

Keykhosro Khademi Kalantari

# Verkkoon jarruttavan taajuusmuuttajan häviöiden tarkastelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Autosähkötekniikka

Insinöörityö

3.2.2016

Tekijä Otsikko	Keykhosro Khademi Kalantari Verkkoon jarruttavan taajuusmuuttajan häviöiden tarkastelu
Sivumäärä Aika	50 sivua + 2 liitettä 3.2.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Autosähkötekniikka
Ohjaajat	Sähköinsinööri Pekka Happonen, ABB Lehtori Vesa Linja-aho, Metropolia
<p>Tämä insinööri työ tehtiin ABB:n toimeksiannosta. Insinööri työn tarkoituksena oli tehdä verkkovaihtosuuntaajalle häviötarkastelu. Työ suoritettiin ABB:n laboratoriotiloissa. Tarkastelu tehtiin kahta menetelmää käyttäen: sähköinen ja kalorimetrinen menetelmä. Testit tehtiin standardin määrittelemissä ajopisteissä molemmat menetelmät samanaikaisesti. Taajuusmuuttajan LCL-suodattimen häviöt tutkittiin myös erikseen samalla tavalla kuin koko laitteen tarkastelussa.</p> <p>Tuloksissa havaittiin menetelmien välistä eroa. Osoittautui, että kalorimetrillä mittaustavalla saatiin erilaisia mittaustuloksia kuin sähköisellä menetelmällä, kalorimetrillä mittaustavalla saatiin mm. parempi hyötysuhde laitteesta. Tuloksista pystyttiin erittelemään häviön aiheuttavat tekijät. Havaittiin, että muun muassa verkkovaihtosuuntaaja ja LCL-suodatin olivat suurimpia häviöiden tuottajia. Lisäksi kalorimetrillä mittaustavalla pystyttiin mittaamaan laitteen valmiustilan häviöt, mutta sähköisellä menetelmällä tämä ei onnistunut.</p> <p>Työ alkaa teoriaosuudella, jossa tutustutaan taajuusmuuttajien toimintaan ja lisäksi niissä esiintyvään häviöiden syntyyn. Tämän jälkeen esitetään käytettävät testausmenetelmät ja testauskokeen lopuksi tulokset ja menetelmien vertailu.</p>	
Avainsanat	Taajuusmuuttaja, kalorimetri, verkkovaihtosuuntaaja, häviö

Author Title	Keykhosro Khademi Kalantari Power Loss Review of a Regenerating Frequency Converter
Number of Pages Date	50 pages + 2 appendices 3th February 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Specialisation option	Automotive Electronics Engineering
Instructors	Pekka Happonen, Electrical Engineer, ABB Vesa Linja-aho, Senior Lecturer, Helsinki Metropolia University of Applied Sciences
<p>This thesis was assigned by ABB, and the purpose of this thesis was to review power losses produced by a regenerating frequency converter. The tests were carried out in the ABB laboratory facilities using two methods simultaneously: electric and calorimetric method. The tests were carried out in load points according to a specific standard. The power losses of LCL filter used in the frequency converter were also reviewed by using the same methods, while the filter was separated from rest of the device.</p> <p>Differences were found between the methods in the results. It appeared that in the calorimetric method different measurement results were obtained compared to the electric method. For example, observed efficiency of the device was better when using the calorimetric method. Based on the results it was possible to identify factors causing the power losses in the device. It was found that, among other things, the network inverter and LCL filter were the largest producers of losses. In addition, the calorimetric method was able to measure the standby losses of the device, but with the electric method this was not possible.</p> <p>The work begins with a theory part, which introduces the operation of the inverters and the parts causing power losses. Then, the test methods and the test setup to be used in this thesis are presented. Finally, the results and comparison of different methods are discussed.</p>	
Keywords	Frequency converter, calorimeter, power loss

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Yritysesittely	2
3	Taajuusmuuttaja	2
3.1	Taajuusmuuttajan toimintaperiaate	2
3.2	Taajuusmuuttajan ohjaus	4
3.2.1	Skalaariohjaus ja -säätö	7
3.2.2	Vektorisäätö	8
3.2.3	Suora vääntömomenttisäätö	9
3.3	Jarruttaminen	10
3.3.1	Vuojarrutus	11
3.3.2	Jarrukatkoja	12
3.3.3	Yhteinen tasavirtapiiri	14
3.3.4	Verkkoon jarrutus	15
3.4	Häiriöt ja yliaallot	16
3.5	Häviöt	19
3.5.1	Kytkenhäviöt ja johtavan tilan häviöt	19
3.5.2	Sydänhäviöt	21
3.5.3	Käämihäviöt	22
3.5.4	Muut komponenttihäviöt	23
3.5.5	Hyötysuhde	23
4	Testauskokoontaminen	26
5	Mittausmenetelmät	28
5.1	Ajopisteet	28
5.2	Sähköinen mittaus	30
5.3	Kalorimetrinen mittaus	30
6	Tulokset	31
6.1	Sähköiset tulokset	32
6.2	Kalorimetriset tulokset	36

6.3	Vertailu	39
6.4	Häviöiden tarkastelu	44
7	Yhteenveto	47
	Lähteet	49
	Liitteet	
	Liite 1. Tehoanalysaattorin tehonlaskutapa	
	Liite 2. Tehoanalysaattorin mittaustarkkuus	

## Lyhenteet

4Q	Neljä kvadranttia
CDM	Kokonainen käyttömoduuli (Complete Drive Module)
DTC	Suora vääntömomenttisäätö (Direct Torque Control)
EUT	Testissä oleva laite (Equipment Under Test)
IGBT	Suurtehoinen eristehilabipolaaritransistori (Insulated-gate bipolar transistor)
PWM	Pulssinleveysmodulaatio (Pulse Width Modulation)
THD	Kokonaisharmoninen särö (Total Harmonic Distortion)

## 1 Johdanto

Taajuusmuuttajien tehtävä on säädellä sähkömoottorien nopeutta, momenttia ja akselin asentoa sopivaksi sekä teollisuuden eri käyttötarkoituksissa että missä tahansa muualla, missä on sähkömoottoreita, kuten hisseissä, pumpuissa ja autoissa. Esimerkiksi energian säästöä syntyy säätämällä suoraan prosessin nopeutta, kuten ilman virtausta puhaltimen avulla, sen sijaan että puhallin pyörisi koko ajan täydellä teholla ja erilaisilla mekaanisilla ratkaisuilla rajoitettaisiin ilmanvirtausta. Toinen tapa säästää energiaa on ohjata moottoreiden tuottama jarrutusenergia takaisin verkkoon esimerkiksi hissikäyttöissä. Taajuusmuuttajissa, kuten kaikissa muissakin sähkölaitteissa, on häviöitä, jotka pitää ottaa huomioon kun puhutaan energiasäästöistä.

Taajuusmuuttajien häviöistä on vain vähän tutkimuksia, ja tämän tutkimuksen tarkoituksena on tarkastella nelikvadranttisen taajuusmuuttajan häviötä kahdella eri menetelmällä ja vertailla näiden tuloksia. Ensimmäinen menetelmä on sähköinen mittaus, josta saadaan tulo- ja lähtötehot, joista lasketaan häviöt. Toinen tapa on niin sanottu kalorimetrisen tarkastelu, jossa mitataan hukkalämmön määrää ja lasketaan teho, jolla kyseinen hukkalämpö saadaan aikaiseksi.

Tutkimus on tehty ABB:lle (Asea Brown Boveri), joka on tunnettu teollisuuskonserni automaatiotekniikan ja sähkövoimatekniikan alalla. Tutkimuksen kohteena on eräs ABB:n verkkovaihtosuuntaaja. Koska kyseiselle tuotteelle ei ole olemassa häviömittauksia ja häviöerittelyä, ABB on tilannut tämän tutkimuksen määrittelemään tuotteelle hyötysuhteen ja häviöt.

Työ alkaa teoriaosuudella, jossa tutustutaan taajuusmuuttajien toimintaan ja lisäksi niissä esiintyvään häviöiden syntymiseen. Myös käytetyt testausmenetelmät ja mittauskalusto esitellään. Seuraavaksi kootaan molempien menetelmien testaustulokset ja esitellään ne mahdollisimman selkeästi. Lopuksi tuloksia vertaillaan keskenään ja tehdään niistä yhteenveto.

## 2 Yritysesittely

ABB perustettiin vuonna 1988, kun ruotsalainen Asea ja sveitsiläinen Brown Boveri yhdistyivät liiketoimintaansa. ABB on tällä hetkellä johtava sähkövoima- ja automaatioteknologia alueelle keskittynyt yritys maailmassa. Yritys toimii yli sadassa maassa ja henkilöstön määrä on jopa 120 000.

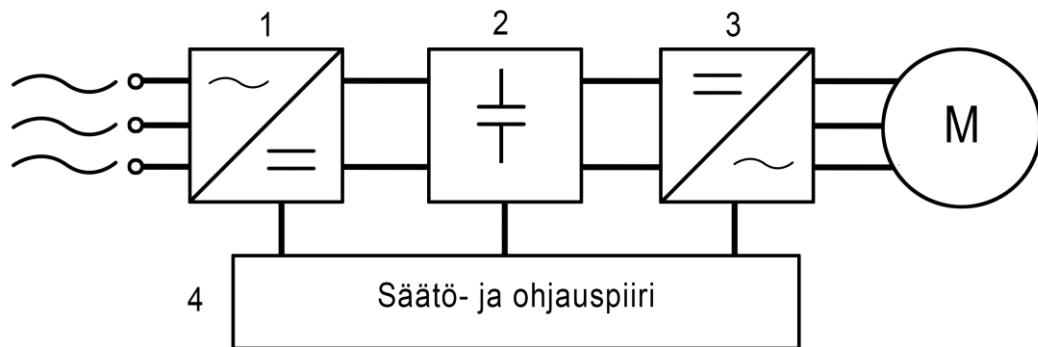
ABB:llä on toimintaa koko Suomessa ja isoja tehtaita muun muassa Helsingin Pitäjänmäellä, Vaasassa ja Porvoossa. Henkilöstön määrä Suomessa on yli 6000. ABB:n organisaatioita Suomessa ovat automaatiotuotteet, prosessiautomaatio, sähkövoimajärjestelmät, sähkövoimatuotteet, service (huolto) ja product support (tuotetuki). (1.)

## 3 Taajuusmuuttaja

### 3.1 Taajuusmuuttajan toimintaperiaate

Taajuusmuuttajan tehtävänä on toimia säätimenä vakiotaajuisen sähköverkon ja moottorin välillä. Taajuusmuuttajan avulla säästetään energiakustannuksissa säästämällä prosessin moottoreiden nopeutta tai momenttia. Esimerkiksi säätämällä suoraan virtausnopeutta energian säästö voi olla jopa 70 % verrattuna perinteiseen kuristusmenetelmään. Nopeussäädetyissä sähkökäyttöissä on monia lisäetuja energiansäästön lisäksi. Esimerkiksi säätäminen on tarkempaa kuin perinteisillä menetelmillä, sillä nopeussäädetyissä sähkökäyttöissä on mahdollisuus myös portaattomaan säätöön. Laite voidaan jakaa kolmeen osioon: tasasuuntaajaan, välipiiriin ja vaihtosuuntaajaan, kuten kuvassa 1.



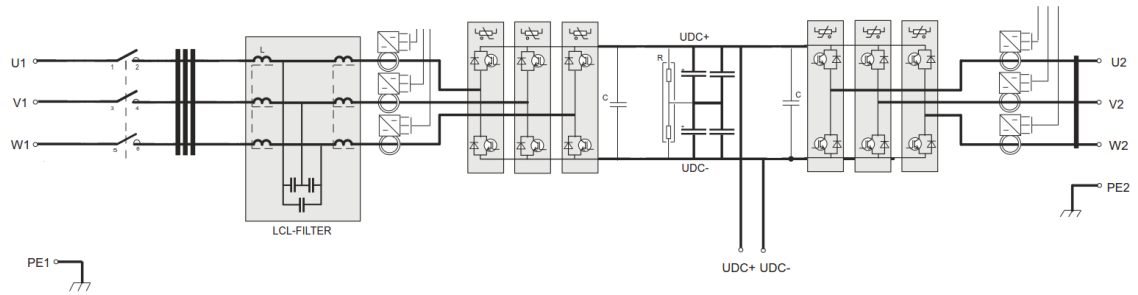


Kuva 1. Taajuusmuuttajan pääosat: Tasasuuntaaja (1), välipiiri (2), vaihtosuuntaaja (3) ja näiden säätö- ja ohjauspiiri (4).

Tasasuuntaaja koostuu diodisilloista, jotka muuttavat verkon vaihtojännitettä tasajännitteeksi välipiiriin. Välipiiri sisältää kondensaattoreita, jotka varastoivat energiaa ja tasaa välipiirin jännitettä esimerkiksi syöttävän verkon puolella tapahtuvien häiriöiden aikana. Välipiirin yhteydessä käytetään yleisesti latauspiiriä, jonka avulla hidastetaan välipiirin jännitteen nousua. Näin vältetään virtapiikki, joka saattaa vaurioittaa komponentteja. Latauspiiri sisältää releen ja vastuksen, joka on sarjassa välipiirin kondensaattoreiden kanssa. Rele ohittaa vastuksen, kun välipiirin jännite on saavuttanut halutun tason.

Vaihtosuuntaaja muuttaa välipiirin tasajännitteen halutuksi vaihtojännitteeksi ohjattujen IGBT-moduulien (Insulated Gate Bipolar Transistor) avulla. IGBT-moduuleja ohjataan PWM-menetelmällä (Pulse Width Modulation), jolloin moottoreille saadaan lähes sinimuotoinen virta.

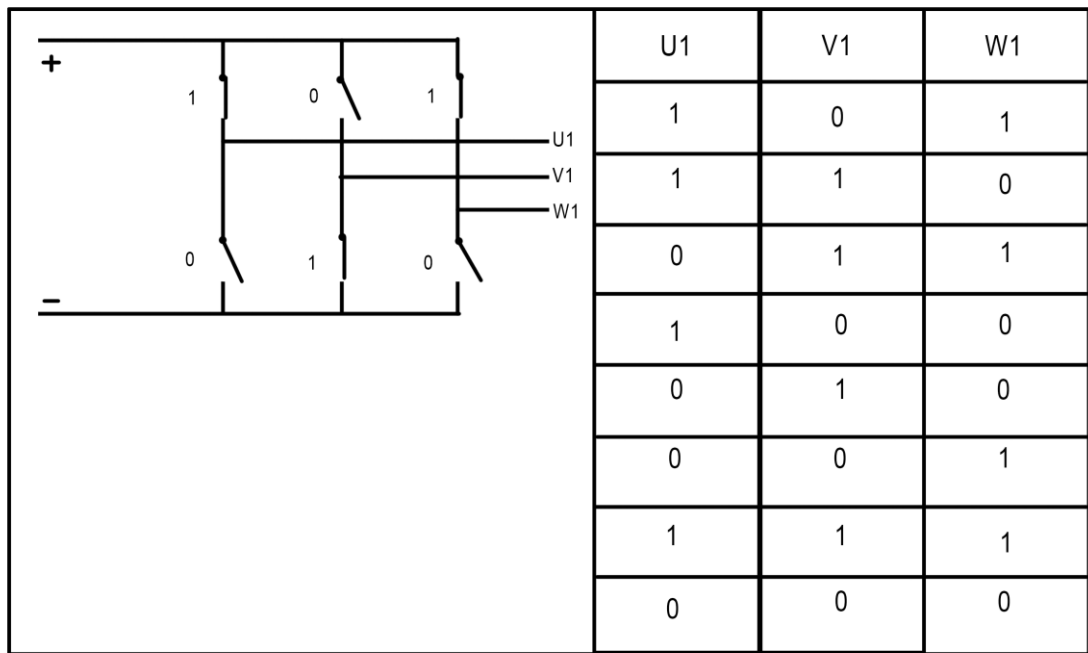
Taajuusmuuttajia käytetään myös generaattoreiden ohjaukseen ja säätöön, jolloin niiden rakenne on hieman erilainen kuin edellä mainittu muuttaja. Kun moottori toimii generaattorina, se tuottaa jarrutustehoa. Tämä tuotettu teho syötetään takaisin verkkoon verkkovaihtosuuntaajan avulla. Tällaisen taajuusmuuttajan tasasuuntaajan diodit on korvattu IGBT-transistoreilla ja lisäksi LCL-suodatinta käytetään suodattamaan verkkoon menevää jännitettä ja virtaa. Seuraavassa kuvassa (kuva 2) esitellään yleisen verkkovaihtosuuntaajataajuusmuuttajan rakennetta.



Kuva 2. Yleinen verkkovaihtosuuntaajan rakenne.

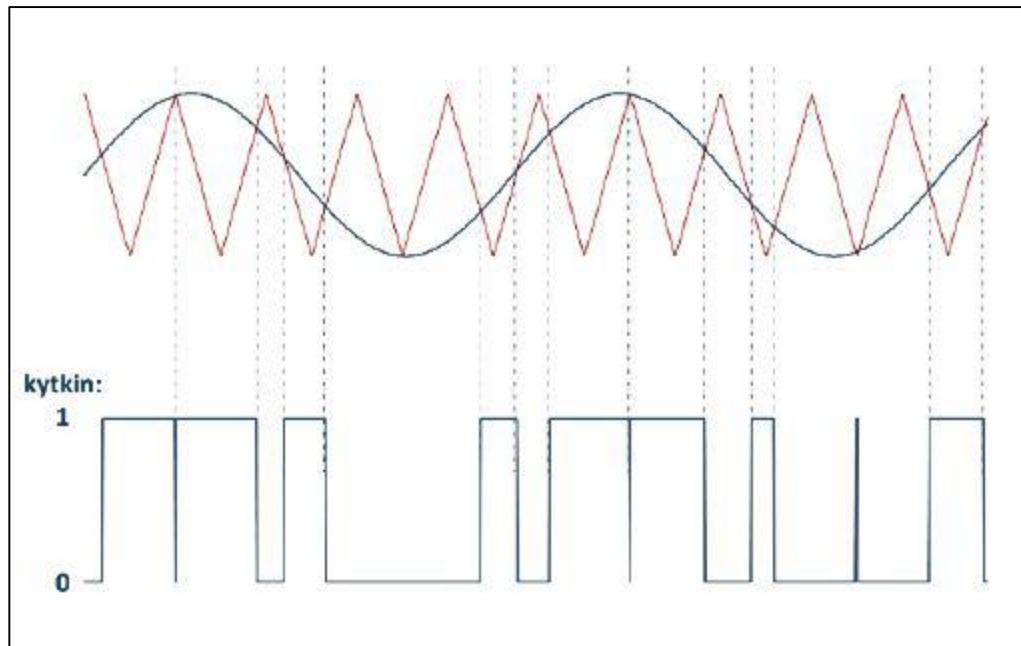
### 3.2 Taajuusmuuttajan ohjaus

Taajuusmuuttajissa on pääsäännöllisesti kolme eri säätötapaa: skalaariohjaus, vektori-säätö ja suora vääntömomenttisäätö (DTC, Direct Torque Control). Kaikissa edellä mainituissa säätötavoissa käytetään pulssileveysmodulointia (PWM). PWM:n toiminta perustuu pulssinleveyden muuttamiseen, amplitudin pysyessä vakiona. Vaihtosuuntaajan kytkinyhdistelmiä ohjaamalla saadaan aikaiseksi pulsseja ja niiden leveyttä säätämällä on mahdollista saada sinimuotoinen virtakäyrä. Kuvassa 3 nähdään eri kytkinkombinaatiot.



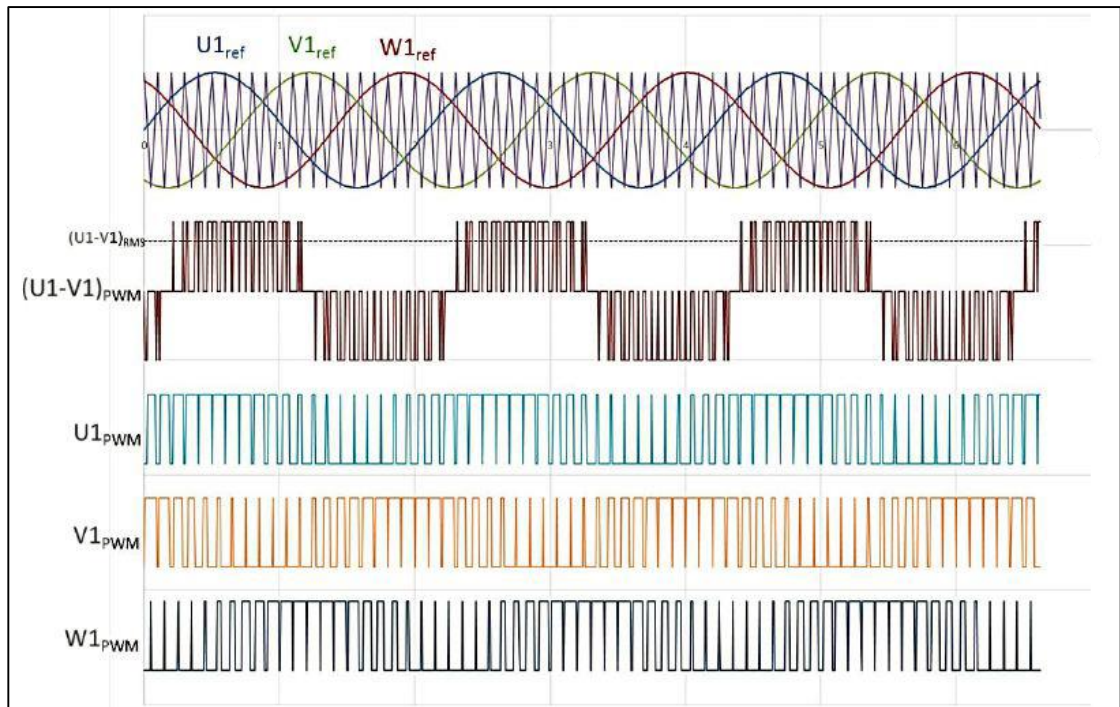
Kuva 3. Vaihtosuuntaajan kytkinvariaatiot.

Kytкимиä ohjataan sinikolmiovertailulla. Tässä verrataan modulointiaaltoa, joka on halututaajuinen vaihtojännite, kolmioaaltoon. Kun kolmioaalto on suurempi kuin modulointiaalto, kytkin on asennossa 0, ja kun kolmioaalto on pienempi, kytkin on asennossa 1, jolloin muodostuu pulssi. Kuva 4 havainnollistaa tämän asian.



Kuva 4. Sinikolmiovertailu (3).

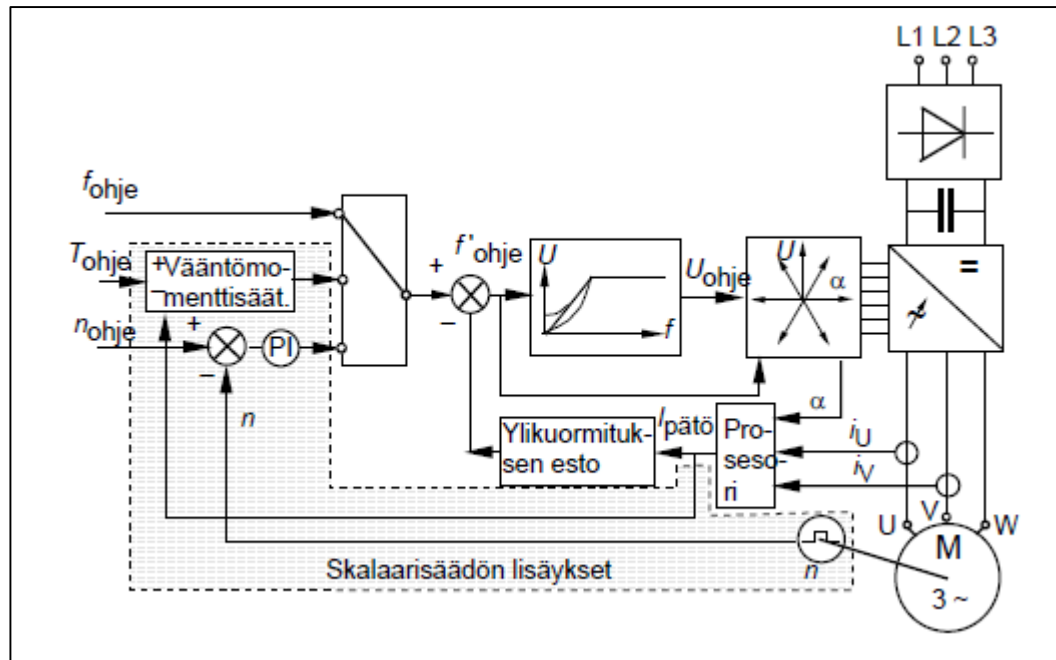
Moottoreille menevä jännite ei ole sinimuotoista, mutta virta on sinimuotoinen. Mitä tiheämpi kolmioaalto on, toisin sanoen mitä korkeampi kytkentätaajuus, sitä sinimuotoisempaa virtaa moottoreille menee. Yhden modulaation sijaan käyttämällä kolmea modulaatiota ja näiden välille 120 asteen vaihe-erolla voidaan muodostaa kolmivaiheista pulssileveysmodulaatiota, kuten kuvassa 5. (3.)



Kuva 5. Kolmivaiheinen PWM (3).

### 3.2.1 Skalaariohjaus ja -säätö

Skalaariohjauksella ohjataan moottorin pyörintänopeutta taajuusmuuttajan lähtötaajuutta muuttamalla, jolloin moottorin pyörintänopeus saavuttaa taajuuden ja kuormitusväätömomentin määräämään arvon. Lähtöjännite riippuu lähtötaajuudesta. Skalaariohjauksessa mitataan vaihevirrat ja lasketaan pätövirtakomponentit. Moottorin pätövirtakomponentti on verrannollinen moottorin väätömomenttiin. Skalaariohjauksessa ei mitata pyörintänopeutta. Skalaarisäädössä voidaan käyttää takometrin signaalia säätämään joko moottorin pyörintänopeutta tai väätömomenttia (kuva 6). (4, s. 23.)



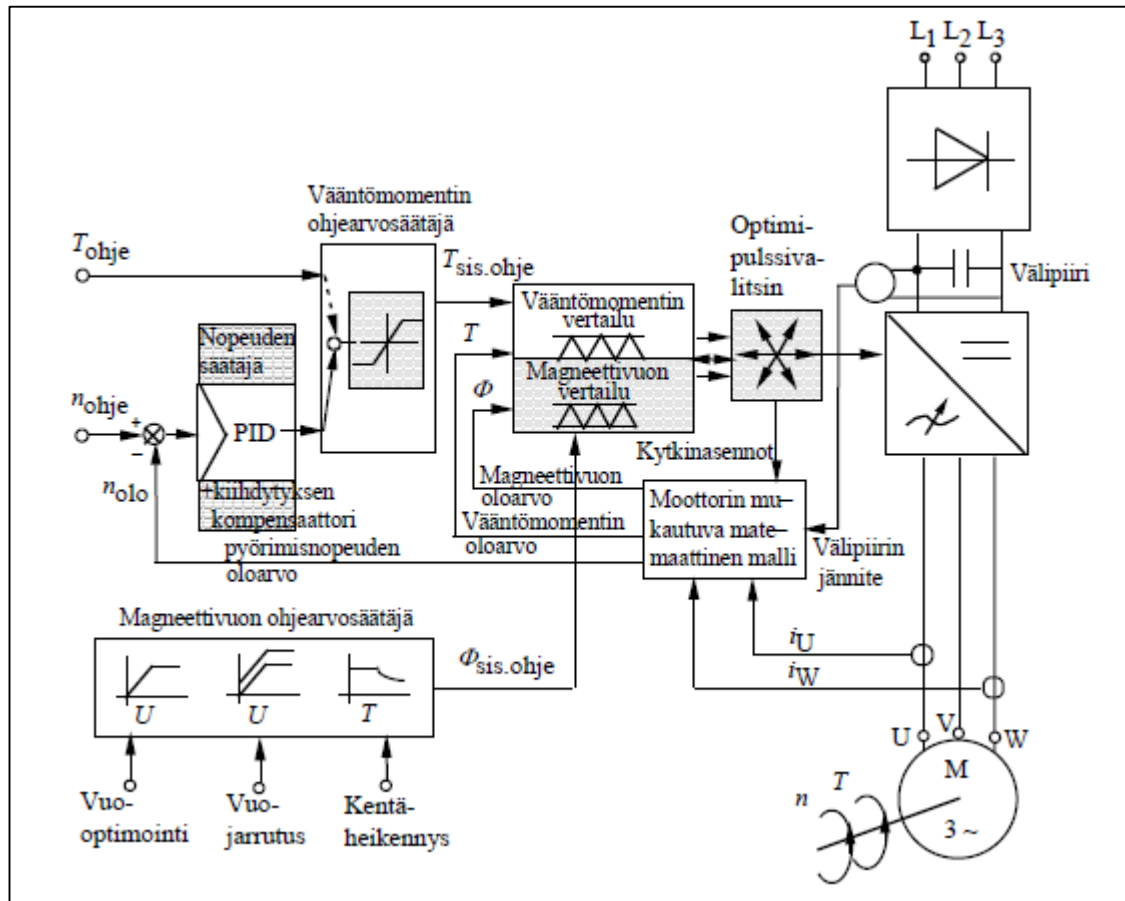
Kuva 6. Skalaariohjauksen kytkentä (4, s. 23).

### 3.2.2 Vektorisäätö

Päävuon ja roottorivirran vektoritulo on oikosulkumoottorin vääntömomentti. Vektorisäädössä vuovektorin suunta on otettava huomioon, jos halutaan säätää vääntömomenttia. Vektorisäädössä tarvitaan tarkkaa moottorivirtojen ja pyörimisnopeuden mittausta. Mitatut suureet syötetään matemaattiseen malliin. Malli laskee moottorin magneettivuon ja jakaa virran vääntömomenttia ja magneettivuota kuvaaviin virran osiin. Virtakomponentit ovat säädettävissä erikseen, joten vääntömomenttia voidaan muuttaa ja vuo pitää vakiona (kuva 7).



tuskykyarvoja vaativissakin käyttökohteissa. Näin sähkömoottoria voidaan ohjata tarkasti suurissa kuormituksissa ja reagoida nopeasti nopeissa kuormituksen muutoksissa (kuva 8). (4, s. 26.)



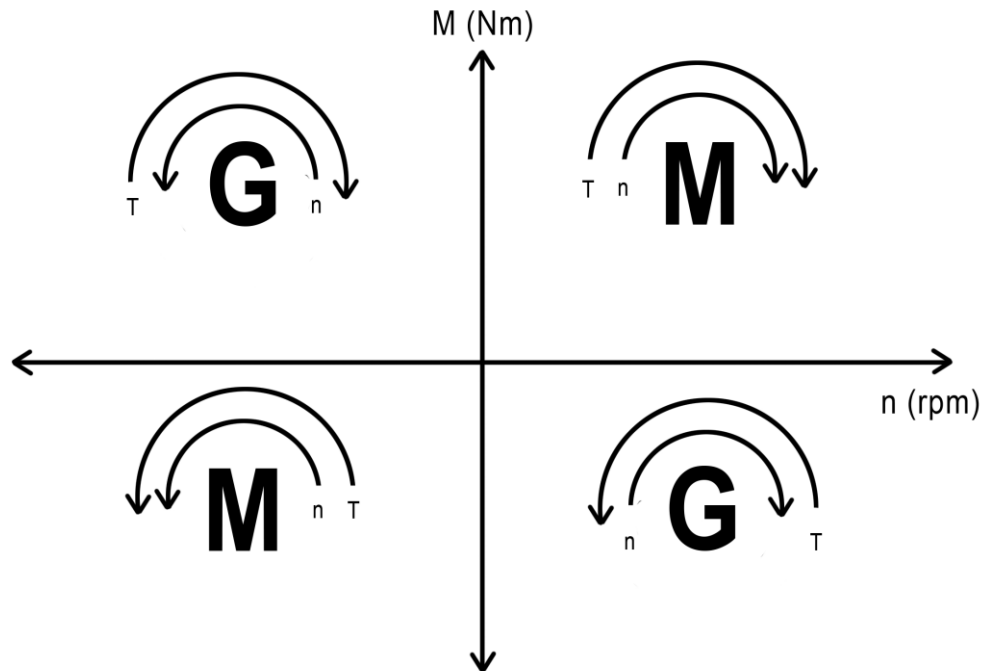
Kuva 8. DTC:n kytkentä (4, s. 26).

### 3.3 Jarruttaminen

Käyttösovellukset voidaan jakaa kolmeen pääluokkaan nopeuden ja momentin mukaan. Ensimmäinen ja yleisimpiä vaihtovirtakäyttöjen käyttökohteita ovat yhden kvadrantin sovellukset, joissa nopeus ja momentti pyörivät samaan suuntaan ja teho kulkee vaihtosuuntaajasta moottorille. Vastaavia sovelluksia ovat esimerkiksi pumput ja puhaltimet. Toiseen luokkaan kuuluvat kahden kvadrantin sovellukset. Tässä luokassa pyörimissuunta ei muutu, mutta momentin suunta voi muuttua. Moottori toimii tällöin generaattorialueella ja tehon suunta kääntyy, kun nopeus ja momentti ovat erimerkkiset.



Kolmannessa luokassa on neljän kvadrantin (4Q) sovelluksia, jossa sekä nopeuden, että momentin suunta voi muuttua vapaasti. Tällaisia sovelluksia ovat esimerkiksi hissit, nosturit ja vinssit. Kuvassa 9 nähdään, milloin moottori toimii generaattorina. (5, s. 5.)



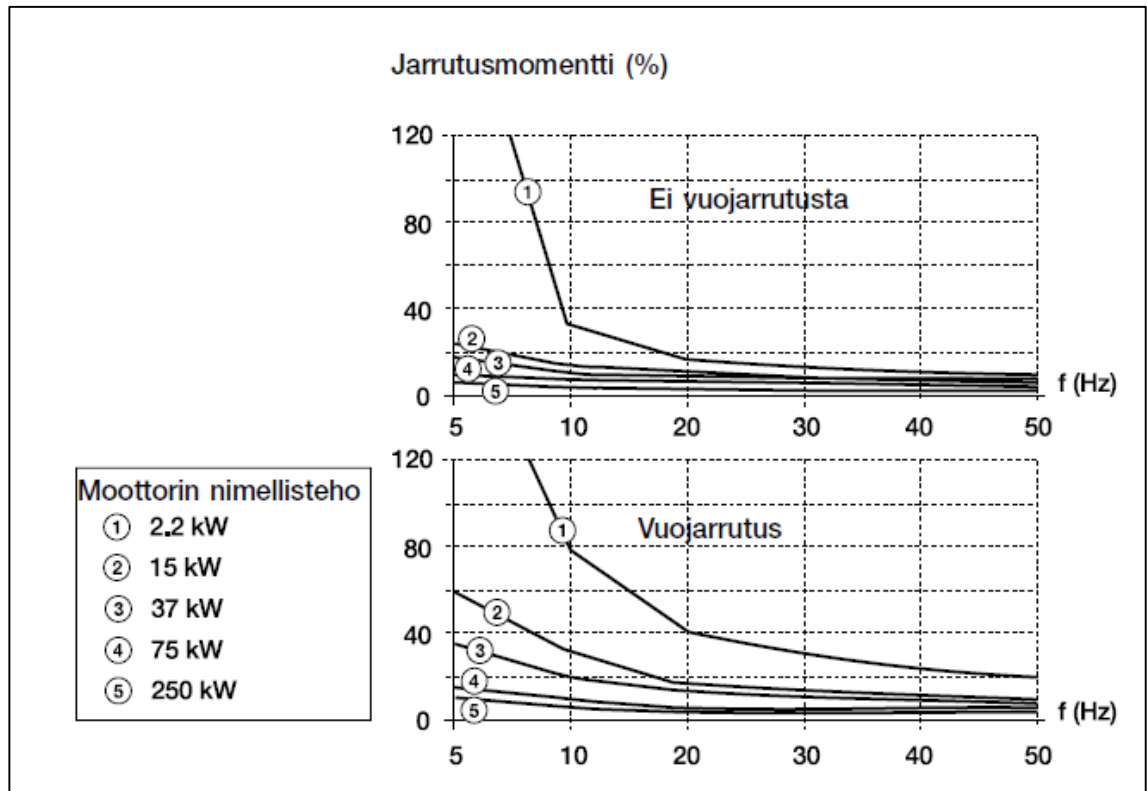
Kuva 9. Käyttösovellukset nopeuden ja momentin mukaan.

On erilaisia tapoja toteuttaa moottorin jarruttaminen taajuusmuuttajalla. Tarkoitus on kuitenkin kuluttaa generoitua tehoa jossain muodossa tai syöttää sitä takaisin verkkoon. Seuraavaksi on esitelty erilaisia tapoja jarruttaa.

### 3.3.1 Vuojarrutus

Vuojarrutusmenetelmä perustuu moottorin häviöihin. Jarruttava teho saadaan, kun taajuusmuuttaja nostaa magnetointivirrat moottorissa, toisin sanoen moottorin vuota kasvatetaan. Tämä onnistuu helposti suoraan momentinsäädöllä. DTC:n avulla jarrutus voidaan toteuttaa tietyn nopeusrampin mukaisesti ja lisäksi on mahdollista vaihtaa nopeasti jarrutustehosta moottoritehoon. Vuojarrutuksella jarrutustehoa kulutetaan pois rautasydämessä ja vastuksissa lämpönä, jolloin ei tarvita lisäkomponentteja, eikä lisäkus-

tannuksia synny. Huonona puolena on moottorin kasvava lämpörasitus, jos jarrutus toistetaan lyhyin aikaväleihin. Mitä suurempi vastusarvo, sitä suurempi jarrutusenergian häviö esiintyy moottorissa. Yleisesti pienissä moottoreissa on suurempi vastusarvo verrattuna nimellisvirtaan, mikä tarkoittaa, että pienissä moottoreissa myös vuoajarrutus on tehokkaampaa (kuva 10). (5, s. 13.)



Kuva 10. Moottorin jarrutusmomentin osuus nimellismomentista lähtötaajuuden funktiona (5, s. 13).

### 3.3.2 Jarrukatkoja

Kahden tai neljän kvadrantin sovelluksissa, kun moottori on generaattorialueella, teho siirtyy moottorista vaihtosuuntaajan kautta välipiiriin. Välipiirin tasavirtakondensaattorit varautuvat kaavan 2 mukaisesti.

$$W = P * t = \frac{C * U_{dc}^2}{2} \quad (1)$$

$$U_{dc} = \sqrt{\frac{2 * W}{C}} = \sqrt{\frac{2 * P * t}{C}} \quad (2)$$

jossa

$W$  on työ

$P$  on teho

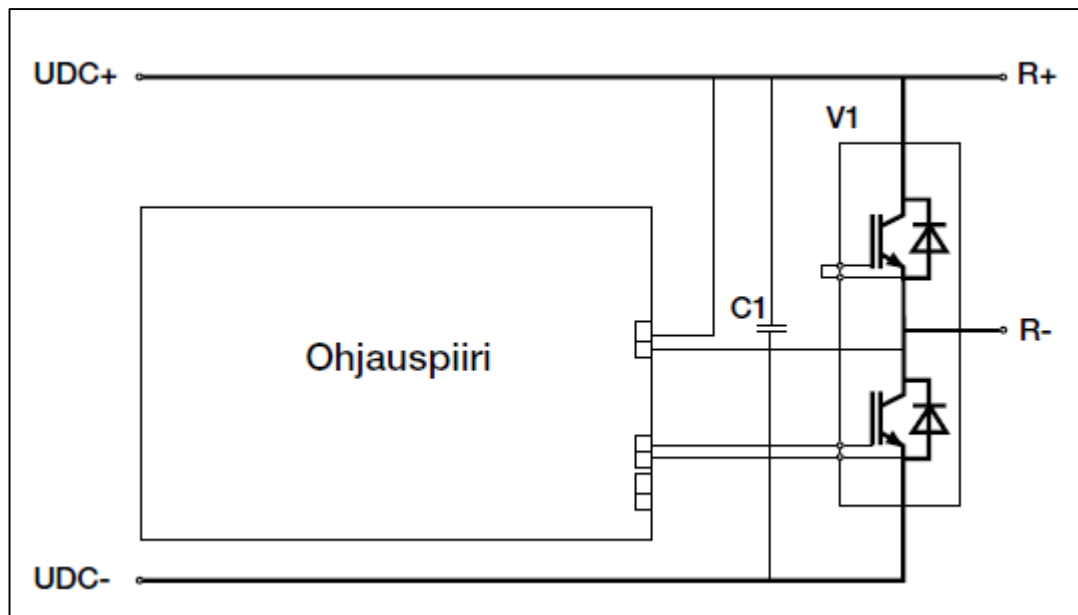
$T$  on aika

$C$  on kapasitanssi ja

$U_{dc}$  on välipiirin jännite.

Koska kondensaattorien kuormitus on rajallinen ja jotta vältetään komponenttien vahingoittumiselta, on mahdollista käyttää kahta menetelmää. Ylijännitesäätäjän avulla estetään välipiirin vakiojännitetason nousu liian korkeaksi rajoittamalla jarrutusmomenttia vaihtosuuntaajia säätämällä. Tämä menetelmä estää käyttäjää määrittämästä nopeusramppeja.

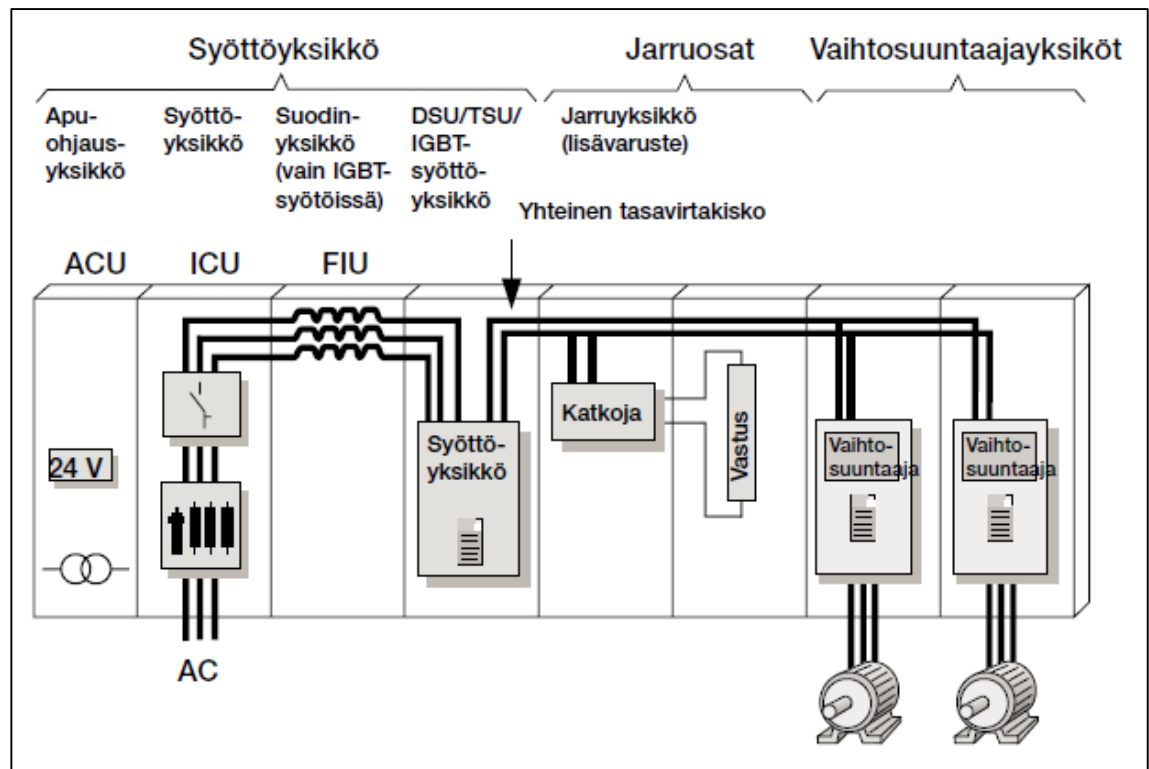
Toinen tapa estää välipiirin jännitteen kasvamista liian korkealle on käyttää erillisiä jarrukatkoja ja tehovastusta (kuva 11). Katkojan tehtävä on ohjata jarrutustehoa vastuksille, joissa teho häviää lämmöksi. Tämä tapa on kohtuullisen edullinen, yksinkertainen ja tehokas menetelmä. Huonona puolena on tehon häviäminen lämmöksi, mutta toisaalta tämä tuotettu lämpö on mahdollista käyttää hyväksi muissa sovelluksissa, esimerkiksi lämmityksessä. (5, s. 15.)



Kuva 11. Jarrukatkojan piirikaavio välipiirissä (5, s. 16).

### 3.3.3 Yhteinen tasavirtapiiri

Kun sovelluksessa on käytössä useampi moottori, niiden käytöt voidaan kytkeä yhteiseen välipiiriin. Kun jarruttava moottori tuottaa tehoa, vaihtosuuntaaja siirtää tehon välipiirille muiden moottorien käytettäväksi. Näin verkosta ei tarvita lisätehoa ja energiaa säästyy. Tässä yhdistelmässä on yhteinen tasasuuntaaja, joka tuottaa välipiiriin tasajännitettä. Lisäksi välipiirissä voidaan käyttää lisävarusteena jarrukatkoja, mikäli useampi moottori jarruttaa samanaikaisesti (kuva 12). (5, s. 22.)



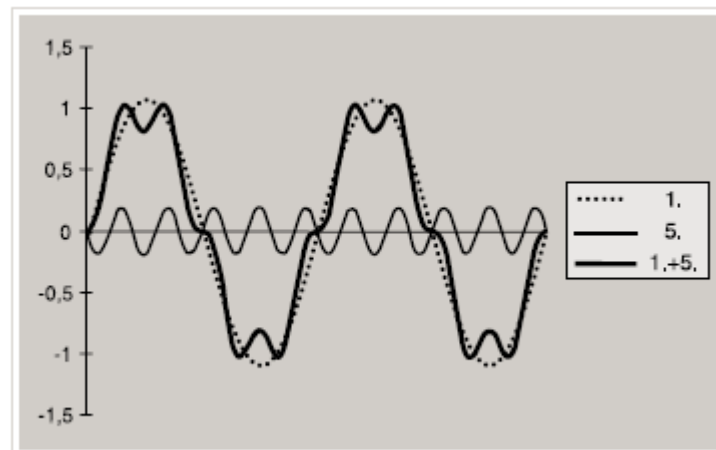
Kuva 12. Yhteisen tasavirtakiskon perusrakenne (5, s. 23).

### 3.3.4 Verkkoon jarrutus

Välipiirin jännitteen kasvaessa tasavirtakondensaattorit ylikuormittuvat ja ylimääräinen jarrutusteho voidaan jarrukatkojen ja vastuksen avulla hävittää. Tämä teho voidaan myös hyödyntää ohjaamalla sitä takaisin verkkoon. Tämä ei perinteisellä taajuusmuuttajan rakenteella kuitenkaan onnistuu. Taajuusmuuttajan syöttöpuolella on käytössä diodisiltoja, jossa teho siirtyy vain yhteen suuntaan, verkosta välipiirille. Korvaamalla diodisiltoja IGBT-transistoreilla voidaan teho siirtää myös verkolle päin. Tätä taajuusmuuttajan osaa kutsutaan verkkovaihtosuuntaajaksi. Verkkovaihtosuuntaajaa ohjataan samalla tavalla kuin moottoripuolen vaihtosuuntaajia eli PWM-säädöllä. Riippuen jarruttavan moottorin pyörimisnopeudesta generoituva jännitteen taajuus ja vaihekulma ovat todennäköisesti erisuuruiset kuin verkon. Tämä saadaan eliminoidua kun vaihtojännitteet muutetaan tasajännitteeksi ja takaisin vaihtojännitteeksi synkronoimalla taajuutta ja vaihekulmaa verkon kanssa. Koska verkkovaihtosuuntaajan tuottama jännite on pulssimainen, pitää tämä suodattaa LCL-suodattimen avulla mahdollisimman sinimuotoiseksi. LCL-suodatin myös pienentää laitteen aiheuttama THD-arvoja (Total Harmonic Distortion, harmoninen kokonaissärö) ja virta saadaan lähes sinimuotoiseksi. (5, s. 19–22.)

### 3.4 Häiriöt ja yliaallot

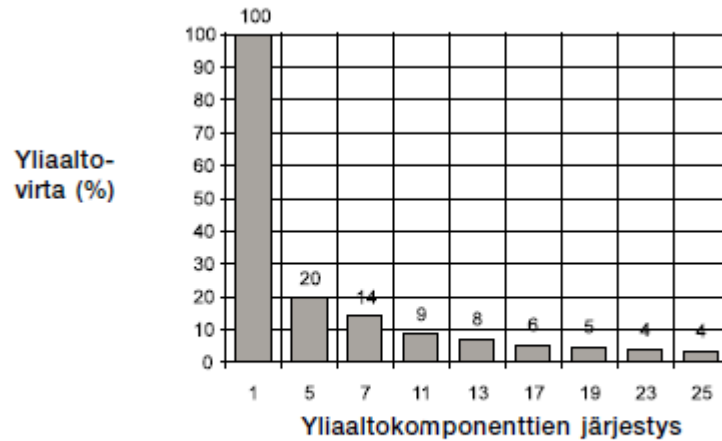
Suomen yleisen sähköjakelun verkossa käytetty jakelujännitteen perusaallon nimellistaajuus on 50 Hz. Verkon vaihtojännitteet ja -virrat, joiden taajuus ylittää nimellistaajuuden, kutsutaan yliaalloiksi (kuva 13). Niin sanotusti ”puhtaan verkon” aaltomuoto on sinimuotoinen. Yliaaltoisessa verkossa jännitteen ja virran käyrämuoto ei ole täysin sinimuotoinen, jolloin näitä kutsutaan säröytyneeksi. (6, s. 26–27.)



Kuva 13. Perustaajuinen virta, 5. yliaaltovirta ja näiden yhteenlaskettu virta (2, s. 7).

Tavallisesti oikosulkumoottorit eivät aiheuta yliaaltoja verkkoon, sillä ne pyörivät samalla taajuudella kuin verkon taajuus, jolloin ne ottavat verkosta sinimuotoista virtaa. Kun käytössä on taajuusmuuntaja, joka säätää moottorin pyörintänopeutta, verkosta otettu tai syötetty virta ei ole enää täysin sinimuotoista. Suuntaajat toimivat yliaaltovirtalähteenä, jotka säröyttävät verkkojännitettä. Taajuusmuuttaja on toimintatapansa vuoksi yksi pahimmista yliaaltohäiriöiden aiheuttajista. Näillä häiriöillä voi olla pahojakin seurauksia samassa verkossa oleville laitteille. Pahasti säröytynyt verkko voi vahingoittaa tai jopa rikkoa muita laitteita. Yleisemmin verkon yliaallot aiheuttavat laitteistossa lisähäviöitä, lämpenemistä ja toimintahäiriöitä. (6, s. 30–32.)

Harmoninen kokonaissärö eli THD ilmaisee puhtaaseen sinisignaaliin syntyneiden harmonisten komponenttien voimakkuuden suhteessa perustaajuisen aallon voimakkuuteen. Harmoninen särö muodostuu perusaallon harmonisista kerrannaisista, jotka ovat  $2f_0, 3f_0, 4f_0, 5f_0$  jne., missä  $f_0$  on perustaajuus. Kuvassa 14 tämä on havainnollistettu.



Kuva 2.2 Teoreettinen yliaaltosisältö 6-pulssisen tasasuuntaajan symmetrisessä virrassa.

Kuva 14. Teoreettinen yliaaltosisältö tasasuuntaajan symmetrisessä virrassa (2, s. 7).

Tulovirran yliaaltojen kokonaissärö määritellään kaavalla

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (3)$$

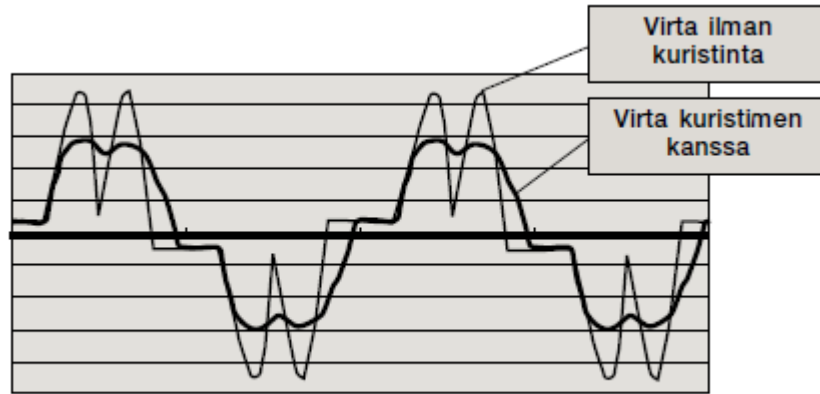
jossa  $I_n$  on yliaaltokomponentin tehollinen kokonaisvirta.

Vastaavasti tulojännitteen THD saadaan kaavasta

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (4)$$

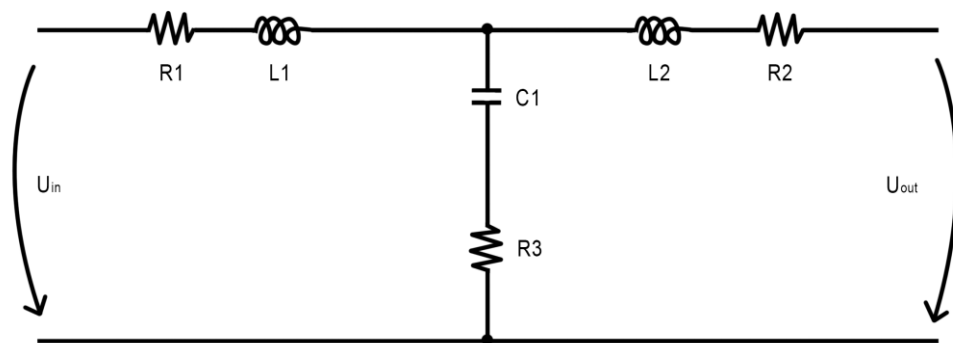
jossa  $V_n$  on yliaaltokomponentin tehollinen kokonaisjännite.

ABB:n ja muidenkin valmistajien taajuusmuuttajien tulee täyttää erilaisia standardeja ennen kuin niitä voidaan myydä asiakkaille. Yksi näistä standardeista (7) vaatii, että THD-arvojen on oltava sallittujen rajojen alapuolella. Pelkästään taajuusmuuttajan toiminnan säädöillä ei saada arvoja sopiviksi. Käyttöön tarvitaan suodatus. Oikein mitoitettu suodatin poistaa pahimmat yliaaltovirrat ja lisäksi pienentää hieman loistehoa (kuva 15). Koska suodatin on lisälaitte, siitä on myös haittaa. Suodatin vaatii oman tilansa, lämpenee eli kuluttaa tehoa ja tuo laitteelle lisähintaa. Suodatin voidaan toteuttaa eri kondensaattori ja kela aseteluilla, kuten LCL tai LC -suodattimissa.



Kuva 15. Virta ilman suodatinta ja suodattimen kanssa (2, s. 21).

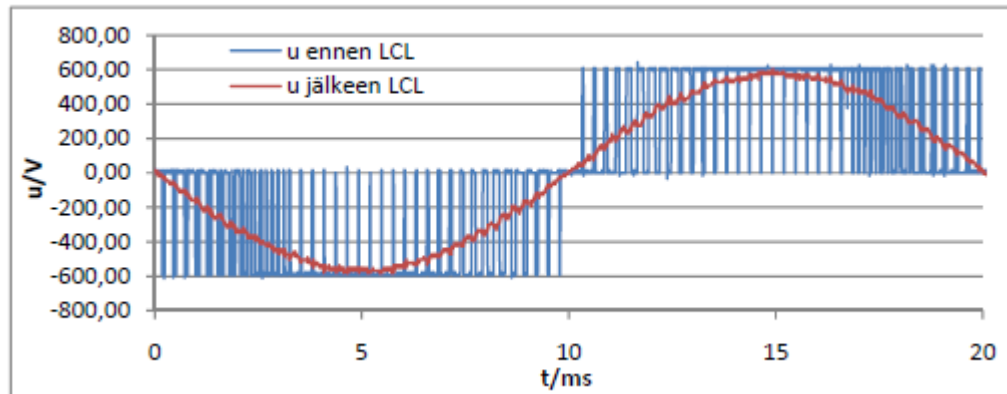
Tämän insinööriyön kohteena on verkkoon jarruttava taajuusmuuttaja, jossa on käytössä LCL-suodatin. LCL-suodatin sisältää kaksi sarjassa oleva induktanssia ja niiden väliin rinnakkain kytketty kondensaattori, kuten kuvassa 16. Koska kyseessä on kolmi-vaiheikäyttö, niin kaikkia komponentteja on kolminkertaisesti.



Kuva 16. LCL-suodattimen piirikaavio yhden vaiheen osalta.

Seuraavasta kuvaajasta 17 nähdään, miten LCL-suodatin vaikuttaa taajuusmuuttajan syöttämän pulssimuotoisen jännitteeseen ja muuttaa sen lähes sinimuotoiseksi.





Kuva 17. Taajuusmuuttajan napajännitteen käyrämuoto (sininen) sekä LCL-suodattimen jälkeinen käyrämuoto (punainen).

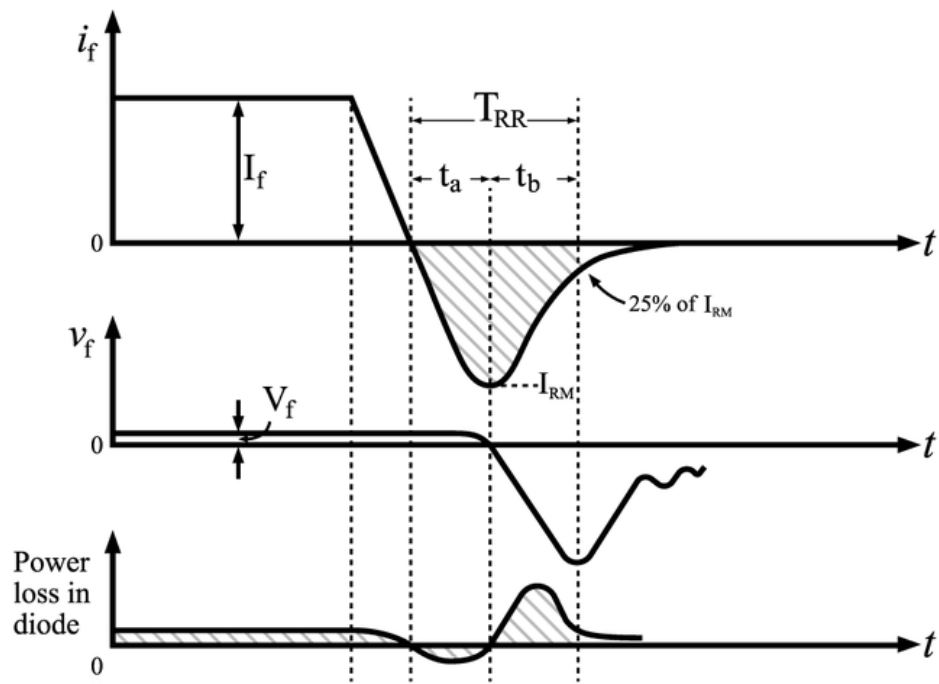
### 3.5 Häviöt

Taajuusmuuttaja on sähkölaite, jonka läpi kulkee tietty teho. Teho voi kulkea joko verkosta moottorille tai päinvastoin, riippuen onko kyseessä verkkoon jarruttava vai tavallinen taajuusmuuttaja. Teho joka tulee taajuusmuuttajalle, ei kumminkaan ole yhtä suuri kuin mikä laitteesta lähtee moottoreille. Matkalla tapahtuu häviöitä laitteen sisällä. Häviöitä syntyy kaikissa sähköisissä komponenteissa heti jo laitteen sisääntulossa johtimien resistanssista johtuen. Johtimien lisäksi häviöitä syntyy pääosin suodattimissa, verkkovaihtosuuntaajissa, vaihtosuuntaajissa, välipiirin kondensaattoreissa ja tasausvastuksissa, puhaltimissa ja ohjauskorteissa. Tämän insinööriyön tapauksessa suodattimena toimii LCL-suodatin ja verkkovaihtosuuntaaja on korvattu toisella vaihtosuuntaajalla. Näiden häviöiden summa eli kokonaishäviö on suhteessa laitteen lähtötehoon varsin pientä, mikä tekee taajuusmuuttajasta edelleen kannattavan laiteen.

#### 3.5.1 Kytkehäviöt ja johtavan tilan häviöt

IGBT:ssä on sekä johtamistilan häviöitä että kytkentähäviöitä. Kytkehäviöt syntyvät, kun transistori tai diodi niin sanotusti sytytetään tai sammutetaan, jolloin tämä on suuren virran ja jännitteen vaikutuksen alaisena. Suurimmat kytkentähäviöt johtuvat pääosin virran hännästä, joka vaikuttaa vielä hetken. Kytkehäviöt vaikuttavat vain lyhyen aikaa, mutta kytkentätaajuuden kasvaessa myös kytkentähäviöt kasvavat.

Seuraavassa kuvassa 18 on kuvattu diodin käyttäytyminen kun se sammutetaan. Häviötehoa on vakiomäärä johtavassa tilassa, kunnes diodi sammutetaan, jolloin häviöt lisääntyvät hetkellisesti.



Kuva 18. Virran ja jännitteen käyttäytyminen, kun diodi kytetään pois päältä (8).

Seuraavilla kaavoilla voidaan laskea IGBT:n transistorien ja diodien johtavasta tilasta aiheutuma häviö sekä kytkentähäviö. (7, s. 33–36.)

Transistorin johtavan tilan häviö lasketaan kaavalla

$$P_{L,on,T} = \sqrt{2} * I_{out} U_{T,th} * \left( \left( \frac{1}{2\pi} \right) + \frac{1,22 * m * \cos\phi}{8} \right) + \frac{U_{T,r} - U_{T,th}}{I_{r,out}} * 2 * I_{out}^2 * \left( \frac{1,22 * m * \cos\phi}{3\pi} + \frac{1}{8} \right) \quad (5)$$

jossa

$U_{T,th}$  on transistorin kynnyksjännite

$U_{T,r}$  on transistorin johtavan tilan jännite CDM:n nimellisvirralla

$I_{r,out}$  on CDM nimellisvirran tehollisarvo

$m$  on modulaatiokerroin.

$$m = 2 * \sqrt{2} * \frac{U_{out}}{\sqrt{3} * U_{dc}} \quad (6)$$

Diodin johtavan tilan häviö voidaan laskea kaavasta

$$P_{L,on,D} = \sqrt{2} * I_{out} U_{D,th} * \left( \frac{1}{2\pi} - \frac{1,22 * m * \cos\phi}{8} \right) + \frac{U_{D,r} - U_{D,th}}{I_{r,out}} * 2 * I_{out}^2 * \left( \frac{1}{8} - \frac{1,22 * m * \cos\phi}{3\pi} \right) \quad (7)$$

jossa

$U_{D,th}$  on diodin kynnsjännite

$U_{D,r}$  on diodin johtavan tilan jännite CDM:n nimellisvirralla.

Transistorin kytkentähäviö saadaan kaavalla

$$P_{L,sw,T} = \frac{E_T}{\pi} * U_{DC} * \sqrt{2} * (I_{out} + I_{motor\_cable}) * f_{sw} \quad (8)$$

$E_T$  on transistorin kytkentäenergia jännitteen ja virtaan suhteen

$f_{sw}$  on kytkentätaajuus.

Diodin kytkentähäviö saadaan vastaavasti kaavalla

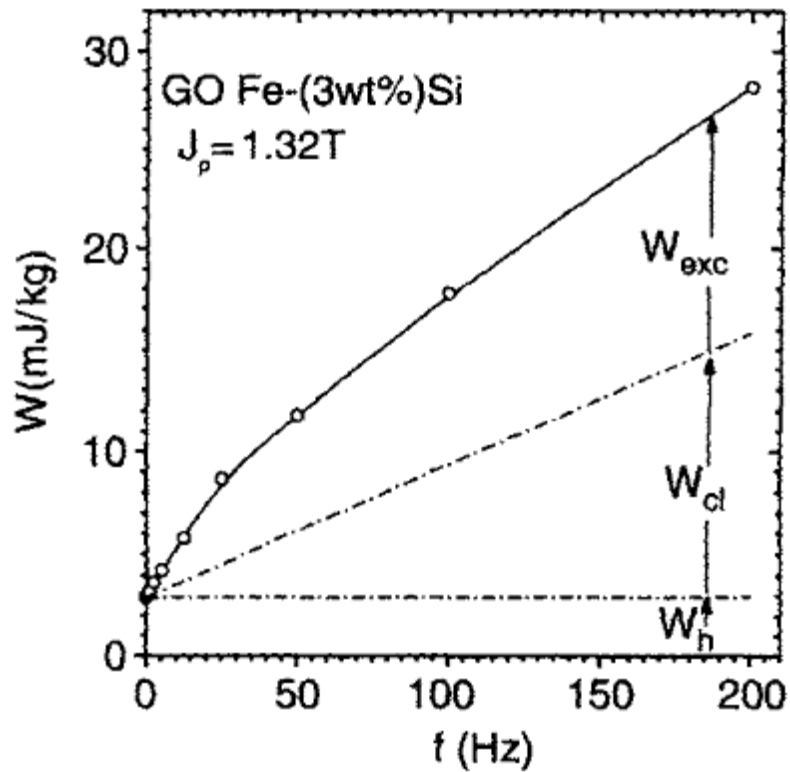
$$P_{L,sw,D} = \frac{E_D}{\pi} * U_{DC} * \sqrt{2} * (I_{out} + I_{motor\_cable}) * f_{sw} \quad (9)$$

$E_D$  on diodin kytkentäenergia jännitteen ja virtaan suhteen.

### 3.5.2 Sydänhäviöt

Kuristimissa käytetään usein ferromagneettisesta materiaalista tehtyä sydäntä, jolla saavutetaan suurempia magneettivuon tiheyksiä kuin ilmasydämisissä kuristimissa. Muuttuva magneettivuo aiheuttaa sydänmateriaalissa häviöitä, jotka voidaan jakaa kolmeen

osaan, jotka ovat hystereesihäviöt, pyörrehäviöt ja lisähäviöt. Seuraavassa kuvassa 19 on esitetty erän kuristimen sydänhäviön häviökomponentit taajuuden funktiona.



Kuva 18. Rautasydämen eri häviötekijät taajuuden funktiona: hystereesihäviöt, pyörrehäviöt ja lisähäviöt. (9, s. 7).

Hystereesihäviöt johtuvat sydämen edestakaisesta magnetoitumisesta. Tämä häviö voidaan minimoida ainoastaan kuristimen sydänmateriaalin valinnalla. Myös pyörrehäviöt johtuvat käytetystä materiaalista sekä sydämen rakenteesta. Lisähäviöt johtuvat kuristimessa aiheutuvasta resonanssista. Taajuuden kasvaessa syntyy enemmän pyörrevirtoja, joiden vuoksi magneettinen vastapaine kasvaa, mikä aiheuttaa liikkeitä sydämen seinämissä. (10, s. 558.)

### 3.5.3 Käämihäviöt

Kuristimissa on resistiivinen käämitys, jolloin syntyy  $i^2R$ -häviöitä. Näitä käämihäviöitä kutsutaan myös kuparihäviöiksi, sillä yleisin käämitysmateriaali on kupari. Eri sydänhäviöistä kaikki käämihäviöt muuttuvat lopulta lämmöksi. Käämihäviöihin vaikuttaa lähinnä virta. Kuten kaavassa 10 nähdään, häviöteho käämityksessä on virran neliöllinen

tulo käämin resistanssiin. Myös lämpötila vaikuttaa häviön suuruuteen, sillä käämin ominaisresistiivisyys vaihtelee eri lämpötiloissa. Kaavalla 11 voidaan laskea käämille resistanssi kuristimen käyttölämpötilassa (11, s. 2).

$$P = I^2 * R \quad (10)$$

jossa  $P$  on käämin häviö ja  $R$  käämin resistanssi.

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta t) \quad (11)$$

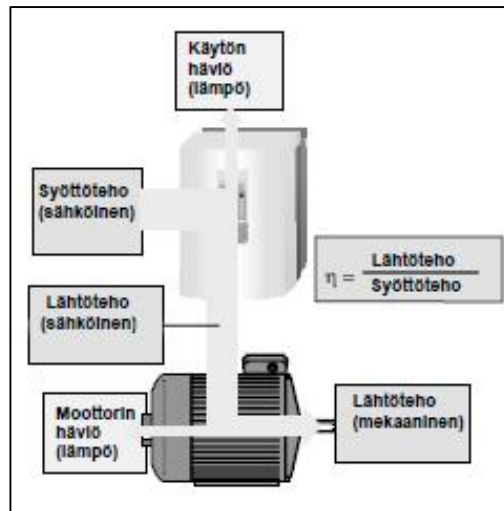
jossa  $\alpha$  on materiaalin resistiivisyyden lämpötilakerroin ja  $R_0$  on referenssilämpötilassa mitattu resistanssi.

#### 3.5.4 Muut komponenttihäviöt

Sähkölaitteissa muodostuu myös muita häviöitä muun muassa, kuparikiskoissa, johdoissa, piirikorteissa, laitteen puhaltimissa ja kondensaattoreissa. Näiden yksittäisten komponenttien häviöteholaskenta on kuitenkin työlästä, joten yleensä nämä lasketaan yhtenä häviöryhmänä muiden häviöiden summan erotus laitteen kokonaishäviöstä.

#### 3.5.5 Hyötysuhde

Taajuusmuuttajan hyötysuhteen laskemisessa tarvitaan laiteelle tulevaa tehoa ja laitteesta lähtevää tehoa. Näiden suhde ilmaisee laitteen hyötysuhdetta. Seuraava kuva 20 havainnollistaa asiaa.



Kuva 19. Laitteen hyötysuhde (12, s. 14).

Hyötysuhdekaava on

$$\eta = \frac{P_{\text{lähtö}}}{P_{\text{syöttö}}} * 100\% \quad (12)$$

jossa  $P_{\text{lähtö}}$  on lähtöteho ja  $P_{\text{syöttö}}$  on tuloteho.

Hyötysuhde voidaan laskea kaavoja 12 ja 13 käyttäen myös laitteen häviön avulla, kun tiedetään sen lisäksi syöttöteho.

$$P_{\text{lähtö}} = P_{\text{syöttö}} - P_{\text{loss}} \quad (13)$$

jossa  $P_{\text{loss}}$  on laitteen häviö.

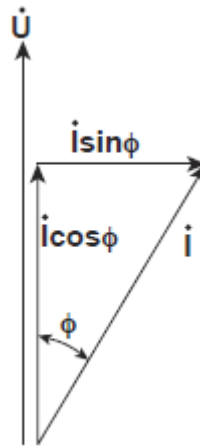
Pätöteho on vaihtovirtapiirissä todellisuudessa kulutettu teho. Tämä on teho, joka tekee työtä ja esimerkiksi vastuskuormalla muuttuu lämmöksi. Pätötehon tunnus on  $P$  ja yksikkö watti (W).

$$P = U * I * \cos\varphi \quad (14)$$

jossa  $U$  on vaihejännite,  $I$  on vaihevirta ja  $\varphi$  on vaihekulma.

Toisin kuin pätöteho, loisteho ei tee työtä. Se värähtelee edestakaisin kuorman ja verkon välillä. Loisteho kuormittaa verkkoa ja verkon siirtojohtoja.

$$Q = U * I * \sin \varphi \quad (15)$$



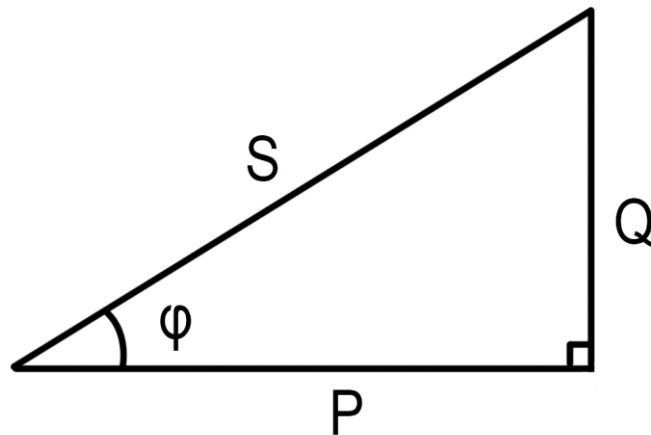
Kuva 21. Virran vaihekulma suhteessa vaihejännitteeseen (13, s. 352).

Näennäisteho on vaihejännitteen ja vaihevirran tulo. Vaihtovirtapiirissä, jossa ei ole virran ja jännitteen välissä vaihe-eroa, näennäisteho on yhtä suuri kuin pätöteho.

$$S = U * I \quad (16)$$

Näennäistehoa voidaan myös laskea pätötehon ja loistehon avulla seuraavasti.

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (17)$$



Kuva 20. Kaava 16 esitetään graafisesti suorakolmion avulla.

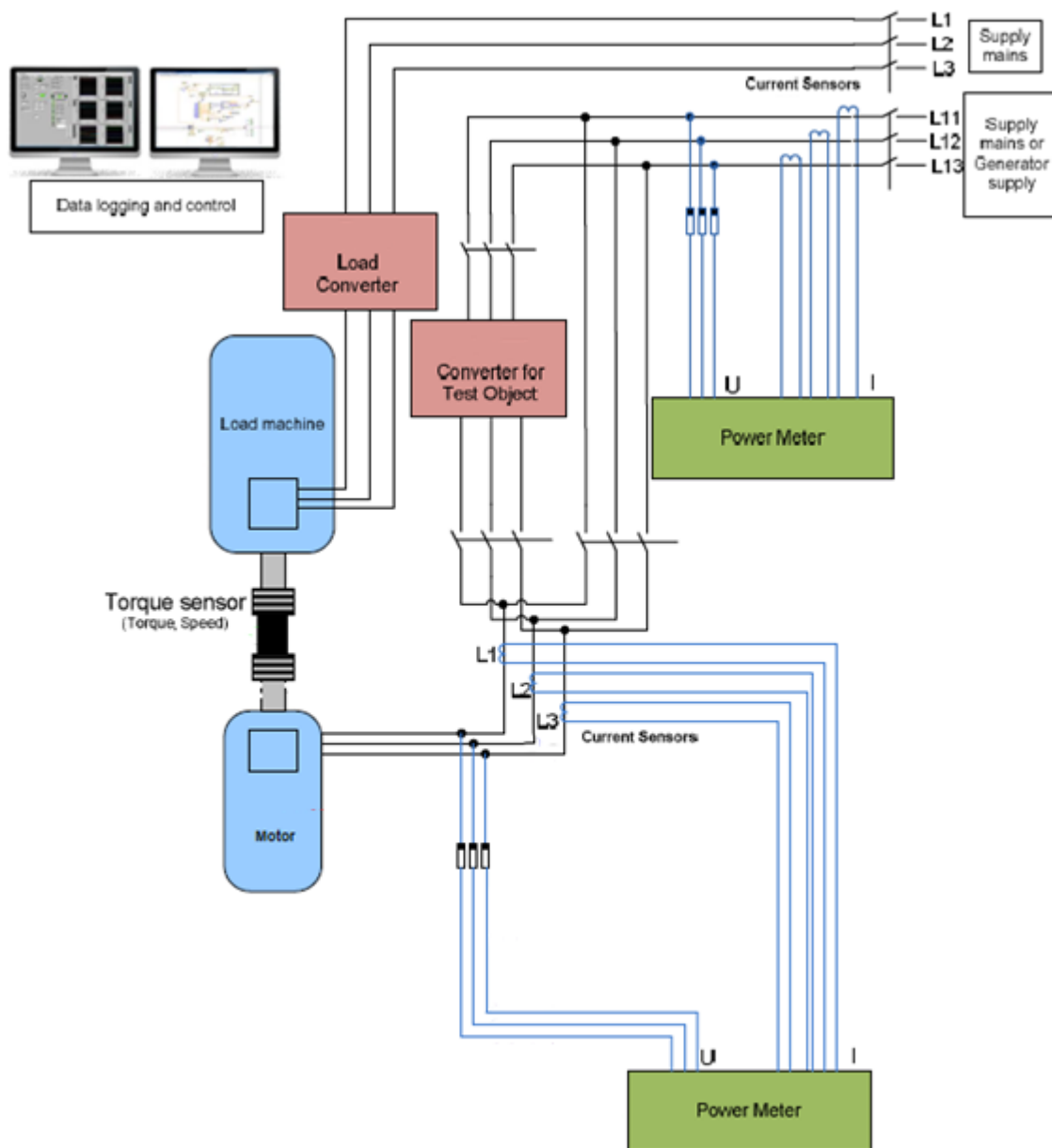
Käytetyt vaihevirratt ja vaihejännitteet ovat molemmat tehollisarvoja. Tehollisarvon laskentakaava on seuraavanlainen:

$$U_{rms} \text{ tai } I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f(t)^2 dt} \quad (18)$$

#### 4 Testauskokoontapano

Häviömittaukset tehtiin ABB:n laboratoriotiloissa, jossa on käytössä tarvittavat mittalaitteet, testilaitteet, moottorit ja syöttöverkko. Mittauskohteena on eräs ABB:n 90 kW:n suuruinen verkkoon jarruttava taajuusmuuttaja. Häviömittaukset suoritettiin tälle laitteelle kahdella eri menetelmällä, sähköisellä mittaustavalla ja kalorimetrisellä tavalla. Sähköisessä mittaustavassa käytetään kahta Yokogawan WT3000-tehoanalysaattoria. Niiden lisäksi käytössä on Hitecin Zero-flux-virtamuuntimet, jotka ovat liitetty tehoanalysaattoreihin Hitecin vahvistimien kautta. Vaihejännitteet mitataan suoraan tehoanalysaattorille tulevista mittajohdoilla ilman välivahvistinta tai erottajaa. Kytkenät on havainnollistettu kuvassa 23.

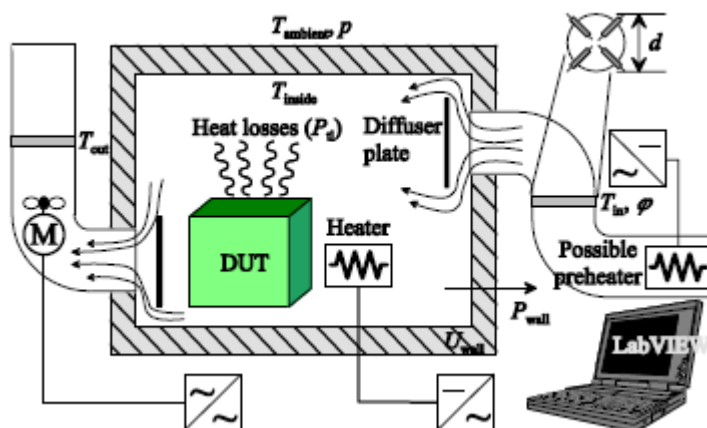




Kuva 21. Taajuusmuuttajan, moottorin ja mittalaitteiden kytkentä.

Kalorimetrisessä menetelmässä käytetään lämpöeristettyä kammiota, missä on kaksi aukkoa, sisääntulo ja ulostulo ilmalle ja jokaisessa 4 kpl PT-100-lämpöantureita. Kammiossa on kuusi eristettyä kuparikiskoa, joista syöttö- ja moottorikaapelit yhdistetään testissä olevalle laitteelle (EUT, Equipment under test). Kammiossa on myös iso tasavirta-käyttöinen tehovastus ja 12 kpl PT-100-lämpöantureita. Ulostuloaukon yhteydessä on imutoiminen puhallin, jota ohjaa pienempi ABB:n taajuusmuuttaja, joka on asennettu

kammion ulkoseinään. Kalorimetrikammion yhteydessä on käytössä erillinen pienempi kaappi, jossa on lämpötilaloggauslaite, Keithley, DC-jännitelähde ja Ethernet-reititin. Kalorimetria kokonaisuudessaan ohjataan tietokoneen kautta LabView-ohjelman avulla (kuva 24).



Kuva 22. Kalorimetrinen testikokoonpano (14, s. 9).

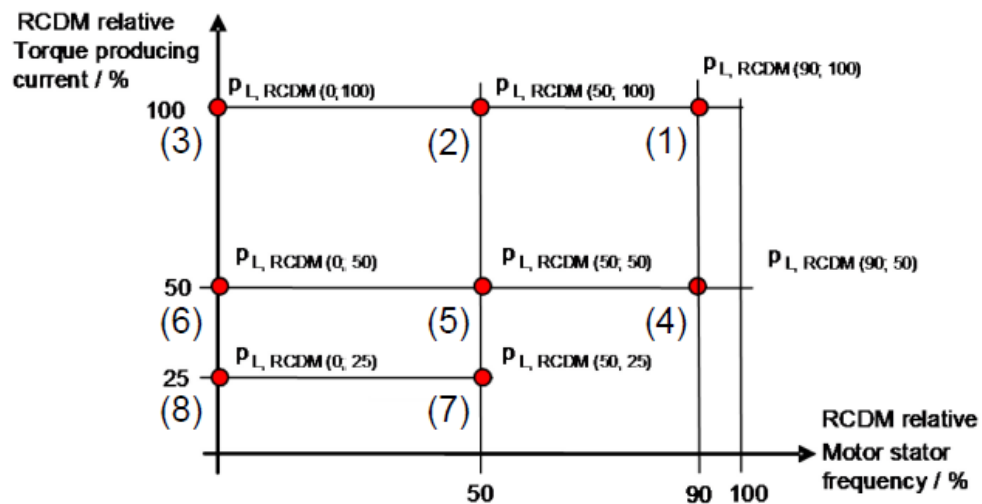
Taajuusmuuttajan syöttö- ja moottorikaapeleina käytetään 120 mm<sup>2</sup> paksuja ja 2,5 m pitkiä monisäikeistä kuparikaapeleita, jotka on mitoitettu laitteen tehojen mukaan. Lisäksi testeissä käytetään oskilloskooppia, DC-virta-anturia, DC-jänniteanturia, jännitelähteitä ja Agilentin lämpötilaloggauslaitetta. Kokemuksen mukaan LCL-suodatin on massansa vuoksi hitain komponentti lämpenemään, tämän takia suodattimen eri kohtiin asennetaan J-tyyppin termopareja mittaamaan kyseisen kohdan lämpötilaa. Näitä lämpötiloja seuraamalla voidaan tarkistaa hetkeä jolloin komponenttien lämpötilat saavuttavat tasapainotilan. Käyttömoottorina käytetään ABB:n M2BA 280 SMB:tä ja tätä vastaan kuormamoottorina käytetään ABB:n M2BA 355 S-moottorimallia.

## 5 Mittausmenetelmät

### 5.1 Ajopisteet

Kuten luvussa 4 tuli ilmi, mittausmenetelmiä on kaksi, sähköinen mittaustapa (kutsutaan myös Input-Output) ja kalorimetrinen tapa. Testit suoritetaan niin, että molemmat mene-

telmät toteutetaan samanaikaisesti, jotta tulokset ovat mahdollisimman paljon verrannollisia, kun olosuhteet ovat identtisiä. Tarkastelupisteet ovat standardin EN 50598-2 (7) mukaiset kuormituspisteet sekä EUT:n ollessa valmiustilassa. Valmiustilassa laitteessa on ainoastaan tulosillat aktiivisena, joka ylläpitää välipiirin jännitettä. Standardin mukaiset pisteet ovat tasaisia kuormituspisteitä, syklinen kuormitus on enemmän todellista taajuusmuuttajakäyttöä. Ajopisteet ovat nähtävillä kuvassa 25. Ajopisteet joissa standardin mukaan olisi 0 hertsin taajuus, ajetaan 5 Hz:n taajuudella, jotta saadaan pidettyä kuormamomentti stabiilina. Taajuusmuuntaja on suunniteltu niin, että lämpöjen noustaessa laite säätää kytkentätaajuutta alemmas. Näin vältetään komponenttien ylisituksesta ja laiterikosta. ABB:n taajuusmuuttajissa kytkentätaajuutta voidaan vakioda haluttuun arvoon, mikä helpottaa tulosten vertailua eri ajopisteiden välillä.



Kuva 23. Standardin mukaiset ajopisteet (7, s. 24).

Jokaista ajopistettä ajetaan niin kauan, kunnes kaikki lämpötilat ovat stabiloituneet vähintään 20 minuuttia. LabView-ohjelman kautta nähdään kalorimetrikammion lämpötilat ja Agilent-mittalaitteen sekä taajuusmuuttajan oman datan avulla nähdään EUT:n lämpötilat. Jokaisen ajopisteen aikana mitataan DC-jännite sekä DC-virta, joka menee välipiiristä laitteen piirikorteille ja puhaltimille.

Toisessa tarkastelutavassa LCL-suodatin irrotetaan taajuusmuuttajasta ja asennetaan kalorimetrin sisälle yksinään muun laitteiston ollessa kammion ulkopuolella kytkettynä jatkokaapeleilla toisiinsa. Samat ajopisteet ajetaan ja tarkastellaan LCL-suodattimen häviöt molemmiin menetelmin.

## 5.2 Sähköinen mittaus

Sähköisellä menetelmällä häviöteho saadaan mitattua, kun tiedetään EUT:n tulevaa ja lähtevää tehoa. Häviöteho on yksinkertaisuudessaan näiden kahden tehoarvon erotus. Vaikka tämä kuulostaa yksinkertaiselta, niin taajuusmuuttajien tapauksessa tämä ei sitä ole. Tehon laskussa tarvitaan vaiheiden välistä virta- ja jännitearvoja. Kuten aikaisemmin tuli todettu, taajuusmuuttajan lähtöjännite on PWM-muotoinen, mikä hankaloittaa tämän mittaamisen. Käytössä oleva tehoanalyysointilaite ei täten anna aina todellista tehon arvoa, johtuen lähtöjännitteestä sekä mittalaitteen omasta mittauserävarmuudesta. Tehoanalyysointilaitteen (Yokogawa WT3000) mittaustapa on esitetty liitteessä 1 ja tehoanalyysointilaitteen tarkkuus liitteessä 2.

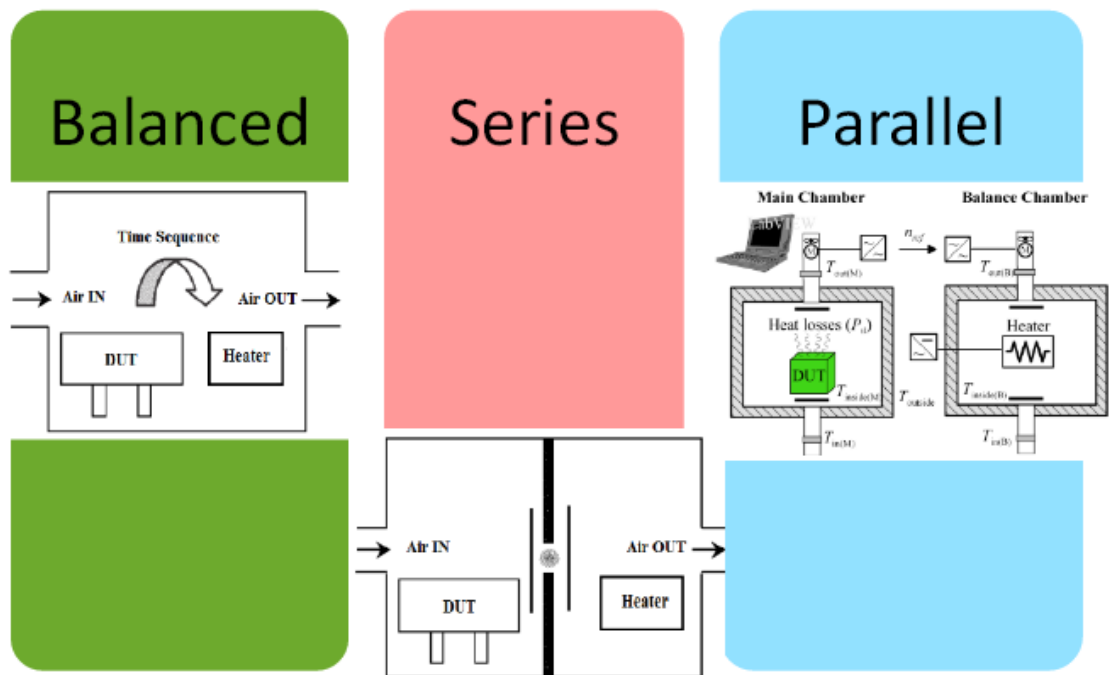
## 5.3 Kalorimetrinen mittaus

Toinen tapa mitata laitteen häviöt on käyttää kalorimetristä menetelmää. Tässä menetelmässä on kaksi vaihetta. Ensimmäisessä vaiheessa, eli kalibrointivaiheessa, ensin määritellään haluttu lämpötilaero sisään- ja ulostulolämpöjen välille LabView-ohjelmaan. Tämän jälkeen ohjelma ohjaa pienempää taajuusmuuttajaa, joka säätää kalorimetrikammion ulostulon kohdalla olevaa puhallinta. Puhallin puhallaa ilmaa kammion ulospäin, jolloin kammion sisällä muodostuu virtaus. Puhaltimen nopeus on lämpötilaerosta riippuvainen. Kun EUT ajetaan tasalämpöiseksi, puhaltimen nopeudella pyritään pitää sisään- ja ulostulo lämpötilaero vakiona asetetun arvon kohdalla. Samalla ohjelma tarkkailee 12:ta muuta lämpötila-anturia kammion sisällä. Puhaltimen nopeuden stabiloiduttua, otetaan tämä arvo muistiin.

Toisessa vaiheessa eli tasausvaiheessa ohjelmalle annetaan edellisessä vaiheessa käytetty lämpötilaero ja puhaltimen nopeus. Tämän jälkeen puhallin pyörii vakionopeudella määritetyllä nopeudella. Ohjelma säätelee DC-jännitelähteen jännitettä, mikä on kytketty kammiossa olevaan vastukseen. Vastus lämmittää kammiota, kunnes saavutetaan samaa lämpötilaeroa mikä oli aikaisemmin asetettu. Ohjelma laskee tehon, jolla vastus lämmittää kammiota. Kun tämän tehon muutos on stabiloitunut, saadaan selville EUT:n hukateho, joka on vastuksen tehon kanssa verrannollinen. Jotta tulos olisi mahdollisimman tarkka, ennen tätä vaihetta annetaan EUT:n viilentyä ympäristölämpöiseksi tai poistetaan EUT kokonaan kammion ulkopuolelta.

Edelliset kalorimetrin vaiheet toistetaan jokaiselle ajopisteelle, sekä koko taajuusmuuttajalle että pelkästään LCL-suodattimelle.

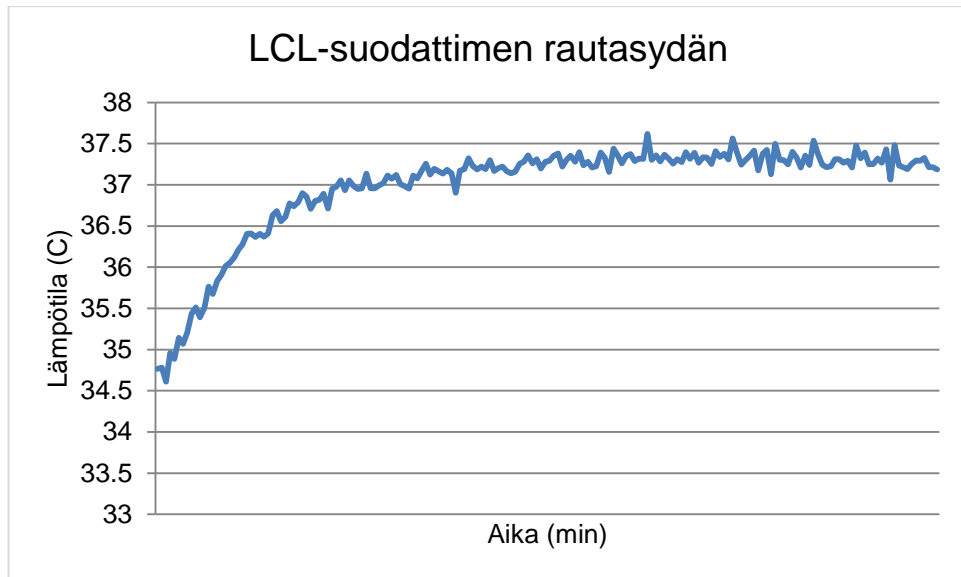
On olemassa muitakin kalorimetrisiä mittaomenetelmiä. Esimerkiksi ilman lämpötilan sijaan tarkkailussa käytetään vettä, jolloin ohjataan veden virtausta ja kammio saadaan kokonaan ilmatiiviiksi. Muita fyysisesti erilaisia kalorimetria ovat esimerkiksi sarjassa olevat kammiot tai kaksi identtistä kammiota, jossa toisessa on EUT ja toisessa vastus, joita voidaan ajaa samanaikaisesti. Erilaiset kalorimetrit ovat nähtävissä kuvassa 26.



Kuva 24. Esimerkkejä kalorimetrityyeistä (15, s. 6).

## 6 Tulokset

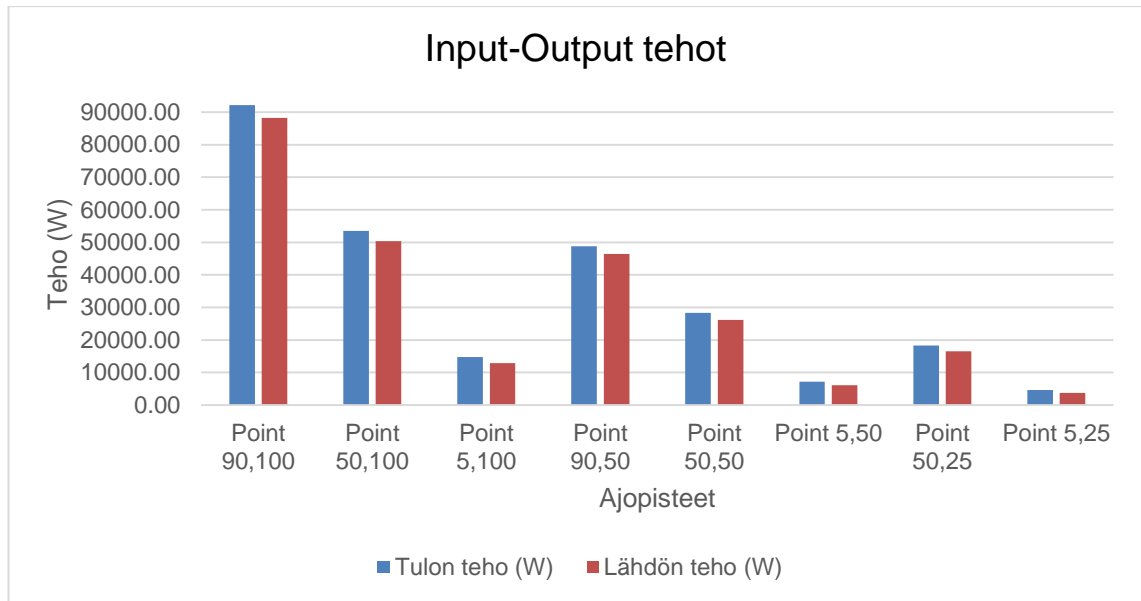
Molemmista mittaustavoista kertyy paljon dataa. Saatu data on pääosin tekstitiedostoina pois lukien oskilloskooppikuvat, jotka voidaan käsitellä Excelissä. Datassa on mm. lämpötiloja, jännite, virta, teho jne. Jokaisesta datan sarakeesta, missä arvot ovat aikajärjestyksessä, otetaan keskiarvo kun arvot ovat stabiloituneet. Tuloksien käsittelyssä käytetään tämä näin saatua keskiarvoa. Seuraavassa kuvaajassa (kuvaaja 1) on LCL-suodattimen erään rautasydämen lämpeneminen testin aikana, josta otetaan viimeisestä 20 minuutista keskiarvo.



Kuvaaja 1. Esimerkki yhdestä LCL-suodattimen rautasydämen lämpötilakuvaajasta.

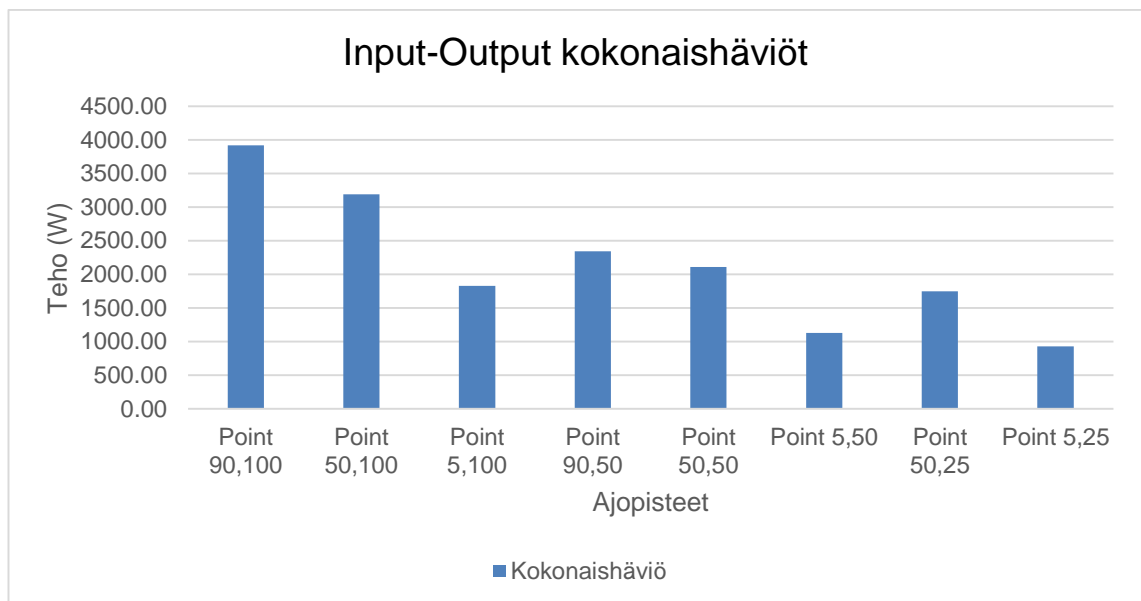
## 6.1 Sähköiset tulokset

Tässä menetelmässä, kaksi WT3000-tehoanalysaattoria nauhoittavat 10 minuutin ajan jokaisesta vaiheesta virran, jännitteen, pätö-, lois- ja näennäistehon, kun laitteen lämpötilat ovat tasoittuneet. Lisäksi analysaattorit laskevat suoraan vaiheiden summat. Joka ajopisteestä otetaan tulon ja lähdön pätöteho, joita tarkastellaan. Kuvaajassa 2 huomataan lähtötehon olevan tulotehoa pienempi, mikä on ollut odotettavissa, sillä laitteessa tapahtuu häviöitä. Lisäksi nähdään, että moottorin kierrosnopeuden noustaessa myös teho kasvaa kuormituksesta riippumatta.



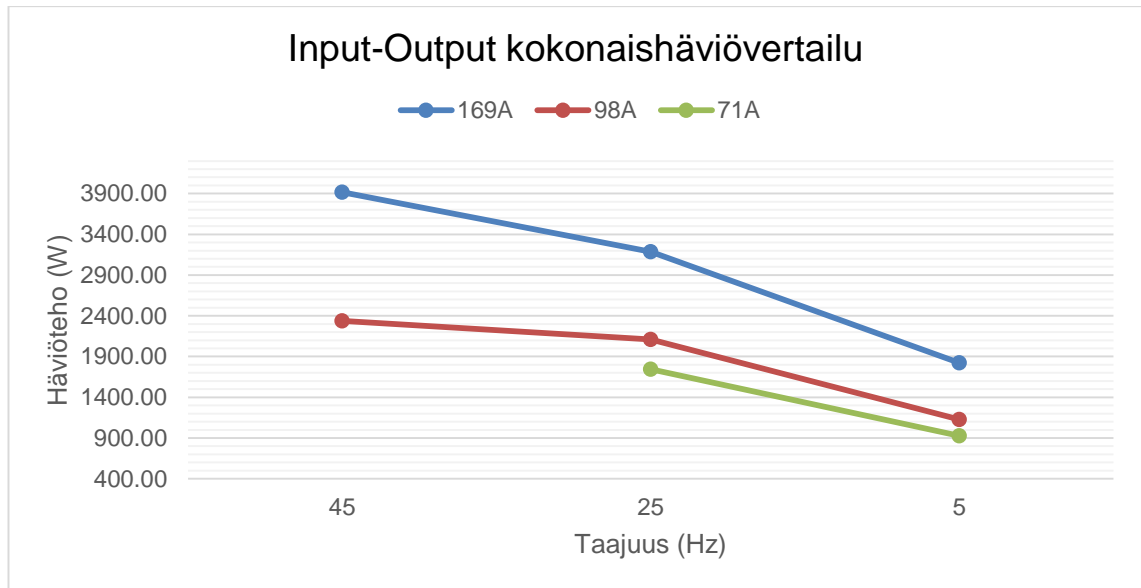
Kuvaaja 2. Sähköisen menetelmän tulo- ja lähtötehojen vertailu eri ajopisteissä.

Tulo- ja lähtötehojen erotuksella saadaan laskettu häviötehon määrää. Vastaavasti häviöt kasvavat sitä enemmän mitä enemmän lähtöteho kasvaa. Kuvaajasta 3 voidaan havaita, että pahimmillaan sähköisellä mittaustavalla häviötehoa on noin 3900 W.



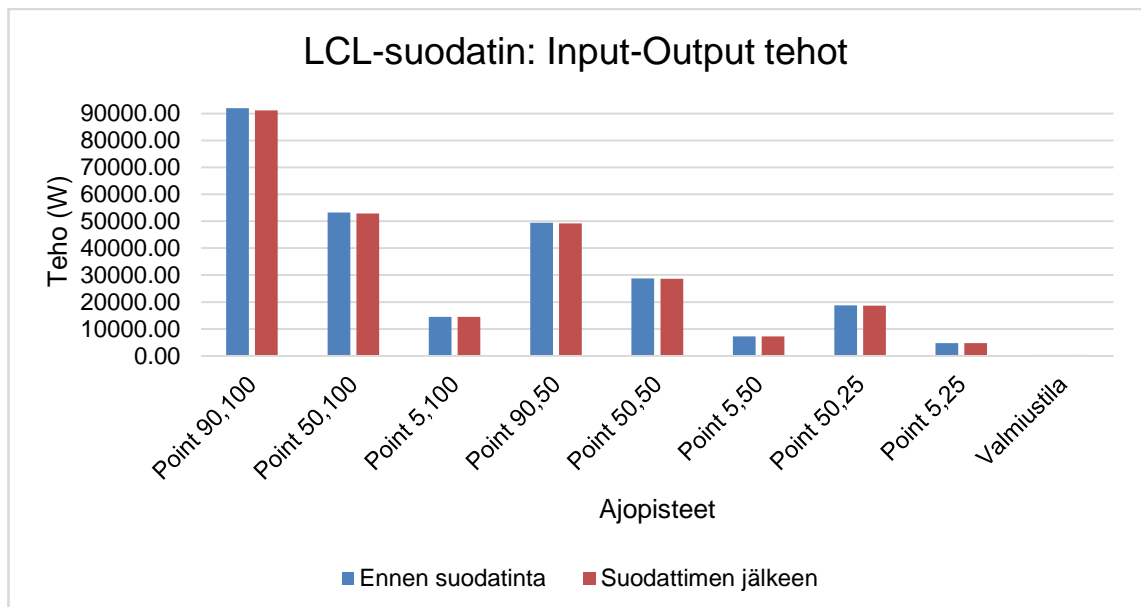
Kuvaaja 3. Sähköisellä menetelmällä saadut kokonaishäviöt eri ajopisteille.

Kuvaajassa 4 kokonaishäviöt on esitetty virroittain taajuuden funktiona.



Kuvaaja 4. Sähköisellä menetelmällä mitatut kokonaishäviöt taajuuden funktiona.

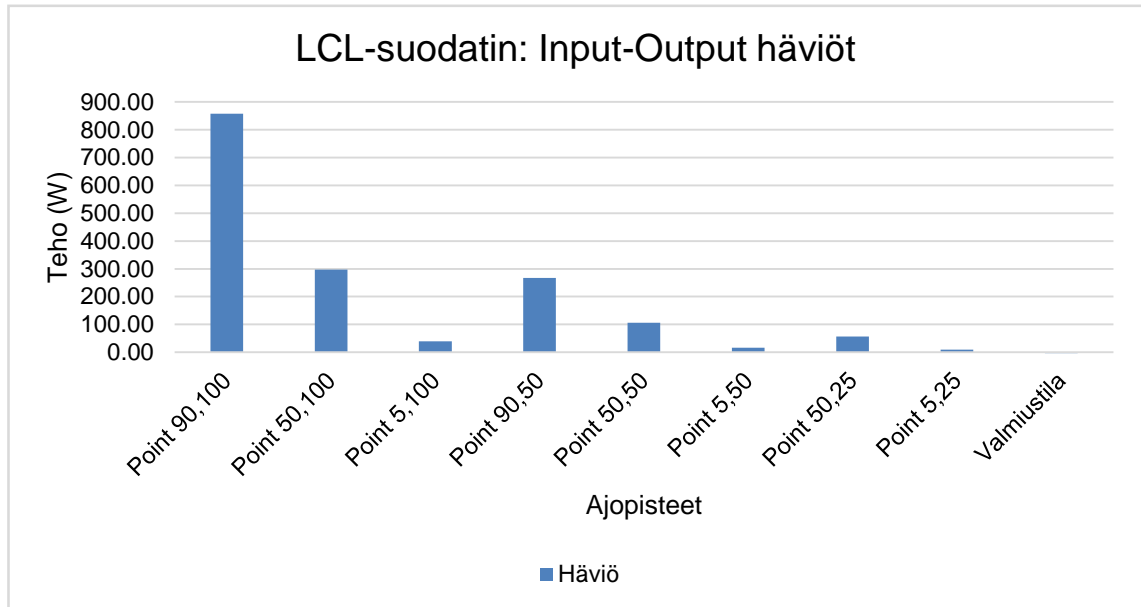
Mittauksissa tarkasteltiin myös LCL-suodatin erikseen. Kuten kokonaisen laitteen tehoissa, myös LCL-suodattimen tulo- ja lähtötehoissa on ero. Kuvaajasta 5 huomataan, ettei ero ole iso. Tämä todistaa sen aikaisemmin todetun väitteen olevan tosi, jossa kerrottiin LCL-suodattimella olevan hyvä hyötysuhde ja pienet häviöt, kun komponentit ovat mitoitettu oikein.



Kuvaaja 5. LCL-suodattimen tehot ennen ja jälkeen suodatinta sähköisellä mittaamenetelmällä.

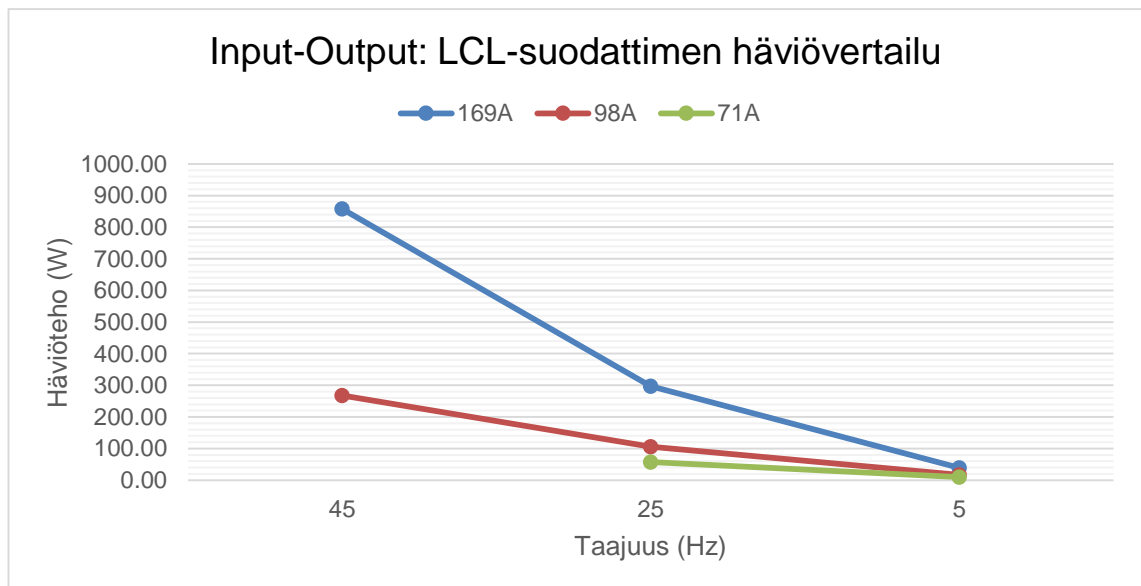


Kuvaajan 6 mukaan testeissä suodattimen häviö oli pahimmillaan noin 860 W. Pienimillä taajuuksilla tuloteho menee melkein muuttumattomana läpi ja valmiustilassa ei tapahdu häviöitä ollenkaan.



Kuvaaja 6. LCL-suodattimen häviöt sähköisellä menetelmällä.

Kuvaajassa 7 LCL-suodattimen häviöt on esitetty virroittain taajuuden funktiona.

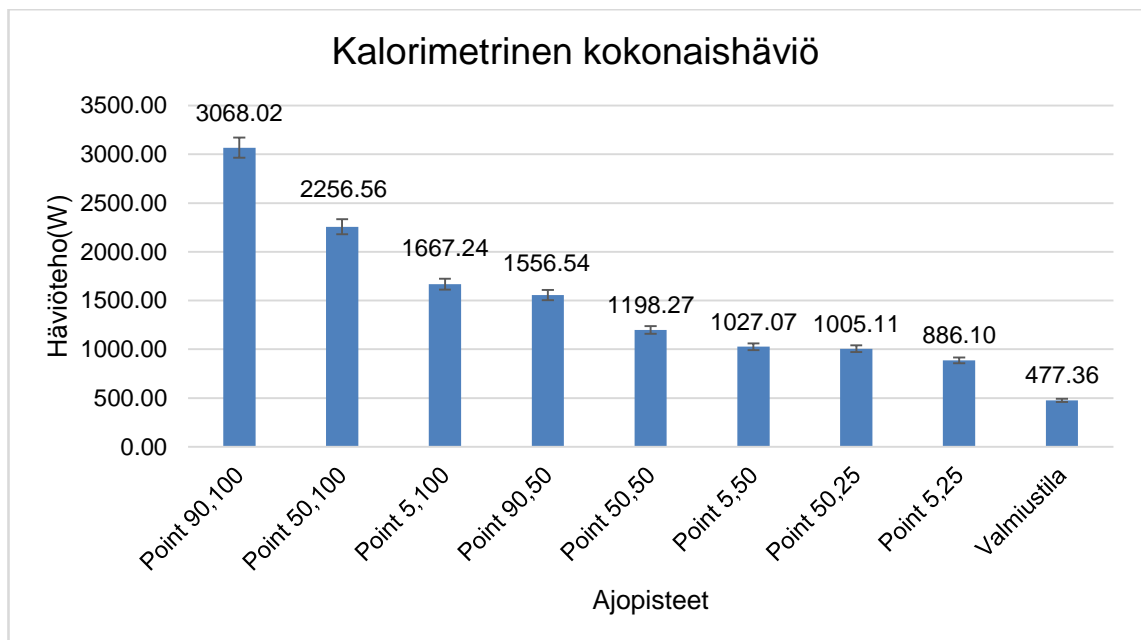


Kuvaaja 7. LCL-suodattimen häviöt taajuuden funktiona.

## 6.2 Kalorimetriset tulokset

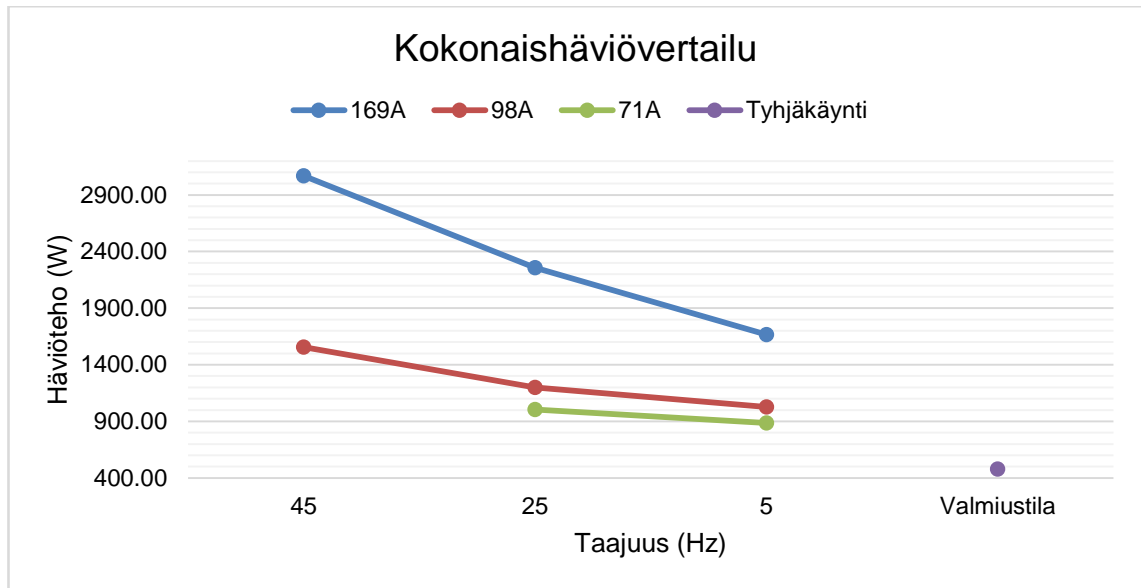
Tässä menetelmässä tarkasteltiin taajuusmuuttajaa kokonaisuutena sekä LCL-suodatin erikseen kalorimetrikammiossa. Tuloksena halutaan pelkästään laitteen häviöt, joten syöttö- ja moottorikaapeliin häviöt kammion sisällä pitää ottaa huomioon. Niiden häviöt laskettiin eri ajopisteissä ja vähennettiin lopullisesta kalorimetrin ilmoittamasta häviötehosta. Pienempitehoisten ajopisteiden kohdalla käytössä oli kalorimetrin oma lisälämmittin (vastus), jolla saatiin kammion häviöt kasvatettua ja näin puhaltimien nopeutta nostettua. Tällä tavoin ilmanvirtaus oli kovempaa, mikä vähentää ilman liikkumista väärään suuntaan, esimerkiksi ilman virtaus kammioista sisääntuloaukosta takaisin ulkoilmaan. Lisätty häviöteho tietenkin otettiin huomioon lopullisissa tuloksissa.

Kalorimetrikammio ei ole täysin eristetty järjestelmä, ja ilman virtauksessa esiintyy turbulenssia kammion sisällä. Nämä aiheuttavat yhdessä jonkin verran epätarkkuutta tuloksissa, mikä pitää ottaa huomioon tuloksia tarkastellessa. Erillisillä mittauksilla saatiin mitattu kalorimetrille virheprosentti, joka on noin 3,4 %. Kuvaajassa 8 on mitattu häviöteho kalorimetrisesti eri ajopisteissä virhemarginaalin kanssa.



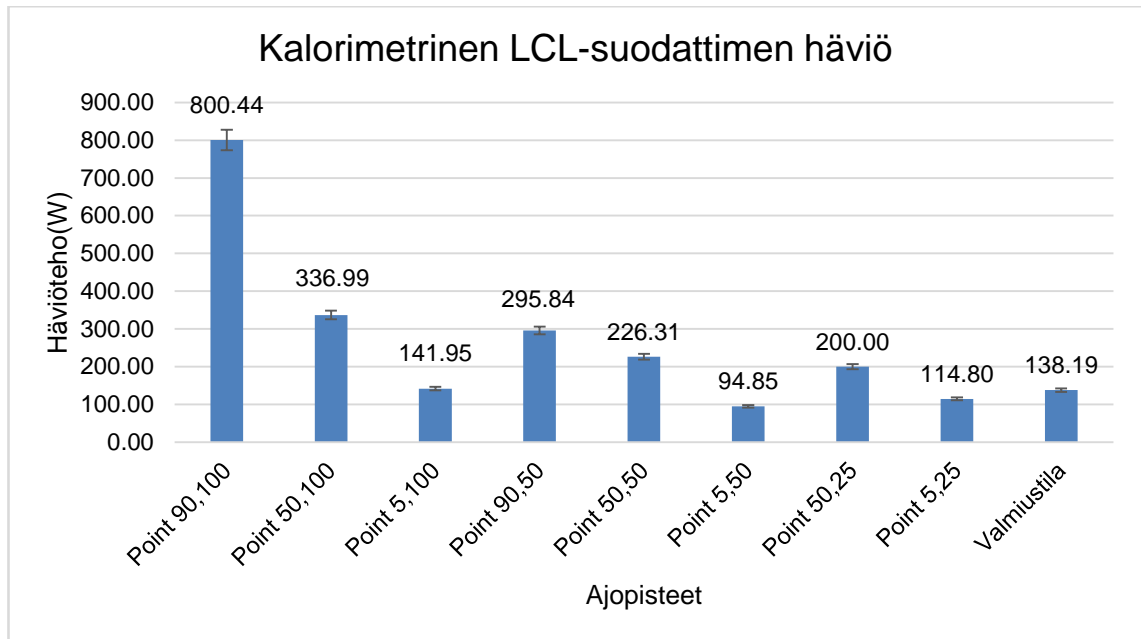
Kuvaaja 8. Kalorimetrisesti mitatut häviöt eri ajopisteelle.

Kuvaajassa 9 kokonaishäviöt on esitetty virroitain taajuuden funktiona.



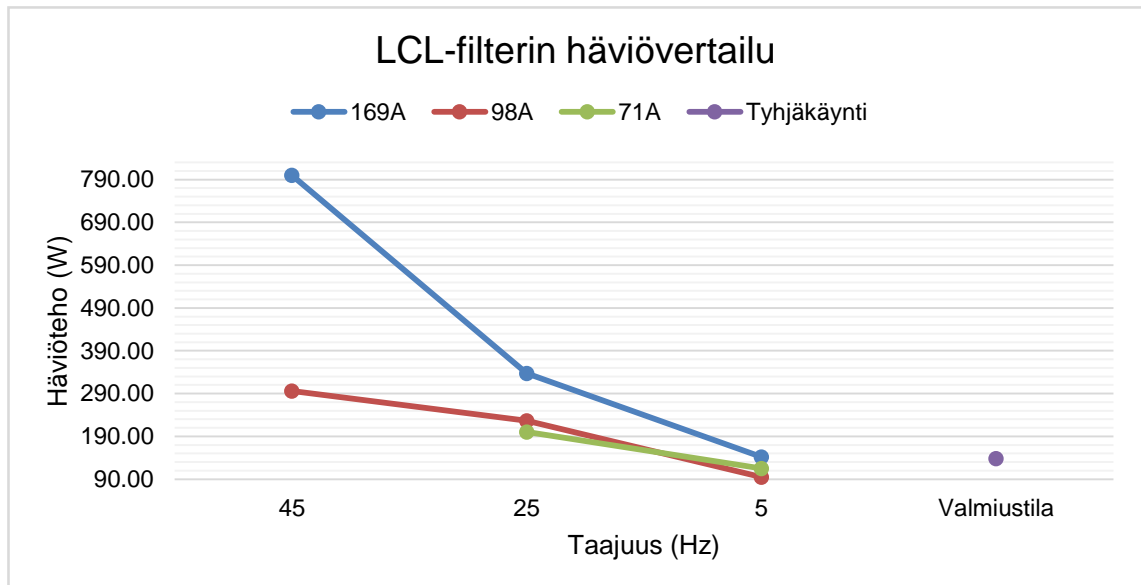
Kuvaaja 9. Kalorimetrisesti mitatut häviöt taajuuden funktiona.

LCL-suodattimen tarkasteluvaiheessa kaapelien häviöt otettiin myös huomioon. Käytössä oli myös lisäpuhallin jäähdyttämässä suodatinta. Puhallin oli tasavirtakäyttöinen, jonka kuluttama teho oli helposti mitattavissa yleismittareiden avulla. Seuraavassa kuvaajassa (kuvaaja 10) on LCL-suodattimen häviöt kalorimetrisesti. Kuvaajasta huomataan suodattimen häviön muutos lähtötaajuuden funktiona. Merkkiin pantava asia on suodattimen valmiustilan häviö, mikä oli sähköisellä mittaustavalla lähes nolla. Toinen huomiota herättävää asia on valmiustilan häviön ollessa hieman suurempi kuin esimerkiksi ajopisteen 5, 50 tai 5, 25. Tämä todennäköisesti johtuu kalorimetrin virhemittaukseen pienemmillä häviöillä.



Kuvaaja 10. LCL-suodattimen häviöt kalorimetrisesti mitattuna.

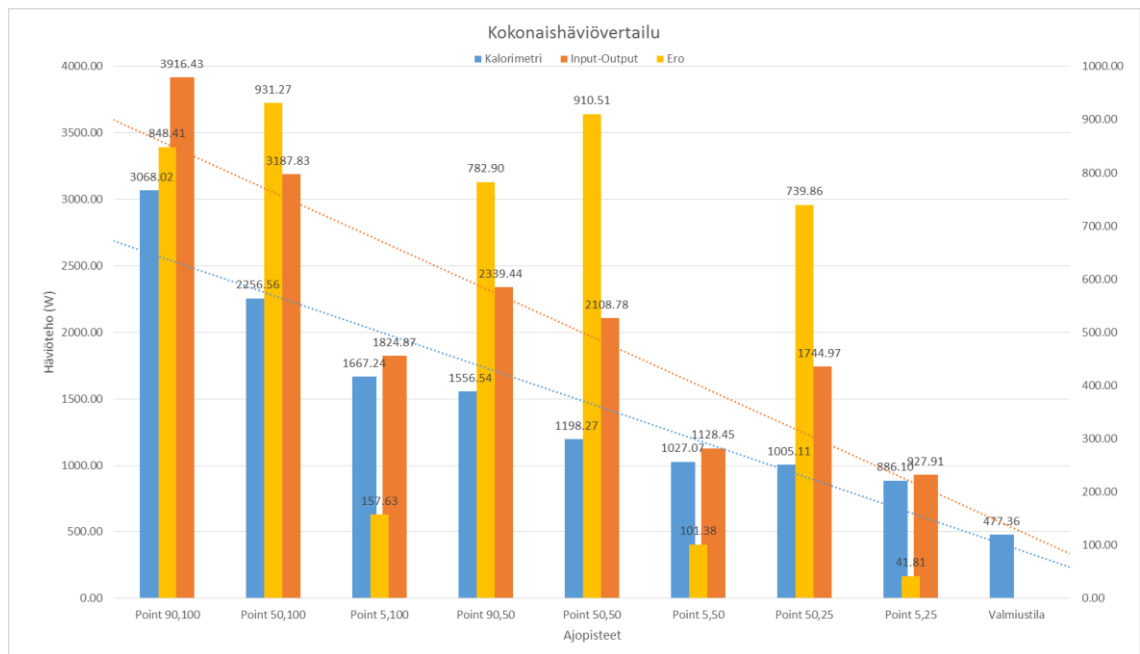
Kuvaajassa 11 LCL-suodattimen häviöt on esitetty virroittain taajuuden funktiona.



Kuvaaja 11. LCL-suodattimen häviöt taajuuden funktiona.

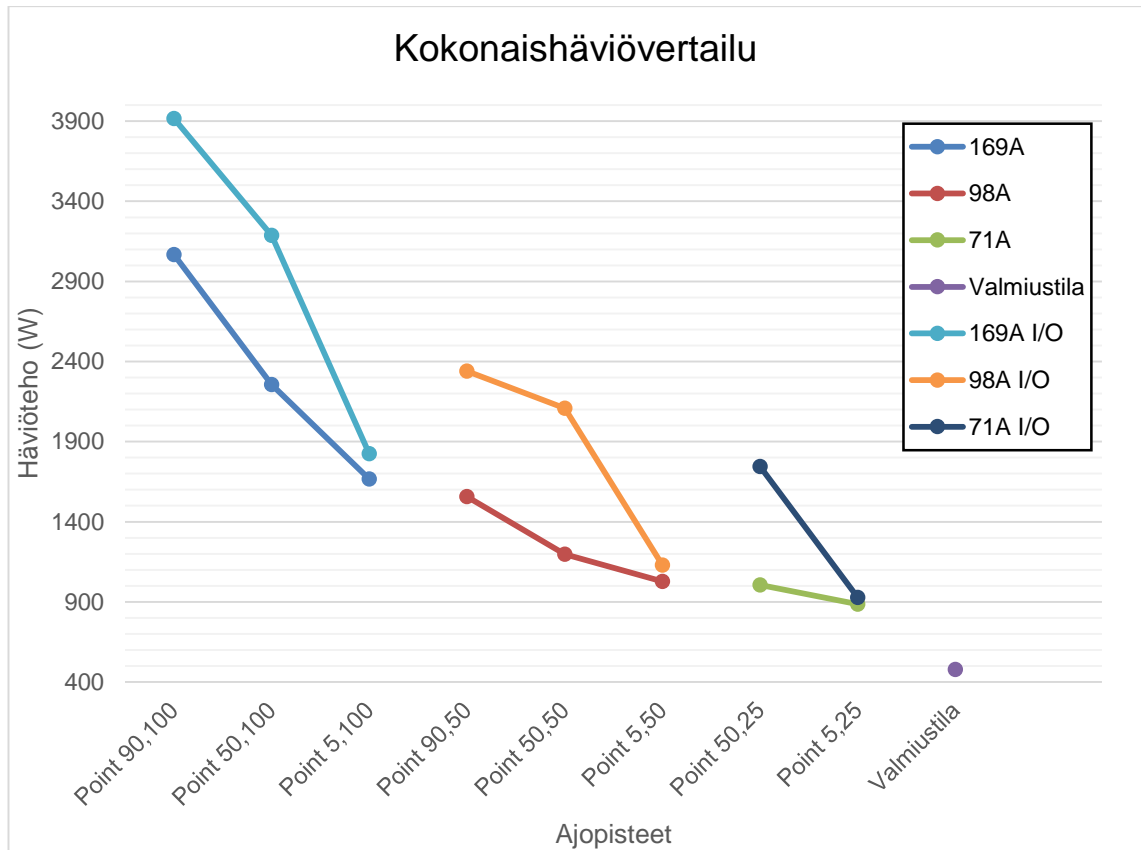
### 6.3 Vertailu

Seuraavaksi tehdään kokonaishäviöiden vertailu menetelmien tuloksista. Kuvaajasta 12 havaitaan, että jokaisessa ajopisteessä paitsi valmiustilassa, sähköisellä menetelmällä mitatut häviöt ovat suurempia kuin kalorimetriset häviöt. Ero on suurimmillaan jopa 931 W, joka on hyvin suuri verrattuna samaan ajopisteeseen kalorimetrisen häviöön. Toisaalta molempien menetelmien häviöt ovat melkein yhtä suuret, kun lähtötaajuus on lähellä nollaa hertsiä.



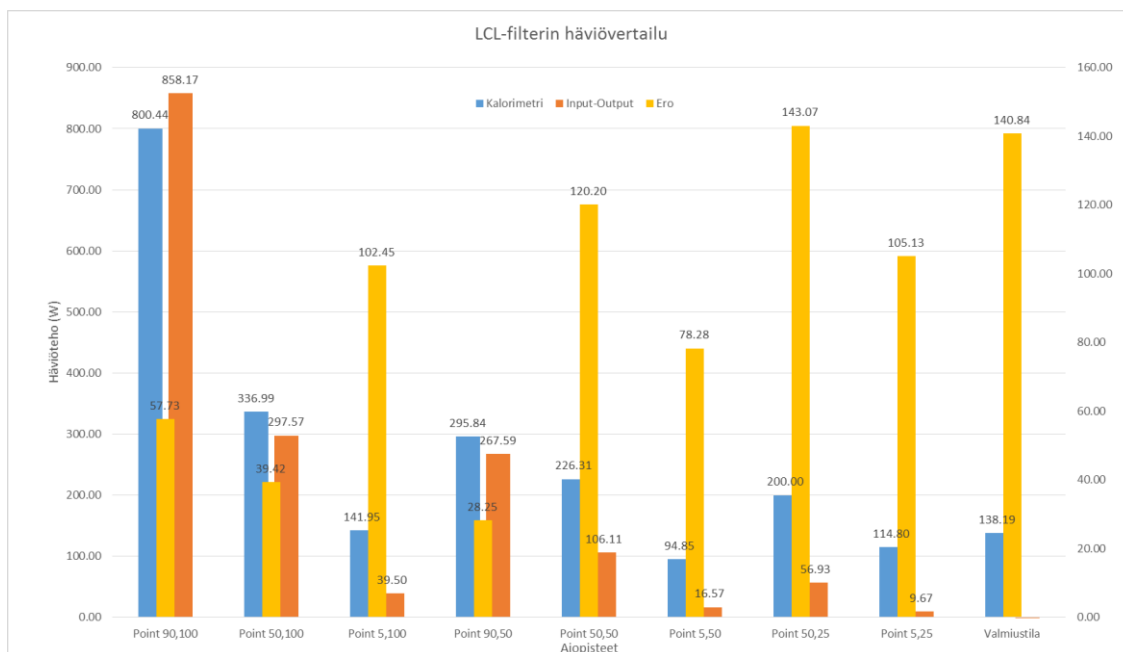
Kuvaaja 12. Kahden mittausmenetelmän häviöt ja niiden ero.

Seuraavassa kuvaajassa (kuvaaja 13) kokonaishäviöt on ilmaistu virroittain, jolloin mittausmenetelmien välinen ero on helpompi havainnollistaa.



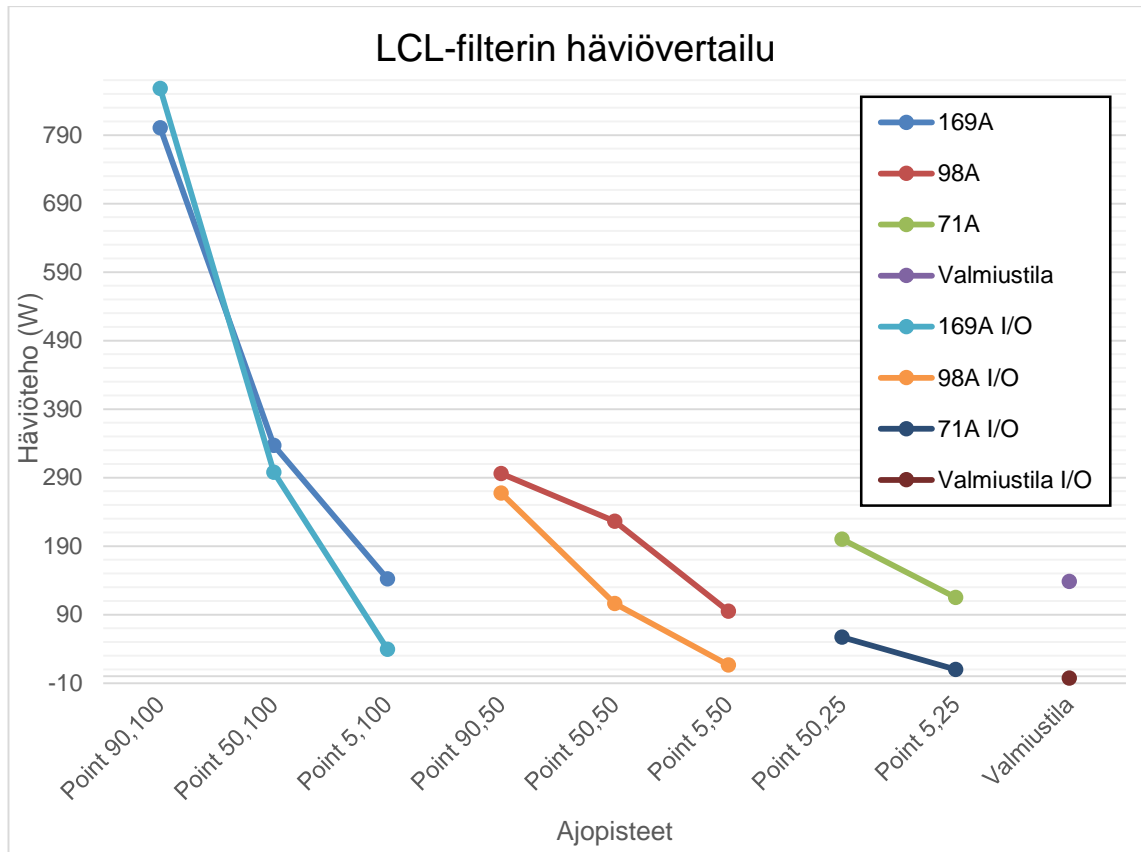
Kuvaaja 13. Häviöiden vertailu virroittain eri mittausmenetelmien välillä.

LCL-suodattimen häviömittausten vertailussa huomataan (kuvaaja 14), että sähköisen menetelmän tulokset ovat päinvastaiset kuin kokolaitetta tarkastaessa. Kalorimetriset häviöt ovat suurempia kuin sähköisesti mitatuilla pois lukien ajopiste 90, 100.



Kuvaaja 14. Kahden mittausmenetelmän häviöt LCL-suodattimelle.

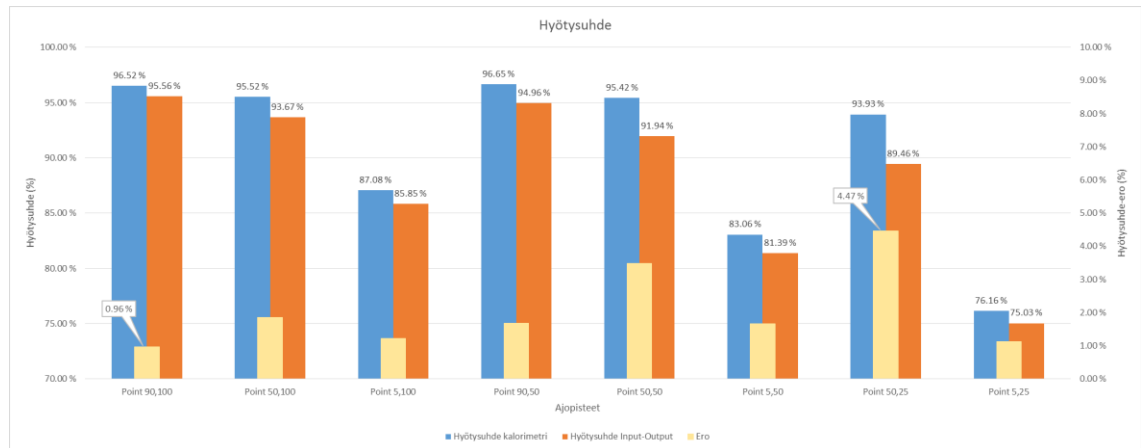
Seuraavassa kuvaajassa (kuvaaja 15) kokonaishäviöt on ilmaistu virroittain, jolloin mittausmenetelmien välinen ero on helpompi havainnollistaa.



Kuvaaja 15. LCL-suodattimen häviöt virroitain ja eri menetelmien vertailu.

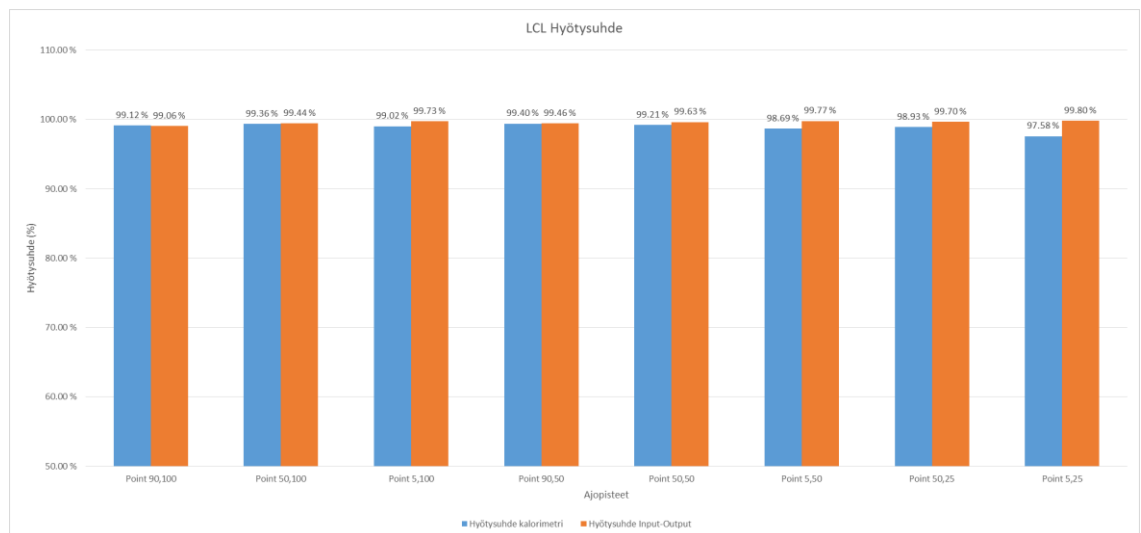
Seuraavassa kuvaajassa (kuvaaja 16) on laskettu kunkin ajopisteen hyötysuhdetta. Vertailussa sähköisen menetelmän hyötysuhde on parhaimmillaan noin prosentin verran huonompi kuin kalorimetrinen menetelmä ja pahimmillaan jopa 4,5 prosenttia. Kokonaisuudessa kalorimetrisella mittausmenetelmällä on saatu parempi hyötysuhde, kuin sähköisellä menetelmällä on.





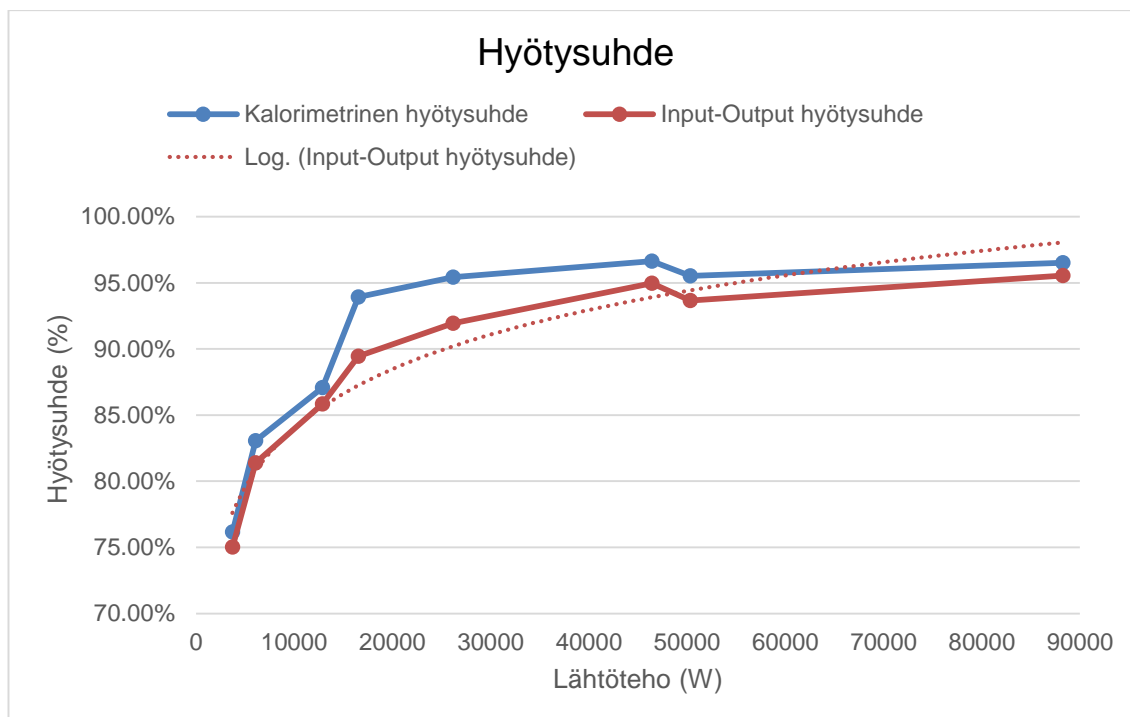
Kuvaaja 16. Hyötysuhde eri mittausmenetelmällä jokaiselle ajopisteelle.

LCL-suodattimen tapauksessa huomataan, että kummassakin menetelmässä hyötysuhde on hyvin korkea, niin kuin tämän kuuluisikin olla (kuvaaja 17).



Kuvaaja 17. LCL-suodattimen hyötysuhde ja mittausmenetelmien vertailu.

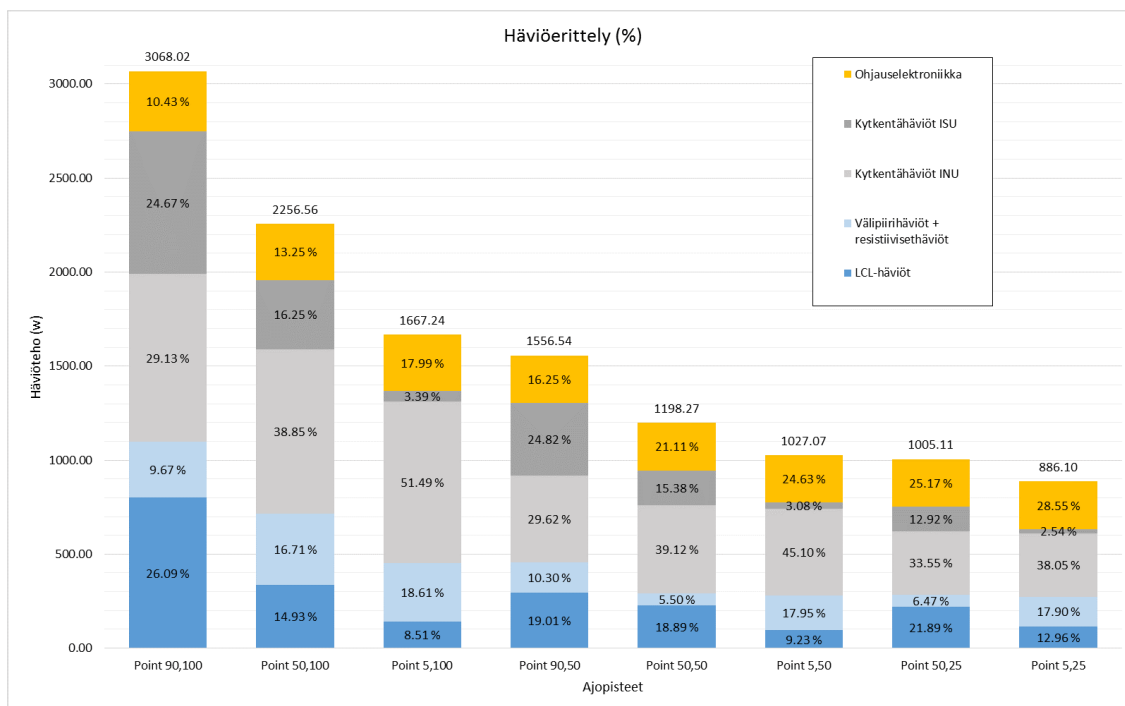
Kuvaajassa 18 on laitteen hyötysuhde esitetty lähtötehon funktiona ja siitä huomataan miten laitteen hyötysuhde paranee mitä enemmän tehoa laitteesta ulos otetaan.



Kuvaaja 18. Hyötysuhde lähtötehon funktiona.

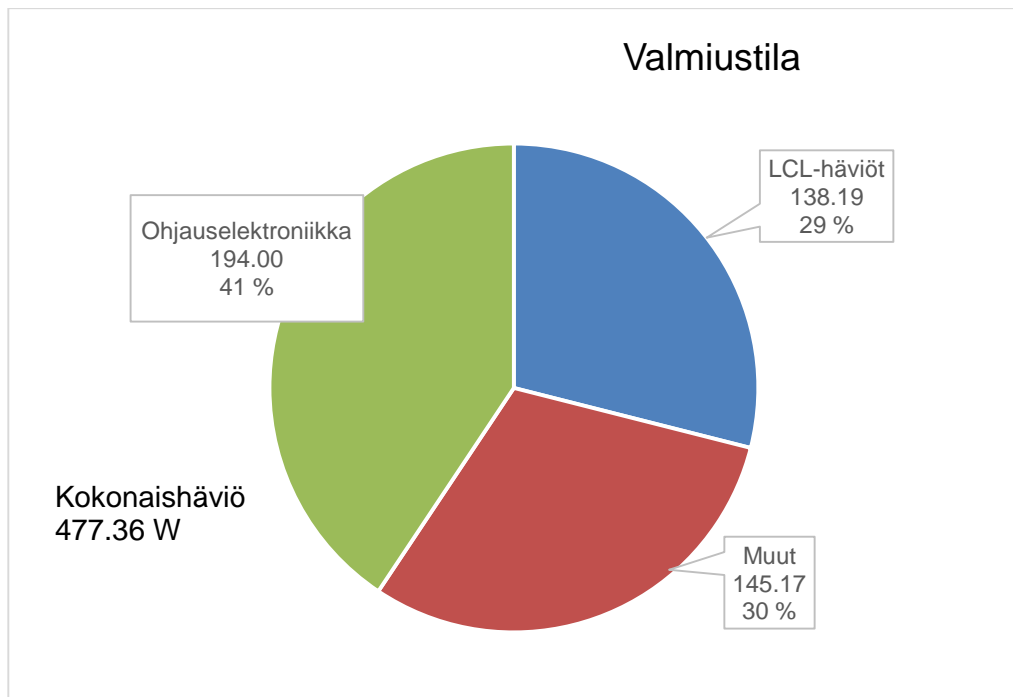
#### 6.4 Häviöiden tarkastelu

Seuraavaksi tarkastellaan laitteessa tapahtuvan häviötehon lähteitä. Taajuusmuuttajassa häviöt muodostuvat mm. ISU- ja INU- puolen kytkentähäviöistä sekä välipiirin, LCL-suodattimen ja ohjauselektronikan häviöistä. Käytössä oli eräs ABB:n simulointiohjelma, jolla laskettiin eri ajopisteistä saatujen virta ja jännite arvojen avulla, kytkentähäviöt tulo- ja lähtöpuolen IGBT-moduuleille. Ohjaukskorkeille ja puhaltimille menevästä virrasta laskettiin teho joka ajopisteelle. Lisäksi LCL-suodattimen häviöt mitattiin aikaisemmin. Kuvaajassa 19 mitatut ja lasketut häviötehot on eroteltu, jolloin nähdään kokonaishäviön eri elementit. Lähtötaajuuden kasvaessa myös ISU:n kytkentähäviöt ja LCL-suodattimen häviöt kasvavat. Puolestaan lähtövirran kasvaessa INU:n kytkentähäviöt kasvavat.



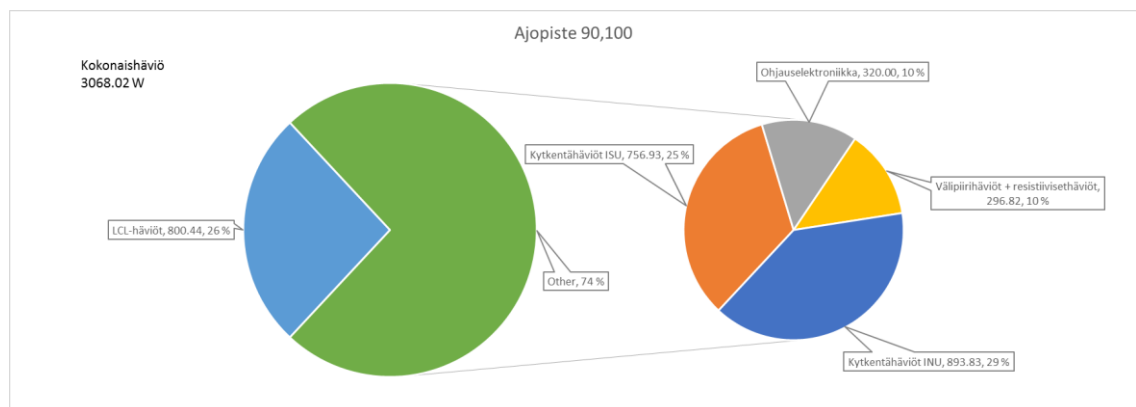
Kuvaaja 19. Laitteen häviöt eriteltynä ajopisteittäin.

Valmiustilan osalta häviöt koostuvat samoista elementeistä pois lukien INU-puolen kytentähäviöt. Kytentähäviöitä ei synny sillä INU-puolen IGBT-moduulit eivät moduloi valmiustilassa. LCL-suodattimen häviöt koostuvat lähinnä sydänhäviöistä, sillä taajuusmuuttajan läpi ei mene tehoa läpi, mikä aiheuttaisi käämihäviöt. Seuraavassa sektoridiagrammissa (kuvaaja 20) on havainnollistettu valmiustilan häviön osa-alueet. Kohta muut häviöt muodostuu välipiirin-, johdin- ja ISU-häviöiden summasta.



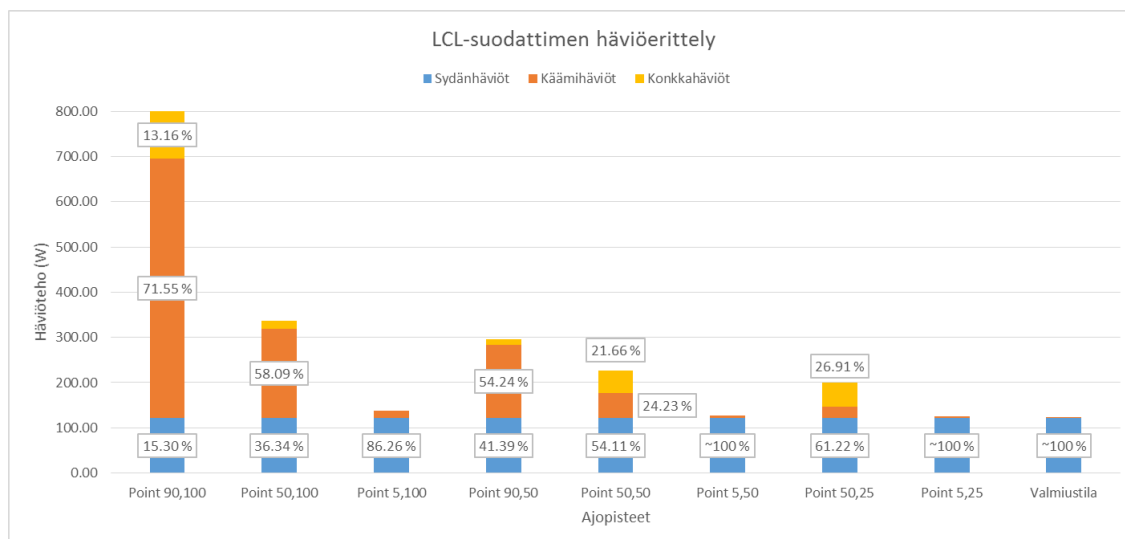
Kuvaaja 20. Valmiustilan häviön aiheuttajat eriteltynä.

Seuraava piirakkadiagrammi (kuvaaja 21) esittää ajopisteen 90,100 häviöt eriteltynä.



Kuvaaja 21. Ajopisteen 90,100:n häviön aiheuttajat eriteltynä.

Kuvaajassa 22 LCL-suodattimen häviöt on eritelty kolmeen osaan, käämi-, sydän- ja kondensaattorihäviöihin. Sydänhäviöt ovat kussakin ajopisteessä vakiot, sillä tämä häviö on verkon taajuudesta riippuvainen mikä on myös vakio. Käämihäviöt ovat riippuvia virrasta kaavan 16 mukaan ja jokaiselle ajopisteelle tämä häviö on laskettavissa. Lisäksi on olemassa LCL-suodattimen kondensaattorien häviöt, mikä on käämi- ja sydänhäviöiden summa vähennettynä suodattimen kokonaishäviöstä.



Kuvaaja 22. LCL-suodattimen häviöt ajopisteittäin eriteltynä.

## 7 Yhteenveto

Koska taajuusmuuttajien häviöistä on vain vähän tutkimuksia, tämän tutkimuksen tarkoituksena oli tarkastella nelikvadranttisen taajuusmuuttajan häviötä kahdella eri menetelmällä ja vertailla näiden tuloksia. Ensimmäinen menetelmä oli sähköinen mittausta, josta saatiin tulo- ja lähtötehot, joista laskettiin häviöt. Toinen tapa oli niin sanottu kalorimetrisen tarkastelu, jossa mitattiin hukkalämmön määrää ja laskettiin teho, jolla kyseinen hukkalämpö saatiin aikaiseksi.

Tutkimus tehtiin ABB:lle (Asea Brown Boveri), joka on tunnettu teollisuuskonserni automaatiotekniikan ja sähkövoimatekniikan alalla. Tutkimuksen kohteena oli eräs ABB:n verkkovaihtosuuntaaja. Koska kyseiselle tuotteelle ei ollut olemassa häviömittauksia ja häviöerittelyä, ABB tilasi tämän tutkimuksen määrittelemään tuotteelle hyötysuhteen ja häviöt.

Työ alkoi teoriaosuudella, jossa tutustuttiin taajuusmuuttajien toimintaan ja lisäksi niissä esiintyviin häviöiden syntymiseen. Myös käytetyt testausmenetelmät ja mittauskalusto esiteltiin. Seuraavaksi koottiin molempien menetelmien testaustulokset ja esiteltiin ne mahdollisimman selkeästi. Lopuksi tulokset vertailtiin.

Ennen työn aloittamista suunnitelmana oli käyttää häviötehon mittaamisessa tuulitunnelia, mutta tästä ajatuksesta jouduttiin luopumaan, koska testattava laite ei olisi mahtunut

tuulitunneliin. Onneksi ABB:lla oli kalorimetrinen kammio, jonka saimme käyttöön, jolla häviömittaukset olivat mahdollisia käytössä olevalle laitekoolle. Taajuusmuuntajan saatavuudelle oli aluksi ongelmia, jota jouduttiin odottaa. Tämä ei loppujenlopuksi aikataulua juuri haitannut.

Häviömittaukset tehtiin molemmilla menetelmillä rinnakkain, mikä nopeutti testien kestoa. Jokainen testaus eri ajopisteelle kesti suunnilleen 4–6 tuntia ja lisäksi samat ajopisteet ajettiin myös LCL-suodattimelle erikseen.

Aluksi kalorimetrikammion käytön kanssa oli ongelmia. Käyttöjärjestelmä ei toiminut kunnolla, tiedonsiirtoyhteydet pätkivät tai säädöissä oli ongelmia. Nämä ongelmat pikkuhiljaa ratkesivat ajan kanssa, kun testejä tehtiin enemmän ja käytettiin eri kytkentäyhdistelmiä tai parametriarvoja. Samalla kalorimetrikammion havaittiin muutamia parannusehdotuksia ja testauksen liittyviä menetelmätapoja.

Testeistä kertyi hyvin paljon dataa, ja niiden käsittelyssä ja havainnollistamisessa meni omaa aikansa. Tulosten avulla saatiin havainnollistettua teoriassa käsiteltyjä asioita ja ymmärtämään käytössä olleen taajuusmuuttajan häviöiden käyttäytymistä esimerkiksi taajuuden tai virran funktiona. Lopulta suurin havainto oli mittausmenetelmien välisen eron suuruus. Havaittiin, että kalorimetrisesti mitattu hyötysuhde on jopa 4,5 prosenttiyksikköä parempi kuin sähköisesti mitatulla menetelmällä. Tuloksista myös havaittiin LCL-suodattimen häviön määrää eri ajopisteissä. Lisäksi pystyttiin erittelemään koko laitteen häviöiden lähteitä ja niiden suhdetta keskenään.

Myöhemmin olisi hyvä suorittaa jatkotestejä, esimerkiksi samojen ajopisteiden toisto tulosten vahvistamiseksi ja virhearviointia varten tai suorittaa testejä uusissa ajopisteissä vanhojen ajopisteiden välissä, jotta saadaan esimerkiksi tarkempia kuvaajia. Lisäksi testejä voisi suorittaa eri testimenetelmillä myös muille laitteille. Kalorimetrikammion olisi hyvä tehdä jatkokehitystä testausten aikana ilmenneen havaintojen perusteella.

## Lähteet

- 1 ABB lyhyesti. 2015. Verkkodokumentti. <<http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti>>. Luettu 5.10.2015.
- 2 ABB. 2001. Tekninen opas nro 6. Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas. Helsinki: ABB.
- 3 Heikki Tuusa. 2013. DEE-33020 Tasa- ja vaihtosuuntaajat. Luentomoniste. Tampereen teknillinen yliopisto.
- 4 ABB:n TTT-käsikirja. 2000-2007. Sähkömoottorikäytöt. Helsinki: ABB.
- 5 ABB. 2001. Tekninen opas nro 8. Sähköinen jarrutus. Helsinki: ABB.
- 6 Männistö, M., Hietalahti, L., Seesvuori, R., Seesvuori, V & Wilén, T. 2006. Yliaallot ja kompensointi. Tampere: Sähköinfo.
- 7 EN 50598-2. Ecodesign for power drive systems, motor starters, power electronics & their driven applications. 2014. Part 2: Energy efficiency indicators for power drive systems and motor starters. Brussel: Cenelec.
- 8 Switching Losses: Effects on Semiconductors. 2015. Verkkodokumentti. Editorial Team. <<http://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/switching-losses-effects-on-semiconductors/>>. Luettu 5.12.2015.
- 9 Mäkilä Joni. 2014. Säröytyneen virran aiheuttamat häviöt sekä lämmön jakautuminen kuristimessa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.
- 10 Bertotti, G. 1998. Hysteresis in magnetism. Torino: Academic Press.
- 11 FYSP104 / K3 Resistanssin lämpötilariippuvuus. 2010. Verkkodokumentti. Jyväskylän yliopisto. <[https://www.jyu.fi/science/opiskelu-ohjeet/fysiikka/tyoosasto/tyot/fysp104/FYSP104\\_K3\\_k2010.pdf](https://www.jyu.fi/science/opiskelu-ohjeet/fysiikka/tyoosasto/tyot/fysp104/FYSP104_K3_k2010.pdf)>. Luettu 8.12.2015.
- 12 ABB. 2001. Tekninen opas nro 4. Nopeussäädettyjen käyttöjen opas. Helsinki: ABB.
- 13 Yokogawa Meters & Instruments Corporation. 2014. Yokogawa WT3000 manual. Yokogawa.
- 14 Aarnivuori Lassi, Kosonen Antti, Niemelä Markku, Pyrhönen Juha. 2015. Eemods'15 Conference. Loss Measurement System for Variable Speed Drives. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

- 15 Nair Devi, Rasilo Paavo, Arkkio Antero. 2015. Eemods'15 Conference. Accurate Calorimetric Measurement of Efficiency of a Frequency Converter. Helsinki: Aalto-yliopisto.



## Tehoanalysointori

Yokogawa WT3000 tehoanalysointorin tehonlaskutapa.

There are three types of powers: active power, reactive power, and apparent power.

In general, each type is defined by the following equations.

$$\text{Active power } P = UI \cos \phi \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{Reactive power } Q = UI \sin \phi \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{Apparent power } S = UI \dots\dots\dots (3)$$

where U: rms voltage, I: rms current, and  $\phi$ : Phase between voltage and current

For three-phase power, it is the sum of the powers of each phase.

In addition, these power values are related as follows:

$$(\text{Apparent power } S)^2 = (\text{active power } P)^2 + (\text{reactive power } Q)^2 \dots\dots (4)$$

These definitions apply only for sine waves. The measured values for apparent power and reactive power vary for distorted waveform measurement depending on which definitions above are combined for the computation. Because the equations for deriving the power for distorted waveforms are not defined, none of the equations can be said to be more correct than the other. Therefore, the WT3000 provides three equations for determining the apparent power and reactive power.

Because active power is derived directly from the sampled data, errors resulting from different definitions do not occur such as in the apparent power and reactive power.

- **TYPE 1 (The Method Used by Normal Mode of Conventional WT Series Power Meters)**

The apparent power of each phase is calculated using equation (3), and the reactive power of each phase is calculated using equation (2). The results are summed to derive the power.

$$\text{Active power for three-phase, four-wire system } P_{\Sigma} = P_1 + P_2 + P_3$$

$$\text{Apparent power for three-phase, four-wire system } S_{\Sigma} = S_1 + S_2 + S_3 (= U_1 \times I_1 + U_2 \times I_2 + U_3 \times I_3)$$

$$\text{Reactive power for three-phase, four-wire system } Q_{\Sigma} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_{\Sigma} = s_1 \times \sqrt{(U_1 \times I_1)^2 - P_1^2} + s_2 \times \sqrt{(U_2 \times I_2)^2 - P_2^2} + s_3 \times \sqrt{(U_3 \times I_3)^2 - P_3^2}$$

However, the sign for  $s_1$ ,  $s_2$ , and  $s_3$  is negative when the current leads the voltage and positive when the current lags the voltage.

## Tehoanalysaattori

Yokogawa WT3000 tehoanalysaattorin mittaustarkkuus.

### 12.4 Accuracy

#### Power Accuracy

Item	Specifications																														
Accuracy (accuracy at 6 months)	Conditions Same as the conditions for voltage and current.																														
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Frequency</th> <th>Accuracy ±(reading error + measurement range error)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">DC</td> </tr> <tr> <td>• Voltage Input • Current of a 30-A Input element from direct Input</td> <td>0.05% of reading + 0.1% of range</td> </tr> <tr> <td>• Current of a 2-A Input element from direct Input</td> <td>0.05% of reading + 0.1% of range + 2 μA × voltage reading</td> </tr> <tr> <td>0.1 Hz ≤ f &lt; 30 Hz</td> <td>0.2% of reading + 0.3% of range</td> </tr> <tr> <td>30 Hz ≤ f &lt; 45 Hz</td> <td>0.05% of reading + 0.05% of range</td> </tr> <tr> <td colspan="2">45 Hz ≤ f ≤ 66 Hz</td> </tr> <tr> <td>• Current sensor Input • Current of a 30-A Input element from direct Input • Current of a 2-A Input element from direct Input at the 500 mA to 2 A range</td> <td>0.02% of reading + 0.04% of range</td> </tr> <tr> <td>• Current of a 2-A Input element from direct Input at the 5 mA to 200 mA range</td> <td>0.05% of reading + 0.05% of range</td> </tr> <tr> <td>66 Hz &lt; f ≤ 1kHz</td> <td>0.05% of reading + 0.05% of range</td> </tr> <tr> <td>1 kHz &lt; f ≤ 10 kHz</td> <td>0.15% of reading + 0.1% of range</td> </tr> <tr> <td>10 kHz &lt; f ≤ 50 kHz</td> <td>0.3% of reading + 0.2% of range</td> </tr> <tr> <td>50 kHz &lt; f ≤ 100 kHz</td> <td>0.014 × f% of reading + 0.3% of range</td> </tr> <tr> <td>100 kHz &lt; f ≤ 500 kHz</td> <td>0.012 × f% of reading + 1% of range</td> </tr> <tr> <td>500 kHz &lt; f ≤ 1 MHz</td> <td>(0.048 × f – 19)% of reading + 2% of range</td> </tr> </tbody> </table> <p>* The unit of f in the read error equation is kHz.</p>	Frequency	Accuracy ±(reading error + measurement range error)	DC		• Voltage Input • Current of a 30-A Input element from direct Input	0.05% of reading + 0.1% of range	• Current of a 2-A Input element from direct Input	0.05% of reading + 0.1% of range + 2 μA × voltage reading	0.1 Hz ≤ f < 30 Hz	0.2% of reading + 0.3% of range	30 Hz ≤ f < 45 Hz	0.05% of reading + 0.05% of range	45 Hz ≤ f ≤ 66 Hz		• Current sensor Input • Current of a 30-A Input element from direct Input • Current of a 2-A Input element from direct Input at the 500 mA to 2 A range	0.02% of reading + 0.04% of range	• Current of a 2-A Input element from direct Input at the 5 mA to 200 mA range	0.05% of reading + 0.05% of range	66 Hz < f ≤ 1kHz	0.05% of reading + 0.05% of range	1 kHz < f ≤ 10 kHz	0.15% of reading + 0.1% of range	10 kHz < f ≤ 50 kHz	0.3% of reading + 0.2% of range	50 kHz < f ≤ 100 kHz	0.014 × f% of reading + 0.3% of range	100 kHz < f ≤ 500 kHz	0.012 × f% of reading + 1% of range	500 kHz < f ≤ 1 MHz	(0.048 × f – 19)% of reading + 2% of range
Frequency	Accuracy ±(reading error + measurement range error)																														
DC																															
• Voltage Input • Current of a 30-A Input element from direct Input	0.05% of reading + 0.1% of range																														
• Current of a 2-A Input element from direct Input	0.05% of reading + 0.1% of range + 2 μA × voltage reading																														
0.1 Hz ≤ f < 30 Hz	0.2% of reading + 0.3% of range																														
30 Hz ≤ f < 45 Hz	0.05% of reading + 0.05% of range																														
45 Hz ≤ f ≤ 66 Hz																															
• Current sensor Input • Current of a 30-A Input element from direct Input • Current of a 2-A Input element from direct Input at the 500 mA to 2 A range	0.02% of reading + 0.04% of range																														
• Current of a 2-A Input element from direct Input at the 5 mA to 200 mA range	0.05% of reading + 0.05% of range																														
66 Hz < f ≤ 1kHz	0.05% of reading + 0.05% of range																														
1 kHz < f ≤ 10 kHz	0.15% of reading + 0.1% of range																														
10 kHz < f ≤ 50 kHz	0.3% of reading + 0.2% of range																														
50 kHz < f ≤ 100 kHz	0.014 × f% of reading + 0.3% of range																														
100 kHz < f ≤ 500 kHz	0.012 × f% of reading + 1% of range																														
500 kHz < f ≤ 1 MHz	(0.048 × f – 19)% of reading + 2% of range																														
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• For temperature changes after zero level compensation or range change, add (voltage influence) × (current influence) to the DC accuracy. For details on voltage and current influence, see page 12-5.</li> <li>• For self-generated heat caused by current input on an AC input signal, add the following values to the power accuracy. <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2-A Input element: 0.004 × I<sup>2</sup>% of reading</li> <li>• 30-A Input element: 0.00002 × I<sup>2</sup>% of reading</li> </ul> </li> <li>• For self-generated heat caused by current input on a DC input signal, add the following values to the power accuracy. <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2-A Input element: 0.004 × I<sup>2</sup>% of reading + 6 × I<sup>2</sup> μA</li> <li>• 30-A Input element: 0.00002 × I<sup>2</sup>% of reading + 3 × I<sup>2</sup> μA</li> </ul>           I is the current reading (A). The influence from self-generated heat continues until the temperature of the shunt resistor inside the WT3000 lowers even if the current input changes to a small value. </li> <li>• When the data update interval is 50 ms, add 0.1% of reading to all accuracy figures.</li> <li>• When the data update interval is 100 ms, add 0.05% of reading to all accuracy figures.</li> <li>• All accuracy figures for 0.1 to 10 Hz are reference values.</li> <li>• The power accuracy figures for 30 kHz to 100 kHz when the voltage exceeds 750 V are reference values.</li> <li>• The power accuracy figures for 100 kHz to 1 MHz when the voltage (V) exceeds 2.2 × 10<sup>4</sup> / f (kHz) are reference values.</li> <li>• The power accuracy figures for DC, 10 Hz to 45 Hz, and 400 Hz to 200 kHz when the current exceeds 20 A are reference values.</li> <li>• The power accuracy figures for 200 kHz to 500 kHz when the current exceeds 10 A are reference values.</li> <li>• The power accuracy figures for 500 kHz to 1 MHz when the current exceeds 5 A are reference values.</li> </ul>																														

## 12.4 Accuracy

Item	Specifications
Effective Input range	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0 to <math>\pm 130\%</math> of the power range (see section 5.2) for DC measurement.</li> <li>• <math>\pm 130\%</math> of the power range for current measurement when the voltage and current are in the range of 1 to 130% of the measurement range. However, if the data update interval is 50 ms, 100 ms, 5 s, 10 s, or 20 s, the signal level of the synchronization source must satisfy the input signal level of frequency measurement (see section 12.5).</li> <li>• 110% for the maximum range of direct voltage and current inputs. The accuracy for 110% to 130% of the measurement range is reading error <math>\times 1.5</math>.</li> </ul>
Lower limit of measurement frequency	Same as the lower limit of measurement frequency for voltage and current.
Power factor ( $\lambda$ ) influence	<ul style="list-style-type: none"> <li>• When <math>\lambda = 0</math> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 5 mA to 200 mA range of a 2-A input element <ul style="list-style-type: none"> <li>• Apparent power reading <math>\times 0.1\%</math> in the range of 45 to 66 Hz.</li> <li>• For other frequency ranges, see below. However, the figures are reference values. Add apparent power reading <math>\times (0.1 + 0.05 \times f \text{ (kHz)})\%</math></li> </ul> </li> <li>• 500 mA to 2 A range of a 2-A input element or 30-A input element <ul style="list-style-type: none"> <li>• Apparent power reading <math>\times 0.03\%</math> in the range of 45 to 66 Hz.</li> <li>• For other frequency ranges, see below. However, the figures are reference values. Add apparent power reading <math>\times (0.03 + 0.05 \times f \text{ (kHz)})\%</math></li> </ul> </li> </ul> </li> <li>• When <math>0 &lt; \lambda &lt; 1</math> (Power reading) <math>\times \{(\text{power reading error } \%) + (\text{power range error } \%) \times (\text{power range/apparent power indication value}) + \{\tan \phi \times (\text{influence when } \lambda = 0)\}\}</math> where <math>\phi</math> is the phase angle between the voltage and current.</li> </ul>
Line filter influence	<p>When the cut-off frequency is 500 Hz</p> <p>45 Hz <math>\leq f \leq 66</math> Hz: Add 0.3% of reading. <math>f &lt; 45</math> Hz: Add 1% of reading.</p> <p>When the cut-off frequency is 5.5 kHz</p> <p><math>f \leq 66</math> Hz: Add 0.3% of reading. 66 Hz <math>&lt; f \leq 500</math> Hz: Add 1% of reading.</p> <p>When the cut-off frequency is 50 kHz</p> <p><math>f \leq 500</math> Hz: Add 0.3% of reading. 500 <math>&lt; f \leq 5</math> kHz: Add 1% of reading.</p>
Temperature coefficient	Same as the temperature coefficient for voltage and current.
One year accuracy	Add (reading error of accuracy at 6 months $\times 0.5$ ) to the accuracy at 6 months.
Accuracy when the crest factor is set to 6	Accuracy obtained by doubling the measurement range error for the accuracy when the crest factor is set to 3

## Accuracy of Other Parameters and Computation Accuracy

- Accuracy of apparent power S Voltage accuracy + current accuracy
- Accuracy of reactive power Q Accuracy of apparent power +  $(\sqrt{(1.0004 - \lambda^2)} - \sqrt{(1 - \lambda^2)}) \times 100\%$  of range
- Accuracy of power factor  $\lambda$   $\pm [(\lambda - \lambda/1.0002) + |\cos \phi - \cos(\phi + \sin^{-1}(\text{influence from the power factor when } \lambda = 0\%/100))|] \pm 1$  digit when voltage and current is at rated input of the measurement range
- Accuracy of phase difference  $\phi$   $\pm [|\phi - \cos^{-1}(\lambda/1.0002)| + \sin^{-1}(\text{influence from the power factor when } \lambda = 0\%/100)] \text{ deg} \pm 1$  digit when voltage and current is at rated input of the measurement range
- For the accuracy of frequency fU and fI, see "Frequency Measurement" in section 12.5, "Functions."
- For the accuracy of measured values WP+, WP-, q, q+, and q- and the integration time, see "Integration" in section 12.5, "Functions."
- For the accuracies of voltage, current, and power during harmonic measurement; the accuracies of rotating speed and torque; and the accuracy of D/A output; see the respective sections in the *Expansion Function User's Manual IM760301-51E*.