



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
VASA YRKESHÖGSKOLA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Roy Högfors

TAHTIRELUKTANSSIKONEIDEN
LÄMPÖAJOJEN TEHOKAS
MITTAAMINEN

Tekniikka ja liikenne
2014

ALKUSANAT

Tämä insinöörityö on tehty ABB moottorit ja generaattorit Vaasan yksikön tuotekehitykselle. Työ on tehty Vaasan yksikön koestamon pakettitestauspaikalla. Tämän työn ohjaajana toimi PhD(Phys), DSc(Tech), Technology specialist, Jere Koehmainen, kiitokset kuuluvat hänelle. Työn onnistumisen kannalta kiitokset kuuluvat myös DI Tero Käsäkankaalle ja ABB moottorit ja generaattorit Vaasan yksikön koestamon henkilökunnalle.

Kiitokset myös työn valvojalle yliopettaja Vesa Verkkoselle ja Vaasan ammattikorkeakoulun sähkötekniikan opettajille.

Mustasaassa 1.6.2014

Roy Högfors

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Roy Högfors
Opinnäytetyön nimi	Tahtireluktanssikoneiden lämpöajojen tehokas mittaaminen
Vuosi	2014
Kieli	suomi
Sivumäärä	43+ 1liite
Ohjaaja	Vesa Verkkonen

Tässä insinöörityössä määriteltiin tahtireluktanssimoottorin lämpöajojen tehokas mittaaminen. ABB:n uusi tuote, tahtireluktanssimoottoripaketti, on suunniteltu asiakkaan tarpeisiin mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella. Paketti sisältää moottorin ja ACS850-taajuusmuuttajan. Tästä johtuen ABB:n täytyi kehittää pakettimittauksen lämpöajotestit mahdollisimman tehokkaaksi, joista oli helppo määrittää lämpöajojärjestys. Tehtäväkseni jäi dokumentoida 24 lämpöajopistettä kustakin koneesta. Tahtireluktanssimoottoreita, joista lämpöajotestit tähän työhön tehtiin, oli kaksi kappaletta sekä 280 että 315 runkokoon moottoria sekä referenssinä runkokoon 280 oikosulkumoottori. Lämpöajodatasta oli tehtävä ajallisesti nopein mahdollinen lämpöajojärjestys.

Työssä valittiin, mitkä tahtireluktanssimoottorit otettiin testeihin. Kun koneet oli valittu, odotettiin että moottorit olisivat olleet jo ennen joulua 2013 testeissä. Toisin kävi ja testit venyivät vuoden 2014 tammikuun puolelle. Kaikki moottorit saatiin kuitenkin ajettua vuoden 2014 maaliskuun aikana. Työssä ajettiin kaksi moottoria manuaalisesti ja kaksi HTR-automaatio-ohjelmalla.

Vaikka testit venyivät kohtuullisen pitkään, saatiin tuloksista hyviä. Tulokset kerättiin Excel-taulukoihin, joista oli helppo määrittää lämpöajojärjestys sekä ajat lämpöajopisteille. Loppujen lopuksi saatiin tehokkain lämpöajoaika, joka oli kolmetoista tuntia nopeampi kuin ensimmäiset määritellyt ajat.

ABSTRACT

Author	Roy Högfors
Title	Effective Measurement of Heat Runs of Synchronous Reluctance Motor
Year	2014
Language	Finnish
Pages	43 + 1 Appendices
Name of Supervisor	Vesa Verkkonen

The purpose of the thesis was to define an effective way to measure the heat runs of the synchronous reluctance motors. It has not been done before because the motor is a new product for ABB. The objective was to determine the fastest way to run the test by changing power and rotation.

The tests were performed in the test field in Vaasa unit of ABB Motors and generators. In the testing four motors with different sizes were used. There were 24 heat runs in every motor. The HTR automation program was running every heat run with different power and rotation. The temperature rise was measured only from the nominal points.

The first test lasted for 51 hours. As a result of this thesis, the time of testing was reduced to 38 hours compared to the first test.

The heat run order which has been created in the result of this Thesis will be taken into use in the testing of synchronous reluctance motors.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	7
2	TAHTIRELUKTANSSIMOOTTORI.....	8
	2.1 Tahtireluktanssimootorin rakenne	8
	2.2 Roottorin rakenne.....	8
	2.3 Toimintaperiaate	10
	2.4 Tahtireluktanssimootori verrattuna oikosulkukoneeseen.....	12
3	TAAJUUSMUUTTAJA.....	13
	3.1 Yleistä	13
	3.2 ACS850.....	13
	3.3 PC- työkalut	15
4	HTR-AUTOMAATIO-OHJELMA.....	16
5	LÄMPÖAJON MITTAUS	18
	5.1 Moottorien asennus	18
	5.2 Mittausjärjestelyt.....	20
	5.3 Testipaikan verkko.....	23
	5.4 Pakettitestauspaikka	24
	5.5 Lämpenemäajot.....	26
	5.6 Ajojärjestys	29
	5.7 Lämpenemäajojen ajat	35
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	40
	LÄHTEET.....	42
	LIITTEET	

KUVA JA TAULUKKO LUETTELO

Kuva 1. Nelinapainen tahtireluktanssimoottori /3/.....	8
Kuva 2. Tahtireluktanssimoottorin roottorimalleja /4/.....	9
Kuva 3. Tahtireluktanssimoottorin tehokulma /6/.....	11
Kuva 4. Eritehoisia ACS850-taajuusmuuttajia /7/.	13
Kuva 5. ACS850-taajuusmuuttajan tekniset tiedot /7/.	14
Kuva 6. DriveStudion näkymä /7/.	15
Kuva 7. HTR-ohjelman operaattorinäkymä.	17
Kuva 8. Testattavan moottorin ja jarrumoottorin sommitelma.	18
Kuva 9. 1,0 kNm momenttianturi sekä akseliyhdiste.	19
Kuva 10. Yokogawa-mittarit.	20
Kuva 11. Vasemmalla 600 A ja oikealla 1000 A virtamuuntajat.	21
Kuva 12. MotLab-ohjelman näkymä.....	22
Kuva 13. Testipaikan verkon rakenne.	23
Kuva 14. Vaasan yksikön koestamon pohjapiirustus /8/.....	24
Kuva 15. TP 9.5 sekä TP 9.	25
Kuva 16. Kuvia pakettitestausta paikalta.	25
Kuva 17. Jäähtymäkäyrä.	28
Kuva 18. Ensimmäisen moottorin lämpöajopisteet.	29
Kuva 19. Toisen moottorin ajojärjestys.....	30
Kuva 20. Kolmannen moottorin ajojärjestys.....	31

Kuva 21. Neljännen moottorin ajojärjestys.....	31
Kuva 22. Neljännen moottorin momentin muutos. Y-akselilla on suhteellinen momentti, x-akselilla on lämpöajojärjestys.....	32
Kuva 23. Y-akselilla virta ja x-akselilla lämpöajojärjestys.....	33
Kuva 24. Oikosulkukone referenssinä.....	34
Kuva 25. Oikosulkumoottorin virta. Y-akselilla virta ja x-akselilla lämpöajojärjestys.....	34
Kuva 26. Lämpötilamittaukset.	38
Kuva 27. Lämpötilat pysäytyksen jälkeen.....	39
Taulukko 1. Lämpenemäluokat /9/.	26
Taulukko 2. Moottorin pysäytyksen ja ensimmäisen vastusmittauksen välinen maksimiaika eri teholuokissa.	27
Taulukko 3. Ajojärjestys.....	37

1 JOHDANTO

Tässä työssä tullaan määrittelemään ABB Oy moottorit ja generaattorit - yksikön uuden tuotteen, tahtireluktanssikoneen lämpöajojärjestys. Testeihin valittiin kaksi IEC:n mukaista 280 runkokoon moottoria ja kaksi 315 runkokoon moottoria sekä vertailuksi yksi runkokoon 280 oikosulkumoottori. Lämpöajot koostuivat 24 lämpöajosta eri nopeuksilla ja tehoilla kaikilla koneilla. Tahtireluktanssikoneiden ajojärjestys on määritelty siten, että ajetaan ensin viileimmästä pisteestä kuumimpaan. Lämpöajot ajettiin sillä periaatteella, että testattava moottori toimii momenttiohjeella ja jarrumoottoria ajettiin nopeusohjeella. Moottoreita mitattiin kahdellatoista mittauskanavalla, kuudella jännitekanavalla ja kuudella virtakanavalla. Mittaus suoritettiin kahdella Yokogawa WT3000 tehoanalysointilaitteella sekä Yokogawa MV200 lämpötilapiirturilla. Osassa testeissä käytettiin HTR-automaatio-ohjelmaa. Ohjelmalla ohjattiin taajuusmuuttajia vaihtamaan lämpöajopisteet tietyin väliajoin. Opinnäytetyö on osa tahtireluktanssikoneen tyyppitestausohjelmaa. Työssä pyrittiin löytämään nopein tapa ajaa lämpöajot ja etsimään lämpöajoissa ilmeneviä ongelmia. Työ tehtiin ABB Oy moottorit ja generaattorit Vaasan yksikön koestamossa.

ABB-yhtymä on johtava sähkövoima- ja automaatioteknologian yritys. ABB:n pääkonttori sijaitsee Sveitsin Zürichissä. Yrityksen palveluksessa on maailmanlaajuisesti noin 150000 henkilöä yli sadassa maassa. Suomessa ABB:lla on palveluksessa noin 5500 henkilöä. Yrityksellä on toimintaa yli 30 paikkakunnalla, ja tehtaat sijoittuvat kolmelle paikkakunnalle (Helsinki, Vaasa ja Porvoo). ABB on perustettu vuonna 1988 mutta sen historia ulottuu aina 120 vuoden päähän. Panostus tutkimukseen ja tuotekehitykseen on ollut avain ABB:n menestykseen /1/.

2 TAHTIRELUKTANSSIMOOTTORI

2.1 Tahtireluktanssimoottorin rakenne

Toisin kuin tavanomaisessa tahtimoottorissa, tahtireluktanssimoottorissa ei ole roottorissa magnetointia. Tahtireluktanssimoottori on avonapainen kiertokenttätahtikone. Tahtireluktanssimoottorilla on tavallisen kiertokenttäkoneen monivaiheinen staattorikäänitys. Tahtireluktanssimoottori muistuttaa avonapaista tahtikonetta ilman napakäämivirtaa /2/.

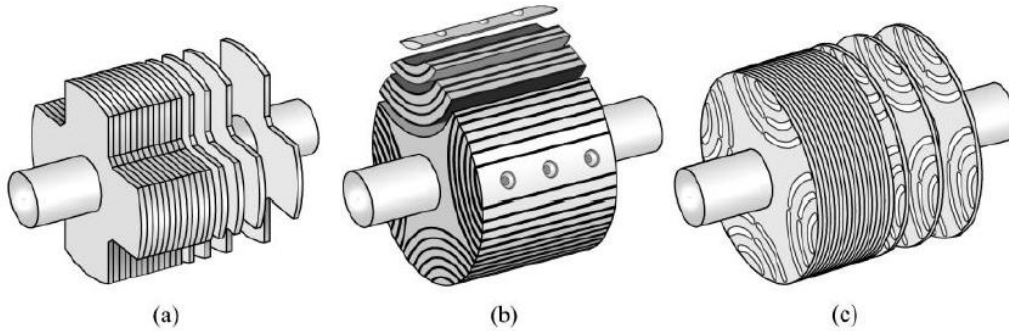
2.2 Roottorin rakenne

Roottorin rakenne täytyy olla magneettisesti hyvin epäsymmetrinen. Tahtireluktanssimoottorin staattori ei niinkään eroa tavallisesta oikosulkumoottorista, mutta roottoriin on tehty niin sanotut yhdensuuntaiset magneettisesti johtavat sauvat, jotka taivutetaan napaluvulle sopivaksi /3/. Kuvassa 1 nähdään nelinapaisen tahtireluktanssimoottorin rakenne.



Kuva 1. Nelinapainen tahtireluktanssimoottori /3/.

Tahtireluktanssimoottorille voidaan käyttää erilaisia roottorivaihtoehtoja, esimerkiksi kuvan 2 kaltaisia roottorirakenteita, jotka ovat yleisimpiä roottorivaihtoehtoja /4/.



Kuva 2. Tahtireluktanssimoottorin roottorimalleja /4/.

Kuvassa roottori a on SP-roottori (simple salient pole rotor), joka on yksinkertaisin roottorimalli. Siitä on poistettu rautamateriaalia siten, että sen ominaisuudet ovat erilaiset eri suunnista (anisotrooppinen). Sähköisesti tämä roottorimalli on huonoin. Roottori b on tyypiltään ALA-roottori (axially laminated anisotropy rotor). Se rakennetaan liittämällä pitkittäissuuntaisia metalliosia, jotka eristetään toisistaan johtamattomalla materiaalilla. Nämä kiinnitetään roottorin runkoon kiinnikkeillä. Tämä on sähköisesti erinomainen mutta tuottaa pyörrevirtahäviötä. Viimeiseen roottoriin tehdään halutunlaiset ilmavälit, jotka muodostavat q- ja d-akselit. Roottori c:tä kutsutaan nimellä TLA-roottori (transversally laminated anisotropy rotor). Tämäkin on sähköisesti hyvä ja omaa vain vähän pyörrevirtoja. Roottorissa on ristiriita mekaanisten ja sähköisten ominaisuuksien välillä. Roottorit b ja c ovat yleisimmin käytetyt roottorimallit /4, 6/.

Tahtireluktanssimoottorin roottori on täysin käämitön, joten sen roottorihäviöt ovat erittäin pienet. Tämä johtaa siihen, että tahtireluktanssimoottorilla on parempi hyötysuhde kuin tavanomaisella oikosulkumoottorilla. Myös lämpötilat pysyvät alhaisina, mikä pidentää moottorin käyttöikää /4/.

2.3 Toimintaperiaate

Kun tahtireluktanssimootorin käämeihin syötetään vaihtovirtaa, syntyy magneettikenttä. Roottoriin on tehty niin sanotut vuopolut, jotka ovat magneettisesti hyvin johtavia. Vuopolut pyrkivät seuraamaan staattorin magneettikenttää, koska magneettivuo pyrkii löytämään magneettiselle johtavuudelle helpoimman kulku-reitin. Tahtireluktanssimootori on saanut nimensä siitä, että kun magneettikenttä pyrkii löytämään pienimmän reluktanssin omaavan akselin, se pyörii synkroni-nopeudella staattorin magneettikentän mukana /4/.

Vaikka tahtireluktanssimootorin napapyörää ei magnetoida tasavirralla, perustuu tahtireluktanssimootorin toiminta siihen, että magneettisesti epäsymmetriselle avonapakoneelle syntyy momentti /5/.

Seuraava yhtälö on johdettavissa tahtireluktanssimootorin momentille.

$$T_e = \frac{3p}{2\omega} \left[\frac{\hat{u}_s^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \right], \text{ jossa} \quad (1)$$

T_e = Reluktanssimomentti.

p = Napapariluku.

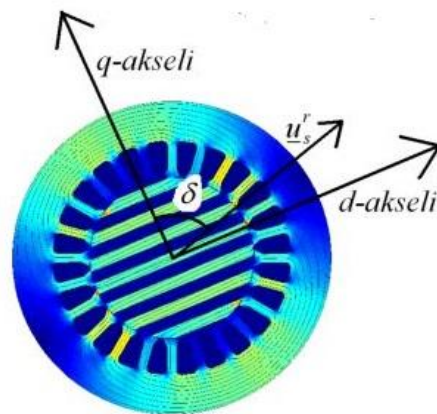
$\omega = 2 * \pi * f$, jossa f = taajuus.

\hat{u}_s = Vaihe jännitteen huippuarvo.

X_q = Poikittaisreaktanssi.

X_d = Pitkittäisreaktanssi.

Tahtireluktanssimoottorin maksimimomentti saavutetaan tehokulman ollessa 45 asteen kohdalla. Kuorman tästä vielä noustessa, kone putoaa tahdista. Epäsymmetrisyys vaikuttaa maksimimomenttiin eli mitä suurempi on pitkittäisreaktanssin X_d ja poikittaisreaktanssin X_q ero. X_d/X_q suhde voi olla parhaimmillaan 10 - 25. Magneettisesti symmetrisillä roottoreilla, joilla $X_d = X_q$, reluktanssimomentti on nolla /5/. Tahtireluktanssimoottorin roottori pyritään valmistamaan siten, että pitkittäisinduktanssin L_d ja poikittaisinduktanssin L_q suhde olisi mahdollisimman suuri. L_d ja L_q suhde määrittelee tahtireluktanssimoottorin ominaisuudet, jotka ovat koneen huippuvääntömomentti, säätämisen helppous, tehokerroin ja moottorilla saavutettava hyötysuhde /2/. Kuvassa 3 nähdään tahtireluktanssimoottorin tehokulma.



Kuva 3. Tahtireluktanssimoottorin tehokulma /6/.

2.4 Tahtireluktanssimoottori verrattuna oikosulkukoneeseen

ABB:n tahtireluktanssimoottoreiden ohjaus toteutetaan aina taajuusmuuttajalla, koska tahtireluktanssimoottoria ei voida käynnistää suoraan verkkoon. Suoraan käynnistyäkseen täytyisi tahtireluktanssimoottoriin tehdä myös oikosuljettu roottori. Apukoneen avulla se voitaisiin tahdistaa verkkoon. Oikosulkumoottori puolestaan voidaan käynnistää verkkoon ilman apulaitteita. Seuraavassa luettelossa on kerrottu, miten tahtireluktanssimoottori muuten eroaa käytössä oikosulkumoottorista /6/.

- ✓ Yksinkertaisin tapa tehdä tahtireluktanssimoottori on vaihtaa oikosulkukoneen roottori tahtireluktanssimoottorin roottoriksi.
- ✓ Pyörii tahdissa.
- ✓ Hyötysuhde on korkeampi.
- ✓ Pienemmästä moottorista saa suuremman tehon.
- ✓ Pienempi virta.
- ✓ Huonompi tehokerroin.
- ✓ Roottorissa ei ole virtalämpöhäviöitä.
- ✓ Viileämpi roottori.
- ✓ Viileämmät laakerit.

3 TAAJUUSMUUTTAJA

3.1 Yleistä

Kuten edellisessä kappaleessa todettiin, tahtireluktanssimoottoria ajetaan aina taajuusmuuttajalla. ABB onkin tehnyt tahtireluktanssimoottorille ns. moottori-taajuusmuuttaja-paketin. Taajuusmuuttajaksi on valittu ACS850-taajuusmuuttaja, koska se oli konseptin suunnitteluvaiheessa ainut uusista taajuusmuuttajista, joihin kehitettiin tahtireluktanssimoottorille sopivaa ohjelmistoa. ACS880-taajuusmuuttaja oli tuolloin vasta kehitysasteella, mutta nykyään myös siihen saa tahtireluktanssimoottoriohjelmiston. Tässä työssä ajot on tehty kuitenkin ACS850:llä. Tulevassa kappaleissa esitellään hieman tuota taajuusmuuttajaa.

3.2 ACS850

ACS85- taajuusmuuttaja kuuluu ABB industrial drive -tuoteperheeseen, joka on suunniteltu erityisesti prosessiteollisuuden tarpeisiin /7/.



Kuva 4. Eritehoisia ACS850-taajuusmuuttajia /7/.

ACS850-taajuusmuuttajat räätälöidään asiakkaan sovelluksen mukaisesti, joten mukautus on helppoa laajoihin teho- ja jännitealueisiin. Kattavan vakio- ja lisäominaisuusvalikoiman sekä selkeän ohjelmoitavuuden ansiosta ACS850 sopii erilaisiin sovelluksiin /7/.

Taajuusmuuttajaa voidaan ohjata niin skalaari- kuin suoralla momenttisäädöllä eli DTC:llä (Direct Torque Control), jonka etuja ovat tarkka staattinen ja dynaaminen nopeus- ja momenttisäätö, suuri käynnistysmomentti ja mahdollisuus käyttää pitkiä moottorikaapeleita /7/. Tässäkin työssä ajettiin niin jarrumoottoria kuin tahtireluktanssimoottoria DTC:llä. Kuvassa 5 on esitelty ACS850-taajuusmuuttajan tekniset tiedot.

Verkkoliitântä	
Syöttöjännite	3-vaiheinen 380—500 V +10/-15 %
Taajuus	50—60 Hz \pm 5 %
Tasavirtaliitântä	
Tasajännite	485—675 VDC \pm 10 %
Lataus	Sisäinen
Moottoriliitântä	
Moottorityypit	Asynkroniset moottorit ja kesto- magneettimoottorit
Lähtötaajuus	0—500 Hz
Säätömenetelmä	ABB:n suora momentinsäätö (DTC)
Momenttisäätö:	Momentin nousuaika:
Ilman takaisinkytkentää	< 5 ms nimellismomentilla
Takaisinkytkennällä	< 5 ms nimellismomentilla
	Epälineaarisuus:
Ilman takaisinkytkentää	\pm 4 % nimellismomentilla
Takaisinkytkennällä	\pm 3% nimellismomentilla
Nopeussäätö:	Staattinen tarkkuus:
Ilman takaisinkytkentää	10 % moottorin jättämästä
Takaisinkytkennällä	0,01 % nimellinopeudesta
	Dynaaminen tarkkuus
Ilman takaisinkytkentää	0,3—0,4 % s 100 % momentilla
Takaisinkytkennällä	0,1—0,2 % s 100 % momentilla
Jarruliitântä	
Jarrukatkoja	Rungot A–D: vakiona, muut runkokoot: sisäänrakennettuna lisävarusteena
Jarruvastus	Taajuusmuuttajaan kytketty ulkoinen vastus

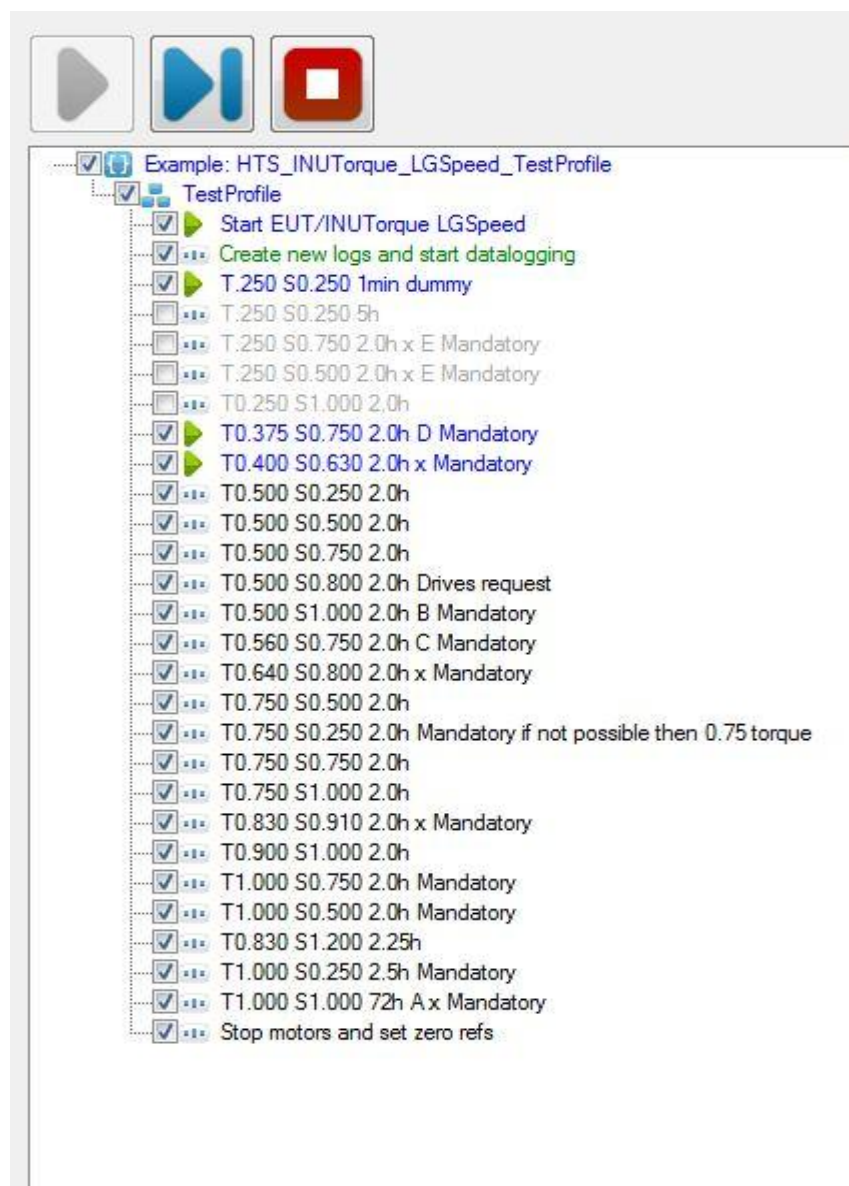
Kuva 5. ACS850-taajuusmuuttajan tekniset tiedot /7/.

4 HTR-AUTOMAATIO-OHJELMA

Tässä työssä käytettiin HTR-automaatiota sekä kahdessa tahtireluktanssimoottoritestissä että referenssinä ajatus oikosulkumoottoritestissä. Kahta konetta ajettiin manuaalisesti, koska näille koneille ajettiin samaan aikaan Ex-sertifiointia, ja näissä ajoissa täytyy mitata moottorin lämpenemä jokaisesta lämpöajopisteestä.

HTR automaatio-ohjelma on ohjelma, joka on tehty ABB:n omaan käyttöön, eikä siitä ole tarkempia speksejä tarjolla. Ohjelma toimii siten, että se ohjaa tässä tapauksessa testattavan moottorin ACS850-taajuusmuuttajaa sekä jarrumoottorina toimivaa ACS800-taajuusmuuttajaa. Ohjelmalle annetaan momentti prosentteina, joka antaa sen edelleen ACS850:lle. Nopeusohje annetaan suhteellisenä lukuna, joka jaetaan ACS800:lle. Suhteelliset luvut ovat tahtireluktanssimoottorin eli testattavan moottorin nimellisistä arvoista, jotka luetaan arvokilvestä. Automaatiolla ajettaessa täytyy varmistaa, että moottorin lämpötilan nousu on loppunut.

Kuvassa 7 nähdään HTR-ohjelman operaattorinäkyä. Tästä nähdään kuinka HTR-ohjelma laitetaan ajamaan tietyllä momentilla (T0) sekä nopeudella (S0). Vihreä nuoli näyttää, mitkä ajot on ajettu, ja viimeinen nuoli missä ajossa mennään. Vasemmalta oikealle katsottuna ensimmäisenä nähdään momentti, joka on suhteellisenä lukuna testattavan moottorin nimellisarvoista. Seuraavaksi on nopeus, ja viimeisenä ilmoitetaan kunkin kohdan ajoaika.



Kuva 7. HTR-ohjelman operaattorinäkökulma.

Koko opinnäytetyön tarkoitus on nimenomaan saada tälle ohjelmalle optimiajat, jotta moottorit voitaisiin ajaa mahdollisimman nopeasti. Seuraavissa kappaleissa tulen esittelemään mittauksien tuloksia sekä ajatuksia mittausten pohjalta.

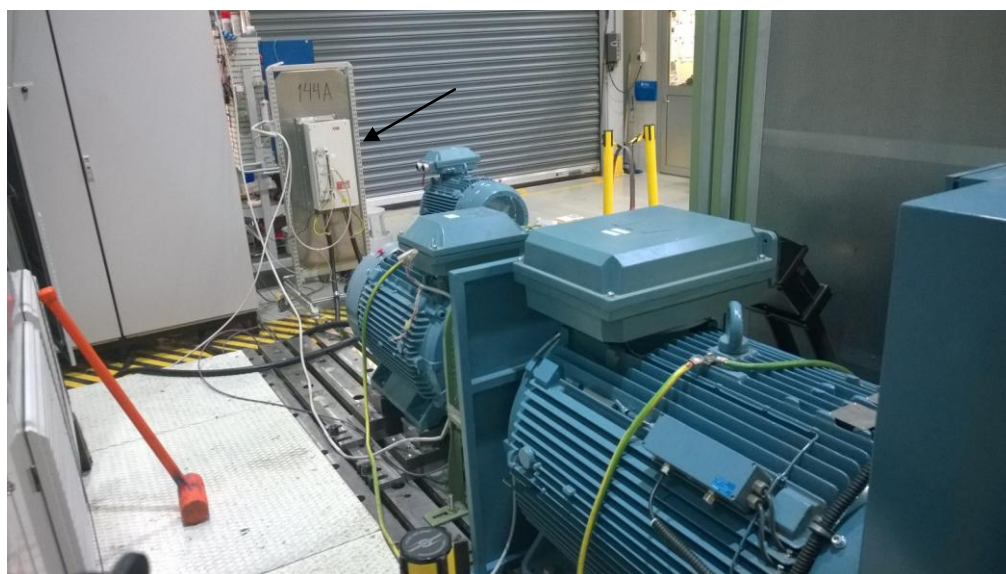
5 LÄMPÖAJON MITTAUS

Lämpöajolla tarkoitetaan tahtireluktanssimoottorin ajoa vaaditulla teholla loppulämpenemään. Kun loppulämpenemä on saavutettu, mitataan vastusmittarilla vastus tiettyjen aikojen kuluessa. Lämpenemän mittaus on esitelty myöhemmissä kappaleissa tarkemmin.

5.1 Moottorien asennus

Tahtireluktanssimoottoreiden testaus toteutettiin menetelmällä, jossa testattava moottori oli vastakkain jarrumoottorin kanssa. Testaus tehtiin siten, että testattavaa moottoria ajettiin momenttiohjeella ja jarrumoottoria ajettiin nopeusohjeella. Nopeusohjeella moottori pyrkii pitämään nopeutensa vastamomentista huolimatta. Momenttiohjeella moottori taas pyrkii pitämään momenttinsa nopeudesta huolimatta.

Kuvassa 8 nähdään tämä asetelma. Jarrumoottori on kuvassa oikealla ja testattava tahtireluktanssimoottori vasemmalla. Jarrumoottorin kilven eteen on laitettu peltilevy, ettei jarrumoottorin tuuletin vaikuttaisi testattavaan moottoriin.



Kuva 8. Testattavan moottorin ja jarrumoottorin sommitelma.

Tahtireluktanssimoottorilla oli taajuusmuuttajanaan ACS850, joka näkyy kuvan taustalla keskellä.

Moottorit on kytketty toisiinsa kiinteällä jousikytkyllä siten, että jousikytky on jarrumoottorin puolella ja momenttianturi on lähempänä testattavaa moottoria. Momenttiantureina käytettiin HBM:n T12 anturia, joita oli neljä eri kokoa, 250 Nm, 500 Nm, 1000 Nm sekä 3000 Nm. Momenttianturit valittiin niiden hyvän tarkkuuden perusteella. Valintaan vaikutti myös se, että momenttianturissa on valmiina oma takometri. Kuvassa 9 nähdään momenttianturi ja akselin kytkentä. Testattava moottori on oikealla ja jarrumoottori vasemmalla. Lisäksi nähdään kiinteät kytkyt sekä momenttianturin vasemmalla puolella oleva jousipakka.



Kuva 9. 1,0 kNm momenttianturi sekä akseliyhdiste.

Kaapeleina testauksissa käytettiin PVC-vaippaisia Ölflexin kaapeleita, kooltaan $50 - 120 \text{ mm}^2$. Kaapelit olivat kaksoishäiriösuojattuja alumiinifoliolla ja tinatulla kuparipalmikolla.

5.2 Mittausjärjestelyt

Sähköiset mittaukset suoritettiin kahdella Yokogawa WT3000 tehoanalysaattorilla sekä moottorin lämpötilat lämpötilapiirturi Yokogawa MV2000:lla. Kuvassa 10 nähdään mainitut mittarit sekä niiden sijoittelu pakettitestauspaikan ohjaamossa.



Kuva 10. Yokogawa-mittarit.

Yokogawa-mittarit valittiin niiden tarkkuuden perusteella, joka oli 0.02 %. Kaksi tehoanalysaattoria tarvittiin, kun kussakin analysaattorissa oli vain neljä kanavaa. Mittauksissa mitattiin kahdellatoista kanavalla, kuudella verkon puolta ja kuudella moottorin puolta. Lisäksi moottoripuolen Yokogawa mittasi momenttia momenttianturilta sekä nopeutta momenttianturin takometristä.

Jännitteen mittausta oli suora 1:1 mittausta. Virran mittausta suoritettiin virtamuuntajilla, joiden muuntosuhde oli 1:1000. Virtamuuntajia oli kahden kokoisia, 600 A ja 1000 A.

Kuvassa 11 nähdään virtamuuntajat. Vasemmalla 600 A ja oikealla 1000 A virtamuuntajat.

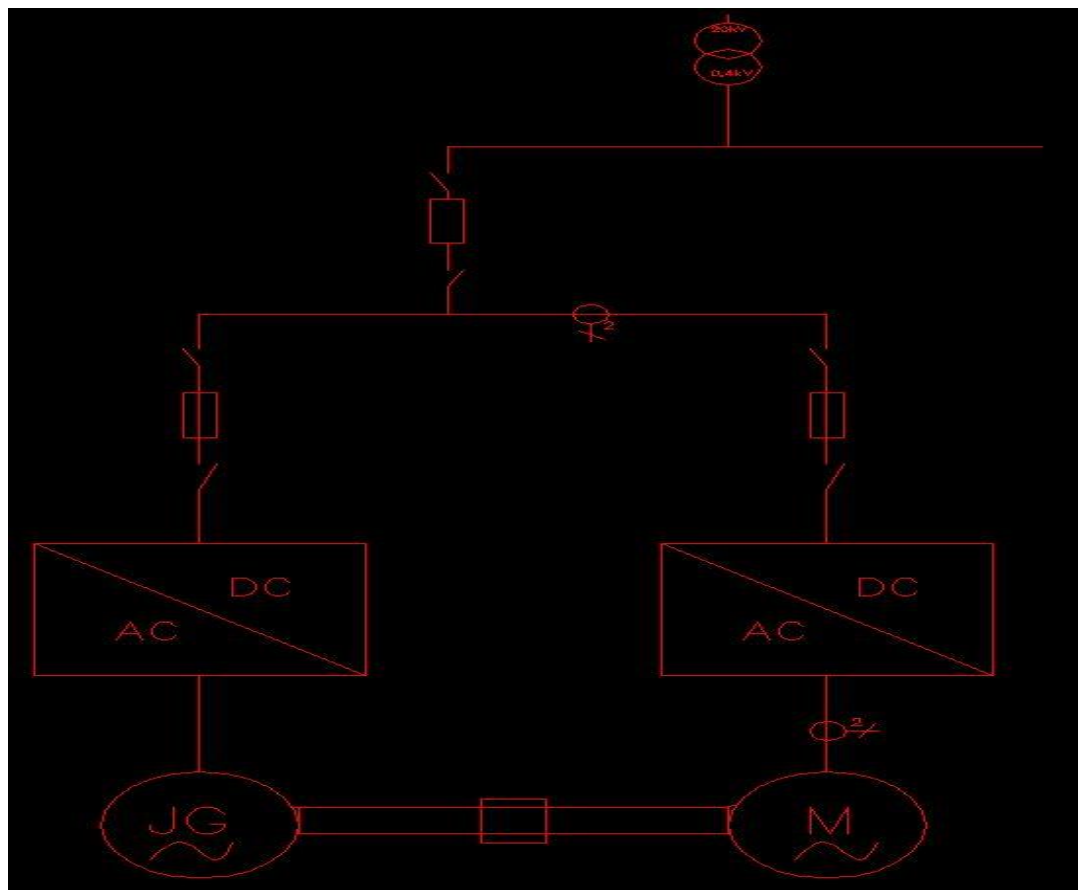


Kuva 11. Vasemmalla 600 A ja oikealla 1000 A virtamuuntajat.

Mittaustulokset kerättiin ABB:n omalle mittausohjelmalle, MotLabille, joka on tehty Labview-ohjelman päälle. MotLab kerää mittaustulokset suoraan tehoanalysaattoreilta ja lämpötilapiirturilta. MotLab on jaettu kahteen osaan. Ensimmäisessä osassa on testattavan moottorin kilpiarvot. Näistä arvoista MotLab suorittaa laskelmat. Alemmassa osassa on itse mittaustulokset. Kuvassa 12 on esitetty MotLab-ohjelman näkymä. Siitä nähdään, että myös tulokset on jaettu kahteen osaan. Ylemmät sarakkeet ovat verkon puoleisille arvoille ja alemmat arvot ovat moottorin navoilta mitatut.

5.3 Testipaikan verkko

Testipaikan verkko on tehty siten, että verkosta otettiin sähköä vain häviötehon verran. Kuvassa 13 nähdään testipaikan verkon rakenne. Kuvassa alhaalla näkyy myös jarrumoottorin (JG) ja testattavan moottorin (M) yhdiste.



Kuva 13. Testipaikan verkon rakenne.

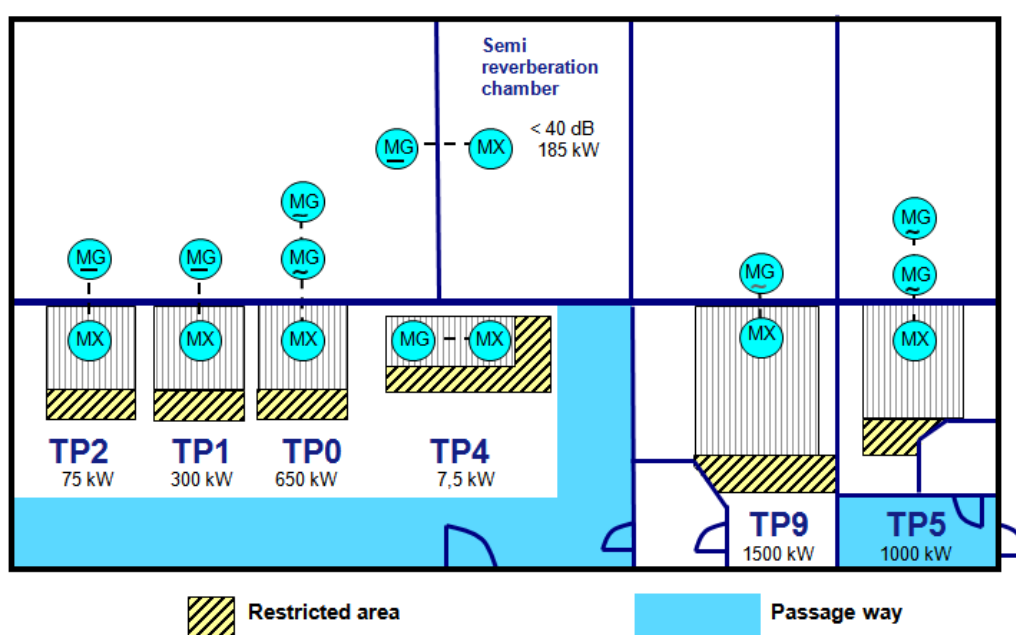
Kuvasta näkyy, kuinka virtamuuntajat on sijoitettu sekä verkon että testattavan moottorin puolelle.

Verkko olisi tällaisenaan ollut toimiva, mutta saman muuntajan verkkoon kuului paljon muitakin sähkölaitteita, jotka kuormittivat verkkoa. Muun kuormituksen suuruudesta riippuen jännitteen alenemaa oli noin 0,5 – 3,0 %.

5.4 Pakettitestausta paikka

Tahtireluktanssimootorin pakettitestausta paikka nimettiin TP 9.5:ksi, koska se sijaitsee testipaikka yhdeksän alueella (TP9). Moottorit ja generaattorit Vaasan yksikön koestamossa on tahtireluktanssimootoritestauspaikan lisäksi seitsemän testipaikkaa. Kuvassa 14 nähdään koestamon pohjapiirustus.

ABB Oy, Motors Test Floor



Kuva 14. Vaasan yksikön koestamon pohjapiirustus /8/.

Vaikka tämän työn tarkoituksena oli lämpöajojoukon tehokas mittaaminen, on otettava kantaa myös tahtireluktanssimootoritestipaikan tilaan, koska tehokkaan lämpöajamiseen kuului myös tahtireluktanssimootorin jouheva vaihto. Testipaikka oli suunniteltu väliaikaiseksi, ja käytettävissä oleva tila oli rajallinen. Kuvassa 15 on esitetty TP 9 tila ylhäältä kuvattuna. Vasemmalla on tahtireluktanssimootorin testipaikka ja oikealla testipaikka yhdeksän testattava moottori taajuusmuuttajan kanssa. Tästä on helppo havainnoida tilan haasteellinen koko.



Kuva 15. TP 9.5 sekä TP 9.

Kuvassa 15 vasemmalla näkyy jarrumoottorin taajuusmuuttaja ACS800. Suoraan moottoriletkan takana näkyy testattavan moottorin taajuusmuuttaja ACS850. Tämän vieressä vasemmalla on jakokeskus.



Kuva 16. Kuvia pakettitestausta paikalta.

Kuvassa 16 samaa testipaikkaa on kuvattu lattiatasolta. Niistä nähdään, että tilan käyttö on liiankin tehokasta.

Testien aikana testit täytyi keskeyttää useasti viereisellä testipaikalla tehtyjen ääni- ja värinätestien vuoksi. Se toi testeihin lisähaasteita. Tulevaisuudessa olisi tarpeellista etsiä pakettitestausta paikalle oma erillinen tilansa.

5.5 Lämpenemäajot

Lämpöajot koostuivat 24 ajosta eri nopeuksilla ja tehoilla. Tehot ja nopeudet oli valittu näihin ajoihin pumppusovellusten tyypillisistä nopeus-tehokäyristä, ja tasaisin välein valituista nopeus- ja vääntömomenttipisteistä. Lämpöajoihin valittiin neljä tahtireluktanssimootoria, jotka olivat 280 runkokoon ja 315 runkokoon tahtireluktanssimootoria. Lisäksi valittiin yksi 280 runkokoon oikosulkumootori referenssiksi.

Kaksi tahtireluktanssimootoreista oli high output (HO) moottoria ja kaksi high efficiency (HE) moottoria. HO-moottorista otettiin tehoa paljon enemmän kuin HE-moottorista. HE-moottorissa oli tärkeää, että lämpenemä ei ylitä B-luokan rajaa. B-luokan lämpenemäraja on 80 astetta celsiusta. B-luokka tarkoittaa, että moottoriin saa käyttää vain tiettyjä standardin hyväksymiä eristeitä. Taulukosta 1 nähdään lämpenemäluokat ja niiden lämpenemäarvot.

Taulukko 1. Lämpenemäluokat /9/.

Luokka	Sallittu lämpenemä (°C), kun ympäristön lämpötilaan 40°C
A	60
E	< 75
B	< 80
F	< 105
H	< 125
C	>125

Lämpenemällä tarkoitetaan tilaa, jossa moottorin lämpötila ei enää nouse, vaan lämpötila pysyy samana. Moottori on saavuttanut lämpenemänsä, kun lämpötilan nousu on enää maksimissaan kaksi astetta tunnissa. Lämpenemä mitataan

vastusmenetelmällä, jossa moottorin pysähtyttyä aloitetaan ajanotto. Vastusmittari asetetaan moottorin napoihin U-W. Mittauspisteet perustuvat IEC 60034-1 -standardiin, jossa tietyn tehoisen moottorin lämpenemä mitataan jonkin aikäsäännön mukaan moottorin tehosta riippuen. Aikasäännöt tehoineen näkyvät taulukossa 2.

Taulukko 2. Moottorin pysäytyksen ja ensimmäisen vastusmittauksen välinen maksimiaika eri teholuokissa.

Teho/kW	Aika/s
0 – 50	30
50 – 200	90
200 – 5000	120

Mittauspisteet ovat 45, 60, 75, 90, 120, 150, 180 ja 210 s. Näistä pisteistä muodostetaan lämpenemäkäyrä, josta extrapoloidaan pysäytyksen aikainen lämpenemä. Tämän työn moottorit olivat kaikki yli 50 kW, joten lämpenemä mitattiin 90 ja 120 sekunnin säännöillä. Niissä lämpöajoissa, joissa ei otettu vastusmenetelmällä lämpenemää, katsottiin moottorin lämpötilasta, ettei se enää muutu. Lämpenemä lasketaan kaavalla:

$$\Delta T = \frac{R_2}{R_1} * (235 + t_1) - (235 + t_2), \text{ jossa} \quad (2)$$

R_2 = Käämien resistanssi kuumana.

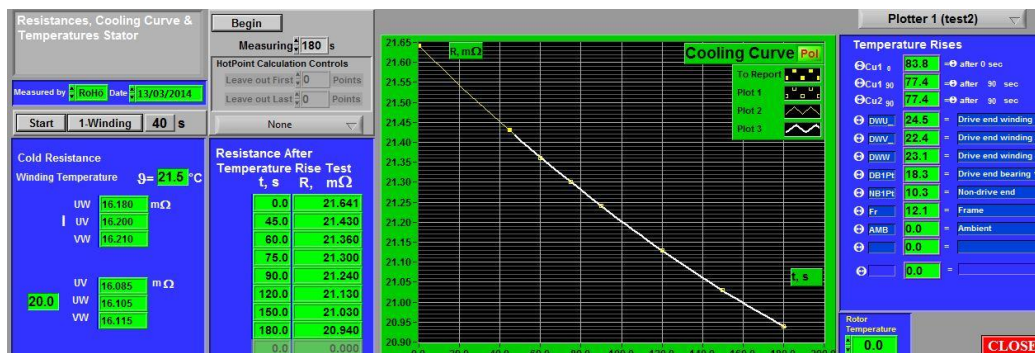
R_1 = Käämien resistanssi kylmänä.

t_1 = Ympäristön lämpötila ajon alussa

t_2 = Ympäristön lämpötila ajon lopussa.

235 = Kuparille ominainen vakio.

ΔT = Lämpenemä.



Kuva 17. Jäähtymäkäyrä.

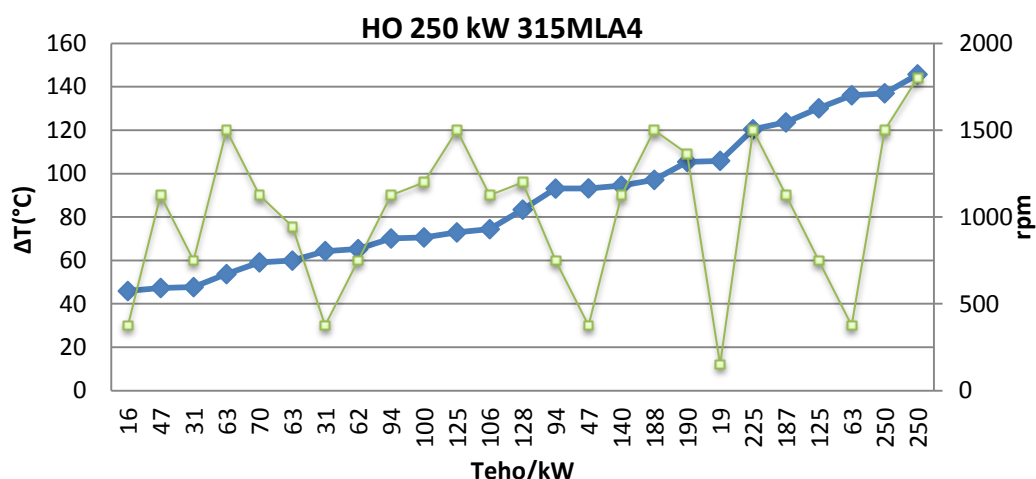
Kuvassa 17 on esitetty jäähtymäkäyrä sekä lämpenemät sekuntisääntöineen. Vasemmalla ylhäällä näkyy mitatut kylmävastukset ja alhaalla redusoidut vastusarvot. Keskellä on jäähtymäkäyrä ja sen vasemmalla puolella on mitatut vastusarvot, joista jäähtymäkäyrä muodostuu. Käyrän oikealla puolella on lämpenemät, tässä tapauksessa 90 sekunnin säännöllä.

Tässä työssä testattavista moottoreista kahdesta otettiin lämpenemä vain moottorin nimellis pisteestä. Kahdella moottorilla ajettiin samalla Ex-sertifikaatiota, joten niistä mitattiin siltamittarilla lämpenemät jokaisesta ajetusta lämpöajopisteestä.

Työn alussa mietittiin, että moottorit voitaisiin ajaa suurimmasta tehosta pienimpään. Kokemuksesta kuitenkin tiedettiin, että moottori jäähtyy hitaammin kuin lämpenee, joten päätettiin ajaa moottorit pienimmästä tehosta suurimpaan. Nimellinen teho jätettiin viimeiseksi, koska tästä täytyi mitata lämpenemä vastusmenetelmällä. Tahtireluktanssimoottoreiden ajojärjestys määriteltiin alussa siten, että ensimmäistä lämpöajopistettä ajettiin viisi tuntia ja muut ajot perään kaksituntisina. Ajojen kokonaiskestoksi saatiin tällöin 51 tuntia. Jos lämpöajopisteet olisi ajettu pysäyttämättä konetta kertaakaan, olisi voitu päästä tällaisiin aikoihin.

5.6 Ajojärjestys

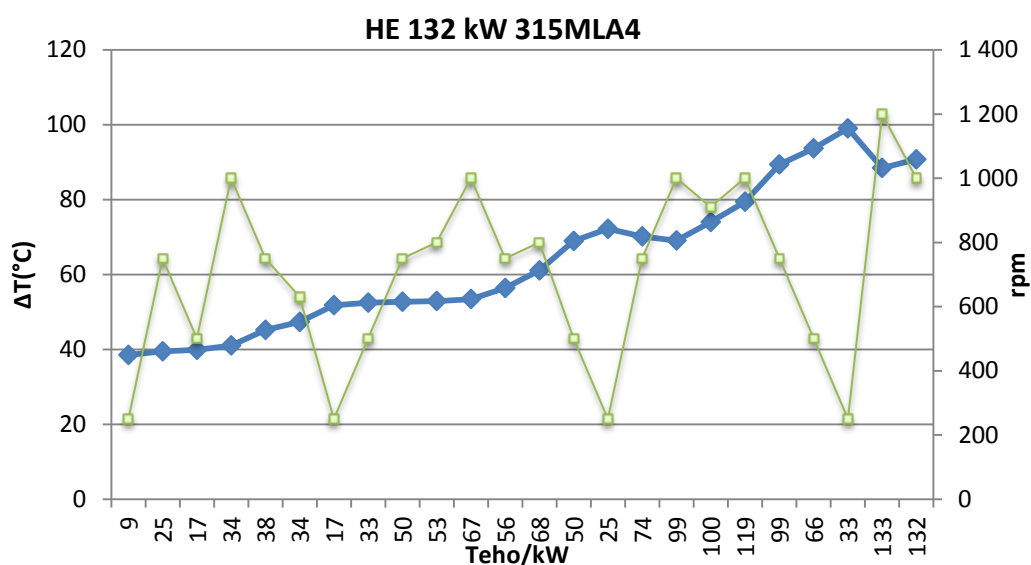
Lämpöajojärjestyksen tarkemmassa analyysissä huomattiin, että sähkövirralla on suurempi vaikutus lämpötiloihin kuin moottorin pyörimisnopeudella. Liitteen 1 taulukosta voidaan todeta, että mittausten perusteella moottorin lämpeneminen riippuu sähkövirran suuruudesta. Häviöteho on virran toiseen potenssiin. Lämpenemä on taas verrannollinen häviötehoon. Pyörimisnopeudella on pienempi merkitys moottorin lämpötilaan. Liitteen 1 taulukosta voidaan todeta myös, että pyörimisnopeudella on vaikutusta, jos sähkövirran ero on erittäin pieni. Kuvasta 18 voidaan nähdä helposti lämpöajojärjestys. Vasen pystyakseli on lämpötila, oikea pyörimisnopeus ja vaaka-akselilla on teho. Vihreä diagrammi on pyörimisnopeus ja sininen lämpötila



Kuva 18. Ensimmäisen moottorin lämpöajopisteet.

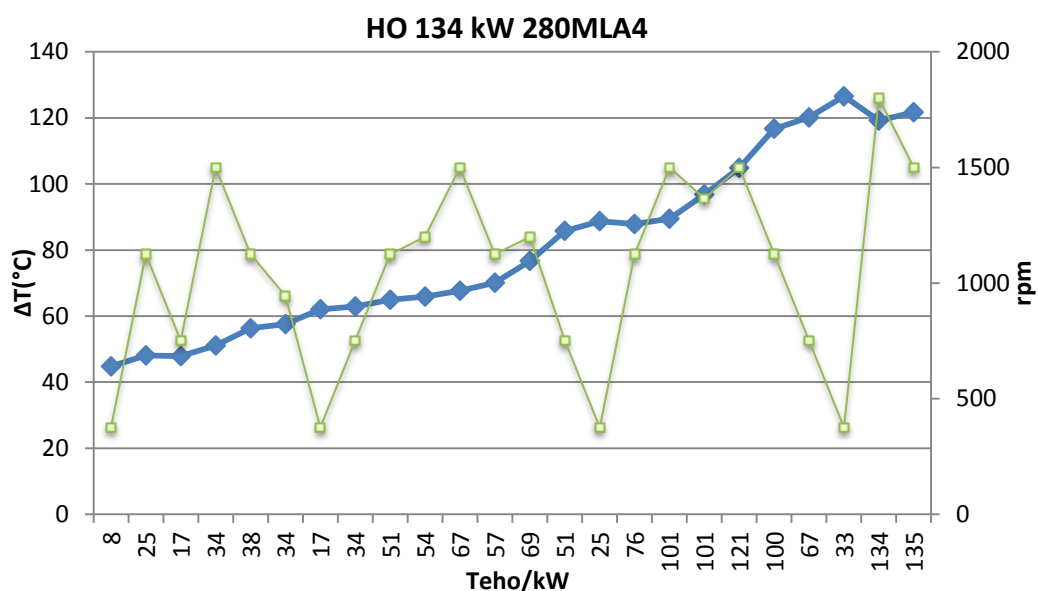
Kuvassa 18 lämpötilapisteet ovat lämpöajon viimeisistä lämpömittauspisteistä. Lämpömittauspisteet saatiin PT 100 lämpöantureista, joita oli käämin kuumimmissa kohdissa, jokaisessa vaiheessa yksi eli niitä oli kaikenkaikkiaan kolme. Kuvion mittauspisteet ovat noiden arvojen keskiarvot. Kuviosta nähdään myös se, kuinka pyörimisnopeudella ei ole yhtä suurta vaikutusta lämpenemään kuin virralla. Tässä mittauksessa käytettiin suuritehoista tahtireluktanssimoottoria, jonka mittausarvoja käytettiin referenssinä seuraavaan moottoriin. Seuraava moottori oli selvästi pienempitehoinen, ja moottori oli HE-moottori kun taas edellinen moottori oli HO-moottori.

Toinen moottori ajettiin edellisen ajon pohjalta, ja siitä saatiin kuvan 19 kaltainen tulos. Tästä kuvasta huomataan, että samalla ajojärjestyksellä kaksi lämpöajopistettä eroaa edellisestä ajosta. Tämä suuntaus jatkuu kaikissa testatuissa moottoreissa. Erona ensimmäiseen moottoriin oli, että se oli huomattavasti suurempitehoinen kuin muut tämän työn moottorit. Eron selvittänee myös se, että ensimmäisessä moottorissa viimeisten pisteiden virran ero oli huomattavasti suurempi kuin muissa pienempitehoisissa moottoreissa. Kuten aiemmin on mainittu, nimellispiste näille moottoreille on ajettu viimeisenä lämpöajopisteenä.



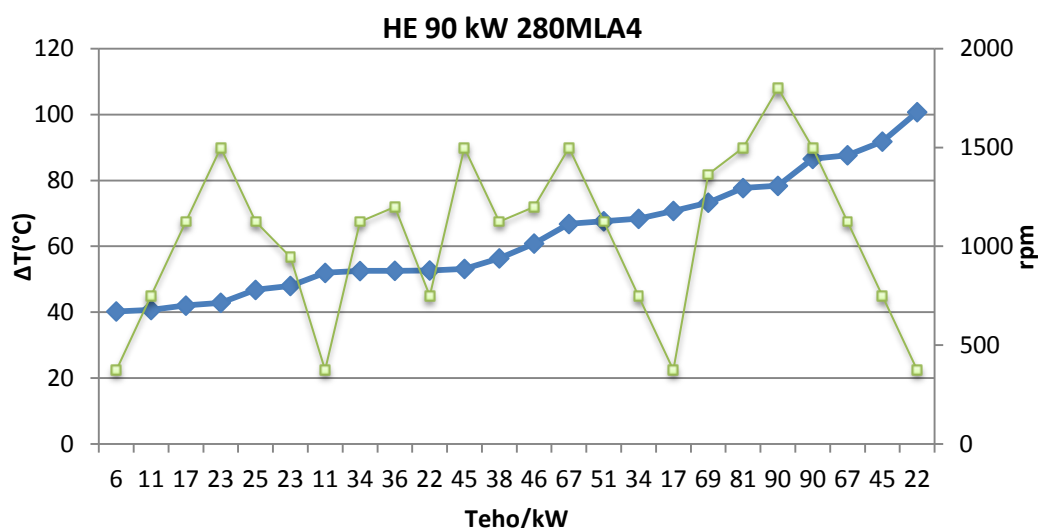
Kuva 19. Toisen moottorin ajojärjestys.

Kolmannessa ajossa nähdään samankaltainen diagrammi kuin edellä, joten voidaan todeta, että moottoreilla on samankaltainen lämpöajojärjestys. Tämä ajo ajettiin samalla ajo-ohjelmalla, että nähtäisiin, jatkuuko samankaltainen suuntaus.



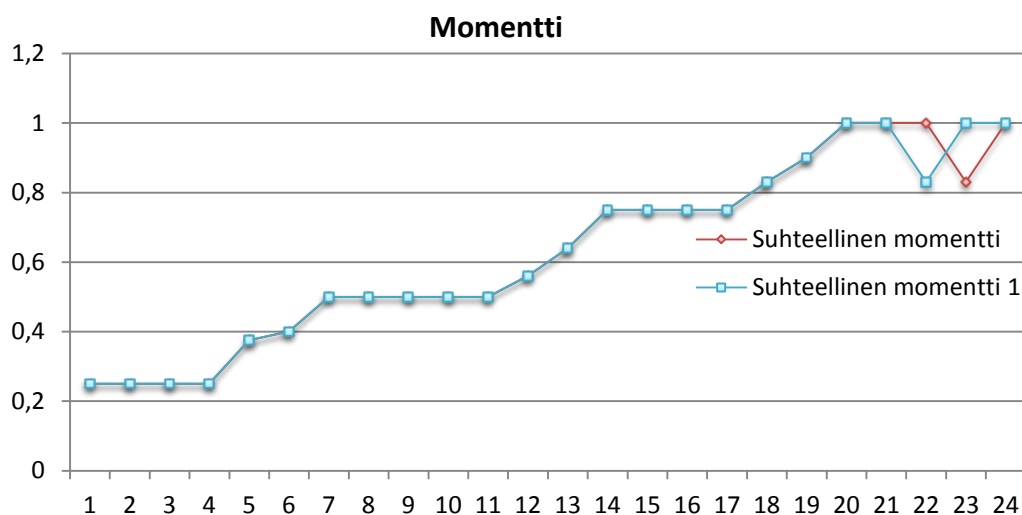
Kuva 20. Kolmannen moottorin ajojärjestys.

Neljäs moottori ajettiin nousevalla lämpenemäajojärjestyksellä ja tästä saatiin kuvan 21 mukainen ajo. Tässä ajossa ei ole ajettu nimellispistettä viimeiseksi.



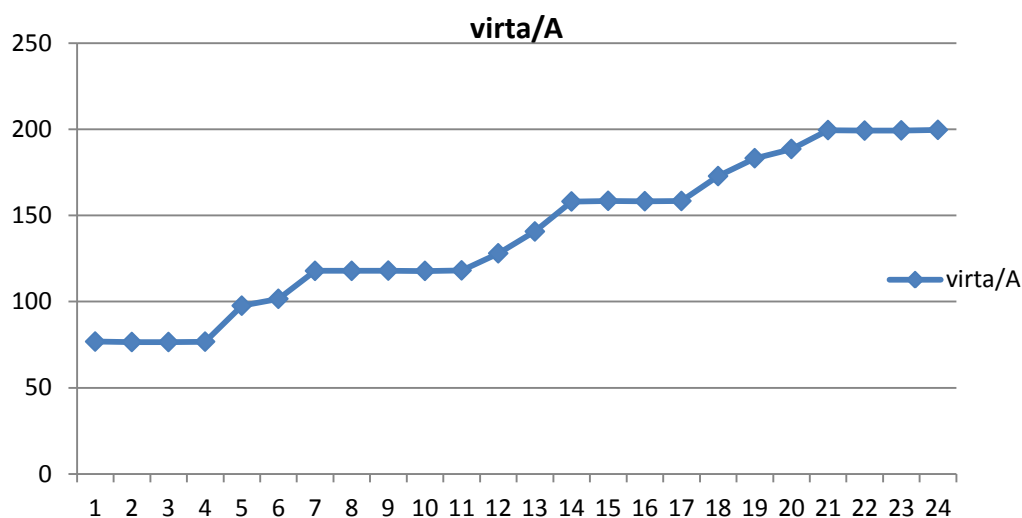
Kuva 21. Neljännen moottorin ajojärjestys.

Kuvassa 22 on esitetty kuvan 21 moottorin momentti lämpöajojärjestyksessä. Tästä huomataan, että momentti kulkee askelmaisesti kohti loppua. Ajon lopussa oleva pudotus on pisteestä, joka oli kentänheikennyksessä. Tämän pisteen teho oli sama kuin nimellisellä, mutta nopeus oli eri ($1,2 \cdot$ nimellisa nopeus).



Kuva 22. Neljännen moottorin momentin muutos. Y-akselilla on suhteellinen momentti, x-akselilla on lämpöajojärjestys.

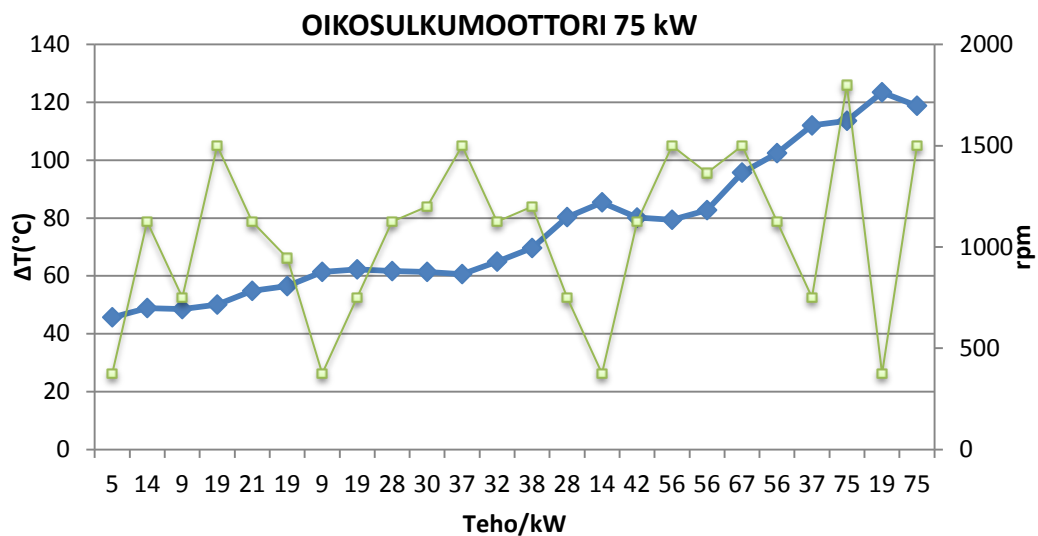
Voidaan siis todeta, että momentti on verrannollinen virtaan. Kuvassa 23 on virran vastaava kuva samasta moottorista.



Kuva 23. Y-akselilla virta ja x-akselilla lämpöajojärjestys.

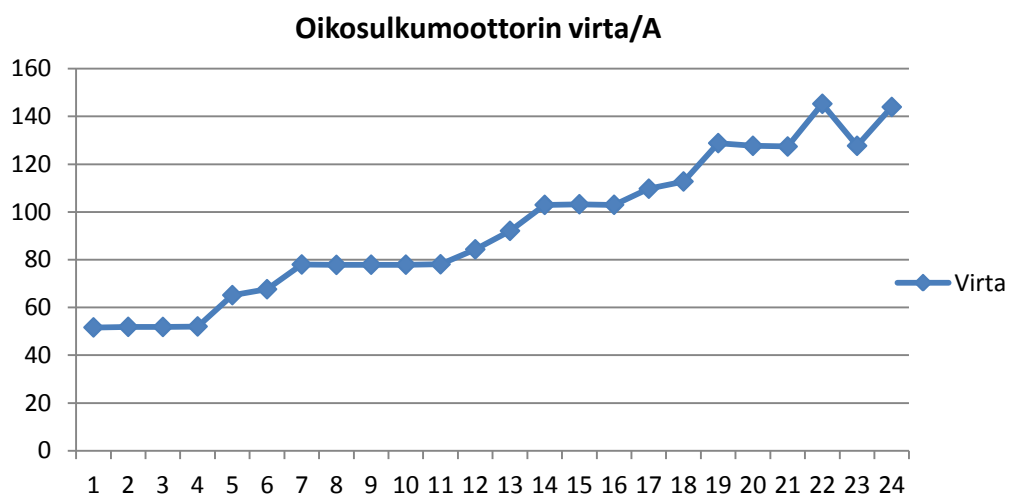
Lämpöajojärjestyksistä voitiin havaita, että suurempitehoisille tahtireluktanssimoottoreille täytyi tehdä oma ajo-ohjelma, joka noudatti ensimmäisen moottorin ajo-ohjelmaa, ja pienempitehoisille moottoreille neljännen moottorin kaltainen ajo-ohjelma.

Tahtireluktanssimoottoreiden jälkeen ajettiin yksi oikosulkumoottori referenssiksi. Ajo-ohjelma pyrittiin asettelemaan lähes samaksi kuin tahtireluktanssimoottoreissa. Ainoastaan ajo-ohjelman loppuun oli tehty muutoksia. Kuvasta 24 voitiin päätellä, että oikosulkumoottorin lämpenemän käyttäytyminen oli lähes samankaltainen kuin tahtireluktanssimoottorilla. Ajo-ohjelman puolivälissä oli havaittavissa jyrkempää lämpenemistä kuin tahtireluktanssimoottorilla. Tässäkin ajossa jouduttiin laittamaan nimellispiste viimeiseksi lämpöajoksi, koska lämpenemä mitattiin ainostaan tästä pisteestä. Oikosulkumoottorin ajossa tutkittiin myös sitä, kuinka moottoria voitiin ajaa HTR-ohjelmalla. Oikosulkumoottorin ajot onnistuivat hyvin. Ohjelmointi oli ehkä hieman haastavampaa, koska momentti muuttui enemmän moottorin lämmitessä verrattuna tahtireluktanssimoottoriin.



Kuva 24. Oikosulkukone referenssinä.

Kuvassa 25 nähdään oikosulkumoottorin virran käyttäytyminen verrattuna kuvan 23 tahtireluktanssimoottoriin.



Kuva 25. Oikosulkumoottorin virta. Y-akselilla virta ja x-akselilla lämpöajojärjestys.

5.7 Lämpenemäajojen ajat

Nyt kun lämpöajojärjestykset oli saatu, tarvittiin vielä ajat lämpöajopisteille. Aikojen määrittäminen oli erittäin haasteellista, koska jokaisella lämpöajopisteellä oli vähän eri lämpenemäaika. Ongelmia lämpenemäaikoihin toivat myös verkon jännitteenalenemat. Kun verkossa oli jännitteenalenemaa, lämpötilat moottorilla kasvoivat. Tästä johtuen lämpenemäajat pitenivät eikä moottoreita voitu verrata toisiinsa. Suuremmat ongelmat syntyivät, kun lämpöajoja pysäyteltiin. Testimoottoreita jouduttiin pysäyttelemään monestakin syystä. Esimerkiksi kun TP9 tai jollain muulla testipaikalla mitattiin ääniä. Testimoottori pysäytettiin myös, jos TP 9:llä mitattiin tärinöitä tai asiakkaat olivat paikalla.

Lämpenemäajat saatiin siten, että laskettiin edellisistä ajoista taaksepäin. Tästäkin saatiin vain suuntaa antavia aikoja, joten oli vain kokeiltava yksi testi. HTR-ohjelman konfiguroinnin yhteydessä huomattiin, että testimoottori lämpeni niin paljon, ettei tarvinnut ajaa ensimmäistä ajoa viittä tuntia vaan 2,5 tuntia riitti. Tästä saatiin heti 2,5 tuntia koko ohjelmasta pois. Kaavasta 3 nähdään kuinka lämpenemä laskettiin.

$$\tau = \frac{\Delta T}{\Delta t}, \text{jossa} \quad (3)$$

τ = Lämpenemän muutos.

ΔT = Lämpötilan muutos.

Δt = Ajan muutos.

Lämpenemän muutos (τ) sai olla enintään kaksi astetta tunnissa.

Taulukossa 3 on lämpöajoajat, jotka parhaimmillaan saatiin. Taulukkoon on merkitty suhteellinen momentti ja suhteellinen nopeus moottoreiden nimellistehoista. Aika-sarakkeessa on ilmoitettu kuinka kauan kutakin lämpöajoa tulee ajaa, että moottorit saavuttaisivat loppulämpenemänsä. Kokonaisajaksi saatiin näillä ajoilla 38 tuntia, joten ajoja saatiin tiivistettyä 13 tuntia alkuperäisestä ajasta. Taulukon viimeiset kolme arvoa vaihdetaan, jos moottorin teho ylittää 250 kW. Lämpöajojärjestys on esitetty taulukossa 3 ylhäältä alaspäin. Taulukosta 3 nähdään hyvin millainen vaikutus moottorin tuuletuksella on. Esimerkkeinä voidaan tarkastella pisteitä kaksi ja kolme. Vaikka teho on suurempi toisessa pisteessä kuin kolmannessa, niin se ei kuitenkaan ole kuumempi kolmatta pistettä. Liitteestä 1 voidaan havainnoida virran eron olevan todella pieni kyseisillä tehoilla. Kun toisen pisteen pyörimisnopeus on suurempi, se jäähdyttää enemmän kuin virta ehtii sitä lämmittää.

Taulukko 3. Ajojärjestys

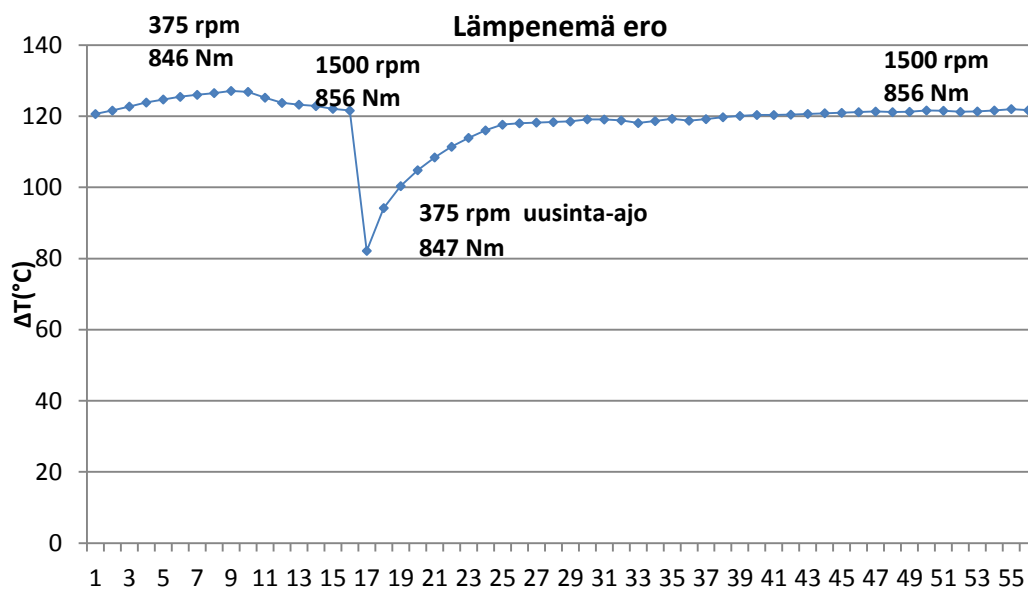
Suhteellinen momentti	Suhteellinen nopeus	aika/min
0,250	0,250	150
0,250	0,750	80
0,250	0,500	80
0,250	1,000	80
0,375	0,750	90
0,400	0,630	80
0,500	0,250	90
0,500	0,500	80
0,500	0,750	80
0,500	0,800	80
0,500	1,000	80
0,560	0,750	90
0,640	0,800	105
0,750	0,500	90
0,750	0,250	90
0,750	0,750	105
0,750	1,000	105
0,830	0,910	105
0,900	1,000	105
1,000	0,750	105
1,000	0,500	105
1,000/0,830	0,250/1,200	120/105
0,830/1,000	1,200/1,000	105/90
1,000	1,000/0,250	90/120
Yhteensä		2290

Taulukon 3 lämpöajoajat toimivat hyvin, jos testattavat moottorit saivat toimia ilman pysäytyksiä. Ongelmat alkoivat siitä, kun testi pysäytettiin joistain edellisissä kappaleissa todetuista syistä. Vaikka ajo-ohjelmaa siirrettiin taaksepäin ja lämpenemäajoja ajettiin muutama uudestaan, testattavat moottorit eivät saavuttaneet loppulämpenemäänsä, koska ne jäähtyivät liian paljon. Ajot olisi jouduttu näillä ajoilla aloittamaan kokonaan alusta. Ongelmaksi muodostui siis ajo-ohjelman keskeytys. Kuvassa 26 nähdään oikeassa reunassa moottorin viimeinen lämpötilamittaus. Ensimmäisellä sinisellä rivillä huomataan, että lämpötila on noussut 126,5 asteeseen. Kun tämä ajo ajettiin uudestaan, sen lämpötila nousi vain 116 asteeseen. Tämä voitiin todeta toiselta punaiselta riviltä. Sama jatkui kaikissa muissakin pisteissä, eli edellisten ajojen loppulämpenemiin ei päästy. Kun ajo-ohjelma saatiin ajettua loppuun ilman keskeytyksiä, vastaavia ongelmia ei syntynyt.

847.31	375.02	33.28	123.699997	117.199997	121.000000	67.5	45	715	25.6000038	120.633331
847.03	374.99	33.26	124.800003	118.099998	121.900002	64.4000053	46	73.09999847	25.5	121.6000031
846.75	374.98	33.25	125.900002	119.300003	123.000000	63.79999924	46.9000053	74.30000305	25.5	122.733335
846.50	375.00	33.24	127.099998	120.400002	124.099998	63.5	47.5	75.4000053	25.2000076	123.866666
846.32	374.97	33.23	127.900002	121.300003	125.000000	63.79999924	47.79999924	76.19999935	25.6000038	124.733335
846.25	374.99	33.23	128.699997	122.000000	125.699997	63.79999924	48.09999847	76.09999847	25.3999962	125.466665
846.21	375.01	33.23	129.199997	122.599998	126.300003	63.9000053	48.4000053	76.80000305	25.2000076	126.033333
846.12	375.00	33.23	129.800003	123.000000	126.800003	64.19999635	48.4000053	77.19999635	24.7000076	126.533335
856.49	1499.92	134.53	130.399994	123.400002	127.599998	64.30000305	48	75.80000305	25.3999962	127.133331
856.50	1499.95	134.53	130.000000	123.199997	127.400002	69.69999635	45.5	70.5	25.3999962	126.866666
856.65	1500.01	134.59	128.500000	121.500000	125.699997	70.69999635	44.5	68.4000053	25.3999962	126.233332
856.96	1500.06	134.62	126.699997	120.199997	124.400002	70.9000053	44.2000076	67.4000053	25.79999924	123.766665
856.91	1499.94	134.59	128.199997	119.699997	123.900002	70.4000053	44.09999847	66.90000305	25.2999962	123.266665
859.33	1499.29	134.54	125.900002	115.300003	123.900002	71.09999847	43.0000053	65.00000305	25.0000076	122.866665
709.42	1800.27	133.74	124.800003	118.900003	122.699997	69.69999635	43.79999924	65.69999635	25.2999962	122.100001
709.74	1800.27	133.80	124.500000	118.099998	122.199997	71.09999847	44.09999847	64.4000053	25.3999962	121.599998
852.38	374.98	33.47	84.599998	79.699997	82.199997	49.29999924	45.9000053	48.5	24.3999962	82.166664
850.48	375.00	33.40	96.800003	91.300003	94.500000	49.4000053	43.7000076	53	24.7999962	94.200002
849.34	374.99	33.35	103.000000	97.400002	100.699997	50.2000076	43	57.59999847	24.8999962	100.366666
848.57	375.02	33.32	107.400002	101.800003	105.300003	51.5	43.2000076	60.7000076	24.8999962	104.833336
848.04	375.01	33.30	111.000000	105.400002	108.900002	52.79999924	43.69999847	63.5	24.8999962	108.433334
847.75	375.00	33.29	114.099998	108.300003	111.900002	54.09999847	44.09999847	65.5	25	111.433334
847.36	375.01	33.28	116.800003	110.699997	114.300003	55.29999924	44.7000076	67.4000053	25	113.933334
847.33	375.00	33.28	116.900002	110.799997	114.400002	55.39999924	44.7000076	67.4000053	25	113.933334
856.56	1499.98	134.55	120.199997	114.400002	118.300003	62.09999847	44.2000076	65.69999635	24.6000038	117.633334
856.59	1500.02	134.55	120.400002	114.800003	118.900002	65.19999635	43.5	64.69999847	24.8999962	118.033335
856.61	1499.97	134.60	120.500000	115.099998	119.099998	66.30000305	43.5	64.30000305	24.8999962	118.233332
856.30	1499.98	134.50	120.500000	115.300003	119.300003	66.9000053	43.5	64.30000305	24.6000038	118.366669
856.67	1499.98	134.56	120.599998	115.500000	119.500000	67.19999635	43.69999847	64.5	24.8999962	118.533333
856.22	1499.98	134.45	121.199997	116.099998	120.099998	67.5	43.7000076	64.5	25	119.133331
709.74	1800.30	133.80	120.300002	116.300003	120.099998	68.4000053	43.7000076	63.2000076	24.7999962	119.100001
709.96	1800.27	133.84	120.099998	115.599998	118.800003	68.59999847	43.69999847	62.9000053	24.7000076	118.833333
709.93	1800.27	133.84	119.900002	115.199997	119.199997	68.69999635	43.69999847	62.9000053	24.8999962	118.099998
709.84	1800.31	133.82	120.300003	116.000000	119.699997	68.69999635	43.5	62.9000053	24.8999962	118.666667
709.88	1800.29	133.83	121.500000	116.099998	120.300003	68.59999847	43.4000053	63.09999847	24.5	118.300001
709.74	1800.25	133.80	120.699998	115.800003	119.900002	68.69999635	43.4000053	62.9000053	24.7999962	118.766669
709.80	1800.28	133.81	120.800003	116.500000	120.300003	68.59999847	43.4000053	62.9000053	24.7999962	119.200002
856.43	1499.94	134.52	123.699997	118.500000	122.699997	68.30000305	43.69999847	65.9000053	25.2000076	121.633331
856.63	1499.99	134.59	123.699998	118.500000	122.599998	68.4000053	43.69999847	65.90000305	25.3999962	121.566666
857.01	1500.01	134.62	123.300003	118.099998	122.300003	68.4000053	43.69999847	65.9000053	25.6000038	121.233335
856.88	1500.00	134.60	123.400002	118.300003	122.400002	68.4000053	43.7000076	65.80000305	25.2000076	121.366669
856.97	1500.03	134.61	123.699997	118.500000	122.699997	68.5	43.79999924	66	25.7999962	121.666669
856.92	1500.03	134.61	124.099998	118.900002	123.099998	68.59999847	43.9000053	66.09999847	25.8999962	122.033331
857.31	1500.03	134.67	123.800003	118.699998	122.699997	68.59999847	43.79999924	65.80000305	23.6000038	121.699999

Kuva 26. Lämpötilamittaukset.

Kuvasta 27 voidaan havainnoida, kuinka lämpötila käyttäytyy pysäytyksen jälkeen. Pysäytyskohdassa lämpötila putoaa jyrkästi. Kuvion ensimmäinen ajo ei uusinta-ajossa saavuta enää samaa lämpötilaa.



Kuva 27. Lämpötilat pysäytyksen jälkeen.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kun tahtireluktanssimoottorien testaus alkoi, ajatuksena oli tehdä niille oma pysyvä pakettitestauspaikka, mutta resurssien puitteissa jouduttiin asentamaan väliaikainen testauspaikka. Tämä toi testaukseen omat haasteensa. Erityiset haasteet toivat suuritehoiset taajuusmuuttajat, jotka olivat kaappiin asennettavia moduuleja. Alkuperäisessä suunnitelmassa nämä taajuusmuuttajat olisivat olleet omissa kaapeissaan, ja kaapit olisivat olleet siistissä rivissä. Ohjaaminen olisi tapahtunut katkaisijoiden avulla. Mielestäni tässä olisi ollut erittäin hyvä konsepti, mutta nyt jouduttiin asentamaan yksi kaappi kerrallaan. Taajuusmuuttajamoduuleita oli neljä kappaletta, joista kaksi sopi yhteen kaappiin. Moduuleita oli kohtuullisen helppo asentaa kaappiin ja se onnistui koestamon henkilökunnalta vielä hyvin. Kun jouduttiin vaihtamaan koko kaappi ja johdotukset, turvaututtiin ulkopuoliseen sähköurakoitsijaan. Tämä toikin testaukseen monen päivän tauon, koska johdotukseen ja moduulin vaihtoon meni kaksi – kolme päivää. Taajuusmuuttajien asennukset helpottuivat paljon kun siirryttiin pienempitehoisiin moottoreihin, koska taajuusmuuttajat pystyttiin asentamaan pyörillä kulkeviin telineisiin. Kaapelointi olisi voinut olla erilainen, koska kaapelit olivat erittäin jäykkiä, ja näin ollen raskaita asentaa. Jatkossa voisi miettiä kevyempiä kaapeleita. Kun kaapelit ovat jäykkiä ne soveltuvat kyllä yhteen asennukseen. Tässä tapauksessa kaapeleilla mitattiin noin neljäkymmentä moottoria. Jäykät kaapelit murtuvat helposti kun asennuksia on monia.

Tahtireluktanssimoottorin asennus testipaikalle oli suhteellisen helppoa. Testattavan moottorin rihtaamiseen käytettiin laseria, jonka käyttö oli nopeaa ja jouhevaa. Moottoreiden koon vaihtelut aiheuttivat aikaa vieviä asennuksia. Tällöin jouduttiin vaihtamaan moottorin alustat ja momenttianturit. Momenttiantureiden vaihtoon olisikin syytä paneutua. Anturit olivat fyysisesti erikokoisia, joten myös ne täytyi rihdata joka kerta uudestaan. Ehdottaisinkin, että antureiden alustat tehtäisiin siten, että olisi vain yksi alusta kaikkiin momenttiantureihin.

Sähköisissä mittauksissa käytettiin kahta Yokogawa-tehoanalysaattoria, joista toisella mitattiin verkonpuolta ja toisella moottorin arvoja. Mittarit valittiin tarkkuutensa vuoksi. Mielestäni olisimme voineet käyttää yhtä tehoanalysaattoria, jossa on kaksitoista mittakanavaa. Muilla testipaikoilla koestamossa mitataan Norman-tehoanalysaattorilla. Tahtireluktanssimoottorin mittauksessa voitaisiin kysyä, onko tarpeellista mitata niin tarkasti ottaen huomioon, että testipaikan sähköverkko ei ollut täysin stabiili. Mittauksien ongelma olikin juuri tuo verkon heiluminen. Jännitteenalenemat toivatkin lämpenemääjoihin lisää haasteita. Kun nämä olivat tiedossa, mittaukset onnistuivat hyvin. Yokogawa-mittarin konfigurointi oli mielestäni kohtuullisen vaikeaa, mutta muutaman harjoittelun jälkeen sekin onnistui.

Ensimmäisissä kahdessakymmenessä moottorin mittauksessa ei ollut automaatioajomahdollisuutta. Moottoreiden ajoajat olivatkin tuolloin pitkiä, mikä hankaloitti lämpöajojen ajan analyysiä. HTR-ohjelman myötä tämä helpottui ratkaisevasti. HTR-ohjelma toimii tällaisissa mittauksissa erinomaisesti. Ohjelman konfigurointi oli myös erittäin helppoa. HTR-ohjelmassa oli heikkoutensa. Jos tietokone jostain syystä irtautui taajuusmuuttajista, ajo jatkui senhetkisillä arvoilla. Testiä oli tämän jälkeen vaikea pysäyttää hallitusti. Vaihtoehtona pysäytykseen oli asettaa taajuusmuuttajat vikatilaan. Tämä taas aiheutti sen, että taajuusmuuttajat jäivät ajotilaan. Kun vika poistettiin, testattava moottori ryntäsi nopeusrajaan aiheuttaen vaaratilanteen. Tähän tilanteeseen voitaisiinkin tehdä jokin lukitus, ettei moottori pääse ryntäilemään.

Työssä löydettiin hyvä lämpöajojärjestys tahtireluktanssimoottoreille. Huomattiin myös, että virta seuraa momenttia. Hyvän lämpöajojärjestyksen onnistuminen taataan sillä, ettei testimoottoria pysäytetä testin aikana. Lisäksi oikosulkumoottorille tarvitaan oma lämpöajojärjestys.

Kaiken kaikkiaan työ oli erittäin mielenkiintoinen, vaikka työn alussa oli vaikeuksia päästä selville mitä tehdä. Mielestäni työ onnistui vastoinkäymisistä huolimatta hyvin ja mittauksissa päästiin tavoitteisiin.

LÄHTEET

- /1/ <http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti>. Viitattu 19.3.2014
- /2/ Sähkökäytöt, Pyrhönen, J. LTY Sähkötekniikka
- /3/ SynRMuseinAdeptTraining, ABB koulutusmateriaali, 2011
- /4/ Synkronireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin vertailu, Suomela, P. Tampereen ammattikorkeakoulu Sähkötekniikka Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto. 2013
- /5/ Säädetyt sähkökäytöt Jokinen, K. Vaasan ammattikorkeakoulu , tekniikka ja liikenne
- /6/ Pyörivät sähkökoneet SATE2050 Osa 6: Tahtireluktanssikone. Kolehmainen, J. 19.11.2012
- /7/ ABB industrial drive ACS850- sarjan taajuusmuuttajamoduulit 1,1-500kW tuoteluettelo ABB. 2014
- /8/ ABB BU Motors May 2.2014/slide 1
- /9/ http://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/b120a0100/luennot/luento_7.pdf
Viitattu 23.4.2014
- /10/ Fimot Motors koestamo-ohjeet.

LIITE 1

Ajojärjestys

AJO JÄRJESTYS							
nopeus/s	Momentti/T	P	Vyyhden max lämpö	rpm	momentti	Teho	Virta/A
0,250	0,252	0,063	45,90	375	400,8	15,75	184,80
0,750	0,249	0,19	47,30	1125	396	46,70	183,90
0,500	0,250	0,13	47,70	750	398	31,30	184,20
1,000	0,251	0,25	53,70	1500	399,8	62,80	184,60
0,750	0,375	0,28	59,10	1125	597,7	70,40	236,70
0,630	0,400	0,25	59,90	945	636,6	63,00	246,60
0,250	0,501	0,13	64,30	375	798,3	31,35	288,10
0,500	0,500	0,25	65,20	750	795,4	62,48	288,00
0,750	0,499	0,37	70,10	1125	793,9	93,52	288,00
0,800	0,501	0,40	70,60	1200	797,8	100,26	288,80
1,000	0,501	0,50	72,90	1500	797	125,18	288,70
0,750	0,563	0,42	74,40	1125	895,7	105,52	314,30
0,800	0,641	0,51	83,40	1200	1020,4	128,23	347,10
0,500	0,750	0,37	93,10	750	1193,5	93,74	392,40
0,250	0,747	0,19	93,20	375	1190	46,73	391,20
0,750	0,748	0,56	94,40	1125	1191,5	140,36	392,20
1,000	0,751	0,75	97,10	1500	1196,1	187,88	395,60
0,910	0,833	0,76	105,40	1365	1326,9	189,67	428,30
0,100	0,751	0,08	105,90	150	1195	18,80	413,30
1,000	0,901	0,90	120,40	1500	1434,9	225,40	473,30
0,750	0,999	0,75	123,60	1125	1591,4	187,48	499,00
0,500	0,999	0,50	130,10	750	1591,2	124,97	499,10
0,250	1,002	0,25	136,10	375	1595	62,64	500,70
1,000	1,000	1,00	137,00	1500	1592,2	250,00	520,40
1,200	0,834	1,00	145,70	1800	1328,3	250,41	530,70