

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Sähkövoimatekniikka

Tutkintotyö

Toni Hämäläinen

Vaihtosähkösuodatus invertterin lähdössä

Työn ohjaaja

Diplomi-insinööri Lauri Hietalahti

Työn tilaaja

Cargotec Finland Oy

Tampere 5/2010

TIIVISTELMÄ

Taajuusmuuttajalla syötettäviä sähköverkkojen määrä on lisääntynyt parissa vuosikymmenessä rajusti. Cargotecin konttilukissa on käytössä taajuusmuuttajalla syötetty verkko. Kuormituksen herkkyyden vuoksi taajuusmuuttajan invertterin aiheuttaman signaalin säröytymistä täytyy suodattaa vaihtosähkösuotimella. Tämän työn tarkoituksena on tutustua häiriön aiheuttajaan, selvittää erityyppisten suodattimien toimintaa ja käsitellä suodatinta fyysisenä kokonaisuutena. Työssä tarkastellaan kuormitusten syöttöä sekä konttilukin että yleisen sähköjakeluverkon kannalta.

Työn simuloinnit ovat teoreettisia. Tarkoituksena on selkeiden kuvien ja laskenta hyvien esimerkkien avulla todentaa teoriaa. Konttilukin sähköverkosta rakennettiin MATLAB-ohjelmistolla malli. Mallin avulla simuloitiin erilaisia suodatin topologioita eri kuormitus- ja kytkentävariaatioilla. Simulaatioita vertailtiin keskenään, jolloin tuloksiin saatiin vertailtavuutta.

Tutkimusten päätyttyä selvisi, että alkuperäisessä simulaatiomallissa oli käytetty virheellistä suodatinmitoitusta. Virheen selvittyä tutustuttiin suodattimen matemaattiseen mitoittamiseen alan ammattilaisten johdolla. Matemaattinen mitoitus mahdollisti simulaation halutunlaisen toiminnan, mallin sähköverkko ei kuitenkaan täysin vastannut lukin oikeaa sähköverkkoa. Ohjelmistolla sai kuitenkin mallinnettua suodatintopologiat riittävällä tarkkuudella, jotta tulokset olivat luotettavia ja vertailukelpoisia. Lisäksi perehdyttiin suodattimien fyysiseen rakenteeseen ja standardien mukaiseen suojaukseen.

Työn tuloksena havaitsimme hyvin kuinka tarpeellinen laite suodatin on. Herkkää kuormaa syötettäessä suodatin tasoittaa säröytyneen vaihtosignaalin lähes puhtaaksi siniaalloksi. Signaalista poistetaan samalla haitallisia yliaaltoja, jotka aiheuttavat laitteiden toiminnalle haittaa. Tulevaisuudessa konttilukin suodattimen toimintaa kannattaa kiinnittää erityistä huomiota. Sen toiminta vaihtelevissa olosuhteissa saattaa tuottaa ongelmia. Erinomainen tutkimuskohde on suodattimen tärinän sietokyky ja sen parantaminen sekä suodatuksen vaikutusten muuttuminen ylikuormilla.

TAMK University of Applied Sciences, Master's Degree
Electrical Engineering
Electrical Power Engineering
Toni Hämäläinen Sinewave filtering in frequency converter's output
Engineering Thesis 75 pages, 4 appendices
Thesis supervisor Lauri Hietalahti (MSc)
Commissioning Company Cargotec Finland Oy, supervisor Jari Mäkelä (BSc)
May 2010
Keywords Filtering, Transfer-function, MATLAB

ABSTRACT

Electrical networks fed by frequency converter have increased dramatically in a couple of decades. Straddle carrier made by Cargotec has a frequency converter controlled loads. Sensitive load types don't stand signal distortion. That's why there is a need for a special sine wave filter. The purpose of this work is to learn about the cause of failure in sinusoidal waveform, explain how sine wave filter works and deal filter as a electrical component. The work is intended to pave straddle carrier's network, as well as the public electricity distribution networks.

Work theories and simulations are carried out in a theoretical aspect. The aim is to clarify reader's view about filtering with clear images and calculation examples. Straddle carrier's electrical network model is built with MATLAB software. The model was simulated using a variety of different filter topologies and load variations. In the end simulations were compared with each other.

End of the studies showed up that, in the original simulation model filter was flawed. The error was sorted out after meeting with professionals of filter designing. We got through the appropriate size of filter with the mathematical calculations. The model grid did not fully responded to straddle carrier's right grid, but it was close enough. By modelling few different filter topologies, with sufficient precision so that the results were reliable and comparable. Studies also included filters protection issues.

The results astonished and made us realized how necessary a filter device was. In the future straddle carrier's there should be paid special attention in filter operation. For example the filter operation at varying conditions may produce problems. There might also be many good studies, for example investigating the causes of violating vibration in carriers electric network.

Käytetyt merkit ja lyhenteet

A	pinta-ala	[m ²]
A _v	siirtofunktio	
C	kondensaattorin kapasitanssi	[F]
f	taajuus	[Hz]
G	vahvistus	[dB]
i	vaihtovirta	[A]
I	vaihtovirta rms	[A]
l	pituus	[m]
L	kelan induktanssi	[H]
n	lukumäärä	[kpl]
N	johdinkierrosten lukumäärä	[kpl]
P	teho	[W]
q	varaus	[Coulomb]
R	resistanssi	[Ω]
u	vaihtojännite	[V]
U	vaihtojännite rms	[V]
X	reaktanssi	[Ω]
Z	impedanssi	[Ω]
$\omega = 2\pi f$	kulmapyörimisnopeus	[rad/s]
Ψ	magneettivuon voimakkuus	[Wb]
μ_r	kelan sydänmateriaalin suhteellinen permeabiliteetti	$[\frac{H}{m}]$
μ_0	tyhjiön permeabiliteetti	$[4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}]$

Lyhenteet

PWM	(Pulse Width Modulation), Pulssileveysmodulaatio
THD	(Total Harmonic Distortion), Harmoninen särö
EMC	(Electromagnetic Compability), Sähkömagneettinen yhteensopivuus
PJ	(Pienjännite)
AC	(Alternating Current), Vaihtovirta
DC	(Direct Current), Tasavirta

ALKUPUHE

Tämä tutkintotyö on tehty opinnäytetyöksi Tampereen ammattikorkeakoulun sähkötekniikan osastolle. Tutkintotyö käsittelee vaihtosähkön suodatusta taajuusmuuttajan lähdössä. Aihe on lähtöisin Tampereen ammattikorkeakoululta ja Cargotec Finland Oy:ltä. Työn tarkoituksena oli tutkia vaihtosähkön suodatusta taajuusmuuttajan jälkeisessä lähdössä, siihen liittyvää sähköverkon mallinnusta sekä suodattimen teknistä rakennetta. Työ on alkanut aikaisin syksyllä 2009. Aihevalinta oli haasteellinen ja kiinnostava, joten myös työn laatiminen oli mielekästä ja innovatiivista.

Haluan kiitän kaikkia projektiin osallistuneita tahoja. Erityiset kiitokset ansaitsee työn ohjaaja diplomi-insinööri Lauri Hietalahti, joka opasti vaikeimpienkin haasteiden ylitse. Lisäksi tahdon kiittää Tampereen ammattikorkeakoulua tutkintotyön aiheen tarjoamisesta. Kiitoksen ansaitsevat myös Trafotek Oy, opastuksesta suodatuksen perusteisiin, sekä kaikki muut minua tämän työn kanssa auttaneet yritykset ja yksityiset henkilöt.

Erityinen kiitos perheelleni kannustuksesta.

Tampereella 26.2.2010

Toni Hämäläinen

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	8
2	TUTKITTAVA SÄHKÖVERKKO	10
2.1	Yritysesittely Cargotec Finland Oy	10
2.2	Laatuvaatimukset	12
2.3	Sähköturvallisuus	13
2.4	Suodatintekniikan edut ja haitat	13
2.5	Työn tavoite ja rajaus	14
3	SUODATUKSEN TAUSTOJA JA TEORIAA	15
3.1	Sähköverkon häiriöiden aiheuttaja	15
3.1.1	Taajuusmuuttaja	16
3.1.2	Invertterin verkkovirran yliaallot	18
3.1.3	Fourier-sarjakehitelmä	19
3.1.4	THD ja sen laskeminen	20
3.2	Suodattimen peruskomponentit	21
3.3	Suodattimien käsittely ja siirtofunktio	21
3.3.1	Desibeli ja sen laskeminen	21
3.3.2	Boden-diagrammi	23
3.3.3	Siirtofunktio ja sen laskeminen	24
3.3.4	Resonanssiipiiri	27
4	SUODATUKSEN TOTEUTUS	29
4.1	LC-suodatin	29
4.2	LCL-suodatin	33
4.3	Muuntajan vaikutus suodatukseen	36
5	SUODATTIMIEN TUTKIMUSMENETELMÄT	39
5.1	Käytetyt tutkimusmenetelmät	39
5.2	MATLAB-ohjelmisto	40
6	SUODATTIMEN SIMULOINTI	41
6.1	Simuloinnin lähtökohdat	41
6.2	Suodattamaton signaali suuntaajan lähdessä	42
6.3	LC-suodattimen simulointi	45
6.3.1	Resistiivisen kuorman simulointi	45
6.3.2	Moottorikuorman simulointi	46
6.3.3	Kytkenätilanteen simulointi	47

6.4	LCL-suodatuksen simulointi	48
6.5	LC-suodatus ja muuntaja	51
7	SIMULOINTIEN ANALYSOINTI	57
7.1	Suodattimien keskinäinen vertailu	57
7.1.1	LC- ja LCL-suodatustekniikoiden vertailu	57
7.1.2	LCL- ja LC+muuntaja suodatustekniikoiden vertailu	58
7.2	Mekaaninen kokonaisuus	59
7.2.1	Paino.....	59
7.2.2	Ulkomitat ja kotelointi	61
7.3	Sähköiset ominaisuudet.....	62
7.3.1	EMC yhteensopivuus	62
7.3.2	Hyötysuhde ja häviöt	63
7.3.3	Suojaus	64
7.3.4	Ikääntyminen ja värinä.....	65
7.3.5	Ympäristö, lämpötila ja jäähdytys	66
7.3.6	Käyttöönotto ja mittaukset	67
7.3.7	Huolto ja vikatilanteet.....	68
7.4	Suodatuksen tarve tulevaisuudessa	69
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	70
	LÄHTEET.....	72
	LIITTEET	
Liite 1	Kela	
Liite 2	Kondensaattori	
Liite 3	Siirtofunktion Laplace laskenta.....	
Liite 4	MTE Sine wave filters data sheet.....	

1 JOHDANTO

Ympäristöystävällisyys ja luonnonmukaisuus ovat tulleet tärkeiksi tekijöiksi moottorikäyttöön suunnitellussa, sillä 2000-luvun alusta laitteiden päästömääräykset ovat kiristyneet. Tällöin EU alkoi kiinnittää huomiota tehtaiden, voimaloiden ja liikkuvien laitteiden päästöihin. Nämä päästömääräykset ovat saaneet eri valmistajat tekemään uudenlaisia ratkaisuja laitteistoihinsa, jotta ne läpäisevät niille asetetut päästönormit.

Cargotec-nimeä käyttävä entinen Kalmar oli vuonna 2009 maailman johtava satamamateriaalien kuljetuskaluston valmistaja. Kalmarin kehitys oli 2000-luvun puolesta välistä vuoden 2009 lopulle asti hyvin voimakasta. Samaan aikaan kiristyneet päästövaatimukset ajoivat myös Cargotecin etsimään uusia tapoja vähentää päästöjä. Ratkaisuvaihtoehtoja oli monia, mutta Cargotec päätyi ratkaisussaan Toyotan markkinoille lanseeraaman Prius-mallin tapaan hybriditekniikkaan. Hybridiratkaisu oli kannattava ratkaisu monessa mielessä. Ratkaisun yhtenä merkittävänä etuna oli polttoainekustannusten raju leikkautuminen. Säästöjä saavutettiin jopa 15 % polttoaineen kulutuksessa.

Hybridiratkaisu on kuitenkin luonut omat haasteensa sähkökäyttöjen lisääntyttyä rajusti. Ongelmia tuottivat aluksi energiavarastot ja moottorimitoitukset, mutta niistä selvittiin ammattitaitoisella insinööritoimistolla. Uusia ongelmia on kuitenkin havaittu ajan myötä lisää, kun on alettu tutkia konttilukin sähköverkon standardinmukaisuusvaatimuksia.

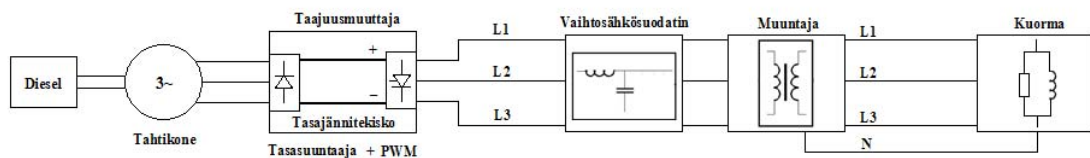
Konttilukissa käytetään tehon säätämiseen taajuusmuuttajia, jotka tasasuuntaavat niihin syötetyn sähköön ja vaihtosuuntaavat sen välittömästi halutulle taajuus- ja jännitetasolle. Muuttajan tasasuuntaaja ja vaihtosuuntaaja muodostavat molemmat omia häiriöitänsä lukin sähköverkkoon. Tasasuuntaaja tekee verkon sähköstä kantiaallon muotoista ja vaihtosuuntaaja säteilee sähköverkkoon kytkimien kytkeytymisen takia erinäisiä kytkeäntäpiikkejä, jotka näkyvät verkkosähköön säröytymisenä.

Verkon säröytymiseen on kehitelty erilaisia suodatinratkaisuja, joiden tarkoituksena on poistaa verkosta häiriöitä aiheuttavia tekijöitä. Verkon tunnetuimpia häiriöitä ovat yliaallot, joita syntyy mm. taajuusmuuttajalla syötetystä oikosulkumoottorista.

Tässä tutkintotyössä perehdytään taajuusmuuttajaohjatun syöttöverkon vaihtosähkönsuodatukseen. Tavoitteena on tutkia häiriöiden alkuperää ja syntymistä, suodatukseen liittyviä mitoitusperiaatteita ja käytössä olevia tekniikoita sekä erilaisten simulaatioiden avulla harjaannuttaa sähkötekniikan ammattilaisia huomioimaan jo mitoitusvaiheessa myös haitallinen verkon säröytyminen ja keskittymään sen ennaltaehkäisyyn.

2 TUTKITTAVA SÄHKÖVERKKO

Tutkittavana sähköverkkona on Cargotecin hybridikonttilukki, joka toimii erillisenä yksikkönä verkon ulkopuolella. Tuotettu teho ajetaan taajuusmuuttajan kautta konttilukin verkkoon, jolloin tarpeelliset toimilaitteet saavat sähköenergiaa. Generaattorin tuottaman sähkön taajuus vaihtelee, joten sähköenergia on ajettava taajuusmuuttajan läpi verkon vaatimaa taajuutta vastaavaksi ennen tehon syöttöä verkkoon. Dieselgeneraattori pyörittää suoravetoisesti Stamfordin tahtigeneraattoria, jonka tuottama sähköenergia ja taajuus ovat riippuvaisia dieselin pyörintänopeudesta.



Kuvio 1. Hybridi konttilukin toimintaperiaate apulaitteiden osalta

2.1 Yritysesittely Cargotec Finland Oy

” Cargotec tehostaa tavaravirtojen kulkua tarjoamalla laitteita, järjestelmiä ja palveluja tavaroiden lastaamiseen ja purkamiseen. Cargotecin tuotemerkeillä Hiab, Kalmar ja MacGregor on maailmanlaajuinen markkinajohtajan asema. Ratkaisuja käytetään maalla ja merellä, kaikkialla missä tavara liikkuu. Kattavat huoltopalvelut lähellä asiakasta takaavat laitteiden jatkuvan toiminnan. Cargotec on alansa teknologiajohtaja ja panostaa tuotekehityksessä ympäristönäkökohdat huomioon ottaen innovatiivisiin ratkaisuihin.” Tämä on Cargotecin motto uudelle vuosikymmenelle. Yritys on laajentunut viimeisten vuosien aikana uusille markkinoille ja laajentanut toimintojaan mm. Kiinaan ja Puolaan. (Cargotec Finland Oy)

Cargotec yritys rakentuu kolmen merkittävän yksittäisen tuotemerkin varaan. Ne ovat Hiab, Kalmar ja MacGregor. Cargotec valmistaa Hiab-merkkisiä autonostureita ja perälautanostimien. Kalmar sen sijaan valmistaa pääasiassa mobileja merikonttien käsittelylaitteita sekä trukkeja. MacGregorin tuotteet painottuvat satamien laivanlastausnostimien valmistukseen.

Cargotec on panostanut valtavasti tuotekehitykseen jokaisella päätoimialalla. Erityisesti Kalmar on saavuttanut merkittäviä tuloksia tuotekehityksen avulla, mm. rakentamalla hybridikäyttöisen konttilukin, jonka avulla laitteen päästöjä ja polttoaineen kulutusta on saatu leikattua merkittävästi. Kuviossa 2 on Cargotecin valmistama hybridikäyttöinen konttilukki, jonka voimansiirto on suurelta osin sähköinen.



Kuvio 2. Cargotecin valmistama hybridi konttilukki

Tulevaisuudessa Cargotecin tavoitteena on säilyttää johtava markkina asemansa, pyrkiä laajentamaan toimintaansa uusiin laitteisiin, myydä laitteita entisille ja uusille asiakkaille, sekä panostaa tuotekehitykseen. Toimintoja on tarkoitus keskittää kriittisten markkina-alueiden välittömään läheisyyteen. Suomi tulee edelleen toimimaan Cargotecin suunnittelu- ja tuotekehitysmaana.

(Cargotec Finland Oy)

2.2 Laatuvaatimukset

Konttilukin laatuvaatimukset perustuvat hyvin pitkälle konestandardissa esitettyihin vaatimuksiin. Jännitteen suurimman sallitun huojunnan asettaa SFS 60204-32, jonka rajoissa ($U = 0,9 \dots 1,1 \cdot U_{\text{nominal}}$) tulisi pysyä. Tämä jännitejäykkyys koskee niin AC- kuin DC-jännitettä. Laitteistossa saattaa kuitenkin esiintyä jännitekuoppia, kun laitetta kiihdytetään tai vastaavasti jarrutetaan.

Konttilukin jarrukatkojen rajajännitteeksi oli aseteltu $1,1 \cdot U_n$. Mikäli rajoitus ylittyy ajetaan ylimääräinen teho vastuksille. Vastuksille syötetty teho on hukkatahoa, joka muutetaan lämmöksi. Standardin 60204-1.4.3.4 mukaan erikoisvirransyötön, kuten nostokoneessa olevan generaattorin, jännitevaihtelu voi ylittää kohdissa 4.3.2 ja 4.3.3 annetut rajat edellyttäen, että laitteisto toimii oikein näissä olosuhteissa.

Vaihtosähkösyöttöjärjestelmät on toteutettava niin, että tehon syöttö katkea automaattisesti kun

- syöttöjännite ei ole alueella $0,85 \dots 1,1$ osaa nimellisjännitteestä
- taajuus ei ole alueella $0,95 \dots 1,05$ osaa nimellistaajuudesta.

(SFS 60204-1)

Harmonisen särön (THD) rajana oli konestandardin määräämä 10 %. Mitoituksessa pyrittiin kuitenkin saamaan särö reilusti alle tavoitellun.

Yliaaltoa mitattaessa tärkeimmäksi osoittautui konestandardin 60204-32 rajoitusten mukaan toimiminen. Tämä standardi määrittää rajat seuraavasti: ”Toisesta viidenteen harmonisten yliaaltojen summana saatu suhteellinen yliaaltosisältö ei yli 10 % vaiheiden välisestä jännitteen tehollisarvosta (r.m.s.). 2 % lisäys vaiheiden välisestä jännitteen tehollisarvosta kuudennesta kolmanteenkymmenenteen harmonisten yliaaltojen summana sallitaan.” (Konestandardi, SFS-60204-32, s. 58)

2.3 Sähköturvallisuus

Sähköturvallisuuskriteerit on täytetty, kun sähköstandardissa (SFS 6000) ja konestandardissa (SFS 60204-1) esitetyt vaatimukset on täytetty. Näihin vaatimuksiin kuuluvat generaattorilaitteiston kosketus- ja kosketusjännitesuojasasiat sekä ylivirtaan ja jännitteeseen liittyvät asiat.

Suodatinyksikön on täytettävä kaikki sähkölaitteille määrätty turvallisuusvaatimukset sekä lisäksi konestandardin asettamat vaatimukset EMC-, tärinä ja ympäristövaikutuksille. (IEC / EN 61000 ja SFS 60204-1)

2.4 Suodatintekniikan edut ja haitat

Vaihtosähkön suodatuksella saavutetaan enemmän etuja kuin haittoja. Pahasti säröytynyt vaihtosähkö saattaa pahimmassa tapauksessa rikkoa laitteita tai ainakin vahingoittaa niitä. Suodatuksella näiltä ongelmilta suuremmaksi osaksi välttyään. Oikein mitoitettu suodatin eliminoi laitteistosta pahimmat yliaaltovirrat, ja lisäksi se kompensoi hieman loistehoa. Haittaa laitteistosta syntyy, koska se on lisälaite. Lisälaite on aina erillisesti suunniteltuun kokonaisuuteen liitettävä laite, joka saattaa aiheuttaa sähköverkkoon odottamattomia ongelmia. Lisälaite vaatii myös oman tilansa, jo suunniteltuun laitteistoon, mikä saattaa tuoda ongelmia. Lisäksi laitteessa esiintyy häviöitä ja sen hinta riippuu hyvin pitkälti laitteen laatuvaatimuksista.

Konttilukin sähköverkko on yksinkertaisuudessaan haastava kohde suodattimelle, koska se ei ole verrattavissa tavalliseen jäykkään jakeluverkkoon. Tämä aiheuttaa omia ongelmia mitoituksessa ja laitteiston toteutuksessa. Oikein mitoitettuna suodatus parantaa lukin laitteiden toimivuutta ja alentaa korjauskustannuksia, koska säröytynyt vaihtosähkö kuormittaa suotta verkon laitteistoja.

2.5 Työn tavoite ja rajaus

Tutkintotyön tavoitteena on tutustua pääasiassa LC- ja LCL–tyyppisiin vaihtosähkösuodattimiin, jotka on kytketty konttilukin taajuusmuuttajaohjattuun lähtöön. Työssä tarkastellaan kolmivaiheista suuntaajatekniikka, vaihtosähköpiirejä sekä erilaisia suodatintekniikoita.

Suodattimia simuloidaan erilaisilla kuormitusvariaatioilla, jotta saataisiin mahdollisimman vertailukelpoista mittaustietoa. Tutkimuksien pääpaino on suodatinteknologiassa. Tuloksia on tarkoitus verrata keskenään, todeta mihin kannattaa erityisesti kiinnittää huomiota ja milloin suodatinta tarvitaan.

Työn tärkein tavoite on suodatintekniikoiden selventäminen ja niiden keskinäinen vertailu. Lisäksi perehdytään hieman tekniikoiden vertailuun sekä ongelmatekijöihin. Työssä ei ole tarkoitus tutkia erilaisia suuntaajatekniikoita tai mitään muuta konttilukin sähköverkkoon liittyvää. Niistä esitellään vain tarpeellinen, jotta suodattimen toiminta, käyttö ja tarpeellisuus tulevat selväksi. Tutkimukset suoritetaan pääsääntöisesti MATLAB-ohjelmistolla simuloimalla, joten reaalimaailman mittaustietoa ei ole tähän käytettävissä. Tämä on hyvä huomioida vertailtaessa eri tietolähteitä keskenään.

Omissa tutkimuksissani tehon virtausta tapahtuu vain kuormituksen suuntaan, mutta tuloksia on mahdollista soveltaa tehon virratessa kuormalle ja sieltä pois. Tämä vaatii kuitenkin hieman erilaista tarkastelua sekä lisäksi erilaisia suodatinratkaisuja, jotka jätän tutkintotyössäni huomiotta.

3 SUODATUKSEN TAUSTOJA JA TEORIAA

Tässä kappaleessa perehdymme asioihin, jotka osaltaan vaikuttavat suodatukseen. Ensiksi tutustutaan häiriön aiheuttajaan, jonka jälkeen esitellään laskentateoriaa yliaaltoanalyysiin ja särön laskemiseen Fourier-sarjakehitelmän avulla. Lisäksi tutustutaan suodattimessa käytettäviin komponentteihin ja suodattimien matemaattiseen mallintamiseen. Suodattimen mitoituksessa kaikki edellä mainitut teoriat on hallittava suunnittelussa kokonaisuutena.

3.1 *Sähköverkon häiriöiden aiheuttaja*

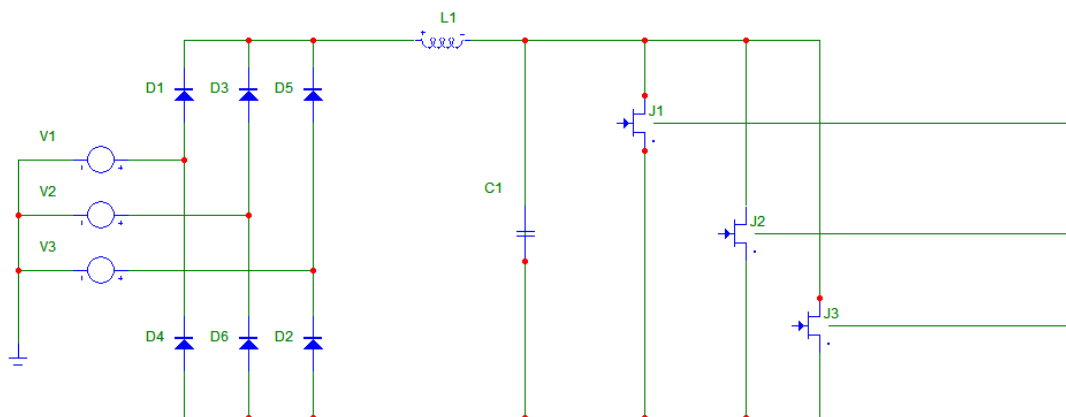
Konttilukin generaattori on muuttuvanopeuksinen, minkä vuoksi jännite ja taajuus vaihtelevat. Kuormitukset vaativat kuitenkin vakiojännitteen ja -taajuuden. Jännite ja taajuus saadaan stabiloitua taajuusmuuttajan avulla.

Ohjattujen sähkökäyttöjen tehonohjauslaitteet perustuvat tehoelektroniikan komponenteilla toteutettuihin suuntaajiin, jotka ovat sähköverkon kannalta epälineaarisia kuormituksia. Niiden verkosta ottama tai verkkoon syöttämä virta ei ole puhtaasti sinimuotoista. Suuntaajat toimivat yliaaltovirtalähteinä, jotka säröyttävät verkkojännitettä, aiheuttavat lisähäviöitä muissa verkon laitteissa ja voivat häiritä myös ohjausjärjestelmien toimintaa. Taajuusmuuttaja on toimintatapansa vuoksi yksi pahimmista verkon yliaaltohäiriöiden aiheuttajista. Taajuusmuuttajan aiheuttamilla häiriöillä voi olla pahojakin seurauksia, jos niihin ei puututa riittävän ajoissa. Muita hankalia yliaaltoja tuottavia kuormia ovat mm. tietokoneet, hitsauslaitteet ja elektroniset valonsäätimet. Tutkintotyössäni perehdyn kuitenkin vain taajuusmuuttajan aiheuttamiin yliaaltoihin ja niiden suodatukseen.

(Taajuusmuuttajakäytön verkostovaikutukset)

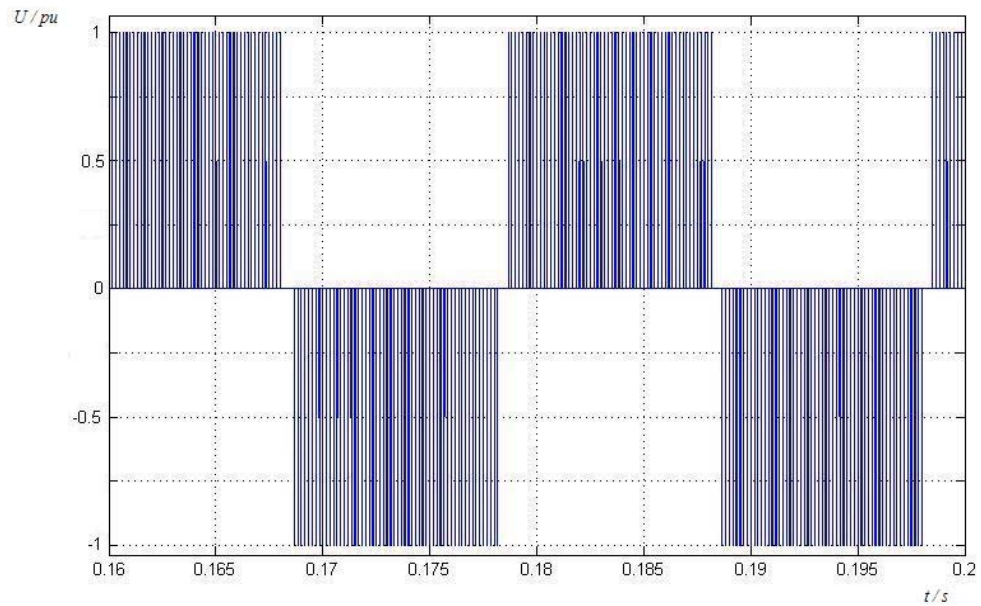
3.1.1 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttajat käyttävät nykyisin PWM-tekniikkaa, joka voi olla toteutettu joko diodi- tai tyristoritekniikalla. Konttilukin taajuusmuuttaja on toteutettu dioditekniikalla, jolla generaattorin tuottamasta jännitteestä muodostetaan 6-pulssisella diodisuuntaajalla generaattorin jännitteen määräämä tasajännite $2,34 \cdot U_v$. Taajuusohjauksessa tästä kiinteästä tasajännitteestä vaihtosuuntaaja muodostaa moottorin tarvitseman kolmivaihejännitteen halutulla taajuudella. Kuviossa 3. on esitettyä perinteinen PWM-tekniikkaan perustuva taajuusmuuttajaratkaisu.



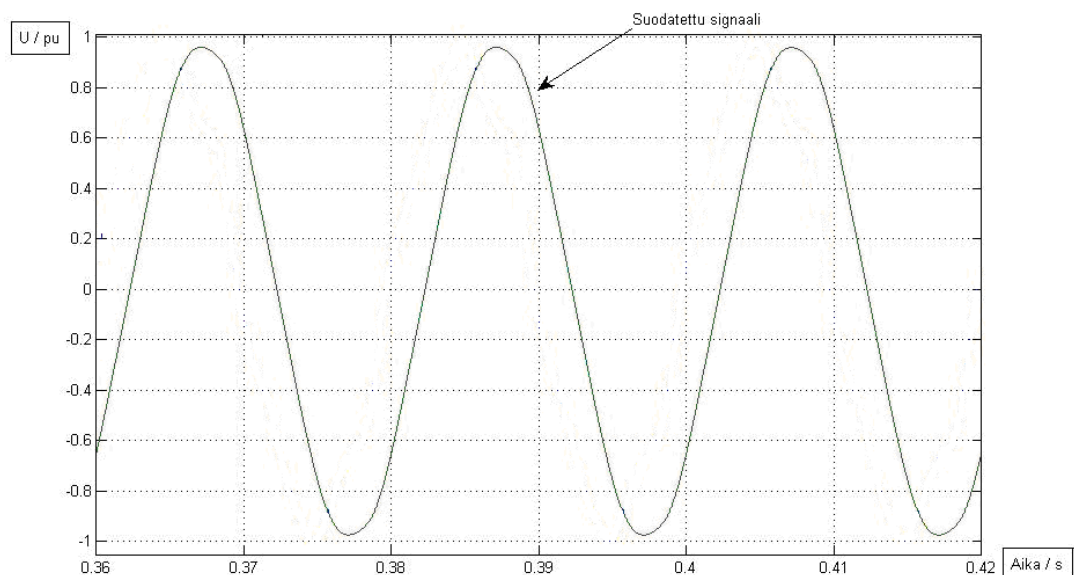
Kuvio 3. PWM-taajuusmuuttajan toimintaperiaate

PWM-tyyppisen taajuusmuuttajan vaihtosuuntaaja muodostaa kytkimien (tyristori tai transistori) avulla tasajännitteestä vaihtojännitteen. Vaihtojännite saadaan muodostettua kytkimien nopealla avautumisella ja sulkeutumisella, jolloin tasajännitteestä muodostetaan hyvin kapeita ja korkeita pulsseja. Vaihtosuuntaussillan kytkintoimintoa kutsutaankin usein hakkaamiseksi. Signaali saadaan sinimuotoiseksi kasvattamalla siniaallon huippukohtaa lähestyttäessä hakattujen pulssien leveyttä riittävästi. Kuviossa 4. on selkeästi havaittavissa pinta-alaltaan erisuuruisia pulsseja, joista saadaan muodostettua kuviossa 5. esitetty puhdas sinisignaali. Signaalin puhtauteen vaikuttaa, transistorien kytkintoimintojen nopeuden lisäksi transistorien aiheuttamat häiriösignaalit.



Kuvio 4. Taajuusmuuttajan hakkaaman jännitteen kuvaaja

Taajuusmuuttajan tasavirtapiiriin on yleensä lisätty suodatuskuristin L, jonka tarkoituksena on pienentää verkkovirtaa kuormittavien yliaaltojen määrää. Ilman kuristinta suuri suodatuskondensaattori C varautuisi aina pääjännitteen huippukohdassa ottaen verkosta suuren virtapiikin, rasittaen verkkoa entisestään. Kuviossa 5. on esitettyä puhdas sinisignaali joka taajuusmuuttajan pitäisi syöttää.

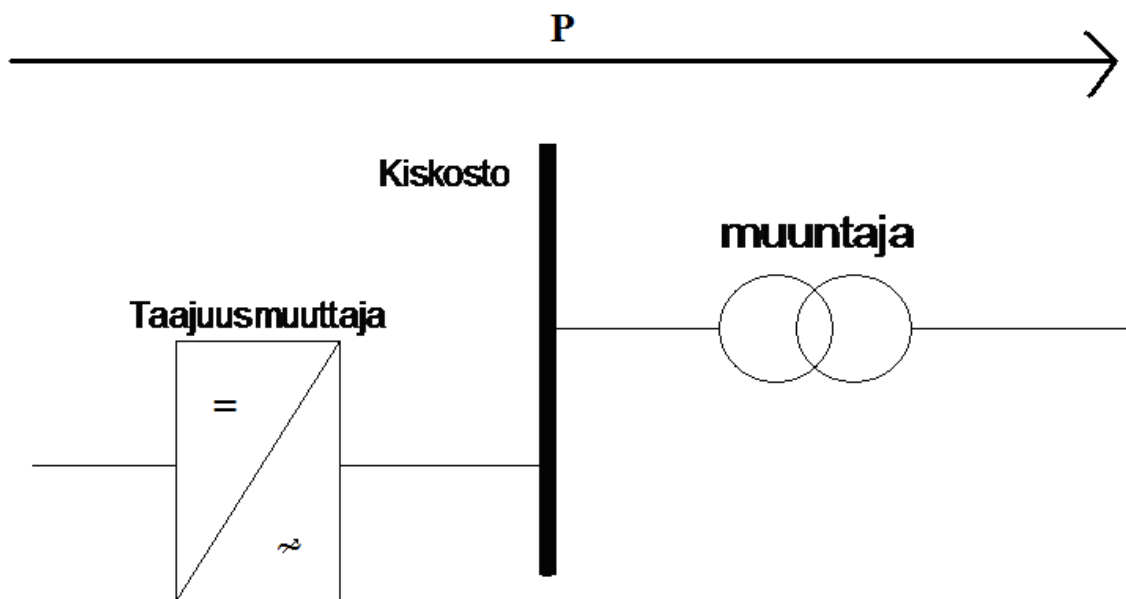


Kuvio 5. Taajuusmuuttajan lähtöjännitteen ideaalinen kuvaaja

Kuviossa 5. esitetty aaltomuoto kuitenkin rikkoutuu usein invertteri lähdössä ja vaatii suodatusta. Tutkintotyössä perehdyn juuri kyseiseen ongelmaan.

3.1.2 Invertterin verkkovirran yliaallot

Invertterin verkkoon syöttämät yliaallot aiheuttavat lukin sähköverkon sisäisessä impedanssissa jännitehäviön ja suuntaajaa syöttävään kiskostoon syntyvät yliaaltoja vastaavat jännitteet. Kiskoston jännite ei ole tämän jälkeen puhdas perusaaltojännite vaan sen sanotaan säröytyvän. Tätä on havainnollistettu kuviossa 6., jossa sähkönjakeluverkon periaatekuvan ja vastaavan sijaiskytkennän avulla.



Kuvio 6. Konttilukin verkko taajuusmuuttajan jälkeen

Standardit ja sähkölaitokset asettavat rajoja yksittäisten yliaaltojännitteiden sekä kokonaissäröjännitteiden suuruudelle. Yliaallot ja verkkojännitteen särö voidaan mitata spektrianalysointia käyttämällä. Tutkintotyössä rajoitukset on määritelty konestandardissa joka perustuu hyvin pitkälti sähköstandardiin.

(Taajuusmuuttajakäytön verkostovaikutukset)

Yliaaltovirrat aiheuttavat yleisesti jokaisessa sähköverkossa, joissa niitä esiintyy seuraavanlaisia ongelmia. Generaattoreissa, moottoreissa ja muuntajissa syntyy ylimääräisiä häviöitä ja tämän seurauksena haitallista lämpenemistä.

Suojareleiestyksessä on havaittu yliaaltojen vuoksi virhetoimintoja. Lisäksi yliaalloista saattaa syntyä vaarallinen resonanssitilanne, jolloin syntyy hengenvaarallisia ylijännitteitä. Resonanssia käsitellään lisää luvussa 3.3.4. Häiriöiden poistamiseksi on

sähköverkkoihin suunniteltava suodattimia, ns. imupiirejä, jotka poistavat verkosta haitalliset yliaallot.

(Aura – Tonteri, 1996-A)

3.1.3 Fourier-sarjakehitelmä

Matemaattisesti Fourier-sarjassa funktio jaotellaan jokaiselle eri taajuuskomponentille erikseen, erillisten kertoimien avulla, joille kullekin annetaan tietty painoarvo sitä vastaavan taajuuskomponentin mukaan. Jaottelun avulla sarja voidaan matemaattisesti laskea ja esittää periodisten lähteiden avulla. Fourier-sarja voidaan esittää muodossa

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \text{Cos}(n \cdot \omega \cdot t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \text{Sin}(n \cdot \omega \cdot t) \quad (1.)$$

(Mäkelä, 2007-A)

Taajuusmuuttajan kytkimistä kehittyvä epäsinimuotoinen virta voidaan kuvata Fourier-analyysiin perustuen virtana, joka sisältää perusaallon ja teoriassa äärettömän joukon yliaaltoja. Jos oletetaan teoreettisesti, että tasavirran aaltoilua ei ole, sisältää verkkovirta perusaallon, jonka amplitudi on

$$I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (2.)$$

Virrassa esiintyvät yliaallot voidaan näin ollen määrittää kaavalla

$$n = p \cdot k \pm 1 \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (3.)$$

Yliaaltojen amplitudit (I_n) sen sijaan noudattavat kaavaa

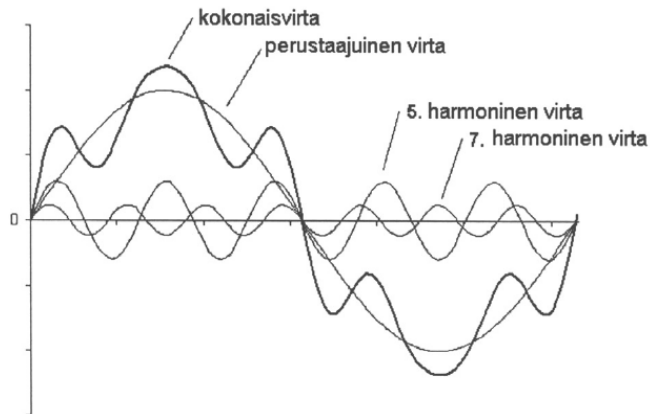
$$I_n = \frac{I_1}{n} \quad (4.)$$

Virrassa esiintyvät siis yliaallot $n = 5, 7, 11, 13, \dots$ ja niiden amplitudit ovat vastaavasti 20 %, 14,1 %, 9,1 %, 7,7 % perusaallosta.

(ABB Tech Guide, 2002)

3.1.4 THD ja sen laskeminen

Harmoninen särö eli THD ilmaisee puhtaaseen sinisignaaliin syntyneiden harmonisten kerrannaisten voimakkuutta suhteessa perustaajuiseen aallon voimakkuuteen.



Kuvio 7. Säröytynyt signaali koostuu monesta eritaajuisesta virrasta

Harmoninen särö muodostuu, nimensä mukaisesti, perusaallon harmonisista kerrannaisista, joita ovat $2f_0$, $3f_0$, $4f_0$, $5f_0$, $6f_0$ jne... (f_0 = perustaajuus).

Särötehokerroin ilmaistaan yleensä suhdelukuna, joka ilmoitetaan prosentteina. THD-prosentti voidaan laskea kaavalla jänniteamplitudein

$$THD(U) = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{U_{hn}}{U_{f_0}} \right)^2} \quad (5.)$$

Tämä muoto on kuitenkin avattavissa yksinkertaisempaan muotoon, jossa eri jänniteamplitudit summataan yhteen.

(ST-kortti 52.16)

3.2 Suodattimen peruskomponentit

Toimiva suodatin voidaan rakentaa passiivisista sähköteknisistä komponenteista. Näitä peruskomponentteja ovat kela ja kondensaattori. Kelan ja kondensaattorin perusteet on esitetty liitteissä 1. ja 2.

3.3 Suodattimien käsittely ja siirtofunktio

Siirtofunktion määritelmä on suodatinmitoituksen peruskivi, jota on osattava käsitellä. Siirtofunktion avulla pystytään laskennallisesti määrittämään, miten jokin signaali käyttäytyy erilaisilla suodatinratkaisuilla. Funktion avulla pystytään piirtämään myös Bode-diagrammi, jolla voidaan graafisesti havainnollistaa suodattimen esto- ja päästöalueet. Lisäksi liitteessä 3 on esitetty siirtofunktion laskenta Laplace-tasossa.

3.3.1 Desibeli ja sen laskeminen

Siirtofunktioiden käsittelyssä käytetään yksikköä bel, mutta se on niin suuri yksikkö, että se skaalataan usein desibeliksi seuraavasti

$$1 B = 10 dB \quad (6.)$$

Desibelien avulla tutkitaan usein tehojen suhdetta, kuten verrattaessa tehon P_2 suuruutta tehoon P_1 . Desibeli vahvistuksesta käytetään yleisesti merkintää G

$$G = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_2}{P_1} \quad (7.)$$

Sähkötekniikassa 3 dB vahvistus on mainittu useissa eri yhteyksissä. Mikäli vahvistus G on 3 dB, niin tällöin $P_2 = 2 \cdot P_1$. Vahvistus on tällöin likimäärin 3 dB:ä. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että jos haluttaisiin piirin ulostuloon 3 dB:n vahvistus, olisi sisäänmenevä teho kaksinkertaistettava.

Teho on myös määritettävissä jännitteiden ja kuormitusresistanssien avulla seuraavasti.

$$P_1 = \frac{U_1^2}{R_1} \quad (8.)$$

$$P_2 = \frac{U_2^2}{R_2} \quad (9.)$$

Täten desibeli yhtälöksi saadaan

$$G = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_2}{P_1} = 10 \cdot \log_{10} \frac{U_2^2 \cdot R_2}{U_1^2 \cdot R_1} = 20 \cdot \log_{10} \frac{U_2}{U_1} + 10 \cdot \log_{10} \frac{R_2}{R_1} \quad (10.)$$

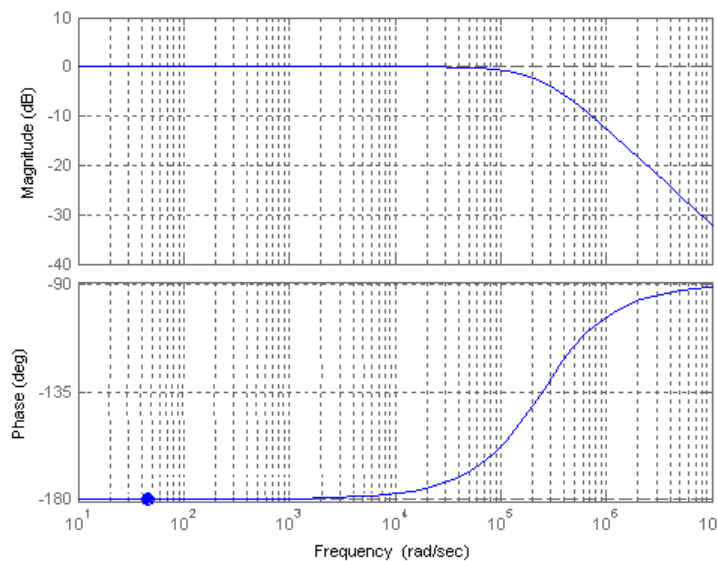
Käytännössä, siirtofunktioiden tehotasoja vertailtaessa toisiinsa, voidaan olettaa että $R_1 = R_2$. Tällöin yhtälön jälkimmäinen termi saa arvon nolla eli vahvistus voidaan ilmoittaa pelkkien jännitteiden avulla seuraavasti

$$G = 20 \cdot \log_{10} \frac{U_2}{U_1} \quad (11.)$$

(Tarkka – Hietalahti, 2006-A)

3.3.2 Boden-diagrammi

Boden-diagrammi koostuu kahdesta kuvaajasta. Ensimmäinen esittää amplitudisuhdetta ja toinen vaihe-eroa herätesignaalin taajuuden funktiona. Boden-diagrammissa on taajuusakseli mukana, jolloin siitä on helppo tutkia mitä eri taajuuksilla tapahtuu. (Taajuusvasteen graafiset esitystavat / Bode-diagrammi)



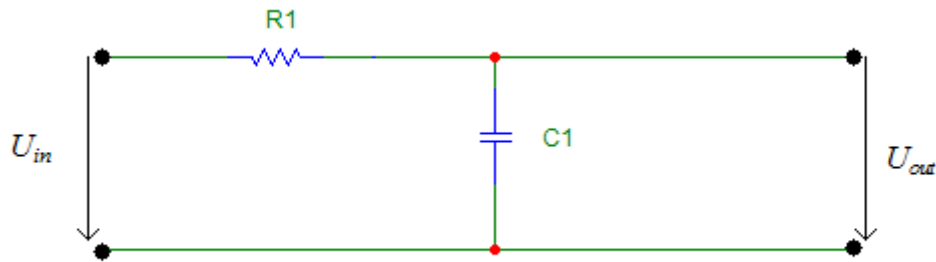
Kuvio 8. Esimerkki alipäästösuotimen Boden-diagrammista vaimennus- ja vaihekulman kuvaajat

Bode-diagrammi ei sinällään ole muuta kuin yksinkertainen kuvaaja, mutta siitä on helppo havainnoida piirin resonanssi, stabiilisuus, yms. asiat. Bode-kuvaaja saadaan muodostettua käsin siirtofunktiolausekkeesta jokaiselle eri taajuudelle laskemalla. Suodattimia tutkittaessa kaikki Bode-kuvaajat saadaan piirrettyä MATLAB-ohjelmistolla.

(Taajuusvasteen graafiset esitystavat / Bode-diagrammi)

3.3.3 Siirtofunktio ja sen laskeminen

Siirtofunktion tarkoituksena on kuvata sähköisessä piirissä tapahtuvaa jännitteen muutosta. Tapahtunut muutos ilmaistaan vielä usein desibeleinä, jolloin se ilmaisee tehomuutosta, joka piirissä tapahtuu. Selitän siirtofunktio käsitettä tässä kappaleessa alipäästösuodattimen avulla.



Kuvio 9. Alipäästösuodattimen vastinpiiri

Siirtofunktiossa lasketaan syötetyn jännitteen suhdetta ulostulevaan jännitteeseen jännitteen jaon avulla

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{1}{R_1 + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}} = A_v \quad (12.)$$

Tuloksen mukaan ulostulevan jännitteen U_o suuruus suhteessa tuloon kytkettyyn jännitteeseen U_i riippuu sähköisen vastinpiirin ominaisuuksista. Kompleksitasossa tutkittuna tuloksena saatava A_v on riippuvainen taajuudesta ja saa näin ollen suuruuden ja vaihekulman.

Siirtofunktiolla tulkitaan sähköisten piirien vaikutusta tutkittaviin signaaleihin.

Siirtofunktiossa A_v :n kiinnostavimpia asioita ovat sen itseisarvo ja vaihekulma.

Itseisarvo kertoo vastinpiirissä tapahtuvasta vahvistuksesta ja vaihekulma kertoo miten paljon signaali vääristyy piirissä. Näiden suureiden käyttäytymistä tutkitaan yleensä taajuustasossa Boden–diagrammin avulla.

Alipäästösuodattimen siirtofunktiota A_v voidaan edelleen sieventää

$$A_v = \frac{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}}{R_1 + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}} = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot R \cdot C + 1} = \frac{1}{j \frac{f}{1} + 1} = \frac{1}{j \left(\frac{f}{f_c} \right) + 1} \quad (13.)$$

$$\frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C}$$

Sievennys perustuu resonanssiipiiri kappaleessa käsiteltävään asiaan. Puolen teho rajataajuus on laskettavissa RC - piirissä kaavalla

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} \quad (14.)$$

RC - piirissä rajataajuudella teho puolittuu eli laskee 3 dB:tä. Tämä voidaan todeta kaavasta

$$|A_v| = \left| \frac{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}}{R + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}} \right| = \left| \frac{j \cdot X_c}{R + j \cdot X_c} \right| = \frac{X_c}{\sqrt{R^2 + X_c^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (15.)$$

Jotta vahvistus olisi edellisen kaavan mukainen eli tehosuhte on $\frac{1}{2}$, tulee yhtälön $X_c = R$ toteutua. Tällöin

$$X_c = R \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{2\pi \cdot f_c \cdot C} = R \quad \Rightarrow \quad f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} \quad (16.)$$

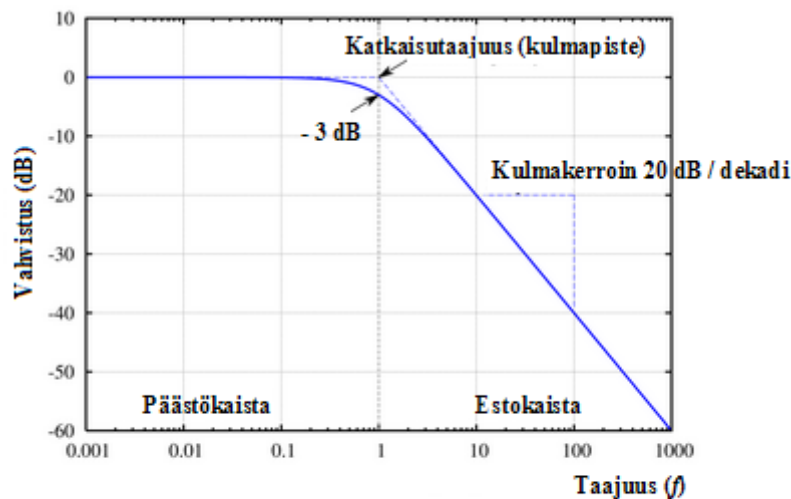
RL – piirin vastaava yhtälö on muotoa

$$f_c = \frac{R}{2\pi \cdot L} \quad (17.)$$

Alkuperäistä siirtofunktiota voidaan edelleen käsitellä, siten havaitaan piirin vahvistuksen muutos taajuuden funktiona

$$\frac{A_v}{\underline{U}_i} = \frac{U_o}{U_i} = |A_v| \angle \theta = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{f}{f_c}\right)^2 + 1}} \angle \tan^{-1}\left(\frac{f}{f_c}\right) \quad (18.)$$

Yhtälön perusteella syöttöön kytketty jännitesignaali näkyy ulostulonavoissa amplitudiltaan pienentyneenä kun syöttötaajuutta kasvatetaan. Taajuustasoon piirretystä kuvaajasta on helppo havainnollistaa miten vahvistus muuttuu taajuuden kasvaessa



Kuvio 10. Alipäästösuodattimen vaimennus taajuuden funktiona

Todellisuudessa tulokset ilmaistaan desibeliasteikkoa käyttäen, koska tällöin jännitesignaalin vahvistumisen vaikutus on tehon kannalta mielekkäämmin luettavissa. Siirtofunktion desibelivahvistus G on laskettavissa seuraavasti

$$A_{vdB} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{f}{f_c}\right)^2 + 1}} \right) \quad (19.)$$

(Tarkka – Hietalahti, 2006-B)

3.3.4 Resonanssipiiri

Suodatinpiiri on resonanssissa, kun sen jännite ja virta ovat samanvaiheiset. Suodatin näyttää piirin navoista tarkasteltuna usein sarjakytkeä, joten tarkastelemme vain sarjaresonanssia tässä yhteydessä.

Sarjaresonanssiipiirissä on kela ja kondensaattori kytkettynä sarjaan. Piirissä on jokin jännitelähde, joka syöttää piiriä sekä johtimella on jokin vastus R , joka usein huomioidaan laskennassa.

Vaihtosähköpiirin impedanssi on

$$Z = R + j\left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right) \quad (20.)$$

Impedanssin kaavasta voidaan edelleen muokata kaavaa siten, että suodatin voidaan mitoittaa tietylle taajuudelle.

$$\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (21.)$$

Resonanssin määritelmän mukaan resonanssitaajuudella ω_0 jännitteen \underline{E} ja virran \underline{I} tulee olla samanvaiheiset. Täten resonanssitaajuudeksi saadaan

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (22.)$$

Resonanssitaajuudella piirin impedanssi $\underline{Z} = R$. Impedanssin itseisarvon ollessa pienimmillään, piirin virta \underline{I} on suurimmillaan. Resonanssi tilanteessa piiriin varastoitunut energia vaihtelee resonanssitaajuudella kelan magneettikentän ja kondensaattorin sähkökentän välillä. Ainoastaan piirin sisäresistanssi kuluttaa tätä energiaa.

Resonanssiipiirejä käytetään erityisesti tietoliikenne-elektronikassa suodattimina, joilla voidaan valita käyttöön haluttu taajuusalue tai vaimentaa haluttu taajuusalue.

Resonanssiipiirejä voidaan soveltaa myös tehoelektroniikkaan sillä erotuksella että käytettävät komponentit ovat järeämpiä. Kaistanpäästösuodattimen tehtävä on vaimentaa resonanssitaajuuden ulkopuoliset taajuudet merkityksettömiksi. Kaistanestosuodin toimii päinvastoin, se sallii kaikki muut taajuudet paitsi resonanssitaajuuden.

(Tarkka – Hietalahti, 2006-C)

4 SUODATUKSEN TOTEUTUS

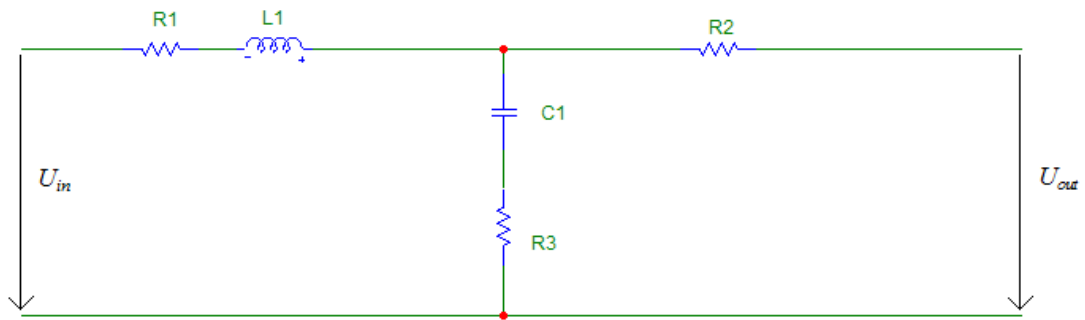
Tässä kappaleessa käsitellään erilaisia suodattimia. Kaikki suodatinpiirit ovat peruseriaatteeltaan hyvin yksinkertaisia, mutta niiden väärällä mitoituksella voidaan pilata suodatusvaikutus ja lisätä uusia verkkoa kuormittavia ongelmia.

Suuntaaja vaatii lähtöjännitteen suodatuksen, jonka tehtävänä on suodattaa pois suuntaajan aiheuttamat perustaajuutta suuremmat taajuuskomponentit. Suodatin voidaan toteuttaa usealle eri tekniikalla, kuten esim. LC-, LCL-, ja LC+muuntaja-tyyppiset suodatintopologiat. Kappaleessa tutkin kaikki eri tekniikat, sekä selvitän niiden matemaattisen käsittelyn.

4.1 LC-suodatin

LC-suodatin on vaihtosähkösuodatin vaihtoehdoista yksinkertaisin ja helpoin käsitellä matemaattisesti. Suodatin rakentuu kelan ja kondensaattorin sarjaan kytkennästä. LC-suodatin on alipäästösuodin joka suodattaa pois kaikki perustaajuuden yläpuolella olevat taajuudet. Suodattimen periaatekuva on esitetty kuviossa 11., johon lisätty johtimista aiheutuvat resistanssit. Johtimien vaikutus on huomioitava laskettaessa siirtofunktiota Laplace-tasossa (Liite 3). Suodattimen aiheuttama jännitehäviö ja –särö olisi saatava perusaallolla mahdollisimman pieneksi myös epälineaarilla kuormituksella. Tämän vuoksi suodattimen induktanssi tulisi mitoittaa mahdollisimman pieneksi, jolloin myös impedanssi pysyisi pienenä. Kapasitanssi arvoa täytyisi vastaavasti kasvattaa, jotta haluttu rajataajuus saavutettaisiin. Kapasitanssin kasvatus kuitenkin lisää loistehon määrää ja huonontaa näin ollen myös suodattimen tehokerrointa. LC-suodattimen suunnittelussa pyritäänkin yleisesti pitämään tehokerroin mahdollisimman suurena ja häviöt pienenä.

(Nuutinen, 2007)



Kuvio 11. LC – suodatin, jossa mukana johtimien aiheuttamat resistanssit

LC-suodattimen käsittely matemaattisesti onnistuu yksinkertaisimmin resonanssipiiri teorian avulla. Kappaleessa 3.3.4 resonanssipiirit on selvitettyä teoria tarkemmin. Piiri mitoitetaan tietylle taajuudelle resonanssiin, jolloin se toimii tällä taajuusalueella suodattimena. Konttilukin vaihtosähkösuodatin mitoitetaan kaavalla 22. Kaavaa joudutaan kuitenkin hieman johtamaan ja luottamaan asiantuntijan ilmoittamaan vakioon. Vakio on useimmiten määritelty 10 %. Tämä vakio kertoo jännitteen aleneman joka suodattimessa oletetaan ja sallitaan tapahtuvaksi.

Trafotek Oy on kotimainen suodatin valmistaja, jolla on pitkän linjan kokemus suodattimien mitoittamiseen. Kyseisen yrityksen asiantuntijat opastivat käyttämään mitoituksessa yksinkertaisinta resonanssitaajuuteen liittyvää kaavaa. Sen avulla heidän kokemuksensa perusteella suodatus on saatu toimimaan halutulla tavalla. Mitoituksessa oli tärkeintä tietää, että suodattimessa oletetaan sallituksi 10 % jännitteen alenema, joka on huomioitava laskennassa. Mikäli jännitteen alenema oletetaan pienemmäksi, se väistämättä kasvattaa suodattimen komponenttien kokoa.

Mitoitus aloitetaan kaavasta 22. laskemalla kelalle arvo, kuormavirran perusteella.

$$L = \frac{0.1 \cdot U}{\sqrt{3} \cdot 2\pi \cdot f \cdot I} \quad (23.)$$

Kuten kaavasta 23. huomataan, on kelan mitoitus riippuvainen sallitusta jännitteen alenemasta ja kuormavirrasta. Lasketaan kondensaattorille arvo

$$C = \frac{1}{\left[2\pi \cdot \frac{f_k}{3}\right]^2 \cdot L} \quad (24.)$$

Kondensaattorin arvo on riippuvainen sen kytkentätavasta ja invertterin kytkentätaajuudesta.
(Trafotek Oy, 2010)

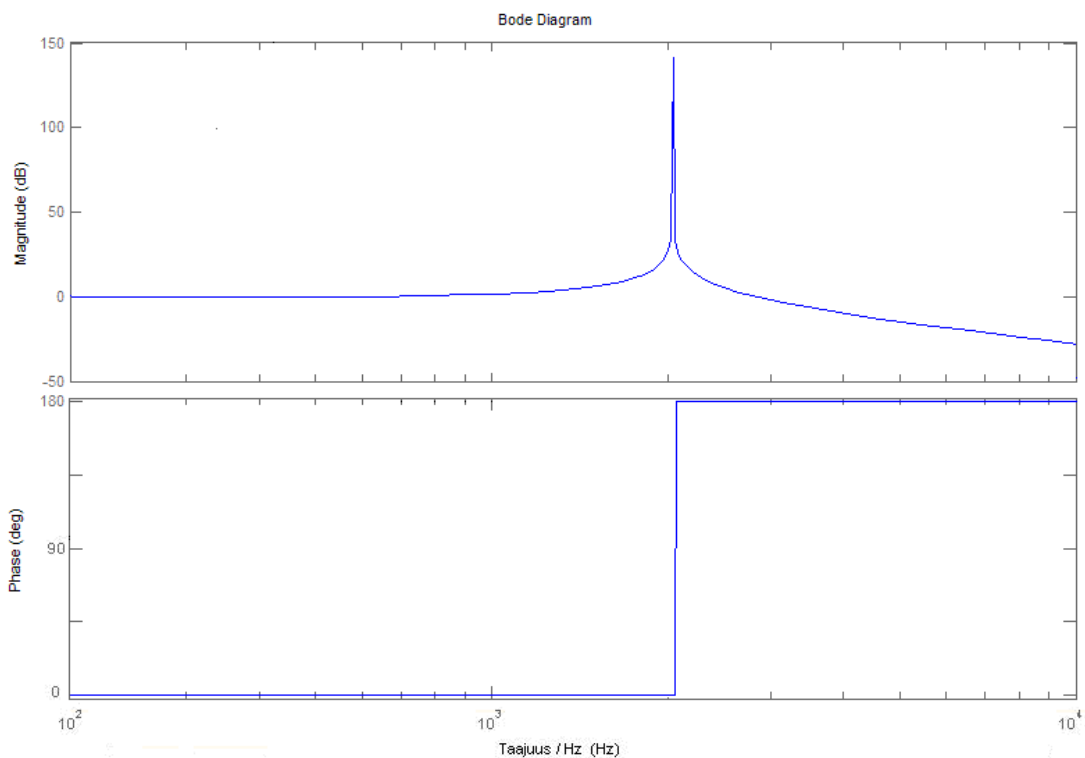
Havainnollistetaan laskentaa esimerkin avulla. Mitoitetaan LC-suodattimelle arvot, kun $U_{pu} = 1$, $\Delta U = 0,1$, $I_{load} = 1$, $f = 50$ Hz. Lasketaan kelalle arvo kaavan 23. avulla.

$$L = \frac{0.1 \cdot 1}{\sqrt{3} \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 1} = 183,776 \mu\text{H} \approx 184 \mu\text{H}$$

Määritetään kondensaattorin arvo kaavalla 24., kun, $f_k = 3,6$ kHz.

$$C = \frac{1}{\left[2\pi \cdot \frac{3600 \text{ Hz}}{3}\right]^2 \cdot 184 \mu\text{H}} = 95,7186 \mu\text{F} \approx 96 \mu\text{F}$$

Kuviossa 12. on esitettyä esimerkkinä suodattimen Bode – diagrammi. Diagrammista voidaan tulkita että suodatin päästää lävitseen taajuuudet jotka ovat alle n. 1,1 kHz. Resonanssitaajuus on 1197 Hz kohdalla, jolloin suodatin resonoi muun järjestelmän kanssa. 1,2 kHz suurempia taajuuksia suodatin alkaa vaimentaa eli suodattaa.



Kuvio 12. Esimerkinä lasketun LC-suodattimen Bode-diagrammi

Kaavan 24. mukaan kondensaattorin arvo on laskettu siten, että se oletetaan kytkettäväksi tähteen. Usein kuitenkin kondensaattori kytketään kolmioon, koska tällöin kapasitanssi voi olla kolmas osan pienempi kuin tähtikytkennässä. Tämä on helposti selitettävissä kaavasta

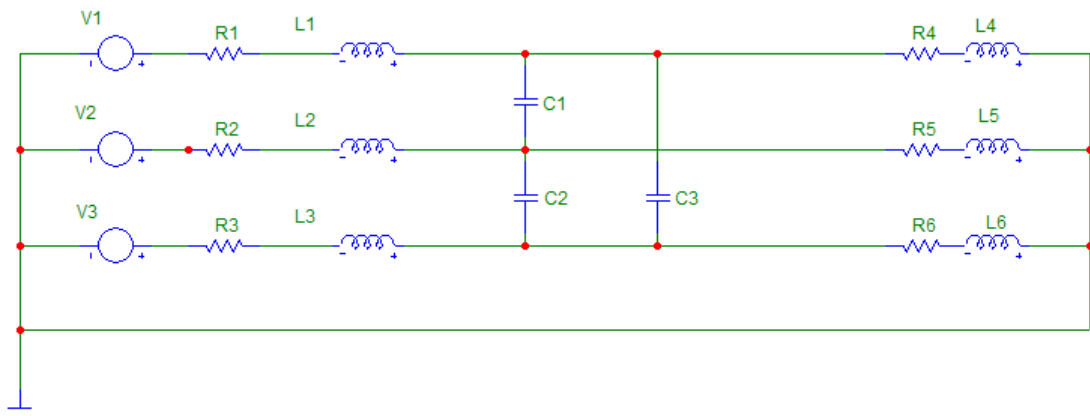
$$Q = 3 \cdot \frac{U^2}{X_C} \Rightarrow X_C = 3 \cdot \frac{U^2}{Q} \quad \left| X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \right. \quad (25.)$$

$$\frac{1}{\omega \cdot C} = 3 \cdot \frac{U^2}{Q} \Rightarrow C_D = \frac{Q}{3 \cdot U^2 \cdot \omega} = \frac{Q}{3 \cdot U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \quad (26.)$$

$$C_Y = \frac{Q}{U^2 \cdot \omega} \quad \text{kondensaattori tähdessä} \quad (27.)$$

$$C_D = \frac{C_Y}{3} \quad \text{kondensaattori kolmiossa} \quad (28.)$$

Kondensaattorit pyritään suodatinpiireissä kytkemään niin, että niiden yli vaikuttaisi mahdollisimman suuri jännite. Tämä on havaittavissa kaavasta 27, josta huomataan, että mitä suurempi jännite kondensaattorien yli vaikuttaa, sitä pienempi komponentti on mahdollista valita. Pienempi kondensaattori on myös useammin myös se edullisempi vaihtoehto, mikä myös puoltaa kondensaattorien kytkentää kolmioon kuten kuviossa 13. on esitetty. (Bergman, 2009)



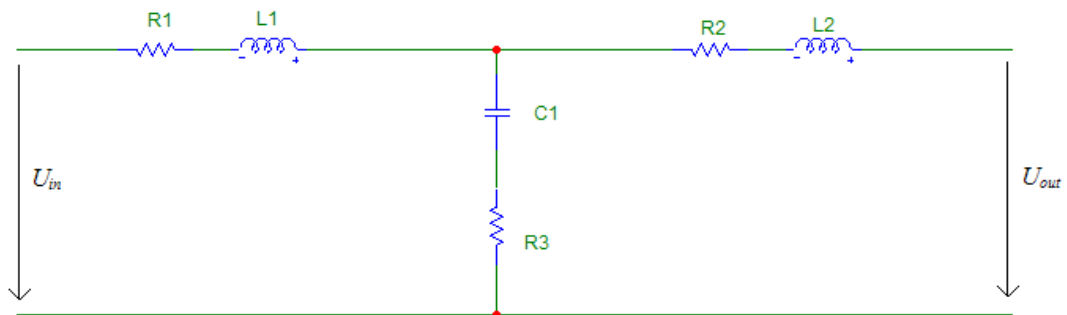
Kuvio 13. LC – suodatin, jossa kondensaattorit kytkettynä kolmioon

LC–tyyppisen suodattimen etuuksia ovat sen yksinkertainen rakenne, helppo matemaattinen käsittely ja valmistaminen ovat verrattain helppoja.

4.2 LCL–suodatin

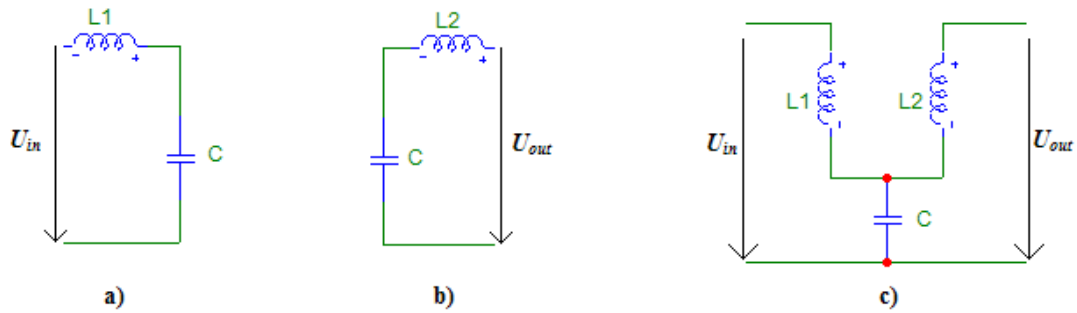
LCL–suodatin on LC–suodattimeen perustuva suodin, jonka suodatusta on tehostettu ylimääräisen kelan avulla. Suodatin rakentuu kahdesta sarjaan kytketystä kelasta, sekä niiden väliin rinnalle kytketystä kondensaattorista. Kuviossa 14. on esitettyä LCL–suodattimen periaatekuva, johon on lisätty johtimista aiheutuvat resistanssit. LCL–suodatinta käytettäessä on mahdollista suunnitella suodatin, jonka komponenttiarvot ovat suhteellisen pienet. LCL–tyyppisen suodattimen suunnitteluun ja mitoitukseen on olemassa kolme erilaista tekniikkaa: Liserre-menetelmä, resonanssitaajuuden asettamiseen perustuva menetelmä, sekä näiden kahden yhdistelmä. Jokaisella menetelmällä saadaan suunniteltua toimiva suodatin, mutta kerrotaan tässä yhteydessä yleisin menetelmä: resonanssitaajuuteen perustuva menetelmä.

(Nuutinen, 2007)



Kuvio 14 LCL-tyyppinen suodatin ratkaisu

LCL–suodattimen resonanssitaajuuteen perustuvassa mitoituksessa asetetaan ensimmäiseksi resonanssitaajuus halutuksi, jonka jälkeen määritetään komponenttiarvot. Viitteen (Nuutinen, 2007) mukaan Liserren määrittämä resonanssitaajuus f_{res} on aseteltava taajuusalueelle $10 \cdot f_l \leq f_{res} \leq \frac{1}{2} f_{sw}$, missä f_l on suuntaajan perusaallon taajuus. LCL-suodattimella on kolme eri resonanssitaajuutta, jotka muodostuvat alla olevan kuvio mukaisiin resonanssiipiireihin.



Kuvio 15. LCL-suodattimen resonanssipiirit a, b ja c

LCL-suodatin mitoitetaan useimmissa tapauksissa kuvio 15. tavan c mukaan. Kuvion kaltaisessa resonanssipiirissä on kaksi yhtä suurta kelaä kytkettynä rinnan, joiden kanssa kondensaattori on sarjassa. Kytkennästä voidaan laskea komponenttiarvot seuraavasti Aluksi määritellään että kelat 1 ja 2 ovat yhtä suuret, jolloin saadaan

$$L = 0,5 \cdot L_1 = 0,5 \cdot L_2 \quad (29.)$$

$$L = \frac{0,1 \cdot U}{\sqrt{3} \cdot 2\pi \cdot f \cdot I}$$

$$C = \frac{1}{\left[2\pi \cdot \frac{f_k}{3}\right]^2 \cdot L}$$

Kaavasta 29. huomataan että näennäiseksi kelan arvoksi muodostuu kelan 1. ja 2. rinnankytkennän arvo. Richard Lee Ozenbaughin mukaan LCL-suodattimessa kelan arvo voidaan puolittaa. LCL-suodattimessa kelat 1. ja 2. ovat siis aina yhtä suuret. Laskennassa huomataan myös että kondensaattorin kapasitanssi arvo laskee. (Ozenbaugh, 2001)

Tutkitaan LCL-suodattimen mitoitusta esimerkin avulla

Mitoitetaan LCL-suodattimelle arvot, kun $U_{pu} = 1$, $\Delta U = 0,1$, $I_{load} = 1$, $f = 50$ Hz.

$$L = \frac{0,1 \cdot 1}{\sqrt{3} \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 1} = 183,776 \mu\text{H} \approx 184 \mu\text{H}$$

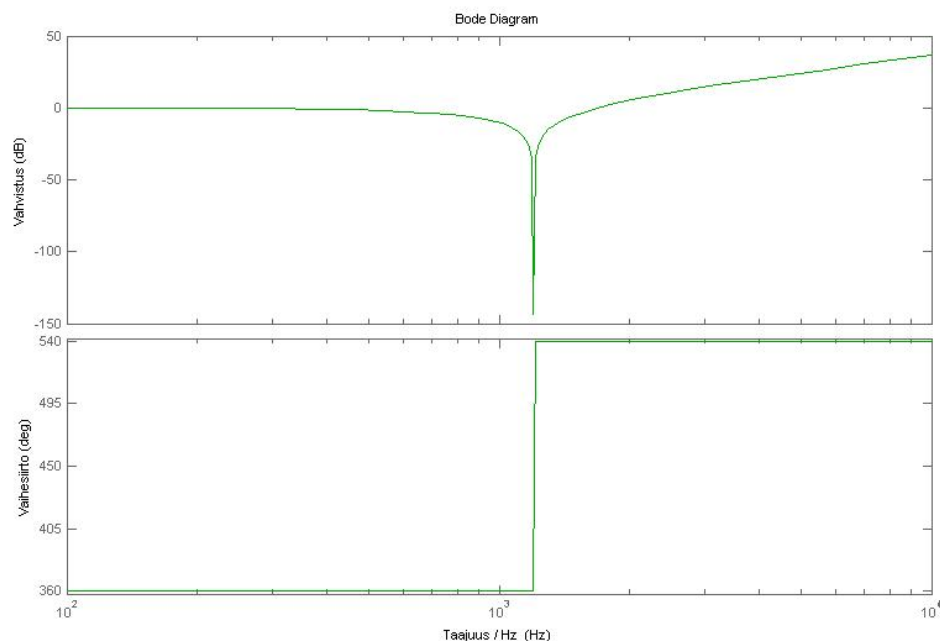
LCL-suodattimessa $L_1 = L_2$, jolloin päästään tulokseen

$$L = 0,5 \cdot L_1 = 0,5 \cdot L_2 = 92 \mu H$$

Kelalle laskettu arvo on huomattavasti pienempi kuin vastaavan LC-suodattimen arvosta. Määritetään kondensaattorin arvo, kun $f_k = 3,6 \text{ kHz}$.

$$C = \frac{1}{\left[2\pi \cdot \frac{3600 \text{ Hz}}{3}\right]^2 \cdot 92 \mu H} = 191,2 \mu F \approx 191 \mu F$$

Kuviossa 16. on esitettyä esimerkistä piirretty Boden-diagrammi. Kuvaajasta voidaan selvästi todeta, kuinka LCL-suodatin toimii kaistanestosuotimena. Se päästää normaalisti lävitse kaikki alle 1 kHz taajuudet. 1030 Hz kohdalla suodatin vaimentaa kaikki signaalit. Yli 1,1 kHz taajuuksia LCL-suodatin alkaa vahvistamaan. LCL-suotimen ominaisuus voimistaa signaalia on huomioitava suodatinta mitoitettaessa, jotta haitallisia signaaleja ei voimistettaisi moninkertaisiksi.



Kuvio 16. Esimerkkinä lasketun LCL-suodattimen Boden-diagrammi

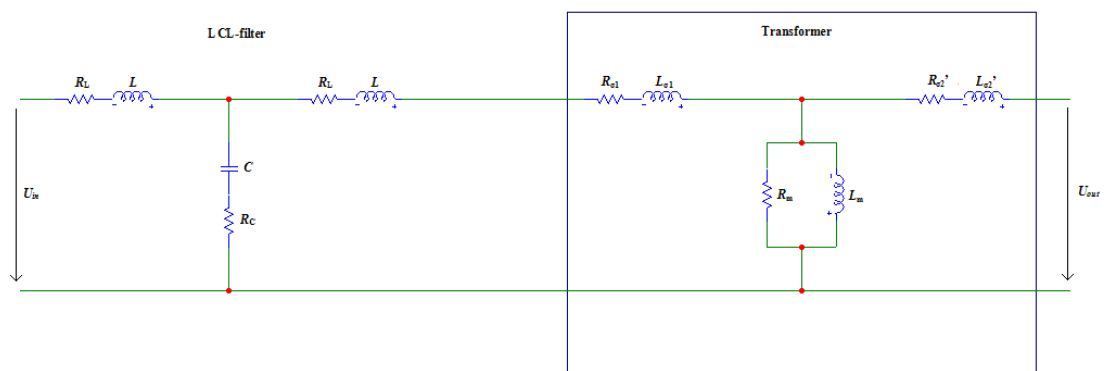
Esimerkistä huomataan, että LCL-suodatin voidaan toteuttaa huomattavasti pienemmillä komponenteilla kuin vastaava LC-suodatin. LCL-suodatin on monelta kannalta erittäin hyvä suodatin ratkaisu. Sen eduiksi voi luetella mm. mahdollisuuden ajaa tehoa molempiin suuntiin, sekä komponenttien pienentyminen. LC-suodattimessa

tehonvirtaus molempiin suuntiin ei ole mahdollista, koska tehoa ei voida syöttää ulostulonavoista suodattimeen. Ulostulonavoista katsottuna kondensaattori on jännitelähde ja se aiheuttaa ongelmia syöttävän jännitelähteen kanssa. LCL-suodattimessa ei ole väliä kumpaan suuntaan teho virtaa, suodatus on molempiin suuntiin yhtä tehokas. LCL-suodattimen harmina ovat sen monet resonanssitaajuudet.

4.3 Muuntajan vaikutus suodatukseseen

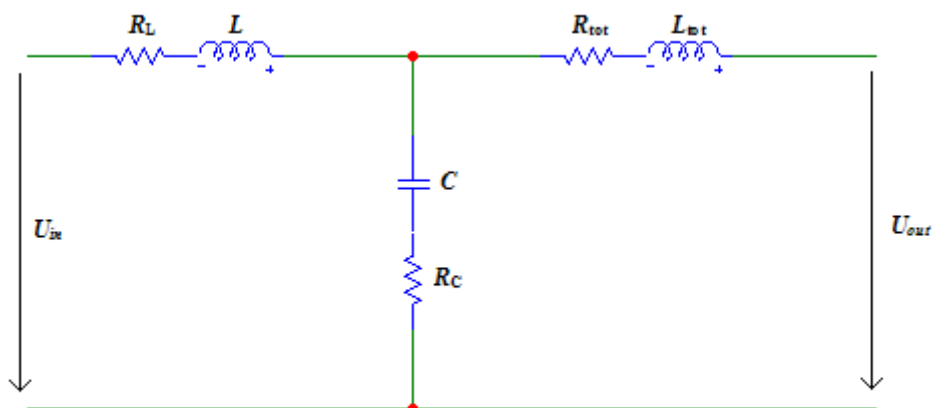
Suodatusta suunniteltaessa on tunnettava myös muu verkkoympäristö, johon suodatin asennetaan. Suodatuksen ja sen toimivuuteen vaikuttaa monta asiaa, kuten verkkoon kytketyt muuntajat jotka toimivat tietynlaisina suodattimina.

Muuntaja on rakenteensa puolesta eräänlainen vaihtosähkösuodatin, koska se rakentuu kahdesta suuresta kelasta. Liitteessä 1 kelasta todetaan, että sen jännite on induktanssin ja virran muutoksen tulo ajan funktiona. Tämä tarkoittaa sitä, että kela pyrkii vastustamaan virran muutosta ja tasoittaa näin ollen vaihtosähkön aaltomuotoa, jos se on pahoin säröytynyt. Muuntaja voidaan kuvata LCL-suodattimen perään galvaanisena piirinä, josta havaitaan sen suodatusvaikutus.



Kuvio 17- LCL-suodatin ja PJ-muuntaja

Kuviossa 17. on esitetty LCL-tyyppinen suodatin ja muuntaja. Muuntajan sijaiskytkentää voidaan edelleen pelkistää jättämällä muuntopiiri huomioimatta, koska kuormitettuna muuntajan kaikki teho ajetaan kuormalle. Muuntopiiri huomioidaan vain tyhjäkäyvässä muuntajassa.



Kuvio 18. LCL – suodatin ja muuntaja galvaanisesti yhdistettynä

Kuviosta 18. huomataan, miten muuntajalla saadaan periaatteessa LC-suodattimesta LCL-suodatin, jossa suodattimen alkuperäiset R_L ja L ovat summautuneet muuntajan sisäisten resistanssien ja induktanssien kanssa. Täten on saatu muodostettua LCL-suodattimen toiseen haaraan yli suuret resistanssi ja induktanssi. Resistanssi ja induktanssi alkavat toimia osa kuormana ja näin ollen vaikuttavat myös heikentävästi suodattimen suodatuksen. Käytännössä muuntajan kanssa on parasta suunnitella LC-suodatin, siten että huomio mitoituksessa myös muuntajan vaikutuksen.

Tutkintotyössäni muuntaja oli sijoitettu heti suodattimen jälkeen, jolloin myös sen suodatus vaikutus tuli huomioida. Muuntajan suodatuksen tehokkuuteen vaikuttaa suuresti se, miten sen kytkentä on rakennettu. Tutkintotyössäni perehdyn yleisesti käytettyyn Dyn 11 muuntajaan. Dyn 11-kytketyllä muuntajalla on merkittävä suodatus vaikutus, sekä sillä voidaan luoda nollapiste kuormalaitteille. Tutkin tässä yhteydessä pelkästään Dyn-kytkennän vaikutusta suodatukseen. Yleisesti on syytä huomioida myös muuntajan kytkentäryhmän vaikutus suodatustulokseen.

Dyn-kytketyn muuntajan ensiö on kytketty kolmioon, jolloin jokaiseen vaihekäämiin vaikuttaa sinimuotoinen jännite. Tällöin muuntajasydänpylväisiin vaikuttaa sinimuotoiset magneettivuot. Tämän seurauksena magneettisesti kyllästyneet rautasydämet edellyttävät magnetointivirtaan parittomia yliaaltoja. Näistä kuitenkin kolmella jaolliset virta-aallot ovat kaikissa vaihekäämeissä samanvaiheisia ja muodostavat kolmioon suljetun piirin. Yliaaltojen haittaavaa nollavuota, joka

sulkeutuisi muuntajan astian ikeen kautta ikeestä toiseen ei esiinny. Tämä johtuu siitä, että vuot ovat sinimuotoisia ja muodostavat kolmivaiheisen symmetrisen järjestelmän. Toisioon indusoituneet jännitteet ovat sinimuotoisia magneettivoiden indusoimina ensiöstä. Kuormituksen vaihtelu epä- ja symmetrisen kuormituksen välillä ei muuta muuntaja rakenteen ominaisuuksia.

(Aura - Tonteri, 1996-B)

Monissa verkoissa joihin vaihtosähkösuodattimia suunnitellaan ja asennetaan, on myös muuntaja. Muuntajan syy - seuraus suhde jää usein kuitenkin huomioimatta ja näin ollen suodatus ei välttämättä testausmittauksissa tuota haluttua tulosta. Omassa tutkintotyössä oli myös muuntaja kytkettynä konttilukin sähköverkkoon. Muuntaja oli sijoitettu suodattimen jälkeen eli sen vaikutus oli huomioitava laskennassa. Laskennat suoritettiin pääasiassa MATLABilla, jolloin saatiin luotettavia tuloksia aikaiseksi.

5 SUODATTIMIEN TUTKIMUSMENETELMÄT

Tässä kappaleessa perehdytään käytettyihin tutkimusmenetelmiin ja tutkimuslaitteiston tarkasteluun. Suodattimia tutkittaessa parhaana yksittäisenä tutkimusmenetelmänä oli MATLAB-ohjelmisto. Tutkimusten tavoitteena on MATLAB-simulaatioiden avulla selvittää eri suodattimien toimintaa, käyttäytymistä vaihtelevilla kuormilla, sekä niiden eroavaisuuksien havainnollistaminen kuvien avulla.

5.1 Käytetyt tutkimusmenetelmät

Tutkimuksissa käytin apunani pääasiassa MATLAB- ja OrCad-simulointilaitteistoja. OrCad-ohjelmistolla piirsin sähkökaaviot, MATLAB-ohjelmiston avulla simuloin erilaiset suodatinmallit vaihtelevilla kuormituksilla. Kuormituksia vaihtelin siten, että aloitin simuloinnin konttilukin peruskuormalla, seuraavaksi lisättiin moottorikuormaa ja viimeisenä tutkin mitä kytkentätilanteessa tapahtuu. Koettelin suodatinlaitteistoa myös vinokuormituksella, selventääkseni, ettei se aiheuta erityisiä ongelmia.

Simulointien avulla oli tarkoitus oppia tuntemaan eri suodatin tyyppien toiminnat erilaisilla kuormilla, sekä niiden heikkoudet ja vahvuudet. Ohjelmistojen avulla suodattimien vertailu oli helppoa ja niiden eroavaisuuksia oli helppo vertailla, simulaatioiden nopea räätälöitävyyden vuoksi. Teoria osuudessa esitetyt laskennat toimivat simulointien tukena.

5.2 MATLAB-ohjelmisto

MATLAB (MATrix LABoratory) on alunperin fortran-ohjelmointikielellä kirjoitettu matriisienkäsittelyohjelma. (Laine, MATLAB perusteet) MATLAB on erityisesti tekniseen laskentaan suunniteltu tehokas matematiikkaohjelma, jolla voi suorittaa niin numeerista laskentaa, havainnollistaa laskentaa kuvaajilla tai tehdä ohjelmia.

MATLABia ohjataan käskykomennoinnilla, jotka kirjoitetaan erilliseen komentoikkunaan syöttöriveille. MATLABia voidaan laajentaa erillisillä toolboxeilla.

(Mäkelä, 2009-A)

MATLABin yhteyteen on rakennettu erillinen graafinen ja vuorovaikutteinen ohjelma Simulink. Simulinkillä voi mm. mallintaa erilaisia piirejä, simuloida niitä ja analysoida tuloksia. Simulinkin käytettävyyttä kuvaa, se että sillä voi tutkia mm. mekaanisia, sähköisiä ja termodynaamisia järjestelmiä. Järjestelmätkin voi vielä erikseen lajitella lineaarisiin ja epälineaarisiin, sekä aikajatkuviin, aikadiskreetteihin tai sekajärjestelmiin.

(Mäkelä, 2009-B)

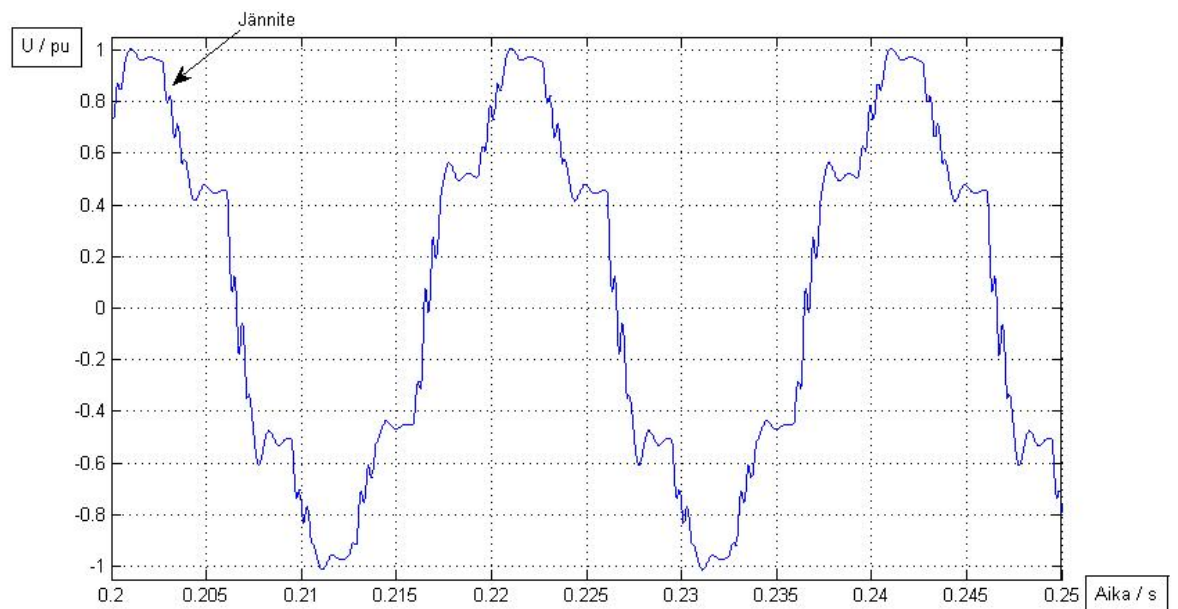
Järjestelmän tutkiminen on MATLABin avulla yksinkertaista. Ensimmäisenä luodaan MATLABiin malli editorilla, joka muokataan halutuksi. Kun malli on valmis, se simuloidaan ja tarkastellaan tuloksia. Mikäli järjestelmä ei ole toiminut kuten oli alunperin suunnitellut, voi vanhaa mallia edelleen muokata ja mallin simuloida uudestaan. Mallia voidaan muokata ja analysoida niin kauan, sillä saavutetaan haluttu käyttäytyminen.

MATLAB tuli tutkintotyössä kyseeseen juuri helpon käyttöliittymän ja muokkausominaisuuksiensa vuoksi. Sen avulla oli helppo mallintaa suodattimia, joiden mittaaminen oikealla mittausjärjestelyllä olisi vienyt päiviä. Lisäksi mallin muokkaaminen kävi käden käänteessä, verrattuna oikean mittausasetelman muuttaminen toisenlaiseksi.

käytettävissä. Taajuusmuuttaja oli aseteltu siten, että sen vahvistus oli aseteltu 0,5, integrointiaika 200 ms ja kytkentätaajuus oli yleisesti käytetty vakio 3,6 kHz.

6.2 Suodattamaton signaali suuntaajan lähdössä

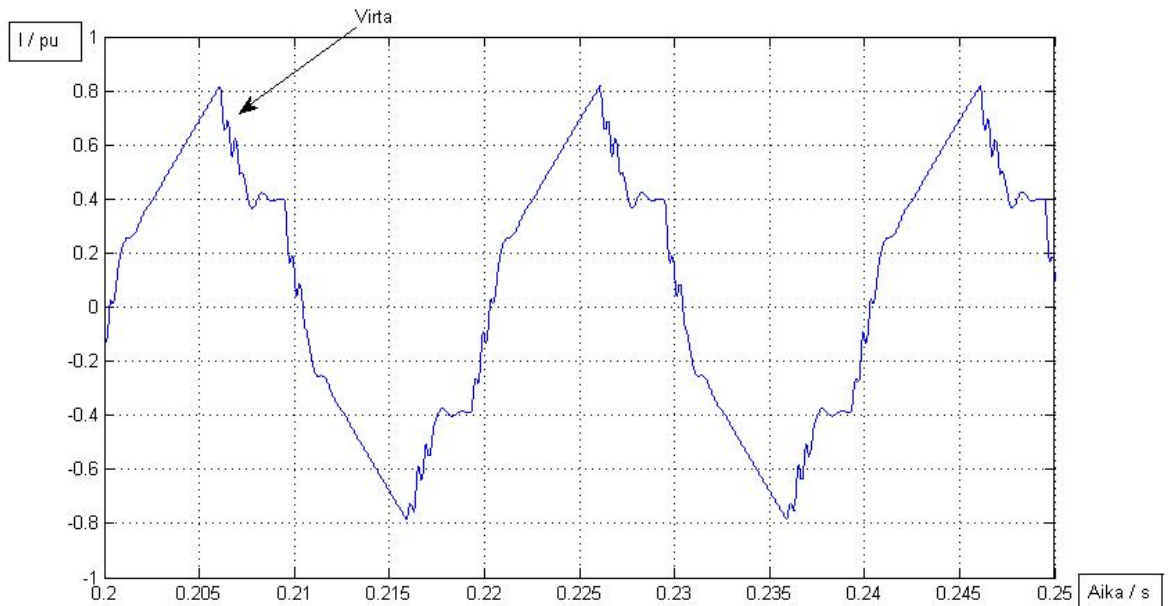
Suuntaajan todettiin olevan verkon suurin yksittäinen yliaaltojen aiheuttaja. Teorian tueksi simuloitiin ensiksi kuvion 19. mukaista mallia ilman suodatinta ja muuntaajaa. Simulointi tulos on mitattu taajuusmuuttajan jälkeen vaiheiden väliltä. On hyvä huomioida, että jännite on mitattu vaiheiden väliltä ja virta vaiheesta maahan. Tässä tilanteessa syntyy 30° vaihesiirto mikä näkyy kuvissa vertailtaessa.



Kuvio 20. Suodattamaton jännitesignaali taajuusmuuttajan lähdössä

Kuviossa 20. on esitetty suodattamatonta jännitesignaalia taajuusmuuttajan jälkeen. Signaalia on hyvä vertailla kappaleessa 3.1.1 esitettyyn kuvioon 4., jossa on taajuusmuuttajan hakkaama jännitesignaalia. Kuviossa on selvästi havaittavissa yhtäläisyyksiä ja häiriöitä, jotka aiheutuvat taajuusmuuttajan kytkimien toiminnasta. Lisäksi signaalissa on havaittavissa harmonisia yliaaltoja, joita voisi tutkia matemaattisesti Fourier -analyysin avulla. MATLAB-ohjelmistosta saa Fourier- sekä THD-analyysin ulos vaivattomasti. Tarkempi matemaattinen tulkinta on täten turhaa.

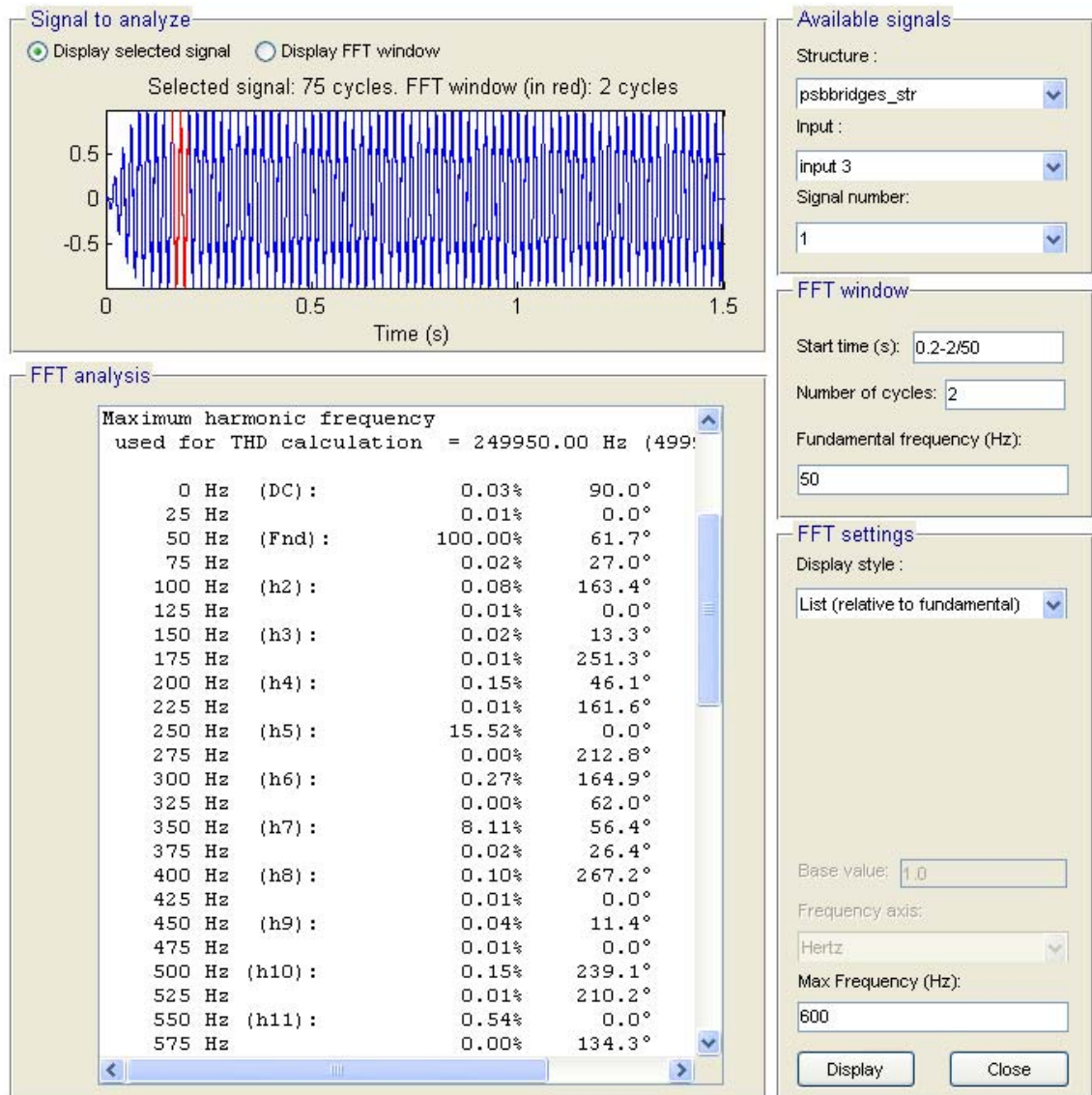
Kuvio 21. esittää samaisessa tilanteessa esiintyvää virtasignaalia. Taajuusmuuttajan suodattamattomassa lähdössä esiintyvä virtasignaali on aaltomuodoltaan lähempänä kolmioaaltoa, kuin sinisignaalia. Virtasignaalissa on tämän lisäksi havaittavissa signaalin säröytymistä.



Kuvio 21. Suodattamaton virtasignaali taajuusmuuttajan lähdössä

Kuvion 21 signaalista on myös määritettävissä Fourier-analyysi, sekä THD-arvo. MATLAB-ohjelmalla nämä laskennat saadaan kuitenkin vaivattomasti esiin, ilman että mitään tarvitsee määrittää käsin. THD saatiin mallista vertailemalla jännitesignaaleja keskenään. Vastaavasti Fourier-analyysi saatiin luotua MATLABin sisäisellä analysointityökalulla.

Ohjelmisto laski suodattamattomalle signaalille THDksi 18,21 %. Säröytynyttä signaalia on siis merkittävästi perusaallon lisäksi. Fourier analyysi saatiin kuvion 22. mukaiseen ikkunaan. Analyysin perusteella mitattavassa signaalissa oli 50 Hz perusaallon lisäksi viidettä harmonista yliaaltoa 15,5 % amplitudilla, sekä seitsemättä 8 % amplitudilla. Muut harmoniset olivat merkityksettömän pieniä, joten niitä ei tarvitse huomioida. Laitteistossa esiintyy juuri tyypillisimpiä harmonisia yliaaltoja, jotka täytyy suodattaa pois aiheuttamasta häiriötä ja kuluttamasta tehoa.



Kuvio 22. Suodattamattoman signaalin Fourier-analyysi

Seuraavissa simuloinneissa esitän vain tarvittavat lukemat harmonisista yliaalloista. On myös hyvä huomioida, että analyysi on tehty vain pieneen signaalin pätkään.

Esimerkiksi kytkentätilanteessa analyysin tuloksissa on todella rajuja yliaaltoja.

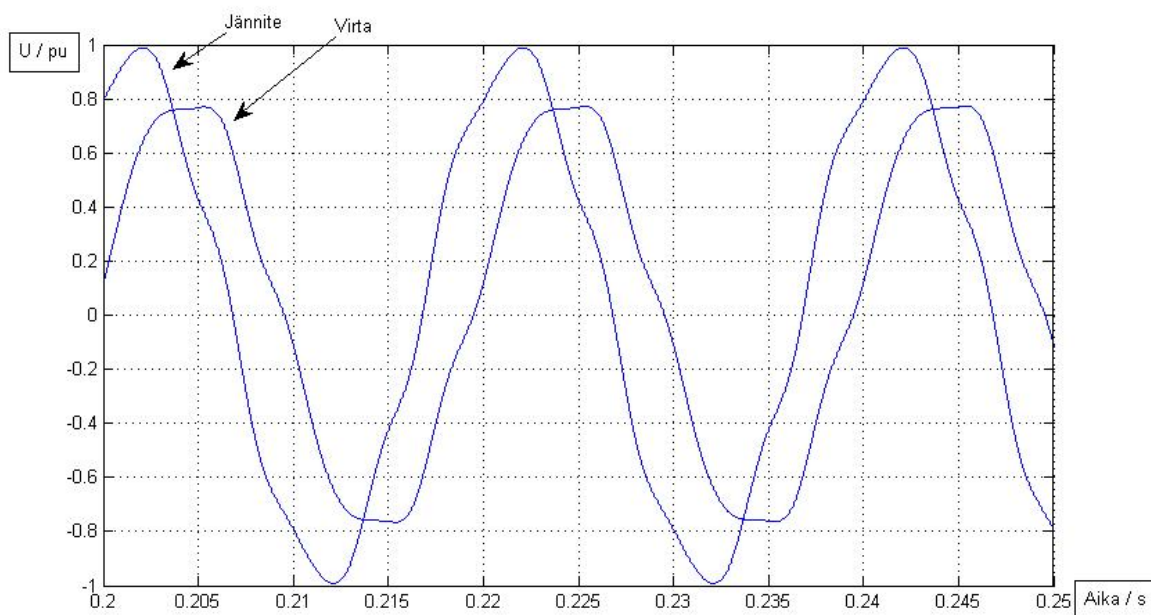
Tarkoituksena oli tutkia laitteiston stabiilia tilaa, jolloin myös analysoinnit on otettu stabiilista tilasta.

6.3 LC-suodattimen simulointi

Tutkitaan LC-suodatusta ja sen vaikutusta systeemin toimintaan. Simulointi suoritetaan kolmella erilaisella kuorma variaatiolla. Ensimmäisenä LC-suodin simuloidaan resistiivisellä kuormalla. Seuraavaksi kuormituksena on moottorikuorma, sekä edellinen resistiivinen kuorma. Viimeisenä laitteistoa kuormittaan vinokuormalla, sekä tutkitaan kytkentätilan muutosta ja sen vaikutusta laitteiston dynamiikkaan.

6.3.1 Resisttiivisen kuorman simulointi

Ensimmäisenä tutkitaan, miten LC – suotimen suodatus näkyy sen lähtönavoissa resistiivisellä kuormalla. Kuviossa 23. on esitettyä suodattimen jälkeen mitatut jännite- ja virtasignaali.



Kuvio 23. LC-suotimen lähtönavoista mitattu suodatettu signaali resistiivisellä kuormalla

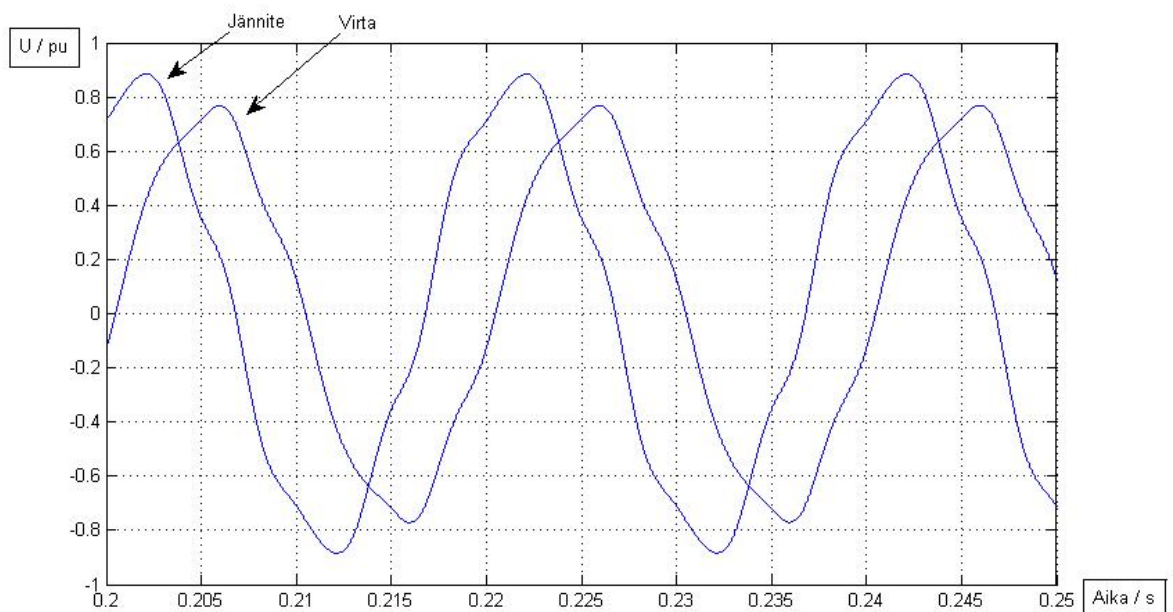
Kuviosta 23. on selvästi havaittavissa suodattimen vaikutus signaalin aaltomuotoon. Kun vertaillaan suodatettua signaalia suodattamattomaan, niin huomataan että vaikutus on merkittävä. Signaali ei kuitenkaan vielä ole täysin tasoittunut vastaamaan puhdasta sinisignaalia, mutta on kuitenkin jo siedettävällä tasolla. THD-säröä on ohjelmiston mukaan 7 % ja yliaaltoista merkittävimpinä esiintyvät viides amplitudilla 7

% ja seitsemäs amplitudilla 2 %. Suodatuksella kyetään siis resistiivisellä kuormalla täyttämään standardien esittämät vaatimukset. On kuitenkin huomioitava, että herkille laitteille kuvion 23. mukainen signaali on aivan liian säröytynyttä, mikä aiheuttaa näin ollen ongelmia laitteiston toiminnassa ja pahimmassa tapauksessa jopa laiterikot ovat mahdollisia. Kuvassa esiintyvä vaihesiirto johtuu jo edellä mainitusta mittausteknisestä seikasta. Jännitemittaus on otettu vaiheiden väliltä ja virtamittaus vaiheesta maahan, jolloin syntyy 30° vaihe-ero niiden välille.

6.3.2 Moottorikuorman simulointi

Suodatusta tarvitaan useimmiten silloin kun taajuusmuuttajalla ohjataan moottoria, sekä samalla syötöllä käytetään jotakin muita laitteita. Moottorikuorman simulointi on tärkein malli, jonka mukaan laitteistot usein mitoitetaan.

Moottorikuormana oli mallissa pienehkö oikosulkumoottori, joka oli mallinnettu pelkästään passiivisilla komponenteilla. Oikea moottorimalli olisi tarvinnut takaisinkytkennän, jolloin se olisi keskustellut muun ohjelman kanssa reaaliaikaisesti. Tätä en nähnyt tarpeelliseksi, koska tarkoituksena oli pelkästään tutustua erilaisiin suotimiin ja näiden välisiin eroihin.



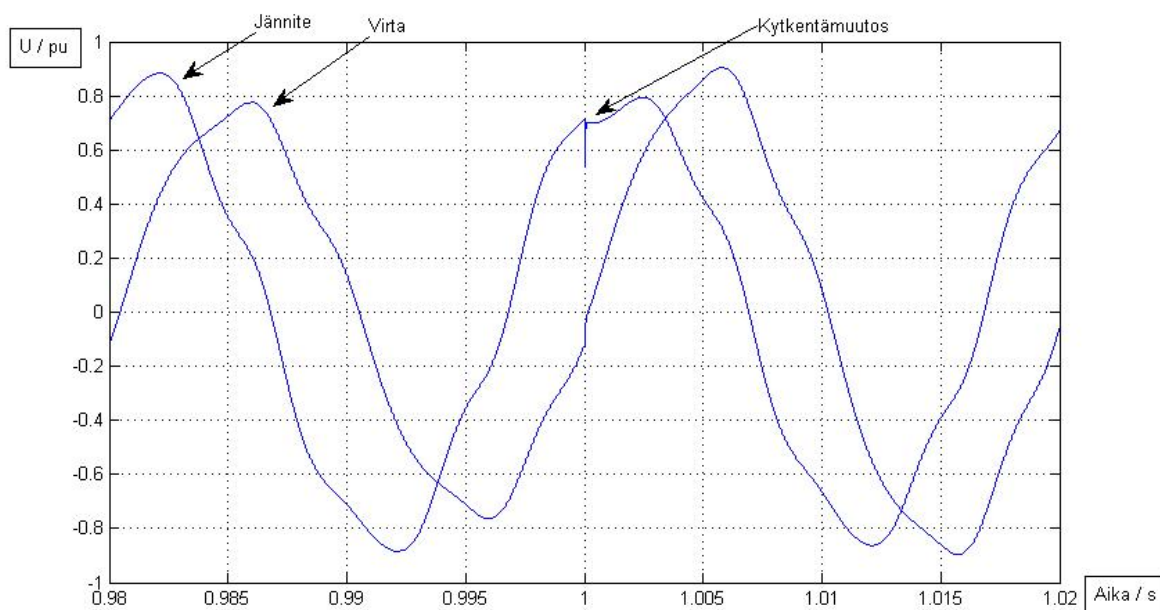
Kuvio 24. LC-suotimen lähtönavoista mitattu moottorikuormituksen jännite- ja virtasignaalit

Kuviosta 24., LC-suodattimen jälkeen on havaittavissa selvästi induktiivisuuden vaikutus. Signaali on selvästi tasoittunut resistiivisen kuorman aaltomuodosta. Tämä muutos on selitettävissä kelan ominaisuudella vastusta virran muutosta. Moottorikuormalla THD on 8 % ja harmonien särö viidennellä 6 % ja seitsemännellä 3 %. Vaihesiirto ei merkittävästi kasva, koska piirin induktiivisuus ei kasva merkittävästi.

6.3.3 KytKentätilanteen simulointi

Laitteiston toiminnan kannalta tutkin myös tapausta, jolloin laitteistossa n vaiheiden välillä epäsymmetristäkuormitusta. Kuormituksen jakautuminen eri vaiheiden kesken ei merkittävästi vaikuttanut omissa simuloinneissa havaittuihin suodatustuloksiin. Vinokuorma aiheutti vain tiettyyn vaiheeseen normaalia suuremman kuormituksen. Joissain teoksissa kuitenkin mainitaan, että epäsymmetrinen kuorma aiheuttaisi suodattimen toiminnassa häiriötä ja mahdollisia virtahäviöitä. Omissa simulointi tuloksissa en kuitenkaan tällaista huomionut. Vinokuormituksen vaikutuksia on parempi tutkia oikean suodattimen mittauksien yhteydessä.

Epäsymmetrisen kuorman lisäksi tutkin kytkentätilan muuttumisen vaikutusta suodatukseen. KytKentätilanteen muutoksella tarkoitan tässä yhteydessä kuorman muuttumista. Kuormitus muuttui 1 sekunnin kuluttua simuloinnin alusta siten, että siihen kytkettiin lisää moottorikuormitusta.



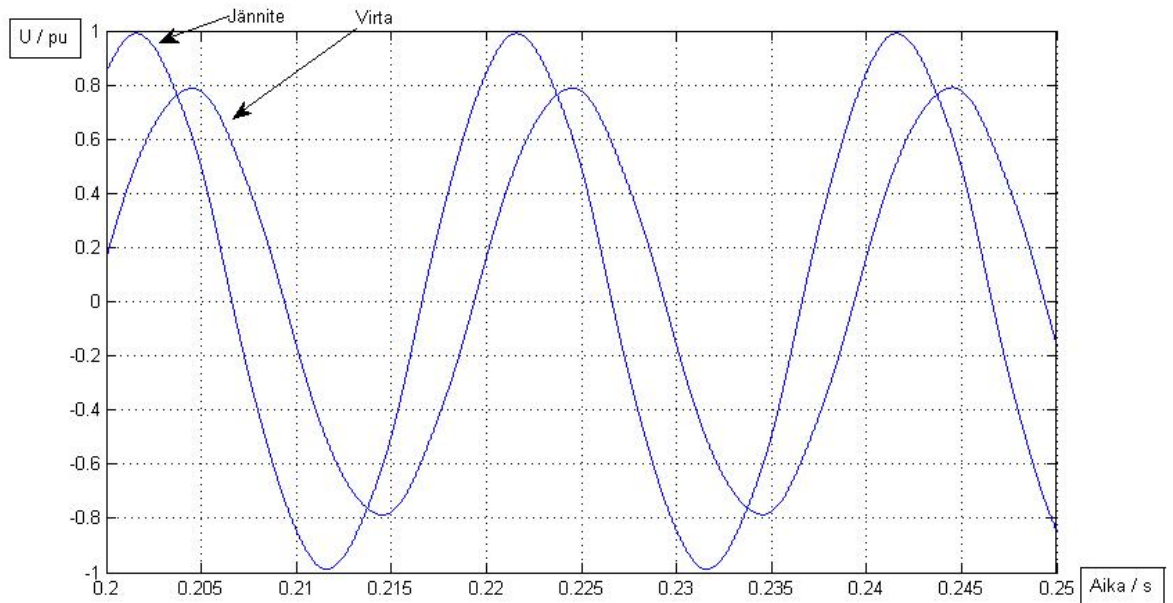
Kuvio 25. LC-suotimen lähtönaivoista mitattu signaali, kun lisäkuormitus kytkeytyy

Kuviosta 25., LC-suodattimen jälkeen on selvästi havaittavissa, kun ajan hetkellä 1 sekunti tapahtuu kytkentämuutos. Jännitteessä tapahtuu kytkennästä aiheutuva hetkellinen jännitteen alenema. Virralla vastaavasti esiintyy kytkentävirtapiikki. Lisäksi havaitaan, että jännitteen amplitudi hieman pienenee ja vastaavasti virran amplitudi kasvaa. Tämä johtuu siitä että piiri on muutostilassa jolloin piirin tarvitseman tehon täytyy siirtyä. Jännite palaa tietyn aikavakion kuluessa omaan arvoonsa ja vastaavasti virta pienenee, siten että kuormalle siirretään riittävä teho. Kytkentätilanteesta ei tehty THD-mittauksia, eikä Fourier-analyysiä sillä tulokset olisivat olleet todella huonoja, johtuen piirin muutostilasta.

6.4 LCL-suodatuksen simulointi

Tutkitaan LCL-suodatuksen vaikutusta laitteiston toimintaan. Suodatin simuloidaan samoilla kuormitus variaatioilla kuin LC-suotimella. Tällöin saadaan keskenään vertailu kelpoisia tuloksia. Mittaukset ovat otettu LCL-suodattimen jälkeen ennen kuormaa.

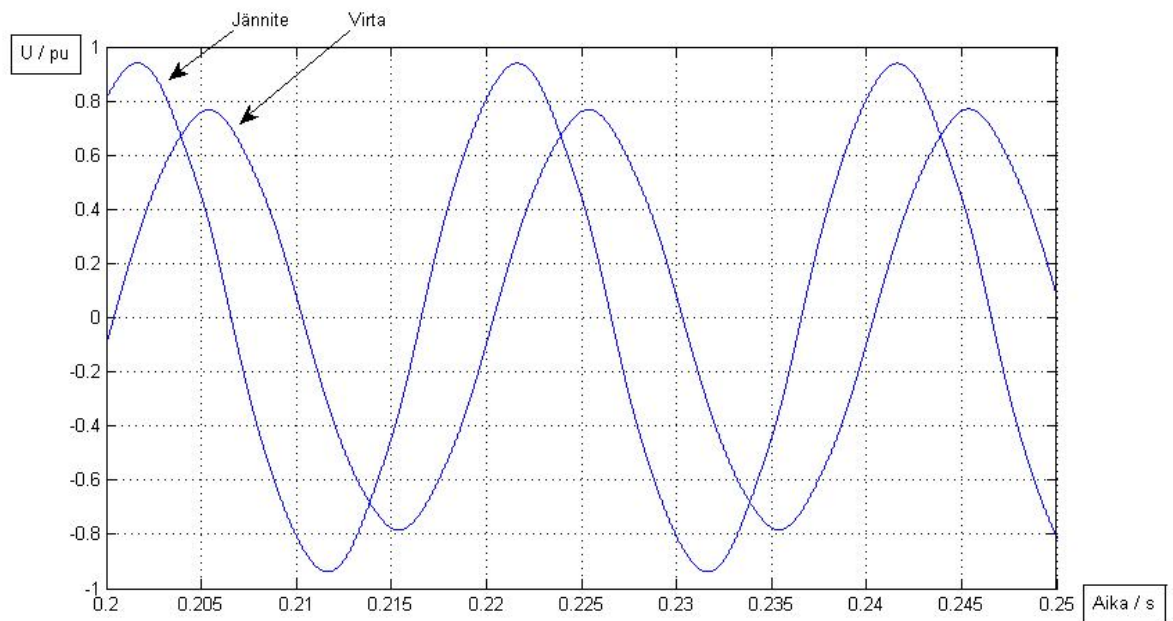
Ensimmäisenä LCL-suodatinta kuormitettiin samalla resistiivisellä kuormalla kuin LC-suodinta. Kuviossa 26. on esitettyä LCL-suodatuksen kuvaaja samalla ajan hetkellä kuin vastaava LC-suodin.



Kuvio 26. LCL-suotimen lähtönavoista mitattu jännite ja virtasignaalit, resistiivisellä kuormalla

LCL-suodattimen teho on aivan eri luokkaa kuin LC-suotimella. Suodattimen THD on 3 % ja harmonista säröä on viidettä amplitudilla 3 % ja seitsemättä amplitudilla 0,5 %. Suodattimen komponenttien todettiin laskennan kannalta olevan merkittävästi pienempiä kuin LC-suotimella ja niillä saavutetaan monia etuisuuksia. Sinisignaalin puhtauden lisäksi LCL-suotimen merkittävänä etuna on sen kyky toimia molempiin suuntiin. Suodatus vaikutus toimii täten myös molempiin suuntiin.

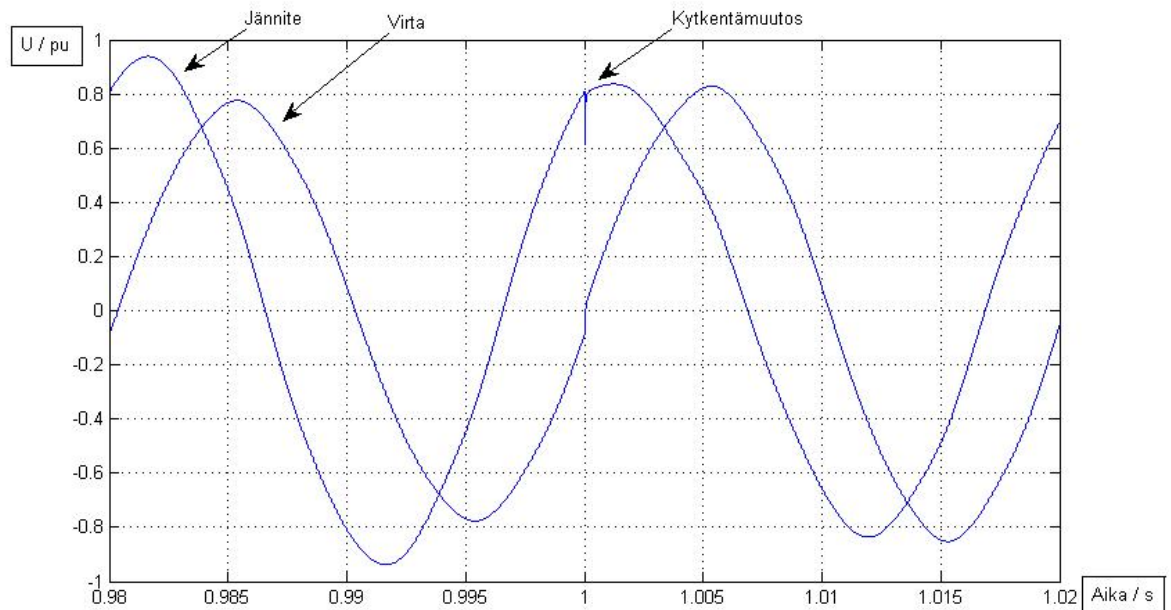
Tutkitaan seuraavaksi LCL-suodattimen toimintaa moottorikuormituksella.



Kuvio 27. LCL-suotimen lähtönavoista mitattu jännite- ja virtasignaali, moottorikuormalla

Kuviosta 27. huomataan miten puhtaana signaali säilyy vaikka kuormitus muuttui. THD on luokkaa 3,5 % ja harmonisia yliaaltoja on viidettä 4 % ja seitsemättä 0,5 %. Suodatus ei näin ollen merkittävästi huonone moottorikuorman vaikutuksesta.

Tutkitaan vielä LCL-suodattimen toimintaa kytkentätilanteessa



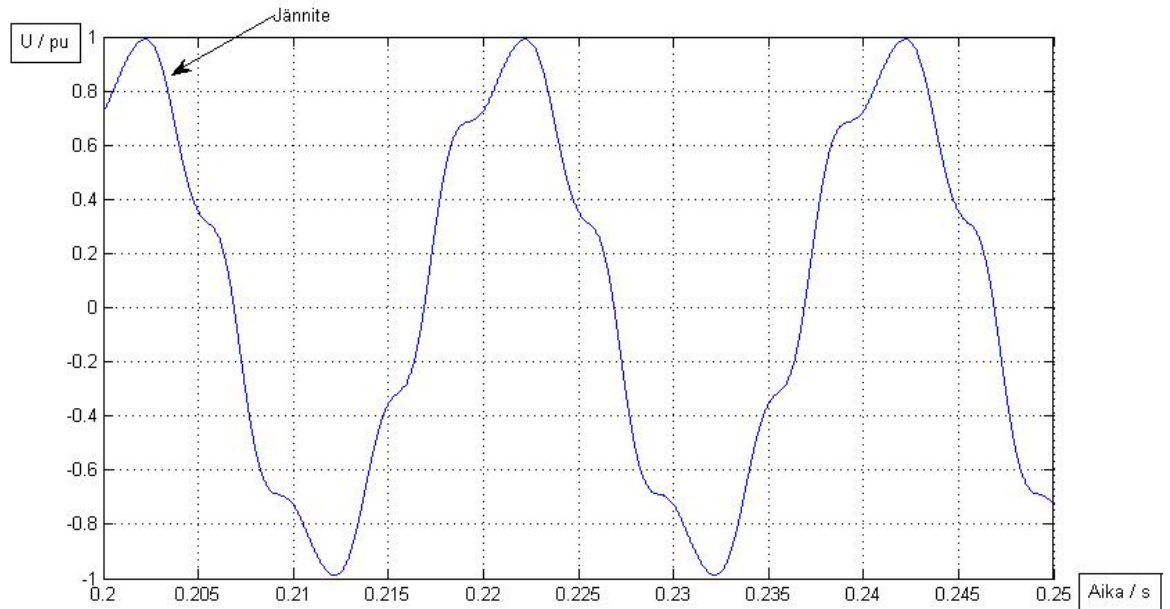
Kuvio 28. LCL-suotimen lähtöavoista mitattu kytkentätilan muutos

Kuviosta 28. huomataan selvästi kuinka LC-suotimen tapaan on jännitteen ja virran signaalissa selvästi havaittavissa kytkentäilmiön vaikutus. Kuten LC-suotimella piiri joutuu muutostilaan ja vaatii oman ajan palautuakseen normaalitilaan. Kuvion 28. perusteella voidaan kuitenkin todeta, että suodatukseen kytkennällä ei merkittäviä vaikutuksia ole.

6.5 LC-suodatus ja muuntaja

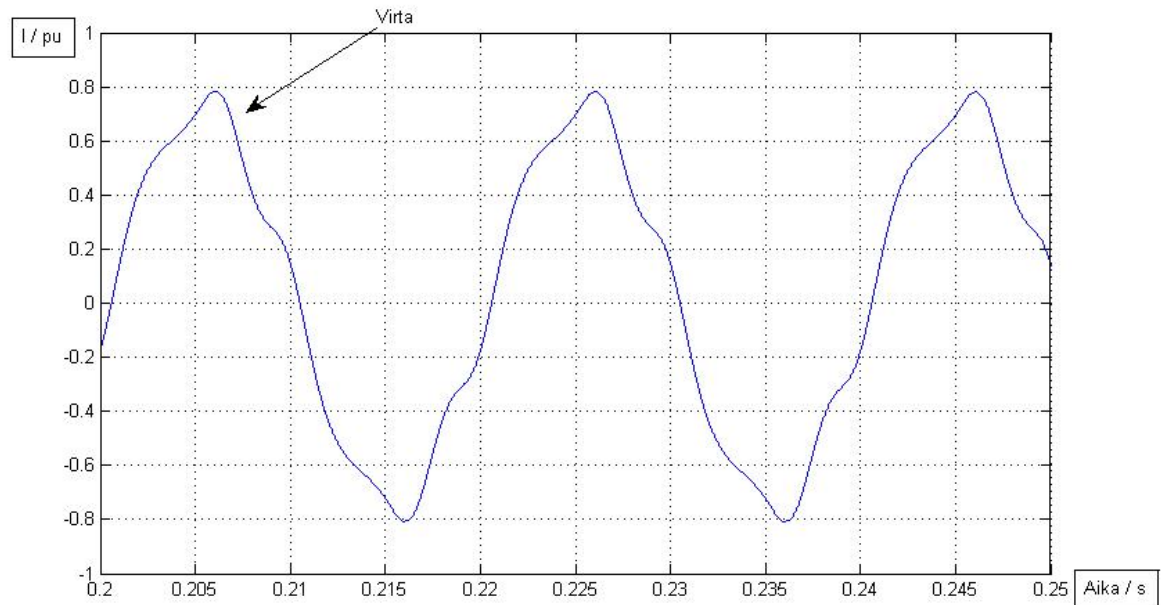
Suodattimessa tulee välttämättä olla kela, jonka induktanssi voi systeemin kannalta olla todella merkittävä. Induktanssi vaikuttaa lähinnä lähtöjännitteeseen positiivisesti, mutta sen vaikutus muuhun systeemiin saattaa olla negatiivinen. Suuret induktanssit yleensä mahdollistava pienempien kapasitanssien käytön, mutta tällöin on taas huomioitava kelassa tapahtuva jännitehäviö. Tämän vuoksi tarkastelen tapausta, jossa LC-suodattimen perään on kytketty muuntaja. Simuloimalla on helppo havainnollistaa kappaleen 4.3 teorian paikkansa pitävyyttä.

Muuntajan vaikutuksen havainnollistamiseksi tarkastella aluksi piiriä, jossa ei ole lainkaan suodatusta. Muuntaja on kytketty taajuusmuuttajan ja kuorman väliin. Mittaukset on otettu muuntajan toisiosasta ennen kuormitusta.



Kuvio 29. Muuntajan lähtöavoista mitattu suodatus ja sen vaikutus kuormajännitteeseen

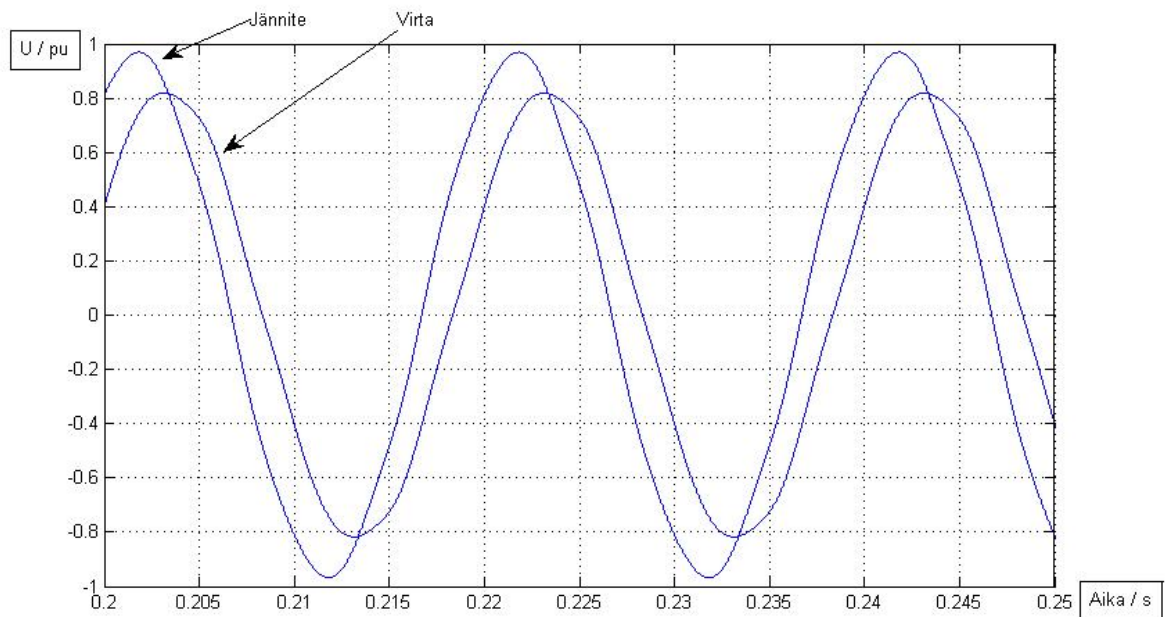
Kuviosta 29. huomataan miten paljon muuntaja itsessään vaikuttaa aaltomuotoon. Pelkällä suodattimella ei päästä aivan yhtä miellyttäviin tuloksiin kuin tapauskohtaisesti mitoitettulla vaihtosähkösuodattimella, mutta sen suodatus vaikutusta ei voi olla sivuuttamatta.



Kuvio 30. Muuntajan lähtönavoista mitattu suodatuksen vaikutus kuormavirtaan

Kuormitusvirtaa tutkittaessa kuviosta 30., havaitaan miten paljon siistimmäksi muuntaja muuttaa signaalia. Signaali on kuitenkin edelleen aaltomuodoltaan lähempänä kolmioaaltoa, kuin sinisignaalia. THDksi mitattiin 13 % ja harmonisia yliaaltoja ilmeni viidettä 15 % ja seitsemättä 4 %. Verrattuna suodattamattomaan signaaliin THD on pienentynyt 5 prosenttiyksikköä, mikä on merkittävästi kun huomioidaan, että muuntaja ei ole pääasiallinen suodatin.

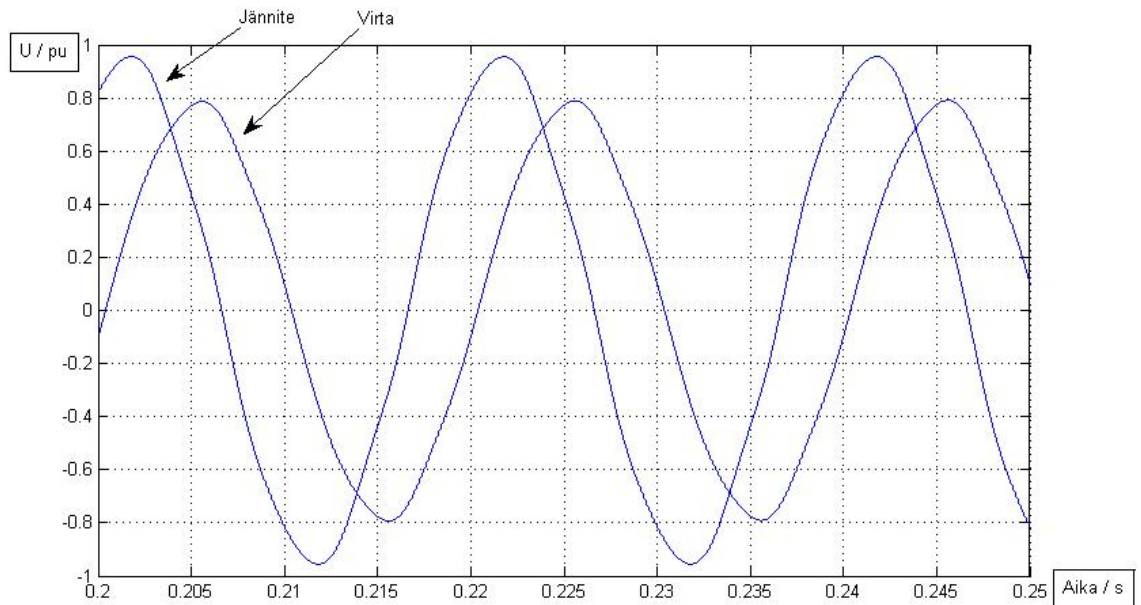
Tutkitaan seuraavaksi LC-suodattimen ja muuntajan yhteistä vaikutusta. Kuorma on resistiivinen.



Kuvio 31. LC-suodattimen ja muuntajan jälkeen mitattu, jännite ja virtasignaaliin resistiivisellä kuormalla

Kuviosta 31. havaitaan miten aaltomuoto alkaa lähennellä hyvin puhdasta sinisignaalia. Tulokset vastaavat lähestulkoon LCL-suodattimen tuloksia. THDksi mitattiin 5 % ja harmonisia yliaaltoja ilmeni viidettä amplitudilla 8 % ja seitsemättä amplitudilla 3 %.

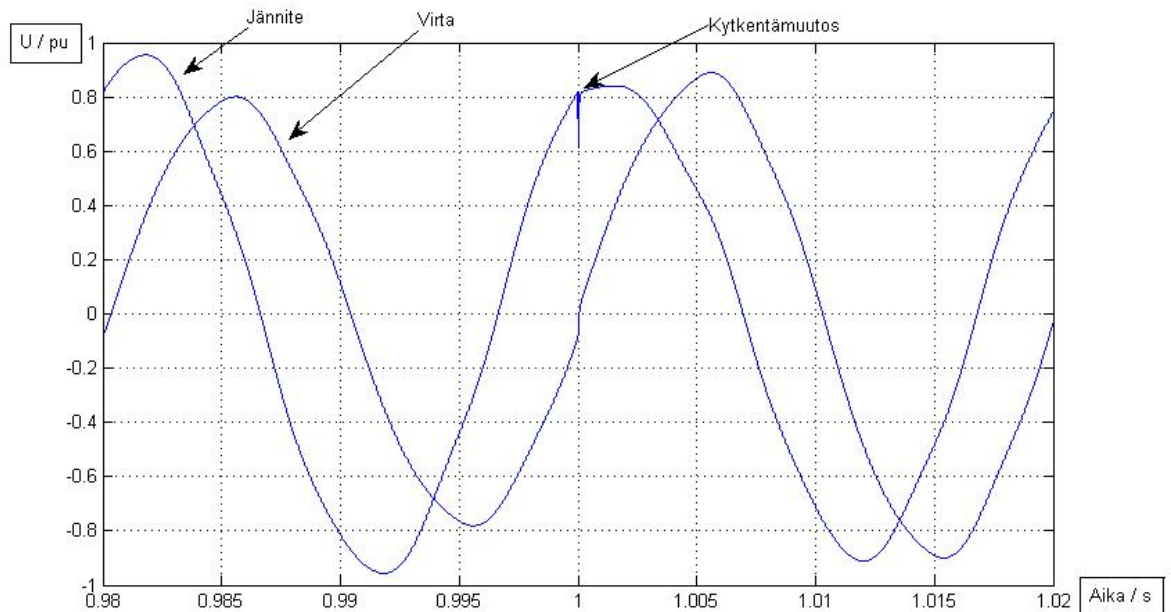
Tarkastellaan seuraavaksi miten suodattimen ja muuntajan yhdistelmä käyttäytyy moottorikuormituksella.



Kuvio 32. LC-suodattimen ja muuntajan jälkeen mitatut jännite- ja virtasignaali moottori kuormalla

Moottorikuorman vaikutus on verrattavissa LCL-suotimen vastaavaan tilanteeseen. Kuviossa 32 on selkeästi havaittavissa miten aaltomuoto säilyttää hyvin muotonsa. Lisäksi se aiheuttaa THD:tä vain 5 % ja yliaaltoja viidettä 8,5 % - ja seitsemättä 3 %-amplitudilla. Muuntajan induktanssi aiheuttaa tuloksiin hieman lisää vaihesiirtoa.

Tarkastellaan viimeisenä kytkentätilannetta



Kuvio 33. LC-suodattimen ja muuntajan jälkeen mitattu jännite ja virtasignaalit kytkentätilanteessa

Kuviossa 33. on esitettynä kytkentätilanne, joka on vastaava kuin kahdessa edellisessä suodattimen simuloinnissa. Tulokset ovat myös hyvin paljon verrattavissa LCL-suodattimen tuloksiin, jännitesignaalisissa on havaittavissa kytkennästä aiheutuva muutos, samoin virtasignaalisissa. Muutostilan jälkeen amplitudit tasoittuvat normaaleihin arvoihinsa.

Simulointien avulla on yksinkertaista todeta, kuinka muuntaja vaikuttaa suodatustuloksiin. Vaikka kappaleessa 4.3 todettiin, että suodatuksen vaikuttaa olennaisesti muuntajan kytkentäryhmä, on muuntaja joka tapauksessa eräänlainen suodin oli sen kytkentäryhmä mikä tahansa. Suodatus ominaisuuden lisäksi on syytä kiinnittää huomiota siihen, että ilman suodatusta, yliaallota aiheuttavat muuntajaan ylimääräisiä häviöitä. Nämä häviöt lämmittävät muuntajaa aivan suotta ja niukasti mitoitettu muuntaja voi pahimmassa tapauksessa jopa palaa, ellei suodatuksen tarpeellisuutta ole osattu ennakoida.

7 SIMULOINTIEN ANALYSOINTI

Tässä kappaleessa tarkastellaan simulointien tuloksia ja vertaillaan niitä keskenään. Vertailun avulla selkiytetään eri suodatusmenetelmien heikkouksia ja vahvuuksia, sekä perehdytään millaiseen tarkoitukseen mikin suodin parhaiten soveltuu. Tarkoituksena on myös tutkia suodattimien mekaanista ja sähköistä rakennetta, sekä mihin suodatusta tulevaisuudessa tarvitaan.

7.1 Suodattimien keskinäinen vertailu

Yhtenevien kuormien avulla suodattimia on mahdollista vertailla keskenään. Vertailun tarkoituksena olisi selkeyttää näkemystä siitä, millaisiin sovelluksiin kukin suodatin soveltuu parhaiten.

7.1.1 LC- ja LCL-suodatustekniikoiden vertailu

Vertailtaessa keskenään LC- ja LCL-suodatinta, tulee väistämättä ensimmäisenä mieleen laitteiston kustannukset. LC-suodatin on oivallinen siinä mielessä, että se on rakenteeltaan yksinkertainen ja verrattain helppo valmistaa. Suunnittelu perustuu yksinkertaisesti sarjaresonanssiin jolloin sen suunnittelukaan ei ole monimutkaista. LCL-suodattimen valmistaminen ei kauheasti eroa LC-suotimesta. LCL-suotimen suunnittelu onkin hieman monimutkaisempaa, sillä siinä on otettava huomioon piirin resonanssitaajuudet ja tehonvirtaus-suunnanvaihtelu.

Komponenttien määrä lisää myös suodatuksesta aiheutuvia kustannuksia. LCL-suodattimessa olevat kelat ovat puolet LC-suodattimen arvosta, mutta kustannuksia määritettäessä on hyvin todennäköistä, että kaksi pienempää kelaa on kalliimpi ratkaisu kuin yksi iso. Tämän vuoksi onkin tarkkaa miettiä millaiseen toimintaympäristöön suodatin asennetaan, minne suuntaan tehoa ajetaan, onko piirissä muuntajia, tai onko piirissä jotain muuta suodatusta heikentävää komponenttia.

LC-suodatin on rakenteensa vuoksi oiva ratkaisu laitteistoihin, joissa tehoa ajetaan vain yhteen suuntaan ja signaali saa olla hieman säröytynyt. Tällaisia kohteita ovat mm. taajuusmuuttajaohjatut moottorisytöt. LCL-suodatin on puolestaan pakollinen silloin kun tehonvirtausta tapahtuu verkosta kuormalle ja kuormalta verkolle. Suodattimella saavutetaan erinomainen suodatustulos. LCL-suodattimen käyttökohteena voi mainita taajuusmuuttajalla ohjatun pienvoimalan tehonsyötön verkkoon.

7.1.2 LCL- ja LC+muuntaja suodatustekniikoiden vertailu

LCL-suodatinta ja LC-suodin, sekä muuntaja ovat keskenään ratkaisuihin hieman huonoja vertailtavia. Ratkaisuja käytetään hyvin erilaisissa yhteyksissä. Tarkastelen tuloksia kuitenkin suodatuksen kannalta, jolloin muuntajan vaikutus selkiytyy.

LCL-suodattimen simuloinnissa totesin, että suodatus toimii monin verroin paremmin kuin yksinkertaisempi LC-suodin. LC-suodin muuntajan kanssa kuitenkin alkaa lähennellä LCL-suotimen tehokkuutta. Siirtoverkoissa on säännöllisesti muuntaja osana verkkoa. Mikäli tavalliseen siirtoverkkoon haluttaisiin muuntaja, esimerkiksi tavalliselle PJ-asiakkaalle, niin täten kannattava ratkaisu muodostuu LC-suodattimesta ja jakelumuuntajasta. Ongelma tilanteita ei pääse syntymään, sillä PJ-asiakas pääasiallisesti vain kuluttaa energiaa, ei tuota sitä. Mikäli kuitenkin asiakas alkaa tuottaa itse energiaa, tulee ongelmia. Cargotecin konttilukissa ei ongelmia pääse syntymään, koska tehoa ei virtaa kuin kuorman suuntaan.

7.2 Mekaaninen kokonaisuus

Suodatin on yksinkertainen laite, jossa ei ole liikkuvia osia. Ne ovat sähköteknisistä peruskomponenteista koottuja laitteita. Niissä käytetään yleisesti pelkkiä passiivisia komponentteja, sekä erikoistapauksissa joitakin suojalaitteita. Suodatinta voi mekaanisena kokonaisuutena verrata, vaikka oikosulkumoottoriin tai ilmajäähdytteiseen muuntajaan. Mekaanisesti suodattimesta löytyy kuten moottorista liitäntänaulat syötöille, tulo- ja lähtöpuolille erikseen. Laitteisto on koottava siten, että se voidaan SFS-standardin mukaisesti koteloida ja kosketussuojata. Tutkin tässä kappaleessa konttilukkiin sijoitettavaa laitteistoa. Tuloksia ei voi konestandardien määräysten vuoksi suoranaisesti voi verrata verkkoon liitettävään suotimeen. Tietoja voi kuitenkin pitää suuntaa-antavina.

7.2.1 Paino

Oikosulkumoottorin tavoin suodattimen paino on hyvin pitkälti sidottu tehoon. Tehon kasvaessa myös paino kasvaa, ja sama toimii toisinpäin. Suodatuksen teho on tiukasti sidottu kelan induktanssiin. Induktanssin kasvaessa, kasvaa myös suodatuksen tehokkuus. Induktanssin kasvu lisää väistämättä kelan kokoa ja painoa.

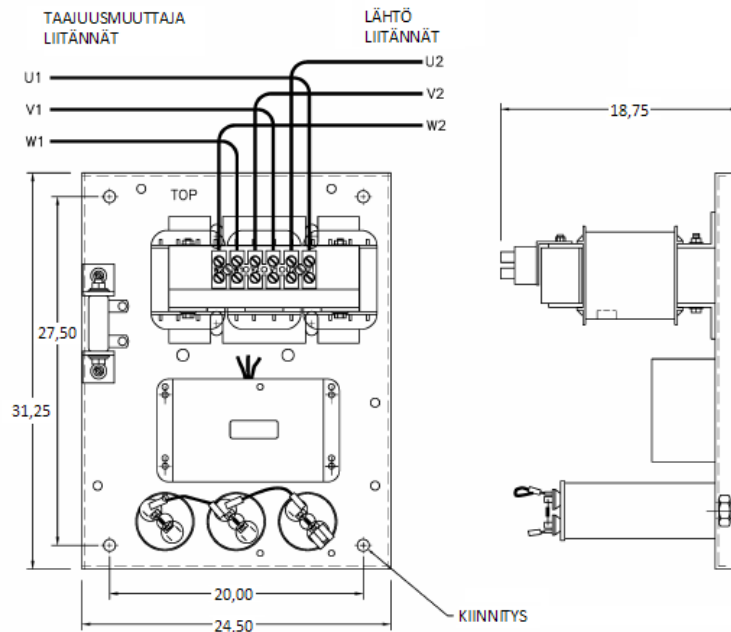
Oikosulkumoottorin tapaan, suurempi tehoinen kokonaisuus myös painaa enemmän, juuri teho painosuhteen vuoksi.



Kuvio 34. MTE Corporation valmistama tyypillinen vaihtosähkösuodatin

Kuviossa 34. on esitettynä Yhdysvaltalais- valmisteen vaihtosähkösuodatin. Suodatin on tyypiltään perinteinen LC-alipäästösuodatin. Suodatin on suunniteltu kytkettäväksi PWM-taajuusmuuttaja lähtöön. Tutkin suodatinlaitteistoa yleiseltä rakenteeltaan MTE:n valmistaman suodattimen datalehden avulla (kts. liite 4).

(MTE Group, Vaihtosähkösuodattimen datalehti)



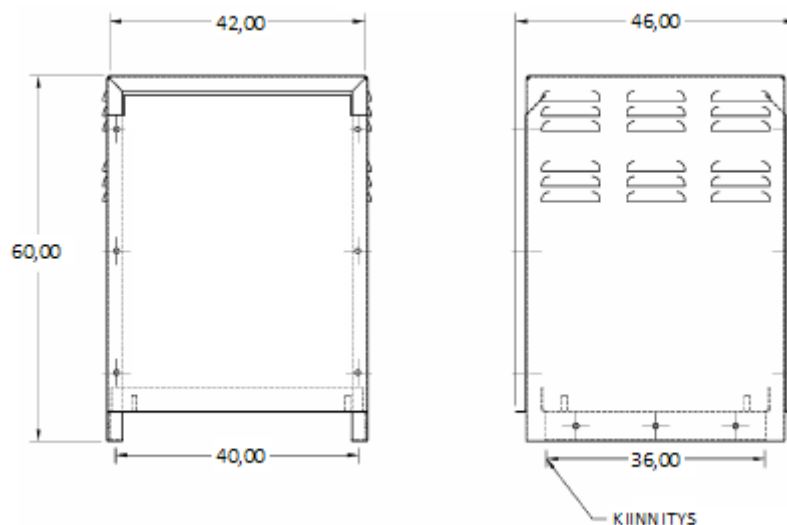
Kuva 35. MTE Corporation suodatinlaitteen mittapiirros

Kuviossa 35. on esitettynä tyypillisen suodattimen mittapiirustus (mitat muutettu senttimetreiksi). Siitä selviää laitteen liitännät ja kiinnityspisteet. Kuvion suodatin on pienitehoinen, joka on huomattavissa asennusmitoista. Vastaavasti tehon kasvaessa laitteen ulkomitat kasvavat, kun kelojen koko kasvaa ja kondensaattoreita asennetaan enemmän riittävän kapasitanssin saavuttamiseksi.

(MTE Group, Vaihtosähkösuodattimen datalehti)

7.2.2 Ulkomitat ja kotelointi

Suodattimen suodatuksen parantamiseen tarvitaan tehon kasvaessa enemmän rautaa ja kuparia. Fyysinen koko aiheutuu pääasiassa keloista, koska tehon kasvaessa, myös induktanssi väistämättä kasvaa. Kondensaattoritkin vaativat jonkin verran tilaa, sillä usein kapasitanssi kootaan useista pienemmistä kondensaattoreista kytkemällä niitä riittävä määrä rinnan.



Kuvio 36. Suodattimen tyypillinen kotelointi

Kuvion 36. perusteella laitteiston koko kasvaa entisestään, kun siihen asennetaan kotelointi. Koteloinnin seurauksen suodattimen jäähdytys heikkenee ja jäähdytystuuletin tulee tarpeelliseksi. Konttilukissa varsinkin tulee ottaa huomioon suodattimen jäähdytys, koska laitteet operoivat myös hyvin lämpimissä maissa. Liitteenä 4 MTE:n valmistaman suodattimen tyypillinen datalehti, josta nähtävissä eri laitekokojen mittoja.

(MTE Group, Vaihtosähkösuodattimen datalehti)

SFS 6000 sähköstandardin mukaan laitteisto veloitetaan koteloitavaksi jännitteisten osien läheisyydestä vähintään IP2X suojausluokan mukaisesti. Mikäli laitteistoon on sijoitettu siten, että kaikki henkilöt, mukaan lukien lapset pääsevät on sovellettava konestandardin kohtaa 60204-32-6.2.2 kohtaa ja muutettava kotelointia vähintään IP 4X luokkaan. Koteloihin pääsy edellyttää kannen tai luukun avaamista. Kotelon avaamiseen vaaditaan erillinen avain, jota saa konestandardin mukaan käyttää vain ammattitaitoinen

tai siihen opastettu henkilö. Laitteiston huoltoon on myös kiinnitettävä erityistä huomiota, siihen perehdytään lisää kappaleessa 7.3.7.
(SFS 6000-4-41A) (SFS EN 60204-32-6.2)

7.3 Sähköiset ominaisuudet

Mekaanisen rakenteen lisäksi tutkin myös suodattimen sähköisiä ominaisuuksia. Tarkoituksena on perehtyä laitteiston aiheuttamaan EMC säteilyyn, hyötysuhteeseen, ympäristön vaikutusten huomioimiseen ja huoltoon sekä käyttöön. Tarkastelussa käytän apuna konestandardin SFS EN 60204 määräyksiä ja MTE:n valmistaman suodattimen datalehteä.

7.3.1 EMC yhteensopivuus

Suodatin on aiheuttaa yksittäisenä laitteena magneettisia häiriöitä. Nämä häiriöt syntyvät keloista jotka aiheuttavat ympärilleen magneettikentän, kun niiden läpi johdetaan virtaa (kts. Liite 1). Häiriöiden määrä kasvaa tehoon verrannollisena.

Konestandardi on määritellyt yleisesti, että laitteisto ei saa aiheuttaa sähkömagneettista häiriötä, joka ylittää ympäristölle sallitut raja-arvot. Lisäksi laitteistolla tulee olla siedettävä häiriön sietokyky, jotta se toimisi oikein sille tarkoitettussa ympäristössä.

Laitteistossa aiheutuvaa sähkömagneettista säteilyä on mahdollista vähentää erilaisilla toimenpiteillä. Kotelon suunnittelulla voidaan mm. vähentää radiotaajuisien häiriöiden säteilyä. Häiriöitä voidaan vähentää myös käyttämällä EMC-johdotusta, kierrettyä johdinparia tai kuljettamalla johtimia mahdollisimman lähellä maapotentiaalia. Konttilukissa on kiinnitettävä huomiota EMC-yhteensopivuuteen, koska koneessa on laitteistoja joiden toiminta häiriintyy ylimääräisestä EMC säteilystä.

(SFS EN 60204-32-4.4.2)

7.3.2 Hyötysuhde ja häviöt

Suodatin ei ole ideaalinen laite, jolla ei ilmene häviöitä. Suodattimen suunnittelussa pyritään aina kuitenkin minimoimaan häviöt ja parantamaan hyötysuhdetta.

Suodattimen häviöt muodostuvat pääasiallisesti keloissa, jotka lämpenevät, virran neliöön verrannollisena. Lämpiyminen aiheutuu kelaan käämityssä kupari johtimessa, jolla on jokin resistanssi. Ohmin lain mukaisesti lämmittävä teho on tällöin yhden vaiheen osalta

$$P = I^2 \cdot R \quad (30.)$$

(Ahoranta, 2005)

Johtimen lämmitykseen kuluva teho on häviötehoa, jonka suodatin vaatii toimiakseen. Suodattimessa ilmenevät kondensaattoritkaan eivät ole ideaalisia, vaan niissä esiintyy vuotovirtaa eristekerrosten lävitse. Tämä kondensaattoreissa ilmenevä vuotovirta on kuitenkin niin mitätöntä verrattuna kelojen aiheuttamaan lämmitykseen kuluttama teho, ettei sitä tarvitse huomioida.

(Honkanen, BY-PASS_kondensaattorit)

Suodatinlaitteistojen hyötysuhde on yleisesti lähellä 0,98. Suodatinta voisi sähköisten ja mekaanisten ominaisuuksien puolesta verrata vaikka taajuusmuuttajaan, jolla on myös suhteellisen hyvä hyötysuhde. Suodattimen laskenta kaavassa ilmoitettu 10 % jännitteen aleneman mukaan laskettuna suodattimelle saadaan hyötysuhteeksi luokkaa 0,99. Simuloinneissa päädyttiin samankaltaisiin tuloksiin. Kuviossa 37. on ilmoitettuna MTE Corporationin valmistaman suodattimen hyötysuhde ja häviötehot laitteen nimellisvirralla.

Filter	440 - 480 VAC, 60 Hz Filter Ratings		550 - 600 VAC, 60 Hz Filter Ratings	
	Maximum Output Amps RMS	Efficiency (Typical) (%)	Power Dissipation @ Rated Current (Typical) (Watts)	Efficiency (Typical) (%)
9	98.26	128	98.31	155
12	98.35	162	98.54	177
17	98.90	151	98.73	219
22	98.72	229	98.86	253
27	99.01	216	98.92	295
35	99.08	262	99.08	323
45	99.01	360	98.93	489
55	98.97	457	99.04	535
65	99.13	454	99.01	650
80	99.08	596	99.00	806
110	99.01	878	99.09	1014
130	99.20	836	99.12	1157
160	99.23	996	99.02	1589
200	99.20	1286	99.35	1315
250	99.29	1424	99.34	1655
305	99.31	1701	99.27	2237
365	99.37	1841	99.32	2489
415	99.40	2021	99.26	3098
515	99.29	2944	99.33	3229
600	99.24	3698	99.38	3406
720	99.33	4133	99.44	3935

Kuvio 37. MTE Corporationin valmistaman suodattimen hyötysuhteet ja häviötehot

Tarkasteltaessa kuviota täytyy huomioida, että suodatin on valmistettu Yhdysvaltojen markkinoille ja näin ollen taajuus on 60 Hz. 60 Hz järjestelmään verrattessa on huomioitava, että suodattimen komponenttiarvot ovat erilaiset kuin vastaavalla 50 Hz laitteistolla. Tämä on havaittavissa kappaleen 4.1 kaavoista 23. ja 24. Taulukko toimii kuitenkin suuntaa-antavana ja näin ollen sen avulla saa käsityksen suodattimen hyötysuhteesta ja häviöistä.

(MTE Group, Vaihtosähkösuodattimen datalehti)

7.3.3 Suojaus

Vaihtosähkösuodatinta koskevat samat standardit ja säännökset kuin mitä tahansa muuta sähköistä toimilaitetta. Sähköstandardin SFS 6000-4-41 todetaan, että suojaus on toteutettava siten että suodattimesta ei aiheudu ulkopuoliselle sähköiskun vaaraa Suodin on myös suojattava kosketukselta, siten että ihminen ei omalla huolimattomalla toiminnallaan altistu sähköiskulle. Lisäksi tulee ottaa huomioon ympäristön olosuhteet ja niiden vaikutus laitteiston suojaukseen. Konestandardin määrittelee erikseen konttilukille EN 60204-32-6 kappaleessa vaatimukset laitteiston suojaamiseen. Yleisesti konestandardi määrittää laitteiston suojauksen hyvin tarkoin, jotta mahdollisilta henkilövahingoilta vältyttäisiin. Standardissa mainitaan myös jäännösjännitteet, joihin

on suodattimessa kiinnitettävä huomiota. Laitteen huollossa laitteen täytyykin antaa seistä tovin, ennen kuin huoltotoimenpiteisiin voidaan ryhtyä. Sähkömagneettiselta säteilyltä pyritään suojautumaan niin tehokkaasti, ettei suodatin säteile haitallisia radiotaajuisia säteitä, siten että niistä aiheutuisi vaaraa ihmiselle tai muille toimilaitteille.

(SFS-60204-32-6)

Jäännösjännitteiden ja ylijännitteiden vuoksi suodattimeen on laitettava niistä varoittavia kylttejä ja tarroja. Suodattimen koteloinnin oveen on liitettävä kyltti, jossa on maininta ylijännitteestä ja sähköiskun vaarasta. Lisäksi laitteeseen on jännitteisten osien läheisyyteen asetettava varoitustarroja. Varoituskylttien ja – tarrojen avulla on tarkoitus varoittaa käyttäjää ja huoltajaa, sähköiskun varalta.

Suodatinlaitteistoon tulee myös asentaa mahdollisia ylivirtoja vastaan suojaus. Suojaus voidaan toteuttaa joko rele tai sulakesuojauksella. Suojaustavan valinta riippuu hyvin pitkälti millaisiin olosuhteisiin laite asennetaan. Suojauksella suodattimen käyttöikä pitenee ja sen vikaantuminen vähenee, kun se on tarkoituksen mukaisesti suojattu.

Lämpeneminen ja siltä erikseen suojautuminen on tapauskohtaista. Mikäli laite sijoitetaan laitteeseen joka joutuu toimimaan erittäin lämpimissä olosuhteissa, täytyy suodatinta suojella ylilämmöltä. Ylilämmöltä suojautuminen vaatii joko tehostetun ilmankierron tai nestejäähdytyksen. Lämpö on yksi pahimmista sähkölaitteiden vaurion aiheuttajista, joten siihen on myös panostettava.

(Sähköpostikeskustelu, Jari Mäkelä, Cargotec)

7.3.4 Ikääntyminen ja tärinä

Suodattimen tulisi kestää koko lukin käyttöiän ajan toimivana. Suodatin ei varsinaisesti vanhetessaan huonone, muutamat seikat kuitenkin saattavat lyhentää suodattimen elinikää. Ylikuormitukset ovat suodattimen kannalta haitallisia. Suuret ja pitkäkestoiset ylikuormitukset heikentävät suodatustehoa. Ylikuormituksen aiheuttama virta kuormittaa kuparijohtimia kaavan 30 mukaisesti, jolloin lämpötila kasvaa rajusti. Lämpötilan kasvu saattaa aiheuttaa pysyviä muutoksia kuparijohtimen resistanssiin ja näin ollen heikentää suodattimen toimintaa.

Konttilukin toiminta ympäristö satama-alueella ei ole tasainen. Epätasainen alusta aiheuttaa jousittamattomaan työkoneeseen haitallista tärinää. Suodatinyksikkö tulee kiinteänä asennuksena lukin yläruntoon, jolloin myös siihen kohdistuu suuria tärinöitä. SFS EN 60204-32-4.4.8 pykälän mukaan laitteet tulee suunnitella, siten että ne kestävät tärinän ja iskujen aiheuttamat rasitukset. Suodatin on näin ollen asennettava kumityynyjen varaan, jotta suurimmat iskut hieman vaimenisivat. Lisäksi jokaisen huollon yhteydessä on tarkistettava, että liitokset ovat säilyttäneet oikean tiukkuutensa. Laitteistossa tosin käytetään huoltovapaita jousiliittimiä, jotka vapauttavat suodatinlaitteiston liitosten tarkastamiselta.

(SFS EN 60204-32-4.4.8)

7.3.5 Ympäristö, lämpötila ja jäähdytys

Suodatin asennetaan laitteeseen, jota markkinoidaan ympärimaailmaa ja näin ollen sen tulee kestää hyvin erilaisia käyttöympäristöjä. Konttilukin suodattimen on toimittava standardin esittämän vähimmäisvaatimuksen mukaan 0 °C ...40 °C lämpötila-alueella. Mikäli olosuhteet ovat erittäin kuumat tai vastaavasti todella kylmät, tällöin on tarpeellista tehdä lisätoimenpiteitä. Konestandardin EN 60204 mukaan sähkölaitteiston tulee toimia oikein suhteellisen kosteuden ollessa 50 % enintään 40 °C lämpötilassa. Alemmissa lämpötiloissa voidaan sallia suhteellisen kosteuden kasvaminen. Kondensoitumisen haitalliset vaikutukset on pyrittävä välttymään oikealla suunnittelulla ja muilla mahdollisilla lisätoimenpiteillä. Suodatin on lisäksi suojattava siten että mikään kiinteä tai nestemäinen aine ei pääse vahingoittamaan laitteistoa. Laitteiston toiminnassa ei saa esiintyä häiriöitä alle 1000m korkeudessa merenpinnasta.

(SFS EN 60204-32-4.4.3) (SFS EN 60204-32-4.4.4, sekä 5 ja 6)

Vaativiin olosuhteisiin, varsinkin erittäin lämpimiin on syytä kiinnittää huomiota suodattimen riittävään jäähtymiseen. Suodatin on rakennettu koteloon joka oletetaan asennettavaksi tehdas olosuhteisiin, joiden tyypillinen mitoitus lämpötila on 40 °C. Suodattimessa saattaa jo tässä lämpötilassa olla tarvetta erillisjäähdytykselle, joten erityisen lämpimiin oloihin vaaditaan erikoisratkaisuja esim. nestejäähdytys tai jokin muu vastaava. Erittäin kylmissä oloissa laitteeseen saatetaan vaatia toimilaitteille

lisälämmityksiä, jotta toiminta oli normaalia. Kylmät olot eivät kuitenkaan haittaa suodattimen toimintaa.

(Sähköpostikeskustelu, Jari Mäkelä, Cargotec)

7.3.6 Käyttöönotto ja mittaukset

Suodatinlaitteisto tulee aina asentaa, käyttöönottaa ja mitata, ennen kuin konttilukki voidaan toimittaa asiakkaalle. Laitteisto asennetaan kiinteästi lukkiin joko suoraan koneen runkoon tai elastisten kumityynyjen päälle. Mikäli laite asennetaan suoraan koneen runkoon, tulee suodattimen pohjalevyn ja koneen rungon väliin levittää lämmönsiirtävää ainetta. Runkoon asennettuna laitteessa syntyvä lämpö poistuu paremmin laitteesta koneen runkoon, vastaavasti haitta puolena on tärinöiden aiheuttamien vahinkojen suhteellinen kasvaminen. Laitteiston saa asentaa runko rakenteeseen asentaja, mutta sähköisesti sen saa kytkeä vain alan ammattilainen. Ammattiasentaja osaa kytkeä laitteen piirustusten mukaisesti.

Suodatin tarvitsee käyttöönottaa ennen laitteen toimittamista asiakkaalle. Suodattimen toiminnan kannalta käyttöönotossa tulee varmistaa, että taajuusmuuttajaan on asetettu kytkentätaajuus, jolle suodin on alun perin mitoitettu. Seuraavaksi tulee tarkistaa, että maadoitukset on kytketty asianmukaisesti. Maadoitusten tarkastuksessa tulee kiinnittää erityistä tarkkuutta liitoksiin jotka saattavat kärsiä lukkiin kohdistuvasta tärinästä. Tarkastetaan vaihejärjestys niin taajuusmuuttajan kuin kuorman puolella. Ensimmäinen suodattimen käynnistys suoritetaan ilman kuormaa. Tällöin mitataan mittalaitteella, jännitteet ja tarkistetaan vaihejärjestys, niin taajuusmuuttajan, kuin suodattimen lähtönavoista. Tyhjäkäynti kokeen jälkeen laitteiston annetaan seistä n. 15 minuuttia, jolloin kondensaattorien varaus purkautuu riittävän pieneksi. Tässä vaiheessa kytketään kuormitus suodattimen perään ja voidaan suorittaa koe kuorman kanssa. Mikäli laitteisto toimii kuormakokeella moitteetta, voidaan laitteelle suorittaa normaalit kuormituskokeet.

(MTE Group, Vaihtosähkösuodattimen datalehti)

7.3.7 Huolto ja vikatilanteet

Suodatin on laite, joka kaipaa hyvin vähän huoltoa ja ylläpitoa. Asennettaessa sen on tarkoitus toimia ilman huoltoa koko konttilukin eliniän ajan. Suodatinta ei siis huolleta erikseen. Vikaantuessa suodattimeen voi tehdä perusmittauksia, joilla selvitetään laitteiston tilaa. Mittaukset voi suorittaa tavallinen asentaja, kunhan tämä toimii ohjeiden mukaisesti.

Vikatilanteessa huoltajan on varmistuttava laitteiston jännitteettömyydestä, jotta sähköiskun vaaralta vältytään. Seuraavaksi huoltajan on varmistuttava että laitteiston kondensaattoreissa ei ole varausta. Paras tapa varmistua asiasta on odotella n. 15 min laitteiston pysäyttämistä. Varauksen voi myös purkaa pikaisesti siten, että katkaise syöttöjännitteen ja kytkee tämän jälkeen kuormituksen päälle. Vikaantuneen suodattimen mittaaminen kannattaa aloittaa tarkistamalla liitosten tiukkuus. Johdotuksista kannattaa tarkistaa kunto ja läpivientien kohdalta erityisesti hankaumat. Lopuksi mitataan kelojen resistanssit ja kondensaattoriparistojen kapasitanssit.

Suodattimen rikkoontuminen pitäisi teoriassa olla helposti havaittavissa. Mikäli jostakin suodattimen vaiheesta hajoaa kondensaattori, tällöin kolmivaiheinen suojalaite laukeaa. Mikäli yhden vaiheen kela vikaantuu, tällöin koko vaihe ei siirrä tehoa kuormalle. Tämä havaitaan laitteiden toimimattomuutena tai releiden toimintana. Käytännössä kuitenkin laitteet saattavat toimia jossain määrin, jolloin suodattimen vikaantuminen saattaa aiheuttaa suurempia vikoja muissa toimilaitteissa.

Vikaantuessaan suodattimen toiminta muuttuu ja suojalaitteet toimivat. Toiminnan muuttuminen riippuu hyvin pitkälti siitä, kumpi komponentti laitteessa vikaantuu. Suodattimen vikaantumista tarkastelen kolmivaiheisesti. Mikäli suodattimen jonkin vaiheen kondensaattori vikaantuu, muuttuu suodatinpiiri galvaanisesti johtavaksi. Kondensaattorin muuttuessa johtavaksi, syntyy oikosulku, jolloin joko suodattimen omien tai konttilukin sähköverkkoa suojaavien sulakkeiden tulee toimia. Tässä tilanteessa suojaus ajaa kolmivaiheisen laitteen alas. Kelan vikaantuessa, yksi vaihe katoaa systeemistä kokonaan. Piiriin jäänyt kondensaattori pyrkii pitämään teho tasapainoa yllä ja aiheuttaa pienen ylijännitteen kelan johtimen katketessa. Kondensaattorin energiamäärä on kuitenkin rajallinen ja se ei pysty pitämään laitteistoa

montaa sekuntia toiminnassa. Yhden vaiheen pudottua pois, toimii relesuojaus ja katkaisee syötön jokaiselta vaiheelta. Edellä mainitut viat ovat kuitenkin hyvin harvinaisia, mikäli laite on mitoitettu oikein ja komponenteissa ei ole valmistusvikoja.

Suurimmat suodattimet ovat rakenteeltaan moduulimaisia, jolloin niihin voi vaihtaa yhden komponentin kerrallaan. Pienemmät suodattimet ovat kuvion 37. mukaisia, niiden korjaaminen ei onnistu paikan päällä.

(Sähköpostikeskustelu, Jari Mäkelä, Cargotec)

7.4 Suodatuksen tarve tulevaisuudessa

Tulevaisuuden ennustaminen on aina hankalaa, mutta hyviä arvauksia voi aina tehdä. Tarkoituksena olisi pohtia miten suodatuksen tarve muuttuu, niin konttilukissa kuin jakeluverkossakin. Tiedot suodatuksen tulevaisuuden näkymistä on kartoitettu verkkoyhtiöiden koosteista, jotka koskevat sähköverkkojen tulevaisuuden haasteita.

Konttilukissa kuormituksen tulevat muuttumaan jatkuvan teknisen kehityksen myötä. Kehityksen muuttuminen saattaa lisätä suodatuksen tarvetta aina kun uusia muutoksia laitteistoon tehdään. Vastaavasti uudet laitteet, kuten taajuusmuuttajat saattavat kehittyä siten että niiden syöttämä jännite on jo valmiiksi suodatettua.

Jakeluverkon kuormitukset muuttuvat vastaavalla tavalla. Verkkoon liitetään jatkuvasti lisää hajautettua sähköenergian tuotantoa ja epälineaaristen kuormitusten määrä kasvaa jatkuvasti. Tällaisten kuormatyyppien lisääntyminen kuormittaa verkkoa ja sen laitteita turhaan. Kuormittumisen vuoksi verkon viat lisääntyvät ja sähkönjakelu asiakkaille heikkenee. Suodatuksella näitä tulevaisuuden häirtatekijöitä voitaisiin torjua tehokkaasti jo ennakkoon. Hajautettujen energiantuottajien on pakollista hankkia suodatus, jotta heidän verkkoon syöttämä sähköenergia täyttäisi standardien mukaiset vaatimukset. Vastaavasti tehtaiden epälineaarille kuormituksille on olemassa aktiivisuodattimia, jotka osaavat muuttaa suodatustaan kuormituksen vaihteluiden mukaan. Tällöin verkkoa ei turhaan kuormitettaisi ja sähkönjakelun säilyisi entisellään tai jopa hieman paranisi.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkintotyössäni perehdyin taajuusmuuttajan aiheuttamiin sähkönlaatu ongelmiin, sekä niiden matemaattiseen määrittelyyn. Tutkintotyön tarkoituksena oli tutustua laskennan ja MATLAB-simulaatioiden avulla erilaisten suodatintopologioiden mallintamiseen ja vertailuun. Lopuksi pohdin hieman suodatukseen liittyviä yleisiä asioita, kuten mekaanisia ja sähköisiä asioita, suojausta, käyttöönottoa ja käyttöä, sekä huoltoa. Simulointien ja tulosten tarkastelun kautta vaihtosähkösuodatuksen tarpeellisuus erilaisissa kohteissa on tullut selväksi.

Suodatuksen matemaattinen mallintaminen on esiteltyjen kaavojen mukaan yksinkertaista. Asia ei kuitenkaan ole näin. Suodatuksen toimivuuteen vaikuttaa laitteiston jokainen komponentti. Lisäksi sähköverkko on tunnettava perinpohjaisesti, jotta suodatuksen mitoituksessa osataan ottaa kaikki tarpeellinen huomioon. Haasteelliseksi suodatuksen mitoittamisesta teki se, että aiheesta ei ole kirjoitettua tekstiä juuri lainkaan. Parhaana lähdekirjallisuutena toimi muutama ulkomainen tehoelektroniikkaa käsittelevä oppikirja. Lähdemateriaalin niukkuus ja uusi tekniikka loivat haastetta suodattimen mitoitukseseen. Pelastus tähän ehdinkoon tuli työn tilaajan puolelta, kun tarjoutui tilaisuus päästä keskustelemaan suodattimia ammatiksi valmistavana Trafotek Oy:n asiantuntijoiden kanssa.

Matemaattisen perustan ollessa kunnossa, simulointien tuloksiin saattoi luottaa. Erilaisten suodatintopologioiden simulointi oli helppoa, mutta itse simulointi mallin rakentaminen tuotti ongelmia. Malli luotiin konttilukin sähköverkkoa vastaavaksi, jolloin sen pitäisi periaatteessa vastata täysin oikeaa lukkia. Näin asia ei kuitenkaan aivan, ole sillä malli ei huomioi johtimien vaikutusta, kuormat ovat passiivisia ja vaatisivat takaisinkytkentöjä, jotta malli todella vastaisi oikean lukin sähköistyksiä. Työn tarkoituksena ei kuitenkaan ollut täysin mallintaa lukin sähköverkkoa, vaan mitoittaa suodin ja simuloida sen toimintaa.

Simulaatiomallin rakentaminen vei viikkoja ennen kuin tulokset olivat haluttuja. Simulaatioiden avulla saatujen kuvaajien avulla suodatintopologioita oli helppo analysoida. Simuloinnit suoritettiin vielä samoilla kuormituksilla, mikä mahdollisti

suodatintopologioiden keskinäisen vertailun. Vertailujen avulla oli tarkoitus ilmaista eri suodattimille sopivia käyttökohteita.

Suodattimien rakennetta tarkasteltaessa perehdyin tarkemmin laitteeseen fyysisenä kokonaisuutena. Suodattimesta kävin lävitse mekaanisesti ja sähköisesti. Tarkoituksena oli selkiyttää lukijalle suodatinta sähköteknisenä laitteena. Tässä yhteydessä suurena apuna oli MTE:n valmistaman suodattimen datalehti, jonka avulla oli helppoa peilata tuloksia ja havaittuja asioita oikeaan suodattimeen.

Tutkintotyön kantavana voimana oli MATLAB-ohjelmisto, joka helpotti suodattimien simulaatioiden tekemistä ja yleisesti suodattimiin tutustumista. Ilman ohjelmistoa matemaattisesti mallintamalla eri suotimia olisi tullut pitkiä työpäiviä opiskelun ohessa. Pelkän siirtofunktion muodostaminen yhdelle suodattimelle, tietyllä kuormalla vie tovin aikaa. Tutkimuksen kohteena oli kuitenkin monta erilaista variaatiota suotimista ja kuormituksista. Lisäksi keskustelu ohjaavan opettajan, työn tilaajan, sekä Trafotek Oy asiantuntijan kanssa veivät työtä loogisesti eteenpäin.

Työn avulla olen oppinut taajuusmuuttajan aiheuttamien häiriöiden taustoja ja matemaattista mallintamista. Suodattimista olen oppinut erilaisia topologioita ja niiden laskentaa matemaattisesti. Simulointien avulla opin uuden ohjelmiston käsittelyn. Simuloinneista opin lisäksi suotimien toiminnalliset perusteet, jolloin voin vertailla näitä keskenään. Lopuksi tarkasteltujen ominaisuuksien kautta opin standardien merkityksen ja laitteen suunnittelussa huomioitavien asioiden tärkeyden.

Tutkintotyönä vaihtosähkösuodattimien mitoittaminen ja tutkiminen on ollut hyvin antoisaa, mutta raskasta työtä. Työn eteen olen uhrannut paljon aikaa, sillä kustannuksella että tulokset eivät aina olleet odotetun kaltaisia. Silti vastoinkäymisistä huolimatta voin hyvillä mielin todeta tämän olleen opettavainen prosessi. Suodatin maailma on yksi vaikeimmin käsitettävistä asioista sähkötekniikan saralla. Asiaan perehtyminen vaatii omistautumista ja aikaa. Suodatin suunnittelu on pitkäjänteistä ja haastavaa toimintaa.

Tutkintotyön aihetta kannattaa jatkossa tutkia enemmänkin. Lisäksi Cargotecin konttilukissa olisi oivallisena päättötyö aiheena tärinän vaikutusten tutkiminen ja haittavaikutusten arviointi konttilukin sähköverkolle.

LÄHTEET

Painetut lähteet

- 1 Ahoranta, 2005 [Viitattu 12.2.2010]
Ahoranta Jukka, Sähkötekniikka, WSOY, 2005, 1.-7. painos, s. 55
- 2 Aura-Tonteri, 1996-B, Muuntajan kytkentä Dyn11 [Viitattu 3.2.2010]
Lauri Aura – Antti Tonteri, Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet, WSOY 1996, 1.painos, s. 54
- 3 Aura-Tonteri, 1996-A, Yliaaltosuodatin kuristimet [Viitattu 3.2.2010]
Lauri Aura – Antti Tonteri, Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet, WSOY 1996, 1.painos, s. 116 - 117
- 4 Mäkelä, 2007-A, Fourier sarjakehitelmä [Viitattu 10.2.2010]
Timo Mäkelä, Integraalimuunnokset, Tammertekniikka, s. 97 – 98
- 5 Mäkelä, 2007-B, Laplace laskennan perusteet [Viitattu 10.2.2010]
Timo Mäkelä, Integraalimuunnokset, Tammertekniikka, s. 14 -15
- 6 Mäkelä, 2009-A, MATLAB Perusteet [Viitattu 26.1.2010]
Timo Mäkelä, MATLAB Perusteet, Tammertekniikka, s. 1
- 7 Mäkelä, 2009-B, MATLAB Simulink [Viitattu 26.1.2010]
Timo Mäkelä, MATLAB Simulink, Tammertekniikka, s. 1
- 8 Ozenbaugh, 2001, LCL – suodattimen mitoitus [Viitattu, 9.2.2010]
Richard Lee Ozenbaugh, EMI FILTER DESIGN, CRC Press, 2001, 2 painos. s. 216 – 217
- 9 Tarkka - Hietalahti, 2006-E, Kela perusteet [Viitattu 26.1.2010]
Pertti Tarkka - Lauri Hietalahti, Piirianalyysi 2, Edita 2006, 2. painos, s. 24 - 26

- 10 Tarkka - Hietalahti, 2006-F, Kondensaattori perusteet [Viitattu 26.1.2010]
Pertti Tarkka - Lauri Hietalahti, Piirianalyysi 2, Edita 2006, 2. painos, s.
22 – 24
- 11 Tarkka - Hietalahti, 2006-A, Desibeli käsite [Viitattu 10.2.2010]
Pertti Tarkka - Lauri Hietalahti, Piirianalyysi 2, Edita 2006, 2. painos, s.
164 - 165
- 12 Tarkka - Hietalahti, 2006-B, Siirtofunktio [Viitattu 10.2.2010]
Pertti Tarkka - Lauri Hietalahti, Piirianalyysi 2, Edita 2006, 2. painos, s.
167 - 170
- 13 Tarkka - Hietalahti, 2006-D, Laplace-laskennan perusteet [Viitattu
10.2.2010]
Pertti Tarkka - Lauri Hietalahti, Piirianalyysi 2, Edita 2006, 2. painos, s.
177 - 178
- 14 Tarkka – Hietalahti, 2006-C, Resonanssiipiiri [Viitattu 26.1.2010]
Pertti Tarkka - Lauri Hietalahti, Piirianalyysi 2, Edita 2006, 2. painos, s.
180 - 183
- 15 SFS-EN 6000 [Viitattu 27.1.2010]
Pienjännitteiset generaattorilaitteistot SFS 6000-5-551 s. 339 – 351
Suojaus sähköiskulta 6000-4-41 s. 121 - 148
- 16 SFS EN 60204-32 Konestandardi [Viitattu 12.2.2010]
Konestandardi SFS EN 60204-32

Painamattomat lähteet

- 17 Bergman, 2009, Kondensaattorikytkennät suodattimessa [Viitattu 3.2.2010]
Opintojaksomateriaali, Tuntiopetus/TAMK, 26.11.2009, Väinö Bergman, Tampere
- 18 Trafotek Oy, 2010, LC-suodattimen mitoitus [Viitattu 29.1.2010]
Keskustelu / Trafotek Oy / Turku, LC – suodattimen mitoitus, 29.1.2010.
- 19 Sähköpostikeskustelu, Jari Mäkelä, Cargotec, Tampere [Viitattu 13.2.2010]
Sähköpostikeskustelu, Jari Mäkelä, Cargotec Finland Oy, 13.1.2010, Tampere

Sähköiset lähteet

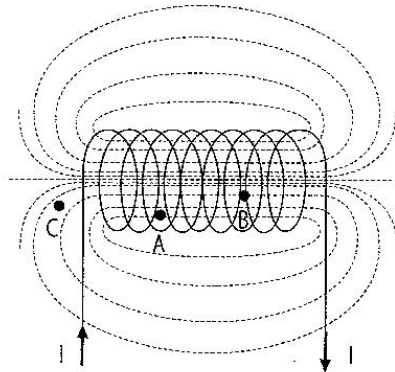
- 20 ABB Tech Guide, 2002, Yliaaltoanalyysi [Viitattu 26.1.2010], internet lähde, saatavilla
[ABB Technical Guide No. 6](#), ABB Guide to Harmonics with AC Drives
- 21 Cargotec Finland Oy [Viitattu 2.2.2010], internet lähde, saatavilla:
[Cargotec Finland Oy](#)
- 22 Honkanen, BY-PASS_kondensaattorit [Viitattu 12.2.2010]
Kajaanin AMK, H. Honkanen, internet lähde, saatavilla
[BY-PASS_kondensaattori](#)
- 23 Kelan kuva [Viitattu 26.1.2010], internet lähde, saatavilla:
<http://img101.imageshack.us/img101/9819/coil2sm.jpg>
- 24 Laine, MATLAB perusteet [Viitattu 26.1.2010], internet lähde, saatavilla:
<http://www.helsinki.fi/~mjllaine/matlab/perusteet.html>

- 25 MTE Group, Vaihtosähkösuodattimen datalehti [Viitattu 12.2.2010]
MTE Group, Internet lähde, saatavilla
[SineWaveFilter_SeriesA440-600VAC](#) ,
- 26 Nuutinen, 2007, Vaihtosuuntauksen ja suodatuksen toteuttaminen
tasasähköjakeluverkossa [Viitattu 27.1.2010], internet lähde, saatavilla:
<https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/32991...>
- 27 ST - kortti 52.16 [Viitattu 14.2.2010]
ST - kortisto, ST - kortti 52.16, Internet lähde, saatavilla maksusta
- 28 Taajuusmuuttajakäytön verkostovaikutukset [Viitattu 26.1.2010], internet
lähde, saatavilla:
www.tp.spt.fi/~salabra/yk/sk2/verkkova2.doc
- 29 Taajuusvasteen graafiset esitystavat / Bode - diagrammi [Viitattu
26.1.2010], internet lähde, saatavilla:
<http://www.control.hut.fi/Kurssit/Verkkokurssit...>

LIITTEET

Liite 1 Kela

Kela on N-kierrosta kuparijohtinta kierrettynä kuvan 1. tavalla sydämen ympärille. Sydän materiaalina voi toimia metalli, ferromagneettinen aine tai ilma.



Kuvio 1. Kela

Johtimessa kulkee virta i , joka generoi magneettikentän johtimen ympärille. Sydänmateriaaliin muodostuu magneettivuon (Ψ). Virta esiintyy usein ajan funktiona ja tällöin myös magneettivuo on ajan funktio. Johtimen välille indusoituu tällöin jännite u , joka on verrannollinen magneettivuon muutosnopeuteen.

$$\psi = L \cdot i \quad (1.)$$

Kelalle ominainen induktanssi L on suuruudeltaan riippuvainen kelan rakenteesta ja käytettävistä materiaaleista. Induktiolain perusteella voidaan ilmaista

$$u = \frac{d\psi}{dt} = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (2.)$$

Jännite on kelan induktanssin ja virran muutoksen tulo ajan funktiona.

Kelan perusrakenteelle on myös mahdollista ilmaista induktanssin L lausekkeeksi

$$L = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot A}{l} \quad (3.)$$

Kaavasta on hyvin havaittavissa, että kelan induktanssi on verrannollinen johdinkierrosten N neliöön.

Kelan hetkellinen teho on määritettävissä

$$p_L = u \cdot i = L \cdot i \cdot \frac{di}{dt} \quad (4.)$$

Kelan energianmuutos

$$dw_L = p_L \cdot dt = L \cdot i \cdot di \quad (5.)$$

Lauseke integroimalla saadaan kelan energian lauseke

$$w_L = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i^2 \quad (6.)$$

Kelan energia w_L on ajan jatkuva funktio. Energian w_L ollessa verrannollinen virran i neliöön, on myös virran oltava jatkuva ajan funktiona.

Vaihtosähköllä kelan tarkasteluun tulee mukaan vaihekulma, jolloin kelan jännite on

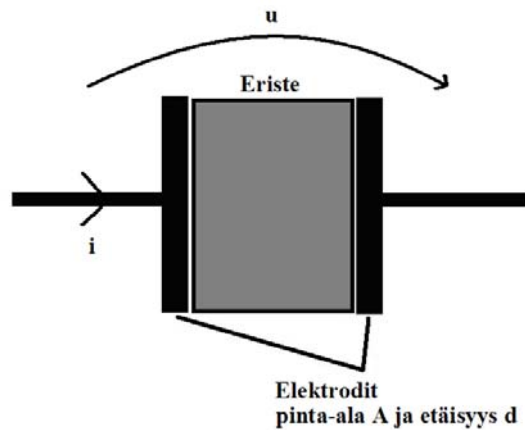
$$u_c = j \cdot \omega \cdot L \cdot i_c \quad (7.)$$

Kelalla kompleksitasossa imaginääriyksiköllä j kertominen merkitsee vaihekulman kasvamista 90° , jolloin kelan jännite on 90° virtaa edellä.

(Tarkka – Hietalahti, 2006-E)

Liite 2 Kondensaattori

Kondensaattorissa on metallielektrodien välissä eristemateriaalia. Elektrodien yhteinen pinta-ala on A ja elektrodien etäisyys toisistaan d .



Kuvio 1. Kondensaattori

Yhdistettäessä kondensaattori ulkoiseen jännitelähteeseen muodostuu kondensaattorilevyjen välille sähkökenttä, joka varastoi itseensä lähteestä saamansa energian.

Kondensaattorin varaus q on verrannollinen kondensaattorilevyjen välillä vaikuttavaan jännitteeseen.

$$q = C \cdot u \quad (1.)$$

Kondensaattorin verrannollisuuskerrointa C kutsutaan kapasitanssiksi. Kapasitanssin suuruus on riippuvainen vain kondensaattorin rakenteesta ja käytetystä eristemateriaalista.

Kondensaattorin virta i on varauksen q aikaderivaatta

$$i = \frac{dq}{dt} = C \cdot \frac{du}{dt} \quad (2.)$$

Kondensaattorin kapasitanssi voidaan määrittää seuraavasti

$$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \quad (3.)$$

Kondensaattorin hetkellinen teho on

$$p_C = u \cdot i = C \cdot u \cdot \frac{du}{dt} \quad (4.)$$

Kondensaattorin energia on

$$w_C = \frac{1}{2} \cdot C \cdot u^2 \quad (5.)$$

Kondensaattorin energian on jatkuva ajan funktio. Koska kondensaattorin energia on verrannollinen jännitteen neliöön on myös jännitteen oltava ajan funktio.

Vaihtosähköllä kondensaattorin

$$u_c = \frac{i_c}{j \cdot \omega \cdot C} \quad (6.)$$

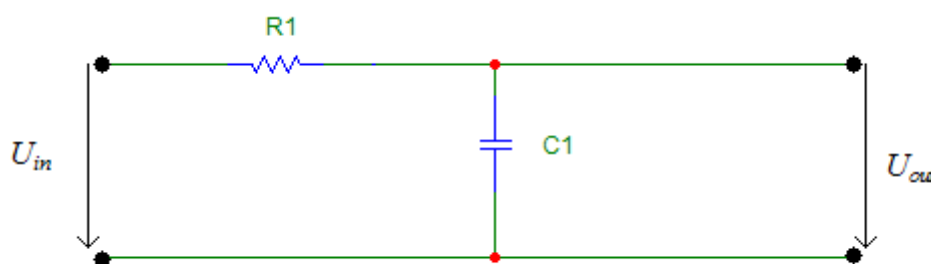
Vaihtosähköllä laskettaessa kondensaattorin jännite on 90° kondensaattorin virtaa jäljessä.

(Tarkka – Hietalahti, 2006-F)

Liite 3 Siirtofunktion Laplace laskenta

Siirtofunktioita käsitellään usein Laplace laskennan avulla. Laplace laskennassa $f(t)$ reaaliuuttujan t funktio on määritelty, kun $t \geq 0$. Funktion $f(t)$ Laplace-muunnoksella tarkoitetaan kompleksimuuttujan s kompleksiarvoista funktiota. (Mäkelä, 2007-B)

Käsitellään Laplace laskentaa alipäästösuodattimen avulla



Kuvio 1. Alipäästösuodatin

Määritetään syötetyn jännitteen ja ulostulevan jännitteen suhde jännitteen jaon avulla

Error! Bookmark not

$$\mathbf{defined.} U_{out}(s) = \frac{1}{R + \frac{1}{s \cdot C}} \cdot U_{in}(s) \Rightarrow \frac{U_{out}(s)}{U_{in}(s)} = \frac{1}{R + \frac{1}{s \cdot C}} \quad (1.)$$

Ulostulevan jännitteen ja sisään menevän jännitteen suhteesta voidaan edelleen määrittää alipäästösuodattimelle vahvistus s -tasossa

$$A_v(s) = \frac{1}{R + \frac{1}{s \cdot C}} = \frac{1}{s \cdot C \cdot R + 1} \quad (2.)$$

Siirtofunktio on kompleksiluku, jonka itseisarvo kertoo taajuusvasteen itseisarvon, sekä kulma osoittajan ja nimittäjän välisen vaihe-eron. (Tarkka, 2007) Laplace laskennassa siirryttäessä s -tasoon piirin tarkastelu ei ole ajasta t riippuvainen. Mikäli s :n potenssi on

yksi, tarkoitetaan sillä ensimmäisen asteen suodatinta. Yhden kelan tai kondensaattorin lisääminen kasvattaa potenssia yhdellä.

(Tarkka – Hietalahti, 2006-D)

Laplace-tason siirtofunktioita käytetään yleisesti sähkö ja tietoliikennetekniikassa piirien ja siirtoteiden mallintamiseen. Siirtofunktioiden avulla saadaan määriteltyä piireille ja siirtoteille Boden-diagrammi, jonka avulla voidaan graafisesti tutkia signaalin käyttäytymistä tutkittavassa kohteessa.

(Tarkka – Hietalahti, 2006-D)

Liite 4 MTE Sine wave filters data sheet



Sine Wave Filters

Series A - Selection Table & Technical Specifications Guide

MTE SERIES A SINE WAVE FILTERS are designed to provide a Sine Wave output voltage when driven from Variable Frequency Drives or other types of PWM inverters with switching frequencies from 2kHz to 8kHz. For Variable Frequency Drive (VFD) applications, MTE Sine Wave Filters eliminate the problem of motor/cable insulation failures, heating, and audible noise. Sine Wave Filters also reduce electromagnetic interference (EMI) by eliminating the high dv/dt associated with inverter output waveforms.

APPLICATIONS - For alternative energy applications, such as wind driven generators, where an inverter is used to return power to the utility distribution system through a step-up transformer, these filters meet the requirements of IEEE-519 and permit the use of standard transformers.

Added cable protection and the economy of using standard grade electrical wire is a significant benefit of using the MTE Sine Wave Filter to protect against long lead drive to motor excess voltage problems.

SINE WAVE FILTER SELECTION - For variable and constant torque applications, select filters based on the current rating of the motor. Filter current ratings have been designed to meet the NEC requirements. For applications that use motors with current ratings that exceed NEC values, select a filter with a current rating equal to or greater than that of the load. Where a single filter feeds multiple motors select the filter based on the total motor current.

For inverters feeding isolation transformers select a filter with a current rating equal to or greater than that of the transformer primary current. Power and frequency converter applications which use PWM inverters to supply a wide range of loads require that the output of the Sine Wave Filter must feed a Delta-Wye isolation transformer with the primary sized to the Sine Wave Filter full load current.

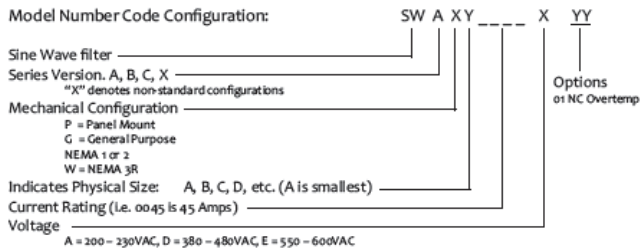


PRODUCT SELECTION: See MTE Sine Wave Filter Selection Brochure or visit the MTE website at www.mtecorp.com for complete product selection. Please note that Series A Sine Wave Filters can only be used with PWM inverters with switching frequencies between 2kHz and 8kHz.

BASIC SPECIFICATION RANGES - The Sine Wave Filter is available in voltage ranges of 200-230VAC, 380-480VAC, or 550-600VAC & for motor sizes from 1.5 Hp to 700 Hp. The Sine Wave Filter has a continuous current rating of 100% RMS & an intermittent current of 150% for 1 minute. Harmonic voltage distortion feeding a transformer at full load & at 60Hz is 5% maximum. Harmonic voltage distortion feeding a motor at full load & at 60Hz is 5% typical.

INSTALLATION OPTIONS: Panel-mount or NEMA 1, 2 and 3R enclosures are available.

- Typical applications include:
- HVAC Fans
 - Deep Well Pumps on VFDs
 - Multi Motor Common Drive Conveyor Systems
 - Variable Frequency Power
 - Linear Drive Motors
 - Old Non Inverter Duty Motors used with Modern VFDs
 - Underground Ventilation
 - Critical Process Controls Systems



MTE Sine Wave Filter Selection Tables

Selection Table Series A Sine Wave Filter Technical Data - 200 & 230VAC

200 V Motor HP	230 V Motor HP	Filter Amps	Open Panel Design					NEMA 1-2		NEMA 3R		Watts
			Cat. PN.	weight #	Magnetics Size	RC Panel Size	Fig.	Cat. PN.	Cab Type	Cat. PN.	Cab Type	
0.5	0.5	3	SWAP0003A	16	12.5"H x 9.8"W x 7.5"D	-	1	SWAGA0003A	CAB-13V	SWAWA0003A	CAB-12C	124
.75-1	.75-1	5	SWAP0005A	21	12.5"H x 9.8"W x 7.5"D	-	1	SWAGA0005A	CAB-13V	SWAWA0005A	CAB-12C	149
1.5	1.5	7	SWAP0007A	24	12.5"H x 9.8"W x 7.5"D	-	1	SWAGA0007A	CAB-13V	SWAWA0007A	CAB-12C	191
2	2	9	SWAP0009A	24	12.5"H x 9.8"W x 7.5"D	-	1	SWAGA0009A	CAB-13V	SWAWA0009A	CAB-12C	125
3	3	12	SWAP0012A	27	12.5"H x 9.8"W x 7.5"D	-	1	SWAGA0012A	CAB-13V	SWAWA0012A	CAB-12C	206
-	5	17	SWAP0017A	31	12.5"H x 9.8"W x 7.5"D	-	1	SWAGA0017A	CAB-13V	SWAWA0017A	CAB-12C	279
5	7.5	22	SWAP0022A	32	12.5"H x 9.8"W x 7.5"D	-	1	SWAGB0022A	CAB-17V	SWAWB0022A	CAB-17C	362
7.5	10	30	SWAP0030A	38	12.5"H x 9.8"W x 7.5"D	-	1	SWAGB0030A	CAB-17V	SWAWB0030A	CAB-17C	329
10	15	45	SWAP0045A	47	17"H x 11"W x 9"D	-	1	SWAGB0045A	CAB-17V	SWAWB0045A	CAB-17C	476
15	20	55	SWAP0055A	55	17"H x 11"W x 9"D	-	1	SWAGB0055A	CAB-17V	SWAWB0055A	CAB-17C	520
20	25	70	SWAP0070A	60	17"H x 11"W x 9"D	-	1	SWAGC0070A	CAB-17V	SWAWC0070A	CAB-17C	606
25	30	85	SWAP0085A	73	6.9"H x 9"W x 8.1"D	20"H x 11"W x 7.6"D	2	SWAGC0085A	CAB-26C	SWAWC0085A	CAB-26C	752
30	40	110	SWAP0110A	92	8.8"H x 11"W x 9.8"D	20"H x 11"W x 7.6"D	2	SWAGC0110A	CAB-26C	SWAWC0110A	CAB-26C	788
40	50	135	SWAP0135A	100	8.8"H x 11"W x 9.8"D	20"H x 11"W x 7.6"D	2	SWAGC0135A	CAB-26C	SWAWC0135A	CAB-26C	989
50	60	160	SWAP0160A	121	8.8"H x 11"W x 9.8"D	20"H x 11"W x 7.6"D	2	SWAGC0160A	CAB-26C	SWAWC0160A	CAB-26C	1062
60	75	200	SWAP0200A	167	13"H x 14.4"W x 10.8"D	27"H x 17"W x 7.6"D	2	SWAGC0200A	CAB-30C	SWAWC0200A	CAB-30C	1377
75	100	250	SWAP0250A	195	13"H x 14.4"W x 11.3"D	27"H x 17"W x 7.6"D	2	SWAGD0250A	CAB-30C	SWAWD0250A	CAB-30C	1617
100	125	320	SWAP0320A	228	13"H x 14.4"W x 11.5"D	27"H x 17"W x 7.6"D	2	SWAGD0320A	CAB-30C	SWAWD0320A	CAB-30C	1991

Sine Wave Filter Selection:

Select filters based on the current rating of the motor for both variable and constant torque applications. These filters have been designed to meet motor current requirements based on the NEC motor ratings. For applications that exceed NEC current ratings, use the next larger filter. Series A Sine Wave Filters are available as open panel and with enclosed ratings including NEMA 1, NEMA 2, and NEMA 3R.

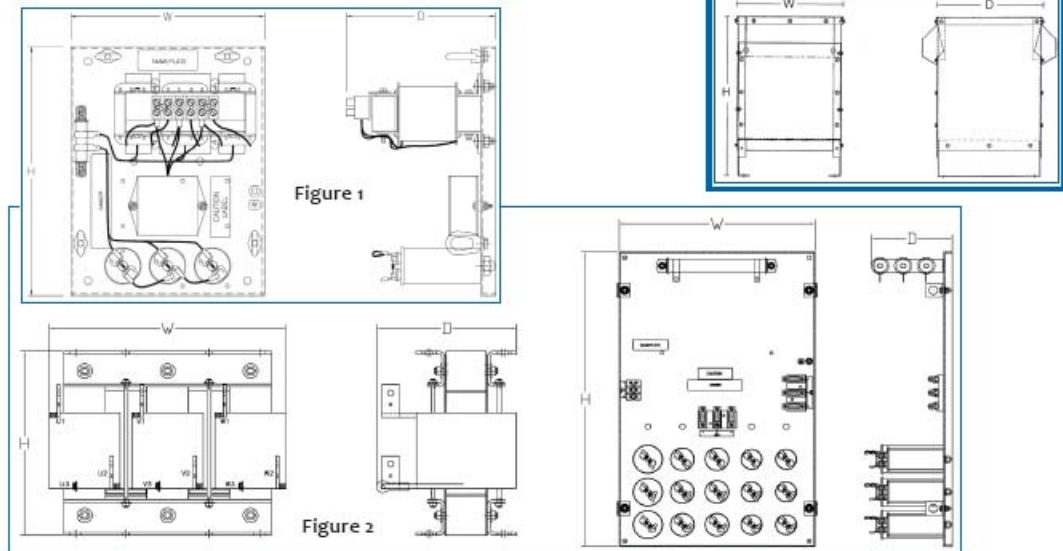
Multiple Motors On One Filter:

Where a single filter is used to feed multiple motors, the filter current rating should be selected equal to the total current ratings of all motors.

Variable Frequency Power Source:

For inverter power applications, use a Delta-Wye isolation transformer or step-up transformer on the Sine Wave Filter output. The filter current rating should be equal to or greater than that of the loaded primary current.

Type	Size inches	3R Depth	Weight
CAB-13V	13"H x 13"W x 13"D	-	18#
CAB-17V	24"H x 17"W x 18"D	-	27#
CAB-12C	24"H x 13"W x 18"D	23"	68#
CAB-17C	31"H x 18"W x 21"D	26"	84#
CAB-26C	47"H x 27"W x 25"D	30"	180#
CAB-30C	72"H x 31"W x 31"D	40"	319#
CAB-42C	72"H x 43"W x 31"D	40"	393#



THE GLOBAL POWER QUALITY RESOURCE

MTE Corporation - Menomonee Falls, WI - 1-800-455-4MTE - www.mtecorp.com

Selection Table Series A Sine Wave Filter Technical Data - 380, 480, & 600VAC

380 V Motor KW	480 V Motor HP	Filter Amps	Open Panel Design					NEMA 1-2		NEMA 3R		Watts
			Cat. PN.	weight #	Magnetics Size	RC Panel Size	Fig.	Cat. PN.	Cab Type	Cat. PN.	Cab Type	
0.75	1	2	SWAP0002D	16	12.5"H x 9.8"W x 7.5"D	-	1	SWAGA0002D	CAB-13V	SWAWA0002D	CAB-12C	40
1.1	1.5	3	SWAP0003D	18	12.5"H x 9.8"W x 7.5"D	-	1	SWAGA0003D	CAB-13V	SWAWA0003D	CAB-12C	53
1.5 - 2.2	2 - 3	5	SWAP0005D	22	12.5"H x 9.8"W x 7.5"D	-	1	SWAGA0005D	CAB-13V	SWAWA0005D	CAB-12C	93
3	-	7	SWAP0007D	25	12.5"H x 9.8"W x 7.5"D	-	1	SWAGA0007D	CAB-13V	SWAWA0007D	CAB-12C	110
4	5	9	SWAP0009D	27	12.5"H x 9.8"W x 7.5"D	-	1	SWAGA0009D	CAB-13V	SWAWA0009D	CAB-12C	128
5.5	7.5	12	SWAP0012D	27	12.5"H x 9.8"W x 7.5"D	-	1	SWAGA0012D	CAB-13V	SWAWA0012D	CAB-12C	162
7.5	10	17	SWAP0017D	30	12.5"H x 9.8"W x 7.5"D	-	1	SWAGA0017D	CAB-13V	SWAWA0017D	CAB-12C	151
11	15	22	SWAP0022D	37	17"H x 11"W x 9"D	-	1	SWAGB0022D	CAB-17V	SWAWB0022D	CAB-17C	229
-	20	27	SWAP0027D	38	17"H x 11"W x 9"D	-	1	SWAGB0027D	CAB-17V	SWAWB0027D	CAB-17C	216
15	25	35	SWAP0035D	51	17"H x 11"W x 9"D	-	1	SWAGB0035D	CAB-17V	SWAWB0035D	CAB-17C	262
18.5-22	30	45	SWAP0045D	57	17"H x 11"W x 9"D	-	1	SWAGB0045D	CAB-17V	SWAWB0045D	CAB-17C	360
-	40	55	SWAP0055D	67	17"H x 11"W x 9"D	-	1	SWAGB0055D	CAB-17V	SWAWB0055D	CAB-17C	457
30	50	65	SWAP0065D	77	17"H x 13"W x 9"D	-	1	SWAGB0065D	CAB-17V	SWAWB0065D	CAB-17C	454
37	60	80	SWAP0080D	86	17"H x 13"W x 9"D	-	1	SWAGC0080D	CAB-26C	SWAWC0080D	CAB-26C	596
45-55	75	110	SWAP0110D	117	13"H x 14.4"W x 10.5"D	20"H x 11"W x 7.6"D	2	SWAGC0110D	CAB-26C	SWAWC0110D	CAB-26C	878
-	100	130	SWAP0130D	134	13"H x 14.4"W x 10.8"D	20"H x 11"W x 7.6"D	2	SWAGC0130D	CAB-26C	SWAWC0130D	CAB-26C	836
75-90	125	160	SWAP0160D	163	13"H x 14.4"W x 11.3"D	20"H x 11"W x 7.6"D	2	SWAGC0160D	CAB-26C	SWAWC0160D	CAB-26C	996
110	150	200	SWAP0200D	188	13"H x 14.4"W x 11.5"D	27"H x 17"W x 7.6"D	2	SWAGD0200D	CAB-30C	SWAWD0200D	CAB-30C	1286
132	200	250	SWAP0250D	233	13"H x 14.4"W x 13.5"D	27"H x 17"W x 7.6"D	2	SWAGD0250D	CAB-30C	SWAWD0250D	CAB-30C	1424
160	250	305	SWAP0305D	266	13"H x 14.4"W x 15"D	27"H x 17"W x 7.6"D	2	SWAGD0305D	CAB-30C	SWAWD0305D	CAB-30C	1701
185-200	300	365	SWAP0365D	425	17"H x 22"W x 12.5"D	27"H x 17"W x 7.6"D	2	SWAGD0365D	CAB-30C	SWAWD0365D	CAB-30C	1841
-	350	415	SWAP0415D	500	17"H x 22"W x 15.5"D	27"H x 17"W x 7.6"D	2	SWAGD0415D	CAB-30C	SWAWD0415D	CAB-30C	2021
250	400-450	515	SWAP0515D	650	17"H x 22"W x 15.5"D	27"H x 17"W x 7.6"D	2	SWAGD0515D	CAB-30C	SWAWD0515D	CAB-30C	2944
315	500	600	SWAP0600D	825	17"H x 22"W x 22"D	38"H x 17"W x 7.3"D	2	SWAGE0600D	CAB-42C	SWAWE0600D	CAB-42C	3698
355-400	600	720	SWAP0720D	1125	28.5"H x 33.5"W x 19.5"D	38"H x 17"W x 7.3"D	2	SWAGE0720D	CAB-42C	SWAWE0720D	CAB-42C	4133

600 V Motor HP	Filter Amps	Open Panel Design					NEMA 1-2		NEMA 3R		Watts
		Cat. PN.	weight #	Magnetics Size	RC Panel Size	Fig.	Cat. PN.	Cab Type	Cat. PN.	Cab Type	
1.5	2	SWAP0002E	18	12.5"H x 9.8"W x 7.5"D	-	1	SWAGA0002E	CAB-13V	SWAWA0002E	CAB-12C	57
2	3	SWAP0003E	21	12.5"H x 9.8"W x 7.5"D	-	1	SWAGA0003E	CAB-13V	SWAWA0003E	CAB-12C	67
3	5	SWAP0005E	24	12.5"H x 9.8"W x 7.5"D	-	1	SWAGA0005E	CAB-13V	SWAWA0005E	CAB-12C	95
5	7	SWAP0007E	26	12.5"H x 9.8"W x 7.5"D	-	1	SWAGA0007E	CAB-13V	SWAWA0007E	CAB-12C	120
7.5	9	SWAP0009E	27	12.5"H x 9.8"W x 7.5"D	-	1	SWAGA0009E	CAB-13V	SWAWA0009E	CAB-12C	155
10	12	SWAP0012E	27	12.5"H x 9.8"W x 7.5"D	-	1	SWAGA0012E	CAB-13V	SWAWA0012E	CAB-12C	177
15	17	SWAP0017E	37	17"H x 11"W x 9"D	-	1	SWAGB0017E	CAB-17V	SWAWB0017E	CAB-17C	219
20	22	SWAP0022E	38	17"H x 11"W x 9"D	-	1	SWAGB0022E	CAB-17V	SWAWB0022E	CAB-17C	253
25	27	SWAP0027E	45	17"H x 11"W x 9"D	-	1	SWAGB0027E	CAB-17V	SWAWB0027E	CAB-17C	295
30	35	SWAP0035E	58	17"H x 11"W x 9"D	-	1	SWAGB0035E	CAB-17V	SWAWB0035E	CAB-17C	323
40	45	SWAP0045E	63	17"H x 11"W x 9"D	-	1	SWAGB0045E	CAB-17V	SWAWB0045E	CAB-17C	489
50	55	SWAP0055E	75	17"H x 13"W x 9"D	-	1	SWAGB0055E	CAB-17V	SWAWB0055E	CAB-17C	535
60	65	SWAP0065E	86	17"H x 13"W x 9"D	-	1	SWAGB0065E	CAB-17V	SWAWB0065E	CAB-17C	650
75	80	SWAP0080E	117	13"H x 14.4"W x 10.5"D	20"H x 11"W x 7.6"D	2	SWAGC0080E	CAB-26C	SWAWC0080E	CAB-26C	806
100	110	SWAP0110E	146	13"H x 14.4"W x 10.8"D	20"H x 11"W x 7.6"D	2	SWAGC0110E	CAB-26C	SWAWC0110E	CAB-26C	1014
125	130	SWAP0130E	166	13"H x 14.4"W x 11.3"D	20"H x 11"W x 7.6"D	2	SWAGC0130E	CAB-26C	SWAWC0130E	CAB-26C	1157
150	160	SWAP0160E	194	13"H x 14.4"W x 12.3"D	20"H x 11"W x 7.6"D	2	SWAGC0160E	CAB-26C	SWAWC0160E	CAB-26C	1589
200	200	SWAP0200E	236	13"H x 14.4"W x 13.5"D	20"H x 11"W x 7.6"D	2	SWAGD0200E	CAB-30C	SWAWD0200E	CAB-30C	1315
250	250	SWAP0250E	280	13"H x 14.4"W x 13.5"D	20"H x 11"W x 7.6"D	2	SWAGD0250E	CAB-30C	SWAWD0250E	CAB-30C	1655
300	305	SWAP0305E	425	17"H x 22"W x 12.5"D	27"H x 17"W x 7.6"D	2	SWAGD0305E	CAB-30C	SWAWD0305E	CAB-30C	2237
350	365	SWAP0365E	490	17"H x 22"W x 13.5"D	27"H x 17"W x 7.6"D	2	SWAGD0365E	CAB-30C	SWAWD0365E	CAB-30C	2489
400	415	SWAP0415E	726	17"H x 22"W x 17"D	38"H x 17"W x 7.3"D	2	SWAGD0415E	CAB-30C	SWAWD0415E	CAB-30C	3098
450-500	515	SWAP0515E	750	17"H x 22"W x 17.8"D	27"H x 17"W x 7.6"D	2	SWAGD0515E	CAB-30C	SWAWD0515E	CAB-30C	3229
600	600	SWAP0600E	1225	28.5"H x 33.5"W x 19.5"D	38"H x 17"W x 7.3"D	2	SWAGE0600E	CAB-42C	SWAWE0600E	CAB-42C	3406
700	720	SWAP0720E	1375	28.5"H x 33.5"W x 20"D	38"H x 17"W x 7.3"D	2	SWAGE0720E	CAB-42C	SWAWE0720E	CAB-42C	3935

THE GLOBAL POWER QUALITY RESOURCE

MTE Corporation - Menomonee Falls, WI - 1-800-455-4MTE - www.mtecorp.com

Product Specifications - 2kHz-8kHz Sine Wave Filters

Refer to the Series A Sine Wave Filter User Manual for Detailed Specifications

Performance:

Harmonic Voltage Distortion when feeding a:

Transformer at full load and at 60Hz: 5% maximum
 Motor at full load and at 60Hz: 5% typical

Ratings:

Continuous Current Rating 100% RMS
Intermittent Current Ratings: 150 % for 1 minute
Minimum Inverter Switching Frequency: 2kHz
Maximum Inverter Switching Frequency: 8kHz
Nominal Inverter Operating Frequency: 60Hz
 Minimum: 0Hz
 Maximum with de-rating: 90Hz
Altitude without de-rating: 1000 meters
Maximum Motor Lead Length: 15,000 feet
Maximum ambient temperature: 50° C open filters
 40° C enclosed filters
 10% of rated voltage maximum

Insertion Loss:

Audible Noise:

Maximum Audible Noise Level at
 Two Meters for Standard Configuration: 76dB-A

Output Compatibility/Loading:

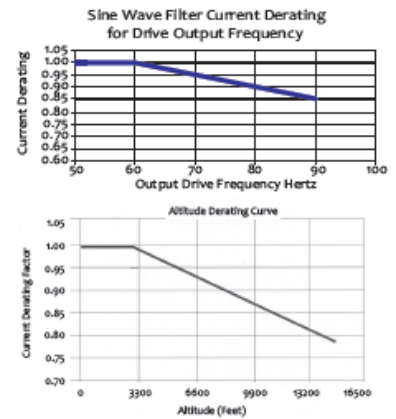
Conventional 3 phase motors. Standard step-up transformer with 4% minimum output impedance, "No load" continuous operation

Agency Approvals, UL& cUL:

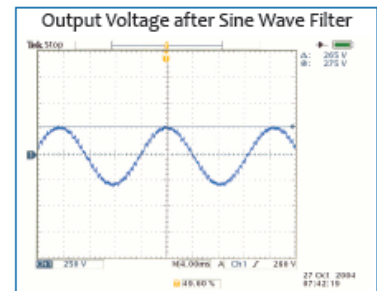
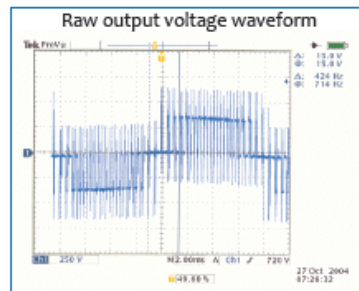
Listed to UL508 type MX and CSA-C22.2 No 14-95, File E180243
 3HP to 1000HP, 120VAC to 600VAC, 50/60Hz Three Phase

Note: Short Circuit rating not required under Exception No.1 of UL508A SB4.2.1

Data subject to change without notice.



MTE Sine Wave Filters help eliminate the high dv/dt associated with inverter output waveforms in applications where the distance between the motor and the inverter is up to 15,000 feet.



For Technical Support: appengrg@mtecorp.com
 For Sales Support: sales@mtecorp.com

World Headquarters
 N83 W13330 Leon Road
 Menomonee Falls
 Wisconsin 53052
 Toll Free 1-800-455-4MTE
 Phone: (262) 253-8200
 Fax: (262) 253-8222
 Form 1214A-2-08



Visit us on the Web at:
www.mtecorp.com

© 2008 MTE Corporation
 All Rights Reserved

THE GLOBAL POWER QUALITY RESOURCE