

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
Teknillinen tiedekunta  
LUT Energia  
Sähkötekniikan koulutusohjelma

*Kati Kainulainen*

# MONIMOOTTORIKÄYTTÖJEN SUOJAUKSET, MITOITUS JA OHJEISTUS

Työn tarkastajat:      Professori Juha Pyrhönen  
                                    Diplomi-insinööri Ari Turunen

Työn ohjaaja:            Diplomi-insinööri Ari Turunen

# TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
Teknillinen tiedekunta  
LUT Energia  
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Kati Kainulainen

## Monimoottorikäyttöjen suojaukset, mitoitus ja ohjeistus

Diplomityö  
2012  
64 sivua, 32 kuvaa ja 10 taulukkoa

Tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen  
Diplomi-insinööri Ari Turunen

Hakusanat: monimoottorikäytöt, oikosulkumoottorit, yhteismuotoinen virta

Työssä tutkitaan pienitehoisen monimoottoritaajuusmuuttajakäytön yhteismuotovirtojen aiheuttamia ongelmia. Työn tavoitteena on muodostaa monimoottorikäyttöjen toteuttajille opastus, jonka avulla sähkökäytön suunnittelun alkuvaiheessa voidaan ottaa huomioon monimoottorikäytön erikoistarpeita.

Työn teoriaosuudessa esitellään taajuusmuuttajan vaihtosuuntaustekniikan aiheuttamia ongelmia, moottorikaapelin mallintamista ja vertaillaan ongelmien ratkaisukeinoja pienitehoisten taajuusmuuttajien näkökulmasta. Yhteismuotoista virtaa tutkitaan mittaamalla rakennetulla monimoottorikäytöllä sekä simuloimalla vaihdellen kaapelin pituutta ja moottorien lukumäärää. Mittaamalla vertaillaan myös virran suodatusratkaisuja.

Muodostettu simulointimalli on hyvin yksinkertainen ja luotettavimmat virta-arvot saadaankin mittauksella. Kuitenkin työn perusteella voidaan antaa ohjeita monimoottorikäytön suunnittelulle. Esimerkiksi jokaiselle moottorille täytyy suunnitella erillinen suojaus ja taajuusmuuttaja on syytä mitoittaa todellisen kuormavirran mukaan. Yhteismuotoisen virran aiheuttamat ongelmat ovat sitä pienempiä, mitä vähemmän moottoreita on rinnakkain ja mitä lyhyempi moottorikaapelin yhteispituus on.

# ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology  
Faculty of Technology  
LUT Energy  
Degree Programme in Electrical Engineering

Kati Kainulainen

## **Protecting, dimensioning and instructions in multimotor drives**

Master's Thesis  
2012  
64 pages, 32 figures and 10 tables

Examiners: Professor Juha Pyrhönen  
Master of Science (Tech.) Ari Turunen

Keywords: multimotor drives, induction motors, common mode current

In this Master's thesis the common mode current and the problems it causes in multimotor drives is discussed. The goal of the thesis is to create guidance for multimotor drive builders that the special properties of multimotor drives could be taken into account.

In the theory part of this thesis the inverter produced problems, motor cable modelling and the solutions for the problems are presented from the low power drive point of view. Common mode current is examined by simulations and measurements using the built multimotor drive. The current filtering alternatives are compared by measurements too.

Due to the very simple simulation model created in this thesis the measured current values are more reliable. However some guidelines for the design of multimotor drives are given in the thesis. For example the electric drive dimensioning should be based on the real load current and the protection of every motor in the multimotor drive is important to design. The problems caused by common mode current are the smaller the fewer motors are connected and the shorter the sum of the motor cables is.

# ALKUSANAT

Haluan kiittää professori Juha Pyrhöstä työn tarkastamisesta ja mielenkiinnosta aihetta kohtaan. ABB:llä työn ohjaajana ja toisena tarkastajana toiminutta diplomi-insinööri Ari Turusta haluan kiittää työn aikana saamastani avusta ja neuvoista. Haluan kiittää myös kaikkia muita työn tekemisessä avustaneita ja Henri Kinnusta simulointimalliin liittyneestä opastuksesta.

Kiitokset kuuluvat myös sukulaisilleni ja kavereilleni, joiden kanssa vietetty vapaa-aika on vienyt ajatukset tehokkaasti pois opiskelusta ja diplomityön tekemisestä. Tuomakselle lisäksi kiitos kannustamisesta ja ymmärtämisestä jokaisena hetkenä.

Helsingissä 1.8.2012

Kati Kainulainen

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b>	<b>9</b>
1.1	Taajuusmuuttajan toiminnalliset pääkomponentit . . . . .	10
1.2	Pulssinleveysmodulaation aiheuttamia ongelmia . . . . .	11
1.3	Monimoottorikäytön ominaisuudet . . . . .	14
1.4	Monimoottorikäyttötutkimukset kirjallisuudessa . . . . .	17
<b>2</b>	<b>MOOTTORIKAAPELIN MALLINTAMINEN</b>	<b>18</b>
2.1	Moottorikaapelin siirtojohtomalli . . . . .	18
2.2	Heijastukset moottorikaapelissa . . . . .	19
2.2.1	Heijastukset monimoottorikäytön moottorikaapeleissa . . . . .	21
2.3	Kaapelikapasitanssien lataus- ja purkuvirrat . . . . .	22
2.3.1	Eromuotoiset virrat sähkökäytössä . . . . .	23
2.3.2	Yhteismuotoiset virrat sähkökäytössä . . . . .	24
2.3.3	Suojamaajohtimen virrat monimoottorikäytössä . . . . .	25
2.4	Käytännön moottorikaapeli . . . . .	25
2.4.1	Monimoottorikäytön moottorikaapelit . . . . .	27
<b>3</b>	<b>RATKAISUT MIKROKÄYTISSÄ</b>	<b>28</b>
3.1	Lähtösuodattimet mikrokäytöissä . . . . .	28
3.1.1	Siniaaltosuodatin . . . . .	28
3.1.2	$du/dt$ -suodatin . . . . .	29
3.1.3	Yhteismuotoinen kuristin . . . . .	30
3.2	Tulokuristin . . . . .	31
3.3	Muut ratkaisut . . . . .	31
<b>4</b>	<b>SIMULOINTI</b>	<b>32</b>
4.1	Yhteismuotoisten virtojen simulointimalli . . . . .	32
4.2	Simulointimallin parametrit . . . . .	32
4.2.1	Taajuusmuuttajan simulointiparametrit . . . . .	33
4.2.2	Moottorikaapelin simulointiparametrit . . . . .	34
4.2.3	Moottorien simulointiparametrit . . . . .	35
4.2.4	Syöttöverkon simulointiparametrit . . . . .	36
4.3	Simulointitulokset . . . . .	37
4.3.1	Moottorien lukumäärän variointi . . . . .	38
4.3.2	Eri parametriarvojen merkitys . . . . .	39
4.3.3	Suodattimen vaikutus . . . . .	40

<b>5</b>	<b>MITTAUKSET</b>	<b>42</b>
5.1	Mittauslaitteisto . . . . .	42
5.2	Mittaustulokset . . . . .	44
5.2.1	Moottorien lukumäärän variointi . . . . .	45
5.2.2	Moottorikaapelin pituuden variointi . . . . .	47
5.2.3	Virtojen jakautuminen suojamaajohtimissa . . . . .	49
5.2.4	Kontaktoreilla kytkeminen . . . . .	50
5.2.5	IGBT-puolijohdetehokytkimen lämpötila . . . . .	53
5.2.6	Lähtösuodattimen vaikutus . . . . .	54
<b>6</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET</b>	<b>57</b>
<b>7</b>	<b>YHTEENVETO</b>	<b>60</b>
	<b>LÄHTEET</b>	<b>62</b>

# SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

## Symbolit

$C$	kapasitanssi, F
$c_0$	valonnopeus tyhjiössä, $2,99 \cdot 10^8$ m/s
$c$	kapasitanssi pituusyksikköä kohti, F/m
$dz$	pituusalkio
$G$	konduktanssi, S
$g$	konduktanssi pituusyksikköä kohti, S/m
$i$	virta, A
$\hat{i}$	virran huippuarvo, A
$L$	induktanssi, H
$l$	induktanssi pituusyksikköä kohti, H/m ja pituus, m
$L$	kolmivaihejärjestelmän vaihejohdin
$n$	moottorien lukumäärä
$R$	resistanssi, $\Omega$
$r$	resistanssi pituusyksikköä kohti, $\Omega/m$
$t$	aika, s
$u(t)$	jännitteen aikafunktio, V
$v$	nopeus, m/s
$Z$	impedanssi, $\Omega$
$Z_0$	ominaisimpedanssi, $\Omega$

## Kreikkalaiset

$\epsilon_r$	suhteellinen permittiivisyys
$\mu_r$	suhteellinen permeabiliteetti
$\rho$	heijastuskerroin
$\omega$	kulmataajuus

## Alaindeksit

AC	vaihtosähkö
DC	tasasähkö
k	kaapeli
kr	kriittinen
L	vaihe, line
L1, L2, L3	kolmivaihejärjestelmän vaiheet
ll	vaiheiden välinen, line-to-line
lg	vaihe- ja maajohtimen välinen, line-to-ground
m	moottori
m.kaapeli	moottorikaapeli
mg	moottorin ja maajohtimen välinen, motor-to-ground
N	negatiivinen välipiiri
n	nousu-
pk-pk	huipusta huippuun -arvo, peak-to-peak
r	heijastunut
res	jäännös-
s.kaapeli	syöttökaapeli
kulku	pulssin kulkaikaan viittaava

## Lyhenteet

AMCMK	alumiinijohtiminen ja PVC-eristeinen kaapelityyppi
DTC	suora vääntömomentin säätö, Direct Torque Control
EMC	sähkömagneettinen yhteensopivuus, Electromagnetic Compatibility
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
M	moottori
MCMK	kuparijohtiminen ja PVC-eristeinen kaapelityyppi
PE	suojavaajohdin, Protective Earth
PWM	pulssinleveysmodulointi, Pulse Width Modulation
rms	tehollisarvo, Root Mean Square
VSN	kumikaapelityyppi

# 1 JOHDANTO

Monimoottorikäyttö tarkoittaa tässä työssä laitteistoa, jossa useita oikosulkumootoreita on kytketty rinnan yhden taajuusmuuttajan lähtöön. Tällä ratkaisulla haetaan hintasäästöä niin, ettei jokaiselle moottorille tarvitse olla omaa taajuusmuuttajaansa. Moottorit voivat liikuttaa samaa kuormaa tai toimia itsenäisesti riippuen sovelluksesta. Pienitehoisten sähkökäyttöjen tapauksessa näitä itsenäisiä sovelluksia voivat olla esimerkiksi puhallin, kelain tai tärustin. Usein esimerkiksi liukuhihnasovelluksissa yksi taajuusmuuttaja syöttää useampaa moottoria yhtä aikaa. Tällä säävutetaan vääntömomentin jakautuminen useaan eri pisteeseen ja moottorit saadaan pyörimään samalla pyörimisnopeudella. Koneenrakentajat valmistavat tällaisia käyttöjä, ja niiden vaihtosuuntaajan puolijohdetehokytkimien on havaittu tuhoutuvan joissakin olosuhteissa.

Aiheen käsittely painottuu niin sanottuihin mikrokäyttöihin, joiden tehon yläraja on noin 22 kW. Mikrokäytöllä on havaittu ongelmia monimoottorikäytössä erilaisissa sovelluksissa, joista yksi esitellään käsittelyosassa. Työssä vertaillaan ratkaisuja, joilla monimoottorikuormaa syöttävien mikrokäyttöjen ongelmat pyritään ratkaisemaan. Näitä ratkaisuja ovat esimerkiksi IGBT-puolijohdetehokytkimien virtakestoisuuden ylimitoitus sekä taajuusmuuttajan lähtö- ja tulojännitteen suodattimet. Vertailussa keskeisessä roolissa ovat kustannukset, sillä mikrokäytöissä pyritään mahdollisimman halpaan lopputulokseen.

Diplomityön tavoitteena on tutkia monimoottorikäyttöjen ongelmia, jotka johtuvat taajuusmuuttajan pulssinleveysmoduloidun jännitteen aiheuttamasta yhteismuotoisesta virrasta. Monimoottorikäytöissä nimittäin yhteismuotoista virtaa voi muodostua enemmän kuin yhden moottorin sähkökäytössä ja sen oletetaan olevan ongelmien juurisyy. Työn lopullisena tavoitteena on muodostaa monimoottorikäyttösovellusten rakentajille ja myyjille opastus, jolla jo sähkökäytön suunnittelun alkuvaiheessa voidaan ottaa huomioon monimoottorikäytön erikoistarpeet.

Työssä käsitellään taajuusmuuttajan vaihtosuuntaajan IGBT-puolijohdetehokytkimien (Insulated Gate Bipolar Transistor) virtoja, vaikka monissa aiheutta koskevissa tutkimuksissa on keskitytty moottoreita vahingoittaviin laakerivirtoihin. Laakerivirrat ovat merkittävämpiä isommilla moottoritehoilla. Rakennetun monimoottorikäytön pulssinleveysmoduloidun jännitettä ja virtaa mitataan, jotta nähdään moottoreiden lukumäärän vaikutus niihin. Myös simuloinnin ja ratkaisujen vertailun perus-

teella valikoitavien suodattimien vaikutusta monimoottorikäytössä mitataan.

Työn alussa esitellään lyhyesti taajuusmuuttajan toimintaa, vaihtosuuntaustekniikan aiheuttamia ongelmia sähkökäytössä sekä monimoottorikäytön ominaisuuksia. Luvussa 2 käsitellään moottorikaapelin mallintamista sekä jänniteheijastuksien ja kaapelikapasitanssien aiheuttamia ilmiöitä. Kolmannessa luvussa puolestaan arvioidaan erilaisten suodattimien käyttökelpoisuutta mikrokäyttöjen tapauksessa. Muodostettu simulointimalli ja keskeiset simulointitulokset esitetään luvussa 4, ja mittaukset ja niiden tulokset ovat viidennessä luvussa. Luvussa 6 on simulointien ja mittausten johtopäätökset. Luvun 7 yhteenvedossa taas esitetään myös työn perusteella koottu ohjeistus monimoottorikäyttöjen suunnittelijoille.

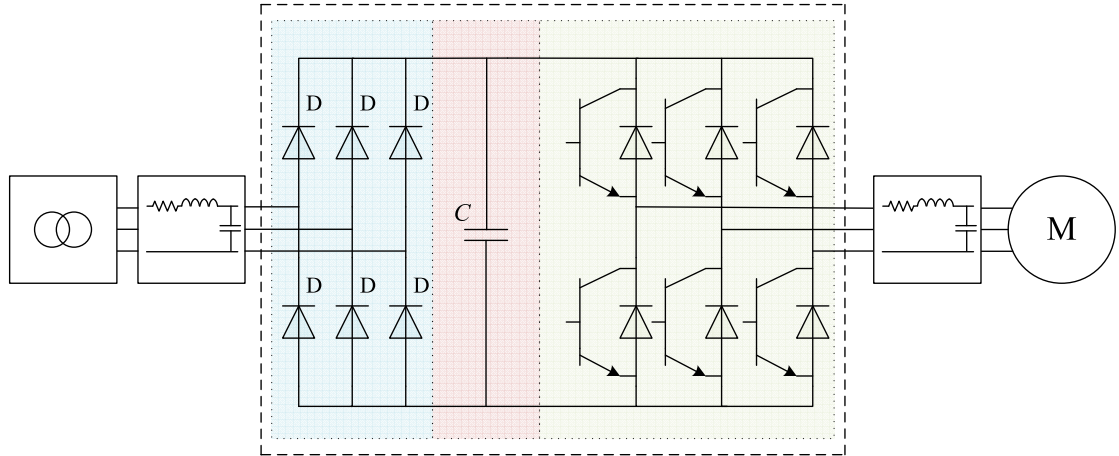
## 1.1 Taajuusmuuttajan toiminnalliset pääkomponentit

Säädetty sähkökäyttö koostuu tehoelektronikasta, sähkömoottorista, säätimestä ja mittalaitteista. Yleisessä tapauksessa teho voi virrata sähkömoottorin akselilta kuormalle ja kuorma voi syöttää tehoa verkkoon päin. Mitatuilla signaaleilla ja ohjearvolla kontrolloidaan sähkömoottorille syötettävää tehoa. Sähkökäyttöjen avulla säädetään prosessien nopeutta, mikä tuo energiansäästöä, ja nykyään tähän energiansäästöön käytetään yleisesti apuna taajuusmuuttajia. (Pyrhönen 2010.)

Teollisuudessa yleisimmin on käytössä jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja, joka voidaan toiminnallisuuden perusteella jakaa kolmeen osaan: tasasuuntaaja, välipiiri ja vaihtosuuntaaja. Kuvassa 1 on esitetty sähkökäytön pääkomponentit. Taajuusmuuttaja on ympyröity katkoviivalla, jonka sisällä tasasuuntaaja on sinisellä, välipiiri punaisella ja vaihtosuuntaaja vihreällä pohjalla. Sähkökäyttö saa tehon syöttömuuntajalta ja sekä taajuusmuuttajan syöttökaapeli että moottorikaapeli on kuvattu piirimallilla. Taajuusmuuttaja syöttää tehoa moottorin akselille tai yleisessä tapauksessa teho voi kulkea myös kuormalta verkkoon päin.

Taajuusmuuttajan tasasuuntauksessa käytetään diodi- tai transistorisiltaa riippuen taajuusmuuttajan käyttötarkoituksesta ja vaadittavista ominaisuuksista. Verkkokommutoiva kuusipulssidiodisilta soveltuu käyttötarkoitukseen, jossa verkosta ainoastaan otetaan tehoa, mutta ohjattu transistorisilta pystyy myös syöttämään tehoa verkkoon päin. Kuvassa 1 on diodisilta.

Välipiirin tasasuunnatun jännitteen suuruus riippuu syöttävän verkon jännitteen



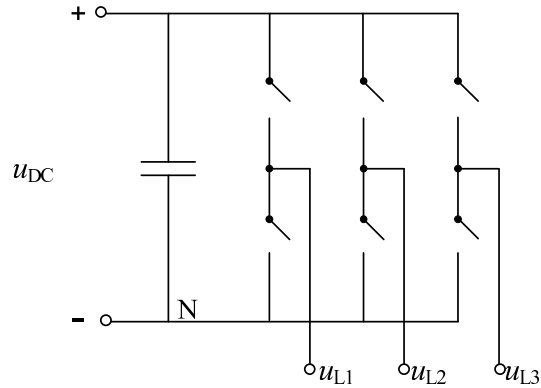
Kuva 1. Sähkökäytön pääkomponentit, jossa katkoviivalla on ympäröity taajuusmuuttaja, jossa tasasuuntaaja on sinisellä, välipiiri punaisella ja vaihtosuuntaaja vihreällä pohjalla. Sähkökäyttö saa tehon syöttömuuntajalta ja sekä taajuusmuuttajan syöttökaapeli että moottorikaapeli on kuvattu piirimallilla. Taajuusmuuttaja syöttää sähkötehoa moottorille, joka muuttaa sen mekaaniseksi tehoksi akselille.

suuruudesta. Välipiirin jännite ei kuitenkaan ole vakio, sillä sitä heiluttavat syöttöverkon tila, tehon kulkusuunta ja kuorman vaihtelut. Siten välipiirin jännite pyritään suodattamaan tasaiseksi kondensaattorilla, joka on esitetty kuvassa 1. Kondensaattori toimii myös taajuusmuuttajan pieni-impedanssisena energiavarastona. Sen varauskyky on tosin alhainen verrattuna esimerkiksi akkuihin, joita liitetään yhä useammin välipiireihin.

## 1.2 Pulssinleveysmodulaation aiheuttamia ongelmia

Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan vaihtosuuntaus toteutetaan yleensä pulssinleveysmodulaatiolla (PWM, Pulse Width Modulation). Vaihtosuuntaukseen käytetään nykyään vapaakiertodiodeita ja IGBT-puolijohdetehokytкимиä, jotka kytkevät vaiheita L1, L2 ja L3 sopivasti ohjelman mukaisessa järjestyksessä välipiirin potentiaaleihin tuottaen kolmivaiheisen lähtöjännitteen. Kaksitasoisen jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan vaihtosuuntaajan periaatteellinen kytkentä on piirretty kuvan 2, jossa  $u_{DC}$  on välipiirin jännite. Kuvassa olevat kytkimet kuvaavat IGBT-puolijohdetehokytкимиen ja diodin rinnankytkentää, kuten kuvassa 1 vihreällä pohjalla on ilmaistu.

Yleisesti käytettyjä pulssinleveysmodulointimenetelmiä ovat esimerkiksi sinikolmio-



Kuva 2. Kaksitasoisen jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan vaihtosuuntaajan periaatteellinen kytkentä. Kytkimet kuvastavat IGBT-puolijohdtehothytkimen ja diodin rinnankytkentää.

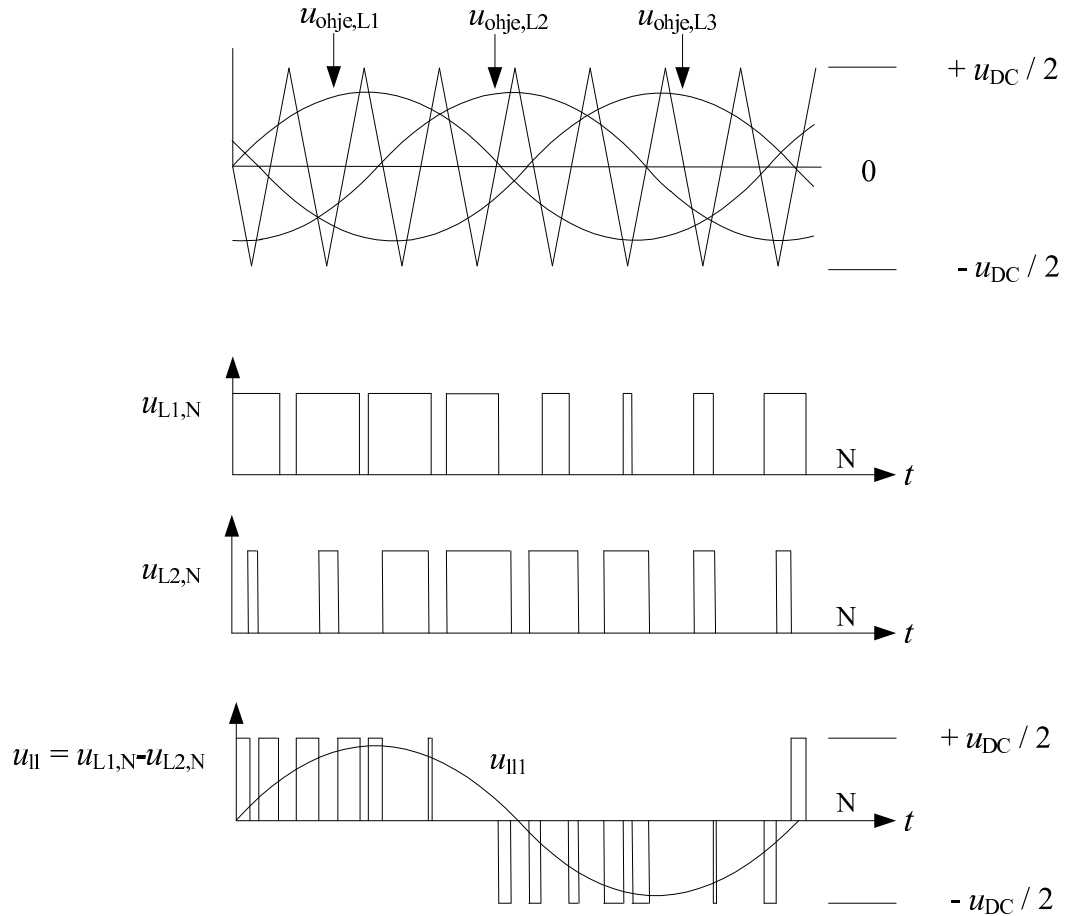
vertailu, avaruusvektorimodulointi ja suora vääntömomenttiohjaus (DTC, Direct Torque Control). Kuvassa 3 havainnollistetaan analogisin käyrin kolmivaiheista sini-kolmiovertailuun perustuvaa pulssinleveysmodulaatiota, joka tuottaa vaihejännitteet  $u_{L1,N}$ ,  $u_{L2,N}$  ja niiden perusteella pääjännitteen  $u_{ll}$ . Kolmioaallon taajuus vastaa kytkentätaajuutta, ja jokaista vaihetta kohden on sinimuotoinen ohjearvokäyrä. (Mohan et al. 2003.)

Todellisessa vaihtosuuntaajassa sini-kolmiovertailu toteutuu niin, että kyseisen vaiheen ylähaaran kytkin johtaa ohjekäyrän hetkellisarvon ollessa kolmioaallon hetkellisarvoa suurempi ja alahaaran kytkin johtaa, kun ohjekäyrän hetkellisarvo on pienempi kuin kolmioaallon hetkellisarvo.

Avaruusvektorimoduloinnissa kaksitasoisessa taajuusmuuttajassa laitteen kytkimet voivat olla kahdeksassa erilaisessa kytkentäkombinaatiossa, joista muodostetaan jännitevektorit. Niistä kuusi on aktiivivektoreita ja kaksi nollavektoreita. Nollavektoreita ovat ne kytkennät, joissa kaikki kytkimet ovat samassa potentiaalissa, positiivisessa tai negatiivisessa.

### *Jännitteen nousunopeus*

Kuvasta 3 nähdään, että taajuusmuuttaja syöttää moottorille IGBT-puolijohdtehothytkimillä tuotettuja jyrkkäreunaisia jännitepulsseja. Niiden myötä syntyy myös virtapulsseja. Kuva 4 havainnollistaa pelkistetyt käyrämuodot, kun kahden vaiheen välinen jännitepulssi aiheuttaa häiriövirran. Varsinaisen toivotun virran päälle kerrostuvan häiriövirran huippuarvo  $\hat{i}$  riippuu jännitteen nousunopeudesta  $du/dt$  kon-



Kuva 3. Kolmivaiheisen vaihtosuuntaajan sini-kolmiovertailuun perustuva pulssinleveysmodulaatio, joka tuottaa pääjännitteen  $u_{II}$ .  $u_{II}$  on pääjännitteen perusaalto.

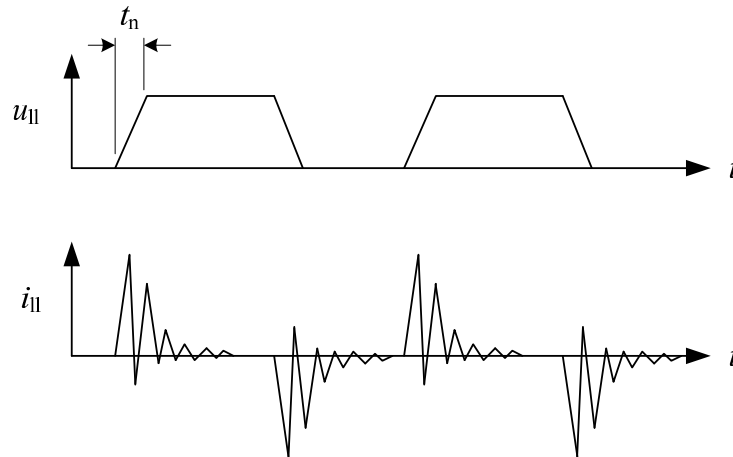
densaattorin virtayhtälön mukaisesti

$$\hat{i} = C \frac{du}{dt}, \quad (1)$$

missä  $C$  on kapasitanssi. Suuret virtapiikit voivat aiheuttaa rasitusta taajuusmuuttajan IGBT-puolijohdetehoktykimille.

Kuvan 4 perusteella pulssimainen häiriövirta on suurimmillaan jännitepulssein nousu- ja laskureunoilla ja virta värähtelee vaimentuen ennen seuraavaa jännitepulssein nousu- tai laskureunaa. Jännitepulssein nousunopeutta kuvataan  $du/dt$ -arvolla. Standardin IEC TS 60034-25 (2007) mukaan jännitteen nousu määritellään jännitteen noustessa huippuarvonsa 10 %:sta 90 %:iin. Tyypillinen nousunopeuden arvo IGBT-puolijohdetehoktykimillä ABB:n tutkimusten mukaan on noin  $1,3 \text{ kV}/\mu\text{s}$ .

Jännite- ja virtapulsstit kulkevat taajuusmuuttajalta moottoriin vaimentuen mootto-



Kuva 4. Kahden pulssinleveysmodulaation tuottaman jännitepulssin  $u_{II}$  ja niiden indusoidun häiriövirran  $i_{II}$  periaatteelliset käyrämuodot kahden vaiheen välillä.  $t_n$  on jännitteen nousuaika.

rikaapelin impedanssin vaikutuksesta, joten moottorin liittimiltä mitattuna nousunopeuden arvo ei ole aivan yhtä suuri. Siihen vaikuttavat moottorin ja moottorikaapelin suurtaajuusominaisuudet. Moottorin liittimiltä mitatun jännitteen nousunopeudelle annetaan suosituksia standardeissa, vaikka varsinaisia rajoituksia sille ei ole asetettu. Taajuusmuuttajakäyttöön suunniteltuja moottoreita käytettäessä tulisi soveltaa IEC TS 60034-25 -standardia, jossa suositus perustuu moottorin käämien eristyksen jännitteen keston. Sen mukaan mitoitettaessa taajuusmuuttajaa moottoria varten, tulisi taajuusmuuttajan lähdön jännitteen nousunopeudelle käyttää perustana moottorille ilmoitettua jännitteen kestoa. Tällöin mitoitus jää varaa. (IEC TS 60034-25 2007.) Tämä ei kuitenkaan ota huomioon pitkiä moottorikaapeleita käytettäessä ilmenevää moottoriliittimien jännitteen nousumista, jopa moninkertaistumista. Se johtuu kaapelin ja moottorin ominaisimpedanssien aiheuttamista jänniteheijastuksista, joita käsitellään kohdassa 2.2.

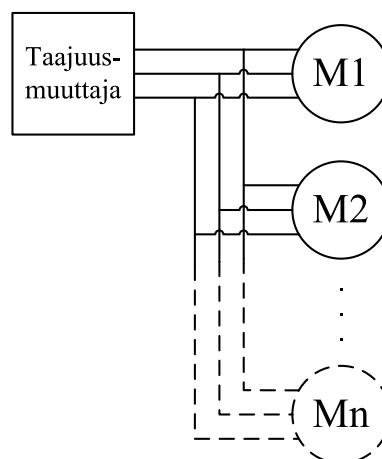
### 1.3 Monimoottorikäytön ominaisuudet

Monimoottorikäyttö tarkoittaa laitteistoa, jossa yksi taajuusmuuttaja syöttää useaa rinnankytkettyä moottoria samanaikaisesti siten, että jokaiselle moottorille syötetään samaa taajuusohjetta. Sovelluksesta riippuen moottorit voivat liikuttaa samaa kuormaa tai toimia itsenäisesti. Monimoottorikäytön etuna on esimerkiksi vääntömomentin jakaminen useaan eri pisteeseen, jolloin kuorman käyttäytymistä voidaan säätää tarkemmin. Tässä diplomityössä monimoottorikäytön moottorit ovat oikosul-

kumoottoreita, joista jokainen pyörittää omaa kuormaansa. Hyypio ja Muehlbauer (2011) esittelevät monimoottorikäyttöjen moottorien kytkemisen vaihtoehtoja. Heidän mukaansa moottorit voidaan esimerkiksi ketjuttaa, kytkeä suoraan taajuusmuuttajan lähtöön tai tietyn matkan päähän taajuusmuuttajasta ulottuvaan pisteeseen. Näiden kytkentätapojen ominaisuuksia selvitetään kohdassa 2.2.1. Kuvassa 5 on monimoottorikäytön periaatteellinen kuva, jossa moottorit on kytketty rinnan taajuusmuuttajan moottorilähtöön.

Monimoottorikäyttöä säädetään skalaariohjauksella eli moottoreille syötetään taajuusohjetta. Tämä johtuu siitä, että monimoottorikäytössä yksittäisen moottorin tilaa ei voida tietää tarkasti. Skalaariohjaus ei kykene säätämään tarkasti yksittäisten oikosulkumoottoreiden pyörimisnopeutta, mikä olisi tärkeää tilanteissa, joissa moottoreiden kuormitusten välillä on eroja. Kokonaan toisen tapauksen muodostavat tahtikoneet, jotka pystyisivät säilyttämään saman pyörimisnopeuden riippumatta kuormitusväntömomentista.

Valittaessa taajuusmuuttajaa monimoottorikäyttöön täytyy ottaa huomioon moottoreiden vaatima teho ja virta. Taajuusmuuttajan nimellistehon tulee olla vähintään moottoreiden nimellistehojen summa. Jotta moottoreiden nimellisteho saavutetaan, taajuusmuuttajan nimellisvirran pitää olla vähintään yhtä suuri kuin moottoreiden summavirta. Taajuusmuuttajan mitoitus monimoottorikäyttöön on tehtävä tapauskohtaisesti, mielellään mitatun todellisen kuorman mukaan. Huomioon täytyy ottaa erityisesti IGBT-puolijohdetehokytkimien mitoitus.



Kuva 5. Monimoottorikäytön periaatteellinen kuva, jossa on  $n$  kappaletta moottoreita rinnankytkettynä taajuusmuuttajan lähtöön.

### *Monimoottorikäytön suojaus*

Monimoottorikäytössä taajuusmuuttaja mittaa ainoastaan moottoreiden kokonaisvirran, ei yksittäisten moottoreiden virtoja. Yksittäisen moottorin virta voi kuitenkin kasvaa huomattavasti ja aiheuttaa haittaa moottorille tai moottori voi joutua jumiin. Tällöin moottorin syöttöjännite täytyy katkaista esimerkiksi lämpöreleellä. Tämä tapahtuu lämpöreleen bi-metalliliuskojen taipuessa lämpötilan kasvaessa tiettyyn suunniteltuun arvoon. Se on yksinkertainen ja toimiva ratkaisu, joka sopii mikrokäyttöihin myös halpojen kustannustensa puolesta. (ABB Strömberg 1990.) Monimoottorikäytössä jokaiselle moottorille täytyy asentaa oma erillinen lämpöreleensä, minkä vuoksi kokonaiskustannukset nousevat.

### *Käyttäjäsovelluksen kuvailu ja kontaktorit*

Monimoottorikäyttösovelluksissa voidaan käyttää kontaktoreja moottorien lukumäärän vaihtamiseen. Joissakin tapauksissa tämä voi tapahtua vielä taajuusmuuttajan moduloidessa eli uusia moottoreita kytketään suoraan verkkoon muiden moottorien pyöriessä. Tässä tilanteessa moottori voi teoriassa ottaa jopa 10-kertaisen käynnistysvirran nimellisvirtaan verrattuna eikä taajuusmuuttajan perustoiminnallisuudesta, käynnistysvirtaa rajoittavasta ramppikiihdytyksestä, päästä hyötymään. Eräs tällainen sovellus on lankarullain, jossa jokainen moottori kiertää lankaa yhden rullan ympärille. Rullan täytyessä moottori sammutetaan kontaktorilla napista painamalla ja tilalle vaihdetaan tyhjä rulla, jonka jälkeen moottori käynnistetään suoraan verkkoon jälleen kontaktorilla kytkemällä. Tässä työssä mitattiin kontaktorin vaikutusta monimoottorikäytön toimintaan.

Kontaktorien toiminta perustuu koskettimien liikkeeseen, joka mahdollistaa virran kulun, kun koskettimet ovat kiinni toisissaan. Ohjausvirta synnyttää kontaktorin käämiin magneettikentän, joka vetää kontaktorin koskettimet kiinni toisiinsa ja virta kontaktorin läpi alkaa kulkea. Kun ohjausjännite katkeaa, jousivoima avaa koskettimet.

Kontaktorit eivät ole ideaalisia kytkimiä, vaan koskettimien avautuminen ja sulkeminen vaativat tietyn ajan. Koskettimien massa ja materiaalin vähäinenkin joustavuus aiheuttavat koskettimien ponnahtelua ennen lopullista pysyvää kontaktia. Tämä ponnahtelu kestää muutamia millisekunteja ja joissakin sovelluksissa sitä ei siten tarvitse ottaa huomioon. Taajuusmuuttajan vaihtosuuntaajan pulssinleveysmodulaation jaksonaika on kuitenkin niin lyhyt, että ponnahteluilmiö huomataan.

Kontaktorien käyttäminen aiheuttaa virtapiikkejä, jotka syntyvät jännitteen nopeiden muutosten takia.

## 1.4 Monimoottorikäyttötutkimukset kirjallisuudessa

Monimoottorikäytön ongelmiin pureutuvia tutkimuksia on kuvattu kirjallisuudessa muutamia. Esimerkiksi Suwankawin et al. (2005) ovat tutkineet monimoottorikäyttöä pitkillä moottorikaapeleilla todellisen tapauksen avulla. Kyseessä on noin 37 kW:n taajuusmuuttaja, joka syöttää 75 kappaletta 3 kW:n moottoreita. Moottorikaapelin pituus jokaiselle moottorille on noin sata metriä. He ovat todenneet, että tässä tapauksessa taajuusmuuttajan vaihtosuuntaajan hajoaminen johtuu pitkien moottorikaapeleiden eromuotoisen virran aiheuttamasta ylikuumentumisesta. Heidän mukaansa yhteismuotoinen virta voi puolestaan nostaa välipiirin tasajännitteen suuruutta ja siten aiheuttaa taajuusmuuttajan toiminnan keskeytymisen ylijännitteeseen. Ratkaisuksi ongelmiin he ovat suunnitelleet LC-suodattimen.

Skibinski et al. (1998) ovat tutkineet monimoottorikäyttöä, jossa 163 pienitehoista moottoria pyörittää liukuhihnaa metalliteollisuudessa. He ovat kuvanneet yhteismuotoisen virran kulkureittejä monimoottorikäytössä ja muodostaneet simulointimallin, jonka parametrit on saatu RLC-mittarin avulla. Lisäksi he ovat tutkineet lähtökuristimen vaikutusta yhteismuotoisen virran huippuarvoon.

## 2 MOOTTORIKAAPELIN MALLINTAMINEN

Moottorikaapelia voidaan kuvata siirtojohtomallilla, koska malli soveltuu pitkien kaapeleiden tutkimiseen. Tässä luvussa kerrotaan siirtojohtomallin lisäksi myös kaapeleissa tapahtuvista heijastuksista sekä kaapelikapasitanssien lataus- ja purkuvirroista. Myös moottorikaapeleina käytettävien käytännön kaapeleiden parametrien arvoja käsitellään.

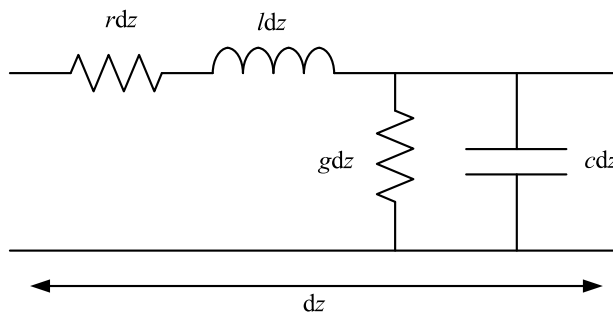
### 2.1 Moottorikaapelin siirtojohtomalli

Aaltojen etenemistä moottorikaapelissa voidaan kuvata siirtojohtomallilla, jota esimerkiksi Pyrhönen (2004 ja 2010) esittää. Siirtojohtomalli soveltuu pitkien kaapeleiden tutkimiseen jakautuneiden vakioiden käyttämisen ansiosta. Se tarkoittaa sitä, että kaapelin resistanssi  $R$ , induktanssi  $L$ , konduktanssi  $G$  ja kapasitanssi  $C$  kuvataan koko kaapelin pituudelle jakautuneiksi. Kuvassa 6 on esitetty pituusalkion  $dz$  pituinen osa siirtojohtoa ja sen jakautuneet parametrit resistanssi  $rdz$ , induktanssi  $ldz$ , konduktanssi  $gdz$  ja kapasitanssi  $cdz$ .

Kaapelille yksilöllinen ominaisimpedanssi  $Z_0$  määräytyy kaapelin pituusyksikköä kohti olevien resistanssin  $r$ , induktanssin  $l$ , konduktanssin  $g$  ja kapasitanssin  $c$  mukaan

$$Z_0 = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}}. \quad (2)$$

Häviöttömällä johdolla oletetaan, että kaapelissa ei ole resistiivisiä häviöitä eli  $r =$



Kuva 6. Pituusalkion  $dz$  pituinen osa siirtojohtoa ja sen jakautuneet parametrit resistanssi  $rdz$ , induktanssi  $ldz$ , konduktanssi  $gdz$  ja kapasitanssi  $cdz$ .

$g = 0$  ja siten ominaisimpedanssi yksinkertaistuu muotoon

$$Z_0 = \sqrt{\frac{l}{c}}. \quad (3)$$

Lausekkeen 3 mukaisesti ominaisimpedanssi  $Z_0$  riippuu induktanssista  $l$  ja kapasitanssista  $c$ . Aalto etenee kaapelissa nopeutta  $v$ , joka voidaan laskea lausekkeella

$$v = \frac{1}{\sqrt{lc}} = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}, \quad (4)$$

jossa  $c_0$  on valonnopeus tyhjiössä. Aallon etenemisnopeuskin siis riippuu kaapelin ominaisinduktanssista  $l$  ja -kapasitanssista  $c$ . Nopeuteen vaikuttavat vain kaapelin eristemateriaalin permeabiliteetti  $\mu$  ja permittiivisyys  $\epsilon$ , jotka riippuvat kaapelin eristyksestä. Suhteellinen permeabiliteetti voi olla esimerkiksi  $\mu_r = 1$  ja suhteellinen permittiivisyys  $\epsilon_r = 4$ , jolloin aallon etenemisnopeus kaapelissa on puolet valonnopeudesta eli noin 150 m/ $\mu$ s. Aallon etenemisnopeus ja kaapelin ominaisimpedanssi riippuvat siis kaapelin ominaisuuksista.

## 2.2 Heijastukset moottorikaapelissa

Kaapelissa kulkevalle aallolle tapahtuu heijastumisia epäjatkuvuuskohdissa eli ominaisimpedanssin muutoskohdissa. Moottorikaapelissa tällainen kohta on esimerkiksi moottorikaapelin ja moottorin liitoskohdassa, sillä moottorin impedanssi on huomattavasti kaapelin ominaisimpedanssia suurempi. Osa ominaisimpedanssin muutoskohtaan saapuvasta aallosta heijastuu, ja jäljelle jäänyt osa läpäisee liitoksen. Heijastunut jännite  $u_r$  riippuu tulevasta jännitteestä  $u$

$$u_r = \rho u, \quad (5)$$

missä  $\rho$  on heijastuskerroin

$$\rho = \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0}, \quad (6)$$

joka riippuu moottorikaapelin ominaisimpedanssista  $Z_0$  ja moottorin ominaisimpedanssista  $Z_m$ .

Pulssinleveysmodulaatiossa muodostettava jännitepulssi on amplitudiltaan välipiirin jännitteen  $u_{DC}$  suuruinen. Tämän jännitepulssin saapuessa moottorin liittimille tapahtuu heijastuminen ja osa aallosta palaa takaisin taajuusmuuttajalle, jolloin aal-

to kohtaa suuren välipiirin kondensaattorin. Se näyttää jännitepulssille oikosululta, ja siten ominaisimpedanssi suuritaajuiselle aallolle on likimain nolla eli lausekkeen 6 perusteella heijastuskertoimen  $\rho \approx -1$ . Tämän takia aalto heijastuu negatiivisena jälleen takaisin moottorille ja jatkaa tätä kulkemista moottorin ja taajuusmuuttajan välillä, vaimentuen heijastuskertoimen mukaisesti lopulta nolnaan. Myös kaapelin häviöllisyys vaikuttaa vaimenemiseen.

Ääritapauksessa aaltoa on vastassa avoin johto, jossa heijastuva jännite on tulevan aallon kanssa amplitudiltaan samansuuruinen ja samanmerkkinen. Tällöin tapahtuu täydellinen heijastus eli jännite kaksinkertaistuu niin, että sen amplitudi on kaksinkertainen välipiirin jännitteeseen  $u_{DC}$  nähden. Jännitteen kaksinkertaistuminen kuitenkin vaatii tiettyä kaapelin pituutta pidemmän kaapelin johtuen taajuusmuuttajalta palaavasta negatiivisesta aallosta. Tämä negatiivinen aalto ei nimittäin pysty vaimentamaan ylijännitettä, jos jännitepulssin nousuaika on lyhyempi kuin aallon edestakaiseen matkaan käyttämä aika. Heijastumisista aiheutuva värähtely on merkittävää kriittistä kaapelin pituutta  $l_{kr}$  pidemmällä kaapeleilla, joka voidaan laskea lausekkeesta

$$l_{kr} = \frac{t_n v}{2}, \quad (7)$$

missä  $t_n$  on jännitepulssin nousuaika ja  $v$  on jännitepulssin etenemisnopeus. Jos oletetaan pulssin nousuajaksi  $t_n = 200$  ns ja etenemisnopeudeksi jo laskettu  $v = 150$  m/ $\mu$ s, voidaan lausekkeella 7 laskea kriittiseksi kaapelin pituudeksi  $l_{kr} = 15$  m. Aika  $t_{kulk}$ , joka jännitepulssilta kuluu kulkea kerran kaapelin pituuden matka, voidaan määrittää kaapelin pituuden  $l_k$  ja pulssin etenemisnopeuden  $v$  osamääränä

$$t_{kulk} = \frac{l_k}{v}. \quad (8)$$

Moottorin jännite voi tietyissä olosuhteissa nousta suuremmaksikin kuin esitetty kaksinkertainen välipiirin jännite. Näin käy, jos pulssin värähtely ei ole ehtinyt vaimentua ennen sitä seuraavan pulssin saapumista. Tällöin ylijännite voi teoriassa olla jopa nelinkertainen pulssin jännitteeseen nähden. Moottorikaapelissa heijastuksia voivat aiheuttaa sekä ero- että yhteismuotoinen jännite.

Moottorilta vaihtosuuntaajalle heijastuvan jännitepulssin suuruus  $u_r$ , kun  $t_{kulk} < t_n$ , voidaan laskea

$$u_r = \frac{t_{kulk} u_{DC} \rho_m}{t_n}, \quad (9)$$

missä  $t_{kulk}$  on aika, joka jännitepulssilta kuluu siirtyä kerran kaapelin pituus ja  $u_{DC}$

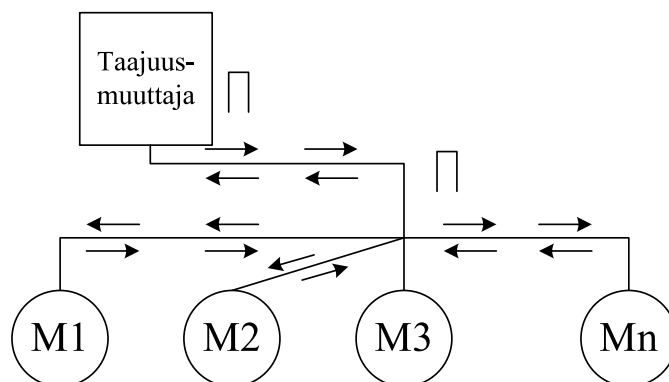
on tasajännitteen suuruus. Jos taas pulssin nousuaika on pienempi kuin jännitepuls-  
sin kaapelin pituuden kulkemiseen kuluva aika eli  $t_{\text{kulku}} \geq t_n$ , voidaan jännitepuls-  
sin suuruus  $u_r$  laskea

$$u_r = u_{\text{DC}}\rho_m. \quad (10)$$

(Basavaraja et al. 2006.)

### 2.2.1 Heijastukset monimoottorikäytön moottorikaapeleissa

Monimoottorikäyttöjen jänniteheijastusten käsittely on tässä työssä hyvin kevyt joh-  
tuen kirjallisuusmateriaalin vähyydestä ja työn tutkimuksen keskittymisestä yhteis-  
muotoisiin virtoihin. Seuraavaksi kuitenkin esitellään lyhyesti yksi aihetta käsitte-  
levä artikkeli. Hyypio ja Muehlbauer (2011) kirjoittavat, että monimoottorikäytös-  
sä moottorit voidaan esimerkiksi ketjuttaa, jolloin taajuusmuuttaja sijaitsee lähellä  
moottoriketjun ensimmäistä moottoria tai vaihtoehtoisesti taajuusmuuttaja voi si-  
jaita jossain ketjun keskellä. Yksi kytkentätapa on moottoreiden kytkeminen kaape-  
lilla suoraan taajuusmuuttajan lähtöön. Tämä kuitenkin voi vaatia enemmän kaape-  
liä kuin muut vaihtoehdot, mikä tuo lisäkustannuksia, eikä siten sovi mikrokäyt-  
töjen ajatusmaailmaan. Viimeinen vaihtoehto, jonka Hyypio ja Muehlbauer (2011)  
listaavat on taajuusmuuttajasta lähtevään kaapeliin kytkettävät moottoreille mene-  
vät kaapelit. Tämä vaihtoehto on havainnollistettu kuvassa 7 ja nuolilla on kuvattu  
jänniteheijastuksien kulkemiset. Hyypio ja Muehlbauer (2011) kertovat, että jän-  
nitteen heijastelun merkittävyys voi vaihdella riippuen kaapelointitavasta. He eivät  
kuitenkaan ole perustelleet väitteitään.



Kuva 7. Moottoreiden kytkentätapa, jossa moottorit on kytketty rinnan taajuusmuutta-  
jasta lähtevään kaapeliin. Nuolilla on kuvattu jänniteheijastuksien kulkemiset.

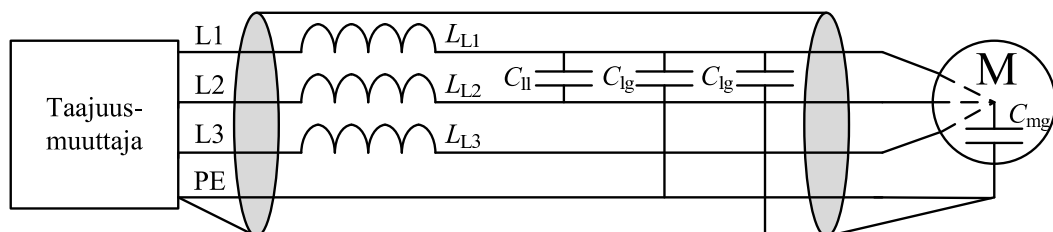
Edellisissä kohdissa läpikäydyn teorian perusteella voidaan ajatella, että monimoottorikäytössä jokaisessa kriittisen kaapelin pituuden ylittävissä moottorikaapelissa tapahtuu jänniteheijastuksia. Heijastelevat pulssit riippuvat eri moottoreiden kaapelien pituuksista ja materiaaleista. Kuvan 7 mukaan taajuusmuuttajalle tulee jänniteheijastuksia jokaisesta monimoottorikäytön moottorista. Jos heijastukset tulevat yhtä aikaa monista eri moottorikaapeleista, voivat heijastelevat jännite- ja virtapulssit olla suuria ja mahdollisesti aiheuttaa suuria virtapiikkejä taajuusmuuttajan IGBT-puolijohdetehoktykimille.

### 2.3 Kaapelikapasitanssien lataus- ja purkuvirrat

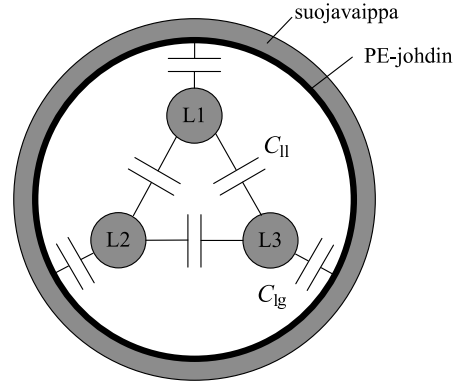
Kaapelikapasitanssien lataus- ja purkuvirtoja tutkivat esimerkiksi Skibinski et al. (1998). Heidän mukaansa kolmivaiheisen kaapelin vaihe- ja maajohtimien välillä on kapasitanssia  $C_{lg}$  sekä vaihejohtimien välillä kapasitanssia  $C_{ll}$ , jotka on havainnollistettu kuvassa 8 maadoitetun kaapelin tapauksessa. Moottorin hajakapasitanssi on kuvattu kapasitanssilla  $C_{mg}$ . Kuvassa ei ole piirretty kaikkia kapasitansseja, vaikka luonnollisesti myös vaiheiden L1 ja L3 sekä L2 ja L3 välillä on kapasitanssia  $C_{ll}$ . Piirtämättä on myös vaiheiden L2 ja L3 kapasitanssit  $C_{lg}$  maajohtimeen nähden.

Kuvassa 9 puolestaan on suojatun ja symmetrisen kolmivaiheisen kaapelin poikkileikkaus, josta nähdään kapasitanssit  $C_{ll}$  ja  $C_{lg}$ . Suojamaajohdin (PE-johdin, Protective Earth) ja suojavaippa ovat kolmivaiheisten johtimien L1, L2 ja L3 ympärillä (Skibinski et al. 2006).

Nämä kapasitanssit latautuvat, kun jännite kytketään kaapelin päähän, mikä aiheuttaa latausvirtoja. Purkausvirtoja puolestaan syntyy, kun jännite poistetaan ja kapasitanssien varaukset purkautuvat. Siten latausvirta koostuu vaiheiden välisestä



Kuva 8. Kolmivaiheisen kaapelin vaihe- ja maajohtimien välinen kapasitanssi  $C_{lg}$  sekä vaihejohtimien välinen kapasitanssi  $C_{ll}$ . Moottorin hajakapasitanssi on  $C_{mg}$ .  $L_{L1}$ ,  $L_{L2}$  ja  $L_{L3}$  ovat kyseisten johtimien sisäiset induktanssit.



Kuva 9. Symmetrisen kolmivaiheisen kaapelin poikkileikkaus sekä johdinten väliset kapasitanssit  $C_{Ig}$  ja  $C_{II}$ . Suojamaajohdin (PE-johdin, Protective Earth) ja suojavaippa ovat kolmivaiheisten johtimien L1, L2 ja L3 ympärillä.

komponentista  $i_{II}$  sekä vaihe- ja maajohtimen välisestä komponentista  $i_{Ig}$ . Virroille käytetään myös nimityksiä ero- ja yhteismuotoinen virta kulkureittiensä perusteella. Seuraavissa kohdissa 2.3.1 ja 2.3.2 näitä virtoja käsitellään hieman tarkemmin.

### 2.3.1 Eromuotoiset virrat sähkökäytössä

IGBT-puolijohdetehokytkimien kytkemä jännitepulssi indusoi eromuotoisia eli vaihejohtimien välisiä lataus- ja purkuvirtoja  $i_{II}$  kuvissa 8 ja 9 havainnollistettujen kapasitanssien  $C_{II}$  varautuessa. Jos kytkentätaajuus on korkea tai käytetään pitkiä kaapeleita, ei kapasitanssi  $C_{II}$  ehdi purkautua ennen seuraavan jännitepulssin alkamista ja kapasitanssiin jää jäännösjännitettä  $u_{res}$ . Latausvirran huippuarvo  $\hat{i}_{II}$  voidaan laskea välipiirin jännitteen  $u_{DC}$ , jäännösjännitteen  $u_{res}$  ja vaihejohtimien välisen impedanssin  $Z_{II}$  perusteella lausekkeella

$$\hat{i}_{II} = \frac{u_{DC} \pm u_{res}}{Z_{II}}, \quad (11)$$

missä impedanssi

$$Z_{II} = \sqrt{\frac{L_L}{C_{II}}}. \quad (12)$$

$L_L$  on vaiheen induktanssi. Lausekkeessa 11 valitaan yhteen- tai vähennyslasku riippuen siitä, onko jännite  $u_{res}$  vastakkais- vai myötäsuuntainen jännitteeseen  $u_{DC}$  nähden. (Skibinski et al. 1998.)

### 2.3.2 Yhteismuotoiset virrat sähkökäytössä

Pohjimmiltaan yhteismuotoiset virrat aiheutuvat siitä, että pulssinleveysmodulaatiossa muodostettavan jännitteen hetkellisarvojen summa ei ole nolla ja siten vaihejohtimissa nähdään yhteismuotoinen jännite. Nämä IGBT-puolijohdetehokytkimillä muodostettavat jyrkkäreunaiset jännitepulssit indusoivat vaihe- ja maaajohtimien välisiä suuritaajuisia latausvirtoja kapasitanssien  $C_{lg}$  varautuessa. Näitä virtoja syntyy myös moottorin hajakapasitansseissa  $C_{mg}$ . Virta on suurimmillaan, kun kapasitanssit  $C_{lg}$  ja  $C_{mg}$  ovat varautuneet vastakkaisiin polariteetteihin ennen jännitepulssin saapumista. Tällöin jännitepulssin huippuarvo on lähes yhtä suuri kuin välipiirin jännite  $u_{DC}$ . Siten latausvirran huippuarvo  $\hat{i}_{lg}$  saadaan laskettua lausekkeella

$$\hat{i}_{lg} \approx \frac{u_{DC}}{Z_{lg}}, \quad (13)$$

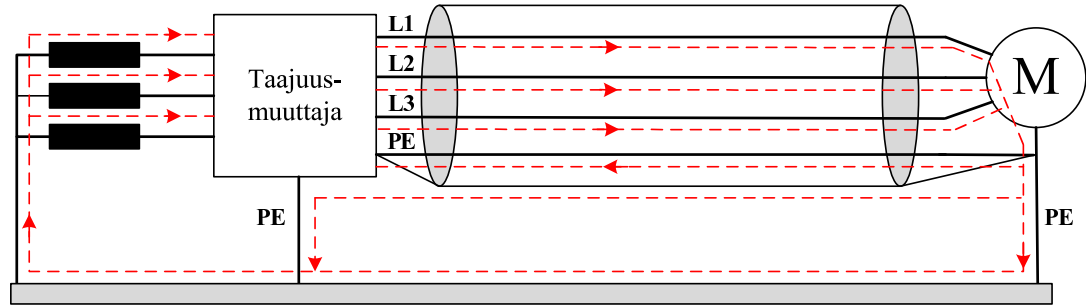
missä impedanssi

$$Z_{lg} = \sqrt{\frac{L_L}{C_{lg}}}. \quad (14)$$

(Skibinski et al. 1998.)

Kuvassa 10 on piirretty yhteismuotoisen virran kulkureitti sähkökäytössä ja siitä nähdään, että yhteismuotoinen virta kulkee moottorilta taajuusmuuttajalle suojamaajohdinta pitkin. Moottorikaapelin PE-johdin on kytketty taajuusmuuttajan runkoon. Taajuusmuuttajassa osa virrasta palaa välipiiriin ja vaihtosuuntaajaan. Loppuosa yhteismuotoisesta virrasta jatkaa taajuusmuuttajan syöttökaapelin PE-johtimen kautta syöttöverkkoon, josta taas jälleen taajuusmuuttajaan. Jokaisessa moottorikäytön osassa on hajakapasitanssia. Pienikin kapasitanssi muodostaa kuitenkin suuritaajuiselle virralle pieni-impedanssisen reitin. Koska yhteismuotoinen virta on suuritaajuista, se kytkeytyy sähkökäytön PE-johtimiin hajakapasitanssien kautta. Yhteismuotoinen piiri voidaan siis kuvata sähkökäytön hajakapasitanssien avulla. Tässä työssä muodostettu yhteismuotoisten virtojen simulointimalli koostuu monimoottorikäytön hajakapasitansseista.

Vaihtosuuntaajan modulointimenetelmällä on merkitystä yhteismuotoisen jännitteen syntyyn. Tätä on tutkinut Virtanen (2007) ja todennut, että suurin vaikutus on nollavektoreiden käytöllä. Hänen mukaansa erilaiset modulointimenetelmät tuottavat eri määriä kytkentöjä, jolloin niillä on suora yhteys jännitepulssien lukumääriin. Mitä enemmän jännitepulsseja esiintyy, sitä useammin yhteismuotoinen jänni-



Kuva 10. Yhteismuotoisen virran kulkureitti sähkökäytössä punaisella katkoviivalla. Yhteismuotoinen virta kulkee taajuusmuuttajalta moottorin kautta suojamaajohtinta pitkin syöttömuuntajalle jälleen takaisin taajuusmuuttajalle.

tepulssikin esiintyy ja yhteismuotoiset virrat pääsevät muodostumaan sähkökäytössä. Symmetrisessä modulointimenetelmässä käytetään kumpaakin nollavektoria, epäjatkuvuissa vain toista nollavektoria ja nollavektorittomassa tavassa nollavektoreita ei käytetä ollenkaan.

### 2.3.3 Suojamaajohtimen virrat monimoottorikäytössä

Skibinski et al. (1998) kirjoittavat, että monimoottorikäytössä suojamaajohtimessa kulkevat virrat voivat olla suuria, koska kaikissa moottorikaapeleissa muodostuvat lataus- ja purkuvirrat summautuvat suojamaajohtimessa. Jos heijastelevien virtapulssien amplitudit tulevat yhtä aikaa suojamaajohtimeen, summavirran arvo on suurimmillaan. Ongelmaksi sovelluksen toiminnan kannalta voi tässä tapauksessa tulla esimerkiksi taajuusmuuttajan suojaus, joka havaitsee suuren suojamaajohtimen virran ja toiminta keskeytyy.

## 2.4 Käytännön moottorikaapeli

Moottorikaapeleina käytetään erilaisia kaapeleita. Ne eroavat toisistaan resistanssi-, kapasitanssi- ja induktanssiarvoiltaan käytettyjen materiaalien ja poikkileikkauksen geometrian perusteella. Ahola et al. (2001) kertovat, että parametrien määrittämiseen on olemassa laskentayhtälöitä, joiden avulla voidaan arvioida kaapeliparametrien arvoja. Kaapelivalmistajien kaapeilleen ilmoittamat arvot perustuvat mittauksiin. Taulukossa 1 on esitetty valmistajan ilmoittamia resistanssi-, kapasitanssi- ja induktanssiarvoja kahdelle MCMK-kaapelilleen. MCMK-kaapeli on kuparijohtiminen

Taulukko 1. MCMK-moottorikaapeleiden parametrien arvoja mikrokäyttöjen tapauksissa.  $l$  on induktanssi vaihetta ja pituusyksikköä kohti,  $c$  on käyttökapasitanssi pituusyksikköä kohti,  $r_{DC}$  on johtimen maksimitasavirtaresistanssi pituusyksikköä kohti ja  $r_{AC}$  on johtimen maksimivaihtovirtaresistanssi pituusyksikköä kohti. Arvot on mitattu 20°C:n lämpötilassa ja 50 hertzin taajuudella. (Prysmian 2012.)

valmistaja	kaapeli	$c$ pF/m	$l$ nH/m	$r_{DC}$ mΩ/m	$r_{AC}$ mΩ/m
Draka	MCMK 3x1,5/1,5	250	340	12,1	14,5
Draka	MCMK 3x2,5/2,5	300	320	7,41	8,87

ja PVC-eristeinen kaapeli. Taulukon 1 induktanssit on mitattu 50 hertzin taajuudella, joten ne eivät vastaa yhteismuotoisen virran esiintymistäajuutta. Mikrokäytöissä virtojen perusteella moottorikaapelin pinta-alaksi voidaan valita esimerkiksi 0,75 mm<sup>2</sup>, 1,5 mm<sup>2</sup> tai 2,5 mm<sup>2</sup>.

Mikkola (2000) käsittelee suuritehoisia taajuusmuuttajakäyttöjä. Niissä moottorikaapelit ovat yleensä PVC-eristeistä MCMK- tai AMCMK-kaapelia, joiden suoja-johtimet ovat kuparia. AMCMK-kaapeli on alumiinijohtiminen ja PVC-eristeinen kaapeli. ABB (2010) suosittelee moottorikaapeleina käytettäväksi symmetrisiä, suojattuja kaapeleita (kuva 9). Suojattu kaapeli muodostaa yhteismuotoiselle virralle lyhyen, pieni-impedanssisen paluureitin vaihtosuuntaajalle. Kaapelin suojauksen tarkoituksena on estää häiriöiden kulkeutuminen kaapeliin ja toisaalta pois kaapelista, joten vierekkäisten suojattujen kaapelien välisen hajakapasitanssin pitäisi olla merkityksetön.

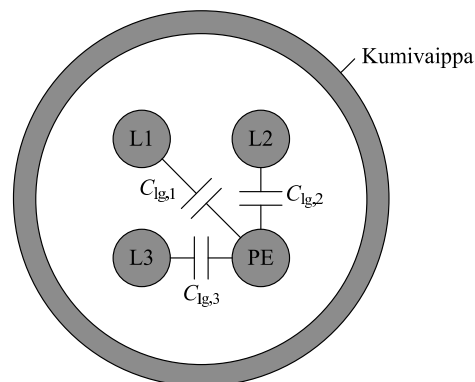
Koneenrakentajien mikrokäyttöihin asentamat moottorikaapelit voivat kuitenkin olla esimerkiksi epäsymmetristä kumikaapelia. Epäsymmetristen kaapeleiden tapauksessa kapasitanssit eri vaiheiden ja maa-johtimen välillä ovat erisuuret riippuen kaapelin poikkileikkauksen geometriasta eli johdinten välisistä etäisyyksistä. Kuvassa 11 on havainnollistettu kolmivaiheisen nelijohtimisen epäsymmetrisen kaapelin poikkileikkaus, jossa eri vaihejohtimien fyysinen etäisyys maa-johtimesta vaihtelee. Näin ollen kuvan kapasitanssit  $C_{lg,1}$ ,  $C_{lg,2}$  ja  $C_{lg,3}$  ovat erisuuria keskenään. Kumikaapeli ei ole suojattua, joten yhden kumikaapelin johtimien ja sen lähekkäisten kaapelien johtimien välillä voi olla hajakapasitanssia.

ABB:n kokemusten mukaan esimerkiksi Intiassa koneenrakentajat käyttävät epäsymmetristä kumikaapelia mikrokäyttöjen moottorikaapeleina. Kumikaapeli on taipui-

saa ja halpaa sekä sitä on saatavilla helposti. Lisäksi kumikaapeli kestää esimerkiksi auringonvalon aiheuttamaa haurastumista paremmin kuin muovikaapelit. Asennuksissa käytettävät kaapelit eivät täten välttämättä vastaa valmistajan asennuksille antamia suosituksia.

### 2.4.1 Monimoottorikäytön moottorikaapelit

Jokaisessa moottorikaapelissa on edellä kuvattuja hajakapasitansseja johtimien välillä ( $C_{lg}$  ja  $C_{ll}$ ) ja nämä kapasitanssit ovat sitä suurempia, mitä pidempi moottorikaapeli on. Monimoottorikäytössä useat taajuusmuuttajalta moottorille kulkevat moottorikaapelit voivat olla asetettuina aivan lähekkäin. Tällöin myös vierekkäisten kaapelien johtimien välillä voi olla hajakapasitansseja, joiden kautta yhteismuotoinen virta pääsee kulkemaan. Moottorikaapelin hajakapasitanssien suuruuteen vaikuttaa kaapelin tyyppi ja pituus. Kaapelin tyyppi vaikuttaa esimerkiksi niin, että suojatun moottorikaapelin johtimien välillä on suurempi kapasitanssi kuin suojaamattoman kaapelin, jolloin latausvirran huippuarvo voi olla suurempi. Suojattu kaapeli pienentää kuitenkin hajakapasitanssien muodostumista vierekkäisten kaapelien johtimien välille. (Rockwell Automation 2012.) Monimoottorikäytössä kapasitanssia yhteismuotoiseen virtapiiriin lisäävät myös moottorit, joten voidaan sanoa, että monimoottorikäytössä yhteismuotoisen virran kululle voi olla hyvät edellytykset.



Kuva 11. Nelijohtimisen epäsymmetrisen kolmivaiheisen kaapelin poikkileikkaus sekä vaihe- ja maaohdinten väliset kapasitanssit  $C_{lg,1}$ ,  $C_{lg,2}$  ja  $C_{lg,3}$ .

## 3 RATKAISUT MIKROKÄYTISSÄ

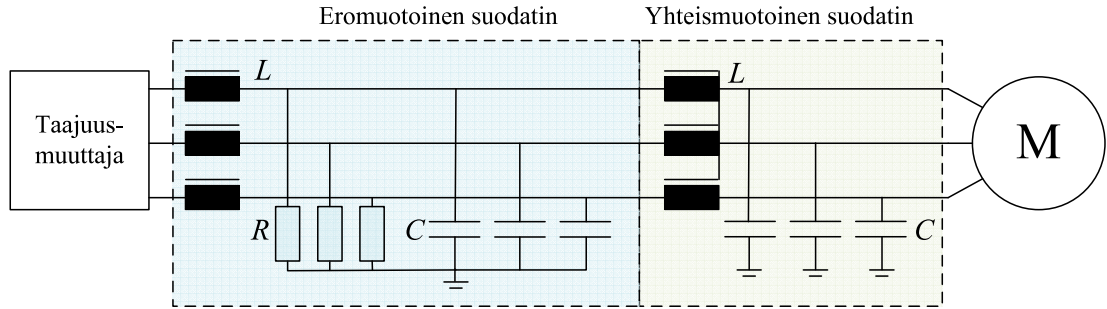
Taajuusmuuttajan aiheuttamien ylijännitteiden suojaukseen on kehitetty erillisiä suodattimia taajuusmuuttajan ja moottorin väliin. Näitä ovat esimerkiksi siniaaltosuodatin ja lähtökuristin. Suurien häiriövirtojen aiheuttamia vaurioita vastaan voidaan valita enemmän virtaa kestävä IGBT-puolijohdetehokytin. Yhteismuotoisten virtojen pienentämisessä voidaan käyttää myös taajuusmuuttajan tulopuolelle asennettavaa kuristinta. Koska mikrokäytöissä pyritään aina halvimpaan ratkaisuun, mahdollisesti asennettavan suodattimenkin täytyy olla mahdollisimman halpa.

### 3.1 Lähtösuodattimet mikrokäytöissä

Moottoreita täytyy suojata taajuusmuuttajan aiheuttamia ylijännitepiikkejä vastaan. Tähän on kehitetty erilaisia alipäästösuodatukseen perustuvia ratkaisuja kuten  $du/dt$ -suodatin ja siniaaltosuodatin. Niillä suodatetaan pulssinleveysmodulaation ja kaapelin heijastusten aiheuttamia jännitepiikkejä, jolloin jännitteen nousunopeus saadaan pienenemään. Siten lähtösuodattimilla pystytään vaikuttamaan myös taajuusmuuttajalle saapuviin jänniteheijastuksiin.

#### 3.1.1 Siniaaltosuodatin

Vaihejännitteiden ollessa sinimuotoisia niiden summa on nolla eikä siten synny yhteismuotoista jännitettä. Pulssimaiseen jännitteeseen kuuluvia nopeita nousureunoja ei ole sinimuotoisessa jännitteessä, joten jänniteheijastukset eivät aiheuta rasitusta. Siniaaltosuodattimella taajuusmuuttajan jännitepulsseista pyritäänkin muokkaamaan perustaajuista siniaaltoa. Rangarajan et al. (2010) perusteella siniaaltosuodatin voidaan muodostaa sekä yhteis- että eromuotoisia parametriarvoja käyttäen. Kuvan 12 siniaaltosuodatin muodostuu yhteis- ja eromuotoisista osista. Kuvan suodattimella voidaan vaikuttaa sekä ero- että yhteismuotoisen jännitteen heijastumisiin sekä pienentää moottorikaapelin latausvirtojen aiheuttamia virran huipparvoja. Rangarajan et al. (2010) kuitenkin toteaa, että kyseinen suodatinratkaisu muodostaa matalataajuiselle yhteismuotoiselle jännitteelle pieni-impedanssisen reitin, minkä takia alkaa liikkua huomattavia matalataajuisia vuotovirtoja.



Kuva 12. Yhteis- ja eromuotoinen siniaaltosuodatin.

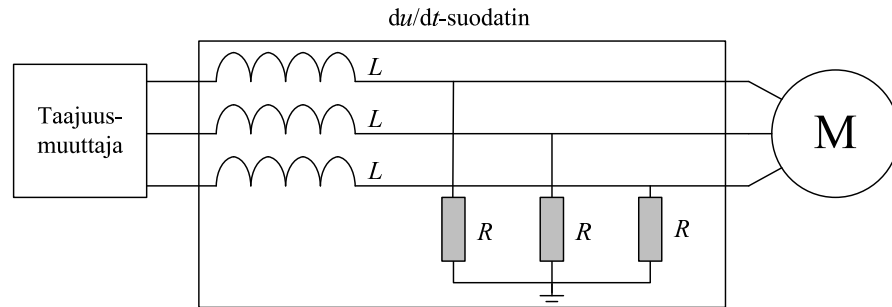
Sinimuotoinen moottorijännite vähentää moottorin eristyksen kuormitusta ja alentaa moottorin aiheuttamaa ääntä. Siniaaltosuodatin myös alentaa moottorin laakerivirtaa ja pienentää taajuusmuuttajassa aiheutuvia tehohäviöitä, mutta sen hankintakustannukset ja tehohäviö voivat kuitenkin olla korkeita. Siniaaltosuodattimet pienentävät moottorin rautahäviöitä, joten koko käytön näkökulmasta siniaaltosuodattimien käyttö saattaa pitää moottorikäytön hyötysuhteen lähes ennallaan.

Mikroikäyttöjen tapauksessa siniaaltosuodatin on lähtökohtaisesti kallis ja fyysisiltä mitoiltaan isokokoinen, mutta joissakin sovellustapauksissa se voi olla ainoa vaihtoehto pulssinleveysmoduloidun jännitteen aiheuttamien ongelmien ratkaisemiseksi.

### 3.1.2 $du/dt$ -suodatin

Jännitteestä pyritään poistamaan nopeat nousureunat  $du/dt$ -suodattimella, jota on havainnollistettu kuvassa 13. Se myös vähentää vaihe- ja verkkojännitteiden vaihtelua ja siten moottorin käämitysten sisäistä jänniterasitusta.

RL-suodatin voidaan mitoittaa eromuotoisten jänniteheijastusten vaimentamiseksi. Vastuksen resistanssi valitaan siten, että se vastaa moottorikaapelin eromuotoista aaltoimpedanssia, jolloin moottorin jännitteen heijastelu vaimenee. Eromuotoinen induktanssi valitaan niin, että se pienentää moottorin jännitteen suurinta arvoa. Arvot voidaan kuitenkin valita myös siten, että ne vaimentavat yhteismuotoisesta jännitteestä aiheutuvia heijastuksia. Näin ollen voidaan suunnitella suodatin, joka vaimentaa sekä yhteis- että eromuotoista heijastelua. Siten voidaan vaikuttaa myös yhteismuotoisen virran huippuarvoihin. (Rangarajan et al. 2010.)

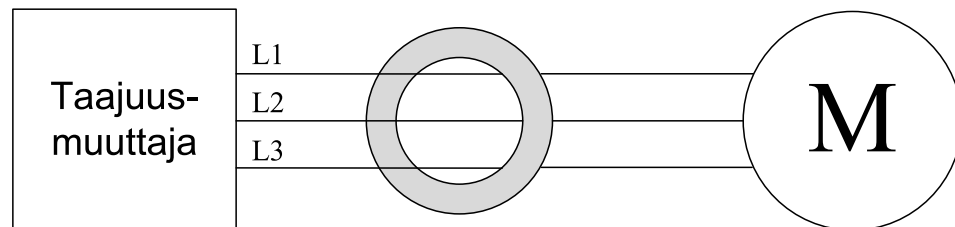


Kuva 13. Jännitteen nopeita nousureunoja alipäästösuodattava  $du/dt$ -suodatin.

Siniaaltosuodattimiin verrattuna  $du/dt$ -suodattimet ovat pienempiä fyysisiltä mitoiltaan, hinnaltaan ja painoltaan, mikä on etu mikrokäytöissä. Ne on helppo ja halpa asentaa sekä käyttökustannukset ovat halvat varsinkin isompien moottoritehojen kannalta (ABB 1997). Mikrokäyttöjen näkökulmasta kustannukset voivat kuitenkin olla isot verrattuna esimerkiksi taajuusmuuttajan kustannuksiin.

### 3.1.3 Yhteismuotoinen kuristin

Yhteismuotoinen kuristin muodostuu vaihejohtimien ja ferriittirenkaiden yhteisvaikutuksesta. Suodattimen ferromagneettinen sydän on renkaan muotoinen, ja se sijoitetaan yhteismuotoiseen virtapiiriin. Yhteismuotoisen kuristimen induktanssin tarkoitus on lisätä yhteismuotoiseen virtapiiriin impedanssia, ja siten loiventaa yhteismuotoisen jännitepulsin käyrämuotoa. Näin jännitteen nousunopeuden arvo pienenee ja yhteismuotoinen virta vaimenee. Kuvassa 14 on esitetty yhteismuotoisen kuristimen renkaanmuotoinen sydän moottorikaapelin vaihejohtimien ympärillä.



Kuva 14. Yhteismuotoisen kuristimen renkaanmuotoinen sydän on kaapelin vaihejohtimien ympärillä.

Yhteismuotoinen kuristin voidaan asentaa esimerkiksi taajuusmuuttajan tulokaapeleihin, välipiiriin tai moottorikaapeleihin. Yhteismuotoinen kuristin on halpa, ja siksi sopiva sovellettavaksi mikrokäytöissä. Mitoitettaessa tällaista kuristinta piiriin materiaalin saturoituminen täytyy ottaa huomioon. Jos tietty materiaalista ja lämpötilasta riippuva virran suuruus ylittyy, suhteellinen permeabiliteetti laskee nopeasti ja samalla impedanssi pienenee. Saturoitumisriski on sitä suurempi, mitä suurempi virta piirissä kulkee.

Jos yhteismuotoisen virran vähentämisen lisäksi jännitteen nousuaikaa pitää kasvattaa, täytyy valita esimerkiksi LCR-suodatin taajuusmuuttajan lähtöön. Näin ollen erilaisia suodattimia yhdistelemällä voidaan muodostaa eri tavoin vaikuttavia suodattimia. Ogasawaran ja Akagin (1996) mukaan yhteismuotoinen kuristin pienentää yhteismuotoisen virran huippuarvoa, muttei tehollisarvoa. He ovat kuitenkin suunnitelleet yhteismuotoisen muuntajan, jolla myös yhteismuotoisen virran tehollisarvoa voidaan pienentää.

### **3.2 Tulokuristin**

Yhteismuotoisen virtapiirin impedanssia voidaan lisätä myös taajuusmuuttajan tulopuolelle asennettavalla kuristimella, koska yhteismuotoinen virta kulkee myös taajuusmuuttajan syöttömuuntajaan. Tulokuristimen toimivuutta ei tässä työssä kuitenkaan testattu. Jos yhteismuotoinen virta kulkee merkittävästi tulokaapelien kautta, tulokuristimella voisi olla vaikutusta yhteismuotoisen huippuarvon vaimentamisessa.

### **3.3 Muut ratkaisut**

IGBT-puolijohdetehokytkimien virrankestoisuuden ylimitoituksella voidaan saada monimoottorisovelluksessa toimiva taajuusmuuttaja. Jos monimoottorikäytössä liikkuu merkittäviä suuritaajuisia virtoja, täytyy taajuusmuuttajan komponenttien kestää virrat ja niiden aiheuttama lämpeneminen. Vaihtosuuntaajan kytkentätaajuuden pienentäminen alentaa virran tehollisarvoa.

## 4 SIMULOINTI

Tässä luvussa tutustutaan muodostettuun yksivaiheiseen yhteismuotoiseen simulointimalliin. Myös mallin parametrien määrittämismenetelmät ja keskeiset simulointitulokset selostetaan. Simulointimalli luotiin luvun 2 (Moottorikaapelin mallintaminen) ja luvun 3 (Ratkaisut mikrokäytöissä) perusteella. Simulointityökaluna on Simplorer-piirisimulointiohjelma.

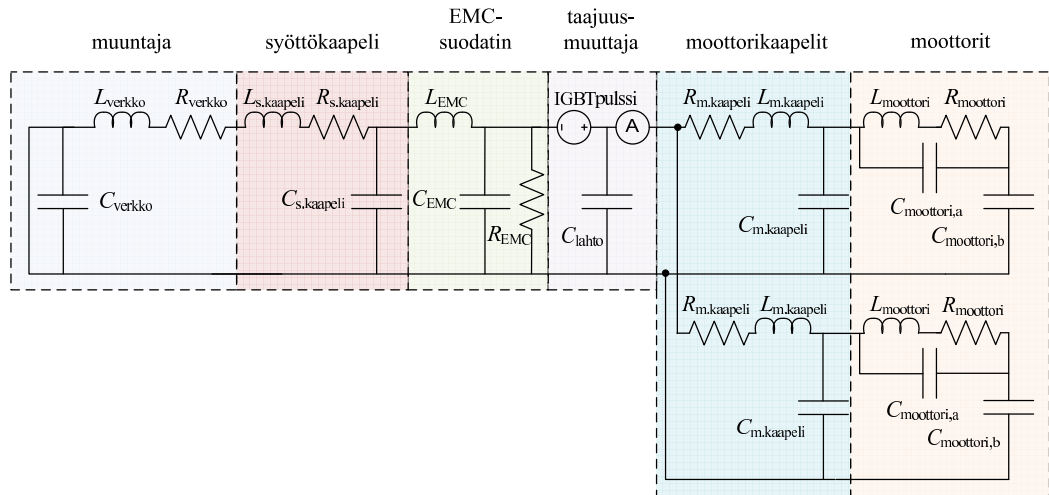
### 4.1 Yhteismuotoisten virtojen simulointimalli

Tässä työssä käytettävä yhteismuotoisten virtojen simulointimalli kuvaa mahdollisimman yksinkertaisesti yhteismuotoisten virtojen kulkua monimoottorikäytössä (Kinnunen 2012), koska päätutkimusmenetelmä työssä on mittaus oikealla laitteistolla. Siten malli on yksivaiheinen, ja sen parametrit on valittu yhteismuotoisten ilmiöiden tutkimista varten. Yhteismuotoinen ilmiö on taajuuskaistaltaan laaja, ja tässä mallissa sitä tutkitaan vaihtosuuntaajan kytkentätaajuudella, joka on käyttäjätapausta vastaava 8 kHz.

Simulointimalli koostuu verkkoliitynnästä, taajuusmuuttajasta ja rinnankytketyistä moottoreista. Muodostettu malli on havainnollistettu kuvassa 15, jossa on eroteltu laatikoin muuntajan, syöttökaapelin, EMC-suodattimen, taajuusmuuttajan, moottorikaapelin ja oikosulkumoottoreiden mallit. Mitä useampia moottoreita halutaan mallintaa, sitä useampia moottorikaapelin ja moottorin malleja lisätään rinnakkain taajuusmuuttajan lähtöön.

### 4.2 Simulointimallin parametrit

Simulointimallin parametrien valinta tehtiin mittauksien ja valmistajien antamien arvojen perusteella sekä hyödyntämällä aikaisempaa mittaustietoa. Impedanssien mittaamiseen käytettiin Agilent 4980A LCR -impedanssimittaria, jolla saatiin mitattavat arvot taajuuden funktiona 20 Hz - 2 MHz kaistalla. Koska sähkökäytön eri osien impedanssit riippuvat taajuudesta, parametrien määrittämistäajuudeksi valittiin jo mainittu 8 kHz.



Kuva 15. Yhteismuotoista virtaa simuloiva Simplerer-ohjelmistolla tehty yksivaiheinen malli, jossa on kaksi moottoria. Muuntajan, syöttökaapelin, EMC-suodattimen, taajuusmuuttajan, moottorikaapelien ja oikosulkumoottoreiden mallit on eroteltu laatikoin.

#### 4.2.1 Taajuusmuuttajan simulointiparametrit

Taajuusmuuttajan vaihtosuuntaaja mallinnettiin yhteismuotoista jännitettä tuottavana pulssimaisena jännitelähteenä, jota kuvassa 15 vastaa IGBTpulssi. Kinnusen (2004) perusteella ideaalisen kytkimen käyttäminen ei ole järkevää muutoin kuin simulointien nopeuttamiseksi. Tällöin vaihtosuuntaajan jännitteen nousunopeuden arvot nimittäin riippuvat simuloinnissa käytettävästä aika-askeleesta. Tämän työn mallissa jännitelähde on ideaalinen, mikä ei vastaa todellisuutta, mutta senkin perusteella voitiin havaita riippuvuussuhteita mallin eri parametrien väleillä. Mallin jännitepulssien nousunopeus määriteltiin vastaamaan IGBT-puolijohdetehokytkimien nousunopeutta, joka tässä tapauksessa oli noin  $1,3 \text{ kV}/\mu\text{s}$ . Koska simuloinnilla haluttiin selvittää vain taajuusmuuttajan jännitepulssien suuruusluokka, pulssinleveysmodulaatiota vastaavaa porrasmaista jännitettä ei mallinnettu. Sitä vastoin mallissa jännitelähde syöttää yhteismuotoisen jännitteen suuruista jännitepulssia, joka on kaksitasoisella jännitevälipiirivaihtosuuntaajalla tunnetusti kolmasosa tasajännitteen suuruudesta,  $1/3 \cdot u_{\text{DC}}$ . Taajuusmuuttajalle syötettävän pääjännitteen tehollisarvon ollessa  $400 \text{ V}$  saadaan dioditasasuuntaajan muodostamaksi välipiirin jännitteeksi  $u_{\text{DC}} \approx 1,35 \cdot 400 \text{ V} = 540 \text{ V}$ , josta jännitepulssin suuruudeksi saadaan noin  $1/3 \cdot u_{\text{DC}} \approx 180 \text{ V}$ .

Yhteismuotoisessa mallissa taajuusmuuttajaa kuvattiin kahdella hajakapasitanssilla  $C_{\text{tulo}}$  ja  $C_{\text{lahto}}$  sekä tulopuolelle suunnitellulla yhteismuotoisella kelalla, jonka yhteis-

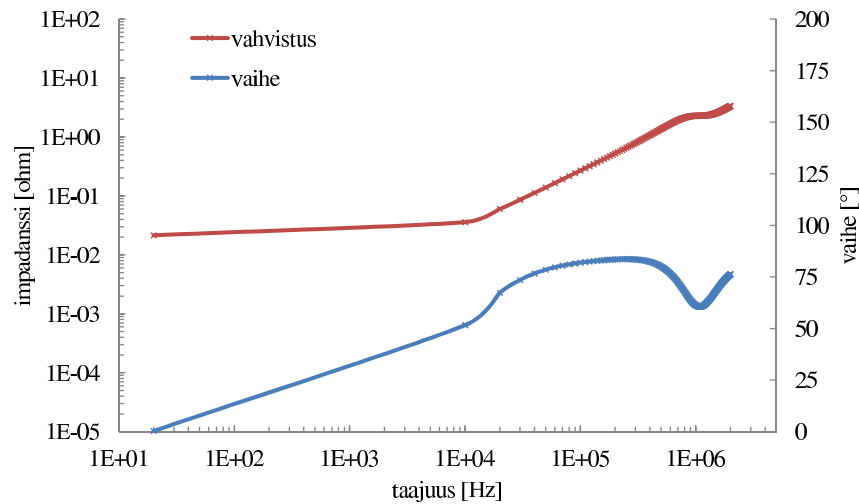
muotoinen induktanssi oli  $L_{EMC} = 3 \mu\text{H}$ . Tulopuolta kuvaava yhteismuotoinen kapasitanssi mitattiin oikosuljettujen syöttövaiheiden ja suojamaan väliltä. Lähtöpuolta kuvaava yhteismuotoinen kapasitanssi puolestaan mitattiin oikosuljettujen lähtövaiheiden ja suojamaan väliltä. Sisäänrakennettu EMC-suodatin mallinnettiin vain, kun syöttöverkko oli maadoitettu, koska EMC-suodatinta ei käytetä kelluvalla verkolla. Tulokapasitanssiksi saatiin EMC-suodattimen ollessa poiskytkettynä  $C_{tulo} = 0,23 \text{ nF}$  ja lähtökapasitanssiksi  $C_{lahto} = 0,2 \text{ nF}$ . Kun EMC-suodatin oli kytkettynä saatiin tulokapasitanssiksi  $C_{EMC} = 660 \text{ nF}$  ja sen rinnalle kytketyksi resistanssiksi  $R_{EMC} = 333 \text{ k}\Omega$  sekä lähtökapasitanssiksi  $C_{lahto} = 2 \text{ nF}$ .

#### 4.2.2 Moottorikaapelin simulointiparametrit

Syöttö- ja moottorikaapeleita mallinnettiin yksinkertaisesti resistanssin ja induktanssin sarjaankytkentänä, joka on rinnan kapasitanssin kanssa (kuva 6). Käyttäjätapausta vastaavan epäsymmetrisen VSN-tyyppisen kumikaapelin ( $4 \times 1,5 \text{ mm}^2$ ) ja symmetrisen MCMK-kaapelin ( $3 \times 2,5 \text{ mm}^2$ ) parametriarvot mitattiin impedanssimittarilla simulointimallia varten. Mäki-Onton et al. (2004) mukaan yhteismuotoiset parametrit mitattiin PE-johtimen ja oikosuljettujen vaihejohtimien välistä. Induktanssi mitattiin kaapelin piirin ollessa oikosuljettu ja kapasitanssi piirin vaihejohtimien ollessa oikosuljettu. Myös kaapelin yhteismuotoinen impedanssi mitattiin, ja se on esitetty kuvassa 16 VSN-kumikaapelille. Mallin lopulliset parametriarvot saatiin sovittamalla niitä vastaava impedanssikäyrä mitatun mukaiseksi. Taulukossa 2 on listattu valitut yhteismuotoiset parametriarvot VSN-kumikaapelille ja MCMK-kaapelille.

Taulukko 2. Yhteismuotoisen virran simulointimallin kaapelimallin yhteismuotoiset parametrit VSN-kumikaapelille ( $4 \times 1,5 \text{ mm}^2$ ) ja MCMK-kaapelille ( $3 \times 2,5 \text{ mm}^2$ ). Merkinnät vastaavat kuvan 15 merkintöjä.

VSN kumikaapeli	yhteismuotoinen induktanssi $L_{m.kaapeli}$	400 nH/m
	yhteismuotoinen resistanssi $R_{m.kaapeli}$	22 m $\Omega$ /m
	yhteismuotoinen kapasitanssi $C_{m.kaapeli}$	80 pF/m
MCMK-kaapeli	yhteismuotoinen induktanssi $L_{m.kaapeli}$	150 nH/m
	yhteismuotoinen resistanssi $R_{m.kaapeli}$	10 m $\Omega$ /m
	yhteismuotoinen kapasitanssi $C_{m.kaapeli}$	60 pF/m

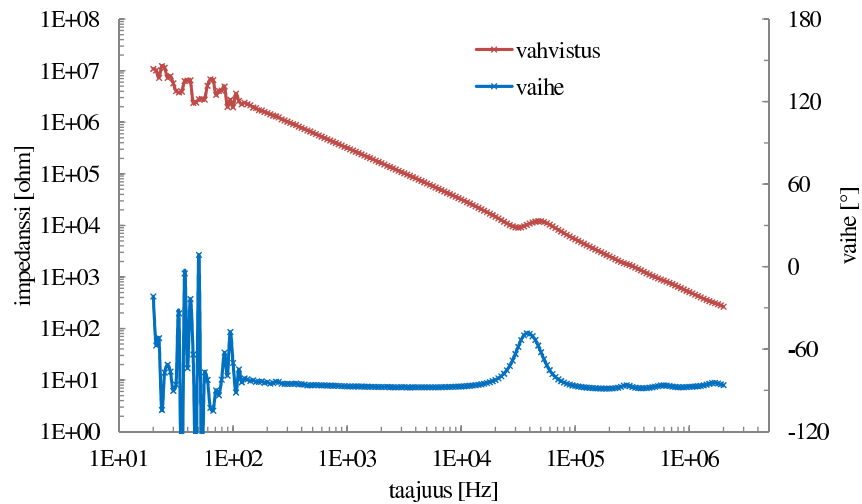


Kuva 16. VSN-kumikaapelin yhteismuotoinen impedanssi mitattuna PE-johtimen ja oikosuljettujen vaihejohtimien välistä. Vasemmalla pystyakselilla vahvistus ja oikealla vaihe.

Nämä mitatut arvot poikkeavat taulukon 1 valmistajan ilmoittamista parametriarvoista. Ero johtuu siitä, että arvot kuvaavat eri kapasitanssia, induktanssia ja resistanssia. Tässä työssä mitatut arvot ovat yhteismuotoisia kahdeksan kilohertzin taajuudelta, kun taas valmistajan ilmoittamat arvot ovat 50 hertzin taajuudelta ja kuvaavat eromuotoista mallia. Kapasitanssin arvolla on suuri ero näissä eri lähteissä, sillä MCMK-kaapelille valmistajan ilmoittama kapasitanssi on 300 pF/m ja mitattu 80 pF/m. Näin ollen voidaan sanoa, ettei yhteismuotoista mallia pysty muodostamaan suoraan valmistajan ilmoittamien tietojen perusteella.

#### 4.2.3 Moottorien simulointiparametrit

Moottorin hajakapasitanssien kautta muodostuu kulkureitti yhteismuotoiselle virralle. Kahden erilaisen moottorin yhteismuotoiset impedanssit mitattiin, ja näistä toisen moottorin impedanssikuvaaja on kuvassa 17. Mitatun impedanssin käyrämuodon perusteella valittiin sitä kuvaava malli, joka on esitetty kuvassa 15 sivulla 33. Mallissa resistanssi  $R_{\text{moottori}}$  ja induktanssi  $L_{\text{moottori}}$  kuvaavat staattorikäänien resistanssia ja induktanssia. Kapasitanssi  $C_{\text{moottori,a}}$  mallintaa käämin hajakapasitanssia ja  $C_{\text{moottori,b}}$  puolestaan kuvaa kytkeytymisvaikutuksia ja moottorin rautasydäntä.



Kuva 17. Moottorin (56B) yhteismuotoinen impedanssi. Vasemmalla pystyakselilla on vahvistus ja oikealla vaihe.

Taulukko 3. Yhteismuotoisen virran simulointimallin moottoreita kuvaavat parametrit. Merkinnät vastaavat kuvan 15 merkintöjä.

parametri	moottori 56B	moottori 63A
$L_{\text{moottori}}$	20 mH	10 mH
$R_{\text{moottori}}$	3000 $\Omega$	800 $\Omega$
$C_{\text{moottori,a}}$	1 nF	3 nF
$C_{\text{moottori,b}}$	1 nF	1 nF

Mallin parametrit valittiin siten, että mallin impedanssi vastaa melko hyvin mitattua yhteismuotoista impedanssia. Taulukossa 3 ovat moottoreita kuvaavat simulointiparametrit. Monimoottorikäytössä sarjaankytketyt moottorikaapelin ja moottorin mallit ovat rinnakkain taajuusmuuttajan lähdössä.

#### 4.2.4 Syöttöverkon simulointiparametrit

Taajuusmuuttajan syöttöverkon muuntajien ja kaapeleiden hajakapasitanssit muodostavat kulkureitin yhteismuotoiselle virralle. Monissa yhteismuotoista virtaa käsittelevissä julkaisuissa syöttöverkko on otettu huomioon, joten tässäkin se haluttiin ottaa mukaan yhteismuotoista virtaa simuloivaan malliin. Jos taajuusmuuttajan sisäänrakennettu EMC-suodatin on käytössä, suuritaajuisten yhteismuotoisen virran

kulkureitti on erilainen kuin tilanteessa, jossa EMC-suodatinta ei käytetä. EMC-suodatin estää virran kulkua syöttöverkkoon, ja siten yhteismuotoinen virta kulkee suuremmin taajuusmuuttajalle. Jos taas EMC-suodatin ei ole kytketty, syöttöverkon kautta kulkee suurempi osa yhteismuotoisesta virrasta.

Syöttöverkon piirimallin parametrit voidaan määrittää mittaamalla koko syöttöverkon yhteismuotoinen impedanssi taajuuden funktiona. Se on kuitenkin vaikea mitata, jos muuntaja on kytketty verkkoon. Tämän vuoksi syöttöverkon parametrit valittiin jo olemassa olevien taulukoitujen mittaustulosten perusteella tyypilliselle syöttöverkolle. Kuvassa 15 esitetyssä muuntajan mallissa kapasitanssi kuvaa suuritaajuuden hajavirran kulkureittiä. Induktanssi ja resistanssi puolestaan mallintavat muuntajan toision yhteismuotoisia arvoja. Kelluvalla verkolla muuntajan tähtipisteen ja maatason välillä on suuri resistanssi (1 M $\Omega$ ), ja maadoitetulla verkolla tähtipiste on kytketty suoraan maahan. Maadoitettu verkko on tyypillinen käyttöympäristö todellisessa sovelluksessa, mutta kelluvaa syöttöverkkoa käytetään laboratorioissa työturvallisuuden takia tai esimerkiksi laivoissa.

Syöttökaapeliksi valittiin 10 metrin pituinen MCMK 3x2,5 mm<sup>2</sup> -kaapeli ja muuntajaksi 250 kVA:n muuntaja, jonka simulointimallin yhteismuotoiset parametrit on listattu taulukossa 4.

### 4.3 Simulointitulokset

Simulointimallilla voitiin kokeilla monia erilaisia tapauksia moottoreiden lukumäärää ja kaapelien pituuksia vaihdellen. Perustapauksessa sähkökäytössä oli yksi moottori ja sitä varioitiin lisäämällä malliin moottoreita, jotta nähtiin lukumäärän vaikutus yhteismuotoisen virran huippuarvoon. Myös kaapelien pituuksia muuteltiin ja todettiin sen vaikutus yhteismuotoiseen virtaan taajuusmuuttajassa. Arvot on simuloitu hyvin yksinkertaistetulla mallilla, joten sen perusteella ei saa absoluuttisen

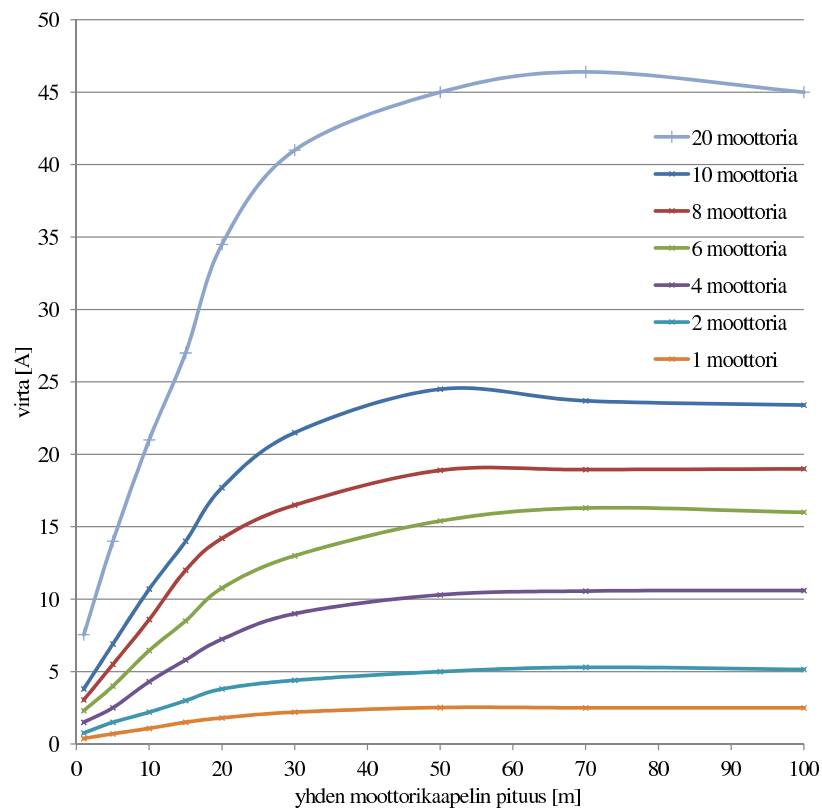
Taulukko 4. Simulointimallin muuntajan parametrit, jotka on valittu taulukoitujen tietojen perusteella. Merkinnät vastaavat kuvan 15 merkintöjä.

toision induktanssi $L_{\text{verkko}}$	9,3 $\mu\text{H}$
toision resistanssi $R_{\text{verkko}}$	833 $\mu\Omega$
hajakapasitanssi $C_{\text{verkko}}$	3,3 nF

tarkkoja virran huippuarvoja. Arvojen suuruusluokka vastaa kuitenkin mittauslaitteistolla saatuja tuloksia.

### 4.3.1 Moottorien lukumäärän variointi

Kuva 18 havainnollistaa simuloinnilla saatua kuvaajaa, jossa on taajuusmuuttajan moottoreille syöttämän yhteismuotoisen virran huippuarvo VSN-tyyppisen moottorikaapelin pituuden funktiona syöttöverkon ollessa kelluva. Moottorikaapelin pituus on ilmoitettu yhden kaapelin pituutena, eli monimoottorikäytössä kuvan vaakakselilla on kutakin moottoria syöttävän kaapelin pituus.



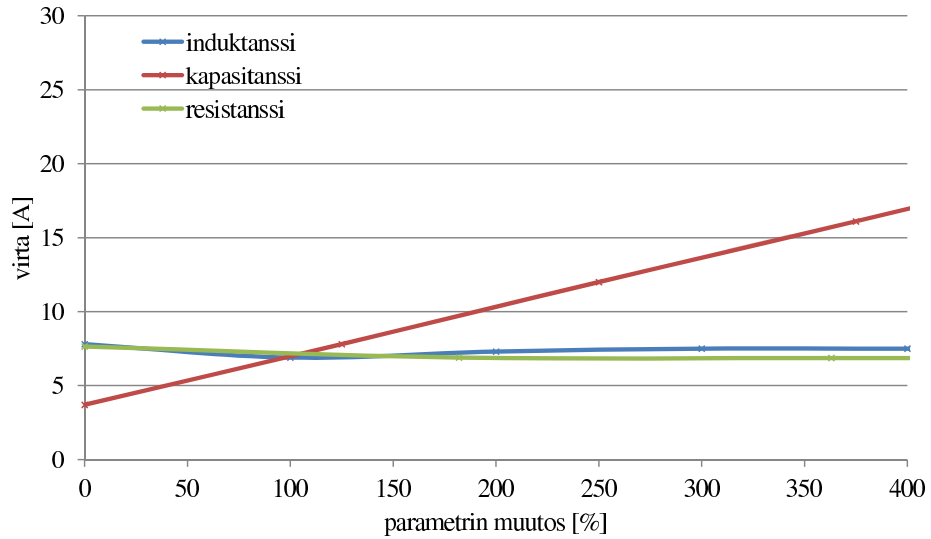
Kuva 18. Moottorikaapelin pituuden vaikutus yhteismuotoisen virran suuruuteen simuloinnin perusteella. Moottorikaapelin pituus on ilmoitettu yhden kaapelin pituutena eli monimoottorikäytössä vaakakselilla on kutakin moottoria syöttävän kaapelin pituus. Lisäksi tässä oletetaan, että monimoottorikäytössä jokaista moottoria syötetään yhtä pitkällä moottorikaapelilla.

Lisäksi tässä kuvassa oletetaan, että monimoottorikäytössä jokaista moottoria syötetään yhtä pitkällä moottorikaapelilla, eli esimerkiksi kymmenen moottorin sähkökäytössä on kymmenen kappaletta keskenään samanpituisia moottorikaapeleita. Kuvan käyräparven muodostavat moottoreiden lukumäärät yksi, kaksi, neljä, kuusi, kahdeksan, kymmenen ja kaksikymmentä kappaletta. Kuvassa voidaan verrata moottorikaapelin pituuden vaikutusta sekä moottoreiden lukumäärän vaikutusta yhteismuotoisen virran huippuarvoon.

Kuvasta 18 nähdään, että virran huippuarvo tasaantuu moottorikaapelin pituuden kasvaessa, mikä vastaa de Paulan et al. (2009) mittauksia ja simulointeja. Lisäksi kuvasta nähdään, että moottorien lukumäärän kasvaessa yhteismuotoisen virran huippuarvo kasvaa: esimerkiksi kymmenen metrin moottorikaapelilla on yhdellä moottorilla virtapiikin maksimiarvo noin 1 A ja kymmenellä moottorilla 11 A. Kuvasta voidaan lisäksi verrata tilannetta, jossa moottorikaapelin yhteispituus on sama, mutta moottorien lukumäärä vaihtelee. Esimerkiksi yhdellä moottorilla 50 metrin kaapelilla virran huippuarvo (2,5 A) on pienempi kuin kymmenellä moottorilla viiden metrin kaapeleilla (7 A). Näin ollen simulointimallin perusteella voidaan sanoa, että yhteismuotoinen virta on sitä suurempi, mitä useampi moottori monimoottorikäytössä on. Myös kaapelin pituuden kasvaessa yhteismuotoisen virran huippuarvo suurenee, mutta vaikutus pienenee, mitä pidemmät kaapelit ovat.

#### 4.3.2 Eri parametrien merkitys

Moottorikaapelin parametrien merkitystä yhteismuotoisen virran huippuarvoihin simuloitiin, ja tätä on havainnollistettu kuvassa 19. Kuvan arvot on simuloitu, kun käytössä oli kymmenen moottoria. Kuvan mukaan moottorikaapelin resistanssilla ja induktanssilla ei ole suurta vaikutusta virran huippuarvoon. Kapasitanssiarvo puolestaan on merkittävä, sillä kapasitanssin kasvaessa virran huippuarvo kasvaa jollakin kulmakertoimella. Myös moottorikapasitanssin merkitystä simuloitiin eri moottorien lukumäärillä, ja se on esitetty kuvassa 20. Kuvasta nähdään, että moottorikapasitanssin arvon kasvaessa kasvaa myös virran huippuarvo, mutta virran kasvu taittuu arvon kasvaessa tarpeeksi suureksi.

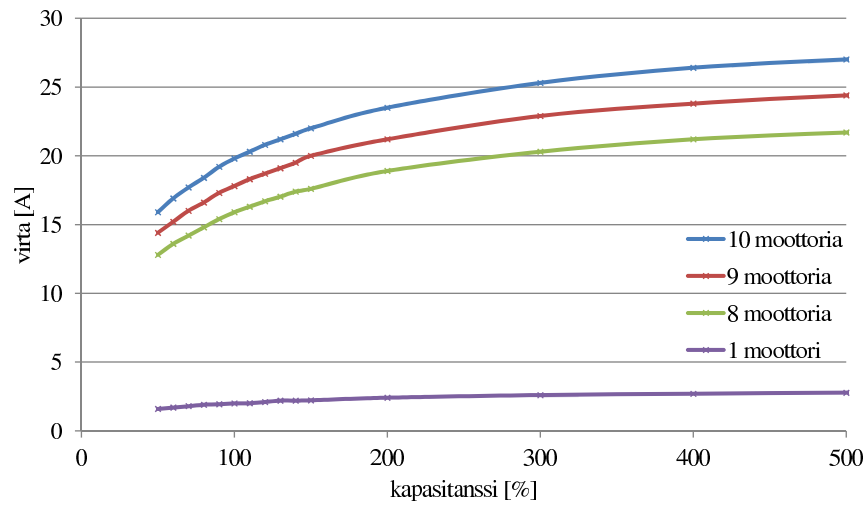


Kuva 19. Kaapeliparametrien vaikutus yhteismuotoisen virran suuruuteen. Sinisellä induktanssi, punaisella kapasitanssi ja vihreällä resistanssi. 100 % vastaa simulointimalliin valittuja viiden metrin VSN-tyyppisen kaapelin arvoja. Simuloinnissa oli maadoitettu verkko ja kymmenen moottoria.

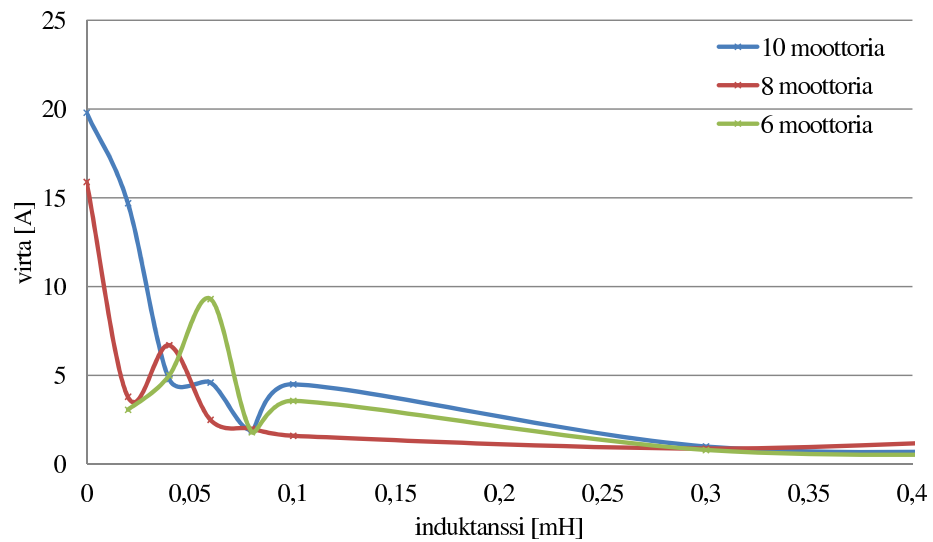
Kuvien 19 ja 20 perusteella voidaan sanoa, että kaapeli- ja moottorikapasitansseilla on vaikutusta yhteismuotoisen virran huippuarvoon. Simuloinnissa todettiin myös, että moottorimallin resistanssin  $R_{\text{moottori}}$  ja induktanssin  $L_{\text{moottori}}$  arvoilla ei ole merkitystä yhteismuotoisen virran huippuarvon kannalta. Tämä johtuu siitä, että yhteismuotoinen ilmiö on suuritaajuinen ja pieni-impedanssin kulkureitti virralle on siten resistanssin ja induktanssin rinnalla olevan kapasitanssin  $C_{\text{moottori,a}}$  kautta.

### 4.3.3 Suodattimen vaikutus

Lähtösuodattimen vaikutusta virran huippuarvoon mallinnettiin lisäämällä induktanssia taajuusmuuttajan lähtöön. Simuloitu kuvaaja eri moottorien lukumäärillä ja lisätyn induktanssin funktiona on kuvassa 21. Kuvasta havaitaan, että induktanssin lisääminen pienentää virran huippuarvoa. Induktanssin arvosta on kuitenkin vaikea sanoa tarkkaa ohjetta, koska käyrät eivät ole koko ajan laskevia. Kuitenkin huomataan, että jo pienellä induktanssin arvolla on merkitystä yhteismuotoisen virran huippuarvon pienentämisessä.



Kuva 20. Moottorikapasitanssin vaikutus yhteismuotoisen virran suuruuteen. 100 % vastaa simulointimalliin valittua arvoa, 1 nF. Simuloinnissa oli maadoitettu verkko ja jokaisella moottorilla viisi metriä VSN-kaapelia.



Kuva 21. Lähtösuodattimen vaikutus eri moottorien lukumäärillä induktanssiarvon muuttuessa. Sinisellä on merkitty kymmenen moottoria, punaisella kahdeksan moottoria ja vihreällä kuusi moottoria. Simuloinnissa oli maadoitettu verkko ja jokaisella moottorilla viisi metriä VSN-kaapelia.

## 5 MITTAUKSET

Tässä luvussa kuvaillaan mittalaitteisto ja kerrotaan keskeisimmät mittaustulokset. Mittauksia varten rakennettiin sivulla 16 kuvailtua käyttäjätapausta jäljittelevä monimoottorikäyttö, jolla testattiin monimoottorikäyttöä käytännössä. Monimoottorikäyttö koostui yhdestä taajuusmuuttajasta ja kymmenestä moottorista, joita jokaisesta syötettiin viiden metrin pituisella VSN-tyyppisellä kumikaapelilla tyhjäkäynnillä. Järjestelmässä oli kontaktori, jota kytkemällä syötettävien moottoreiden lukumäärää voitiin nostaa kahdeksasta kymmeneen. Kontaktorin kytkemisen aiheuttamia virtapiikkejä testattiin, kun taajuusmuuttaja moduloi. Vertailun vuoksi mitattiin myös yhden moottorin käyttöä pidemmällä moottorikaapeleilla, jolloin kytkentää muutettiin vastaamaan haluttua tilannetta.

### 5.1 Mittauslaitteisto

Mittaukset tehtiin käyttäjätapausta vastaavilla moottoreilla, jotka olivat ABB:n valmistamia kaksinapaisia oikosulkumoottoreita. Moottoreita oli tehoiltaan kahta kokoa: 120 W ja 180 W, joiden nimellisarvoja on listattu taulukkoon 5. Moottorit asennettiin rinnan ABB:n valmistaman ACS150-taajuusmuuttajan lähtöön. Taajuusmuuttajan nimellisarvot on esitetty taulukossa 6.

Kuvassa 22 on valokuva rakennetusta monimoottorikäytöstä ja mittausjärjestelyistä. Kuvasta nähdään, että kymmenen moottoria, viisi kumpaakin kokoa, ruuvattiin yhteiselle alustalle (kuvassa kohta 1). ACS150-taajuusmuuttaja (4) ja kontaktori (2) sekä kontaktoria ohjaava kytkin (3) puolestaan kiinnitettiin telineeseen. Moottorikaapelit kytkettiin riviliittimien ja osa kontaktorien kautta taajuusmuuttajan lähdöstä moottoreille. Lähtökuristin (5) kiinnitettiin telineeseen taajuusmuuttajan viereen. Taajuusmuuttajan moottoreille syöttämää pulssinleveysmodulointua jännitettä

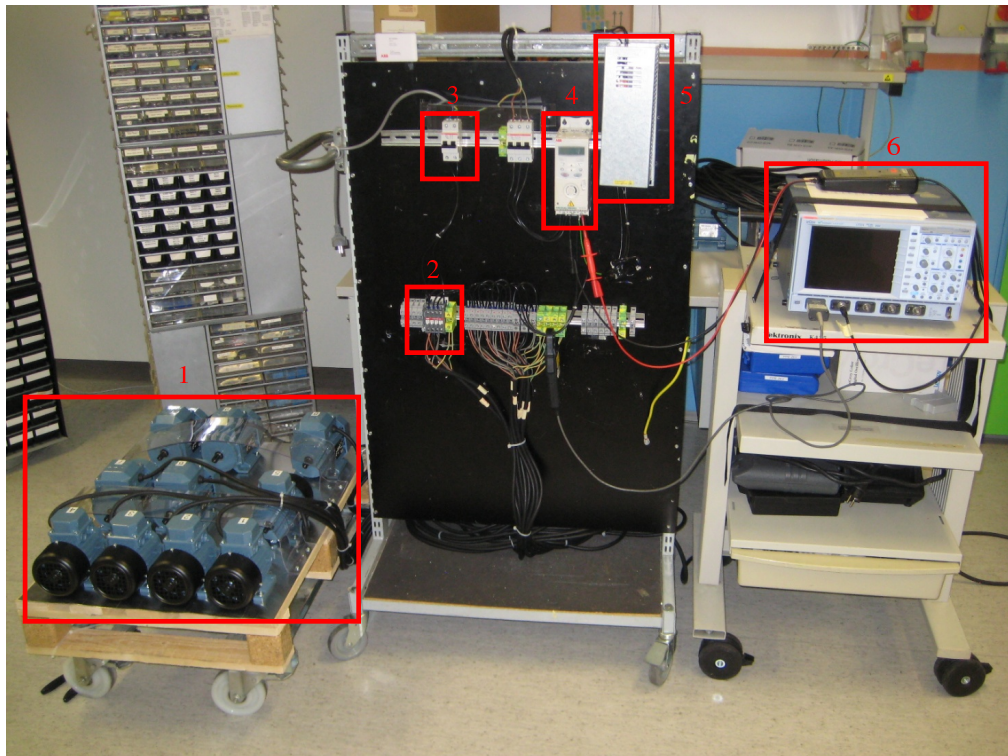
Taulukko 5. Mittauksissa käytettävien moottoreiden nimellisarvoja.

moottori	nimellis- teho W	nimellis- jännite V	nimellis- virta A	nimellis- taajuus Hz	nimellis- nopeus rpm
M2AA56B	120	400	0,31	50	2820
M2AA63A	180	400	0,55	50	2820

Taulukko 6. Mittauksissa käytettävän taajuusmuuttajan (ACS150-03E-05A6-4) nimellisarvoja. Maksimilähtövirralla 50 % ylikuormitus sallittu 1/10 minuutin jaksoissa. Suurin hetkellinen lähtövirta on sallittu enintään 2 sekunnin ajan.

jatkuva tulovirta	9,6 A
jatkuva nimellislähtövirta 50 % ylikuormituksella	5,6 A
maksimilähtövirta 50 % ylikuormituksella	8,4 A
suurin sallittu lähtövirta	9,8 A
tyypillinen moottoriteho	2,2 kW
runkokoko	R1

mitattiin oskilloskoopilla (6) taajuusmuuttajan lähdöstä kahden vaihejohtimen välistä. Taajuusmuuttajan syöttämää vaihevirtaa mitattiin taajuusmuuttajan lähdön vaihejohtimesta, ja yhteismuotoinen virta saatiin mittaamalla virta jokaisesta taajuusmuuttajan lähdön vaihejohtimesta yhtäaikaan. Mittauksissa käytettävä oskilloskooppi oli LeCroy Waverunner, jännitettä mitattiin differentiaalimittapäällä (1:500) ja virran mittauspäänä oli LeCroy AP011 (DC-120kHz).

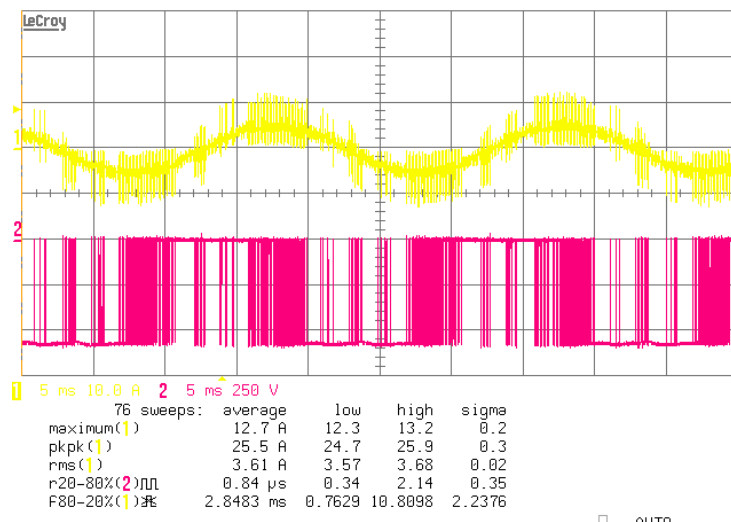


Kuva 22. Rakennettu monimoottorikäyttö ja mittausjärjestelyt.

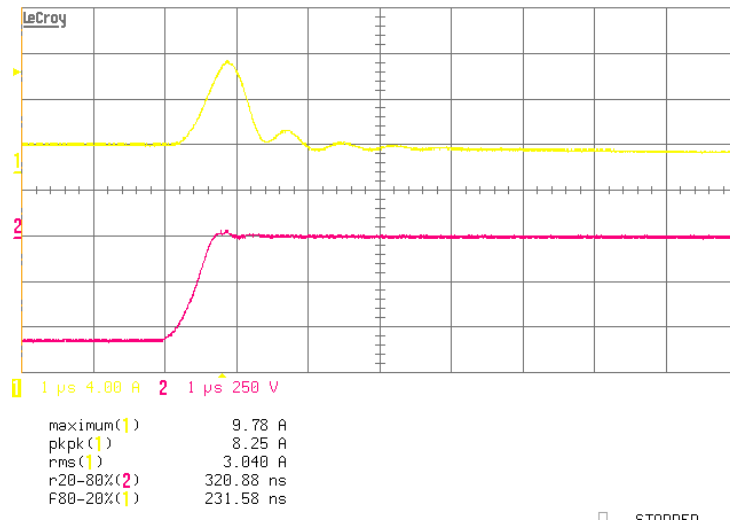
Taajuusmuuttajan kytkentätaajuudeksi valittiin asiakastapausta vastaava 8 kHz. Vertailun vuoksi joitakin mittauksia tehtiin myös muilla kytkentätaajuuksilla. Mittauksia tehtiin sekä maadoitetulla että kelluvalla syöttöverkolla, jolloin nähtiin syöttöverkon vaikutus monimoottorikäytön toimintaan. Kelluvalla verkolla taajuusmuuttajan sisäänrakennettua EMC-suodatinta ei käytetty, mutta maadoitetulla verkolla EMC-suodattimen toimintaa testattiin. Mittauksissa huomattiin, että EMC-suodatin vaikutti mitattujen PE-johdimien virtojen jakautumiseen, mutta ei kuitenkaan virran huippuarvoon. Moottoreille syötettiin jokaisessa mittauksessa referenssitaaajuutta 50 Hz.

## 5.2 Mittaustulokset

Kuvassa 23 on taajuusmuuttajan lähdöstä mitattu sinimuotoinen vaihevirta ja PWM-vaihejännite, kun monimoottorikäytössä on yhteensä kymmenen moottoria ja syöttöverkko on maadoitettu. Kuvan perusteella vaihevirran tehollisarvo on keskimäärin 3,61 A, josta laskettuna sinimuotoisen virran huippuarvo on noin viisi ampeeria. Virrassa on kuitenkin suuritaajuisia komponentteja, ja kuvan mukaan koko virtajakson huipusta huippuun -arvo on suurimmillaan  $i_{pk-pk} = 25,9$  A. Näin ollen kymmenen moottorin sähkökäytöllä suuritaajuiset virtapiikit aiheuttavat noin 15 A lisävaihtelua vaihevirran perustaajuuteen.



Kuva 23. Sinimuotoinen vaihevirta keltaisella ja PWM-vaihejännite punaisella taajuusmuuttajan lähdöstä mitattuna. Kytkentätaajuus on 8 kHz, moottoreita kymmenen kappaletta ja syöttöverkko maadoitettu.



Kuva 24. Yksi vaihevirtapulssi keltaisella ja PWM-pääjännitteen nousureuna punaisella taajuusmuuttajan lähdöstä mitattuna. KytKentätaajuus on 8 kHz, moottoreita kymmenen kappaletta ja syöttöverkko maadoitettu.

Mittausten perusteella jännitepulssin nousunopeus vaihtelee, mutta voidaan sanoa sen olevan keskimäärin noin  $1,3 \text{ kV}/\mu\text{s}$ . Kuvassa 24 on kuvattu yksittäinen PWM-jännitteen nousureuna ja sen aiheuttama virtapulssi, kun taajuusmuuttaja syöttää kymmentä moottoria. Kuvasta voidaan laskea jännitteen nousunopeudeksi noin  $1,7 \text{ kV}/\mu\text{s}$ , kun  $du = 0,54 \text{ kV}$  ja  $dt = 0,32 \mu\text{s}$ . Kyseisen virtapiikin huippuarvo on noin  $7,5 \text{ A}$ . Kuvasta nähdään myös, että ensimmäisen huippunsa jälkeen virtapulssi vaimenee.

### 5.2.1 Moottorien lukumäärän variointi

Tässä kohdassa verrataan taajuusmuuttajan lähdöstä mitatun virran sekä yhteismuotoisen virran huippu- ja tehollisarvoja moottorien lukumäärän vaihdellessa. Moottoreita oli yksi, kuusi, kahdeksan tai kymmenen kappaletta. Mittauksia tehtiin kelvulla ja maadoitetulla verkolla sekä kytkentätaajuuksilla 4 kHz, 8 kHz, 12 kHz ja 16 kHz.

Taulukkoon 7 on listattu mitatut yhteismuotoisen virran ja vaihevirran huippu- ja tehollisarvot eri moottorien lukumäärillä, kun kaikki moottorikaapelit olivat VSN-tyyppisiä ja viiden metrin pituisia. Myös kytkentätaajuuksien 4 kHz - 16 kHz vaikutusta yhteismuotoisten virtojen tehollisarvoihin voidaan vertailla kahdeksan moot-

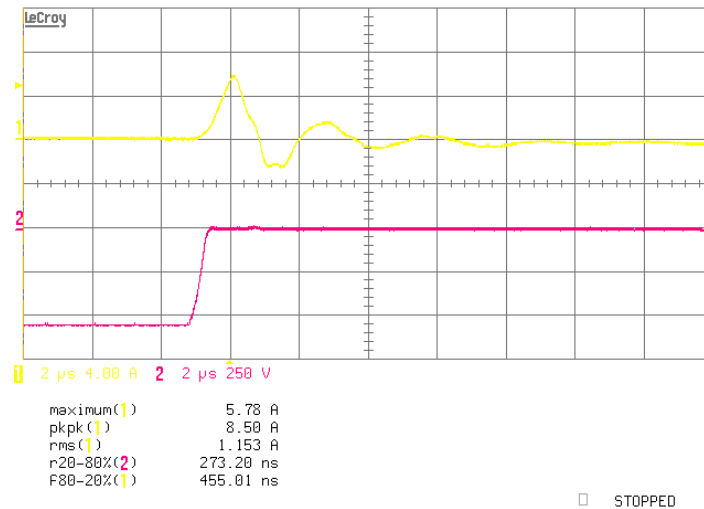
Taulukko 7. Mitatut yhteismuotoisen virran ja vaihevirran huippuarvot eri moottorien lukumäärillä, kun jokainen moottorikaapeli oli VSN-tyyppinen ja 5 m pituinen. Kelluvassa syöttöverkossa taajuusmuuttajan sisäänrakennettu EMC-suodatin ei ollut käytössä, mutta maadoitetussa verkossa EMC-suodatin oli käytössä. rms-arvo (Root Mean Square) tarkoittaa tehollisarvoa.

verkko	kytkentä- taajuus	mootto- reita	yhteismuot. virta		vaihevirta	
			huippuarvo	rms	huippuarvo	rms
kelluva	4 kHz	8	5,9 A	293 mA	-	-
	8 kHz	1	2,26 A	229 mA	-	-
		6	4,43 A	295 mA	8,4 A	2,1 A
		8	5,9 A	356 mA	10,7 A	2,8 A
		10	7,25 A	478 mA	12,5 A	3,6 A
	12 kHz	8	6,03 A	407 mA	-	-
16 kHz	8	6,15 A	442 mA	-	-	
maadoitettu EMC- suodatin käytössä	8 kHz	1	2 A	191 mA	3,61 A	0,4 A
		6	4,45 A	310 mA	9,05 A	2,1 A
		8	5,55 A	370 mA	11,3 A	2,8 A
		10	6,3 A	412 mA	13,4 A	3,5 A
maadoitettu ilman EMC- suodatinta	8 kHz	1	1,92 A	200 mA	3,36 A	0,4 A
		6	5,11 A	310 mA	8,4 A	2,1 A
		8	6,45 A	375 mA	10,8 A	2,8 A
		10	7,45 A	423 mA	12,7 A	3,5 A

torin tapauksessa. Vaihevirran arvoissa pitää ottaa huomioon kuormitus, joka kasvaa moottorien lukumäärän kasvaessa. Kuormitus nimittäin nostaa vaihevirran sinimuotoisen osan huippuarvoa, ja siten taulukon vaihevirran huippuarvot sisältävät sinimuotoisesti vaihtelevan osankin. Yhteismuotoisen virran huippuarvot taas ovat keskenään täysin vertailukelpoiset.

Taulukosta 7 huomataan, että moottorien lukumäärän noustessa yhteismuotoisen virran huippuarvo suurenee. Esimerkiksi maadoitetulla verkolla kahdeksalla moottorilla yhteismuotoisen virran huippuarvo on 5,55 A ja kymmenellä moottorilla se on 6,3 A eli noin 14 % suurempi. Taulukosta nähdään myös, että yhteismuotoisen virran tehollisarvo (rms-arvo, Root Mean Square) kahdeksalla moottorilla suurenee kytkentätaajuuden kasvaessa, mikä johtuu virtapiikkien esiintymistäajuuden kasvamisesta.

Kuvassa 25 on mitattu yhteismuotoinen virtapiikki, kun taajuusmuuttaja syöttää kymmentä moottoria. Kuvan yhteismuotoisen virtapiikin huippuarvo on noin 5,8 A



Kuva 25. Moottorikaapelin yhteismuotoinen virta keltaisella ja pääjännite punaisella. Kyt-kentätaajuus on 8 kHz, moottoreita on kymmenen, kunkin moottorikaapelin pituus 5 m ja syöttöverkko kelluva.

ja jännitepulssin nousuaika noin  $0,27 \mu\text{s}$ . Yhteismuotoisen virran pulssi vaimenee hitaammin kuin kuvan 24 vaihevirta.

### 5.2.2 Moottorikaapelin pituuden variointi

Tapausta, jossa oli kuusi moottoria viiden metrin VSN-tyyppisillä kumikaapeleilla verrattiin tapaukseen, jossa oli yksi moottori samantyyppisellä 30 metrin pituisella kaapelilla. Verrattiin myös kymmentä moottoria viiden metrin kaapeleilla yhteen moottoriin 50 metrin kaapelilla. Moottorikaapelin yhteispituus oli siis yhtä suuri verrattavissa tapauksissa. Tällä vertailulla haluttiin selvittää, onko moottorikaapelien pituus ainoa tekijä yhteismuotoisten virtojen huippuarvoihin. Mittaukset tehtiin kelluvalla syöttöverkolla kytkentätaajuudella 8 kHz. Taulukossa 8 on havainnollistettu mitatut virtapiikkien maksimisuuruudet yhdellä ja kuudella moottorilla, kun moottorikaapelin pituus on vakio 30 m. Taulukossa on myös yhden ja kymmenen moottorin mitatut virtapiikkien huippuarvot, kun moottorikaapelin yhteispituus molemmissa on 50 m.

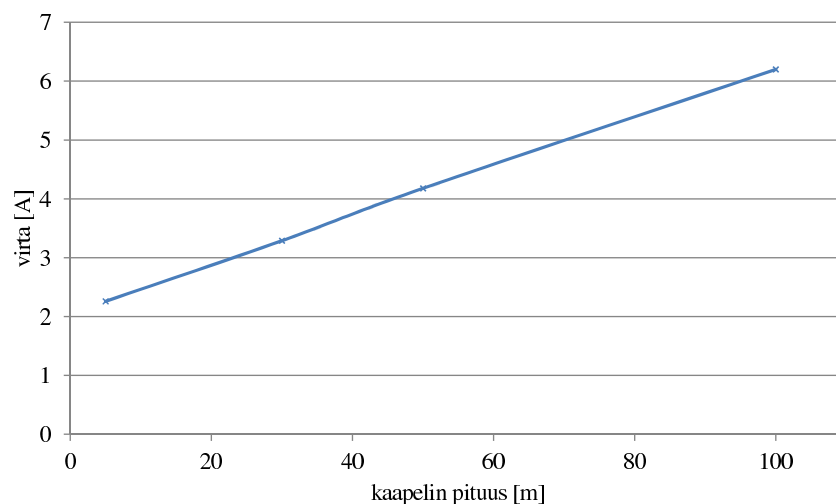
Taulukosta 8 nähdään, että monimoottorikäytössä yhteismuotoisen virran huippuarvo on suurempi kuin yhden moottorin käytössä. Tämän perusteella voidaan sanoa, ettei moottorikaapelin yhteispituus ole ainoa tekijä yhteismuotoisen virran muodos-

Taulukko 8. Mitatut virtapiikkien maksimisuuruudet yhdellä ja kuudella moottorilla, kun moottorikaapelin pituus on vakio 30 m sekä yhdellä ja kymmenellä moottorilla, kun moottorikaapelin yhteispituus on molemmissa 50 m.

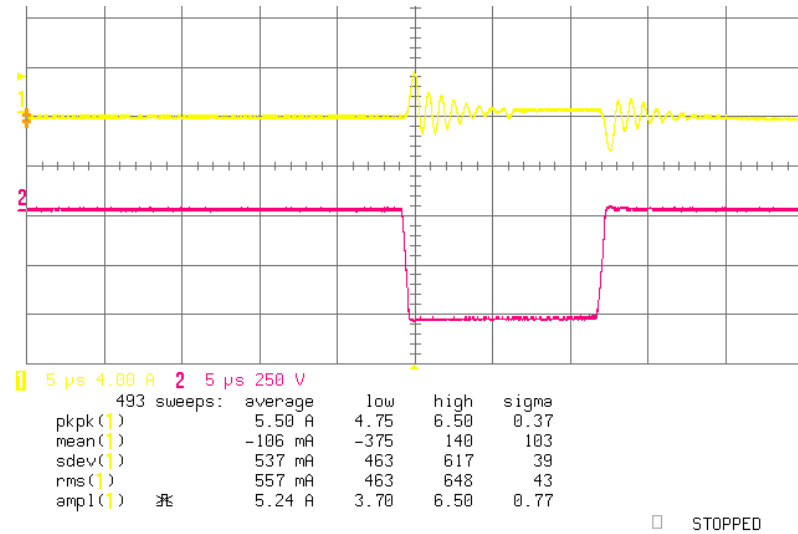
kytkentä- taajuus	moottorien lkm	kaapelin pituus	yhteismuot. virta		vaihevirta	
			huippuarvo	rms	huippuarvo	rms
8 kHz	1	30 m	3,29 A	284 mA	5,12 A	538 mA
	6	6x5 m	4,43 A	295 mA	8,4 A	2,1 A
	1	50 m	4,18 A	331 mA	7,1 A	635 mA
	10	10x5 m	7,25 A	478 mA	12,5 A	3,6 A

tumisessa monimoottorikäytössä. Myös vaihevirran huippuarvo on suurempi monimoottorikäytössä kuin yhdellä moottorilla. Se selittyy ainakin osittain kuormituksen nousulla, koska mitä useampaa moottoria taajuusmuuttaja syöttää, sitä suurempi lähtövirta taajuusmuuttajalta vaaditaan.

Yhden moottorin tapauksessa mitattiin yhteismuotoista virtaa neljällä eri moottorikaapelin pituudella, jotka olivat 5, 30, 50 ja 100 m. Mittausten perusteella piirretty kuvaaja on kuvassa 26. Kuvasta nähdään, että yhteismuotoisen virran huippuarvo kasvaa lineaarisesti moottorikaapelin pituuden kasvaessa. Mitattujen arvojen perusteella piirretty kuva näyttää erilaiselta kuin simuloitu kuvaaja (kuva 18), koska simuloinnissa käyrät taittuivat pitkillä kaapelin pituuksilla.



Kuva 26. Moottorikaapelin pituuden vaikutus yhteismuotoisen virran huippuarvoon. Kyt-kentätaajuus on 8 kHz, moottoreita on yksi ja syöttöverkko kelluva.



Kuva 27. Taajuusmuuttajan lähdön vaihejohtimen virta keltaisella ja pääjännite punaisella. KytKentätaajuus on 8 kHz, moottoreita on yksi, moottorikaapelin pituus 30 m ja syöttöverkko kelluva.

Tämä mittausten ja simuloinnin välinen ero voi johtua mittauspisteiden vähyydestä. Kuvassa 27 on taajuusmuuttajan lähdön vaihejohtimesta mitattu virta ja jännite, kun taajuusmuuttajalla syötettiin yhtä moottoria 30 metrin pituisella VSN-tyyppisellä kumikaapelilla. Kuvan mukaan yhtä moottoria 30 metrin pituisella moottorikaapelilla syötettäessä virta värähtelee noin seitsemän jakson ajan. Kuvan 24 mukaan kymmenellä moottorilla moottorikaapelin yhteispituuden ollessa 30 m virta värähtelee noin kolmen jakson ajan. Monimoottorikäytössä taajuusmuuttajan syötämä vaihevirta ei siis värähtele yhtä kauan kuin pitkällä moottorikaapelilla yhden moottorin tapauksessa.

### 5.2.3 Virtojen jakautuminen suojamaajohtimissa

Yhteismuotoisen virran jakautuminen sähkökäytön eri osien välillä riippuu eri osien yhteismuotoisten impedanssien jakautumisesta sekä virran taajuudesta. Taulukossa 9 on esitetty mitattujen suojamaajohtimien virtojen huippuarvoja eri moottorien lukumäärillä EMC-suodattimen ollessa käytössä ja poissa käytöstä. Mittaukset tehtiin taajuusmuuttajan, syöttökaapelin ja yhden moottorikaapelin suojamaajohtimesta. Taulukosta perusteella EMC-suodattimen käytöllä on vaikutusta virtojen jakautumiseen eri suojamaajohtimien välillä.

Taulukko 9. Mitatut virtapiikkien maksimisuuruudet monimoottorikäytön suojamaajohtimissa. PE-johdin tarkoittaa suojamaajohdinta.

EMC-suodatin	moottorien lkm	PE-johtimien virran huippuarvot		
		ACS150	syöttö	moottorikaapeli
ei EMC-suodatinta	1	0,88 A	0,79 A	1,51 A
	6	0,94 A	5 A	1,06 A
	8	1,0 A	6,05 A	1,67 A
	10	1,03 A	6,78 A	1,46 A
EMC-suodatin käytössä	1	1,82 A	1 A	0,88 A
	6	3,83 A	1,85 A	0,85 A
	8	4,9 A	1,1 A	1,04 A
	10	5,88 A	2,75 A	1,3 A

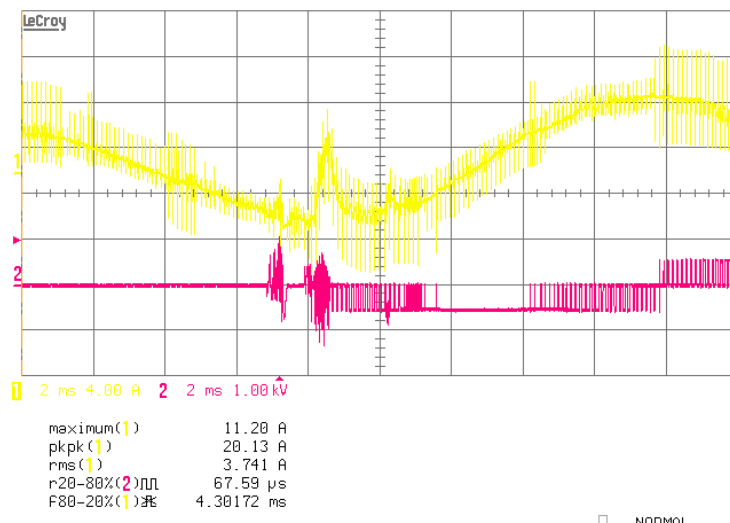
Taulukon 9 mitattujen arvojen mukaan virran huippuarvot ovat suurimmillaan taajuusmuuttajan syöttökaapelin suojamaajohtimessa, kun EMC-suodatin ei ole käytössä. Kun EMC-suodatin on käytössä, suurimmat arvot ovat taajuusmuuttajan suojamaajohtimessa. EMC-suodatin muodostaa yhteismuotoiselle virralle suuren impedanssin, mikä rajoittaa virran kulkemista verkkoon ja siten virta kulkee suuremmin taajuusmuuttajalle. Monimoottorikäytössä yhteismuotoisen virran huippuarvo kasvaa moottoreiden lukumäärän kasvaessa, ja siten myös etenkin EMC-suodatinta käytettäessä taajuusmuuttajan suojamaajohtimen kautta kulkeva virta kasvaa. Tämä virran kulkureitti voi olla syy yhteismuotoisen virran arvojen vaihteluun EMC-suodattimen takia. Nimittäin kohdassa 5.2.1 olevan taulukon 7 mukaan EMC-suodatinta käytettäessä yhteismuotoisen virran huippuarvot ovat pienemmät kuin ilman EMC-suodatinta. Teorian perusteella, jos virta ei kierrä syöttömuuntajan kautta, on yhteismuotoisen virtapiirin kapasitanssi pienempi, eikä yhteismuotoisen virran huippuarvo siten pääse kasvamaan niin suureksi.

#### 5.2.4 Kontaktoreilla kytkeminen

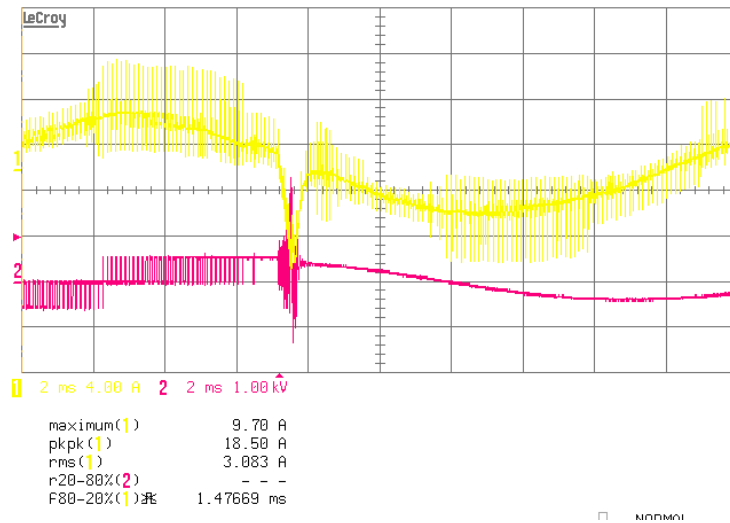
Moottorin kytkemistä taajuusmuuttajan lähtöön moduloinnin aikana tutkittiin kontaktorin avulla. Taajuusmuuttajan moduloidessa kontaktoria ohjattiin kytkimellä kääntelemällä kytkintä manuaalisesti on/off-asennosta toiseen. Monimoottorikäyttöön lisättiin siis yksi moottori suoralla verkkokäynnistyksellä. Kuvassa 28 on mitattu yhden kontaktorikytkennän aiheuttama ilmiö, kun kahdeksan moottorin pyöriessä kytkentään lisättiin yksi moottori yhdellä kontaktorilla kytkemällä ja kuvassa

29 poistettiin yksi moottori. Kuvien jännite on lisättävän tai poistettavan moottorikaapelin pääjännite ja virta on mitattu taajuusmuuttajan lähdön vaihejohtimesta. Kuvan 28 perusteella kontaktorin kytkeytyessä jännite heilahtelee noin kahden millisekunnin ajan ennen kuin normaali PWM-jännite muodostuu. Tämä johtuu kontaktorin fyysisestä toimintaperiaatteesta, jossa käämiin ohjausvirran synnyttämä magneettikenttä vetää kontaktorin koskettimet kiinni toisiinsa ja virta kontaktorin läpi alkaa kulkea. Kun ohjausjännite katkeaa, jousivoima avaa päävirtakoskettimet. Kuvien mukaan taajuusmuuttajan lähdön vaihevirrassa on noin kahdeksan ampeerin heilahdus sekä lisättäessä että poistettaessa moottori kontaktorilla.

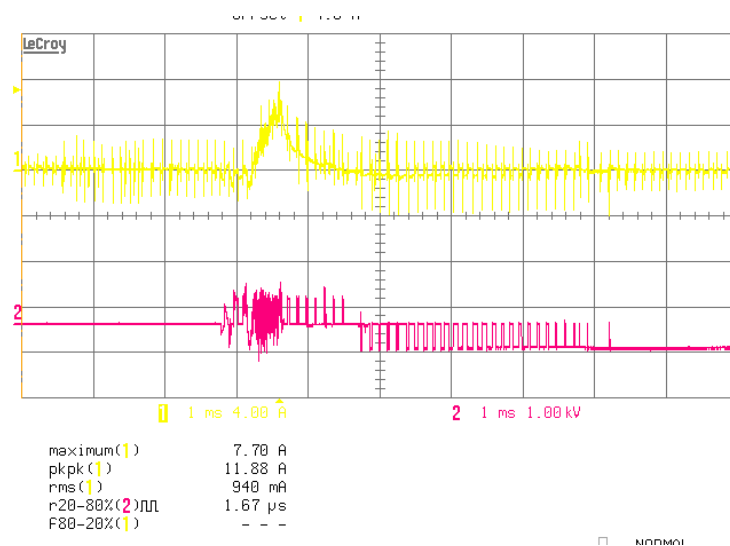
Kuvassa 30 on mitattu yhteismuotoinen virta, jonka mukaan kontaktorin kytkentä vaikuttaa myös yhteismuotoiseen virtaan. Siihen muodostuu kuvan mukaan noin neljän ampeerin ylimääräinen huippu. Kuvista 28 ja 29 huomataan, että kontaktorin kytkennän osuessa sinimuotoisen vaihevirran huippuun virran arvo on suurimmillaan. Kuvan 28 tapauksessa vaihevirran huippuarvon normaalisti ollessa noin 11 A voisi virta suurimmillaan saada lähes 20 A:n huippuarvon. Tämä arvo on suurempi kuin taulukossa 6 ilmoitettu suurin sallittu lähtövirta (9,8 A), joka on käytettävissä kahden sekunnin ajan käynnistyksessä ja muutoin taajuusmuuttajan lämpötilan salliman ajan. Taajuusmuuttaja ei mittauksien aikana hajonnut näihin kontaktorin kytkennöillä aiheutettuihin virtapiikkeihin, koska ne olivat niin nopeita, etteivät lämmittäneet komponentteja niin paljon.



Kuva 28. Taajuusmuuttajan lähdön vaihevirta keltaisella ja lisättävän moottorin pääjännite punaisella mitattuna hetkellä, kun kahdeksan moottorin kytkentään lisätään kontaktorilla yksi moottori. Kytkentätaajuus on 8 kHz ja syöttöverkko on kelluva.



Kuva 29. Taajuusmuuttajan lähdön vaihejohtimen virta keltaisella ja poistettavan moottorikaapelin pääjännite punaisella mitattuna hetkellä, kun yhdeksän moottorin kytkennästä poistetaan kontaktorilla yksi moottori. Kytkenätaajuus on 8 kHz ja syöttöverkko on kelluva.



Kuva 30. Taajuusmuuttajan lähdön yhteisluotoinen virta keltaisella ja kontaktorilla lisätävän moottorikaapelin pääjännite punaisella mitattuna hetkellä, kun kahdeksan moottorin kytkentään lisätään kontaktorilla yksi moottori. Kytkenätaajuus on 8 kHz ja syöttöverkko on kelluva.

### 5.2.5 IGBT-puolijohdetehokytken lämpötila

Mittauksia tehtiin myös jarruttamalla yhtä moottoria toisella moottorilla, jolloin saatiin yhdellä moottorilla taajuusmuuttajalle sama kuormitusvirta kuin kymmenellä moottorilla. Siten nähtiin IGBT-puolijohdetehokytken lämpötilat eri moottorien lukumäärillä kuormituksen vaikuttamatta. Kun tämä mittaus tehtiin 50 metrin kaapelilla, huomattiin, että taajuusmuuttajan mittaama IGBT-puolijohdetehokytken lämpötila oli noin 43°C. Kymmenellä moottorilla viiden metrin kaapeleilla lämpötila oli suurempi, 48°C. Tästä voidaan sanoa, että monimoottorikäytössä IGBT-puolijohdetehokytken lämpötila nousee suuremmaksi kuin yhdellä moottorilla. Taulukossa 10 on esitetty myös muissa tilanteissa mitattuja IGBT-puolijohdetehokytken lämpötiloja.

Taulukko 10. Mitatut IGBT-puolijohdetehokytken lämpötilat eri tilanteissa. Jarrutus tarkoittaa, että mitattavaa moottoria jarrutetaan toisella moottorilla, jolloin yhdellä moottorilla saatiin sama kuormitusvirta kuin kymmenellä moottorilla.

verkko	kytkentä-taajuus	moottorien lkm	kaapelin pituus	IGBT:n lämpötila
kelluva ilman EMC-suodatinta	8 kHz	1	1x5 m	22 °C
		6	6x5 m	-
		8	8x5 m	41 °C
		10	10x5 m	48 °C
maadoitettu ilman EMC-suodatinta	8 kHz	1	1x5 m	24 °C
		6	6x5 m	39 °C
		8	8x5 m	46 °C
		10	10x5 m	54 °C
maadoitettu EMC-suodatin käytössä	8 kHz	1	1x5 m	24 °C
		6	6x5 m	39 °C
		8	8x5 m	47 °C
		10	10x5 m	56 °C
kelluva ilman EMC-suodatinta	8 kHz	1	1x30 m	25 °C
		1	1x50 m	26 °C
		1	1x100 m	27 °C
		2	2x50 m	35 °C
		jarrutus	1	1x50 m
	16 kHz	8	8x5m	52 °C

Taulukon 10 perusteella voidaan sanoa, että monimoottorikäyttöillä on suurempi IGBT-puolijohdtehokeytkimen lämpötila kuin yksittäisellä moottorilla. Myös kytkentätaajuuden kasvaessa lämpötila nousee. Maadoitetulla verkolla lämpötilat ovat suurempia kuin kelluvalla verkolla, mikä johtuu eri muuntajien syöttöjännitteestä. Maadoitetun verkon tapauksessa taajuusmuuttajan välipiirin jännite oli noin 570 V ja kelluvalla verkolla noin 550 V. Tämä lämpötilaero eri verkkojen välillä selittyy IGBT-puolijohdtehokeytkimen kytkentähäviöiden kasvulla. Nimittäin välipiirin jännitteen noustessa jännitteen nousuaika kasvaa ja vaihtosuuntaajan kytkentähäviöt kasvavat. Tästä huomataan, että syöttöverkolla on suuri merkitys IGBT-puolijohdtehokeytkimien lämpötiloihin. Taulukon 10 mukaan muuntajan eri syöttöjännitteiden vaikutus kasvaa monimoottorikäytössä olevien moottoreiden lukumäärän kasvaessa, sillä kymmenellä moottorilla lämpötilaero on 8°C ja yhdellä moottorilla vain 2°C.

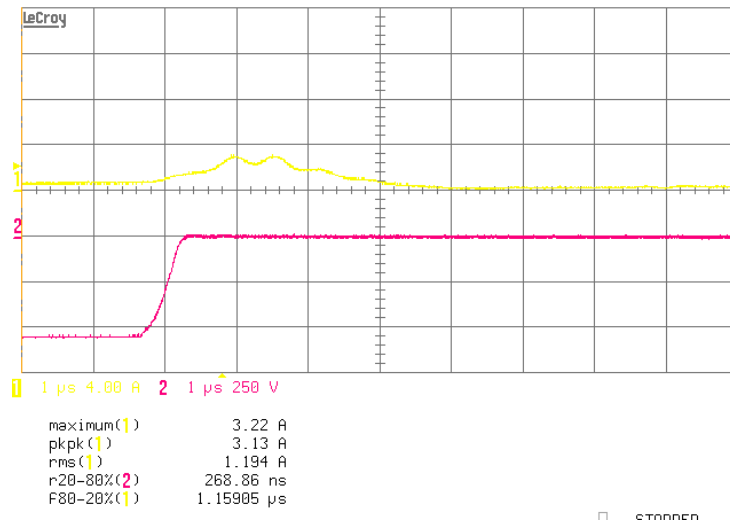
Lämpötilat on luettu taajuusmuuttajan sisäisen IGBT-puolijohdtehokeytkimen lämpötilamittauksesta. Lämpötilojen mittaustuloksissa voi olla virhettä johtuen siitä, ettei lämpötila ollut aina välttämättä täysin tasaantunut. Lämpötilojen arvoja ei nimittäin luettu käyrältä, vaan vain parametrin arvosta. Lisäksi monimoottorikäytön ollessa pitkään käynnissä komponenttien lämpötila voi olla suurempi kuin vasta käynnistetyllä laitteistolla. Mittauksia tehtiin myös eri päivinä, jolloin ympäröivät olosuhteet voivat olla erilaiset.

### 5.2.6 Lähtösuodattimen vaikutus

#### *Yhteismuotoinen kuristin*

Yhteismuotoisten virtojen huippuarvojen pienentämistä testattiin mittaamalla virran suuruutta, kun taajuusmuuttajan lähtövaihejohtimiin kiinnitettiin yhteismuotoinen kuristin. Kuristin oli toroidin muotoinen ja ferriittiä.

Kuristin pienensi yhteismuotoisen virran huippuarvon suuruutta, mikä oli odotettavissa teorian ja simuloinnin perusteella. Kuvassa 31 on esitetty kuristimen jälkeen mitattu yhteismuotoisen virran piikki, kun kaikki lähtöjohtimet oli pyöritetty neljä kertaa kahden ferriittirenkaan läpi. Kun kuvaa verrataan ilman yhteismuotoista kuristinta mitattuun virtaan kymmenen moottorin lähdöstä (kuva 25), huomataan, että ensimmäinen huippu on vaimentunut kuristimen vaikutuksesta. Lisäksi virran värähtelyn jaksonaika on pidentynyt kuristimen vaikutuksesta.

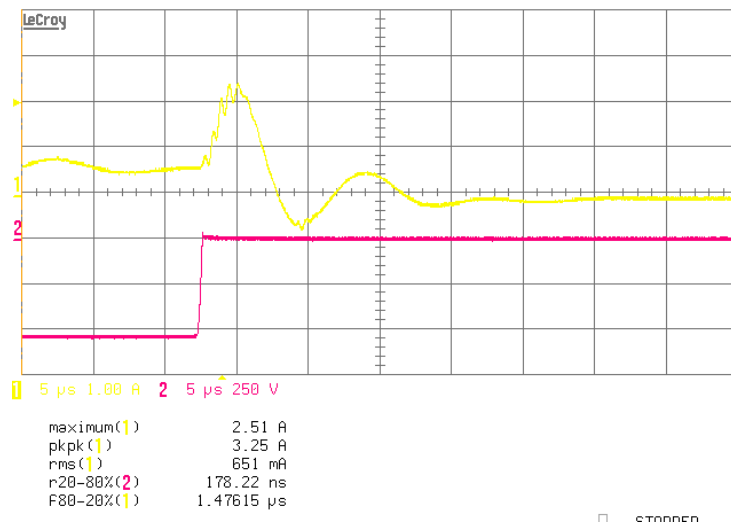


Kuva 31. Moottorikaapelin yhteismuotoinen virta keltaisella ja pääjännite punaisella, kun taajuusmuuttaja syöttää kymmentä moottoria ja kaksi ferriittirengasta on asetettu taajuusmuuttajan lähdön vaihejohtimiin. Vaihejohtimet on kierretty neljä kertaa ferriittirenkaiden läpi. Kytkenätäaajuus on 8 kHz ja syöttöverkko on kelluva.

Induktanssia voidaan lisätä asettamalla useampi ferriittirengas peräkkäin sekä kiertämällä vaihejohtimia renkaan läpi useamman kerran. Ferriittirengas täytyy kuitenkin valita niin, että vaihejohtimien kierrosmäärän noustessa materiaali ei pääse satu-roitumaan. Mittauksissa yhteismuotoisen virran huippuarvo saatiin laskemaan noin puoleen, kun kahden ferriittirenkaan ympärille kierrettiin neljä kierrosta vaihejohtimia. Mittausten mukaan tämä ei kuitenkaan vaikuttanut merkittävästi mitatun vaihevirran huippu- eikä tehollisarvoon eikä myöskään IGBT-puolijohdetehokytkimien lämpötilaan.

### *Lähtökuristin*

Lähtökuristimen vaikutusta virtoihin mitattiin ACS-CHK-C3-kuristimella, jossa jokaisen vaiheen induktanssi oli 0,8 mH. Kuristin pienensi sekä vaihevirran värähtelyä että yhteismuotoista virtaa merkittävästi. Kymmenellä moottorilla yhteismuotoisen virran maksimiarvo pieneni noin 60 % ja vaihevirran maksimiarvo noin 40 %. Myös IGBT-puolijohdetehokytkimien lämpötila oli pienempi kuristinta käytettäessä: se las-ki 48°C:sta 39°C:een. Kuvassa 32 on mitattu yhteismuotoinen virta, joka nousee noin 2 A jännitepuls- sin nousureunalla. Kuvasta havaitaan myös, että virta värähtelee noin 10 μs. Värähtelyn jaksonaika on pidempi kuin ilman kuristinta, jolloin se oli noin 3 μs (kuva 25).



Kuva 32. Taajuusmuuttajan lähdön yhteismuotoinen virta keltaisella ja pääjännite punaisella, kun taajuusmuuttaja syöttää kymmentä moottoria ja lähtökuristin on taajuusmuuttajan lähdössä. KytKentätaajuus on 8 kHz ja syöttöverkko on kelluva.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Simulointien perusteella nähtiin, että yhteismuotoisen virran huippuarvo kasvaa moottorien lukumäärän kasvaessa. Tämä johtuu yhteismuotoisen virran kulkemisen mahdollistavien kapasitanssien kasvamisesta. Huomattiin, että erityisesti moottorikaapelin yhteismuotoisen kapasitanssin arvolla on merkitystä yhteismuotoisen virran huippuarvon kannalta. Lisäksi simuloinneilla todettiin, että lisäämällä induktanssia monimoottorikäytön taajuusmuuttajan lähtöön, saadaan yhteismuotoisen virran huippuarvo pienenemään. Tarkkoja virran huippuarvoja ei simulointimallin yksinkertaisuuden vuoksi voitu kuitenkaan saavuttaa, eikä sen takia esitetä simuloitua virran käyrämuotojakaan. Mallin vastaavuutta reaaliseseen monimoottorikäyttöön lisäisi ainakin ideaalisen jännitelähteen vaihtaminen todellisempaan.

Mittaustuloksista havaittiin, että monimoottorikäytössä moottorien lukumäärän kasvaessa kasvavat sekä taajuusmuuttajan vaihe- että yhteismuotoinen virta. Moottorikaapelin vaikutusta tutkimalla havaittiin, että moottorikaapelin yhteispituus ei suoraan määritä virtojen huippuarvojen suuruutta, vaan monimoottorikäytössä arvot ovat suuremmat kuin yhden moottorin sähkökäytössä. Tämä voi johtua moottoreiden lukumäärän noususta, sillä tällöin yhteismuotoisen kapasitanssin arvo kasvaa ja yhteismuotoisen virran suuruus kasvaa kondensaattorin virtayhtälön (lauseke 1) mukaisesti. Mittauksilla nähtiin myös, että monimoottorikäytön suojamaajohtimissa kulkee yhteismuotoisia virtoja, joiden kulkureitti riippuu taajuusmuuttajan sisälle rakennetun EMC-suodattimen käytöstä. Pienimmät yhteismuotoisen virran huippuarvot mitattiin, kun EMC-suodatin oli käytössä ja tämä voi johtua yhteismuotoisen kapasitanssin pienemmästä arvosta, sillä virta ei pääse kiertämään syöttömuuntajan ja -kaapelin kautta.

Mittausten mukaan moottoreiden lisääminen ja poistaminen kontaktoreilla aiheuttaa piikkejä sekä vaihe- että yhteismuotoiseen virtaan. Huippuarvot ovat suuria taajuusmuuttajan nimellisvirta-arvoihin nähden, mutta piikit kuitenkin niin nopeita, etteivät komponentit ehdi lämmentä ja tuhoutua lämmön takia. Kontaktoreilla on helppo muuttaa moottorien lukumäärää, mutta tällaisessa suoraverkkokäynnistyksessä moottorit ottavat käynnistysvirtaa eikä taajuusmuuttaja pysty rajoittamaan sitä. Tällaisilta kontaktorien aiheuttamilta ongelmilta vältyttäisiin, jos taajuusmuuttaja ja siten kaikki monimoottorikäytön moottorit pysäytettäisiin ennen moottoreiden lisäämistä tai poistamista.

IGBT-puolijohdetehokytken lämpötila nousee moottoreiden lukumäärän noustessa. Lämpötilaan vaikuttaa syöttöverkon jännite, sillä taajuusmuuttajan välipiirin jännitteen noustessa kasvaa puolijohdetehokytken muodostaman jännitteen nousuaika ja sen myötä kasvavat myös kytkentähäviöt. Mittauksen mukaan myös kytkentätaajuuden nouseminen nostaa lämpötilaa, mikä johtuu kytkentähäviöiden kasvamisesta.

Mittauksissa lähtökuristin pienensi sekä vaihevirran värähtelyä että yhteismuotoista virtaa merkittävästi. Myös IGBT-puolijohdetehokytken lämpötila laski kuristimen vaikutuksesta. Yhteismuotoinen kuristin vaikutti ainoastaan yhteismuotoisen virran huippuarvon suuruuteen. Yhteismuotoinen kuristin on pienten fyysisten mittojensa ja hintansa puolesta sopiva mikrokäyttöjen yhteismuotoisen virran pienentämiseen. Tämän työn mittausten perusteella tehokkaampi vaihtoehto esimerkiksi IGBT-puolijohdetehokytken lämpötilojen pienentämiseen on kuitenkin lähtökuristin. Sen haittapuolena ovat mikrokäyttöjen näkökulmasta suuret fyysiset mitat ja hinta.

Kymmenellä moottorilla työssä mitatut virran huippuarvot eivät olleet niin suuria, että olisivat aiheuttaneet taajuusmuuttajan komponenttien hajoamisen. Tämä työ ei siten ratkaise tässä työssä sivulla 16 esitellyn käyttäjäsovelluksen ongelmaa, jossa IGBT-puolijohdetehokytken hajosivat. Tämän työn mittaukset suoritettiin kuitenkin täysin eri laitteistolla ja erilaisissa olosuhteissa. Todellisessa sovelluksessa taajuusmuuttajat on asennettu pieneen tilaan, jossa ympäristön lämpötila voi olla suurempi kuin tämän työn laitteistoa ympäröivä lämpötila. Myös käyttäjätapauksen tekstiiliteollisuushallin pölyisyys voi aiheuttaa taajuusmuuttajan jäähdytyksen tehokkuuden alenemista, jolloin komponenttien lämpötila pääsee nousemaan. Myös sähkökäytön syöttöjännitteen suuruus käyttäjätapauksessa voi olla eri kuin tämän työn mittauksissa käytetyillä muuntajilla, mikä voi vaikuttaa monimoottorikäytön IGBT-puolijohdetehokytken lämpötilaan. Lisäksi tämän työn mittauksissa monimoottorikäytön moottorit pyörivät tyhjäkäynnillä, mutta todellisessa tilanteessa moottoreilla on kuormaa, joka voi nostaa virran huippuarvoa.

Jatkossa simulointimallia voisi kehittää, sillä tässä työssä esitetty malli on hyvin yksinkertainen, eikä sen avulla voitu tehdä tarkkoja johtopäätöksiä yhteismuotoisen virran huippuarvojen suuruuksista. Esimerkiksi työn ideaalisen yhteismuotoisen jännitelähteen voisi korvata todellisemmalla tavalla. Simulointimallista voisi myös tehdä kolmivaiheisen, jolloin sillä voitaisiin simuloida myös vaihevirtaa ja eri jännitteitä. Haluttaessa mallintaa jotain tiettyä monimoottorikäyttöä malli täytyisi muo-

dostaa tapauskohtaisesti, sillä esimerkiksi moottorikaapelin tyyppi ja paksuus voivat vaihdella. Jatkotutkimuksen voisi tehdä myös jänniteheijastuksien kulkemisesta monimoottorikäytössä, sillä joissakin sovelluksissa voidaan käyttää pitkiäkin moottorikaapeleita. Jänniteheijastukset kun teorian mukaan esiintyvät juuri pitkiä moottorikaapeleita käytettäessä. Lee ja Park (2010) ovat esittäneet siirtofunktioperusteisen simulointimallin, jolla nähdään jännite- ja virtaheijastukset pitkällä kaapelilla yhden moottorin tapauksessa. Esimerkiksi tätä mallia mukaillen voisi simuloida myös monimoottorikäyttöä. Mielenkiintoista jatkossa olisi myös tutkia yksityiskohtaisemmin miten esimerkiksi tämän työn monimoottorikäytössä mitatut virtapiikit vaikuttavat vaihtosuuntaajan IGBT-puolijohdetehokytkimien toimintaan. Suurempi lämpötilaahan lyhentää komponentin elinikää.

## 7 YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin pienitehoista monimoottorikäyttöä ja tarkastelu keskittyi monimoottorikäytössä kulkeviin yhteismuotoisiin virtoihin. Teoriaosuus kuvaa pääosin yhden moottorin sähkökäytön jänniteheijastuksia sekä kaapelikapasitanssien lataus- ja purkuvirtoja. Monimoottorikäyttöä käsiteltiin suppeammin, koska lähdemateriaalia aiheesta oli melko vähän. Työssä rakennettiin monimoottorikäyttö, jonka moottorit, taajuusmuuttaja ja moottorikaapelit vastasivat käyttäjäsovellusta. Sitä tutkittiin tarkemmin mittaamalla taajuusmuuttajan lähdön vaihe- ja yhteismuotoista virtaa sekä pulssinleveysmodulointia jännitettä. Työssä muodostettiin myös yksivaiheinen yhteismuotoisen virran simulointimalli, jonka parametriarvot kuvasivat rakennetun monimoottorikäytön osia. Parametriarvot määritettiin mittaamalla, valmistajien ilmoittamien arvojen perusteella ja hyödyntämällä aikaisempaa mittaustietoa. Simulointimallin perusteella ei kuitenkaan voitu tehdä tarkkoja johtopäätöksiä yhteismuotoisen virran huippuarvojen suuruuksista, koska malli oli todella yksinkertainen.

Teorian mukaan moottorikaapelin pituuden kasvaessa kasvaa myös yhteismuotoinen kaapelikapasitanssi, jonka kautta yhteismuotoinen virta kulkee. Tällöin yhteismuotoisen virran huippuarvo kasvaa. Simuloinneilla ja mittauksilla nähtiin, että monimoottorikäytössä yhteismuotoisen virran huippuarvojen suuruus kasvaa moottoreiden lukumäärän ja moottorikaapeleiden pituuksien kasvaessa. Mittaustulosten perusteella voidaan sanoa, että myös taajuusmuuttajan vaihtosuuntaajan IGBT-puolijohdetehokytken lämpötila nousi moottoreiden lukumäärän noustessa. Lisäksi todettiin, että syöttöverkolla on vaikutusta virtojen suuruuteen: mitä suurempi välipiirin jännite, sitä enemmän on vaihtosuuntaajan IGBT-puolijohdetehokytken kytkentähäviöitä ja suurempi lämpötila.

Jatkossa työn yksivaiheista simulointimallia voisi kehittää ja esimerkiksi tehdä siitä kolmivaiheisen, jolloin voitaisiin simuloida myös vaihevirtaa ja eri jännitteitä. Malli pitäisi muodostaa tapauskohtaisesti, sillä parametrien arvot riippuvat esimerkiksi moottorikaapelin tyypistä ja pituudesta. Myös monimoottorikäytön jänniteheijastuksista voisi tehdä tutkimusta. Mielenkiintoista olisi myös tutkia, miten mitatut virtapiikit vaikuttavat IGBT-vaihtosuuntaajan toimintaan ja esimerkiksi elinikään.

Työn tavoitteena oli muodostaa ohjeistus monimoottorikäytön suunnittelulle. Työn perusteella voidaan esittää, että taajuusmuuttajaa mitoitettaessa pitää ymmärtää

sovellus. Esimerkiksi työssä kuvailtu kontaktorien käyttö vaikuttaa mitoitukseen, koska siinä täytyisi ottaa huomioon suoran verkkokäynnistyksen muodostama käynnistysvirta. Myös todellisen, mielellään mitatun kuormavirran tietäminen on tärkeää taajuusmuuttajan mitoituksen kannalta. Lisäksi jokainen moottori on syytä suojata esimerkiksi lämpöreleellä, jotta vältetään moottoreiden mahdollisesti aiheuttamat suuremmat virrat vikatilanteessa. Lähtökuristin pienentää suuritaajuisen häiriövirran huippuarvoa, mutta sitä voidaan pitää viimeisenä vaihtoehtona mikrokäytössä suhteellisen suurten kustannustensa ja dimensioidensa takia. Yhteismuotoinen kuristin oikein mitoittettuna pienentää yhteismuotoisen virran huippuarvoa.

## LÄHTEET

- ABB Strömberg (1990): "Teknisiä tietoja ja taulukoita", kahdeksas painos, Vaasa, ISBN 951-99366-0-2, 1990.
- ABB (1997): "Effects of AC Drives on Motor Insulation - Knocking down the Standing Wave", Technical Guide No. 102. 1997.
- ABB (2010): "User's manual, ACS150 drives (0.37...4kW)", 2010.
- Ahola J., Lindh T., Partanen J., Silventoinen P. ja Nerg J. (2001): "Pienjännitevoimakäyttöjärjestelmien ominaisuudet sähköverkkotiedonsiirron kannalta", Tutkimusraportti, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Tesla-raportti, 52/2001.
- Basavaraja B. ja Siva Sarma D.V.S.S. (2006): "Application problem of PWM AC drives due to long cable length and high dv/dt", Power Electronics, Drives and Energy Systems, PEDES '06. International Conference on, 12.-15.12.2006.
- de Paula H., Lisboa M. V. C., Guilherme J. F. R., Chaves M. L. R. ja de Almeida W. P. (2009): "Characterization of cable arrangements in terms of the generated high-frequency quantities in PWM motor drives", Power Electronics Conference, 2009. COBEP '09. Brazilian, s. 856-863, 2009.
- Hyypio D. ja Muehlbauer J. (2011): "Cabling options for multiple motors on a single inverter", verkkodokumentti, viitattu 20.3.2012, saatavilla: <http://nw.automation.wesco.com/sites/default/files/Marathon%20Multi%20%20Motor%20cabling%20App%20Note.pdf>
- IEC TS 60034-25 (2007): "Rotating electrical machines - Part 25: Guidance for the design and performance of a.c. motors specifically designed for converter supply", 2007.
- Kinnunen H. (2004): "Taajuusmuuttajakäytön suurtaajuisten ilmiöiden mallintaminen piirisimulointiohjelmistolla", Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, 2004.
- Kinnunen H. (2012): Keskustelut Simplorer-mallin toteuttamisesta, 2012.
- Lee Sang-Choel ja Park Ju H. (2010): "Transfer function-based modelling for voltage oscillation phenomena in PWM motor drives with long feeding cables", International Journal of Electronics, vol. 97, no. 4, s. 457-473, huhtikuu 2010.
- Mikkola J. (2000): "Taajuusmuuttajalla syötetyn oikosulkumoottorin jänniterasitusten ja laakerivirtojen pienentäminen", Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, 2000.

- Mohan N., Undeland T., Robbins W. (2003): "Power electronics", 3. painos, USA, John Wiley & Sons, 2003.
- Mäki-Ontto P., Kinnunen H. ja Luomi J. (2004): "AC motor cable model suitable for bearing current and over-voltage analysis", Proceeding of the International Conference on Electrical Machines, ICEM 2004, Cracow, Poland, 2004.
- Ogasawara S. ja Akagi H. (1996): "Modeling and Damping of High-Frequency Leakage Currents in PWM Inverter-Fed AC Motor Drive Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 5, s. 1105-1114, 1996.
- Prysmian Group (2012): "Product Catalogue", verkkodokumentti, viitattu 23.3.2012, saatavilla: [http://www.drakakeila.ee/toot/Draka\\_Catalogue\\_EST.pdf](http://www.drakakeila.ee/toot/Draka_Catalogue_EST.pdf)
- Pyrhönen J. (2004): "Sähkömagnetismi", Luentomateriaali, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2004.
- Pyrhönen J. (2010): "Sähkökäytöt", Luentomateriaali, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2010.
- Rangarajan M. Tallam, Gary L. Skibinski, Todd A. Shudarek ja Richard A. Lukaszewski (2010): "Integrated differential-mode and common-mode filter to mitigate the effects of long motor leads on AC drives", Energy conversion congress and exposition, s. 838-845, 12.-16.9.2010.
- Rockwell Automation (2012): "Installation Considerations", Technical papers and Documentation, verkkodokumentti, viitattu 3.7.2012, saatavilla: <http://www.ab.com/support/abdrives/documentation/techpapers/Installation-Considerations01.pdf>
- Skibinski G., Dahl D., Pierce K., Freed R., Gilbert D. (1998): "Installation Considerations for Multi-Motor AC Drives & Filters Used In Metal Industry Applications", Industry Applications Conference, 33rd IAS Annual Meeting, s. 2270-2278, 12.-15.10.1998.
- Skibinski G., Tallam R., Reese R., Buchholz B ja Lukaszewski R. (2006): "Common mode and differential mode analysis of three phase cables for PWM AC drives", Industry Applications Conference, 41st IAS Annual Meeting, vol. 2, s. 880-888, 8.-12.10.2006.

Suwankawin S., Pairodamonchai P., Sangwongwanich S., Sukhapap C., Tearwattanarattikal W. (2005): "Destruction by charge current and its solution for PWM inverter feeding multiple motors through long cables", Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, vol. 2, s. 1382-1389, 2005.

Virtanen A. (2007): "Modulointimenetelmien vaikutukset taajuudenmuuttajien yhteismuotoisiin jännitteisiin", Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2007.