LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Teppo Vuorio

AKTIIVISEN VERKKOSILLAN TUOTTAMAN YHTEISMUOTOISEN JÄNNITTEEN VAIMENTAMINEN KAKSITASOISESSA, JÄNNITEVÄLIPIIRILLISESSÄ, TAAJUUSMUUTTAJATOPOLOGIASSA

Työn tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen
DI Juhamatti Nikander

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Teppo Vuorio

Aktiivisen verkkosillan tuottaman yhteismuotoisen jännitteen vaimentaminen kaksitasoisessa, jännitevälipiirillisessä, taajuusmuuttajatopologiassa

Diplomityö

2014

81 sivua, 49 kuvaa, 6 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen
DI Juhamatti Nikander

Hakusanat: Yhteismuotoinen, aktiivinen verkkosilta, PWM, kaksitasoinen, suodattaminen

Pulssinleveysmoduloidun vaihtosuuntaajan hyötysuhteen parantaminen ja kytkentätaajuuden suurentaminen ovat johtaneet lähtöjännitteen suuritaajuiseen taajuussisältöön kaksitasoisessa, jännitevälipiirillisessä taajuusmuuttajatopologiassa. Kasvava tarve siirtää tehoa myös verkkoon päin on lisännyt aktiivisen verkkosillan käyttöä.

Kaksitasoisen aktiivisen verkkosillan vaikutuksesta DC-välipiirin keskipisteen ja kolmivaiheisen kuorman tähtipisteen välinen jännite on nollasta poikkeava aiheuttaen suurentuneen yhteismuotoisen jännitteen taajuusmuuttajan lähtöön ja verkon puolelle. Lisäksi yhteismuotoisten jännitteiden aiheuttamat kytkentätaajuiset häiriövirrat voivat aiheuttaa vikavirtasuojien tahatonta laukeamista, vaikeuttaa EMC-standardien vaatimusten täyttämistä, lisätä moottorin käämieristyksien rasitusta ja mahdollisuutta moottorin laakerivaurioille.

Diplomityössä tutkitaan aktiivisen ja passiivisen verkkosillan tuottamaa yhteismuotoista jännitettä simuloinneilla. Esitellään aikaisempaa tutkimustietoa yhteismuotoisen jännitteen ja virran vaimennusratkaisuista aktiivista verkkosiltaa käytettäessä. Tutkimustiedon pohjalta suunnitellaan koelaitteistolle soveltuva suodin. Suotimen toiminta testataan simuloinnein sekä kokeellisin mittauksin.

Tehdyt mittaukset osoittavat, että suunniteltu suodin vaimentaa yhteismuotoista jännitettä noin 20 dB verkkosillan kytkentätaajuudella ja tämän jälkeen yli 20 dB/dekadi taajuuteen 100 kHz asti. Lisäksi yhteismuotoisen virran suuruus syöttökaapelin kautta pieneni ehdotetun suotimen vaikutuksesta.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
School of Technology
Degree Programme in Electrical Engineering

Teppo Vuorio

Mitigating Common-Mode Voltage Caused by Active Front-End in Two-Level Voltage Source Frequency Converter Topology

Master's thesis

2014

81 pages, 49 figures, 6 tables and 1 appendix

Examiners: Professor Juha Pyrhönen
M.Sc. Juhamatti Nikander

Keywords: Common-Mode, Active Front-End, PWM Network Converter, PWM, Two-Level, Filtering

Improved efficiency and increased switching frequency of the pulse-width-modulated inverter has led to high-frequency voltage harmonics in two-level voltage source frequency converter topology. Also the growing need for feeding electric power back into the supply grid has increased the use of converters with active front-ends.

Because of the two-level active front-end (PWM network converter), the voltage between DC-link middle-point and three-phase load star-point is nonzero, which causes increased common-mode voltage to the output of the frequency converter as well as to the grid side. In addition, interference currents of the switching frequency caused by the common-mode voltages may cause unintentional tripping of the residual-current devices, complicate the compliance of the EMC-standards, increase voltage stress on motor winding insulations and increase the possibility of the motor bearing failures.

In this Master Thesis the common-mode voltages produced by either active or passive network bridge are studied by simulations. Previous research of the attenuation solutions of the common-mode voltage and current is reviewed. Based on the previous research, suitable filter for the test setup is designed. Filter performance is tested through simulations and experimental measurements.

The measurements show that the designed filter attenuates the common-mode voltage by about 20 dB at the switching frequency of the active front-end and then by over 20 dB/decade up to 100 kHz frequency. In addition, the common-mode current through the supply grid decreased due the proposed filter.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty KONE Oyj:lle osana Drive-tiimiä. Haluan kiittää ryhmänvetäjää Vesa-Matti Koistista diplomityöpaikasta ja koko ryhmää useista aiheehdotuksista. Suuri kiitos kuuluu myös Juha Pyrhöselle hyvistä kommenteista ja ripeästä yhteydenpidosta. Erityisesti haluan kiittää Juhamatti Nikanderiä diplomityön aiheen esittelystä, sen ohjaamisesta sekä tärkeästä avusta mittausjärjestelmän parissa.

Kiitokset myös opiskelutovereilleni erinomaisesta opiskeluilmapiiristä, ja vanhemmilleni kaikesta siitä tuesta, jota olen opintojeni aikana saanut.

Lopuksi haluan kiittää Annia tuesta ja ymmärryksestä diplomityön ja koko opiskelujen ajalta.

Hyvinkäällä 16.2.2013

Teppo Vuorio

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO 9

1.1 Tutkimuksen rakenne 12

2 YHTEISMUOTOINEN JÄNNITE 13

2.1 Verkkosiltana passiivinen dioditasasuuntaussilta 13

2.2 Moottorisilta 15

2.3 Aktiivinen verkkosilta 21

2.4 Aktiivisella verkkosillalla varustettu moottorisilta 23

3 YHTEISMUOTOISEN JÄNNITTEEN VAIMENTAMISKEINOJA 24

3.1 DC-välipiirin yhteismuotoinen suodin 24

3.2 Kaksoiskytketty suodintopologia 30

3.3 Erityinen suodin suuritaajuisen maavuotovirran vaimentamiseksi 32

4 SUOTIMEN SUUNNITTELU 33

4.1 Tutkittava järjestelmä 33

4.2 Tutkittava järjestelmä suotimella 34

4.3 Suodinkomponentit 35

4.3.1 Yhteismuotoinen kuristin L_{CM} 35

4.3.2 Kondensaattorit C_{d1}, C_{d2} ja C_f 38

4.3.3 Vastus R_f 39

4.4 Yhteismuotoisen piirin sijaiskytkentä 39

4.5 Suotimen mitoittaminen 41

4.6 Suotimen vaimennus 46

5 SIMULOINTITULOKSET 48

6 KOKEELLISET TULOKSET 51

6.1 Yhteismuotoinen jännite 53

6.2 Yhteismuotoinen virta $\sum I_1$ 56

6.3 Yhteismuotoinen virta $\sum I_2$ 59

6.4 Suodinpiirin virta ja häviöteho 62

6.5 Tulokset tyhjäkäynnissä 65

6.5.1 Yhteismuotoinen jännite 65

6.5.2 Yhteismuotoinen virta $\sum I_1$ 67
6.5.3 Yhteismuotoinen virta $\sum I_2$ 69
6.5.4 Suodinpiirin virta ja häviöteho 71
6.6 Kytkentätransientti 73
7 JOHTOPÄÄTÖKSET 74
8 YHTEENVETO 76
LÄHTEET 78

LIITE 1 AKTIIVISEN VERKKOSILLAN SIMULOINTIMALLI

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

roomalaiset aakkoset

A	poikkipinta-ala
C	kondensaattori, kapasitanssi
e	vastasähkömotorinen jännite
f	taajuus
G	siirtofunktio
$\boldsymbol{H}$	magneettikentän voimakkuus
I, i	virta
L	induktanssi
M	hajainduktanssi
N	käämien kierroslukumäärä
R	vastus, resistanssi
s	Laplace-muuttuja
U	jännite
Y	admittanssi
Z	impedanssi

kreikkalaiset aakkoset

Φ	magneettivuo
ω	kulmataajuus
ζ	vaimennusvakio
μ	permeabiliteetti

Alaindeksit

0	nollataso
e	magneettisydämen
G,g	maataso
h	harmoninen
ka	keskiarvo

LL	vaiheesta vaiheeseen
n	tähtipiste
N	negatiivinen DC-välipiirin potentiaali
P	positiivinen DC-välipiirin potentiaali
s	verkko-
U, V, W	vaiheet

Yläindeksit

‘	virtuaalinen, kuvitteellinen
^	huippuarvo

Lyhenteet

AC	Alternating Current, vaihtovirta
AFE	Active Front-End, aktiivinen verkkosilta
DC	Direct Current, tasavirta
CM	Common-Mode, yhteismuotoinen
EMC	Electromagnetic Compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus
EMI	Electromagnetic Interference, sähkömagneettinen häiriö
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor, eristehilabipolaaritransistori
PCC	Point of Common Coupling, yhteisen kytkennän piste
PWM	Pulse-Width Modulation, pulssinleveysmodulaatio
RMS	Root-Mean-Square, tehollisarvon kuvaus
UPS	Uninterruptible Power Supply, keskeytymätön teholähde

1 JOHDANTO

Puolijohdetehokytkimiä on käytetty vaihtosuuntaajissa jo usean vuosikymmenen ajan. Teknologisen kehityksen myötä niiden nopeus sekä virta- ja jännitekestoisuus ovat kasvaneet, niistä on tullut entistä helpommin ohjattavia, pienempiä sekä hyötysuhteeltaan parempia.

Vaihtosuuntaajia käytetään energianmuuntoprosesseissa, DC/AC tai AC/DC. AC/DC-tasasuuntaus on yleisimmin toteutettu puolijohdetehokytkimien sijaan passiivisella diodisillalla. Sen sijaan aktiivisilla komponenteilla toteutettujen vaihtosuuntaajien sovelluskohteita ovat erilaiset DC-energialähteet, kuten aurinkopaneelit tai akut esimerkiksi UPS-järjestelmissä tai sähköautoissa. AC/AC-käytöissä vaihtosuuntaajaa hyödynnetään esimerkiksi AC-moottorin nopeuden ohjaukseen, missä vaihtosuuntaaja on taajuusmuuttajan moottorisiltana. Riippuen välipiirin luonteesta, puhutaan joko jännite- tai virtavälipiirillisestä taajuusmuuttajasta. Jännitevälipiirillisiä vaihtosuuntaajia on käytännössä saatavina joko kaksitasoisena tai kolmitasoisena. Teollisuuden kolmivaiheisissa pienjännitesähkökäytöissä, erityisesti kaksitasoinen jännitevälipiirillinen vaihtosuuntaajatopologia on yleistynyt taajuusmuuttajissa muun muassa edullisuuden, yksinkertaisuuden ja luotettavuuden myötä.

Vaihtosuuntaajien hyötysuhdetta on parannettu vähentämällä kytkentä- ja johtamistilanhäviöitä. Kytkentähäviöitä on pienennetty lyhentämällä puolijohdetehokytkimien syttymis- ja sammumisaikoja. Sen sijaan johtamistilanhäviöitä on vähennetty pienentämällä kynnysjännitteitä ja sisäistä resistanssia. Usein pyritään myös käyttämään suurta kytkentätaajuutta. Suuren kytkentätaajuuden etuna on se, että induktiivisten suodinkomponenttien koko saadaan pienemmäksi. Lisäksi ääniongelmat pienenevät kytkentätaajuuden lähestyessä kuuloalueen ylärajaa. Kuitenkin puolijohdetehokytkimien nopean kytkemisen seurauksena vaihtosuuntaajan lähtöjännite sisältää merkittävän määrän kytkentätaajuuden harmonisia. Säteilevien mittausten perusteella taajuusmuuttajien suurimmat häiriöt esiintyvät kytkentätaajuudesta aina satoihin megahertseihin.

Kaksitasoisessa vaihtosuuntaajassa lähtövaihe voidaan kytkeä joko DC-välipiirin positiiviseen tai negatiiviseen potentiaaliin. Näin ollen kolmivaiheisessa järjestelmässä on kahdeksan erilaista mahdollisuutta kytkeä puolijohdetehokytkimiä: kaikki vaiheet voidaan kytkeä joko positiiviseen tai negatiiviseen DC-välipiirin potentiaaliin, kaksi vaihetta voidaan kytkeä negatiiviseen potentiaaliin ja yksi positiiviseen tai päinvastoin, yksi vaihe negatiiviseen ja kaksi vaihetta positiiviseen potentiaaliin. Voidaan päätellä, että jännite DC-välipiirin keskipisteen ja kolmivaihemoottorin tähtipisteeseen välillä on nollasta poikkeava ja jonka suuruus muuttuu aina kytkennän muuttuessa. Kirjallisuudessa tähtipisteen jännitettä maatasoa vasten kutsutaan yhteismuotoiseksi jännitteeksi. Vaihtosuuntaaja on siis yhteismuotoinen häiriölähde, jonka tuottama lähtöjännite sisältää harmonisia puolijohdetehokytkimien kytkentätaajuuden monikerroilla. (Mohan et al. 2003)

Muun muassa puolijohdetehokytkimien, kaapeleiden ja moottorin hajakapasitanssit muodostavat suljetun piirin yhdessä sähköverkon syöttömuuntajan ja maatason kanssa, jossa suuritaajuinen virta voi kulkea. Yhteismuotoinen virta palaa takaisin vaihtosuuntaajaan pieni-impedanssisimman kulkureitin kautta. Käytännössä paluuvirralla on useita rinnakkaisia sulkeutumisreittejä, joita ei voida tarkasti määrittää. Kuitenkin jokainen paluureitti sisältää induktanssia, jonka seurauksena taajuusmuuttajan elektroniikkaan saattaa aiheutua jännitehäiriöitä kytkentätaajuisen yhteismuotoisen virran kulkiessa elektroniikan läpi. Lisäksi yhteismuotoinen virta voi aiheuttaa vikavirtasuojan tarpeetonta laukeamista kulkiessaan syöttömuuntajan maadoitusjohtimen kautta, jos muuntajan tähtipiste on maadoitettu. Suurentuneet maavuotovirrat lisäävät myös epätoivottuja sähkömagneettisia häiriöitä vaikeuttaen EMC-standardien vaatimustenmukaisuutta sekä johtuvissa että säteilevissä mittauksissa. (ABB 2011) & (Skibinski et al. 1999)

Moottorikäytöissä yhteismuotoinen jännite on erittäin haitallinen, koska se suurentaa moottorin jänniterasitusta, joka voi johtaa vaiheen ja maan väliseen eristysvaurioon (Yanshu 2002). Lisäksi yhteismuotoinen jännite indusoi moottorin laakereiden yli

jännitteen synnyttäen laakerivirtoja, jotka voivat lyhentää laakereiden elinikää etenkin suuremman teholuokan moottoreissa (Särkimäki 2009).

Aikaisemmin yhteismuotoisen jännitteen tutkimus on keskittynyt lähinnä suurille moottorikaapelin pituuksille dioditasasuuntaussiltaa käytettäessä verkkosiltana. Ilmiötä ja sen vaimentamista on tutkinut esimerkiksi Dzhankhotov (2009). Suurilla moottorikaapelin pituuksilla varustetun sähkökäytön vaikutuksia on tutkinut myös Purcarea (2011). Lisäksi esimerkiksi Jounne et al. (1997) ehdottavat yhteismuotoista suodinta moottorin terminaaliin tai Hanigovski et al. (2004) vaihtosuuntaajan lähtöön. Myös Hongfei et al. (2004) ehdottavat vaihtosuuntaajan lähtöön suodinratkaisua vaimentamaan yhteismuotoista jännitettä sekä pitkän moottorikaapelin aiheuttamaa ylijännitettä. Lisäksi Naumanen (2010) ja Chung-Chuan et al. (2010) ovat tutkineet vaihtosuuntaajan lähtöjännitteen modulointikuviota, pyrkimyksenä vähentää yhteismuotoisen jännitteen vaikutuksia. Lisäksi esimerkiksi Yanshu et al. (2002) ja Ström (2009) ovat tutkineet yhteismuotoisen jännitteen vaimentamista aktiivisella suotimella.

Nykyisin dioditasasuuntausillan korvaajaksi on nousemassa aktiivinen verkkosilta, joka mahdollistaa tehon siirtämisen myös verkkoon päin, paremman tehokertoimen, korkeamman välipiirin jännitteen sekä verkkovirran särökertoimen pienentämisen. Lisäksi aktiivinen verkkosilta aiheuttaa huomattavasti vähemmän syöttöverkon vaihejännitteen nimellistaajuuden virtaharmonisia verrattuna dioditasasuuntaussiltaan. Sen sijaan suuritaajuiset harmoniset kytkentätaajuudella ja sen kerrannaisilla lisääntyvät entisestään. Lisäksi korkeampi välipiirin jännite lisää jänniterasitusta verkkosillan AC-puolella lisäten osaltaan vuotavan häiriövirran suuruutta maatasoon (Morán et al. 2004).

Tässä työssä syvennytään tutkimaan ainoastaan aktiivisen verkkosillan aiheuttamia yhteismuotoisia häiriöitä. Tavoitteena on suunnitella suodin vaimentamaan aktiivisen verkkosillan tuottama yhteismuotoinen jännite diodisiltaa vastaavalle tasolle. Lisäksi tavoitteena on suodattaa kytkentätaajuiset jänniteharmoniset sekä vähentää syöttö-

muuntajan tähtipisteen maadoituksen kautta kiertävää suuritaajuista yhteismuotoista häiriövirtaa heikentämättä järjestelmän luotettavuutta. Tutkimusmenetelminä käytetään MATLAB/Simulink tietokonesimulointeja ja suunnitellun suotimen toiminnan varmistamiseksi tehdään kokeellisia mittauksia.

Rajataan tutkimus koskemaan ainoastaan kolmivaiheista, kaksitasoista topologiaa. PWM-modulaattoriin ei tehdä muutoksia. Lisäksi yhteismuotoisen jännitteen analysoinnin ja suodin suunnittelun yksinkertaistamiseksi rajataan kulkuaaltoilmiön tarkastelu suodinsuunnittelun ulkopuolelle.

1.1 Tutkimuksen rakenne

Diplomityö on jaettu kahdeksaan lukuun. Johdannon jälkeen, luvussa 2 tarkastellaan yhteismuotoisen jännitteen muodostumista kaksitasoisessa vaihtosuuntaajatopologiassa. Verrataan yhteismuotoisen jännitteen suuruutta dioditasasuuntaajan ja vaihtosuuntaajan välillä. Luvussa 3 tarkastellaan aikaisempaa tutkimustietoa yhteismuotoisten jännitteiden ja virtojen vaimentamisratkaisuista aktiivista verkkosiltaa käytettäessä. Luvussa 4 suunnitellaan ja mitoitetaan suodin välipiirin keskipisteen ja kolmivaiheverkolle muodostetun tähtipisteen välille. Luvussa 5 esitetään tehdyt simulointitulokset ja luvussa 6 kokeelliset tulokset ilman suodinta sekä suotimen kanssa. Luvussa 7 pohditaan saatuja tuloksia ja luvussa 8 tehdään yhteenveto sekä ehdotetaan jatkokehitysmahdollisuuksia.

2 YHTEISMUOTOINEN JÄNNITE

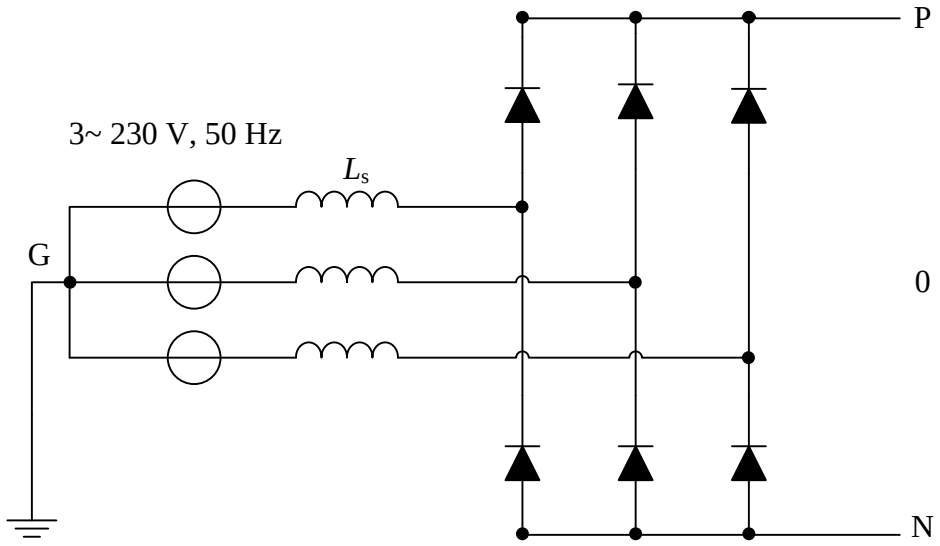
Vaihtosuuntaajat aiheuttavat sekä säteilevää että johtuvaa sähkömagneettista häiriötä. Häiriöt muodostuvat ero- ja yhteismuotoisesta häiriöstä. Diplomityössä painotutaan tutkimaan yhteismuotoista häiriötä. Yhteismuotoinen jännite voidaan mitata vaihejohtimien ja maatason väliltä. Yhteismuotoinen virta voidaan määritellä vaihevirtojen summana

$$i_{\mathrm{CM}} = i_{\mathrm{L1}} + i_{\mathrm{L2}} + i_{\mathrm{L3}}. \tag{1}$$

Yhteismuotoiset virrat kulkevat vaihejohtimissa samansuuntaisesti (Williams 2007).

2.1 Verkkosiltana passiivinen dioditasasuuntaussilta

Yhteismuotoisen jännitteen analysoinnin helpottamiseksi tarkastellaan aluksi kuvan 1 avulla kaksitasoisen vaihtosuuntaajatopologian tulossa tyypillisesti olevaa dioditasasuuntaussiltaa. AC-puolella oleva induktanssi L_s kuvaa syöttöverkon impedanssia (Mohan et al. 2003).

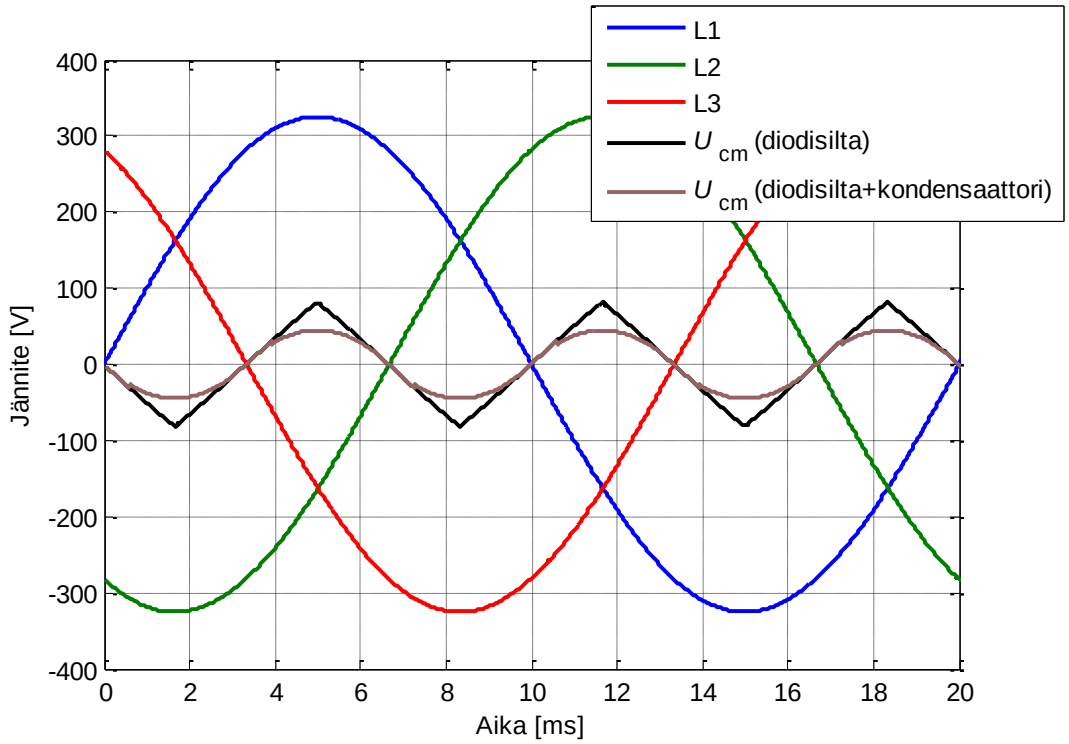


Kuva 1. Kolmivaiheinen ja kaksitasoinen dioditasasuuntaussilta, jossa syöttömuuntajan tähtipiste on maadoitettu.

Välipiirin keskipisteen jännite syöttöverkon maata vasten saadaan keskiarvona yhtälöstä

$$U_{0G} = \frac{U_{PG} + U_{NG}}{2} = U_{CM}, \tag{2}$$

missä U_{PG} ja U_{NG} ovat välipiirin positiivinen ja negatiivinen jännite maatasoa vasten. Kuvaan 2 on piirretty välipiirin keskipisteen jännite maatasoa vasten yhtälön (2) mukaisesti. Lisäksi kuvassa on esitetty välipiirin kondensaattorin lisäämä jännitettä suodattava vaikutus.

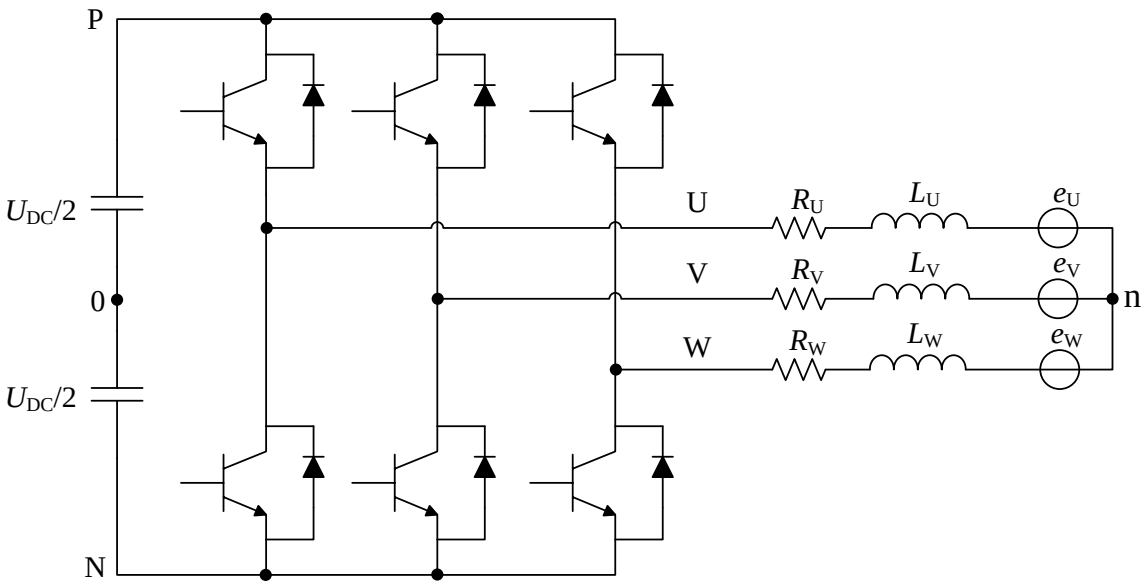


Kuva 2. Simuloitu yhteismuotoinen jännite välipiirin keskipisteen ja maatason välillä ilman välipiirin kondensaattoria ja kondensaattorin kanssa. Simulointiaikana on yksi 50 Hz:n syöttöjännitteen jakso. Kuvaan on piirretty myös 50 Hz:n vaihejännitteet. Kondensaattorin suuruus on 1000 µF ja induktanssin L_s suuruus on 1 mH.

Kuvasta 2 voidaan havaita, että välipiirin keskipiste huojuu maata vasten kolminkertaisella taajuudella verkon syöttötaajuuteen nähden. Kondensaattorin lisääminen välipiiriin suodattaa diodisillan aiheuttamaa yhteismuotoista jännitettä.

2.2 Moottorisilta

Tutkitaan seuraavaksi kuvan 3 avulla vaihtosuuntaajaa ja sen vaikutuksia lähtöjännitteeseen kaksitasoisessa topologiassa kolmivaiheisella kuormalla.



Kuva 3. Kaksitasoinen jännitevälipiirillinen vaihtosuuntaajatopologia tyypillisessä moottorikäytössä.

Kuvan 3 lähtövaiheille voidaan muodostaa seuraavat jänniteyhtälöt vaihtosuuntaajan lähtövaiheen ja tähtipisteen välille

$$U_{\mathrm{Un}} = U_{\mathrm{U0}} - U_{\mathrm{n0}}, \tag{3}$$

$$U_{\mathrm{Vn}} = U_{\mathrm{V0}} - U_{\mathrm{n0}}, \tag{4}$$

$$U_{\mathrm{Wn}} = U_{\mathrm{W0}} - U_{\mathrm{n0}}. \tag{5}$$

Samat jännitteet voidaan myös kirjoittaa muotoon

$$U_{\mathrm{Un}} = R_{\mathrm{U}} i_{\mathrm{U}} + L_{\mathrm{U}} \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{U}}}{\mathrm{d}t} + e_{\mathrm{Un}}\,, \tag{6}$$

$$U_{\mathrm{Vn}} = R_{\mathrm{V}} i_{\mathrm{V}} + L_{\mathrm{V}} \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{V}}}{\mathrm{d}t} + e_{\mathrm{Vn}}\,, \tag{7}$$

$$U_{\mathrm{Wn}} = R_{\mathrm{W}} i_{\mathrm{W}} + L_{\mathrm{W}} \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{W}}}{\mathrm{d}t} + e_{\mathrm{Wn}}\,. \tag{8}$$

Oletetaan, että vaiheet ovat symmetriset, jolloin pätee

$$R_{\mathrm{U}} = R_{\mathrm{V}} = R_{\mathrm{W}} = R\,, \tag{9}$$

$$L_{\mathrm{U}} = L_{\mathrm{V}} = L_{\mathrm{W}} = L\,. \tag{10}$$

Summaamalla yhtälöt (6), (7) ja (8) puolittain yhteen saadaan

$$\begin{aligned} U_{\mathrm{Un}} + U_{\mathrm{Vn}} + U_{\mathrm{Wn}} = {} & R(i_{\mathrm{U}} + i_{\mathrm{V}} + i_{\mathrm{W}}) + \\ & L\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(i_{\mathrm{U}} + i_{\mathrm{V}} + i_{\mathrm{W}}) + e_{\mathrm{Un}} + e_{\mathrm{Vn}} + e_{\mathrm{Wn}}\,. \end{aligned} \tag{11}$$

Koska nollajohdinta ei ole, on virtojen summa nolla

$$i_{\mathrm{U}} + i_{\mathrm{V}} + i_{\mathrm{W}} = 0\,. \tag{12}$$

Oletetaan myös, että sähkömotoriset jännitteet ovat symmetriset ja 120 asteen vaihesiirrossa keskenään

$$e_{\mathrm{Un}} + e_{\mathrm{Vn}} + e_{\mathrm{Wn}} = 0\,, \tag{13}$$

jolloin yhtälö (11) yksinkertaistuu muotoon

$$U_{\mathrm{Un}} + U_{\mathrm{Vn}} + U_{\mathrm{Wn}} = 0\,. \tag{14}$$

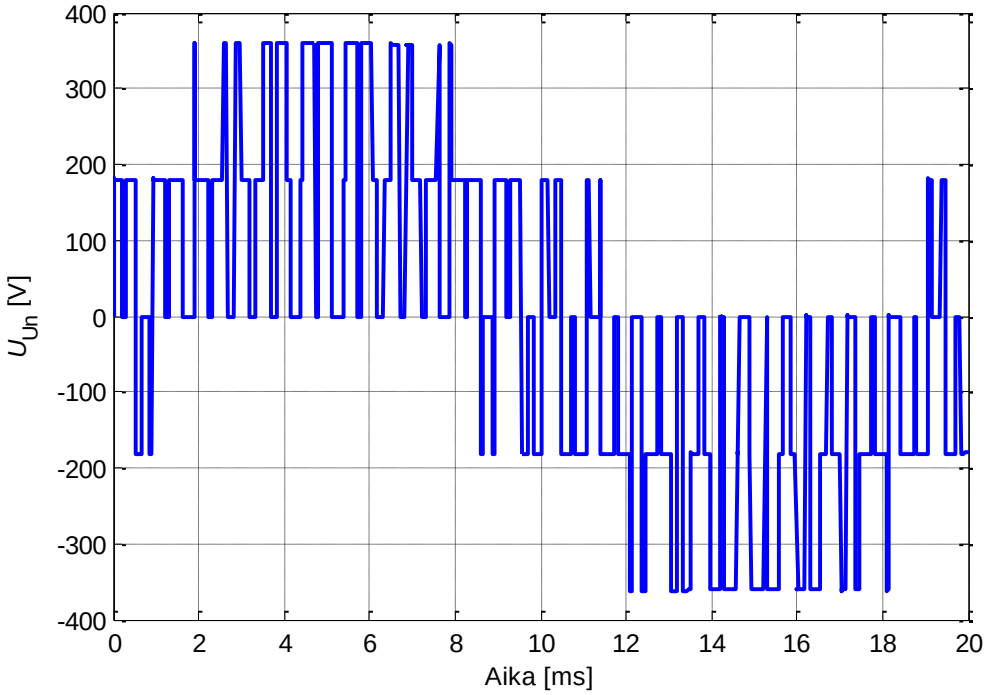
Nyt sijoittamalla yhtälöt (3), (4) ja (5) yhtälöön (14) ja ratkaisemalla U_{n0}, saadaan

$$U_{\mathrm{n0}} = \frac{U_{\mathrm{U0}} + U_{\mathrm{V0}} + U_{\mathrm{W0}}}{3}\,, \tag{15}$$

joka on vaihtosuuntaajan tuottama jännite kolmivaihekuorman tähtipisteen n ja välipiirin keskipisteen 0 välillä. U_{n0} saa vain diskreettejä arvoja: $U_{\mathrm{DC}}/2$, $U_{\mathrm{DC}}/6$, $-U_{\mathrm{DC}}/2$ tai $-U_{\mathrm{DC}}/6$. Sijoittamalla U_{n0} takaisin yhtälöön (3), saadaan jännite vaiheen U ja tähtipisteen n välille

$$U_{\mathrm{Un}} = \frac{2}{3}U_{\mathrm{U0}} - \frac{1}{3}(U_{\mathrm{V0}} + U_{\mathrm{W0}})\,. \tag{16}$$

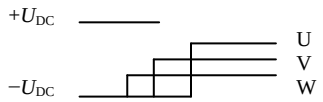
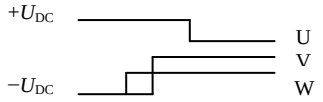
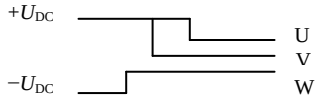
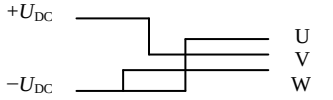
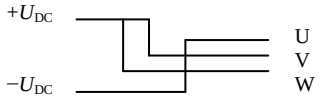
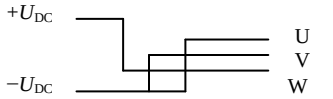
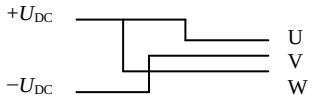
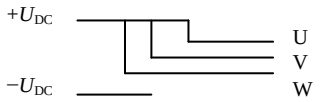
Yhtälö (16) voidaan kirjoittaa samalla tavalla myös vaiheille V ja W. U_{Un} saa vain diskreettejä arvoja: 0, $U_{\mathrm{DC}}/3$, $2U_{\mathrm{DC}}/3$, $-U_{\mathrm{DC}}/3$ tai $-2U_{\mathrm{DC}}/3$. Kuva 4 havainnollistaa vaihtosuuntaajan lähtövaiheen U ja kuorman tähtipisteen n välistä jännitteen käyrämuotoa.

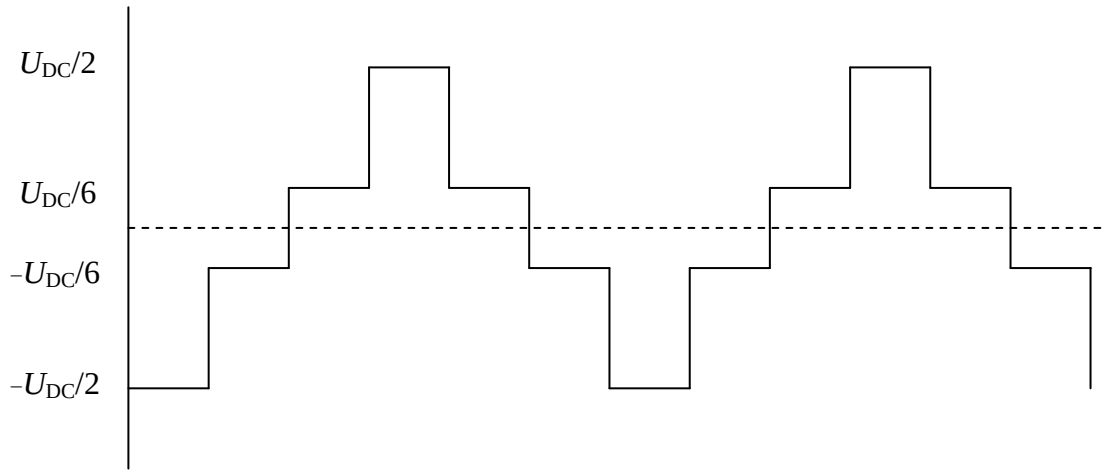


Kuva 4. Simuloitu vaiheen U ja kuorman tähtipisteen n välinen jännite, kun perustaajuus on 50 Hz, kytkentätaajuus on 1 kHz ja välipiirin jännite 540 V.

Vaihtosuuntaajan yhteismuotoisen jännitteen muodostuminen aiheutuu kaksitasoissa vaihtosuuntaajassa aina, kun moottorin vaiheeseen luodaan jännitepulssi. Jännitepulssi voidaan muodostaa kahdeksalla erilaisella kytkinkombinaatiolla, jotka tuottavat 6-tasoisen jännitteen. Kytkinkombinaatiot on esitetty taulukossa 1 ja 6-tasoinen jännite kuvassa 5.

Taulukko 1. Kaksitasoisen vaihtosuuntaajan mahdolliset kytkinkombinaatiot, kun lähdössä on kolmivaiheinen kuorma.

U	V	W	Kytkentä
0	0	0	
0	0	1	
0	1	1	
0	1	0	
1	1	0	
1	0	0	
1	0	1	
1	1	1	



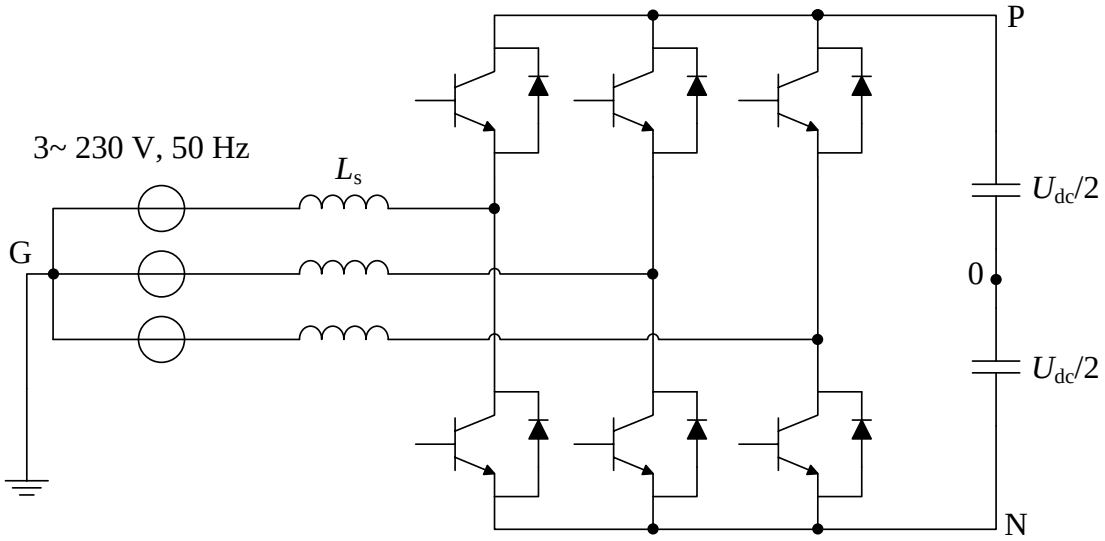
Kuva 5. Kaksitasoisen vaihtosuuntaajan aiheuttama jännite välipiirin keskipisteen 0 ja moottorin tähtipisteen n välillä.

Taulukosta 1 voidaan huomata kaksi kombinaatiota, missä kaikki vaiheet on kytketty DC-välipiirin positiiviseen tai negatiiviseen potentiaaliin. Tämä merkitsee sitä, että näiden kytkinkombinaatioiden aikana tehoa ei siirry välipiiristä kuormaan. Lähtöjännitteen suuruutta säädetään ohjaamalla näiden oikosulkujen kestoa. (Mohan et al. 2003)

Pulssinleveysmoduloitua vaihtosuuntaajaa hyödyntäviin järjestelmiin on kehitetty erilaisia menetelmiä matalien harmonistaajuuksien välttämiseksi ylimodulaatiossa. Sinikolmioaaltovertailussa lineaarisen alueen yläraja saavutetaan jo noin 330 V:ssa, 400 V:n verkossa. Lineaarisen moduloinnin aluetta voidaan suurentaa samalle tasolle syöttöverkon pääjännitteen kanssa lisäämällä merkittävä määrä kolmatta harmonistaajuutta modulaattorin jänniteohjeisiin. Kolmas harmonistaajuus voidaan lisätä ongelmitta kolmivaiheiseen järjestelmään, sillä kolmannet harmonistaajuudet ovat samanvaiheisia eikä näin ollen tuota virtoja esimerkiksi moottorin käämityksiin. (Pyrhönen 2010)

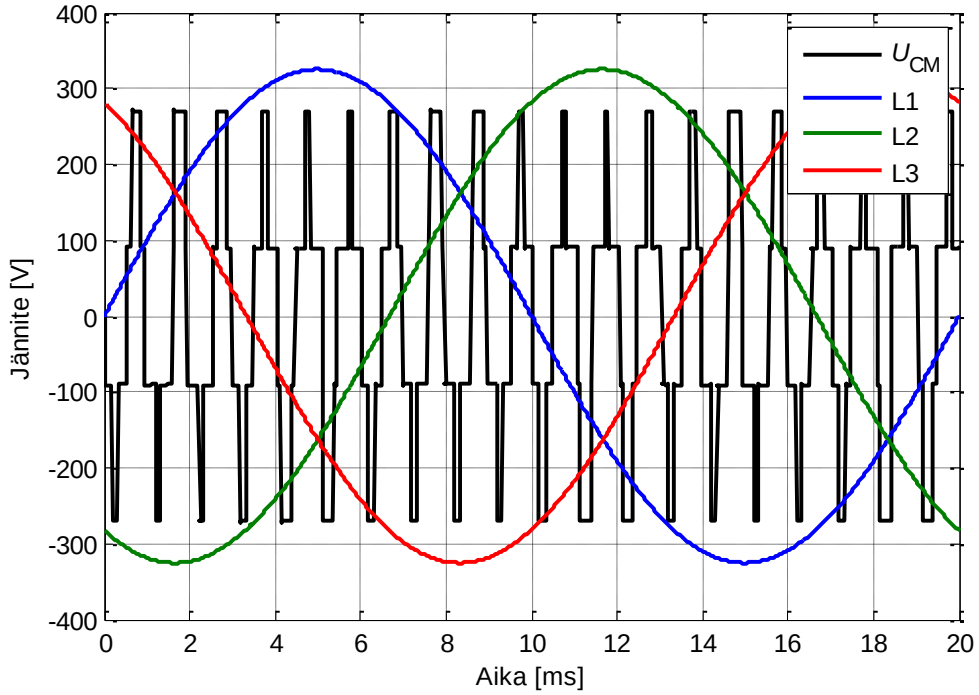
2.3 Aktiivinen verkkosilta

Tarkastellaan seuraavaksi aktiivisen verkkosillan aiheuttamaa yhteismuotoista jännitettä kuvan 6 järjestelmässä, jossa induktanssi L_s kuvaa verkon impedanssia.



Kuva 6. Aktiivinen verkkosilta kaksitasoisessa jännitevälipiirillisessä taajuusmuuttajatopologiassa, jossa syöttömuuntajan tähtipiste on maadoitettu.

Kuva 6 vastaa kuvan 3 tilannetta sillä poikkeuksella, että kuormana on nyt syöttöverkko, jonka tähtipiste on maadoitettu. DC-välipiirin keskipisteen ja maatason väliltä voidaan mitata kuvan 7 mukainen yhteismuotoinen jännite.

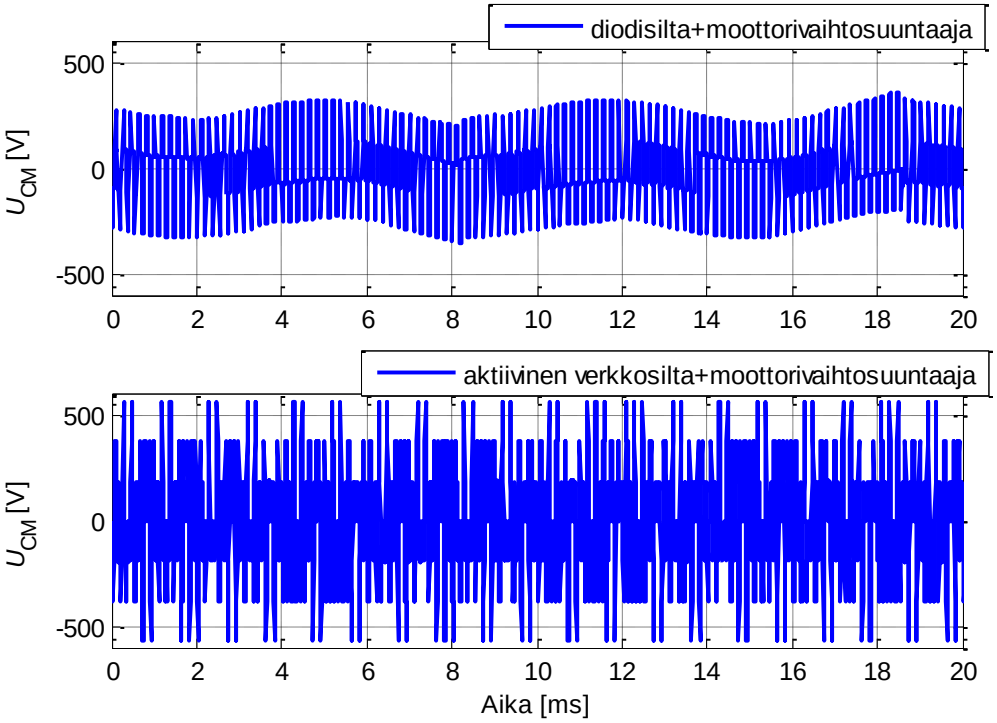


Kuva 7. Simuloitu yhteismuotoinen jännite välipiirin keskipisteen ja maatason välillä, kun syöttöverkon muuntajan tähtipiste on maadoitettu. Perustaajuus on 50 Hz, kytkentätaajuus on 1 kHz ja välipiirin jännite on 540 V. Kuvaan on piirretty myös 50 Hz:n vaihejännitteet häiriöjännitteen suuruusluokan havainnollistamiseksi. Vaihejännitteisiin ei ole lisätty kolmatta harmonistaajuutta. Modulaattorina on sinikolmiaaltovertailu.

Kuvasta 7 voidaan havaita, että yhteismuotoisen jännitteen käyrämuoto noudattaa moottorisillan yhteydessä, kuvassa 5, esiteltyä käyrämuotoa. Aktiivisen verkkosillan tuottamaa yhteismuotoista jännitettä verrattaessa kuvan 2 diodisillan tuottamaan, voidaan huomata, että yhteismuotoinen jännite on nyt selvästi suurempi ja jakson ajaltaan lyhyempi. Pulssien määrä on suoraan verrannollinen kytkentätaajuuteen.

2.4 Aktiivisella verkkosillalla varustettu moottorisilta

Tarkastellaan lopuksi yhteismuotoisen jännitteen suuruutta aktiivisella verkkosillalla varustetun taajuusmuuttajan tapauksessa, kuva 8. Vertailun vuoksi on esitetty yhteismuotoisen jännitteen suuruus, kun verkkosiltana on diodisilta.



Kuva 8. Simuloitu yhteismuotoinen jännite moottorin tähtipisteen ja maatason välillä, kun syöttöverkon muuntajan tähtipiste on maadoitettu. Moottorisillan kytkentätaajuutena on 5.5 kHz ja aktiivisen verkkosillan 10 kHz. Perustaajuus on 50 Hz ja välipiirin jännite 570 V. Modulaattorin vaihejännitteisiin on lisätty kuudesosa kolmatta harmonistaajuutta. Lisäksi kulkuaaltoilmiötä ei ole huomioitu, joka vastaa tilannetta, jossa moottorikaapeli on äärettömän lyhyt.

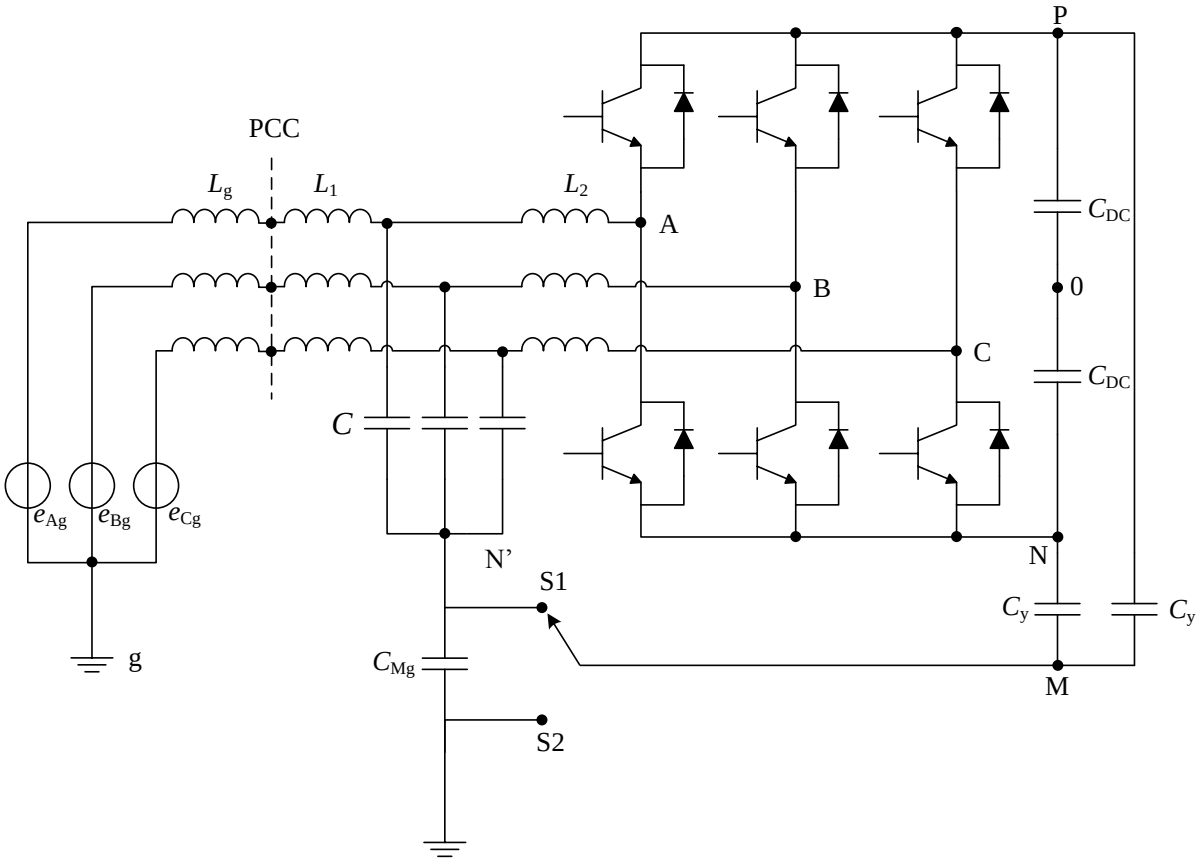
Kuvasta 8 nähdään selvästi aktiivisen verkkosillan lisäämä vaikutus yhteismuotoisen jännitteen suuruuteen käytettäessä kaksitasoista, jännitevälipiirillistä taajuusmuuttajaa.

3 YHTEISMUOTOISEN JÄNNITTEEN VAIMENTAMISKEINOJA

Tarkastellaan seuraavaksi millaisia suodinratkaisuja yhteismuotoisen jännitteen vaimentamiseksi on kirjallisuudessa esitetty käytettäessä aktiivista verkkosiltaa.

3.1 DC-välipiirin yhteismuotoinen suodin

Anirudh et al. (2010) esittelevät yhteismuotoisen jännitteen vaimentamiseksi ja maavuotovirtojen minimoimiseksi syöttöverkon ja välipiirin välisen suotimen, kuva 9.

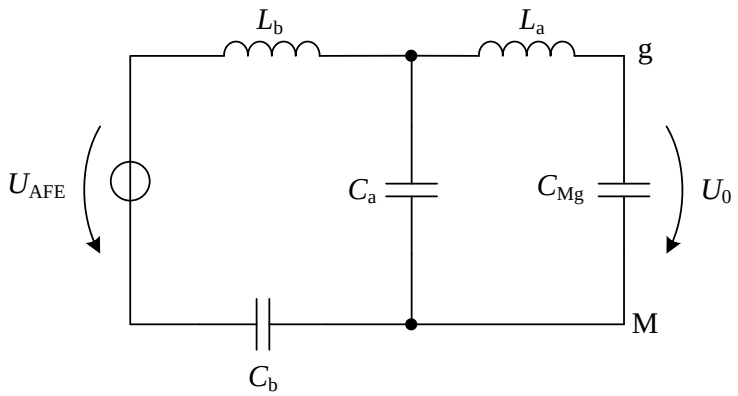


Kuva 9. Aktiiviselle verkkosillalle toteutettu suodintopologia. DC-välipiiriin on luotu keskipiste M, joka on kytkettynä maatasoon (S2) tai LCL-suotimen tähtipisteeseen N' (S1). Induktanssi L_g kuvaa verkon induktanssia. Kelat L_1 ja L_2 sekä kondensaattorit C, muodostavat LCL-suotimen, joka estää kytkentätaajuuden harmonisten pääsyä verkkoon päin. (Anirudh et al. 2010)

Ehdotettu suodin koostuu kahdesta kondensaattorista C_y, joista toinen on kytketty DC-välipiirin positiiviseen ja toinen negatiiviseen potentiaaliin. Tällä tavoin saadaan luotua DC-välipiirin keskipistettä vastaava jännitetaso. Jännitetaso M on yhdistetty LCL-suotimen tähtipisteeseen N' kytkimellä S1. Potentiaalia M on tuotu lähemmäksi maapotentiaalia, valitsemalla topologiaan sopiva kondensaattori C_{Mg}, jonka kautta tähtipiste N' on maadoitettu. Artikkelissa on tutkittu myös vaihtoehtoa, jossa keskipiste M on yhdistetty suoraan maapotentiaaliin kytkimellä S2, LCL-suotimen tähtipisteen ollessa maadoitettu kondensaattorin C_{Mg} kautta.

Kytkennässä S1 kolmella jaollisille parittomille harmonisille muodostuu reitti välipiirin keskipisteeseen suoraan LCL-suotimen tähtipisteen kautta. Sen sijaan kytkennässä S2, reitti muodostuu LCL-suotimen sekä sähköverkon syöttömuuntajan tähtipisteen kautta.

Tutkitaan kuvan 9 järjestelmää kuvan 10 sijaiskytkennän avulla, kun kytkin S1 on suljettuna.



Kuva 10. Yhteismuotoisen piirin sijaiskytkentä DC-välipiirin suotimella, missä L_b on $L_2/3$, L_a on $L_1/3$, C_b on $2C_y$ ja C_a on $3C$. (Anirudh et al. 2010)

Ehdotetun suotimen yhteismuotoisen jännitteen ja maavuotovirran vaimentaminen perustuu siihen, että aktiivisen verkkosillan tuottamalle suuritaajuiselle virralle tarjotaan järjestelmässä kulkureitti kondensaattorien C_b ja C_{Mg} kautta.

Järjestelmälle voidaan muodostaa siirtofunktio aktiivisen verkkosillan muodostaman nollaverkon jännitteestä LCL-suotimen tähtipisteen ja DC-välipiirin keskipisteen väliseen jännitteeseen

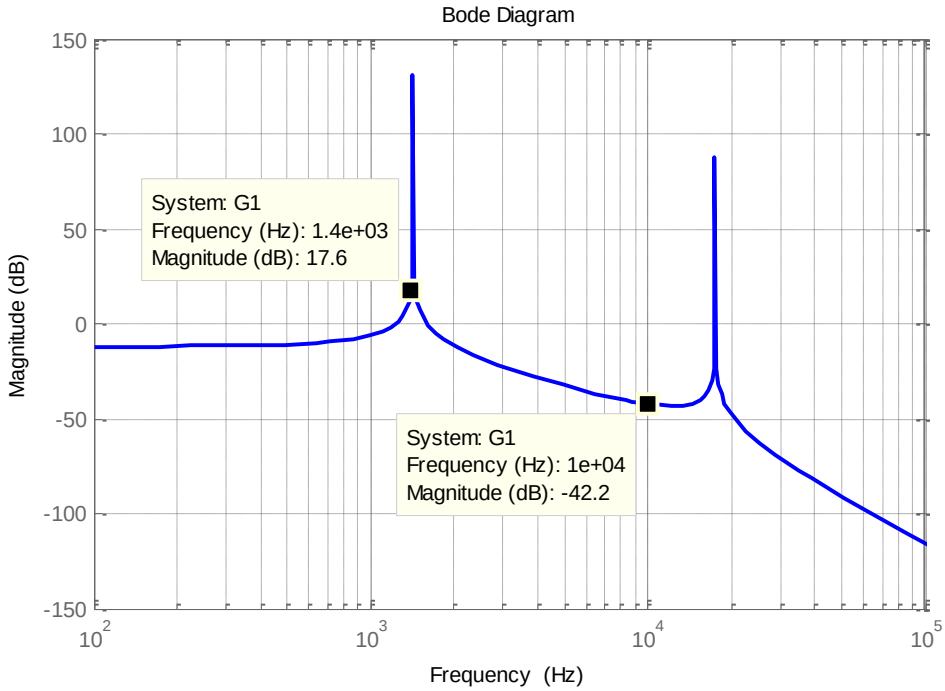
$$G_1(s) = \frac{U_0(s)}{U_{\mathrm{AFE}}(s)} = \frac{\dfrac{1}{\alpha C_{\mathrm{a}} C_{\mathrm{Mg}}} \dfrac{\alpha}{L_{\mathrm{a}} L_{\mathrm{b}}}}{s^4 + \dfrac{\beta}{L_{\mathrm{a}} L_{\mathrm{b}}} s^2 + \dfrac{\alpha}{L_{\mathrm{a}} L_{\mathrm{b}}}}, \tag{17}$$

missä

$$\alpha = \frac{1}{C_{\mathrm{b}} C_{\mathrm{Mg}}} + \frac{1}{C_{\mathrm{a}} C_{\mathrm{b}}} + \frac{1}{C_{\mathrm{a}} C_{\mathrm{Mg}}},$$

$$\beta = \frac{L_{\mathrm{a}}}{C_{\mathrm{a}}} + \frac{L_{\mathrm{a}}}{C_{\mathrm{b}}} + \frac{L_{\mathrm{b}}}{C_{\mathrm{a}}} + \frac{L_{\mathrm{b}}}{C_{\mathrm{Mg}}}.$$

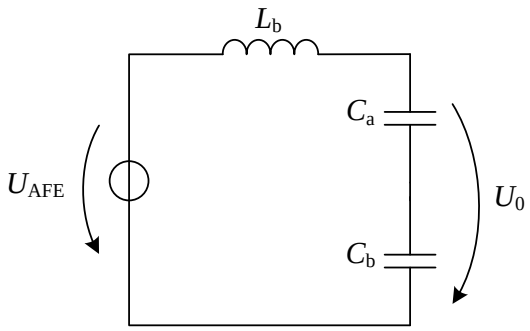
Tutkitaan korkeiden taajuuksien vaimennusta Bode-diagrammin avulla, kuva 11. Käytetään artikkelissa esitettyjä parametriarvoja, L_1 on 2.5 mH, L_2 on 2.5 mH, C on 20 µF, C_{y} on 10 µF ja C_{Mg} on 100 nF. Lisäksi resonanssitaajuutena on 1.4 kHz ja kytkentätaajuutena 10 kHz.



Kuva 11. Järjestelmän G_1 itseisarvokäyrä.

Kuvasta 11 voidaan havaita, että vaimennusta on riittävästi suurilla taajuuksilla. Kuitenkin kondensaattorista C_{Mg} johtuva 10 kHz:n kytkentätaajuuden jälkeinen resonanssipiikki tulee vaimentaa.

Matalilla taajuuksilla C_{Mg} voidaan olettaa nollaksi, koska sen suuruus on pieni verrattuna C_b:hen. Näin ollen suodinpiirille voidaan esittää kuvan 12 mukainen sijaiskytkentä.



Kuva 12. Suodinpiirin sijaiskytkentä matalille taajuuksille. (Anirudh et al. 2010)

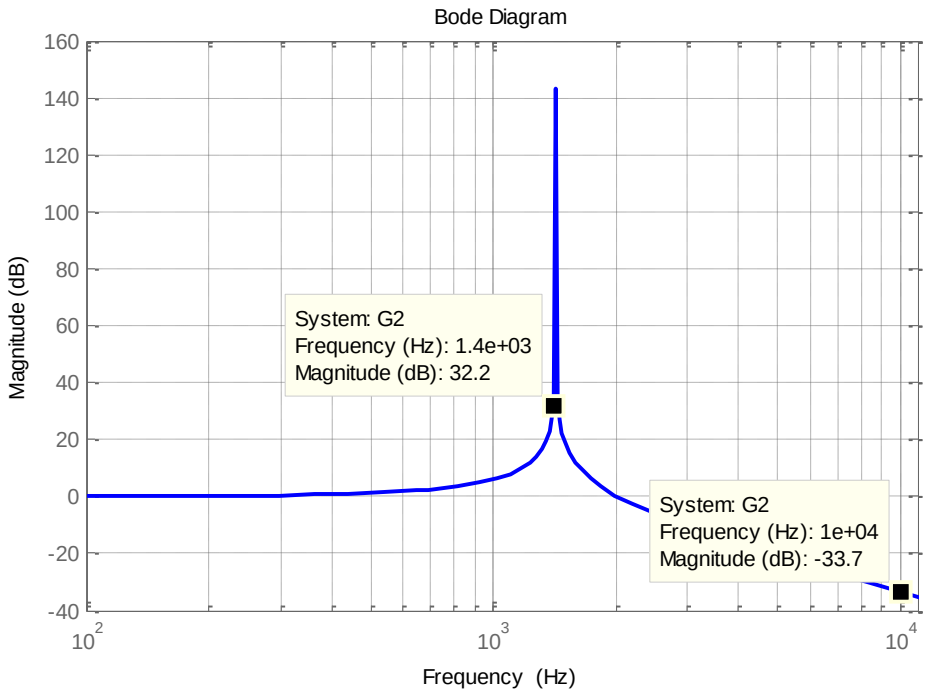
Kuva 12 edustaa toisen kertaluvun alipäästösuodinta, jolle voidaan muodostaa siirto-funktio

$$G_2(s) = \frac{U_0(s)}{U_{\mathrm{AFE}}(s)} = \frac{\dfrac{1}{L_\mathrm{b} C_\mathrm{s}}}{s^2 + \dfrac{1}{L_\mathrm{b} C_\mathrm{s}}}, \tag{18}$$

missä

$$C_\mathrm{s} = \frac{C_\mathrm{a} C_\mathrm{b}}{C_\mathrm{a} + C_\mathrm{b}}.$$

Tarkastellaan vaimennusominaisuuksia Bode-diagrammin avulla, kuva 13.

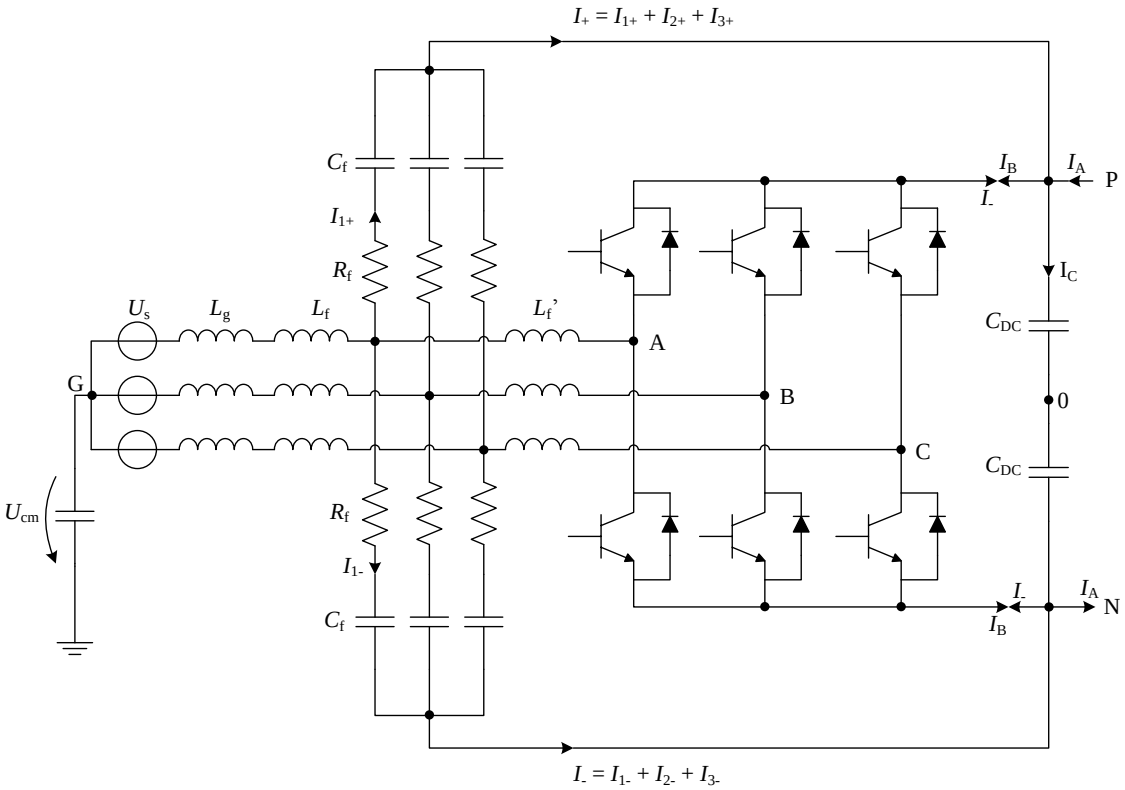


Kuva 13. Matalille taajuuksille esitetyn järjestelmän G_2 itseisarvokäyrä.

Kuvasta 13 nähdään, että valitun resonanssitaajuuden 1.4 kHz kohdalla on resonanssipiikki. Tämä johtuu siitä, että kyseisen järjestelmän vaimennusvakio on teoriassa nolla. Todellisuudessa kuristimien, muuntajien, kaapeleiden ja maatason häviöistä johtuen vaimennus ei ole koskaan nolla. Kuitenkin erittäin pienen vaimennusvakion seurauksena siirtofunktion navat ovat kompleksiset tarkoittaen, että järjestelmän askelvaste värähtelee. Toisaalta jännitteen vaimennus on 10 kHz:n taajuudella 33.7 dB. Ongelmia voi kuitenkin syntyä resonanssitaajuuden läheisyydessä, missä vahvistus on erittäin korkea.

3.2 Kaksoiskytketty suodintopologia

Ortiz et al. (2008) esittelevät suodintopologian, joka vaimentaa samanaikaisesti yhteismuotoisen jännitteen vaikutuksesta aiheutuvaa maavuotovirtaa sekä ylijännitteen amplitudia moottorin terminaalissa. Kyseisessä topologiassa etuna on se, että maavuotovirran suodattaminen ei vaikuta DC-kondensaattorin virtaväreeseen (Ortiz et al. 2008). Artikkelin esittelemä suodintopologia soveltuu käytettäväksi sekä vaihtosuuntaajalla syötettyihin moottorikäyttöihin että aktiiviselle verkkosillalle. Suodin koostuu kahdesta RLC-piiristä, joiden RC-haarojen tähtipisteet on kytketty DC-välipiirin positiiviseen ja negatiiviseen potentiaaliin kuvan 14 mukaisesti.



Kuva 14. Aktiiviselle verkkosillalle ehdotettu passiivinen kaksoiskytketty suodin. (Ortiz et al. 2008)

Suodin tarjoaa suuritaajuisille virtakomponenteille pieni-impedanssisen kulkureitin. Nämä virtakomponentit eivät kulje DC-kondensaattorin läpi, koska ne kumoavat toisensa. Suodintopologian voidaan ajatella koostuvan kahdesta osasta, joista toinen on kytketty DC-välipiiriin positiiviseen ja toinen negatiiviseen potentiaaliin. Koska suu-

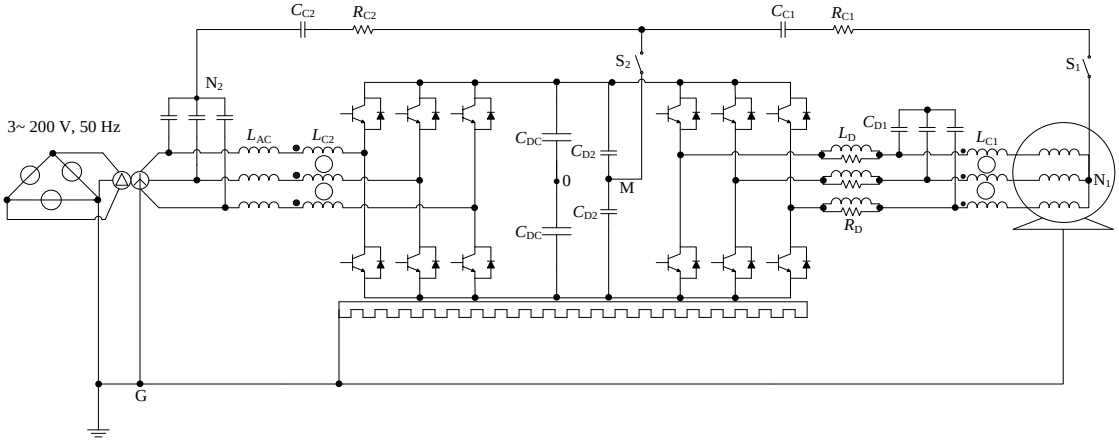
ritaajuiset virrat I_+ ja I_- ovat samanvaiheisia ja yhtä suuria amplituditaan, ne eivät virtaa DC-kondensaattorin läpi, vaan verkkosillan. Virta, joka kulkee DC-kondensaattorin läpi, on moottorisillalta ja verkkosillalta tulevien virtojen erotus, $I_A - I_B$. Jos virtojen I_+ ja I_- välillä on pieni eroavaisuus, kulkeutuu erosuure DC-kondensaattorin läpi, millä ei ole vaikutusta suotimen toiminnan kannalta. (Ortiz et al. 2008)

Vastukset R_f suurentavat suotimen häviötehoa verrattuna kytkentään, jossa vastus on sijoitettu takaisinkytkentäsilmukkaan. Tämä johtuu sitä, että kuvan 14 mukaisessa kytkennässä myös eromuotoinen virta pääsee kulkemaan vastuksien läpi.

Suotimen suunnittelu on jaettu artikkelissa kolmeen vaiheeseen: ylijännitteen amplitudin määrittäminen moottorin terminaalissa, suotimen resonanssitaajuuden valinta ja suodinparametrien laskenta. Suodinsuunnittelu ja kokeelliset mittaukset on esitetty ainoastaan moottorivaihtosuuntaajan lähdössä olevalle suotimelle.

3.3 Erityinen suodin suuritaajuisen maavuotovirran vaimentamiseksi

Hirofumi et al. (2008) esittelevät erityisen suodinratkaisun aktiivisella verkkosillalla varustetulle sähkökäytölle, minkä pääpainona on vaimentaa suuritaajuisen virran virtaamista maatasoon maadoitetun jäähdytyslevyn kautta. Suotimen suorituskykyä on todennettu kolmella erilaisella kytkennällä, jotka on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Koejärjestelmä kolmen erilaisen kytkennän testaamiseksi. (Hirofumi et al. 2008)

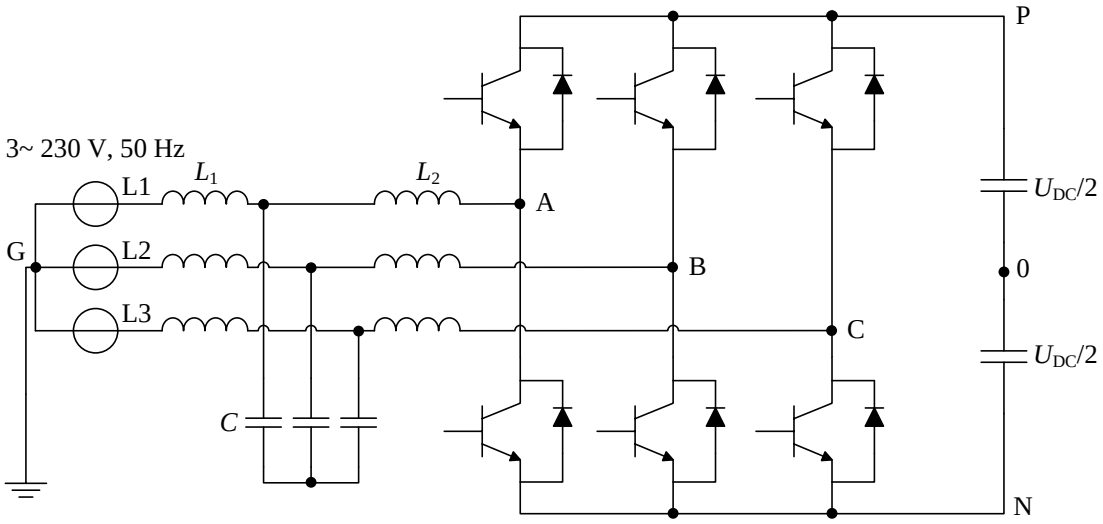
Passiiviset pääkomponentit, jotka sisältyvät kaikkiin kolmeen kytkentään, ovat yhteismuotoiset kuristimet L_{C1} ja L_{C2}, jotka on asennettu taajuusmuuttajan tuloon ja lähtöön sekä du/dt-suodin vaihtosuuntaajan lähdössä. Ensimmäinen kytkentä koostuu ainoastaan edellä mainituista passiivisista komponenteista. Toisessa kytkennässä moottorin staattorin tähtipiste N_1 on yhdistetty kytkimellä S_1 verkon puolelle muodostettuun tähtipisteeseen N_2 sarjassa olevien R_{C1}, C_{C1} sekä R_{C2} ja C_{C2} komponenttien kautta. Viimeisessä kokoonpanossa DC-välipiirin on kytketty kaksi kondensaattoria C_{D2}, toinen positiiviseen ja toinen negatiiviseen potentiaaliin. Lisäksi potentiaali M on yhdistetty kytkimellä S_2 edellä mainitun kytkennän R_{C2} ja C_{C1} komponenttien väliin.

Kolmas kytkentä osoittautui artikkelin mukaan tehokkaimmaksi keinoksi vaimentaa jäädytyslevystä kulkevaa virtaa maatasoon. Ehdotetussa ratkaisussa moottorin puoleinen suodin on kuitenkin kytketty staattorin tähtipisteeseen, joka on käytännössä harvoin saatavana.

4 SUOTIMEN SUUNNITTELU

4.1 Tutkittava järjestelmä

Suodin tulee suunnitella kuvan 16 mukaiselle järjestelmälle, jossa vaihtosuuntaajan tulossa käytetään LCL-suodinta rajoittamaan aktiivisen verkkosillan kytkentätaajuuden harmonisten pääsyä verkkoon.

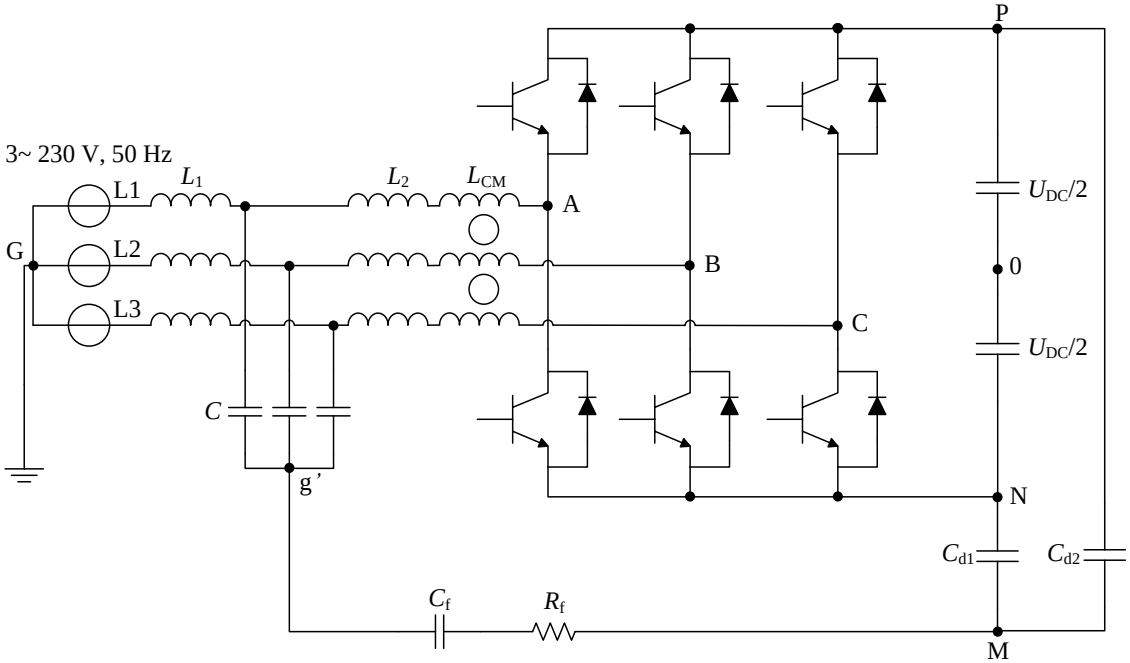


Kuva 16. Tutkittava järjestelmä, jossa aktiivisen verkkosillan tuloon on kytketty LCL-suodin. Syöttöverkon tähtipiste on maadoitettu.

Aktiivisen verkkosillan kytkentätaajuudeksi asetetaan 10 kHz ja välipiirin jännitteeksi 650 V. Käytettävän LCL-suotimen parametriarvot 12 A nimellisvirralla: L_1 on 0.6 mH, L_2 on 1.67 mH ja C on 10 μF.

4.2 Tutkittava järjestelmä suotimella

Ehdotetaan järjestelmälle kuvan 17 mukaista suodintopologiaa.



Kuva 17. Tutkittavalle järjestelmälle ehdotettu suodin.

Ehdotettu suodin on kytketty LCL-suotimen tähtipisteen ja DC-välipiiriin muodostetun keskipisteen välille. Vaikka tässä tapauksessa myös todellinen DC-välipiirin keskipiste olisi ollut saatavilla, on keskipisteen muodostamiseen käytetty kondensaattoreita C_{d1} ja C_{d2}, jotta suuritaajuiset häiriövirrat eivät kulkisi isojen DC-kondensaattoreiden läpi. Potentiaali g' on syöttöverkon tähtipistettä G vastaava potentiaali. Näin ollen myös LCL-suotimen aktiivisen verkkosillan puoleinen kuristin L_2 on osana suljettua suodinsilmukkaa.

Suodinpiiri voidaan jakaa sekä ero- että yhteismuotoisiin komponentteihin. Kuristimet L_1 ja L_2 sekä kondensaattorit C muodostavat eromuotoisen suodinpiirin, joka eliminoi suuritaajuiset eromuotoiset jännitteet pääjännitteiden väliltä. Eromuotoinen osa ei vaikuta nyt vaiheen ja maan välisiin jännitteisiin. Eromuotoisen piirin tehtävä on muokata vaiheiden välisistä jännitteistä sinimuotoisia.

Yhteismuotoiseen piirin kuuluu sen sijaan kuristin L_{CM}, jossa kaikki kolme vaihetta on käämitty yhteiselle magneettipiirille ja samalle polariteetille. Tämä mahdollistaa suuren yhteismuotoisen impedanssin eromuotoisen impedanssin ollessa hyvin pieni. Lisäksi yhteismuotoiseen piiriin kuuluvat kondensaattori C_f ja resistanssi R_f. (Yoshihiro 1992)

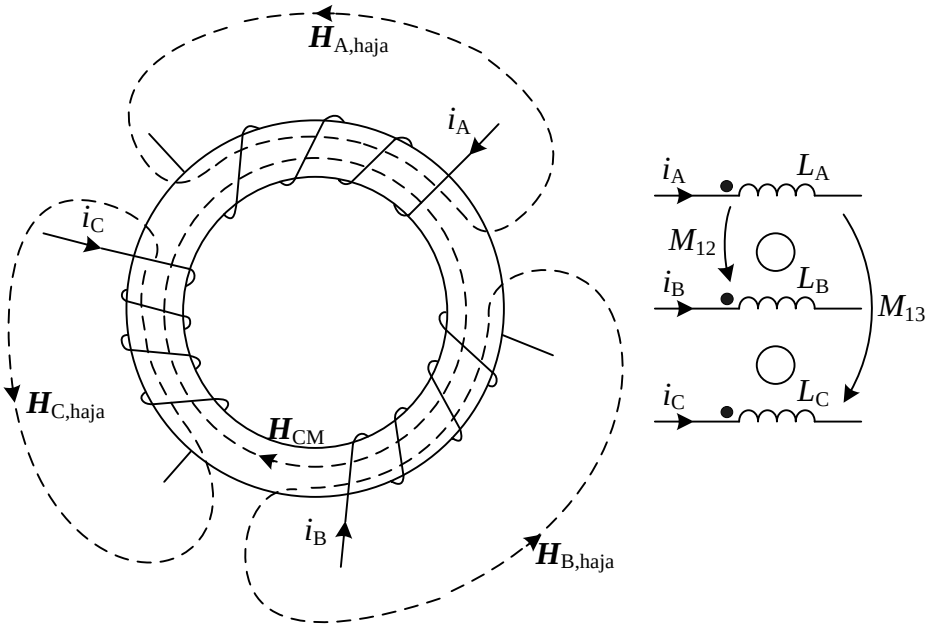
4.3 Suodinkomponentit

Passiivinen suodin on yksinkertainen tapa vaimentaa vaihtosuuntaajan tuottamaa jännitehäiriötä, koska suodin koostuu ainoastaan vastuksista, kondensaattoreista ja induktansseista. Ulkoista tehonsyöttöä ei tarvita, jonka aktiivinen suodin tarvitsisi. Erityisesti verkkoon kytketyissä sovelluksissa passiivinen vaimentaminen on välttämätöntä, jos vaihtosuuntaaja voidaan kytkeä pois päältä, kun suodin on yhä kytkettynä verkkoon (Parikshith et al. 2010). (Sedra et al. 2004)

4.3.1 Yhteismuotoinen kuristin L_{CM}

Pulssinleveysmoduloidut vaihtosuuntaajat vaativat tyypillisesti tulosuotimen, jotta EMC-vaatimukset saadaan täytettyä. Näin ollen kolmivaiheisille suotimille on teollisuudessa kysyntää. Erityisesti kolmivaiheista yhteismuotoista kuristinta käytetään monissa sovelluksissa, kuten nopeusohjattavissa sähkökäytöissä, UPS-järjestelmissä, uusiutuvassa energiassa, prosessiteknologiassa, sähköautojen latausjärjestelmissä, IT-järjestelmien tehonsyötössä ja tulevaisuudessa yhä sähköistyvissä lentokoneissa. (Heldwein et al. 2011)

Yhteismuotoinen kuristin näkyy suurena impedanssina yhteismuotoisille virroille (Ott 1988). Tarkastellaan yhteismuotoista kuristinta tarkemmin kuvan 18 avulla.



Kuva 18. Kolmivaiheisen yhteismuotoisen kuristimen virrat ja magneettikentän voimakkuudet äärellisellä permeabiliteetilla μ (vasen) sekä piirrossymboli, kun kuristin oletetaan täysin induktiiviseksi (oikea). Kuvassa (oikea) on esitetty myös A vaiheen käämin keskinäisinduktanssit M_{12} ja M_{13} vaiheisiin B ja C. (Heldwein et al. 2011)

Yhteismuotoisen kuristimen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 18. Yhteismuotoinen virta tuottaa jokaiseen käämiin samansuuntaisen magneettikentän voimakkuuden, joiden muodostama skalaarisumma on ideaalisesti yhtä suuri kuin yhteismuotoisen kuristimen kokonaismagneettikentän voimakkuus $\boldsymbol{H}_{\mathrm{CM}}$ (Heldwein et al. 2011). Kuvan 18 esittämä yhteismuotoinen kuristin kestää vain pienen yhteismuotoisen virran kyllästymättä käytettäessä suuri-permeabiliteettista sydänmateriaalia (Harttman et al. 2010). Sydämen kyllästymistä voidaan välttää vähentämällä sydämessä kulkevan magneettivuon suuruutta Φ, virran huippuarvoa $\hat{I}$, käämien kierroslukumäärää N tai lisäämällä sydämen poikkipinta-alaa A_{e} tai ilmaväli magneettipiiriin. Yhteismuotoisen kuristimen mitoittaminen on kompromissi sydänkoon ja poikkipinta-alan välillä kyllästymisen välttämiseksi. (Heldwein et al. 2011)

Yhteismuotoisen kuristimen keskinäisinduktansseille voidaan kirjoittaa

$$M_{12} = \frac{\Phi_{12}}{I_{\mathrm{A}}}, \tag{19}$$

$$M_{13} = \frac{\Phi_{13}}{I_{\mathrm{A}}}, \tag{20}$$

missä Φ_{12} on vaiheessa A kulkevan virran I_{A} synnyttämä magneettivuo, joka läpäisee vaiheen B käämin, ja Φ_{13} on magneettivuo, joka läpäisee vaiheen C käämin. Ideaalitapauksessa

$$\Phi_{12} = \Phi_{13} = \Phi_1 = LI_{\mathrm{A}}. \tag{21}$$

Tällöin keskinäisinduktanssit ovat yhtä suuria kuin itseisinduktanssit

$$M_{12} = L, \tag{22}$$

$$M_{13} = L. \tag{23}$$

Yhtälön (1) perusteella vaihevirtojen summa on yhtä suuri kuin yhteismuotoinen virta. Tällöin pätee myös

$$U_{\mathrm{A}} = U_{\mathrm{B}} = U_{\mathrm{C}} = U_{\mathrm{CM}}. \tag{24}$$

Näin ollen yhteismuotoisen kuristimen induktanssiksi voidaan kirjoittaa

$$L_{\mathrm{CM}} = \frac{U_{\mathrm{CM}}}{\frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{CM}}}{\mathrm{d}t}} = L + M_{12} + M_{13} = 3L. \tag{25}$$

Todellisuudessa magneettivuo ei pysy ainoastaan sydämessä, vaan osa vuosta kiertää ympäröivässä ilmassa (Heldwein et al. 2011).

4.3.2 Kondensaattorit C_{d1}, C_{d2} ja C_f

Muodostetaan välipiirin keskipistettä 0 vastaava taso M kondensaattorien C_{d1} ja C_{d2} avulla. Kytkemällä potentiaali M LCL-suotimen tähtipisteeseen g', stabiloituu välipiirin keskipisteen jännite maatasoon nähden (Hirofumi et al. 2008). Lisäksi kytkentä ohjaa yhteismuotoisen virran DC-välipiiriin muodostaen pieni-impedanssisemman reitin välipiiriin verrattuna reittiin syöttömuuntajan tähtipisteen, maatason ja hajakapasitanssien kautta. (Hirofumi et al. 2004)

LCL-suotimen tähtipistettä ei voida kytkeä suoraan välipiiriin, jos modulaattorin jänniteohjeisiin on lisätty vaihejännitteiden taajuuden kolmatta harmonista, koska takaisinkytkentä muodostaa hyvin pieni-impedanssisen kulkureitin matalataajuisille virtakomponenteille. Lisäksi jos yksi vaihe puuttuu sulakkeen palamisen takia, ei LCL-suotimen tähtipiste vastaa enää syöttöverkon muuntajan tähtipisteen potentiaalia. Tästä syystä lisätään LCL-suotimen tähtipisteen ja välipiirin keskipisteen väliin kondensaattori C_f, joka näkyy aktiivisen verkkosillan kolmannelle virtaharmoniselle suuri-impedanssisena estäen sen pääsyä välipiirin keskipisteeseen. Tällöin yhteismuotoisen kuristimen kyllästymisen välttämiseksi, C_f:n tulee olla mahdollisimman pieni, koska

$$i_{f,3h} \approx C_f \frac{dU_{AFE,3h}}{dt}. \tag{26}$$

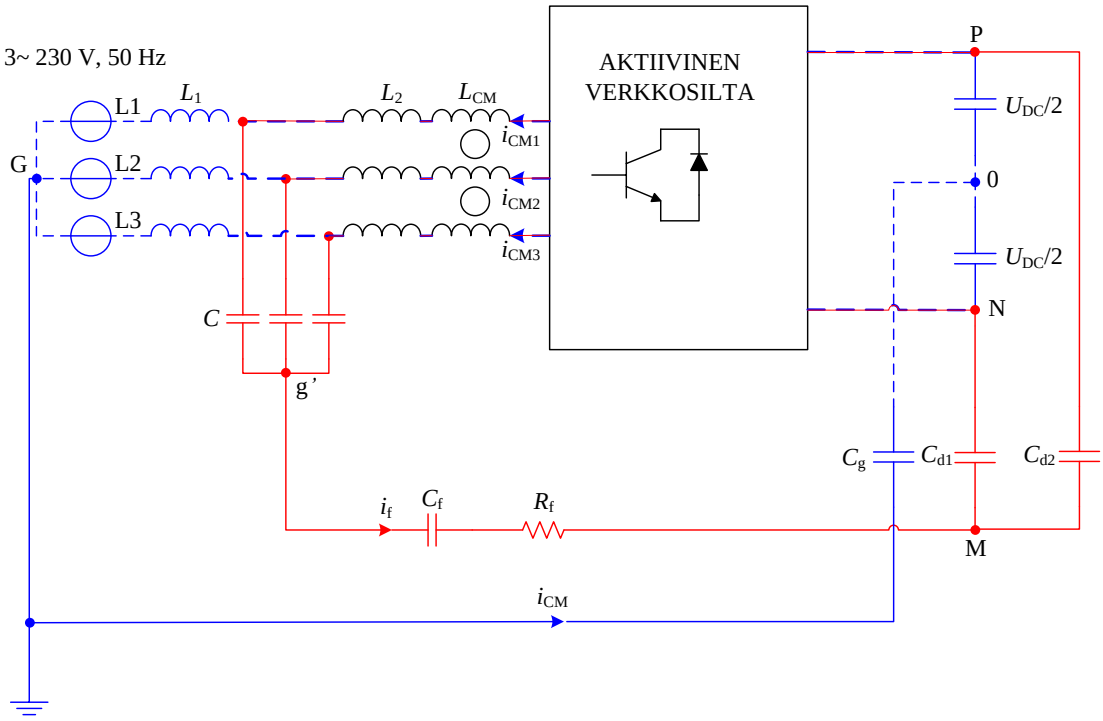
Samalla C_f tulee valita siten, että se näkyy suuritaajuisille jänniteharmonisille pienenä impedanssina. Näin ollen matalataajuiset harmoniskomponentit vaikuttavat C_f:n yli ja suuritaajuiset yhteismuotoisen kuristimen L_{CM} yli. Tällöin L_{CM} ei kyllästy yhtä helposti ja sen ei tarvitse olla induktanssiltaan niin suuri. (Harttman et al. 2010)

4.3.3 Vastus R_f

Ilman resistanssia suotimen vahvistus nousee resonanssitaajuudella ja sen läheisyydessä suureksi, joka voi aiheuttaa ongelmia, kuten kappaleessa 3.1 havaittiin. Lisäksi ilman vastusta järjestelmä voi pahimmassa tapauksessa ajautua epästabiiliin tilaan ja vaurioittaa laitteistoa. Lisäämällä suodinpiiriin resistanssia, saadaan vaimennusta resonanssitaajuuden ympäristössä lisättyä sekä pidettyä järjestelmä stabiilina. Haittapuolena vastus R_f aiheuttaa tehohäviöitä, jotka on pyrittävä minimoimaan.

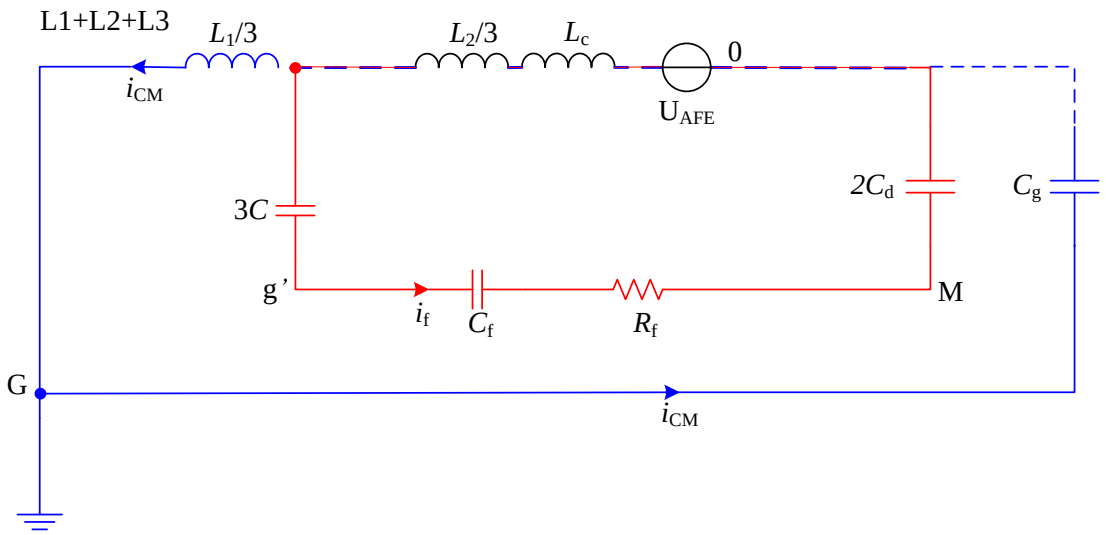
4.4 Yhteismuotoisen piirin sijaiskytkentä

Piirretään kuva 17 uudelleen siten, että järjestelmässä kulkevat yhteismuotoiset virrat on esitetty, kuva 19.



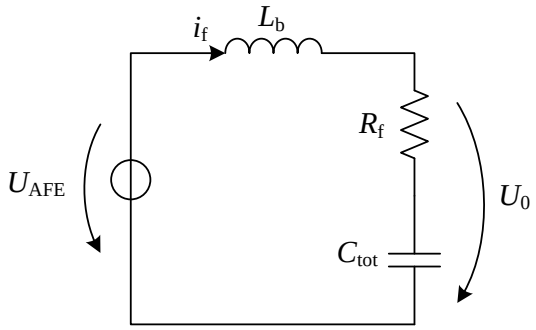
Kuva 19. Yhteismuotoiset virrat sekä suodinpiirissä kulkeva virta i_f.

Yhteismuotoisen kuristimen yksivaiheista sijaiskytkentää varten hyödynnetään yhtälöä (25), jonka perusteella yhteismuotoinen induktanssi on yhden vaiheen induktanssin ja sen keskinäisinduktanssien summa eli L_{CM} on $3L_c$. Nyt kuvan 19 järjestelmä voidaan piirtää yksivaiheisena, kuva 20.



Kuva 20. Yhteismuotopiirin yksivaiheinen sijaiskytkentä.

C_g on kokonaishajakapasitanssi taajuusmuuttajan välipiirin, puolijohdetehokytkimien, jäähdytyslevyn ja maatason välillä. Suodinsuunnittelua varten oletetaan, että C_g on nolla. Tällöin U_{AFE} vaikuttaa komponenttien L_2, L_{CM}, C_d, C_f ja R_f yli. Suodinsuunnittelun yksinkertaistamiseksi oletetaan, että kaikki yhteismuotoinen virta kulkee rakennetun suotimen kautta. Näin ollen suljetulle suodinpiirille voidaan esittää kuvan 21 mukainen sijaiskytkentä.



Kuva 21. Suodinpiirin sijaiskytkentä.

Kuva 21 esittää toisen kertaluvun alipäästösuodinta, joka koostuu komponenteista L_b, C_{tot} ja R_f, missä

$$L_\mathrm{b} = \frac{L_2}{3} + L_\mathrm{c}\,,$$

$$C_\mathrm{tot} = \frac{6C_\mathrm{d}C_\mathrm{f}C}{6C_\mathrm{d}C + 3C_\mathrm{f}C + 2C_\mathrm{f}C_\mathrm{d}}\,.$$

4.5 Suotimen mitoittaminen

Kaksitasoisen vaihtosuuntaajan aiheuttamaa yhteismuotoista jännitettä voidaan vähentää minimoimalla jännite U_0. Tällöin yhteismuotoinen jännite vaikuttaa lähes ainoastaan induktanssin L_b yli.

Kuvan 22 sijaiskytkennän perusteella voidaan esittää siirtofunktio aktiivisen verkkosillan muodostaman nollaverkon jännitteestä LCL-suotimen tähtipisteen ja DC-välipiirin keskipisteen väliseen jännitteeseen

$$G(s) = \frac{U_0(s)}{U_\mathrm{AFE}(s)} = \frac{sR_\mathrm{f}C_\mathrm{tot} + 1}{s^2L_\mathrm{b}C_\mathrm{tot} + sR_\mathrm{f}C_\mathrm{tot} + 1}\,. \tag{27}$$

Muokataan siirtofunktio G vastaamaan toisen kertaluvun standardimuotoa

$$G(s) = \frac{\omega_\mathrm{n}^2(s + \omega_\mathrm{RC})}{\omega_\mathrm{RC}(s^2 + 2\zeta\omega_\mathrm{n}s + \omega_\mathrm{n}^2)}\,. \tag{28}$$

missä ω_n on resonanssitaajuus, ω_RC on ylipäästösuotimen –3 dB rajataajuus ja ζ on vaimennusvakio. Siirtofunktioiden (27) ja (28) kertoimia vertaamalla saadaan

$$\omega_\mathrm{n}^2 = \frac{1}{L_\mathrm{b}C_\mathrm{tot}}\,, \tag{29}$$

$$\omega_\mathrm{RC} = \frac{1}{R_\mathrm{f}C_\mathrm{tot}}\,, \tag{30}$$

$$\zeta = \frac{R_\mathrm{f}}{2}\sqrt{\frac{C_\mathrm{tot}}{L_\mathrm{b}}}\,. \tag{31}$$

Kuvan 21 sijaiskytkennän avulla voidaan esittää myös admittanssi aktiivisen verkkosillan muodostaman LCL-suotimen tähtipisteen ja DC-välipiirin keskipisteen jännitteestä suotimen virtaan

$$Y(s) = \frac{i_\mathrm{f}(s)}{U_\mathrm{AFE}(s)} = \frac{sC_\mathrm{tot}}{s^2 L_\mathrm{b} C_\mathrm{tot} + sR_\mathrm{f} C_\mathrm{tot} + 1} = \frac{\omega_\mathrm{n}^2 C_\mathrm{tot} s}{s^2 + 2\zeta\omega_\mathrm{n} s + \omega_\mathrm{n}^2}\,. \tag{32}$$

Valitaan suotimen resonanssitaajuudeksi kymmenesosa käytettävästä kytkentätaajuudesta eli 1 kHz, koska tavoitteena on, että yhteismuotoisen jännitteen vaimennus on kytkentätaajuudella 20 dB. Teoriassa toisen kertaluvun suotimen vaimennus on rajataajuuden jälkeen 40 dB/dekadi. Siirtofunktion jokainen napa vaimentaa järjestelmää 20 dB/dekadi ja jokainen nolla vahvistaa 20 dB/dekadi. Tässä tapauksessa on yksi nolla ja kaksi napaa, mikä mahdollistaa 20 dB/dekadi vaimennuksen.

Suodinpiirissä kulkevan yhteismuotoisen virran suuruus on suoraan verrannollinen yhteismuotoisen kuristimen induktanssin suuruuteen. Näin ollen valitsemalla sopiva yhteismuotoinen kuristin, voidaan suotimen vastuksessa syntyvä tehohäviö minimoida. Toisaalta, mitä suurempi-induktanssinen yhteismuotoinen kuristin, sitä kalliimpi ja kookkaampi se on, kun käytettävä nimellisvirta pidetään vakiona. Näin ollen yhteismuotoisen kuristimen valinnalla tehdään kompromissi yhteismuotoisen jännitteen ja virran vaimennuksen, vastuksen tehohäviön ja yhteismuotoisen kuristimen hinnan välillä.

Valitaan induktanssiltaan 10 mH:n yhteismuotoinen kuristin. Koska komponenttivalmistajalta ei löytynyt suoraan 10 mH:n kuristinta käytettävälle nimellisvirralle, asennetaan sarjaan kaksi 5 mH:n kuristinta. Nyt yhtälöstä (29) voidaan ratkaista kapasitanssin C_{tot} suuruus. Sen arvoksi saadaan 2.4 μF.

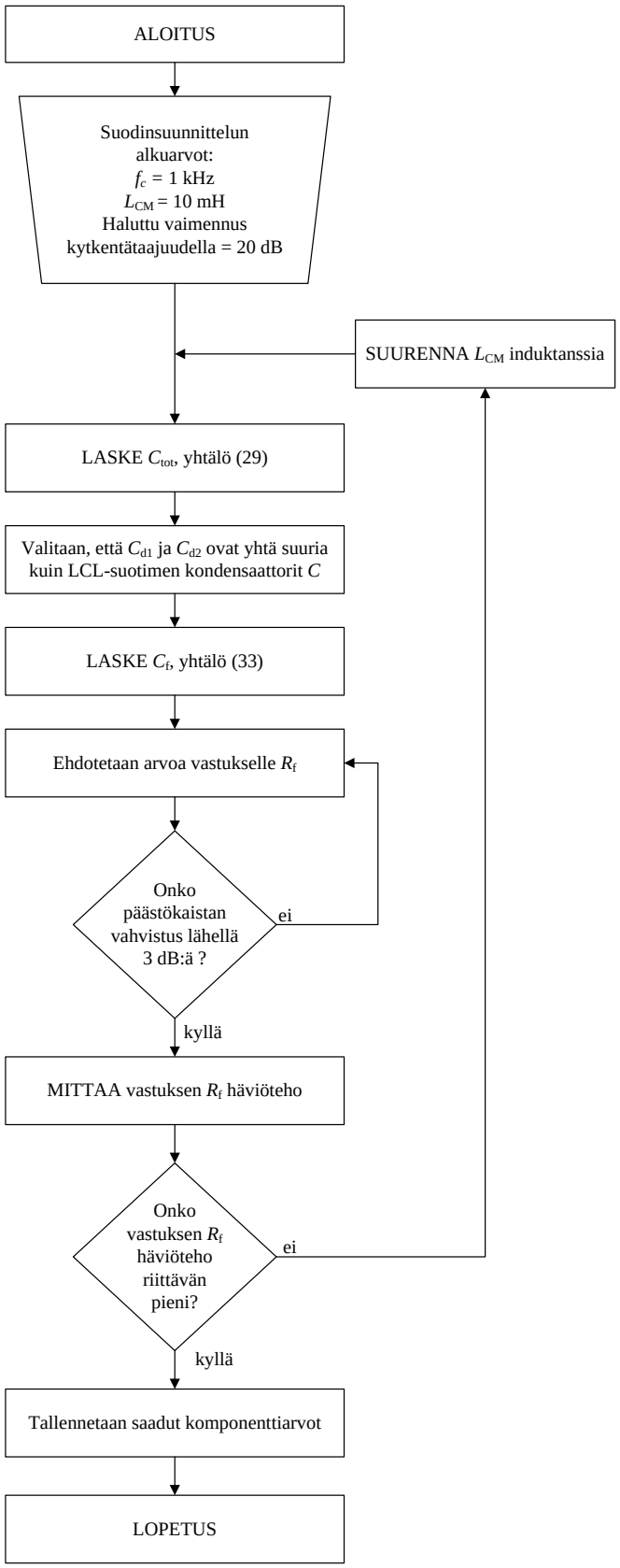
Koska L_{CM} ja C_{tot} ovat jo valittu, voidaan vaimennusvakion ζ suuruuteen vaikuttaa resistanssin R_f avulla, yhtälön (31) perusteella. Jos $\zeta > 1$, järjestelmä on ylivaimennettu, navat ovat reaaliset ja askelvaste ei värähtele. Järjestelmä on sen sijaan alivaimennettu, jos $0 \leq \zeta < 1$. Tällöin askelvasteessa on värähtelyä ja navat ovat kompleksiset. Lisäksi jos $\zeta = 1$, kutsutaan järjestelmää kriittisesti vaimennetuksi. Tällöin askelvaste ei värähtele ja järjestelmällä on kaksinkertainen reaalinen napa. (Virkkunen 1995)

Mitoitetaan vastus R_f siten, että päästökaistan vahvistus on lähellä 3 dB:ä. Tällöin resonanssitaajuuden läheisyydessä olevien harmonistaajuuksien vahvistumisesta ei aiheudu haittaa järjestelmän toiminnan kannalta. Etsitään sopiva vastuksen arvo iteroimalla eri arvoja MATLAB-ohjelmistossa. Iteraatioiden perusteella, vastuksen arvoksi saadaan 68 Ω. Tällöin vaimennusvakio ζ voidaan ratkaista yhtälöstä (31), ja sen arvoksi saadaan 0.5126.

Valitaan välipiirin kondensaattorien C_{d1} ja C_{d2} arvoiksi 10 μF. Koska LCL-suotimen kondensaattorit ovat myös 10 μF, voidaan suotimen kondensaattorin arvo laskea

$$C_f = \frac{6C_d C_{tot} C}{6C_d C - 3C_{tot} C_d - 2C_{tot} C}. \tag{33}$$

C_f:n arvoksi saadaan 3 μF. Mitoituksen vuokaavio on esitetty kuvassa 23 ja mitoituksen tuloksena saadut komponenttiarvot taulukossa 2.



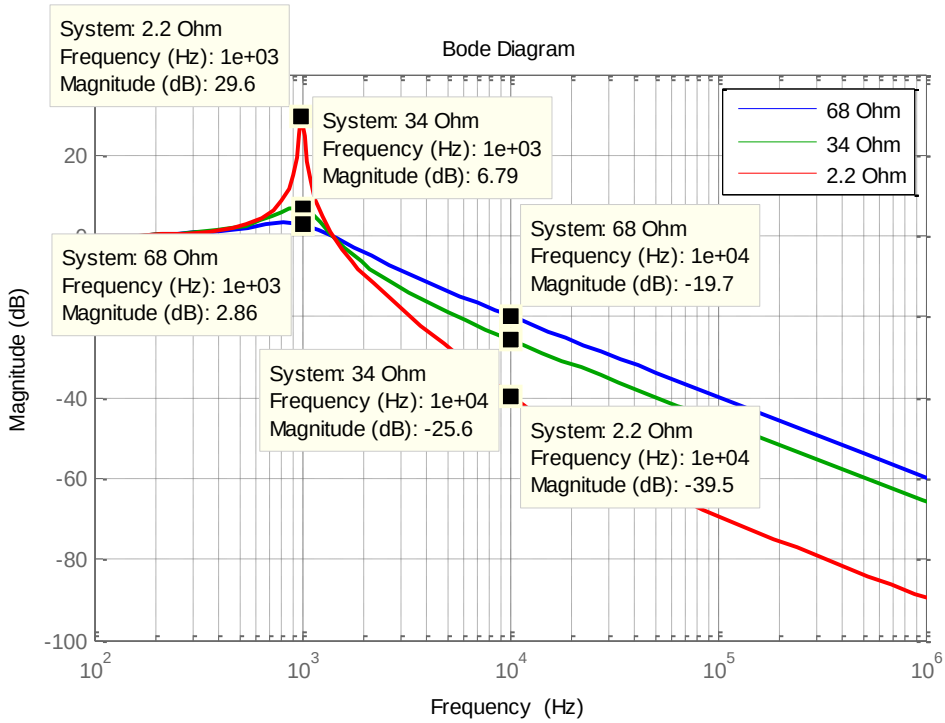
Kuva 23. Mitoituksen vuokaavio.

Taulukko 2. Komponenttien arvot.

LCL-suotimen verkon puolen induktanssi, L_1	0.67 mH
LCL-suotimen verkkosillan puoleinen induktanssi, L_2	1.67 mH
LCL-suotimen kondensaattorit, C	10 µF
Suotimen kondensaattorit välipiirin, C_{d1} ja C_{d2}	10 µF
Yhteismuotoinen kuristin, L_{CM}	10 mH
Suodinpiirin kondensaattori, C_f	3 µF
Suodinpiirin vastus, R_f	68 Ω

4.6 Suotimen vaimennus

Testataan suotimen toimintaa suunnitellun vastuksen lisäksi myös 34 Ω:n ja 2.2 Ω:n vastuksilla. Tällöin vastaavat vaimennusvakiot ovat teoriassa 0.2563 ja 0.0166. Pienemmällä vastuksen arvolla suotimen häviötehoa saataisiin pienennettyä. Samalla selviää myös pienemmän vaimennusvakion tuomat vaikutukset. Tarkastellaan itseisarvokäyrän avulla eri vastuksen arvojen vaikutusta siirtofunktion *G* vaimennukseen, kuva 24.

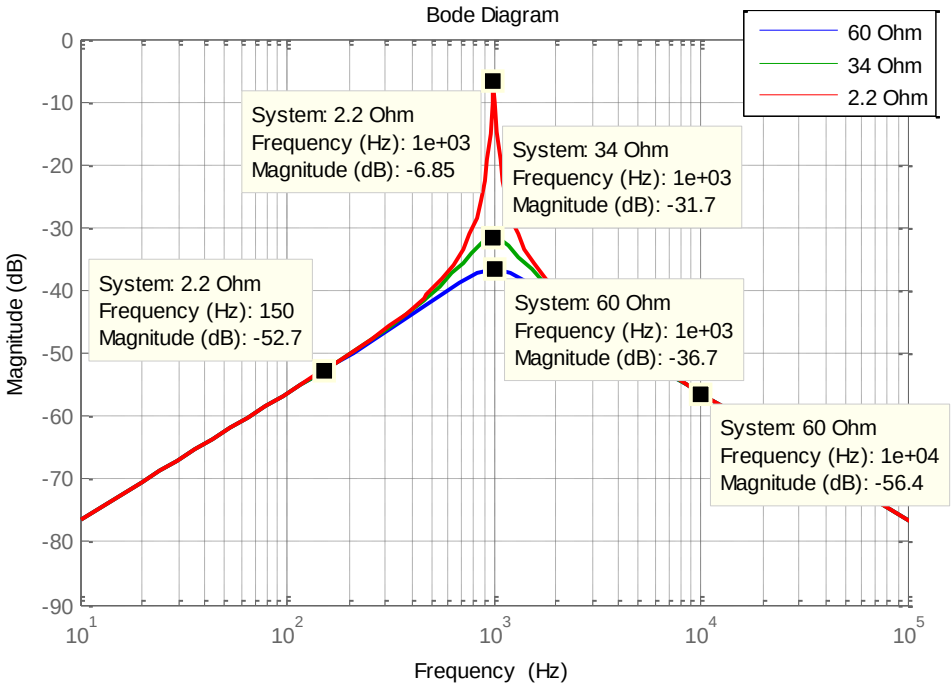


Kuva 24. Vastuksen R_f vaikutus siirtofunktion *G* itseisarvokäyrään.

Vastuksen arvon pienentyessä myös vaimennusvakio pienenee, joka näkyy kuvassa 24 suurempana kytkentätaajuuden vaimennuksena. Kuvasta nähdään, että suunnitelluilla arvoilla yhteismuotoisen jännitteen vaimennus on lähes haluttu 20 dB:ä. Vastuksen ollessa 2.2 Ω, vaimennusvakio on liki nolla, jolloin vaimennus kytkentätaajuudella on lähes 40 dB. Toisaalta vahvistus resonanssitaajuudella kasvaa. 2.2 Ω:n vastuksella suodin vahvistaa resonanssitaajuudella yhteismuotoista jännitehäiriötä noin 30 dB, josta voi seurata ongelmia. Mikäli resonanssitaajuudella tai sen läheisyy-

dessä ei ole yhteismuotoisia jännitehäiriöitä, ei resonanssitaajuuden vahvistuksesta ole välttämättä haittaa.

Tarkastellaan myös vastuksen eri arvojen vaikutusta admittanssin vaimennukseen, kuva 25.

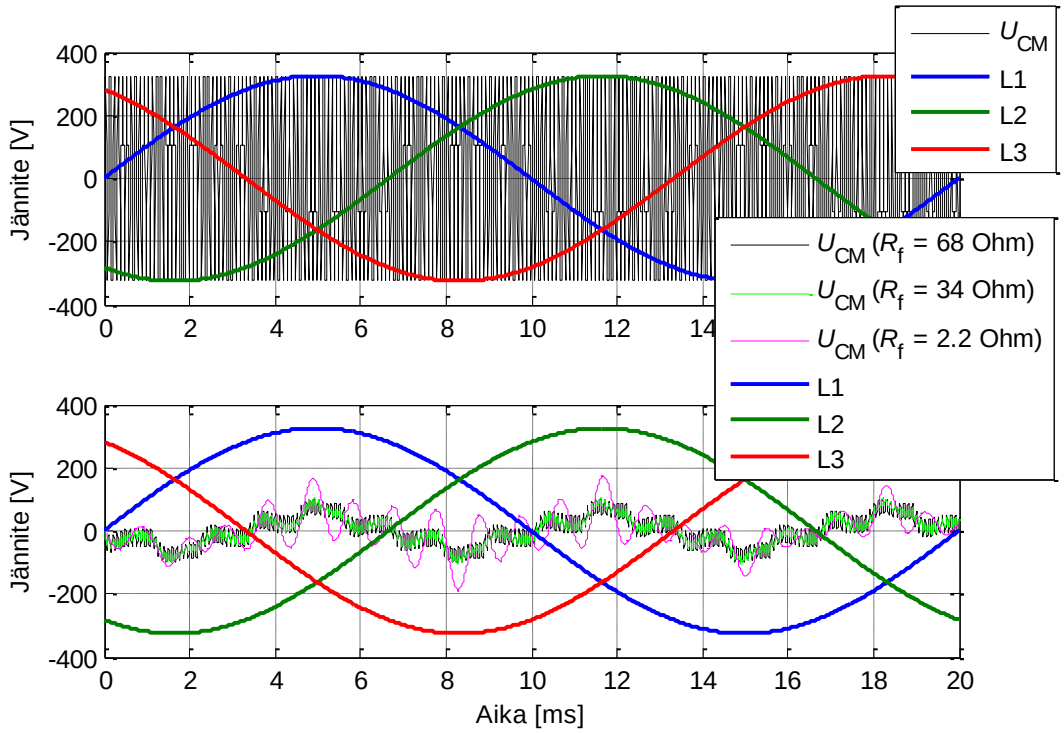


Kuva 25. Vastuksen R_f vaikutus admittanssin Y itseisarvokäyrään.

Kuvasta 25 voidaan huomata, että vastuksen arvon pienentäminen, pienentää vaimennusta ainoastaan resonanssitaajuudella. Yhteismuotoisen virran vaimennus on kytkentätaajuudella 56.4 dB ja virran kolmannen harmonistaajuuden vaimennus on 52.7 dB.

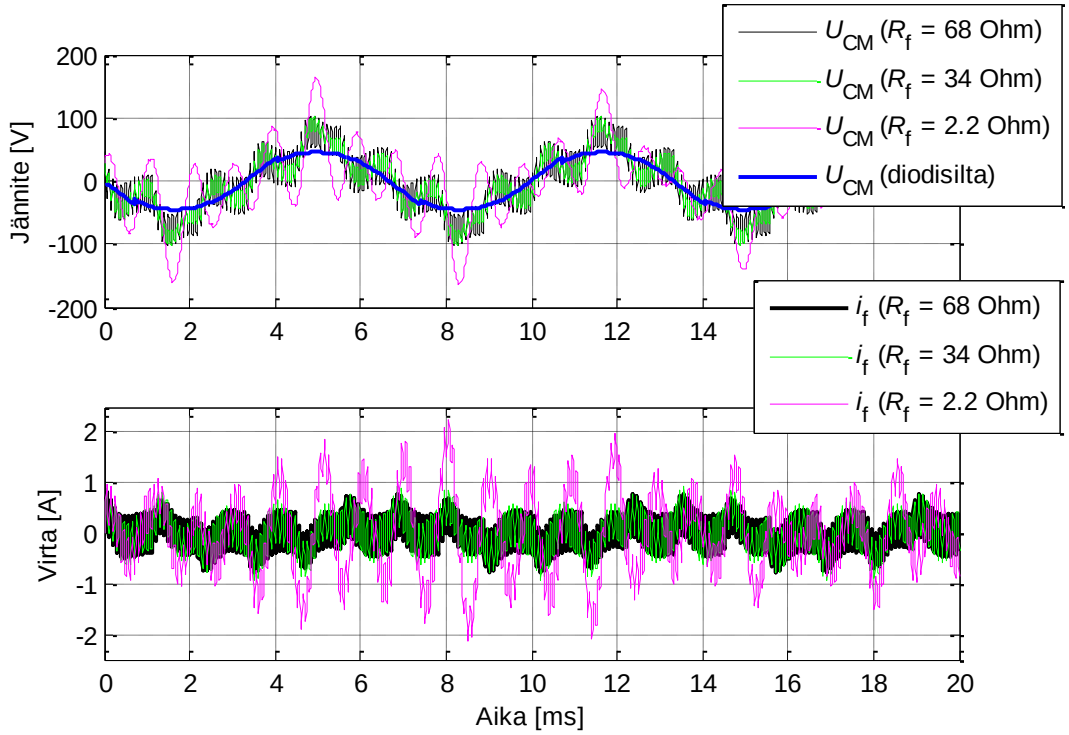
5 SIMULOINTITULOKSET

Suunnitellun suotimen testaamista varten luodaan MATLAB Simulink-ympäristöön ideaalinen aktiivinen verkkosilta, joka sisältää ainoastaan taulukon 2 komponenttiarvot. PWM-modulaattorina on sinikolmioaaltovertailu, jonka jänniteohjeisiin on lisätty kuudesosa kolmatta harmonistaajuutta. Simulointimalli on esitetty liitteessä 1. Aluksi on tutkittu kuinka paljon yhteismuotoinen jännite vaimenee mitoitetun suotimen vaikutuksesta, kuva 26.

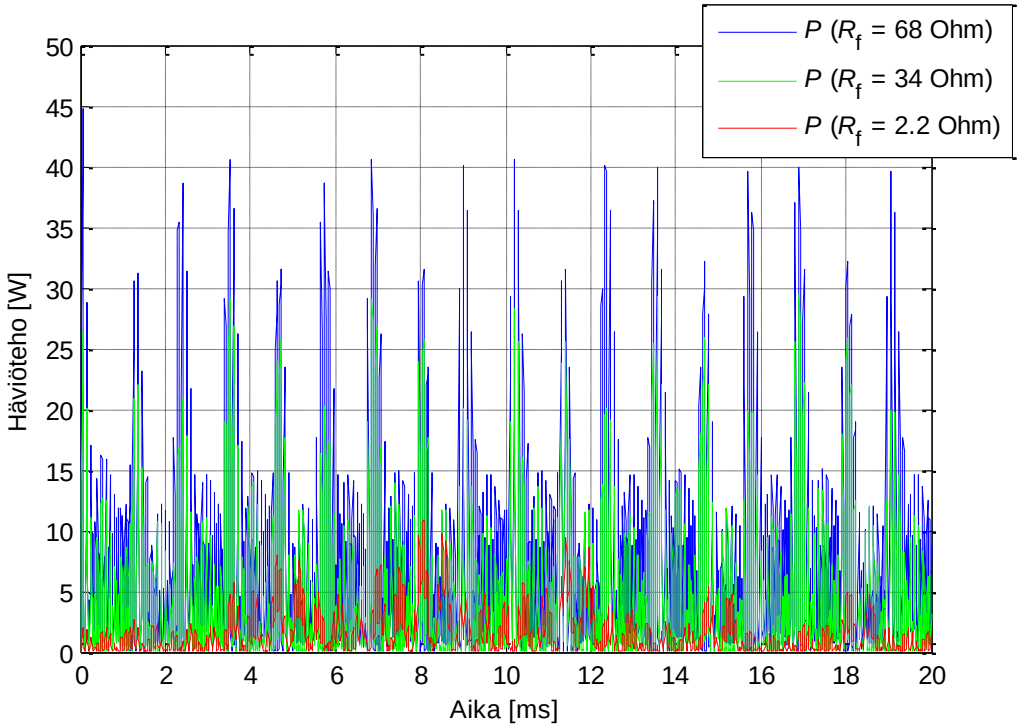


Kuva 26. Simuloitu yhteismuotoinen jännite ilman suodinta (ylempi) ja suotimen kanssa vastuksen eri arvoilla (alempi). Lisäksi 50 Hz:n vaihejännitteet on esitetty vaimennuksen havainnollistamiseksi.

Kuvaan 26 on piirretty vaimennettu yhteismuotoinen jännite pienemmällä jännite-skaalalla sekä suotimen vastuksessa kulkeva virta i_f. Vertailun vuoksi kuvassa 28 on esitetty myös dioditasasuuntaussillan tuottama yhteismuotoinen jännite. Lisäksi kuvaan 29 on piirretty eri vastuksien häviötehot.



Kuva 28. Simuloitu ja suodatettu yhteismuotoinen jännite aktiivisella verkkosillalla vastuksen eri arvoilla ja dioditasasuuntaussillalla (ylempi) sekä vastuksen virta vastuksen eri arvoilla (alempi).



Kuva 29. Simuloidut häviötehot vastuksen eri arvoilla.

Kuvasta 28 voidaan havaita, että suotimen vaikutuksesta yhteismuotoinen jännite vaimenee dioditasasuuntaussiltaa vastaavalle tasolle. Simulointitulokset vastuksen eri arvoilla on koottu taulukkoon 3.

Taulukko 3.

R_f [Ω]	$i_{f,RMS}$ [mA]	P_{ka} [W]
68	343	8,0
34	384	5,0
2,2	814	1,5

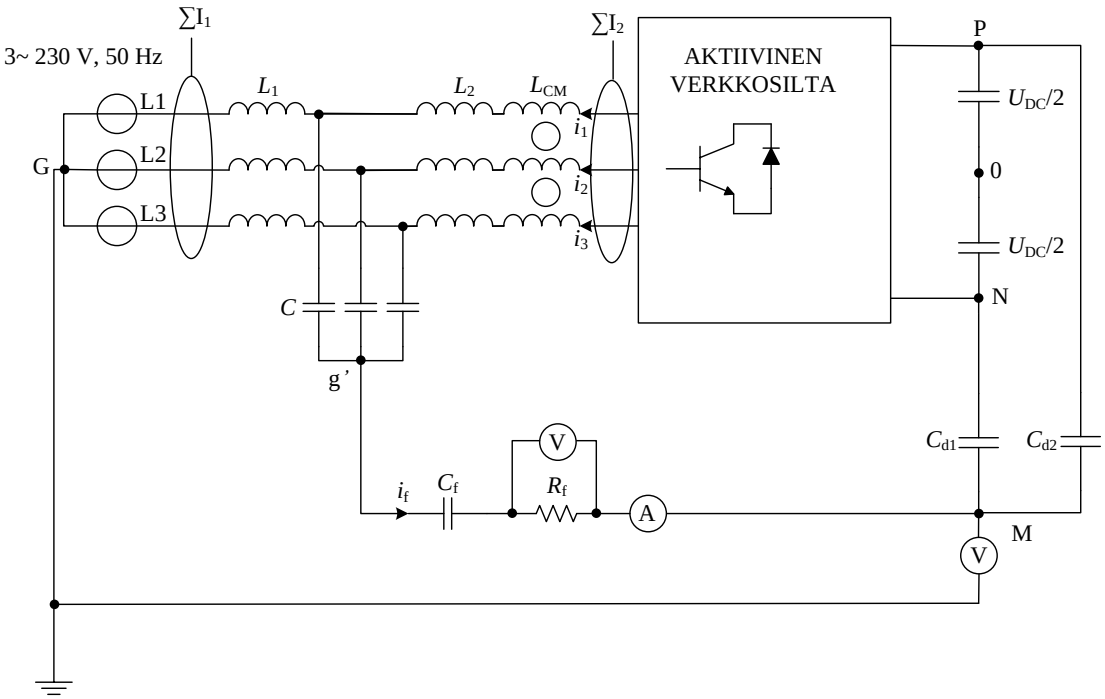
6 KOKEELLISET TULOKSET

Suotimen toimintaa tutkittiin myös kokeellisin mittauksin, kun aktiivisen verkkosillan välipiirin jännite oli 650 V, verkkovirta 12 A ja kytkentätaajuus 10 kHz. Lisäksi suotimen toimintaa tutkittiin tyhjäkäynnissä 0 A verkkovirralla. Eristehilabipolaaritransistorien (IGBT) ohjaukseen käytettiin pulssinleveysmodulaattoria, jonka jänniteohjeisiin on lisätty kuudesosa kolmatta harmonistaajuutta. Mittalaitteisto on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Mittalaitteisto.

- Tektronix TCPA A300 vahvistin, AC/DC virtapihti
- PicoScope 3406B oskilloskooppi
- PEM CWT Mini Rogowski virtamuunnin
- Tektronix TCP202 virtapihti
- Tektronix TCPA300 virtapihti
- Pico TA042 differentiaalinen jännitemittapää
- Tektronix 1103 TekProbe teholähde

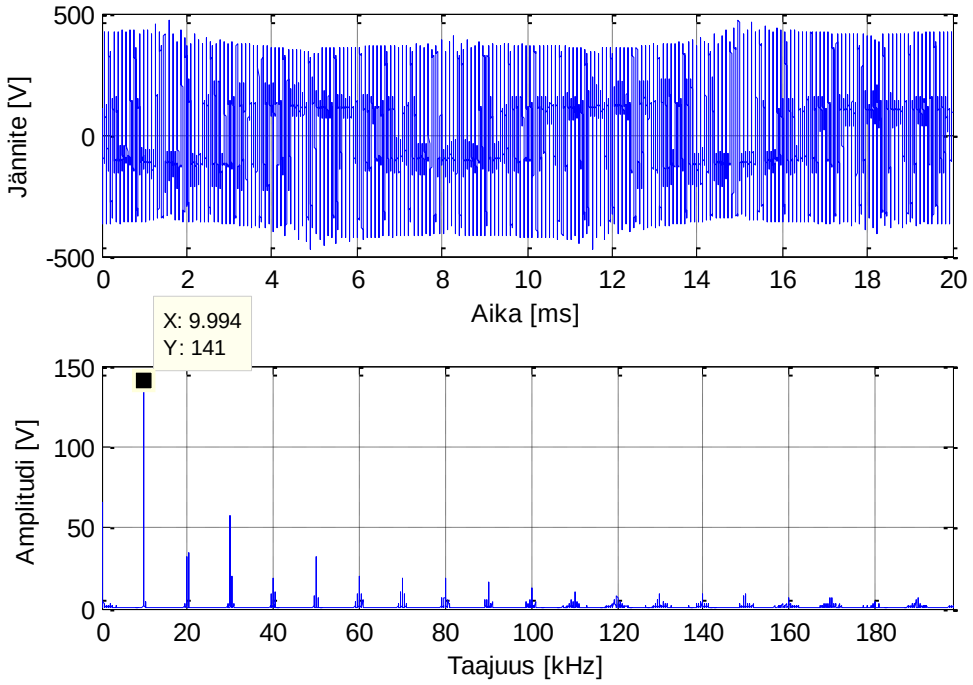
Summavirta mitattiin sekä verkon puolelta että aktiivisen verkkosillan edestä, ilman suodinta sekä suotimen kanssa vastuksen eri arvoilla. Kondensaattoreilla C_{d1} ja C_{d2} muodostettiin välipiirin keskipistettä vastaava potentiaali M yhteismuotoisen jännitteen mittausta varten. Mitattiin yhteismuotoinen jännite potentiaalin M ja maatason G väliltä ilman suodinta sekä suotimen kanssa vastuksen eri arvoilla. Lisäksi mitattiin suodinpiirissä olevan resistanssin R_f yli oleva jännite sekä sen läpi kulkeva virta i_f suotimen häviötehon selvittämiseksi. Mittaukset tehtiin kuvan 30 osoittamalla tavalla.



Kuva 30. Tutkittava järjestelmä mittauksineen.

6.1 Yhteismuotoinen jännite

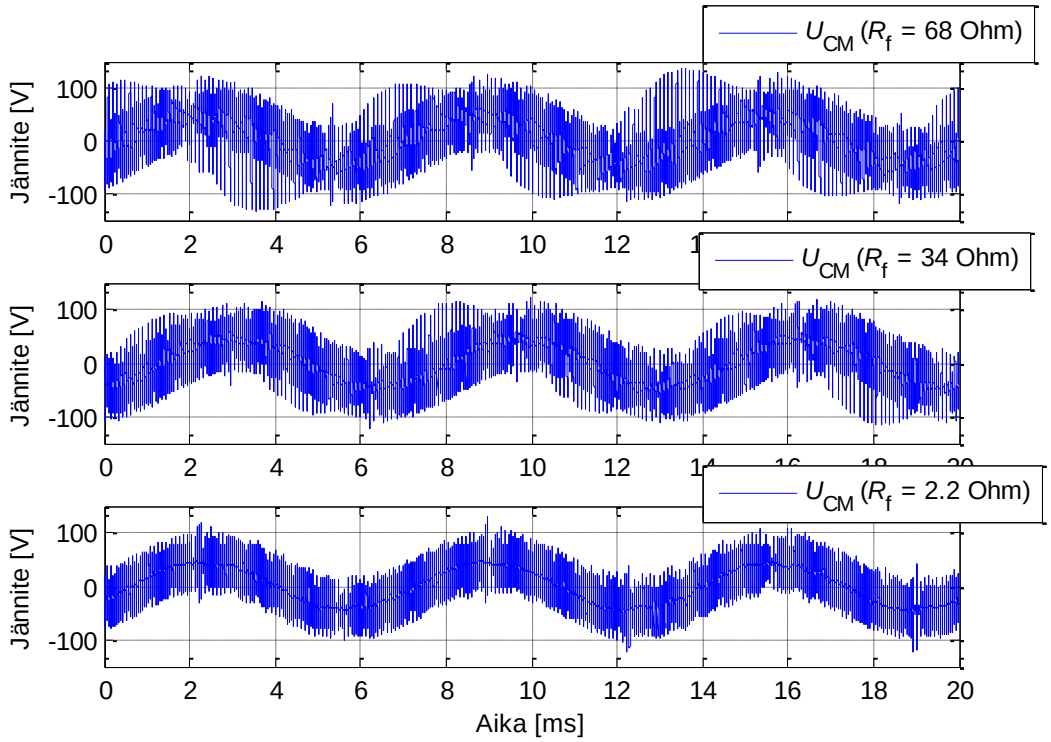
Mitattu yhteismuotoinen jännite välipiirin keskipisteen ja maatason välillä ilman suodinta on esitetty kuvassa 31. Kuvaan on piirretty myös vastaava taajuussisältö.



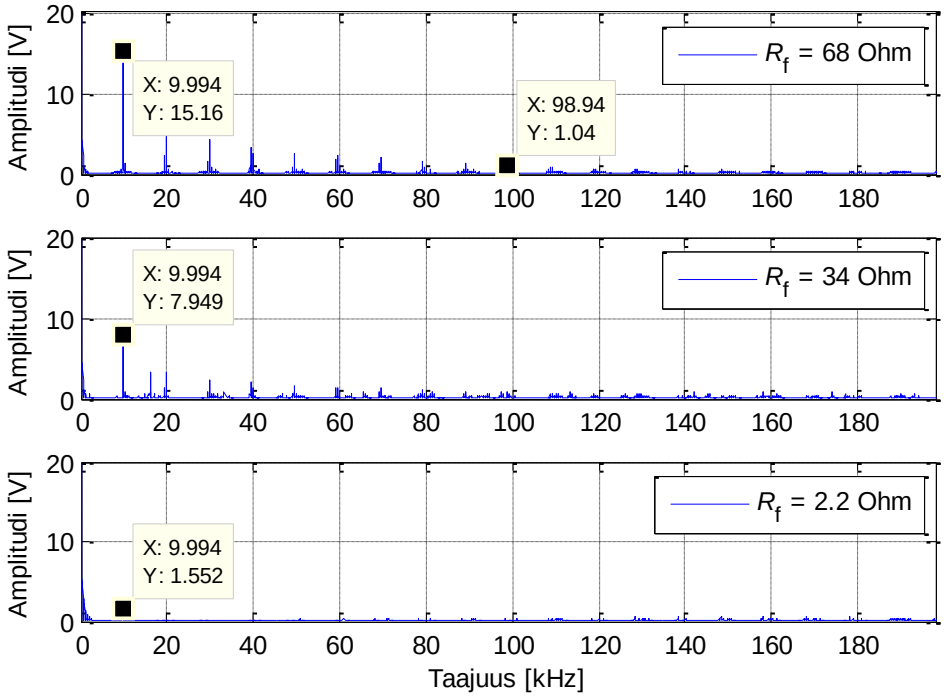
Kuva 31. Mitattu yhteismuotoinen jännite ilman suodinta (ylempi) ja vastaava taajuussisältö (alempi).

Ylemmästä kuvasta voidaan havaita modulaattoriin lisätyn kolmannen harmonistaajuuden käyrämuoto yhteismuotoisessa jännitteessä. Alemmasta kuvasta nähdään, että jänniteharmonisia ilmenee aina kytkentätaajuudesta useisiin satoihin kilohertseihin.

Tutkitaan seuraavaksi kuvan 32 avulla ehdotetun suotimen vaikutusta yhteismuotoiseen jännitteeseen ja sen taajuussisältöön vastuksen eri arvoilla, kuva 33.



Kuva 32. Mitattu yhteismuotoinen jännite suotimella vastuksen eri arvoilla.

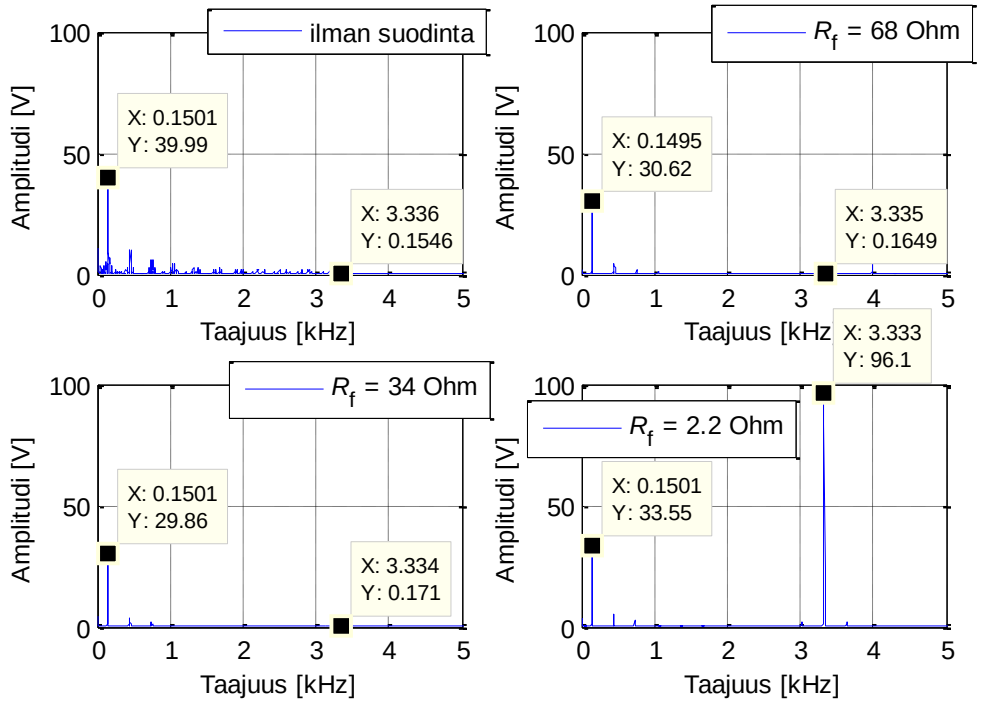


Kuva 33. Mitatun yhteismuotoisen jännitteen taajuussisällöt suotimen kanssa vastuksen eri arvoilla.

Kuvasta 32 nähdään, että suotimen vastuksen arvon muuttaminen ei juuri vaikuta yhteismuotoisen jännitteen käyrämuotoon. Jännitepiikkien määrä näyttää kuitenkin vähentyvän vastuksen arvon pienentyessä. Tämä saattaa johtua, siitä että suuremmilla vastuksen arvoilla on enemmän sisäistä induktanssia rajoittamassa virran kulkua, minkä seurauksena ilmiö näkyy virran sijasta jännitteessä.

Kuva 33 sen sijaan havainnollistaa hyvin, kuinka suodin pienentää yhteismuotoisen jännitteen harmonisten amplitudia kytkentätaajuudella ja sen monikerroilla. Kuvasta nähdään, että vastuksen arvon pienentyessä eli vaimennusvakion pienentyessä, myös saavutettu vaimennus on suurempaa. Lisäksi kuvasta nähdään, että 68 Ω:n vastuksella yhteismuotoisen jännitteen amplitudi pienenee 10 kHz:n kytkentätaajuuden ja 100 kHz:n välillä noin 15 V tarkoittaen, että yhteismuotoinen jännite vaimenee kytkentätaajuuden jälkeen yli 20 dB/dekadi ainakin 100 kHz:n taajuuteen asti.

Tutkitaan, onko pienemmällä vastuksen arvolla vahvistavaa vaikutusta resonanssitaajuuden läheisyydessä oleviin harmonistaajuuksiin, kuva 34.

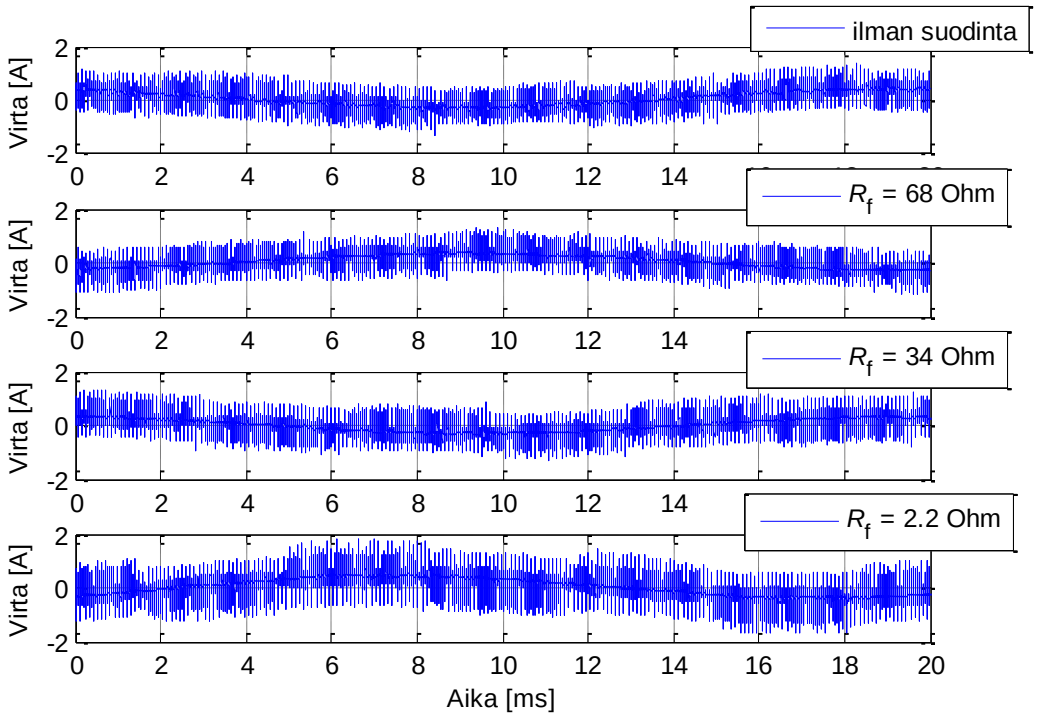


Kuva 34. Mitatun yhteismuotoisen jännitteen matalat taajuussisällöt ilman suodinta ja suotimen kanssa vastuksen eri arvoilla.

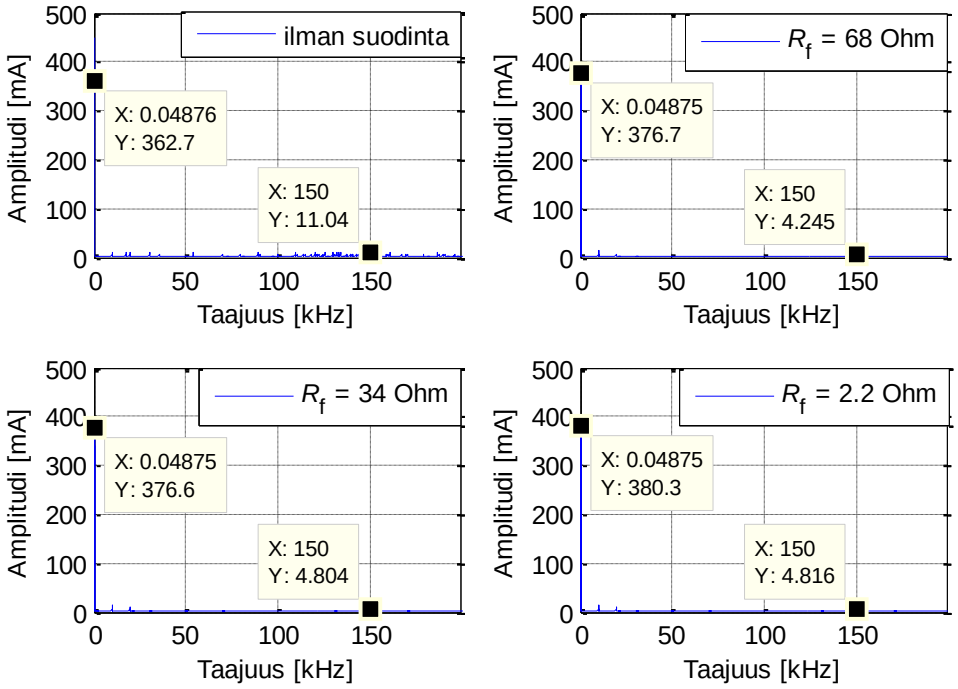
Kuvasta 34 nähdään selvästi, että vastuksen arvon pienentyessä riittävästi, kolmannen harmonistaajuuden amplitudi suurenee. Lisäksi 2.2 Ω:n vastuksella suodin vahvistaa 3.3 kHz:n taajuutta 55.87 dB. Suodin siis vaatii resistanssia, jotta satunnaiset harmonistaajuudet eivät vahvistuisi resonanssitaajuuden läheisyydessä.

6.2 Yhteismuotoinen virta $\sum I_1$

Kuvassa 35 on esitetty verkon puolelta mitattu yhteismuotoinen virta ilman suodinta ja suotimen kanssa vastuksen eri arvoilla. Lisäksi kuvaan 36 on piirretty vastaavat taajuussisällöt.

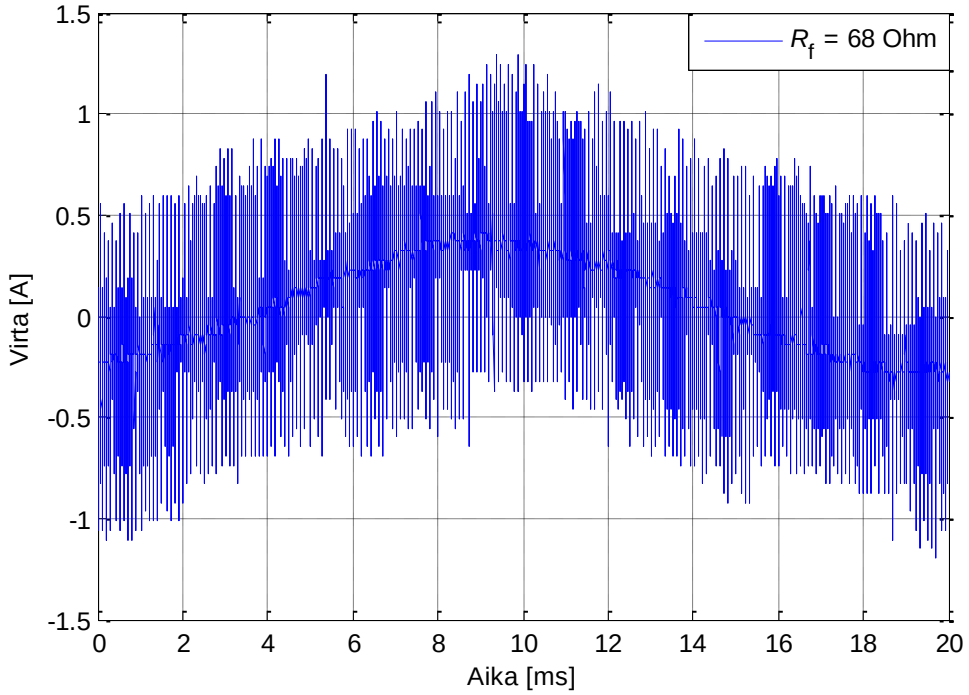


Kuva 35. Verkon puolelta mitattu yhteismuotoinen virta ($\sum I_1$) ilman suodinta sekä ehdotetun suotimen kanssa vastuksen eri arvoilla.



Kuva 36. Verkon puolelta mitatun yhteismuotoisen virran ($\sum I_1$) taajuussisältö ilman suodinta sekä ehdotetun suotimen kanssa vastuksen eri arvoilla.

Yhteismuotoisen virran $\sum I_1$ käyrämuotoa on tarkasteltu vielä tarkemmin kuvassa 37 68 Ω:n suotimella.



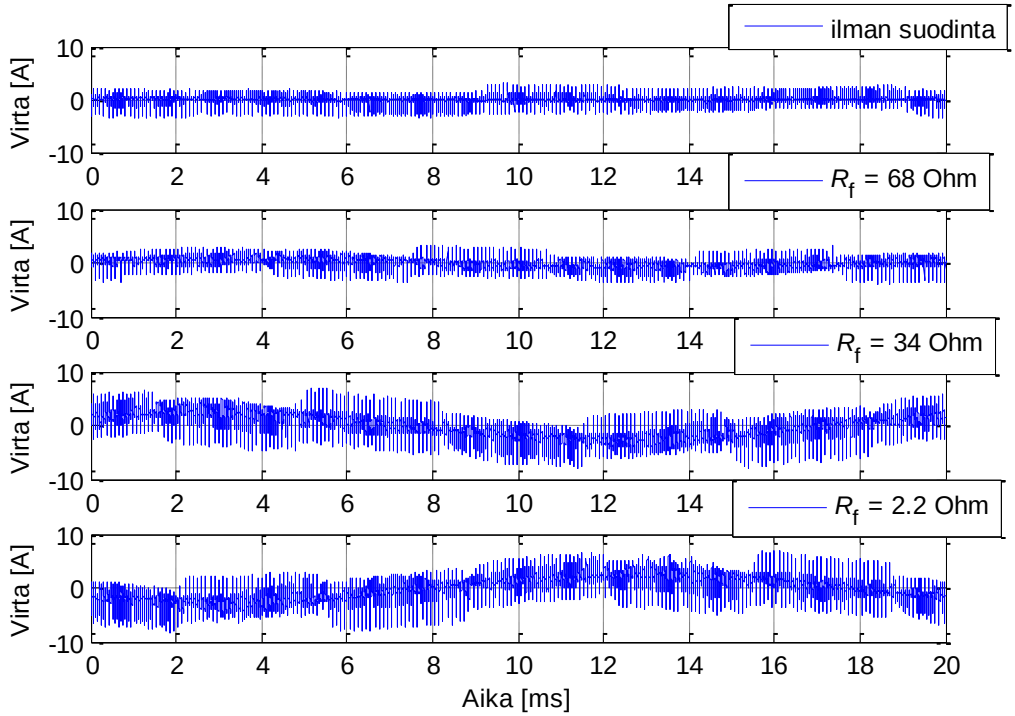
Kuva 37. Verkon puolelta mitattu yhteismuotoinen virta ($\sum I_1$) 68 Ω:n suotimella.

Kuvasta 35 nähdään, että suotimen vastuksen arvon pienentyessä merkittävästi, yhteismuotoinen virta syöttömuuntajan maadoitusjohtimen kautta suurenee. Lisäksi tarkastelemalla taulukon 5 tehollis- ja huippuarvoja voidaan huomata, että 68 Ω:n vastuksella suodin pienentää syöttömuuntajan kautta kulkevan yhteismuotoisen virran tehollisarvoa 24 mA ja huippuarvoa 49 mA. Vastaavasti 34 Ω:n vastuksella suodin pienentää tehollisarvoa 26 mA ja huippuarvoa vain 3 mA. Sen sijaan 2.2 Ω:n vastuksella suodin lisää edellä mainittuja arvoja merkittävästi verrattuna järjestelmään ilman suodinta.

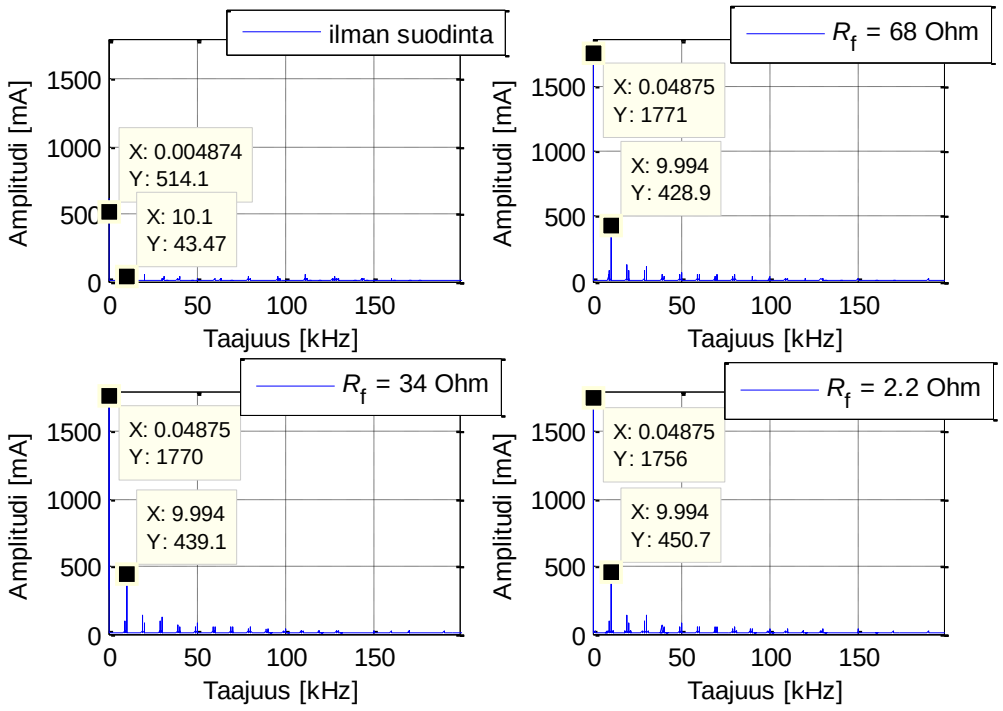
Kuvasta 36 voidaan havaita, että yhteismuotoisen virran 50 Hz:n harmonisen amplitudi suurenee hieman suotimen vaikutuksesta, noin 14 mA. Toisaalta yhteismuotoisen virran 150 kHz:n harmonisen amplitudi pienenee suotimen vaikutuksesta. Myös muiden suuritaajuisten harmonisten amplitudit pienenevät, jonka seurauksena hajakapasitanssien, maatason ja syöttömuuntajan maadoitusjohtimen muodostaman virtasilmukan aiheuttaman sähkömagneettisen häiriön suuruus pienenee parantaen järjestelmää EMC-mielessä.

6.3 Yhteismuotoinen virta $\sum I_2$

Kuvaan 38 on piirretty verkkosillan puoleinen yhteismuotoinen virta ilman suodinta sekä suotimen kanssa vastuksen eri arvoilla. Lisäksi kuvaan 39 on piirretty verkkosillan puoleisen yhteismuotoisen virran taajuussisältö.



Kuva 38. Verkkosillan puolelta mitattu yhteismuotoinen virta ($\sum I_2$) ilman suodinta sekä ehdotetun suotimen kanssa vastuksen eri arvoilla. Huomaa pystyakselin skaala verrattuna mitattuun yhteismuotoiseen virtaan ($\sum I_1$) verkon puolelta.

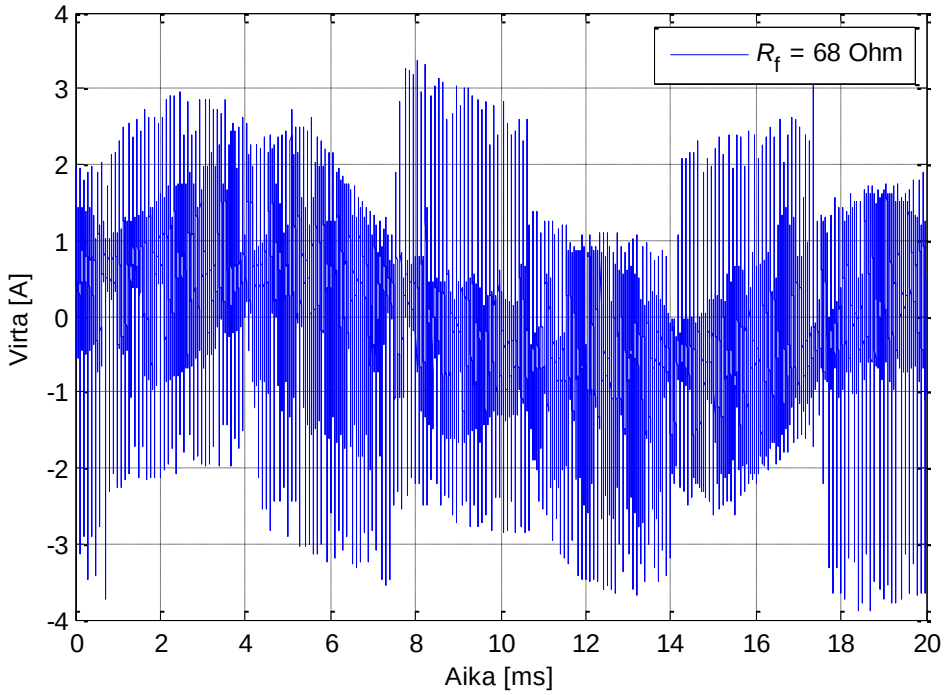


Kuva 39. Verkkosillan puolelta mitatun yhteismuotoisen virran ($\sum I_2$) taajuussisältö ilman suodinta sekä ehdotetun suotimen kanssa vastuksen eri arvoilla.

Kuvasta 38 voidaan havaita, että aktiivisen verkkosillan tulosta mitattu yhteismuotoinen virta suurenee selvästi suotimen vastuksen arvon pienentyessä. Tämä johtuu siitä, että suotimen takaisinkytkentä välipiirin ja LCL-suotimen tähtipisteen välillä tarjoaa pieni-impedanssisemman kulkureitin yhteismuotoiselle virralle kuin hajakapasitanssit, maataso ja syöttömuuntajan maadoitusjohdin.

Vastuksen arvon pienentyessä myös yhteismuotoisen virran kytkentätaajuisten harmonisten amplitudit suurenevat. Kuvan 39 perusteella yhteismuotoisen virran amplitudi vahvistuu suotimen vaikutuksesta kytkentätaajuudella noin 20 dB, jolla voi olla puolijohdetehokytkimiä lämmittävä vaikutus. Lisäksi yhteismuotoisen virran 50 Hz:n harmonisen amplitudi suurenee suotimen vaikutuksesta noin 11 dB.

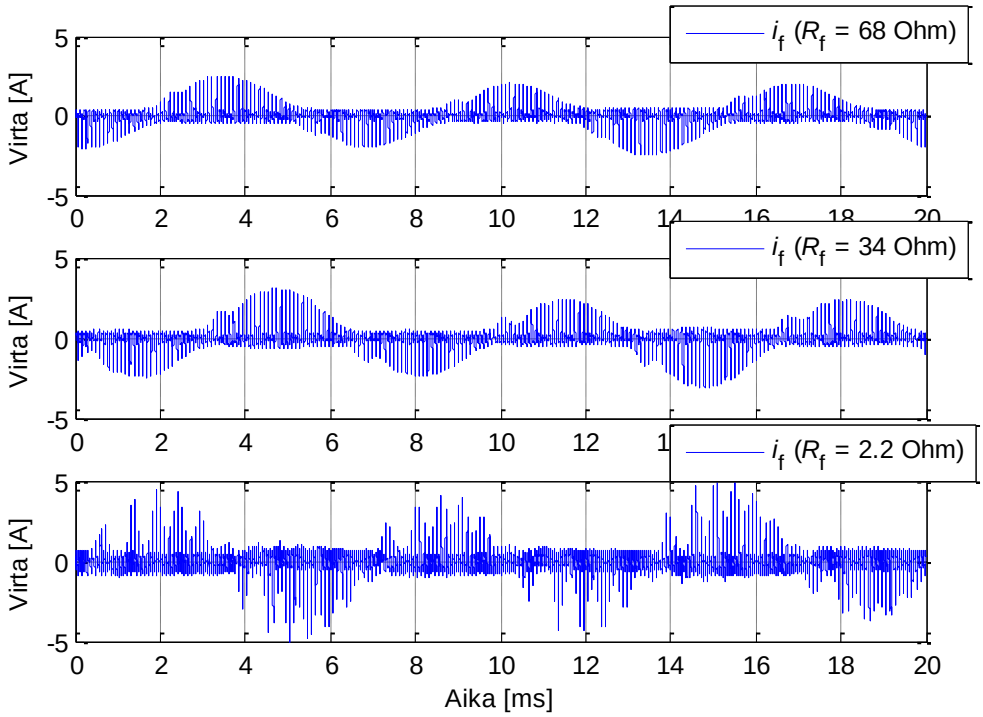
Yhteismuotoisen virran $\sum I_2$ käyrämuotoa on tarkasteltu vielä tarkemmin kuvassa 40 68 Ω:n suotimella.



Kuva 40. Verkkosillan puolelta mitattu yhteismuotoinen virta ($\sum I_2$) 68 Ω:n suotimella.

6.4 Suodinpiirin virta ja häviöteho

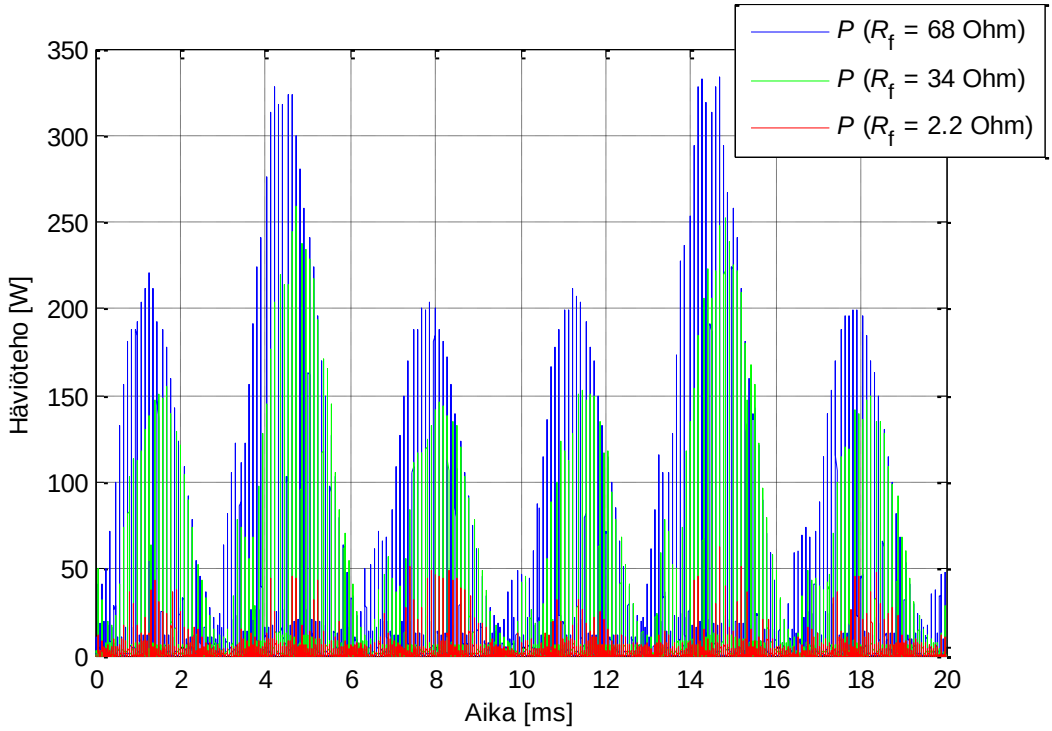
Tutkitaan seuraavaksi suodinpiirissä kulkevan virran i_f suuruutta vastuksen eri arvoilla, kuva 41.



Kuva 41. Mitattu suodinpiirin virta i_f vastuksen eri arvoilla.

Kuten kuvan 38 yhteydessä todettiin, yhteismuotoinen virta suodinpiirissä suurenee, kun vastuksen arvo pienenee. Tämä selviää myös kuvasta 41 ja taulukosta 5. Lisäksi yhteismuotoisen virran käyrämuodosta tulee pulssimaisempaa vastuksen arvon pienentyessä. Tämä näkyy myös kuvassa 40 suurentuneena taajuussisältönä.

Vastuksen R_f häviöteho on esitetty kuvassa 42 vastuksen eri arvoilla.



Kuva 42. Häviötehot vastuksen R_f eri arvoilla.

Kuva 42 todentaa saatuja simulointituloksia vastuksen häviötehosta, vaikkakin mitattujen häviötehojen huippuarvot ovat selvästi simulointeja suurempia. Tämä johtuu siitä, että simulointiympäristö oli täysin ideaalinen. Lisäksi huomioitavaa on se, että simulointituloksissa häviöteho oli pulssimaisempaa kuin mittaustuloksissa, jossa 20 ms ajanjaksolla oli vain kuusi häviötehopulssia. Mittaustulokset on koottu taulukkoon 5.

Taulukko 5. Mittaustulokset 12 A verkkovirralla.

R_f [Ω]	$\hat{U}_{CM}$ [V]	$U_{CM,\ 10\ kHz}$ [V]	$\sum I_{1,RMS}$ [mA]	$\sum \hat{I}_1$ [mA]	$\sum I_{2,RMS}$ [mA]	$\sum \hat{I}_2$ [mA]	$i_{f,\ RMS}$ [mA]	P_{ka} [W]
-	474	141	254	1338	185	3029	-	-
68	136	15,3	230	1289	701	3367	414	8,7
34	123	7,9	228	1335	1950	6917	444	4,9
2,2	129	1,6	305	1814	1936	6921	507	0,4

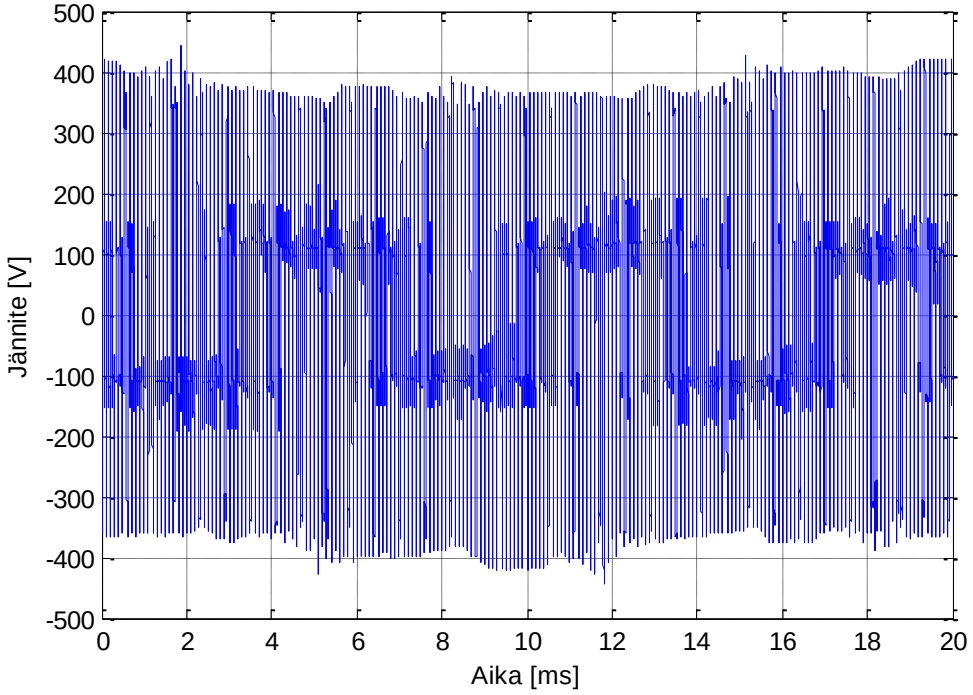
Taulukon 5 tuloksista selviää, että yhteismuotoisen jännitteen vaimennus on 68 Ω:n vastuksella 19.2 dB, joka on lähellä tavoiteltua 20 dB. Sen sijaan 2.2 Ω:n vastuksella vaimennus on 38.9 dB. Suurentunut verkon puolen yhteismuotoinen virta 2.2 Ω:n vastuksella voi johtua siitä, että LCL-suotimen tähtipiste värähtelee verkon tähtipistettä vasten, imien yhteismuotoista virtaa verkosta.

6.5 Tulokset tyhjäkäynnissä

Suotimen toiminnan varmistamiseksi, tutkitaan järjestelmää myös tyhjäkäynnissä verkkovirran ollessa 0 A.

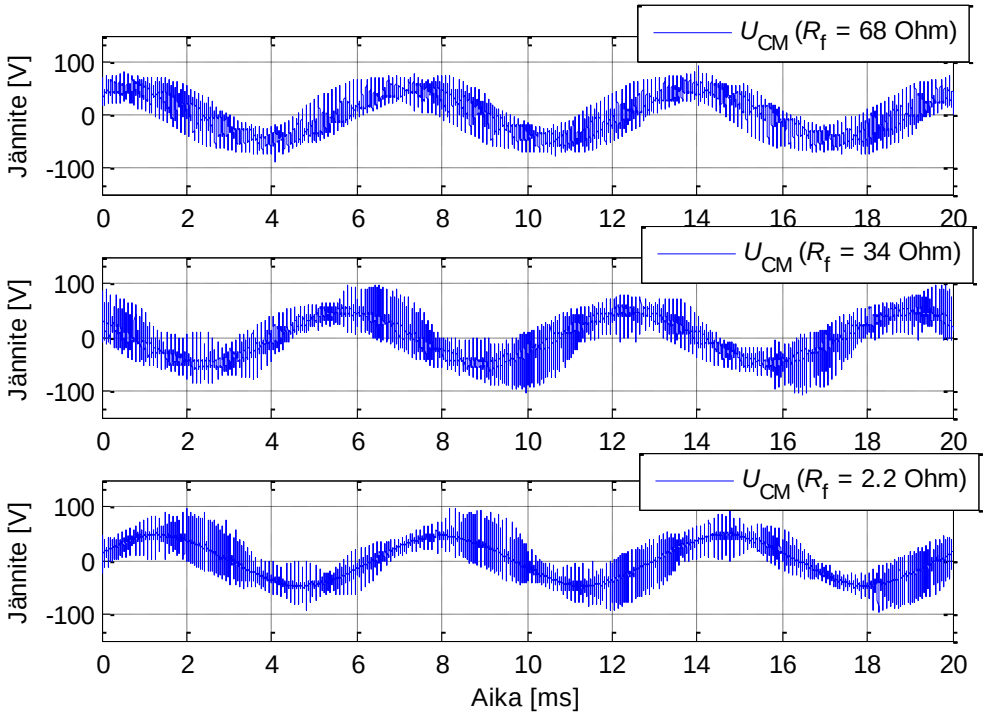
6.5.1 Yhteismuotoinen jännite

Mitattu yhteismuotoinen jännite tyhjäkäynnissä välipiirin keskipisteen ja maatason välillä ilman suodinta on esitetty kuvassa 42.



Kuva 42. Mitattu yhteismuotoinen jännite tyhjäkäynnissä ilman suodinta.

Tutkitaan kuvan 43 avulla ehdotetun suotimen vaikutusta yhteismuotoiseen jännitteeseen tyhjäkäynnissä vastuksen eri arvoilla.

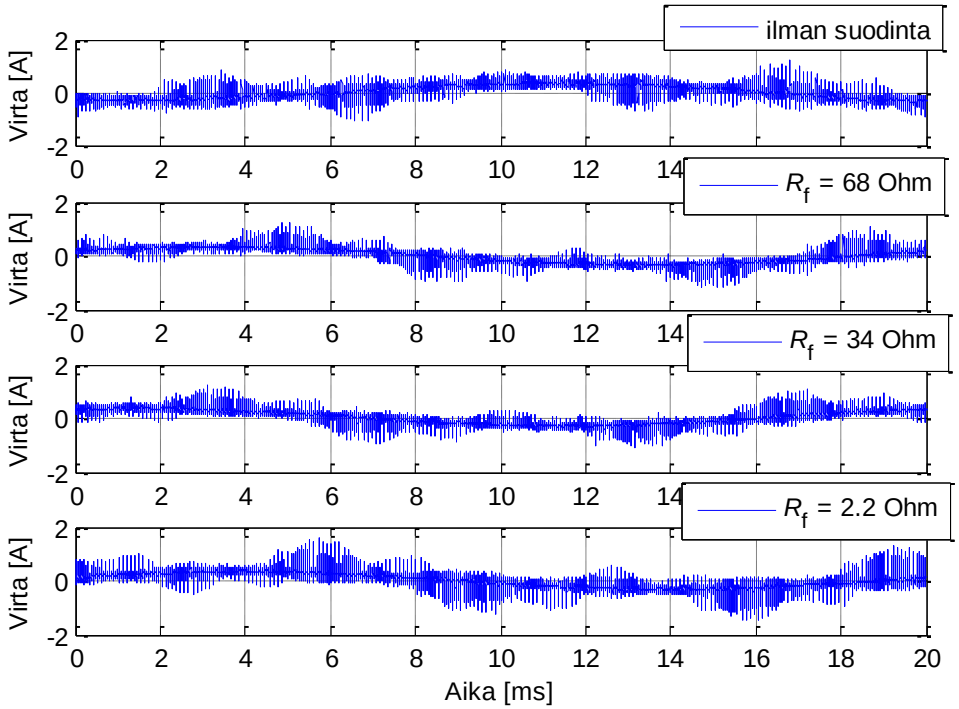


Kuva 43. Mitattu yhteismuotoinen jännite tyhjäkäynnissä suotimella vastuksen eri arvoilla.

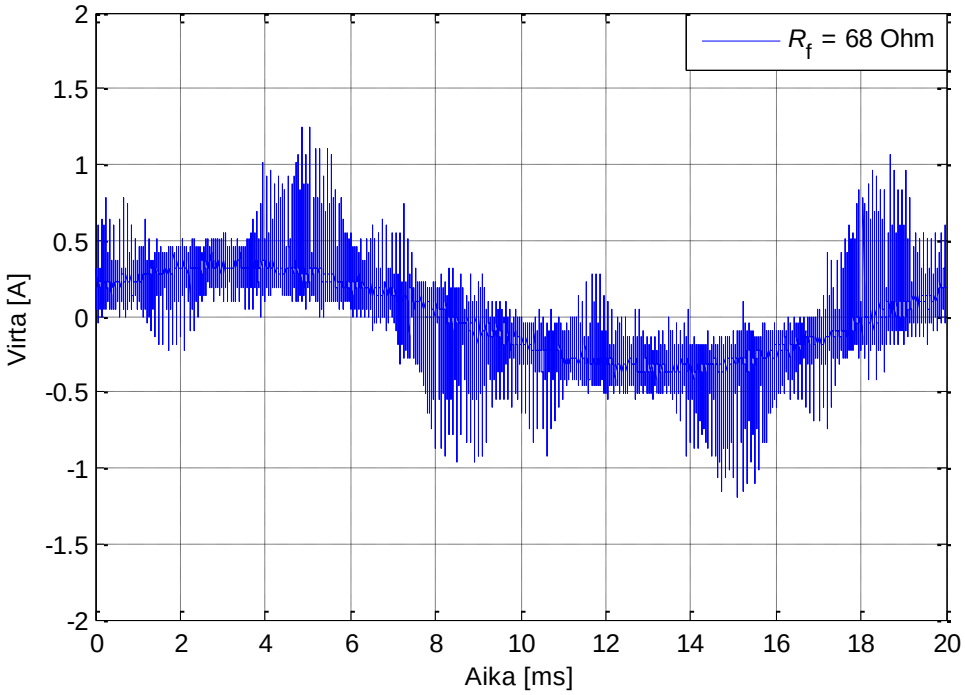
Kuvasta 42 voidaan havaita, että suodattamattoman yhteismuotoisen jännitteen huippuarvo on tyhjäkäynnissä noin 30 V pienempi kuin 12 A verkkovirralla. Myös suodatettujen yhteismuotoisten jännitteiden huippuarvot vastusten eri arvoilla ovat noin 30 V pienempiä tyhjäkäynnissä kuin 12 A verkkovirralla. Lisäksi suodatettujen yhteismuotoisten jännitteiden käyrämuodot ovat tyhjäkäynnissä selvästi kapeampia verrattuna kuvan 32 käyrämuotoihin.

6.5.2 Yhteismuotoinen virta $\sum I_1$

Kuvassa 44 on esitetty verkon puolelta mitattu yhteismuotoinen virta tyhjäkäynnissä ilman suodinta ja suotimen kanssa vastuksen eri arvoilla. Lisäksi kuvaan 45 on piirretty yhteismuotoinen virta 68 Ω:n suotimella lähempää tarkastelua varten.



Kuva 44. Verkon puolelta mitattu yhteismuotoinen virta ($\sum I_1$) tyhjäkäynnissä ilman suodinta sekä suotimella vastuksen eri arvoilla.

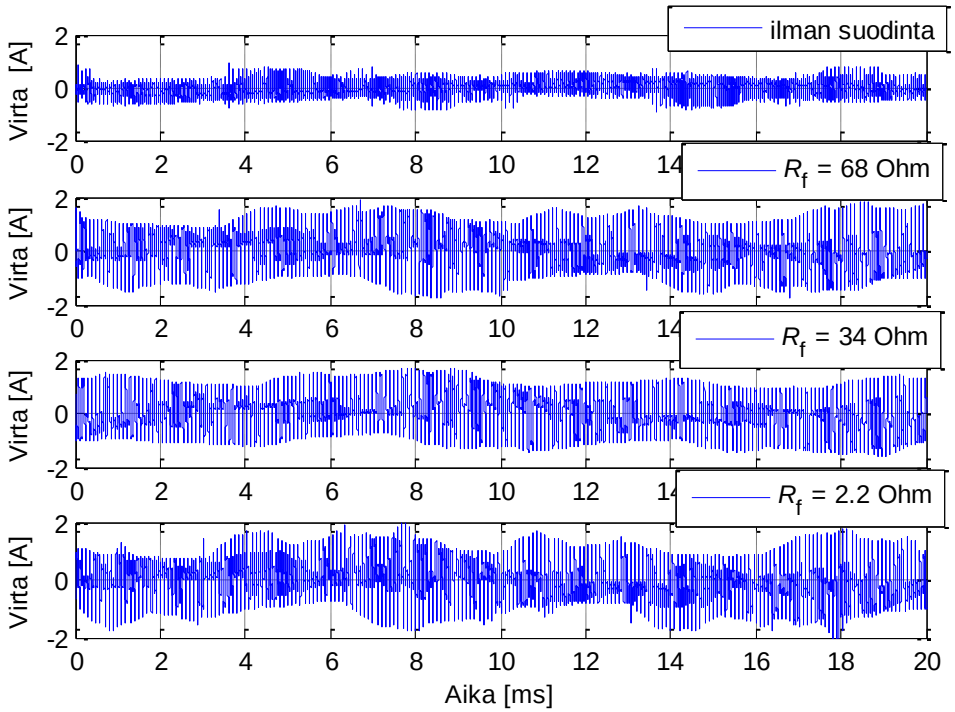


Kuva 45. Verkon puolelta mitattu yhteismuotoinen virta ($\sum I_1$) 68 Ω:n suotimella tyhjäkäynnissä.

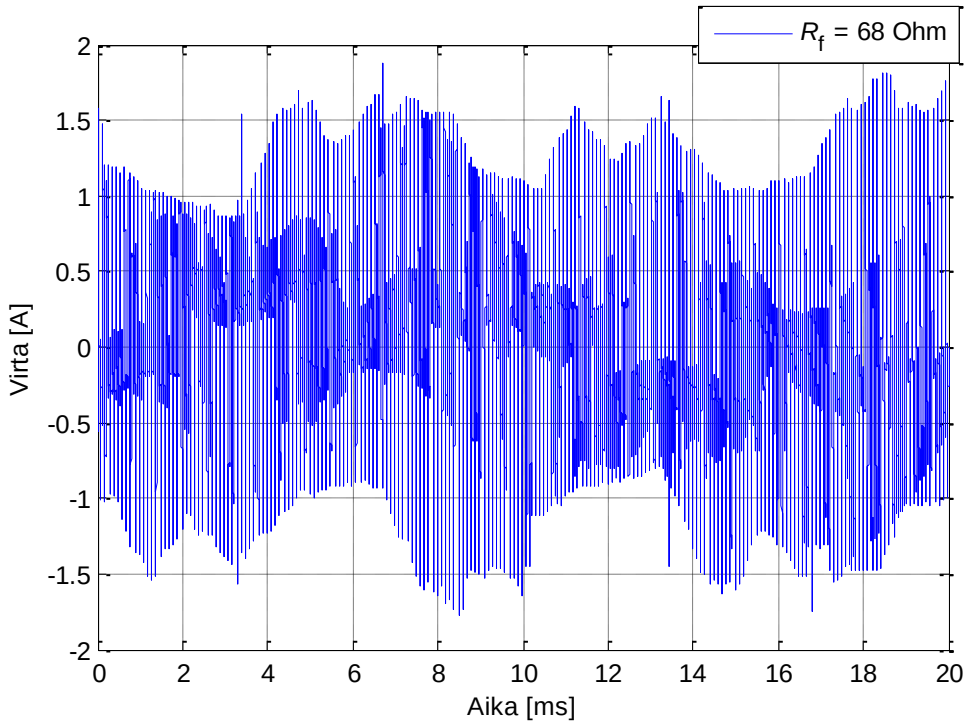
Kuvista 44 ja 45 voidaan havaita, että virtapiikkien määrä on vähäisempää tyhjäkäynnissä kuin 12 A verkkovirralla, mikä näkyy mittaustuloksissa myös pienempänä yhteismuotoisen virran huippuarvona.

6.5.3 Yhteismuotoinen virta $\sum I_2$

Kuvassa 46 on esitetty verkkosillan puolelta mitattu yhteismuotoinen virta tyhjäkäynnissä ilman suodinta ja suotimen kanssa vastuksen eri arvoilla. Lisäksi kuvaan 47 on piirretty yhteismuotoinen virta 68 Ω:n suotimella lähempää tarkastelua varten.



Kuva 46. Verkkosillan puolelta mitattu yhteismuotoinen virta ($\sum I_2$) tyhjäkäynnissä ilman suodinta sekä suotimella vastuksen eri arvoilla.

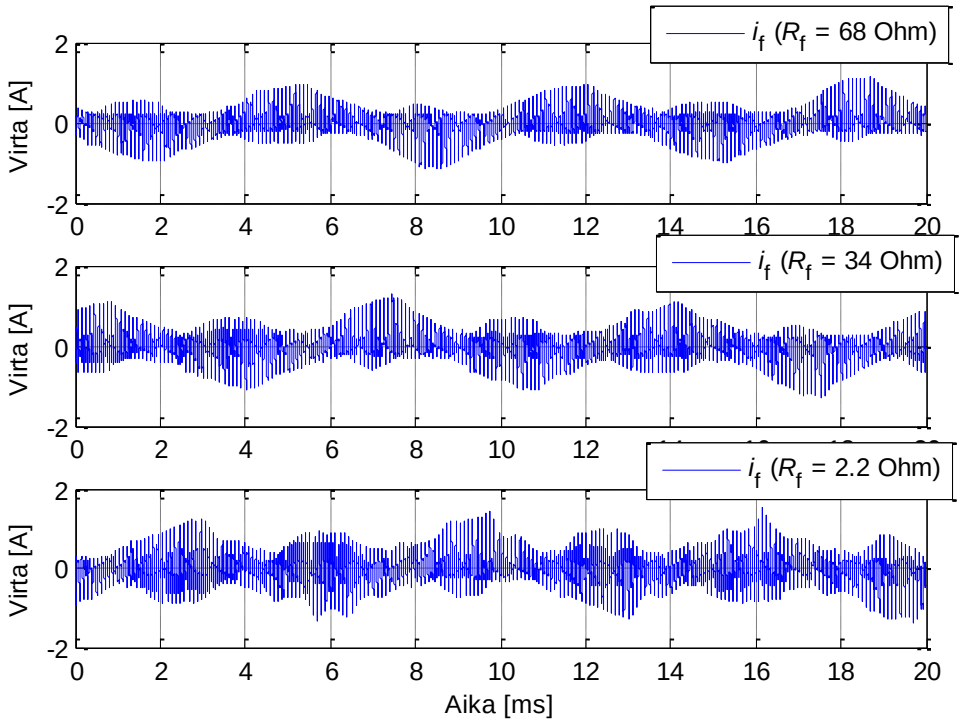


Kuva 47. Verkkosillan puolelta mitattu yhteismuotoinen virta ($\sum I_2$) 68 Ω:n suotimella tyhjäkäynnissä.

Kuvista 46 ja 47 voidaan havaita, että yhteismuotoinen virta aktiivisen verkkosillan tulossa on selvästi pienempi tyhjäkäynnissä kuin 12 A verkkovirralla. Tämä näkyy myös taulukon 6 mittaustuloksissa pienempinä yhteismuotoisen virran huippu- ja tehollisarvoina.

6.5.4 Suodinpiirin virta ja häviöteho

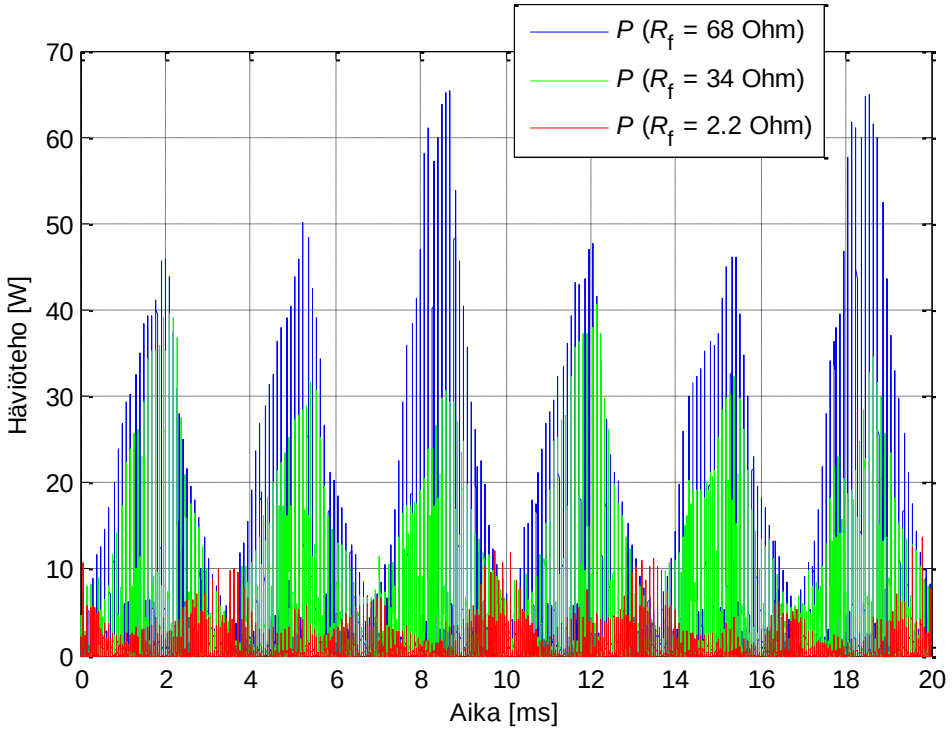
Tarkastellaan seuraavaksi suodinpiirissä kulkevan virran i_f suuruutta tyhjäkäynnissä vastuksen eri arvoilla, kuva 48.



Kuva 48. Mitattu suodinpiirin virta i_f tyhjäkäynnissä vastuksen eri arvoilla.

Kuvasta 48 voidaan nähdä, että suodinpiirin virta i_f pysyy tyhjäkäynnissä lähes samanlaisena, vaikka vastuksen arvoa muutetaan. Tämä selviää myös taulukosta 6, jossa virran i_f tehollisarvo eroaa 68 Ω:n ja 2.2 Ω:n vastuksien välillä vain 10 mA.

Lopuksi vastuksen R_f häviöteho on esitetty kuvassa 49 vastuksen eri arvoilla.



Kuva 48. Häviötehot tyhjäkäynnissä vastuksen R_f eri arvoilla.

Kuvasta 48 nähdään, että häviötehojen huippuarvot vastaavat lähemmin simulointituloksia tyhjäkäynnissä. Mitatut häviötehojen keskiarvot ovat kuitenkin pienempiä kuin simuloidut johtuen simulointimallin yksinkertaisuudesta. Häviöteho pienenee tyhjäkäynnissä noin 60 % verrattuna mittaustuloksiin 12 A verkkovirralla.

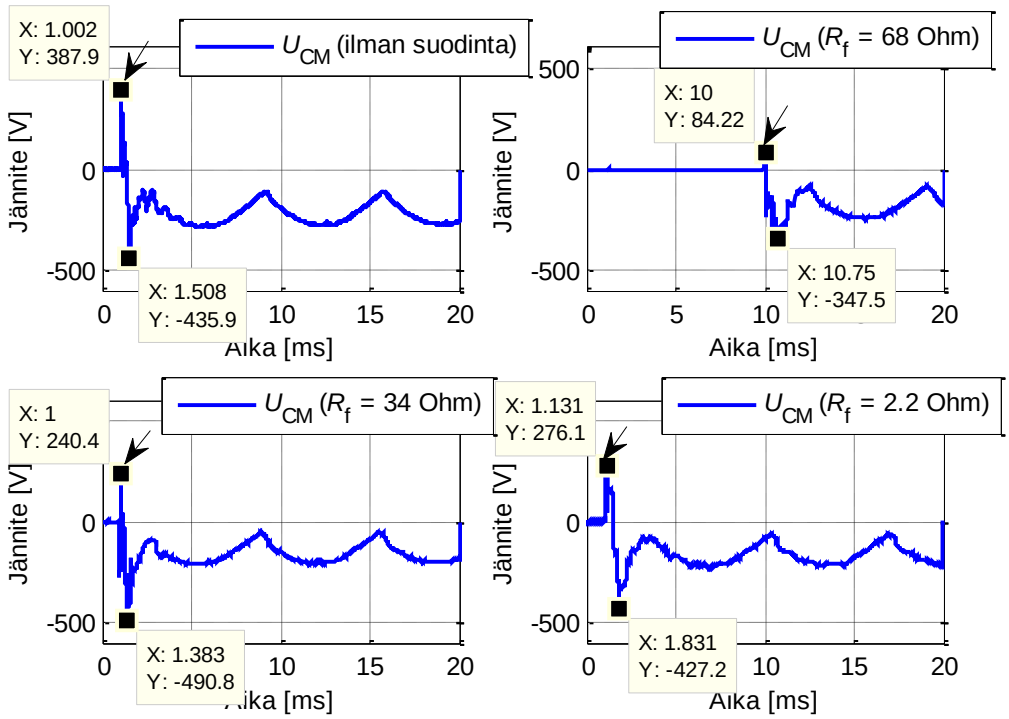
Taulukko 6. Mittaustulokset tyhjäkäynnissä 0 A verkkovirralla.

R_f [Ω]	$\hat{U}_{CM}$ [V]	$\sum I_{1,RMS}$ [mA]	$\sum \hat{I}_1$ [mA]	$\sum I_{2,RMS}$ [mA]	$\sum \hat{I}_2$ [mA]	$i_{f,\,RMS}$ [mA]	P_{ka} [W]
-	445	239	1197	182	891	-	-
68	92	246	1243	509	1871	269	3,6
34	98	240	1228	572	1696	276	1,9
2,2	96	243	1584	489	2049	279	0,2

Verrattaessa taulukon 6 tuloksia taulukon 5 tuloksiin, voidaan havaita, että verkon puolelta mitatun yhteismuotoisen virran ($\sum I_1$) tehollisarvo on tyhjäkäynnissä suurempi kuin 12 A verkkovirralla sekä 68 Ω:n että 34 Ω:n vastuksilla.

6.6 Kytkentätransientti

Tutkitaan vielä suotimen vaikutusta välipiirin keskipisteen ja maatason väliseen jännitteeseen, kun kolmivaiheverkon sähköt kytketään sähköttömään järjestelmään. Kuvassa 49 on esitetty kytkentätransientit ilman suodinta sekä ehdotetun suotimen kanssa vastuksen eri arvoilla.



Kuva 49. Yhteismuotoisen jännitteen kytkentätransientti ilman suodinta sekä ehdotetun suotimen kanssa vastuksen eri arvoilla. Kytkentähetki on merkitty nuolella.

Kuvasta 49 nähdään, että ehdotettu suodin vähentää jännitetransientin suuruutta kytkentähetkellä. Vastuksen arvon pienentyessä, kytkennän aiheuttama jännitetransientti kuitenkin suurenee.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kokeelliset mittaukset vastasivat melko hyvin suunniteltua toimintaa ja simulointeja. Simuloinneissa yhteismuotoinen jännite värähteli 2.2 Ω:n vastuksen arvolla, mutta mittauksissa tätä ei tapahtunut. Sama ilmiö näkyi myös 2.2 Ω:n vastuksen läpi simuloidussa virrassa. Järjestelmä sisältää todellisuudessa resistanssia vastuksen lisäksi myös kaapeloinneissa ja kuristimissa, mitä ei simulointiympäristöön mallinnettu. Lisäksi simulointimalli ei ota huomioon erilaisia magneettisia häviöitä, joita järjestelmässä todellisuudessa ilmenee. Kahdella suuremmalla vastuksen arvolla yhteismuotoisen jännitteen simulointitulokset vastasivat silti yllättävän tarkasti kokeellisia tuloksia.

Yhteismuotoinen jännite vaihteli 100 V ja −100 V välillä huojuen kolminkertaisella taajuudella verkon syöttötaajuuteen nähden vastaten simulointituloksien käyrämuotoa. Myös suotimen vastuksen läpi simuloitu virta oli melko lähellä mitattua virtaa. Erisuuruisten vastusten simuloidut häviötehot olivat yllättävän lähellä mitattuja häviötehoja, vaikka simulointimalli oli täysin ideaalinen. Ehdotetulla vastuksella keskimääräiseksi häviötehoksi simuloitiin 8.0 W ja mitattiin 8.7 W, 34 Ω:n vastuksella simuloitiin 5 W ja mitattiin 4.9 W ja 2.2 Ω:n vastuksella simuloitiin 1.5 W ja mitattiin 0.4 W. Jos suotimen häviötehoa verrataan järjestelmän ottamaan näennäistehoon, on suotimen häviöteho suurimmalla vastuksellakin vain noin 0.1 % näennäistehosta.

Yhteismuotoisen jännitteen harmonisten amplitudit pienenivät odotetusti suotimen vastuksen arvon pienentyessä. Huomattiin kuitenkin, että 2.2 Ω:n vastuksella yhteismuotoisen jännitteen 3.3 kHz:n harmoninen vahvistui merkittävästi lisääntyneen vahvistuksen vaikutuksesta resonanssitaajuuden ympäristössä. Suuren vahvistuksen myötä suodin alkoi myös resonoida joillakin harmonistaajuuksilla niin voimakkaasti, että resonanssi kuului äänenä. Voimakas resonanssi on potentiaalinen rikkomaan laitteistoa tai sen osia. Näin ollen vastusta voidaan pitää tärkeänä osana suodinta, jonka suuruus tulee mitoittaa käytettävän sovelluksen mukaisesti.

Ilman suodinta syöttömuuntajan kautta kulkevan yhteismuotoisen virran tehollisarvoksi mitattiin 254 mA ja huippuarvoksi 1.34 A. Ehdotetulla suotimella vastaaviksi arvoiksi mitattiin 230 mA ja 1.29 A. Sen sijaan yhteismuotoisen virran taajuussisältö aktiivisen verkkosillan tulossa suureni 20 dB kytkentätaajuudella ehdotetun suotimen vaikutuksesta. Tämä saattoi johtua siitä, että koelaitteisto oli asennettu vanerilevylle eikä yhteismuotoiselle virralle ollut käytännössä muita reittejä kuin virrata puolijohdetehokytkimien jäähdytyslevystä maadoitusjohdon kautta syöttömuuntajalle tai DC-välipiirin ja LCL-suotimen tähtipisteen välillä. Aktiivisen verkkosillan asentaminen ja maadoittaminen metallikoteloon saattaisi muutta tulosta. Pienen kondensaattorin lisääminen LCL-suotimen tähtipisteen ja maatason välille voisi myös vähentää yhteismuotoista virtaa kytkentätaajuudella ja sen monikerroilla aktiivisen verkkosillan tulosta.

8 YHTEENVETO

Diplomityön tekijän tavoitteena oli löytää suodinratkaisu aktiivisen verkkosillan tuottaman yhteismuotoisen jännitteen vaimentamiseksi dioditasasuuntaussiltaa vastaavalle tasolle. Ehdotetun suotimen valitsemiseksi tutkittiin aikaisempaa tutkimustietoa yhteismuotoisen jännitteen ja virran vaimennusratkaisuista aktiiviselle verkkosillalle. Suotimen mitoittamisen helpottamiseksi, aktiiviselle verkkosillalle muodostettiin yksivaiheinen sijaiskytkentä, jonka avulla muodostettiin siirtofunktio aktiivisen verkkosillan muodostaman nollaverkon jännitteestä LCL-suotimen tähtipisteen ja DC-välipiirin keskipisteen väliseen jännitteeseen ja admittanssi aktiivisen verkkosillan muodostaman LCL-suotimen tähtipisteen ja DC-välipiirin keskipisteen jännitteestä suotimen virtaan. Suunnittelun ja mitoittamisen apuna käytettiin MATLAB-ohjelmistoa sopivien komponenttiarvojen löytämiseksi.

Suotimen toimintaa testattiin ensin simuloimalla, jonka jälkeen aktiiviselle verkkosillalle rakennettiin ehdotettu suodin. Suotimen toimintaa todennettiin kolmella vastuksen eri arvolla. Tavoitteena oli vaimentaa yhteismuotoista jännitettä 20 dB kytkentätaajuudella eli kymmenesosaan alkuperäisesti. Ehdotetulla suotimella yhteismuotoinen jännite vaimeni kytkentätaajuudella 19.4 dB eli 9.3:een osaan alkuperäisestä ja tämän jälkeen yli 20 dB/dekadi taajuuteen 100 kHz asti. Sen sijaan puolittamalla vastuksen arvo, yhteismuotoinen jännite vaimeni kytkentätaajuudella 25 dB eli 18:nteen osaan alkuperäisestä. Lisäksi 68 Ω:n vastuksella suodin pienensi syöttömuuntajan kautta kulkevan yhteismuotoisen virran huippuarvoa 49 mA ja tehollisarvoa 24 mA. Lopuksi suotimen toiminta varmistettiin tyhjäkäynnissä sekä kytkettäessä järjestelmään sähköt.

Jatkotutkimuksena suotimen toimintaa voitaisiin tutkia aiheutuvien sähkömagneettisten häiriöiden kannalta tekemällä järjestelmälle EMC-testit ilman suodinta ja ehdotetun suotimen kanssa. Yhteismuotoinen kuristin tulisi valmiin kaupallisen kuristimen sijaa suunnitella sovelluskohtaisesti käytetylle kytkentätaajuudelle ja virralle, jolloin kuristin sisältäisi varmasti suunnitellun määrän induktanssia kytkentätaajuudella ja jotta kuristimen koko ja paino saataisiin kaupalliseen käyttöön soveltuvaksi.

Lisäksi yhteismuotoisen kuristimen kyllästymispiste tulisi määrittää sovelluskohtaisesti kuristimen ali- tai ylimitoittamisen välttämiseksi. Yhteismuotoisen jännitteen yhä pienentämiseksi tulisi pohtia kolmitasoisen aktiivisen verkkosillan soveltamista.

LÄHTEET

ABB. (2011). *Bearing Currents in Modern AC Drive Systems*, Technical guide No. 5.

Anirudh, A. ja Vinod, J. (2010). “Common Mode DC Bus Filter for Active Front-End Converter” *IEEE Power Electronics, Drives and Energy Systems,* pp. 1-6.

Chung-Chuan, H., Chih-Chung, S., Po-Tai, C. ja Hava A.M. (2010). ”Common-Mode Voltage Reduction Modulation Techniques for Three-Phase Grid Connected Converters” *IEEE Power Electronics Conference*, pp. 1125-1131.

Dzhankhotov, V. (2009). *Hybrid LC Filter for Power Electronic Drives: Theory and Implementation*, Väitöskirja, Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Hanigovszki, N., Poulsen, J. ja Blaabjerg, F. (2004). “A Novel Output Filter Topology to Reduce Motor Overvoltage” *IEEE Transactions on Industrial Applications*, Vol. 40, pp. 845–852.

Harttman, M., Ertl, H. ja Kolar J. W. (2010). ”EMI Filter Design for High Switching Frequency Three-Phase/Level PWM Rectifier Systems” *IEEE Applied Power Electronic Conference and Exposition*, pp. 986-993.

Heldwein, M.L., Dalessandro, L. ja Kolar, J.W. (2011). “The Three-Phase Common-Mode Inductor: Modeling and Design Issues” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 3264-3274.

Hirofumi, A., Hiroshi, H. ja Takafumi D. (2004). “Design and Performance of a Passive EMI Filter for Use With a Voltage-Source PWM Inverter Having Sinusoidal Output Voltage and Zero Common-Mode Voltage” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, pp.1069-1076.

Hirofumi, A. ja Takehiko, O. (2008). “A Specific Filter for Eliminating High-Frequency Leakage Current From the Grounded Heat Sink in a Motor Drive With an Active Front End” *IEEE Power Electronics*, vol. 23, pp. 763-770.

Hongfei, M., Dianguo, X. ja Lijie, M. (2004). ”Suppression Techniques of Common-Mode Voltage Generated by Voltage Source PWM Inverter” *IEEE Power Electronics and Motion Control Conference*, Vol. 3, pp. 1533-1538.

Jouanne, A. von ja Enjeti, P. (1997). “Design Considerations for an Inverter Output Filter to Mitigate the Effects of Long Motor Leads in ASD Applications” *IEEE Transactions on Industrial Applications*, Vol. 33, pp. 1138–1145.

Mohan, N., Undeland, T. M. ja Robbins, W. P. (2003). *Power Electronics: Converters, Applications and Design*, 3rd edition. New York: John Wiley & Sons.

Morán, L., Espinoza, J., Ortíz, M. ja Dixon, J. (2004). “Practical Problems Associated with the Operation of ASDs Based on Active Front End Converters in Power Distribution Systems” *IEEE Industry Applications Conference*, pp. 2568-2572.

Naumanen, V. (2010). *Multilevel Converter Modulation: Implementation and Analysis*, Väitöskirja, Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Ortiz, M., Moran, L., Palma, L. ja Enjeti, P. (2008). “A Dual Connected Passive Filter Scheme for PWM Converters” *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 4022-4026.

Ott, H.W. (1988). *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*, 2rd edition. New York: John Wiley & Sons.

Parikshith, C. ja Vinod, J. (2010). “Filter Optimization for Grid Interactive Voltage Source Inverters” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, pp.4106-4114.

Purcarea, C. (2011). *High-Frequency Parasitic Effects in Electric Drives with Long Cables*, Väitöskirja, Darmstadtin teknillinen yliopisto.

Pyrhönen, J. (2010). Sähkökäytöt kurssin luentomoniste.

Sedra, A., Smith, K. (2004). Microelectronic Circuits. 5th ed. New York: Oxford University Press.

Skibinski, G.L., Kerkman, R.J. ja Schlegel, D. (1999). “EMI Emissions of Modern PWM ac Drives” *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 5, pp. 47-80.

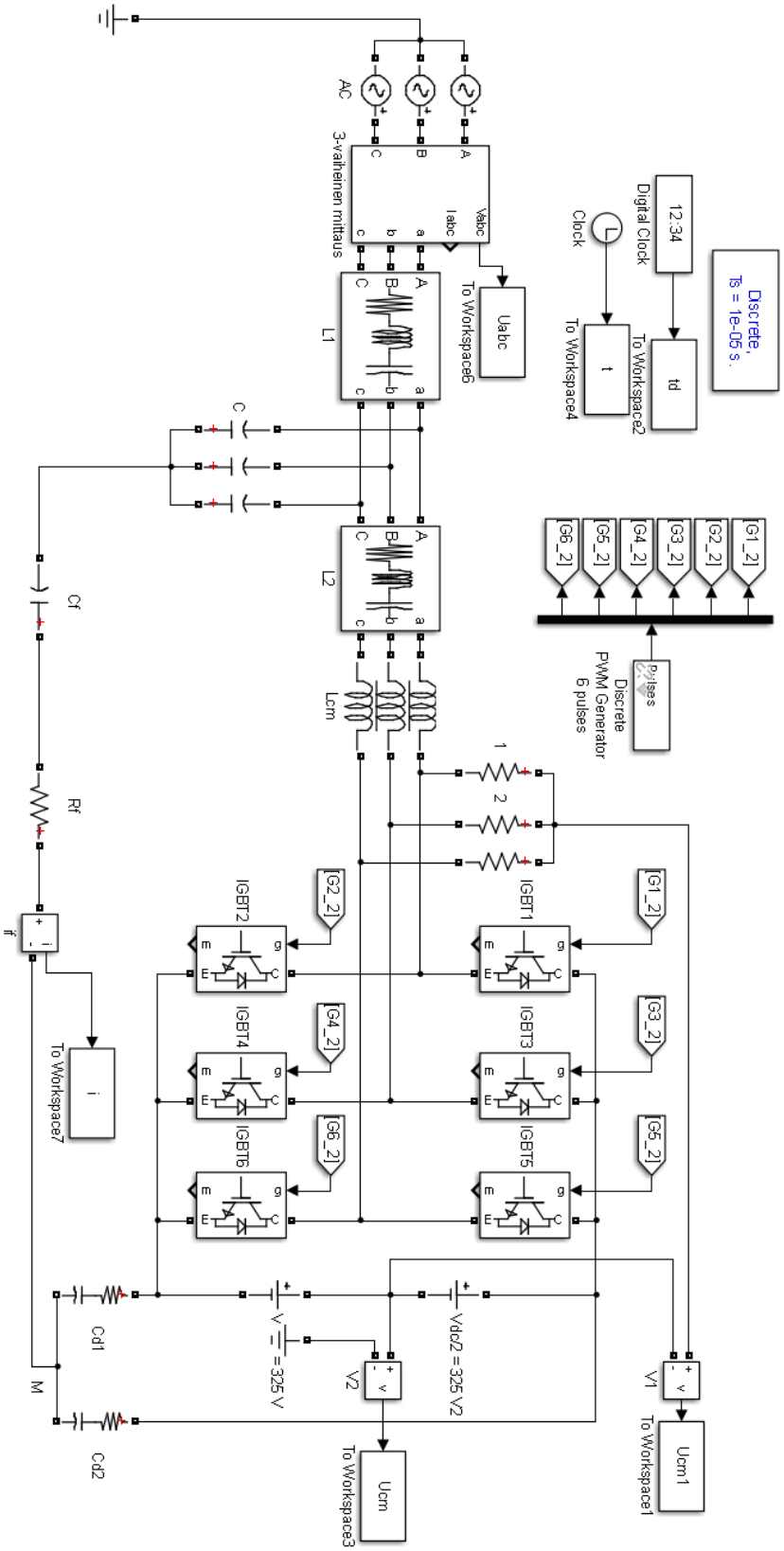
Särkimäki, V. (2009). *Radio Frequency measurement method for detecting bearing currents in induction motors*, Väitöskirja, Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Ström, J-P. (2009). *Active du/dt Filtering for Variable-Speed AC Drives*, Väitöskirja. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Virkkunen, J. (1995). *Säätötekniikan matematiikka*, Otatieto, Helsinki.

Williams, T. (2007). EMC for Product Designers. 4th ed. Elsevier Ltd.

Yanshu, J., Dianguo, X. ja Xiyou, C. (2002). “Analysis and Design of a Feed-Forward-Type Active Filter to Eliminate Common-Mode Voltage Generated by a PWM Inverter.” *IEEE Industrial Electronics Society*, vol. 1, pp. 771-775.

Yoshihiro, M., Takehiko, K. ja Yoshihiro, K. (1992). ”Leakage Current Reduction for a High-Frequency Carrier Inverter Feeding an Induction Motor” *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 28, pp.858-863.

LIITE 1 AKTIIVISEN VERKKOSILLAN SIMULOINTIMALLI