



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
VASA YRKESHÖGSKOLA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Joonas Valtamäki

PIENTUULIVOIMALAN
TESTAUSYMPÄRISTÖN
KEHITTÄMINEN JA KÄYTTÖÖNOTTO
VACON-TAAJUUSMUUTTAJILLA

Tekniikka ja liikenne

2010

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö sai alkunsa työn toimeksiantajan Roaming Oy:n toimitusjohtajan Ari-Jussi Uunilan aloitteesta tutkia Vaconin verkkovaihtosuuntaajaa pientuulivoimalakäytössä. Kiinnostuin aiheesta, ja sain Uunilan kautta Tuulivoimala.com yritykseltä tutkimusta varten 2 kW:n kestromagneettigeneraattorin Technobothnian laboratorioon.

Haluan kiittää Roaming Oy:n Ari-Jussi Uunilaa mielenkiintoisesta opinnäytetyöaiheesta ja kannustuksesta työn edetessä. Testilaitteiston lahjoituksista kiitokset ABB Oy:lle sekä Tuulivoimala.com Finland Oy:lle. Lisäksi kiitän työn ohjaajaa, lehtori DI Juha Niemistä mielenkiinnosta ja ohjauksesta sekä Technobothnian laboratoriomekaanikko Jyrki Isoniemeä testilaitteiston asennuksista.

Vaasassa 15.5.2010

Joonas Valtamäki

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU

Sähkötekniikan koulutusohjelma

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Joonas Valtamäki
Opinnäytetyön nimi	Pientuulivoimalan testausympäristön kehittäminen ja käyttöönotto Vacon-taajuusmuuttajilla
Vuosi	2010
Kieli	suomi
Sivumäärä	56 + 6 liitettä
Ohjaaja	Juha Nieminen

Opinnäytetyössä oli tarkoitus tutkia pientuulivoimalan verkkoonkytkentää Vacon NXI-taajuusmuuttajilla ja toteuttaa 2 kW:n pientuulivoimalan sähköinen malli Technobothnian laboratoriossa. Opinnäytetyön tavoitteena oli saada tietoa Vaconin verkkovaihtosuuntaajan soveltuvuudesta pientuulivoimalakäyttöön ja aloittaa testausympäristön kehitystyö.

Aineistona käytettiin Vaconin sovellusmanuaaleja sekä kirjallisuutta tuulivoimatekniikasta ja tuulivoimalan säädöstä. Työssä sovellettiin ohjelmoitavien logiikoiden rinnankäyttömahdollisuutta taajuusmuuttajien kanssa. Tuulivoimalan simulomiseen käytettiin oikosulkumoottoria, jota ohjattiin taajuusmuuttajalla. Kaikkien prosessissa käytettyjen sähkökäyttöjen tarvittavat ohjaus- ja mittausarvot yhdistettiin Profibus-väylällä työssä tehtyyn valvomoon.

Pientuulivoimalan generaattorilla syötettiin tehoa sähköverkkoon laboratoriossa ja tehtiin suorituskykymittauksia. Todettiin, että Vacon-verkkovaihtosuuntaajalla on mahdollista toteuttaa pientuulivoimalan turvallinen käyttö yleisessä jakeluverkossa. Työssä esitettiin laitteistolta vaadittavia suojauksia ja säätötoimenpiteet verkkoon syötetyn tehon optimoimiseksi.

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Sähkötekniikan koulutusohjelma

ABSTRACT

Author	Joonas Valtamäki
Title	Development and Implementation of Testing System for Small Wind Turbine with Vacon Frequency Converters
Year	2010
Language	Finnish
Pages	56 + 6 appendices
Name of Supervisor	Juha Nieminen

The purpose of the thesis was to study on-grid system for a small 2 kW wind turbine. The control system was made of Vacon NXI frequency converters. The electrical model of the wind turbine studied was developed in the Technobothnia laboratory. The aim of the thesis was to gather knowledge about the usability of the Vacon on-grid system in small wind turbine use and start development of the testing system.

Materials used in the thesis were mostly Vacon application manuals but also researches on wind power technology and control of wind turbines were used. The possibility of controlling frequency converters with an external programmable logic controller was applied in the laboratory tests. A squirrel cage motor controlled by NXP frequency converter was used in the simulation of the wind turbine. The process data controls and measured values used in the simulation were connected to a supervising system developed in the laboratory. A Profibus cable was used in the data transfer between the PLC and frequency converters.

As a result, electrical power was fed to the grid and performance tests for the system were made. The conclusion of the thesis was that Vacon on-grid system is suitable for small wind turbine use when all the protections and controls demanded by the grid owner are appropriate.

Keywords	Wind Power, Frequency Converter, Programmable Logic Controller
----------	---

SISÄLLYS

ALKUSANAT	2
TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
1 JOHDANTO	9
1.1 Opinnäytetyön tavoitteet	9
1.2 Toimeksiantajan kuvaus	9
2 TUULIVOIMATEKNIikka	11
2.1 Historia	11
2.2 Tuulivoimalan toiminta	12
2.3 Tuulivoimalan säätö	14
2.3.1 Lapakulmasäätö	16
2.3.2 Sakkaussäätö	16
2.4 Generaattorit ja tehonmuokkaimet	17
3 PIENTUULIVOIMALAT	19
3.1 Käyttökohteet ja soveltuvuus	19
3.2 Vaaka-akselisen pientuulivoimalaitoksen osat	19
3.3 Pientuulivoimalan säätö ja tuotannon optimointi	20
3.3.1 Peräsimellä varustettu pientuulivoimala	20
4 TUTKITTAVA PIENTUULIVOIMALA	21
4.1 Roottori, peräsin ja masto	22
4.2 Generaattori	22
4.2.1 Generaattorin sijaiskytkentä	22
4.2.2 Kuormituskoe resistiivisellä kuormalla	25
5 TUULIVOIMALAN SIMULOINTI LABORATORIOSSA	28
5.1 Vacon NXP-taajuusmuuttaja moottorikäyttöön	28
5.2 Siemens S7-ohjauslogiikka ja valvomosovellutus	31
5.3 Ohjauslogiikan rakenne ja konfigurointi	34
6 PIENTUULIVOIMALAN VERKKOONKYTKENTÄ	36
6.1 Työn kuvaus	36

6.2	Verkkovaihtosuuntaaja.....	36
6.2.1	Tuulesta saatavan tehon optimointi oikealla vastamomentilla	40
6.2.2	Käyttöönotto.....	40
6.3	Verkkovaihtosuuntaajan parametroida ja testaus	45
7	PIENTUULIVOIMALA ERI TOIMINTATILANTEISSA	50
7.1	Käynnistyminen ja toiminta pienellä tuulennopeudella	51
7.2	Toiminta suurella tuulennopeudella.....	51
7.3	Toiminta taustaverkon vikatilanteissa.....	52
8	YHTEENVETO	53
	LÄHDELUETTELO	54
	LIITTEET	

LIITELUETTELO

LIITE 1. Vacon-verkkovaihtosuuntaajan piirikaaviot

LIITE 2. Siemens S7-logiikkaohjelma tuulennopeuden simuloimiseen

LIITE 3. Wonderware Intouch valvomo- ja tiedonkeruunäkymät

LIITE 4. Generaattorin staattorikäämien mittaukset ja laskut

LIITE 5. Generaattorin kuormitusmittaukset ja generaattori-verkkovaihtosuuntajayhdistelmän hyötysuhdemittaukset

LIITE 6. Moottori-taajuusmuuttajayhdistelmän kuormitettavuuden tarkistus ABB:n DriveSize-ohjelmalla

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

AFE	Active Front End, aktiivinen syöttöyksikkö
INU	Inverter Unit, invertteriyksikkö
LCL	Verkkosuodatin, jossa on 2 kelaa ja kondensaattori, L= induktanssi C= kapasitanssi.
IGBT	Integrated Gate Bipolar Transistor, automaattisesti eristetty bipolaarinen transistori
PPO5	Parameter/Process Data/Object, Profibus DP:n kommunikointiohjelma 5
VSI	Voltage Source Inverter, jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator, kestopagneettigeneraattori
DFIG	Double Fed Induction Generator, liukurengasgeneraattori
PWM	Pulse Width Modulation, pulssinleveysmodulaatio

1 JOHDANTO

1.1 Opinnäytetyön tavoitteet

Tässä opinnäytetyössä on tarkoitus tutkia pientuulivoimalan verkkoonkytkentää ja toteuttaa 2 kW:n pientuulivoimalan sähköinen malli Technobothnian laboratoriossa. Työhön liittyy myös Vaconin verkkovaihtosuuntaajan käyttöönotto. Tarkoituksena on tehdä valvomo- ja tiedonkeruusovellus Intouch-ohjelmalla, josta voidaan ohjata tuulen simulointiin käytettävää taajuusmuuttajamoottoriyhdistelmää sekä seurata ja ohjata verkkovaihtosuuntaajaa Profibus-väylän kautta. Käytettävä taajuusmuuttaja sekä oikosulkumoottori on tarkoitus mitoitaa siten, että sillä voidaan aikaansaada sama momentti kestoplaneettigeneraattorin akselille, minkä tutkittava pientuulivoimala pystyy toimiessaan tuottamaan. Tuulen simuloimiseen on tarkoitus tehdä logiikkaohjelma Siemens S7-ohjelmointina. Lisäksi verkkovaihtosuuntaajaan generaattorin ohjauspuolen invertterille on tarkoitus tehdä verkkoonsyötettävän tehon optimointi kulloisenkin tuulennopeuden mukaan. Optimointi on tarkoitus toteuttaa Siemens S7-ohjelmoinnilla, ja sitä ohjataan väylän kautta Siemensin 300-sarjan keskusyksiköllä.

Työn toimeksiantaja toimitti tutkimusta varten kestoplaneettigeneraattorin, loput testilaitteiston osat olivat Technobothnian kalustoa. Opinnäytetyön tavoitteena oli saada tietoa Vaconin verkkovaihtosuuntaajan soveltuvuudesta pientuulivoimalakäyttöön. Toimeksiantajan päätavoitteena on saada nyt aloitettavalla kehitystyöllä valmis pientuulivoimala verkkoonkytkennällä myytäväksi asiakkaille.

1.2 Toimeksiantajan kuvaus

Työn toimeksiantaja Roaming Oy, on 1994 toimintansa aloittanut monialayhtiö, joka valmistaa, maahantuo, myy ja asentaa aurinkopaneeleilla ja tuulivoimalla varustettuja energiaratkaisuja. Roaming Oy on toimittanut lukuisia hybridi-

voimaloita sekä Vaasan saaristoon että muualle Suomeen vapaa-ajan asuntoihin. Yritys tuottaa myös mainontaan liittyviä ratkaisuja yhteistyössä mediatoimistojen kanssa. /10/

Vaasan alueen referenssikohteina Roaming Oy:lla on 1997 saaristoravintola Jannen Saluunaan asennettu matkapuhelimien latauspiste, joka sai virtansa aurinkopaneelistä. Roaming Oy on asentanut myös alueen edelleen suurimman aurinkopaneelijärjestelmän Mikkelsaarille 1998. Luontoaseman aurinkopaneelien teho on 2100 W:a. Samana vuonna aloitettiin kannettavan Mobisolar-aurinkopaneelin valmistus. Pari vuotta myöhemmin aloitettiin DIN-kiskoon kiinnitettävien aurinkopaneelisäätimien valmistus. Vuonna 2009 Roaming Oy pystytti omavaraiseen ekokylään Kempeleessä ensimmäisen 20 kW:n pientuulivoimalan. Samana vuonna kytkettiin valtakunnanverkkoon Pohjanmaan ensimmäinen 2 kW:n tuulivoimala Lohtajalle. Roaming Oy on kehittänyt yhteistyössä Vaasan ammattikorkeakoulun kanssa aurinkopaneelijärjestelmissä tarvittavia lataussäätimiä ja pientuulivoimaloiden verkkoonsyöttölaitteita. /10/

2 TUULIVOIMATEKNIikka

2.1 Historia

Ensimmäiset tuulimyllyt rakennettiin Persiassa noin 900 ennen ajan laskun alkua. Nämä olivat pystyakselisia puusta rakennettuja voimaloita, jotka olivat tehottomia ja herkkiä tuhoutumaan kovissa tuulissa. Eurooppaan tuulimyllyt saapuivat keskiajalla. Ne olivat vaak-akselisia ja niitä käytettiin mekaanisen liikkeen, kuten puun sahaamisen aikaansaamiseksi. Tuuli oli Euroopan pääenergianlähde aina teollisen vallankumouksen alkuun saakka, jolloin se sai väistyä hiilivoimalle. Hiilen etuina olivat sen kuljetettavuus ja käytettävyys aina, kun energiaa tarvittiin. /9/

1800-luvun loppupuolella ilmestyi sähkögeneraattori ja sitä kokeiltiin pyörittää tuulivoimalla. Ensimmäiset sähkön tuotantoyritykset eivät onnistuneet, mutta sähkögeneraattorin yleistymisen jälkeen syntyi Yhdysvalloissa nykyaikaisen kolmilapaisen pientuulivoimalan esi-isä Jacobin turbiini (Kuva 1). Sillä voitiin pyörittää vesipumppua ja tuottaa sähköä kokonaisen asuinrakennuksen tarpeisiin. Sähköverkon laajentuminen maaseudulle ja helpompien energialähteiden käyttö lopetti pikkuhiljaa pientuulivoimaloiden kysynnän 1930-luvun jälkeen. /9/



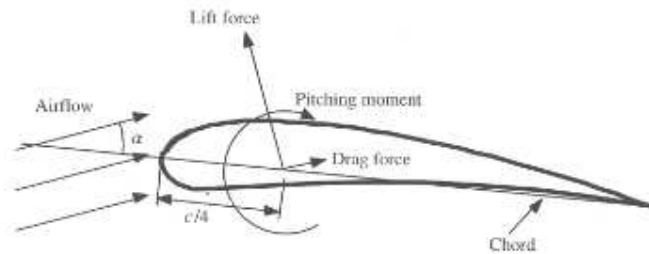
Kuva 1. Jacobin turbiini vuodelta 1927 /9/

Tuulivoimatekniikan kehitys käynnistyi uudelleen 1970-luvulla, kun ympäristökysymykset nousivat pintaan. Fossiilisten polttoaineiden ja ydinvoiman käyttöä haluttiin vähentää ja Yhdysvallat sekä monet Euroopan maat alkoivat tukea tuulivoimatuotantoa. Tuotetun sähkön laadun kanssa oli kuitenkin ongelmia, eikä yhdysvaltalaiset valmistajat pärjänneet markkinoilla, vaan tuulivoimatekniikan edelläkävijämaa Tanska valtasi alan. Tuulivoimatekniikan yritysten keskus siirtyi Eurooppaan, erityisesti Saksaan ja Tanskaan. Suurimmat valmistajat perustivat tuotanolaitoksia useisiin maihin, kuten Espanjaan, Intiaan ja Yhdysvaltoihin. Nykyään tuulivoima alkaa olla teknologian kehittyttyä jo lähes kilpailukykyinen vaihtoehto perinteisille energiantuotantomuodoille. Erityisesti tehoelektroniikan kehitys on mahdollistanut tuulivoimaloiden uuden sukupolven, joka tarjoaa paremman hyötysuhteen vaihteiston jäädessä pois roottorin ja generaattorin välistä. /9/ /8/

2.2 Tuulivoimalan toiminta

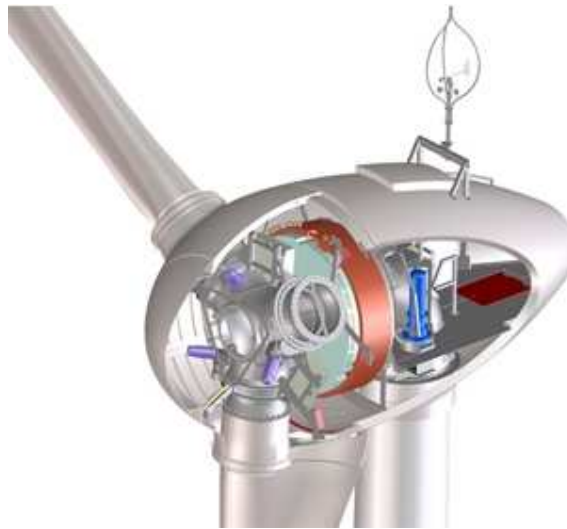
Tuulivoimala on koneisto, joka muuttaa tuulen energian sähköksi. Tuulivoimalan sähkögeneraattori on aina kytketty johonkin sähköverkkoon. Näitä voi olla esimerkiksi akun latauspiirit, kotitalousverkot, eristetyt saarekeverkot tai suuret jakeluverkot. Modernissa vaaka-akselisessa tuulivoimalassa tuulen energia muutetaan ensin mekaaniseksi energiaksi pyörivälle akselille, joka on kytketty generaattorin roottoriin. Pyörimisliikkeen muodostamiseen käytetään tuulen aiheuttamaa nostevoimaa tuuliturbiinin lavoille. /9/

Nostevoima syntyy, kun ilma virtaa siiven yläpinnalla nopeammin aiheuttaen sinne pienemmän paineen kuin siiven alapinnalla. Tämän seurauksena syntyy tuulensuuntaan nähden kohtisuora nostevoima. Siipi aiheuttaa myös vastusvoiman ilmavirrälle. Nämä kaksi voimaa sekä pituuskallistuksen vääntömomentti vaikuttavat kuvan 2 mukaan siiven poikkileikkauksen jänteellä neljänneksen päässä siiven kärkipisteestä. Voimien ja väännön suuruteen voidaan vaikuttaa ilmavirran ja siiven poikkileikkauksen kohtauskulmaa muuttamalla. /9/



Kuva 2. Tuulivoimalan siiven poikkileikkaus, jossa näkyy tuulen aiheuttamat noste- ja vastusvoimat /9/

Nykyaikaisen vaaka-akselisen tuulivoimalan toiminta voidaan mallintaa vetoakselilla, jonka toisessa päässä on roottorin hitausmassa ja toisessa generaattorin hitausmassa. Roottorin pyöriessä siihen syntyy aerodynaaminen vääntömomentti. Roottorin akseli on kiinnitetty yhä useammin ilman vaihteistoa suoraan kestopagneettigeneraattorin akseliin (Kuva 3). Sähköverkkoon kytketty generaattori aiheuttaa akselille sähköisen vastamomentin. Aerodynaaminen vääntö vaikuttaa koko turbiinin toimintaan ja saa aikaan verkkoon syötetyn tehon. Tämän väännön suuruus riippuu roottorin kärkinopeudesta ja geometriasta, tuulen nopeudesta, nasellin suuntautumisesta tuuleen nähden sekä roottorin ilmanvastuksesta. Muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan säätöjärjestelmä pystyy vaikuttamaan kaikkiin muihin aerodynaamisen väännön aiheuttaviin komponentteihin paitsi tuulen nopeuteen. Tuulen ollessa alle turbiinin nimellisen nopeuden, ohjausjärjestelmä pyrkii ottamaan suurimman mahdollisen tehon tuulesta säätämällä lapakulmaa. Yli nimellisellä tuulennopeudella, säätöjärjestelmä rajoittaa momentin kasvua samalla pitäen tuotetun tehon vakiona. /9/



Kuva 3. Enercon E-33 vaihteeton, muuttuvanopeuksinen tuuliturbiini lapakulmasäädöllä /3/

2.3 Tuulivoimalan säätö

Kaikki tuulivoimalat on varustettu tehonsäätölaitteistolla. Modernissa vaak akselisessa tuulivoimalassa on kaksi yleisesti käytettyä roottorin säätötekniikkaa, lapakulma- ja sakkaussäätö. Tuulivoimaloissa on myös koneisto, jolla tuulivoimalan roottori ja samalla koko tornin päässä oleva laitteisto eli naselli, voidaan kääntää tuulen suunnan mukaan. Lisäksi muuttuvanopeuksisessa tuulivoimalassa on käytettävissä generaattorin momentin säätö. Nykyaikaiset tuulivoimalat on suunniteltu tuottamaan maksimitehonsa noin 15 m/s tuulennopeudella. Tätä suuremmilla nopeuksilla täytyy ylimääräinen energia hävittää, jotta vältetään laitteiston hajoamiselta. /9/ /2/

Tuulivoimalan akselille voi parhaimmillaan kehittyä vain noin 59 %:a tuulen tehosta. Tätä kutsutaan Betzin-teoriaksi, keksijänsä mukaan. Ideaalisen tuuliturbiinin hyötysuhde voidaan esittää kaavalla 1. /9/

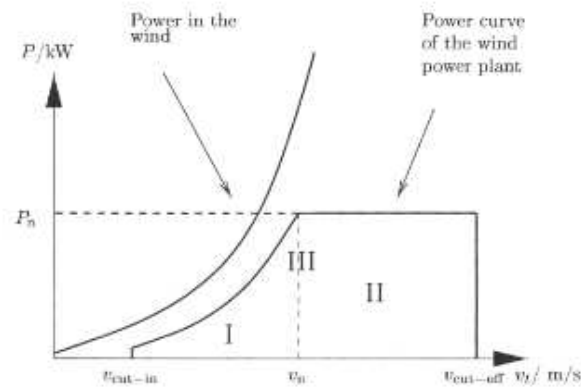
$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \times \rho \times V^3 \times A} \quad (1)$$

- C_p = tuulivoimalan hyötysuhde (max. 0,5926)

- P = roottorin teho
- ρ = ilman tiheys
- V = tuulen nopeus
- A = roottorin pyyhkäisyypinta-ala

Muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan säätöjärjestelmä koostuu roottorin aerodynaamisen momentin säädöstä, generaattorin sähköisen momentin säädöstä sekä nasellin suunnan säädöstä. Käytettävä säätö riippuu turbiinin toiminta-alueesta. Alle nimellisellä tuulennopeudella säätöjärjestelmä pyrkii ottamaan suurimman mahdollisen sähkötehon generaattorista ilman, että tuulen akselille kehittämä momentti ylittyy. Tämä säätö tehdään usein pelkällä generaattorin momentin säädöllä, ja vasta nimellistuulennopeuden yli olevalla alueella käytetään lapakulmasäätöä rajoittamaan tuotettua tehoa. /9/

Kuvassa 4 on merkitty roomalaisilla numeroilla tuuliturbiinin toiminta-alueet. Kuvasta nähdään myös tuulen sekä tuulivoimalan teho nopeuden funktiona. Toiminta-alue I alkaa siitä tuulennopeudesta, kun generaattori alkaa tuottaa sähkötehoa, ja loppuu voimalan nimelliseen tuulennopeuteen. Tällä alueella säätöjärjestelmä ajaa generaattoria parhaimmalla hyötysuhteella. Alueella II, on tuulennopeus yli nimellisen. Tällöin järjestelmä rajoittaa tehon yleensä voimalan nimellistehoon. Toimintapisteessä III saavutetaan nimellisteho, jolloin säätöjärjestelmä siirtyy tehonrajoitustilaan pitäen tuotetun tehon koko ajan nimellisessä. *Cut-in*-tuulennopeus on alaraja, jonka jälkeen generaattori alkaa tuottaa sähköä. Roottori pyörii kuitenkin jo ennen tämän rajan saavuttamista ilman kuormitusta. *Cut-off*-tuulennopeus on nopeus, jolla generaattori pysäytetään ja voimala käännetään pois tuulesta. /16/



Kuva 4. Tuulivoimalan ohjaus eri toiminta-alueilla /16/

2.3.1 Lapakulmasäätö

Lapakulmasäätöisen tuulivoimalan elektroninen ohjausyksikkö tarkkailee generaattorin antotehoa, ja sen kasvaessa liian suureksi, antaa käskyn lapakulmasäätimien moottoreille pienentää lapojen kohtauskulmaa tuuleen nähden. Lajojen kulmaa säädetään kiertämällä niitä pituusakselinsa ympäri. Tuulivoimalan toimiessa alle nimellistuulennopeutensa, optimoidaan lapakulmien säädöllä paras mahdollinen hyödynnettävissä oleva teho tuulesta. /2/

2.3.2 Sakkaussäätö

Sakkaussäätöisessä tuulivoimalassa lavat on kiinnitetty pyörivään keskiöön kiinteällä kulmalla. Niiden muotoilussa on kuitenkin huomioitu se, että tuulennopeuden kasvaessa liian suureksi, muodostuu lavan yläpinnalle turbulenssia, joka hävittää nostevoiman. Näin roottorin pyörimisnopeus ei enää kiihdy. Kiinteälapakulmaisen tuulivoimalan lavat on kierretty pituusakselinsa suhteen tyvestä kärkeä kohti, jotta sakkausilmiö ei tapahtuisi äkillisesti koko lavan pituudella. Kierretty lapa pehmentää ilmavirran sakkausta kun kriittinen tuulennopeus saavutetaan. Sakkaussäätö vähentää liikkuvien osien käyttöä roottorissa, mutta tuo haastetta aerodynaamiseen suunnitteluun. /2/

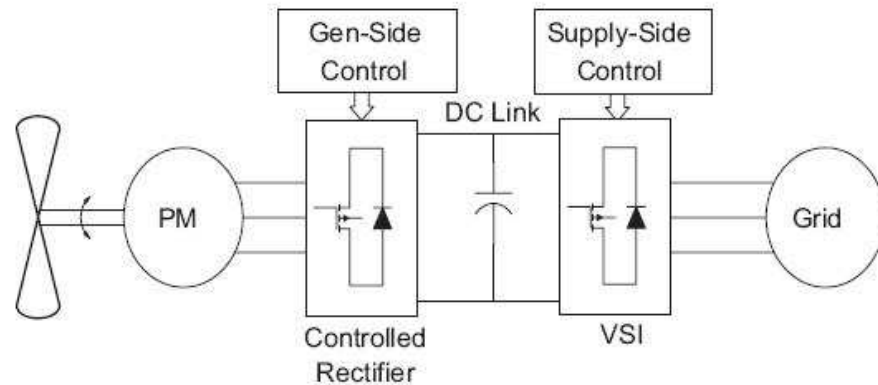
Aktiivi sakkaussäätöinen tuulivoimala on yhdistelmä lapakulmasäätöä ja normaalia passiivista sakkaussäätöä. Sen ideana on kuluttaa nimellistehon ylittävä

osuus roottorissa, kasvattamalla lapojen kohtauskulmaa tuuleen nähden. Tällöin lavat sakkaavat yhä enemmän, eikä generaattorin antoteho kasva. Etuna aktiivisessa sakkaussäädössä on generaattoritehon pysyminen tarkasti nimellisessä kovilla tuulennopeuksilla. Haittana on suuremmat investointikulut, kun lapakulmasäätölaitteisto joudutaan lisäämään. /2/

2.4 Generaattorit ja tehonmuokkaimet

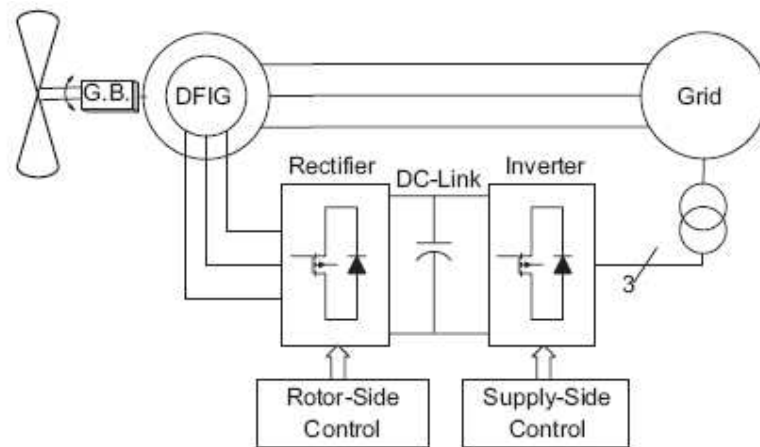
Tuulivoimat jaetaan kahteen tyyppiin pääasiassa niiden käyttämän generaattorin mukaan. Vakionopeuksisessa tuulivoimalassa käytetään yleensä oikosulkumoottoria ylisynchronisella alueella, jolloin tehonsäätö on mahdollista vain roottoripuolella, esimerkiksi lapakulmaa muuttamalla. Muuttuvanopeuksisessa tuulivoimalassa, mitä tässä työssä käsitellään, käytetään yleensä kestmagneettigeneraattoria ilman vaihteistoa vetoakselilla. Kestomagneettigeneraattorin kanssa on käytettävä täydelle teholle mitoitettua tehonmuokkainlaitteistoa. Muuttuvanopeuksisessa tuulivoimalassa on myös mahdollista käyttää liukurengasgeneraattoria, jolloin vain osa tehosta kulkee taajuusmuuttajan läpi (Kuva 6). Muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan säätöön on olemassa myös monia muita tehonmuokkainratkaisuja, mutta tässä työssä käsitellään vain PWM-taajuusmuuttajista koostuvia jännitevälipiirillisiä kokoonpanoja, joissa tehon suunta voi olla verkkoon tai moottoriin päin kummankin taajuusmuuttajan ollessa ohjattavissa, esimerkiksi IGBT-transistoreilla.

Kuvassa 5 esitetty kestmagneettigeneraattori muuttuvanopeuksisessa tuulivoimalassa on nykyään suosittu ratkaisu, koska ylennysvaihe voidaan jättää pois mitoittamalla tahtigeneraattorin nimellisyörimisnopeus tuulivoimalan roottorin nimellisen pyörimisnopeuden kanssa samaksi. Tämä mahdollistaa generaattorin sähköisen momentin säädön täysitehoisella taajuusmuuttajalla. Verkkopuolen taajuusmuuttaja pitää taajuuden ja jännitteen verkkoon soveltuvana ja generaattorin taajuusmuuttaja säätää sähköistä momenttia niin, että kullakin tuulennopeudella saavutetaan paras mahdollinen teho. /6/



Kuva 5. Muuttuvanopeuksinen tuulivoimala kestmagneettigeneraattorilla ja PWM-taajuusmuuttajilla /6/

Oikosulkugeneraattorin käyttö muuttuvanopeuksisessa tuulivoimalassa edellyttää ylennysvaihteistoa tuuliroottorin ja generaattorin yhdistävälle akselille. Kuvassa 6 oleva kytkentä mahdollistaa liukurengasgeneraattorin jättämän säädön roottoriin virtaa säätämällä. Säätöön käytetään taajuusmuuttajaa, joka on kytketty generaattorin roottoriin hiiliharjojen ja liukurenkaiden avulla. Muuttuvanopeuksista tuulivoimalaa pyritään aina ajamaan lähellä nimellinopeutta. Jättämän säätö antaa generaattorin synkroninopeuden ympärille liikkumavaraa. Tässä ratkaisussa suurin osa tehosta kulkee verkkoon staattorin kautta, joten roottoriin taajuusmuuttajaa ei tarvitse mitoittaa generaattorin kokonaisteholle. /8/ /6/



Kuva 6. Muuttuvanopeuksinen tuulivoimala liukurengasgeneraattorilla /6/

3 PIENTUULIVOIMALAT

3.1 Käyttökohteet ja soveltuvuus

Pientuulivoimaloita käytetään pääsääntöisesti kolmeen eri käyttötarkoitukseen. Generaattorin tuottamalla sähköteholla voidaan ladata akkuja, lämmittää vettä vastuksen avulla tai generaattori voidaan kytkeä kiinteistön sähköverkkoon. Akun lataukseen pääsääntöisesti käytettävää tuuligeneraattoria voidaan käyttää myös lämmitysvastuksen kuormittamiseen. Tähän tarkoitukseen tarvitaan tasasuuntauslaitteisto, jolla generaattorin tuottama vaihtojännite muunnetaan akun lataukseen ja vastuksen kuormittamiseen käytettäväksi tasajännitteeksi. /5/

Pientuulivoimalan verkkoonkytkentä on kasvattamassa suosiotaan monessa maassa. Omalla pientuulivoimalalla tuotetun sähkön kannattavuuteen vaikuttaa se, maksaako verkkoyhtiö korvausta verkkoonsa syötetystä sähköstä. Suomessa verkkoyhtiöiden on otettava kohtuullista korvausta vastaan tekniset vaatimukset täyttävät pientuulivoimalat verkkoonsa, mutta niiden tuottamasta tehosta ei välttämättä tarvitse maksaa tuottajalle, jos ei tuotetun sähkön ostajaa ole määrätty. Pientuulivoimala verkkoonkytkennällä on kuitenkin mahdollista rakentaa ilman liittymämaksuja, jos verkonhaltijan ja tuottajan välillä on tehty erillissopimus siitä, ettei ylijäämästä eli verkkoon siirretystä sähköstä, makseta korvausta. /4/

3.2 Vaaka-akselisen pientuulivoimalaitoksen osat

Pientuulivoimalat ovat tekniikaltaan pelkistyneempiä kuin keskikokoiset ja suuret voimalat. Rakenteeltaan ne ovat kuitenkin samantyyppisiä. Nykyajan pientuulivoimalat ovat lähes aina vastatuuleen suuntautuneita, vaaka-akselisia ja kolmilapaisia. Pientuulivoimaloissa ei käytetä moottoroitua pyöritystä turbiinille, vaan tuulensuuntaan ohjautuminen hoidetaan peräsimellä, joka toimii usein myös myrsky- ja ylipyörimisnopeussuojana. Tämä suojaus tapahtuu, kun roottorin pyörimisen aiheuttama työntövoima ylittää peräsimeen kohdistuvan tuulesta pysymisen aiheuttavan voiman. Pientuulivoimalan roottori kääntyy tällöin kohti peräsimä, joko pysty- tai vaakasuorasti. Generaattorin ja peräsimen liitoskohta on

saranoitu myrskysuojauksen vuoksi. Suurin osa pientuulivoimaloista käyttää kestmagneettigeneraattoria, joka on yksinkertaisin ja kestävin ratkaisu kyseiseen käyttöön. /5/

3.3 Pientuulivoimalan säätö ja tuotannon optimointi

Pientuulivoimaloissa on harvoin säätömahdollisuuksia roottorin aerodynaamiselle vääntömomentille. Tämän vuoksi pientuulivoimalan säätö ja tuotannon optimointi on tehtävä generaattorin sähköistä vastamomenttia säätelemällä. Ilman lapakulmasäätöä toimivan pientuulivoimalan on pystyttävä pyörittämään roottoria jo pienillä tuulenopeuksilla, jotta generaattorin kuormittaminen voidaan aloittaa mahdollisimman pienellä tuulenopeudella. /1/

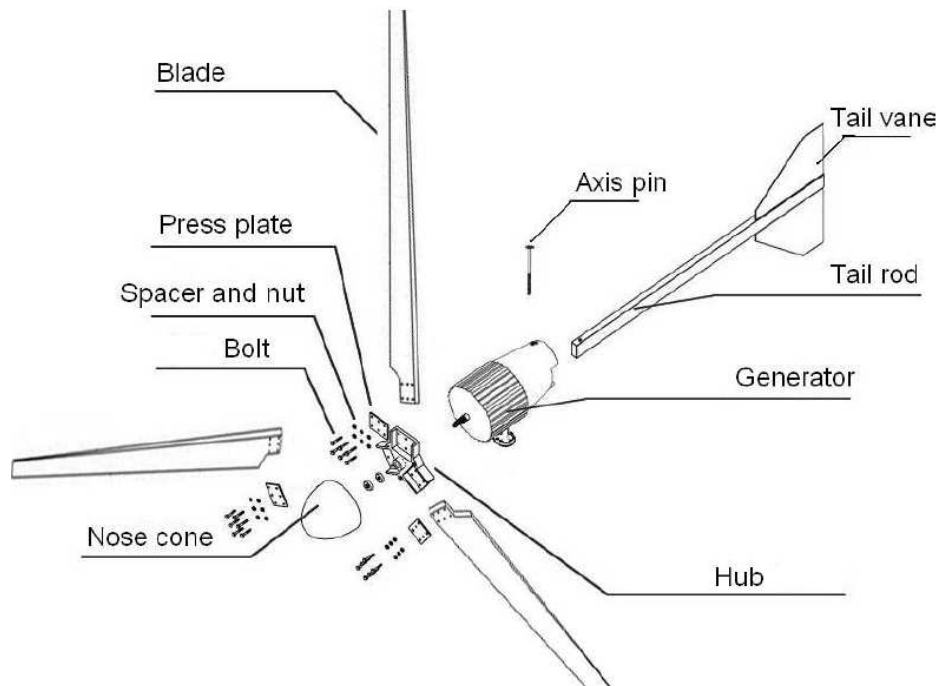
Muuttuvanopeuksisen pientuulivoimalan käynnistyminen, eli lapojen pyöriminen, pyritään aloittamaan jo pienellä tuulenopeudella. Monessakaan pientuulivoimalasovelluksessa ei käytetä generaattoria moottorina pyörimisliikkeen aloittamiseksi, vaan tuulen aiheuttama aerodynaaminen momentti käynnistää turbiinin. Pientuulivoimalan tehontuotanto alkaa yleensä vasta, kun roottorin pyörimisnopeus on kiihtynyt lähelle generaattorin nimellispyörimisnopeutta. Tätä ennen roottorin annetaan pyöriä vapaasti, eikä generaattoria ole kytketty kuormitukseen. Pienintä tuulenopeutta, jolla tehoa tuotetaan sanotaan *cut-in*-tuulenopeudeksi. /1/

3.3.1 Peräsimellä varustettu pientuulivoimala

Pientuulivoimaloissa käytetään tuulen suunnan määrittämiseen peräsintä. Sen avulla roottori pidetään oikeassa kulmassa tuulen suuntaan nähden. Peräsin on tuulivoimalan tuoton kannalta erittäin tärkeä väline, koska oikein suunniteltuna tuulivoimala pysyy jokaisella tuulen suunnalla ja nopeudella oikeassa asennossa.

4 TUTKITTAVA PIENTUULIVOIMALA

Tutkittava pientuulivoimala on kiinalaisvalmisteinen Yangzhou Shenzhou FD3.6-2000. Kuvassa 7 on räjäytyskuva maston päähän tulevista osista ja kuvassa 8 voimalan nimellisarvot.



Kuva 7. SWG:n 2 kW:n tuulivoimalan rakennekaavio /17/

Model	FD3.6-2000
Rated power(W)	2000
Rated voltage(V)	120
Rotor diameter(M)	3.2
Start-up wind speed(m/s)	2
Rated wind speed (m/s)	9
Security wind Speed (m/s)	35
Rated rotating speed (r/m)	400
Blade material	fiber glass
Blade No.	3
Suggested battery capacity	12V200AH*10

Kuva 8. Tutkittavan pientuulivoimalan nimellisarvot ja teknisiä tietoja /17/

4.1 Roottori, peräsin ja masto

Tuulivoimalan roottori on kolmilapainen ja halkaisijaltaan 3,2 metriä. Peräsimen avulla tuulivoimalan roottori ohjautuu tuulen suuntaan. Tuulennopeuden ylittäessä 35 m/s, kääntyy roottori peräsimeen kohdistuvasta voimasta johtuen pois tuulesta. Valmistaja suosittelee vähintään 8 metrin pituista mastoa 2 kW:n tuulivoimalalle.
/17/

4.2 Generaattori

Tutkittavan pientuulivoimalan generaattorina käytetään kestopommitettua tahtigeneraattoria. Kilpiarvoista saatiin selville generaattorin nimellisyörimisnopeus 400 rpm ja nimellisteho 2000 W:a. Myös nimellijännite ilmoitettiin kilvessä, mutta kyseessä oli tasajännitearvo, mikä ei vastaa yleisesti ilmoitettua pääjännitteen arvoa nimellisyörimisnopeudella. Myöhemmissä mittauksissa nimellijännitteksi saatiin n. 370 V:a.

4.2.1 Generaattorin sijaiskytkentä

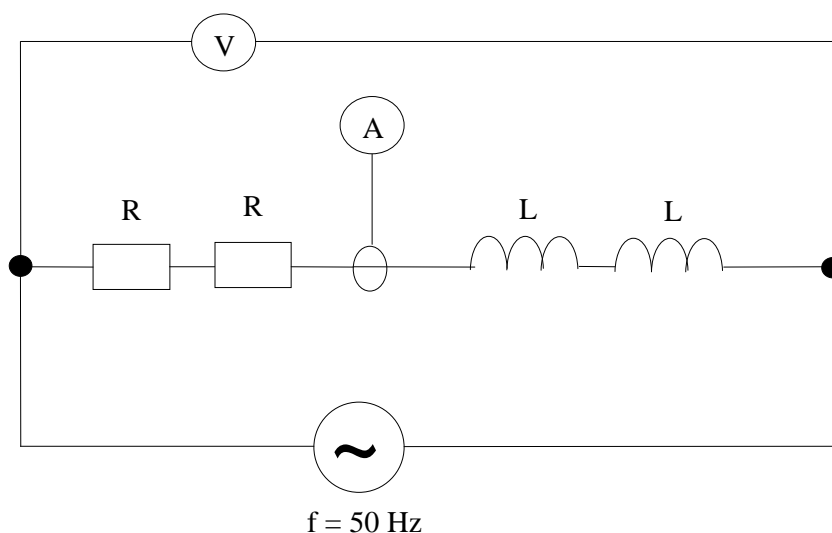
Generaattorin ominaisuuksia tarkasteltaessa on selvitettävä staattorikäämien resistanssi ja induktiivinen reaktanssi. Maahantuojalta saatiin tieto, että generaattori on tähtikytkentäinen ja staattoriresistanssi on noin 5 Ω . Tämä oli vaikea tarkastaa, koska staattorikäämien tähtikytkentä oli tehty valetun rungon sisällä, eikä ulkopuolelle tuotu kuin staattorikäämien vapaat päät. Staattorikäämien resistanssit määritettiin kuitenkin kuvan 9 kytkennällä, jossa kahden kääminpään väliin johdettiin 1 A tasavirta ja mitattiin jännite käämien navoista. Tällöin kaksi staattorikäämiä on kytkettynä sarjaan. Resistanssi laskettiin ohmin lakia käyttäen. Kaikkien kolmen vaihekombinaatioiden arvot mitattiin ja tuloksista otettiin keskiarvo. Yhden käämin likimääräinen resistanssi saatiin jakamalla laskettu resistanssin arvo kahdella. Mittaustulokseksi saatiin 5,3 Ω (LIITE 4).

Staattorin reaktanssin määrittäminen tehtiin kytkemällä kahden käämin sarjakytkentään sähköverkon vaihejännite säätömuuntajalta laboratoriotyöpöydän paneelista. Oskilloskoopin näytölle otettiin piirissä kulkeva virta sekä piirin

impedanssin yli vaikuttava jännite (LIITE 4). Oskilloskoopilta saatiin virran ja jännitteen vaihesiirto sekä sinikäyrien tehollisarvot. Impedanssin kulma on virran kulma positiivisena, jos jännitteen kulmaksi määrätään 0° , koska virta on jännitettä jäljessä induktiivisessä piirissä. Näiden tietojen perusteella pystyttiin ratkaisemaan sarjakytkennän induktiivinen reaktanssi.

$$X_L = \tan(\varphi) \times R \quad (2)$$

- X_L = induktiivinen reaktanssi
- R = käämien sarjakytkennän resistanssi
- φ = impedanssin kulma



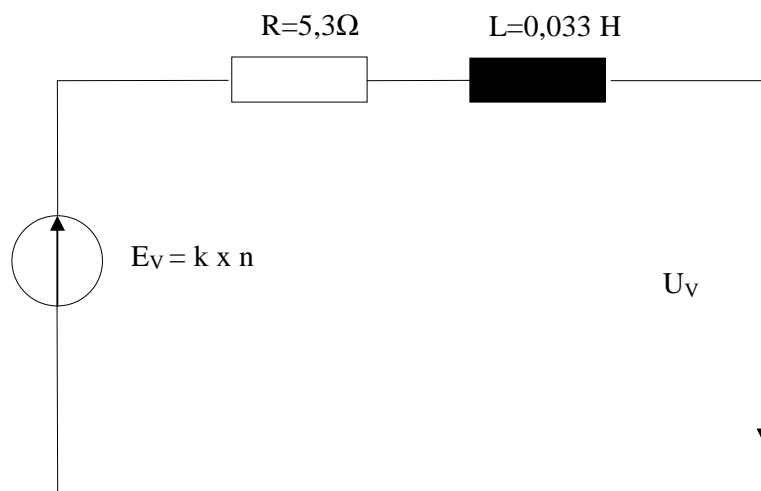
Kuva 9. Mittauskytkentä staattorin induktanssin määrittämiseksi

Impedanssin kulmaksi saatiin oskilloskooppikuvasta määritetyn virran ja jännitteen vaihesiirron avulla 63 astetta (LIITE 4). Oskilloskooppikuvasta selvitettiin virran nollakohdan aikapoiikkeama jännitteen nollakohdasta ja muutettiin saatu tulos asteiksi. 50 Hz:n taajuudella 3,5 ms:n vaihesiirto vastaa osoitinkoordinaatistossa 63 asteen kulmaeroa. Kahden käämin sarjakytkennän induktiivinen reaktanssi laskettiin kaavalla 2 ja tulokseksi saatiin 20,8 Ω .

Staatorkäämien induktanssi laskettiin kaavalla 3, kun tiedettiin induktiivinen reaktanssi X_L . Tulokseksi saatiin 0,067 H.

$$L = \frac{X_L}{2 \times \pi \times f} \quad (3)$$

Generaattorin yksivaiheisen sijaiskytkennän resistanssin ja induktanssin arvot on saatu jakamalla kahden staatorkäämin sarjakytkennässä mitatut arvot kahdella, jolloin saadaan likimäärin yhden käämin arvot (Kuva 10).



Kuva 10. Generaattorin yksivaiheinen sijaiskytkentä

Tahtigeneraattorin staatorkäämiin indusoituvaan sähkömotoriseen jännitteeseen E_V , vaikuttaa koneen rakenteelliset ominaisuudet seuraavasti: /15/

$$E_V = 4,44 \times f_k \times f \times N \times \hat{\phi}_n \quad (4)$$

- E_V = yhteen käämiin indusoitunut smj
- f_k = käämityskerroin
- f = taajuus
- N = käämin kierrosmäärä

- $\hat{\phi}_m =$ yhden navan vuon huippuarvo

Kestomagneettigeneraattorissa vuo on vakio, joten staattorikäämiin indusoituva sähkömotorinen jännite voidaan esittää yksinkertaisesti pyörimisnopeuden ja rakenteellisia ominaisuuksia kuvaavan vakiokertoimen k tulona.

$$E_V = k \times n \quad (5)$$

Kestomagneettigeneraattorin vakiokerroin k määritettiin mittaamalla pääjännitteet kuormittamattomana eri pyörimisnopeuksilla ja laskemalla näistä vaihejännitteet. Vaihejännitteiden laskentaan käytettiin kaavaa 6 (LIITE 4). Symmetrisen kolmivaihejärjestelmän pääjännitteen ja vaihejännitteen suhde on seuraava:

$$U_N = \sqrt{3} \times U_V \quad (6)$$

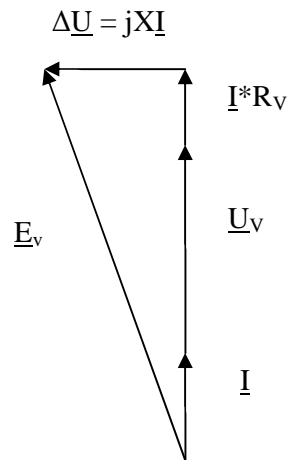
- $U_N =$ pääjännite
- $U_V =$ vaihejännite

Kaavasta 5 ratkaistiin vakio k kuudella eri pyörimisnopeudella. Tuloksista otettiin keskiarvo. Tutkittavan generaattorin vakiokertoimeksi saatiin $k = 31,88$ Vs.

4.2.2 Kuormituskoe resistiivisellä kuormalla

Generaattorin tehonantokykyä testattiin kuormittamalla sitä resistiivisellä kuormalla. Staattorikäämin napoihin kytkettiin säädettävä kolmivaihevastus. Vastuksien toiset päät kytkettiin yhteen eli muodostettiin tähtipiste.

Generaattorikäytössä tahtikoneen sähkömotorinen jännite on napajännitettä edellä induktiivisessa reaktanssissa syntyvän jännitehäviön vuoksi. Kun generaattoria kuormitetaan resistanssilla, ovat virta ja napajännite samansuuntaisia. Täten saadaan seuraava resistiivisen kuormituksen osoitinpiirros (Kuva 11).



Kuva 11. Tahtigeneraattorin osoitinpiirros resistiivisellä kuormituksella /15/

Kuvasta voidaan kirjoittaa seuraava jänniteyhtälö:

$$\underline{E}_v = \underline{U}_v + \underline{I} \times R_v + jX \underline{I} \quad (7)$$

- E_v = yhteen käämiin indusoitunut smj
- U_v = generaattorin vaihejännite
- I = kuormitusvirta
- R_v = staattorin resistanssi
- X = staattorin induktiivinen reaktanssi

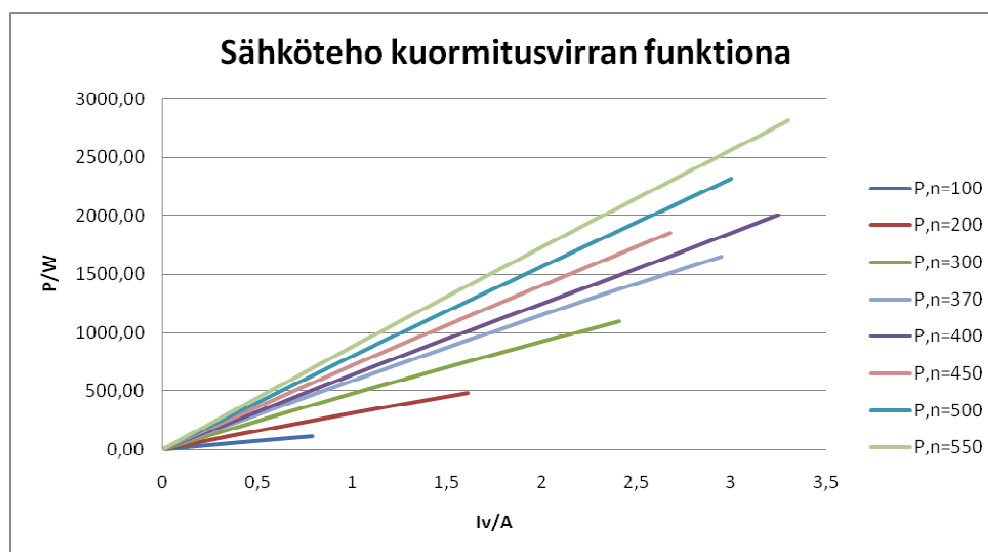
Kun kuormitusvirtaa kasvatetaan pienentämällä säätövastuksen resistanssia, kasvaa staattorin induktiivisessa reaktanssissa syntyvä jännitehäviö. Tällöin U_v ja E_v välinen kulma kasvaa, mikä kasvattaa voimakoneelta vaadittavaa momenttia. /15/

Resistiivisellä kuormituksella teho voidaan laskea pääjännitteestä ja vaihevirrasta, koska tehokerroin on yksi.

$$P = \sqrt{3} \times U \times I_V \quad (8)$$

- P = pätöteho
- U = pääjännite
- I_V = kuorman vaihevirta

Pätötehoa kasvatettiin kuormitusvastuksen arvoa pienentämällä, jolloin virta kasvoi. Generaattoria pyöritettiin laboratorion kuormituspenkin 5,5 kW:n oikosulkumoottorilla, jota ohjataan taajuusmuuttajalla. Sähköteho laskettiin 8:lla eri pyörimisnopeudella, ja todettiin generaattorin pystyvän tuottamaan nimellisyörimisnopeudella luvattu 2000 W:n sähköteho. Tällöin staattorikäänissä kulkeva kuormitusvirta on 3,25 A:a. Suurin mitattu teho oli 550 rpm:llä 2800 W:a (Kuva 12). Generaattorin akselin momentti mitattiin myös, ja sen avulla laskettiin akseliteho. Akselitehon ja sähkötehon suhteesta saatiin generaattorin hyötysuhde, joka nimellisyörimisnopeudella ja -teholla oli 0,91 (LIITE 5).



Kuva 12. Kuormituskokeen tulokset

5 TUULIVOIMALAN SIMULOINTI LABORATORIOSSA

Työssä simuloitiin tuulivoimalan toimintaa Technobothnian sähkölaboratoriossa. Tähän tarkoitukseen rakennettiin testi- ja mittausjärjestelmä, joka koostui seuraavista osista:

- Wonderware Intouch-valvomosovellutus
- Siemens S7-300-keskusyksikkö ja ohjauslogiikka
- Vacon NXP-taajuusmuuttaja
- 4 kW:n oikosulkumoottori
- SWG 2 kW:n kestoplaneettigeneraattori

5.1 Vacon NXP-taajuusmuuttaja moottorikäyttöön

Tuulivoimalan moottorin simuloimiseen laboratoriossa käytettiin 4 kW:n oikosulkumoottoria, jota ohjattiin Vaconin NXP-tuotesarjan taajuusmuuttajalla. Taajuusmuuttaja oli asennettu telineeseen, jossa oli kytkentälevy johdotuksen helpottamiseksi. Vaconin NXP-tuotesarjaan voidaan ladata valmiita sovellusohjelmia eri käyttötarkoituksiin. Taajuusmuuttajan oletussovellutuksena oli All in one-paketin perussovellus. Se on helppokäyttöinen ja sitä käytetään yksinkertaisissa moottorinohjauksissa.

Tuulivoimalan simuloimiseen oli tarkoitus rakentaa ohjausjärjestelmä, joka on varustettu valvomoliittymällä. Taajuusmuuttajan sovellusohjelmaksi valittiin järjestelmäkäyttösovellus. Järjestelmäkäyttösovelluksen tyypillisiä käyttökohteita ovat koordinoitua taajuusmuuttajat, jotka on varustettu ohjausjärjestelmällä.

Järjestelmän ohjausrajoitukseksi suositellaan kenttäväyläkommunikaatiota. Järjestelmäkäyttösovelluksen closed loop-säätömahdollisuus nopeusohjeella on hyödyllinen, kun generaattorin kuormittaminen kasvattaa voimakoneelta vaadittavaa momenttia ja pyörimisnopeus halutaan pitää vakiona.

Ohjattavaksi moottoriksi oli valittu ABB:n 4 kW:n 6-napainen oikosulkukone, jonka nimellismomentti on 40 Nm:ä ja nimellisvirta 8,7 A:a. Taajuusmuuttaja mitoitetaan moottorivirran tehollisarvon mukaan. Käytössä oli Vaconin NXP 009 5A2H1SSS-taajuusmuuttaja. Käytetyn taajuusmuuttaja-moottoriyhdistelmän kuormitettavuus tarkistettiin ABB:n DriveSize-ohjelmalla. Ohjelmasta etsittiin vastaava ABB:n taajuusmuuttaja, joka oli ACS800-01-0006-3-malli (LIITE 6).

Käytön kuormitettavuuden tarkistuksessa etsittiin suurin mahdollinen momentti, kun moottoria pyöritetään 200-600 rpm:llä. Käytetyt pyörimisnopeuden arvot valittiin arvioimalla sopiva pyörimisnopeusalue generaattorille tuulivoimakäytössä. Moottorin akselitehoksi ohjelma laski 200 rpm:llä 1 kW:a. Teho kasvaa lineaarisesti pyörimisnopeuden funktiona niin, että 600 rpm:llä se on 3 kW:a. Tehot olivat DriveSizen laskemia arvoja vakiomomentilla. Ohjelman laskema suurin vakiomomentti käytetylle taajuusmuuttaja-moottoriyhdistelmälle on 47,7 Nm:ä (LIITE 6).

Generaattorin sähkötehon laskettiin olevan 400 rpm:llä ja 47,7 Nm:llä 2000 W:a. Generaattorin häviöihin kuluu osa akselitehosta. Tämän takia akselitehon täytyy olla generaattorin nimellistilanteessa yli 2000 W:a. Vaadittava akselimomentti laskettiin nimellistilanteessa kaavalla 9. Voimakoneen akselilta vaadittava momentti 400 rpm:n pyörimisnopeudella ja 2000 W:n generaattorin sähköteholla on n. 52,5 Nm:ä (kaava 9).

$$M = \frac{P_N}{2\pi \times n_n} = \frac{2000W}{2\pi \times 6,67 \frac{1}{s}} = 52,47 Nm \quad (9)$$

- P_N = akseliteho (2000 W)
- M = moottorilta vaadittava akselimomentti
- n_n = generaattorin nimellinen pyörimisnopeus (6,67 1/s)

- η = generaattorin hyötysuhde (0,91)

Voimakoneen akselin teho on hyötysuhteen määrämän häviötehon verran pienempi kuin verkosta otettava sähköteho. Momentti on suoraan verrannollinen pätövirtaan, joten moottorin verkosta ottama pätövirta voidaan laskea kaavalla 10. Akselimomentti jaetaan moottorin hyötysuhteella, jotta saadaan vaadittava sähköinen momentti: /7/

$$I_P = \frac{\frac{M_V}{\eta}}{M_N} \times I_N \times \cos \phi_N = \frac{52,5 Nm}{40 Nm} \times 8,7 A \times 0,78 = 10,5 A \quad (10)$$

- I_P = momenttiin verrannollinen moottorivirran pätökomponentti
- M_V = akselilta vaadittava suurin momentti (52,5 Nm)
- M_N = moottorin nimellismomentti (40 Nm)
- I_N = moottorin nimellisvirta (8,7 A)
- $\cos \phi_N$ = moottorin nimellistehokerroin (0,78)
- η = moottorin hyötysuhde (0,85)

Moottorin virran tehollisarvo saadaan Pythagoran kaavalla. Loisivirtakomponentin I_{QN} arvo saadaan ratkaisemalla tehokertoimen avulla $\sin \phi_N$ ja kertomalla se nimellisvirralla.

$$I = \sqrt{(I_P)^2 + (I_{QN})^2} = \sqrt{(10,5 A)^2 + (8,7 A \times \sin(38,7^\circ))^2} = 11,8 A \quad (11)$$

- I_{QN} = moottorivirran loiskomponentti ($I_N \times \sin \phi_N = 5,44 A$)
- I_P = moottorivirran pätökomponentti kaavasta 10

Moottorivirran tehollisarvoksi 52,5 Nm:n akselimomentilla saatiin 11,8 A:a kaavalla 11. Käytettävää moottoria joudutaan ylikuormittamaan, jotta saadaan

vaadittava momentti. Valittua taajuusmuuttajaa joudutaan ylikuormittamaan yli 30 %:a jatkuvasta virrasta normaalissa käytössä (I_L kuvassa 13).

Verkköjännite 380—500 V, 50/60 Hz, 3-

Vacon NXP	Kuormitettavuus					Moottorin akseliteho		Runko- koko	Mitat L*K*S (mm)
	Normaali käyttö (+40°C)		Raskas käyttö (+50°C)		Maksimi- virta I_S	400 V:n syöttö			
	Jatkuva virta I_L (A)	10%:n yli- kuormitus- virta (A)	Jatkuva virta I_H (A)	50%:n yli- kuormitus- virta (A)		10%:n ylik. P (kW)	50%:n ylik. P (kW)		
NXP 0003 5A 2 H 1 SSS	3,3	3,6	2,2	3,3	4,4	1,1	0,75	FR4	128*292*190
NXP 0004 5A 2 H 1 SSS	4,3	4,7	3,3	5,0	6,2	1,5	1,1	FR4	128*292*190
NXP 0005 5A 2 H 1 SSS	5,6	6,2	4,3	6,5	8,6	2,2	1,5	FR4	128*292*190
NXP 0007 5A 2 H 1 SSS	7,6	8,4	5,6	8,4	10,8	3	2,2	FR4	128*292*190
NXP 0009 5A 2 H 1 SSS	9	9,9	7,6	11,4	14	4	3	FR4	128*292*190
NXP 0012 5A 2 H 1 SSS	12	13,2	9	13,5	18	5,5	4	FR4	128*292*190

Kuva 13. Vaconin taajuusmuuttajataulukko /14/

Tuloksista huomataan, ettei käytetyllä taajuusmuuttajalla pystytä ohjaamaan 4 kW:n oikosulkumoottoria riittävällä teholla ja momentilla, jotta kestomagneettigeneraattori tuottaisi nimellistehonsa. Testeissä huomattiin, että moottorivirran kasvaessa lähelle 11 A:a taajuusmuuttajan suojaustoiminto pudottaa virran 9 A:iin.

5.2 Siemens S7-ohjauslogiikka ja valvomosovellutus

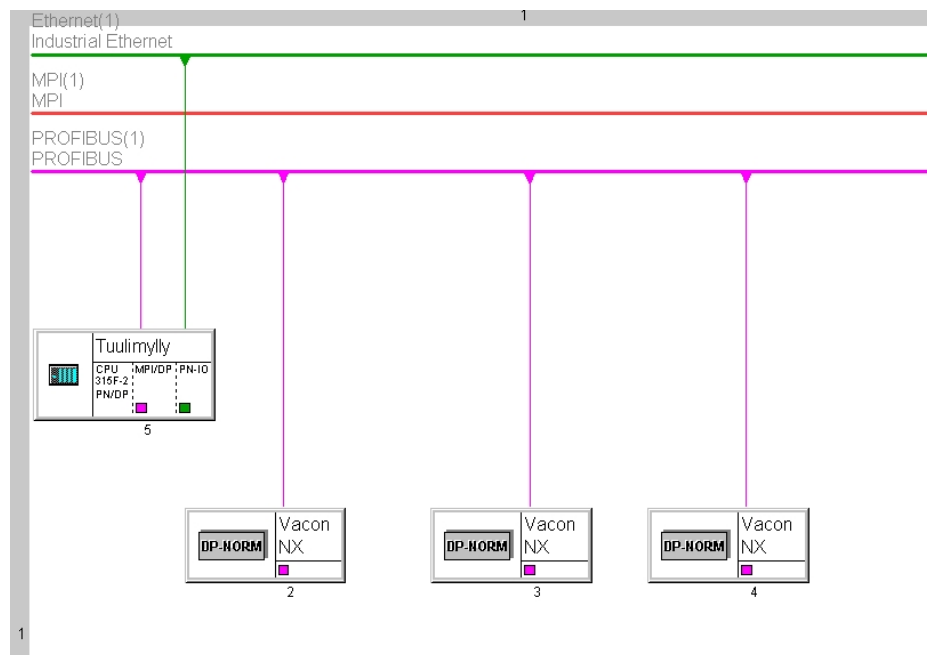
Tuulivoimalasovelluksen testaukseen käytettiin ulkoista logiikkaohjelmointiyksikköä, joka liitettiin taajuusmuuttajiin Profibus-kenttäväylällä. Keskusyksikkönä käytettiin Siemensin 315F-2 PN/DP-prosessoria, koska siitä löytyvät liittynät väylälle sekä Ethernetille, jonka kautta logiikka oli kytketty ohjelmointitietokoneeseen. Taajuusmuuttajien parametointia varten kytkettiin sarjaliikennekaapeli tietokoneeseen, jossa oli NCDrive-ohjelma. Tällä voitiin asettaa vakiona pysyviä parametreja, joita ei pientuulivoimalaprosessissa tarvitse muuttaa. Muutettavia parametreja voidaan ohjata Profibus-väylän kautta, kun taajuusmuuttajat ovat PPO5-liikennöinnissä. Tällöin väylällä liikkuvaa dataa kasvatetaan lisäämällä prosessidatantentä, joka koostuu ohjaus- ja tilasanasta sekä mistä tahansa sovelluksessa määritetystä signaalista. Käyttäjä voi omien tarpeidensa mukaan valita NCDriven Datamapping valikosta mitä signaaleja haluaa väylällä liikennöidä. Kuvassa 14 on voimakoneen ohjauksen järjestelmäkäyttösovelluksesta käytetyt prosessidatat. Esimerkiksi PD IN3 ID 1161 on ohjaus-lisäsana, joka lähetetään logiikkaohjelmasta väylää pitkin

taajuusmuuttajalle prosessidat Kentässä 3. Vastaavasti taajuusmuuttajalta voidaan lukea tilatietoja, kuten moottorin virta, PD OUT- kentistä.

Index	Variable Text	Value	Default	Unit	Min	Max
P 2.17.1	PD IN1 ID	1140			0	65535
P 2.17.2	PD IN2 ID	1288			0	65535
P 2.17.3	PD IN3 ID	1239			0	65535
P 2.17.4	PD IN4 ID	1161			0	65535
P 2.17.5	PD IN5 ID	1240			0	65535
P 2.17.6	PD IN6 ID	1278			0	65535
P 2.17.7	PD IN7 ID	0			0	65535
P 2.17.8	PD IN8 ID	0			0	65535
P 2.17.9	PD OUT1 ID	1			0	65535
P 2.17.10	PD OUT2 ID	2			0	65535
P 2.17.11	PD OUT3 ID	3			0	65535
P 2.17.12	PD OUT4 ID	4			0	65535
P 2.17.13	PD OUT5 ID	5			0	65535
P 2.17.14	PD OUT6 ID	6			0	65535
P 2.17.15	PD OUT7 ID	7			0	65535
P 2.17.16	PD OUT8 ID	1169			0	65535

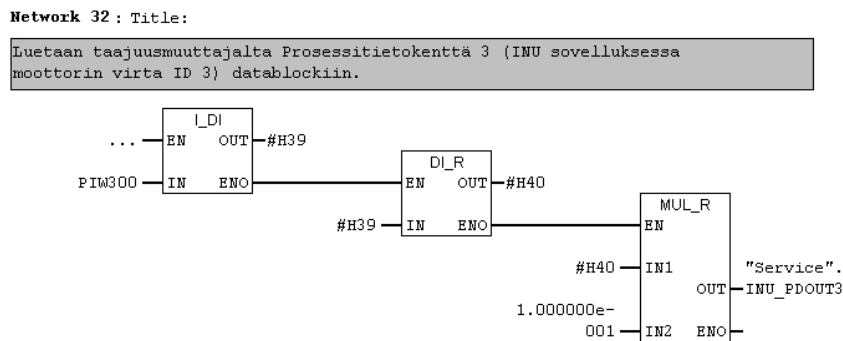
Kuva 14. Voimakoneen taajuusmuuttajassa käytetyt prosessidat ID:t

Logiikan Hardware-konfiguroinnissa lisättiin CPU:n Ethernet- ja Profibusväylä. Keskusyksikön lisäksi Profibus-väylään liitettiin voimakoneen, generaattorin ja verkkovaihtosuuntajan taajuusmuuttajat (Kuva 15).



Kuva 15. Logiikan yhteysmäärittelyt

Väylän käyttöönoton jälkeen tehtiin logiikkaohjelmaan liikennöinti-datablock, josta kirjoitettiin ja johon luettiin väylän dataliikennettä. Luetun ja kirjoitetun datan muunnokset oikeaan muotoon tehtiin logiikalle ohjelmoidulla funktiolla (Kuva 16). Kun halutut tila- ja ohjaustiedot oli logiikan datablockissa, voitiin rakentaa valvomosovellus, josta päästään käsiksi taajuusmuuttajien mittauksiin ja ohjauksiin. Liikennöinti logiikan ja valvomon välillä tapahtui Ethernet-väylälle määritetyllä yhteydellä (Kuva 17).



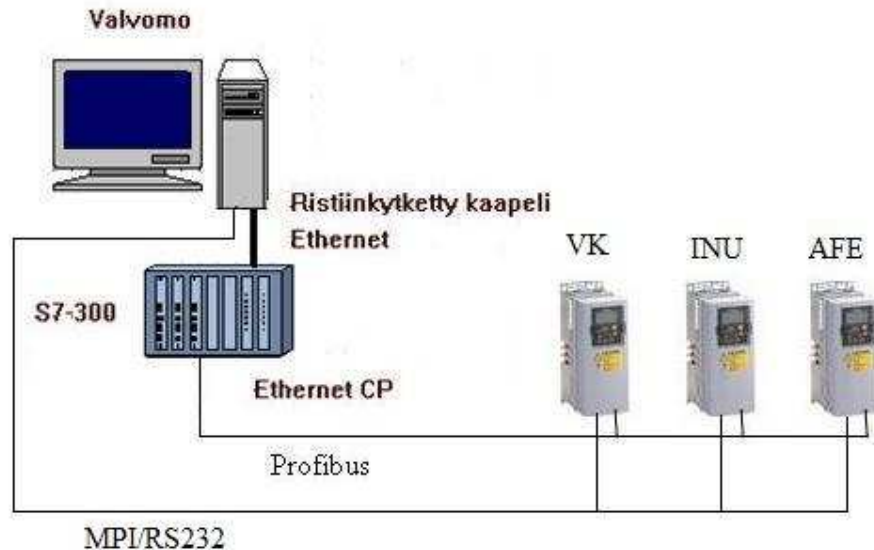
Kuva 16. Esimerkki väylältä luettavasta datasta logiikan datablockiin

Name	R/W Status	Value
DB103,X148.0	R/W	FALSE
DB103,X148.1	R/W	TRUE
DB103,X148.3	R/W	TRUE
DB103,X148.7	R/W	FALSE
DB103,REAL36	R/W	0
DB103,REAL40	R/W	0
DB103,REAL44	R/W	0
DB103,REAL52	R/W	0
DB103,REAL56	R/W	0
DB103,REAL60	R/W	575
DB103,REAL64	R/W	155
DB103,REAL68	R/W	0
DB103,REAL72	R/W	0
DB103,REAL76	R/W	2000
DB103,REAL80	R/W	0
DB103,REAL84	R/W	0
DB103,REAL88	R/W	0

Kuva 17. Valvomon ja logiikan välistä liikennöintiä

Valmis ohjausjärjestelmä sisälsi 3 taajuusmuuttajaa, ohjauslogiikan, tietokoneen, tarvittavat ohjelmistot sekä Profibus-, Ethernet- ja sarjaliikennekaapeloinnin (Kuva 18). Valvomon tietokoneelta voidaan ohjelmoida Siemensin CPU:ta, joka edelleen ohjaa väylässä olevia taajuusmuuttajia. Taajuusmuuttajien parametointi

voidaan tehdä sarjaliikennekaapelilla tietokoneeseen asennetun NCDrive-ohjelman avulla.



Kuva 18. Pientuulivoimalan ohjausjärjestelmän rakenne

5.3 Ohjauslogiikan rakenne ja konfigurointi

Siemensin keskusyksikkö oli työssä mukana sen käytännöllisyyden takia. Sillä voitiin ohjata kaikkia kolmea sähkökäyttöä yhtä aikaa. Tavoitteena oli saada voimakoneelle tehtyä tuulen vaihtelua simuloiva ohjelma ja verkkovaihtosuuntaajalle pientuulivoimalan ohjaukseen oma S7-ohjelma, joka voitaisiin toiminnallisuudeltaan siirtää Vaconin taajuusmuuttajan sovellukseen.

Voimakoneen nopeusohjeelle tehtiin neljän askeleen sekvenssi, jossa toimilaitteina ovat ramppilohkot (LIITE 2). Valvomosta voidaan asettaa halutut pyörimisnopeudet kullekin rampin sisääntulolle, kulmakerroin nousu- tai laskuajalle sekä askellukseen kulutettu aika. Lisäksi tehtiin manuaalitila, joka valittiin valvomosta AJO 2-bitillä. Tällöin sekvenssin suoritus pysähtyy ja käyttäjä voi valita seuraavaan pyörimisnopeuden. Voimakone voidaan asettaa valvomosta myös momenttiohjeelle, jolloin tuulivoimalan toiminnallisuuden testaaminen onnistuu paremmin kuin nopeusohjeella (LIITE 3).

Verkkovaihtosuuntaajan kestopagneettigeneraattoria ohjaavan INU-yksikön järjestelmäkäyttösovelluksen parametriin P.2.8.7 generaattoripuolen momenttiraja kirjoitetaan logiikalta, prosenttiarvo 0-300%.

Tämä arvo määräytyy voimakoneen pyörimisnopeuden perusteella niin, että arvo 0 % asetetaan momenttirajaksi, kun pyörimisnopeus ylittää asetellun alarajan (*cut-in*), ja 100 % saavutetaan nimellisyörimisnopeudella. Nimellisyörimisnopeuden jälkeen momenttirajaa kasvatetaan edelleen, mutta testeissä ei ole tarkoitus pyörittää voimakonetta yli generaattorin nimelliskoouden.

Momenttirajan kasvatus tehtiin logiikassa ramppilohkolla, johon asetettiin pyörimiskoouden mukaan muuttuva momenttirajareferenssi sisäänmenoksi, ja generaattorille menevä momenttirajaohje ulostuloksi. Logiikkaohjelmoinnilla varmistettiin ettei muuttuja saa koskaan negatiivisia arvoja. Nopeutta, jolla momenttirajaohje seuraa referenssiä voidaan muuttaa ramppilohkon kulmakertoimella. Momenttirajan kasvattamisen aloituspisteenä oleva alaraja, nimelliskoouputena oleva yläraja sekä kulmakertoimeen vaikuttavat cycle ja slope tuotiin valvomoon aseteltavaksi (LIITE 3).

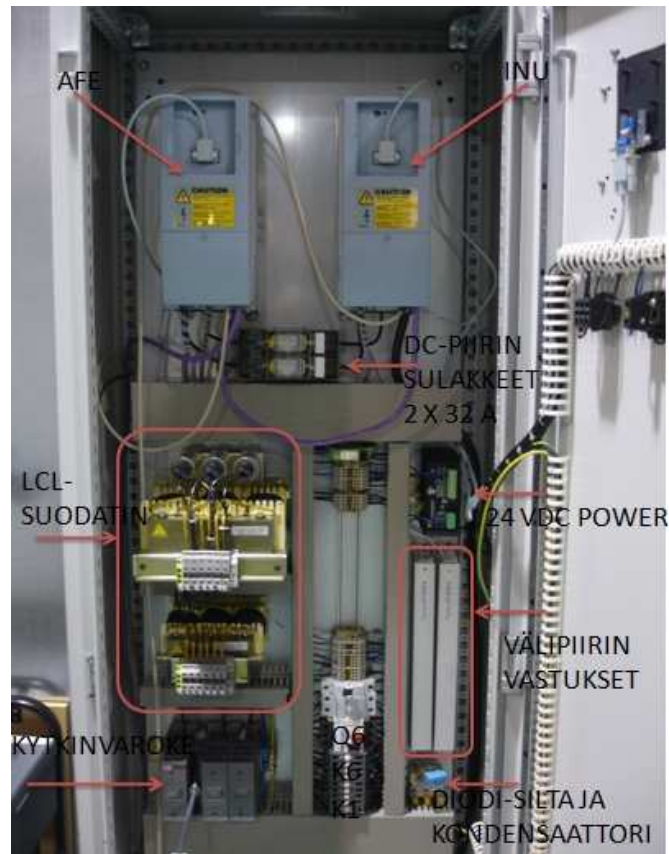
6 PIENTUULIVOIMALAN VERKKOONKYTKENTÄ

6.1 Työn kuvaus

Pientuulivoimalan verkkoonkytkemiseksi on tahtigeneraattorin ja sähköverkon väliin asennettava laitteisto, jolla tuotettu sähkö muokataan verkkomuotoiseksi. Kestomagneettigeneraattorin tuottaman jännitteen taajuus muuttuu pyörimisnopeuden muuttuessa, joten käytettävän verkkokytkimen on pystyttävä muokkaamaan siitä verkkoon kytkettäväksi soveltuvaa jännitettä joka hetki. Työssä käytettävä verkkovaihtosuuntaaja on Vaconin jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja, joka koostuu kahdesta ohjausyksiköstä. Tarkoituksena on syöttää generaattorilla invertteri-yksikköä, joka tasasuuntaa kolmivaihejännitteen. Toinen invertteri on kytketty välipiiriin vaihtosuuntaamaan DC-jännite takaisin kolmivaiheiseksi verkkojännitteeksi. Välipiirin jännitteen on oltava tarpeeksi korkea, jotta verkkopuolen invertteri voi tehdä siitä 400 V:n pääjännitettä.

6.2 Verkkovaihtosuuntaaja

Vaconin verkkovaihtosuuntaaja koostuu kahdesta ohjausyksiköstä. Kestomagneettigeneraattori kytketään invertteri yksikköön ja sähköverkko Active Front End -yksikköön. Näiden kahden välillä on tasajännitepiiri, jota INU-yksikkö lataa ja josta AFE-yksikkö kytkee IGBT-ohjatulla kuusipulssisillalla tehoa verkkoon. Lisäksi tarvitaan latauspiiri, jolla DC-jännite saadaan nostettua nimelliseen, ennen yksikköjen modulointien käynnistystä. Latauspiiri ohitetaan, kun jännite on tarpeeksi suuri, ja verkkopuolen pääkontaktorin koskettimet suljetaan. Verkon ja taajuusmuuttajan väliin on kytkettävä suodatin, joka mahdollistaa taajuusmuuttajan ulostulojännitteen ja sinimuotoisen verkkojännitteen yhdistämisen. Työssä käytettävän Vaconin verkkovaihtosuuntaajan suodatin on LCL-tyyppinen, jossa kahden sarjaankytketyn kolmivaihekelan väliin on kytketty kondensaattorit kolmioon. Edellä mainitut komponentit on esitetty kuvassa 19.

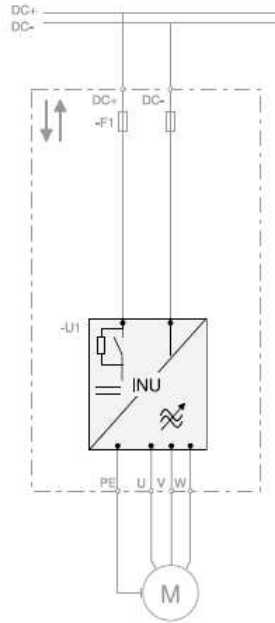


Kuva 19. Vaconin verkkovaihtosuuntaajan komponentit

Verkkovaihtosuuntaajan ensimmäinen pääkomponentti on generaattoria ohjaava INU-yksikkö. Sen tarkoituksena on tuulivoima- ja kestopagneettigeneraattorikäytössä tasasuunnata jännite välipiiriin. Virran suunta voi olla kumpaankin suuntaan, joten välipiiriin latautuneella jännitteellä voidaan myös pyörittää generaattoria moottorina. Tuulivoimantuotannossa INU kuitenkin antaa sopivan vastamomentin generaattorille tuulivoimakkuuden mukaan. Näin akselin pyörimisnopeus ja momentti ovat vastakkaissuuntaisia, joten generaattori syöttää tehoa välipiiriin.

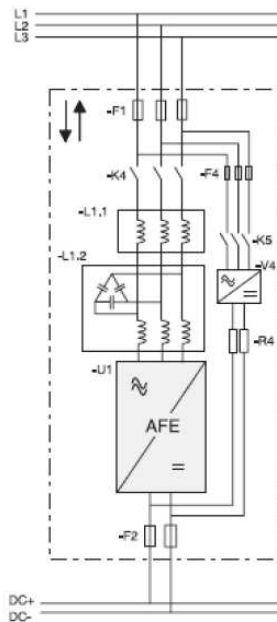
INU-yksikön ohjelasovelluksena voidaan käyttää järjestelmäkäyttösovellusta, koska se soveltuu kestopagneettigeneraattorin ohjaukseen. Kuvasta 20 selviää invertterin toimintaperiaate. Se on tavallinen taajuusmuuttaja, joka ohjaa generaattorin sähköntuotantoa momenttiohjeella. Valmiissa pientuulivoimalasovelluksessa INU-yksikön sovellukseen on lisätty tuotannon

optimointilogiikka, joka säätää jokaisella hetkellä vastamomenttiohjeen niin, että tuulesta saadaan paras teho.



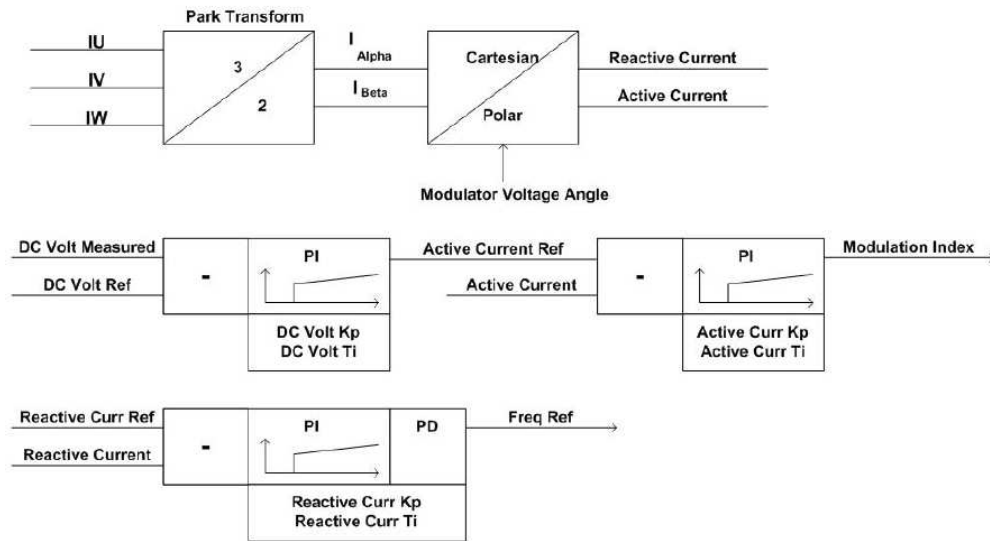
Kuva 20. INU-yksikkö /13/

Tasajännitevälipiiriin on kytketty myös verkkovaihtosuuntaajan toinen ohjausyksikkö. Tämä AFE (active front end) yksikkö tahdistaa invertterin olemassa olevaan sähköverkkoon. Se muodostaa verkkoon syötettävää jännitettä ohjaamalla IGBT-transistoreilla jännitteen taajuutta ja amplitudia. Verkon ja taajuusmuuttajan väliin on kytkettävä LCL-suodatin, joka muodostaa tasajännitteestä hakatusta palikkajännitteestä verkkoonkytettävän sinimuotoista. Välipiiri ladataan 6-pulssisillalla, joka on kuvassa 21 AFE-yksikön rinnalla. Latauksen ollessa valmis, kytketään pääkontaktori kiinni ja latauspiirin kontaktori auki.



Kuva 21. AFE-yksikkö /13/

AFE:n perustoimintaperiaattena on verkkovirran jakaminen verkkojännitteen suhteen pätö- ja loisvirtakomponentteihin. Näitä mitattuja arvoja verrataan parametreinä annettaviin referenssiarvoihin. Pätövirran referenssiarvo saadaan välipiirin jänniteensäätäjältä, jonka tarkoitus on pitää välipiirin jännite parametreinä annettavan ohjearvon suuruisena. DC-jänniteensäätäjän lähdön ja mitatun pätövirran erotus antaa pätövirransäätimelle ohjearvon. Pätövirransäätäjän lähtö antaa AFE:lle jännitteen amplitudin ohjearvon. Tämä näkyy kuvassa 22 muuttujana *Modulation Index*. Loisvirtakomponenttia verrataan parametreinä annettavaan ohjearvoon, josta erotus menee PI-säätäjälle. Positiivinen ohjearvo kompensoi induktiivista loisvirtaa ja negatiivinen kapasitiivista. Oletusarvona loisvirran ohje on 0. Loisvirransäätäjän tehtävä on pitää suuntaaja synkronoituna verkkoon. Sen lähtö derivoituna antaa AFE-yksikölle taajuusohjeen. /12/



Kuva 22. AFE-yksikön ohjearvojen muodostaminen /12/

6.2.1 Tuulesta saatavan tehon optimointi oikella vastamomentilla

Tutkittavan pientuulivoimalan nopeudensäätö perustuu pelkkään generaattorista otettavan sähkötehon säätöön vastamomentilla. Pientuulivoimalasovelluksen vastamomentin optimointi pitää tehdä tarkasti voimalakohtaisen käyrästäön mukaan. Tämän takia tarvitaan generaattorin pyörimisnopeudelle, tuulen nopeudelle, akselin momentille ja verkkoon syötetylle sähköteholle mittaukset. Jokaisella tuulen nopeudella on olemassa piste, jolloin generaattorin pyörimisnopeus ja akselin momentti ovat optimaalisia. Tällöin pientuulivoimalaa ajetaan parhaalla hyötysuhteella. Pientuulivoimalan valmistajalta tulisi saada käyrästä, josta käy ilmi kuinka suurella momentilla ja pyörimisnopeudella generaattoria voidaan kullakin tuulen nopeudella ajaa. Niiden perusteella INU-yksikölle voidaan ohjelmoida vastamomentin optimointi. Laboratorion testiympäristössä voimakonetta voidaan ohjata tuulen nopeutta vastaavalla momenttiohjeella.

6.2.2 Käyttöönotto

Verkkovaihtosuuntaaja otettiin käyttöön 2,2 kW:n oikosulkumoottorilla, jota pyöritettiin voimakoneella. Moottorista saatiin verkkoon tehoa syöttävä

generaattori pyörittämällä sitä yli synkroninopeuden. Taajuusmuuttajakäytössä synkroninopeutta voidaan muuttaa taajuudella. Tässä tapauksessa taajuusmuuttajana käytettiin verkkovaihtosuuntaajan INU-yksikköä, johon parametroitiin moottorin nimellisarvot. Lisäksi parametroitiin piirikaavion mukaiset digitaalitulot (LIITE 1). Epätahtikoneelle annettiin taajuusohjeeksi 25 Hz:ä, jolloin sen synkroninopeus on kaavalla 12 laskettuna 750 rpm.

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (12)$$

- n_s = synkroninopeus
- f = taajuus (25 Hz * 60 s)
- p = moottorin napapariluku ($p = 2$)

Voimakoneen akseliteho halutaan syöttää moottorin häviöiden verran pienempänä verkkoon, joten jättämän on oltava negatiivinen. Koska nimellisteho saavutetaan lähes samalla jättämällä kuin moottorikäytössä, voidaan vaadittava voimakoneen pyörimisnopeusohje laskea kaavasta 13. /7/

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (13)$$

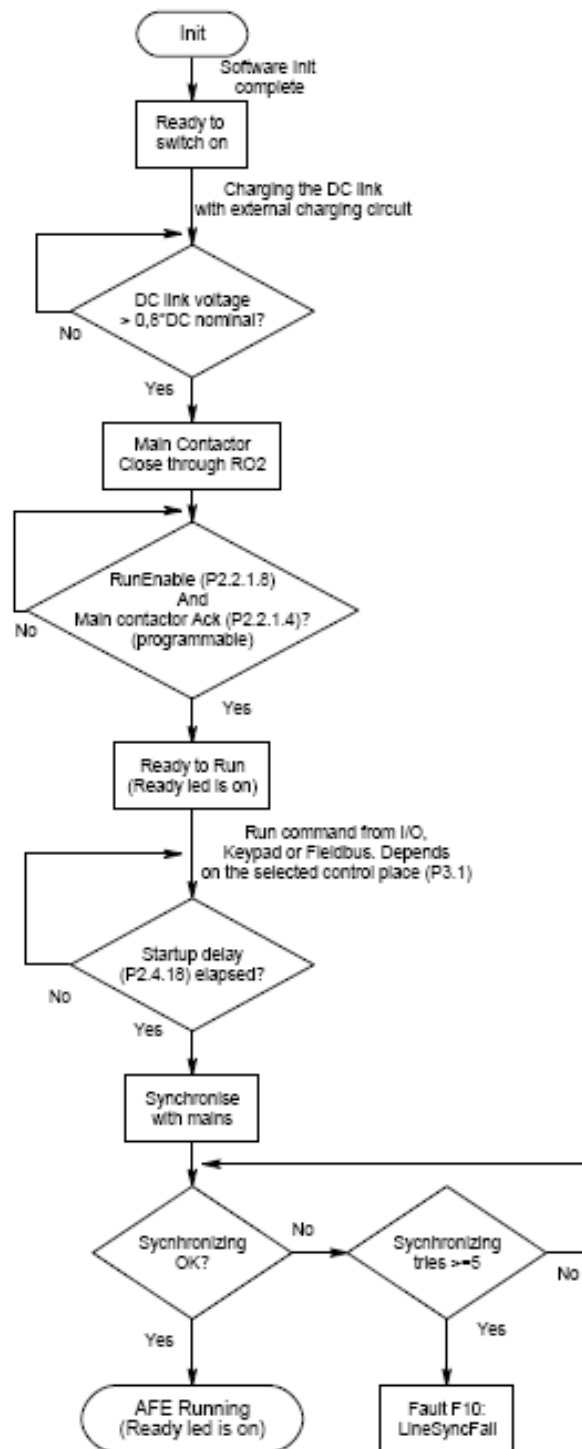
- s = epätahtikoneen nimellisjättämä negatiivisena ($s = -0,047$)

Tulokseksi saadaan $n = 785$ rpm. Voimakoneelle annettiin nopeusohjeeksi 785 rpm, jolloin nopeusohjeella 750 rpm oleva epätahtimoottori toimii ylisynkronisella alueella ja syöttää pätötehoa verkkovaihtosuuntaajan välipiiriin. Tämä todettiin AFE-yksikön ohjauspaneelin valvontasivustolla olevasta DC-välipiirin jännitemittauksesta. Huomattiin, että DC-jännite nousi arvoon 786 V:a, kun se ilman generaattoria on verkkosyöttöisen 6-pulssisillan avulla noin 560 V:a.

Kuvasta 23 voidaan todeta, että AFE-sovellus on käynnistysvalmis, kun välipiiriin on ladattu vähintään 0,8 kertainen nimellisjännite. Nimellisjännite tässä tapauksessa on 1,35 kertaa syötön pääjännite /12/. Annettaessa käynnistyskäsky

AFE-yksikölle, tuli kuitenkin ylivirtavika. Vikaa tutkittaessa mitattiin oskilloskoopilla verkkovirta LCL-suodattimen jälkeen, ja huomattiin AFE-yksikön modulaattorin käynnistyksessä erittäin suuri, n. 150 A:n virtapiikki. AFE-sovelluksen parametroinnissa voidaan virtarajaksi asettaa vain 18 A:a. Ylivirtavika ajoittuu kuvassa 23 olevassa lohkoaviossa tilanteeseen, jolloin AFE:n pitäisi synkronoitua olemassa olevan verkon taajuuteen ja amplitudiin. Ylivirtalaukaisu on kuitenkin niin nopea, ettei synkronointi onnistu.

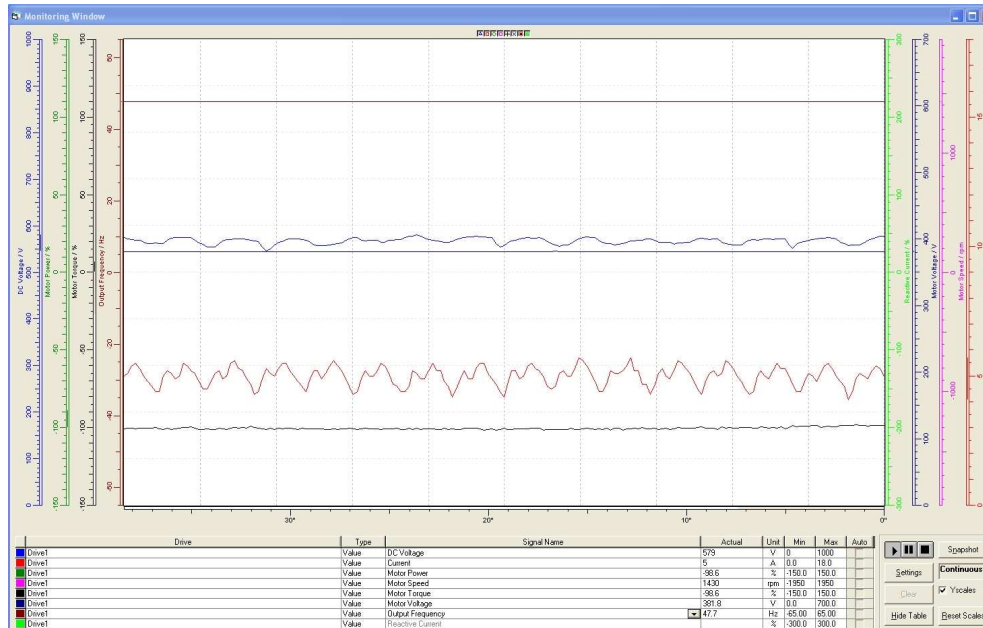
Ongelman ratkaisu oli lopulta yksinkertainen. Verkkopuolen LCL-suodatin oli kytketty väärin. Kuvasta 21 nähdään, että kahden kolmivaihekelan väliin tulee kondensaattoripaketti kolmioon kytkettynä. Koska kyseessä oli uuden laitteiston käyttöönotto, olivat kytkentävirheet mahdollisia. Kondensaattorit oli kytketty suoraan suuntaajan liittimiin, mikä aiheutti virtapiikin moduloinnin käynnistyessä. Kun kondensaattorit siirrettiin kelojen väliin, saatiin synkronointi verkon kanssa toimimaan.



Kuva 23. AFE-yksikön START-sekvenssi /12/

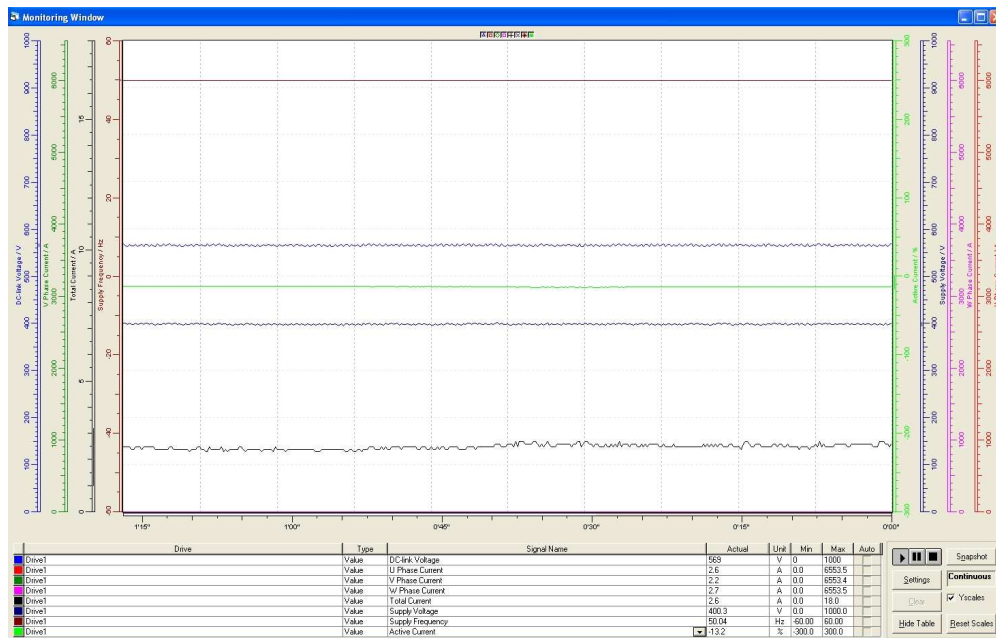
AFE-sovelluksen START-sekvenssi saatiin suoritettua, ja oikosulkumoottorilla voitiin syöttää tehoa verkkoon. Laboratorion 5,5 kW:n taajuusmuuttajaohjattua

oikosulkukonetta käytettiin voimakoneena, ja sille annettiin nopeusohjeeksi 1465 rpm. Vaconin verkkovaihtosuuntaajan INU-yksiköllä annettiin 2,2 kW:n oikosulkukoneelle nopeusohjeeksi 1430 rpm. Tällöin kone toimi verkkoonpäin ylisynkronisena moottorina, mikä näkyy negatiivisena momenttina (-98,6%) kuvasta 24. Kuvasta 24 nähdään myös moottorivirran tehollisarvo 5 A:a ja moottorin jännite 381,8 V:a.



Kuva 24. NCDriven valvontaikkuna generaattoripuolen taajuusmuuttajalta nimellistilanteesta koneen toimiessa generaattorina

Verkkovaihtosuuntaajan valvonta-arvot näkyvät kuvassa 25. Huomataan, että moduloinnin ollessa käynnissä, DC-piirin jännite pysyy referenssin suuruisena. Käytettynä välipiirin jännitereferenssinä oli 105 %:a, mikä tarkoittaa 400 V:n syöttöverkossa noin 567 VDC:tä ($1,05 \times 1,35 \times 400 \text{ V} = 567 \text{ V}$). Kerroin 1,05 tulee käytetystä tasajännitereferenssistä ja kerroin 1,35 on ohjaamattoman 6-pulssisillan vakiotermin. Loisivirtareferenssinä käytettiin 0 %:a, joten verkkoon syötetään pelkkää pätövirtaa.



Kuva 25. Sama tilanne kuin edellisessä kuvassa, mutta valvontanäkymä on verkkovaihtosuuntaajalta

6.3 Verkkovaihtosuuntaajan parametointi ja testaus

Verkkovaihtosuuntaajaan parametroiin tehtiin NCDrivella kestmagneettigeneraattorin nimellisarvot INU-yksikköön ja verkon puolen parametrit, kuten verkkojännite ja virta AFE-yksikköön. Koska yksiköitä ohjataan Profibus-väylän kautta, selvitettiin manuaalista Vaconin määrittelemät osoitteet liikennöitävälle datalle. AFE-sovelluksen ohjaussanalle ja välipiirin jännitereferenssille on kiinteästi asetettu paikat ennen prosessidatantentää. Valvomoon otettiin AFE-yksiköstä ohjaussana biteiksi purettuna, jännitereferenssi sekä virran ja jännitteen mittaukset (LIITE 3). Kuvissa 26-27 esitetään AFE-sovelluksen Profibus-profiilin ohjaus- ja tilakentät.

Signals from Overriding System to Vacon regenerative Drive.

Profibus Data Name	Signal Name	Min	Max	FB Scale	Scaling Description
Control Word	Main Control Word				See bitwise description below
Reference	Voltage Reference	105	130 for 500V 115 for 690V		DC Voltage reference as a percentage of nominal DC voltage when the unit is controlled from Fieldbus.
Process Data IN1					Reserved for future use.
Process Data IN2	Aux. Control Word 1				See bitwise description below
Process Data IN3					Reserved for future use.
Process Data IN4					Reserved for future use.
Process Data IN5					Reserved for future use.
Process Data IN6					Reserved for future use.
Process Data IN7					Reserved for future use.
Process Data IN8					Reserved for future use.

Kuva 26. Väylälle kirjoitettavan datan osoitteet AFE-sovelluksessa /12/

Signals from Vacon Drive to Overriding system

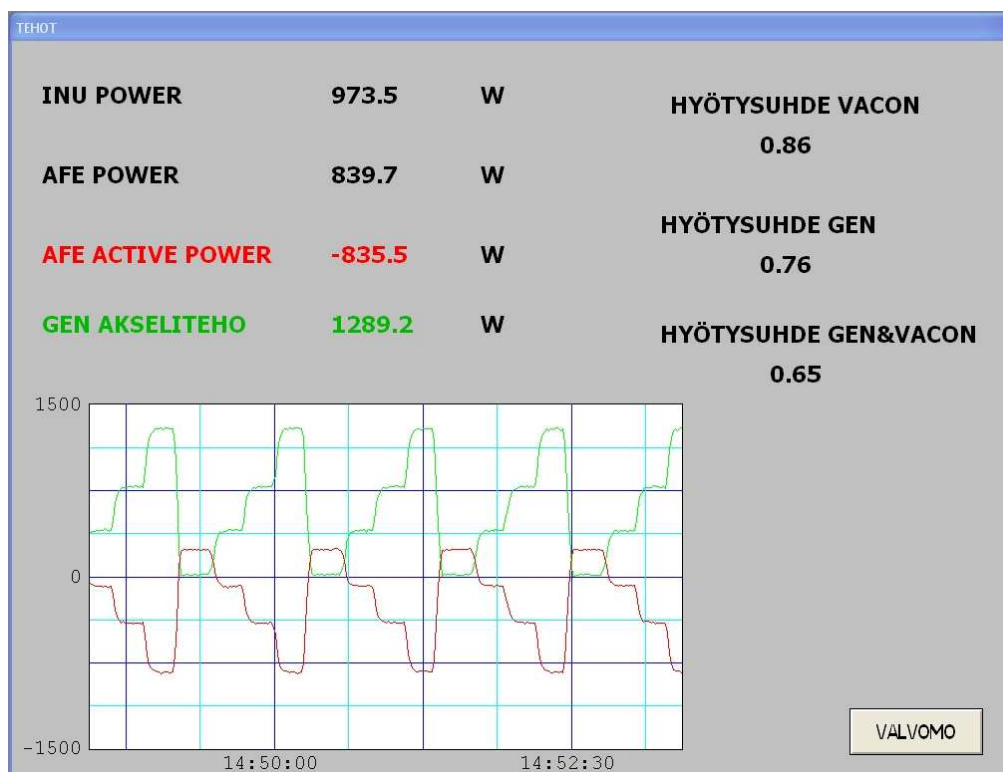
Profibus Data Name	Signal Name	FB Scale	Scaling Description
Main Status Word	Main Status Word		See bitwise description below
DC Voltage	DC Voltage	1=1V	DC Voltage in Volts
ProcessDat Out1	Total current	10=1A	Total Current
ProcessDataOut2	Warning Word 1		See bitwise description below
ProcessDataOut3	Fault Word1		See bitwise description below
ProcessDataOut4	Fault Word2		See bitwise description below
ProcessDataOut5	Digital Input Status Word 1		See bitwise description below
ProcessDataOut6	Digital Input Status Word 2		See bitwise description below
ProcessDataOut7			Reserved for future use.
ProcessDataOut8	Supply Voltage	1=1V	Supply voltage in volts

Kuva 27. Väylältä luettavan datan osoitteet AFE-sovelluksessa /12/

INU-yksikössä oli käytössä järjestelmäkäyttösovellus, jonka Profibus-profiili poikkeaa edellä selvitetystä AFE-sovelluksesta. Tarkoituksena oli ohjata kestopagneettigeneraattoria momenttiohjeella, mutta koska sitä ei voitu ajaa Closed Loop-säädöllä ilman takometriä, päädyttiin generaattoria jarruttamaan momenttirajaa vasten. Väylän kautta valvomoon tuotiin momenttiohje ja momenttiraja generaattorina prosessidatan sisäänmenoissa syötettäväksi taajuusmuuttajalle. Mittausarvot taajuusmuuttajalta ja edellä mainitut ohjaussanat näkyvät liitteen 3 valvomokuvista.

Testijärjestelmän taajuusmuuttajien mittausarvoista voitiin laskea mekaaninen teho generaattorin akselilla, sähköteho generaattorin navoilla sekä

verkkoon syötetty sähköteho AFE-sovelluksen mittaamasta pätövirrasta ja verkon pääjännitteestä. Koko järjestelmän hyötysuhde laskettiin logiikalla ja siitä tehtiin näyttö valvomoon. Hyötysuhteen mittaukseen käytettiin tietoa voimakoneen nimellismomentista ja laskettiin logiikalla voimakoneen taajuusmuuttajan mittaamasta momentin prosenttiarvosta lukuarvo. Tämä kerrottiin akselin kulmanopeudella, jolloin saatiin akseliteho. Akselitehoa verrattiin AFE-sovelluksen mittaamasta verkon pätövirrasta laskettuun tehoon, jolloin saatiin generaattori-verkkovaihtosuuntaajayhdistelmän hyötysuhde (Kuva 28). Kuvassa 28 on hetkellinen tehojen ja hyötysuhteen mittaus valvomosta.

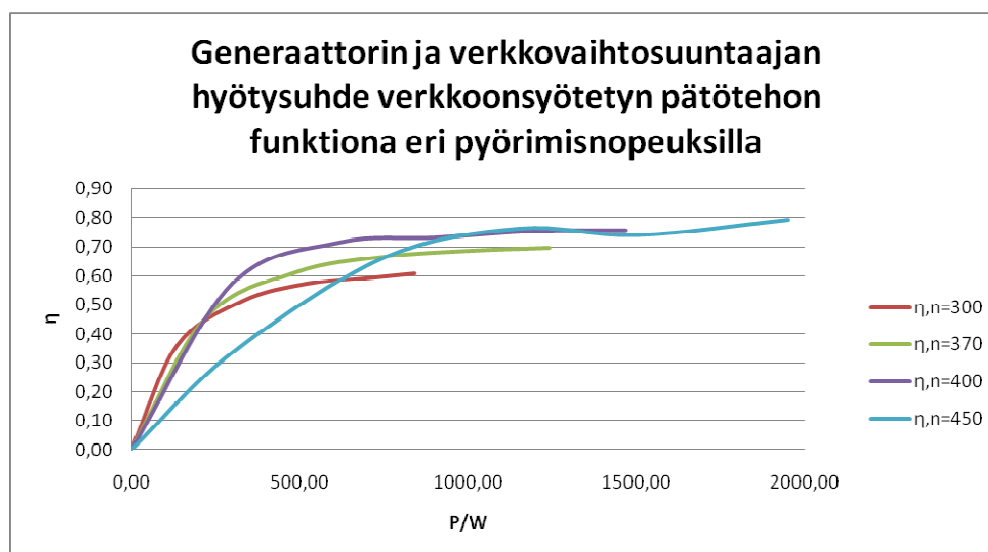


Kuva 28. Tehojen ja hyötysuhteiden mittaukset

Taajuusmuuttajien mittausarvoista logiikalla lasketuista tehoista otettu hyötysuhdemittaus tarkastettiin laboratoriossa. Tehtiin mittaukset, jossa voimakoneena käytettiin Technobothnian kuormituspenkin 5,5 kW:sta taajuusmuuttajaohjattua voimakonetta, ja verkkoon syötetty teho mitattiin verkkovaihtosuuntaajan kytkinvarokkeen navoista Yokokawan kolmivaiheisella

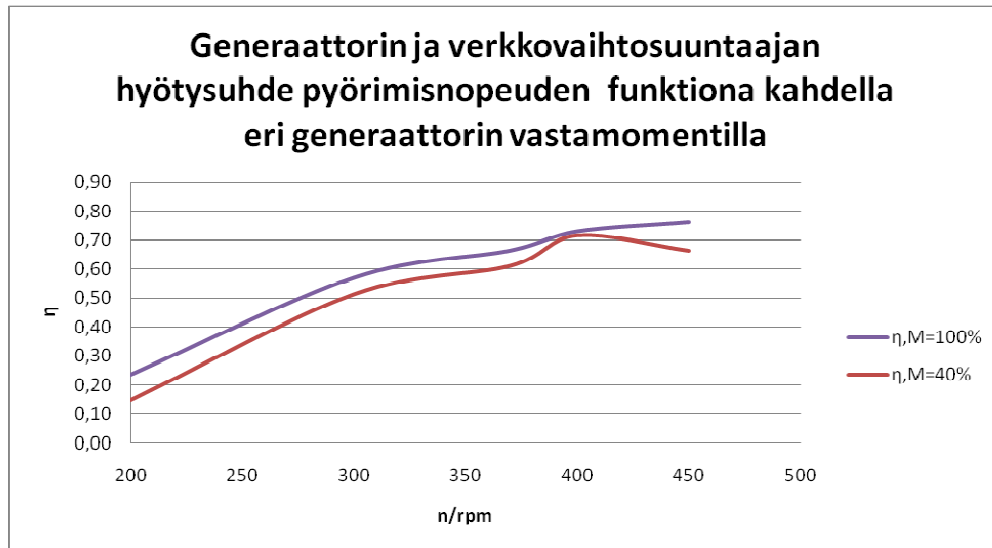
pätötehomittarilla. Generaattorin akselimomentti saatiin laskettua voimakoneen momentti- ja pyörimisnopeusanturitiedoista. Generaattori-verkkovaihtosuuntaajayhdistelmän hyötysuhde eri pyörimisnopeuksilla ja momenteilla saatiin laskettua pätö- ja akselitehon suhteesta (LIITE 5).

Kuvassa 29 on generaattori-verkkovaihtosuuntaajayhdistelmän hyötysuhde esitetty pätötehon funktiona neljällä eri pyörimisnopeudella. Huomataan, että hyötysuhde paranee, kun generaattoria pyöritetään suuremmalla nopeudella. Tällöin myös toiminta-alue hyvällä hyötysuhteella on laajempi. Esimerkiksi 400 rpm:llä hyötysuhde ylittää 70 %:a jo noin 500 W:n pätöteholla. Paras mitattu hyötysuhde 79 %:a saavutettiin tilanteessa 450 rpm, 1950 W:a. Tulokset tukevat aiemmin esitettyä teoriaa siitä, että pientuulivoimalaa pyritään ajamaan lähellä nimellisyörimisnopeutta.



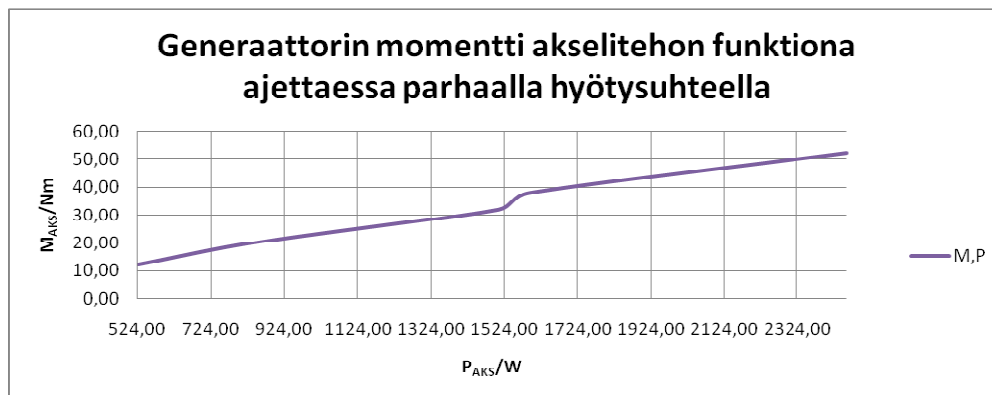
Kuva 29. Hyötysuhde verkkoonsyötetyn pätötehon funktiona

Myös kuvasta 30 huomataan, että suurempi generaattorin pyörimisnopeus parantaa hyötysuhdetta. Myös generaattorin kuormittaminen parantaa hyötysuhdetta. Kuvajaan on otettu käyrät kahdella eri vastamomenttirajan arvolla. INU-yksiköllä valvomosta annettu vastamomenttiraja on punaisessa käyrässä 40 %:a ja violetissa 100 %:a. Suuremmalla kuormituksella ajettuna, on hyötysuhde parempi koko mitatun pyörimisnopeusalueen.



Kuva 30. Hyötysuhde pyörimisnopeuden funktiona

Kuvassa 31 on esitetty kestopagneettigeneraattorin akselin momentti tehon funktiona. Mittapisteinä oli viisi generaattorilla akselille annettavan vastamomentin arvoa. Pienin käytetty vastamomentin raja-arvo valvomosta oli 20 %:a ja suurin 100 %:a. Jokaisen viiden mittapisteen kohdalta laskettiin hyötysuhteet eri pyörimisnopeuksilla. Momentin ja tehon arvot valittiin parhaan hyötysuhteen saavuttaneen pyörimisnopeuden kohdalta. Kuten aiemmin todettiin, paras hyötysuhde saavutetaan lähellä generaattorin nimellisyörimisnopeutta. Koska pyörimisnopeus pysyy vakiona ja momentti kasvaa, on kuvaaja lineaarinen.



Kuva 31. Generaattorin momentti akselitehon funktiona parhaalla hyötysuhteella

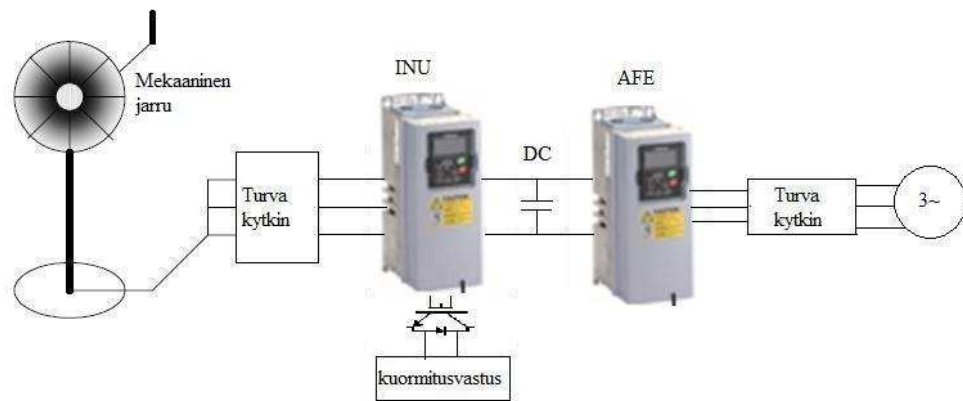
7 PIENTUULIVOIMALA ERI TOIMINTATILANTEISSA

Pientuulivoimalan turvallisen toiminnan kannalta on mietittävä kaikki sen eri toiminta-alueet erikseen ja sovellettava käytettävissä olevia säätö- ja rajoitustoimenpiteitä. Voimalaitteisto ei saa aiheuttaa häiriötä sähköverkkoon käynnistyksen eikä normaalin käytön aikana. Laitteiston syöttämän sähkön tulee täyttää yleiseen jakeluun tarkoitetun sähkön laatustandardien vaatimukset. Laitteisto on tätä varten varustettava tarpeellisilla säätölaitteilla. Voimalaitteisto on varustettava laitteilla, joilla sen voi erottaa yleisestä jakeluverkosta. Voimalaitteisto ei saa jäädä syöttämään jakeluverkonhaltijan verkkoa silloin, kun verkkoa ei syötetä muualta. Voimalaitteisto on varustettava vähintään seuraavilla turvallisen ja tarkoituksenmukaisen toiminnan edellyttämällä suojauksilla: /11/

- Yksinään syötön estämiseksi jänniterele, joka laukaisee generaattorin irti verkosta, kun jännite poikkeaa enemmän kuin 15 %:a nimellisjännitteestä, tai taajuusrele, joka laukaisee generaattorin irti verkosta, kun taajuus poikkeaa enemmän kuin 3 Hz:ä nimellistaajuudesta (50 Hz).
- Kuluttajalaitteiden suojaus vaarallisilta jännite- ja taajuuspoikkeamilta:
 - ◆ ylijännitesuoja $U >$
 - ◆ alijännitesuoja $U <$
 - ◆ ylitaajuussuoja $f >$
 - ◆ alitaajuussuoja $f <$
- Oikosulkusuojana ylivirtarele
- Ylikuormitussuoja
- Takatehorele

Tutkittavan 2 kW:n pientuulivoimalan tehonsäätö tapahtuu pelkästään generaattorin vastamomenttia muuttamalla tuulennopeuden funktiona. Voimalalta vaaditaan kuitenkin suojautumista muun muassa verkon vikatilanteissa ja erittäin

suurilla tuulenopeuksilla. Kuva 32 esittää vaadittavat komponentit, kun verkkoonkytkentä tehdään Vaconin verkkovaihtosuuntaajalla. Kuvasta puuttuu yllämainitut suojarieleet, mutta samat toiminnot voidaan oletettavasti toteuttaa Vaconin taajuusmuuttajan sisäänrakennetuilla suojuuksilla.



Kuva 32. Periaatekuva verkkoonkytketyn pientuulivoimalan komponenteista

7.1 Käynnistyminen ja toiminta pienellä tuulenopeudella

Vaconin verkkovaihtosuuntaaja tarvitsee käynnistykseen ulkoisen latausjännitteen välipiiriin. Laboratorion testilaitteistossa latausteho otetaan syöttävästä sähköverkosta verkkokommutoidulla 6-pulssisillalla. Kun lataus on valmis, voidaan AFE käynnistää, jolloin latauspiirin kontaktorin pääkoskettimet avautuvat. Toimivan pientuulivoimalan käynnistyssekvenssissä välipiiriin lataus aloitettaisiin, kun tuulen nopeus ylittää asetellun rajan. Tämän jälkeen AFE- ja INU-ohjauksyksiköt käynnistetään. Voimala pyrkii tuottamaan parhaan mahdollisen tehon INU-yksikköön ohjelmoidun optimointialgoritmin avulla. Jos tuulenopeus alittaa käynnistysrajaksi asetellun arvon, ja pysyy sen alle riittävän pitkän ajan, ajaa sekvenssi voimalan alas käänteisessä järjestyksessä.

7.2 Toiminta suurella tuulenopeudella

Tutkittavassa tuulivoimalassa on myrskysuojauksena kääntymismekanismi, joka peräsimen kohdistuvalla tuulen aiheuttamalla voimalla kääntää roottorin pois tuulesta myrskyllä. Jos verkkoon syötettävää tehoa halutaan rajoittaa, voidaan

käyttää puolijohdekytkimellä ohjattua kuormitusvastusta häivyttämään osa tuotetusta tehosta. Jos taustaverkko vikaantuu tai katoaa, kun pientuulivoimala toimii suurella tuulennopeudella, täytyy jarruttamiseen kuuluva generaattoriteho pystyä kytkemään kuormitusvastukseen. Tätä toimintoa varten tarvitaan jännitteen ja taajuuden mittaustiedot AFE-yksiköltä.

7.3 Toiminta taustaverkon vikatilanteissa

Yleiseen jakeluverkkoon kytketyn pientuulivoimalan on katkaistava tehonsyöttö, jos liittymispisteessä verkko vikaantuu. Pikajälleenkytkennän ajaksi generaattorin jarrutusteho voidaan ohjata kuormitusvastukseen, ja jakeluverkon palatessa, tahdistaa generaattori verkkoon uudestaan. Pientuulivoimala ei saa yksin syöttää jakeluverkkoa silloin, kun sitä ei syötetä muualta, koska verkon uudelleen syöttäminen on voitava aloittaa ilman asiakkaan voimalaitteistoon kohdistuvia toimenpiteitä. Erottaminen on tarpeen myös jakeluverkon työturvallisuuden varmistamiseksi ja sen vuoksi, että pienvoimalaitoksella ei yleensä pystytä estämään verkkoon liitetyille sähkölaitteille vaarallisten jännite- ja taajuuspoikkeamien syntymistä silloin, kun voimalaitteisto jää yksinään syöttämään verkkoa.

Voimalaitteiston suojaukselle ja rakenteelle suositellaan asetettavan sellaisia vaatimuksia, että laitteisto sietää rinnankäyntitilanteessa rikkoutumatta jakeluverkon käyttöhäiriöt, kuten oikosulut, maasulut pikajälleenkytkentöineen, yllättävät jakelukeskeytykset ja taajuushäiriöt. Edellä mainitut häiriöt voivat aiheuttaa voimalaitteistolle, jännitteen palatessa, tahdistamattoman jälleenkytketymisen elleivät suojarieleet ole erottaneet voimalaitteistoa verkosta.

8 YHTEENVETO

Pientuulivoimaloiden käyttö on lisääntymässä uusiutuvien energiantuotantomuotojen myötä. Kiinteistön omalla tuulivoimalalla voidaan tuottaa sähköä luonnonmukaisesti omiin tarpeisiin ja näin pienentää sähkölaskua. Puolijohdetekniikan kehittyessä voidaan pientuulivoimaloiden käyttöä monipuolistaa perinteisestä akun lataus- tai lämmityskäytöstä sähkönjakeluverkkoon kytkeytyviksi voimaloiksi. Tämä edellyttää tarkan jännitteen ja taajuuden säädön, jotta tuuligeneraattori ei aiheuta häiriötä verkossa. Lisäksi tarvitaan suojauksia verkon vikatilanteissa, jotta saarekekäyttö estetään ja jakeluverkonhaltija hallitsee kaikki verkkoon kytkeytyvät voimalaitokset.

Opinnäytetyön tavoitteena oli aloittaa kehitystyö verkkoon kytkettävän pientuulivoimalan testausympäristölle Technobothnian laboratoriossa. Aloitettun kehitystyön lopputuloksena pientuulivoimala on tarkoitus kytkeä verkkoon Vaconin verkkovaihtosuuntaajalla. Työssä mietittiin pientuulivoimalan laitteistolta vaadittavia suojauksia ja esitettiin säätötoimenpiteet verkkoonsyötetyn tehon optimoimiseksi.

Vaconin verkkovaihtosuuntaaja otettiin käyttöön laboratorio-olosuhteissa. Voimakoneella pyörittämällä, pientuulivoimalan generaattori saatiin syöttämään tehoa sähköverkkoon. Vaconin AFE-sovellus soveltuu pientuulivoimalakäyttöön, mutta jatkossa voitaisiin kehittää sovellus pientuulivoimalan generaattorin INU-ohjausyksikölle. Työssä tehtiin valvomosovellus, jolla päästään Siemensin ohjelmoitavan logiikan ja Profibus-kenttäväylän avulla kiinni testilaitteiston taajuusmuuttajiin. Jatkossa työssä kehitettyä valvomoa voidaan hyödyntää mahdollisesti Technobothnian laboratorioon tulevan tuulivoimalatyöpiirteen pohjana.

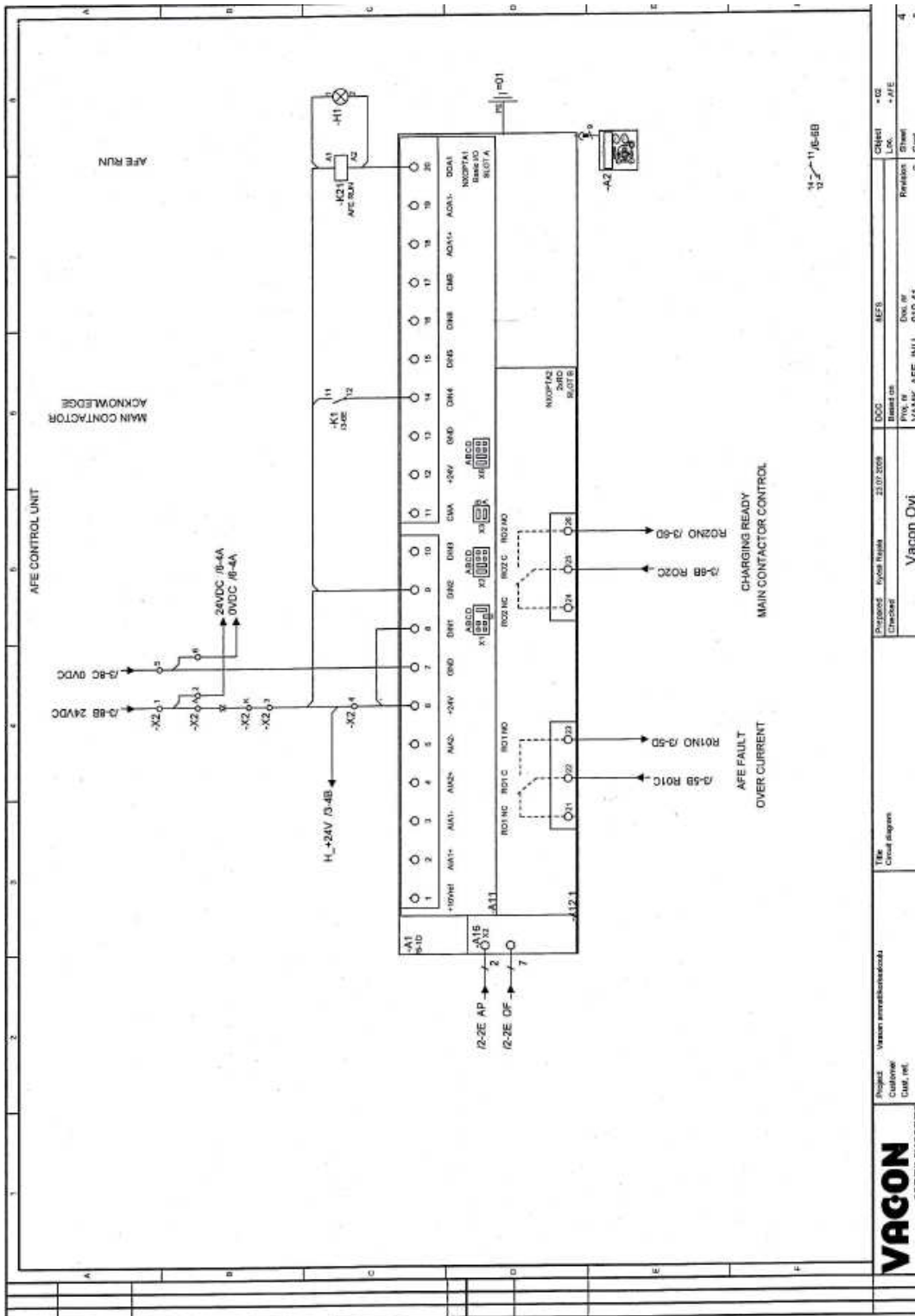
LÄHDELUETTELO

- /1/ A.K. Wright, D.H. Wood. 2004. [online] The starting and low wind speed behaviour of a small horizontal axis wind turbine. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 92 (2004) Saatavilla [www-muodossa:](http://www.muodossa: <URL:http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V3M-4DBSY78-1&_user=10&_coverDate=12%2F01%2F2004&_alid=1258706072&_rdoc=2&_fmt=high&_orig=search&_cdi=5734&_sort=r&_docanchor=&view=c&_ct=153&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=5d1a21678db46ef5e899ffa51cd0fa4a>)
- <URL:http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V3M-4DBSY78-1&_user=10&_coverDate=12%2F01%2F2004&_alid=1258706072&_rdoc=2&_fmt=high&_orig=search&_cdi=5734&_sort=r&_docanchor=&view=c&_ct=153&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=5d1a21678db46ef5e899ffa51cd0fa4a>.
- /2/ Danish Wind Industry Association [online]. [viitattu 6.3.2010]. Saatavilla [www-muodossa:](http://www.muodossa: <URL: http://guidedtour.windpower.org/en/tour/wtrb/powerreg.htm >) <URL: <http://guidedtour.windpower.org/en/tour/wtrb/powerreg.htm> >.
- /3/ Enercon GmbH kotisivut <URL: <http://www.enercon.de/>>.
- /4/ Energiateollisuus 2009 [online]. [viitattu 27.3.2010]. Mikrotuotannon liittäminen verkkoon. Verkostosuositus YA9:09. Saatavilla [www-muodossa:](http://www.muodossa: <URL:http://www.energia.fi/content/root%20content/energiateollisuus/fi/s%c3%a4hk%c3%b6/s%c3%a4hk%c3%b6verkko/pientuotanto/liitteet/mikrotuotannon%20liitt%c3%a4minen%20verkostosuositus_lopullinen_2009.pdf?SectionUri=%2ffi%2fsahko%2fsahkoverkko%2fpientuotanto>)
- <URL:http://www.energia.fi/content/root%20content/energiateollisuus/fi/s%c3%a4hk%c3%b6/s%c3%a4hk%c3%b6verkko/pientuotanto/liitteet/mikrotuotannon%20liitt%c3%a4minen%20verkostosuositus_lopullinen_2009.pdf?SectionUri=%2ffi%2fsahko%2fsahkoverkko%2fpientuotanto>.
- /5/ Gipe, Paul 1999. Wind energy basics: a guide to small and micro wind systems. 122p. England. Chelsea Green Publishing Company.
- /6/ Jamal A. Baroudi, Venkata Dinavahi, Andrew M. Knight 2006. [online] A review of power converter topologies for wind generators. University of Alberta, Edmonton, AB., Canada. Saatavilla [www- muodossa:](http://www-muodossa:)

<URL:http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V4S-4MVN01F-2&_user=10&_coverDate=11%2F30%2F2007&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1270200383&_rerunOrigin=scholar.google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=6731298be2f7762a4346682e7ee0a7ae>.

- /7/ Jokinen, Kari 2008. Moottorikäyttöjen ohjaus ja suojaus. Vaasan ammattikorkeakoulu. Opetusmoniste.
- /8/ Jokinen, Kari 2008. Suuntaajatekniikan sovellutukset. Vaasan ammattikorkeakoulu. Opetusmoniste.
- /9/ Manwell, J.F. & McGowan, J.G. & Rogers, A.L. 2002. Wind energy explained: theory, design and application. 577p. University of Massachusetts, Amherst, USA. John Wiley & Sons, Ltd., s. 2-19, s.328-335.
- /10/ Roaming Oy:n kotisivut [online]. [viitattu 20.4.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: <http://www.roaming.fi/>>.
- /11/ Sähköasennusten erityisohje 4.01/98 [online]. [viitattu 20.4.2010]. Saatavilla www-muodossa <URL: <http://www.satavakka.fi/skansio/docs/40198.doc>>.
- /12/ Vacon Oyj 2008. Active front end AFE Application Manual. Käsikirja 7.10.2008 [online]. [viitattu 9.3.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: <http://www.vacon.com/File.aspx?id=462996&ext=pdf&routing=396771&name=UD01129E> >.
- /13/ Vacon Oyj 2007. Vacon NX products for Common DC Bus Systems. Esite 19.9.2007 [online]. [viitattu 9.3.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL:http://www.vacon.com/File.aspx?id=469620&ext=pdf&routing=396771&name=BC00249K>.

- /14/ Vacon Oyj 2006. Vacon NXP and NXC. Esite 10.7.2006 [online]. [viitattu 4.2.2010]. Saatavilla [www-muodossa: <URL:http://www.vacon.fi/File.aspx?id=463319&ext=pdf&routing=396771&webid=396774&name=BC00199A>](http://www.vacon.fi/File.aspx?id=463319&ext=pdf&routing=396771&webid=396774&name=BC00199A).
- /15/ Verkkonen, Vesa 2007. Sähkömoottorikäytöt. Tahtikoneet. Vaasan ammattikorkeakoulu. Opetusmoniste.
- /16/ Vihriälä, Harri 2002. Control of Variable Speed Wind Turbines. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Väitöskirja.
- /17/ Yangzhou Shenzhou Wind-driven Generator Co., Ltd (SWG) 2008. Users' manual for WTGS from SWG-2008-12-17 [online]. [viitattu 5.2.2010]. Saatavilla [www-muodossa: <URL: http://www.f-n.cn/eweb/uploadfile/20081217154433.pdf >](http://www.f-n.cn/eweb/uploadfile/20081217154433.pdf).



Product: Vacon inverters/converters
 Title: Circuit diagram

Drawn: Vaco Jyoti
 Checked: Vaco Jyoti

Doc. No: VAAK_AFE_INU_01D-41

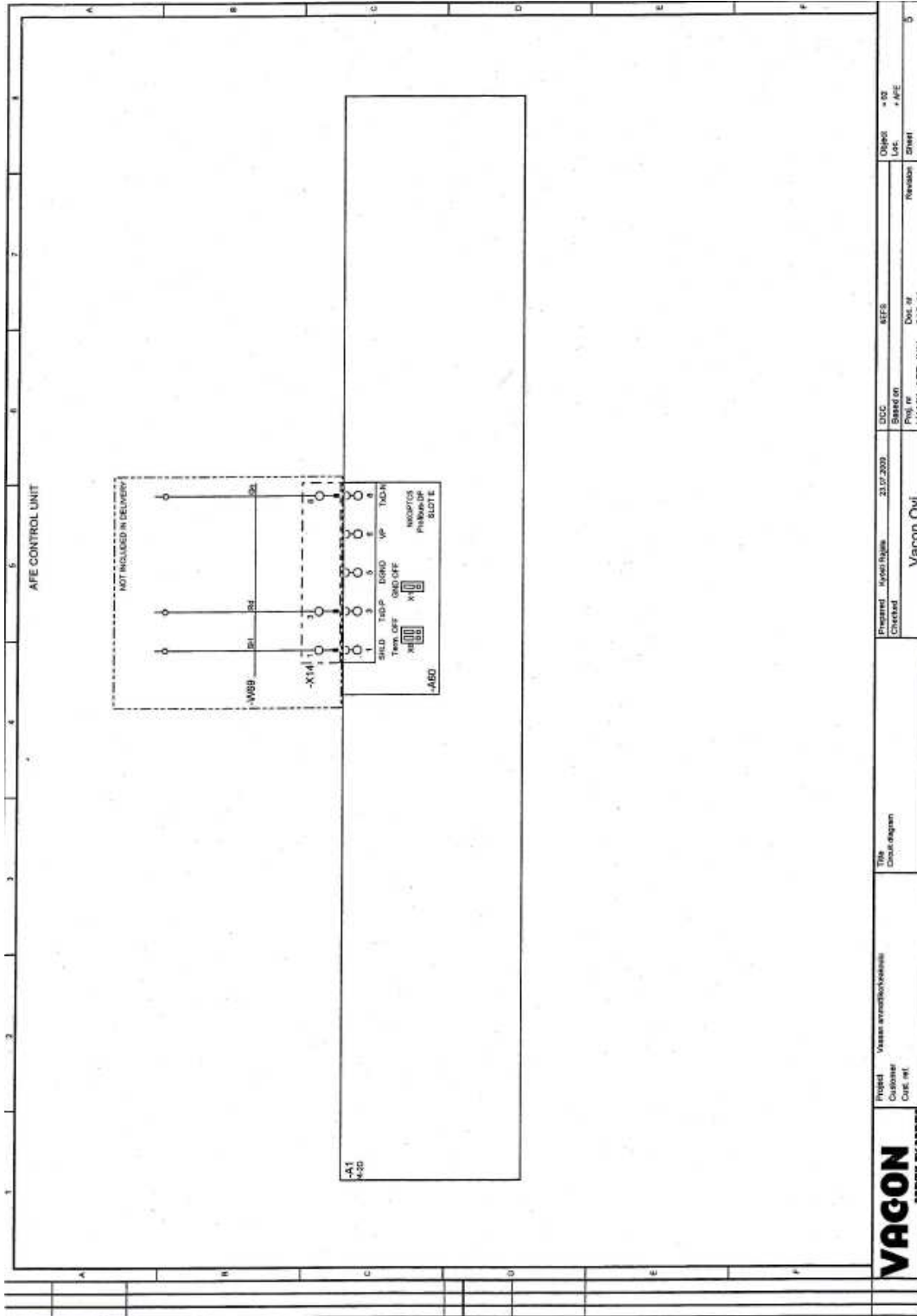
Rev. No: 1

Rev. No: 1

Rev. No: 1

Rev. No: 1

Rev. No: 1



FC1 - <offline>

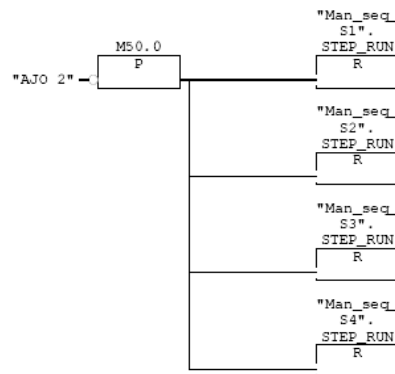
```
"Wind_Speed_Ramp"
Name:                               Family:
Author:                              Version: 0.1
Time stamp Code:                     Block version: 2
                                      04/24/2010 02:19:51 PM
Interface:                            04/13/2010 04:11:54 PM
Lengths (block/logic/data):          01204 01046 00044
```

Block: FC1

Toimilaitteina tuulen simuloimisen sekvenssissä toimivat ramppilohkot. tuulen simulointi koostuu neljästä ramppi lohkoista, joille voidaan asetella valvomosta rampin sisäänmeno, nousunopeus (SLOPE, CYCLE) sekä automaattisessa sekvenssissä askeleessa kulutettu aika. Manuaalisessa rampituksessa (AJO 2) pysäytetään ramppi johonkin valittavaan askeleeseen, ja valitaan seuraava askel eli sisäänmenonopeusohje. Kummassakin sekvenssissä ohjattavana suureena on moottorin pyörimisnopeusohje taakse.

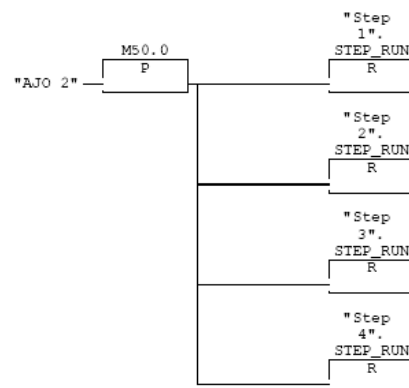
Network: 1 Step Run - Tämä askel on päällä

Kun Manuaali rampitus (Ajo 2) laitetaan pois päältä, nollataan manuaali sekvenssin STEP_RUN tilat

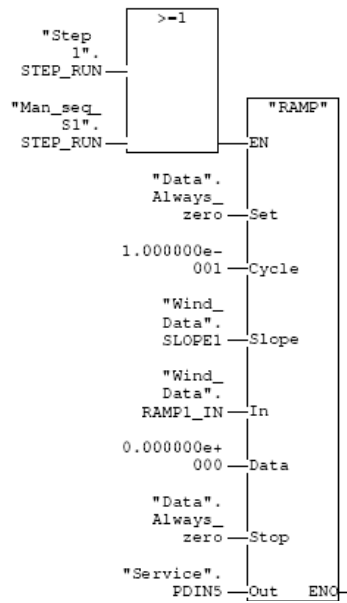


Network: 2 Step Run - Tämä askel on päällä

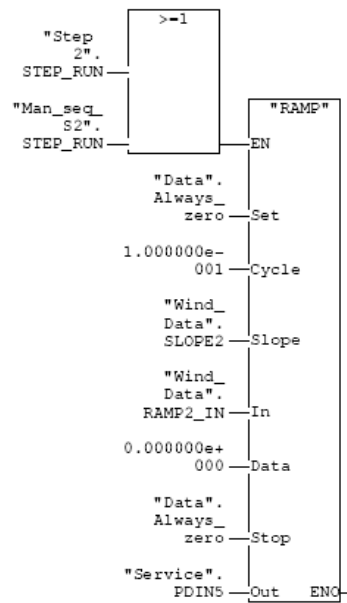
Kun Manuaali rampitus (Ajo 2) laitetaan päälle, nollataan automaattisen rampituksen sekvenssin STEP_RUN tilat



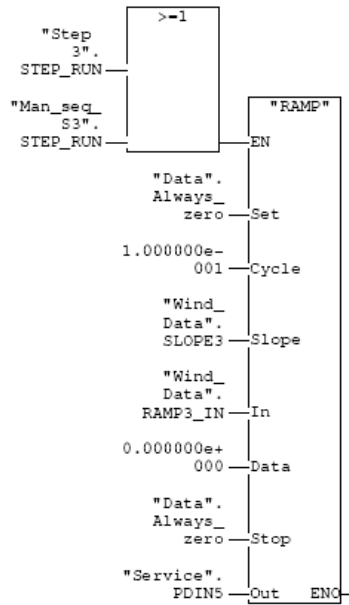
Network: 3



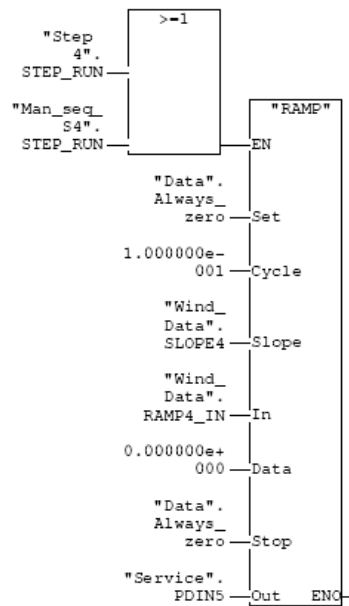
Network: 4



Network: 5



Network: 6

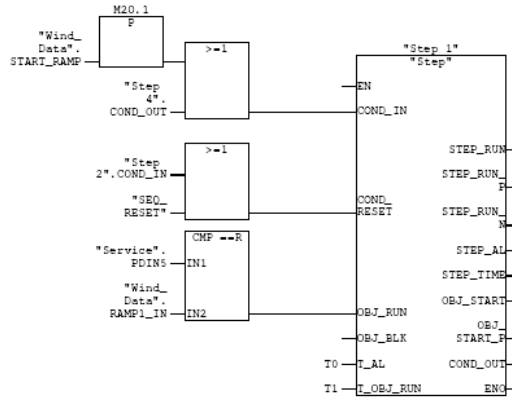


FC2 - <offline>

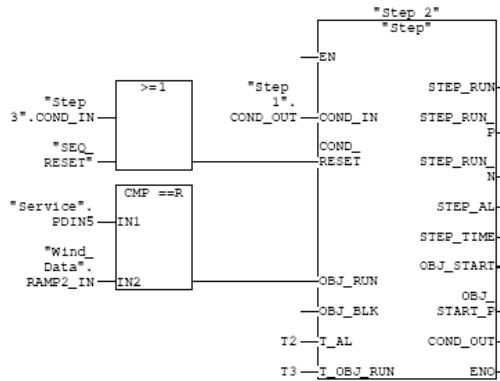
"Wind_speed_seq"
 Name: Family:
 Author: Version: 0.1
 Block version: 2
 Time stamp Code: 04/24/2010 02:31:31 PM
 Interface: 04/15/2010 11:53:27 AM
 Lengths (block/logic/data): 00634 00528 00006

Block: FC2
 Automaattisen rampituksen sekvenssi - Seuraava askel päälle, kun nopeusohje saavuttaa toimilaitteeseen (RAMP-lohko) asetetun rajan. Kaikki vaadittava aseteltavissa valvomosta.

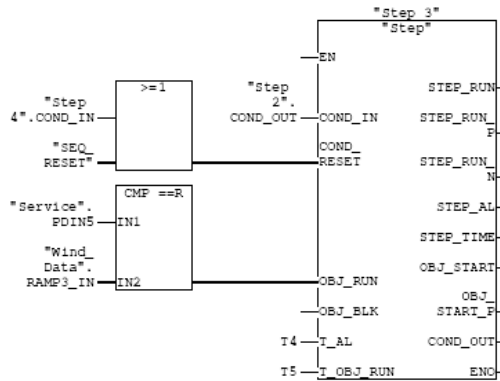
Network: 1



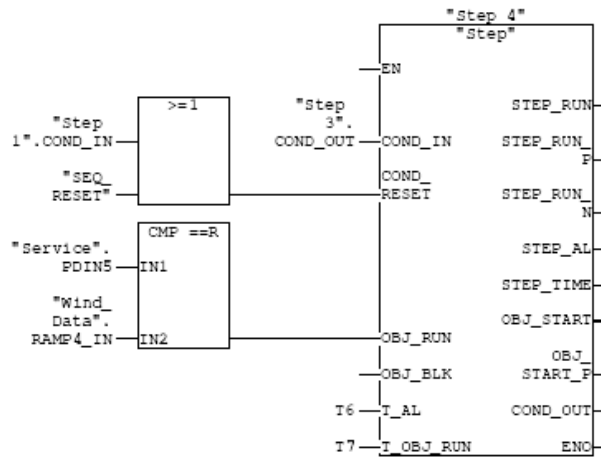
Network: 2



Network: 3



Network: 4



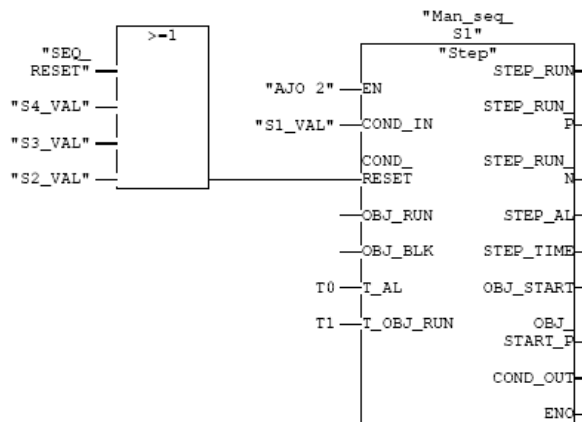
FC4 - <offline>

"Wind_Ramp_Man"
 Name: Family:
 Author: Version: 0.1
 Block version: 2
 Time stamp Code: 04/24/2010 01:51:56 PM
 Interface: 04/24/2010 01:31:17 PM
 Lengths (block/logic/data): 00500 00394 00006

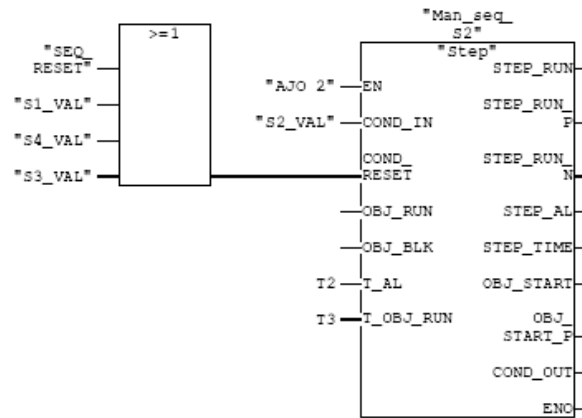
Block: FC4

Manuaalisen rampituksen sekvenssi - Askeleet eivät tule itsestään valmiiksi vaan niitä ohjataan valvomosta. Ohjattavana toiminlaitteena ramppilohkot, jotka muuttavat moottorin nopeusohjetta.

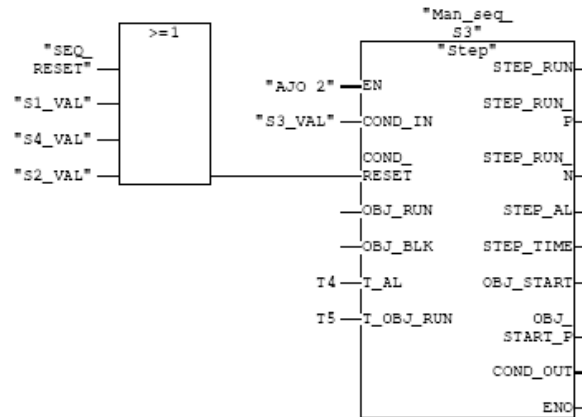
Network: 1



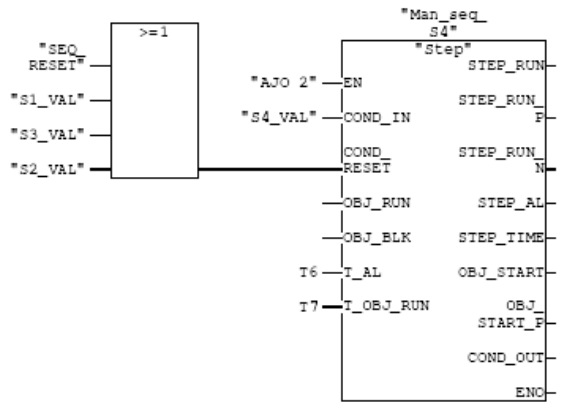
Network: 2



Network: 3



Network: 4



Valvomo

ENABLE	●	NOPEUSOHJE	NOPEUSOLO
STOP_VAPAASTI	●	0.0 RPM	0.0 RPM
HÄTÄSEIS	●	CONTROL	STATUS
START	●	PD1 0.0 Mom.raja 0-300%	PD1 -10.9 Hz
RAMP_OUT=0	●	PD6 ● 0 = Nop, 1 = Mom	PD2 -216.0rpm
RAMPIN PITO	●	AFE	PD3 6.2 A
RAMP_IN=0	●	INU	PD4 0.0 %(Nm)
RESET	●	SALLI ASKELLUS ●	PD5 1.0 %(W)
SALLI VÄYLÄ	●	ASKEL TAAKSE ●	PD6 91.9 V
WATCHDOG	●	ASKEL ETEEN ●	PD7 555.0 V(DC)
		NOPEUSASKEL TAAKSE	PD8 60.0 deg
		272.0 RPM	WIND SIMULATION
		NOPEUSASKEL ETEEN	MOMENTIN OPTIMOINTI
		0.0 RPM	

INU

ENABLE	●	NOPEUSOHJE	NOPEUSOLO
STOP_VAPAASTI	●	0.0 RPM	0.0 RPM
HÄTÄSEIS	●	CONTROL	STATUS
START	●	PD1 0.0 Mom.ohje -300-300%	PD1 0.0 Hz
RAMP_OUT_0	●	PD2 0.0 Mom.raja 0-300%	PD3 0.0 A
RAMPIN PITO	●	PD6 ● 0 = Nop, 1 = Mom	PD4 0.0 %(Nm)
RAMP_IN_0	●	Käyttö on nopeussäädettynä, mutta sitä voidaan ajaa momenttirajaa vasten [PD2]	PD5 0.0 %(W)
RESET	●		PD6 0.0 V
SALLI VÄYLÄ	●		PD7 563.0 V(DC)
WATCHDOG	●		
			VALVOMO

AFF

<input type="button" value="K6-OHJ"/>		DC-JÄNNITE REFERENSSI	DC-JÄNNITE OLOARVO
<input type="button" value="STOP=0"/>		0.0 VDC (%)	563.0 VDC
<input type="button" value="START"/>		RATED LINE CURRENT	
<input type="button" value="RESET"/>		0.0 A	STATUS
<input type="button" value="DC_REF1"/>		115 %	PD2 0.0 A
<input type="button" value="DC_REF2"/>		120 %	PD8 0.0 V(Syöttö)
<input type="button" value="SALLI VÄYLÄ"/>			ACTIVE CURRENT (PD 7)
<input type="button" value="WATCHDOG"/>			0.0 %
			ACTIVE POWER
			0.0 W

Tuulen simulointi

<input type="button" value="START RAMP"/>		<input type="button" value="AJO 2"/>		MAN
<input type="button" value="RESET SEQ"/>		PYÖRIMISNOPEUS 1	50.0	
		PYÖRIMISNOPEUS 2	200.0	
		PYÖRIMISNOPEUS 3	350.0	
		PYÖRIMISNOPEUS 4	228.0	
PYÖRIMISNOPEUS -74.0 rpm		SLOPE 1	100.00	
NOPEUSOHJE TAAKSE		SLOPE 2	100.00	
83.0 RPM		SLOPE 3	200.00	
<input type="button" value="SALLI ASKELLUS"/>		SLOPE 4	100.00	
<input type="button" value="ASKEL TAAKSE"/>		ASKEL 1-2 AIKAVIIVE	0.0 s	
<input type="button" value="ASKEL ETEEN"/>		ASKEL 2-3 AIKAVIIVE	0.0 s	<input type="button" value="MOMENTIN OPTIMOINTI"/>
<input type="button" value="START"/>		ASKEL 3-4 AIKAVIIVE	0.0 s	
		ASKEL 4-1 AIKAVIIVE	0.0 s	<input type="button" value="VALVOMO"/>

Momentin optimointi

PYÖRIMISNOPEUS -300.0 rpm
VASTAMOMENTTI REF 50.00 %
VASTAMOMENTTI ACT 13.20 %

WIND SIMULATION

START RAMP ●
 RESET SEQ ●
 SALLI ASKELLUS ●
 ASKEL TAAKSE ●
 ASKEL ETEEN ●
 START ●

ALARAJA 200
 YLÄRAJA 400
 SLOPE 2
 CYCLE 0.10

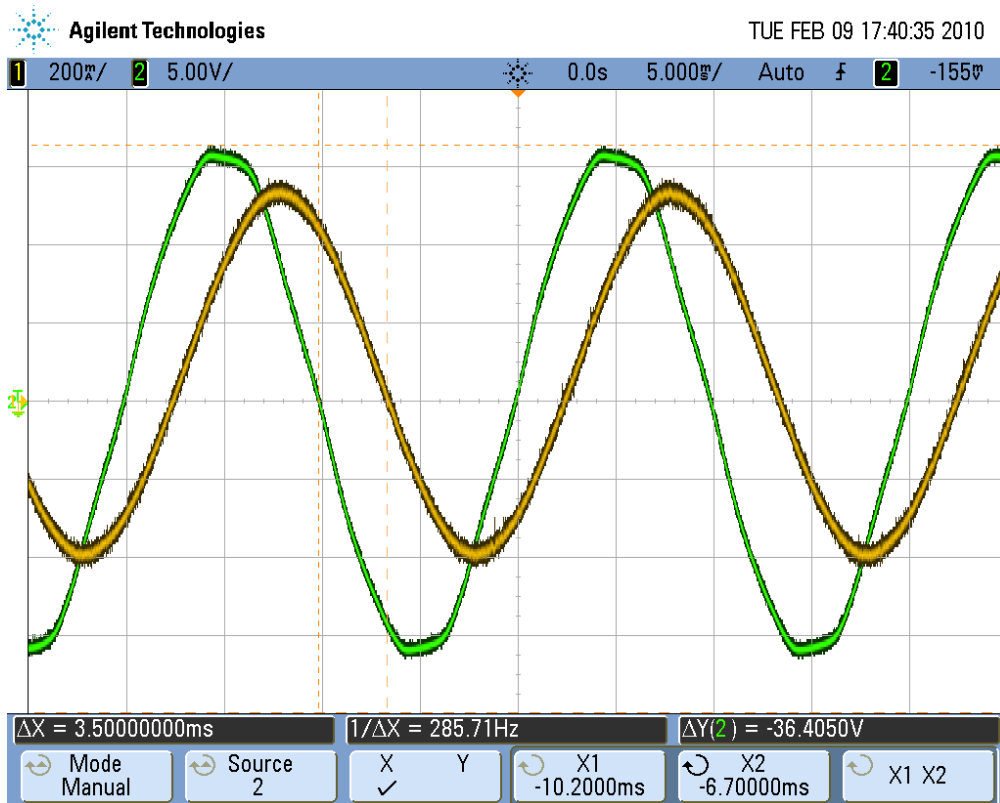
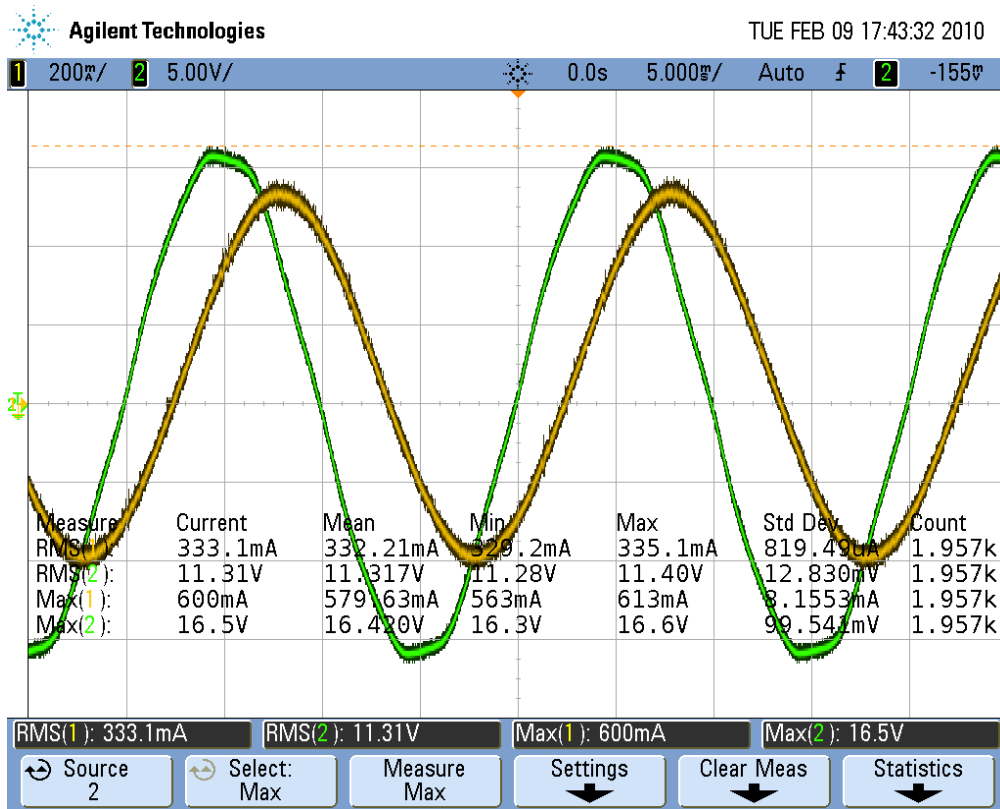
VALVOMO

TEHOT

INU POWER 973.5 W
AFE POWER 839.7 W
AFE ACTIVE POWER -835.5 W
GEN AKSELITEHO 1289.2 W

HYÖTYSUHDE VACON 0.86
HYÖTYSUHDE GEN 0.76
HYÖTYSUHDE GEN&VACON 0.65

VALVOMO

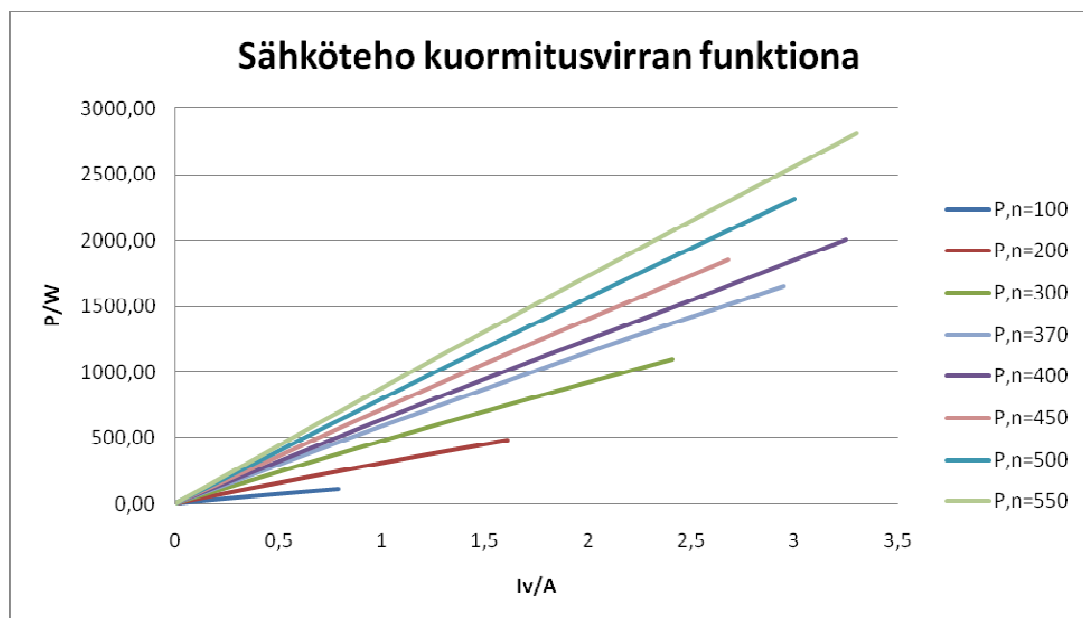


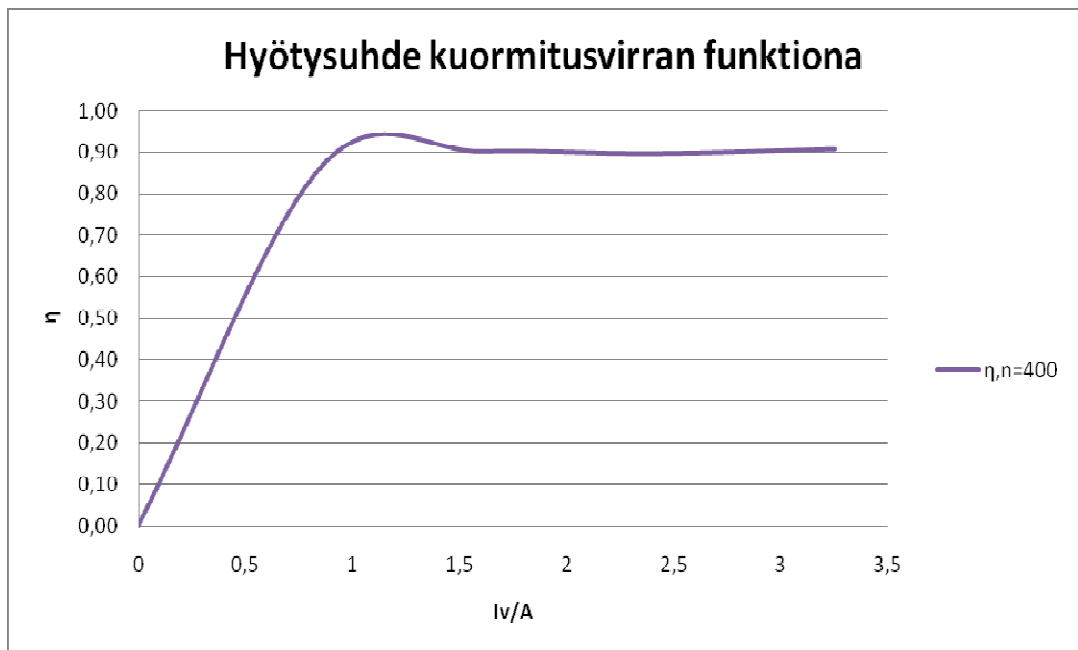
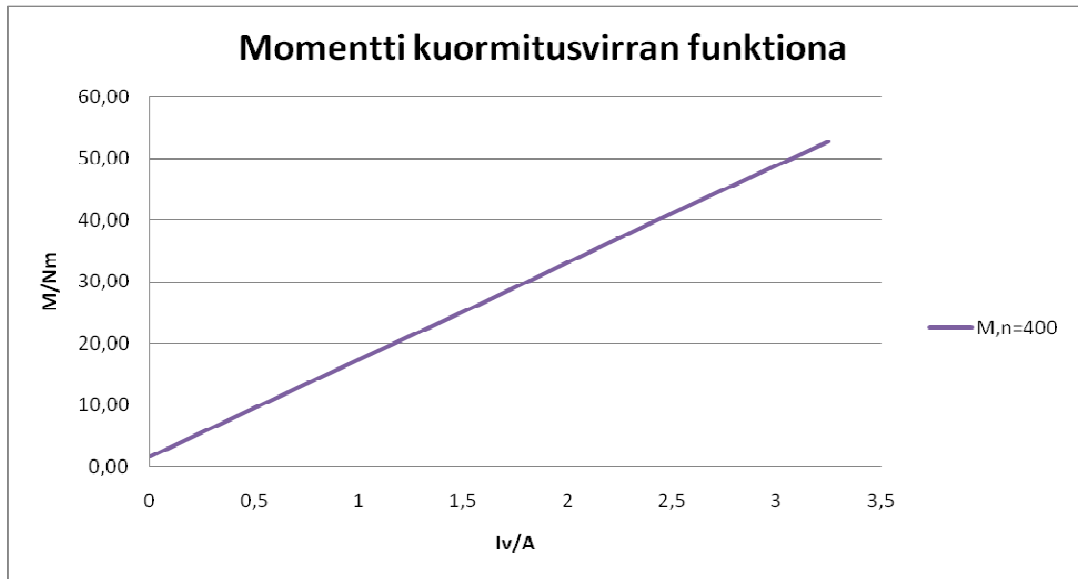
Staattorikäämin resistanssin ja induktanssin määrittäminen									yhden käämin arvo
f/Hz	U_{huippu}	i_{huippu}	$\varphi(Z)$	R	R/2	X_L	L	L/2	
50,00	16,50	0,60	63,00	10,60	5,30	20,80	0,066	0,033	

Resistanssin mittaaminen			
	I_{DC}/A	U_{DC}/A	R_s/Ω
L1-L2	1	10,6	10,60
L2-L3	0,99	10,63	10,74
L1-L3	0,99	10,61	10,72

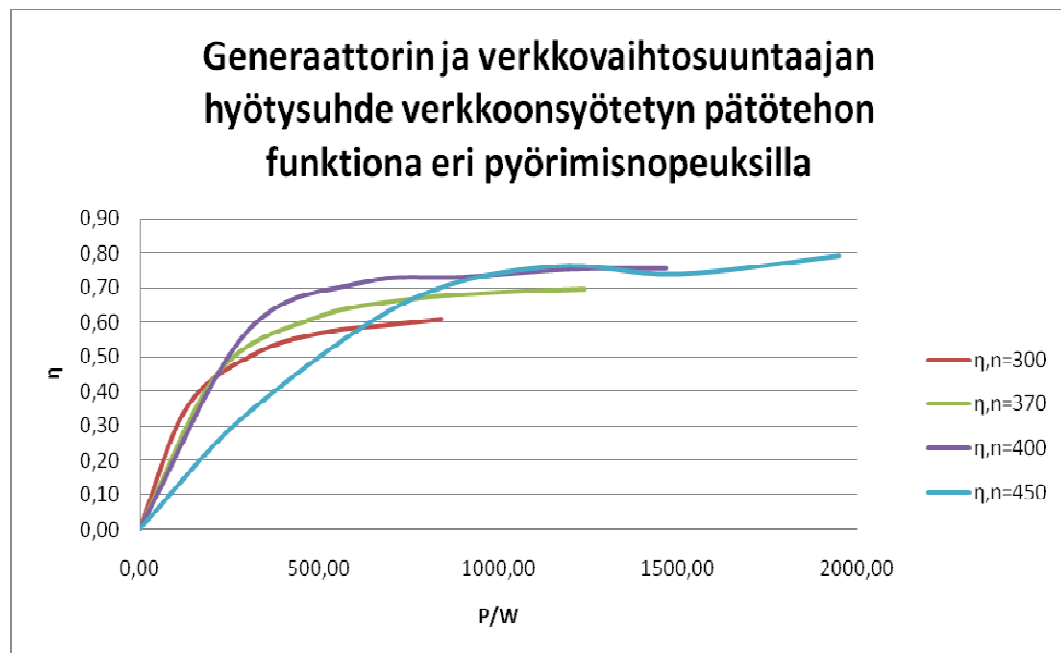
n/rpm	n/1/s	U_N/V	U_V/V	k/Vs	
50	0,83	43	24,83	29,79	
100	1,67	93	53,69	32,22	
200	3,33	186	107,39	32,22	
300	5,00	280	161,66	32,33	
400	6,67	374	215,93	32,39	
500	8,33	467	269,62	32,35	
				31,88	KA

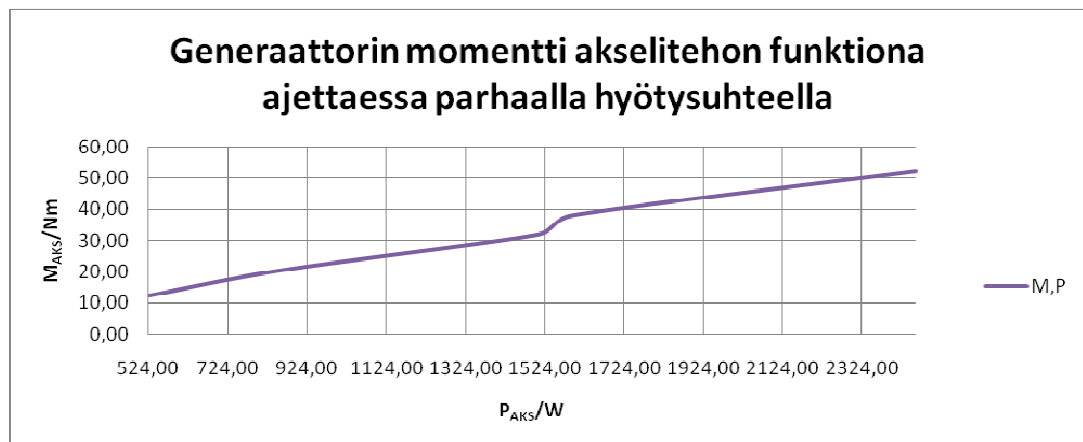
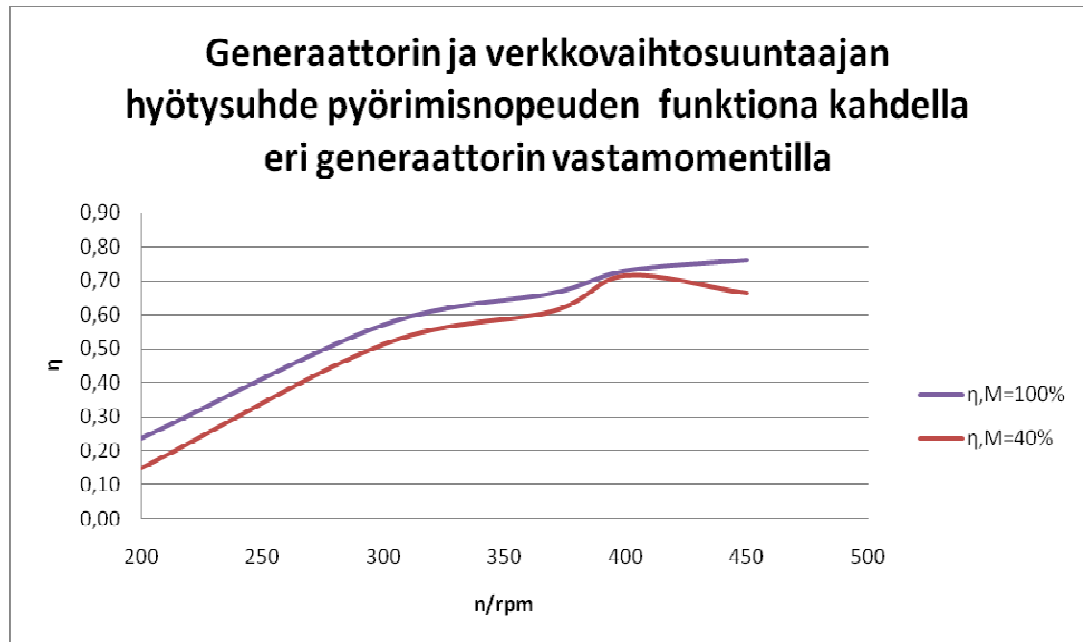
n/1/s	f/Hz	n/rpm	I _v /A	U _{RS} /V	R/Ω	P _{sä} /W	M/Nm	P _{aks} /W	η	
1,67	8,33	100	0	90	x	0,00	1,50	15,71	0,00	
1,67	8,33	100	0,22	90	252	34,29	4,50	47,12	0,73	
1,67	8,33	100	0,4	88	132	60,97	7,20	75,40	0,81	
1,67	8,33	100	0,6	87	87	90,41	10,20	106,81	0,85	
1,67	8,33	100	0,79	85	64	116,31	13,30	139,28	0,84	
3,33	16,67	200	0	184	x	0,00	1,50	31,42	0,00	
3,33	16,67	200	0,44	184	252	140,23	8,10	169,65	0,83	
3,33	16,67	200	0,81	181	132	253,94	14,00	293,22	0,87	
3,33	16,67	200	1,21	178	87	373,05	20,20	423,07	0,88	
3,33	16,67	200	1,61	174	64	485,22	26,30	550,83	0,88	
5,00	25,00	300	0	278	x	0,00	1,50	47,12	0,00	
5,00	25,00	300	0,65	278	252	312,98	11,70	367,57	0,85	
5,00	25,00	300	1,21	273	132	572,15	20,50	644,03	0,89	
5,00	25,00	300	1,81	268	87	840,18	29,90	939,34	0,89	
5,00	25,00	300	2,41	263	64	1097,83	39,30	1234,65	0,89	
6,17	30,83	370	0	340	x	0,00	1,50	58,12	0,00	
6,17	30,83	370	0,79	340	252	465,23	13,90	538,57	0,86	
6,17	30,83	370	1,48	335	132	858,75	24,90	964,78	0,89	
6,17	30,83	370	2,22	330	87	1268,90	36,40	1410,37	0,90	
6,17	30,83	370	2,95	323	64	1650,38	48,00	1859,82	0,89	
6,67	33,33	400	0	369	x	0,00	1,50	62,83	0,00	
6,67	33,33	400	0,86	369	252	549,65	15,10	632,51	0,87	
6,67	33,33	400	1,61	363	132	1012,26	26,80	1122,60	0,90	
6,67	33,33	400	2,4	357	87	1484,02	39,50	1654,57	0,90	
6,67	33,33	400	3,25	356	64	2003,98	52,70	2207,49	0,91	nimellistilanne
7,50	37,50	450	0	414	x	0,00	1,50	70,69	0,00	
7,50	37,50	450	0,96	414	252	688,39	16,70	786,97	0,87	
7,50	37,50	450	1,8	406	132	1265,78	29,80	1404,29	0,90	
7,50	37,50	450	2,68	399	87	1852,12	43,90	2068,74	0,90	
8,33	41,67	500	0	460	x	0,00	1,50	78,54	0,00	
8,33	41,67	500	1,07	460	252	852,52	18,30	958,19	0,89	
8,33	41,67	500	2	452	132	1565,77	33,20	1738,35	0,90	
8,33	41,67	500	3	446	87	2317,48	48,80	2555,16	0,91	
9,17	45,83	550	0	506	x	0,00	1,50	86,39	0,00	
9,17	45,83	550	1,17	506	252	1025,41	20,00	1151,92	0,89	
9,17	45,83	550	2,2	498	132	1897,63	36,30	2090,73	0,91	
9,17	45,83	550	3,3	492	87	2812,16	53,90	3104,42	0,91	max. teho





GEN+VACON HYÖTYSUHTEET												
n/1/s	f/Hz	n/rpm	generaattorin navoilta		mitattu pätöteho		laskettu gen. näennäisteho		vastam.raja			
			I_v/A	U_{ik3}/V	P_{sa}/W	P_{sk}/W	M/Nm	M/%	P_{sk3}/W	η		
		200	0		0,00						0,00	
3,33	16,67	200	1,72	370	20,00	1102,28	11,50	20,00	240,86		0,08	
3,33	16,67	200	2,5	360	60,00	1558,85	19,50	40,00	408,41		0,15	
3,33	16,67	200	3,2	337	130,00	1867,84	26,40	60,00	552,92		0,24	
3,33	16,67	200	3,9	317	180,00	2141,33	34,20	80,00	716,28		0,25	
3,33	16,67	200	4,6	302	220,00	2406,16	41,20	100,00	862,89		0,25	
5,00	25,00	300	0		0,00						0,00	
5,00	25,00	300	1,4	460	135,00	1115,44	12,00	20,00	376,99		0,36	
5,00	25,00	300	2	462	330,00	1600,41	20,50	40,00	644,03		0,51	
5,00	25,00	300	2,7	443	520,00	2071,71	29,00	60,00	911,06		0,57	
5,00	25,00	300	3,4	418	680,00	2461,59	36,70	80,00	1152,96		0,59	
5,00	25,00	300	4	397	840,00	2750,50	44,00	100,00	1382,30		0,61	
6,17	30,83	370	0		0,00						0,00	
6,17	30,83	370	1,3	573	220,00	1290,20	12,50	20,00	484,33		0,45	
6,17	30,83	370	1,9	587	485,00	1931,76	20,50	40,00	794,30		0,61	
6,17	30,83	370	2,5	577	750,00	2498,48	29,10	60,00	1127,52		0,67	
6,17	30,83	370	3,2	550	1010,00	3048,41	38,00	80,00	1472,36		0,69	
6,17	30,83	370	3,8	524	1240,00	3448,86	46,00	100,00	1782,33		0,70	
6,67	33,33	400	0		0,00						0,00	
6,67	33,33	400	1,3	580	300,00	1305,97	12,50	20,00	523,60		0,57	
6,67	33,33	400	1,8	593	620,00	1848,79	20,70	40,00	867,08		0,72	
6,67	33,33	400	2,4	588	900,00	2444,27	29,40	60,00	1231,50		0,73	
6,67	33,33	400	3	578	1200,00	3003,38	38,00	80,00	1591,74		0,75	
6,67	33,33	400	3,7	551	1470,00	3531,13	46,40	100,00	1943,60		0,76	nimellistilanne
7,50	37,50	450	0,00		0,00						0,00	
7,50	37,50	450	2,7	530	300,00	2478,56	19,00	20,00	895,35		0,34	
7,50	37,50	450	2,8	555	750,00	2691,61	24,00	40,00	1130,97		0,66	
7,50	37,50	450	2,9	587	1150,00	2948,47	32,00	60,00	1507,96		0,76	
7,50	37,50	450	3,2	605	1500,00	3353,25	43,00	80,00	2026,33		0,74	
7,50	37,50	450	3,6	600	1950,00	3741,23	52,20	100,00	2459,87		0,79	

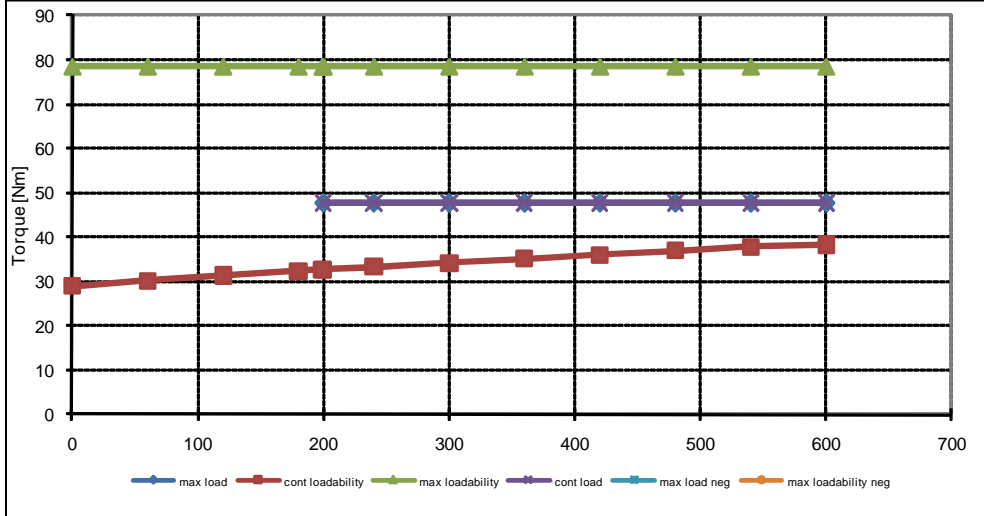






Motor Technical Data Sheet		M3AP 132 MA 6			
Item No.	1.1.1				
Specifications		DOL Catalogue data			
Name	[undefined]	Product code	3GAA 133 002 (SE)		
Motors per inverter	1	Voltage [V]	400		
Motor type	Auto selection	Frequency [Hz]	50		
FrameMaterial	Aluminum	Power [kW]	4		
Family	Not specified	Poles	6		
Polenumber	6	Speed [rpm]	960		
Design	Basic (Cenelec)	Max mech.speed [rpm]	4500		
Connection	Not specified	Current [A]	8,7		
IP class	IP55	Torque [Nm]	40		
IC class	IC411 self ventilated	Tmax/Tn	2,8		
IM class	IM1001, B3(foot)	Power factor	0,78		
Max speed rule	Standard	Efficiency [%]	85,5		
Temperature rise	B (<80 K)	Temperature rise class	B		
Motor Tmax margin	43 %	Insulation class	F		
Motor load		Calculations			
Load type	Constant torque		Required	Result	Margin
Overload Type	Simple	Torque [Nm]			
n min [rpm]	200	n min	47,7	32,7	-31 %
n base [rpm]	600	n base	47,7	38,3	-20 %
n max [rpm]	600	Power [kW]			
Pbase [kW]	3	n min	1	0,685	-31 %
Olbase [%]	100	n base	3	2,41	-20 %
Olmax [%]	100	Overload [Nm]			
Temperature [°C]	40	n min	47,7	78,4	64 %
Altitude [m]	1000	n base	47,7	78,4	64 %
Ol definition:	No RMS				
200-600 rpm / 100 %	590s				
200-600 rpm / 100 %	10s				

Graph: load torques





Drive Technical Data Sheet		ACS800-01-0006-3	
Item No.	1.1.1		
Specifications		Catalogue data	
Name	[undefined]	Voltage [V]	400
Inverter amount	1	Drive power [kVA]	6
Type	Auto selection	Nominal power [kW]	4
Pulse	6-pulse	Nominal current [A]	10,2
		Imax [A]	13,8
		Ihd [A]	7,5
		Pulse	6
		Frame type	R2
		Icont max [A]	10,9
		IP Class	IP21

Inverter load		Calculations			
Load type	Constant torque		Required	Result	Margin
Overload type	Simple cyclic	Limit			
Icont [A]	10,1 590s	Icont [A]	10,1	10,9	8 %
Imax [A]	10,1 10s	Imax [A]	10,1	13,8	37 %
		Pmax kW	3,51	5,95	69 %
		Temperature			11 %
Selection method: IGBT temperature					

Graph: currents

