



TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN TOIMIALA

Sähkötekniikka

Sähkövoimatekniikka

INSINÖÖRITYÖ

TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTÖN TESTAUSJÄRJESTELMÄN KÄYTTÖÖNOTTO

**Työn tekijä: Tuomo Hakola
Työn ohjaaja: lehtori, DI Jari Ijäs
Työn ohjaaja: DI Esa Ylinen**

Työ hyväksytty: __. __. 2008

**Jari Ijäs
lehtori, DI**



ALKULAUSE

Tämä sähkövoimatekniikan insinööri työ tehtiin Edec Oy:lle. Työni ohjaajana yrityksessä toimi dipl.ins. Esa Ylinen, jolle esitän kiitokseni. Lisäksi kiitän Edec Oy:n ja Eniram Oy:n henkilökuntaa saamastani tuesta työn aikana.

Työni ohjaajana toimi lehtori, dipl.ins Jari Ijäs Metropolia Ammattikorkeakoulusta. Kiitän saamastani ohjauksesta.

Helsingissä 23.9.2008

Tuomo Hakola

INSINÖÖRITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä: Tuomo Hakola	
Työn nimi: Taajuusmuuttajakäytön testausjärjestelmän käyttöönotto	
Päivämäärä: 23.9.2008	Sivumäärä: 31 s. + 2 liitettä
Koulutusohjelma: Sähkötekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Sähkövoimatekniikka
Työn valvoja: lehtori, dipl.ins Jari Ijäs	
Työn ohjaaja: dipl.ins Esa Ylinen	
<p>Tämä sähkövoimatekniikan insinööri työ tehtiin Edec Oy:lle. Työssä tutustuttiin taajuusmuuttajakäytön testausjärjestelmään ja tehtiin laitteiston käyttöönotto. Työssä perehdyttiin taajuusmuuttajien käyttöön sekä niiden ominaisuuksiin. Työssä keskityttiin laivakäytössä oleviin taajuusmuuttajiin ja erityisesti propulsioon.</p> <p>Aluksi työssä on esitelty laivan propulsio eri osat. Työssä on keskitytty dieselsähköiseen propulsioon. Osat on esitelty loogisessa järjestyksessä alkaen dieselmoottorista. Dieselmoottorin lisäksi on esitelty generaattori ja dieselmoottorin vaikutus generaattorin valintaan. Tämän lisäksi on kerrottu sähköverkosta ja sen ominaisuuksista.</p> <p>Tämän jälkeen on esitelty taajuusmuuttajan rakennetta yleisellä tasolla ja käyty läpi sen neljä pääosaa: tasasuuntaaja, välipiiri, vaihtosuuntaaja ja ohjauspiiri. Työssä on esitelty myös erilaisia taajuusmuuttajan ohjaus- ja säätötapoja kuten skalaariohjaus- ja säätö, vektorisäätö ja suoravääntömomenttisäätö.</p> <p>Lopuksi on esitelty testausjärjestelmän laitteisto ja kerrottu käyttöönotosta sekä laitteiston kehittämismahdollisuuksista tulevaisuudessa.</p>	
Avainsanat: propulsio, taajuusmuuttaja, verkkosyöttö	

ABSTRACT

Name: Tuomo Hakola	
Title: Introduction of frequency converter testing system	
Date: 23.9.2008	Number of pages: 31
Department: Electrical engineering	Study Programme: Power systems
Instructor: Jari Ijäs, Lecturer, M.Sc.	
Supervisor: Esa Ylinen, M.Sc.	
<p>This final project in electrical power engineering was carried out for Edec Oy. The main objective of this work is to explore and implement a frequency converter testing system. One aim is to examine the use of frequency converters and their properties. This study focuses on frequency converters in ship use, especially propulsion.</p> <p>The theoretical part of the study is based on the literature of the field, network publications and the equipment suppliers' instructions. The study was conducted on test equipment that was assembled to the premises of the school.</p> <p>First the different parts of the propulsion in the ship are presented. The focus is on diesel electric propulsion. The parts are presented in a logical order, beginning from the diesel engine. After the diesel engine, the generator is presented and also the effect of the diesel engine on the choice of the generator. After this, the main supply and its properties are discussed.</p> <p>Next, the structure of the frequency converter is explained on a general level as well as its four main parts. Different controls and adjustments of the frequency converter are also described.</p> <p>Finally, the equipment for the testing system is presented along with the implementation process. The study also contains ideas for developing the equipment further.</p>	
Keywords: propulsion, frequency converter, electric breaking	

SISÄLLYS

ALKULAUSE

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYS

LYHENTEET

1	JOHDANTO	1
2	YLEISTÄ PROPULSIOKONEISTOISTA	2
3	DIESELSÄHKÖINEN PROPULSIO	2
3.1	Dieselmoottori	3
3.2	Generaattori	4
3.3	Sähköverkko	5
3.4	Taajuusmuuttaja	6
3.4.1	<i>Tasasuuntaaja</i>	8
3.4.2	<i>Välipiiri</i>	11
3.4.3	<i>Vaihtosuuntaaja</i>	13
3.4.4	<i>Ohjaus- ja säätöpiiri</i>	14
3.5	Taajuusmuuttajan säätötavat	14
3.5.1	<i>Skalaariohjaus- ja säätö</i>	14
3.5.2	<i>Vektorisäätö</i>	15
3.5.3	<i>Suora vääntömomenttisäätö DTC</i>	16
3.5.4	<i>DTC -ja PWM-käytön erot</i>	16
3.6	Muita kohteita taajuusmuuttajille laivakäytössä	18
4	TESTAUSJÄRJESTELMÄN ESITTELY JA KÄYTTÖTARKOITUS	20
4.1	Oikosulkumoottori	21
4.2	Moottoripuolen ohjaus	22
4.3	Generaattoripuolen ohjaus ja verkkoonjarruttaminen	24
5	TEHONRAJOITUSLAITTEISTON KÄYTTÖÖNOTTO	26
6	TEHONRAJOITUSLAITTEISTON TESTAUS	28
7	YHTEENVETO	30
	LÄHTEET	31

LIITTEET

- LIITE 1 Verkkoon jarrutus AFE päälle ja pois kytkettynä
- LIITE 2 Perusparametrit erikoiskäyttösovelluksessa

LYHENTEET

AFE	<i>Active Front-End</i> ; aktiivinen syöttöyksikkö, joka mahdollistaa verkkoonjarruttamisen
CAN	<i>Controller Area Network</i> ; automaatioväylä jota käytetään teollisuudessa
COP	<i>Capacity On Power</i> ; miten paljon lämpöä laite antaa suhteessa kulutettuun sähköenergiaan
CSI	<i>Current Source Inverter</i> ; virtavälipiiritaajuusmuuttaja
DC	<i>Direct Current</i> ; tasavirta
DTC	<i>Direct Torque Control</i> ; suora vääntömomenttisäätö
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i> ; sähkömagneettinen yhteensopivuus
IGPT	<i>Indulated Gate Bipolar Transistor</i> ; tehopuolijohdetyyppi
INU	Inverter Unit; invertteriyksikkö; kaksisuuntainen tasavirralla toimiva vaihtosuuntaaja
LCI	<i>Load Commuted Inverter</i> ; kuormakommutoitu taajuusmuuttaja
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i> , käytetään automaatioprosessien ohjauksessa
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> ; pulssinleveysmodulointi Sähkömoottorin tehonsäätö tapa.
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i> ; jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja

1 JOHDANTO

Tässä insinööriyössä perehdytään sähköisen propulsiokäytön testausjärjestelmän käyttöönottoon. Samalla esitellään siihen kuuluvat laitteistot ja komponentit. Testausjärjestelmällä voidaan mallintaa mitä tahansa taajuusmuuttaja ohjattua moottorikäyttöä. Työssä tutustutaan myös taajuusmuuttajien toimintaan ja niiden parametreihin sekä erilaisiin ohjausmuotoihin. Lisäksi selvitetään verkkoonjarruttamista.

Sähköinen propulsiokäyttö yleistyy laivakäytössä sen hyvän ohjattavuuden ja hallinnan ansiosta. Yhä useampi laiva varustetaan sähköisellä propulsiojärjestelmällä, jossa taajuusmuuttajaohjattu oikosulkumoottori pyörittää potkuria. Työ on jatkoa Sami Heinon insinööriyölle (2008), jonka aiheena oli laivan propulsiokäytön tehohallinnan perusteiden kartoitus.

Työssä tehdään käyttöönotto ja alkuasetukset Metropolia Ammattikorkeakoulun sähköisen käytön laboratorioon rakennetulle laitteistolle. Laitteistolla voidaan demonstroida laivan sähköisen propulsiokäytön eri tilanteita, sekä muitakin taajuusmuuttaja ohjattuja moottorikäyttöjä, kuten esimerkiksi ilmastointikoneita. Tavoitteena on myös taajuusmuuttajien käytön oppiminen sekä parametrien muutosten ymmärtäminen. Osana työtä on myös verkkoonjarruttaminen ja siihen liittyvien tilanteiden hallinta. Työssä käytetään lähteinä alan kirjallisuutta, verkkojulkaisuja sekä laitetoimittajien käyttöohjeita.

Työssä käydään yleisesti läpi sähköistä propulsiojärjestelmää ja sen eri osia ja pyritään antamaan selkeä kuva oleellisista laitteistoista sekä niiden osuudesta ja tarkoituksesta sähköisessä propulsiossa. Tämän jälkeen esitellään varsinainen testausjärjestelmä ja käydään läpi käytössä olevat laitteet ja niiden tarkoitus testausjärjestelmän kannalta. Näin pyritään saamaan kokonaisvaltainen kuva laitteiston toiminnasta. Laitteistoiesittelyn jälkeen tutustutaan taajuusmuuttajien ja verkkoonsyöttöyksikön parametrien asetteluun. Lisäksi käydään läpi kaikki muutetut parametrit sekä muutosten syyt. Samalla perehdytään erilaisten ohjaustapojen eroihin ja valinta-perusteisiin. Lopuksi esitellään pohdintoja testausjärjestelmän potentiaalista ja tulevista käyttömahdollisuuksista.

2 YLEISTÄ PROPULSIOKONEISTOISTA

Propulsiokoneistolla tarkoitetaan kuljetuskoneistoa, jonka tehtävänä on laivan liikkuttamiseen tarvittavan voiman tuottaminen. Propulsiolaite kiihdyttää veden, ilman tai vesi/ilmaseoksen massavirran taaksepäin. Tämä massavirran kiihdyttäminen työntää alusta eteenpäin. Kuljetuskoneisto käsittää kaikki laivan liikkuttamiseen tarvittavat komponentit, kuten päämoottorit, potkurit sekä voimansiirtoon tarvittavat laitteet. Perinteisessä propulsiossa moottorin ja potkurin välillä on suora mekaaninen yhteys. Dieselsähköisessä propulsiossa voiman siirto tapahtuu sähköisesti, eli dieselmoottori pyörittää generaattoria. Generaattorin tuottamalla sähköllä pyöritetään suoraan potkuriin kiinnitettyjä taajuusmuuttajaohjattuja sähkömoottoreita. /1, s. 8-1./

Matkustaja-aluksissa käytetään kolmea erilaista propulsiokoneistoa. Perinteisemmän dieselmekaanisen koneiston lisäksi on kaasuturbiinikoneisto sekä yhä suosittumaksi tuleva dieselsähköinen koneisto. Dieselmekaanisessa koneistossa on yleisimmin käytössä neljä keskinopeaa dieselmoottoria, jotka toimivat pareittain, ja ne on kytketty alennusvaihteiden kautta säätösiipipotkureille.

Kaasuturbiinikoneistoa kannattaa harkita, kun laivan tehotarve on yli 50 MW. Kaasuturbiinien hyötynä on niiden suuri teho/paino suhde sekä helppokäyttöisyys ja apulaitteiden vähäisyys. Polttoaineena käytettävän kaasuöljyn korkea hinta on kuitenkin haittapuolena kaasuturbiinikoneistoilla.

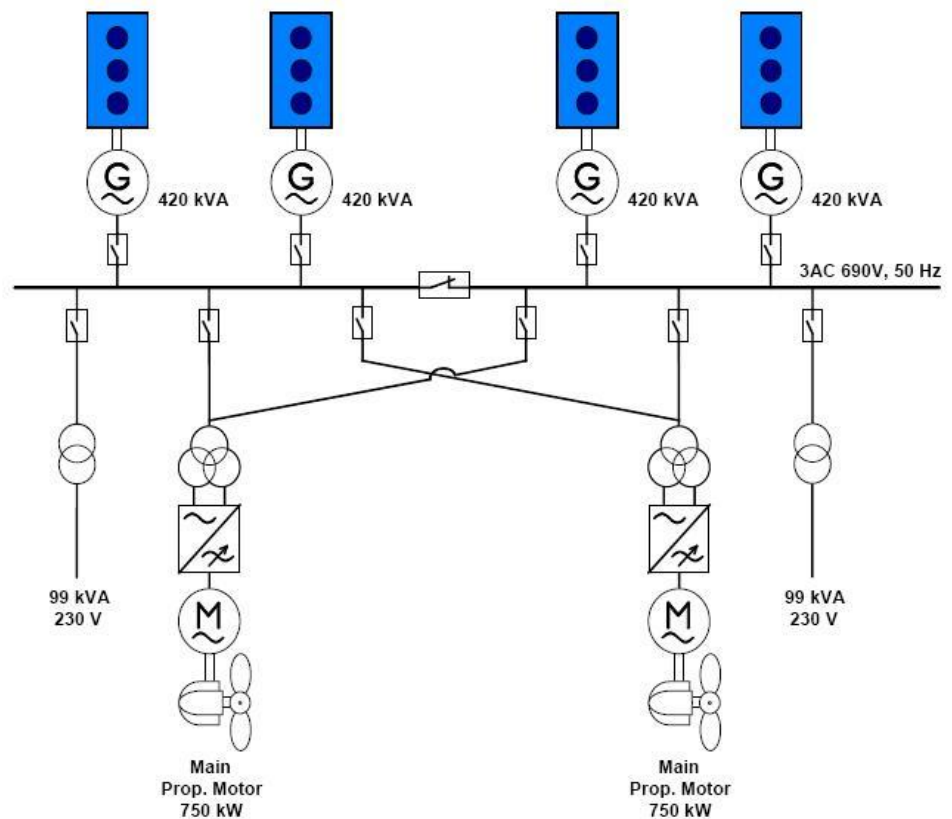
Yhä yleistyvässä dieselsähköisessä propulsiokoneistossa vakiokierrosnopeudella pyörivät dieselgeneraattorit tuottavat sähköä sekä laivan sähköverkkoon että propulsioon. Sähköverkkoon on liitettynä koko laivan sähköjärjestelmä. Taajuusmuuttajien avulla säädetään potkurien kierrosnopeutta ja pyörimissuuntaa. Etuna dieselsähköisessä koneistossa on sijoittelun vapaus, joka antaa paremmat mahdollisuudet laivan painojakauman suunnitteluun. /1, s. 18-29 - 18-30./

3 DIESELSÄHKÖINEN PROPULSIO

Dieselsähköisen propulsioyleistymisen syynä on tehoelektroniikan komponenttien kehittyminen ja halventuminen sekä tiukentuvat ympäristövaatimukset. Sähköinen propulsio mahdollistaa laivan ajamisen paremmalla hyötysuhteella verrattuna perinteiseen propulsiokoneistoon.

Taajuusmuuttajien kehittymisen myötä myös sähköinen propulsio on yleisty misessä, sillä taajuusmuuttajat mahdollistavat sähkömoottoreiden ohjaa misen ja säätämisen.

Sähköisestä propulsiosta esimerkkinä voidaan käyttää Siemensin vuonna 1999 rakentamaa Harstadverftet-alusta, jossa on neljä 420 kVA:n dieselgeneraattoria, kaksi taajuusmuuttajaohjattua 750 kW pääpropulsiomootoria sekä kaksi 99 kVA:n lähtöä normaaliin 230 V:n jakeluun. Joissain aluksissa on lisäksi vielä yhteys maasähköverkkoon. (Kuva 1.) /2, s. 83./



Kuva 1. Harstadverftet-aluksen propulsiojärjestelmän yksiviiva esitys /2/

Dieselgeneraattoreiden, potkureiden sekä muidenkin laitteiden määrä ja tehot vaihtelevat eri laivoissa kunkin laivan tarpeen mukaan.

3.1 Dieselmoottori

Dieselsähköisessä propulsiossa laivan sähköverkon energia tuotetaan ni mensä mukaan dieselmoottorin avulla. Dieselmoottori toimii siis voimakoneena, joka pyörittää generaattoria.

Laivakäytössä dieselmoottorit jaetaan hidaskäyntisiin, keskinopeisiin ja nopeakäyntisiin. Nopeakäyntisiä käytetään laivakäytössä hyvin vähän ja lähinnä pienehköissä sota-aluksissa. Hidaskäyntiset (70...250 rpm) dieselmoottorit ovat kaksitahtisia, isokokoisia ja painavia. Niissä voimansiirto on toteutettu mekaanisesti, eli potkuri on suorassa yhteydessä moottoriin. Hidaskäyntisiä dieselmoottoreita käytetään yleensä laivoissa, joissa on yksi potkuri ja joissa moottorin korkeus ei ole ongelma.

Keskinopeita (350...900 rpm) moottoreita käytetään yleisesti autolautoissa. Tämä moottorityyppi on yleisin dieselsähköisessä koneistossa, joissa se pyörittää generaattoria. Tätä yhdistelmää kutsutaan dieselgeneraattoriksi. Keskinopean dieselmoottorin pyörittämä generaattori on yleisin valinta risteilijöissä joissa on suuri hotellikuorma ja täyttä propulsiotehoa tarvitaan harvoin. /3, s. 11 - 13./

Laivoissa käytettävät moottorit ovat lähes aina turboahdettuja, eli sylinteriin syötetään pakokaasujen käyttämällä turbiinilla paineistettua ilmaa. Tällä menetelmällä saadaan enemmän tehoa laajemmalla moottorin kierrosnopeusalueella. Turboahdamisella otetaan käyttöön osa pakokaasun mukana hukkaan menevästä energiasta. Moottorin kierrosnopeuden kasvaessa kasvaa myös turbon ahtaman ilman paine. Ylimääräinen paine poistetaan hukkaportin avulla ja näin moottori ei vaurioidu.

Dieselmoottorista saatava energia määrittää koko prosessissa käytössä olevan energian määrän. Sen perusteella ratkeaa myös propulsiomoottoreiden teho.

3.2 Generaattori

Generaattorin tehtävänä on tuottaa voimakoneen tuottamasta pyörivästä liikkeestä sähköä sähköverkkoon. Käytettävät generaattorit ovat pääosin tahtigeneraattoreita. Tahtigeneraattorin etuna on se, että sen magneettinen ja sähköinen pyörimisnopeus ovat tarkalleen samoja ja näin ollen sen reagointinopeus verkossa tai akselilla tapahtuviin muutoksiin on hyvä.

Tahtigeneraattorin tuottama sähköverkon taajuus on suoraan verrannollinen tahtigeneraattorin pyörimisnopeuteen. Tahtigeneraattorin pyörimisnopeus taas riippuu sitä pyörittävästä voimakoneesta. Risteilijöissä voimakoneena on eniten keskinopeita moottoreita joiden pyörimisnopeus on $350 - 900 \frac{1}{\text{min}}$.

Tahtigeneraattorin magnetointi tapahtuu roottoriin sijoitetun magnetointikäännyksen avulla. Magnetointikäämiin syötetään tasavirtaa, joka synnyttää roottoriin nähden paikallaan olevan magneettivuon, vaikka moottori pyörisikin. Tämä paikallaan oleva magneettivuo on nimeltään päävuo. Voimakoneen pyörittäessä generaattorin roottoria, lävistää päävuo staattorikämejä. Staattorikämin näkökulmasta katsottuna vuo muuttuu ajallisesti, joten niihin indusoituu sinimuotoinen jännite eli päälähdejännite. /4, s.214 - 215./

Tahtigeneraattorissa pätötehon säätö tapahtuu muuttamalla voimakoneen vääntömomenttia. Perusmagnetoimisvirralla tahtikoneen tehokerroin eli $\cos\phi = 1$. Jos verkkoon halutaan syöttää induktiivista loistehoa niin generaattori on ylimagnetoitava. Jos taas halutaan syöttää kapasitiivista loistehoa, on generaattori alimagnetoitava. Yli- ja alimagnetoinneissa on omat rajansa. Liiallisessa alimagnetoinnissa on vaarana tahdistaputoaminen ja ylimagnetointi tuottaa lämpöä, joka rikkoo generaattorin. Jarrutus tilanteissa saadaan potkurilta verkkoon tulevaa tehoa säädettyä halutessa joko induktiiviseksi tai kapasitiiviseksi loistehoksi. Eli myös tällä tavoin voidaan parantaa verkon ominaisuuksia. /4, s. 236 - 239./

3.3 Sähköverkko

Sähköverkko on laajempi nimitys, joka sisältää sähkön jakeluun tarvittavat komponentit. Sen tehtävänä on yhdistää sähkön tuotanto ja kulutus toisiinsa. Sähköverkko koostuu siis kaapeleista, muuntajista ja verkonsuojaukseen käytettävistä laitteista. Nykyään laivoissa käytetään vaihtovirtaa jonka taajuus on Euroopassa 50 Hz ja Amerikassa 60 Hz ja runkoa käytetään suoja- maadoituselektrodina. Runkoa ei saa käyttää paluujohtona. Etuna tässä järjestelmässä on, että ensimmäinen vika ei aiheuta vaaraa. Oikosulkuvirrat ovat generaattoreiden läheisen sijainnin takia isoja. /5./

Laivan tärkein keskus on päätaulu, johon liitetään dieselgeneraattorit generaattorikatkaisijoiden välityksellä. Päätauluun kytketään myös kaikki tärkeimmät kuluttajat esimerkiksi radio- ja merenkulkulaitteet, peräsinkoneen sähkölaitteet, palohälytyslaitteet, palopumput, tyhjennyspumput sekä muut turvallisuuteen liittyvät laitteet.

Tämän lisäksi päätauluun kytketään myös turvallisuuden kannalta vähemmän tärkeitä kuluttajia kuten keittiölaitteet, asuintilojen tuuletus, saniteettilaitteet, pesulaitteet ja konetilojen tuuletus.

Jaottelu vähemmän tärkeisiin- ja tärkeisiin kuluttajiin on tehty turvallisuussyistä. Jännitteen katoaminen laivan verkosta poistaa laivalta sen ohjattavuuden. Tästä johtuen laivan ylikuormitussuojaus on toteutettu toisarvolaukaisun avulla. Ylikuormitustilanteessa toisarvolaukaisuun kytkee verkosta irti vähemmän tärkeitä kuluttajia joko kaikki kerralla tai porrastetusti. Samalla verkkoon kytketään ja tahdistetaan lisää generaattoreita. Kun verkon kuormitettavuus on kasvanut riittävästi, toisarvolaukaisuun kytkee vähemmän tärkeät kuluttajat takasin verkkoon.

Laivassa on lisäksi hätägeneraattori ja hätätaulu. Normaalitylanteessa hätätaulu saa syöttönsä pääverkosta. Jos päägeneraattorit laukeavat irti verkosta, hätägeneraattori käynnistyy automaattisesti ja syöttää hätätauluun kytkettyjä laivan turvallisuuden kannalta elintärkeitä kuluttajia. Tällaisia kuluttajia ovat esimerkiksi hätävalaistus, yleishälytys, navigointilaitteet, radiolaitteet, merenkulkuvalot ja peräsinkoneisto.

Hätägeneraattorin käynnistyminen kestää jonkin aikaa, ja tämän ajan laivan sähköverkko on jännitteettömänä. Risteilijöissä on tällaisen tilanteen varalle hätäakusto, joka ylläpitää jännitettä hätägeneraattorin käynnistymisen ajan.

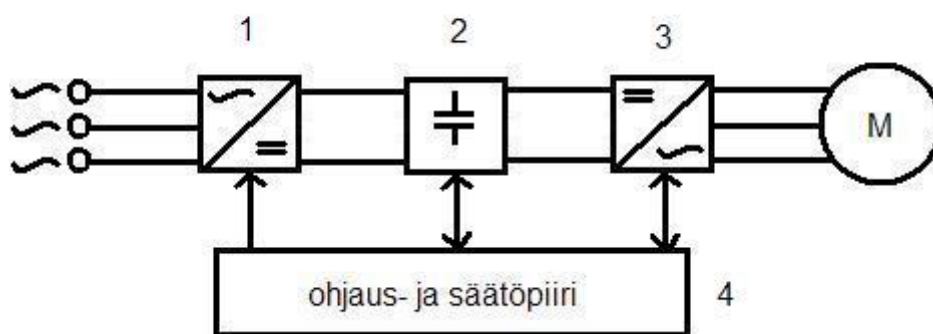
3.4 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttaja mahdollistaa vaihtosähkömoottorin pyörimisnopeuden säätämisen. Laivakäytössä esimerkiksi potkuria pyörittävän moottorin säätämisen. Taajuusmuuttajia käytetään myös laivan ilmastointilaitteistoissa sekä pumppujen ohjauksessa. Taajuusmuuttaja korvaa perinteisen vaihteiston tai välityksen. Taajuusmuuttajia on kahta eri tyyppiä: välipiirillisiä- ja suoria taajuusmuuttajia eli syklokonverttereita. Tässä insinööriyössä keskitytään välipiirillisiin.

Ennen taajuusmuuttajia vaihtosähkömoottoreiden järkevä nopeuden säätäminen oli mahdotonta. Tehoelektronikan komponenttien kehittyminen ja halpeneminen mahdollistavat kuitenkin nykyään sen, että vaihtosähkömoottorin ovat monissa käyttökohteissa korvanneet aiemmat nopeussäädettävät tasasähkömoottorit.

Taajuusmuuttaja koostuu neljästä pääosasta (kuva 2):

1. tasasuuntaaja
2. välipiiri
3. vaihtosuuntaaja
4. ohjauspiiri.



Kuva 2. Taajuusmuuttajan periaatekaavio /lähde 6, s. 11 mukailen/

Tasasuuntaaja muuttaa verkosta syötetyn kolmivaiheisen vaihtojännitteen sykkiväksi tasajännitteeksi. Tasasuuntaaja on kuvassa merkitty numerolla yksi. Tasasuuntaaja voi toimia myös toiseen suuntaan sellaisissa laitteissa joissa on verkkoonsyöttö mahdollisuus, esimerkiksi AFE (*Active Front-End*) -sovelluksissa (ks. 4.3).

Välipiiriä on kolmea eri tyyppiä: Yhdessä tasasuuntaajan jännite muutetaan tasavirraksi. Toisessa sykkivä tasajännite stabilisoidaan, ja se lähetetään vaihtosuuntaajaan. Kolmannessa tyyppissä tasasuuntaajan vakiotasajännite muutetaan muuttuvaksi jännitteeksi. Kuvassa 2 välipiiri on merkitty numerolla kaksi.

Vaihtosuuntaaja, joka on merkitty kuvaan numerolla kolme, ohjaa moottorijännitteen taajutta ohjaus- ja säätöpiirin käskyjen mukaan.

Ohjaus- ja säätöpiiri kommunikoi muiden osien kanssa. Ohjauspiiri huolehtii käyttäjän asettamien parametrien ja raja-arvojen toteuttamisesta moottorille muita taajuusmuuttajan osia säätelemällä. /6, s. 11./

Sähkön käytön laboratorioon kasatessa testilaitteistossa on moottoripuolen ohjauksessa käytetty välipiirillistä taajuusmuuttajaa. Kuormapuolella on kaksi invertteriyksikköä eli kaksisuuntaista tasavirralla toimivaa vaihtosuuntaajaa, joista toinen hoitaa kuormana toimivan oikosulkumoottorin ohjaamisen. Toisessa on verkkoonjarrutuksen mahdollistava AFE-käyttö. Tällä tavoin moottorin pyörittäessä kuormaa saadaan syntynyt teho syötettyä verkkoon.

3.4.1 Tasasuuntaaja

Tasasuuntaajaa on kahta erilaista päätyyppiä, ohjattu ja ohjaamaton tasasuuntaaja. Tasasuuntaaja muuttaa nimensä mukaisesti syöttöverkon kolmivaiheisen vaihtojännitteen tasajännitteeksi. Tasasuuntaaja voidaan toteuttaa diodeilla, tyristöreilla, tehotransistoreilla tai näiden yhdistelmillä, sekä IGBT-sillalla (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Diodeilla toteutettu tasasuuntaussilta on ohjaamaton tasasuuntaaja. Jos silta on toteutettu diodien ja tyristorien yhdistelmällä, tasasuuntaaja on puoliksi ohjattu. Pelkillä tyristöreilla tai transistoreilla toteutettua siltaa kutsutaan täysinohjatuksi tasasuuntaajaksi. Myös IGBT-sillalla toteutettu tasasuuntaaja on täysin ohjattu.

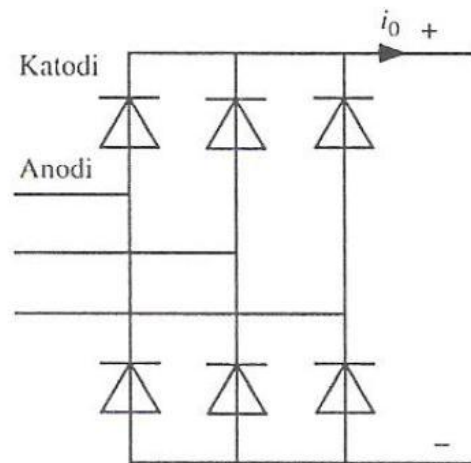
[7.]

Kun tasajännite muodostuu kolmesta pulssista yhden verkkojakson aikana, on kyseessä kolmipulssitasasuuntaaja. Kolmipulssitasasuuntaajan käyttö on nykyään harvinaista johtuen haittana olevista vaihevirroissa esiintyvistä tasakomponentista ja nollajohtimen tarpeesta. Yleisempi vaihtoehto on kuusipulssitasasuuntaaja, jossa tätä tasakomponenttia ei esiinny. Kaksitoistapulssitasasuuntaajat ovat myös yleistymässä kokoajan.

Diodeilla toteutetussa kuusipulssisessa tasasuuntaussillassa tarvitaan kolme diodia toteuttamaan yksi kolmiasentoinen kytkin. Kytkimen kääntö, virran siirto diodilta toiselle, eli kommutointi tapahtuu kolmivaiheisen syöttöjännitteen pakottamana. Kyseessä on tällöin verkkokommutointi. Yläpuolen kolmesta diodista johtaa aina se, jonka vaihejännite on kaikista positiivisin. Alapuolella olevista kolmesta diodista taas johtavana on negatiivisimman vaihejännitteen omaava diodi. Diodisillan vaikutuksesta

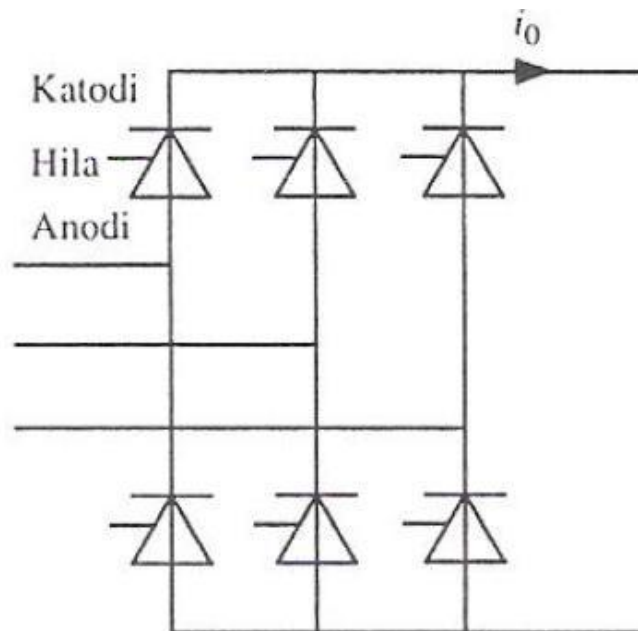
- taajuusmuuttaja syöttää verkkoon yliaaltovirtoja
- syötön $\cos \varphi$ paranee ja
- moottori ei syötä verkkoon oikosulku tehoa.

Laivaverkot ovat kriittisiä virran ja oikosulkutehon suhteen, joten taajuusmuuttajien laaja käyttö parantaa tilannetta. Generaattoreiden tehokertoimen paraneminen kompensoi yliaaltovirtojen aiheuttaman tehohäviön. (Kuva 3.)



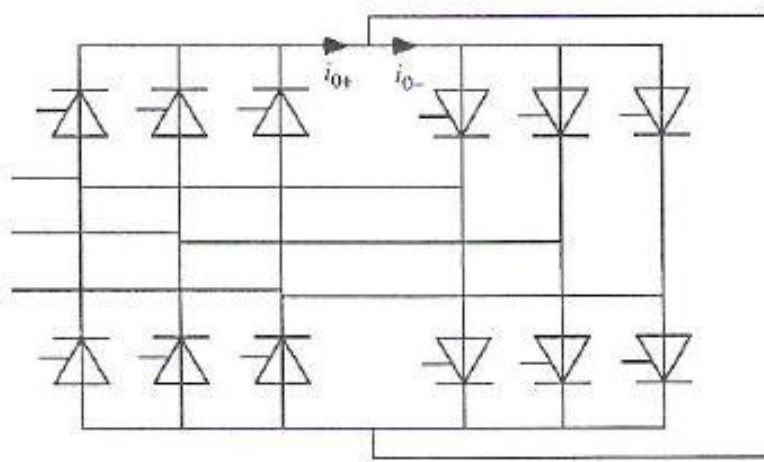
Kuva 3. Diodisillalla toteutettu kuusipulssinen tasasuuntaaja /8, s. 42/

Tyristoreilla toteutetussa kuusipulssisessä tasasuuntaussillassa kytkimen kääntö tapahtuu edelleen kolmivaiheverkon jännitteiden avulla. Tyristorin ohjattavuudesta johtuen kommutoinnin alkua voidaan viivästyttää ohjaukskulman avulla. Tyristorisillalla voidaan siis ohjata kuormituksen saamaa tasajännitettä. (Kuva 4.)



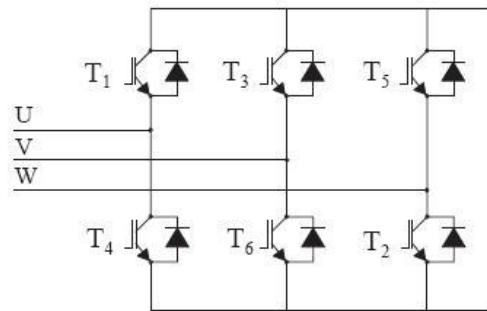
Kuva 4. Tyristorisillalla toteutettu kuusipulssinen tasasuuntaaja /8, s.42/

Edellä olevissa tasasuuntaussilloissa tasavirta voi kulkea vain yhteen suuntaan. Jos halutaan tasavirran suunnan olevan vaihdettavissa, tulee silloin käyttää vastarinnan kytkettyä tyristorisiltaa. Riippuen tasavirran suunnasta jompi kumpi vastarinnan kytketyistä silloista johtaa virtaa. Virran suuntaa vaihdettaessa tulee tasavirran olla nollassa vähintään noin millisekunnin ajan, jotta tyristorit ehtivät toipua. Jos toipumisaika on liian lyhyt, on seurauksena oikosulku. Kiertovirrallisessa tasasuuntaajassa oikosulun mahdollisuus on suljettu pois lisäämällä kummankin sillan tasasähkölähtöön kuristin. (Kuva 5.) /8, s. 40 - 44./



Kuva 5. Vastarinnan kytketyllä tyristoriparilla toteutettu kuusipulssinen tasasuuntaaja /8, s.42/

IGBT-sillalla toteutettu tasasuuntaaja on yksi esimerkki aktiivisista verkko-vaihtosuuntaajista eli AFE:sta. Aktiivinen tulosilta tasaa välipiirin jännitettä sekä palauttaa tehoa takaisin verkkoon päin sen sijaan, että palautuva teho menisi jarrukatkojalle tai välipiirin kondensaattorille. IGBT-sillalla toteutetussa tasasuuntaussillassa voidaan jännitteen ja virran suuntaa ja suuruutta muuttaa vapaasti toisistaan riippumatta. Tämän ansiosta myös teho voi vaihtaa suuntaa, koska teho on jännitteen ja virran tulo. Näin ollen taajuusmuuttajalla voidaan syöttää tehoa taajuusmuuttajasta generaattoriin päin. (Kuva 6.)

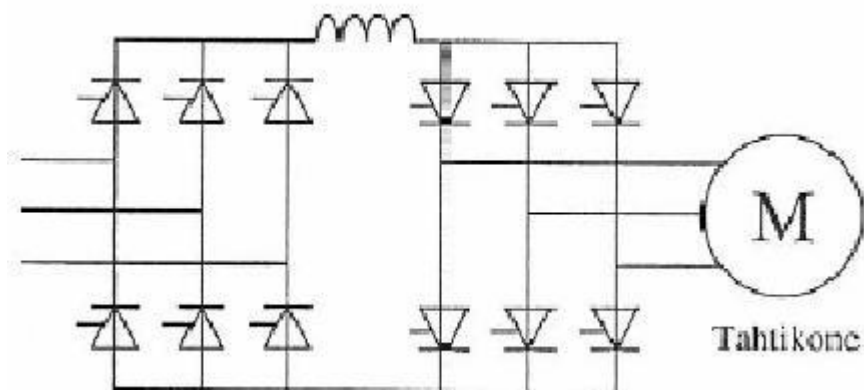


Kuva 6. IGBT-silta /9, s.5/

3.4.2 Välipiiri

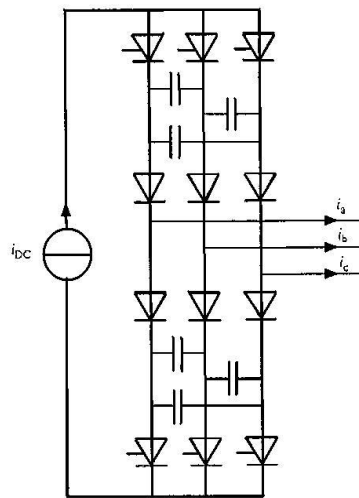
Virtavälipiiri koostuu tasoituskuristimesta. Sen tarkoitus on pienentää tasavirran aaltoisuutta. Jännitevälipiirissä on kondensaattori, joka taas puolestaan pienentää tasajännitteen aaltoisuutta. Jännitevälipiirissä saattaa olla tasokuristin tasasuuntaajan ja kondensaattorin välissä.

Yksinkertaisin virtavälipiirillisistä taajuusmuuttajista on kuormakommutoitu taajuusmuuttaja eli LCI (*Load Commutated Inverter*). Siinä on kaksi tyristorisiltaa, joista toinen on kytketty syöttävään verkkoon ja toinen tahtikoneeseen. Tyristorisiltojen välillä on välipiiri kuristimieen. Normaaliajossa verkkoon kytketty silta toimii tasasuuntaajana ja koneen puoleinen silta vaihtosuuntaajana (kuva 7). Jarrutustilanteessa- kun kone toimii generaattorina, osat vaihtuvat polariteetin muuttuessa. Välipiirin virran suunta on sama niin moottori- kuin generaattoritoiminnassa. LCI-kytkennässä ongelmana on tyristorien epäluotettava kommutointi alhaisilla nopeuksilla. Tästä johtuen vääntömomentti on nykivää, joten LCI ei sovellu käyttöihin, joissa tarvitaan suurta vääntömomenttia pienillä kierrosnopeuksilla.



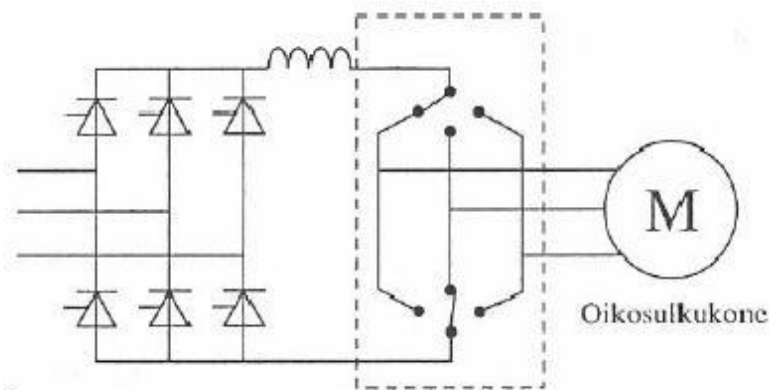
Kuva 7. Kuormakommutoitu taajuusmuuttaja (LCI) /8, s.49/

Oikosulkumoottorille soveltuva virtavälipiiritaajuusmuuttaja saadaan kun korvataan LCI:n koneen puoleinen tyristorisilta kuvan kahdeksan mukaisella kytkennällä. Tästä muuttajasta käytetään lyhennettä CSI (*Current Source Inverter*). Luten LCI:lläkin toiminta on mahdollista sekä moottorina että generaattorina. Kytkennän kommutointikondensaattoreista johtuen välipiirivirtaa ei tarvitse katkoa pienilläkään pyörimisnopeuksilla (kuva 8). Tästä johtuen vääntömomentti on tasaisempaa kuin LCI:llä. Lisäksi pulssinleveysmodulaation PWM (*Pulse Width Modulation*) käyttö on mahdollista.



Kuva 8. Virtavälipiirivaihtosuuntaaja /8, s.47/

Kuvissa on katkoviivalla esitetty kytkennän sijoittuminen (kuvat 8 ja 9).

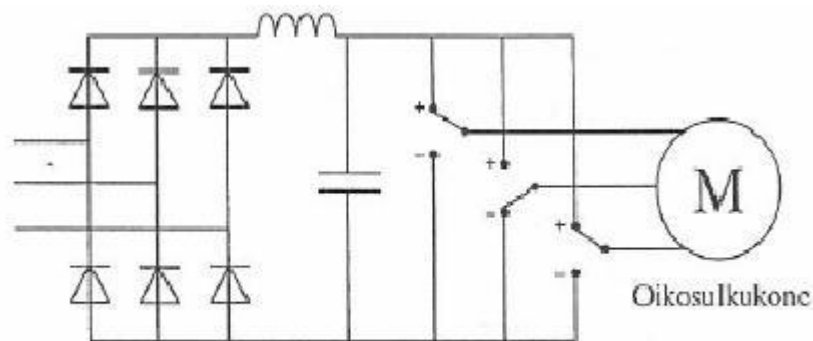


Kuva 9. Virtavälipiiritaajuusmuuttaja /8, s.49/

Kolmas välipiireistä on jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja eli VSI (*Voltage Source Inverter*) (kuva 10). Siinä käytetään tavallisimmin diodisiltaa tuot-

tamaan välipiirin tasajännite. Diodisilta ei kuitenkaan pysty ohjaamaan. Tästä johtuen moottorin jännitettä säädetään pulssinleveysmodulointia käyttäen. Pulssinleveysmoduloinnin etuja ovat hyvä dynamiikka säädöissä sekä lähes sinimuotoinen vaihevirta. Diodisilta estää myös jarrutustehon vaihtosuuntauksen syöttöverkkoon. Jos konetta halutaan jarruttaa enemmän kuin muuttajan tai koneen häviöt antavat myöden, tulee välipiiriin lisätä jarrukatkoja ja jarruvastus. Jarruvastus muuttaa jarrutustehon lämmöksi.

Yhtenä vaihtoehtona on korvata diodisilta verkkovaihtotasasuuntaajalla eli aktiivisella etuvasteella AFE. AFE toimii normaalisti tasasuuntaajana ikäänkuin syöttöverkko olisi jarrupuolella toimiva tahtikone. Kun moottori alkaa jarruttaa, siirtyy sitä syöttävä vaihtosuuntaaja tasasuuntaajaksi ja verkkovaihtosuuntaaja vaihtosuuntaajaksi syöttäen jarrutustehon takaisin verkkoon. /8, s. 48 - 50./



Kuva 10. Jännitevälipiiritajuusmuuttaja /8, s. 49/

3.4.3 Vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaaja on viimeinen moduuli ennen moottoria. Vaihtosuuntaajalla muutetaan tasajännite vaihtojännitteeksi jolla syötetään moottoria. PWM:ssa säätö tapahtuu vaihtosuuntaajassa ja säätönopeus on suuri. Välipiiristä vaihtosuuntaaja saa joko muuttuvaa tasavirtaa, muuttuvaa tasajännitettä tai vakiotasajännitettä. Kun vaihtosuuntaaja saa muuttuvaa virtaa tai jännitettä, sen tarvitsee vaikuttaa vain taajuuteen. Jos taas jännite on vakio, vaihtosuuntaajan tulee ohjata sekä jännitteen taajuutta että amplitudia. /6, s. 18 - 19./

3.4.4 Ohjaus- ja säätöpiiri

Ohjauspiiri ohjaa taajuusmuuttajassa olevia puolijohteita ympärillä olevien laitteiden tai käyttäjän säätöjen mukaan. Ohjauspiirillä on kaksi tehtävää: ohjata puolijohteita ja vastaanottaa tai lähettää viestejä ympärillä oleville laitteille. Viestit ja käskyt voivat tulla joko käyttäjän ohjauspaneelistä tai ylemmän tason PLC-ohjauksen kautta. /6, s. 31./

3.5 Taajuusmuuttajan säätötavat

Ohjaus ja säätö eroavat toisistaan. Ero on tavassa, jolla haluttu tavoite pyritään saavuttamaan. Ohjaus perustuu ohjearvoihin ja laitteesta muodostettuun malliin. Mallin ja ohjearvojen perusteella muodostetaan tarvittavat laitteen ohjaussignaalit, jotta haluttu ilmiö saavutetaan. Säädössä verrataan laitteen lähtösuureita ohjearvoihin ja näiden kahden erotuksen eli säätöpoikkeaman perusteella muutetaan ohjaussignaaleja säätöalgoritmin mukaisesti siten, että säätöpoikkeama pienenee.

Oikosulkukoneen ohjauksessa ja säädössä yleisimpiä ovat skalaariohjaus, skaalarisäätö, vektorisäätö sekä suora vääntömomenttisäätö. Skalaariohjaus ja skaalarisäätö soveltuvat dynamiikkavaatimuksiltaan vähäisiin käyttöihin. Vektorisäätö mahdollistaa suorituskyvyltään haastavampia käyttökohteita ja paras mutta elektroniikaltaan vaativin menetelmä on suora vääntömomenttisäätö DTC (*Direct Torque Control*).

3.5.1 Skalaariohjaus- ja säätö

Skalaarisuureella tarkoitetaan suuretta, jolla on vain suuruus mutta ei suuntaa. Tällaisia skalaarisuureita ovat tyypillisesti jännite ja taajuus.

Skalaariohjauksessa moottorin pyörimisnopeuden ohjaaminen tapahtuu lähtötaajuutta muuttamalla. Tällöin moottorin pyörimisnopeus asettuu taajuuden ja kuormitusvääntömomentin määräämään arvoon. Lähtöjännite on riippuvainen lähtötaajuudesta. Jännitteen kasvu tapahtuu lineaarisesti aina nimellisjännitteeseen asti. Nimellisjännite saavutetaan moottorin nimellistaajuudella. Nimellistaajuuden yläpuolella jännite pysyy vakiona. Jännitettä ja taajuutta on muutettava samassa suhteessa aina nimellistaajuuteen asti. Niiden välistä suhdetta pidetään vakiona kaikissa ohjaustilanteissa.

Kun taajuus kasvaa ja jännite pysyy nimellisessä, moottorin vääntömomentti pienenee. Tämä ilmiö on kentänheikennys. Kohta, jossa vääntömomentti lähtee pienenemään, on nimeltään kentänheikennyspiste.

Skalaariohjauksessa mitataan moottorin vaihevirratt ja lasketaan pätövirtakomponentit. Pätövirtakomponentti on verrannollinen moottorin vääntömomenttiin. Voidaan olettaa että moottorin vääntömomentti on suoraan verrannollinen moottorin jännitteen ja pätövirran tuloon. Tästä johtuu nimitys skalaariohjaus. Skalaariohjauksessa ei mitata moottorin pyörimisnopeutta.

Skalaarisäätö sisältää nopeussäädön ja sen jälkeisen vääntömomenttisäädön. Skalaarisäädöllä voidaan säätää joko moottorin pyörimisnopeutta tai vääntömomenttia tai molempia vuorotellen. Pyörimisnopeus jää jättämän verran syöttötaajuutta vastaavaa tahtinopeutta pienemmäksi ja jättämä asetuu arvoon jossa työkonetta saa vaatimansa tehon. /7./

Skalaarisäätö soveltuu pumppu, puhallin ja kuljetuskäyttöön. Oikosulkumoottoreiden suurilla nopeuksilla säätö soveltuu vaativiin käyttöihin, koska tällöin koneen sisäinen vuonsäätö toteutuu hyvin. Koska skaalarisäätö ei vaadi moottorimallia toimiakseen, se soveltuu hyvin myös monimoottorikäyttöön. Skalaarisäätö ei sovellu hitaan vääntömomenttivasteensa takia vaativiin servokäyttöihin eikä esimerkiksi valssikäyttöihin.

3.5.2 Vektorisäätö

Vektorisäädön tavoitteena on ohjata konetta oikein myös muutostilanteissa. Oikosulkumoottorin vääntömomentti on päävuon ja roottorivirran vektoritulo. Ja jos halutaan säätää vääntömomenttia, on myös vektorin suunta huomioitava. Tästä johtuu nimitys vektorisäätö.

Jotta vektorisäätö olisi mahdollista toteuttaa, tarvitaan sekä moottorivirtojen että pyörimisnopeuden tarkkaa mittausta. Mittaustiedot syötetään oikosulkumoottorista tehtyyn matemaattiseen malliin, joka on mikro-prosessorin muistissa. Moottorimalli laskee moottorin magneettivuon ja jakaa virran vääntömomenttia ja magneettivuota kuvaaviin osiin. Molempia virran komponentteja pystytään säätämään erikseen, joten vääntömomenttia säädettäessä vuon voi pitää vakiona.

Vektorisäätöä kannattaa käyttää sovelluksissa, joissa vaaditaan hyvää dynamiikkaa ja tarkkaa nopeudensäätöä esimerkiksi paperikoneissa. Vektorisäädöllä voidaan estää vuon heikkeneminen silloin, kun kuormassa tapahtuu äkillinen kasvu, ja kaikki virta tarvittaisiin lisäämään moottorin vääntömomenttia. /7./

3.5.3 Suora vääntömomenttisäätö DTC

Suora vääntömomentti säätö on nyky markkinoiden kehittynein vaihtovirtakäyttötekniikka. DTC -tekniikka on noussut käytetyimmäksi säätötavaksi, ja se on vakiona lähes kaikissa taajuusmuuttajissa. Suorassa vääntömomenttisäädössä annetaan moottorin tehtäväksi kehittää haluttu pyörimisnopeus ja vääntömomentti mahdollisimman nopeasti. Mitään muita reunaehtoja ei moottorille aseteta.

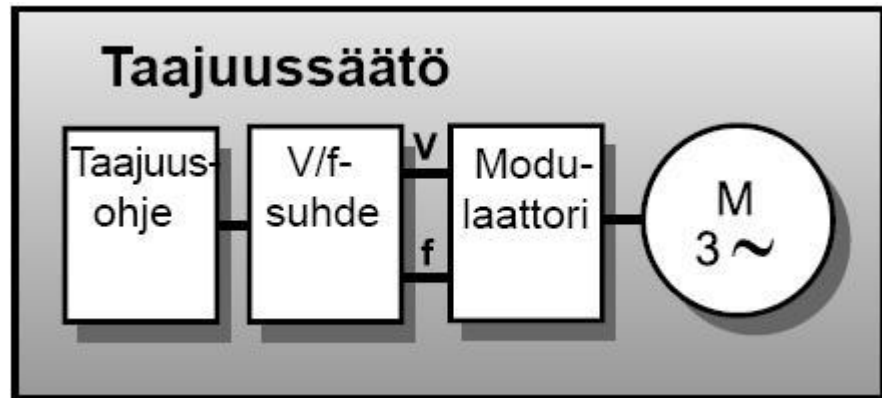
Tämän seurauksena moottori saavuttaa toimintavaiheen, jossa sitä syöttävät jännite- ja virtasuureet ovat sinimuotoisia ja ilmapälissä pyörii sinimuotoisesti ilmapäliin jakautunut magneettikenttä, vasta, kun se on jatkuvuustilassa tai hyvin hitaassa muutostilassa. Tämän takia järjestelmää ei voida tutkia muutostiloissa, eikä laskuja voida perustaa perinteiseen osoitinlaskentaan. Laskut suoritetaan hetkellisarvoilla numeerisesti. DTC soveltuu käyttökohteisiin joissa vaaditaan tarkkaa nopeudensäätöä ja nopeaa momentinsäätöä. /4, s. 475./

3.5.4 DTC -ja PWM-käytön erot

PWM-käytössä säädettävät suureet ovat lähtöjännite ja lähtötaajuus. DTC-käytössä ne ovat moottorin momentti ja moottorin magneettivuo. DTC-käytöt säätävät siis suoraan moottorin momenttiin vaikuttavia suureita. Tästä johtuen moottorin momenttiin ja nopeuteen tehtävät muutokset tapahtuvat nopeasti. PWM-säädetyssä vaihtovirtakäytössä säätösuureet eli jännite ja taajuus kulkevat usean vaiheen läpi, ennen kun niitä käytetään moottorissa. Säätö tapahtuu elektronisessa säätölaitteessa eli vaihtosuuntaajassa eikä moottorin sisällä. DTC-säädön etuna on se, että modulaatiota ei tarvita kuten PWM-käytöissä. Tämä vähentää säätövaiheiden määrää ja nopeuttaa momentti-vastetta. DTC:n avulla momenttia voidaan säätää ilman takaisinkytkentää.

PWM-käytössä taajuus- ja jänniteohje syötetään modulaattoriin, joka simuloi vaihtovirran siniaaltoa ja syöttää sen moottorin staattorin käämeille. PWM-käytöllä toteutettu taajuussäätö ei käytä takaisin kytkentää, jonka avulla

moottorin akselilta mitatut nopeus- ja asentotiedot syötettäisiin säätöpiiriin. Koska takaisin kytkentää ei tarvita, menetelmä sopii hyvin pumppu- ja puhallinkäyttöön, eli käyttöihin joissa ei tarvita tarkkaa säätöä. (Kuva 11.)

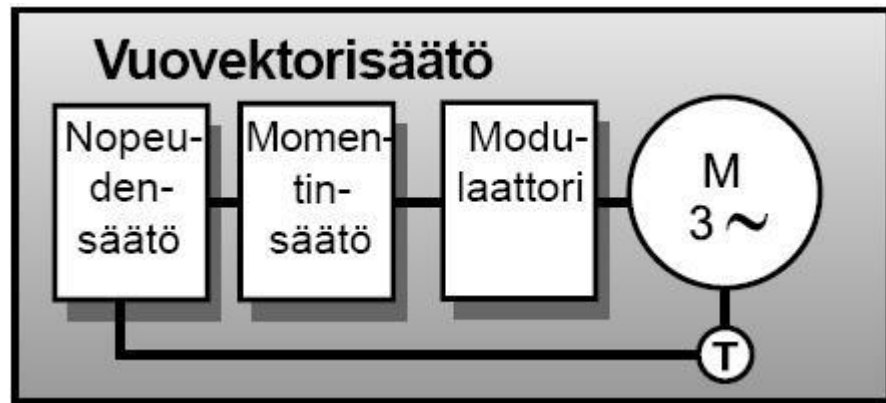


Kuva 11. PWM:n avulla taajuussäädetyin vaihtovirta käytön säätöpiiri /10, s.9/

Haittana kuvan yksitoista säätöpiirissä on, että vektorisäätöä ei hyödynnetä eikä momenttia säädetä. Menetelmässä käytettävä modulaattori hidastaa moottorin reagoitua syöttöjännitteen ja -taajuuden muutoksiin.

PWM-käytön vuovektorisäätö vaatii takaisin kytkennän. Vuovektorisäätö simuloi tasavirtakäyttöä, ja moottorin sähköisiä ominaisuuksia simuloidaan moottorimallilla. Jotta moottorin magneettisia käyttöolosuhteita voitaisiin jäljitellä, eli kentän suuntaa voitaisiin säätää, on tiedettävä roottorivuon asema oikosulkumoottorissa.

Tieto roottorin tilasta saadaan pulssianturin avulla. Se antaa roottorin asento- ja nopeustiedot suhteessa staattorin kenttään. Moottorin sähköisiä ominaisuuksia mallinnetaan mikroprosessorien avulla. Vuovektorisäädössä on hyvä momenttivaste ja tarkka nopeudensäätö. Momentti on nolla-nopeudesta asti suurin mahdollinen. Huonona puolena voidaan pitää moduloinnin aiheuttamaa reagoitihitautta sekä takaisinkytkennän välttämättömyyttä. (Kuva 12.)



Kuva 12. Vuovektorisäätöä PWM:n avulla käyttävän vaihtovirtakäytön säätöpiiri /10, s.10/

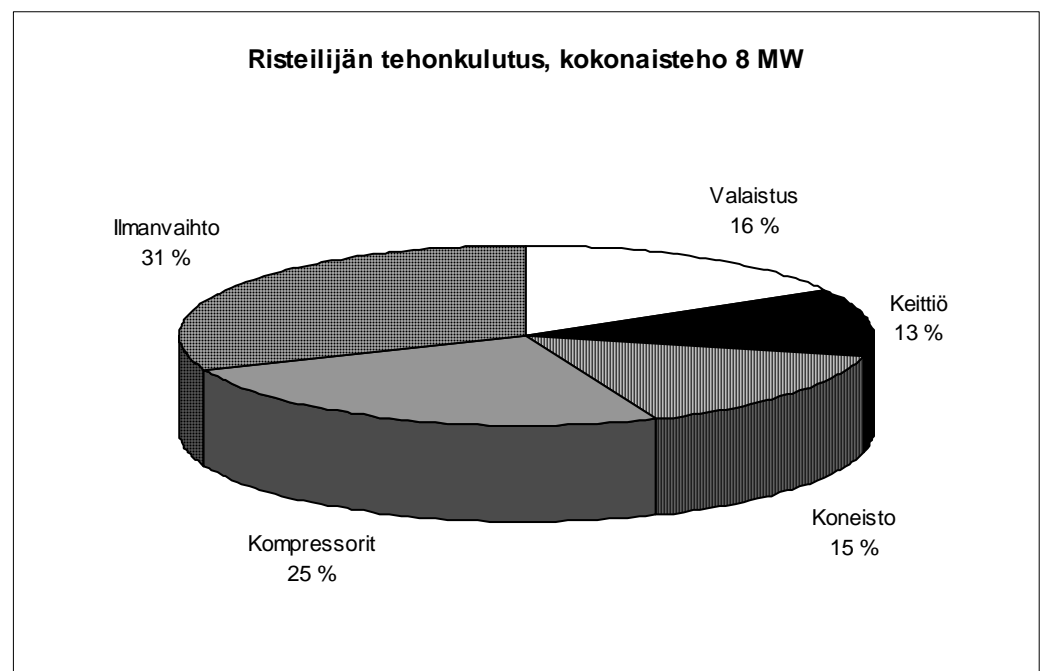
DTC-tekniikkaa käytettäessä ei tarvita takaisinkytkentää eikä modulaattoria. Siinä hyödynnetään pitkälle kehittyneitä matemaattisia malleja moottorin toimintaperiaatteesta. Tämän ansiosta DTC-käytön momenttivaste on jopa kymmenen kertaa nopeampi kuin missään vaihtovirta- tai tasavirtakäytössä. DTC-tekniikassa moottorin momentti ja staattorin vuo ovat ensisijaisia säätösuureita. Tieto molemmista saadaan suoraan moottorilta. Tästä johtuen DTC-tekniikkaa käytettäessä ei tarvita erillistä taajuuden ja jännitteen avulla säädettävää PWM-modulointia. DTC:n etuna on, että 95 % käytöistä ei vaadi takaisinkytkentälaitetta. /10./

3.6 Muita kohteita taajuusmuuttajille laivakäytössä

Propulsiokäyttö ei ole ainoa kohde laivassa, jossa käytetään taajuusmuuttajia. Niitä käytetään muunmuassa ilmastointilaitteistoissa sekä erilaisten pumppujen säätämisessä. Laivan liikkuvuus asettaa haasteen esimerkiksi ilmastoinnin suunnittelulle. Otetaan esimerkkinä Helsinkiin rakennettava toimistorakennus, johon tulee ilmastointi. Sinne ilmastointilaitteiden mitoittaminen on huomattavasti helpompaa, koska talo ei vaihda paikkaa. Tällöin riittää, kun tutustutaan paikallissähän tarpeeksi monta vuotta taaksepäin. Jos laivan ilmastointilaitteet suunnitellaan vain Helsingin sääolojen perusteella, pienenee laivan käyttöalue huomattavasti. Meriveden ja ilman lämpötilat vaihtelevat maailmalla suuresti, joten ilmastoinnin tulee olla toimiva kaikissa olosuhteissa.

Erään laivan ilmastointilaitteiden käyttöolosuhteiksi oli annettu ilman lämpötilan osalta $-10^{\circ}\text{C} \dots 35^{\circ}\text{C}$ ja meriveden lämpötilan osalta $0^{\circ}\text{C} \dots 32^{\circ}\text{C}$. Tämä vaatii hyvää ohjattavuutta ja säätömahdollisuuksia laitteistolta, joten taajuusmuuttajaohjatut käytöt ovat yleistyneet erittäin paljon. Taajuusmuuttajien käyttö mahdollistaa laajan käyttöalueen, koska laitteisto voidaan mitoittaa kuumimman olosuhteen mukaan, vaikka laiva ei kävisikään alueella kertaakaan. Taajuusmuuttajien ohjaamana moottoreita voidaan ajaa osateholla. Säätö tapahtuu siis myös moottoria ohjaamalla. Aikaisemmin säätö on tapahtunut erilaisilla venttiileillä ja puhaltimen lapakulmaa muuttamalla, moottori on pyörinyt kokoajan nimellisnopeudellaan.

Moottorin pyörimisnopeuden säätäminen säästää huomattavat määrät energiaa, koska moottorit saadaan pyörimään halutulla nopeudella, juuri silloin, kun pitääkin. Ylimääräistä käyttöä ja energian kulutusta ei siis tule, joten taajuusmuuttajien avulla saadaan säästettyä huomattavasti energiaa. Energiansäästön kannalta taajuusmuuttajilla on suurin vaikutus juuri ilmastoinnissa, sillä ilmastointi on suurin yksittäinen kuluttaja laivassa propulsiojälkeen (kuva 13).



Kuva 13. Risteilijän tehonkulutus /11/

Kompressorikäyttöisen jäähdytyskoneiston hyvyttä mitataan kylmäkertoimella COP. Se kuvaa saadun jäähdytystehon suhdetta tarvittavaan kompressorin eli sähkötehoon. Kylmäkertoimen arvo riippuu höyrystymis- ja lauhtumislämpötiloista sekä kompressorin hyötysuhteesta.

Ilmastoinnin jäähdytyskoneistojen teho on työlaivoissa muutama sata kilowattia ja isoissa risteilijöissä useita kymmeniä megawatteja. Vakiokierrostaajuudella toimivien kylmälaitosten kompressorien hyötysuhde pidetään lähellä nimellispisteen hyötysuhdetta jakamalla kylmäteho useammalle kompressorikäytölle. Kompressorikäyttöjä käynnistetään ja sammutetaan tarpeen mukaan. Hyötysuhdetta saadaan olellisesti parannettua käyttämällä kierrostaajuuden säätöä esimerkiksi ruuvikompressorin luistinohjauksen tilalla. Luistinsäädöllä 900 kW:n kompressorin COP on laajalla alueella vakio ja alle 50 %:n kuormituksella COP laskee 80 % suunnittelupisteeseen verrattuna. Kierrostaajuussäädöllä saman kylmälaitoksen COP kasvaa osakuormilla siten, että

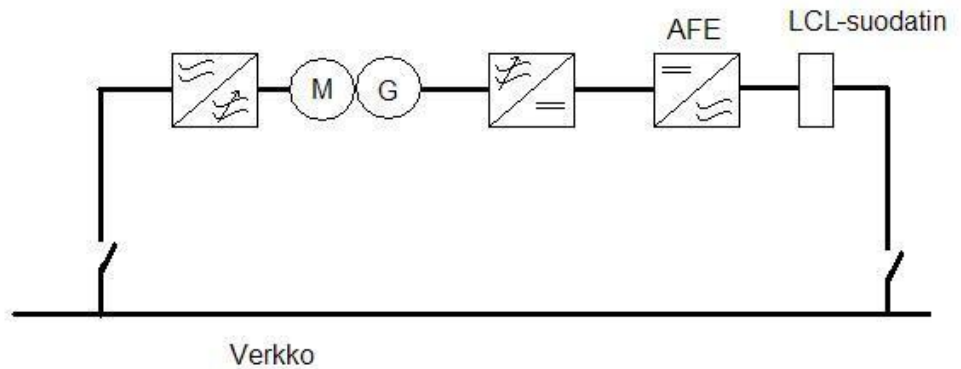
- 50 %:n kuormalla suhteellinen COP on 135 % ja
- 80 %:n kuormalla COP on 120 %.

Kierrostaajuussäädöllä ohjataan massavirtaa. Massavirran pienentyessä lauhtuttimen ja höyrystimen teho paranee. Tämä tarkoittaa parempaa kylmäkerrointa.

Eräessä laivassa ilmastoinnin puhaltimien teho on 2 000 kW, josta tulee 5 kW sisäänpuhallettua kuutiometriä kohden. Maapuolella on mahdollista käyttää isompia ja avarampia kanavia, joten luku on maapuolella huomattavasti pienempi. Ilman jäähdytykseen ja kuivaamiseen tarvitaan 10 kW jokaiselle kuutiometrille. Ilmastoinnissa puhaltimet ovat taajuusmuuttaja-säädettyjä. Kyseisen laivan ilmastointikoneisto sisältää 245 taajuusmuuttajaa.

4 TESTAUSJÄRJESTELMÄN ESITTELY JA KÄYTTÖTARKOITUS

Sähkön käytön laboratorioon rakennettu testausjärjestelmä koostuu Vaconin NXP - taajuusmuuttajasta, kahdesta Vaconin NXI - invertteriyksiköstä, ulkoisesta LCL-suodattimesta sekä kahdesta oikosulkumoottorista. Toisessa invertteriyksikössä on AFE-sovellus verkkoonjarruttamista varten. (ks. testauslaitteiston periaate, kuva 14.)

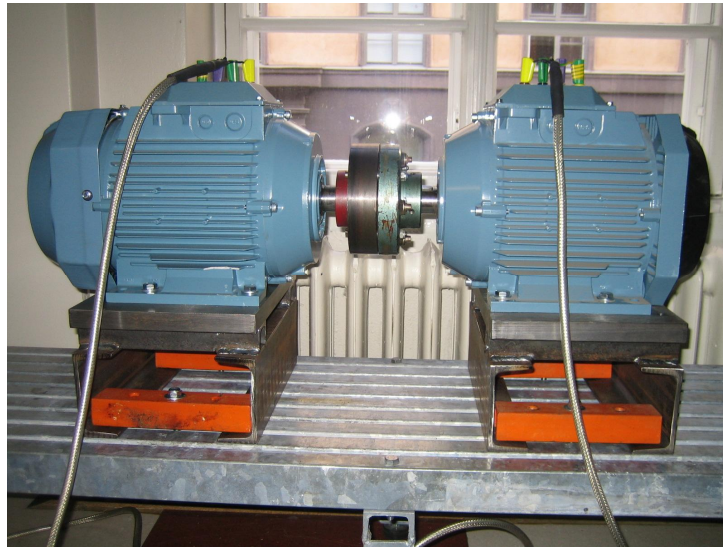


Kuva 14. Testausjärjestelmän periaatekuva

Laitteet on kytketty sähkön käytön laboratorion verkkoon. Syötön voisi hoitaa myös esimerkiksi aggregaatista. Verkkoonjarrutuksen voisi silloinkin hoitaa valtakunnalliseen verkkoon tai aggregaatin syöttämään verkkoon, jos siinä on tarpeeksi kuluttajia käyttämään syötetty teho. Kuvassa 14 vasemmalla oleva taajuusmuuttaja hoitaa moottorin ohjauksen. Moottorin ja generaattorin jälkeisellä INU (*Inverter Unit*) -yksiköllä ohjataan kuormana toimivaa oikosulkumoottoria, joka on kuvassa generaattorina. AFE-yksikkö hoitaa verkkoonjarruttamisen ja AFE-yksikkö vaatii ulkoisen LCL-suodattimen, joka on kuvassa oikealla. Tehon suunta on kuvassa vasemmalta oikealle.

4.1 Oikosulkumoottori

Testausjärjestelmässä käytetään kahta 7,5 kW oikosulkumoottoria (kuva 15). Toinen oikosulkumoottoreista simuloi tilanteesta riippuen testattavaa moottoria kuten esimerkiksi laivan propulsioon sähkömoottoria. Toinen moottoreista toimii kuormana. Sen avulla luodaan erilaisia testi tilanteita. Kuorma voi olla tasaista tai jatkuvasti muuttuvaa. Moottorit on kytketty akseleista toisiinsa kiinni. Niiden väliin on mahdollista lisätä hitausmassa. Hitausmassan avulla saadaan laajennettua erilaisten käyttöolosuhteiden määrää.



Kuva 15. Testilaitteiston oikosulkumoottorit, joista toinen toimii moottorina ja toinen kuormana.

4.2 Moottoripuolen ohjaus

Moottoripuolen ohjauksen hoitaa Vaconin NXP-taajuusmuuttaja, johon kuuluu vakiona "All-in-One"-sovelluspaketti (kuva 16). "All-in-One"-sovelluspaketissa on seitsemän sovellusta, jotka voidaan valita yhdellä parametrillä. Valittavat sovellukset ovat paikallis-/kauko-ohjaus, vakionopeus, PID-säätö, erikoiskäyttö, pumppu ja puhallinautomatiikka, perussovellus ja vakiosovellus. Näiden lisäksi on tilattavissa ja valmistajan sivuilta ladattavissa muitakin sovelluksia, kuten esimerkiksi laivakäyttöihin suunniteltu marinesovellus. Sovellus on tiettyä tarkoitusta varten suunniteltu toimintojen ja parametrien joukko. Erilaisia käyttöjä varten suunnitellut sovellukset helpottavat ja yksinkertaistavat käyttöönottoa. Eri sovelluksissa on myös erilaiset ohjelmointi- ja muokkausmahdollisuudet.

Perussovellus on nimensä mukaisesti yksinkertaisin ja vähiten muokkausta vaativa sovellus, kun taas erikoiskäyttösovelluksessa ja pumppu- ja puhallinautomatio-sovelluksessa on mahdollista valita jokaisen sisääntulon käyttötarkoitus erikseen. NXP-taajuusmuuttajassa on vakiona kuusi digitaalista ja kaksi analogista sisääntuloa. Digitaalisten sisääntulojen kautta on mahdollista tuoda taajuusmuuttajalle esimerkiksi vikatieto ulkoisena vikasignaalinä tai valinta vakionopeuden ja ryömintänopeuden välillä. Testilaitteiston sovellukseksi valittiin käyttöönotossa erikoiskäyttösovellus sen muunneltavuuden ja lisätoimintojen ansiosta.



Kuva 16. Testilaitteiston moottoripuolen ohjauksessa käytettävä Vaconin NXP

Taajuusmuuttajaa on mahdollista käyttää kolmella eri tavalla. Ohjaus ja parametrien muuttaminen on mahdollista taajuusmuuttajassa olevan käyttöpaneelin välityksellä tai PC-työkalujen välityksellä. PC-työkalua voi käyttää joko kuvan 16 mukaisesti liittämällä PC taajuusmuuttajaan RS232C sarjaliikennekaapelilla tai kenttäväylän välityksellä. Kuvassa 16 sarjaliikennekaapeli on liitetty käyttöpaneelin tilalle, mutta on myös olemassa erillinen lisäkortti, johon PC:n saa liitettyä ilman ohjauspaneelin irrottamista.



Kuva 17. Ohjauspaneeli /12/

Vaconin PC-työkalu NCDrive

Vaconin internet-sivuilta on ladattavissa PC-työkalu NCDrive. Sen avulla parametrien muuttaminen ja tallentaminen on nopeampaa ja helpompaa kuin ohjauspaneelilla. NCDrive mahdollistaa parametrien vertailun ja sovelluksen muuttamisen. Sen avulla pystytään tallentamaan ja tulostamaan parametreja ja huoltoraportteja tiedostoon tai paperille. NCDrivellä voidaan ohjata moottoria ja asettaa ohjearvoja. NCDriven avulla pystytään seuraamaan saman aikaisesti kahdeksaa muuttujaa. Eri muuttujia ovat muunmuassa moottorin pyörimisnopeus, välipiirin jännite, moottorin virta, moottorin momentti, moottorin teho sekä kaikkien sisääntulojen tilat.

Index	Variable Text	Value	Default	Unit	Min	Max
P 2.6.1	Motor Ctrl Mode	2 / OL TorqCtrl	0 / Freq Control		n/a	n/a
P 2.6.2	U/I Optimization	0 / None	0 / None		n/a	n/a
P 2.6.3	U/I Ratio Select	2 / Programmable	2 / Programmable		n/a	n/a
P 2.6.4	Field Weakening Pnt	50.00	50.00	Hz	n/a	n/a
P 2.6.5	Voltage at FvP	100.00	100.00	%	n/a	n/a
P 2.6.6	U/I Mid Freq	1.42	1.68	Hz	n/a	n/a
P 2.6.7	U/I Mid Voltg	4.01	4.76	%	n/a	n/a
P 2.6.8	Zero Freq Voltg	2.84	3.37	%	n/a	n/a
P 2.6.9	Switching Freq	10.0	10.0	kHz	n/a	n/a
P 2.6.10	Overvolt Contr	1 / On;NoRamping	1 / On;NoRamping		n/a	n/a
P 2.6.11	Undervolt Contr	1 / On;NoRamping	1 / On;NoRamping		n/a	n/a
P 2.6.12	Motor Ctrl Mode2	2 / OL TorqCtrl	2 / OL TorqCtrl		n/a	n/a
P 2.6.13	DL Speed Reg P	3000	3000		n/a	n/a
P 2.6.14	DL Speed Reg I	300	300		n/a	n/a
P 2.6.15	Load Drooping	0.00	0.00	%	n/a	n/a
P 2.6.16	Identification	0 / No Action	0 / No Action		n/a	n/a
P 2.6.17	Restart Delay	0.750	0.750	s	n/a	n/a
P 2.6.18	Load Drooping Time	0	0	ms	n/a	n/a
P 2.6.19	Neg Freq Limit	-327.67	-327.67	Hz	n/a	n/a
P 2.6.20	Pos Freq Limit	327.67	327.67	Hz	n/a	n/a
P 2.6.21	GenertorqueLimit	300.0	300.0	%	n/a	n/a
P 2.6.22	Motor TorqueLimit	300.0	300.0	%	n/a	n/a
P 2.6.23.1	Magn Current	5.9	5.9	A	n/a	n/a
P 2.6.23.2	Speed Control Kp	30	30		n/a	n/a
P 2.6.23.3	Speed Control Ti	100.0	100.0	ms	n/a	n/a
P 2.6.23.4	Reserved	0	0		n/a	n/a
P 2.6.23.5	Accel Compens.	0.00	0.00	s	n/a	n/a
P 2.6.23.6	Slip Adjust	75	75	%	n/a	n/a
P 2.6.23.7	Start Magn Curr	0.0	0.0	A	n/a	n/a
P 2.6.23.8	Start Magn Time	0	0	ms	n/a	n/a
P 2.6.23.9	Start 0 SpeedTime	100	100	ms	n/a	n/a
P 2.6.23.10	Stop 0 SpeedTime	100	100	ms	n/a	n/a
P 2.6.23.11	StartUp Torque	0 / Not Used	0 / Not Used		n/a	n/a
P 2.6.23.12	StartupTorq FwD	0.0	0.0	s	n/a	n/a
P 2.6.23.13	StartupTorq REV	0.0	0.0	s	n/a	n/a
P 2.6.23.14	Reserved	0	0		n/a	n/a
P 2.6.23.15	EncoderTfA Time	0.0	0.0	ms	n/a	n/a
P 2.6.23.16	Reserved	0	0		n/a	n/a
P 2.6.23.17	CurrentControlKp	40.00	40.00	%	n/a	n/a
P 2.6.23.18	CurrentControlTi	1.5	1.5	ms	n/a	n/a
P 2.6.23.19	GenertorqueLimit	300.0	300.0	%	n/a	n/a
P 2.6.23.20	Motor Power Limit	200.0	200.0	%	n/a	n/a

Kuva18. Näkymä NCDrive parametri valikosta.

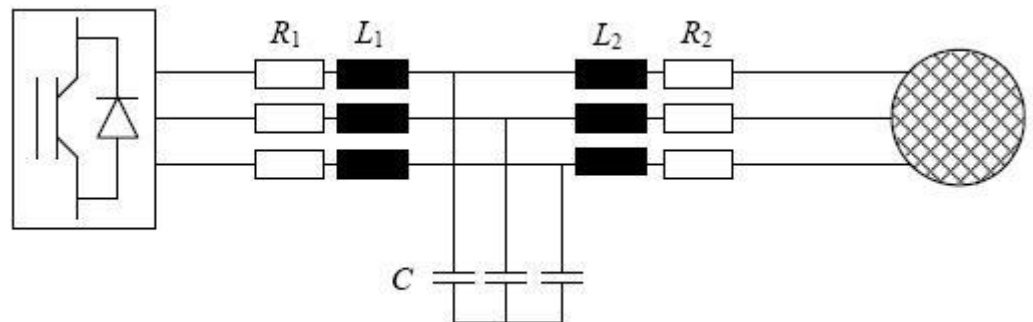
Vacon NXP:ssä NCDriveä voi käyttää myös dataloggerina, eli sen avulla voidaan valvoa tiettyä käyttäjän haluamaa tapahtumaa ja tallentaa tapahtuman aikaiset muuttujien arvot. CAN (*Controller Area Network*) -väylän kautta NCDrive-ohjelmalla pystytään kommunikoimaan jopa 254:n taajuusmuuttajan kanssa. /12./

4.3 Generaattoripuolen ohjaus ja verkkoonjarruttaminen

Generaattoripuolella on kaksi Vaconin NXI-invertteriyksikköä. Vekonpuoleinen on AFE-yksikkö, joka mahdollistaa verkkoonjarruttamisen. Toisella invertteriyksiköllä ohjataan kuormana toimivaa oikosulkumoottoria.

Invertteriyksiköt on kytketty toisiinsa DC-väylän kautta. Kuormana toimivan oikosulkumoottorin ohjaus toimii kuten edellä esitelty moottoripuolen ohjauksin. Ohjaus on mahdollista sekä ohjauspaneelin että PC:n välityksellä.

Kuormana toimiva oikosulkumoottori pyrkii jarruttamaan toista moottoria. Näin ollen kuorman roolissa olevan oikosulkumoottorin pyörimisnopeus on vastakkainen sykroninopeuteen nähden ja moottori toimii generaattorina. Generaattorin tuottama teho syötetään välipiiriin, jonka jännite nousee. Ilman verkkoonjarrutusmahdollisuutta välipiirin jännitteen yläraja tulee vastaan ja taajuusmuuttaja keventää kuormaa, jotta laitteet säilyvät ehjänä. AFE-yksikkö huolehtii ylimääräisen energian syöttämisestä verkkoon. AFE-yksikön ja verkon välillä on LCL suodatin suodattamassa ylijännitteitä. LCL suodatin koostuu kondensaattoreista ja keloista (kuva 19).



Kuva 19. LCL-suodattimen periaatekuva

IGBT-tekniikalla toteutetuilla verkkoonjarrutusyksiköillä on kolme yleistä säätötavoitetta. Yksi tavoitteista on pitää välipiirin tasajännite vakaana tehon suuruudesta ja suunnasta riippumatta. Tällä varmistetaan vaihtovirtamoottoria syöttävän vaihtosuuntaajan optimaalinen toiminta. Toinen tavoite on minimoida tarvittavaa syöttövirtaa eli pitää $\cos\phi$ arvossa 1,0. Tähän tavoitteeseen päästään säätämällä verkkosuuntaajan lähde jännitettä. Jos sovelus sitä vaatiin, voi verkkosuuntaaja toimia myös induktiivisena tai kapasitiivisena kuormana. Kolmantena tavoitteena on minimoida syöttövirran yliaaltosisältö. /13, s.20./

5 TEHONRAJOITUSLAITTEISTON KÄYTTÖNOTTO

Taajuusmuuttajaa asentaessa tulee ottaa huomioon valmistajan antamat ohjeet asennuksen yksityiskohdista. Laite voidaan mallista riippuen asentaa joko lattialle tai seinälle. Verkkokuristin on tärkeä komponentti moottorisäädön kannalta, se suojaa syöttöä sekä DC-välipiirin komponentteja äkilliseltä virran- ja jännitteen muutoksilta. Kuristinten liitännät on tarkistettava asennuksessa ja muutettava tarpeen mukaan.

Taajuusmuuttajan yläpuolelle ja eteen pitää jättää tarpeeksi tilaa riittävää jäähdytystä ja huolta varten. Eri taajuusmuuttaja mallit tarvitsevat eri määrän jäähdytysilmaa ja vaadittava määrä tulee tarkistaa valmistajan ohjeista. On myös huolehdittava, että jäähdytysilman lämpötila ei ylitä taajuusmuuttajalle määriteltyä maksimilämpötilaa. Testi laitteistossa se on 50°C. Lisäksi kaapelien tulee olla laitteistoon sopivat. Moottorikaapeleissa tulee olla 360°:n EMC-maadoitus ja kaapeleiden lämmönkeston tulee olla vähintään +70°C.

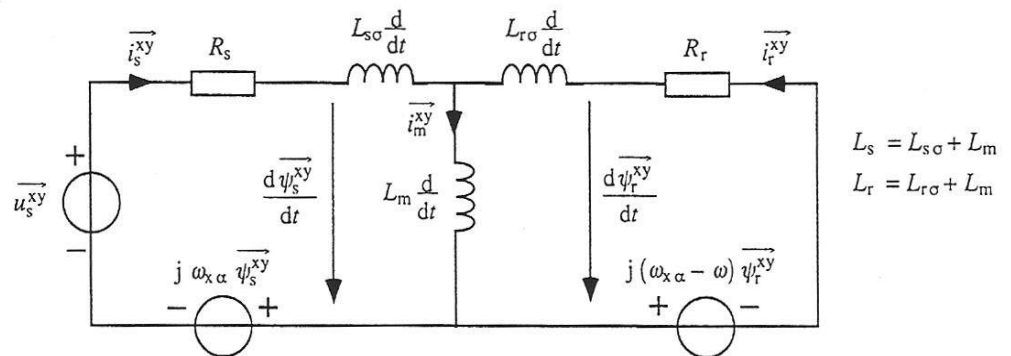
Kaapelien ja sulakkeiden mitoitus tapahtuu taajuusmuuttajan nimellisen lähtövirranmukaan, joka löytyy arvokilvestä. Häiriöiden minimoimiseksi verkko-kaapeliksi suositellaan kolmi- tai nelijohdinkaapelia. Taajuusmuuttajan kaapelointi tulee aina tehdä tarkasti ohjeiden mukaisesti häiriöiden vähentämisen ja niiltä suojautumisen takia. Taajuusmuuttajaa asentaessa tulee ottaa huomioon, että taajuusmuuttajassa on korkeita kapasitiivisia virtoja. Tämän takia vikavirtasuojat eivät välttämättä toimi oikein. Ohjauskaapeleiden tulee olla vähintään 0,5 mm² häiriösuojattua monijohdinkaapelia.

Fyysisen asennuksen jälkeen taajuusmuuttajien käyttöönotto on erittäin yksinkertaista. Aloituskysely käynnistyy, kun laitteeseen kytketään virta ensimmäisen kerran. Aloituskyselyssä kysytään käyttäjältä, mitä kieltä ja sovellusta halutaan käyttää. Näiden lisäksi aloituskyselyssä käydään läpi parametrejä jotka ovat yhteisiä kaikille sovelluksille sekä joitain sovelluskohtaisia parametriarvoja. Ainakin moottorin nimellisjännite, nimellisvirta, nimellistaajuus ja nimellinopeus tulisi asettaa. Arvot löytyvät moottorin arvokilvestä. Sovelluskohtaisia parametrejä ovat esimerkiksi erikoiskäyttösovelluksessa vakionopeus arvojen asettaminen sekä ohjearvopaikan valinta. Erikoiskäyttösovelluksen perusparametrit on lueteltuna liitteessä kaksi.

Taajuusmuuttajissa on valittavissa automaattinen identifiointiajo eli ID-ajo. ID-ajoja on kahta eri tyyppiä: Toisessa moottoria pyöritetään ja toisessa

identifiointiajo tehdään moottoria pyörittämättä. ID-ajo, jossa moottoria ei tarvitse pyörittää, on tarkoitettu laitteistoille, jossa moottorin irrottaminen on mahdotonta tai liian työlästä. Moottoria pyörittävän ID-ajon ajaksi on suositeltavaa irroittaa moottori kuormasta tai vaihteistosta, jotta moottori pääsisi pyörimään vapaasti. Jos ID-ajon aikana esimerkiksi kuormitus muuttuu, tai kuormaa ei ole kytketty irti vaikka pitäisi, moottorin käyttäytyminen ääritilanteissa saattaa jatkossa olla poikkeavaa ja epätarkkaa.

ID-ajossa taajuusmuuttaja syöttää moottoriin jännitettä ja laskee sen avulla muunmuassa staattoriresistanssit, magnetointivirran, U/f-käyrän parametrit sekä vuon linearisoinnin. Taajuusmuuttajan muistissa on usean eri moottorin matemaattinen malli. Mitattuja ja laskettuja arvoja verrataan näihin matemaattisiin malleihin ja niiden avulla haetaan oikea jo ennalta aseteltu moottorimalli, sekä säädetään poikkeavat arvot kohdalleen, jotta moottorin yksilölliset piirteet tulisi huomioitua. Kuvassa 20 on oikosulkumoottorin sijaiskytkentä, jonka avulla taajuusmuuttaja laskee ja tunnistaa moottorin ominaisuudet.



Kuva 20. Oikosulkumoottorin xy -koordinaatiston jänniteyhtälöihin perustuva sijaiskytkentä. /8, s.86./

ID-ajon avulla saadut parametrit mahdollistavat muunmuassa momentin maksimoinnin, joka käyttää U/f-käyrän parametrejä. Onnistunut ID-ajo mahdollistaa myös U/f suhteen ohjelmoinnin käyttäjän haluamalla tavalla. Automaattinen ID-ajo nopeuttaa ja yksinkertaistaa taajuusmuuttajien käyttöönottoa. Taajuusmuuttaja tunnistaa moottorin tyypin ja asettelee parametrit oikeiksi. Parametrien asettelu käsin on myös mahdollista, mutta se on hidasta ja työlästä. Testilaitteistoille tehtiin identifiointiajo, jossa moottoria ei pyöritetä. ID-ajo parantaa momenttilaskentaa ja automaattista momentin maksimointia.

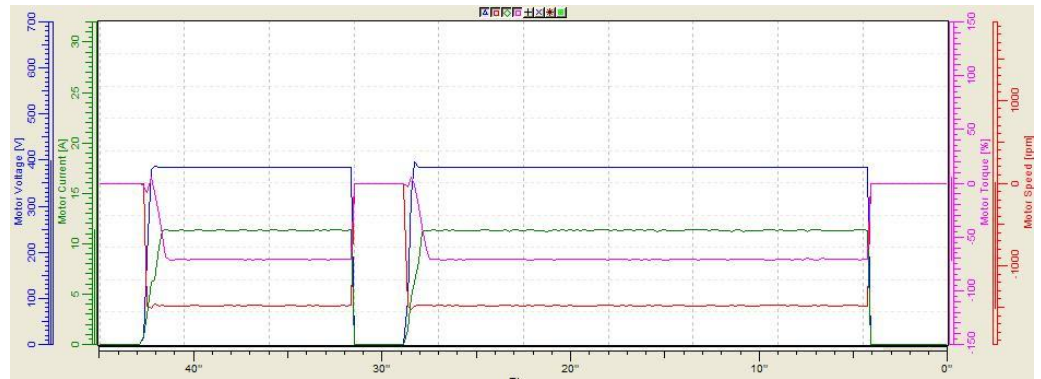
Sen avulla saavutetaan myös parempi jättämän kompensointi nopeusohjauksessa. ID-ajon jälkeen taajuusmuuttajat pysähtyvät ja käynnistyvät normaalisti seuraavan käynnistä käskyn yhteydessä.

Kuormana toimivaa moottoria pyörittävän taajuusmuuttajan ohjausmuodoksi aseteltiin parametrinä P2.6.1 momenttiohjaus oletuksena olleen taajuusohjauksen sijasta. Näin kuorman vastus moottorille pysyy asetetussa arvossa paremmin kuin taajuusohjauksessa. Tämän jälkeen momentin ohjearvon minimi muutettiin parametrissä P2.10.6 oletuksena olevasta 0 % arvosta -100 prosenttiin. Momentin ohjearvon valinta otettiin käyttöön parametrinä P2.20.4 muuttamalla oletuksena ollut "ei käytössä", tilaan "momentin ohjauspaneelilta". Käynnistystoiminto muutettiin parametrissä P2.4.6 vauhtikäynnistykseksi, jotta kuormapuolen moottorin voi käynnistää moottoripuolen sitä pyörittäessä. Myös moottoripuolelle muutettiin vauhtikäynnistys.

6 TEHONRAJOITUSLAITTEISTON TESTAUS

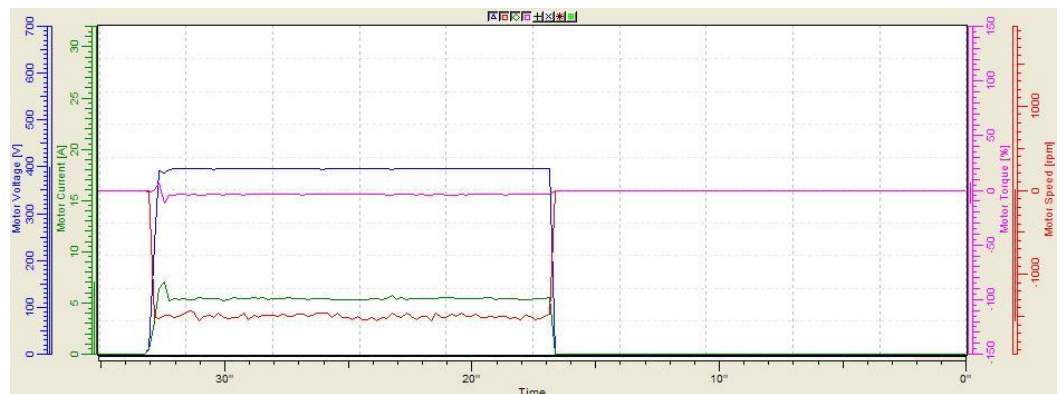
Laitteiston testaaminen aloitettiin taajuusmuuttajien käytön opettelulla ja taajuusmuuttajien parametreihin tutustumalla. Ensin pyöritettiin molempia moottoreita erikseen ja todettiin niiden toimivuus. Tämän jälkeen tutustuttiin NCDrive ohjelmaan ja sen käyttöön parametrien asetteluiden ja taajuusmuuttajasta saatavien tietojen suhteen.

Testaus vaiheessa kävi ilmi, että käynnistettäessä moottori kun se pyörii vapaasti, se pysähtyy ennen uudelleen kiihdyttämistä. Tämä ilmiö poistettiin jo edellisessä luvussa esitellyn parametrin P2.4.6 muutoksella eli asettamalla vauhtikäynnistys. Näin kuormaa ja moottoria voi käynnistää milloin vain, eivätkä ne välillä pysähdy. NCDrive-ohjelman avulla otettiin kuva verkkoonjarutustilanteesta (kuva 20). Kuva on generaattorin puolelta ja kuvassa on punaisella generaattorin pyörintä nopeus, vaaleanpunaisella generaattorin momentti, vihreällä generaattorin virta ja sinisellä generaattorin jännite.



Kuva 20. Verkkoonjarrutus tilanne generaattorin puolelta

Ajossa moottorina toimiva oikosulkumoottori pyöri tasaisella nopeudella kun kuorma kytkettiin mukaan. Kuvasta käy ilmi, että momentti ja pyörimissuunta ovat negatiivisia. Ja momentin suuruudesta voi todeta sen, että AFE-yksikkö syöttää ylimääräisen tehon verkkoon. Kuorma on käynnistetty ensin lyhyemmäksi aikaa, jonka jälkeen se on sammutettu ja käynnistetty muutaman sekunnin kuluttua uudestaan. Vertailun vuoksi kuvassa 21 on tilanne, jossa kuorma laitetaan päälle, kun AFE-yksikkö on sammutettu.



Kuva 21. Kuorman käynnistys, kun AFE ei ole käynnissä

Momentti on selvästi matalampi, kuin AFE:n ollessa päällä. Tämä johtuu siitä, että välipiiri ei pysty kuluttamaan enempää tehoa ja taajuusmuuttaja ei anna kuormapuolen jarruttaa voimakkaasti pyörivää moottoria. Kuvat 20 ja 21 ovat selvyuden vuoksi myös liitteinä.

7 YHTEENVETO

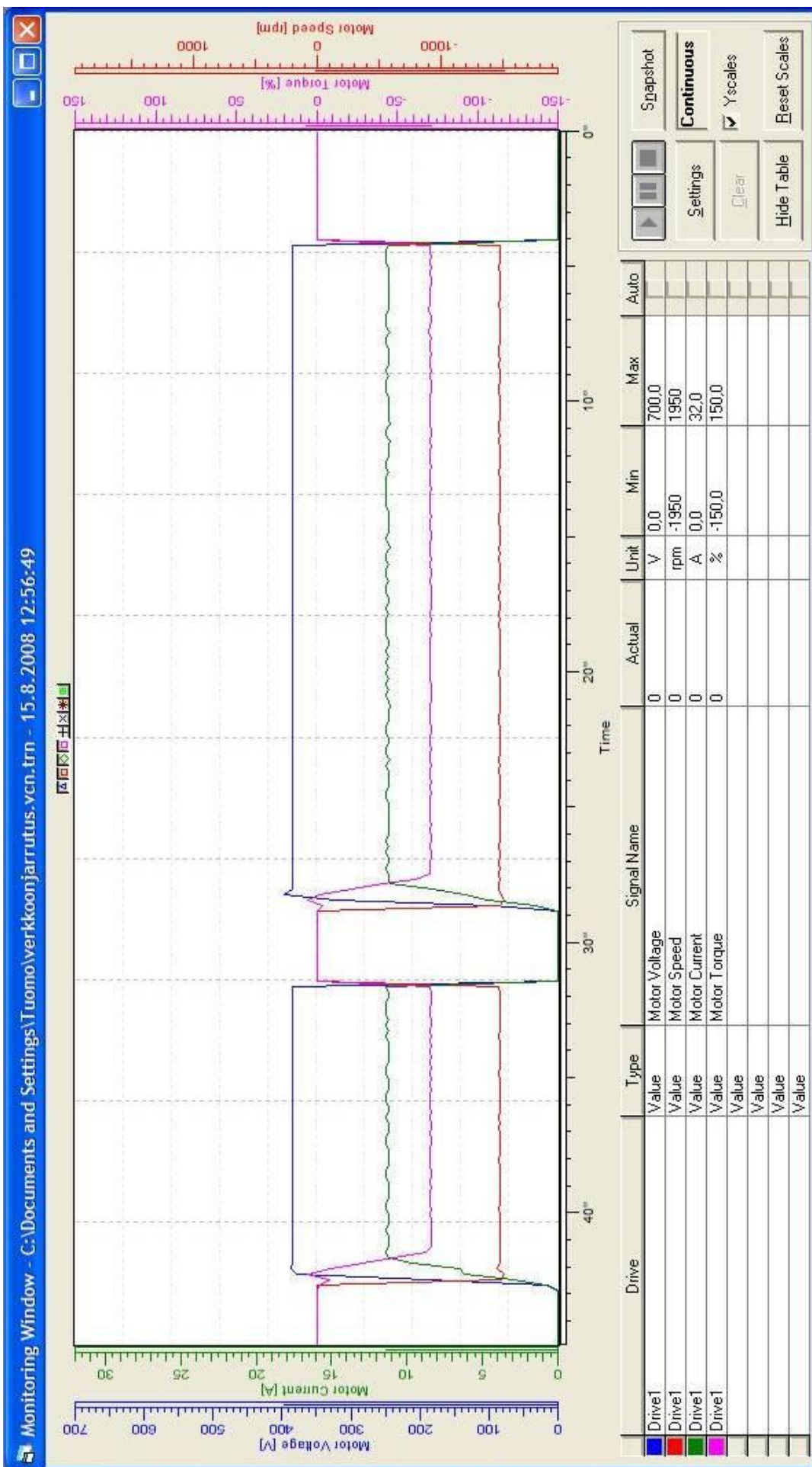
Tässä insinööriyössä esiteltiin laivan propulsio-osat sekä testilaitteiston osat, joilla voidaan mallintaa laivan ajossa vastaan tulevia tilanteita. Työssä esiteltiin myös muita kohteita, joissa taajuusmuuttajaa käytetään laivakäytössä. Myös näitä kohteita ja niissä esiintyviä tilanteita voidaan mallintaa testilaitteistolla.

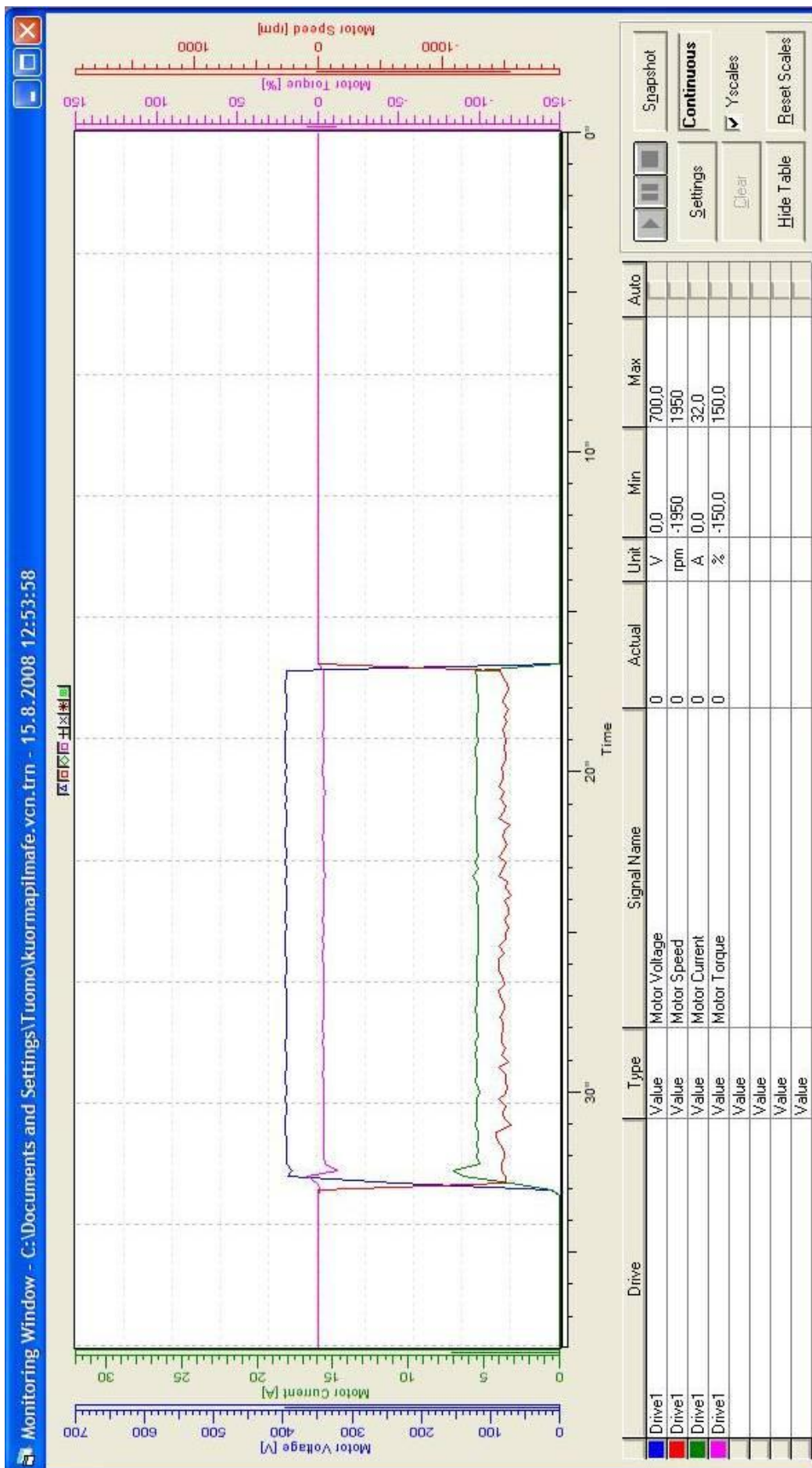
Työn tavoitteena oli tutustua Helsingin ammattikorkeakoulun sähkönkäytön laboratorioon rakennetulle laitteistolle ja opetella käyttämään taajuusmuuttajia sekä niihin liittyviä PC-työkaluja. Työssä oli tavoitteena myös tehdä laitteistolle käyttöönotto ja saada verkkoonjarrutus toimimaan. Laitteisto saatiin toimimaan halutulla tavalla ja taajuusmuuttajien käyttö tuli tutummaksi. Myös kuormana toimivan oikosulkumoottorin tuottama teho saatiin syötettyä verkkoon, kuten oli tarkoituskin.

Työssä esiteltiin myös erilaisia taajuusmuuttajaratkaisuita ja erilaisia taajuusmuuttajan ohjaus- ja säätötapoja. Tulevaisuudessa testilaitteiston kehittäminen on mahdollista ja siihen kannattaisi lisätä esimerkiksi erillinen ohjauspaneeli tai ylemmän tason PLC, jotta laitteiston käyttö paranisi ja tilanteiden mallintaminen helpottuisi.

LÄHTEET

- [1] *Laivatekniikka*. Toim. Pekaa Räisänen, Helsinki: Opetushallitus. 1997.
- [2] Marine Referencec. Siemens. [verkkodokumentti, viitattu 21.7.2008]. Saatavissa: http://www.siemens.no/ccmi/bu/ea/pdf/Marine_References.pdf
- [3] Laivakoneistojen kehityspiirteitä. TKK Laivalaboratorio [verkkodokumentti, viitattu 21.7.2008]. Saatavissa : http://www.tkk.fi/Yksikot/Laiva/Opinnot/Kurssit/Kul-24.3000/pdf/KVTP_%20koneisto.pdf
- [4] Aura, Lauri - Tonteri, Antti, Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. Porvoo:Werner Söderström Osakeyhtiö. 1996.
- [5] Ylinen, Esa. Eniram Oy. Henkilökohtainen tiedonanto. 8.7.2008.
- [6] Hieta-Wilkman, Sinikka, Taajuusmuuttajat: käyttö, asennus, häiriöt. Espoo: Sähköinfo. 1997.
- [7] Sähkösäätötekniikka. ABB TTT-läsikirja [verkkodokumentti, viitattu 30.7.2008]. Saatavissa : [http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/\\$file/180_0007.pdf](http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/$file/180_0007.pdf)
- [8] Niiranen, Jouko, Sähkösäätötekniikan digitaalinen ohjaus, Helsinki: OTA-TIETO 1999
- [9] Applying Active Front End To Multilevel Inverter [verkkodokumentti, viitattu 2.9.2008]. Saatavissa: <https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/39723/nbnfi-fe200808041757.pdf?sequence=3>
- [10] Suora momenttisäätö. ABB [verkkodokumentti, viitattu 2.9.2008]. Saatavissa: [http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/scot201.nsf/VerityDisplay/FDBA0B31A34B89D1C1256D280040B4AE/\\$File/Tekninenopasnro1.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/scot201.nsf/VerityDisplay/FDBA0B31A34B89D1C1256D280040B4AE/$File/Tekninenopasnro1.pdf)
- [11] SÄHKÖENERGIAN SÄÄSTÄMINEN LAIVAJÄRJESTELMISSÄ Kvaerner Masa-Yards. Ei yleisesti saatavilla.
- [12] Vacon NXP-käyttöohjeet
- [13] Sähköinen jarrutus. ABB [verkkodokumentti, viitattu 8.9.2008]. Saatavissa: [http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/scot201.nsf/VerityDisplay/2E30F9C0E2D07B9AC1256D28004152DF/\\$File/Tekninen_opasnro8.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/scot201.nsf/VerityDisplay/2E30F9C0E2D07B9AC1256D28004152DF/$File/Tekninen_opasnro8.pdf)





Perusparametrit erikoiskäyttösovelluksessa.

Koodi	Parametri	Min	Maks	Yks	Oletus	Oma	ID	Huomautuksia
P2.1.1	Minimitaajuus	0,00	P2.1.2	Hz	0,00		101	
P2.1.2	Maksimitaajuus	P2.1.1	320,00	Hz	50,00		102	HUOM: Jos $f_{max} >$ moottorin synkr. nopeus, tarkista moottorin ja laitteen sopivuus
P2.1.3	Kiihtyvyysaika 1	0,1	3000,0	s	3,0		103	0 Hz – enimmäistaajuus
P2.1.4	Hidastuvuusaika 1	0,1	3000,0	s	3,0		104	Enimmäistaajuus – 0 Hz
P2.1.5	Virtaraja	$0,1 \times I_H$	$2 \times I_H$	A	I_H		107	
P2.1.6	Moottorin nimellisjännite	180	690	V	NX2: 230V NX5: 400V NX6: 690V		110	Tarkista moottorin arvokilvestä. Tarkista myös kytkentä (kolmio/tähti).
P2.1.7	Moottorin nimellistaajuus	8,00	320,00	Hz	50,00		111	Tarkista moottorin arvokilvestä
P2.1.8	Moottorin nimellinopeus	24	20 000	rpm	1440		112	Koskee 4-napaista moottoria ja nimelliskokoista taajuusm.
P2.1.9	Moottorin nimellisvirta	$0,1 \times I_H$	$2 \times I_H$	A	I_H		113	Tarkista moottorin arvokilvestä.
P2.1.10	Moottorin cosp	0,30	1,00		0,85		120	Tarkista moottorin arvokilvestä
P2.1.11	Ohjearvopaikan valinta	0	16		0		117	0=A11 1=A12 2=A11+A12 3=A11-A12 4=A12-A11 5=A11x1A12 6=A11 ohjaussauva 7=A12 ohjaussauva 8=Paneeli 9=Kenttäväylä 10=Moottoripotentimetri 11=A11, A12 minimi 12=A11, A12 maksimi 13=Maksimitaajuus 14=A11/A12 valinta 15=Enkooderi 1 16=Enkooderi 2 (vain NXP)
P2.1.12	Paneeliohjauksen ohjearvo	0	9		8		121	0=A11 1=A12 2=A11+A12 3=A11-A12 4=A12-A11 5=A11x1A12 6=A11 ohjaussauva 7=A12 ohjaussauva 8=Paneeli 9=Kenttäväylä
P2.1.13	Kenttäväylä-ohjauksen ohjearvo	0	9		9		122	Katso P2.1.12
P2.1.14	Ryömintätaajuusohje	0,00	P2.1.2	Hz	5,00		124	Kts. ID413
P2.1.15	Vakionopeus 1	0,00	P2.1.2	Hz	10,00		105	"Multi-step"-nopeus 1
P2.1.16	Vakionopeus 2	0,00	P2.1.2	Hz	15,00		106	"Multi-step"-nopeus 2
P2.1.17	Vakionopeus 3	0,00	P2.1.2	Hz	20,00		126	"Multi-step"-nopeus 3
P2.1.18	Vakionopeus 4	0,00	P2.1.2	Hz	25,00		127	"Multi-step"-nopeus 4
P2.1.19	Vakionopeus 5	0,00	P2.1.2	Hz	30,00		128	"Multi-step"-nopeus 5
P2.1.20	Vakionopeus 6	0,00	P2.1.2	Hz	40,00		129	"Multi-step"-nopeus 6
P2.1.21	Vakionopeus 7	0,00	P2.1.2	Hz	50,00		130	"Multi-step"-nopeus 7