

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
SÄHKÖTEKNIIKAN OSASTO

MONIENSIÖINEN MUUNTAJA TAAJUUDENMUUTTAJAKÄYTÖSSÄ

Diplomityön aihe on hyväksytty Lappeenrannan teknillisen yliopiston sähkötekniikan osaston osastoneuvoston kokouksessa 12.10.2005.

Työn ohjaaja ja tarkastaja diplomi-insinööri Anssi Lipsanen
Työn tarkastaja professori Juha Pyrhönen

Lappeenrannassa 5.12.2005

Mikko Valjus
Kauppakatu 4 b A 2
80110 Joensuu
puh. +358 500 376 078

TIIVISTELMÄ

Tekijä: Mikko Valjus
Työn nimi: **Moniensiöinen muuntaja taajuudenmuuttajakäytössä**
Osasto: Sähkötekniikka
Vuosi: 2005
Paikka: Lappeenranta

Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 78 sivua, 32 kuvaa, 3 taulukkoa ja 2 liitettä.

Tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen ja DI Anssi Lipsanen
Hakusanat: moniensiöinen, erikoismuuntaja, *LC*-suodin, rinnakkaiset taajuudenmuuttajat

Suuritehoisissa pumppu- ja puhallinkäytöissä käytetään usein suurnopeusmoottoria, jota syötetään välijännitteellä. Suurjännitetaajuudenmuuttajat ovat kalliita, eikä niitä ole aina edes mahdollista valmistaa. Tutkimuksen kohteena on rinnakkaisilla pienjännitetaajuudenmuuttajilla toteutettu sähkökäyttö, jossa pienjännite nostetaan moniensiöisellä muuntajalla suurjännitteeksi (6,6 kV) ja syötetään edelleen kuormana olevalle suurnopeusmoottorille.

Opinnäytetyössä tutkitaan moniensiöisen muuntajan syöttöä rinnakkaisilla taajuudenmuuttajilla sekä niiden aiheuttamia häiriöitä toisilleen. Työssä tutkitaan myös harmonisten yliaaltojen vaikutuksia muuntajan häviöihin ja magnetointiominaisuuksiin. Taajuudenmuuttajan lähtöjännite ja -virta suodatetaan sinisuotimella, jonka parametreja simuloidaan Simulink-ohjelmistolla. Tavoite on löytää optimaaliset parametrit taajuudenmuuttajan lähtösuotimelle käyrämuotojen ja suotimeen jäävän tehon suhteen.

Työssä tarkasteltiin sinisuodinta, johon jää 3 prosenttia syöttöjännitteestä. *LC*-suodin kompensoi sähkökäytön loistehon lähes kokonaan, joten taajuudenmuuttajien antotehon kannalta suotimet ovat perusteltuja. Taajuudenmuuttajan näennäisteho putoaa 22 prosenttia, joten taajuudenmuuttajat voidaan vastaavasti mitoittaa pienemmiksi.

ABSTRACT

Author: Mikko Valjus
Subject: **Multi-Primary Transformer in the Frequency Converter Drive**
Department: Electrical Engineering
Year: 2005
Place: Lappeenranta

Master's thesis. Lappeenranta University of Technology. 78 pages, 32 figures, 3 tables and 2 appendices.

Supervisors: Professor Juha Pyrhönen and M.Sc. Anssi Lipsanen
Keywords: multi-primary, step-up transformer, *LC* filter, parallel frequency converters

High-speed and high-voltage motors are common in high-power ventilator and compressor drives. High-voltage frequency converters are expensive and sometimes even impossible to manufacture. This study analyses the use of parallel low-voltage frequency converters supplying a multi-primary step-up transformer and a high-speed induction machine.

The thesis addresses parallel low-voltage frequency converters supplying a step-up transformer, and the disturbances caused by these converters. Harmonics and their effects on the characteristics of a special transformer are also investigated. The output voltage and current of the frequency converter are filtered by a sine filter, which has been simulated by Simulink software. The aim of this work is to find optimal parameters for the frequency converter's output filter, which would produce a nearly-sinusoidal voltage and would not consume too much power.

A sine filter was analysed that takes three percent of the frequency converter's output voltage. The capacitor of the *LC* filter compensates the reactive power almost completely. Thus, considering the active power of the inverter, it is advisable to use such a filter. The total reactive power of the frequency converter is reduced approximately by 22 percent, and thus, the frequency converter can be dimensioned accordingly.

ALKUSANAT

Diplomityössä keskitytään tutkimaan erikoismuuntajan ominaisuuksia, kun muuntajan kuormana on suurnopeusmoottori ja muuntajaa syöttää viisi rinnakkaista taajuudenmuuttajaa. Diplomityö on tehty Lappeenrannan teknilliselle yliopistolla (LTY) TEKESin rahoittamana ja on osa TEKESin Climbus-ohjelmaan kuuluvaa ”suuret keskinopeuskäytöt” hanketta.

Haluan lausua kiitoksen työni ohjaajille ja tarkastajille, diplomi-insinööri Anssi Lipsaselle ja professori Juha Pyrhöselle, koska he ovat antaneet arvokkaita neuvoja ja tarvittaessa myös rakentavaa kritiikkiä työn etenemisen kannalta. Työn tekeminen on ollut todella mielenkiintoista ja antoisaa. Tutkimuskohteena erikoismuuntaja on harvinainen, koska vastaavia tutkimuksia on hyvin rajoitetusti. Tämän vuoksi myös lähdemateriaali oli niukkaa.

Haluan kiittää myös perhettäni ja ystäviäni, jotka ovat antaneet tukensa silloinkin, kun ei itsellä ole ollut voimia jatkaa. Erityisesti haluan kiittää tyttöystävääni Tanjaa, joka on jaksanut tukea niin ylä- ja alamäessäkin.

Lisäksi haluan kiittää myös työkavereitani, jotka ovat tarjonneet piristystä arkeen ja ennen kaikkea, keittäneet hyvää kahvia.

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET	3
1 JOHDANTO	9
1.1 Suuret keskinopeuskäytöt-hanke	11
1.2 Prototyypilaitteisto	12
1.2.1 Massiiviroottorinen induktiokone	13
1.2.2 Rinnakkaiset taajuudenmuuttajat	15
1.2.3 Suodatus	16
1.2.4 Erikoismuuntaja	18
1.2.5 Kompensointi	20
1.3 Muuntajan hajavuot	20
1.3.1 Hajavoiden syntymekanismit	21
1.3.2 Käämien päätyilmiöt	23
1.3.3 Hajavuohäviöt	26
1.3.4 Erikoismuuntajan rakenne	35
1.3.5 Erikoismuuntajan kytkeytyminen	37
2 TAAJUUDENMUUTTAJAN LÄHDÖN SUODATUS	39
2.1 Harmonisten yliaaltojen vaikutus muuntajan ominaisuuksiin	41
2.1.1 Harmoniset muuntajan magnetoinnissa	42
2.1.2 Harmoniset muuntajan häviöissä	43
2.2 Taajuudenmuuttajan lähdön käyrämuodot	45
2.2.1 Kytkentätaajuus	47
2.2.2 Modulointiaste	48
2.3 Taajuudenmuuttajan lähtöjännitteen suodatustarve	51
3 PROTOTYYPPILAITTEISTON SIMULOINTEJA	53
3.1 Simulointimallin yksinkertaistukset	54
3.2 Simuloinnin toteutus	57
3.2.1 Kytkentätaajuus	58
3.2.2 Rajataajuus	60
3.2.3 Suotimen jännite	64
3.3 Syöttöjännitteen vaikutus muuntajaan	67

4	YHTEENVETO.....	73
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	75
	LÄHTEET	76

LIITE	I	<i>LC</i> -suotimen siirtofunktio
	II	<i>LC</i> -suotimen jännitteen jako

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

Merkinnät

du/dt	jännitteen nousunopeus
dB/dt	vuontiheyden muutosnopeus
e	jännite
$e_{1,2}$	ensiö- ja toisiokäämin sähkömotorinen voima
f	taajuus
f_h	harmonisen yliaallon taajuus
f_r	resonanssitaajuus
f_s	kytkentätaajuus
h	harmonisen yliaallon järjestysluku
i	virta
i_0	tyhjäkäyntivirta
$i_{1,2,3}$	kuormitushaarojen virrat
i_2	toisiovirta
i_a	lisävirta
i_c	kondensaattorin virta
$i_{c,c}$	kompensointikondensaattorin virta
i_D	tasavirta
$i_{i,o}$	tulo- ja lähtövirta
i_k	oikosulkuvirta
$i_{mo,r,l}$	moottorin resistiivinen ja induktiivinen virta
i_r	rautahäviövirta
i_{THD}	virran kokonaisharmonissärö
k	sarjakehitelmän muuttuja
k	lisäkustannukset
k_{tot}	kokonaiskustannukset
k_w	korjauskerroin
l	johtimen pituus
l_a	käämin aksiaalinen pituus
m	massa
m	muuntosuhde

m_a	modulointiaste
m_f	kytkentätaajuuden ja perustaajuuden suhde
n	pyörimisnopeus
n_n	nimellispyörimisnopeus
s	Laplace-muuttuja
t	aika
t_s	simulointiaika
u_1	ensiön vaihtojännite
u_2	toision vaihtojännite
u_{a0}	pisteen a ja nollatason välinen jännite
u_h	jännitehäviö
$u_{i,o}$	tulo- ja lähtöjännite
u_{kolmio}	kolmioaallon jännite
u_l	induktanssin jännite
u_{ohjaus}	ohjausjännite
u_{res}	resultoiva jännite
A	johtimen poikkipinta-ala
A	vahvistus
A_{hyst}	hystereesisilmukan pinta-ala
Al	alumiini
B	magneettivuontiheys
B_a	aksiaalivuontiheys
B_{ac}	vuontiheyden vaihtokomponentti
B_σ	hajavuontiheys
\mathbf{B}	magneettivuontiheysvektori
C	kompensointikondensaattori
C	kapasitanssi
C_b	kapasitanssin suhteellisarvo
C_f	suotimen kapasitanssi
D_x	diodi
F	jännitteen muotokerroin
F_0	muotokertoimien suhde

F_{1-5}	suotimet
F_{\max}	maksimitaajuus
F_s	näytteenottotaajuus
F_{\sin}	siniaallon muotokerroin
\mathbf{F}	voimavektori
\mathbf{F}_a	akksiaalivoimavektori
\mathbf{F}_r	radiaalivoimavektori
H	magneettikentänvoimakkuus
H_{DC}	kentänvoimakkuuden tasakomponentti
I	virta
I_{1-5}	taajuudenmuuttajat
$I_{1nim, 2nim}$	ensiö- ja toisiokäämin nimellisvirta
I_{DC}	tasavirtakomponentti
I_e	pyörrevirta
I_h	virtayliaallon tehollisarvo
I_{inim}	taajuudenmuuttajan nimellisvirta
I_m	magnetointivirta
\mathbf{I}	virtavektori
L	induktanssi
$L_{1,2,3}$	vaiheet
L_b	induktanssin suhteellisarvo
$L_{f, k}$	suotimen ja kuorman induktanssi
L_m	magnetointi-induktanssi
$L_{r\sigma}$	roottorin hajainduktanssi
L_σ	hajainduktanssi
L'_s	transientti-induktanssi
N	johdinkierrosten lukumäärä
N_1	ensiökäämin johdinkierrosmäärä
P	pätöteho
P_0	tyhjäkäyntihäviöt
P_e	pyörrevirtahäviöt
$P_{e, \sin}$	sinijännitteen pyörrevirtahäviöt
P_f	kiertovirtahäviöt

P_h	häviöteho
P_{hyst}	hystereesihäviöt
P_k	kuormitushäviöt
P_{lh}	lisähäviöt
P_r	rautahäviöt
P_σ	hajavuohäviöt
Q	loisteho
Q_{cap}	kapasitiivinen loisteho
Q_{ind}	induktiivinen loisteho
R	resistanssi
$R_{1,2}$	ensiön ja toision resistanssi
R_{ac}	vaihtosähköresistanssi
R_{DC}	tasasähköresistanssi
$R_{f,k}$	suotimen ja kuorman resistanssi
R_m	reluktanssi
$R_{\text{mo},r}$	moottorin ja rautahäviöiden resistanssi
S	näennäisteho
S_{nim}	nimellinen näennäisteho
T	lämpötila
T_e	sähköinen vääntömomentti
T_k	kipivääntömomentti
T_{max}	maksimivääntömomentti
T_{nim}	nimellisivääntömomentti
T_s	simulointiaika-askel
T_x	puolijohdekytkin
$U_{1\text{nim},2\text{nim}}$	ensiö- ja toisiokäämin nimellisjännite
$U_{i,o}$	tulo- ja lähtöjännite
U_{inim}	taajuudenmuuttajan nimellisjännite
$U_{a,b,c}$	vaihejännitteet
$U_{ia,ib,ic}$	taajuudenmuuttajan vaihejännitteet
U_{CM}	yhteismuotoinen jännite
U_D	välipiirin tasajännite
U_{DC}	jännitteen tasakomponentti

U_f	suotimen jännite
U_h	jännitteen alenema
U_h	harmonisen yliaallon tehollisarvo
U_{kolmio}	kolmioaallon jännite
U_{max}	maksimijännite
U_M	jännitteen tasasuuntauskeskiarvo
U_{nim}	nimellisjännite
U_{ohjaus}	ohjausjännite
$U_{\text{p-p}}$	jännitteen huipusta-huippuun-arvo
U_{res}	resultoiva jännite
U_v	vaihejännite
X_{L_f, C_f}	suotimen reaktanssit
X_{m, m_0}	magnetointi- ja moottorin reaktanssi
X_{σ_1, σ_2}	ensiön ja toision hajareaktanssit
Z	impedanssi
Z_{ib}	kuorman vertailuimpedanssi
$Z_{c,i,k,m,t}$	kondensaattorin, kelan, kuorman, moottorin ja muuntajan impedanssi
Δ	muutos
δ	tunkeutumissyvyys
$\delta_{cp,wf,ps}$	sydämen ja ensiön, käämin ja ikeen sekä ensiön ja toision ilmaväli
η	hyötysuhde
Θ	magnetomotorinen voima
μ	permeabiliteetti
ρ	resistiivisyys
σ	materiaalin johtavuus
ϕ	vuo
ϕ_0	vuon alkuarvo
ϕ_{DC}	vuon tasavirtakomponentti
$\phi_{1\sigma, 2\sigma}$	ensiö- ja toisiokäämin hajavuo
$\phi_{\sigma\alpha, \sigma}$	akσιαalinen ja radiaalinen hajavuo

$\varphi_{2,1}$	toision ja taajuudenmuuttajan virran ja jännitteen vaihekulma
$\varphi_{m,t,tot}$	moottorin, muuntajan sekä systeemin vaihekulma
ψ	käämivuo
ψ_{δ}	ilmavälikäämivuo
ω	kulmataajuus
Ω	kulmataajuus
$\Omega_{r,nim}$	roottorin ja nimelliskulmataajuus

Lyhenteet

mmv	magnetomotorinen voima
CM	Common Mode
EMC	Electro Magnetic Compatibility
FEM	Finite Element Method
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IM	induktiomoottori
KHK	kasvihuonekaasu
LTY	Lappeenrannan teknillinen yliopisto
PWM	Pulse Width Modulation
THD	Total Harmonic Distortion

1 JOHDANTO

Taajuudenmuuttajat pumppu- ja puhallinkäytöissä ovat yleistyneet merkittävästi teollisuuden parissa. Näillä voidaan saavuttaa merkittäviä energiansäästöjä, kun moottoria pyöritetään vain kuorman vaatimalla nopeudella, eikä nimellisnopeudella. Suuritehoiset pumppu- ja puhallinkäytöt vaativat myös suuritehoisen moottorin, jota ei valmistusteknisistä syistä voida aina valmistaa pienjännitteellä. Suurjännitemoottori on siten ratkaiseva asia riittävän tehon saamiseksi, mutta suurjännitetaajuudenmuuttaja aiheuttaa ongelmia. Suurjännitetaajuudenmuuttajat ovat kalliita, eikä niitä voida soveltaa suurnopeuskäyttöihin, koska niissä tulevat taajuusrajoitukset vastaan. Tämän vuoksi työssä tutustutaan halpoihin yleismallin pienjännitetaajuudenmuuttajien rinnankäyttöön, joiden jännite nostetaan jännitteennostomuuntajalla suurjännitteeksi. Tällöin kuormalle saadaan riittävä teho kytkemällä pienjännitetaajuudenmuuttajia tarpeeksi rinnakkain ja valmistamalla teholtaan sekä ensiöiden lukumäärältään sopiva erikoismuuntaja, joka edelleen syöttää moottoria.

Opinnäytetyössä tarkastellaan sähkökäyttöä, jossa käytetään jännitteennostomuuntajaa välijännitteisen suurnopeusmoottorin syöttämiseksi. Erikoismuuntaja koostuu viidestä ensiökäämistä ja niitä syötetään viidellä rinnakkaisella taajuudenmuuttajalla. Työssä tutkitaan muuntajassa syntyvien sähkömagneettisten ilmiöiden aiheuttamia häviötä taajuudenmuuttajakäytössä. Tuloksia verrataan sinijännitteellä saatuihin arvoihin.

Rinnakkaiset taajuudenmuuttajat aiheuttavat häiriöitä toistensa toimintaan, koska magneettinen kytketyminen muuntajan kautta on lähes täydellistä niiden välillä. Tämän vuoksi työssä tutkitaan myös suodatusta erilaisilla suotimilla, mutta keskitytään erityisesti sinisuotimen tarkasteluun.

Työssä simuloidaan sähkökäyttöä Matlabin Simulink-ohjelmistolla, jolla kerätään tarvittava tieto muuntajassa tapahtuvista ilmiöistä. Simulointimalliin on rakennettu muuntajan magneettisia ominaisuuksia kuvaava alamalli, joka on toteutettu Flux-ohjelmiston FEM-mallina.

Työ koostuu seuraavasti

Kappaleessa 1 käydään läpi Suuret keskinopeuskäytöt-hanke, prototyypilaitteisto sekä muuntajan hajavoiden syntymekanismeja

Kappaleessa 2 tutkitaan taajuudenmuuttajan lähtöjännitteen käyrämuotoja sekä niiden vaikutusta muuntajan magnetointiin ja häviöihin.

Kappaleessa 3 tutkitaan sähkökäytön ja muuntajamallin simulointituloksia sekä eri tavalla mitoitettujen suotimien lähtöjännitteen säröä.

Kappaleessa 4 tehdään yhteenveto työstä ja saaduista tuloksista.

Kappaleessa 5 käydään läpi tärkeät tulokset sekä johtopäätökset. Pohditaan mitä kannattaisi tutkia tulevaisuudessa.

1.1 Suuret keskinopeuskäytöt-hanke

TEKESin Climbus-tutkimusohjelman lähtökohtana on kasvava kysyntä ilmastonmuutosta hillitseville teknologioille ja palveluille. Kysynnän kasvun taustalla on kansainvälinen Kioton ilmastopöytäkirja ja sen tavoitteet kasvihuonekaasupäästöjen (KHK) vähentämiseksi eri maissa. Ilmastoteknologian globaalien markkinoiden arvioidaan kasvavan noin 60 % vuodesta 2004 vuoteen 2010 mennessä aloilla, joissa suomalaiset edustavat vahvaa osaamista. Ilmastomuutoksen hillinnän kannalta tärkein KHK-päästö on hiilidioksidi (CO₂), jota syntyy pääasiassa energian tuotannossa ja käytössä. [1]

Ilmastopoliittisesti ohjelman ajoittuu merkittävästi ajanjaksoon vuosille 2004-2008, koska Kioton ilmastopöytäkirjan mukaan teollisuusmaiden tulisi vähentää KHK-päästöjä 5.2% vuoden 1990 tasosta vuoteen 2008-2012 mennessä. Sopimus astui voimaan vuonna 2005 ja tämän poliittiset vaikutukset näkyvätkin jo Euroopan Unionin jäsenvaltioissa. EU:n laajuisen päästökauppa alkoi vuoden 2005 alussa. [1]

Climbus-ohjelman taustalla on TEKESin ”Teknologia ja ilmastonmuutos-teknologia” Climtech-tutkimushanke (1999-2002), jossa koottiin tietoa ilmastonmuutosta rajoittavista teknologioista. Climbus-ohjelman teema on sellaisten tuotteiden ja palveluiden kehittäminen, joiden kustannustehokkuus KHK-päästöjen vähentämisessä on kansainvälistä huippuluokkaa. Päämääränä on suomalaisen liiketoiminnan kasvattaminen ja uusien yritysten synnyttäminen globaaleille ilmastoteknologian ja –palveluiden markkinoille. [1]

Kioton ilmastopöytäkirjan toteutuessa, tämän päämäärän saavuttamiseksi on tutkittava ja keksittävä uusia tekniikoita. Korkean hyötysuhteen sähkökäytöllä on merkittävä osuus ilmastolämpenemisen hillitsemisessä.

Erilaiset sähkökäytöt kuluttavat maailmassa tuotetusta energiasta noin puolet (13290 TWh vuonna 2001). Pääasiallisena energialähteenä sähköntuotannossa käytetään kivihiiltä, joka vastaa noin 60 % eli 13300 TWh kokonaistuotannosta. Jo kolmen prosentin parannus sähkökäyttöjen hyötysuhteeseen vähentäisi 660 TWh sähköenergian käyttöä. Tällöin sähköntuotanto kivihiilellä voisi periaatteessa vähetä noin 5 prosenttia, joka riittäisi kattamaan Kioton ilmastopöytäkirjan ensimmäiset vaatimukset sähköntuotannon osalta. Sähkökäyttö-

jen osalta säästö on merkittävämpi kuin kolme prosenttiyksikköä. Muokkaamalla sähkökäytöt vastaamaan tarkasti pyörimisnopeus- ja teho vaatimuksia saavutetaan aiempaa parempi hyötysuhde, erityisesti pumppu- ja puhallinkäytöissä. [2]

Lappeenrannan teknillisen yliopiston (LTY) sähkökäyttötekniikan laboratorion Suuret keskinopeuskäytöt-hankkeen tavoitteena on luoda energiaa säästävää sähkökäyttötekniikkaa sekä siihen liittyviä liiketoimintamahdollisuuksia. Hanke luo LTY:oon johtavan suuritehoisten, korkeahyötysuhteisten, nopeakäyntisten sähkömoottorikäyttöjen osaamisen, joka mahdollistaa vankan tietämyksen sähkökäytön teknologioilla osa-alueilla. [2]

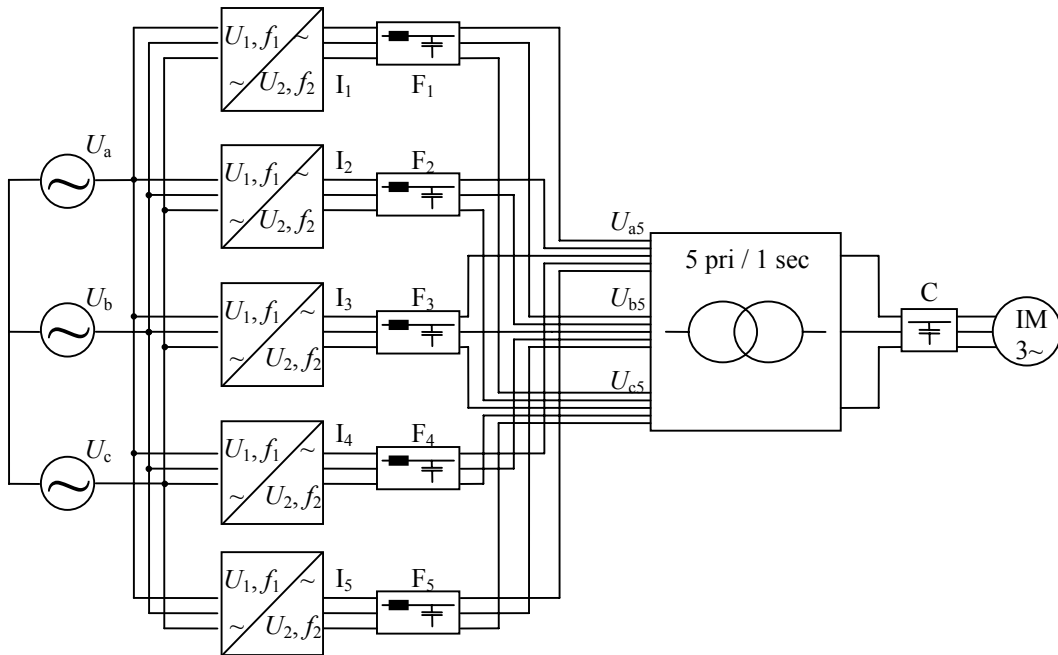
Tutkimushankkeessa kehitetään uusi konsepti keskinopeita, suuritehoisia, sähkömoottorikäyttöjä varten. Tutkittavien koneiden teho vaihtelee välillä 3-25MW ja ne ovat pyörimisnopeudeltaan tyypillisesti 8000- 12000 rpm. Suuritehoisten koneiden tehoalueesta osa voidaan toteuttaa 690 V:n jännitteellä ja suuremmat täytyy toteuttaa suurjännitetekniikalla. [2]

Tehoelektroniikkakonseptin tarkoituksena on luoda pienjännitteisiin taajuudenmuuttajiin perustuva suuritehoinen suurnopeuskäyttö, koska suuri jännitteiset taajuudenmuuttajat ovat vielä varsin kalliita. Nykyään tehoelektroniikalla toteutetun 690 V:n jännitteellä toimivan taajuudenmuuttajan näennäisteho nopeissa käytöissä on 1-2 MVA, mutta pienjännitemoottoreiden tehorajoitukset tulevat vastaan. Induktiolaista johtuen tätä tehokkaampia moottoreita ei kolmivaiheisina kyetä valmistamaan pienjännitteellä, joten on siis siirryttävä suurjännitepuolelle. Rinnankytketyillä taajuudenmuuttajilla syötetään jännitteennostomuuntajaa, joka edelleen syöttää suurnopeusmoottoria. Tällöin olisi mahdollista syöttää rinnakkaisilla pienjännitetaajuudenmuuttajilla suuriakin sähkökäyttöjä. Pienjännitetaajuudenmuuttajat ovat hinnaltaan halvempia ja rinnakkaisessa käytössä voitaisiin vioittunut taajuudenmuuttaja mahdollisesti vaihtaa suoraan ajosta. Tutkimuksen alla ovat vielä sähkökäytön luotettavuus ja kannattavuus. [2]

1.2 Prototyypilaitteisto

Tutkittava laitteisto koostuu suurnopeusinduktiomoottorista, viidestä rinnakkaisesta taajuudenmuuttajasta, muuntajasta, jossa on viisi ensiökäämiä ja yksi toisiökäämi, taajuudenmuuttajan lähtösuotimista sekä mahdollisista kompensointikondensaattoreista. Opinnäyte-

työssä on tarkoitus syöttää viidellä rinnakkaisella taajuudenmuuttajalla I_{1-5} moniensioistä muuntajaa. Tarvittaessa taajuudenmuuttajien jälkeen sijoitetaan myös suotimet F_{1-5} . Muuntajan toisiokäämi puolestaan syöttää suurnopeusinduktiomootoria IM ja toision sekä moottorin välille kytketään tarvittaessa loistehon kompensointikondensaattorit C. Kuvassa 1.1 on esitetty prototyypilaitteiston periaatteellinen kytkentäkaavio.



Kuva 1.1. Kuvassa on esitetty prototyypilaitteiston periaatteellinen kytkentä, kun rinnakkaiset taajuudenmuuttajat I_x syöttävät moniensioistä muuntajaa. Taajuudenmuuttajien lähdössä on suotimet F ja muuntajan jälkeen suurnopeusinduktiomootori IM. Tarvittaessa moottorin induktiivista tehoa kompensoidaan kompensointikondensaattoreilla C.

1.2.1 Massiiviroottorinen induktiokone

Taajuudenmuuttajilla toteutetut pumppu- ja puhallinkäytöt ovat yleistyneet teollisuuden parissa merkittävästi, koska taajuudenmuuttajilla voidaan säästää energiaa oleellisesti. Suurnopeuskäytöissä vaaditaan moottorilta yleensä paljon tehoa ja samalla myös toimintavarmuutta. Pienjännitteellä ei kyetä käytännössä valmistamaan yli 2 MVA:n tehoisia kolmivaihemootoreita. Suuri virta vaatii myös suuret johtimen poikkipinta-alat. Tällöin staatorikäämityksistä tulee niin massiivisia, ettei niitä voida käytännössä toteuttaa. Tämän vuoksi suurjännite tarjoaa huomattavia etuja pienjännitteisiin moottoreihin verrattuna.

Suurjännitteellä toteutetulla moottorilla ei ole niin tiukkoja tehorojoituksia kuin pienjännitteisellä. Tämän vuoksi suuret sähkökäytöt usein toteutetaan suurjännitteisinä. Moottoreiden käämitystekniikassa on jänniteportaasta riippuen eroja, sillä suurjännitemoottorin käämitykset vaativat paremmat eristeet, koska suuri jännite aiheuttaa helpommin läpilyöntejä. Virta vastaavasti pienenee, jolloin käämien johdinpoikkipinta-alaa voidaan pienentää pienjännitteiseen moottoriin verrattuna.

Suurnopeusmoottori saattaa toimia joissain käytöissä suuren paineen alaisena, jolloin moottori tulisi kyetä sulkemaan varsin tiivisti paineistettuun tilaan. Tällöin läpivienneistä on saatava tiiviitä. Paineenalaisissa käytöissä normaalisti käytetyt suurjännitetasot eivät yleensä ole rajoittavia tekijöitä, mutta virran arvo voi olla. Pienjännitteellä johtimen poikkipinta-ala kasvaa suureksi, mikä vaatii suurikokoisia läpivientejä. Suuret läpiviennit voivat olla ongelmallisia esimerkiksi suurilla paineilla.

Prototyypilaitteiston erikoismuuntajan kuormana on massiiviroottorinen oikosulkumoottori, jonka näennäisteho S_{nim} on 1,375 MW. Nimellisvirta I_{nim} ja -jännite U_{nim} ovat 1151 A sekä 690 V. Massiiviroottorisille koneille on ominaista normaali magnetointiinduktanssi L_m , mutta roottorissa esiintyvä suuri hajainduktanssi $L_{r\sigma}$ heikentää koneen tehokerrointa verrattuna häkkikämmityihin induktiokoneisiin

Mekaniikkansa puolesta massiiviroottori soveltuu hyvin suurnopeuskäyttöön ja sitä käytetäänkin nykyisin yhä useammin pumppu- ja puhallinkäytössä. Moottorin koko on kääntäen verrannollinen moottorin nimellisuopeuteen n_n ja suurnopeuskäytössä yleensä myös vaihdelaatikko voidaan jättää pois. Tällöin moottori ja koko käyttö voidaan sijoittaa pienempään tilaan ja hyötysuhde paranee, koska kitkahäviöt vähenevät vaihdelaatikon pois jäännin vuoksi. Lisäksi saavutetaan pienemmät kokonaiskustannukset k_{tot} sekä myös käytön kokonaisvarmuus kasvaa, kun mekaanisia osia on vähemmän.

Massiiviroottorisia koneita käytetään lähinnä niiden mekaanisten ominaisuuksien vuoksi. Massiiviroottori on lujin roottorityyppi ja roottoria pystytään ajamaan suurillakin nopeuksilla, koska roottori säilyttää hyvin tasapainonsa. Laminoituneet roottorit eivät sovellu mekaanisen kestävyytensä vuoksi niin suurille pyörimisnopeuksille kuin massiiviroottoriset. Massiiviroottorilla varustettu moottori kestää suoraan akselille kytketyn kuorman hyvin,

koska roottori on tarpeeksi jäykkä. Tällöin ei ilmene mekaanisia värähtelyjä, jotka voisivat vahingoittaa laakerointia. Luonnolliset värähtelytaajuudet voivat kuitenkin olla ongelmallisia. Lisäksi massiiviroottori on edullinen, yksinkertainen valmistaa sekä termisesti hyvin kestävä ja luotettava. [3]

1.2.2 Rinnakkaiset taajuudenmuuttajat

Suurjännitteellä toteutetut taajuudenmuuttajat ovat kalliita hankintahinnaltaan. Suurnopeuskäytössä myös taajuudenmuuttajan syöttötaajuus voi nousta ongelmaksi. Monissa taajuudenmuuttajissa syöttötaajuus on rajoitettu matalille taajuuksille, joten suurnopeuskäyttö ei onnistu ilman mekaanista vaihdelaatikkoa. Tästä taas aiheutuu merkittäviä lisähäviöitä ja kuluvien osien määrä lisääntyy, mikä pienentää toimintavarmuutta. Tämän vuoksi työssä tutkitaan yleiskäyttöisiä ja edullisia pienjännitetaajuudenmuuttajia, jotka ovat halpoja ja niillä kyetään syöttämään suuriakin taajuuksia. Näitä kytetään rinnakkain riittävä määrä, jotta saadaan tuotettua jännitteennostomuuntajan ja suurjännitemoottorin tarvitsema teho.

Koejärjestelyissä muuntajaa syötetään taajuudenmuuttajilla, joiden nimellisteho S_{nim} on 200 kVA. Taajuudenmuuttajat ovat kaksitasoisia jännitevälipiirillä varustettuja, ja niiden nimellisjännite U_{nim} on 690 V. [4]

Rinnakkaisten taajuudenmuuttajien kytkinohjeiden välille muodostuu lähes aina viivettä, koska ohjaussignaalien siirtoteiden impedanssit Z ja pääteasteiden transistorit poikkeavat toisistaan. Järjestelmästä saadaan kaikkein yksinkertaisin, jos taajuudenmuuttajat on synkronoitu vain perusaaltojen osalta. Tällöin myös jännitteen käyrämuodoissa on hieman eroja, mistä aiheutuu rinnakkaisiin taajuudenmuuttajiin kiertovirtoja. Muuntajan ensiöpuolelle on saatava riittävän suuri magnetomotorinen voima, jotta toisiosta voidaan ottaa riittävästi tehoa kuormana olevalle suurnopeusmoottorille. Ensiöön tämä magnetomotorinen voima synnytetään viidellä taajuudenmuuttajalla, jotka syöttävät viidellä ensiöllä varustettua muuntajaa. Taajuudenmuuttajat ovat siten galvaanisesti erotettuja, joten puolijohdekytkimien kytkennän ei tarvitse olla täsmälleen samanaikaista kaikissa taajuudenmuuttajissa. Viiveitä kuitenkin tulee taajuudenmuuttajien kytkennöissä ja näistä voidaan erottaa kaksi erilaista tilannetta. [4]

Lyhytaikaisessa jännite-epätasapainossa esiintyy vain nopea ja lyhytvaikutteinen vastakkainen jännite eri taajuudenmuuttajien kanttiaalloissa. Suotimen ja muuntajan kapasitanssien vuoksi jännite-ero suodattuu nopeasti pois. Tällöin suuria kiertovirtoja ei ehdi syntyä ja ilmiö voidaankin usein jättää huomiotta. [4]

Pitkäaikaisessa jännite-epätasapainossa eri taajuudenmuuttajien kanttiaallot ovat vastakkaismerkkisiä kauemmin, tällöin jännite-ero eri taajuudenmuuttajien kesken on suuri ja siitä aiheutuu kiertovirtoja taajuudenmuuttajien kesken. Vielä huonompi tilanne on, kun kiertovirtoja syntyy kokonaisten taajuudenmuuttajien lävitse. Tällöin ainoa virtaa rajoittava impedanssi on jännitelähteen impedanssit. Kiertovirrat aiheuttavat taajuudenmuuttajan ylivirtasuojan laukeamisen, jos virtaraja ylitetään. Tällöin kuorma jakautuu jäljellä olevien taajuudenmuuttajien kesken ja virtarajat ylittyvät mahdollisesti myös muilla taajuudenmuuttajilla, josta aiheutuu ketjureaktionomainen taajuudenmuuttajien pois putoaminen. [4]

Kiertovirrat voivat myös aiheuttaa muuntajaan tasavirtakomponentteja, jolloin muuntajan sydänmateriaali ajautuu kyllästystilaan. Vahva kyllästystila pienentää magnetointi-induktanssia, jolloin ensiövirta kasvaa ja tilannetta voidaan verrata muuntajan toisiokäämin oikosulkuun. Tällöin käämeihin kohdistuu suuria voimavaikutuksia, jotka voivat tuhota muuntajan. Ratkaisu kiertovirtojen ehkäisyyn voidaan saavuttaa taajuudenmuuttajien ohjausjärjestelmää muuttamalla master-slave-topologiaksi, jolloin yksi taajuudenmuuttaja ohjaa myös muita taajuudenmuuttajia. Tällöin niiden on mahdollista toimia yhdenaikaisesti, eikä myöskään kiertovirtoja pääse syntymään. [4]

1.2.3 Suodatus

Taajuudenmuuttajien syöttämän jännitteen käyrämuoto koostuu pulssijonosta. Pulssien leveyttä vaihdellaan pulssinleveysmodulaatiolla (PWM). Kehittyneet puolijohdekomponentit mahdollistavat nopeat kytkennät eri tilojen välillä, jolloin myös jännitteen nousuaika on pieni. Tällöin jännitteen nousunopeus du/dt on suuri. Tämä aiheuttaa jännitteen nousun siirtojohdossa ja moottorin liittimissä, mikä voi aiheuttaa moottorin eristeiden heikkene- mistä tai jopa läpilyönnin eristeessä. [5]

Monissa teollisuuden sovelluksissa, kuten esimerkiksi vedenalaisissa käytöissä, moottori ja sitä ohjaava taajuudenmuuttaja on sijoitettava eri paikkoihin, jolloin näiden välisestä siirtojohdosta tulee pitkä. Tällöin siirtojohdon hajainduktanssit L_σ ja maakapasitanssit C saavat aikaan johdossa ja moottorin liittimissä jännitteen nousua, josta seuraa moottorin ja siirtojohdon eristeiden heikkenemistä sekä korkea taajuisia kiertovirtoja. Suuri siirtojohdon pituus, nopeat jännitteen nousuajat nostavat ylijännitteen suuruutta moottorin liittimissä. [5]

Suodinta ei aina voida laittaa moottorin puolelle, joten suodin täytyy sijoittaa taajuudenmuuttajan lähtöön. Lähdön suodatus voidaan toteuttaa usealla eri tavalla; kuristimella, du/dt -suotimella tai sinisuotimella. [5]

Kuristin taajuudenmuuttajan lähtöön sijoitettuna on yksinkertaisin tapa suodattaa harmonisia yliaaltoja. Kolmivaihejärjestelmässä kuristimet sijoitetaan sarjaan, moottorin ja taajuudenmuuttajan väliin, jolloin kuristimet pyrkivät rajoittamaan nopeita virran muutoksia. Kuristimet pienentävät jännitteen nousunopeutta ja vähentävät sähköisiä häiriöitä. Yleisimmin käytetään viiden prosentin reaktanssia, joka pienentää moottoriin kytkeytyvää jännitettä sekä voi vaikuttaa transientti-ilmiöiden suuruuteen. [5]

du/dt -suodin on alipäästösuodin, jolla voidaan pienentää jännitteen nousunopeutta. Tällöin jännitteen nousu siirtojohdossa ja moottorin liittimissä pienenee nopeiden jännitepulssien heijastuksien vähentyessä. Suodin koostuu sarjaan kytketystä induktanssista L ja resistansseista R sekä rinnakkaisesta kapasitanssista C . [5]

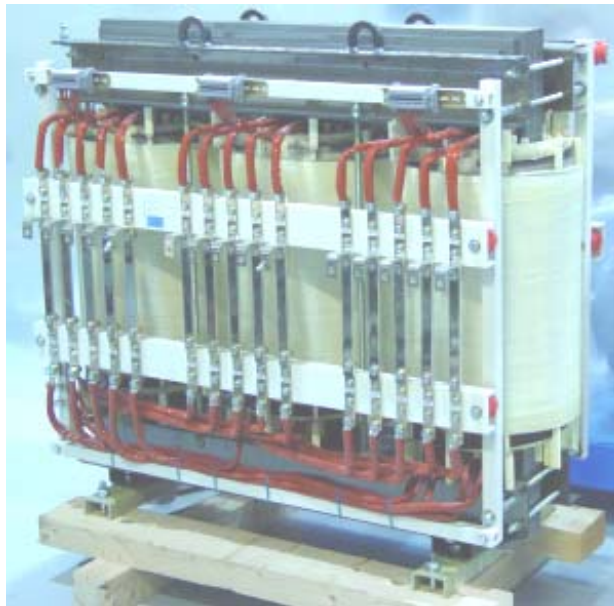
Sinisuodin on rakenteeltaan du/dt -suotimen kaltainen, mutta siitä on usein jätetty vaimennusresistanssit pois. Suotimen mitoitus on raskaampi kuin du/dt -suotimelle, ja suodatus on huomattavasti tehokkaampaa. Sinisuotimella saadaan kanttimaiset aaltomuodot lähelle sinikäyrämuotoja, jolloin siirtojohdon heijastukset vähenevät huomattavasti. [5]

Simuloinneissa käytetään toisen kertaluokan sinisuodinta, joka on toteutettu sarjakuristimella sekä rinnankytketyllä kondensaattorilla. Toisen kertaluokan suotimella saadaan noin 40 dB:n vaimennus dekadia kohden. LC -suotimen suunnittelussa tulee kuitenkin ottaa huomioon suotimen resonanssitaajuus f_r , koska tämä voi vahvistaa harmonisia yliaaltoja ja aiheuttaa merkittäviä häviöitä muuntajassa ja moottorissa. [5]

1.2.4 Erikoismuuntaja

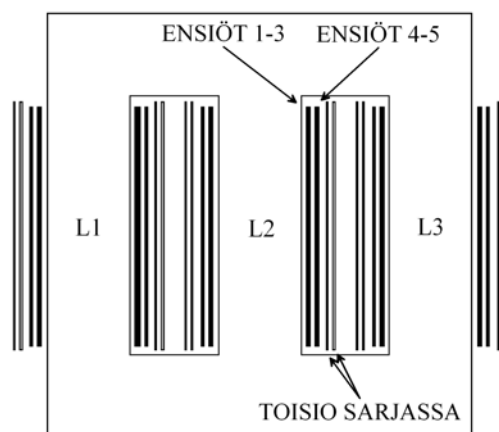
Erikoismuuntaja mahdollistaa pienjännitteellä toimivien taajuudenmuuttajien tehon nostamisen suurempaan jänniteportaaseen, jolloin halvoilla yleisöllin taajuudenmuuttajilla voidaan syöttää suurempaa jänniteporrasta ja tehoa. Kytetään taajuudenmuuttajia riittävästi rinnakkain ja valmistetaan teholtaan ja ensiöiden lukumäärältään sopiva moniensiöinen muuntaja, joka syöttää suuritehoista suurjännitemoottoria.

Työssä tutkitaan erikoisvalmisteista koemuuntajaa, joka koostuu viidestä ensiökäämistä ja yhdestä toisiokäämistä. Muuntajan näennäisteho S_{nim} on 1 MW ja ensiön jännite U_{1nim} on 690 V sekä toision U_{2nim} on 710 V. Ensiöiden nimellisvirrat I_{1n} ovat $5 \times 167,3$ A ja toision $I_{2nim} = 813,2$ A. Muuntajasta on esitetty kuva 1.2, josta nähdään ensiöiden liittimet.



Kuva 1.2. Kuvassa on esitetty viisi-ensiöinen erikoismuuntaja, joka on näennäisteholtaan 1 MVA. Muuntaja on avorakenteinen ja sen jäähdytys toimii konvektiolla.

Kuvassa 1.2 nähdään muuntajan ensiöpuolen liittimet, toision liittimet ovat muuntajan ta-
kaosassa. Muuntaja on rakenteeltaan avonainen ja sen jäähdytys tapahtuu konvektiolla. Kuvassa 1.3, joka on otettu lähteestä [6], on esitetty muuntajan geometria sekä ensiökää-
mien ja toisiokäämin sijoittelu. [4]



Kuva 1.3. Kuvassa on esitetty 3-vaiheisen erikoismuuntajan geometria sekä ensiöiden ja toisyon sijoittelu. Ensiöiden 1-3 sekä 4 ja 5 havaitaan olevan tiiviisti yhdessä ja näiden käämirakenteiden välissä on huomattava tuuletuskanava jäähdytystä varten. [6]

Kuvasta 1.3 voidaan havaita, että ensiökäämit ovat lähinnä levysydäntä kahdessa ryhmässä. Ensiöt 1-3 ovat alimmaisena ja sitten pienen tuuletuskanavan jälkeen ensiöt 4 ja 5. Toisyon käämi on uloimmaisena, jonka tuuletuskanava erottaa ensiökäämiryhmistä.

Muuntajan käämeissä on hajainduktanssien ja magnetointi-induktanssien lisäksi myös resistanssia. Muuntajan käämit muodostavat myös kapasitanssia maata, toisia ensiökäämejä, toisiokäämiä ja käämikierroksia vastaan. Muuntajaa syötetään kanttiaallolla, jolloin jännitepulssit ovat nopeita ja lyhytkestoisia. Nopeissa ilmiöissä voidaan tarkastella vain RC -piiriä, koska induktanssit eivät ehdi reagoida nopeisiin muutoksiin. Tämä johtuu siitä, että induktanssit tarvitsevat aikaa vuon synnyttämiseen ja sen muutoksiin. Kapasitanssit ja resistanssit määräävät siten muuntajan käyttäytymisen transienttitilanteissa. [4]

Oikosulkutilanteessa muuntaja ei vaurioidu ylikuumentumisen takia helposti, koska sillä on suuren massansa m vuoksi myös hidaskäynnin aikavakio τ_T . Tällöin ylivirtasuojat ehtivät reagoida huomattavasti muuntajan lämpenemistä nopeammin. Sen sijaan kuormasta johtuvat suuret oikosulkuvirrat i_k voivat aiheuttaa suuria voimia F käämityksiin ja vaurioittaa muuntajaa mekaanisesti. Samalla voi tapahtua myös läpilyöntejä. [4]

Muuntajassa muodostuu induktanssien ja erilaisten kapasitanssien vuoksi resonanssitajuuksia f_r . Virtasysäyksen aikana nämä voivat aikaan saada muuntajaan yli kahdeksankertaisen virran nimellisvirtaan I_{nim} nähden. [4]

1.2.5 Kompensointi

Induktiomoottori ja muuntaja koostuvat käämeistä ja ne tarvitsevat magneettikenttensä luomiseen loistehoa Q . Loisteho voidaan joko synnyttää taajuudenmuuttajan avulla tai se voidaan kehittää moottorin navoissa. Taajuudenmuuttajalla kehitettävä loisteho kuormittaa pääteastetta, jolloin tarvitaan suuremmat transistorit.

Loistehon kompensoinnissa tuotetaan positiivisen loistehon suuruinen, mutta vastakkaismerkkinen eli kapasitiivinen loisteho kondensaattoreilla. Tällöin voidaan ajatella, että induktiivinen loisteho Q_{ind} otetaan taajuudenmuuttajasta ja kapasitiivinen loisteho Q_{cap} syötetään muuttajaan. Näennäis-, pätö- ja loisteho S , P ja Q ovat toisiinsa yhteydessä yhtälön (1.1) mukaisesti

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} . \quad (1.1)$$

Loistehon kompensointia harjoitetaan harvoin taajuusmuuttajakäytössä, sillä se edellyttää sopivaa suodatusta. Koska massiiviroottorikoneiden tehokerroin on heikohko, on loistehon kompensointi monissa tapauksissa edullista.

Prototyypilaitteistoon sijoitetaan tarvittaessa kompensointikondensaattorit muuntajan toision ja moottorin väliin, riippuen loistehon suuruudesta.

1.3 Muuntajan hajavuot

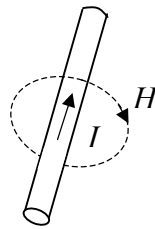
Tässä kappaleessa tutkitaan muuntajassa syntyviä hajavoita, koska prototyypilaitteiston erikoismuuntajan ensiöihin tarvitaan enemmän hajavuota. Tällöin taajuudenmuuttajien lähtösuotimet voitaisiin jättää pois. Kappaleen loppuosassa on tutkittu erilaisia käämien sijoitteluvaihtoehtoja erikoismuuntajassa, joilla voitaisiin lisätä ensiön hajaannusta. Hajavuoilmiöitä kuvataan öljytäytteisellä muuntajalla. Tutkittava erikoismuuntaja on avorakenteinen, joten kaikkia hajavuoilmiöitä ei voida soveltaa tutkittavalle muuntajalle.

Normaaliolosuhteissa suurin osa muuntajan ensiön synnyttämästä vuosta kytkee ensiö- ja toisiokäämin magneettisesti yhteen. Vain pieni osa kokonaisvuosta ei kytkeydy molempiin käämeihin, vaan kiertää ainoastaan toisen käämin ympäri. Tätä kutsutaan hajavuoksi ja

huolimatta sen pienestä osuudesta päävuohon nähden, sillä on tärkeä merkitys muuntajan käyttäytymiseen. [9]

1.3.1 Hajavoiden syntymekanismit

Ampèren lain nojalla voidaan osoittaa, että virrallisen johtimen ympärille muodostuu magneettikentän voimakkuus H kiertäen johdinta. Kuvassa 1.4 on esitetty virrallisen johtimen ympärille muodostuva magneettikenttä.



Kuva 1.4. Kuvassa on esitetty virrallisen johtimen synnyttämä magneettikenttä johtimen ympärille. Johtimessa kulkevaa virtaa on merkitty kirjaimella I sekä johdinta kiertävää magneettikentänvoimakkuutta kirjaimella H .

Faradayn laki puolestaan aiheuttaa vastakkaisen ilmiön Ampèren laille. Ajan t mukana muuttuva johdinsilmukan lävistämä magneettivuo ϕ aiheuttaa suljettuun johtimeen virran i ja vastaavasti avoimeen johtimeen indusoituu jännite e yhtälön (1.2) mukaisesti

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} = -\frac{d\psi}{dt}, \quad (1.2)$$

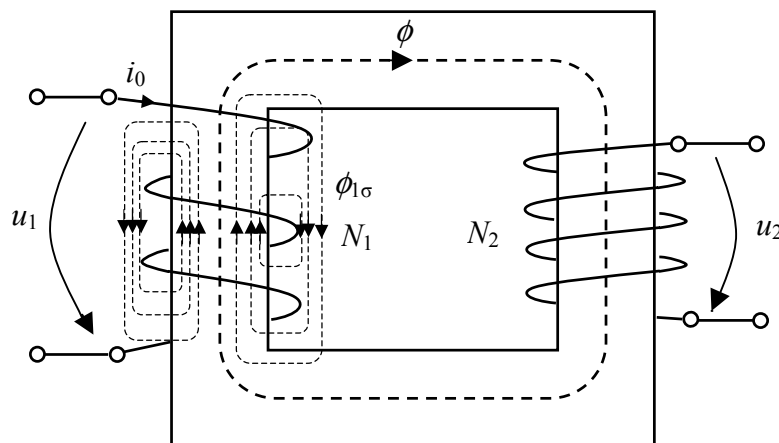
missä ϕ on magneettivuo, N johdinkierrosten lukumäärä ja ψ on käämivuo. Yhtälössä esiintyvä negatiivinen etumerkki tulee Lenzin laista ja se kuvaa indusoituvan jännitteen kykyä vastustaa magneettivuon muutosta. Ampèren ja Faradayn havainnoilla on tärkeä merkitys sähkömagneettisten ilmiöiden ymmärtämiseen ja tästä on erityisesti hyötyä ymmärrettäessä muuntajan käämeissä tapahtuvia ilmiöitä. [10]

Ideaalisessa muuntajassa ei synny häviöitä P_h sekä ensiön ja toision keskinäinen kytkeytyminen on täydellistä. Johtimissa ei ole resistanssia R , eikä niissä tapahdu virranahtoa eikä synny myöskään hajavoita ϕ_σ . Reaalisessa muuntajassa näin ei kuitenkaan ole.

Tyhjäkäynnissä oleva muuntaja, jota syötetään vaihtojännitteellä u_1 , ottaa verkosta tyhjäkäyntivirran i_0 , tällöin toisiokäämi on avoin eli siinä ei kulje virtaa. Ension käämikierrosten N_1 kanssa tyhjäkäyntivirta muodostaa magnetomotorisen voiman Θ (mmv), jonka huippuarvo saadaan seuraavasti

$$\Theta = N_1 \cdot \hat{i}_0. \quad (1.3)$$

Reaalisessa muuntajassa ensiökäämissä syntyvä mmv kehittää rautasydämeen käämivuon sekä hajavuo. Käämivuo on nimeltään päävuo, ja se kulkee sekä ension että toision käämin lävitse magneettiipiiriä pitkin. Ensioökäämin hajavuo $\phi_{1\sigma}$ ei kulje päävuon reittiä, vaan se etsii vaihtoehdoisen reitin. Hajavuo voi kulkea pitkiäkin matkoja epämagneettisessa aineessa, jonka magneettivastus eli reluktanssi R_m on paljon suurempi kuin rautasydämen. Tämän vuoksi hajavuo on yleensä pieni verrattuna päävuohon. Kuitenkin käämi- ja hajavuot noudattavat reluktanssiminimi-periaatetta, eli ne etsivät reittinsä pienimmän reluktanssin mukaan. Vuo menee sieltä mistä helpoiten pääsee ja lyhintä reittiä. Tämän vuoksi magneettivuontiheys B on suurin juuri rautasydämen sisäreunassa [11]. Kuvassa 1.5 on esitetty ension tyhjäkäyntivirran i_0 synnyttämä pää- ja hajavuo rautasydämeen sekä niiden kulkureitit, kun muuntaja on tyhjäkäynnissä eli toisiossa ei kulje virtaa.



Kuva 1.5. Kuvassa on esitetty muuntajaan syntyvä pää- ja hajavuo ϕ sekä $\phi_{1\sigma}$, kun muuntajan toisiokäämi on avoin, eli muuntaja on tyhjäkäynnissä. Tällöin muuntaja ottaa tyhjäkäyntivirran i_0 , joka muodostaa ension käämikierrosten N_1 avulla muuntajaan magnetomotorisen voiman Θ ja edelleen saa rautasydämeen synty-mään haja- ja päävuon $\phi_{1\sigma}$ sekä ϕ .

Kuvasta 1.5 nähdään, että vain päävuo kytkee rautasydämessä kulkiessaan ensiö- ja toisiokäämin yhteen, ja kykenee siirtämään energiaa ensiöstä toisioon kuormitustilanteessa. Hajavuo aiheuttaa häviöitä muuntajassa, josta voi seurata lämpenemistä sekä hot spotteja eli paikallisia kuumia pisteitä. Nämä voivat edelleen vaurioittaa muuntajan käämityksiä ja eristemateriaaleja aiheuttaen muuntajan ikääntymistä. Ensiökäämissä on resistanssia R , joten kulkeva virta i aiheuttaa jännitehäviön u_h johtimeen. Tällöin ensiöön syntyvä sähkömotorinen voima e_1 on syöttävän jännitteen u_1 suuruinen, kun siitä on vähennetty johtimessa tapahtuva jännitehäviö u_h . [6],[10]

Kuormitetussa muuntajassa toisioon on asetettu kuorma Z_l , jolloin toisioon syntyvä sähkömotorinen voima e_2 saa aikaan toisiovirran i_2 . Muuntajan vuo ei voi muuttua, joten ensiöön muodostuu lisävirta i_a , joka on verrannollinen toisioon virtaan käämikierrosten suhteen avulla yhtälön (1.4) mukaisesti. Virtojen huippuarvoille \hat{i} saadaan yhteys

$$\hat{i}_a = \frac{N_2}{N_1} \cdot \hat{i}_2. \quad (1.4)$$

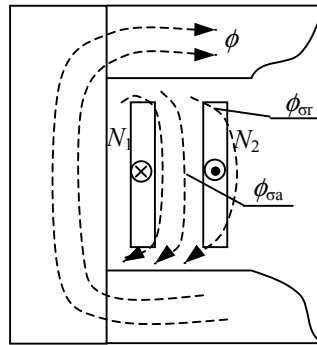
Toisiokäämin magnetomotorinen voima Θ saa aikaan myös toisioon hajavuon $\phi_{2\sigma}$, eikä ensiökäämi voi kumota tätä, koska hajavuo ei kulje ensiökäämin lävitse. Termi N_2/N_1 on myös muuntajan käänteinen muuntosuhde ($1/m$), joka pätee virroille. Jännitteille on voimassa normaali muuntosuhde m . Muuntajan sijaiskytkennän komponenttien arvoja voidaan redusoida eli siirtää toisista ensiöön tai päinvastoin kertomalla ne muuntosuhteen neliöllä m^2 . [6],[10]

Tavallisissa muuntajissa hajavoiden minimoimiseksi tulisi ensiö- ja toisiokäämit sijoittaa aina mahdollisimman lähelle toisiaan. Yleensä käämit sijoitetaankin päällekkäin saman sydämen ympärille. Tällöin käämien väli saadaan pieneksi ja näiden väliset hajavuot vähenevät merkittävästi. [11]

1.3.2 Käämien päätyilmiöt

Muuntajan käämien väleissä kiertää hajavoita ϕ_σ , jotka tuottavat lisähäviöitä P_{lh} muuntajan rakenteisiin. Hajavuot voivat olla aksiaalisia $\phi_{\sigma a}$ tai radiaalisia $\phi_{\sigma r}$. Kuvassa 1.6 on esitetty

muuntajan käämien välisen hajavuon kulkureitit käämien päädyissä.



Kuva 1.6. Kuvassa on esitetty ensiö ja toisiokäämiin väliin syntyvän hajavuon kulkureitti. Hajavuosta voidaan erottaa radiaalinen $\phi_{\sigma r}$ ja aksiaalinen $\phi_{\sigma a}$ osa, kun ensiökäämiä merkitään N_1 ja toisiokäämiä N_2 . Lisäksi kuvaan on merkitty vuon ϕ kulkureitti rautasydämessä, joka kytkee ensiön ja toision magneettisesti yhteen.

Kuvasta 1.6 havaitaan niin kutsuttu päätyilmiö, eli hajavuo taittuu käämin päädyssä aksiaalisesta radiaaliseksi samalla oikaisten käämin lävitse. Aksiaalinen hajavuo $\phi_{\sigma a}$ esiintyy keskellä käämityksiä ensiö- ja toisiokäämiin välissä. Radiaalinen hajavuo $\phi_{\sigma r}$ sen sijaan esiintyy käämien päädyissä, joka nähdään hajavuon vahvana taipumisena. Radiaalinen hajavuo menee käämityksen lävitse ja aiheuttaa lävistettyyn käämiin pyörrevirtahäviöitä. [12]

Muuntajan suunnittelulla voidaan vähentää merkittävästi päätyilmiötä. Ottamalla huomioon hajavuon taipuminen, kannattaa ulompaa käämiä muotoilla hajavuon minimireluktanssi-periaatteen mukaiseksi. [12]

Päätyilmiötä voidaan vähentää huomattavasti sijoittamalla ferromagneettiset renkaat käämien päätyihin. Tällöin käämien välinen vuon on myös päädyissä aksiaalista, eikä se lävistä käämejä, jolloin tehohäviöitä ei synny niin paljoa. Laminoituilla ferromagneettisilla renkailla on kokeellisesti havaittu, että päätyilmiössä esiintyvää radiaalista vuota on pystytty vähentämään jopa 50 prosenttia. [13]

Käämien päätyilmiö on havaittavissa vahvasti esimerkiksi oikosulkutilanteessa. Johtimessa kulkeva virtavektori \mathbf{I} ja sitä vastaan kohtisuora magneettivuontiheysvektori \mathbf{B} saavat aikaan voimavektorin \mathbf{F} , joka on kohtisuorassa sekä virtaa, että magneettivuontiheyttä vastaan. Yhtälössä (1.5) on esitetty näiden välinen riippuvuus

$$\mathbf{F} = l \cdot \mathbf{I} \times \mathbf{B}, \quad (1.5)$$

missä l on johtimen pituus. Käämeissä syntyvä voima on suoraan verrannollinen virran neliöön ja on luonteeltaan sykkivää. Voima on yksisuuntainen, koska virran vaihtaessa merkkiään, vaihtaa myös magneettivuontiheys merkkiään. Oikosulkuvoimia voidaan käsitellä aksiaalisina sekä radiaalisina voimina F_a ja F_r .

Usein muuntajan magneetoiva ensiökäämi on lähinnä rautasydäntä ja toisio on käämitty tämän päälle. Tällöin kuvan 1.6 mukaisesti radiaalivoima syntyy aksiaalisesta vuosta uloimman käämin ulkopuolella yrittäen venyttää käämin johtimia. Vastaavasti sisempi käämi kokee radiaalivoiman yrittäen puristaa käämiä kasaan. Kuvassa 1.6 esiintyvä aksiaalinen vuo saa siis aikaan radiaalivoiman, joka puristaa ensiökäämiä sisäänpäin ja venyttää toisiokäämiä ulospäin. [12]

Ideaalisessa tilanteessa, jolloin muuntajassa on tasaisesti jakautuneet käämikierrokset ja samankorkuiset ensiö- ja toisiokäämi, radiaalivuo saa aikaan aksiaalisen voiman. Aksiaalinen voima, joka esiintyy käämien päätyilmiön vuoksi käämin ylä- ja alaosassa, suuntautuu käämin keskipistettä kohden. Käämiin kohdistuvat voimat kasautuvat siten, että käämin keskiosaan kohdistuu suurin resuloiva voima. Rautasydäntä lähinnä olevaan käämiin syntyy suurempi radiaalivuo kuin uloimpaan käämiin. Tästä seuraa myös suurempi aksiaalinen voima, joten ensiöön kohdistuva voima on yleensä noin kaksi kertaa suurempi kuin toisioon kohdistuva voima. [12]

Oikosulkuvirrat voivat aiheuttaa suuria voimavaikutuksia käämityksiin. Käämissä kulkeva virta ja sitä vastaan kohtisuorassa oleva magneettivuontiheys saavat aikaan näitä kohtisuorassa olevan voiman. Käämien päätyilmiössä oleva radiaalinen vuo leikkaa kohtisuorasti käämissä kulkevaa virtaa, jolloin syntyy aksiaalinen voima. Tämä voima esiintyy päädyissä, joten voimavaikutus kohdistuu lähinnä käämin keskipistettä kohden ylä- ja alaosassa. Käämin keskellä magneettivuontiheys on aksiaalinen, joten syntyvä voima on radiaalinen, joka puristaa magneetoivaa käämitystä kohti rautasydäntä käämin keskiosassa. [12]

Radiaalivuon kasvuun ja samalla aksiaalisen voiman lisääntymiseen vaikuttavat monet asiat; ampeerikierrosten epätasainen jakautuminen ensiön ja toision välillä, eristeiden valmistuksessa niiden kutistuminen kuivauksen aikana, käämien epäsymmetrinen sijainti sydä-

men symmetria-akseliin nähden. On havaittu, että pienikin ero käämien sijainneilla voi saada aikaan suuria voimia, jotka saavat aikaan vaurioita muuntajan rakenteeseen ja johtavat muuntajan tuhoutumiseen. [12]

1.3.3 Hajavuohäviöt

Muuntajassa syntyvät häviöt voidaan luokitella kahteen ryhmään; Kuormituksesta riippuvat eli kuormitushäviöt P_k sekä kuormasta riippumattomat eli tyhjäkäyntihäviöt P_0 . Kuormitushäviöt ovat käämien resistansseissa tapahtuvia häviöitä (I^2R -häviöt) sekä myös lisähäviöitä, jotka tunnetaan hajavuohäviöinä P_σ . Hajavuohäviöitä synnyttävät käämien hajuvoimat sekä suuria virtoja kuljettavat johtimet. Hajavuohäviöt voidaan jakaa myös käämien pyörrevirtahäviöiksi P_e sekä kiertovirtahäviöiksi P_f . Kaikissa reaalisisä muuntajissa tapahtuu aina jonkin verran hajavuohäviöitä, jotka suurilla tehomuuntajilla kasvavat paljon nopeammin tehoon verrattuna kuin pienillä muuntajilla. Käämivuon vaikutus johtaviin osiin, kuten käämeihin ja rakenteellisiin osiin saa aikaan pyörrevirtoja niihin. Nämä häviöt voivat olla huomattavia, jos muuntajan suunnittelussa ei ole otettu huomioon johtimien geometrioita sekä johtimien vuorottelua. [12]

Hajavuohäviöt tulevat yhä merkittävämmiksi muuntajan tehon kasvaessa, koska tällöin muuntajassa tapahtuvat häviöt aiheuttavat pieniä muuntajia enemmän lämpenemistä ja mahdollisesti lyhentävät muuntajan käyttöikä. Markkinatilanne pakottaa jatkuvaan tuotekehitykseen ja kilpailuun, jolloin tuotteen tulee olla edullinen valmistaa. Magneettimateriaalien määrää pienennetään, jolloin myös muuntajan koko ja materiaalikustannukset pienenevät. Tämä johtaa väistämättä hajavoiden lisääntymiseen, jos kunnollisia suojamateriaaleja ei käytetä. Muuntajan suunnittelijan tulee tietää tarkasti muuntajassa tapahtuvat hajavuohäviöt, koska jokaisen häviötehona kuluvan kilowatin on arvioitu maksavan käyttäjälle 650-2200 euroa muuntajan elinkaaren aikana. Tällöin häviötehon väheneminen jopa muutamalla kilowatilla voi olla ratkaiseva etu kilpailutilanteessa. [12]

Muuntajan suunnittelussa tulee kiinnittää erityistä huomioita materiaalien valintaan. Tunkeutumissyvyys δ on tärkeä ja hyvä parametri kuvaamaan johteen ominaisuuksia magneetikentässä. Sähkökenttä vaimenee eksponentiaalisesti tunkeuduttaessa syvemmälle materiaalin sisään. Tunkeutumissyvyys määritetään kohdasta, jossa sähkökenttä on vaimentunut

e^{-1} osaan eli 36.8 prosenttiin. Tunkeutumissyvyys voidaan johtaa Maxwellin yhtälöistä (johdettu lähteessä [12]) ja sille saadaan yhtälön (1.6) mukaan

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}, \quad (1.6)$$

missä ω on magneettikentän kulmataajuus, μ materiaalin permeabiliteetti ja σ materiaalin johtavuus. Tunkeutumissyvydeksi kuparille, jonka suhteellinen permeabiliteetti on 1 ja johtavuus 4.74×10^7 S/m 75°C lämpötilassa, saadaan 50 hertsin taajuudella 10.3 mm. Tunkeutumissyvyyttä voidaan käyttää ns. pintailmiön (engl. skin effect) määrittämiseen. Materiaalin ominaisuuksista riippuen johdattaessa vaihtosähköä johtimen läpi, alkaa johtimessa kulkeva virta i keskittyä yhä lähemmäksi johtimen pintaa taajuuden f kasvaessa. Johtimen poikkipinta-alaa A kasvattamalla johtimen resistanssi R_{DC} tasasähköllä pienenee. Resistanssi vaihtosähköllä R_{ac} kasvaa merkittävästi tasasähköllä mitatusta arvosta käytettäessä suurempia taajuuksia f . Lisäksi voidaan osoittaa (osoitettu lähteessä [12]) Poyntingin vektorin avulla, että pinnalle tuleva teho P on pudonnut e^{-2} osaan eli 13.5 prosenttiin mentäessä tunkeutumissyvyydelle materiaalissa. Tämä on merkittävä tulos pyörrevirtahäviöiden tutkimisessa. [12]

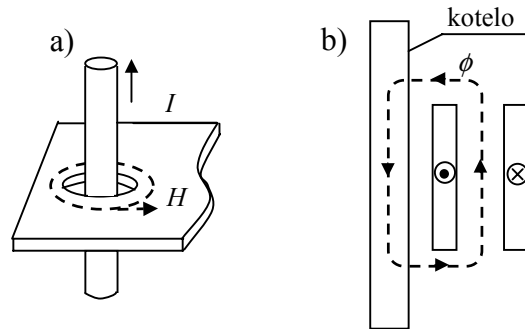
Johtimen ominaisuuksien sanotaan olevan resistanssirajoitteisia, jos johtimilla on pienet poikkipinta-alat, eli johdin on huomattavasti tunkeutumissyvyyttä ohuempi. Tällöin pyörrevirta I_e on 90° magnetointivirtaa I_m jäljessä. Kun taas vastaavasti paksuilla johtimilla, johtimen ominaisuuksien sanotaan olevan induktiivisesti rajoitettua. Tällöin johdin on huomattavasti paksumpi kuin tunkeutumissyvyys ja pyörrevirta on 180° magnetointivirtaa jäljessä. [12]

Suurin osa hajavuohäviöistä syntyy suurilla alueilla, kuten muuntajan säiliössä. Suuret hajavuohäviöt huonontavat muuntajan hyötysuhdetta. Pienemmissä rakenteellisissa osissa ei synny paljoa häviöitä, mutta niillä voi kuitenkin olla suuri ja kohtalokas vaikutus muuntajan kestoikään. Hajaannus pienissä osissa voi aiheuttaa paikallisesti suuren lämpötilan nousun eli hot spotin, joka heikentää rakenteita ja aiheuttaa ikääntymistä. [12]

Hajavuohäviöiden syntyä tutkittiin paljon analyyttisillä menetelmillä aina 1980 luvulle saakka, mutta analyyttiset menetelmät olivat rajoitettuja, eikä niistä ollut apua monimutkaisten geometrioiden tutkimisessa. Numeeristen menetelmien, kuten FEM-laskenta, kehityessä voitiin mallintaa huomattavasti haasteellisempia rakenteita. Numeeriset menetelmät mahdollistavat esimerkiksi pyörrevirtojen laskemisen erilaisissa metallikappaleissa helpommin kuin aiemmin. Tietokoneiden laskentateho on noussut räjähdysmäisesti ja on nykyään jo varsin riittävä FEM-mallien käyttöön. Numeeriset menetelmät vievät kuitenkin paljon aikaa ja laskentayrityksiä, joten haluttaessa nopeita tuloksia heikohkolla tarkkuudella voi olla perusteltua käyttää analyyttisiä menetelmiä. Hajavoiden laskenta on haasteellista, koska reaalin muuntaja on epäsymmetrinen ja kolmiulotteinen. Magneettimateriaali on epälineaarista ja on vaikea saada laskettua nopeita ja tarkkoja arvoja hajavuosta ja sen ilmiöistä. Hajavuohäviöiden komponentit on vaikea erottaa mitatuista kuormitushäviöistä, eikä kokeellisia mittaustuloksia ole saatavilla suurille muuntajille. [12]

Muuntajien tehon kasvun yhteydessä hajavuohäviöiden osa kuormitushäviöistä kasvaa huomattavasti. Suurissa muuntajissa hajavuohäviöt rakenteellisissa osissa voivat olla suuremmat kuin käämeissä syntyvät hajavuohäviöt. Suurin osa hajavuohäviöistä syntyy pinta-alaltaan suurissa osissa, kuten säiliössä ja runkorakenteissa. Hajavuohäviöt rakenteellisissa metalliosissa riippuu useista eri parametreista, kuten hajavuon suuruudesta, taajuudesta, resistiivisyydestä ρ , hajavuonkytkeytymistyyppistä sekä muista epäideaalisuuksista. [12]

Muuntajissa on pääasiassa kahta erilaista hajavuon kytkeytymistyyppiä, tangentialista sekä normaalisuuntaista, eli radiaalista kytkeytymistä. Kuvassa 1.7 a) on esitetty tangentialinen hajavuon kytkeytyminen ja kuvassa 1.7 b) normaalin suuntainen eli radiaalinen kytkeytyminen.



Kuva 1.7. Kuvassa on esitetty hajavuon kytkeytyminen tangentiaalisesti a) sekä normaalin suuntaisesti b) eli radiaalisesti. Kuvassa H on magneettikentänvoimakkuus, I virta sekä ϕ vuo.

Kuvasta 1.7 a) nähdään virran I ympärille syntyvä magneettikentänvoimakkuus H , joka on suoraan verrannollinen johtimessa kulkevan virran suuruuteen ja se voidaan määrittellä superpositioperiaatteen avulla. Kuva 1.7 a) voisi havainnollistaa esimerkiksi johtimen läpivientiä muuntajan tukirakenteessa, jolloin rakenteeseen syntyy kiertävä magneettikentänvoimakkuus. Kuvassa 1.7 b) nähdään vuon radiaalinen kytkeytyminen, jollaista esiintyy esimerkiksi käämien ja säiliön välisessä vuorovaikutuksessa. Hajavuohäviöiden suuruuden määrittäminen on huomattavasti vaikeampaa radiaalisen kytkeytymisen avulla, koska vain hajavuon normaalikomponenttia voidaan pitää suoraan verrannollisena johtimessa kulkevaan virtaan. Tangentiaalisen komponentin ja virran välinen yhteys onkin huomattavasti monimutkaisempi. [12]

Rautahäviöt

Rautahäviöt P_r johtuvat hajavuohäviöistä P_σ vuon taipuessa sydänmateriaalin laminaateissa radiaalisesti. Hajavuon määrään ja kulkureittiin vaikuttaa rinnakkaisten magneettiteiden suhteelliset reluktanssit sekä myös muuntajan kuormitustilanne. Hajakentän ja magneettikentän välinen vaihekulma määrää magneettipiirin kuormitustilanteen sekä kokonaisrautahäviöt kyseisellä ajan hetkellä. Tutkimusten mukaan hajavuon kulkureittiin vaikuttaa huomattavasti myös, jos ulompi tai sisempi käämi on oikosuljettu. Rautahäviöt koostuvat myös hystereesi- ja pyörrevirtahäviöistä. [12]

Suurissa muuntajissa radiaalinen vuo saa aikaan merkittäviä pyörrevirtoja sydämen laminaatteihin aiheuttaen niihin paikallisia kuumia pisteitä. Hajavuon tunkeutuminen laminoituun sydämeen eroaa huomattavasti massiivisydämeen verrattuna. Massiivisydämessä pyörrevirrat keskittyvät koko sydämeen ja vuo lävistää vain hieman pintaa pinta-ilmion

vuoksi. Vastaavasti laminoidulla sydämellä pyörrevirtojen kulkureittiä on rajoitettu ja vuo pääsee tunkeutumaan huomattavasti pintakerroksia syvemmälle. [12]

Rungon hajavuohäviöt

Muuntajan runko, joka tukee käämejä, on suorassa yhteydessä käämeissä syntyvään hajavuohon. Suuren pinta-alan ja tehokkaan jäähdytyksen vuoksi runkoon ei yleensä synny kuumia kohtia. On havaittu, että hajavuo muuntajan säiliössä ja rungossa on keskinäisesti kytketty. Rungossa käytetään terästä, alumiinia sekä epämagneettista terästä. Prototyypilaitteiston muuntaja on rakenteeltaan avonainen, eli tuuletus tapahtuu vapaan konvektion avulla. Tämän vuoksi siinä ei tarvita öljytäytteistä säiliötä lämmönsiirron parantamiseksi. [12]

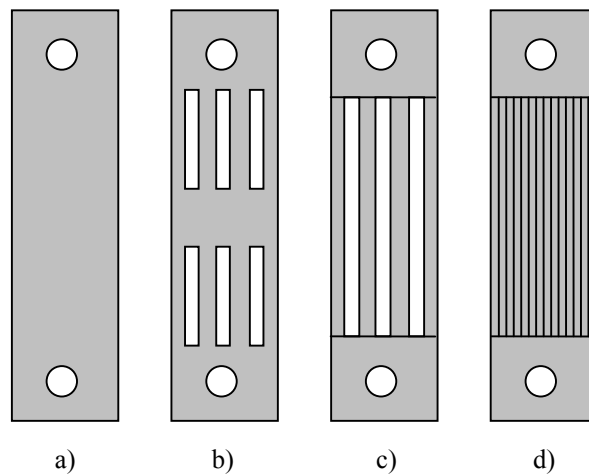
Epämagneettista terästä ei ole suotavaa käyttää muuntajan rungossa. Se on kallista, sitä on vaikea työstää ja sen hajavuohäviöt ovat pienet vain, jos rakenne on tarpeeksi ohutta. Hajavuohäviöitä rungossa voidaan vähentää käyttämällä alumiinikilpisuojausta tai tukemalla käämejä ei-metallisilla materiaaleilla. Jakelumuuntajan hajavuohäviöt säiliössä eivät ole suuria, koska vaikuttava hajavuo on pieni. Rungon hajavuohäviöt voivat suuren ensiövirran vuoksi olla jopa kilowattien luokkaa suurilla, kuten 2 MVA muuntajilla. Ei-metallisella rakenteella voidaan hajavuohäviöitä vähentää merkittävästi. [12]

Hajavuohäviöitä voidaan vähentää myös suunnittelemalla muuntajaan tulevien ja lähtevien johtimien läpiviennit siten, että johtimien magneettikentät kumoavat toisensa. Toinen vaihtoehto on korvata läpiviennin reuna epämagneettisella materiaalilla, jolloin hajavuo ei pääse kiertämään sitä. [12]

Hajavuohäviöt tukilevyissä

Hajavuontiheys sydänlaminaattien tukilevyissä (fitch plates) voi olla huomattavasti suurempi kuin säiliössä, koska sisemmässä käämissä syntyvä radiaalinen hajavuo ϕ_{gr} kohtaa tukilevyn välittömästi. Hajavuohäviöt levyissä eivät ole suuria kokonaishäviöihin P_h verrattuna, mutta ne voivat kuitenkin tuottaa vahingollisia kuumia pisteitä suuren vuontiheyden B ja huonon lämmönsiirron vuoksi. Häviötiheys voi johtaa katastrofaaliseen lämpötilaan nousuun, jos levyjen materiaalivalintaan ei kiinnitetä huomiota. Tällöin eristeet voivat vioittua lyhentäen muuntajan ikää merkittävästi. [12]

Laminaattien tukilevyjen muotoilulla voidaan vähentää kuumien pisteiden muodostumista. Pienissä muuntajissa vuontiheydet eivät ole suuria, joten niiden rakenteita ei tarvitse muokata. Suurissa muuntajissa eristeiden tuhoutumisriski on kuitenkin ilmeinen ja näiden puristuslevyihin valmistetaan aukkoja kohtiin, joissa vuontiheydet saavat suurimmat arvonsa eli puristuslevyn ylä- ja alaosiin. Kuvassa 1.8 on esitetty muotoillut sydämen laminaattien puristuslevyt, joilla voidaan vaikuttaa ratkaisevasti kuumien pisteiden syntyyn.



Kuva 1.8. Kuvassa on esitetty erilaiset sydänlaminaattien puristuslevyjen (fitch plates) rakenteet, joilla voidaan parantaa lämmönsiirtoa levyissä ja samalla ehkäistä kuumien pisteiden syntyminen. Kuvassa a) on tavallinen levy, b) levyn ylä- ja alareunoihin on tehty aukot, c) levyyn on tehty koko pituudelle jäähdytysaukot sekä d) levy on valmistettu laminaateista.

Kuvasta 1.8 nähdään a) muotoilemattomien sydänlaminaattien puristuslevy (fitch plate) sekä b) levyyn valmistetut jäähdytysaukot sen ylä- ja alaosaan. Vielä parempi lopputulos saavutetaan c) levyillä, joihin on sijoitettu aukot koko pituudelle. Tällöin kuitenkin mekaaninen kestävyys ei ole hyvä. Paras vaihtoehto kuitenkin d) on valmistaa levyt epämagneettisesta ruostumattomasta teräksestä, joka on valmistettu tarpeeksi ohuista laminaateista. Laminoitussa materiaalissa tapahtuu vain minimaalisia pyörrevirtoja sekä lisäksi se pyrkii estämään häviöitä sydämessä toimien magneettisena suojana. [12]

Kuva 1.2 on otettu koemuuntajasta ja muuntajan yläosasta voidaan havaita laminaattien tukilevyjen olevan massiiviterästä. Tukilevyt olisi kannattanut muotoilla kuvan 1.8 mukaisesti tai laminoitua, koska radiaalivuo aiheuttaa pyörrevirtahäviöitä näihin.

Puristuslevyissä syntyviin häviöihin vaikuttaa merkittävästi käämien aksiaalinen pituus l_a , sydämen ja ensiön ilmaväli δ_{cp} , käämin ja levyn ilmaväli δ_{wf} sekä ensiön ja toision ilmaväli δ_{ps} . Puristuslevyissä syntyvät häviöt korreloivat lähes lineaarisesti ensiön ja toision ilmavälin kanssa. [12]

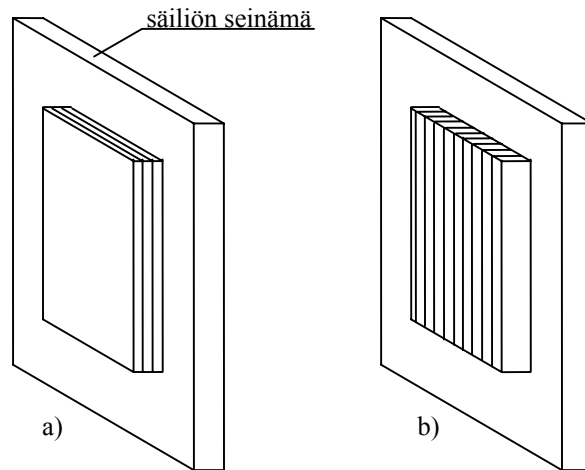
Hajavuohäviöt öljyeristeisen muuntajan säiliössä

Suurissa umpinaisessa öljyjäähdytteisessä muuntajasta säiliössä syntyvät hajavuohäviöt muodostavat suurimman osan kokonaishajavuohäviöstä P_σ . Radiaalinen hajavuo $\phi_{\sigma r}$ muodostaa kulkureitin ulomman käämin ja muuntajan säiliön seinän kanssa. Hajavuontiheys B_σ säiliön seinissä ei ole suuri, mutta suuren pinta-alan A vuoksi kuitenkin merkittävä osa kokonaishäviöistä P_h . Kuumia pisteitä ei yleensä säiliöön synny, koska öljy kuljettaa lämmön tehokkaasti pois. Hajahäviöitä ohjaillaan magneetti- ja pyörrevirtasuojilla. Hajahäviöitä tutkitaan analyttisillä ja numeerisilla menetelmillä 2- ja 3-ulotteisesti mallintamalla rakenteet geometrisesti ja syöttämällä tarvittavat parametrit, kuten reluktanssit, eri materiaaleille. [12]

Säiliö vaikuttaa myös muihin komponentteihin, joissa hajavuota esiintyy. Näiden kytkeytymiseen vaikuttaa säiliön ja käämin etäisyys verrattuna sydämen ja käämin etäisyyteen. Käämien päätyilmiö korostuu, jos säiliö on lähellä käämityksien keskikohtaa. Tällöin radiaalinen vuo kulkee säiliön kautta ja hajavuohäviöt lisääntyvät. [12]

Säiliön kiinnittämisessä käytetyt pultit joutuvat myös suuren vuontiheyden kohteeksi, koska suuret induoituneet virrat pakotetaan kulkemaan kiinnityspulttien lävitse. Näissä kohdissa vuontiheydet nousevat suuriksi ja syntyy kuumia pisteitä. Kuumat pisteet voidaan kuitenkin ennalta ehkäistä eristämällä pultit säiliöstä. Tällöin vuontiheys keskittyy muihin osiin, esimerkiksi laippoihin, jossa suuri lämpötilan nousu voi tuhota tiivisteet. Toisaalta taas huono sähkömagneettinen liitos eristetyn pultin kohdalla aiheuttaa suuren magnetomotorisen voiman putoamisen liitoksen yli, josta aiheutuu suurempi magneettikentänvoimakkuus pultin pinnalle. Tämä voi aiheuttaa suuria paikallisia pyörrevirtoja. Tästä johtuen säiliö ja kuori eivät ole samassa potentiaalissa, mikä olisi suotavaa. Parempi vaihtoehto on kuitenkin kytkeä kuori ja säiliö yhteen useilla matalaresistanssisilla johteilla. Tällöin potentiaaliero ei esiinny ja liitos on varmasti matalaresistanssinen, toisin kuin esimerkiksi maalattujen pulttien tapauksessa. [12]

Hajavoita voidaan ohjalla magneettisuojakilvillä sekä pyörrevirtasuojakilvillä, joskin magneettisuojat ovat tehokkaampia. Niiden kautta hajavuo kulkee haluttua ja ennalta määrättyä matalareluktanssista R_m reittiä pitkin. Magneettisuojakilpiä käytetään lähinnä hajavoiden torjumiseen rakenteellisissa komponenteissa. Kilvissä tapahtuvat häviöt ovat minimaalisia, jos ne ovat tarpeeksi ohuita ja valmistettu laminaateista. Kilpien tulisi olla korkeampia kuin käämit ja ne tulee sijoittaa ylä- ja alakeen keskikohtien väliin säiliön seinämälle. Magneettisuojakilpiä on sekä seinämän suuntaisesti laminoituja, että myös kohtisuoraan laminoituja, joista ensin mainitut ovat yleisempiä. Kuvassa 1.9 on esitetty magneettisuojat säiliön seinämässä.



Kuva 1.9. Kuvassa on esitetty muuntajan säiliön seinämän suuntaisesti a) ja sitä vastaan kohtisuorasti b) laminoituiden magneettisuojakilvet. Magneettisuojoilla voidaan ohjalla hajavoiden kulkua.

Kuvassa 1.9 nähdään seinämän suuntaisesti laminoitu suojakilpi a), joka valmistetaan yleensä muuntajan valmistuksessa ylijäämistä laminaateista. Suojan kerroksien tulee olla ohuita, mutta valmistuksessa työmäärä kuitenkin lisääntyy, joten hinta nousee ja tämä onkin valmistajien optimointikysymys. Suojakilven kerroksien ilmavälit tulee minimoida, että saavutetaan mahdollisimman tehokas suojaus. Radiaalivuo tunkeutuu erityisesti ylä- ja alaosasta kilpeen ja aksiaalivuontiheys B_a on suurimmillaan kilven keskiosassa, joten suojakilpeä kannattaa kaventaa ylä- ja alaosasta sekä vahventaa keskeltä. [12]

Kohtisuoraan laminoitu suojakilpi kuva 1.9 b) on parempi kuin edellinen, koska kohtisuoraan laminoituun kilpeen syntyy huomattavasti vähemmän pyörrevirtahäviöitä. Permeabiliteetti μ on suurempi tässä kilvessä, koska vuo ei lävistä ilmavälejä, kuten edellisessä tapauksessa. [12]

Pyörrevirtasuojakilpi on alumiinista (Al) tai kuparista (Cu) valmistettu ja sitä käytetään suojaamaan rakenteita suurilta virroilta ja hajavuokentilta. Niihin indusoituneet pyörrevirrat hylkivät hajavuokenttia vähentäen häviöitä rakenteellisissa osissa. Pyörrevirtakilpien eduksi luetaan se, että ne voidaan sijoittaa vaikeisiin paikkoihin, toisin kuin magneetikilvet. Lisäksi ne ovat hieman kevyempiä. Nämä kilvet ovat myös tehokkaampia säiliön suojauksessa verrattuna magneetikilpiin, koska näihin ei jää ilmavälejä. [12]

Suojakilpien käyttäminen on kannattavaa rakenteissa, mutta kilvissä itsessään tapahtuu myös häviöitä, jotka tulee ottaa huomioon. Kilpien mitat täytyy suunnitella huolella ja niihin tulee järjestää riittävä jäähdytys, sillä ne voivat lämmetä huomattavasti sekä kuljettaa lämpöä helposti vaurioituviin osiin. [12]

Hajavuohäviöt läpivienneissä

Muuntajien tehojen kasvaessa virrat kasvavat ja samalla myös rakenteissa läpivientejä ympäröivät pyörrevirrat lisääntyvät. Läpivientilevyt on yleensä tehty joko pehmeästä tai ruostumattomasta teräksestä. Pehmeä teräs on magneettista materiaalia, joten suuremmilla tehoilla siinä syntyy merkittävästi pyörrevirtoja ja sen lämpötila nousee. Tämän vuoksi suurilla tehoilla tulee käyttää ruostumatonta terästä läpivientilevyinä. Ruostumaton teräs on kuitenkin huomattavasti kalliimpaa, joten on myös mahdollista käyttää pehmeästä teräksestä valmistettua levyä, jonka reiät on yhdistetty toisiinsa ruostumattomasta teräksestä tehdyillä liitoksilla. [12]

Suurilla virroilla on myös johtimen muodolla rakenteisiin nähden merkitystä. Suorakaiteen muotoisen johtimen lyhyt sivu tulisi sijoittaa rakenteen suuntaisesti, koska näin saadaan rakenteessa syntyvät häviöt pienemmiksi.

Hajavuohäviöiden minimointi

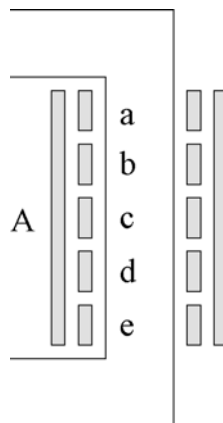
Hajavuohäviöitä rakenteissa voidaan minimoida:

- käyttämällä laminoituja materiaaleja
- käyttämällä suuri-resistiivisiä ρ materiaaleja
- käyttämällä pieni-permeabiliteettisiä μ materiaaleja pienentämään vuontiheyttä B
- pienentämällä vuontiheyttä käyttämällä matala-reluktanssisia R_m rinnakkaisia teitä

- pienentämällä vuontiheyttä kappaleessa käyttämällä hyvin johtavia suojakilpiä [12]

1.3.4 Erikoismuuntajan rakenne

Tutkittavassa koemuuntajassa ensiökäämien sijoittelu on toteutettu kuvan 1.3 mukaisesti. Ensiökäämit ovat päällekkäin kahdessa ryhmässä ja toisiokäämit näiden päällä. Erikoismuuntajan suunnitteluvaiheessa tutkittiin erilaisia käämien sijoitteluvaihtoehtoja. Kuvassa 1.10 on esitetty malli, jossa ensiökäämit ovat kokonaan erilliset ja rinnakkain sydämeen nähden.



Kuva 1.10. Kuvassa on esitetty käämien sijoittelumalli, jossa ensiökäämit ovat rinnakkain sydämeen nähden ja jokainen reilusti erillään. Ensiökäämien päälle käämitään suuri toisiokäämi koko alalle.

Kuvasta 1.10 voidaan havaita, että ensiökäämit ovat reilusti erillään toisistaan ja sijaitsevat rinnakkain muuntajan sydämeen nähden. Sijoittelussa muodostuu reilusti hajaannusta ensiökäämien välille, mikä on hyvä asia juuri tätä sähkökäyttöä silmällä pitäen. Tällöin taajuudenmuuttajat eivät kytkeydy niin vahvasti toisiinsa, eivätkä ne siten aiheuta toisilleen häiriöitä. Suodatustarve ennen muuntajaa vähenee. Huonona puolena sijoittelussa kuitenkin on häviöiden merkittävä kasvu, koska ensiöiden päädyissä syntyvä radiaalinen vuo leikkaa toisiokäämin kohtisuoraan. Tästä aiheutuu huomattavasti pyörrevirtahäviöitä toisiokäämiin. Lisäksi käämien läpiviennit ovat valmistusteknisesti haasteellisia.

Kuvan 1.3 mukaisella käämien sijoittelulla saadaan aikaan hyötysuhteeltaan hyvä muuntaja. Tällöin ensiöiden kytkeytyminen toisiinsa on lähes ideaalista ja ensiöissä tapahtuu todella vähän hajaannusta. Tämä ei kuitenkaan tutkimushankkeen kannalta ole pelkästään edullista, koska tällöin taajuudenmuuttajille tulee suunnitella erilliset lähtösuotimet, jotta

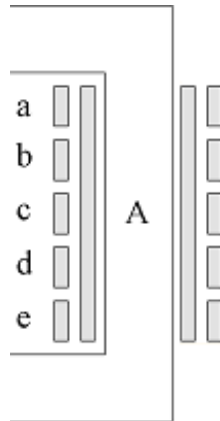
taajuudenmuuttajien keskinäiseltä häirinnältä vältyttäisiin. Kuvassa 1.11 on esitetty tutkitavan muuntajan käämien sijoittelu.



Kuva 1.11. Kuvassa on esitetty tutkitavan muuntajan ensiökäämien ja toisiokäämien sijoittelu. Kuvasta havaitaan ensiöiden 1-3 olevan samana ryhmänä lähinnä sydäntä ja ensiöt 4 ja 5 niiden päällä toisena ensiöryhmänä. Näiden väliin jää tuuletuskanava. Toisiokäämi on ulommaisena kahdessa osassa sarjaan kytkettynä ja myös näiden väliin jää tuuletuskanavat.

Kuvassa havaitaan ensiöiden olevan kahdessa ryhmässä lähempänä sydäntä ja toision olevan sarjaankytketty kahdessa osassa. Näiden käämien väliin on jätetty riittävän lämmönsiirron takaamiseksi tuuletuskanavat. Kuvasta voidaan havaita myös sydämen laminointi sekä käämien vahvat muotokuparijohteet. Muuntajalle on tehty mittauksia ensiöiden kytkeytymisestä, jotka esitetään seuraavassa luvussa.

Tulevaisuuden kannalta olisi mielenkiintoista tutkia muuntajaa, jossa käämit vaihtaisivat paikkaansa verrattuna kuvan 1.10 tilanteeseen. Kuvassa 1.12 on esitetty käämien sijoittelu erikoismuuntajassa, jossa uloimmat ensiökäämit koostuvat rinnakkaisista osista sydämeen nähden ja sisempi toisiokäämi on yhtenäinen.

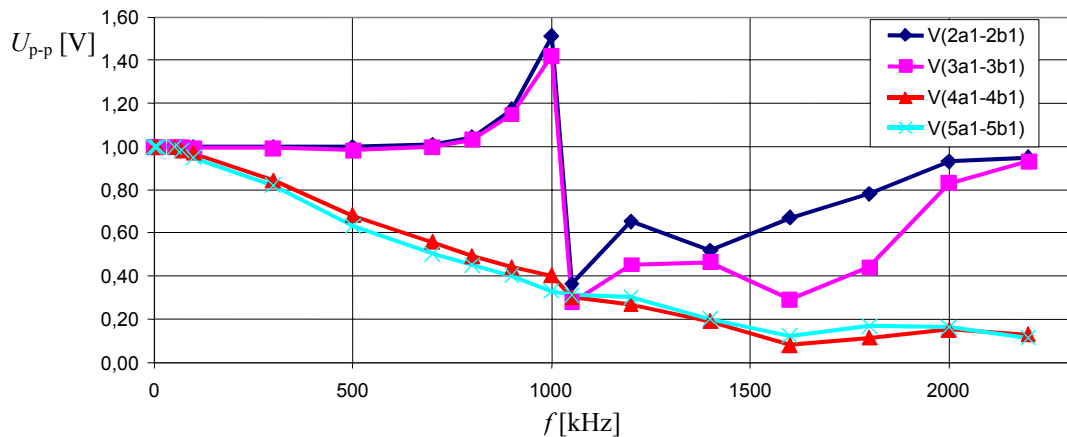


Kuva 1.12. Kuvassa on esitetty käämien mahdollinen sijoittelu tulevaisuutta ajatellen. Mielenkiintoinen jatkokutkimuskohde olisi määrittää käämien sijoittelulla saadut positiiviset ja negatiiviset ominaisuudet kyseistä käyttöä silmällä pitäen.

Kuvan 1.12 mukainen käämien sijoittelu tarjoaisi mielenkiintoisen tutkimuskohteen tulevaisuutta ajatellen. Ensiöiden ollessa ulommaisena saataisiin nykyistä selvästi enemmän hajaannusta näiden välille, jolloin taajuudenmuuttajien lähtösuodatusta voitaisiin keventää. Riittävän suurella tuuletuskanavalla ensiöiden ja toision välissä saataisiin myös radiaalisen vuon aiheuttamat pyörrevirtahäviöt pienenevästi merkittävästi. Ensiöiden läpiviennitkin olisi huomattavasti helpommin toteutettavissa kuin ensin tutkitulla, kuvan 1.10 mukaisella mallilla.

1.3.5 Erikoismuuntajan kytkeytyminen

Tutkittava erikoismuuntaja koostuu viidestä ensiökäämistä ja yhdestä toisiokäämistä. Tällöin muuntajan ensiöiden ja toision välillä tapahtuu induktiivista, kapasitiivista, resonansseista johtuvaa sekä kolmiovirtojen aiheuttamaa kytkeytymistä. Muuntajalle on tehty mittauksia, joista voidaan tarkastella erilaisia kytkeytymisiä, kun muuntajan ensimmäiseen ensiöön syötetään $U_{p-p} = 1.0 \pm 0.01$ V sinisignaalia. Kuvassa 1.3 on esitetty muuntajan geometria sekä käämien sijainti toisiinsa nähden. Siitä voidaan havaita, että ensiöt 1-3 sekä 4 ja 5 ovat omina ryhminään, joiden välissä on jäädytystä parantava ilmakehä. Tällä tuuletuskanavalla on merkittävä osuus käämien välisessä kytkeytymisessä. Kuvassa 1.12 on esitetty ensimmäisen vaiheen kytkeytyminen ensiöillä 2-5, kun ensiön 1 yhteen vaiheeseen syötetään signaaligeneraattorilla sinijännitettä taajuuksilla 1 kHz- 2.2 MHz.



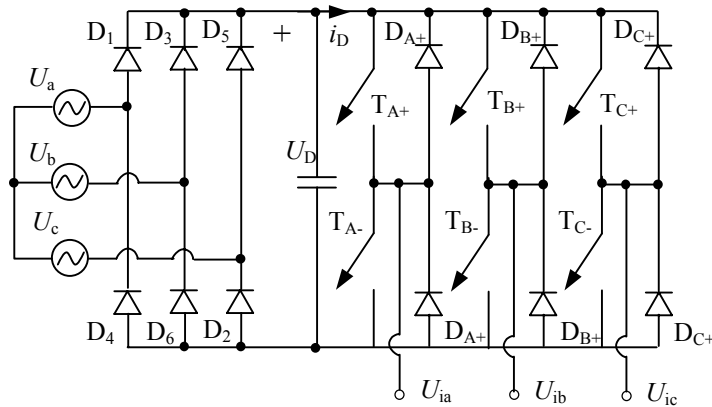
Kuva 1.12. Kuvassa on esitetty ensiöissä 2-5 näkyvät jännitteet, kun 1. ensiötä syötetään signaaligeneraattorilla jännitteellä $U_{p-p} = 1.0$ V. Mittaus rajoittuu taajuuskaistalle 1 kHz-2.2 MHz. Induktiivinen kytketyminen on dominoivaa matalammilla taajuuksilla ja korkeammilla taajuuksilla kapasitiivinen kytketyminen ja resonanssit dominoivat. Kuva otettu lähteestä [5].

Kuvasta 1.12 voidaan nähdä ensiöiden kytketykset taajuuden funktiona. Kytketyminen on induktiivista matalilla taajuuksilla ja korkeammilla taajuuksilla kapasitiivinen kytkentä ja resonanssit dominoivat. Kuvasta voidaan havaita ensiöiden kytketyksen olevan lähes täydellistä alle 100 kHz:n taajuudella. Suuremmilla taajuuksilla vain ensiöiden 2 ja 3 kytketyksen voidaan katsoa olevan lähes täydellistä, mutta ensiöiden 4 ja 5 olevan huomattavasti heikommin kytketyneet. Tämä johtuu lähinnä ensiöryhmien välisestä tuuletuskanavasta, jossa tapahtuu hajaannusta suuremmilla taajuuksilla. Hieman alle 1 MHz:n taajuudella voidaan havaita 2. ja 3. ensiön resonanssitaajuus, koska resonanssitaajuus vahvistaa huomattavasti syötettyä jännitettä. Vastaavasti ensiöillä 4 ja 5 ei resonanssia esiinny tutkitulla taajuuskaistalla. [5]

Kuvasta 1.12 voidaan päätellä moniensiöisessä muuntajassa tapahtuvan hieman erilaisia ilmiöitä kuin yksiensiöisessä muuntajassa. Kuitenkin ilmiöiden syntymekanismit ovat luonteeltaan samanlaisia ja siksi tässä opinnäytetyössä syvennytään tarkemmin yksiensiöisen muuntajamallin ilmiöihin.

2 TAAJUUDENMUUTTAJAN LÄHDÖN SUODATUS

Taajuudenmuuttaja koostuu tasasuuntaajasta, jossa diodisiltakytkennällä jännitteet U_{a-c} tasasuunnataan taajuudenmuuttajan tasajännitevälipiiriin U_D . Tasajännitevälipiiristä jännite vaihtosuunnataan halutulle taajuudelle f kytkemällä puolijohdekytkimiä sopivasti, jolloin syntyvästä käyrämuodosta voidaan erottaa perusaallon taajuinen komponentti. Kuvassa 2.1 on esitetty taajuudenmuuttajan tasasuuntaussilta, tasajännitevälipiiri sekä vaihtosuuntaussilta.



Kuva 2.1. Kuvassa on esitetty taajuudenmuuttajan periaatteellinen kytkentä. Verkosta tulevaa kolmivaiheista sinijännitelähdettä kuvataan kirjaimilla U_{a-c} , tasasuuntausdiodit merkitään D_x , puolijohdekytkimet T_{X+} ja T_{X-} sekä niiden rinnalla olevat diodit D_{X+} ja D_{X-} . Invertterin jalkoja, joita kolmivaiheisessa taajuudenmuuttajassa on kolme, merkitään kirjaimilla U_{ia-c} . Tasajännitevälipiiri U_D ja sen kuormalle syöttämä virta i_D on myös merkitty kuvaan.

Kuvassa 2.1 oleva taajuudenmuuttaja on kolmivaiheinen kaksitasoinen invertteri, koska siinä kuormalle syötettävä jännite U_i voi saada vain kaksi arvoa, positiivisen ja negatiivisen. Kolmitasoisissa invertterissä olisi vaihejännitteellä U_v lisäksi nollassa. Verkosta tuleva jännite U tasasuunnataan kokosiltasuuntaajalla, jolloin myös negatiivinen jännitepulsси käännetään positiiviseksi. Tällöin tasajännitevälipiirin jännitteelle U_D saadaan yhtälön (2.1) mukainen riippuvuus tasasuunnattavaan verkkojännitteeseen

$$U_D = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U, \quad (2.1)$$

missä U on verkon pääjännitteen tehollisarvo. Tällöin esimerkiksi 400 voltin pääjännitteellä saadaan välipiirin jännitteeksi 540 voltia ja vastaavasti 690 voltin pääjännitteellä väli-

piirin jännitteeksi saadaan 932 voltia. Puolijohdekytkimiä, yleensä IGB-transistoreja (Insulated Gate Bipolar Transistor), ohjailaan perinteisessä skalaariohjauksessa muodostamalla ohjauspulsseja vertailemalla tietyn taajuista f_s (kytkentätaajuus) kolmioaaltoa perusaallon taajuiseen f siniaaltoon. Vertailulogiikan perusteella saadaan ohjauspulssit puolijohdekytkimille, joilla saadaan aikaan pulssimainen kanttiaalto. [14]

Askelmaisesta jännitteen käyrämuodosta aiheutuu jännitteen U ja virran I harmonisia yliaaltoja h , jotka voidaan laskea yhtälöstä (2.2)

$$h = 1 + 6k, \quad \text{missä } k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.2)$$

Harmonisen aallon järjestysluku h saa parittomia arvoja, joista merkittävimmät ovat $h = 1, -5, 7, -11, 13$. Harmonisen yliaallon taajuus f_h on perusaallon taajuus f kerrottuna järjestysluvulla ja negatiivinen etumerkki kuvaa, esimerkiksi moottorin tilanteessa perusaallon vastakkaiseen suuntaan kulkevaa harmonista yliaaltoa. Yliaallon tehollisarvolle U_h pätee yhtälö (2.3)

$$U_h = \frac{1}{h} \cdot U, \quad (2.3)$$

missä U on perusaallon tehollisarvo. Esimerkiksi 5. harmoninen yliaalto etenee vastakkaiseen suuntaan ja sen taajuus f_5 on viisinkertainen perusaaltoon nähden ja sen tehollisarvo U_5 on pudonnut viidenteen osaan perusaallon jännitteestä. [15]

Pulssinleveysmoduloinnilla (PWM) toteutettu jännitteen U ja taajuuden f säätö tuottaa kytkenätaajuuden f_s harmonisia yliaaltoja h . Yhtälöstä (2.4) voidaan ratkaista kytkenätaajuuden sekä perustaajuuden f suhde m_f

$$m_f = \frac{f_s}{f}, \quad (2.4)$$

jonka avulla syntyviä harmonisia yliaaltoja voidaan esittää. PWM-tekniikka tuottaa harmonisia yliaaltoja kytkenätaajuuden kerrannaisille. Syntyvät yliaallot riippuvat myös mo-

dulointisuhteesta m_a , joka kuvaa vertaillun kolmiaallon U_{kolmio} ja siniaallon U_{ohjaus} amplitu-
dien suhdetta. Merkittävimpiä kytkentätaajuuden harmonisia ovat $h = m_f, m_f \pm 2, m_f \pm 4, 2m_f$
 $\pm 1, 2m_f \pm 3, \dots$. Sarjasta voidaan havaita sääntö, jolloin harmonisen ollessa pariton, siihen
lisätään tai vähennetään parillinen komponentti. Vastaavasti harmonisen ollessa parillinen,
siihen lisätään tai vähennetään pariton komponentti. [14]

2.1 Harmonisten yliaaltojen vaikutus muuntajan ominaisuuksiin

Taajuudenmuuttaja tuottaa sekä jännitteen että virran harmonisia yliaaltoja ja lisäksi jois-
sakin tilanteissa myös tasakomponentin, josta aiheutuu ylimääräisiä häviöitä. Jännitteen
harmoniset yliaallot U_h aiheuttavat muuntajan sydämeen rautahäviöitä P_r sekä lisäksi ne
vaikuttavat myös vuontiheyden B huippuarvoon. Jännitteen harmonisisältöön voidaan
vaikuttaa muuntajan ensiön kytkennällä. Virran yliaallot I_h sen sijaan aiheuttavat häviöitä
käämityksissä ja muuntajan metallisissa rakenneosissa. Jännitteen tai virran tasakompo-
nentti puolestaan kasvattaa muuntajan sydämessä syntyviä rautahäviöitä. [16]

Yliaaltojen muuntajaan synnyttämiä häviöitä on vaikea päätellä yksivaiheisen sijaiskyt-
kennän perusteella, koska kaikki yksivaiheisen sijaiskytkennän komponentit ovat epäline-
aarisia taajuuden f sekä lämpötilan T suhteen ja kyllästystilan muutokset vaikuttavat häviö-
öihin. Tilannetta vaikeuttaa entisestään jännitteen ja virran koostuminen useista eri taajui-
sista komponenteista. Näiden komponenttien vaikutuksia ei voida tutkia erikseen, koska
yksittäisten yliaaltojen summa voi erota merkittävästi rezultoivasta aallosta. [16]

Magnetointi-induktanssi L_m on raudan epälineaarisuudesta johtuen epälineaarinen ja sen
arvo riippuu vuontiheyden huippuarvosta. Tähän taas vaikuttaa jännitteen rezultoiva käy-
rämuoto U_{res} . Lisäksi myös kokonaisrautahäviöt P_r ovat voimakkaasti riippuvaisia vuon ϕ
käyrämuodosta. Rautahäviöitä ja magnetoitumista tulee tarkastella jännitteen rezultoivan
käyrämuodon mukaan. Resistanssit R ja induktanssit L kuormitushaaroissa ovat taajuudesta
riippuvaisia, mutta niissä ei tapahdu mitään kyllästysilmiöiden kaltaisia epälineaarisuuksia.
Muuntaja poikkeaa siten huomattavasti oikosulkumoottorin sijaiskytkennästä, koska moot-
torin hajainduktanssit L_σ ovat voimakkaasti riippuvia kuormitustilasta kyllästyksen vuoksi.
Myös hajainduktanssit moottorissa ovat enemmän taajuudesta riippuvia kuin muuntajalla,
koska roottorissa tapahtuu virranahtoa. [16]

2.1.1 Harmoniset muuntajan magnetoinnissa

Taajuudenmuuttajalla voidaan säätää moottorin pyörimisnopeutta pitämällä moottorin ja muuntajan vuo vakiona. Tällöin jännitteen U ja taajuuden f suhde U/f tulee pysyä vakiona, jolloin myös magnetointivirta I_m on vakio. Käämin jännitteen hetkellisarvon u ja vuon ϕ välille saadaan yhtälön (2.5) mukaan

$$u = N \frac{d\phi}{dt}, \quad (2.5)$$

missä N on käämin kierrosluku. Ratkaisemalla tästä vuo, saadaan yhtälö (2.6)

$$\phi = \frac{1}{N} \int u dt + \phi_0, \quad (2.6)$$

missä on ϕ_0 vuon alkuarvo. Yhtälöstä voidaan havaita jännitteen käyrämuodon vaikuttavan vuon arvoon. Magneettivuo sisältää samat yliaallot kuin jännite, mutta vuon yliaaltojen amplitudit ovat jännitteen yliaaltoihin nähden kääntäen verrannollisia järjestyslukuun. Pyörrevirtojen vaikutuksesta vuo on epätasaisesti jakautunut raudan poikkileikkaukselle vuon suuritaajuisilla komponenteilla. Tällöin suurin osa vuosta kulkee levyn pinnassa, jolloin vuontiheyden jakauma on epätasainen. [16]

Suuritaajuiset vuot eivät tunkeudu muuntajan sydänmateriaaliin kunnolla siinä esiintyvien pyörrevirtojen vuoksi. Tämän takia magnetoimisinduktanssin näennäinen arvo pienenee voimakkaasti taajuuden kasvaessa.

Keskimääräiselle sydämessä vaikuttavalle magneettivuontiheyden huippuarvolle \hat{B} saadaan yhtälön (2.7) mukaan

$$\hat{B} = \frac{\hat{\phi}}{A}, \quad (2.7)$$

missä A on rautasydämen poikkileikkauksen nettopinta-ala ja $\hat{\phi}$ on magneettivuon huippuarvo. Rautasydämen suunnittelussa ja mitoituksessa vuontiheyden huippuarvo on tärkein suure ja tähän voidaan vaikuttaa käämin kierrosluvun N ja sydämen poikkipinta-alan avulla. [16]

Rautasydämessä kiertävä vuo indusoi toisiokäämiin sähkömotorisen voiman e_2 , joka vastaa muodoltaan ensiöjännitettä e_1 . Toision jännitteen suuruus määräytyy ensiön ja toision käämikierrosten N_1/N_2 suhteen mukaisesti. [16]

Magneettimateriaalin magnetointiominaisuudet ovat samanlaiset tasa- ja vaihtovirtamagnetoinnilla, kun taajuus on pieni. Samanaikainen magnetointi tasa- ja vaihtovirtamagnetoinnilla muuttaa tasavirtamagnetointia riippuen vuontiheyden vaihtokomponentin määräämästä kyllästystasosta. Vaihtokomponentin hystereesisilmukoista tulee tasakentän polarisoivan vaikutuksen vuoksi epäsymmetrisiä. [16]

2.1.2 Harmoniset muuntajan häviöissä

Vaihteleva vuo aiheuttaa rautasydämessä häviöitä, jotka voidaan jakaa hystereesihäviöihin ja pyörrevirtahäviöihin.

Hystereesihäviöt ovat verrannollisia hystereesisilmukan pinta-alaan A_{hyst} , joten tutkimalla yliaaltojen vaikutusta hystereesisilmukan pinta-alaan, päästään käsiksi myös yliaaltojen aiheuttamiin hystereesihäviöihin P_{hyst} . Yliaaltojen itseisarvoista ja vaihekulmista perusaaltoon nähden ja myös yliaaltojen järjestyslukuista johtuen muodostuu lisähystereesisilmukoita. Lisäsilmuksia syntyy, kun resaltoivassa vuontiheydessä on useita paikallisia vuontiheysminimi- ja -maksimiarvoja. Tällöin tapahtuu vuontiheyden nopeita muutoksia dB/dt . Syntyvien lisäsilmuksien kokoon vaikuttaa vuontiheyden poikkeama ΔB , poikkeaman sijainti sekä vuontiheyden huippuarvo. Samansuuruiset poikkeamat eri osissa hystereesisilmukkaa voivat vaikuttaa eri tavalla, esimerkiksi silmukan huipulla olevan lisäsilmuksien pinta-ala on kyllästyksen vuoksi suurempi kuin vastaavan nollatasossa sijaitsevan silmukan. [16]

Pyörrevirtahäviöiden P_e määrittämisessä ohuissa laminaateissa ei edes sinimuotoisella vuolla ole täysin onnistuttu, koska tarkkaa menetelmää tähän ei ole löytynyt. Pyörrevirtahäviöiden on todettu enemmän liittyvän mikrorakenteen ilmiöihin kuin klassiseen induktioilmiöön. Teoreettisesti saadut arvot ovat liian pieniä verrattuna mitattuihin arvoihin. Pyörrevirtahäviöitä yliaalloilla voidaan laskea erilaisilla approksimaatioilla, joissa verrataan siniaallon synnyttämiä pyörrevirtoja yliaaltoja sisältävään jännitteeseen. Approksimaatiossa käytetään korjauskerrointa k_w , joka ottaa huomioon harmoniset yliaallot ja jännitteen särön. [16]

Pyörrevirtahäviöitä voidaan tutkia myös jännitteen muotokertoimen F avulla, koska pyörrevirtahäviöt ovat suoraan verrannollisia muotokertoimen neliöön. Jännitteen muotokertoimelle F pätee yhtälö (2.8)

$$F = \frac{U}{U_M}, \quad (2.8)$$

missä U on jännitteen tehollisarvo sekä U_M on jännitteen tasasuuntauskeskiarvo. Siniaallon muotokertoimeksi saadaan $F_{\sin}=1.11$ (johdettu lähteessä [16]), joten pyörrevirtahäviöiden korjauskertoimeksi k_w saadaan yhtälön (2.9) mukaan

$$k_w = F_0^2 = \left(\frac{F}{F_{\sin}} \right)^2, \quad (2.9)$$

missä F_0 on säröytyneen jännitteen ja sinimuotoisen jännitteen muotokertoimien suhde. Nyt korjauskertoimen avulla, voidaan ratkaista säröytyneen jännitteen kokonaispyörrevirtahäviöt P_e yhtälön (2.10) mukaan

$$P_e = k_w \cdot P_{e,\sin}, \quad (2.10)$$

missä $P_{e,\sin}$ on sinimuotoisen jännitteen pyörrevirtahäviöt. Korjauskertoimen määrittäminen muotokertoimen avulla on helppoa, eikä jännitteen analysointia tarvitse tehdä. [16]

Kuormitushäviöitä määritettäessä yliaaltoja sisältävällä kuormitusvirralla tulee häviöt määrittää erikseen tasavirtaresistanssille ja erikseen muille yliaalloille, koska kuormitushäviöt ovat vahvasti taajuudesta riippuvaisia. Lisähäviöt muodostuvat hajavuon aiheuttamista häviöistä käämeissä sekä muissa rakenteissa. [16]

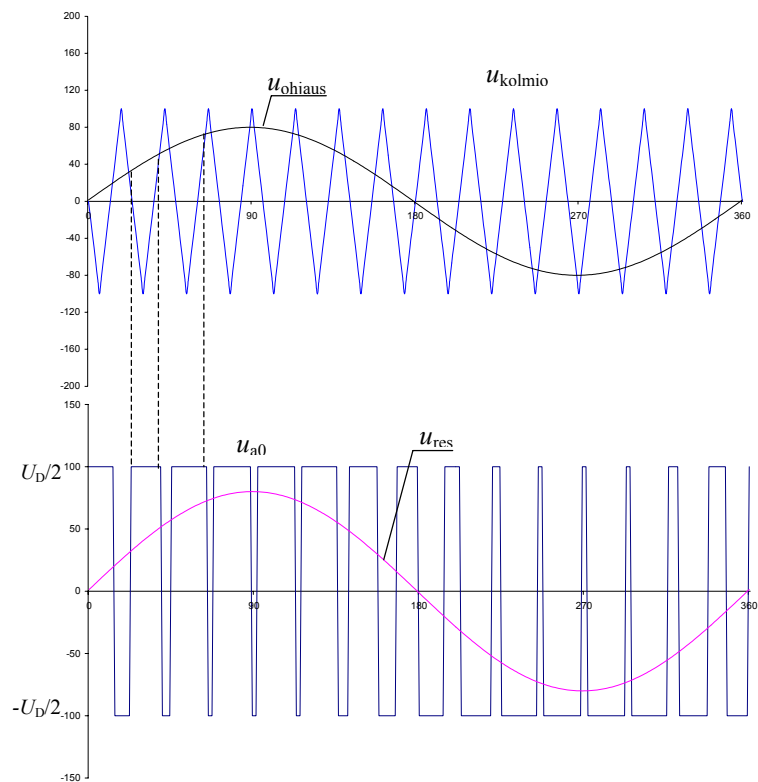
Taajuudenmuuttaja voi kehittää epäsymmetriasta johtuen lähtöjännitteeseen jännitteen tasakomponentin U_{DC} ja jännitteen parillisia yliaaltoja. Jännitteen parilliset yliaallot ovat kuitenkin mittausten mukaan osoittautuneet merkityksettömiksi. Tasakomponentti sen sijaan on ollut vain satoja millivolteja, joka kokee vain käämin tasavirtaresistanssin R_{DC} . Se riittää synnyttämään jopa satojen ampeerien tasavirran I_{DC} . Virtaa rajoittavat kuitenkin muut tekijät ja mittauksissa on havaittu, että virta on muutamia ampeereja. [16]

Vuon tasavirtakomponentti ϕ_{DC} kasvattaa raudan hystereesihäviöitä, koska hystereesisiilmukat tulevat epäsymmetrisiksi ja niiden pinta-ala A_{hyst} kasvaa verrattuna vaihtovirtamagnetointiin samalla vuontiheyden vaihtokomponentin \hat{B}_{ac} huippuarvolla. Demagnetoivan ilmiön vuoksi hystereesihäviöiden kasvu riippuu vuontiheyden vaihtokomponentin ja kentänvoimakkuuden H_{DC} tasakomponentin arvoista. Vuontiheyden vaihtokomponentin ollessa vakio, hystereesihäviöt kasvavat kentänvoimakkuuden tasakomponentin kasvaessa. Suuremmalla vuontiheyden vaihtokomponentilla häviöiden suhteellinen kasvu on pienempi, mikä viittaa juuri demagnetoivaan ilmiöön. [16]

2.2 Taajuudenmuuttajan lähdön käyrämuodot

Moottorin skalaarisella pyörimisnopeussäädöllä täytyy moottoriin saada tuotettua vakio käämivuo ψ nimellispisteeseen n_n saakka. Tämä onnistuu pitämällä jännitteen U ja taajuuden f suhde vakiona. Pyörimisnopeuden n kasvaessa, myös jännitteen tulee kasvaa samassa suhteessa. Nimellispistettä suuremmilla nopeuksilla jännitteen yläraja U_{max} tulee vastaan, eikä jännitettä voida enää kasvattaa. Tämän vuoksi täytyy mennä kentänheikennys alueelle, jossa moottorin käämivuo pienenee, kun taajuus f kasvaa ja jännite pysyy vakiona. Suurnopeuskäytöissä ei kuitenkaan mennä kentänheikennykseen. [17]

Taajuudenmuuttajan lähtöjännitteen käyrämuotoa ohjailaan pulssinleveysmoduloinnilla (PWM), jolloin kytkentätaajuista f_s kolmioaaltoa U_{kolmio} vertaillaan ohjausjännitteeseen U_{ohjaus} . Näitä vertailemalla muodostetaan ohjauspulssit puolijohdekytkimille. Haluttu jännitteen käyrämuoto on siniaaltoa, joten vertaamalla kolmioaaltoa perusaallon taajuiseen siniaaltoon, saadaan käyrämuoto, josta voidaan erottaa resultoiva siniaalto. Kuvassa 2.2 on esitetty yhden vaiheen ohjausjännitteen, kolmioaallon, syntyvän jännitteen sekä resultoivan siniaallon käyrämuodot.



Kuva 2.3. Kuvassa on esitetty taajuudenmuuttajan PWM-tekniikalla toteutettujen puolijohdekytkimien ohjaussignaalien muodostaminen. Ohjausjännitettä u_{ohjaus} ja kolmioaaltoa u_{kolmio} vertailemalla muodostuu puolijohdekytkimille ohjauspulssit. Kytkimiä kytkemällä saadaan oletettua nollapotentiaalia vasten syntyväksi jännitteeksi u_{a0} , jonka huippuarvo on puolet välipiirin jännitteestä $U_D/2$. Tehollisarvoltaan perusaallon taajuisen resultoiva jännitteen komponentti u_{res} on myös esitetty kuvassa.

Kuvassa havaitaan syntyvän jännitteen maksimiarvon olevan puolet välipiirin jännitteestä mitattuna oletettua nollapistettä vasten. Ohjauspulssit esimerkiksi A -vaiheelle muodostuvat sinikolmiovertailulla, eli kytkin T_{A+} johtaa, kun u_{ohjaus} on suurempi kuin u_{kolmio} . Tällöin u_{a0} on $U_D/2$ ja vastaavasti ohjausjännitteen ollessa pienempi kuin kolmioaalto johtaa kytkin T_{A-} ja u_{a0} on $-U_D/2$. Kolmivaiheinen jännite saadaan aikaan tekemällä kaikille vaiheille sinikolmiovertailu ja muodostamalla näille 120° vaihesiirto eri vaiheiden välille. [14]

2.2.1 KytKentätaajuus

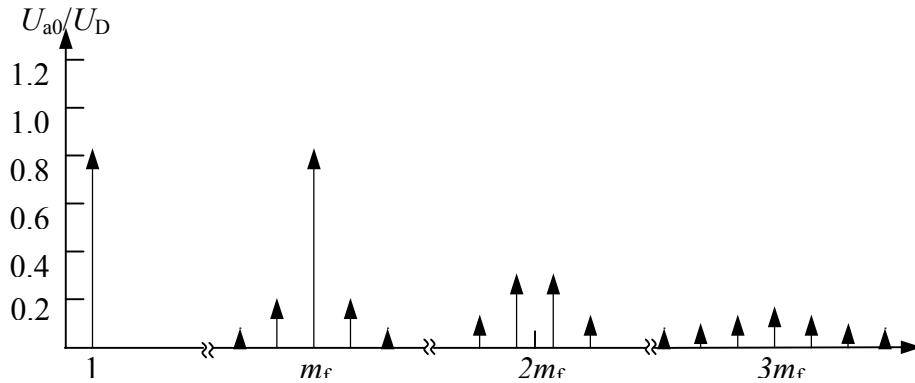
Pulssinleveysmoduloinnissa (PWM) kytKentätaajuus f_s on sinikolmiovertailussa käytettävän kolmioaallon taajuus, jota kutsutaan myös kantoaalloksi. Puolijohdekytkimiä kytkeään enintään tällä taajuudella. Puolijohdekytkimissä tapahtuu aina tehohäviöitä. Kun kytkin on estotilassa, sen yli vaikuttaa jännite, mutta virtaa ei juuri kulje. Kun kytkin vaihtuu päästötilaan eli se suljetaan, alkaa jännite kytkimen yli pudota ja samalla kytkimen läpi kulkeva virta kasvaa. Tällöin jännitteen ja virran samanaikainen esiintyminen kytkimessä aiheuttaa tehohäviöitä kytkimessä, jotka muuttuvat lämmöksi. Päästötilassa kytkimen yli vaikuttaa myös pieni jännite, mutta päästötilasta estotilaan siirryttäessä jännite alkaa kasvaa ja sen jälkeen virta pudota. Näissä kytKentäilmiöissä syntyvä lämpö täytyy kyetä siirtämään pois, ettei taajuudenmuuttaja ylikuumene ja aiheuta suojauspiirin toiminnalla käytön pysähtymistä. Luonnollisesti mitä suurempi kytKentätaajuus, sitä enemmän tapahtuu häviöitä, jotka lämmittävät taajuudenmuuttajaa. [14]

KytKentätaajuus synnyttää harmonisia yliaaltoja PWM-tekniikalla toteutetussa kytkennässä. Harmoniset yliaallot ovat riippuvaisia taajuuden modulointiasteesta m_f sekä amplitudin modulointiasteesta m_a . Taajuuden modulointiaste on yhtälön (2.4) mukaan kytKentätaajuuden f_s sekä perusaallon f suhde. Amplitudin modulointiaste on puolestaan yhtälön (2.11) mukaan

$$m_a = \frac{u_{\text{kolmio}}}{u_{\text{ohjaus}}}, \quad (2.11)$$

missä u_{kolmio} ja u_{ohjaus} ovat kolmio- ja ohjausjännitteen amplitudit.

PWM-taajuudenmuuttajan kytKentätaajuuden läheisyydessä esiintyy syöttöjännitteen harmonisten sivukaistoja. Haluttaessa mahdollisimman sinimuotoinen virta, tulee kytKentätaajuutta nostaa. Nykyaikaisissa moottorin ohjauslaitteissa, kuten vektorisäädössä, ei ole kiinteää jännitteen modulointimenetelmää, joten taajuusspektri ei pysy vakiona. Harmonisia esiintyy kuitenkin lähes samalla tavalla, kuten kuvassa 2.3, joka esittää kytKentätaajuisen harmonisten esiintymistä. [17]



Kuva 2.3. Kuvassa on esitetty taajuudenmuuttajan kytkentätaajuuden läheisyyden harmoniset sekä sen monikerrat. Kuvassa taajuuden modulointisuhde m_f on 15 ja amplitudin modulointiaste m_a on 0.8.

Kuvassa havaitaan syöttöjännitteen harmoniset yliaallot kytkentätaajuuden läheisyydessä sekä kytkentätaajuuden monikertoina. Taajuudenmuuttajan säröytynyt jännite aiheuttaa säröjä myös moottorin ottamaan virtaan. Suuritaajuiset ilmiöt kohtaavat moottorin transientti-induktanssin L'_s ja kytkentätaajuisia vuokomponentteja esiintyy varsin vähän ilmevässä sekä niiden tunkeutuminen koneen rautapiireihin on vähäistä. Näistä huolimatta kytkentätaajuisia häviökomponentteja syntyy kuitenkin oikosulkumoottoriin. Mitä suurempi kytkentätaajuus, sitä paremmin moottorin ottama virta muistuttaa siniaaltoa ja sitä pienemmiksi jäävät taajuudenmuuttajakäytön aiheuttamat lisähäviöt. [17]

2.2.2 Modulointiaste

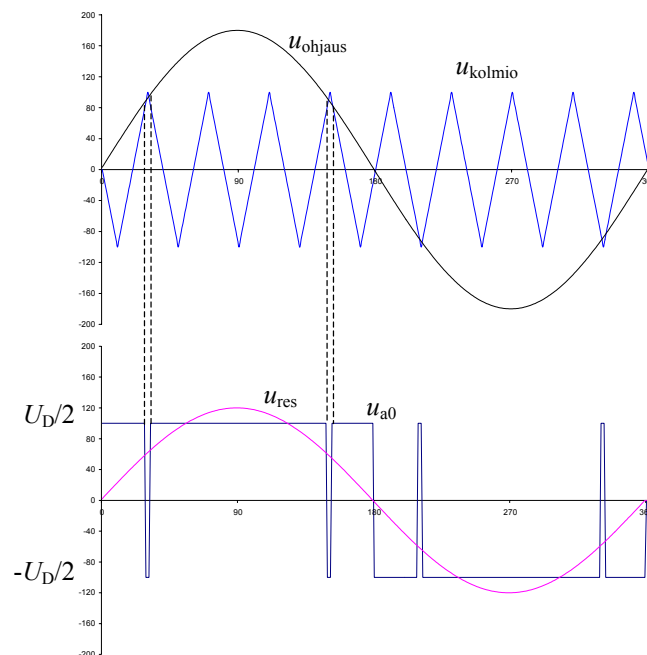
Modulointiaste määritetään yhtälöllä (2.11), jossa siis verrataan ohjausjännitteen u_{ohjaus} huippuarvoa kolmioaallon u_{kolmio} huippuarvoon. Resultoivan siniaallon yhden vaiheen jännitteen huippuarvon \hat{u}_{res} ja välipiirin jännitteen U_D välille voidaan esittää yhtälön (2.12) mukainen yhteys

$$\hat{u}_{res} = m_a \cdot \frac{U_D}{2}, \quad (2.12)$$

kun modulointiaste on alle 1.0. Pulssinleveyden ja samalla resultoivan jännitteen säätö modulointiastetta muuttamalla on lineaarista, kun modulointiaste on alle 1.0. Tällöin jännite on suoraan verrannollinen modulointiasteeseen. Modulointiasteen ollessa 1.0 on sini-

kolmiovertailussa sini- ja kolmioaallon amplitudit yhtä suuret, mutta kasvatettaessa modulointisuhdetta edelleen mennään ylimodulaatioon. [14]

Yhtälöstä (2.1) voidaan laskea verkkojännitteestä tasasuuntaamalla saatu välipiirin maksimijännite. Tästä havaitaan, että esimerkiksi 400 voltin pääjännitteellä välipiirin jännitteeksi saadaan 540.2 voltia. Vaihtosuuntaamalla saadun yhden vaiheen rezultoivan siniaallon huippuarvoksi saadaan 270.0 voltia, kun lasketaan yhtälöllä (2.12) ja käytetään modulointiasteena 1.0. Yhden vaiheen jännitteen tehollisarvoksi U_v saadaan 191.0 voltia. Tästä voidaan päätellä, että moottoria ei voida säätää nimellispisteeseen saakka pitämällä vuo vakiona, koska jännitettä ei pystytä nostamaan tarpeeksi. Tämän vuoksi onkin turvaututtava ylimodulointiin, jolloin modulointiaste on välillä 1.0-3.24. Kuvassa 2.4 on esitetty ylimoduloidun ohjausjännitteen ja syntyvän jännitteen käyrämuodot.

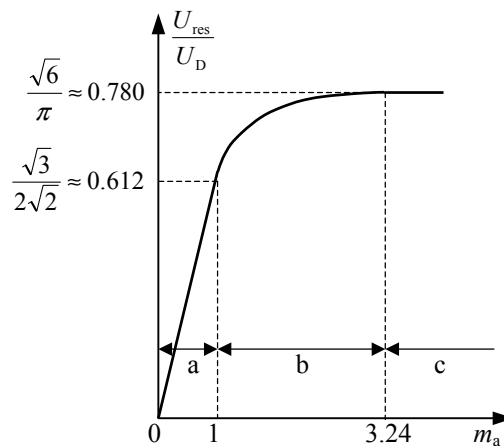


Kuva 2.4. Kuvassa on esitetty yhden vaiheen ylimoduloidun jännitteen käyrämuoto u_{a0} kuviteltua nollapotentiaalia vastaan sekä ohjaus- ja kolmioaaltajännite u_{ohjaus} sekä u_{kolmio} . Modulointiaste m_a on 1.8, jolla saadaan suunnilleen nimellisjännitettä U_{nim} vastaava rezultoiva jännite.

Kuvassa on esitetty ylimoduloidun jännitteen käyrämuoto, josta voidaan havaita jännitteen muistuttavan yhä enemmän kanttiaaltoa. Ylimodulointialueella ($1.0 < m_a < 3.24$) syntyvän jännitteen tehollisarvo U_{res} ei ole suoraan verrannollinen modulointiasteeseen, koska pulssien leveys ei ole lineaarisessa suhteessa modulointiasteeseen. Ylimodulointi aiheuttaa perusaallon matalataajuisia harmonisia yliaaltoja, kuitenkin dominoivat harmoniset voivat

hieman pienentyä lineaariseen modulointiin verrattuna. Tämän vuoksi kytkentätaajuiset häviöt eivät ole niin suuria kuin voisi odottaa, ja ne voivat olla jopa pienempiä kuin lineaarisella moduloinnilla syntyvät harmoniset häviöt. [14]

Kasvatettaessa modulointiastetta m_a edelleen reilusti päästään vähitellen kanttiaaltoalueeseen. Kanttiaaltomodulointi on erikoistapaus PWM-tekniikasta, jossa modulointiaste on yli 3.24. Tällön sini-kolmiovertailussa ohjausjännite on koko puolijakson suurempi kuin kolmioaalto, eivätkä ne tällöin leikkaa toisiaan. Tämän vuoksi myös syntyvä jännite on koko puolijaksoa kestävästä jännitepulsseista syntyvää kanttiaaltoa. Toimiakseen kanttiaaltotekniikalla täytyy taajuudenmuuttajan välipiirin jännitteen olla säädettävissä, koska muutoin resultoivan jännitteen suuruutta ei kyetä säätämään. Kuvassa 2.5 on esitetty resultoivan pääjännitteen U_{res} tehollisarvon suhde välipiiriin jännitteeseen U_D modulointiasteen m_a funktiona.



Kuva 2.5. Kuvassa on esitetty kolmivaiheisen taajuudenmuuttajan lähtöjännitteen tehollisarvon U_{res} suhde välipiiriin jännitteeseen U_D modulointiasteen m_a funktiona. Pulssinleveysmoduloinnissa lineaarinen modulointi tapahtuu alueella a ja alueella b mennään ylimodulointiin, jolloin lähtöjännite käyttäytyy epälineaarisesti modulointiasteeseen nähden. Kanttiaaltoalueella c oltaessa jännitteen tehollisarvoa ei kyetä säätämään modulointiasteella, vaan se täytyy tehdä välipiiriin jännitettä muuttamalla.

Kuvasta 2.5 voidaan erottaa lineaarinen alue a, jossa jännitteen säätö on suoraan verrannollinen modulointiasteeseen. Alueella b mennään ylimodulointiin, jolloin taajuudenmuuttaja kykenee tuottamaan nimellisjännitteen U_{nim} moottorille. Alueella c ollaan kanttiaaltoalueella, jolloin modulointiasteen kasvattaminen ei vaikuta lähtöjännitteeseen, koska pulssien leveydet ovat jo puolijakson pituisia. Tällöin jokainen kytkin on johtavassa tilassa 180°

jakson T ajasta eli koko ajan on kolme kytkintä suljettuna. Pääjännitteen tehollisarvolle U_{res} kanttiaaltotekniikalla saadaan yhtälön (2.13) mukaan

$$U_{\text{res}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 4 \cdot U_{\text{D}}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot 2} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} U_{\text{D}}, \quad (2.13)$$

mistä nähdään välipiirin jännitteen U_{D} vaikutus pääjännitteeseen. Kanttiaaltotekniikka tuottaa harmonisia pääjännitteeseen yhtälön (2.14) mukaan

$$U_{\text{h}} = \frac{0.78}{h} U_{\text{D}}, \quad (2.14)$$

missä h on harmonisen yliaallon järjestysluku ja $h = 6k \pm 1$, kun k saa arvot 1,2,3.... Harmonisten yliaaltojen amplitudi pienenee kääntäen verrannollisesti niiden järjestyslukuun nähden. Yhtälö (2.14) ei kuitenkaan päde kytkentätaajuuden harmonisille. [14]

2.3 Taajuudenmuuttajan lähtöjännitteen suodatustarve

Moottorin eristeiden kokema rasitus taajuudenmuuttajakäytössä on tutkimuksen alla, koska liian nopeasti nousevat jännitepulssit (du/dt) vahingoittavat eristyksiä ja aiheuttavat ylijännitteitä riittävän pitkissä kaapeleissa. Nykyaikaisilla IGBT-taajuudenmuuttajilla jännitteen nousunopeudet voivat olla 10 000 voltia mikrosekunnissa, mikä voi aiheuttaa heijastuspisteessä jännitteen kaksinkertaistumisen käytettäessä jopa vain 10-20 metrin pituisia moottorin syöttökaapeleita. Nopeat jännitteen muutokset aiheuttavat myös laakerivirtoja, pyörrevirtahäviöitä sydänmateriaaliin sekä virranahtohäviöitä käämityksiin. du/dt -ongelman ratkaisemiseksi on tutkittu kaapelin moottorin päähän asennettavia passiivisia suotimia, resonanssitaajuudenmuuttajia sekä passiivisia taajuudenmuuttajan lähdönsuodattimia. [18]

LC -suodattimet ovat hankintahintaansa verrattuina tehokkaimpia suodatuskyvyltään, mutta ne voivat olla ongelmallisia resonanssiipiikin synnyttämien ylijännitteiden vuoksi. Tämän vuoksi LC -suotimen resonanssitaajuus f_r yleensä mitoitetaan merkittävästi (alle 10 kertaa) alemmaksi kuin kytkentätaajuus f_s , jolloin kyseessä on sinisuodin. Kuorman resonoinnin vuoksi resonanssitaajuuden tulee olla huomattavasti perustaajuuden f yläpuolella, ettei

suodin resonoi perusaallon kanssa. LC -suotimen toteutus on haastavaa alle 10 kilohertsin kytkentätaajuuksilla. Suotimen käyttötarkoitus määrää suotimen mitoituksen. Jos kytkentätaajuutta ei haluta suodattaa pois, vaan pelkästään rajoittaa jännitteen nousunopeuksia, niin silloin resonanssitaajuus voidaan mitoittaa kytkentätaajuuden yläpuolelle. Tällöin kyseessä on du/dt -suodin, jonka suodatus on huomattavasti vähäisempää sinisuotimeen verrattuna. [18]

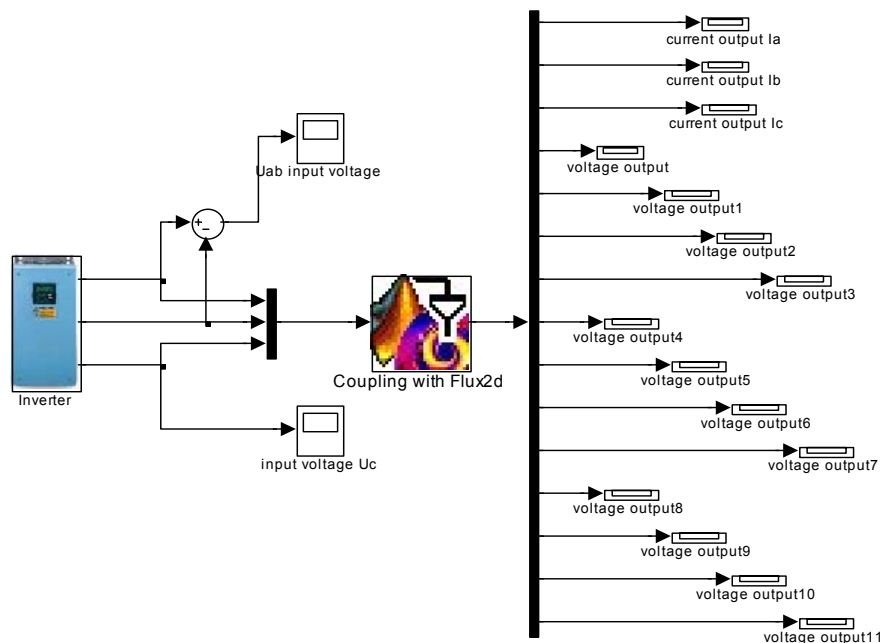
Monet taajuudenmuuttajakäytön hyvät ominaisuudet, kuten nopea dynaaminen vaste, tehokkuus, matala melutaso, koko ja paino vaativat nopeat kytkimet tehoasteeseen. Yleensä käytetään IGBT-tekniikkaa (Insulated Gate Bipolar Transistor). Nopeista kytkentäilmiöistä on myös haittavaikutuksia, jotka voivat vaikuttaa ulkoiseen ja sisäiseen sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen (EMC). [19]

Suurin sähkömagneettisia ongelmia tuottava lähde on yhteismuotoinen (common mode, CM) jännite U_{CM} , joka johtuu lähinnä epätasapainoisista kytkennöistä kaksitasoisissa taajuudenmuuttajissa. Hetkellinen sähköinen epätasapaino aiheuttaa yhteismuotoista jännitettä, joka näkyy laitteiston nollatasossa. Yhteismuotoisen jännitteen nopeat nousureunat aiheuttavat kapasitiivista kytkentää moottorissa ja kaapelissa, josta voi aiheutua moottorin akselin varautuminen. [19]

3 PROTOTYYPILAITTEISTON SIMULOINTEJA

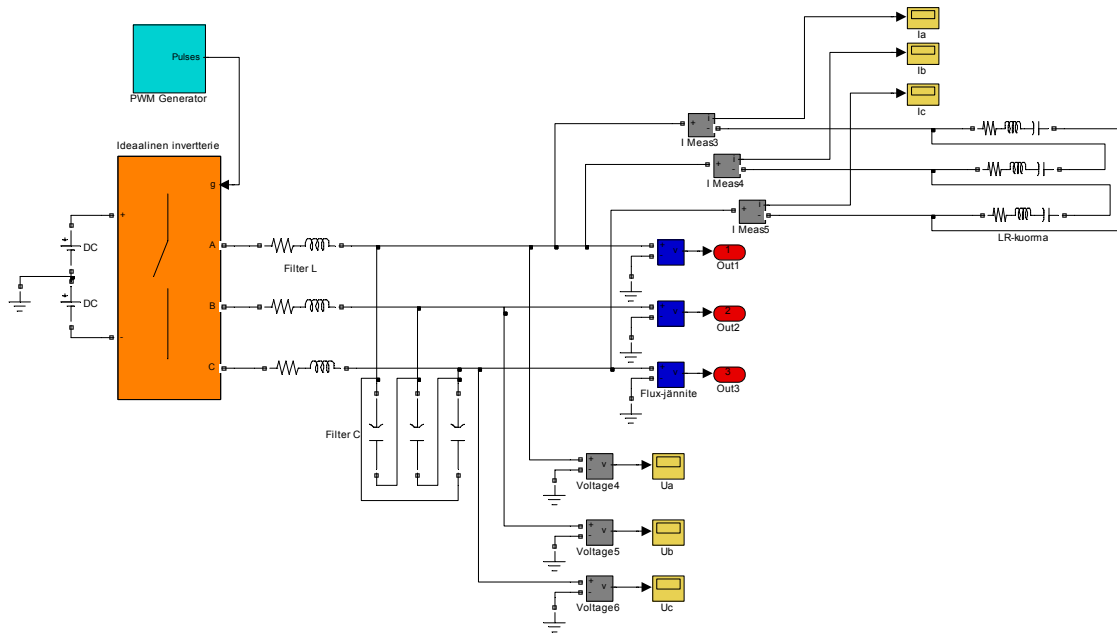
Viiden rinnakkaisen taajuudenmuuttajan, jännitteennostomuuntajan ja induktiomoottorin muodostamaan sähkökäyttöä simuloidaan Simulink-simulointiohjelmistolla, jonka sisälle on rakennettu FEM-malli (finite element method) Flux-ohjelmistolla.

FEM-ohjelmisto on numeeriseen menetelmään perustuva ratkaisumalli, joka kykenee kuvaamaan varsin aidosti muuntajassa tapahtuvia magneettisia ilmiöitä. FEM-mallilla voidaan ottaa huomioon ferromagneettisten materiaalien kyllästyminen, hajavuon vaikutus ja kulkureitit sekä korkeat toimintalämpötilat T . Muuntajan malliin tulee syöttää materiaalien ominaisuudet, kappaleen geometria sekä ratkaisun reunaehdot. Simuloinnissa muodostetaan elementtiverkko, jonka tiheyttä voidaan tarvittaessa lisätä mielenkiintoisista kohdista. Tällöin saadaan tarkkoja tuloksia kiinnostavista asioista, mutta samalla simulointiaika t_s kasvaa. Simuloinnit vaativat laskevalta tietokoneelta todella paljon laskentatehoa, sillä simuloinnit ovat raskaita ainakin lyhyellä aika-askeleella T_s ja tiheällä laskentaverkostolla. Sähkökäyttöä simuloidaan kuvan 3.1 mukaisella järjestelmällä.



Kuva 3.1. Kuvassa on esitetty Simulink-ohjelmiston simulointimalli, jossa viedään taajuudenmuuttajasta tulevat jännitteet muuntajasta muodostettuun Flux-malliin. Muuntajasta ulos tulevia jännitteitä u ja virtoja i mitataan ja syötetään leikepöydälle. Invertteri-kuvake esittää osasysteemiä, jossa simuloidaan taajuudenmuuttajalla syötettynä suotimen ja kuorman muodostamaa systeemiä. Tämä on esitetty kuvassa 3.2.

Kuvassa on esitetty Simulink-malli, jonka sisälle on rakennettu muuntajan magneettipiiriä kuvaava Flux-malli. Tällöin voidaan tutkia muuntajasta ulos tulevien jännitteiden u ja virtojen i käyrämuotoja. Kuvassa 3.2 on esitetty taajuudenmuuttajan, suotimen ja kuorman muodostama simulointimalli, joka on kuvan 3.1 osasysteemi.



Kuva 3.2. Kuvassa on esitetty ideaalisen taajuudenmuuttajan kytkentä, jonka kytkeä ohjataan pulssinleveysmodulointigeneraattorilla. Kuormana on muuntajaa ja moottoria kuvaava LR -piiri ja heti taajuudenmuuttajan jälkeen kuorman kanssa sarjassa olevat suotimen induktanssit L_f sekä rinnankytketyt kondensaattorit C_f .

Kuvassa 3.2 nähdään ideaalinen taajuudenmuuttaja, jonka kuormana on moottoria ja muuntajaa kuvaava LR -piiri. Simuloitu suodin on LC -suodin, jonka induktanssi L_f on kuorman kanssa sarjassa ja kondensaattori C_f rinnalla. Flux-malliin signaalit tulee syöttää jännitteinä, joten mitataan tulevat jännitteet ennen LR -piiriä ja syötetään signaalit Flux-malliin. Mallissa on lisäksi useita eri virran ja jännitteiden mittauksia.

3.1 Simulointimallin yksinkertaistukset

Simulointimalli poikkeaa reaalisesta tilanteesta seuraavien yksinkertaistusten vuoksi.

Muuntajassa esiintyy kapasitansseja muuntajan käämikierrosten, käämien sekä käämien ja maatason välillä. Käämien induktanssit L eivät merkittävästi vaikuta nopeisiin jännitepulsseihin, koska magneettikenttä vaatii tietyn ajan kehittyäkseen, joten jännitepulssit ovat liian nopeita tähän verrattuna. Kapasitanssien C simulointi onkin erittäin haastavaa ja tähän ei ole olemassa valmista simulointimallia. Simuloinneissa ei oteta huomioon muuntajassa sekä muuntajan ja maatason välillä esiintyviä kapasitansseja.

Simulointimallissa syötetään yhdellä taajuudenmuuttajalla muuntajan Flux-mallia ja tämän muuntajan ensiön teho P on viisinkertainen prototyypilaitteiston taajuudenmuuttajaan verrattuna. Tällöin muuntajan magneettinen malli voidaan pelkistää koostuvaksi yhdestä, eli sisimmäisestä ensiökäämistä, jolla voidaan havainnollistaa riittävällä tarkkuudella muuntajan toimintaa. Tällöin myös vaadittava simulointiaika lyhenee merkittävästi. Malli on taajuudenmuuttajien välisen kytkeytymisen kannalta rajusti yksinkertaistettu. Todellisen viisiensioisen systeemin oletetaan toimivan, kunhan tällä simuloinnilla saadut ensiön jännitekäyrämuodot ovat riittävän sinimuotoisia.

Kuormana oleva moottori on esitetty LR -piirinä, koska tällä tavoin simulointia voidaan hieman nopeuttaa ja simulointi kuvaa kohtalaisella tarkkuudella moottorin ominaisuuksia. Mutta simulointi ei ota huomioon moottorissa tapahtuvia nopeita ilmiöitä eikä transientti-induktansseja L'_s . LR -piirin arvot on laskettu nimellisestä moottorin toimintapisteestä nimellisvirralle I_{nim} , josta voidaan ratkaista kuorman impedanssi Z nimellisjännitteellä U_{nim} . Moottorin nimellisarvoista voidaan ratkaista moottorin tehokerroin yhtälön (3.1) mukaan

$$\cos(\varphi) = \frac{U_{nim} \cdot I_{nim} \cdot \sqrt{3} \cdot \eta}{P_{nim}}, \quad (3.1)$$

missä U_{nim} , I_{nim} sekä P_{nim} ovat moottorin nimellispääjännite, -virta sekä -akseliteho. Moottorin hyötysuhde η voidaan mittausten perusteella olettaa 96 prosenttiin. Moottorin nimellisarvot sijoittamalla edelliseen yhtälöön saadaan moottorin tehokerroimeksi

$$\cos(\varphi_m) = \frac{1000\text{kW}}{690\text{V} \cdot 1151\text{A} \cdot \sqrt{3} \cdot 0.96} = 0.757258 \approx 0.76.$$

Reaalinen muuntaja on teholtaan pienempi kuin moottori, joten muuntajan ja moottorin muodostama kuorma tulee laskea simuloinnissa muuntajan nimellisvirran I_{nim} mukaan. Tätä suuremmilla virroilla muuntaja ylikuormittuu ja lämpiää, jolloin on vaarana muuntajan tuhoutuminen. Muuntajan toisiojännitteestä U_2 ja näennäistehosta S_{nim} voidaan laskea toisiovirta I_2 yhtälöllä (3.2) ja saadaan

$$I_2 = \frac{S_{nim}}{U_2 \cdot \sqrt{3}} = \frac{1000\text{KVA}}{710\text{V} \cdot \sqrt{3}} = 813.2\text{A}. \quad (3.2)$$

Ensiövirta I_1 voidaan ratkaista samalla yhtälöllä sijoittamalla toisiojännitteen paikalle ensiöjännite $U_1 = 690\text{V}$, jolloin ensiövirraksi saadaan 836.5 A. Mittaustuloksia hyväksi käyttäen saadaan muuntajalle tehokerroin $\cos(\varphi)$. Muuntajan ja moottorin impedansseja Z_t ja Z_m käyttämällä, sekä näiden tehokertoimet huomioon ottaen, voidaan yhtälöllä (3.3) määrittää näiden muodostaman kuorman kokonaistehokerroin $\cos(\varphi_{tot})$

$$\cos(\varphi_{tot}) = \frac{Z_t \cdot \cos(\varphi_t) + Z_m \cdot \cos(\varphi_m)}{Z_t + Z_m}. \quad (3.3)$$

Sijoittamalla yhtälöön arvot, saadaan koko kuorman tehokertoimeksi 0.68. Muuntajaa ja moottoria kuvaava kuorma simulointimallissa voidaan asettaa nimellispistettä vastaavaksi, kun tiedetään LR -piirin tehokerroin. Samoin muuntajan Flux-mallissa muuntajan kuormana olevan moottorin parametrit voidaan skaalata oikeiksi virran simuloinneilla.

Taajuudenmuuttaja on kuvattu ideaalisilla kytkimillä, jolloin taajuudenmuuttajassa ei tapahdu häviöitä. Reaalisilla puolijohdekytkimillä toteutetussa taajuudenmuuttajassa kytkimet tarvitsevat tietyn pituisen sammumisajan t_b , ennen kuin kytkin voidaan kytkeä päälle. Tällä estetään erilaisia läpilyöntitilanteita sekä kiertovirtoja taajuudenmuuttajassa. Sammumisaika on nopeilla IGBT-komponenteilla vain muutama mikrosekunti. Kytkinten sammumisaikana niissä tapahtuu tehohäviöitä P_h . Tällöin jännitteen käyrämuoto poikkeaa hieman ideaalisesta käyrämuodosta kytkinten sammumisajan pituisen johtamattomuuden vuoksi. [14]

3.2 Simuloinnin toteutus

Simuloinneissa tutustutaan muuntajan käyrämuotoihin erilaisilla kytkentätaajuuksilla ilman suodinta sekä erilaisilla LC -suotimen mitoitusarvoilla. Simulointi on toteutettu kolmessa osassa.

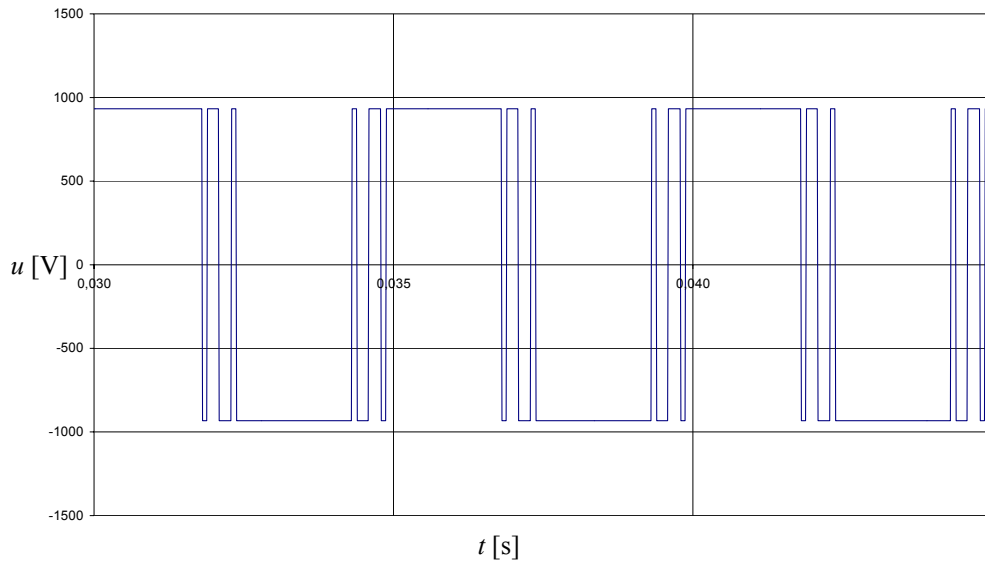
Aluksi valitaan sopiva kytkentätaajuus f_s syöttämällä muuntajamallia ilman suotimia taajuuden ollessa nimellinen $f_{nim} = 200\text{Hz}$. Moottoria ajetaan eri kuormituksilla siten, että moottori on tyhjäkäynnissä, 50 prosentin teholla sekä 70 prosentin teholla. Tällöin moottorin ja muuntajan ottamat virrat ovat noin $I_{n40} = 350\text{ A}$, $I_{n70} = 593\text{ A}$ sekä $I_n = 836\text{ A}$, jotka on merkitty muuntajan nimellisvirran mukaan. Saaduista käyrämuodoista verrataan syötetyn virran ja jännitteen sekä muuntajasta ulos saatavan virran käyrämuotoja eri kytkentätaajuuksilla. Näistä valitaan optimaalisin kytkentätaajuus ottaen huomioon myös kytkentätaajuuden kasvusta aiheutuvat lisähäviöt taajuudenmuuttajaan.

Seuraavaksi lisätään simulointiin LC -suodin, johon jää kolme prosenttia jännitettä, $U_f = 3$ prosenttia. Vaihdeltaan suotimen parametreja muuttelemalla suotimen resonanssitaajuutta eli samalla myös rajataajuutta. Tällöin käytetään edellä valittua kytkentätaajuutta ja pidetään taajuus f ja moottorin kuormitus vakiona, eli moottori on tyhjäkäynnissä. Resonanssitaajuus tulee sinisuotimelle sijoittaa kytkentätaajuuden ja perusaallon taajuuden väliin, joten tutkitaan resonanssitaajuutta 300 Hz:stä 2100 Hz:iin saakka, jolloin rajataajuus on jo yli 3200 Hz. Myös tässä verrataan syötetyn jännitteen ja Flux-mallista ulos saatavia jännitteen ja virran käyrämuotoja. Näiden käyrämuotojen sekä jännitteen ja virran kokonaisharmonissärön THD (total harmonic distortion) perusteella valitaan sopiva resonanssitaajuus f_r .

Viimeisessä vaiheessa varioidaan suotimeen jäävän jännitteen U_f osuutta pitämällä edellä valitut resonanssitaajuus sekä kytkentätaajuus vakiona. Myös syöttötaajuus pidetään vakiona ja virta vastaa moottorin tyhjäkäyntivirtaa. Tällöin tutkitaan kokonaisharmonissäröä ja käyrämuotoja erilaisilla suodinparametreilla ja valitaan optimaalisin arvo suotimeen jäävälle jännitteelle. Reunaehtoina toimivat liika tehon kulutus suotimessa sekä jännitteen ja virran harmonissisältö.

3.2.1 KytKentätaajuus

Simuloinneista havaitaan, että kytKentätaajuus $f_s = 1500$ Hz ei täytä edes PWM-peruseriaatteita, koska taajuusmodulointisuhteeksi tulee 7.5, mikä ei ole kokonaisluku. Tämän vuoksi valitaan kytKentätaajuudeksi $f_s = 3000$ Hz. Simuloinneista saadaan jännitteelle kuvan 3.3 mukainen käyrämuoto.



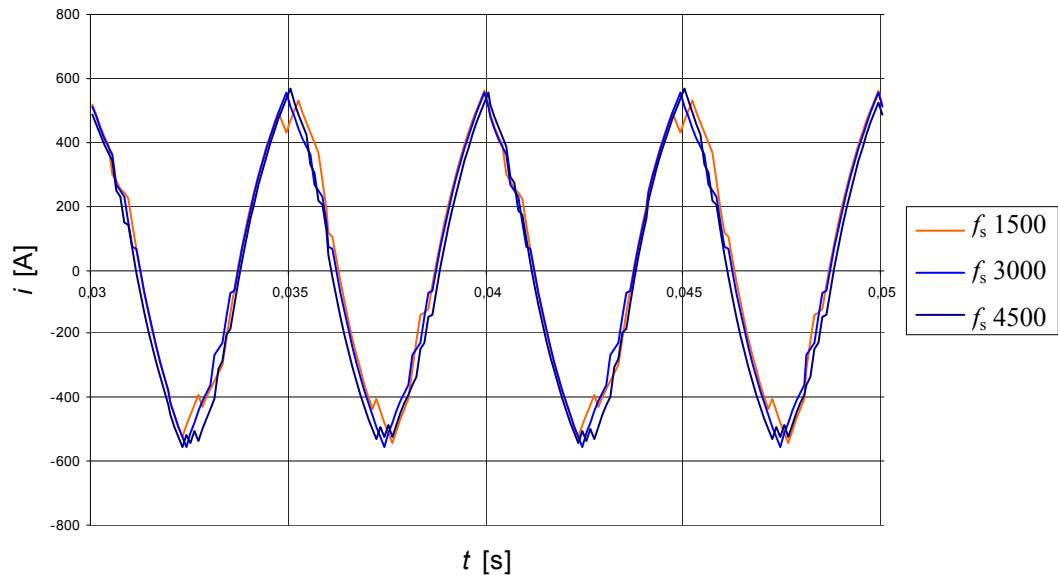
Kuva 3.3. Kuvassa on esitetty taajuudenmuuttajan lähdöstä saatu pääjännite u kahden vaiheen välistä mitattuna ilman suotimia. Jännite vastaa tehollisarvoltaan nimellisjännitettä U_{nim} , joten taajuudenmuuttajaa ylimoduloidaan. Tämä voidaan huomata lähdön lähes koko puolijaksoa kestävästä kantiaalloista. Modulointiaste m_a on tällöin 1.8.

Kuvassa 3.3 on esitetty kytKentätaajuudella $f_s = 3000$ Hz taajuudenmuuttajan lähdöstä mitattu pääjännitteen käyrämuoto, kun simuloinnissa ei ole käytetty suodinta. Modulointiaste m_a on noin 1.8, mikä vastaa nimellisjännitettä U_n . Kuvasta voidaan havaita ylimodulointi varsin selkeästi, koska jännite on lähellä koko puolijakson kestävästä kantiaallosta. Raskeammassa simuloinneissa näytteenottoaika T_s on pidempi, joten suuritaajuiset ilmiöt eivät välttämättä kuvaudu oikein. Nyquistin teoreeman mukaan yhtälöllä (3.4) voidaan esittää suurin mahdollinen kuvattava taajuus F_{max}

$$F_s > 2F_{\text{max}}, \quad (3.4)$$

missä F_s on näytteenottotaajuus. Tällöin taajuutta F_{\max} suuremmat taajuudet laskostuvat alemmille taajuuksille, eivätkä ne kuvaudu oikein. [20]

Kuvassa 3.4 nähdään eri kytkentätaajuuksilla simuloidut Flux-mallista ulos tulevat virrat i .



Kuva 3.4. Kuvassa on esitetty muuntajan Flux-mallista ulos tulevat virrat I_o eri kytkentätaajuuksilla f_s . Kuvis- ta voidaan havaita, että kytkentätaajuudella $f_s = 1500$ Hz virran käyrämuoto on varsin säröytynyttä, kun taas kytkentätaajuuksilla $f_s = 3000$ ja 4500 Hz virta on kohtalaisen siistiä ja muistuttaa enemmän siniaaltoja.

Kuvasta nähdään muuntajamallista ulos tulevan virran i käyrämuodon paranevan kytkentä- taajuutta f_s kasvatettaessa. Käyrämuotojen ero ei kuitenkaan ole suuri enää 3000 ja 4500 Hz:n taajuuksilla ja 1500 Hz:n kytkentätaajuus ei täytä PWM-säädön vaatimuksia, joten käyrämuoto on epäsymmetristä. Taulukossa 3.1 on esitetty mallista lähtevän virran kokoi- nasharmonissärön i_{THD} eri kytkentätaajuuksilla.

Taulukko 3.1. Taulukosta nähdään eri kytkentätaajuuksien muuntajamallista lähtevien virtojen i_o kokonais- harmonissärö i_{THD} . Kytkentätaajuudella $f_s = 1500$ Hz särö on huomattavasti suurempi kuin muilla, koska se ei täytä PWM-peruseriaatteita.

Virran kokonaisharmonissärö i_{THD}			
f_s [Hz]	1500	3000	4500
i_{THD} [%]	12	6.5	6.2

Kuvan 3.4 muuntajamallin ulos tulevista virroista laskettu kokonaisharmonissärö i_{THD} on huomattavasti suurin 1500 Hz:n kytkentätaajuudella. Kytkeäntäaajuuksilla f_s on 3000 ja 4500 Hz ei suurta eroa keskimääräisessä kokonaisharmonissärössä juuri ole, mutta jälkimmäisellä taajuudella särö vaihtelee reilusti ajan t funktiona. Tämä saattaa myös johtua laskostumisesta. Taajuudenmuuttajassa syntyvät häviöt P_h minimoiden ja kuitenkin saavuttamalla pieni harmonissärö, valitaan kytkentätaajuudeksi $f_s = 3000$ Hz.

3.2.2 Rajataajuus

Taajuudenmuuttajan lähtöjännitteen u_i ja virran i_i käyrämuotoja tulee kyetä parantamaan, että sähkökäytön on mahdollista toimia. Lähinnä vaarassa ovat muuntajan eristeiden kestävyys sekä rinnakkaisten taajuudenmuuttajien yhtenäinen toiminta. Nopeat jännitteiden ja virtojen muutokset voivat aiheuttaa häiriöitä muiden rinnankytkettyjen taajuudenmuuttajien toimintaan. Särötytynyt jännite ja virta aiheuttavat huomattavasti lisähäviöitä muuntaajaan ja moottoriin. Tämän vuoksi käytetään LC -komponenteilla toteutettuja sinisuotimia, joissa tehohäviöt tapahtuvat. Tällöin muuntajan eristeet eivät ole niin kovalla rasituksella. Sinisuotimilla pyritään nimensä mukaisesti käyrämuodot saamaan siniaaltoja muistuttavaksi. Suodin toteutetaan kuvan 3.2 mukaisesti laittamalla induktanssi L sarjaan- ja kapasitanssi C rinnankytkettynä kuorman Z_l kanssa. Tällöin muodostetaan toisen kertaluvun alipäästösuodin, jolla päästään estokaistalla jopa 40 desibelin vaimennukseen dekadia kohden.

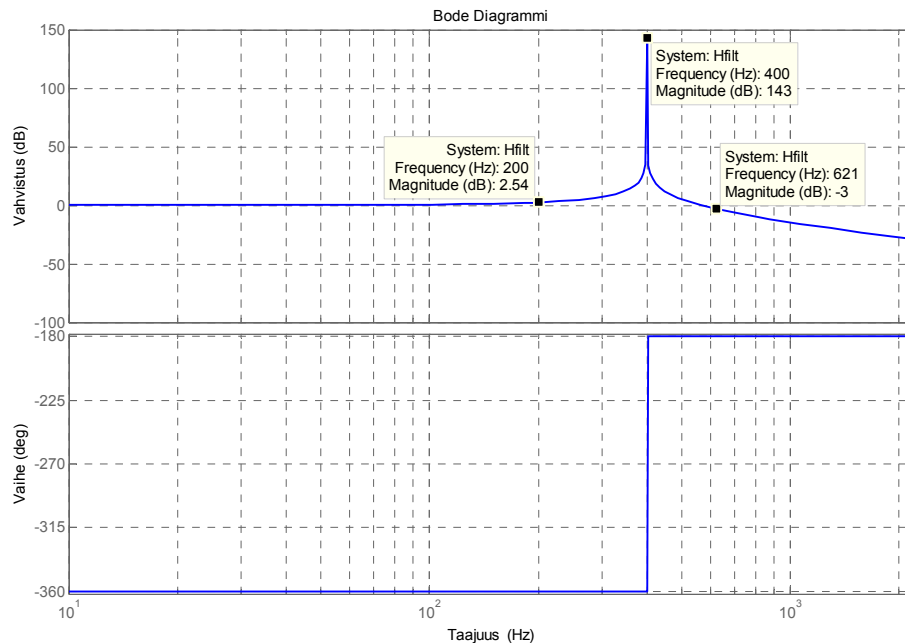
Suotimen resonanssitaajuus f_r määräytyy yhtälön (3.5), joka on esitetty lähteessä [21], mukaisesti

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f \cdot C_f}}, \quad (3.5)$$

missä L_f on suotimen induktanssi ja C_f kapasitanssi. Suotimelle on johdettu liitteessä (Liite I) siirtofunktio $G(s)$, joka esitetään yhtälössä (3.6)

$$G(s) = \frac{1}{L_f \cdot C_f \cdot s^2 + 1}, \quad (3.6)$$

missä s on Laplace-tason kompleksimuuttuja. Suotimen Bode-diagrammi on piirretty kuvaan 3.5.

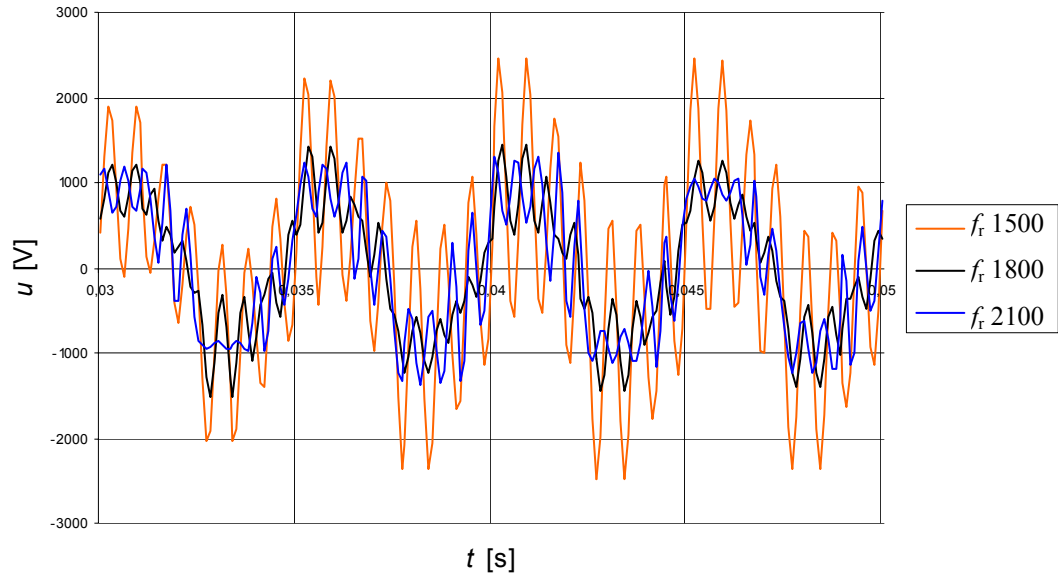


Kuva 3.5. Suotimen siirtofunktiosta muodostettu Bode-diagrammi. Kuvaajasta nähdään suotimen resonanssitaajuuden piikki $f_r = 400$ Hz sekä -3 dB:n rajataajuus $f_{\text{cut-off}} = 621$ Hz. Lisäksi voidaan huomata suotimen hieman vahvistavan perusaallon taajuutta $f = 200$ Hz.

Kuvasta voidaan havaita suotimen resonanssitaajuus $f_r = 400$ Hz ja tässä kohdassa tapahtuva terävä vahvistuspiikki, joka kuvan tilanteessa on noin 143 dB. Resonanssiipiikkiä voidaan hieman rajoittaa lisäämällä induktanssin kanssa sarjaan resistanssi R_f . Resistanssin seurauksena resonanssiipiikki hieman madaltuisi ja jakautuisi leveämmälle alueelle. Resonanssitaajuus aiheuttaa vahvistusta myös perusaallon taajuudelle, joka kyseisellä resonanssitaajuudella on noin $A = 2.54$ desibeliä. Rajataajuus $f_{\text{cut-off}} = 621$ Hz, jolloin vahvistus on pudonnut -3 dB.

Simuloimalla erilaisia suotimen resonanssitaajuuksia havaitaan suotimen vahvistavan merkittävästi taajuudenmuuttajan tuottamia harmonisia yliaaltoja. Näistä 3, 5, 7 sekä 9 harmoninen yliaalto ovat merkittäviä lähes koko tutkittavalla taajuuskaistalla. Kolmas ja yhdeksäs harmoninen johtuvat suotimen kondensaattorien ja kuorman kolmiokytkennästä, joka mahdollistaa kolmannelle harmoniselle kiertovirratt. Pahimmillaan resonanssitaajuuden ai-

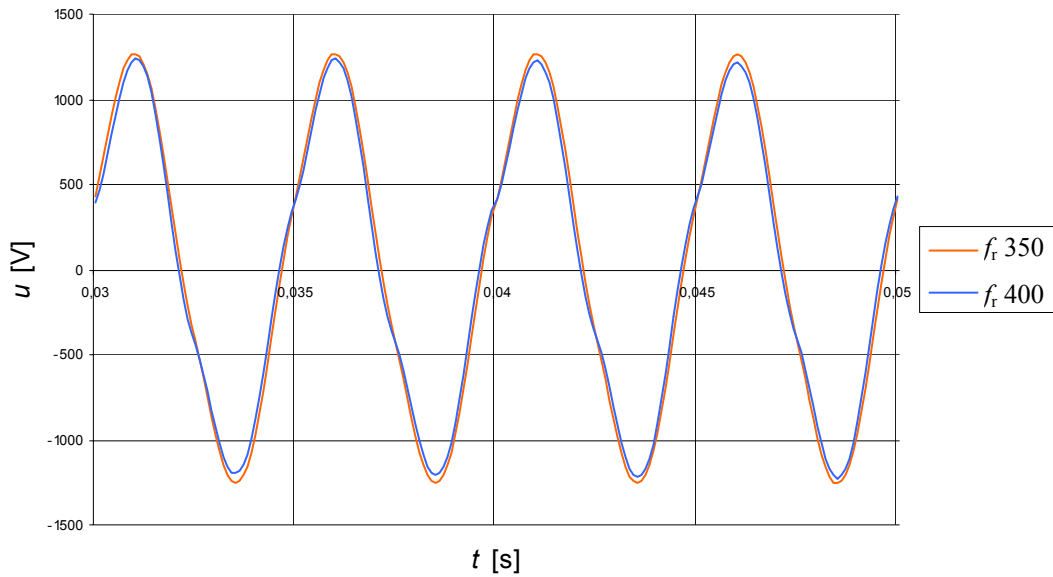
kaan sama vahvistus on todella huonoa ja tämän vuoksi resonanssitaajuus tulee valita tarkoin. Kuvassa 3.6 on esitetty pahimmat resonanssitaajuudet.



Kuva 3.6. Kuvassa suodatetun jännitteen u käyrämuodot kytkentätaajuuksilla $f_r = 1500, 1800$ sekä 2100 Hz. Käyrämuodot ovat säröytyneet erittäin pahasti ja resonanssitaajuudella 1500 Hz voidaan erottaa seitsemäs harmoninen yliaalto ja resonanssitaajuuksilla 1800 ja 2100 Hz korostuu yhdeksäs harmoninen yliaalto.

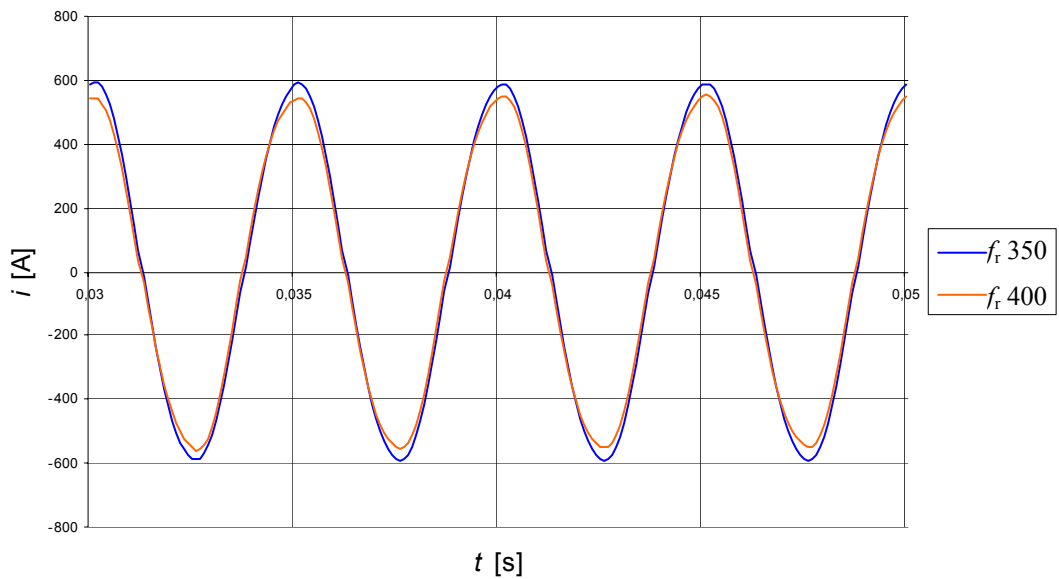
Kuvasta 3.6 voidaan havaita, että jännite on hyvin säröytynyttä suuremmilla resonanssitaajuuksilla, koska pulssimaisesta jännitteestä johtuen taajuudenmuuttaja kehittää viidettä ja seitsemättä harmonista yliaaltoa, jotka ovat vahvasti havaittavissa tietyillä taajuuksilla. Lisäksi ylimoduloinnista johtuva kolmas ja yhdeksäs harmoninen yliaalto esiintyvät vahvasti häiriten perusaaltoa. Lähinnä siniaaltoa jännite u on resonanssitaajuuksilla 300 - 450 , joten resonanssitaajuus tulee sijoittaa tälle välille.

Kuvasta 3.7 voidaan varmistua lopullisesta resonanssitaajuudesta, koska siinä tutkitaan myös taajuudet $f_r = 350$ sekä 400 Hz.



Kuva 3.7. Kuvassa on esitetty suodatetun lähtöjännitteen käyrämuoto resonanssitaajuuksilla $f_r = 350$ ja 400 Hz. Käyrämuodoissa ei ole suurta eroa, mutta matalampi resonanssitaajuus vahvistaa perusaaltoa tarpeettomasti. Käyrämuoto taajuudella $f_r = 400$ Hz ei ole vääristynyt niin paljon kuin $f_r = 450$ Hz, joten valitaan suotimen resonanssitaajuudeksi $f_r = 400$ Hz.

Valitaan kuvan 3.7 perusteella suotimen resonanssitaajuudeksi $f_r = 400$ Hz, koska käyrämuoto ei ole paljoa säröytynyt, eikä se vahvista jännitettä tarpeettomasti. Jännite on kuitenkin huomattavasti siistimpää käyrämuodoltaan kuin resonanssitaajuudella $f_r = 450$ Hz. Muuntajamallista ulos tulevat kuormitusvirrat i samoilla resonanssitaajuuksilla on esitetty kuvassa 3.8.

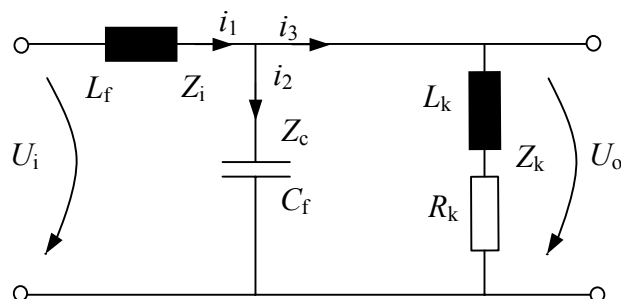


Kuva 3.8. Kuvassa esitetty muuntajamallista ulos tulevan virran käyrämuodot resonanssitaajuuksilla $f_r = 350$ ja 400 Hz. Virran käyrämuodot ovat lähellä siniaaltoa.

Simuloinneista ja kuvista 3.7 sekä 3.8 voidaan havaita jännitteen olevan hieman alttiimpi erilaisille harmonisille yliaalloille, koska muuntajamallista tulleista virroista voi vain heikosti erottaa eri harmoniset yliaallot. Suotimen resonanssitaajuudeksi kannattaa siten valita $f_r = 400$ Hz, koska sen jännitteen u ja virran i käyrämuodot ovat lähellä siniaaltoa, eikä se vahvasta perusaaltoa tarpeettomasti.

3.2.3 Suotimen jännite

Suotimen ja kuorman muodostamalle piirille, joka on esitetty kuvassa 3.9, voidaan määrittellä lähtö- ja tulojännitteen suhde.



Kuva 3.9. Kuvassa on esitetty suotimen ja kuorman muodostama systeemi, jossa suotimen induktanssi L_f ja kapasitanssi C_f ovat sarjaan- ja rinnankytkettyjä kuormaan nähden. Kuorma koostuu induktanssin L_k ja resistanssin R_k sarjaan kytkennästä, jota merkitään impedanssilla Z_k . Suotimen induktanssin ja kapasitanssin haarojen impedanssit merkitään Z_i ja Z_c .

Systeemin lähtö- ja tulojännitteen suhteelle pätee yhtälö (3.7), joka on johdettu liitteessä (LIITE II)

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{Z_k \cdot Z_c}{Z_k \cdot Z_c + Z_k \cdot Z_i + Z_i \cdot Z_c} . \quad (3.7)$$

Siirtofunktiossa Z_c , Z_i ja Z_k ovat kapasitanssin, induktanssin sekä kuorman haaran impedanssit. Siirtofunktiolla tutkitaan suotimeen jäävää jännitettä U_f . Suotimen komponenteille voidaan laskea suhteelliset arvot. Suhteellisia arvoja verrataan taajuudenmuuttajan nimellisarvoihin. Tällöin taajuudenmuuttajan nimellisjännitteellä U_{inim} ja -virralla I_{inim} voidaan laskea nimelliskuorman impedanssi Z_{ib} , joka saadaan yhtälön (3.8) mukaan

$$Z_{ib} = \frac{U_{inim}}{\sqrt{3} \cdot I_{inim}} . \quad (3.8)$$

I_{inim} on taajuudenmuuttajan nimellisvirta ja U_{inim} taajuudenmuuttajan nimellisjännite. Tästä edelleen induktanssin L_b ja kapasitanssin C_b vertailuarvot yhtälöryhmässä (3.9)

$$L_b = \frac{Z_{ib}}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

sekä (3.9)

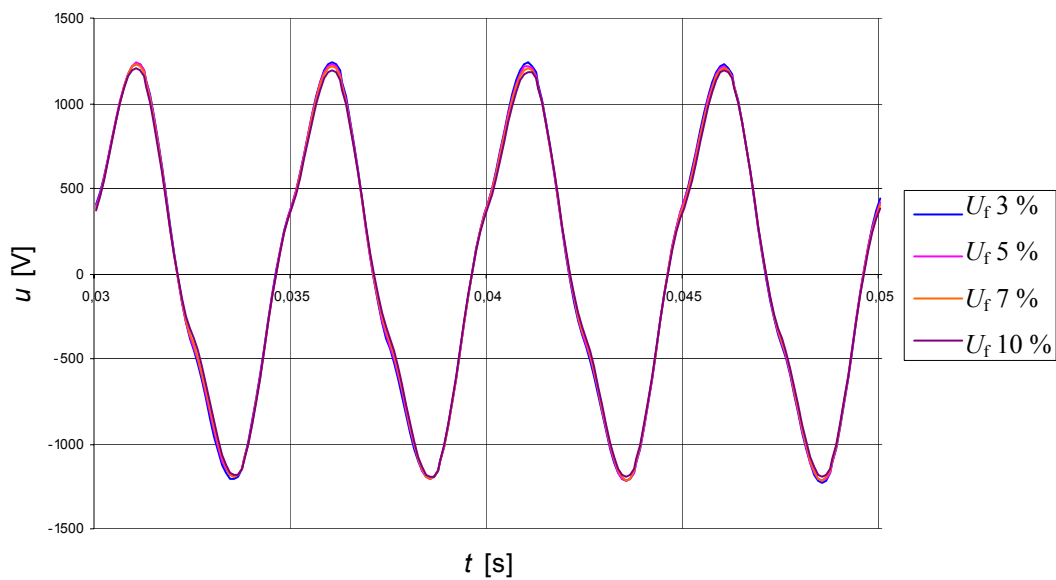
$$C_b = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot Z_{ib}} .$$

Vertaamalla simuloituja suotimen komponenttiarvoja vertailuarvoihin, voidaan laskea suhteellisarvot suotimen induktanssille L_f ja kapasitanssille C_f . Suotimen komponenttien arvot täytyy skaalata viidelle rinnakkaiselle taajuudenmuuttajalle. Tehon pudotessa viidenneksen täytyy suotimen impedanssin Z_f kasvaa 500 prosentilla, että jännitteen jako olisi haluttu. Taulukossa 3.2 on esitetty suotimen komponenttien suhteellisarvot suotimeen jäävän jännitteen eri arvoilla.

Taulukko 3.2. Taulukossa on esitetty suotimen komponenttien suhteelliset arvot, kun suotimeen jäävä jännite $U_f = 3, 5, 7$ ja 10 prosenttia. Simuloidut suodin-arvot on skaalattu taajuudenmuuttajan teholle 200 kVA, joten komponenttien arvot on kerrottu viidellä, että jännitteen jako olisi haluttu.

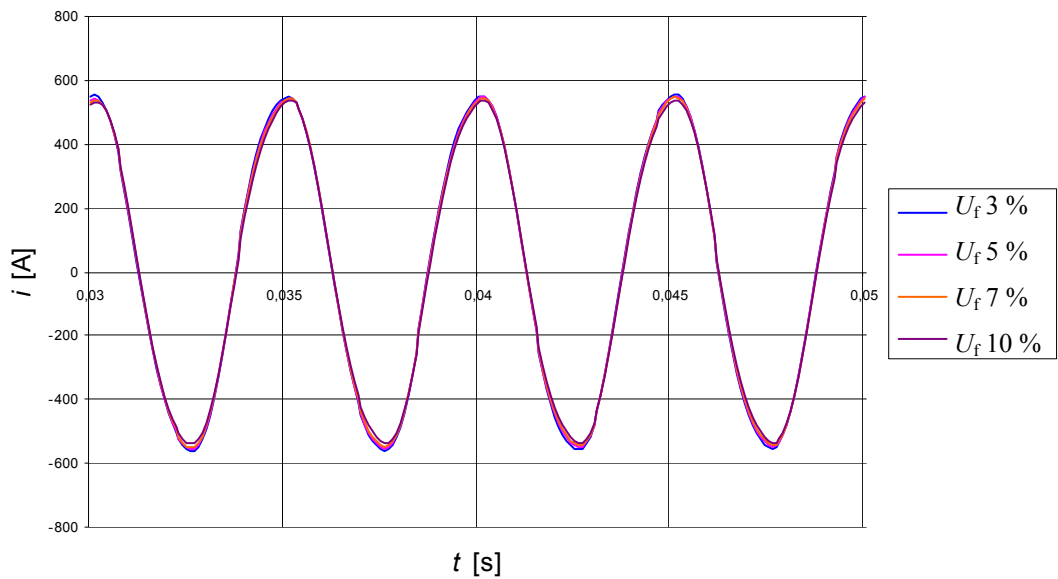
U_f [%]	$U_f = 3$ %	$U_f = 5$ %	$U_f = 7$ %	$U_f = 10$ %
L_f pu	0.433	0.463	0.495	0.545
C_f pu	14.44	13.48	12.64	11.43

Kuvassa 3.10 on esitetty pääjännitteen käyrämuodot erilaisilla suotimeen jäävillä jännitteillä, kun U_f on $3, 5, 7$ ja 10 prosenttia.



Kuva 3.10. Kuvassa on esitetty suodatettu pääjännite, kun suotimeen jäävä jännite U_f on $3, 5, 7$ ja 10 prosenttia. Jännitteiden erot ovat hyvin pienet, mutta valitaan suotimeen jääväksi jännitteeksi 3 %, koska sillä saavutetaan suurempi jännite kuormalle ja käyrämuoto on varsin siistiä. Tällöin jännitteen kokonaisharmonissäröksi saadaan 10 prosenttia.

Muuntajamallista ulos tulevan virran i käyrämuodot on esitetty kuvassa 3.11.

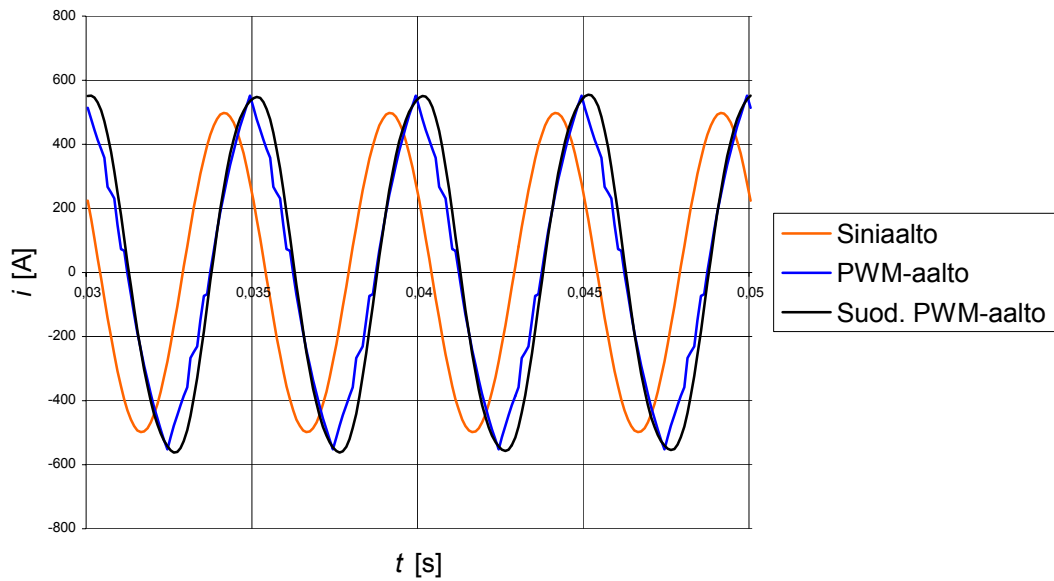


Kuva 3.11. Kuvassa on esitetty muuntajamallista ulos tulevan virran i käyrämuoto, kun suotimeen jäävä jännite U_f on 3, 5, 7 ja 10 prosenttia. Virtojen käyrämuodot ovat lähes identtiset, mutta suurin virta saavutetaan kuitenkin, kun suotimen jännite on kolme prosenttia. Virran kokonaisharmonissärö on noin 5 prosenttia.

Kuvasta havaitaan muuntajamallista ulos tulevien virtojen olevan lähes identtisiä. Kuitenkin suurin jännite ja virta kuormalle, eli enemmän tehoa saadaan käyttämällä suotimelle kolme prosenttia jännitteestä.

3.3 Syöttöjännitteen vaikutus muuntajaan

Taajuudenmuuttajan syöttämä jännite ja virta eroavat huomattavasti sinikäyrämuodosta. Kuvan 3.12 avulla voidaan tutkia muuntajamallista ulos saatuja virtojen käyrämuotoja, kun muuntajaa syötetään siniaallolla, PWM-tekniikalla muodostetulla kantiaallolla sekä suodatetulla PWM-kantiaallolla.



Kuva 3.12. Kuvassa on esitetty muuntajamallista ulos tulevan virran käyrämuodot, kun muuntajaa syötetään siniaallolla, taajuudenmuuttajalla sekä taajuudenmuuttajalla suodinten kanssa. Virran käyrämuoto taajuudenmuuttajalla on terävä ja raskaalla suodatuksella sitä voidaan parantaa lähelle siniaaltoa. Suotimen induktanssi ja suuri kapasitanssi aiheuttavat myös vaihe-eroa virtoihin.

Kuvasta 3.12 nähdään PWM-tekniikalla saadun virran käyrämuodon olevan hyvin terävä kärkeistä, kun taas suotimien kanssa päästään lähes siniaallon käyrämuotoon. Taulukossa 3.3 on esitetty muuntajamallista ulos saatavien virtojen ja jännitteiden kokonaisharmonissäröt THD.

Taulukko 3.3. Taulukossa on esitetty muuntajamallista ulos saatavista virroista ja jännitteistä lasketut kokonaisharmonissäröt THD. Sinisyötöllä päästään sekä virralla ja jännitteellä 0 prosentin säröön. Sen sijaan jännitteen säröksi ilman suodinta ja suotimen kanssa saadaan 38 ja 10 prosenttia. Virran säröksi vastaavasti saadaan 6.5 ja 5 prosenttia.

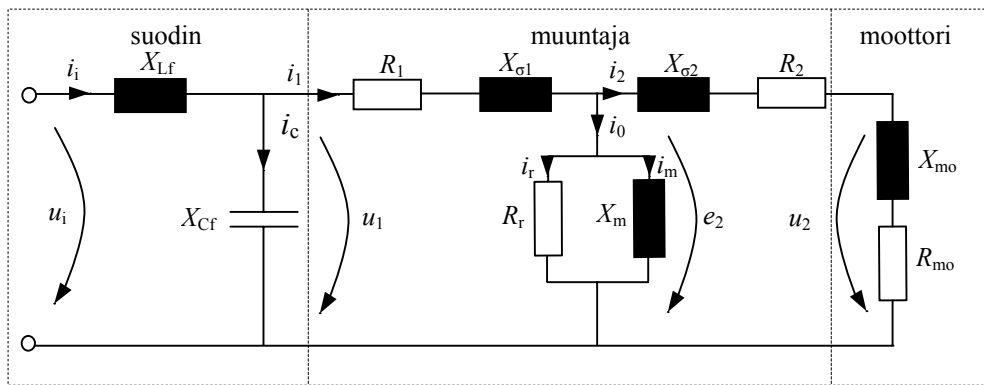
	u_{THD} [%]	i_{THD} [%]
Siniaalto	0	0
PWM	38	6.5
PWM+suod.	10	5.0

Taulukossa 3.3 esitetyt virran ja jännitteen kokonaisharmonissäröt voidaan laskea yhtälöllä (3.10), mutta tässä ne on laskettu simulointiohjelmiston avulla. Kokonaisharmonissäröksi THD virralle saadaan

$$I_{\text{THD}} = 100 \cdot \sqrt{\sum_{h \neq 1} \left(\frac{I_h}{I} \right)^2}, \quad (3.10)$$

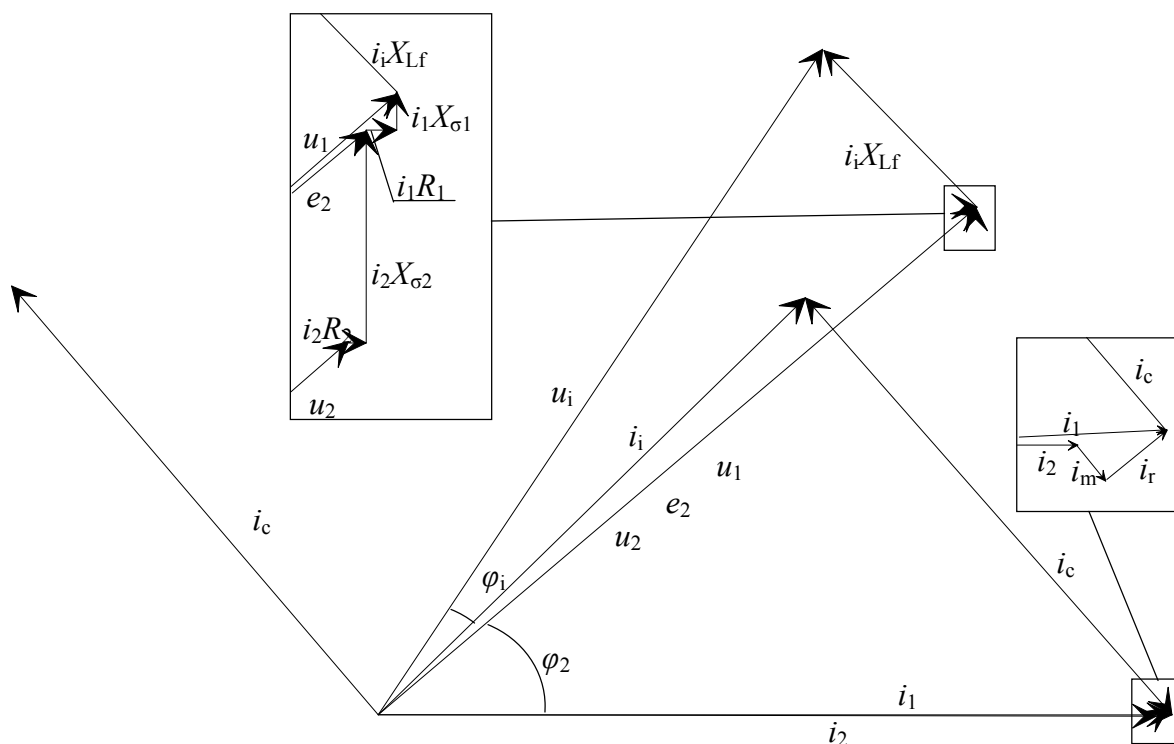
missä I_h on virran h :n harmonisen yliaallon tehollisarvo, I on perusaallon tehollisarvo ja THD on ilmoitettu prosenteissa. [14]

Kuvassa 3.13 on esitetty yksivaiheinen sijaiskytkentä, jossa esitetään suodin, muuntaja ja sen kuormana oleva moottori.



Kuva 3.13. Kuvassa on esitetty yksivaiheinen sijaiskytkentä muuntajan ja moottorin muodostamasta kuormasta, jonka eteen on lisätty LC -suodin. Kuvassa u_i ja i_i ovat taajuudenmuuttajan syöttämä jännite ja virta, u_1 ja i_1 ensiön jännite ja virta, e_2 , u_2 ja i_2 toision sähkömotorinen voima, jännite ja virta. i_c , i_0 , i_m ja i_r ovat kapasitanssin, tyhjäkäynti-, magnetointi- ja rautahäviövirta. Suodin koostuu reaktansseista X_{Lf} ja X_{Cf} , muuntajassa on ensiön ja toision resistanssit R_1 ja R_1 ja hajaannukset $X_{\sigma 1}$ ja $X_{\sigma 2}$. Lisäksi magnetointihaarassa rautahäviöitä kuvaava resistanssi R_r sekä magnetointireaktanssi X_m . Moottori koostuu LR -piirinä reaktiivisesta X_{mo} ja resistiivisestä R_{mo} osasta. Kuvassa on käytetty reaktansseja, koska seuraavassa esitetään sijaiskytkennän käytös perusaallolla osoitinpiirroksena

Kuvasta 3.13 nähdään yksivaiheinen sijaiskytkentä, jossa moottori on kuvattu yksinkertaisena LR -piirinä. Sijaiskytkennästä voidaan piirtää vektoripiirros, joka on esitetty kuvassa 3.14.



Kuva 3.14. Kuvassa on esitetty kuvan 3.13 yksivaiheisesta sijaiskytkennästä laskettu vektoripiirros, joka esittää suotimen, muuntajan ja moottorin virtojen sekä jännitteiden käyttäytymistä. Moottorin virran i_2 ja jännitteeseen u_2 välinen vaihekulma on φ_2 ja taajuudenmuuttajan syöttämän virran i_1 ja jännitteeseen u_1 välinen vaihekulma on φ_1 .

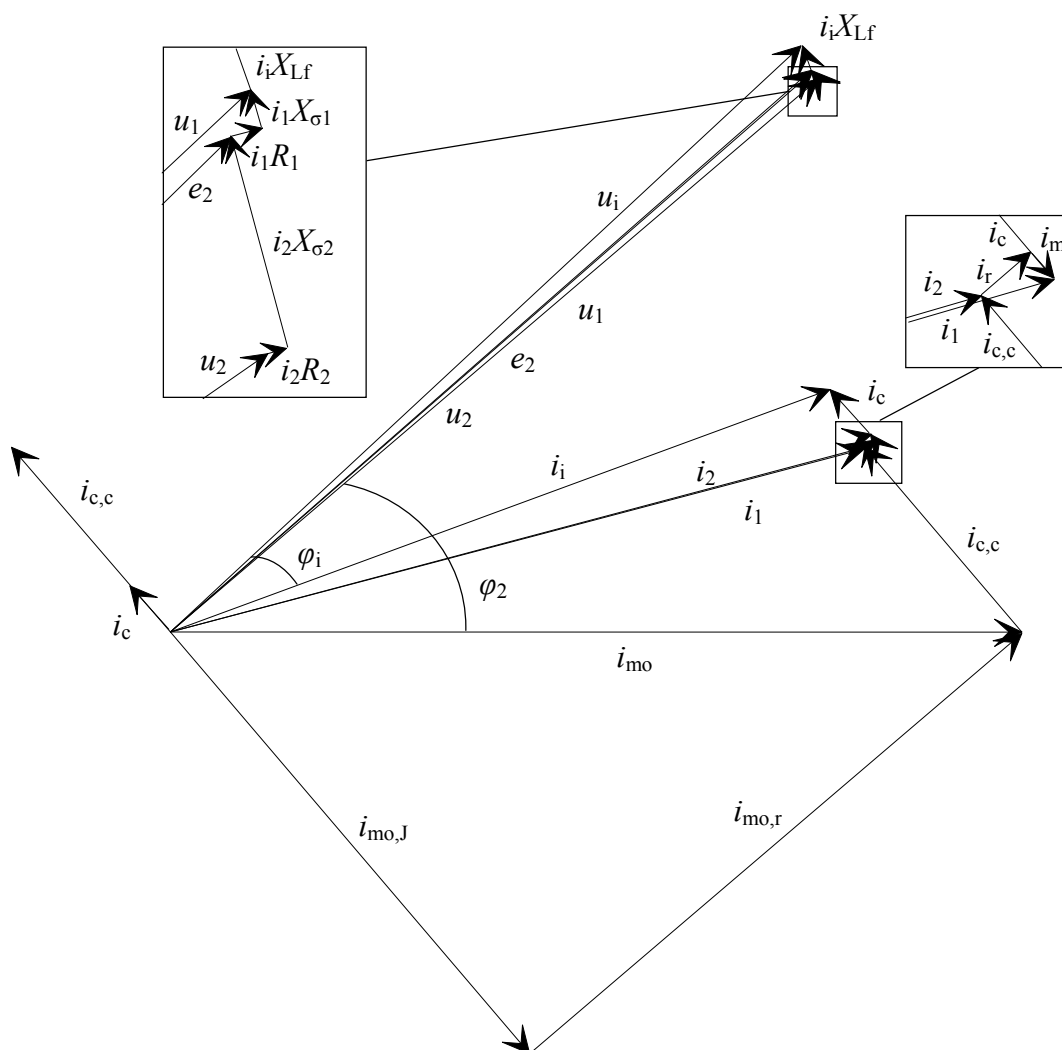
Kuvassa 3.14 vektoripiirros on piirretty suhteellisarvoilla ja suhteellisarvoja on verrattu muuntajan ensiöiden kokonaistehoon. Moottorin jännitteellä u_2 ja virralla i_2 on vaihe-ero φ_2 , koska kyseessä on induktiomoottori, jolloin kuorma on myös vahvasti induktiivinen. Muuntajan toisiovirta i_2 aiheuttaa jännitehäviön toision resistanssissa R_2 , joka on virran suuntainen, sekä hajareaktanssissa $X_{\sigma 2}$, joka on 90° virtaa edellä. Tällöin on muodostunut toision sähkömotorinen voima e_2 . Magnetointihaarassa rautahäviökomponentin R_r läpikulkeva virta i_r on sähkömotorisen voiman suuntainen ja magnetointivirta i_m 90° sitä jäljessä. Nämä virrat muodostavat yhdessä muuntajan tyhjäkäyntivirran i_0 , joka lisättynä toision virtaan muodostaa ensiövirran i_1 . Ensiövirta aiheuttaa vastaavalla tavalla jännitehäviöt ensiön resistanssissa R_1 ja ensiön hajareaktanssissa $X_{\sigma 1}$ kuin toisiossakin. Nämä lisäämällä sähkömotoriseen voimaan muodostuu ensiön jännite u_1 . Suotimen kapasitiivisen reaktanssin X_{Cf} ottama virta i_c voidaan laskea ensiöjännitteestä jakamalla se tällä reaktanssilla ja virta on 90° ensiöjännitettä edellä. Lisäämällä tämä virta ensiön virtaan saadaan taajuudenmuuttajan syöttämä virta i_i , joka aiheuttaa jännitehäviön suotimen induktiivisessa reaktanssissa X_{Lf} .

tanssissa X_{Lf} . Syntynyt jännitehäviö on 90° taajuudenmuuttajan syöttämää virtaa i_i edellä. Taajuudenmuuttajan syöttämä jännite u_i muodostuu suotimen induktiivisen reaktanssin jännitehäviön ja ensiön jännitteen summana. Taajuudenmuuttajan syöttämän virran i_i ja jännitteen u_i välinen vaihekulma on φ_i .

Vektoripiirroksesta nähdään suotimen kondensaattorin kompensoivan reilusti moottorin ottamaa induktiivista tehoa. Tämä vaikuttaa kokonaiskuorman tehokertoimeen huomattavasti ja siitä tulee vain hieman induktiivinen. Koko käytön tehokertoimeksi suotimen kanssa saadaan noin $\cos(\varphi_i) = 0.98$, kun ilman suodinta se on noin 0.76. Suotimen kompensoinnin vuoksi kuorman ottama kokonaisvirta pienenee 22 prosentilla. Taajuuden muuttajan syöttämä jännite on vektoripiirroksesta luettuna noin 3 prosenttia suurempi verrattuna ensiön jännitteeseen. Tästä voidaan havaita, että suotimeen jäävä jännite voidaan laskea yhtälön (3.7) mukaisesti.

Voidaankin helposti todeta suotimen suodattavan todella raskaasti joten siitä tulee turhan suurikokoinen. Vektoripiirroksen suhteellisarvoista laskemalla käytön ottama kokonaisnäennäisteho suotimien kanssa pienenee 22 prosenttia verrattuna tilanteeseen ilman suotimia, joka johtuu suotimen kompensoivasta kapasitanssista. Kompensointi tapahtuu kuitenkin väärässä paikassa, koska muuntajan terminen mitoitus ei kestä moottorin ottamaa suurta induktiivista virtaa. Tämän vuoksi kompensointi tulee tehdä muuntajan ja moottorin välissä.

Suodatuksen tulisi olla kooltaan ja näennäisteholtaan vain noin 10 prosenttia kyseisestä tilanteesta ettei se olisi liian raskas. Lisäksi kompensoinnin tulisi olla muuntajan ja moottorin välissä. Tällöin suotimen komponenttien suhteellisarvot pienennetään kymmenesosaan ja lisätään kompensointikondensaattori. Kuvan 3.13 sijaiskytkentä muuttuu siten, että moottorin rinnalle tulee kompensointikondensaattori. Kompensoidaan moottorin ottama induktiivinen teho esimerkiksi tehokertoimeen 0.9 (ind.). Tällöin voidaan kokonaissysteemille piirtää kuvan 3.15 mukainen vektoripiirros.



Kuva 3.15. Kuvassa on esitetty vektoripiirros, kun muuntajan ja moottorin välissä on kompensointikondensaattori, jonka virta on $i_{c,c}$. Muuntajan ja moottorin välissä olevan kompensoinnin vuoksi muuntaja syöttää moottoria tehokertoimella 0.9 induktiivista. Tällöin muuntajan terminen kestoisuus ei ole vaarassa ja muuntajan ottama virta pienenee noin 14 prosenttia ja kuormaan saadaan noin 17 prosenttia enemmän tehoa. Lisäksi myös moottorin ottaman virran resistiivinen $i_{mo,r}$ ja induktiivinen $i_{mo,l}$ komponentti on merkitty kuvaan

Kuva 3.15 esittää tilannetta, jossa suodatus on hyväksyttävällä tasolla ja kompensointi on lisätty muuntajan ja moottorin väliin. Tällöin muuntaja ei kuormitu liikaa moottorin ottaman induktiivisen loistehon vuoksi, koska loisteho tuotetaan pääosin muuntajan jälkeisellä kompensointikondensaattorilla. Tällöin muuntajan kuorman tehokertoimeksi saadaan noin 0.9 induktiivista ja tällöin koko käytön tehokertoimeksi tulee noin 0.92.

4 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä tavoitteena oli tutkia erikoismuuntajaa taajuudenmuuttajakäytössä sekä selvittää suodinparametrit mahdollisille taajuudenmuuttajan lähtösuotimille. Käytännön mittauksia prototyypilaitteistolle ei ajan puutteen vuoksi voitu tehdä, vaan mittaukset suoritettiin simulointilaitteistolla. Simuloinnit toteutettiin Simulink-ohjelmistolla, jonka sisälle oli tehty muuntajan FEM-malli.

Simuloinneissa tutkittiin ensimmäiseksi muuntajan jännitteen ja virran käyrämuotoja erilaisilla taajuudenmuuttajan kytkentätaajuuksilla. Taajuudenmuuttajan modulointitapana käytettiin sini-kolmiovertailuun perustuvaa synkronista modulaatiota, jossa modulointias-teenä oli tavallisesti 15. Tällöin taajuudenmuuttajan vaihelähdössä esiintyy vain kolme pulssia puolijaksoa kohti. Tämä johti hyvin raskaaseen suodinmitoitukseen, koska muuntajalle menevän jännitteen haluttiin olevan lähellä sinimuotoa. Kytkeäntaajuuden nostaminen kaksinkertaiseksi ei tällä modulointimenetelmällä tuo juuri helpotusta asiaan. Olisikin käytettävä jotain muuta modulaatiotapaa esimerkiksi vektorimodulointimenetelmää tai kolmannella aallolla lisättyä ohjearvokäyrää sini-kolmiovertailumodulaatiossa, jotta saataisiin taajuudenmuuttaja moduloimaan jatkuvasti

Taajuudenmuuttajien lähtösuodatus toteutettiin sinisuotimilla, jotka koostuvat induktanssista sekä kapasitanssista. Näillä varmistettiin, että taajuudenmuuttajat eivät häiritse toisi-
aan rinnakkaisessa käytössä. Suotimen rajataajuus tuli asetella perustaajuuden ja kytkentä-
taajuuden välille. Tästä aiheutui kuitenkin suuremmilla taajuuksilla huomattavia säröjä vir-
ran ja jännitteen käyrämuotoon, joten resonanssitaajuudeksi valittiin 400 Hz. Matala reso-
nanssitaajuus vahvistaa perusaaltoa hieman, mutta jännitteiden ja virtojen kokonaisuharmon-
nissärö on noin 10 sekä 5 prosenttia.

Suotimeen jääväksi jännitteeksi valittiin 3 %. Simuloinneista saaduilla käyrämuodoilla ei ollut suuria eroja, joten päädyttiin pienimpään tutkittuun jännitehäviöön. Simuloinneista saaduille suodinparametreille laskettiin suhteellisarvot ja näistä muuntajan sekä moottorin parametrien kanssa muodostettiin sijaiskytkentä, josta voitiin piirtää vektoripiirros, ku-
va 3.14. Piirrokselta käy hyvin ilmi suotimen todella raskas suodatus. Suotimessa oleva kapasitanssi kompensoi reilusti muuntajan ja moottorin ottamaa induktiivista tehoa. Tällöin koko käytön näennäisteho muuttuu lähes kokonaan pätötehoksi ja kokonaisnäennäisteho

putoaa noin 22 prosenttia. Kompensointi on kuitenkin väärässä paikassa ja se tulee sijoittaa muuntajan ja moottorin väliin, koska muuntajan terminen mitoitus ei kestä moottorin ottamasta suurta loistehoa. Erikoismuuntajasta ja moottorista koostuva sähkökäyttö toimisi lähes sinimuotoisilla jännitteillä ja virroilla simuloituilla suotimen parametreilla. Suotimista tulisi kuitenkin liian raskaasti suodattavia ja se aiheuttaisi koko sähkökäyttöä ajatellen liian suuret tehohäviöt.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyössä simuloitua ja tarkastellut rinnakkaisten taajuudenmuuttajien lähtösuotimet ovat liian raskaasti suodatavia. Ne saavat jännite- ja virtakäyrät siniaallon muotoisiksi ja muuntaja toimii moitteettomasti, koska tilanne vastaa lähes suoraa syöttöä sähköverkosta. Suotimissa syntyvä näennäisteho on kuitenkin aivan liian suuri niille asetettua tehtävää varten.

Erikoismuuntajan ensiökäämit kytkeytyvät erittäin hyvin keskenään, joten niiden välillä ei juuri tapahdu hajaannusta. Tämän vuoksi rinnakkaisten taajuudenmuuttajien lähdöt vaativat suodatusta, ettei taajuudenmuuttajien virtamittaukset häiriinny niiden rinnakkaisuuden vuoksi.

Erikoismuuntajaa voidaan syöttää suoraan taajuudenmuuttajilla eristeidensä puolesta, joten tulevaisuudessa kannattaa tutkia taajuudenmuuttajien rinnakkaista toimintaa pelkästään kuristimilla suodatettuna. Kuristimet toimisivat tällöin du/dt -suotimina, jolloin ne vain hieman pyöristäisi taajuudenmuuttajien syöttämän kanttiaallon reunoja. Tällöin valmistuskustannukset pienenisivät. Tämä kuitenkin väistämättä lisäisi tehohäviöitä muuntajaan ja mahdollisesti aiheuttaisi häiriöitä myös moottorille.

LÄHTEET

- [1] Climbus-ohjelma, Tekesin julkaisema pdf-dokumentti. Viitattu 12.9.05. http://webserv2.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/Kaynnissa/ClimBus/fi/Dokumenttiarkisto/Viestinta_ja_aktivointi/Muu_viestinta_ja_aktivointi/Materiaali_2_haku/CLIMBUS-tyxohjelma_kevxt_2005.pdf

- [2] Suuret keskinopeuskäytöt- tutkimussuunnitelma (j2p 10/04)
Viitattu 12.9.05.

- [3] High-speed solid-rotor induction machine- Electromagnetic calculation and design, Jussi Huppunen. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2004. ISBN 951-764-981-9, s. 15-24.

- [4] Frequency Converter Parallelling using a Step-up Three-Phase Transformer with multiple primaries, Anssi Lipsanen, Marko Kettunen, Juha Pyrhönen, Pertti Silventoinen, Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

- [5] Research of inverter Output Filters for PWM Drives, Ma Hongfei, Xu Dianquo, Harbin Institute of Technology. IEEE-julkaisu.

- [6] Erikoismuuntajan taajuussisällön pohjustavat mittaukset, Anssi Lipsanen. Julkaisematon tutkimusraportti, 6.9.2005.

- [7] Sähkötekniikan käsikirja 2, Otso W. Pöyhönen. Tammi, Helsinki 1980, ISBN 951-30-2487-3, s. 116-119, 282-308.

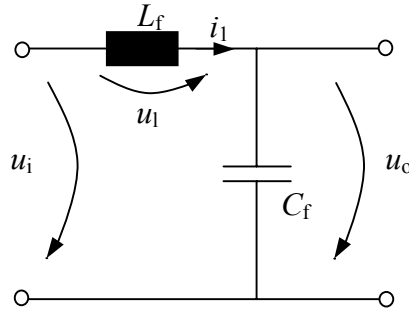
- [8] Virtapiirit ja verkot, Erkki Voipio. Helsinki 1999, Otatieto Oy ISBN 951-672-082-X, s. 131-134.

- [9] Electric Machinery, A. E. Fitzgerald, 1992. Fifth Edition in SI units. McGraw-Hill Book. ISBN 0-07-707708-3, s. 51.
- [10] Sähkömagneettiset komponentit, luentomateriaali. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Digipaino 2002, s. 3-10.
- [11] Electric Machines and Drives, Slemon, Gordon R. 1992, Addison-Wesley publishing Company. ISBN 0-201-57885-9, s. 3, 61.
- [12] Transformer Engineering, S. V. Kulkarni. New York 2004, Marcel Dekker. ISBN 0-8247-5653-3, s. 127-224, 240-247.
- [13] End-Winding Region Configuration of an HTS Transformer, F. Zizek. IEEE-julkaisu, 1.3.2002.
- [14] Power Electronics, Mohan Ned, 1995. John Wiley & Sons. ISBN 0-471-58408-8, s. 20-42, 103, 202-237.
- [15] Reactive Power Control in Electric Systems, T. J. E. Miller, 1982. John Wiley & Sons. ISBN 0-471-86933-3, s. 422-423.
- [16] Taajuusmuuttajakäytön huomioon ottaminen moottorin jännitteennostomuuntajan mitoittamisessa. Virtanen Esa, Tampereen teknillinen korkeakoulu, 1981, s. 42-73.
- [17] Sähkökäytöt 2003, Juha Pyrhönen. Luentomateriaali, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2003, s. 11.14-11.29.
- [18] Design and Implementation of an Inverter Output LC Filter Used for DV/DT Reduction, T. Habetler. IEEE-julkaisu. 3.5.2002.
- [19] The Influence of Passive EMI Filters on Various Aspect of Electromagnetic Compatibility of ASD's, A. Kempeski. IEEE-julkaisu, 2004.

- [20] Digital Signal Processing principles, algorithms, and applications, third edition, Proakis John, Manolakis Dimitris. Prentice-Hall USA, ISBN 0-13-394289-9, s. 29.

- [21] Use of an LC Filter to Achieve a Motor-friendly Performance of the PWM Voltage Source Inverter. Juergen K. Steinke, ABB Industrie AG. IEEE-julkaisu, 3.9.1999.

Kuvassa I.1 on esitetty LC-suotimen kytkentä, josta voidaan määrittellä suotimen siirtofunktio $G(s)$.



Kuva I.1. Kuvassa on esitetty LC-suotimen komponentit sekä niissä esiintyvät tulo- ja lähtöjännite u_i ja u_o sekä virta i_1 . Suotimen induktanssin L_f yli vaikuttava jännite on u_1 ja kapasitanssin C_f yli vaikuttava jännite u_o .

Tulojännitteelle u_i pätee yhtälö (I.1)

$$u_i = u_1 + u_o, \quad (\text{I.1})$$

missä u_1 on suotimen induktanssin L_f yli oleva jännite ja u_o suotimen kondensaattorin yli oleva ja samalla lähtöjännite. Lähtöjännitteelle u_o ja induktanssin virralle i_1 voidaan muodostaa yhtälöt (I.2) ja (I.3)

$$u_o = \frac{1}{C_f} \int_0^t i_1 dt \quad (\text{I.2})$$

ja

$$i_1 = \frac{1}{L_f} \int_0^t u_1 dt, \quad (\text{I.3})$$

missä t on integrointiaika. Laplace-muuntamalla yhtälöt, (I.2) ja (I.3) saadaan ne yhtälöiden (I.4) ja (I.5) mukaiseen muotoon

$$U_o = \frac{I_1}{sC} \quad (\text{I.4})$$

LIITE I, 2

ja

$$I_1 = \frac{U_1}{sL_f}, \quad (I.5)$$

missä s on Laplace-muuttuja. Ratkaisemalla yhtälöstä (I.4) virta I_1 ja sijoittamalla se yhtälöön (I.5), saadaan induktanssin jännitteelle U_L yhtälö (I.6)

$$U_1 = sL_f \cdot sC_f \cdot U_o. \quad (I.6)$$

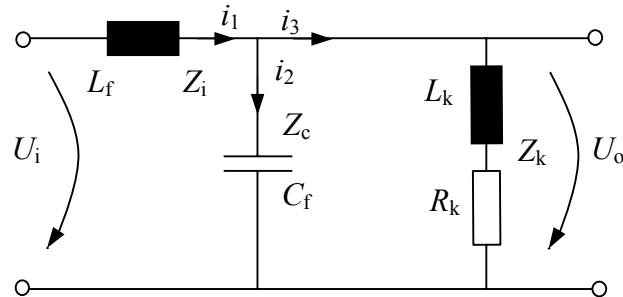
Sijoittamalla yhtälö (I.6) yhtälön (I.1) Laplace-muunnokseen, saadaan yhtälö (I.7)

$$U_i = sL_f \cdot sC_f \cdot U_o + U_o, \quad (I.7)$$

ja tästä ratkaisemalla lähtö- ja tulojännitteen suhde, saadaan siirtofunktio $G(s)$ yhtälön (I.8) mukaan

$$G(s) = \frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{L_f C_f s^2 + 1}. \quad (I.8)$$

Kuvassa II.1 on esitetty suotimen ja kuorman muodostaman systeemin jännitteet ja virrat.



Kuva II.1. Kuvassa on esitetty suotimen ja kuorman muodostaman systeemin jännitteet ja virrat. Suotimen induktanssia L_f ja kapasitanssia C_f merkitään impedansseilla Z_i ja Z_c . Lisäksi kuorman resistanssia R_k ja induktanssia L_k merkitään impedanssilla Z_k .

Kuvasta II.1 muodostamalla rinnankytkentä kondensaattorin ja kuorman impedansseille Z_c ja Z_k , siihen lisäämällä sarjaan induktanssin impedanssi Z_i , saadaan tulojännitteelle U_i yhtälön (II.1) mukaan

$$U_i = \left(\frac{Z_k \cdot Z_c}{Z_k + Z_c} + Z_i \right) \cdot i_1, \quad (\text{II.1})$$

missä i_1 on piiriin tuleva virta. Lähtöjännitteelle U_o saadaan vastaavalla tavalla yhtälön (II.2) mukaan

$$U_o = \left(\frac{Z_k \cdot Z_c}{Z_k + Z_c} \right) \cdot i_1. \quad (\text{II.2})$$

Ratkaisemalla yhtälöstä (II.2) piirin kokonaisvirta i_1 ja sijoittamalla se yhtälöön (II.1), saadaan yhtälön (II.3) mukaisesti

$$U_i = \left(\frac{Z_k \cdot Z_c}{Z_k + Z_c} + Z_i \right) \cdot \left(\frac{Z_k + Z_c}{Z_k \cdot Z_c} \right) \cdot U_o. \quad (\text{II.3})$$

LIITE II, 2

Tästä edelleen ratkaisemalla lähtö- ja tulojännitteen suhde, saadaan yhtälön (II.4) mukaan

$$\frac{U_o}{U_i} = \left(\frac{Z_k \cdot Z_c}{Z_k \cdot Z_c + Z_k \cdot Z_i + Z_c \cdot Z_i} \right), \quad (\text{II.4})$$

josta voidaan laskea lähtöjännitteen ja tulojännitteen suhde.