#hyst)
- 26 Magneettikenttien pienentämismenetelmiä. Tampereen teknillinen yliopisto. [sähköinen dokumentti] [viitattu 20.12.2004] Saatavissa: <http://leeh.ee.tut.fi/raportti1997/luku4.html>
- 27 Sähkömoottorikäytöt. Tampereen teknillinen yliopisto. [sähköinen dokumentti] [viitattu 12.4.2005] Saatavissa: <http://leeh.ee.tut.fi/svtopus/teksti/Luku11.html>

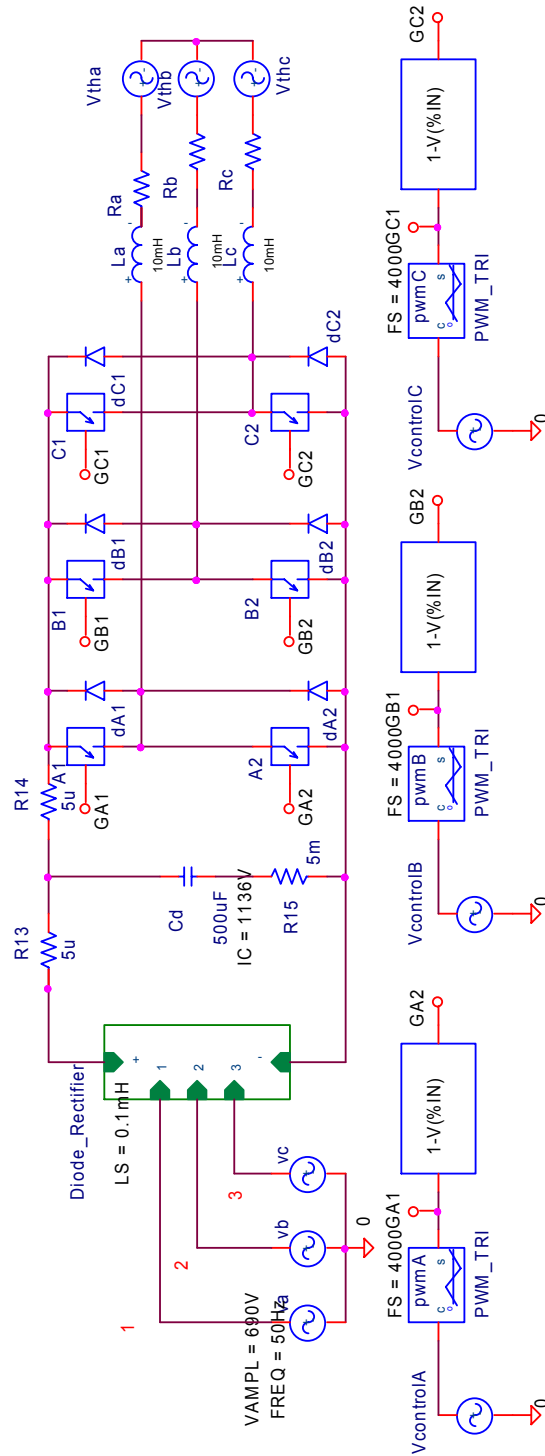


## **LIITTEET**

- Liite 1. Taajuusmuuttajaa mallintava kytkentä
- Liite 2. Virta moottorille päin
- Liite 3. Fourier-muunnos virrasta moottorille päin
- Liite 4. Taajuusmuuttajan diodisilta ja välipiiri
- Liite 5. Virta verkkoon päin
- Liite 6. Fourier-muunnos virrasta verkkoon päin 1/2
- Liite 7. Fourier-muunnos virrasta verkkoon päin 2/2

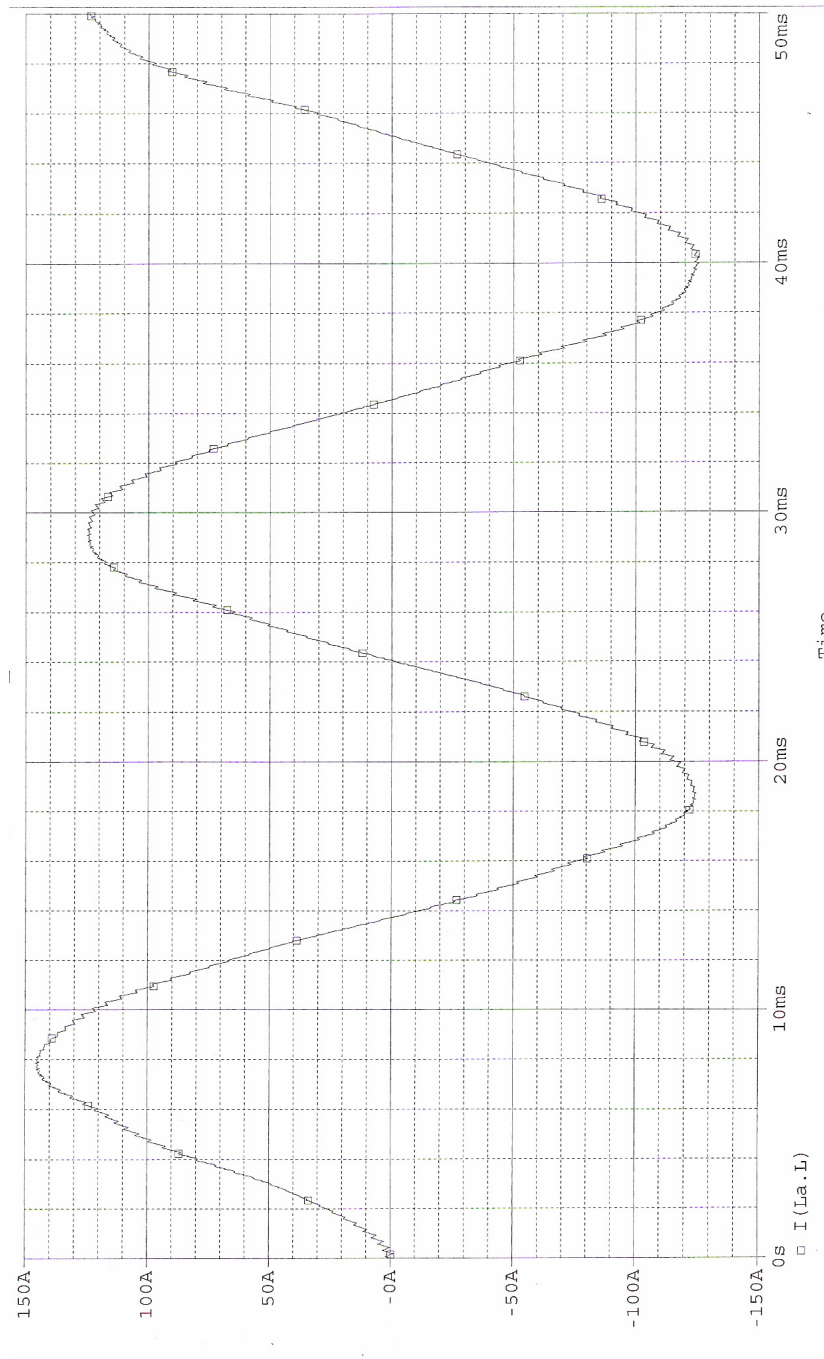
## Taajuusmuuttajaa mallintava kytkentä

Taajuusmuuttajan tasasuuntaus on toteutettu diodisillalla ja vaihtosuuntaus IGBT-transistoreilla. Liitteissä 2 ja 3 on simuloitu moottorille päin lähtevää virtaa.



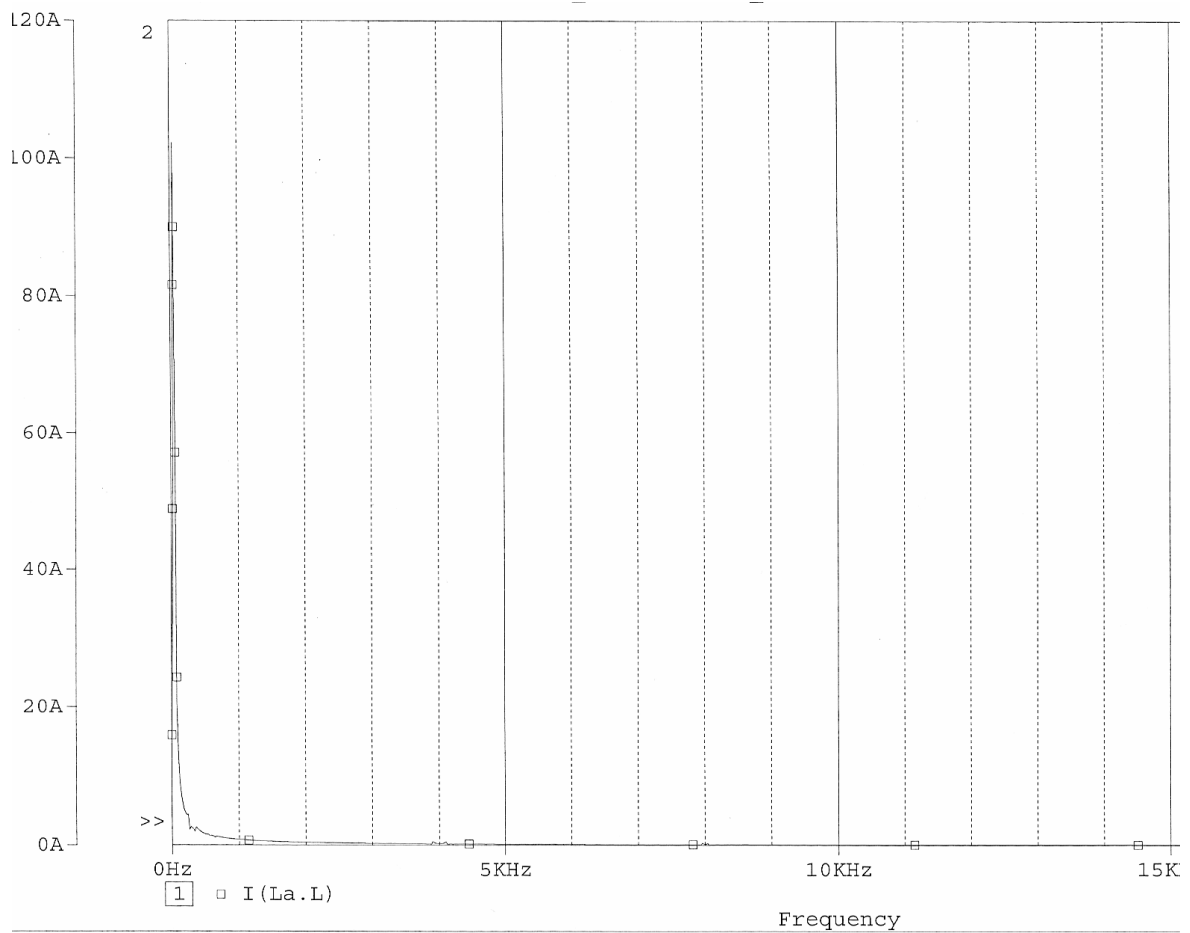
**Virta moottorille päin**

Liitteestä 1 simuloitu virran käyrämuoto moottorille päin. Kuvasta nähdään, että virran käyrämuoto on 4 kHz:n kytkentätaajuudella hyvin sinimuotoista.



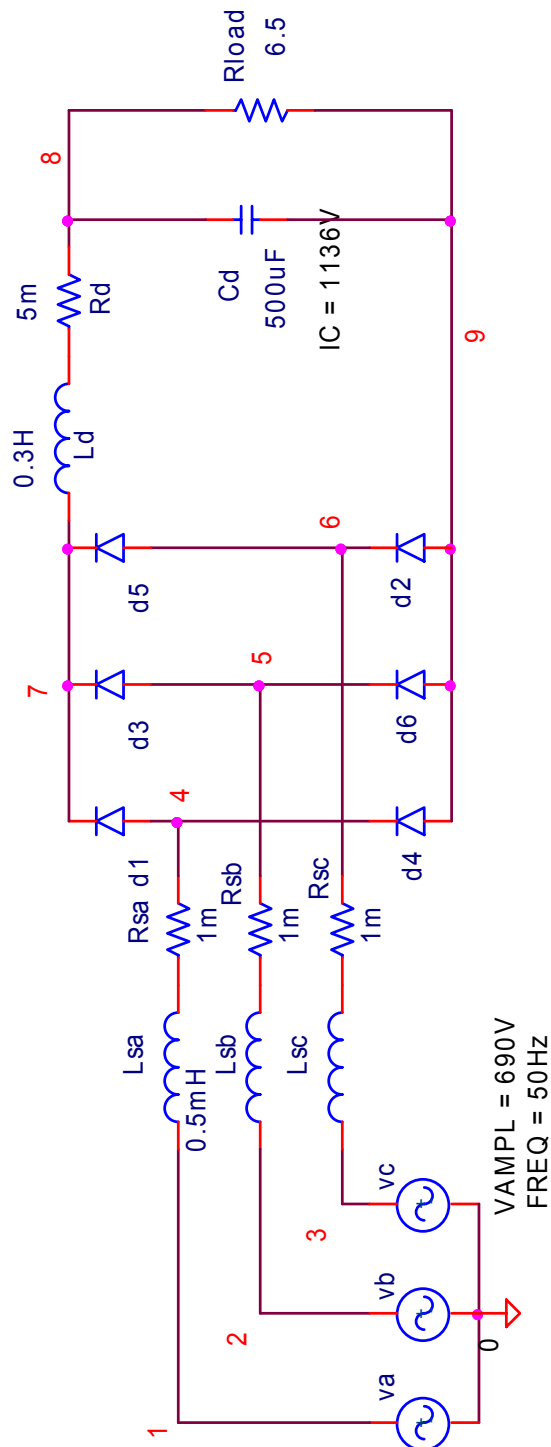
**Fourier-muunnos virrasta moottorille päin**

Liitteen 2 virrasta otettu Fourier-muunnos. Fourier-muunnoksesta nähdään virran eri taajuuksien komponenttien suuruudet. Kuvasta nähdään, että virta ei sisällä muuta kuin perustaajuista komponenttia ja aivan pienet virrat kytkentätaajuudella ja sen monikerroilla.



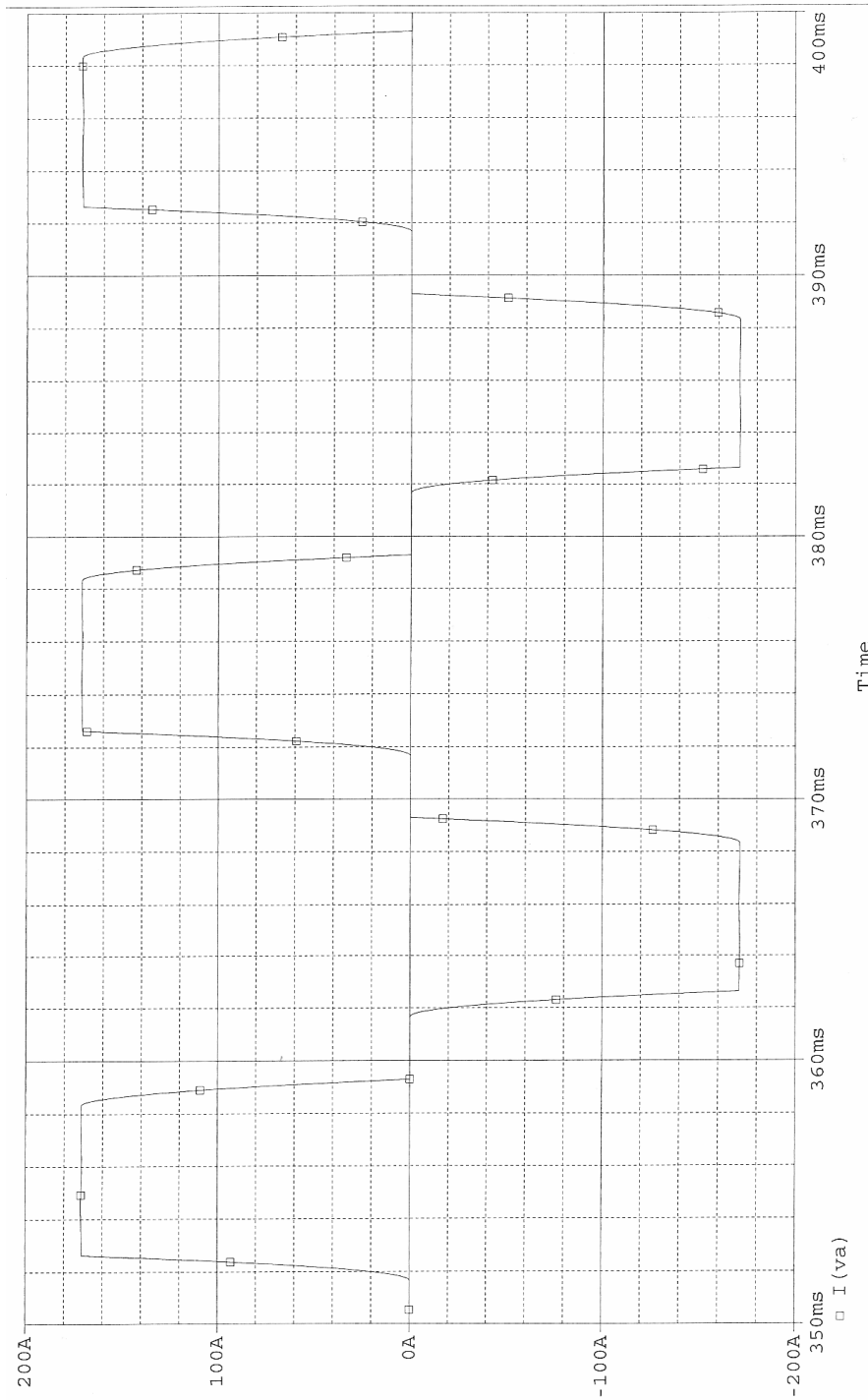
### Taajuusmuuttajan diodisilta ja välipiiri

Kuvan kytkennällä on simuloitu diodisillan verkkoon päin aiheuttaman virran muotoa.



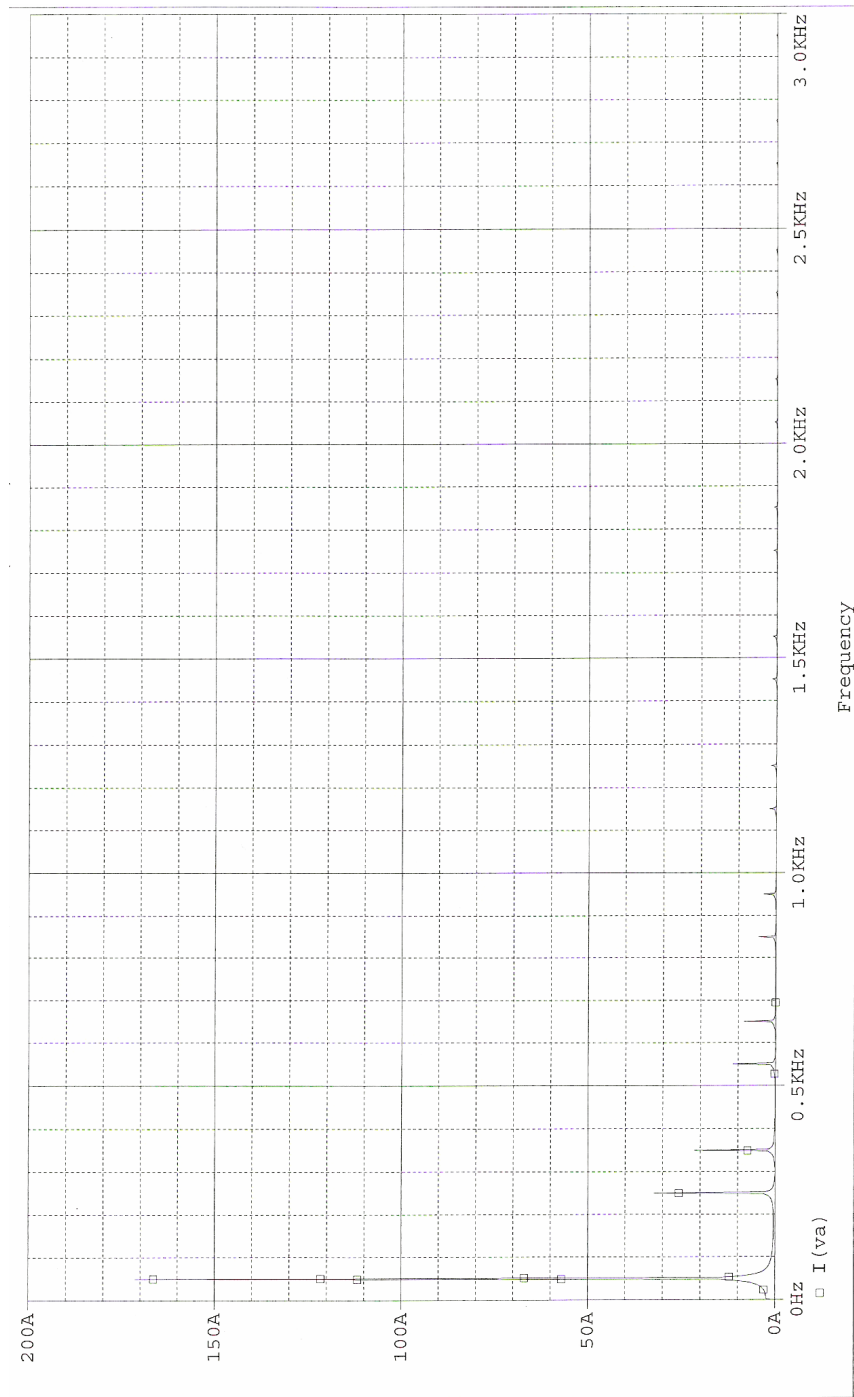
**Virta verkkoon päin**

Kuvassa on simuloitu virran käyrämuoto, jonka diodisilta aiheuttaa verkkoon.



**Fourier-muunnos virrasta verkkoon päin 1/2**

Liitteen 5 virrasta otettu Fourier-muunnos. Kuvasta nähdään, että yliaaltojen sisältö on hyvin lähellä teoriaosuudessa laskettuja arvoja. Ainoastaan korkeammat taajuudet pienenevät enemmän mitä teoriaosuudessa esitelty laskukaava antaa.



### Fourier-muunnos virrasta verkkoon päin 2/2

Liitteen 4 komponenttejen arvoja on muutettu tähän simulointiin niin, että verkkoa kuvaava  $L = 0,05\text{H}$  ja  $R = 1\text{m}\Omega$ , välipiiriä kuvaava  $L = 1,3\text{H}$  ja  $C = 5000\ \mu\text{F}$  ja kuormaa kuvaava vastus  $R_{\text{load}} = 16,5\ \Omega$ .

