



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

JANNE KUUSINEN
MAASULKUVIRTOJEN TUTKIMINEN KAIVOSTEOLLISUUDEN
SÄHKÖKÄYTOISSÄ

Diplomityö

Tarkastaja: professori Teuvo Suntio
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 9. huhtikuuta
2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

KUUSINEN JANNE: Maasulkuvirtojen tutkiminen kaivosteollisuuden sähkökäytössä
Diplomityö, 68 sivua

Elokuu 2014

Pääaine: Sähkökäyttöjen tehoelektroniikka

Tarkastaja: professori Teuvo Suntio

Avainsanat: Maasulku, taajuusmuuttajakäyttö, simulointimalli, yhteismuotoinen virta

Kaivosympäristö asettaa taajuusmuuttajakäytölle erityisvaatimuksia henkilö- ja laiteturvallisuuden takaamiseksi. Tässä työssä tarkastellaan taajuusmuuttajan tuottaman yhteismuotoisen virran vaikutusta maasulkusuojauksen toimintaan.

Työssä käsitellään ensin taajuusmuuttajakäytön teoriaa ja yhteismuotoisen virran syntymistä taajuusmuuttajakäytössä. Tämän jälkeen käydään läpi kaivoksiin sijoitettavien taajuusmuuttajakäyttöjen ominaisuuksia.

Yhteismuotoisen virran virran vaikutusta taajuusmuuttajakäytön rakenteeseen tarkastellaan simuloimalla. Ensin taajuusmuuttajakäytölle rakennetaan simulointimalli. Tämän jälkeen simuloineilla selvitetään mallin toimivuutta ja sitä kuinka mallin eri osat vaikuttavat tuloksiin. Lopuksi käydään läpi laboratoriomittauksen tuloksia, joita verrataan simulointituloksiin.

Simulointimallista rakennettiin kolmivaiheinen malli, johon sisältyy kaikki tärkeimmät taajuusmuuttajakäytön osat. Malli käyttäytyi suurelta osin, kuten ennalta arvioitiin. Simulointimallilla tutkittiin yhteismuotoisen virran suuruutta muun muassa erilaisilla kaapelimalleilla ja eripituisilla kaapeleilla sekä maasulkuvirran suuruutta eri paikkoihin kytkeytyvien maasulkujen aikana. Simulointimallia tarkastelevien laboratoriomittausten perusteella etenkin kuormapuolen simuloitujen yhteismuotoiset virrat olivat halutunlaisia. Työstä saatujen tulosten perusteella simulointimalli soveltuu työhön liittyvien ilmiöiden tutkimiseen. Malli ei ole kuitenkaan vielä riittävän tarkka, jotta sitä voitaisiin käyttää taajuusmuuttajakäytön mitoituksen suunnittelussa.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

KUUSINEN JANNE: Research of the earth faults in the electrical drives of the mining industry

Master of Science Thesis, 68 pages

August 2014

Major: Power Electronics of Electrical Drives

Examiner: Professor Teuvo Suntio

Keywords: Earth fault, frequency-converter drive, simulation model, common-mode current

There are specific requirements for personal and equipmental safety of frequency converters in mining industry. This study investigates the common-mode current produced by the frequency converter and how that effects to the operation of the earth fault protection.

At first the study considers the theory of the frequency-converter drive and how the common-mode current is generated in the frequency converter. In second the study explains about the special requirements for frequency-converter drives in minings.

The effects of the common-mode current to the frequency converter's structure is examined by simulations. At first a simulation model of the frequency converter is built. After that regards to the simulation results is explained how the simulation model works and how the structure of the simulation model effects to the results. In conclude is sifted through the laboratory measurement results which are compared with the simulation results.

The simulation model was built in a three-phase model which includes all the main parts of frequency-converter drive. The model behaved mostly as was pre-estimated. By the simulation model was studied the common-mode current with different cable types and with different length of cables. Also by the model was studied the earth-fault current with fault in different locations. Regard to the laboratory measurements the model behaved as was desired especially in the load side of the converter. According to the results in the study the simulation model is suitable for studying phenomenons related to the study. The model is not yet sufficiently accurate so that it could be used to dimensioning frequency converter's design.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Sähkötekniikan laitokselle ja ABB Oy:lle. Työn ohjaajana toimi DI Henri Kinnunen. Työn tarkastajana toimi professori Teuvo Suntio. Haluan kiittää heitä kaikista neuvoista, ohjeista sekä avusta työn aikana. Lisäksi haluan kiittää kaikkia referenssiryhmään kuuluneita ohjauksesta Simploresin, taajuusmuuttajan, maasulkusuojauksen sekä käytännön asioiden kanssa.

Kiitos myös Matleenalle ja muulle perheelleni kaikesta tuesta työn ja opintojeni aikana.

Tampereella 18.8.2014

Janne Kuusinen

SISÄLLYS

1 Johdanto.....	1
2 Taajuusmuuttajakäyttö	2
2.1 Taajuusmuuttaja	2
2.2 Kaapelit	6
2.3 Syöttömuuntaja.....	9
2.4 Maasulku	11
2.4.1 Syöttömuuntajan maadoitustavan vaikutus maasulkuvirtaan	12
2.4.2 Maasulkuvirta taajuusmuuttajakäytöissä	13
2.5 Yhteismuotoiset virrat ja jännitteet taajuusmuuttajakäytöissä	14
2.5.1 Yhteismuotoinen jännite ja virta	14
2.5.2 Taajuusmuuttajan tuottama yhteismuotoinen jännite	15
2.5.3 Yhteismuotoinen virta taajuusmuuttajakäytössä	17
2.6 Maasulun havainnointi.....	18
3 Kaivuskäyttö.....	21
3.1 Standardi AS/NZS 2081:2011.....	21
3.1.1 Maasulkuvirran rajoittimet.....	21
3.1.2 Maasulkusuojat.....	22
3.2 Kaivuskäyttöjen erityisvaatimukset.....	23
3.2.1 Kaapelit kaivuskäytöissä.....	23
3.2.2 Maadoitus ja turvallisuus	24
3.2.3 Yliaaltojen vaikutus verkkoon.....	25
3.2.4 Useampi rinnakkainen kuorma.....	25
3.2.5 Suora momenttisäätö, DTC.....	26
4 Simulointimallit	27
4.1 Taajuusmuuttajakäyttö.....	27
4.2 Syöttömuuntaja.....	28
4.3 Kaapelit	29
4.4 Taajuusmuuttajamalli.....	33
4.5 Moottori	35
5 Simulointimallin tarkastelut	37
5.1 ISU:n ja INU:n ohjauksen synkronointi	37
5.2 Kaapelimallin lohkojen lukumäärä.....	38
5.3 Kaapelien pituuksien vaikutus yhteismuotoisiin virtoihin.....	39
5.3.1 Moottorikaapelien pituuden vaikutus yhteismuotoiseen virtaan....	40
5.3.2 Syöttökaapelien pituuden vaikutus yhteismuotoiseen virtaan	43
5.4 Kaapelityypin vaikutus yhteismuotoiseen virtaan.....	46
5.4.1 Moottorikaapelin pituuden vaikutus	46
5.4.2 Syöttökaapelin pituuden vaikutus.....	50
5.5 Maasulun paikka ja vikaresistanssi.....	52
5.5.1 Maasulku moottorin navassa.....	52

5.5.2	Maasulku välipiirin negatiivisessa kiskossa.....	55
6	Simulointimallin verifiointimittaukset	59
6.1	Verifiointitapaukset	60
6.1.1	Moottorikaapeli 100m.....	60
6.1.2	Moottorikaapeli 250m.....	63
6.1.3	Moottorikaapeli 250m sekä maasulku moottorikaapelin päässä....	64
7	Yhteenveto ja johtopäätökset.....	68
	Lähteet	69

Termit ja niiden määritelmät

<i>A</i>	<i>Pinta-ala</i>
<i>B</i>	<i>Magneettivuon tiheys</i>
<i>BJT</i>	<i>Bipolaaritransistori, Bipolar junction transistor</i>
<i>C</i>	<i>Kapasitanssi</i>
<i>C</i>	<i>Kollektori</i>
<i>d</i>	<i>Derivaatta (esim. $di =$ virranmuutos)</i>
<i>DSU</i>	<i>Diodeilla varustettu tasasuuntausmoduuli, Diode Supply Unit</i>
<i>DTC</i>	<i>Suora momenttisäätö, Direct Torque Control</i>
<i>Dy</i>	<i>Muuntajan kytkentä, jossa ensiö kolmiossa ja toisio tähdessä</i>
<i>E</i>	<i>Emitteri</i>
<i>f</i>	<i>Taajuus</i>
<i>G</i>	<i>Hila</i>
<i>G</i>	<i>Konduktanssi</i>
<i>GFI</i>	<i>Maasulkusuoja, Ground-Fault Indicator</i>
<i>GTO</i>	<i>Hilalta sammutettava tyristori, Gate-turn-off thyristor</i>
<i>I</i>	<i>Virta, tehollisarvo</i>
<i>i</i>	<i>Virta, hetkellisarvo</i>
<i>IGBT</i>	<i>Eristetyllä hilalla varustettu bipolaaritransistori, Insulated-Gate Bipolar Transistor</i>
<i>INU</i>	<i>Vaihtosuuntausmoduuli, Inverter Unit</i>
<i>ISU</i>	<i>IGBT:eillä varustettu tasasuuntausmoduuli, IGBT Supply Unit</i>
<i>L</i>	<i>Induktanssi</i>
<i>l</i>	<i>Pituus</i>
<i>M</i>	<i>Keskinäisinduktanssi</i>
<i>MCMK</i>	<i>PVC-muovivaippainen kuparimaakaapeli</i>
<i>MOSFET</i>	<i>Metallioksidipuolijohde-kanavatransistori, Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor</i>
<i>PE</i>	<i>Suojajohdin</i>
<i>PVC</i>	<i>Polyvinyylidikloridi</i>
<i>PWM</i>	<i>Pulssinleveysmodulointi, Pulse width modulation</i>
<i>R</i>	<i>Resistanssi</i>
<i>RLC</i>	<i>Resistanssi-induktanssi-kapasitanssi</i>
<i>U</i>	<i>Jännite, tehollisarvo</i>
<i>u, v</i>	<i>Jännite, hetkellisarvo</i>
<i>u, v, w</i>	<i>Vaihejohtimet</i>
<i>X</i>	<i>Reaktanssi</i>
<i>Z</i>	<i>Impedanssi</i>
ϵ_r	<i>Suhteellinen permittiivisyys</i>
ϵ_0	<i>Tyhjiön permittiivisyys</i>
ρ	<i>Ominaisvastus</i>
Φ	<i>Magneettivuo</i>

1 Johdanto

Oikosulkumoottori on energiatehokas ja edullinen sähkömoottori. Oikosulkumoottorin pyörimisnopeutta ei kuitenkaan pystytä säätämään ilman lisälaitteita vaan se joko pyörii täydellä nopeudella tai ei ollenkaan. Taajuusmuuttajaa käytetään sovelluksissa, joissa pyörimisnopeutta täytyy säätää.

Kaivoksissa ja louhoksissa käytettäviltä sähkölaitteistoilta vaaditaan ehdottoman turvallisuuden lisäksi käyttövarmuutta. Lyhyetkin suunnittelemattomat käyttökatkot aiheuttavat teollisuusympäristöissä isoja rahallisia menetyksiä. Teollisuuden sähkökäytöissä käytetään vastuksella maasta erotettua järjestelmää, joka kestää yhden vian ilman käyttökatkoa. Vian havaitsemisen jälkeen järjestelmä voidaan ajaa hallitusti alas ja korjata vika, kun se on sopivinta.

Taajuusmuuttaja tuottaa yhteismuotoista virtaa, joka kulkee osittain samaa reittiä kuin maasulkuvirta. Maasulkusuojan toiminta saattaa häiriintyä, jos yhteismuotoinen virta kasvaa liian suureksi. Sähkökäyttöjä suunniteltaessa on huomioitava asiat, jotka vaikuttavat yhteismuotoisen virran syntyyn sekä keinot, joilla yhteismuotoista virtaa voidaan rajoittaa.

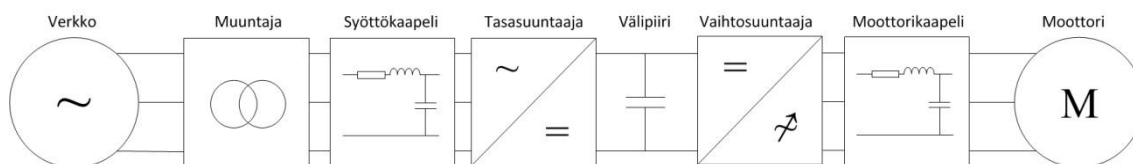
Diplomityön tavoitteena on esittää yleisellä tasolla taajuusmuuttajakäytön rakenne ja selittää mitkä asiat vaikuttavat maasulkujen havaitsemiseen. Työssä tarkastellaan taajuusmuuttajakäyttöä simulointimallilla. Simulointimallilla pyritään kuvaamaan kolmivaiheisen taajuusmuuttajakäytön yhteis- ja eromuotoiset virrat, sekä havaitsemaan miten maasulku vaikuttaa käyttöön.

Työn luvussa 2 esitellään yleisesti taajuusmuuttajakäyttö. Luvussa käydään läpi taajuusmuuttajakäyttöön liittyvät laitteet ja niiden toimintaperiaatteet sekä käydään läpi yhteismuotoinen virta ja maasulku taajuusmuuttajakäytössä. Luvussa 3 esitellään mitä erityispiirteitä kaivos- ja louhoskäytöissä on verrattuna luvussa 2 esiteltyyn taajuusmuuttajakäyttöön.

Luvussa 4 esitellään simulointimallit ja käydään läpi minkä perusteella ne on rakennettu. Luvussa 5 käydään läpi muutama eri simulointitapaus ja esitellään kyseisten simulointien tulokset. Luvussa 6 tarkastellaan verifointimittauksia, joilla verrattiin simulointimallin vastaavuutta reaali maailmaan.

2 Taajuusmuuttajakäyttö

Taajuusmuuttajakäytöllä tarkoitetaan sähkökäytön kokonaisuutta, johon kuuluu taajuusmuuttajan lisäksi syöttömuuntaja, kuorma eli moottori sekä kytkentäkaapelit. Teho virtaa tavallisesti verkosta kuormalle. Tehoa voidaan syöttää myös kuormalta verkkoon, jos taajuusmuuttajan kytkinkomponentit valitaan sopivasti. Käyttöön asennetaan lisäksi erilaisia suotimia, mittaustureita ja säätimiä. Kuvassa 2.1 on esitelty yksi esimerkkitapaus taajuusmuuttajakäytön rakenteesta.



Kuva 2.1. Esimerkki taajuusmuuttajakäytön rakenteesta

Kuvan vasemmassa reunassa on sähköverkko, josta tehoa otetaan. Verkon jännite muutetaan taajuusmuuttajalle sopivaksi muuntajalla. Muuntaja kytketään taajuusmuuttajan tasasuuntaajaan syöttökaapeleilla. Taajuusmuuttaja koostuu tasasuuntaajasta, välipiiristä ja vaihtosuuntaajasta. Taajuusmuuttajan tasasuuntaaja muuntaa kolmen vaihtojännitteet välipiirille tasajännitteeksi positiivisen ja negatiivisen kiskojen välille. Välipiirissä energia varastoidaan tässä tapauksessa kondensaattoriin. Vaihtosuuntaaja muuntaa tasajännitteen kolmeksi vaihtojännitteeksi moottorille. Moottori on kytketty moottorikaapeleilla kiinni taajuusmuuttajan vaihtosuuntaajaan.

2.1 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttajia on useita erilaisia, joista seuraavaksi tarkastellaan jännitevälipiirillistä taajuusmuuttajaa. Nimi jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja tulee välipiirissä olevasta kondensaattorista. Kondensaattorin jännite pyritään pitämään vakiona, jolloin välipiiriin varastoidun energian määrä on myös vakio.

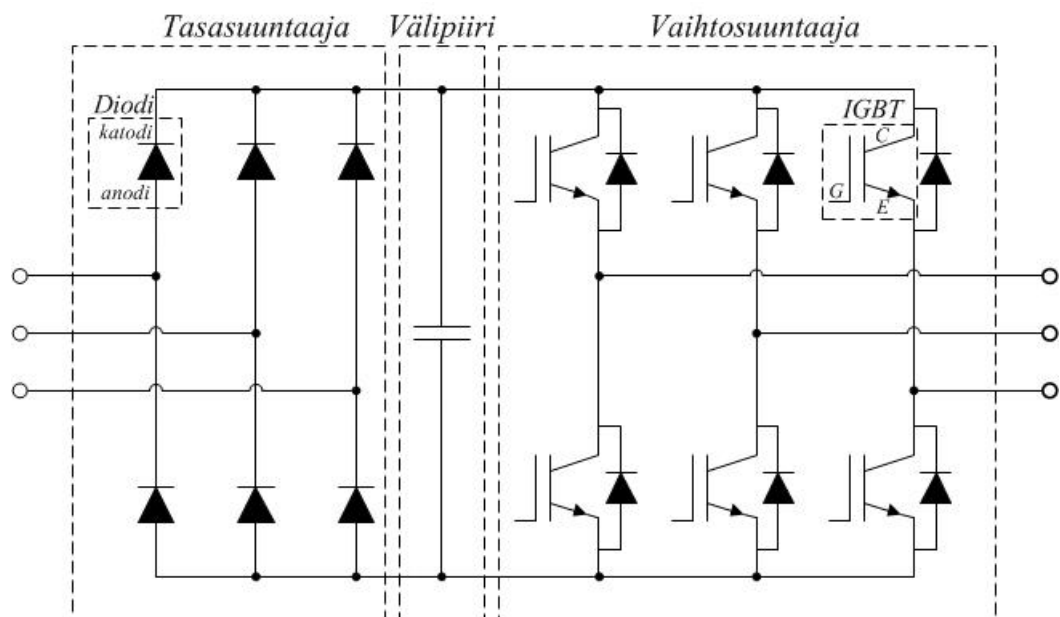
Kun tehoa siirretään vaihtosuuntaajan kautta moottorille, energiaa otetaan välipiiristä. Välipiirin jännite lähtee laskemaan, koska energian määrä välipiirissä pienenee. Jännitteenalenneminen kompensoidaan siirtämällä energiaa verkosta tasasuuntaajan kautta välipiiriin.

Vaihtosuuntaajan toimintaa ohjataan kuorman ohjeiden ja mittausten mukaisesti. Kuormalta voidaan esimerkiksi mitata moottorin pyörimisnopeus, jota verrataan ohjearvoon. Mikäli mitattu arvo poikkeaa ohjearvosta, säädetään vaihtosuuntaajaa niin, että mitattu arvo saadaan lähemmäksi ohjearvoa.

Tasasuuntaajan toimintaa ohjaa välipiirin jännite. Ohjaamattomassa taajuusmuuttajassa käytetään diodeja, joita ei tarvitse eikä pysty ohjaamaan. Tällöin välipiiriin siirtyy energiaa aina, kun verkon jännitteen potentiaali on suurempi kuin välipiirissä. Kun energia välipiirissä kasvaa, välipiirin jännite kasvaa ja verkosta siirtyy välipiiriin vähemmän energiaa. Tasasuuntaus voidaan toteuttaa myös ohjatusti, jolloin tasasuuntaaja toimii vaihtosuuntaajan tapaan. Sitä ohjataan mittaustulosten ja ohjearvojen mukaisesti, jolloin erotus näiden välillä pyritään minimoimaan.

Kuvassa 2.2 on esitetty tyypillisen jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan pääpiirikaavio. Taajuusmuuttaja on jaettu tasasuuntaajaan, välipiiriin ja vaihtosuuntaajaan katkoviivoilla.

Tasasuuntaajassa on käytetty diodeja, jolloin erillistä tasasuuntaajan ohjausta ei tarvita. Tällaisesta diodisillasta voidaan käyttää lyhennystä *DSU* (*Diode Supply Unit*). Välipiirissä on kondensaattori, joka toimii energiavarastona. Vaihtosuuntaajassa on käytetty kytkiminä IGBT-komponentteja (*Insulated-Gate Bipolar Transistor*). Vaihtosuuntaajasta voidaan käyttää lyhennystä *INU* (*Inverter Unit*).



Kuva 2.2: Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan piirikaavio. Taajuusmuuttaja on rajattu katkoviivoilla kolmeen osaan: tasasuuntaaja, välipiiri ja vaihtosuuntaaja. Lisäksi kuvaan on rajattu kytkinkomponentit diodi ja IGBT.

Diodit johtavat virtaa vain anodilta katodille. Katodi on merkitty diodin symbolissa johtimeen nähden kohtisuorassa olevalla viivalla. Kun katodin jännite on anodin jännitettä suurempi, menee diodi estotilaan, jolloin virta ei pääse kulkemaan diodin läpi.

Tasasuuntaajan ylemmistä diodeista on kulloinkin johtavassa tilassa se, jonka vaihejohtimessa jännite on korkein ja korkeampi kuin välipiirin ylähaaran jännite. Vastavasti alemmista diodeista johtaa se jonka vaihejohtimessa jännite on matalin ja matalampi kuin välipiirin alahaaran jännite. Mikäli välipiirin energia ei kulkeudu eteenpäin vaihto-

suuntaajalle syntyy tilanne, jossa välipiirin energiataso nousee niin korkealle, ettei yksikään diodeista johda. Välipiirin jännite on tällöin hetkellisesti suurempi, kuin mikään vaihejännitteistä. Välipiirin jännitteen laskiessa diodit alkavat automaattisesti taas johtaa.

Vaihtosuuntaajan tehtävä on muuntaa välipiirin tasajännite ulostuloihin vaihtojännitteiksi. Muunto tapahtuu kytkemällä välipiirin ylä- ja alakisko ulostulon vaiheisiin sopivassa järjestyksessä. Nykyaikaisessa taajuusmuuttajassa kytkentäkomponentteina käytetään IGBT:itä, jotka pystytään aukaisemaan ja sulkemaan hilaohjauksen avulla. Hilaohjaus tapahtuu syöttämällä IGBT:n hilan G ja emitterin E välille jännite. Kun jännite on positiivinen, kollektorin C ja emitterin välinen jännite tippuu eli kytkin aukeaa ja päästää kollektorivirran kulkemaan. Vastaavasti, kun hilan ja emitterin välinen jännite vaihdetaan negatiiviseksi, kytkin sulkeutuu ja kollektorivirran kulku katkeaa eli kollektorin ja emitterin välinen jännite nousee.

Ohjattavien komponenttien avulla tehoa voidaan siirtää myös kuormalta välipiiriin. Tällöin välipiirin energia pystyisi kasvamaan liiankin suureksi, kun energiaa ei voida siirtää mihinkään. Välipiiriin on kytkettävä jarruvastus, joka polttaa ylimääräisen energian lämmöksi, tai tasasuuntaaja on varustettava IGBT-komponenteilla. Tällaista tasasuuntaajaa voidaan kutsua *IGBT Supply Unit*:iksi eli *ISU*:ksi. *ISU* vastaan täysin *INU*:a mutta on vain sijoitettu verkon puolelle. Molemmilla pystytään siirtämään energiaa vaihtojännitepuolelta tasajännitepuolelle ja toisinpäin.

IGBT on ominaisuuksiltaan MOSFET:n, BJT:n ja GTO:n yhdistelmä. MOSFET:n ominaisuuksista IGBT:lle on kehitetty korkea hilan impedanssi, joka tarkoittaa pientä kytkentäenergiaa. BJT:n kanssa IGBT:llä on yhteistä pieni auki-tilan jännite, jolloin sisäinen resistanssi ja häviöt ovat pieniä. GTO:n tapaan IGBT voidaan suunnitella kumoamaan negatiiviset jännitteet. IGBT:n aukeamis- ja sulkeutumisajat ovat 1 mikrosekunnin luokkaa. [1, s. 27]

IGBT:n rinnalla on kuvassa 2.2 diodi. Kun jokin vaiheista kytketään välipiirin kiskosta toiseen, vaiheen jännite vaihtuu heti. Virran muutos tapahtuu kuitenkin viiveellä. Kunnes virran suunta muuttuu, virta kulkee sen kiskon diodin kautta johon vaihe kytketään. Virran muutosnopeus riippuu kuorman induktanssien ja resistanssien suhteesta. Mitä induktiivisempi kuorma on, sitä suuremman osan ajasta virta kulkee diodien kautta. Kuorman ollessa lähes resistiivinen, diodien johtava aika menee lähes nolnaan. [1, s. 234-235]

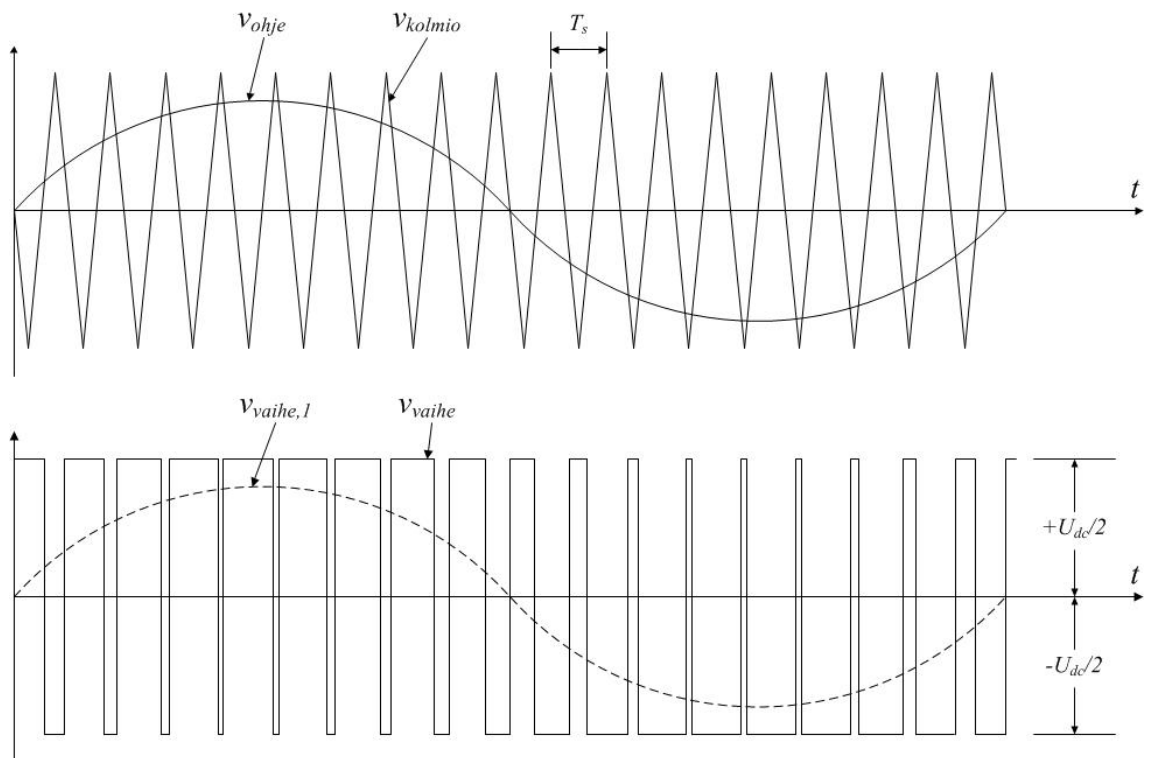
Kytkentöjen järjestys ja ajoitus riippuu säätötavasta. Pulssinleveysmodulaatio *PWM* (*Pulse width modulation*) on yleinen säätötapa nykyaikaisissa taajuusmuuttajissa. Pulssinleveysmodulaatio voidaan toteuttaa usealla eri tavalla, kuten sinikolmiovertailulla, avaruusvektorimoduloinnilla tai suoralla vääntömomenttisäädöllä *DTC* (*Direct Torque Control*). Sinikolmiovertailussa ulostulojännitteille annetaan ohjeaalto, jota verrataan sahanterän muotoiseen kolmioaaltoon. Kun ohjeaalto on kolmioaaltoa suurempi, kytketään vaihe positiiviseen kiskoon. Ja vastaavasti miinuskiskoon, kun ohjeaalto on kolmioaaltoa pienempi.

Avaruusvektorimoduloinnissa kytkinten kytkentäkombinaatioista muodostetaan kahdeksan erilaista vektoria. Kaksi vektoreista on nollavektoreita, jolloin kaikki kytkimet

ovat joko ylä- tai alahaarassa ja jännite vaiheiden välillä on nolla. Jokaiselle kombinaatiolle on oma jännitevektorinsa ja saadaan haluttu ulostulovektori summaamalla jännitevektoreita. Kombinaatio antaa vektorille suunnan ja kytkennän pitoaika antaa vektorin pituuden.

Suorassa momenttisäädössä säädetään suoraan kuorman momentin arvoa. Momenttia säädetään staattorivuon arvon avulla. Staattorivuota pystytään liikuttamaan haluttuun suuntaan jännitevektoreiden mukaan, vastaavalla tavalla kuin avaruusvektorisäädössä. Suora momenttisäätöä käydään läpi tarkemmin luvussa 3.

Seuraavaksi käydään tarkemmin läpi pulssinleveysmodulointi sinikolmiovertailulla, jotta ymmärrettäisiin jännitteiden säröytyminen. Kuvassa 2.3 on esitetty yhden vaiheen pulssinleveysmodulointi sinikolmiovertailulla. Kuvan ylemmässä kuvaajassa on esitetty modulaattorin jännitteen ohjeaalto v_{ohje} ja kolmiovertailuaalto v_{kolmio} . Kuvan alemmassa kuvaajassa on esitetty ulostulojännite v_{vaihe} ja ulostulojännitteen perustaajuinen komponentti $v_{vaihe,1}$.



Kuva 2.3: Pulssinleveydenmodulointi sini-kolmiovertailulla. Ylemmässä kuvaajassa jännitteen ohjeaaltoa v_{ohje} verrataan kolmiovertailuaaltoon v_{kolmio} . Alemmassa kuvaajassa on esitetty tuotettava vaihejännite v_{vaihe} sekä vaihejännitteen perustaajuinen komponentti $v_{vaihe,1}$.

Sinikolmiovertailu-säädössä verrataan ohjeaaltoa v_{ohje} ja kolmiovertailuaaltoa v_{kolmio} , jolloin ulostuloon saadaan ulostulojännite v_{vaihe} . Riippuen onko ohje- vai vertailuaalto suurempi, kytketään ulostulo joko positiiviseen kiskoon $+U_{dc}/2$ tai negatiiviseen kiskoon $-U_{dc}/2$. Kytkentä tehdään yhtälön 2.1 mukaisesti.

$$\begin{aligned} v_{ohje} > v_{kolmio}, \quad v_{vaihe} &= +\frac{1}{2}U_{dc} \\ v_{ohje} < v_{kolmio}, \quad v_{vaihe} &= -\frac{1}{2}U_{dc} \end{aligned} \quad (2.1)$$

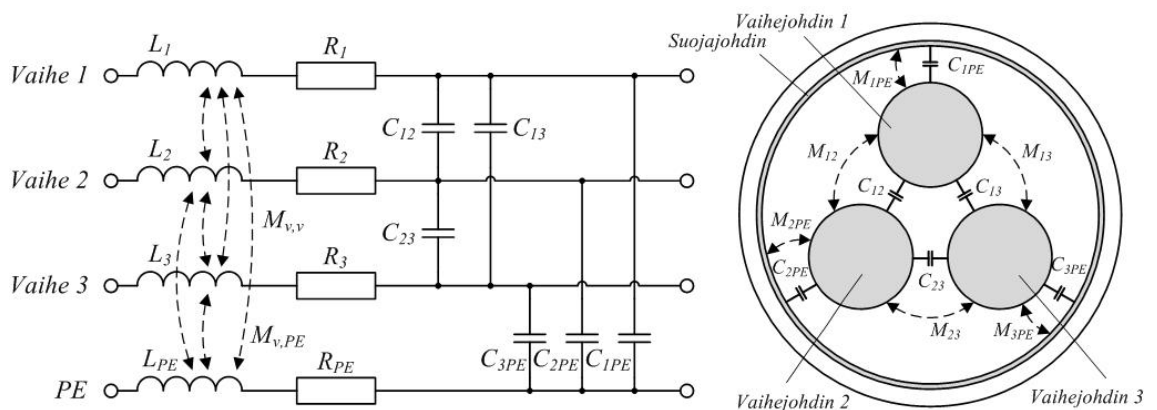
Kun ulostulojännitteelle tehdään *Fourier*-muunnos, erotellaan kantiaaltoisesta ulostulojännitteestä kaikki taajuuskomponentit. Muunnoksen ideana on jakaa tarkasteltava aalto eri taajuuskomponentteihin, jotka summaamalla saadaan alkuperäinen tarkasteltava aalto. Tällöin nähdään minkä taajuisia komponentteja aalto sisältää.

Perustaajuisen komponentin $v_{vaihe,1}$ lisäksi moduloinnin tuloksena saatava kantiaalto sisältää paljon korkeataajuisia komponentteja. Kuorman kannalta vain perustaajuisella komponentilla pystytään tuottamaan haluttua tehoa. Kaikki muut komponentit tuottavat häviöitä, joten ne pyritään minimoimaan kuormalla.

2.2 Kaapelit

Kaapelin rakenne vaikuttaa sen sähköisiin ominaisuuksiin resistanssiin R , induktanssiin L , kapasitanssiin C ja konduktanssiin G . Luvussa käydään läpi miten kaapelin rakenne vaikuttaa sen sähköisiin ominaisuuksiin.

Kuvassa 2.4 on esitetty kolmijohtiminen kolmivaihekaapelin sijaiskytkentä RLC-piirinä sekä kaapelin poikkileikkaus, joka helpottaa ymmärtämään kaapelin rakennetta. Kaapelissa on vaihejohtimet u , v ja w sekä suojajohdin PE. Halkileikkaukseltaan ympyrän muotoiset vaihejohtimet on sijoitettu yhtä kauas toisistaan ja suojajohtimesta. Suojajohdin on sijoitettu vaihejohtimien ympärille, jolloin se suojaa vaihejohtimia ulkoapäin ja estää vaihejohtimista lähteviä häiriöitä pääsemästä kaapelista ulos. Hajasuureet vaiheiden välillä ovat yhtä suuria, koska myös etäisyydet niiden välillä ovat yhtä suuria. Samoin myös hajasuureet vaiheiden ja suojajohtimen välillä ovat yhtäsuuria.



Kuva 2.4: Kaapelin sijaiskytkentä ja poikkileikkaus

RLC-piirinä mallinnettava kaapeli ei ole itsessään tarkka. Kuvan 2.4 mukaisesti kaikki kapasitanssit olisivat kytkeytyneet oikean reunan ulostuloihin, vaikka todellisuudessa kapasitanssit vaikuttavat koko kaapelin pituudella. Sijaiskytkentä saadaan tarkemmaksi,

kun se jaetaan lyhyempiin osiin. Koko kaapeli voidaan mallintaa esimerkiksi kymmenestä osasta, jolloin hajasuureet jakautuvat paremmin koko kaapelin pituudelle. Mitä useampaan osaan sijaiskytkentä jaetaan, sitä lähemmäs todellista tilannetta päästään.

Kaapelissa syntyy lämpöhäviöitä, joiden suuruutta kuvataan resistanssilla. Resistanssilla kuvataan myös kappaleen kykyä vastustaa sähkövirtaa. Kun kappaleen resistanssi vastustaa sen läpi kulkevaa sähkövirtaa, muuttuu sähköenergiaa lämpöenergiaksi.

Tasavirralla resistanssin suuruuteen vaikuttavat kappaleen ominaisvastus ρ , kappaleen pituus l ja kappaleen poikkipinta-ala A kohtisuoraan virran kulkusuuntaan. Resistanssin arvo voidaan laskea yhtälön 2.2 mukaisesti.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.2)$$

Resistanssin arvoon vaikuttaa myös kappaleen lämpötila. Pääsääntöisesti metalleilla resistanssin arvo kasvaa lämpötilan kasvaessa.

Resistanssiin ja kappaleen muihin ominaisuuksiin vaikuttaa myös virran ja jännitteen taajuus. Johdinten taajuusriippuvuutta voidaan kuvata sijaiskytkennässä virranahtomallilla. Tasavirralla ja pienillä taajuuksilla virta kulkee tasaisesti johtimen koko poikkipinta-alalla. Korkeammilla taajuuksilla virta alkaa pakkaantua johtimen pinnalle. Pakkaantuminen johtuu johtimeen syntyvistä pyörrevirroista, jotka kulkevat johtimen keskellä virtaa vastaan ja johtimen pinnassa virran kanssa samaan suuntaan. Virranahtomalli kuvaa tilanteen niin, että johtimen keskelle tulee alue, jossa virta ei kulje. Näin ollen poikkipinta-ala, jossa virta kulkee, pienenee. Pinta-alan pienentyessä johtimen resistanssi kasvaa ja induktanssi pienenee. [1]

Kun kappaleessa kulkee vaihtovirtaa, muodostuu sen ympärille muuttuva magneettikenttä. Magneettikentän suuruutta ja suuntaa kuvataan magneettivuolla Φ ja magneettivuon tiheydellä B . Magneettivuo kuvaa magneettikentän voimakkuutta tietyn pinnan läpi, kun taas magneettivuon tiheys kuvaa magneettikentän voimakkuutta pinta-alayksikön kokoisen pinnan läpi.

Itseinduktanssilla kuvataan sitä kuinka hyvin kappale pystyy varastoimaan energiaa magneettikenttään. Magneettikenttään varastoitunut energia palautuu johtimeen, kun jännite kappaleen yli laskee. Virran muutos induktiivisessa kappaleessa riippuu jännitteen suuruudesta ja induktanssista. Induktanssin virran ja jännitteen suhde nähdään yhtälöstä 2.3, jossa u_L on jännite induktanssin yli, di_L/dt virran muutos induktanssin läpi.

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.3)$$

Kun kaksi johdinta sijoitetaan lähelle toisiaan, vaikuttavat niiden magneettikentät toisiinsa. Magneettikenttien vaikutusta toisiinsa kuvataan keskinäisinduktanssilla M . Keskinäisinduktanssin vaikutusta voidaan kuvata yhtälöllä 2.4.

$$u_{L1} = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} - M_{12} \frac{di_{L2}}{dt} \quad (2.4)$$

Yhtälö kuvaa sitä miten jännite muodostuu johtimen yksi yli. Jännitteeseen vaikuttavat johtimen yksi itseisinduktanssin L_I ja virranmuutoksen johtimessa yksi di_{LI}/dt sekä keskinäisinduktanssi M_{I2} johdinten yksi ja kaksi välillä sekä virranmuutoksen di_{L2}/dt johtimessa kaksi. Koska keskinäisinduktanssi-termi vähennetään itseisinduktanssi-termistä, keskinäisinduktanssi pienentää johtimen yksi jännitettä. Eli kaapelin yli muodostuva jännitehäviö on pienempi, kun keskinäisinduktanssi pienentää johdinten kokonaisinduktanssia.

Kapasitanssilla kuvataan sähkökentän vaikutusta kahden kappaleen välillä. Tarkasteltaessa johdinta, voidaan määrittää kapasitanssi maahan C_{IPE} tai toiseen johtimeen C_{I2} . Kapasitanssia maata vasten kutsutaan hajakapasitanssiksi ja muita kaapeleita vasten keskinäiskapasitanssiksi. Koska kapasitanssi on kahden kappaleen välinen suure, vaikuttavat molemmat kappaleet sen arvoon. Kapasitanssin arvo riippuu kappaleiden etäisyydestä toisiinsa d , kappaleiden kohtisuorasta poikkipinta-alasta A , väliaineen suhteellisesta ϵ_r ja tyhjiön ϵ_0 permittiivisyydestä. Myös kappaleiden muodot vaikuttavat kapasitanssin suuruuteen. Levykondensaattorin kapasitanssi saadaan laskettua yhtälöstä 2.5. Levykondensaattori on yksinkertainen kondensaattori, jossa kaksi yhtäsuurta johdinlevyä ovat vierekkäin, jolloin yhtälön muuttujat on helposti mitattavissa.

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2.5)$$

Yhtälöstä nähdään kapasitanssin kasvavan, kun poikkipinta-ala kasvaa, kappaleiden etäisyys pienenee tai väliaineen permittiivisyys kasvaa. Ilman suhteellinen permittiivisyys on noin 1,00059 ja kaapeleissa yleisesti eristeenä käytettävälle polyvinyylidikloridilla (PVC) luokkaa 3 – 6.

Kolmivaihekaapeleissa kapasitanssit ovat huomattavan suuria. Tämä johtuu johdinten läheisestä sijoituksesta toisiinsa nähden. Myös hajakapasitanssit ovat isoja, koska suojajohdin rakennetaan kaapelin sisään johdinten ympärille, jolloin etäisyys vaihejohtimiin on hyvin lyhyt. Suojajohdin kuitenkin estää häiriöt kaapelin ympäristöön ja suojaa käyttäjää kosketusjännitteiltä. Yksivaihekaapeleilla vaiheiden keskinäiskapasitanssit eivät ole keskenään yhtä suuria, koska kaapeleiden etäisyydet toisistaan vaihtelevat.

Kapasitanssin läpi kulkeva virta i_C saadaan laskettua yhtälön 2.6 mukaisesti kapasitanssin ja kapasitanssin yli olevan jännitteen du_C/dt tulosta.

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} \quad (2.6)$$

Kapasiitiivinen reaktanssi X_C saadaan laskettua yhtälöstä 2.7 taajuuden f ja kapasitanssin avulla. Reaktanssi on kääntäen verrannollinen taajuuteen ja kapasitanssiin, jolloin kapasitanssin tai taajuuden kasvaessa reaktanssi pienenee.

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.7)$$

Kaapeleille voidaan määrittää konduktanssi G , jolla kuvataan vuotovirtavastusta johtimen ja maan välillä.

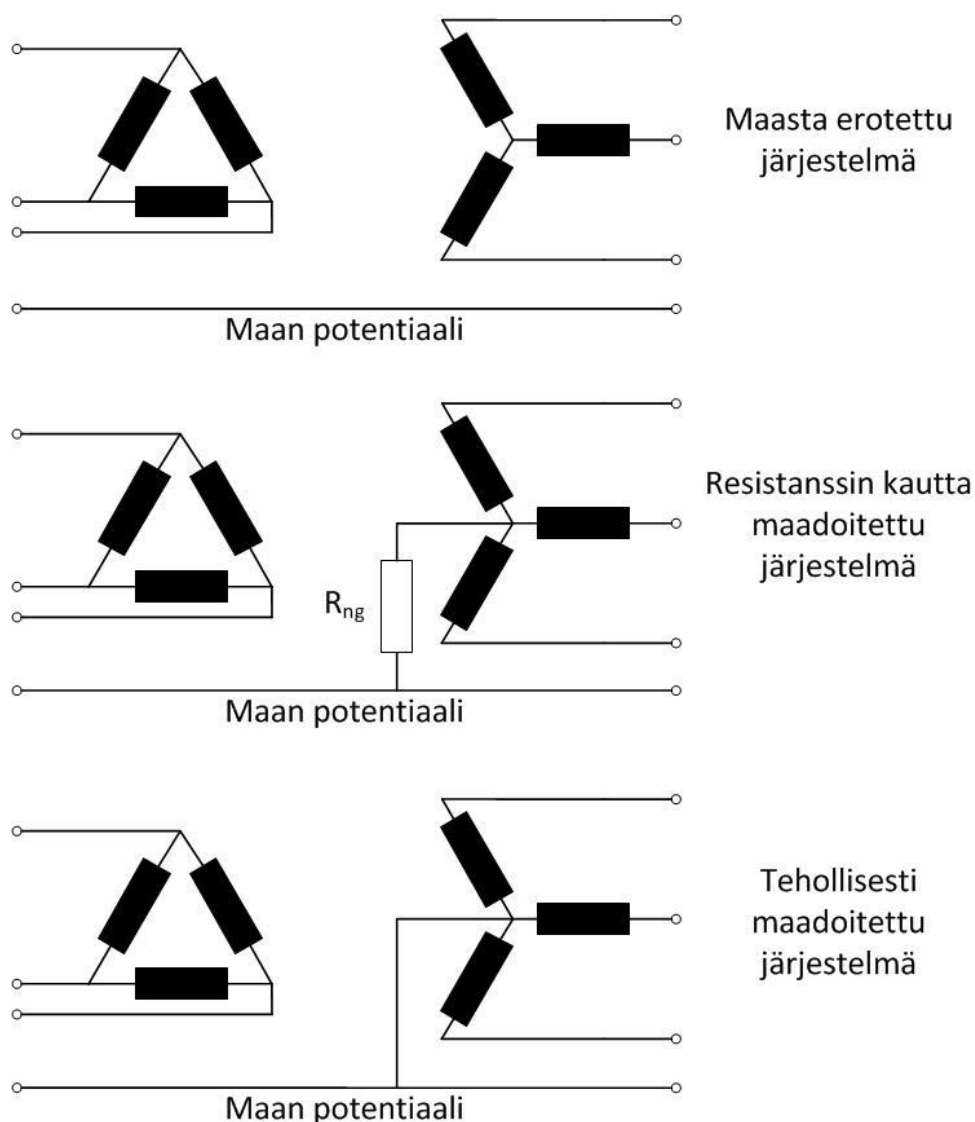
2.3 Syöttömuuntaja

Taajuusmuuttajakäyttö liitetään sähköverkkoon syöttömuuntajalla. Muuntaja rakentuu sähköisesti johtavista ensiön ja toision käämeistä. Käämit on galvaanisesti erotettu, jolloin tasavirta ei johdu käämistä toiseen. Energian siirto käämien välillä toteutetaan magneettikentän kautta. Ensiöön syötetty vaihtosähkö muodostaa muuttuvan magneettikentän muuntajan sydämeen, joka toimii magneettipiirinä. Sydämen muuttuva magneettikenttä ohjataan toisin käämin läpi, jolloin toisioon syntyy vaihtosähköä. Käämien kierrosten määrällä pystytään säätämään jännitteiden ja virtojen suhdetta ensiön ja toision välillä.

Muuntajan ensiö eli yläjännitepuoli on kytketty sähköverkkoon. Muuntajan toisio eli alajännitepuoli on kytketty taajuusmuuttajaan. Sähköverkossa käytetään suurempia jännitteitä, jolloin virta on pienempi ja virrasta aiheutuvat häviöt saadaan pidettyä mahdollisimman alhaalla. Taajuusmuuttajassa käytetään taas pienempiä jännitteitä, jolloin läpiöntietäisyydet ovat pienemmät ja johtimet voidaan sijoittaa lähemmäksi toisiaan.

Taajuusmuuttajakäyttöjen syöttömuuntajat ovat tavallisesti Dy-kytkettyjä. Tämä tarkoittaa, että muuntajan ensiöpuoli on kytketty kolmioon ja toisio tähteen. Dy-kytkettyyn muuntajaan saadaan helposti rakennettua toision tähtipiste, jolloin kytkentä on Dyn. Muuntajan tähtipisteen avulla taajuusmuuttajakäyttö pystytään maadoittamaan halutulla tavalla. Kuvassa 2.5 on esitetty kolme erilaista maadoitustapaa Dy-kytketyille muuntajalle. Jos syöttömuuntajan toisio on kytketty kolmioon, järjestelmän maadoitus tulisi tehdä erillisellä maadoitusmuuntajalla.

Sähköjärjestelmän maadoituksella pyritään mahdollisimman turvalliseen ja luotettavaan kokonaisratkaisuun. Käyttäjälle vaaralliset kosketusjännitteet halutaan pitää alhaisina sekä vikatilanteessa tehonsyöttö halutaan katkaista nopeasti, jotta henkilövahingoilta vältyttäisiin. Prosesseista halutaan vastaavasti mahdollisimman luotettavia ja ne halutaan pitää käynnissä mahdollisimman pitkään, jotta rahallisia tappioita ei syntyisi. Järjestelmän suojausta suunniteltaessa molemmat asiat, turvallisuus ja luotettavuus, on otettava huomioon. Asiaa on kuitenkin vaikea arvioida, kun punnitaan henkilöturvallisuutta ja rahaa. Standardit määrittelevätkin vähimmäisvaatimuksen henkilösuojausjaukselle, joka usein on rajoittava tekijä kokonaisuuden kannalta.



Kuva 2.5: Dy-kytkentäisen syöttömuuntajan tähtipisteen maadoitustavat. Kuvan vasemmassa reunassa on kolmioon kytketty ensiö ja oikeassa reunassa tähteen kytketty toisio.

Maasta erotetussa järjestelmässä tähtipiste eristetään maanpotentiaalista. Tämän maadoitustavan hyötynä on, ettei järjestelmän tehonsyöttöä tarvitse katkaista yhden maasulun aikana. Koska järjestelmä on eristetty maanpotentiaalista, ei virralle synny vikavirtapiiriä. Järjestelmä ei kuitenkaan kestä toista samanaikaista maasulkua, koska silloin kaksi vaihetta olisi oikosulussa maanpotentiaalin kautta. Myös oikosulku itsessään aiheuttaa käyttökatkon.

Maasta erotetun järjestelmän heikkous on jänniteaaltojen läpäisykyky muuntajassa. Vaiheen ja maan välille syötetty syöksyaalto läpäisee maadoittamattoman muuntajan lähes vaimenemattomana ja aiheuttaa muuntajan takana oleville laitteille riskin. Toinen ongelma maasta erotetussa järjestelmässä on tähtipisteen kelluminen, jolla tarkoitetaan tähtipisteen ja maanpotentiaalin välisen jännitteen heilahtelua. Ongelma syntyy, kun maasulku syntyy valokaarena. Tällöin tähtipisteen jännite saattaa lähteä heilahtelemaan valo-

kaaren syttyessä ja sammussa, jolloin hajakapasitanssin kautta muodostuu virtapiiri vikavirralla. Tähtipisteen jännite voi nousta vaihejännitteeseen nähden moninkertaiseksi. Ylijännite aiheuttaa ongelmia etenkin moottoreiden tähtipisteiden eristyksissä, jotka voivat hajota läpilyönnin seurauksena.

Tehollisesti maadoitetussa järjestelmässä muuntajan tähtipiste on yhdistetty suoraan maanpotentiaaliin. Tehollisella maadoituksella saadaan muuntajaan ensiöön tuleva syöksyaalto vaimennettua muuntajan toisiopuolella 10 – 20 %:iin ensiöpuolen jännitteestä. Maasulun aikana tähtipisteen jännite ei pääse nousemaan, jolloin tähtipisteiden eristykset eivät rasitu. Maasulkujen aikana virta kasvaa kuitenkin hyvin nopeasti, koska maasulkuvirtaa ei rajoiteta mitenkään ja syöttö on katkaistava nopeasti. Jos maasulkuvirta kasvaa liian suureksi, aiheuttaa se vahinkoja ylikuumentamalla johtimia.

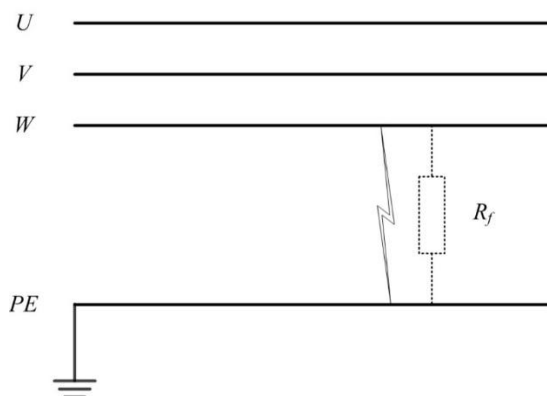
Resistanssin kautta maadoitetussa järjestelmässä tähtipiste on kytketty maanpotentiaaliin vastuksen kautta. Maadoitusvastus mitoitetaan rajoittamaan maasulkuvirta halutulle tasolle. Toisaalta vastuksen arvoa ei haluta asettaa liian suureksi, jolloin syksyaallot eivät vaimenisi tarpeeksi. Resistanssin kautta maadoitetun järjestelmän suurin hyöty on mahdollisuus siitä, ettei syöttöä tarvitsisi katkaista ensimmäisen maasulun jälkeen. Vika on kuitenkin korjattava, ettei vika kehittyisi oikosuluksi. Korjaus voidaan kuitenkin ajoittaa syötettävälle prosessille sopivaksi. Osissa resistanssilla maadoitetuissa järjestelmissä syöttö katkaistaan lyhyellä viiveellä, kuitenkin niin että laitteistot pystytään katkaisemaan turvallisesti.

Resistanssin kautta maadoitetun järjestelmän haittana ovat suuremmat kustannukset kuin tehollisesti maadoitetulla tai maasta erotetulla järjestelmällä. Järjestelmän vikapainannus on vaikeaa, koska vahingot ovat usein hyvin pieniä ja kytkimet tai sulakkeet eivät välttämättä eristä vikaantunutta verkon osaa. Järjestelmässä on mahdollista käyttää erillistä laitetta, joka lähettää virtapulsseja johtimiin ja mittaa pulssien heijastusten perusteella onko järjestelmässä pieniä vikoja. Järjestelmä on hyötyjensä ansiosta laajassa käytössä öljyteollisuuden prosesseissa. [2]

2.4 Maasulku

Maasululla tarkoitetaan sähköverkon vikatilannetta, jossa yksi vaihejohtimista kytkeytyy suoraan tai vikaresistanssin R_f kautta kiinni maanpotentiaaliin. Maasulku syntyy tavallisesti kaapelin eristeen heikentymisen tai vaurioitumisen takia. Tyypillinen sähkökäytön maasulku tapahtuu, kun kaapelin eristeen rakenne haurastuu osittaispurkausten takia. Tällöin vaiheen ja maadoitusjohtimen välille syntyy korkeaohminen vika, joka kehittyy vähitellen suurempi virtaiseksi.

Maasulkuvirran arvo riippuu maadoitustavan lisäksi vikaresistanssin suuruudesta ja vian etäisyydestä syöttävään verkkoon nähden. Tehollisesti maadoitetussa järjestelmässä maasulkuvirrat ovat suurimpia, koska niitä ei rajoiteta millään. Vikaresistanssin ollessa nolla on maasulkuvirta suurimmillaan. Jos vika sattuu lähellä syöttömuuntajaa, maasulkuvirta nousee oikosulkuvirran suuruiseksi. Kuvassa 2.6 on esitetty maasulku W -vaiheessa. Vika voi olla syttynyt valokaari, jonka vikaresistanssia kuvataan vastuksella R_f .



Kuva 2.6: Maasulku vaiheessa W. Valokaari on syttynyt W-vaiheen ja suojamaan välille. Valokaaren resistanssia on merkitty muuttujalla R_f

Maasuluissa ongelmana on maasulkuvirtojen lisäksi myös terveiden vaiheiden jännitteiden nousu. Jos vikaresistanssi on nolla, terveet vaihejännitteet nousevat pääjännitteiden suuruiseksi. Maasulussa olevan vaiheen jännite tasoittuu tähtipisteen jännitteeseen, jolloin jännite terveistä vaiheista tähtipisteeseen vastaa pääjännitteen suuruutta. Ongelmana ovat syntyvät ylijännitteet muuntajien ja moottoreiden eristyksissä, joissa saattaa syntyä läpilyönnejä liiallisten jänniterasitusten takia.

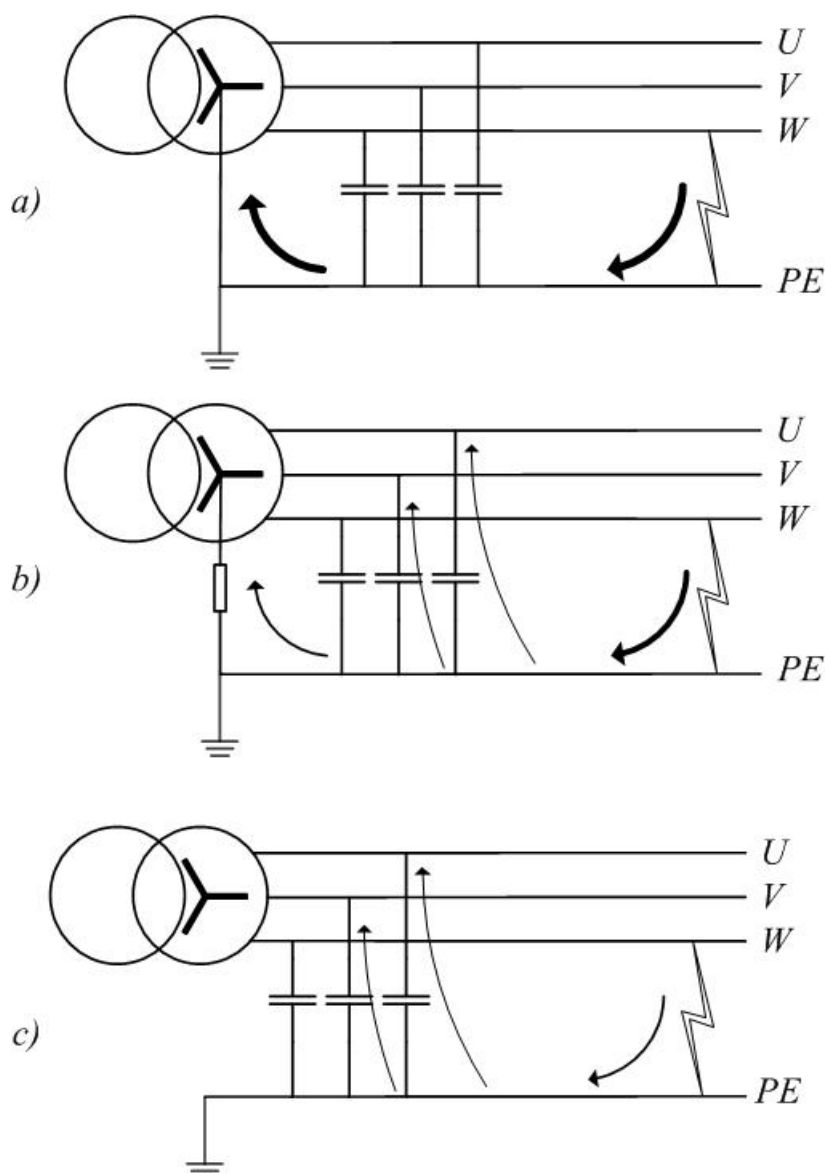
2.4.1 Syöttömuuntajan maadoitustavan vaikutus maasulkuvirtaan

Maasulkuvirran suuruuteen vaikuttaa syöttömuuntajan maadoitustapa. Kuvassa 2.7 on esitetty maasulkuvirran kulku eri maadoitustavoilla. Kuvassa esitetyt kapasitanssit kuvaavat vaihejohtimien ja maanpotentiaalin välisiä hajakapasitansseja.

Tehollisesti maadoitetussa muuntajassa tähtipiste kytketään suoraan maahan, jolloin maasulkuvirralla on pieni impedanssinen paluureitti tähtipisteen kautta, joten vikavirta on suuri. Vikavirta kulkee muuntajan tähtipisteen kautta, koska reitin impedanssi on paljon pienempi kuin hajakapasitanssien suojamaan ja vaiheiden välillä. Vikavirta saattaa kasvaa useisiin satoihin ampeereihin, joten virta tulee katkaista hyvin nopeasti. Vika on kuitenkin helppo havaita ja kytkeä irti. Maasulku aiheuttaaakin tehollisesti maadoitetuissa järjestelmissä aina käyttökatkon.

Maasta erotussa järjestelmässä muuntajan tähtipistettä ei maadoiteta, joten maasulkuvirralla ei synny paluureittiä muuntajan läpi. Maasulkuvirta palaa verkkoon hajakapasitanssien ja mahdollisten suotimien kautta. Jos W-vaihe on maasulussa, vikavirta kulkee U- ja V- vaiheita pitkin muuntajalle ja palaa W-vaihetta pitkin vikapaikkaan. Vikavirta on kuitenkin paljon pienempi kuin tehollisesti maadoitetulla järjestelmällä ja riippuu hajakapasitanssien suuruudesta.

Resistanssin kautta maadoitetussa muuntajassa tähtipiste kytketään resistanssin kautta maahan. Vikavirran suuruus määräytyy vikapaikan, vikaresistanssi sekä maadoitusresistanssin mukaan. Määrittämällä maadoitusresistanssi sopivaksi pystytään maasulkuvirta rajoittamaan halutun suuruiseksi. Tällöin yksittäinen vika ei pakota syötön katkaisuun ja korjaus voidaan ajoittaa sopivaan ajankohtaan. [2]



Kuva 2.7: Maasulkuvirran kulkureitit erimaadoitustavoilla. Tehollisesti maadoitettu järjestelmä a), resistanssin kautta maadoitettu järjestelmä b) ja maadoittamaton järjestelmä c).

2.4.2 Maasulkuvirta taajuusmuuttajakäytöissä

Taajuusmuuttajakäytöissä on kolme erilaista maasulkutilannetta. Ne riippuvat maasulun sijainnista taajuusmuuttajaan nähden. Maasulku voi syntyä syöttöverkon puolella taajuusmuuttajasta, taajuusmuuttajan välipiirissä tai taajuusmuuttajan ulostulon puolella joko kaapelissa tai kuormassa. Maasulku havainnoidaan tavallisesti muuntajan tähtipisteen jännitteestä tai sen läpi kulkevasta virrasta.

Syöttöverkon puoleisen maasulun havaitseminen on varsin yksinkertaista, koska verkko on usein varsin lyhyt syöttömuuntajalta taajuusmuuttajalle. Tällöin verkon sisäinen impedanssi on varsin pieni ja vikavirta on tarpeeksi suuri, jolloin vika voidaan helposti havaita syöttömuuntajan maasulkusuojalla riippumatta verkon maadoituksesta.

Välipiirissä syntyvä maasulku kytkeytyy maahan joko ylä- tai alakiskon kautta. Vikaantuneen kiskon jännite tasaantuu maanpotentiaaliin. Terveessä verkossa syöttömuuntajan tähtipisteen jännite on välipiirin jännitteen puolivälissä. Tähtipisteen jännite muuttuu alakiskon vikaantuessa $+\frac{1}{2}U_{dc}$:ksi ja yläkiskon vikaantuessa $-\frac{1}{2}U_{dc}$:ksi.

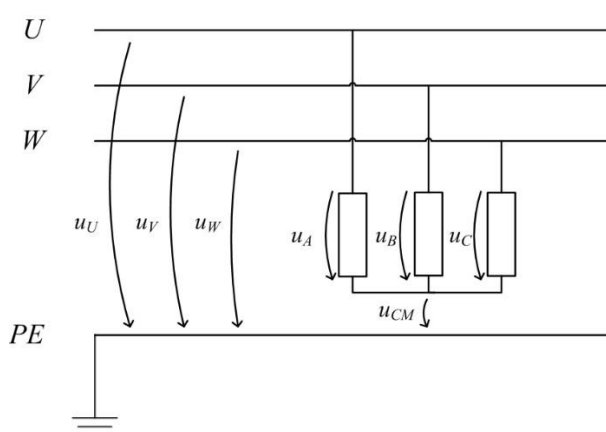
Moottorikaapelissa tai moottorissa syntyvä maasulku on vaikeampi havaita syöttömuuntajaan sijoitetulla maasulkusuojuella, kuin lähempänä syöttömuuntajaa tapahtuvat viat. Maasulkuvirta taajuusmuuttajalla saattaa olla hyvin suuri mutta virta ei kierrä syöttömuuntajan kautta, jolloin vian havaitseminen on vaikeaa. Lisäksi maasulkureleen tulee erottaa maasulku ja taajuusmuuttajan tuottamat yhteismuotoiset virrat toisistaan, ettei rele laukea turhaan. [2]

2.5 Yhteismuotoiset virrat ja jännitteet taajuusmuuttajakäytössä

Jukka Palomäen diplomityössä [3] on esitetty taajuusmuuttajakäyttö yhteismuotoisena sijaiskytkentänä. Tällöin voidaan helposti havaita yhteismuotoisten jännitteiden syntyminen taajuusmuuttajakäytössä ja kuinka yhteismuotoiset virrat kiertävät taajuusmuuttajakäytön eri osissa. Seuraavaksi esitellään Palomäen käyttämät yhteismuotoiset verkkojännitteiden ja -virtojen määrittely, sekä käydään läpi miten taajuusmuuttaja tuottaa yhteismuotoista jännitettä.

2.5.1 Yhteismuotoinen jännite ja virta

Eromuotoiset vaihejännitteet aaltoilevat 120-asteen välein toisistaan. Taajuusmuuttajassa vaihejännitteisiin summautuu yhteismuotoinen jännite. Yhteismuotoinen jännite näkyy kaikissa vaiheissa yhtäsuurena ja samanvaiheisena. Yhteismuotoinen jännite voidaan mitata maadoitusmuuntajan avulla kuvan 2.8 mukaisesti.

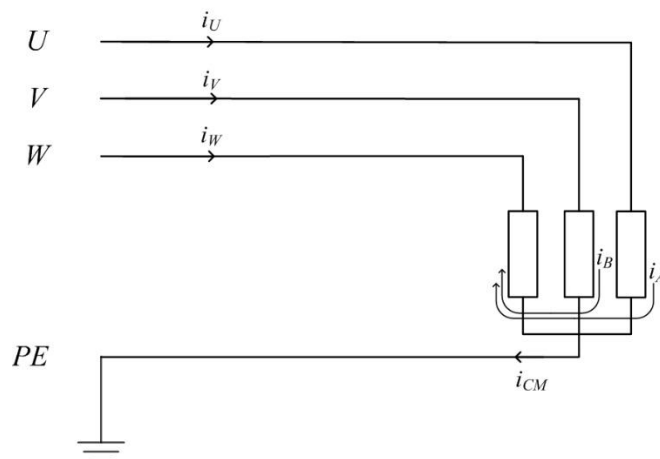


Kuva 2.8: Maadoitusmuuntajan tähtipisteestä mitattavissa oleva yhteismuotoinen jännite U_{cm}

Yhteismuotoinen jännite näkyy maadoitusmuuntajan tähtipisteen ja maanpotentiaalivälissä, jolloin nähdään kunkin vaiheen jännitteen olevan summa yhteismuotoisesta jännitteestä ja kyseisen vaiheen maadoitusmuuntajan vastaavasta eromuotoisesta jännitteestä. Palomäki esittää työssään jännitteiden riippuvuuden yhtälön 2.4 mukaisesti.

$$\begin{bmatrix} u_{CM} \\ u_A \\ u_B \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_U \\ u_V \\ u_W \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Eromuotoiset vaihevirrät aaltoilevat jännitteiden tapaan 120-asteen välein toisistaan. Yhteismuotoinen virta on virtaa, joka näkyy kaikissa vaiheissa yhtä suurena ja samanvaiheisena. Yhteismuotoinen virta mitataan kuvan 2.9 mukaisesti kolmivaiheisen symmetrisen kuorman tähtipisteen maadoituksesta. Maadoitusjohtimeen summautuu yhteismuotoinen virta kaikista vaihejohtimista, jolloin maadoitusjohtimessa kulkeva summavirta on kolminkertainen verrattuna yhdessä vaihejohtimessa kulkevaan yhteismuotoiseen virtaan. Vaihevirrät koostuvat siis vaiheen eromuotoisesta virrasta sekä kolmasosasta yhteismuotoisesta virrasta.



Kuva 2.9: Symmetrisen kuorman tähtipisteen maadoitukseen summautuu yhteismuotoinen virta. Eromuotoiset virrat kiertävät vaihejohtimissa.

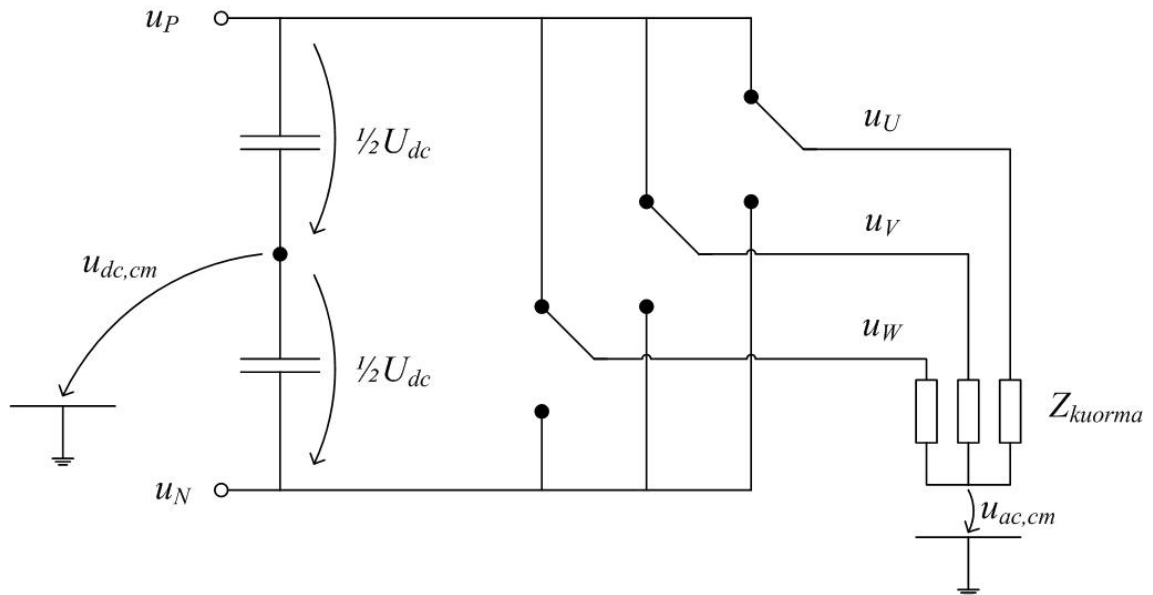
Palomäki esittää virtojen riippuvuuden toisistaan matriisiyhtälön 2.5 mukaisesti.

$$\begin{bmatrix} i_{CM} \\ i_A \\ i_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_U \\ i_V \\ i_W \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

2.5.2 Taajuusmuuttajan tuottama yhteismuotoinen jännite

Taajuusmuuttaja tuottaa yhteismuotoista jännitettä riippuen millaista taajuusmuuttajan rakennetta käytetään. Seuravaksi käydään läpi IGBT-silta, jota käytetään työssä sekä tasa-

että vaihtosuuntaajana. Tarkastellaan seuraavaksi vaihtosuuntaajassa syntyvää yhteismuotoisen jännitettä. Kuvassa 2.10 on esitetty vaihtosuuntaaja ja vaihtosuuntaajan komponenttien yli muodostuvia jännitteitä.



Kuva 2.10: Vaihtosuuntaaja ideaalikytkimillä. Kuvaan on havainnollistettu yhteismuotoinen jännite välipiirissä $u_{dc,cm}$ ja ulostulossa $u_{ac,cm}$ sekä eromuotoiset jännitteet välipiirissä u_P ja u_N ja ulostulossa u_U , u_V ja u_W .

Vaihtosuuntaajan ulostulovaiheet voidaan kytkeä IGBT-kytkimillä välipiirin positiiviseen tai negatiiviseen kiskoon. Koska ulostulovaiheita on kolme kappaletta, mahdollisia kytkentäkombinaatioita on kahdeksan kappaletta. Kahdessa näistä kombinaatioista kaikki vaihejohtimet kytketään samaan välipiirin kiskoon, joko positiiviseen tai negatiiviseen. Kuvassa 2.10 kaikki vaiheet on kytketty positiiviseen kiskoon. Kun kaikki vaiheet kytketään samaan kiskoon, ne muodostavat oikosulun. Tällöin kaikkiin vaiheisiin muodostuu puolikas välipiiri jännitteestä $\frac{1}{2}U_{dc}$. Tämä jännite on myös vaihtojännitteen yhteismuotoinen jännite, jonka kyseiset kytkentäkombinaatio saa aikaan. Kun vaiheet kytketään negatiiviseen kiskoon, yhteismuotoinen jännite on yhtäsuuri mutta negatiivinen.

Loput kytkin kombinaatiot muodostavat itseisarvoltaan yhtä suuren yhteismuotoisen jännitteen, joka on kuudesosa välipiirin jännitteestä $\frac{1}{6}U_{dc}$. Kombinaatiot, joissa yksi vaihe on kytketty positiiviseen kiskoon muodostaa negatiivisen yhteismuotoisen jännitteen. Vastaavasti, kun vain yksi kytkin on kytketty negatiiviseen kiskoon muodostavat positiivisen yhteismuotoisen jännitteen.

Yhteismuotoinen jännite saadaan laskettua yhtälön 2.6 mukaisesti, joka on saatu yhtälömatriisista 2.4.

$$u_{CM,AC} = \frac{1}{3}(u_U + u_V + u_W) \quad (2.6)$$

Kun vaihejännitteiden kohdalle sijoitetaan jonkin kytkennän mukaiset kiskojen jännitteet, saadaan yhtälö esimerkiksi muotoon

$$\begin{aligned} u_{CM,AC} &= u_{CM,DC} + \frac{1}{3}(u_P + u_P + u_N) \\ &= u_{CM,DC} + \frac{1}{3}\left(\frac{1}{2}u_{DC} + \frac{1}{2}u_{DC} - \frac{1}{2}u_{DC}\right) \\ &= u_{CM,DC} + \frac{1}{6}u_{DC}, \end{aligned} \quad (2.7)$$

kun U - ja V -vaiheet kytketään positiiviseen kiskoon ja W -vaihe negatiiviseen kiskoon.

Kun vaihejohdin on kytketty positiiviseen tai negatiiviseen kiskoon, se saa jännitteen arvoksi $\pm \frac{1}{2}U_{dc}$. Tämä on jännite maanpotentiaaliin nähden eli siihen on summattu ero- ja yhteismuotoinen jännite. Vaihtosuuntaajan syöttäessä symmetristä kolmivaiheista oikosulkumoottoria, eromuotoiset jännitteet muodostuvat myös moottorin käämeihin. Käämien jänniterasitusten optimoimiseksi on tärkeä tietää todellinen jännite, joka niiden yli muodostuu. Tämän takia halutaan tietää eromuotoisen jännitteen suuruus, joka saadaan vaihejännitteestä vähentämällä siitä yhteismuotoinen jännite. Riippuen kytkentäkombinaatioista eromuotoiset jännitteet voivat saada seuraavia arvoja 0 , $\pm \frac{1}{3}U_{dc}$ ja $\pm \frac{2}{3}U_{dc}$.

Yhteismuotoinen jännite muuttuu jokaisessa kytkentöjen muutoksessa. Modulointivasta riippuen kytkinten vaihtoja tehdään useita jokaista ulostulon aallonpituutta kohden. Esimerkiksi pulssinleveysmoduloinnissa kytkentöjen määrä riippuu kolmioaallon taajuudesta. Koska yhteismuotoiseen jännitteeseen vaikuttavat jokaisen kolmen vaiheen kytkennät, yhteismuotoinen jännite värähtelee kolminkertaisella kytkentätaajuudella sekä sen monikerroilla.

Vaihtosuuntaajan kytkentätaajuus on tyypillisesti kilohertsien luokkaa. Tämä tarkoittaa yhteismuotoisen jännitteen värähtelevän varsin korkeataajuisesti, koska moottorien nimellistaajuus on tyypillisesti 50 tai 60 Hz:ä. Moottorikaapeleiden hajakapasitanssit vaiheista maahan muodostavat kulkureitin korkeataajuisille yhteismuotoisille virroille. Mitä suurempi taajuus yhteismuotoisella virralla on, sitä pienempi impedanssi hajakapasitansseista näkyy vaiheen ja maan välille.

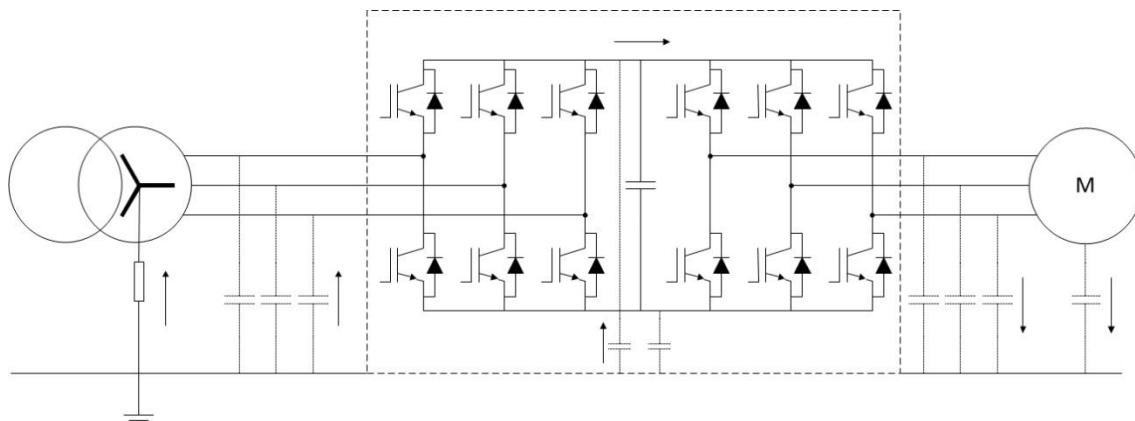
2.5.3 Yhteismuotoinen virta taajuusmuuttajakäytössä

Taajuusmuuttajan siltojen kytkennät muodostavat maanpotentiaalilin ja kytkinten välille yhteismuotoisia jännitteitä. Jännite tarkoittaa potentiaaliero, joka pyrkii tasoittumaan ja synnyttää virran. Tätä virtaa kutsutaan vastaavasti yhteismuotoiseksi virraksi.

Taajuusmuuttajassa käytetään usein IGBT-kytkimillä varustettuja siltoja sekä verkon että kuorman suuntaajassa. Nämä molemmat suuntaajat tuottavat yhteismuotoista virtaa kytkentöjensä aikana.

Yhteismuotoiset virrat kiertävät taajuusmuuttajakäytössä kuvan 2.11 mukaisesti. Kaapeleiden suuret hajakapasitanssit muodostavat hyvän kulkureitin korkeataajuisille virroille. Matalampitaajuiset virrat kulkeutuvat moottorin suurien kapasitanssien sekä syöttömuuntajan tähtipisteen maadoituksen kautta. Myös hajakapasitanssit taajuusmuuttajan

välipiiristä taajuusmuuttajan kaapin maadoitettuihin osiin muodostavat kulkureitin yhteismuotoisille virroille. Kaapin tiivis rakenne ja johdinten suuret pinta-alat lisäävät hajakapasitanssien suuruutta. Lisäksi taajuusmuuttajaan on kytketty komponentteja mitauksia ja suodatuksia varten, joita pitkin yhteismuotoinen virta pääsee kulkemaan.



Kuva 2.11: Taajuusmuuttajakäytössä kiertävät yhteismuotoiset virrat. Taajuusmuuttajan kaappi on merkitty sen ympärille katkoviivalla.

Molempien taajuusmuuttajan siltojen kytkennät muuttavat yhteismuotoisen jännitteen suuruutta. Koska taajuusmuuttajakäytössä on paljon kapasitansseja käytön ja maapotentiaalin välillä, muodostavat yhteismuotoiset jännitteet yhteismuotoista virtaa yhtälön 2.6 mukaisesti. Modulointitavasta riippuen kytkentähetket saattavat tapahtua samaan aikaan. Jos molemmat sillat tuottavat samansuuntaisen yhteismuotoisen virran, virrat summatuvat. Vastaavasti, jos siltojen tuottama virrat ovat erisuuntaisia, syntyvä yhteismuotoinen virta on siltojen tuottaman virran erotus.

Yhteismuotoinen jännite jakaantuu taajuusmuuttajan syöttö- ja kuormapuolelle niiden hajakapasitanssien suhteessa. Pienemmän hajakapasitanssin yli jää suurempi jännite. Tavallisesti moottorikaapelit ja moottori muodostavat huomattavasti suuremmat hajakapasitanssit kuormapuolelle kuin syöttökaapelit ja syöttömuuntaja syöttöpuolelle. Tällöin suurempi yhteismuotoinen jännite muodostuu syöttöpuolelle.

2.6 Maasulun havainnointi

Maasulkujen havaitsemiseen voidaan käyttää useita eri tapoja. Yleisimmin käytössä ovat maasulkuvirranmittaus syöttömuuttajan tähtipisteestä ja yhteismuotoisen virran mittaus taajuusmuuttajan syöttökaapelista tai moottorikaapelista. Maasulku voidaan myös havaita tarkkailemalla sähkökäytön eristystä. Johtavien osien ja suojamaan välille muodostetaan jännite, joka maasulun aikana aiheuttaa virran kyseiseen virtapiiriin.

Maasulun havaitsemiseksi voidaan käyttää vikavirtasuojaa, joka on yleisessä käytössä yksinkertaisen ja halvan rakenteensa ansiosta. Vikavirtasuojia mittaa virtaa ja havaitessaan raja-arvon ylittyvän virran, se katkaisee sähkösyötön kytkimillä.

Vikavirtasuojia voidaan asentaa usealla tavalla. Pienjänniteverkoissa käytettävät vikavirtasuojat mittaavat vaihejohtimien ja nollajohtimen summavirtaa virtamuuntajalla.

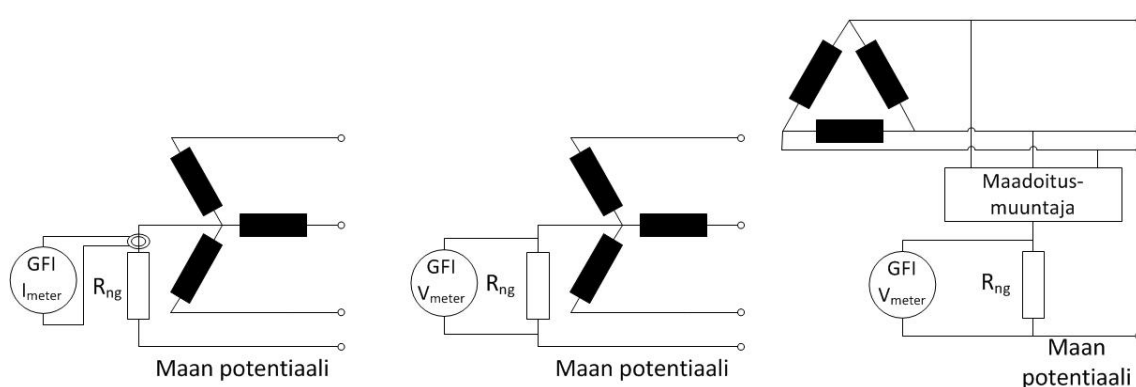
Kaikki johtimet kytetään kulkemaan virtamuuntajan läpi. Normaalitilanteessa, jolloin verkossa ei ole maasulkua, kaikki virta kulkee näitä johtimia pitkin virtamuuntajan läpi ja summavirta on nolla. Jos jokin kohta verkosta kytkeytyy maahan, osa virrasta kulkee maapiirin kautta ja suojan mittaama summavirta poikkeaa nollostä. Kun summavirta ylittää releelle määritellyn asetteluarvon, rele laukaisee sähkönsyötön pois päältä.

Teollisuuden symmetrisissä kolmivaiheikäyttöissä maasulkuvirta voidaan mitata vaihejohtimista. Tällöin kuormavirrat kulkevat vain vaihejohtimia pitkin ja tähtipisteeseen ei kytkeä nollajohdinta. Jos käyttöön syntyy maasulku, osa virrasta kulkee suojajohtimeen ja maasulkusuoja havaitsee vaihejohdinten summavirrassa muutoksen.

Lisäksi teollisuuskäytöissä vikavirtasuoja voidaan kytkeä muuntajan tähtipisteen maadoitusjohtimeen. Maasulun tapahtuessa vioittuneessa vaiheessa virta alkaa kulkea vaiheesta suojajohtimeen ja sitä kautta muuntajan tähtipisteeseen, jonka vikavirtasuoja havaitsee.

Teollisuussovellukset saattavat olla suuria kokonaisuuksia, joissa yhteen syöttömuuntajaan kytetään useita taajuusmuuttajia. Tällöin suojauksia voidaan yhdistää ja niistä pystytään selektiivisesti toimiva maasulkusuojaus. Jokaiselle taajuusmuuttajalle kytetään oma maasulkusuoja ja tämän lisäksi yhteiselle syöttömuuntajalle kytetään oma maasulkusuoja, joka laukee suuremmalla viivellä kuin muut suojat.

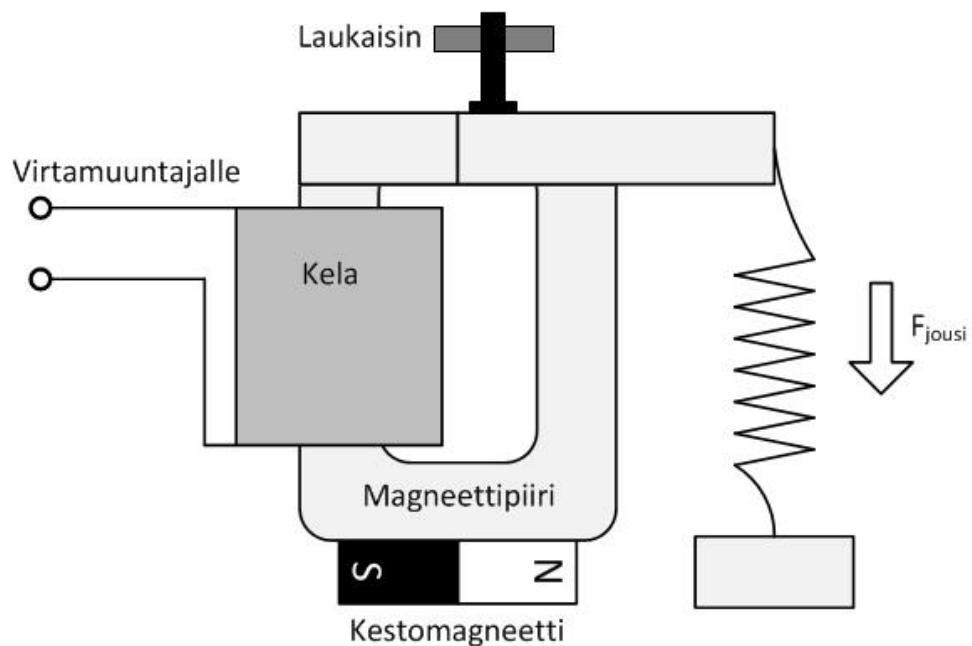
Kuvassa 2.12 on esitetty kolme erilaista vikavirtasuojakytkentää, joissa muuntajan tähtipiste on maadoitettu maadoitusvastuksen R_{ng} kautta. Kahdessa ensimmäisessä kytkennässä vikavirtasuoja on kytketty muuntajan tähtipisteeseen. Ensimmäisessä kytkennässä mitataan suoraan maadoitusjohtimen läpi kulkevaa virtaa. Virranmittaukseen käytetään virtamuuntajaa. Toisessa kytkennässä mitataan maadoitusvastuksen yli olevaan jännitettä ja lasketaan jännitteestä ja vastuksen resistanssista vikavirran suuruus.



Kuva 2.12: Vastuksen kautta maadoitetun muuntajan tähtipisteen maadoitusjohtimeen kytketty vikavirtasuoja (GFI) virranmittauksella (I_{meter}), jännitteenmittauksella (V_{meter}) ja maadoitusmuuntajan tähtipisteen maadoitukseen kytketty vikavirtasuoja jännitteenmittauksella.

Kuvassa 2.13 on esitetty esimerkkikuva vikavirtasuojan rakenteesta. Vikavirtasuojat on rakennettu tyypillisesti virtamuuntajasta, sähkömagneettisesta releestä, katkaisijasta ja testeristä. Virtamuuntajan tehtävänä on mitata haluttua virtaa ja katkaista sähkönsyöttö

jos se havaitsee vikavirran. Vikavirtasuojan sähkömagneettinen rele koostuu käämistä, magneettipiiristä, kestopagneetista ja laukaisimesta.



Kuva 2.13: Esimerkkikuva vikavirtasuojan rakenteesta

Suojan käämi on kytketty virtamuuntajan toisioon. Jos virtamuuntajan mittaama virta eroaa nolasta, alkaa käämissä kulkea virta. Käämi on kierretty releen magneettipiiriin. Magneettipiiriin on kytketty kestopagneetti muodostaa magneettipiiriin vakiomagneettikentän. Kestomagneetti tarkoitus on estää laukaisinta liikkumasta, kun suoja ei ole havainnut vikaa. Laukaisin on kytketty kiinni magneettipiirin ikeeseen niin, että jousi pyrkii aukaisemaan magneettipiirin. Kun releen käämissä kulkee virtaa, kestopagneetista aiheutuva magneettikenttä kumoutuu ja laukaisinta kiinnipitävä voima pienenee niin, että laukaisin laukeaa. Laukaisin katkaisee samalla tehonsyötön tai lähettää signaalin vikatilanteesta eteenpäin. [4] [5]

3 Kaivoskäyttö

Työssä tarkasteltavia suojauksia määrittelee Australian ja Uuden-Seelannin Standardi *AS/NZS 2081:2011*. [6] Standardi painottuu maasulkuun liittyviin suojalaitteisiin. Jotta suojalaitteet täyttäsivät standardin määräykset, tulee sähkökäyttö suunnitella niin, ettei se aiheuta suojalaitteille liikaa häiriötä.

Kaivokset asettavat sähkökäyttöjen ratkaisuille rajoituksia. Kaivoksissa turvallisuus on erittäin tärkeää, sillä vika ilmanvaihdossa tai valokaari jossain käytön osassa saattaa aiheuttaa hengenvaarallisia tilanteita. Ilmanvaihdon vioittuminen lopettaa hapen kuljettamisen kaivokseen, joka on vaarallista kaivoksen työntekijöille. Kaivoksissa esiintyy erilaisia herkästi syttyviä aineita, kuten hiilipölyä, jotka syttyvät helposti valokaaresta. Räjähdysten välttämiseksi valokaarien esiintyminen on minimoitava.

Luvussa käydään läpi edellä mainittua standardia ja mitä laitteita standardi määrittelee sekä millaisia vaatimuksia se laitteille asettaa. Lisäksi käydään läpi millaisia erityispiirteitä sähkökäytöllä on, kun ne sijoitetaan kaivoksiin tai louhoksiin.

3.1 Standardi AS/NZS 2081:2011

Standardi AS/NZS 2081:2011 käsittelee kaivoksissa ja louhoksissa käytävien sähköistysten suojalaitteiden vaatimuksia. Standardi on taloudellisessa mielessä tärkeä, sillä sitä käytetään laajalti myös Australian ja Uuden-Seelannin ulkopuolella.

Standardi sisältö on jaettu aiheittain ohjelmistoilla ohjattuihin laitteisiin, maasulkuvirran rajoittimiin, maadoitussuojoihin, maasulkusuojiin, maasulkuerottimiin, maadoitusvastusten suojiin ja erottimien suojiin. Standardi määrittelee jokaisesta aiheesta yleisen määritelmän mitä laite tekee ja kuinka sen tulee toimia. Laitteille määritellään toiminta-arvoja, joiden mukaan niiden tulee toimia, kuten laukaisurajat ja -aikoja. Lisäksi käydään läpi, minkälaisista vioista laitteen tulee ilmoittaa, mitä arvoja laitteesta tulee ilmoittaa ja mitä tietoja tulee merkitä laitteeseen. Seuraavaksi käydään läpi työssä oleellisten aihealueiden määräytyksiä.

3.1.1 Maasulkuvirran rajoittimet

Maasulkuvirta nostaa kosketusjännitteitä sähkökäytön eri osissa ja altistaa järjestelmän valokaarelle. Vikavirtapiirin virtaa pystytään rajoittamaan sijoittamalla vastus syöttömuuntajan tähtipisteen maadoitusjohtimeen. Kun virtaa rajoitetaan, kosketusjännitteetkin pysyvät pienempinä ja valokaaret pystytään estämään.

Normaalissa pienjänniteverkossa pyritään jännitteelle mahdollisesti altistuvat osat maadoittamaan mahdollisimman pieniresistanssisesti. Teollisuuden liikuteltavissa sähkökäytöissä tämä ei ole soveltuva tapa, koska vikavirrat saattaisivat olla tuhansia ampeereita ja maadoitusjohtimien suuret pituudet nostavat maadoitusjohtimien resistanssin liian korkeaksi.

Virranrajoitusvastuksella saavutetaan sama tai parempi suojaus kosketusjännitteen nousua vastaan, kuin lisäämällä maadoitusjohtimen kokoa. Vastuksen etuna on, että se suojaaa kerralla koko verkkoa, jota muuntaja syöttää.

Virran rajoitukselle eri jännitetasoille on määritetty taulukossa 3.1 esitetyt rajat.

Taulukko 3.1: Standardin AS/ANS 2081:2011 määrittämät maasulkuvirran rajat syöttömuuntajan tähtipisteessä.

Järjestelmän maksimi jännite [V]	Maasulkuvirran maksimi [A]
< 4000	5
4000 - 12000	25
> 12000	50

Jos useampi syöttömuuntaja on kytketty rinnakkain samaan kiskostoon ja kaikilla on oma virranrajoitusvastus, voidaan jokainen vastus mitoittaa taulukon 3.1 mukaisesti. Kiskoston maasulkureleen asettelu määritellään summaamalla syöttömuuntajien virtarajat yhteen, kuitenkin tarkistamalla ettei verkon kosketusjännitteet pääse nousemaan liikaa.

3.1.2 Maasulkusuojat

Maasulkusuojan tehtävä on havaita suojamaajohtimessa kulkeva virta ja antaa syötön katkaisijalle käsky avautua, jos havaittu virta ylittää asetteluarvon. Suojausta ei ole suunniteltu suojaamaan käyttäjää suoralta kosketukselta jännitteiseen osaan vaan jännitteiset osat suojataan suojamaajohtimella. Eristyksen heikentyessä maasulku muodostuu ensisijaisesti suojamaahan. Tällaisessa tapauksessa käyttäjän koskettaessa jännitteistä osaa vikavirta kulkee suojamaajohdinta pitkin, jonka impedanssi on paljon pienempi, kuin rinnalle kytkettyvä käyttäjän keho.

Standardi määrittelee virran havahtumisrajaksi 10%:a maasulkuvirran rajoitusrajasta. Taulukosta 3.1 nähdään, että alle 4000 V:n järjestelmissä virta rajoitetaan 5 A:iin, jolloin maasulkusuojan havahtumisraja tulee asetella 500 mA:iin. Tarkoituksena on havaita alkavat maasulkuviat ennen kuin maasulkuvirta kasvaa liian suureksi. Alle 4000 V:n järjestelmissä maasulkusuojan tulee toimia tarkasti 0.1 A:n ja 5 A:n välisellä alueella. Tarkkuus laitteen asettelupisteessä tulee olla $\pm 10\%$.

Maasulkusuojan laukaisuajat riippuvat siitä mille suojaustasolle se asennetaan. Alimman tason laukaisuajat ovat lyhemmät, kuin korkeamman tason suojauksella. Ideana on laukaista aina alimman tason suojaus, jolloin verkosta poistuu vain pieni osa käytöistä. Ylemmän tason suojaus tarkkailee usean käytön tilannetta samanaikaisesti ja laukaistaessa kaikki käytöt erottuvat verkosta samanaikaisesti.

Standardi määrittelee vikavirtasuojan maksimilaukaisuajaksi 50 ms. Laukaisulle voidaan kuitenkin asetella viivettä 500 ms:iin asti, joka on standardin mukaisesti yleistä kai-vosovelluksissa. Tämän lisäksi useamman tason suojaukselle sallitaan pidempiä viiveitä, jotta suojaus toimisi suunnitellulla tavalla tasoittain.

Jos maasulkusuoja mitoitettaisiin käyttäjän suoraan kosketukseen jännitteiseen johtimeen, tulisi suojan virtaraja asettaa alle 30 mA:n. Kun suoja mitoitetaan epäsuoran kosketuksen mukaan, virtaraja voidaan asettaa reilusti suuremmaksi. 30 mA:n raja on määritetty ihmisen kehon sähkövirran kestävydestä. Virta on erityisen vaarallista sydämen toiminnalle. Yli 30 mA:n virta sopivalla hetkellä sydämen lyönnistä aiheuttaa ihmisen sydämeen rytmihäiriön, joka saattaa johtaa uhrin menehtymiseen.

3.2 Kaivoskäyttöjen erityisvaatimukset

Kaivosympäristössä turvallisuus on erittäin tärkeää. Hiilikaivoksissa syntyvä hiilipöly syttyä palamaan ja saattaa aiheuttaa räjähdysten, jos sähkökäytön maasulkuvirta synnyttää valokaaren. Toisaalta teollisuusympäristössä on huomioitava sähkökäytön luotettavuus, koska käyttökatkot aiheuttavat taloudellisia menetyksiä.

Kaivosten rakenne asettaa sähkökäyttöille omat haasteensa. Kaivosten syvät ja monimutkaiset rakenteet vaativat pitkiä kaapeleita sähkönsyöttöön. Taajuusmuuttajakäytössä pitkät kaapelit lisäävät hajasuureita, jotka pienentävät impedanssia yhteismuotoisten virtojen kulkureitillä. Maasulkusuojan toiminta hankaloituu, koska lisääntyvät yhteismuotoiset virrat häiritsevät suojan virtamittausta.

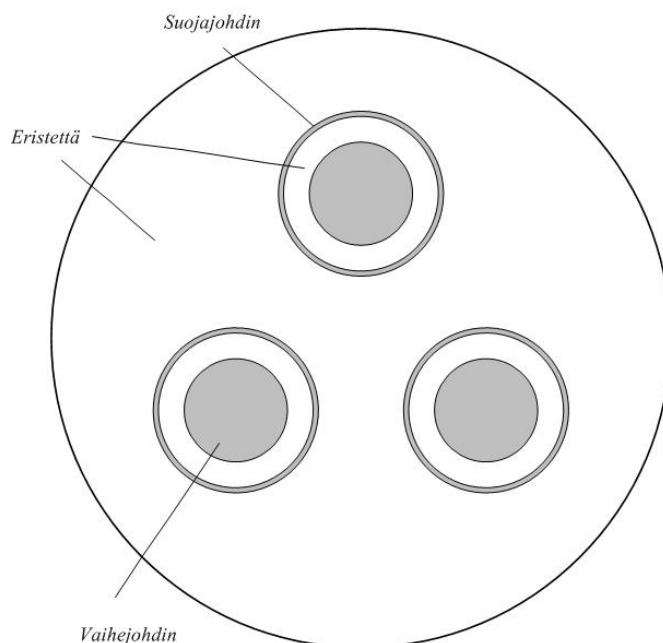
Kaivosten sähkökäyttöjen kuormat ovat tavallisesti liikuteltavia koneita, kuten kuljettimia tai ilmastointilaitteita. Kaivosten rakenne muuttuu jatkuvasti, jolloin laitteita siirrellään ja kiinteät asennukset eivät ole järkeviä tai mahdollisia. Laitteiden liikuttaminen aiheuttaa kaapeleille mekaanista rasitusta. Kaapelin rakenteen tulee kestää jatkuvia vääntyilyä ilman, että rakenne haurastuu tai hajoaa.

Energiatehokkuus on aina esillä, kun suunnitellaan nykyaikaista taajuusmuuttajakäyttöä. Kaivoksissa suurimassaiset koneet varastoivat energiaa osiensa pyörimisliike- tai potentiaalienergiaan. Näistä energioista osa voidaan siirtää takaisin verkkoon, jos taajuusmuuttajan verkkosilta valitaan siihen sopivaksi. Tämä ratkaisu lisää kuitenkin yhteismuotoisia virtoja verkon puolelle, jotka vaikuttavat maasulun havaitsemiseen.

3.2.1 Kaapelit kaivoskäytöissä

Kaivoskäytöt sisältävät usein pitkät syöttö- ja moottorikaapelit. Pitkät kaapelit mahdollistavat taajuusmuuttajan sijoittamisen maanpinnalle, vaikka kuorma olisi syvällä maan alla. Kaivosten rakenne elää jatkuvasti kaivamisen edistyessä. Sähkökäyttöjen kuormia joudutaan ajoittain siirtämään, jolloin sähkökäyttöistä halutaan tehdä tiiviitä ja helposti liikuteltavia. Sähkökäyttö voidaan myös sijoittaa kiskoilla liikuteltavalle vaunulle, jota pystytään helposti siirtämään.

Kaapeleina pyritään käyttämään joustavia materiaaleja, jolloin kaapeleiden liikuttelu on helpompaa. Kaapeleiden liikuttelu altistaa eristemateriaalit fyysiselle rasitukselle. Rasitukset haurastuttavat eristeen rakennetta, jolloin eristeen sähköinen kestävyys heikkenee. Tämä saattaa aiheuttaa lopulta oikosulun kahden vaiheen välille tai maasulun vaiheen ja suojamaan välille. Kuvassa 3.1 on esitetty yksi esimerkki joustavasta kaapelista, joka on suunniteltu AS/NZS-standardin mukaiseksi.



Kuva 3.1: Kaivoskäyttöön soveltuvan kaapelin poikkileikkaus.

Kaapelissa ominaista on jokaiselle vaihejohtimen ympärille rakennettu suojajohtin. Rakenne lisää kaapelin taivuteltavuutta, joka on etu kaivoksissa, kun kaapeleita täytyy siirtää. Rakenne lisää myös kapasitanssien suuruutta vaiheen ja maan välille, koska etäisyys vaihejohtimesta suojajohtimeen vähenee merkittävästi verrattaessa kaapeliin, jossa yksittäinen suojajohtin rakennetaan kaikkien vaiheiden ympärille. Rakenne vähentää kuitenkin vaiheiden välisiä kapasitansseja huomattavasti. Suojajohtimet kytketään toisiinsa vain kaapelin päissä, jolloin niillä saattaa olla eri jännitepotentiaali.

Kaapelien pituutta kasvatettaessa kaapelien hajakapasitanssit ja resistanssit kasvavat. Hajakapasitanssit häiritsevät maasulkuvirtojen havaitsemista. Impedanssi hajakapasitanssien läpi laskee korkeilla taajuuksilla. Kaapelien pituutta rajoittaa maasulkureleen asetteluraja, joka tulee olla AS/NZS:n mukaisesti enintään 500 mA. Vuotovirta ei saa ylittää tätä rajaa, jottei rele havahtuisi pelkästä vuotovirrasta.

3.2.2 Maadoitus ja turvallisuus

Kaivoksissa käytettävät kuormat ovat usein tilapäisesti asennettuja. Kaivoksen rakenne muuttuu jatkuvasti, jolloin laitteistoja täytyy ajoittain siirtää. Laajojen maadoitusten rakentaminen hidastaisi laitteiden siirtoa. Sähkökäyttöjen maadoitus pyritään rakentamaan keskitetysti syöttömuuntajan kautta, joka pysyy pisimpään paikallaan.

Muut käytön osat kytketään syöttömuuntajan suojamaan potentiaalinen syöttökaapelin suojajohtimella. Tämä kuitenkin aiheuttaa jännitteen nousua verkon loppuosassa. Esimerkiksi moottorin kuoren jännite nousee, jos suojajohtimessa kulkee pienikin virta. Johdin saattaa olla satoja metrejä pitkä, jolloin johtimen sisäinen resistanssi kasvaa.

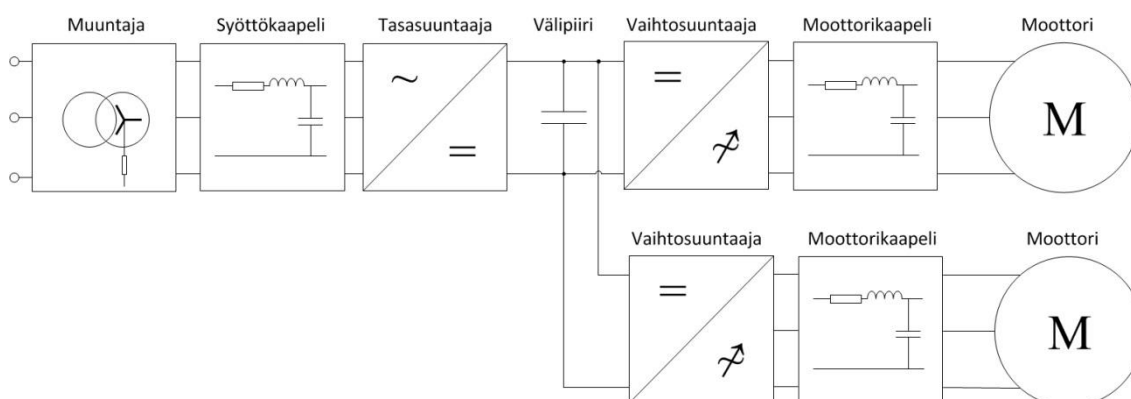
3.2.3 Yliaaltojen vaikutus verkkoon

Kaivoksissa taajuusmuuttajien tuottamat virtojen yliaallot halutaan suodattaa, koska syöttöverkko tulisi mitoittaa yliaaltojen mukaisesti. Laitteistojen nimellistehoja tulisi nostaa virran yliaaltojen osuuden verran. Verkon ylivoittoaminen vaatisi enemmän investointeja, joten yliaaltojen suodattaminen on usein taloudellisempaa. Yliaallot saattavat myös häiritä tai jopa rikkoa verkkoon kytkettynä olevia herkkiä laitteita.

3.2.4 Useampi rinnakkainen kuorma

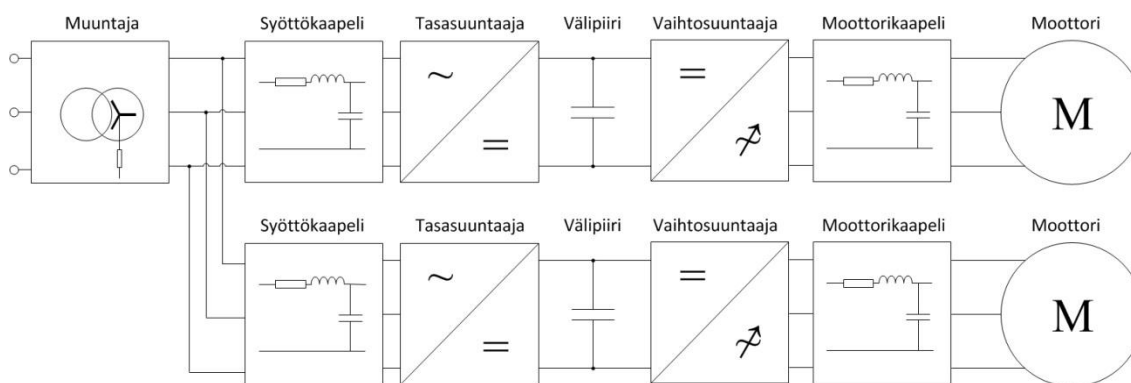
Kaivosteollisuuden sovellukset sisältävät usein isoja kokonaisuuksia. Ilmastointilaitteistot tai kuljettimet sisältävät useita moottoreita. Moottorit voidaan kytkeä taajuusmuuttajien avulla verkkoon monella eri tavalla. Kytkentävät riippuvat kuorman maksimivirroista ja suojausten mitoituksista. Kuormavirtojen kasvaessa moottoreille tarvitaan omat taajuusmuuttajat ja mahdollisesti omat syöttömuuntajat. Myös taajuusmuuttajan tuottamat yhteismuotoiset virrat asettavat rajoituksia rinnankytketyille kuormille.

Kuvassa 3.2 on esitetty kahden moottorin sähkökäytön rakennekaavio. Moottoreille on asennettu omat vaihtosuuntaajat, jotka on kytketty yhteiseen välipiiriin. Tasasuuntaaja sekä syöttömuuntaja ovat kuitenkin yhteiset molemmille kuormille. Tällöin tasasuuntaaja sekä syöttömuuntaja mitoitetetaan moottorien summatehon ja –virran mukaan. On myös huomioitava, etteivät vaihtosuuntaajat tuota liikaa yhteismuotoista virtaa, jotta maasulkusuojaus toimii.



Kuva 3.2: Sähkökäytön yhteiseen välipiiriin on kytketty kaksi moottoria.

Kuvassa 3.3 on esitetty sähkökäyttö, jossa kahdelle moottorille on asennettu omat taajuusmuuttajat. Tällöin syöttömuuntaja on molemmille kuormille yhteinen ja pitää mitoittaa näiden mukaisesti. Ratkaisun ongelmana on usein liian suureksi kasvavat yhteismuotoiset virrat. Syöttömuuntajassa oleva maasulkusuoja mittaa yhtä aikaa molempien taajuusmuuttajien tuottaman yhteismuotoisen virran, jolloin virran taso nousee herkästi liian suureksi.



Kuva 3.3: Sähkökäytön yhteiseen syöttömuuntajaan on kytketty kaksi taajuusmuuttajaa.

Kolmas vaihtoehto on asentaa kuormat omien syöttömuuntajien taakse. Tämä on kuitenkin kallein ratkaisu, koska komponenttien määrä on tällöin suurin. Yksittäisten moottorien suojaus on kuitenkin helpompi mitoittaa, kun käytöt yhdistetään vasta syöttömuuntajien yläjännitepuolella.

3.2.5 Suora momenttisäätö, DTC

ABB käyttää suuritehoisissa taajuusmuuttajissaan säätötapana suoraa momenttisäätöä (*DTC, Direct Torque Control*). Se on tehokas säätötapa suurilla tehoilla, kun säädöltä halutaan nopeaa reagoitua ohjeen muutoksiin ja tarkkuutta suurillakin pyörimisnopeuksilla.

DTC on säätötapa, jossa kuorman pyörimisnopeutta tai kuorman akselin kulmaa ei tarvitse mitata. Erillisiä pyörimisnopeuden tai akselin asennot mittareita ei tarvita, jolloin käytön ratkaisusta tulee yksinkertaisempi, luotettavampi ja nopeampi asentaa kuin monet muut säätötavat. Säätötapa onkin usein käytössä monessa teollisuussovelluksessa.

DTC perustuu magneettivuon ja kuorman momentin estimointiin eikä siinä tarvita myöskään modulaattoria, joka on osa PWM-säätöä. *DTC*:ssä halutaankin säätää suoraan moottorin vääntömomenttia t_e . *DTC* on hyvä säätötapa, koska se on varsin tarkka ja reagoi nopeasti muutoksiin. Säädön huonona puolena on kytkentöjen sattumanvarainen taajuus, jolloin syntyvää yliaaltospektriä ei voida laskea etukäteen ja optimoida suodatusta laskeutujen perusteella. Myös kuormalle syntyvät momentin rippeli vaihtelee niin sanotun hystereesisäädön takia.

4 Simulointimallit

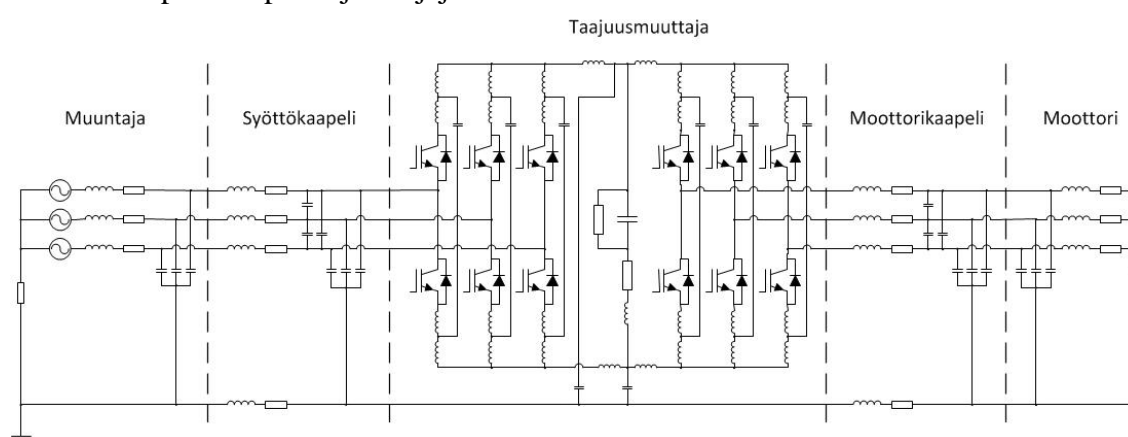
Taajuusmuuttajakäytön maasulkuvirran ja yhteismuotoisten virtojen ilmiöitä voidaan tarkastella kolmivaiheella simulointimallilla. Luvussa käydään läpi taajuusmuuttajakäytön simuloimista varten rakennettu malli ja sen eri osat. Lisäksi tarkastellaan, mitä eri komponentit reaali maailmassa edustavat.

Perusmalli on rakennettu nelijohdinjärjestelmänä, johon kuuluu kolme vaihejohtinta sekä suojajajohtin. Tällöin jokainen mallin osakokonaisuus sisältää neljä sisäänmenoa sekä ulostuloa. Poikkeuksena tälle on muuntaja ja moottori, jotka sijaitsevat mallin rakenteen päissä. Rakenne helpottaa mallin muokkaamista, kun malliin halutaan lisätä tai vaihtaa komponentteja.

Piirimallien simulointiin on käytetty *ANSYS Inc.* -yhtiön *Simplorer*-piirisimulointiohjelmaa. *Simplorer*:iin pystytään syöttämään piirimallien lisäksi ohjausmalleja, signaali malleja, loogisia kaavioita sekä siihen pystyy tuomaan muista ohjelmista esimerkiksi erilaisia 3D-laskelmien malleja. Ohjelman vahvuutena on, kuinka siihen pystytään luomaan uusia komponentteja suoraan reaali maailmasta. Ohjelmaan voidaan esimerkiksi mitata passiivikomponentin taajuudesta riippuva impedanssi ja siirtää mittaustiedot ohjelmaan ja se muodostaa komponentista valmiin mallin.

4.1 Taajuusmuuttajakäyttö

Taajuusmuuttajakäytön malliin on rakennettu päävirtapiiri, joka sisältää kuvan 4.1 mukaisesti syöttömuuntajan, syöttökaapelin, taajuusmuuttajan, moottorikaapelin ja moottorin. Päävirtapiirin lisäksi mallissa on suojajajohtin, suodattimia, hajasuureita päävirtapiiriin sisällä sekä päävirtapiiriin ja suojajajohtimen välillä.

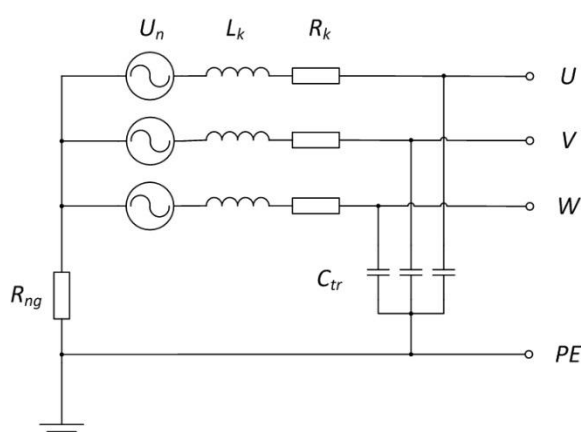


Kuva 4.1: Taajuusmuuttajakäytön mallin

Mallin tarkoituksena on kuvata riittävällä tarkkuudella yhteismuotoisten jännitteiden ja virtojen muodostuminen taajuusmuuttajan kytkennöistä johtuen. Lisäksi mallilla halutaan tarkastella, miten yhteismuotoiset virrat ja maasulkuvirrat kiertävät taajuusmuuttajakäytössä sekä tutkia muita mahdollisia ilmiöitä.

4.2 Syöttömuuntaja

Syöttömuuntajamalli on rakennettu kuvassa 4.2 mukaiseksi. Toisio on kytketty tähteen ja maadoitettu vastuksella. Syöttömuuntajan malli sisältää vaiheiden jännitelähteet U_n , muuntajan käämien resistanssit R_k , muuntajan käämitysten induktanssit L_k , käämien kapasitanssit muuntajan maadoitettuihin osiin C_{tr} ja muuntajan tähtipisteen maadoitusvastuksen R_{ng} . Jännitelähteet kuvaavat muuntajan ensiöstä toisioon indusoituvia jännitteitä. Resistanssit kuvaavat muuntajan käämitysten tuottamia lämpöhäviöitä eli käämien johdinten sarjaresistansseja. Induktanssit kuvaavat muuntajan johdinten riippuvuutta magneettikenttään. Kapasitanssit kuvaavat muuntajan hajakapasitansseja käämeistä säiliöön ja muihin maadoitettuihin osiin.



Kuva 4.2: Syöttömuuntajan mallin piirikaavio

Syöttömuuntajamalli kuvaa muuntajan toisioin liittimistä näkyvää tilannetta. Muuntajan ensiöstä toisioon indusoituva jännite kuvataan lähdejännitteillä U_n . Jännitelähde on jäykkä, joka tuottaa sinimuotoista 50 Hz:stä jännitettä. Lähdejännitteen tehollisarvon oletetaan olevan vakio arvoltaan 230 V – 400 V. Tehollisarvo riippuu täysin käytettävästä ratkaisusta. Luvussa 5 esiteltävissä simuloinneissa käytettiin 400 V:n vaihejännitteitä.

Muuntajassa käämien johtimet kierretään muuntajan sydämen pylvään ympärille. Käämin kierroslukua kasvattamalla myös muuntajan induktanssit kasvavat. Vastaavasti kierrosluvun lisääminen kasvattaa johdinten pituutta ja muuntajan sisäinen resistanssi lisääntyy. Resistanssin lisääntyessä muuntajan lämpöhäviöt kasvavat.

Muuntajan tukirakenteet maadoitetaan, jottei niihin muodostuisi vaarallisia jännitteitä, jotka voisivat aiheuttaa läpilyöntejä osien välille tai käyttäjälle vaarallisia kosketusjännitteitä. Maadoitettujen rakenteiden ja käämien väliin muodostuu hajakapasitansseja, koska osien kohtisuorat poikkipinta-alat voivat olla suuria. Nämä hajakapasitanssit helpottavat

myös korkeataajuisten yhteismuotoisten virtojen kulkua, koska kapasitanssit muodostavat pienemmän impedanssin korkeataajuisille komponenteille kuin käämien induktiiviset johtimet.

Muuntajan tähtipisteen maadoitusvastus mitoitetaan muuntajan vaihejännitteiden mukaan. Maasulun syntyessä lähellä muuntajan vaiheliitintä, tähtipisteen jännite nousee vaihejännitteen suuruiseksi. Kyseessä on suurivirtaisin maasulku syöttömuuntajan takana, joten vastus on mitoitettava tämän tilanteen mukaan. Koska maasulkuvirta halutaan rajoittaa luvussa 3 esitellyssä standardissa viiteen ampeeriin, haluttu maadoitusvastuksen resistanssin arvo saadaan jakamalla vaihejännitteen arvo viidellä ampeerilla. Taulukossa 4.1 on esitetty eri jännitetasojen maadoitusvastusten arvoja.

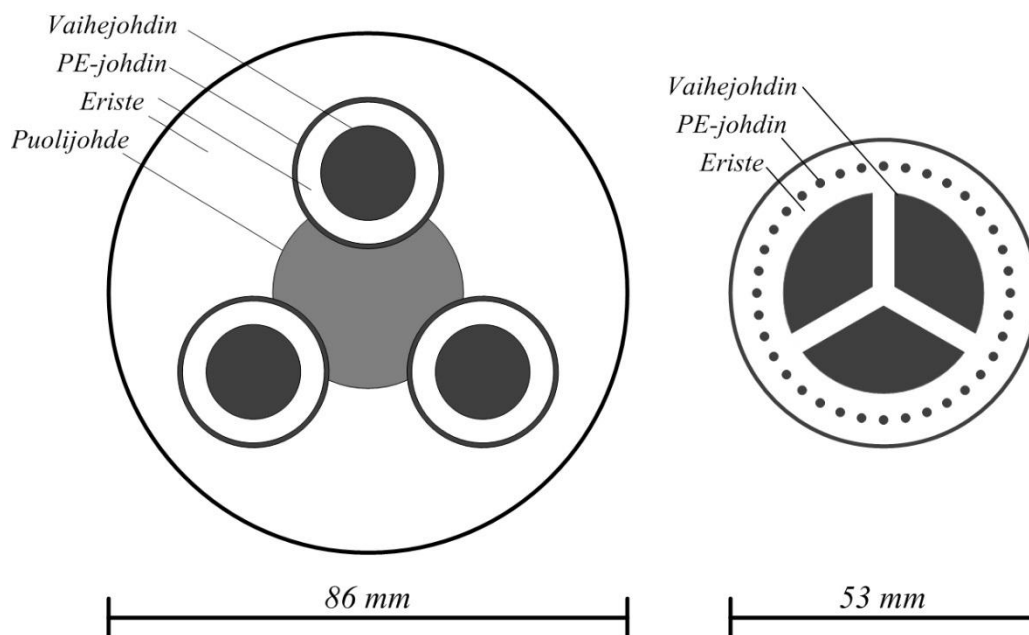
Taulukko 4.1: Jännitetasojen maadoitusvastusten resistanssiarvoja

Pääjännite [V]	Vaihejännite [V]	Maasulkuvirta [A]	Maadoitusvastus [Ω]
240	139	5	28
415	240	5	48
500	289	5	58
690	398	5	80

Pääjännitteiden arvoina on käytetty jännitteen vaihteluvälin maksimiarvoa. Tällöin myös vaihejännite on suurin mahdollinen ja maadoitusvastus mitoitetaan riittävän suureksi, jolloin maasulkuvirta ei ylitä viiden ampeerin rajaa. Maadoitusvastuksen arvot on pyöristetty ylöspäin samasta syystä.

4.3 Kaapelit

Syöttö- ja moottorikaapelien mallintamiseen on käytetty RLC-kaapelimallia. RLC-mallissa johtimeen on kytketty sarjavastus R sekä -induktanssi L ja rinnalle kapasitanssi C . Kuvassa 4.3 on esitelty kaivoskäyttöihin soveltuvan joustavan kolmivaihekaapelin poikkileikkaus, jossa suojajohdin on kolmiosaisena jokaisen vaihejohtimen ympärillä, sekä MCMK-kolmivaihekaapelin poikkileikkaus, jossa suojajohdin ympäröi vaihejohtimia.

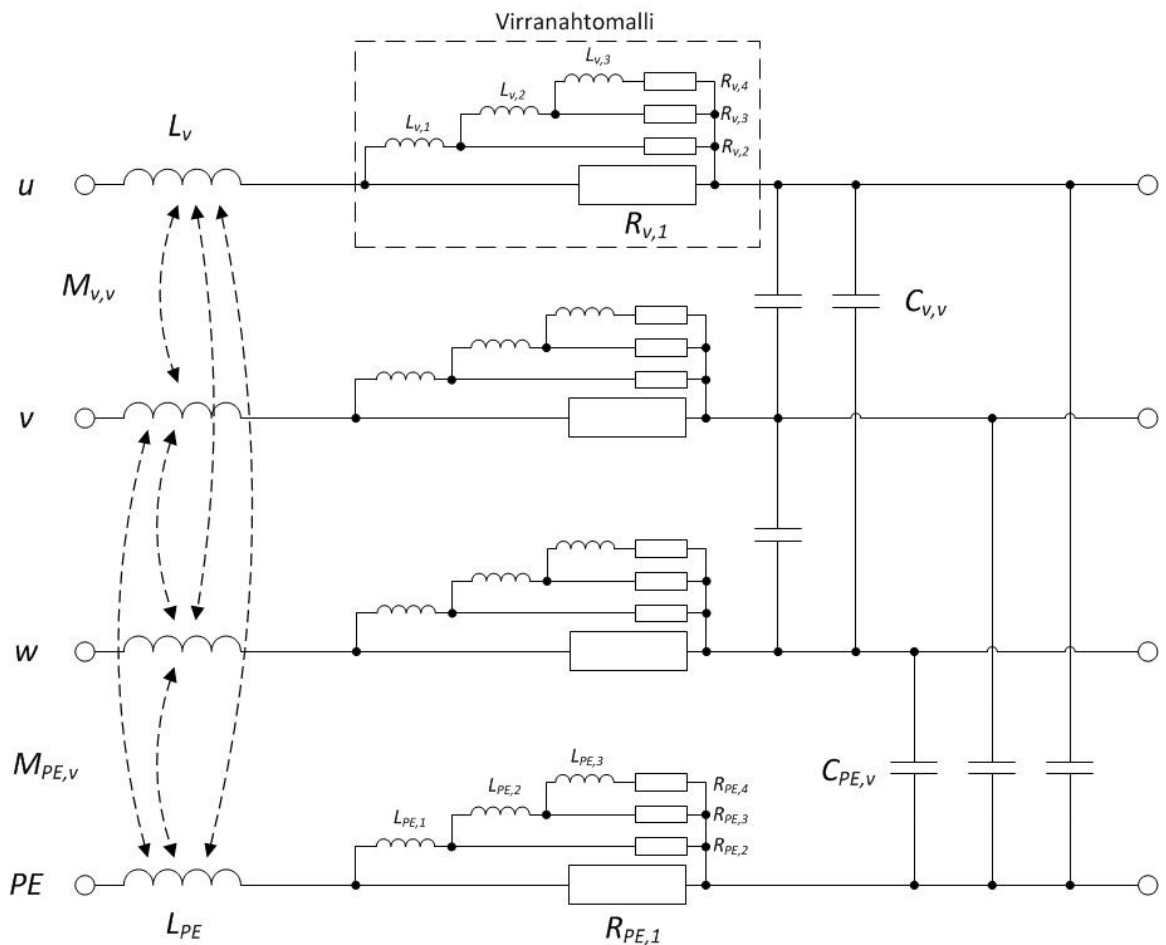


Kuva 4.3: Simuloinneissa käytettyjen kaapeleiden poikkileikkaukset. Vasemmalla kaivoskaapeli, jossa jokaisella vaihejohtimella on oma suojajohdin. Oikealla MCMK-kaapeli, jossa suojajohdin on rakennettu kaikkien vaihejohtimien ympärille.

Kaapeleiden poikkileikkausten kuvasta nähdään, että kaivoskaapelin halkaisija on lähes kaksinkertainen MCMK-kaapelin halkaisijaan nähden, vaikka molemmissa kaapeleissa kunkin vaihejohtimen poikkipinta-ala on 240 mm^2 . Kaivoskaapelissa vaihejohtimien etäisyydet toisistaan ovat huomattavasti suuremmat, jolloin vaiheiden väliset hajasuureet jäävät pienemmiksi. Vaiheiden ja PE-johdinten väliset etäisyydet ovat kaapeleissa samansuuruisia, koska kaapeleiden jännitekestoisuudet ovat yhtä suuret. Kaivoskaapelissa vaiheiden ja maan välinen kapasitiivinen kytketyminen on suurempi kuin MCMK-kaapelissa, koska poikkipinta-ala vaiheiden ja PE-johdinten välillä suurempi.

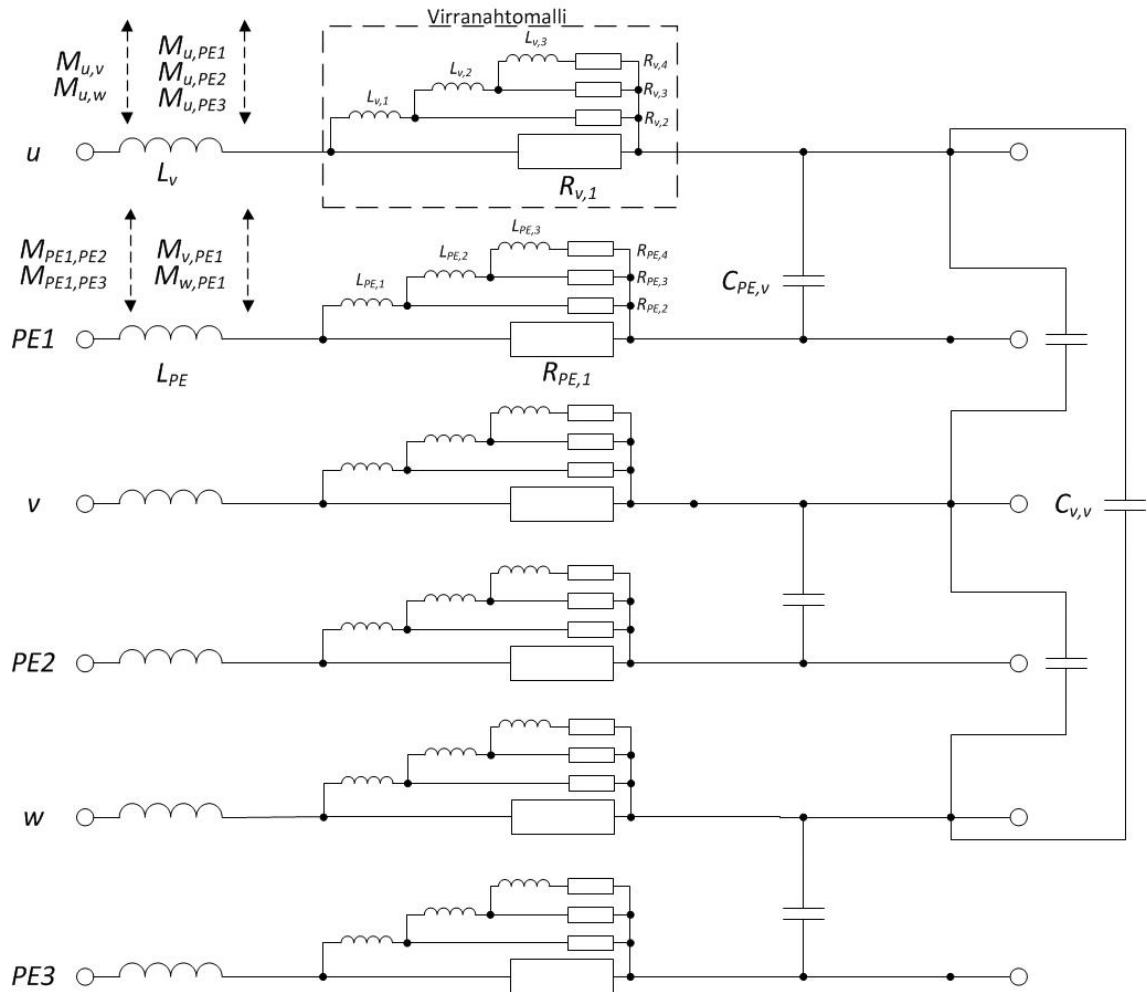
Kuvissa 4.4 ja 4.5 on esitetty kaapelimallien yksittäiset RLC-lohkot, joita voidaan sijoittaa peräkkäin. Yksittäinen RLC-lohko ei kuvaa kaapelia kovin tarkasti. Kokonainen kaapelimalli jaetaan useaan sarjaan kytkettyyn RLC-lohkoon ja tällöin mallin aiheuttama virhe pienenee. Lohkojen lisääminen kuitenkin pidentää mallin simulointia huomattavasti. Vastaavasti, mitä useampi lohko malliin lisätään, sitä vähemmän tulokset mallissa muuttuvat. Tästä syystä mallin koko optimoidaan virheiden suuruuden ja simulointiajan välillä.

Kuvassa 4.4 on esitetty MCMK-kaapelin malli. Kaapeli on jaettu kolmeksi vaihejohtimeksi (u , v ja w) ja yhdeksi suojajohtimeksi. Jokaisella johtimella on omat resistanssit ja induktanssit ja näiden lisäksi johtimilla on toisiinsa vaikuttavat induktanssit ja kapasitanssit. Johdinten induktansseista on huomioitu itseisinduktanssit L_v ja L_{PE} sekä keskinäisinduktanssit $M_{v,v}$ ja $M_{PE,v}$. Kaapelien taajuusriippuvuutta on kuvattu virranahdomallilla, joka muodostuu tikapuumallin resistansseista $R_{v,1...4}$; $R_{PE,1...4}$ ja induktansseista $L_{v,1...4}$; $L_{PE,1...4}$. Lisäksi mallissa on otettu huomioon johdinten välisiä hajakapasitansseja $C_{v,v}$ ja $C_{PE,v}$.



Kuva 4.4: MCMK-kaapelin kaapelimallin piirikaavio.

Kuvassa 4.5 on esitetty kaivoskaapelin malli. Mallissa PE-johdin on jaettu kolmeen osaan $PE1$; $PE2$ ja $PE3$, kuten kuvassa 4.3. Tällöin johdinten välisiä kytkeytymisiä täytyy kuvata useammalla keskinäisinduktanssilla, kuin yksittäisen suojajohtimella. Jokaisesta vaihejohtimesta on keskinäisinduktanssi kahteen muuhun vaiheeseen, sekä lisäksi kaikkiin kolmeen PE-johtimeen. Lisäksi jokaisesta PE-johtimesta on keskinäisinduktanssi toisiin PE-johtimiin. Hajakapasitanssien määrää ei ole lisätty, koska PE-johdinten välisiä kapasitansseja ei ole kuvattu malliin. Nämä hajakapasitanssit olisivat suuruudeltaan niin pieniä, etteivät ne vaikuttaisi oleellisesti tuloksiin ja ne on päätetty jättää huomioimatta.



Kuva 4.5: Kaivoksiin soveltuvan kaapelin piirimalli. PE-johdin on kolmeosainen, jolloin jokainen vaihejohtimen ympärillä on PE-johdin.

Kaapelimallin yksittäisen johtimen taajuusriippuvuutta kuvataan virranahdomallilla, joka on rajattu katkoviivalla kuvissa 4.4 ja 4.5. Virranahdomalli on rakennettu RL -tikapuumallina, jolla pystytään muodostamaan kaapelin resistanssin ja induktanssin taajuusriippuvuudesta sovite. Kaapelille lasketaan resistanssin ja induktanssin arvot halutulle taajuusalueelle. Laskentaan löytyy useita kaupallisia ohjelmia. Työn yhteydessä laskennassa käytettiin *ANSYS Maxwell*:iä laskemaan kaapelin poikkileikkauksen perusteella resistanssin ja induktanssin taajuusriippuvuudet. Resistanssin ja induktanssin taajuusriippuvuuksien ollessa selvillä rakennetaan niille sovite RL -tikapuumalli, joka kuvaa mahdollisimman tarkasti laskettuja käyriä halutulla taajuusalueella.

Tasavirralla virranahdomalli on vain neljän resistanssin rinnankytkentänä. Tämä johtuu induktansseista, jotka ovat taajuusriippuvia. Pienillä taajuuksilla induktansseista syntyvä reaktanssi on pieni. Koska resistanssien arvot ovat noin kymmenkertaisia toisiinsa nähden, tasavirran näkemä kokonaisresistanssi määräytyy pienimmän resistanssin mukaan. Kahden rinnankytketyn resistanssin kokonaisresistanssi saadaan laskettua yhtälön 4.1 mukaisesti. Yhtälössä on oletettu, että $R_3 = 10R_4$.

$$R_{tot} = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} = \frac{10 R_4 R_4}{10 R_4 + R_4} = \frac{10}{11} R_4 \approx R_4 \quad (4.1)$$

Vaihtovirralla tulee huomioida myös induktanssit. Mitä suuremmaksi virran taajuus kasvaa, sitä suurempi vaikutus induktansseilla on. Induktanssien läpi muodostuvan impedanssin arvo kasvaa, kun virran taajuus kasvaa. Jos vaihtovirran taajuus olisi äärettömän suuri, vaihtovirta näkisi virranahtomallin pelkkänä resistanssina R_l , koska impedanssien läpi ei pääsisi yhtään virtaa.

Taajuusmuuttajakäytössä käytetään useimmiten kolmivaihekaapeleita, joissa kaikkien kolmen vaiheen johtimet ovat yhden kaapelin sisällä. Tällöin hajainduktanssi ja hajakapasitanssi vaiheiden välillä pystytään mitoittamaan samansuuruisiksi. Erityistilanteissa joudutaan käyttämään yksivaihekaapeleita, jolloin jokaisella vaihejohtimella on oma kaapelinsa. Yksivaihekaapeleita käytettäessä hajasuureiden arvot eivät ole vaiheiden välillä yhtä suuria, koska johtimet eivät ole kiinteästi tietyllä etäisyydellä toisistaan. Kaapeleiden pituuksien mitoitus on vaikeampaa, kun hajakapasitanssit eivät ole samansuuruisia. Hajakapasitanssit riippuvat kaapeleiden lisäksi, miten kaapelit tullaan asentamaan lopulliselle käyttöpaikalle. On myös mahdollista, että kuormaa tullaan liikuttamaan käytön aikana, jolloin tarkastelu tulisi tehdä pahimman tilanteen varalta.

4.4 Taajuusmuuttajamalli

Taajuusmuuttajamalli on rakennettu jännitevälipiirillisestä nelikvadranttikäytöstä, jossa käytetään IGBT-komponentteja kytkiminä sekä tasa- että vaihtosuuntauksessa. Tällöin energia pystytään siirtämään välipiiristä myös verkkoon.

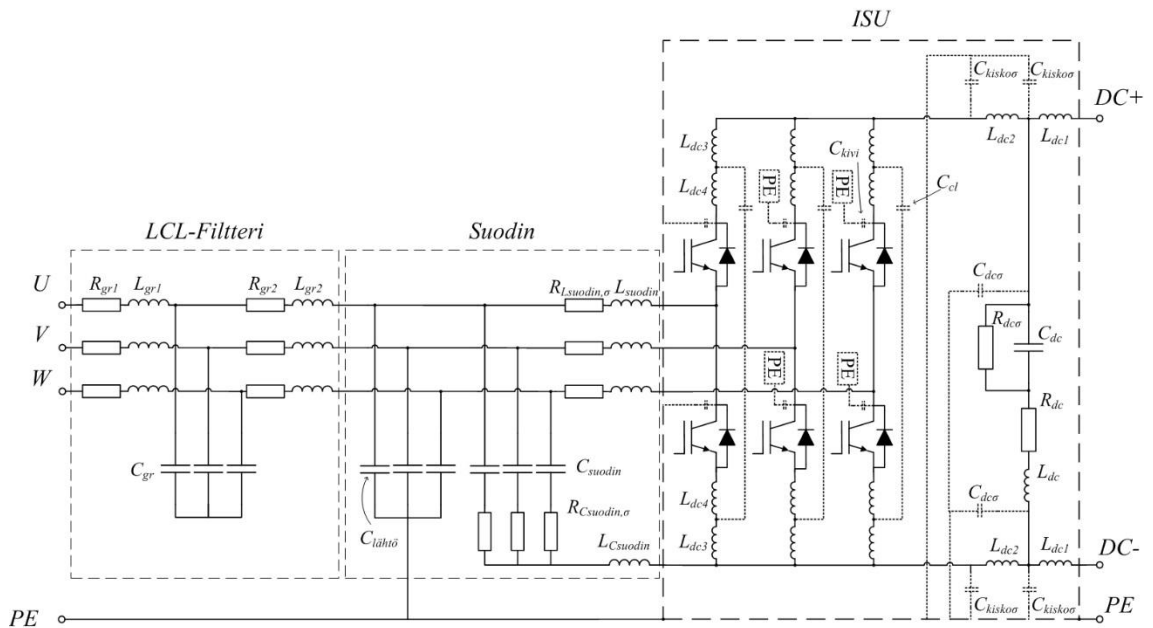
Taajuusmuuttajamalli on jaettu kahteen osaan, tasa- ja vaihtosuuntaajaan, koska taajuusmuuttaja kootaan usein kahdesta eri moduulista. Tällä ratkaisulla simulointimallia voidaan helposti muokata. Osien väliin voidaan lisätä hajasuureita, jotka aiheutuvat osien etäisyydestä tai hajasuureet voidaan poistaa, kun osat on asennettu kiinni toisiinsa. Lisäksi tämä mahdollistaa mallin muokkaamisen esimerkiksi aurinko-inverteriksi, jossa DC-jännite synnytetään aurinkopaneelilla ja tehoa siirretään INU:n kautta verkkoon.

Yksittäisen IGBT-sillan malli on rakennettu Petri Mäki-Onton, Henri Kinnusen ja Jorma Luomen julkaisussa [7] esittelemän piirikaavion pohjalta. Piirikaaviosta on jätetty pois diodi-silta ja lisätty hajakapasitansseja taajuusmuuttajan kaapin ja johtavien osien väliin. Näistä IGBT-silloista on rakennettu ISU ja INU, jotka on esitetty kuvissa 4.5 ja 4.6. Kuviin ei ole piirretty IGBT-komponenttien hilaohjausta.

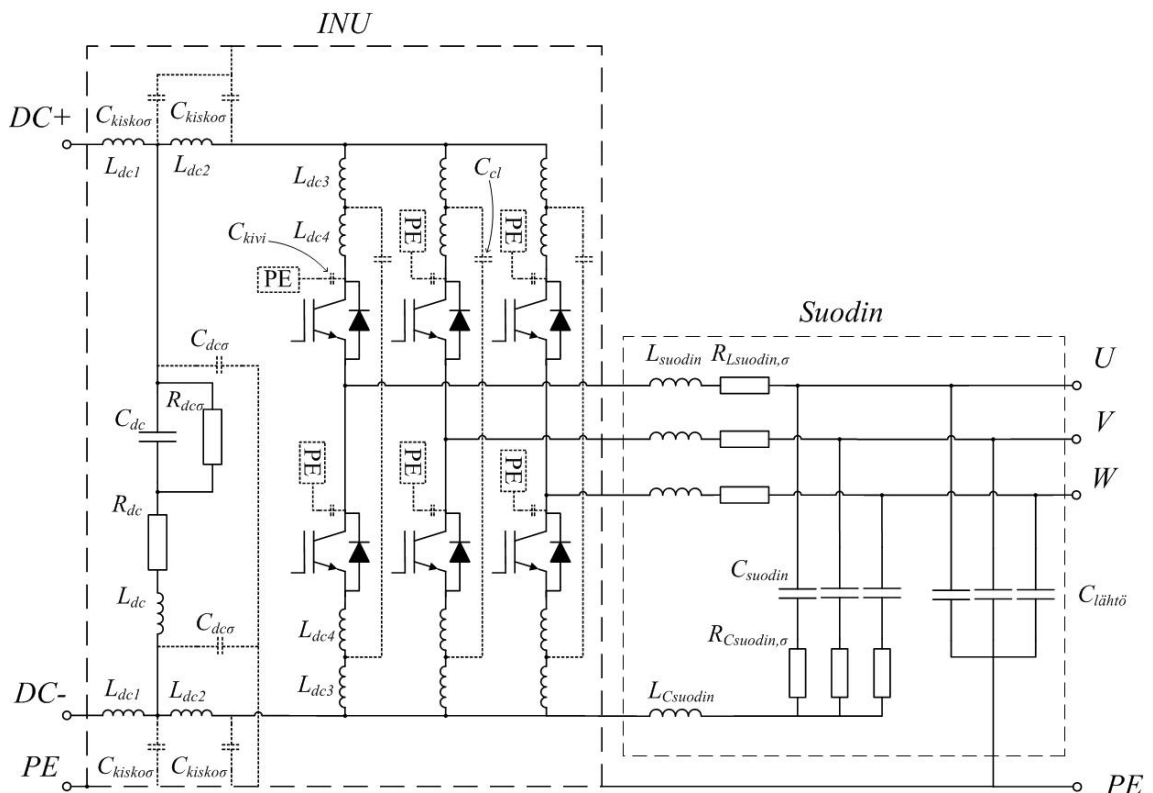
Kytkinten aukaisu ja sulku tapahtuu IGBT:eiden hilan jännitettä muuttamalla. Positiivinen hilan jännite aukaisee virtatien kytkimen läpi ja negatiivinen hilan jännite sulkee virtatien.

Yhteismuotoisten virtojen kannalta on tärkeää kuinka lähemmäksi kytkentöjä tapahtuu, millainen jännitteenmuutos kytkennästä syntyy sekä kuinka lähemmäksi ISU:n ja INU:n kytkennät tapahtuvat. Koska mallista käytössä olevassa DTC-säädössä kytkennät tapahtuvat täysin satunnaisesti, on vertailukelpoisten kytkentäsykliä keinotekoinen tuottaminen varsin mahdotonta. Kytkentäsyklistä onkin nauhoitettu oikeasta sovelluksesta, jossa on

ajettu tyhjäkäyvä moottoria. Tällöin kytkentäsykleistä saadaan realistiset. Simulointeja voidaan myös helposti vertailla keskenään, kun kytkennät tapahtuvat aina samaan aikaan.



Kuva 4.5: Taajuusmuuttajan ISU:n malli



Kuva 4.6: Taajuusmuuttajan INU:n malli

ISU-malliin on sisällytetty LCL-filtteri, jonka tehtävänä on suojata kiinteää verkkoa taajuusmuuttajan tuottamilta korkeataajuisilta yliaalloilta. LCL-filtteri on mallinnettu taajuusmuuttajaan, koska tasasuuntauksessa on käytetty IGBT-siltaa. IGBT-komponenteilla käytettävä moduloinnin kytkentätaajuus on niin suuri, että suodatettavia taajuuskomponentteja esiintyy paljon ja suodatus on välttämätöntä. Jos käytettävät kytkinkomponentit olisivat diodeja, LCL-filtteriä ei kannattaisi käyttää. Lisäksi ISU:ssa ja INU:ssa on suotimet, joiden tehtävänä on suodattaa kytkennöistä syntyviä hyvin korkeataajuisia virtoja.

ISU:n ja INU:n päävirtapiiri on rakennettu vaihejohdinten ja välipiirin kiskojen välissä olevista kuudesta kytkimestä, jotka yhdistävät välipiirin ja kolme vaihejohdinta. Kytkiminä käytetään IGBT-komponentteja sekä vastarinnankytkettyjä diodeja.

Välipiirin kondensaattorin C_{dc} epäideaalisuutta on kuvattu vuotovirralla $R_{dc\sigma}$. Kondensaattorin ja kiskojen välisten johdinten resistanssit ja induktanssit on kuvattu suureilla R_{dc} ja L_{dc} . Välipiirin kiskostoissa kulkeva virta saattaa kasvaa huomattavan suureksi. Virta muodosta johtimien ympärille magneetikentän, johon varastoituu energiaa. Ilmiötä kuvataan induktansseilla L_{dc1} , L_{dc2} , L_{dc3} ja L_{dc4} .

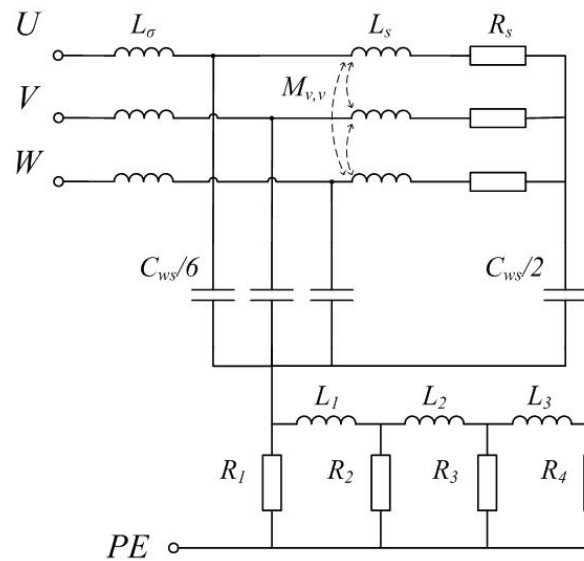
Yhteismuotoisten virtojen tarkastelussa hajakapasitanssien huomioiminen on tärkeää, koska hajakapasitanssit muodostavat yhteismuotoisille virroille lisää kulkureittejä. Moduulien tiukka rakenne aiheuttaa hajakapasitansseja eri osien välillä, joilla on potentiaaliero. Välipiirissä sekä ylä- että alakiskosta muodostuu potentiaaliero taajuusmuuttajan kaappiin. Hajakapasitansseja kiskojen ja taajuusmuuttajan kaapin välillä on merkitty tunnuksilla $C_{kisko\sigma}$. Välipiirin kondensaattorin hajakapasitansseja kaappiin on merkitty tunnuksella $C_{dc\sigma}$.

Jokaisen vaiheen kytkinten yli muodostuu hajakapasitanssi C_{cl} , joka syntyy kytkinkomponenttien kiinnittimisestä. Ylä- ja alakisko ovat niin lähellä toisiaan, että osien väliin syntyy kapasitansseja. Piirikaaviosta voidaan kuitenkin huomata, että kyseiset kapasitanssit ovat rinnankytkettynä välipiirin kondensaattorin kanssa. Tällöin kyseinen kapasitanssi summautuu välipiirin kondensaattorin kapasitanssiin.

Kytkimistä kaapin rungon maadoitukseen muodostuvia hajakapasitansseja on kuvattu suureilla C_{kivi} . Kytkinten kytkentätaajuus on niin suuri, että pienetkin kapasitanssit aiheuttavat virtoja ja ne on otettava huomioon.

4.5 Moottori

Moottorimalli on rakennettu kuvan 4.7 mukaisella sijaiskytkennällä. Malli kuvaa tyhjäkäyvästä moottoria, johon on kuvattu kapasitiivisiä kytkeytymisiä moottorissa. Mallin perustana on käytetty Petri Mäki-Onton, Henri Kinnusen ja Jorma Luomen julkaisussa [7, s. 1675] esittelemää moottorimallia. Mallista on jätetty pois roottori, kuten julkaisussa mainitaan tyhjäkäyvästä moottoriin riittää staattorin mallintaminen.



Kuva 4.7: Moottorimallin piirikaavio

Mallissa on kuvattu staattorin resistanssit R_s , staattorin hajainduktanssit L_s ja L_σ , keskinäisinduktanssit $M_{v,v}$ sekä staattorin ja moottorin levypakan väliset hajakapasitanssit C_{ws} . Näiden lisäksi mallissa on otettu huomioon levypakan virranahtomalli tikapuumallina.

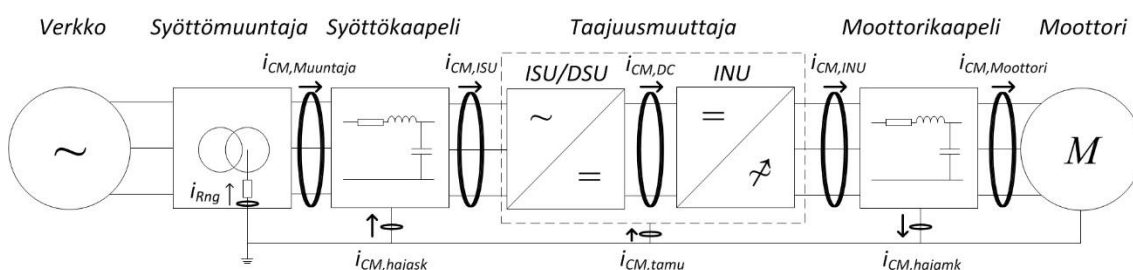
Staattorin ja levypakan väliset kapasitanssit on jaettu kahteen osaan. Ensimmäinen osa on sijoitettu staattorin hajainduktanssien L_s ja resistanssien R_s etupuolelle ja toinen osa näiden jälkeen. Jälkimmäiseen osaan kapasitansseja on summattu kaikkien kolmeen vaiheen kapasitanssit yhteen. Virran kulkureittiä moottorin levypakassa on kuvattu tikapuumallina vastuksilla R_{1-4} ja induktansseilla L_{1-4} .

5 Simulointimallin tarkastelut

Luvussa käydään läpi erilaisia simulointitapauksia, joilla on pyritty havainnollistamaan miten taajuusmuuttajakäytön rakenne vaikuttaa yhteismuotoiseen virtaan ja maasulkuvirtaa.

Simuloinneissa on käytetty luvussa 4 esitettyä simulointimallia. Mallin simuloinneissa käytettyjä muuttujia ovat muun muassa moottori- ja syöttökaapeli pitoudet, moottorin hajakapasitanssi, taajuusmuuttajan verkkosillan ratkaisu ja maasulun sijaintiverkossa.

Kuvassa 5.1 on esitetty simulointimallin piirikaavio, johon on merkitty tuloksissa tarkasteltavien virtojen mittauspisteet.



Kuva 5.1: Simulointituloksien tarkasteluissa käytettyjen virtojen mittauspisteet.

Kuvassa esitetyt yhteismuotoisten virtojen mittauspisteet ovat syöttömuuttajan lähtö $i_{CM,Muuntaja}$, ISU:n sisäänmeno $i_{CM,ISU}$, välipiiri $i_{CM,DC}$, INU:n ulostulo $i_{CM,INU}$, moottori $i_{CM,Moottori}$ sekä syöttömuuttajan tähtipisteen maadoitusvastus $i_{CM,Rng}$. Näiden lisäksi kuvaan on merkitty hajakapasitanssien läpi kulkevat virrat syöttö- $i_{CM,hajask}$ ja moottorikaapeleissa $i_{CM,hajamk}$ sekä taajuusmuuttajassa $i_{CM,tamu}$.

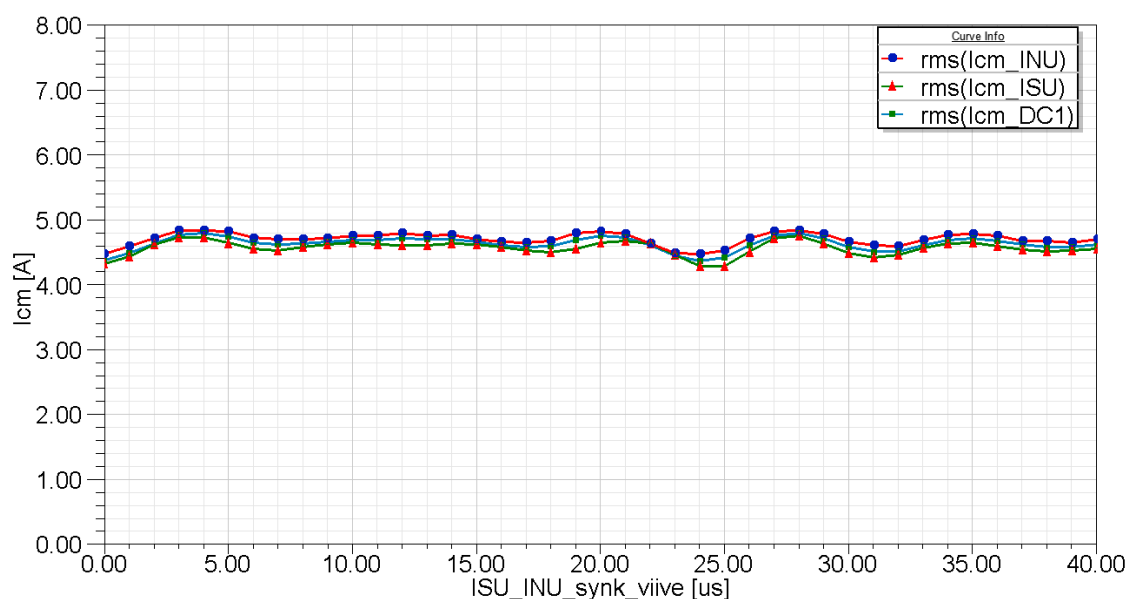
5.1 ISU:n ja INU:n ohjauksen synkronointi

Simulointimallissa ISU:n ja INU:n ohjauskytkennät on toteutettu todellisesta taajuusmuuttajasta nauhoitetuilla ohjauskytkennöillä. Kytkennät tapahtuvat tällöin aina tietyillä hetkillä jokaisella simulointikerralla. Kytkentöjen ajanhetkillä on suuri merkitys yhteismuotoisen jännitteen ja virran kannalta. Sopivilla kytkennöillä ISU:n ja INU:n samanlaiset kytkennät saattavat kumota toistensa vaikutukset yhteismuotoiseen jännitteeseen, jolloin yhteismuotoista virtaa syntyy vähemmän. Siltojen keskinäisten kytkentöjen synkronoinnilla voidaan vaikuttaa yhteismuotoisen jännitteen ja virran suuruuteen.

Luvussa käydään läpi simulointi, jolla pyrittiin selvittämään miten paljon yhteismuotoisen virran tehollisarvo riippuu kytkentöjen synkronoinnista. Tulosten perusteella on pyritty selvittämään synkronointiaika, jolla yhteismuotoinen virta on suurimmillaan eli etsitään synkronointiaika pahimmalle mahdolliselle tilanteelle.

Mallin ainoana muuttujana simuloinnissa on käytetty siltojen kytkentöjen välistä synkronointiaikaa. INU:n kytkennät aloitetaan jokaisessa simuloinnissa simuloinnin alusta.

Ensimmäisessä simuloinnissa ISU:n kytkennät aloitetaan myös heti simuloinnin alusta. Tämän jälkeen ISU:n kytkentöihin lisätään kasvavasti mikrosekunnin viive jokaisen simuloinnin välissä. Kuvassa 5.2 on esitetty virtojen $i_{CM,ISU}$, $i_{CM,DC}$ ja $i_{CM,INU}$ tehollisarvot ISU:n ja INU:n kytkentöjen synkronisen viiveen funktiona. Tehollisarvo on laskettu simulointiajalta 0,3 – 1,0 ms. Tehollisarvon laskeminen on aloitettu ajanhetkestä 0,3 ms, jolloin simuloinnin aloituksesta syntyvät värähtelyt ovat vaimenneet riittävän pieniksi. Koska virtojen arvot on laskettu tehollisarvoina, saatu tulos ei kerro kytkennöistä syntyvien virtapiikkien suuruudesta. Virtapiikit ovat kriittisiä jännitetarkasteluissa. Tässä tapauksessa on oleellista tarkastella virran vaikutusta siirtyvään tehoon, joka vaikuttaa maadoitusvastuksen lämpenemiseen ja maasulkusuojan toimintaan.



Kuva 5.2: $i_{CM,ISU}$:n, $i_{CM,DC}$:n ja $i_{CM,INU}$:n tehollisarvot ISU:n ja INU:n välisten kytkentöjen synkronisen viiveen funktiona. Kunkin virran simulointitulokset on yhdistetty viivoilla, jotka helpottavat tulosten muutosten havaitsemista.

Kuvasta nähdään yhteismuotoisen virran muuttuvan varsin vähän, kun synkronista viivettä muutetaan. Viiveen muuttaminen vaikuttaa yksittäisten kytkentöjen synnyttämään yhteismuotoiseen virtaan. Virran tehollisarvoon vaikuttaa kaikkien kytkentöjen synnyttämä virta, jolloin yksittäisistä kytkennöistä syntyvät suuremmat virtapiikit tasoittuvat kokonaisuuteen. Yhteismuotoisten virtojen tehollisarvot saavat suurimmat arvonsa viiveillä 4 μ s:a, 20 μ s:a ja 28 μ s:a. 28 μ s:n viive on valittu käytettäväksi myöhempisiin simuloimoihin.

5.2 Kaapelimallin lohkojen lukumäärä

Kaapelimalli on rakennettu RLC-lohkoista, jotka kuvaavat kaapelin sähköisiä ominaisuuksia. Lohkoista rakennetulla mallilla pyritään kuvaamaan todellista kaapelia mahdollisimman tarkasti. Mallista syntyy kuitenkin aina virhettä. Todellisessa kaapelissa kaikki sähköiset ominaisuudet ilmenevät koko kaapelin pituudella. RLC-lohkoissa ominaisuudet

on kuvattu perättäin. Ensin kuvataan resistanssi, sitten induktanssi ja lopuksi kapasitanssi. Tällöin lohkon eri osat painottuvat eri kohdille kaapelia. Lisäämällä perättäisiä lohkoja päästään lähemmän todellista kaapelia, kun yksittäisen lohkon kuvaama kaapelin pituus pienenee.

Seuraavaksi tarkastellaan simulointeja, joissa tarkastellaan kaapelimallin lohkojen lukumäärän vaikutusta yhteismuotoisen virran suuruuteen. Simuloinneissa on käytetty mallia, jossa syöttökaapelin pituus on viisi metriä, moottorikaapeli on 700 metriä ja RLC-lohkojen lukumäärää vaihdetaan yhdestä, kolmeen, viiteen sekä kymmeneen lohkoon. Syöttökaapeli on valittu tarkoituksella lyhyeksi ja moottorikaapeli pitkäksi, jolloin nähdään miten kaapelimallin lohkojen määrä vaikuttaa sekä pitkään, että lyhyeen kaapeliin.

Taulukkoon 5.1 on kerätty mittauspisteiden virtojen tehollisarvojen tulokset. Tuloksista nähdään $I_{CM,ISU}$:n vaihdelleen välillä 4,88 A ja 4,80 A, jolloin eri lohkojen lukumäärien välillä tuloksiin syntyy ero 0,08 A. $I_{CM,DC}$:lla ja $I_{CM,INU}$:lla vaihtelut suurimman ja pienimmän arvon välillä olivat 0,13 A ja 0,71 A.

Taulukko 5.1: $I_{CM,ISU}$:n, $I_{CM,DC}$:n ja $I_{CM,INU}$:n simulointitulokset, kun syöttökaapelin pituus oli 5 metriä ja moottorikaapelin pituus oli 700 metriä.

Lohkoja	$I_{CM,INU}$ [A]	$I_{CM,ISU}$ [A]	$I_{CM,DC}$ [A]
1	6,42	4,86	5,56
3	6,55	4,85	5,55
5	5,97	4,80	5,43
10	5,84	4,88	5,44

$I_{CM,INU}$:n suuri vaihtelu johtuu kaapelin suuresta pituudesta. Kun kaapeli on mallinnettu yhdellä lohkoilla, sen mitta on 700 metriä. Koko kaapelin induktanssi on yhdessä osassa kaapelin alkupäässä ja koko kapasitanssi on yhdessä osassa johtimen loppupäässä. Näiden väliin sijoitetaan kaapelin resistanssi, joka vaimentaa induktanssista ja kapasitanssista syntyviä ilmiöitä. Kun koko induktanssi on kaapelin alkupäässä, resistanssi ei pääse vaimentamaan INU:lta tulevia jännitteen tai virran aaltomuotoja. Vastaavalla tavalla moottorilta heijastuvat jänniteaallot latautuvat kapasitanssiin vaimenemattomina. Kun kaapeli jaetaan useampaan osaan, kaapelin resistanssi vaimentaa kyseisiä ilmiöitä. Tästä johtuen simuloinneilla mitattu yhteismuotoisen virran tehollisarvo laskee, kun kaapelimalliin lisätään RLC-lohkoja.

5.3 Kaapelien pituuksien vaikutus yhteismuotoisiin virtoihin

Luvussa tarkastellaan, kuinka moottori- ja syöttökaapelien pituuden muuttaminen vaikuttaa syntyvään yhteismuotoiseen virtaan. Tarkoituksena on selvittää, miten kaapeleiden pituudet vaikuttavat yhteismuotoiseen virtaan ja miten tämä vaikuttaa maasulkusuojan toimintaan.

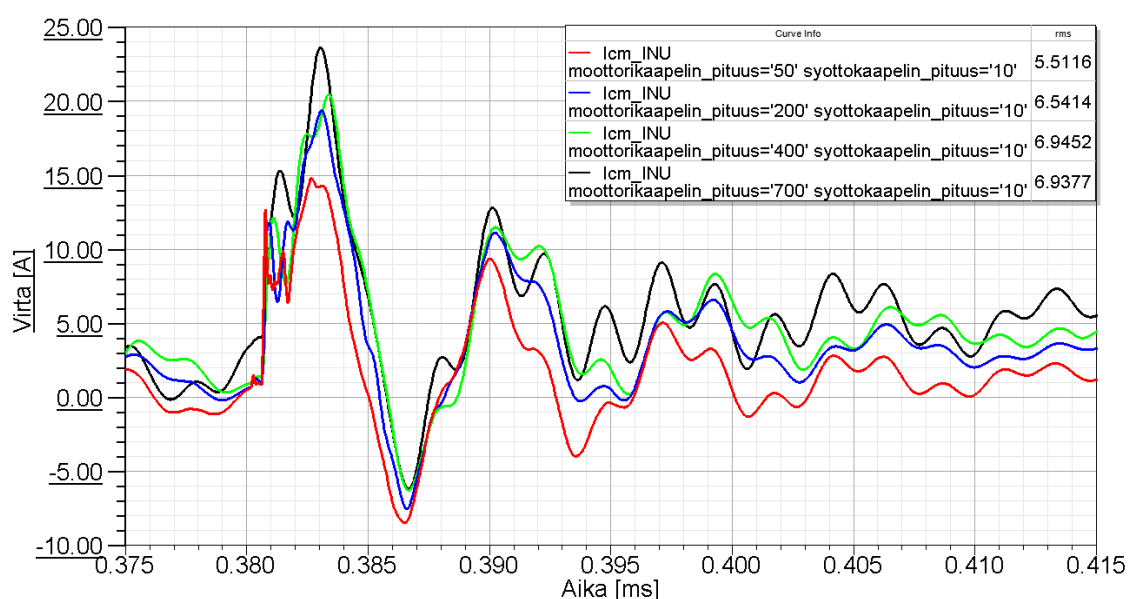
Seuraavaksi on esitetty simulointitulokset, joissa on havainnollistettu kaapelien pituuksien vaikutusta yhteismuotoisen virran suuruuteen. Ensinnäkin käy läpi moottorikaapelien pituuden vaikutus ja tämän jälkeen on käyty läpi syöttökaapelien pituuden vaikutus yhteismuotoiseen virtaan.

5.3.1 Moottorikaapelien pituuden vaikutus yhteismuotoiseen virtaan

Seuraavaksi on esitelty simulointitulokset, joissa luvun 4 mukaista mallia on simuloitu moottorikaapelien pituuksilla 50, 200, 400 sekä 700 metriä. Syöttökaapelien pituus on 10 metriä. Kaapelimalleina on käytetty kuvan 4.4 mukaista kaivoskaapelien mallia. Kaapelimallit on jaettu viiteen RLC-lohkoon. Tuloksina on esitelty yhteismuotoisen virran käyrämuotoja ja tehollisarvoja verkon eri kohdissa. Simulointien kokonaisaikana käytettiin yhtä millisekuntia. Tehollisarvot on laskettu simulointien aikaväliltä 0,3 – 1 ms, jolloin simuloinnin käynnistyksessä syntyvät alkuvärähtelyt kerkeävät vaimentua pois.

Kuvassa 5.3 on esitetty $i_{CM,INU}$ eri moottorikaapelien pituuksilla. Kuvassa näkyy INU:n kytkimen kytkennästä johtuva virtapiikki alkaen ajanhetkestä 0.381 ms.. Kytkennästä syntyvän virtapiikin korkeus riippuu moottorikaapelien pituudesta ja tyypistä. Mitä suurempi kaapelien yhteismuotoinen kapasitanssi, eli vaiheiden ja maan välinen kapasitanssi on, sitä suuremmaksi syntyvä virtapiikki muodostuu. Simulointien perusteella 700 metrin kaapelilla virtapiikki on lähes kymmenen ampeeria korkeampi kuin 50 metrin kaapelilla.

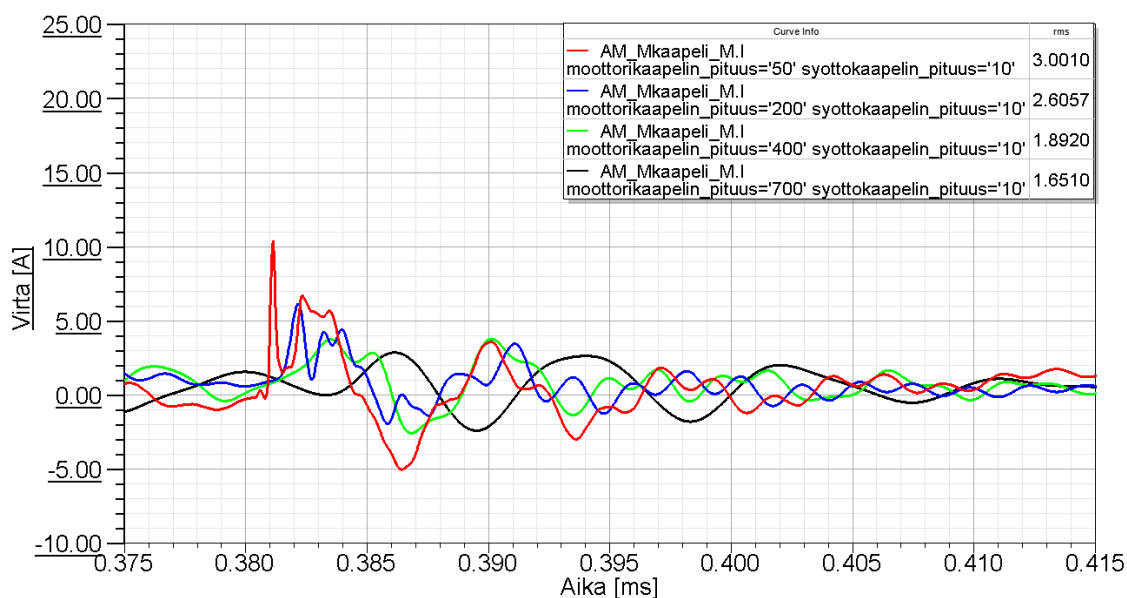
Käyrämuodoista nähdään virtojen sisältävän useita eri taajuuksikomponentteja. Heti kytkennän ajanhetkellä 0.381 ms 50 metrin moottorikaapelilla nähdään hyvin korkeataajuisia megahertsien tasolla olevaa värähtelyä, joka vaimentuu hyvin nopeasti. Tämän jälkeen matalataajuisempi taajuuksikomponentti, noin 70 kHz, nostaa virtapiikin huippuunsa ajanhetkellä 0.383 ms. Ajanhetkellä 0.391 ms nähdään 700 metrin kaapelien simuloinnissa kuinka virtapiikistä leikkaantuu huippu pois. Tämä syntyy, kun virtapiikki heijastuu takaisin moottorista ja palaa takaisin.



Kuva 5.3: $i_{CM,INU}$ ajan funktiona eri moottorikaapelien pituuksilla.

Tehollisarvoissa syntyy eroja simulointien välillä, kun moottorikaapelin pituutta vaihdetaan. Simulointikäyrien perusteella ero johtuu matalien taajuuskomponenttien vaimenemisesta, joka tapahtuu lyhyillä kaapeleilla hieman nopeammin. Kuvasta 5.3 voidaan nähdä kuinka aikavälillä 0.41 ja 0.415 ms virtakäyrät ovat järjestyksessä kaapelin pituuden mukaisesti. Pidemmällä moottorikaapeleilla virran hetkellisarvot ovat suurempia.

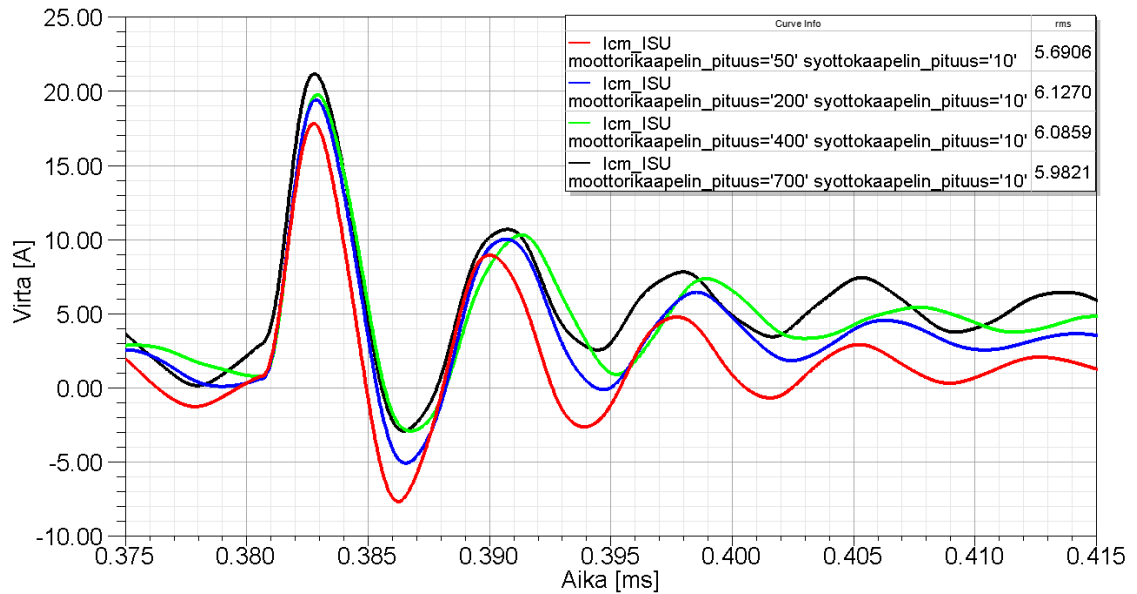
Kuvassa 5.4 on esitetty $i_{CM,Moottori}$ ajan funktiona. Eri simulointien välillä virtojen taajuussisältö muuttuu selvästi. Erityisesti 700 metrin moottorikaapelilla simuloidussa tapauksessa virran taajuus on hyvin alhainen, eikä sisällä korkeataajuisia komponentteja. Kuvasta nähdään myös kuinka kytkennästä syntyvä virtapulssi saavuttaa moottorin maadoitusjohtimen 700 metrin kaapelilla vasta ajanhetkellä 0.386 ms, kun 50 metrin kaapelilla virtapulssi näkyy ajanhetkellä 0.381 ms.



Kuva 5.4: $i_{CM,Moottori}$ ajan funktiona eri moottorikaapelin pituuksilla.

Kuvan 5.3 mukaisesti $i_{CM,INU}$ kasvaa hieman, kun moottorikaapelin pituutta kasvatetaan. Kuvasta 5.4 nähdään vastaavasti $i_{CM,Moottori}$ pienenee, kun moottorikaapelin pituutta kasvatetaan. $i_{CM,hajamk}$ voidaan laskea, kun $i_{CM,INU}$:sta vähennetään $i_{CM,Moottori}$. $i_{CM,hajamk}$:aan vaikuttaa hyvin paljon moottorikaapelin pituus.

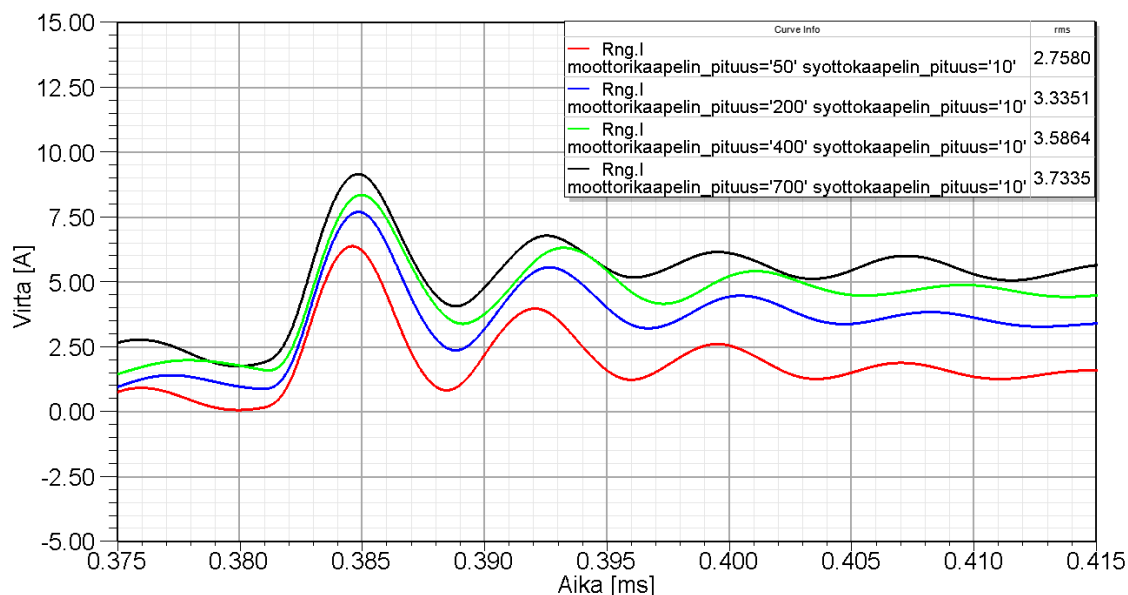
Kuvassa 5.5 on esitetty $i_{CM,ISU}$ ajan funktiona eri moottorikaapelin pituuksilla. Kyseinen virtapulssi vastaa kuvassa 5.3 esitettyä $i_{CM,INU}$:sta piirrettyä käyrää. Virtojen käyrien suurimpina eroina ovat käyrien korkeataajuiset komponentit. $i_{CM,INU}$ sisältää huomattavan määrän korkeataajuisia komponentteja, jolloin käyrästä syntyy teräväreunainen ja nopeasti aaltoileva. Vastaavasti $i_{CM,ISU}$:n käyrämuodosta syntyy tasaisesti aaltoileva käyrä, josta nähdään aallon huiput ja pohjat sekä niiden toistuvan tasaisin väliajoin.



Kuva 5.5: $i_{CM,ISU}$ ajan funktiona eri moottorikaapelin pituuksilla.

$i_{CM,ISU}$ pysyy lähes vakiona moottorikaapelin pituutta muutettaessa. Pidemmällä moottorikaapeleilla matalataajuiset komponentit vaimenevat hitaammin. Kuten kuvasta 5.5 nähdään, 700 metrin kaapelilla virtakäyrä jää ajanhetkellä 0.415 ms korkeammalle kuin 10 metrin kaapelilla.

Kuvassa 5.6 on esitetty i_{Rng} . $i_{CM,hajamk}$ saadaan laskettua, kun $i_{CM,ISU}$:sta vähennetään i_{Rng} . Kuvasta voidaan nähdä virtakäyrien sisältävän varsin matalataajuisia komponentteja, jotka vaimenevat myös nopeasti. Pitkillä kaapelin pituuksilla virtakäyrä tasaantuu heilahdelujen jälkeen varsin korkealle tasolle. Kuvassa mustalla viivalla kuvatulla 700 metriä pitkällä moottorikaapelilla virta ei ehdi laskea alle viiden ampeerin. Tämä johtuu kuormapuolen yhteismuotoisen piirin kokonaiskapasitanssin suuresta arvosta. Kuormapuolen kokonaiskapasitanssi koostuu moottorikaapelissa vaiheista maahan kytkeytyvistä hajakapasitansseista sekä moottorin staattorin ja rungon välisistä kapasitansseista. Koska kapasitanssit kytkeytyvät toisiinsa nähden rinnakkain, kokonaiskapasitanssi lasketaan summamalla kapasitanssien arvot yhteen.



Kuva 5.6: i_{Rng} ajan funktiona eri moottorikaapelin pituuksilla.

Simulointitulosten perusteella voidaan sanoa moottorikaapelin pituuden vaikuttavan yhteismuotoisiin virtoihin koko sähkökäytössä. Moottorikaapelin pituutta kasvattamalla moottorikaapelin hajasuureet kasvavat, jolloin vaihejohtinten kytkeytyminen suojajohtimeen lisääntyy. $I_{CM,INU}$ kasvaa kyseisen ilmiön takia. Virran kasvu kaapelin pituuden funktiona hidastuu hyvin pitkillä kaapeleilla, koska moottorin kapasitanssi on kytkeynyt kaapelin kapasitanssien rinnalle ja kokonaiskapasitanssin muutos pienenee.

Samaa tilannetta voidaan tarkastella $I_{CM,Moottori}$:n kohdalla kuvassa 5.4. Kuvasta nähdään virran tehollisarvon pienenevän kaapelin pituuden funktiona. Tämä johtuu $I_{CM,hajak}$:sta, joka kasvaa kaapelin pituuden kasvaessa. Tällöin moottorin kautta kulkee vain $I_{CM,INU}$:n matalataajuiset komponentit, koska moottorin yhteismuotoisen piirin kapasitanssit ovat suurempia kuin kaapelin hajakapasitanssit.

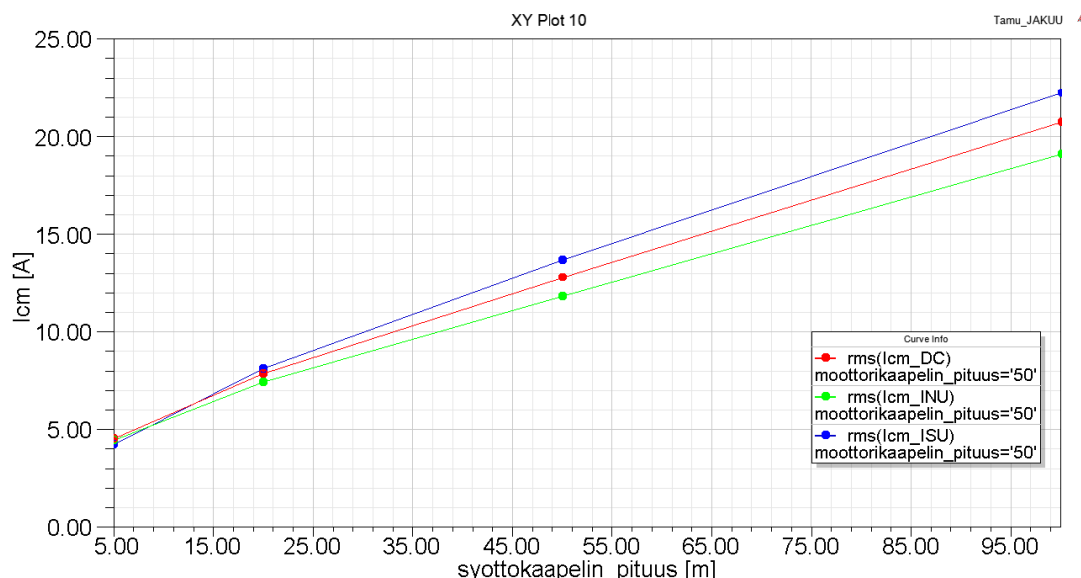
Taajuusmuuttajan syötön puolelle moottorikaapelin pituus ei vaikuta yhtä voimakkaasti kuin kuorman puolelle. Muutokset näkyvät i_{Rng} :ssa ja erityisesti virran matalataajuisissa komponenteissa.

5.3.2 Syöttökaapelin pituuden vaikutus yhteismuotoiseen virtaan

Seuraavaksi on esitelty simulointitulokset, joissa luvun 4 mukaista mallia on simuloitu syöttökaapelin pituuksilla 5, 20, 50 sekä 100 metriä. Moottorikaapelin pituus on 50 metriä. Kaapelimalleina on käytetty kuvan 4.4 mukaista kaivoskaapelin mallia. Kaapelimallit on jaettu viiteen RLC-lohkoon.

Simulointien kokonaisaikana käytettiin yhtä millisekuntia. Simulointitulosten virtojen tehollisarvot on laskettu simulointien aikaväliltä 0,3 – 1 ms.

Kuvassa 5.7 on esitetty $I_{CM,ISU}$, $I_{CM,DC}$ ja $I_{CM,INU}$ syöttökaapelin pituuden funktiona. Simulointipisteet on merkitty kuvaan ympyröin, jotka on yhdistetty viivoilla, jolloin voidaan arvioida miten syöttökaapelin pituus vaikuttaa virtojen tehollisarvoihin myös simulointipisteiden välillä.

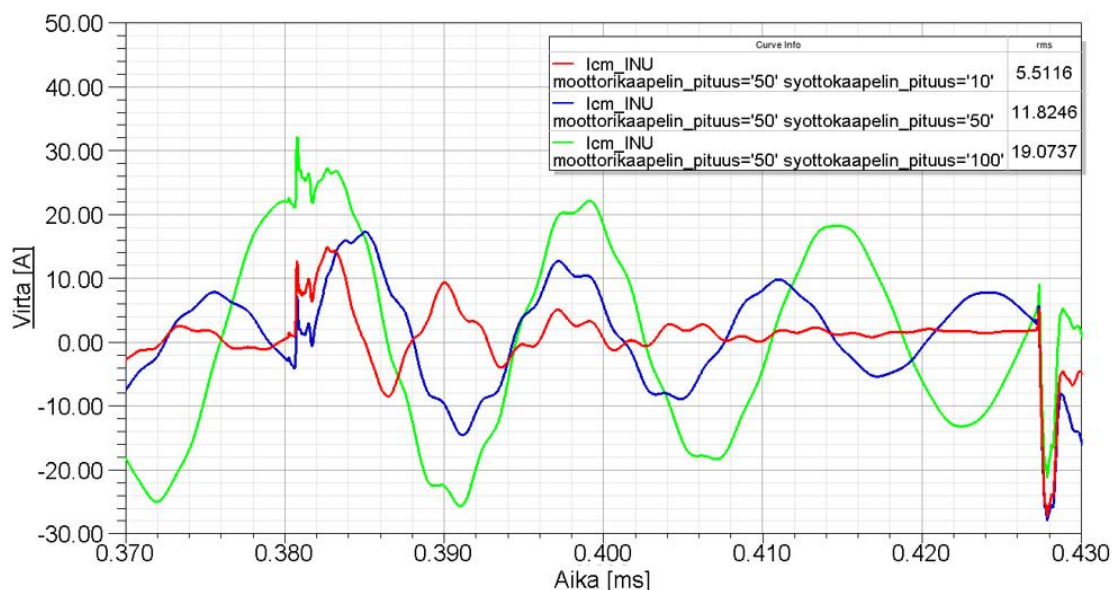


Kuva 5.7: Yhteismuotoisen virran tehollisarvoja syöttökaapelin funktiona. Simuloinnit on tehty syöttökaapelin pituuksilla 5, 20, 50 ja 100 metriä.

Kuvasta 5.7 nähdään $I_{CM,ISU}$:n ja $I_{CM,INU}$:n pysyvän alle viiden ampeerin, kun syöttökaapelin pituus on viisi metriä. Kun syöttökaapelia pidennetään, kasvavat myös virtojen tehollisarvot. Sadan metrin syöttökaapelilla $I_{CM,ISU}$ liittimissä on noin 23 ampeeria ja $I_{CM,INU}$ on noin 19 ampeeria. Voidaan sanoa yhteismuotoisen virran kasvavan huomattavasti syöttökaapelia pidennettäessä sekä että $I_{CM,ISU}$ kasvaa enemmän kuin $I_{CM,INU}$.

Yhteismuotoinen virta kasvaa huomattavasti, kun lyhyttä syöttökaapelia pidennetään. Tämä johtuu verkon ja kuorman puolen kokonaiskapasitanssien suhteesta. Moottorin kapasitanssi on jokaisessa simulointitilanteessa sama ja suhteessa kaapeleihin varsin suuri. Kun syöttökaapelin pituus on noin 5 metriä, on moottorikaapeli sitä kymmenen kertaa pidempi ja kapasitanssit ovat vastaavan verran suuremmat. Yhteismuotoisessa virtapiirissä verkon puolen ja moottorin puolen kapasitanssit kytkeytyvät sarjaan, jolloin kokonaiskapasitanssi saadaan laskettua rinnankytkettyjen vastusten yhtälöstä 4.1. Kuten vastustenkin tapauksessa, huomattavasti pienemmän muuttujan arvo vaikuttaa kokonaisarvoon dominoivasti.

Kuvassa 5.8 on esitetty $i_{CM,INU}$ kytkentähetkellä. Kuvassa on kolme käyrää, jotka kuvaavat simulointeja eri syöttökaapelin pituuksilla. Punainen käyrä vastaa samaa käyrää, kuin kuvan 5.3 punainen käyrä, jossa syöttökaapelin pituus on 10 metriä $i_{CM,INU,sk10}$. Sinisen käyrän simuloinnissa syöttökaapelin pituus on 50 metriä $i_{CM,INU,sk50}$ ja vihreän käyrän simuloinnissa 100 metriä $i_{CM,INU,sk100}$.

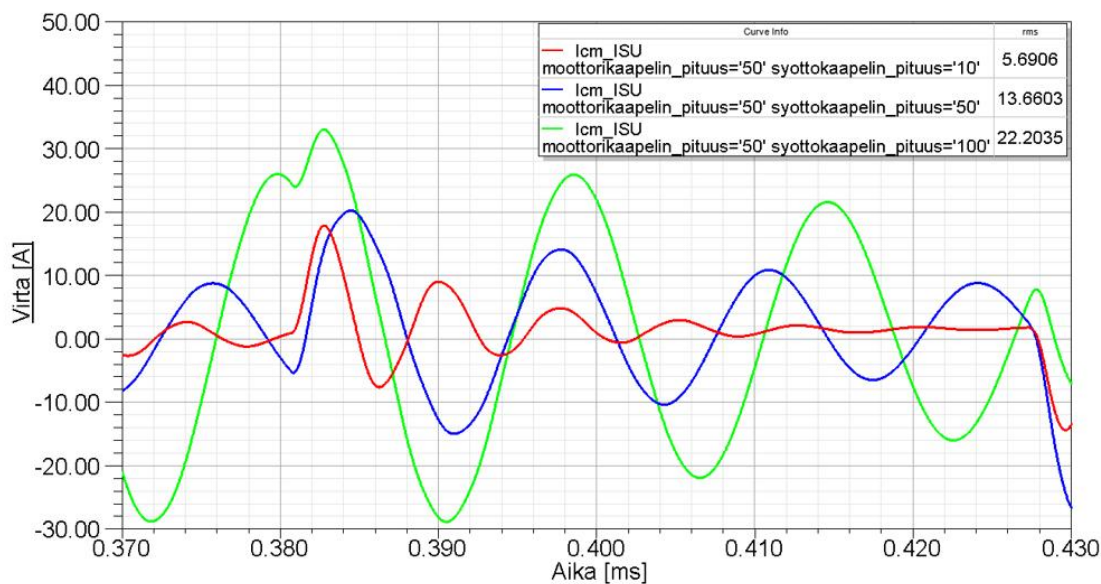


Kuva 5.8: $i_{CM,INU}$ ajan funktiona eri syöttökaapelin pituuksilla. Punainen käyrä vastaa 10 metrin syöttökaapelia, sininen 50 metrin syöttökaapelia ja vihreä 100 metrin syöttökaapelia.

Virtojen käyristä nähdään selkeät erot amplitudeissa ja värähtelyn vaimenemisessa. $i_{CM,INU,10}$:n käyrä nousee kytkennän jälkeen noin 15 ampeeriin, $i_{CM,INU50}$:n käyrä noin 17,5 ampeeriin ja $i_{CM,INU100}$:n käyrä 32 ampeeriin. Ennen kytkentähetkeä $i_{CM,INU50}$:n käyrä on laskemassa, jolloin kytkennän tapahduttua syntyvä virtapiikki ei muodostu niin suureksi, kuin jos käyrä olisi juuri menossa ylöspäin kuten $i_{CM,INU10}$:n käyrä. $i_{CM,INU100}$:n käyrä on jo ennen kytkentää 22 ampeerin kohdalla, jolloin kytkennästä syntyvä korkeataajuinen virtapiikki nostaa virran hetkellisen arvon 10 ampeeria suuremmaksi.

Kuvassa 5.8 kytkennästä syntyvä korkeataajuinen virtapiikki näkyy heti kytkennän jälkeen kaikissa käyrissä varsin samanlaisena. Tämä johtuu korkeataajuisesta resonanssi-piiristä, joka ei muutu syöttökaapelin pituutta muuttamalla. Kyseinen resonanssi-piiri muodostuu paljon pienemmistä kapasitansseista ja induktansseista, kuten taajuusmuuttajan suodattimista sekä hajainduktansseista ja -kapasitansseista.

Kuvassa 5.9 on esitetty $i_{CM,ISU}$, kun mallia on simuloitu 10, 50 ja 100 metrin pituisella syöttökaapelilla. Virtakäyrien värit ovat vastaavat, kuin kuvassa 5.8.



Kuva 5.9: $i_{CM,ISU}$ ajan funktiona eri syöttökaapelin pituuksilla. Punainen käyrä vastaa 10 metrin syöttökaapelia, sininen 50 metrin syöttökaapelia ja vihreä 100 metrin syöttökaapelia.

Kuvan 5.9 $i_{CM,ISU}$:n käyrien matalat taajuuskomponentit, noin 130 – 140 kHz, ovat lähellä kuvan 5.8 $i_{CM,INU}$:n käyrien vastaavia taajuuskomponentteja. Käyrien erona on $i_{CM,INU}$:n korkeat taajuuskomponentit noin 1 MHz, jotka eivät näy $i_{CM,ISU}$:ssa. Lisäksi $i_{CM,ISU}$:n käyristä puuttuvat virtojen heijastukset, jotka näkyvät $i_{CM,INU,10}$:n käyrässä ajanhetkellä 0.398 ms, kun aaltomuodosta leikkaantuu huippu pois.

5.4 Kaapelityypin vaikutus yhteismuotoiseen virtaan

Luvun 5 aikaisemmat simuloinnit on tehty kaivoskaapelin mallilla. Tässä luvussa tarkastellaan MCMK-kaapelin mallia, joka on esitetty kuvassa 4.4.

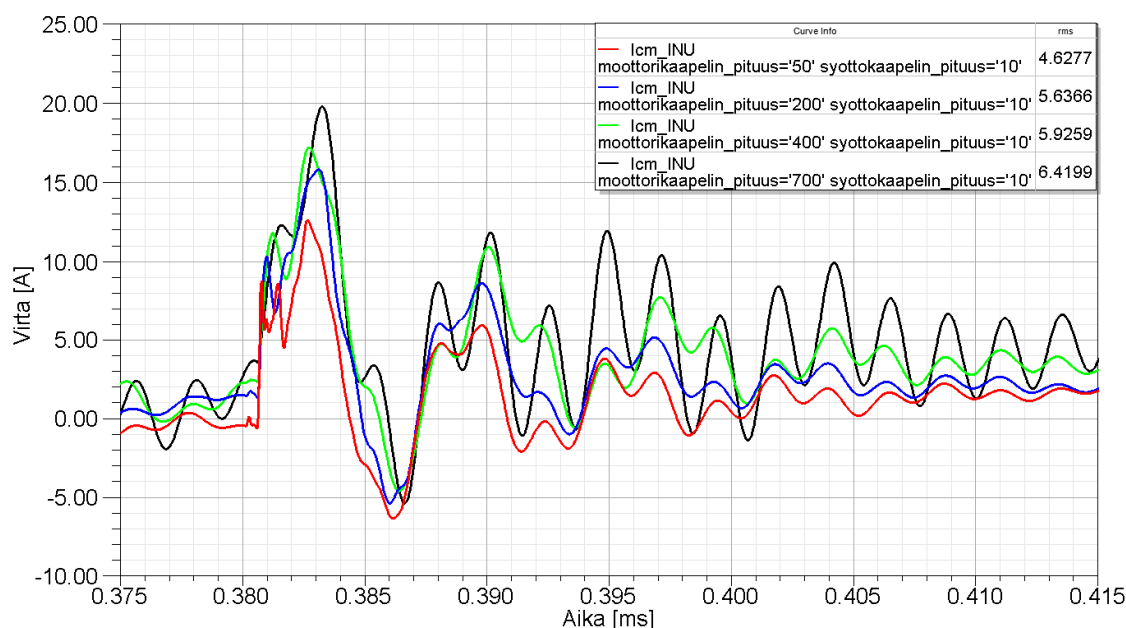
Simulointien tarkoituksena on selvittää, miten mallin käyttäytyminen muuttuu, kun simulointimallia muutetaan kaapelityyppiä vaihtamalla. Lisäksi halutaan selvittää kuinka paljon kaapelityyppi vaikuttaa yhteismuotoiseen virtaan.

Jotta simulointitulokset olisivat vertailtavissa, on mallia simuloitu luvun 5.3 mukaisesti vain kaapelimallin tyyppiä muuttamalla. Mallia on simuloitu syöttökaapelin pituuksilla 10, 50 ja 100 metriä sekä moottorikaapelin pituuksilla 50, 200, 400 ja 700 metriä. Tuloksina on esitetty $i_{CM,ISU}$, $i_{CM,INU}$ ja $i_{CM,Moottori}$ sekä näiden tehollisarvot $I_{CM,ISU}$, $I_{CM,INU}$ ja $I_{CM,Moottori}$.

5.4.1 Moottorikaapelin pituuden vaikutus

Seuraavaksi on esitetty simulointitulokset eri moottorikaapelin pituuksilla, kun kaapelimalleina on käytetty MCMK-kaapelin mallia.

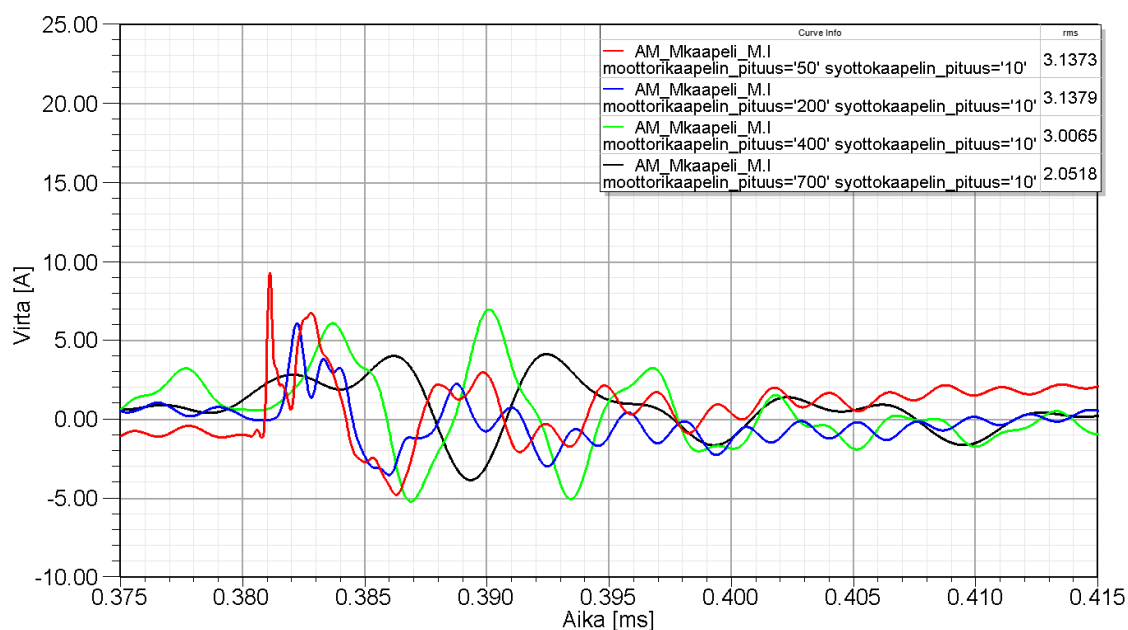
Kuvassa 5.10 on esitetty $i_{CM,INU}$ eri moottorikaapelin pituuksilla. Virtojen tehollisarvot kasvavat moottorikaapelia pidennettäessä. Tehollisarvojen kasvu kuitenkin hidastuu mitä pidemmäksi moottorikaapeli kasvaa.



Kuva 5.10: $i_{CM,INU}$ ajan funktiona eri moottorikaapelin pituuksilla.

Tehollisarvoista nähty tilanne voidaan nähdä myös virtojen käyrämuodoissa. Kun moottorikaapelin pituus on 700 metriä, kytkennästä syntyvä virtapiikki on suurin, noin 20 ampeeria, sekä syntyvien värähtelyjen amplitudit ovat suurimmat ja ne vaimenevat hitaimmin. Vastaavasti 50 metrin moottorikaapelilla syntyvä virtapiikki on noin 13 ampeeria ja värähtelyt vaimenevat jokaisella heilahduksella huomattavasti.

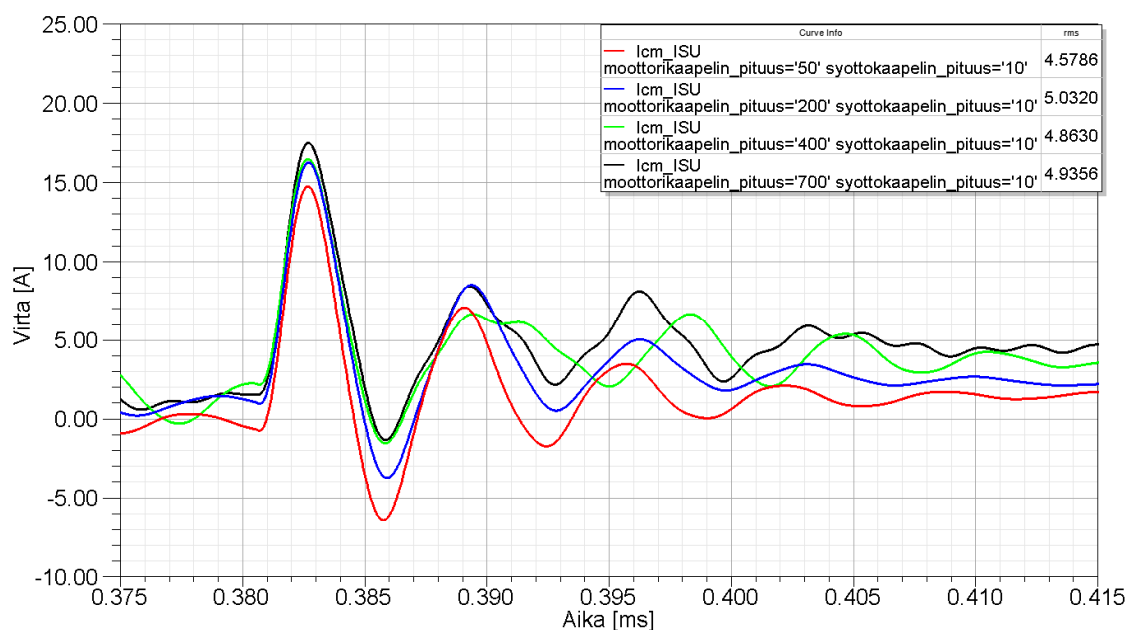
Kuvassa 5.11 on esitetty $i_{CM,Moottori}$:n käyrämuodot ja tehollisarvot. Kun kuvaa verrataan kaivoskaapelin mallilla tehtyjen simulointien tuloksiin, kuvaan 5.4, nähdään niiden olevan hyvin samankaltaisia. Kuvan 5.11 tapauksessa tehollisarvot ja virtojen värähtelyjen amplitudit ovat hiukan suurempia, jotka johtuvat kaapelin vaihejohtinten kytkeymisestä PE-johtimeen. MCMK-kaapelilla kapasitanssit ovat pienemmät, jolloin suurempi osa yhteismuotoisesta virrasta kulkee moottorin kautta.



Kuva 5.11: Yhteismuotoinen virta moottorin maadoitusjohtimessa ajan funktiona eri moottorikaapelin pituuksilla.

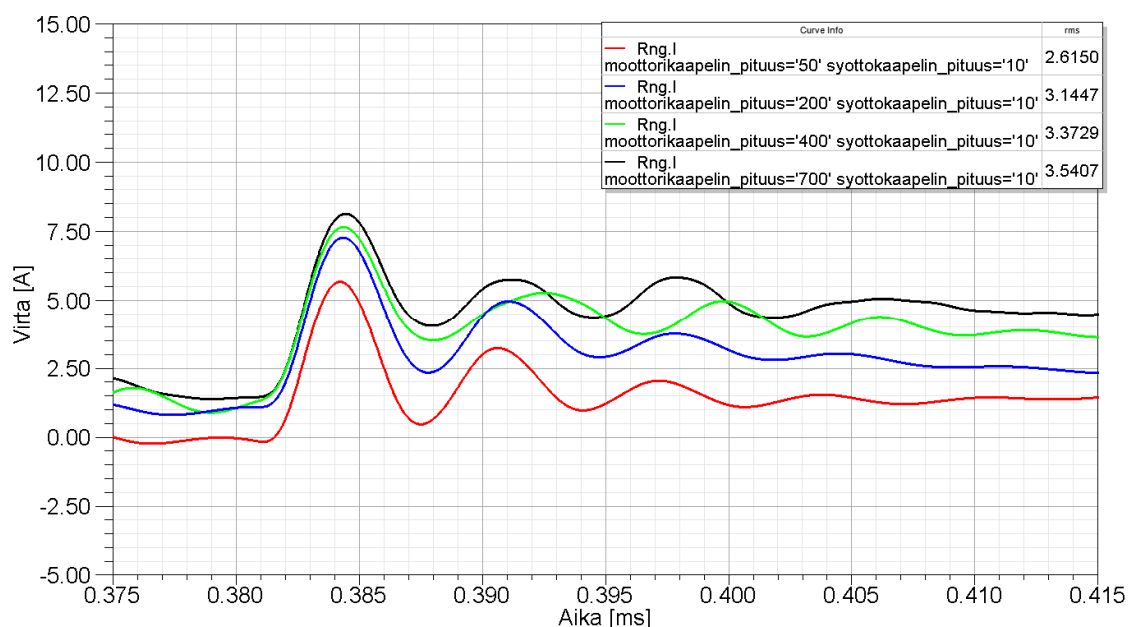
Virtojen käyrämuodoista nähdään kuinka pitkillä kaapeleilla korkeataajuiset komponentit ovat suodattuneet pois. Kun moottorikaapelin pituus on 50 tai 200 metriä, simuloinneissa kytkentähetken 0.381 ms jälkeen virta nousee ensin hyvin nopeasti huippuunsa ja laskee tämän jälkeen nopeasti alaspäin. Virta lähtee kuitenkin uudestaan nousuun, kun matalampi taajuinen virtakomponentti nostaa virran arvoa. Tätä ilmiötä ei synny 400 ja 700 metrin simuloinneissa, vaikka ilmiö näkyy kuvan 5.10 $i_{CM,INU}$:n simuloinneissa.

Kuvassa 5.12 on esitetty $i_{CM,ISU}$ eri moottorikaapelin pituuksilla. Kun kuvan käyriä verrataan kaivoskaapelin simulointituloksiin, jotka on esitetty kuvassa 5.5, nähdään tulosten olevan hyvin lähellä toisiaan. Virtojen huippuarvot ovat hieman alemmat, noin 3 ampeeria, ja värähtelyn vaimeneminen nopeampaa kuvassa 5.12, mutta erot ovat hyvin pieniä.



Kuva 5.12: $i_{CM,ISU}$ ajan funktiona eri moottorikaapelin pituuksilla.

Kuvassa 5.13 on esitetty i_{Rng} eri moottorikaapelin pituuksilla. Verrattaessa tuloksia kaivoskaapelin simuloiteihin kuvassa 5.6, nähdään käyrämuotojen vastaavan lähes toisiaan eikä tehollisarvoissakaan ole suurta eroa. MCMK:n kaapelimallilla simuloitujen tulokset antavat 0,14 – 0,19 ampeeria pienemmät tehollisarvot. Tehollisarvojen ero on noin 5 % kaivoskaapelin simuloitutulosten tehollisarvoista.



Kuva 5.13: i_{Rng} ajan funktiona eri moottorikaapelin pituuksilla.

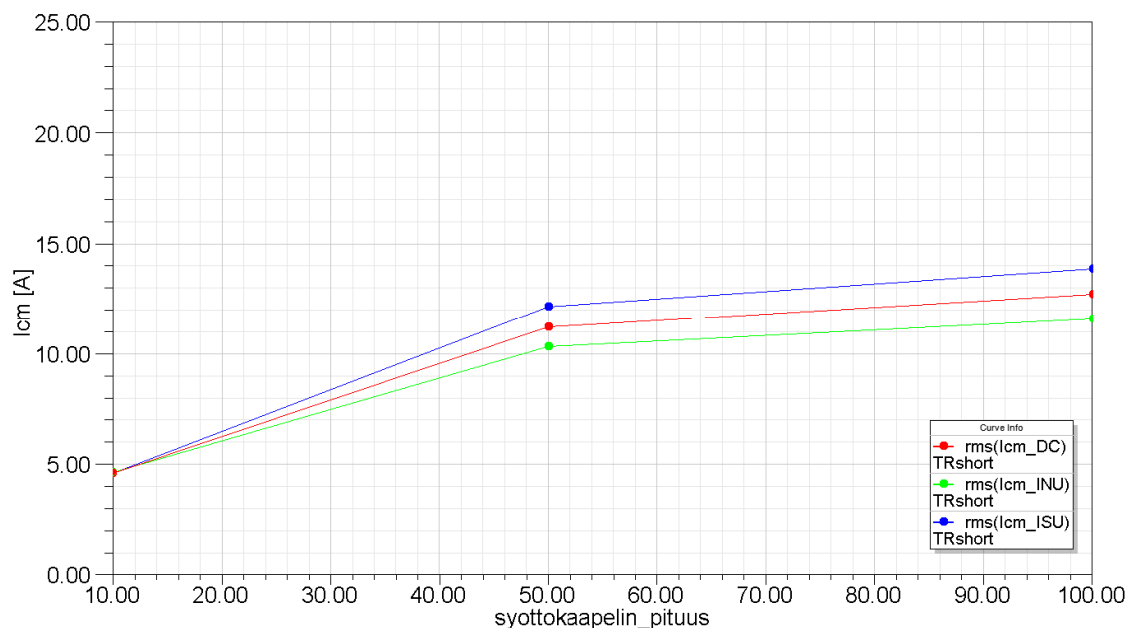
Eri moottorikaapelin pituuksien väliltä huomioitavaa on matalataajuinen virta. Tämä virta näkyy kuvan 5.13 oikeassa reunassa, kun virtojen käyrät jäävät 1,5 – 4,5 ampeerin tasolle, vaikka 100 kHz:n taajuinen värähtely on vaimentunut pois. Tämä matalataajuinen

virta lisää virran tehollisarvoa etenkin pitkillä kaapeleilla. Simulointitulosten perusteella 100 kHz:n taajuinen virta on lähes yhtä suurta 50, 200 ja 700 metrin moottorikaapeleilla. Moottorikaapelin pituuden ollessa 400 metriä simulointituloksissa on nähtävissä värähtelykomponentin taajuusero muihin simulointeihin nähden. Kyseinen ilmiö riippuu ilmeisimmin jonkin syöttöpuolen kondensaattorin resonanssista. Ilmiö ei kuitenkaan vaikuta juurikaan virtojen tehollisarvoihin, koska moottorikaapelia pidennettäessä myös virran tehollisarvot nousevat jokaisen mittauspisteen välillä.

5.4.2 Syöttökaapelin pituuden vaikutus

Seuraavaksi on esitetty simulointitulokset eri syöttökaapelin pituuksilla, kun kaapelimalleina on käytetty MCMK-kaapelin mallia.

Kuvassa 5.14 on esitetty $I_{CM,ISU}$, $I_{CM,DC}$ ja $I_{CM,INU}$ syöttökaapelin pituuden funktiona. Simuloinnit on tehty syöttökaapelin pituuksilla 10, 50 ja 100 metriä. Kuvassa mittauspisteet on yhdistetty viivoilla, jolloin voidaan arvioida virtojen suuruutta mittauspisteiden välillä. Viivat eivät kuitenkaan kerro tarkkoja tuloksia mittauspisteiden välillä.

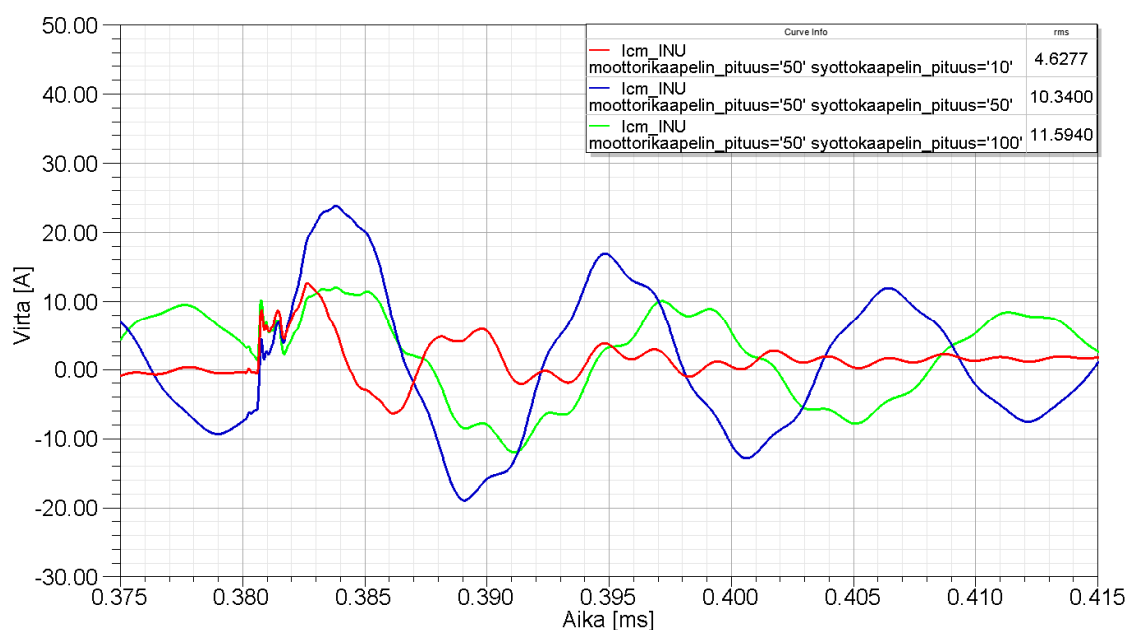


Kuva 5.14: $I_{CM,ISU}$, $I_{CM,DC}$ ja $I_{CM,INU}$ syöttökaapelin funktiona. Simuloinnit on tehty syöttökaapelin pituuksilla 10, 50 ja 100 metriä.

Kun kuvan 5.14 tuloksia verrataan kaivoskaapelin simulointituloksiin kuvassa 5.7, voidaan todeta tehollisarvojen olevan MCMK-kaapelilla pienempiä yli 50 metrin syöttökaapelilla. Tätä pienemmällä syöttökaapelin pituuksilla virran tehollisarvot ovat lähes yhtä suuria.

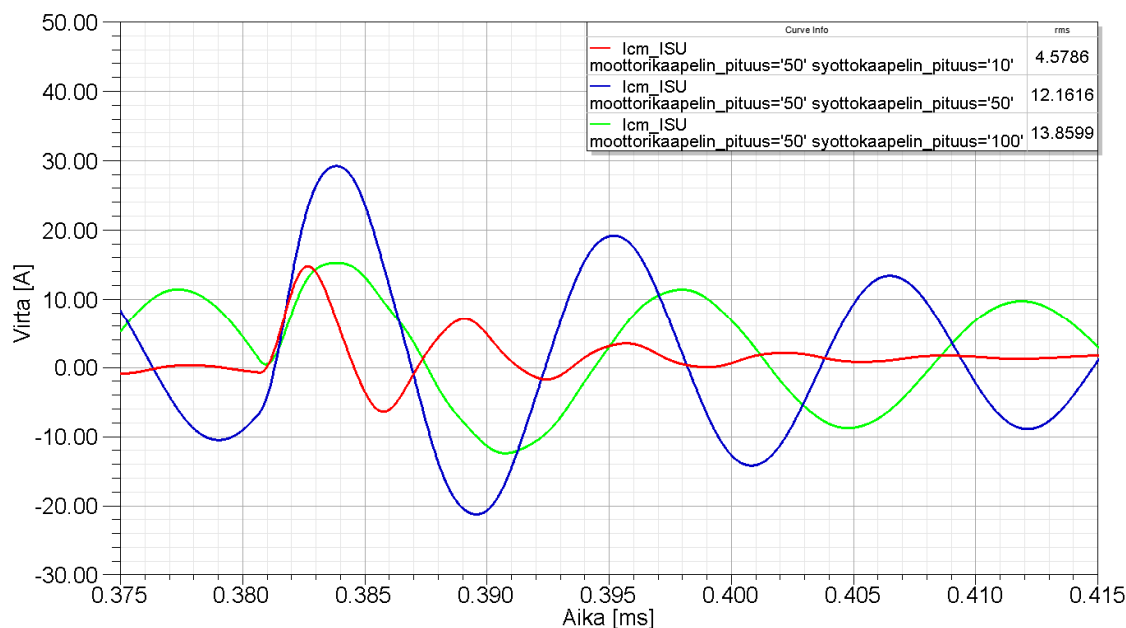
Kuvassa 5.15 on esitetty $i_{CM,INU}$ eri syöttökaapelin pituuksilla. Virran tehollisarvot kasvavat huomattavasti syöttökaapelin pituuden kasvaessa. Virran tehollisarvon kasvu

kuitenkin hidastuu, kun syöttökaapeli on hyvin pitkä. Myös virran käyrämuodoille käy samoin. Syöttökaapelin ollessa 10 metriä kytkennästä syntyvä virtapiikki jää noin 12 ampeeriin ja värähtely vaimenee nopeasti. Pidemmällä syöttökaapeleilla virran värähtely vaimenee hitaasti. Kun syöttökaapelin pituus on 50 metriä, kytkennästä syntyvä virtapiikki nousee noin 24 ampeeriin ja 100 metrin syöttökaapelilla noin 12 ampeeriin. 100 Metrin syöttökaapelilla kyseinen kytkentä ajoittuu aikaisempien värähtelyjen takia niin, että syntyvä virtapiikki jää hyvin pieneksi.



Kuva 5.15: $i_{CM,INU}$ ajan funktiona eri syöttökaapelin pituuksilla.

Kuvassa 5.16 on esitetty $i_{CM,ISU}$ eri syöttökaapelin pituuksilla. Virran tehollisarvot ovat lähes samansuuruisia kuin $i_{CM,INU}$:n kuvassa 5.15. Myös virtojen käyrämuodot ovat lähes samanlaisia. $i_{CM,INU}$:n käyrämuodoissa on nähtävissä korkeataajuista värähtelyä, jota ei näy $i_{CM,ISU}$:n käyrämuodoissa.



Kuva 5.16: $i_{CM,ISU}$ ajan funktiona eri syöttökaapelin pituuksilla.

Simulointien perusteella voidaan sanoa, että MCMK-kaapelia käytettäessä yhteismuotoisten virtojen tehollisarvot pienenevät. Ero tulee näkyviin etenkin pitkällä syöttökaapeleilla, jolloin yhteismuotoiset virrat kasvavat muutoinkin hyvin suuriksi.

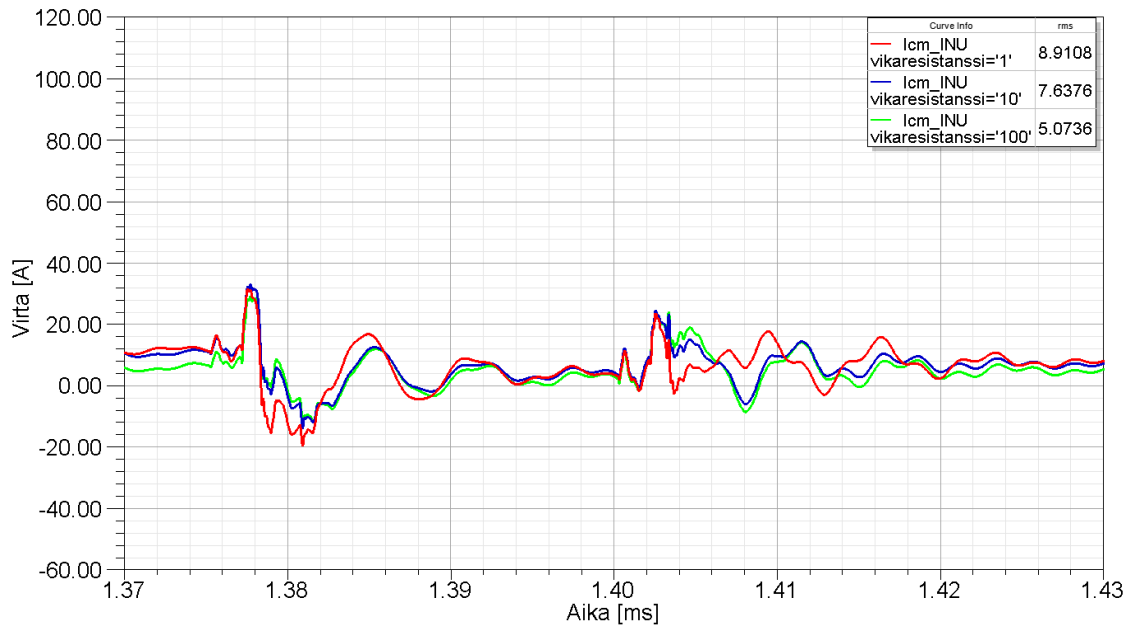
5.5 Maasulun paikka ja vikaresistanssi

Seuraavaksi on esitetty maasulkuvirran simulointituloksia. Simuloinnit on toteutettu luvussa 4 esitetyllä mallilla, jossa syöttökaapelin pituus on 10 metriä, moottorikaapelin pituus on 250 metriä ja kaapelityyppinä on käytetty MCMK-kaapelia. Kaivoskäytössä maasulkuvirta mitataan syöttömuuntajan tähtipisteen maadoitusjohtimesta, joka vastaa virtaa i_{Rng} . Maasulku on toteutettu kytkemällä W-vaiheen ja PE-johtimen väliin vastus. Simuloinnit on tehty kolmella eri resistanssin arvolla 1, 10 ja 100 ohmilla. Resistanssien muutos kuvaa heikkenevää eristettä, joka haurastuessaan menettää vähitellen eristyskykynsä ja alkaa vuotamaan virtaa.

Tarkastelujen simulointiaikana on käytetty 1,5 ms:ia. Maasulku on kytketty ajanhetkellä 1,0 ms. Virtojen tehollisarvot on laskettu väliltä 1,0 ja 1,5 ms:a. Maasulkujen paikoina käytettiin moottorin napaa ja välipiirin negatiivista kiskoa.

5.5.1 Maasulku moottorin navassa

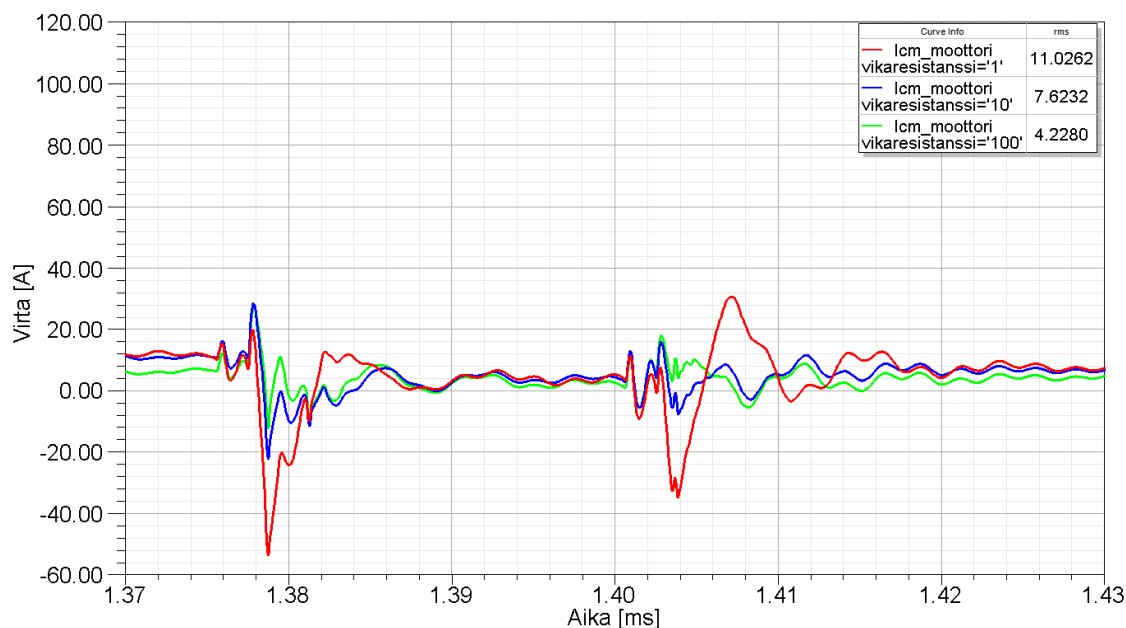
Ensimmäisenä maasulkutapauksena on käsitelty moottorin napaan kytkettyä maasulkuja. Kuvassa 5.17 on esitetty $i_{CM,INU}$ moottori navan ollessa maasulussa. $I_{CM,INU}$ kasvaa lähes kaksinkertaiseksi, kun vikaresistanssi tippuu 100 ohmista 1 ohmiin. $i_{CM,INU}$:n käyrämuodoista nähdään niiden sisältävän korkeita taajuuskomponentteja heti kytkentöjen jälkeen. Nämä myös vaimenevat hitaammin, kuin ilman vikaa syntyvissä kytkennöissä. Voidaan siis olettaa vian synnyttävän resonanssipiirin korkeataajuisille virroille.



Kuva 5.17: $i_{CM,INU}$ ajan funktiona moottorin navan ollessa maasulussa eri vikaresistansseilla.

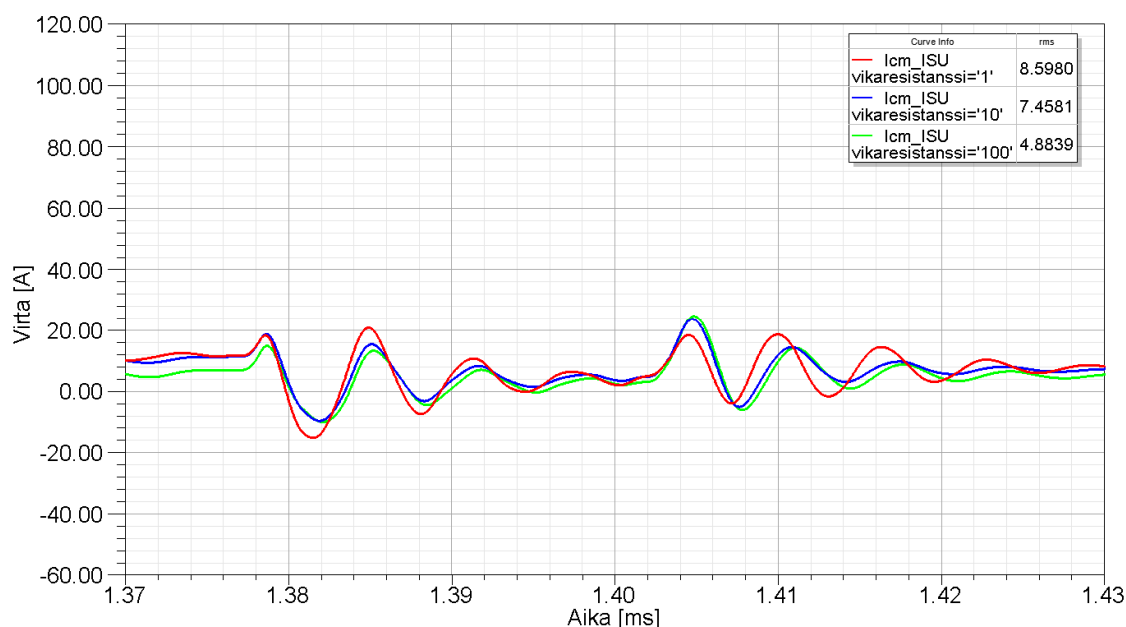
Kuvassa 5.18 on esitetty $i_{CM,Moottori}$ moottorin navan ollessa maasulussa. Verrattaessa virtojen käyrämuotoja $i_{CM,INU}$:n vastaaviin huomataan $i_{CM,Moottori}$:n saavuttavan korkeammat virtapiikit. Ajanhetkellä 1.39 ms $i_{CM,Moottori}$:n virtapiikki on noin 55 ampeeria, kun vikaresistanssi on yksi ohmi.

$i_{CM,Moottori}$:n tehollisarvot ovat suuremmilla vikaresistansseilla lähes yhtäsuuria kuin $i_{CM,INU}$:n tehollisarvot. Kun vikaresistanssi on 1 ohmia, virtojen tehollisarvojen ero kasvaa noin kahteen ampeeriin. Ero muodostuu kytkentöjen synnyttämien virtapiikkien korkeudesta, joka kasvaa huomattavasti, kun vikaresistanssi pienenee 10 ohmista 1 ohmiin.



Kuva 5.18: $i_{CM,Moottori}$ ajan funktiona moottorin navan ollessa maasulussa eri vikaresistansseilla.

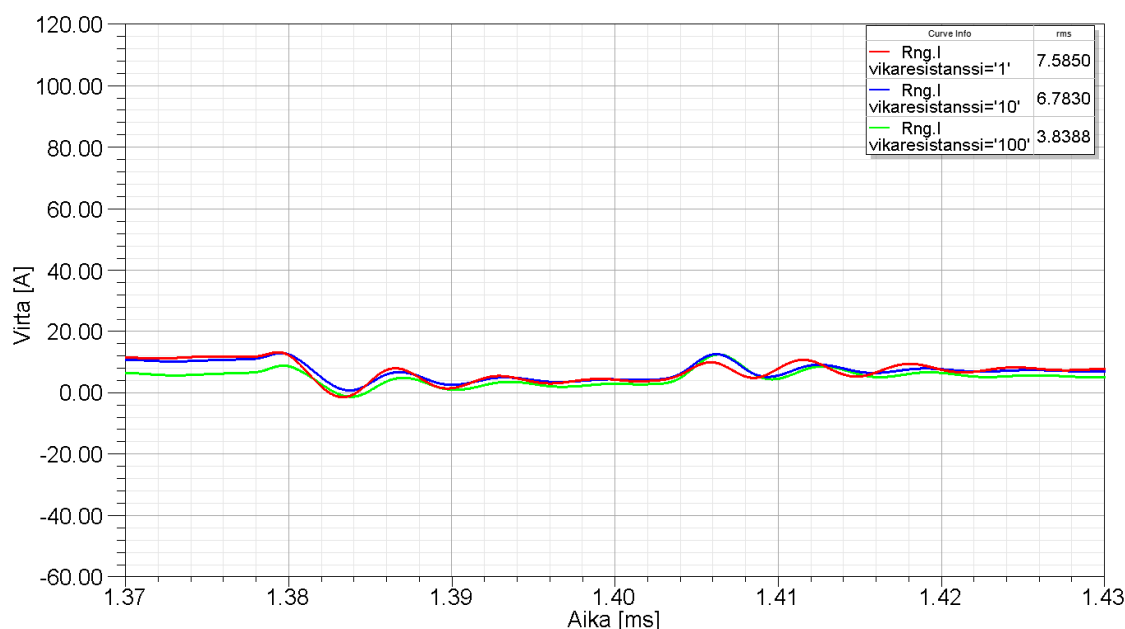
Kuvassa 5.19 on esitetty $i_{CM,ISU}$ moottorin navan ollessa maasulussa. Virran käyrämuodoista nähdään, etteivät ne sisällä korkeita taajuuskomponentteja. Korkeataajuiset virrat eivät kulkeudu syöttöpuolelle vaan kiertävät kuormapuolella. $i_{CM,ISU}$ sisältää matalataajuisia virtoja, jotka vaikuttavat huomattavasti virran tehollisarvoon.



Kuva 5.19: $i_{CM,ISU}$ ajan funktiona moottorin navan ollessa maasulussa eri vikaresistansseilla.

Kuvassa 5.20 on kuvattu $i_{CM,Rng}$ moottorin navan ollessa maasulussa. Virran käyrämuodot ovat lähes $i_{CM,ISU}$:n käyrämuotoja vastaavia. Virtakäyrien amplitudit kuitenkin

eroavat toisistaan. $i_{CM,Rng}$:n amplitudit ovat huomattavasti pienemmät. Maadoitusvastuksen läpi kulkevan virran tehollisarvoissa on huomioitava, että se nousee yli 5 ampeerin. Vastuksen tehtävä on rajoittaa maasulkuvirta 5 ampeeriin, mutta virta nousee tämän rajan yli. Virran tehollisarvo tulee ottaa huomioon vastuksen tehon mitoituksessa, joten virran tehollisarvon todellinen taso olisi hyvä selvittää mittaamalla todellista sähkökäyttöä.



Kuva 5.20: $i_{CM,Rng}$ ajan funktiona moottorin navan ollessa maasulussa eri vikaresistansseilla.

Esitettyjen virtojen käyrämuodot voidaan selkeästi jakaa kuorma- ja syöttöpuolen virtoihin. Kuormapuolen virrat sisältävät korkeita taajuuskomponentteja, joita ei ilmene syöttöpuolen virroissa. Virtojen tehollisarvoissa erot eivät näin selvät.

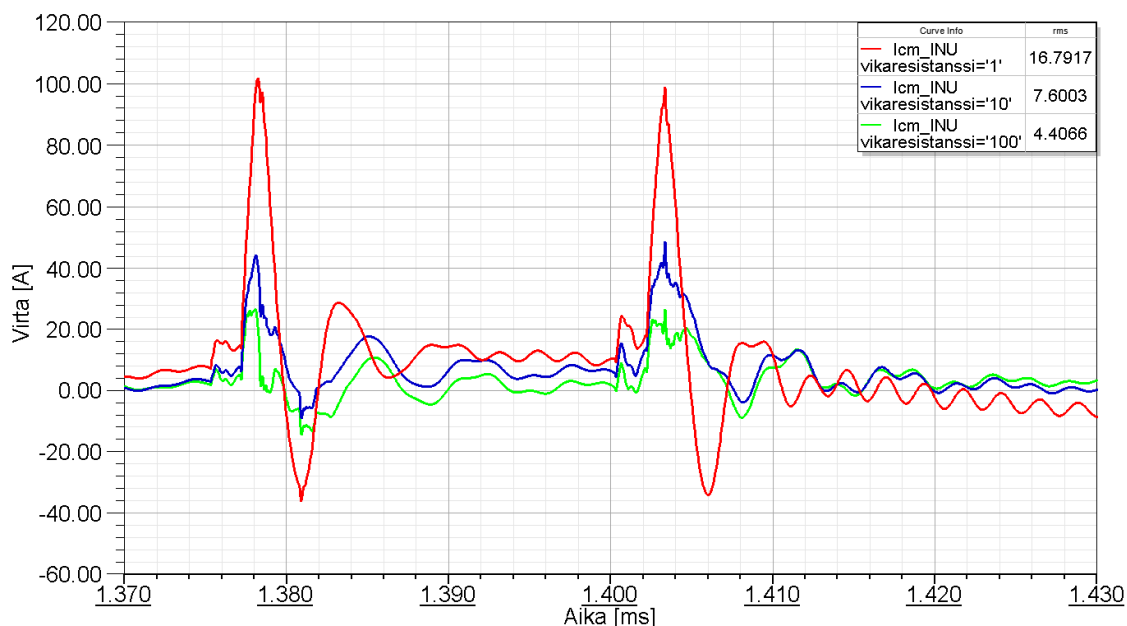
100 Ohmin vikaresistanssilla virtojen tehollisarvot ovat lähes vastaavat kuin ilman vikaa simuloitussa tapauksessa. Kun vikaresistanssia lasketaan 10 ohmiin, virtojen tehollisarvot kasvavat huomattavasti, etenkin $I_{CM,Moottori}$. Ero muodostuu pitkälti hyvin matalista taajuuskomponenteista. Kuvista 5.17-5.20 nähdään, kuinka aikavälillä 1.370 – 1.375 ms virtojen hetkellisarvot ovat 5 ampeeria suuremmat 10 ohmin vikaresistanssilla kuin 100 ohmin.

Kun vikaresistanssi lasketaan edelleen 1 ohmiin, tehollisarvot eivät suurene merkittävästi paitsi $I_{CM,Moottori}$. Tässä vaiheessa erot syntyvät pitkälti virtapiikkien korkeudesta. Kuten kuvista nähdään, aikavälillä 1.370 – 1.375 ms virtojen hetkellisarvoissa ei ole suurta eroa.

5.5.2 Maasulku välipiirin negatiivisessa kiskossa

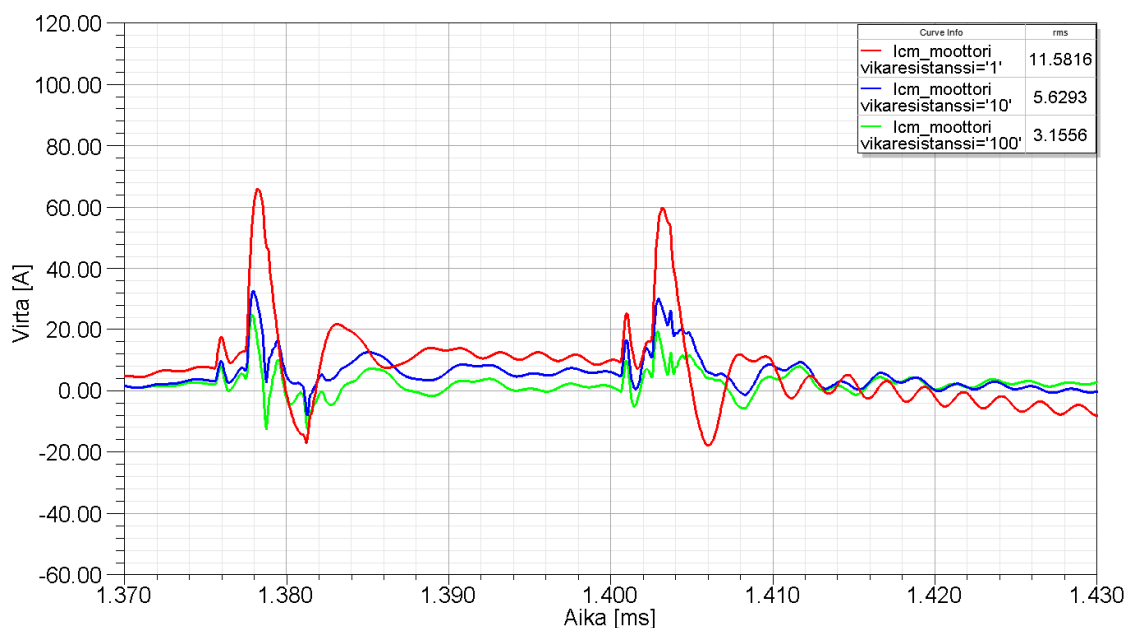
Seuraavaksi on esitelty simulointitapaus, jossa käyttöön kytketään maasulku välipiirin negatiiviseen kiskoon. Kuvassa 5.21 on esitetty $i_{CM,INU}$ välipiirin negatiivisen kiskon ollessa maasulussa. Kuten aikaisemmissa maasulkutilanteissa, 100 ohmin vikaresistanssilla

virran tehollisarvo ja käyrämuodot ovat varsin normaalit. Vikaresistanssin laskiessa virran tehollisarvo nousee huomattavasti ja kytkennöistä syntyy hyvin korkeita virtapiikkejä. Korkein kuvassa 5.21 näkyvä virtapiikki on yli 100 ampeeria.



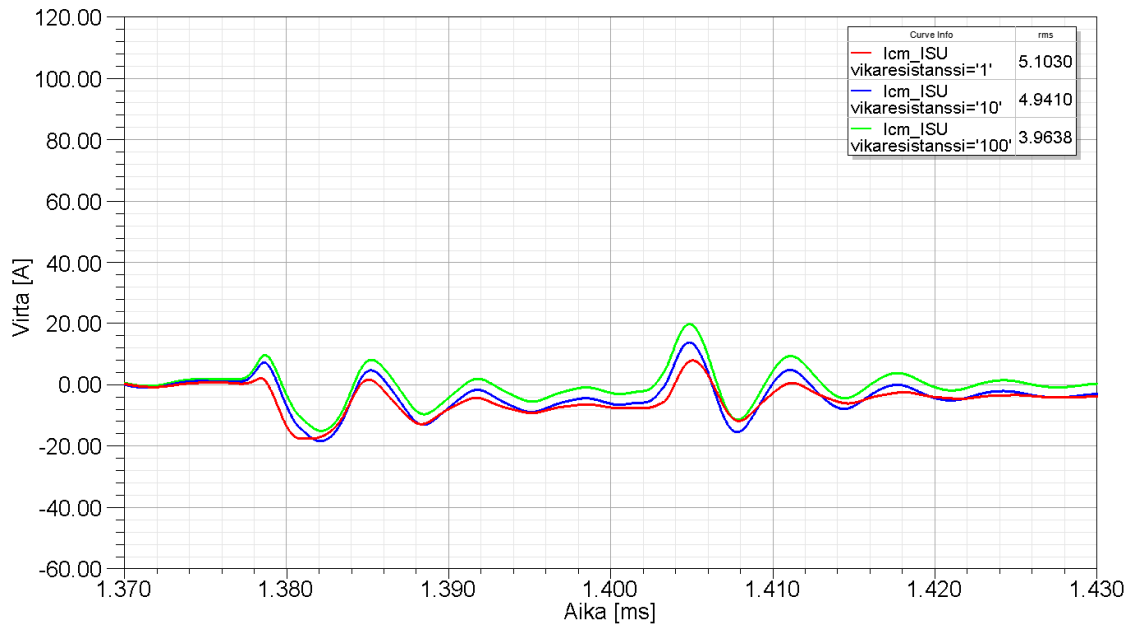
Kuva 5.21: $i_{CM,INU}$ välipiirin negatiivisen kiskon ollessa maasulussa.

Kuvassa 5.22 on esitetty $i_{CM,Moottori}$ välipiirin negatiivisen kiskon ollessa maasulussa. Virran käyrämuodot lähes samanlaiset kuin $i_{CM,INU}$:n. Vain kaikista terävimmät virtapiikit ovat suodattuneet pois. Kuvassa $i_{CM,Moottori}$:n korkein virtapiikki ylittää noin 65 ampeeriin. Myös $i_{CM,Moottori}$:n tehollisarvot ovat hieman pienemmät, mutta virtojen värähtelyt ja värähtelyjen vaimenemiset ovat hyvin lähellä $i_{CM,INU}$:n vastaavia.



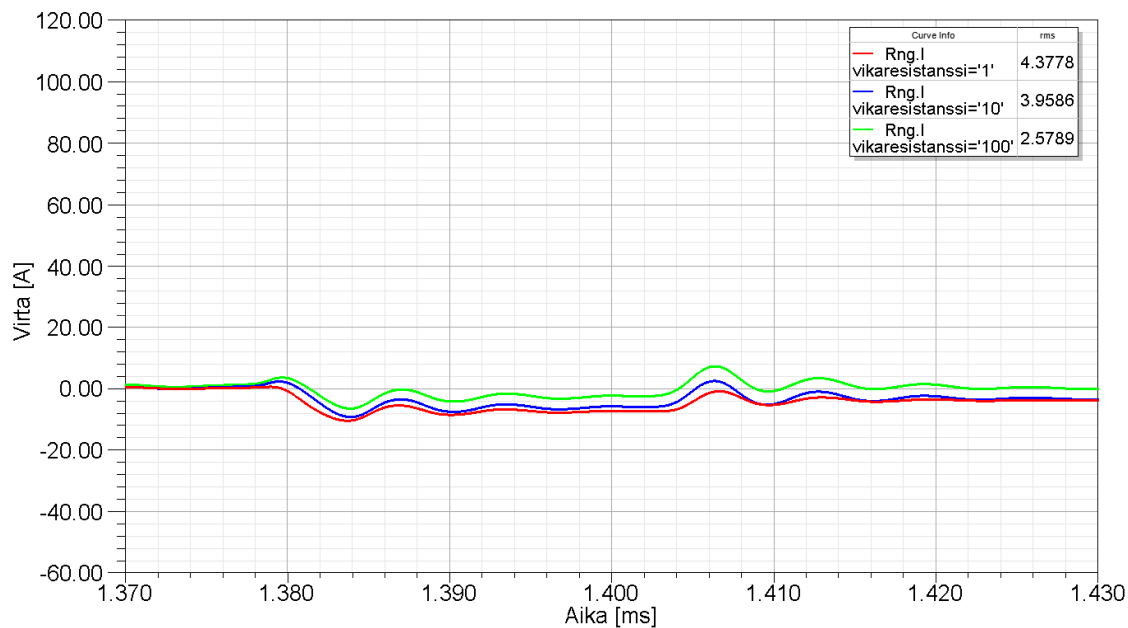
Kuva 5.22: $i_{CM,Moottori}$ välipiirin negatiivisen kiskon ollessa maasulussa.

Kuvassa 5.23 on esitetty $i_{CM,ISU}$ välipiirin negatiivisen kiskon ollessa maasulussa. Virran käyrämuodot ovat lähes vastaavia kuin maasulun ollessa moottorin navassa. Virran tehollisarvot ovat pienempiä. On huomattava, että virran tehollisarvo nousee varsin vähän vikaresistanssin pienentyessä. Tämän perusteella maasulun havaitseminen taajuusmuuttajan tulopuolelta olisi vaikeaa.



Kuva 5.23: $i_{CM,ISU}$ välipiirin negatiivisen kiskon ollessa maasulussa.

Kuvassa 5.24 on esitetty $i_{CM,Rng}$ välipiirin negatiivisen kiskon ollessa maasulussa. Kuten $i_{CM,ISU}$:n käyrämuodot myös $i_{CM,Rng}$:n käyrämuodot ovat vastaavanlaisia moottorin navan maasulussa syntyviin virran käyrämuotoihin nähden. Vikaresistanssin R_{ng} pienentyessä kytkennöistä syntyvä noin 100 kHz värähtely pysyy lähes muuttumattomana, mutta matalampi taajuisen 8 – 10 kHz:n värähtelyn amplitudi kasvaa.



Kuva 5.24: $i_{CM,Rng}$ välipiirin negatiivisen kiskon ollessa maasulussa.

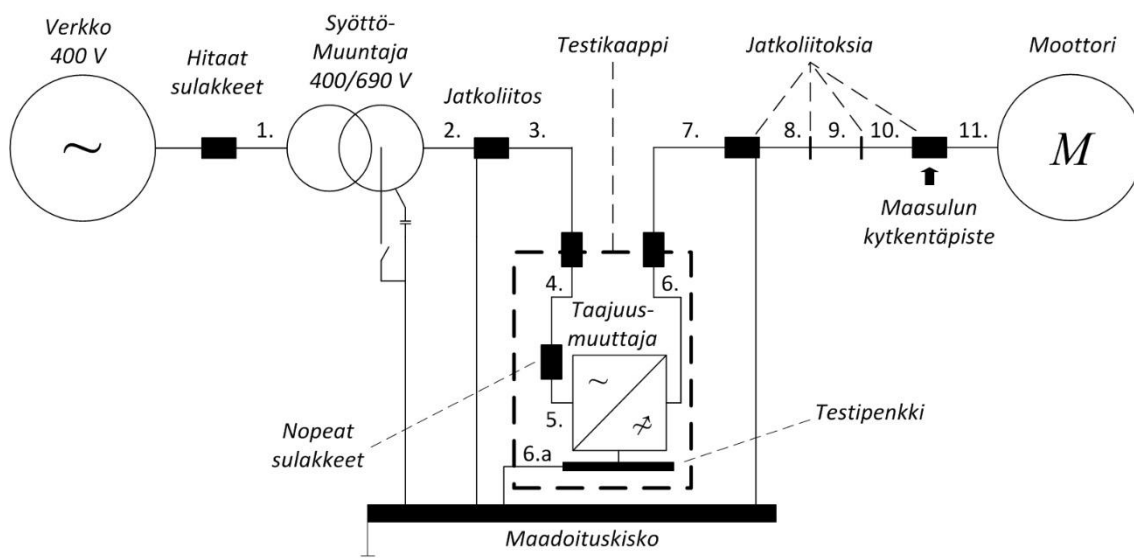
$i_{CM,Rng}$:n tehollisarvot ovat hieman pienemmät kuin maasulun ollessa moottorin navassa. Maasulun havaitseminen mittaamalla $i_{CM,Rng}$:aa olisi kuitenkin mahdollista, koska virran tehollisarvon suhteellinen muutos on suurempi kuin $i_{CM,ISU}$:lla.

6 Simulointimallin verifiointimittaukset

Simulointimallille tehtiin verifiointimittaukset, joiden tarkoituksena oli verrata simulointimallilla simuloituja tuloksia mitattuihin. Testilaboratorioon rakennettiin mittauskytkentä, joka mahdollisti pitkien kaapelien kytkemisen taajuusmuuttajan ja moottorin väliin. Tällöin moottorikaapelin pituutta pystyttiin muuttamaan ja tutkimaan eri kaapelin pituuksien vaikutuksia yhteismuotoiseen virtaan sähkökäytön eri osissa.

Mittauskytkentä rakennettiin kuvaan 6.1 mukaiseksi. Kytkennän kaapelit on merkitty kuvaan järjestysnumeroin, joiden selitteet on avattu taulukossa 6.1. Kolmivaihekaapelit on merkitty " $NxPoikkipinta-ala$ " ja yksivaihekaapelit " $NxIxPoikkipinta-ala$ ", jossa N vastaa johdinten lukumäärää.

Kytkennässä 150 kVA:n syöttömuuntaja kytkettiin 400 V:n syöttävään verkkoon. Syöttömuuntajan muuntosuhde säädettiin nostamaan toisiosion jännite 690 V:iin. Taajuusmuuttaja sijoitettiin testikaapin testipenkkiin. Taajuusmuuttajaan kytkettiin moottori, joka oli sijoitettu konehuoneeseen, josta se oli kytketty kaapelilla 11 kytkentäkenttään. Tämän takia maasulkua ei pystytty kytkemään suoraan moottorin napaan vaan se oli kytkettävä kuvassa 6.1 esitettyyn paikkaan. Moottorikaapelin pituutta pystyttiin lisäämään kytkemällä siihen 100 metriä, 150 metriä tai 250 metriä 10mm²-kaapelia.



Kuva 6.1: Verifiointimittauksissa käytetyn kytkennän lohkokaavio. Kytkennän kaapelit on merkitty järjestysnumeroin, joiden selitteet on esitetty taulukossa 6.1.

Kuten kuvasta 6.1 nähdään, mittauskytkennässä jouduttiin käyttämään useita eri kaapeleita taajuusmuuttajan molemmilla puolilla. Verkon monimutkaisuus vaikeutti myös mittauksien analysointia, koska ei voitu olla täysin varmoja virtojen kulkureiteistä. Mittauskytkentää kuvaava simulointimalli pyrittiin pitämään yksinkertaisena ja malliin

kuvattiin vain kaapelit 2, 9 ja 11. Tällöin mallin muokkaaminen ja ilmiöiden havaitseminen oli helpompaa.

Taulukko 6.1: Verifiontimittauksessa käytettyjen kaapeleiden tyypit (lukumäärä \times poikkipinta-ala [mm²]) sekä pituudet.

	Tyyppi	Pituus [m]
1.	4X25	4
2.	4X25	5
3.	3X1X240	4
4.	4X35	4
5.	3X1X25	2
6.(a)	4X1X50	2
7.	3X1X240	5
8.	4X10	2
9.	4X10	100/150/250
10.	4X10	2
11.	3X70-35	20

Virtojen mittauksessa käytettiin *Power Electronic Measurements Ltd.*:n CWT3 -virtaantureita. Kyseiset virta-anturit toimivat Rokowskin kelan periaatteella, jossa anturin johdin silmukka reagoi sen läpi kytketyissä johtimissa kulkevan virran muodostamaan magneettikenttään. Mittaussignaalit analysoitiin digitaalisella oskilloskoopilla. Oskilloskoopina käytettiin *Tektronix*:in mallia *DPO 4104B*. Se on nelikanavainen oskilloskooppi, jonka kaistanleveys on 1 GHz ja näytteenottotaajuus 5 GS/s. Mittausdatat siirrettiin tietokoneelle, jossa ne muokattiin kuviksi *MATLAB*:illa.

6.1 Verifiontitapaukset

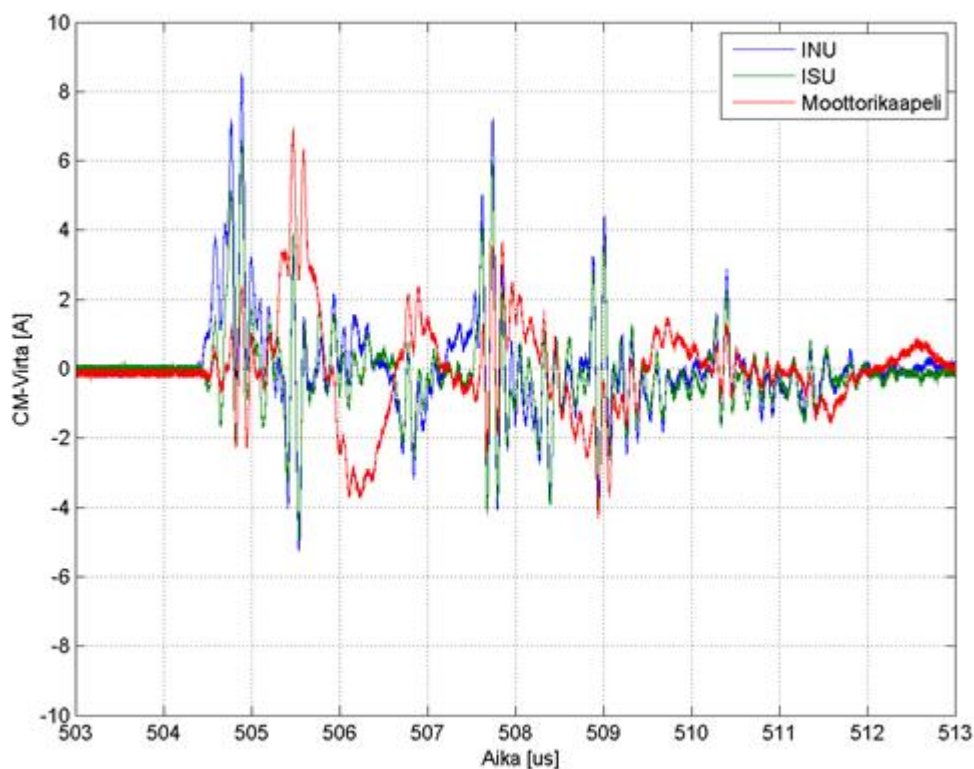
Simulointimallille ja mittauskytkennälle tehtiin useita testejä, joista seuraavaksi on esitetty kolme tapausa. Ensimmäisenä tapauksena käydään läpi yksinkertainen kytkentä, jossa moottorikaapelin pituus on 100 metriä. Toisessa tapauksessa moottorikaapelin pituus on vaihdettu 250 metriin. Viimeisessä tapauksessa tarkastellaan moottorikaapeliin syntyvää maasulkua.

6.1.1 Moottorikaapeli 100m

Ensimmäisenä käsitellään tilanne, jossa käyttöä on mitattu ja simuloitu 100 metrin moottorikaapelilla. Tällöin nähdään, miten simulointimalli käyttäytyy verrattaessa todellisiin mittauksiin ja lisäksi miten kaapelimalli toimii.

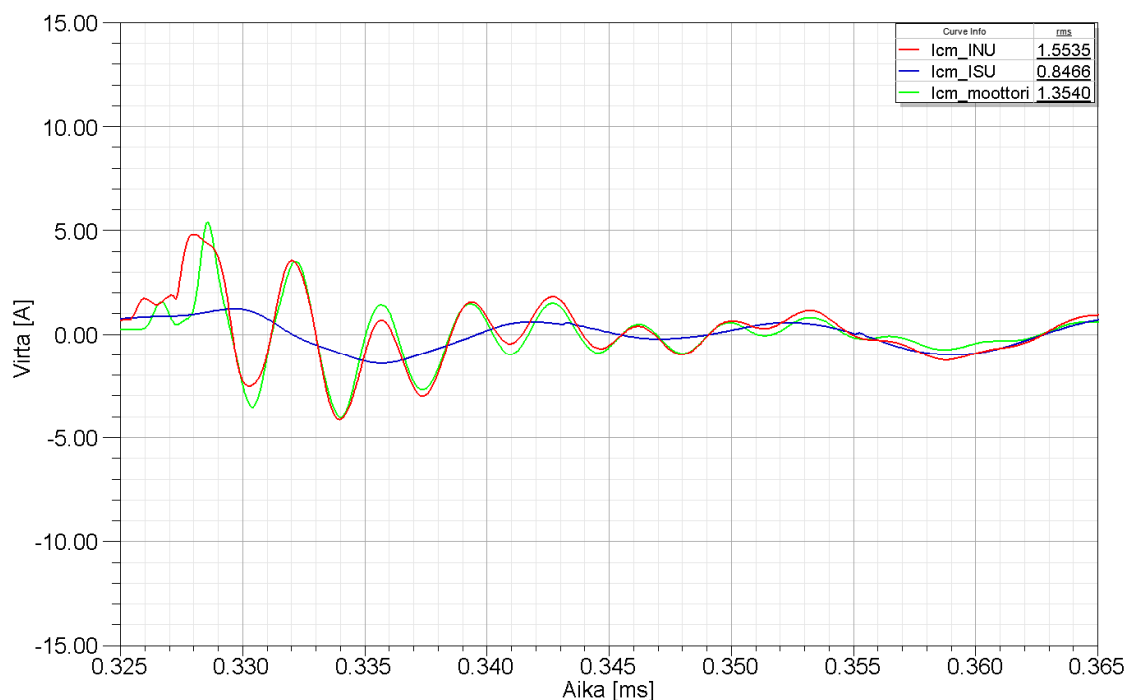
Kuvassa 6.2 on esitetty mittaustulokset virroista $i_{CM,INU}$, $i_{CM,ISU}$ ja $i_{CM,Moottori}$. Kuten virtojen käyrämuodoista nähdään, ne sisältävät hyvin korkeita taajuuskomponentteja, taajuudeltaan noin 10 MHz:ä. Vaikka kyseisen värähtelyn amplitudi on paikoin suuri, vai-

menee se hyvin nopeasti, jolloin vaikutukset virran tehollisarvoon jäävät pieniksi. Simulointimalli rakennettiin tarkastelemaan matalampitaajuisia virtoja, jolloin simulointituloksiin ei mallinnu näin korkeat taajuuskomponentit. Kaapeli- ja moottorimallissa on huomioitu virran taajuudet tasavirrasta aina noin 1 MHz:n taajuuteen. Muiden komponenttien osalta käytettiin yksinkertaisempia sijaiskytkentöjä, jotka eivät olleet taajuusriippuvia.



Kuva 6.2: Mitatut $i_{CM,INU}$, $i_{CM,ISU}$ ja $i_{CM,Moottori}$ ajan funktiona 100 metrin moottorikaapelilla.

Kuvassa 6.3 on esitetty simulointitulokset virroista $i_{CM,INU}$, $i_{CM,ISU}$ ja $i_{CM,Moottori}$. Verrattaessa mitattuja ja simuloituja tuloksia nähdään, että simuloinneissa $i_{CM,ISU}$ on noin 83 kHz:n taajuisia värähtelyä ja mitatuissa tuloksissa $i_{CM,ISU}$ on taajuudeltaan noin 700 kHz. Syöttömuuntajaa ei ole maadoitettu, jolloin syöttöpuolella yhteismuotoinen virta kulkee kaapelin ja muuntajan hajakapasitanssien kautta. Koska syöttöpuolen hajakapasitanssien suuruus suhteessa kuormapuolen hajakapasitansseihin on merkittävästi pienempi, vaikuttaa syöttöpuolen hajakapasitanssien suuruus yhteismuotoisen virran tehollisarvoihin ja värähtelytaajuuksiin herkemmin. $i_{CM,INU}$ ja $i_{CM,Moottori}$ värähtelytaajuuudet ja tehollisarvot saatiin lähelle mittaustuloksia. Kun $i_{CM,ISU}$:n värähtelytaajuutta nostettiin hajakapasitanssien suuruutta muuttamalla, $i_{CM,INU}$ ja $i_{CM,Moottori}$ värähtelytaajuuudet ja tehollisarvot kasvoivat huomattavan paljon.



Kuva 6.3: Simuloidut $i_{CM,INU}$, $i_{CM,ISU}$ ja $i_{CM,Moottori}$ ajan funktiona 100 metrin moottorikaapelilla.

Simuloidut $i_{CM,INU}$:n käyrämuodot saatiin lähes vastaamaan mitattuja. Ensimmäinen virtapiikki kohoaa noin viiteen ampeeriin, jonka jälkeen simuloitu käyrä jatkaa värähtelyä usean jakson ajan yli, kun mitattu käyrä vaimenee lähes välittömästi.

$i_{CM,Moottori}$:n simuloidussa käyrämuodossa nähdään, että ensimmäinen virtapiikki lähtee nousuun hieman $i_{CM,INU}$:n nousun jälkeen. Mitatuissa tuloksissa tämä aikaero on selkeästi suurempi. Ero mitatun ja simuloidun välillä syntyy oletettavasti kaapelimallista, koska kaapeli on kuvattu rajallisesta määrästä RLC-lohkoja.

Kun virtapulssi etenee kaapelissa, kaapelin hajakapasitanssit latautuvat virran kulkusuuntaan nähden järjestyksessä. Kapasitanssit lähtevät latautumaan, kun kapasitanssin potentiaaliero viereiseen kapasitanssiin eroaa nolasta. Kapasitanssien latautumisenopeutta rajoittavat induktanssit ja resistanssit. Simulointimalli ei ota huomioon elektronien rajallista nopeutta, joka tulee vastaa mittaustuloksissa.

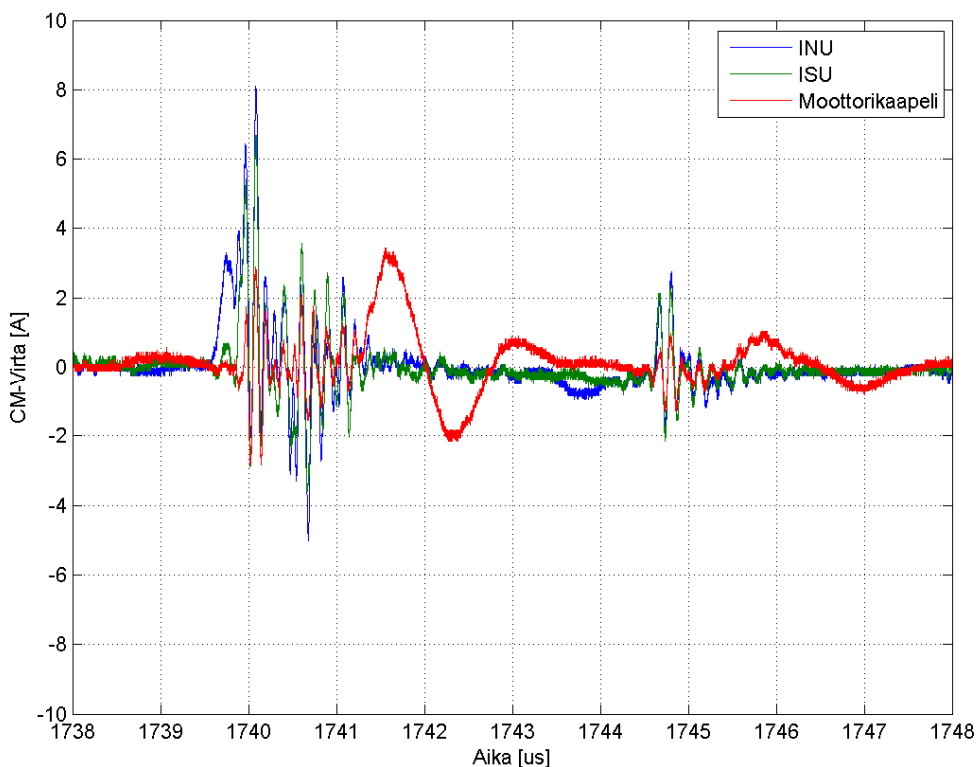
Mitattujen virtojen tehollisarvot olivat $I_{CM,INU} = 0,48$ A, $I_{CM,ISU} = 0,41$ A ja $I_{CM,Moottori} = 0,48$ A. Simuloitujen virtojen tehollisarvot olivat $I_{CM,INU} = 1,55$ A, $I_{CM,ISU} = 0,85$ A ja $I_{CM,Moottori} = 1,35$ A. Käyrämuotojen perusteella ero tehollisarvoissa syntyy värähtelyjen vaimenemisessa. Mitatuista virroista nähdään, värähtelyjen vaimeneminen kestää noin 10 μ s:ssa, kun simuloiduissa virroissa vaimeneminen kestää noin 25 μ s:a. Kuten luvussa aikaisemmin mainittiin, mallin kaikkiin komponentteihin ei ole sisällytetty taajuusriippuvuutta, jolloin vaimeneminen etenkin suurilla taajuuksilla on todellisuudessa voimakkaampaa.

6.1.2 Moottorikaapeli 250m

Seuraavaksi käsitellään tilanne, jossa käyttöä on mitattu ja simuloitu 100 metrin moottorikaapeli on vaihdettu 250 metrin kaapeliin. Tilanteella pyrittiin selvittämään miten moottorikaapelin pituuden lisääminen vaikuttaa yhteismuotoisten virtojen kulkuun käytössä.

Kuvassa 6.4 on esitetty mittaustulokset virroista $i_{CM,INU}$, $i_{CM,ISU}$ ja $i_{CM,Moottori}$. Erona 100 metrin moottorikaapelin mittaustuloksiin $i_{CM,Moottori}$:n virtapulssi lähtee nousemaan kytkennän jälkeen noin 1 μ s:n myöhemmin. Tämä johtuu kaapelin pituudesta, koska virtapulssi etenee kaapelissa äärellistä nopeutta.

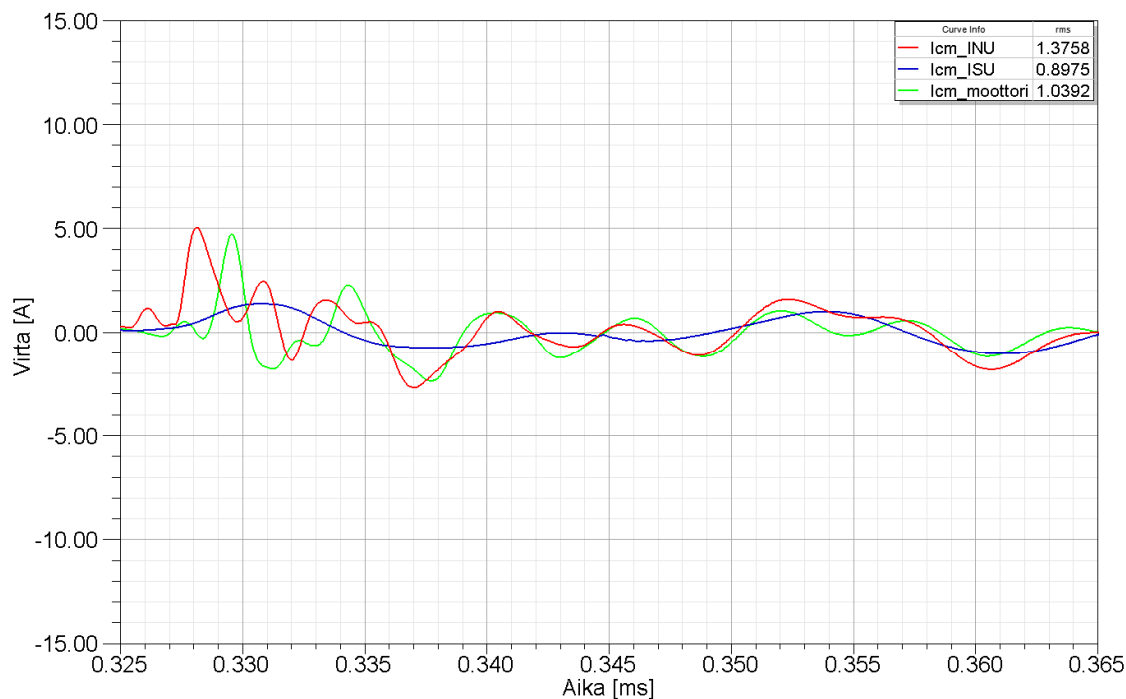
Käyrämuodoista nähdään myös virtapulssin heijastuminen. Ajanhetkellä 1741,6 μ s virtapulssi kulkee moottorin suuntaan. Tämän jälkeen virtapulssi heijastuu ja näkyy ajanhetkellä 1742,3 μ s negatiivisena virtana, koska kulkee toiseen suuntaan. Ajanhetkellä 1743,9 μ s virtapulssi näkyy $i_{CM,INU}$:n käyrämuodossa, vaikka hyvin vaimentuneena.



Kuva 6.4: Mitatut $i_{CM,INU}$, $i_{CM,ISU}$ ja $i_{CM,Moottori}$ ajan funktiona 250 metrin moottorikaapelilla.

Kuvassa 6.5 on esitetty simulointitulokset virroista $i_{CM,INU}$, $i_{CM,ISU}$ ja $i_{CM,Moottori}$. Verrattaessa mitta- ja simulointituloksia nähdään värähtelyjen vaimenemisen olevan hitaampaa simuloituissa tuloksissa, vaikka kytkentöjen jälkeisten ensimmäisten virtapiikkien amplitudit ovat lähes yhtä suuria. Virtojen pienempi vaimeneminen johtaa suurempiin tehollisarvoihin. Mitattujen virtojen tehollisarvot olivat $I_{CM,INU} = 0,46$ A, $I_{CM,ISU} = 0,42$ A

ja $I_{CM,Moottori} = 0.37$ A ja simuloitujen $I_{CM,INU} = 1,38$ A, $I_{CM,ISU} = 0,90$ A ja $I_{CM,Moottori} = 1,04$ A.



Kuva 6.5: Simuloidut $i_{CM,INU}$, $i_{CM,ISU}$ ja $i_{CM,Moottori}$ ajan funktiona 250 metrin moottorikaapelilla.

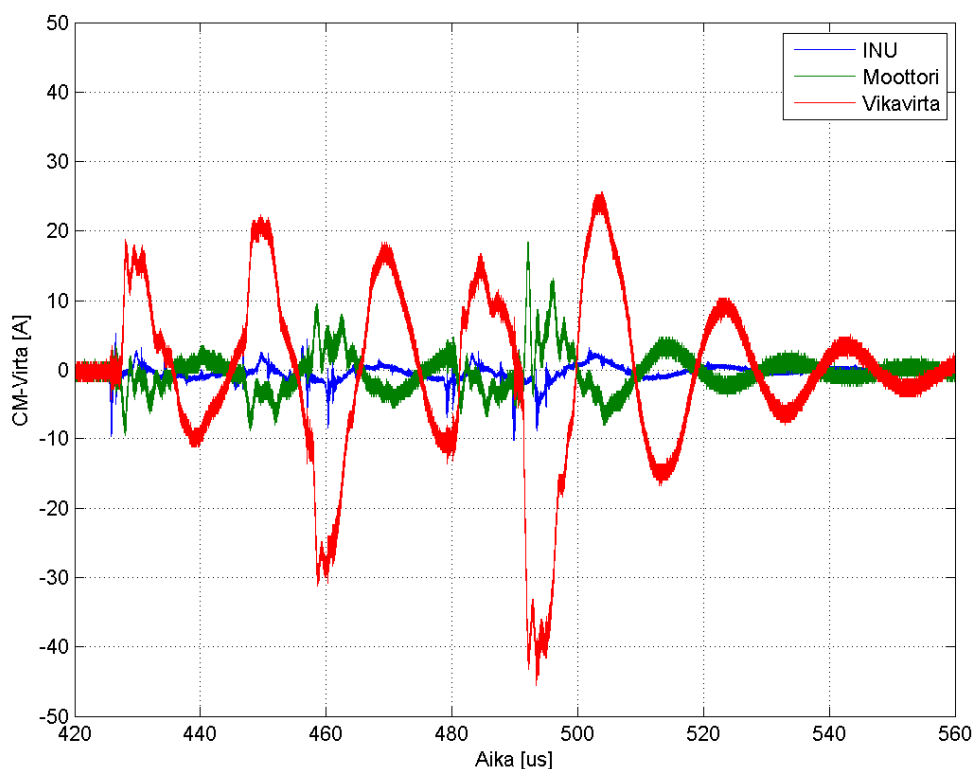
Kaapelin pituudesta syntyvä virtapulssin kulkuviive näkyy myös simulointitulosten käyrämuodoissa. Viiveen suuruus on myös samaa luokkaa noin $1,5 \mu\text{s}$:a.

Kun 250 metrin ja 100 metrin moottorikaapelin tapausten virran tehollisarvojen tuloksia verrataan toisiinsa, nähdään $I_{CM,Moottori}$:n laskevan. Kuten jo luvussa 5 havaittiin, suurempi osa yhteismuotoisesta virrasta kulkee moottorikaapelin hajakapasitanssien kautta maahan, jolloin $I_{CM,Moottori}$ pienenee.

6.1.3 Moottorikaapeli 250m sekä maasulku moottorikaapelin päässä

Lopuksi käsitellään tilanne, jossa moottorikaapelin pituus on 250 metriä ja sen päähän on kytketty maasulku. Aikaisemmista tilanteista poiketen tarkasteltavat virrat ovat $i_{CM,INU}$, $i_{CM,Moottori}$ sekä i_{vika} . i_{vika} kuvaa virtaa vikaresistanssin läpi.

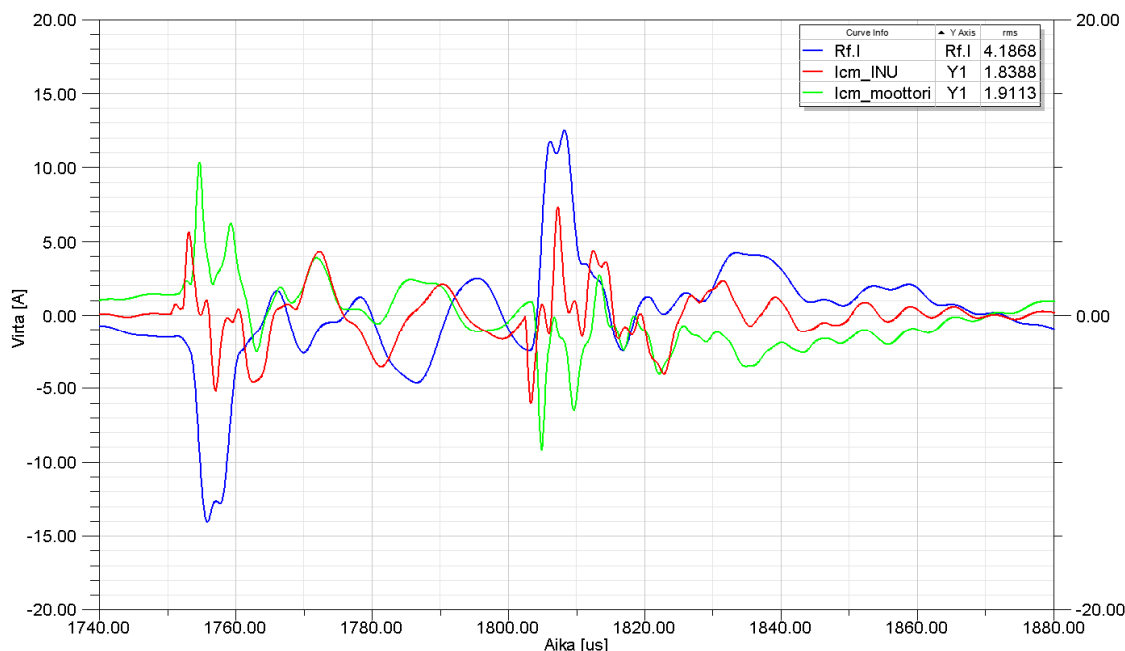
Kuvassa 6.6 on esitetty mittaustulokset virroista $i_{CM,INU}$, $i_{CM,Moottori}$ ja i_{vika} . Virtojen käyrämuodoista havaitaan, että i_{vika} värähtelee varsin suurilla amplitudeilla. Huomioitavaa on myös, että $i_{CM,Moottori}$:n suurimmat amplitudit ovat lähes 20 ampeeria.



Kuva 6.6: Mitatut $i_{CM,INU}$, $i_{CM,Moottori}$ ja $i_{Vikavirta}$ ajan funktiona 250 metrin moottorikaapelilla, kun kaapelin moottoripäässä on maasulku.

Mittaustulosten virtojen tehollisarvot olivat $I_{CM,INU} = 0.86$ A, $I_{CM,Moottori} = 2.21$ A ja $I_{Vikavirta} = 9.55$ A. Kuvassa 6.7 on esitetty simulointitulokset virroista $i_{CM,INU}$, $i_{CM,Moottori}$ ja i_{vika} . Simulointitulosten virtojen tehollisarvot olivat $I_{CM,INU} = 1.83$ A, $I_{CM,Moottori} = 1.91$ A ja $I_{Vikavirta} = 4.19$ A. Kuten aikaisemmissa tilanteissa, $I_{CM,INU}$ on suurempi simuloiduissa tuloksissa värähtelyn vaimenemisesta johtuen. Ero on kuitenkin varsin suuri, koska $I_{CM,Moottori}$:n arvot ovat hyvin lähellä toisiaan. Tilannetta on tarkasteltu tarkemmin luvun lopussa.

$I_{Vikavirta}$ on simuloidussa tapauksessa hieman pienempi. Vikavirran arvo riippuu paljon vikaresistanssi suuruudesta ja simuloidussa tilanteessa on käytetty hieman suurempaa resistanssin arvoa, jotta välttyttäisiin liialliselta värähtelyiltä.



Kuva 6.7: Simuloidut $i_{CM,INU}$, $i_{CM,Moottori}$ ja $i_{Vikavirta}$ ajan funktiona 250 metrin moottorikaapelilla, kun kaapelin moottoripäässä on maasulku.

Kuvan 6.6 ja 6.7 virtojen käyrämuotoja vertaamalla voidaan havaita, kun virta $i_{CM,INU}$ kulkee positiiviseen suuntaan, $i_{CM,Moottori}$ kulkee negatiiviseen suuntaan ja $i_{Vikavirta}$ positiiviseen suuntaan. Virran kulkiessa vikaresistanssin läpi vaiheesta maahan, kaapelin hajakapasitanssit syöttävät tätä virtaa. Samaan tapaan moottorin hajakapasitanssit purkautuvat ja koska syntyvä virta kulkee moottorilta vikapaikkaa kohti, näkyy virta negatiivisena.

Kuten aikaisemmin luvussa havaittiin, simuloidun $I_{CM,INU}$:n arvo oli hieman suurempi kuin mittauksista saatu arvo. Mallia simuloitiin eri moottorin staattorin hajakapasitanssin arvoilla. Hajakapasitanssin arvoa simuloitiin 50 % pienemmällä ($C_{ws} * 0,5$) ja 50 % suuremmalla ($C_{ws} * 1,5$) arvolla kuin alkuperäisessä simuloinnissa. Taulukossa 6.2 on esitetty simulointitulokset eri virtojen tehollisarvoista, kun maasulku on kytketty kuvan 6.1 mukaisesti moottorikaapeliin.

Taulukko 6.2: Simuloitujen virtojen $I_{CM,INU}$, $I_{CM,Moottori}$ ja $I_{Vikavirta}$ tehollisarvot maasulun aikana kolmella eri moottorin staattorin hajakapasitanssin C_{ws} arvolla.

	$C_{ws} * 0,5$	C_{ws}	$C_{ws} * 1,5$
$I_{CM,INU}$ [A]	1,83	1,84	1,87
$I_{CM,Moottori}$ [A]	1,14	1,91	2,54
$I_{Vikavirta}$ [A]	3,69	4,19	4,52

Taulukon 6.1 tuloksista nähdään, että INU:n yhteismuotoinen virta $I_{CM,INU}$ pysyy lähes vakiona staattorin hajakapasitanssin muuttuessa. Vastaavasti moottorin yhteismuotoinen virta $I_{CM,Moottori}$ kasvaa samalla, kun staattorin hajakapasitanssia kasvatetaan. Kuvassa 6.8 on esitetty simuloitujen virtojen käyrämuodot, kun staattorin hajakapasitanssi on 1,5-kertainen alkuperäisen simulointiin verrattaen.



Kuva 6.8: Simuloidut $i_{CM,INU}$, $i_{CM,Moottori}$ ja $i_{Vikavirta}$ ajan funktiona 250 metrin moottori-kaapelilla, kun kaapelin moottoripäässä on maasulku. staattorin hajakapasitanssin arvona on käytetty arvoa $C_{ws} * 1,5$.

Kun verrataan kuvia 6.7 ja 6.8, nähdään kytkentöjen jälkeisten noin 50 kHz:n värähtelyjen vastaavan lähes toisiaan. Virtojen tehollisarvojen ero syntyy matalampitaajuisista virtakomponenteista, jotka nähdään kuvien oikeassa reunassa. Tämän värähtelyn taajuus on noin 13 – 14 kHz riippuen staattorin hajakapasitanssien suuruudesta. Suuremmilla staattorin hajakapasitanssin arvoilla taajuus pienenee.

7 Yhteenveto ja johtopäätökset

Kaivosympäristö asettaa taajuusmuuttajakäytölle rajoituksia henkilö- ja laiteturvallisuudesta johtuen. Muun muassa Australian ja Uuden-Seelannin standardi AS/NZS 2081:2011 määrittelee sähkökäyttöjen maasulkuvirtojen rajaksi 500 mA. Taajuusmuuttajan kytkinkomponenttien kytkennät synnyttävät yhteismuotoista virtaa, joka häiritsee maasulkusuojan toimintaa. Osa syntyvästä yhteismuotoisesta virrasta kulkee maasulkusuojan läpi ja saattaa laukaista maasulkusuojan, vaikka maasulkua ei olisikaan.

Työssä rakennettiin kolmivaiheinen sähkökäytön simulointimalli, jonka tarkoituksena oli kuvata yhteismuotoisten virtojen syntymistä ja virtaamista taajuusmuuttajakäytön eri osissa. Simulointimalliin rakennettiin kaikki tärkeimmät taajuusmuuttajakäytön osat syöttömuuntajasta moottorille. Malli käyttäytyi pääosin odotetulla tavalla ja sillä pystyttiin tutkimaan erilaisia ilmiöitä liittyen taajuusmuuttajakäytön rakenteeseen ja yhteismuotoiseen virtaan. Työssä simulointimallilla tutkittiin yhteismuotoisen virran käyttäytymistä muun muassa erilaisilla kaapelimalleilla, eripituisilla kaapeleilla sekä eri paikkoihin sijoitetuiden maasulkujen aikana.

Laboratoriomittausten perusteella etenkin kuormapuolen yhteismuotoiset virrat käyttäytyivät mallissa hyvin. Mallin käyttäytyminen on hyvin herkkä, jolloin sen käyttö keluvan verkon tapauksissa on vaikeaa.

Simulointimalli soveltuu hyvin työssä esiteltyjen asioiden tutkimiseen. Malli ei ole kuitenkaan vielä niin tarkka, että sitä voisi käyttää itsessään taajuusmuuttajakäytön suunnittelun mitoituksessa. Simulointimallin kehityksen kannalta olisi hyvä saada mittaustuloksia tilanteista, joissa taajuusmuuttajakäytön kytkentä olisi yksinkertainen asiakasasennus. Lisäksi täytyisi tutkia tarkemmin, miten mallintaa paremmin taajuusmuuttajakäytön muut osat kuin taajuusmuuttaja ja kaapeli.

Lähteet

- 1 N. Mohan, T. Undeland, W. Robbins, "*Power Electronics*", John Wiley & Sons, Inc., USA, 2003, 802 s.
- 2 G. Skibinski, B. Wood, J. Nichols, L. Barrios, "*Effect of Adjustable-Speed Drive on the Operation of Low-Voltage Ground-Fault Indicators*", in *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 37, NO. 5, 2001, 15 s.
- 3 J. Palomäki, "*Taajuusmuuttajan maasulun mallintaminen*", Helsinki, 2001
- 4 Yu Xiang, V. Cuk, J.F.G. Cobben, "*Impact of Residual Harmonic Current on Operation of Residual Current Devices*," in *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011 10th International Conference*, Rome, Italy, 2011, 4 s.
- 5 F. Frensch, "*High-Frequency Behavior of Residual Current Devices*", in *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 27, NO.3, 2012, 7 s.
- 6 Australian/New Zealand Standard AS/NZS 2081:2011 "*Electrical protection devices for mines and quarries*", Standards Australia Limited/Standards New Zealand, Australia, 2011, 74 s.
- 7 P. Mäki-Ontto, H. Kinnunen and J. Luomi, "*Three-phase model for the simulation of common-mode phenomena and shaft voltages in AC motor drive systems*," in *Conference Record of the International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2005*, San Antonio, TX, USA, 2005, 140 s.