

Saimaan ammattikorkeakoulu  
Tekniikka Imatra  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto

Henri Löyttynen

# **SUORAVETOISEN TUULITURBIININ GENERAATTORIN TESTISEGMENTIN TESTAUS**

Opinnäytetyö 2010

## TIIVISTELMÄ

Henri Löyttynen

Suoravetoisen tuuliturbiinin generaattorin testisegmentin testaus

52 sivua, 2 liitettä

Saimaan ammattikorkeakoulu, Imatra

Tekniikka, sähkötekniikan koulutusohjelma

Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto

Opinnäytetyö 2010

Ohjaajat: Lehtori Timo Loukiala, Saimaan amk, Testauspäällikkö Janne Kinnunen, The Switch Drive Systems Oy

Työn tarkoituksena oli selvittää, kuinka perinteisiä standardien mukaisia kestopagneettitahtigeneraattorin koeajo- ja testausmenetelmiä voidaan soveltaa yksittäiseen kestopagneettitahtigeneraattorin segmentoituun staattorirakenteseen pienemmässä mittakaavassa. Projektin tarkoitus The Switchin osalta oli kuitenkin enimmäkseen tutkia jäähdytysratkaisuja ja dynaamisia voimia simuloitaessa normaaleja käyttöolosuhteita segmentille.

Testien kohteena oli The Switchin valmistaman 690 V:n PMR3150-generaattorin  $\frac{1}{12}$  staattorisegmentti, jolle pyrittiin tekemään samanlaiset koeajot ja testit kuin normaalille kestopagneettitahtigeneraattorille. Testaukset tehtiin The Switch Drive Systems Oy:n testilaboratorion tiloissa Lappeenrannassa. Ensisijaisena tavoitteena The Switchillä oli rakentaa segmentille testilaitteisto, testipenkki. Laitteistolla oli tarkoitus mahdollisimman hyvin simuloida generaattorin todellisia käyttöolosuhteita. Tässä työssä tehtiin käytännön mittauksia kyseisellä konstruktiolla.

Mitattavat suureet otettiin tarkoin talteen, jotta testipenkkiä voidaan kehittää mahdollisimman paljon, sillä konstruktiolla voidaan simuloida todellisen koneen toimintaa hyvinkin tarkasti tietyssä mittakaavassa. Tulevaisuutta ajatellen laitteisto sopii hyvin tuotekehityksen apuvälineeksi ja sarjatuotannossa segmenttien testilaitteistoksi.

Asiasanat: Kestopagneettitahtigeneraattori, Tuulivoimageneraattori, Staattorisegmentti, IEC 60034, Sähkövoimatekniikka

## ABSTRACT

Henri Löyttynen

Testing of a Gearless Wind Turbine Generator Stator Segment

52 pages, 2 appendices

Saimaa University Applied Sciences, Imatra

Electrical engineering

Electrical power engineering

Final year project 2010

Tutor: Mr Timo Loukiala, Senior Lecturer, Saimaa University of Applied Sciences, Imatra

Supervisor: Mr Janne Kinnunen, Testing Manager, The Switch Drive Systems Ltd

The purpose of this study was to find out how to solve normal permanent magnet synchronous generator's test methods, predetermined in standards, in to a single segmented stator structure of a permanent magnet synchronous generator, in a smaller scale. The purpose of the project for The Switch was mainly to study the cooling alternatives and dynamic forces while simulating normal generator circumstances to the segment.

The tested object was a  $\frac{1}{12}$  stator segment of a 690 V PMR3150-generator, made by The Switch. Same kind of test runs and measurements were tried to be made to the segment as would be normally done to a permanent magnet synchronous generator. The tests were made in a test laboratory of The Switch Drive Systems Ltd in Lappeenranta. The main intention for The Switch was to build a testing hardware, a test bench, for the segment. The main function of the hardware was to simulate the real conditions of the generator as good as possible. In this study, practise measurements were made with the particular hardware.

All the measured quantities were saved properly so that the test bench could be developed as much as possible, because the construction is able to simulate the real machine's behaviour quite precisely in a certain scale. The construction could work well as an instrument of product development in the future and as a testing hardware in series production.

Keywords: Permanent Magnet Synchronous Generator, Wind Generator, Stator Segment, IEC 60034, Electrical Power Technology

# SISÄLTÖ

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

## SISÄLTÖ

1 JOHDANTO .....	6
2 YRITYSESITTELY .....	7
3 TUULIVOIMAGENERAATTOREIDEN ERIKOISPIIRTEITÄ.....	8
3.1 Tuulivoimalat .....	8
3.1.1 Vakionopeuksiset tuulivoimalat .....	9
3.1.2 Muuttuvanopeuksinen tuulivoimala .....	10
3.1.3 Osittain muuttuvanopeuksinen tuulivoimala .....	11
3.2 Tuulivoimaloiden generaattorit.....	12
3.2.1 Epätahtigeneraattori .....	12
3.2.2 Liukurengasepätahtigeneraattori.....	13
3.2.3 Tahtigeneraattori .....	14
3.2.4 Kestomagneettitahtigeneraattori .....	14
3.2.5 Suurjännitegeneraattori .....	16
3.2.6 Taajuusmuuttaja.....	17
4 KESTOMAGNEETTITAHTIGENERAATTORIN TYYPPITESTAUS.....	17
4.1 Ulkopuolisten laitteiden testaukset .....	18
4.2 Kylmän generaattorin staattoriresistanssimittaus .....	18
4.3 Kylmän generaattorin tyhjäkäyntitesti .....	19
4.4 Generaattorin lämpenemäaajo .....	19
4.5 Kuuman generaattorin staattoriresistanssimittaus eli jäähtymiskäyrä..	20
4.6 Kuuman generaattorin tyhjäkäyntitesti.....	22
4.7 Generaattorin kuormituspisteajo.....	22
4.8 Ylikuormitustesti .....	23
4.9 Ylinopeustesti .....	23
4.10 Generaattorin värinämittaus .....	23
4.11 Generaattorin tyhjäkäyntikäyrä .....	23
4.12 Oikosulkutesti .....	24
4.13 Ylijännitetesti .....	24
4.14 Muita mittauksia ja määräyksiä.....	25
5 TESTISEGMENTTI .....	26
5.1 Tausta .....	26
5.2 Tavoitteet.....	26
5.3 Rakenne .....	27
5.4 Testitavoitteet .....	32
5.5 Mekaaniset kestävyys- ja lujuustestit.....	33
5.6 Sähköiset testit .....	33
5.7 Virtaus- ja lämpötilamittaukset.....	34
6 TESTIJÄRJESTELYT.....	35
6.1 Lämpötilamittaukset.....	35
6.2 Jäähdytysilmavirran mittaukset.....	36
6.3 Sähköisten suureiden mittaukset.....	37
7 TESTIT JA TULOKSET .....	38
7.1 Tyhjäkäyntipiste ja kuormituspiste .....	38
7.2 Lämpenemäajot.....	39

7.3 Venymäliuskamittaukset.....	48
8 POHDINTA.....	49
KUVAT.....	51
TAULUKOT.....	51
LÄHTEET.....	52

#### LIITTEET

Liite 1 Testiohjelma

Liite 2 Sähkönsyöttö- ja mittausjärjestelyt

# 1 JOHDANTO

Kun suoravetoisten tuuliturbiinien generaattoreilta vaaditaan paljon tehoa ja hyvää hyötysuhdetta pienellä pyörimisnopeudella, niiden koko alkaa kasvaa ja siten rajoittamaan generaattoreiden koeajoja ja tarkkojen mittaustietojen saamista käyttöpaikalta.

The Switchin valmista PMR3150-kestomagneettitahtigeneraattori painaa 84 tonnia, joten koeajo esimerkiksi Lappeenrannan koestamossa on mahdotonta. Generaattorin erikoispiirteenä on, että se koostuu 12 identtisestä staattorisegmentistä, kun taas perinteisen generaattorin staattori on yhtenäinen. Niinpä The Switch onkin kehittänyt erikoisen testipenkin prototyypin, jossa yhtä tällaista segmenttiä voidaan koeajaa pienemmässä mittakaavassa.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää, kuinka kyseinen testipenkki käytännössä toimii ja kuinka normaalin kestopagneettitahtigeneraattorin testaustoimenpiteitä voidaan soveltaa testisegmenttiin.

## 2 YRITYSESITTELY

The Switch perustettiin Lappeenrannassa marraskuussa 2006, kun alun perin lappeenrantalainen Rotatek Finland yhdistyi vaasalaisen Verteco Oy:n ja USA:n hudsonilaisen Youtility Inc:n kanssa. The Switch tuottaa pääasiassa megawattiluokan kestopagneettigeneraattoreita ja tehonmuokkaimia tuulivoimalakäyttöön sekä suurnopeuskoneita ja polttokennojen tehoelektroniikkajärjestelmiä teollisuuskäyttöön.

The Switch on kolmen yhtiön kokonaisuus, jossa The Switch Electrical Machines toimii Lappeenrannassa, The Switch High Power Converters Vaasassa, The Switch Controls and Converters USA:n Hudsonissa. Yhdessä The Switch Electrical Machines ja High Power Converters muodostavat kokonaisuuden The Switch Drive Systems. The Switchin päätoimisto sijaitsee Vantaalla. Muita toimipaikkoja sijaitsee Kiinan Pekingissä, Deyangissa ja Lu'anissa, Espanjan Barcelonassa sekä Saksan Hampurissa.

Lappeenrannan tehtaassa suunnitellaan, kootaan ja testataan kestopagneetti-generaattorien prototyyppejä pääasiassa Kiinan massatuotantoa varten. Lappeenrannassa voi koeajaa kolmea konetta yhtä aikaa, tyypitesti, rutiinitesti ja äänieristetyssä huoneessa suurnopeuskoneita. Nostokapasiteetti on 20 tonnia ja suurin koestamossa koeajossa ajettu teho on ollut jopa 3,8 MW. Koko The Switchin henkilöstömäärä on noin 200, joista Lappeenrannassa työskentelee noin 60 henkilöä. Tehonmuokkaimet kootaan ja testaan Vaasassa.

Yhtiöllä on myös kenttäkunnossapito-, varaosa-, koulutus- ja päivystystoimintaa. The Switchin asiakkaat ovat pääosin Euroopassa, Intiassa, Kiinassa ja Yhdysvalloissa. (The Switch 2010.)

### **3 TUULIVOIMAGENERAATTOREIDEN ERIKOISPIIRTEITÄ**

Tuulivoimaloiden turbiinit ja generaattorit eroavat monilta ominaisuuksiltaan toisistaan. Tiettyyn käyttöön ja paikkaan on hyvä valita juuri oikeilla ominaisuuksilla varustettu turbiini ja generaattori, jotta kaikki hyöty on saatavissa.

Raportissaan Tuulivoimateknologia sähköjakeluverkoissa Hannu Laakso ja Sami Repo (2003) kertovat nykyisten sähköjakeluverkkoihin liitettyjen tuulivoimalakonseptien teknisistä ominaisuuksista. Tämä luku (3) perustuu kyseiseen tutkimukseen, pois lukien luku 3.1.

#### **3.1 Tuulivoimalat**

Energian tarve on voimakkaasti lisääntymässä maailmalla. Samalla yritetään vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä ilmaston lämpenemisen takia. Silloin uusituilla energialähteillä on keskeinen osa tulevan energiatarpeen kasvun kattamisessa.

Tuulivoima on ollut 1990-luvulta nopeimmin kasvava sähköntuotantomuoto. Vuonna 2009 EU:ssa asennettiin tuulivoimaloita enemmän kuin mitään muuta uutta energiantuotantomuotoa. EU-maiden yhteinen tuulienergian kapasiteetti vuoden 2009 lopussa oli 74767 MW. Kasvun oletetaan lähivuosina jatkuvan. Ympäristövaikutusten lisäksi tuulivoimalla oletetaan olevan myös suuri työllistävä vaikutus. Käynnistyäkseen useimmat tuulivoimalat vaativat tuulen, jonka nopeus on vähintään 3 m/s. Nimellistehonsa ne saavuttavat noin 12–15 m/s tuulennopeudella ja pysähtyvät kun tuulennopeus saavuttaa noin 25 m/s.

Rakenteeltaan tuuliturbiinit ovat usein kolmilapaisia ja pyörimisnopeus on yleensä noin 10–25 r/min. Turbiini voidaan varustaa vaihteistolla, joka on yleensä 70–90-kertainen, jos generaattorin nimellisyörimisnopeus on esimerkiksi 1000–1500 r/min. Tahtigeneraattorilla varustettu muuttuvanopeuksinen tuuliturbiini ei välttämättä vaadi vaihteistoa. Turbiinit voidaan kääntää tuulen suunnan



mukaiseksi erillisellä moottorilla. Tornin korkeus on yleensä noin 50–90 m ja roottorin halkaisija noin 40–70 m.

Päätyypeiltään tuuliturbiinit ovat sakkaus-, aktiivisakkaus- tai lapakulmasäätöön perustuvia, vakio- kaksi- tai muuttuvanopeuksisia. Generaattorit ovat epätahtigeneraattoreita tai tahtigeneraattoreita ja verkkoon liitäntä on suora tai epäsuora. (STY Suomen Tuulivoimayhdistys ry.)

### **3.1.1 Vakionopeuksiset tuulivoimalat**

Vakionopeuksisen tuulivoimalan epätahtigeneraattori on kytketty suoraan verkkoon tuulen nopeudesta riippumatta. Turbiinin pyörimisnopeus määräytyy silloin verkon taajuudesta, epätahtigeneraattorin napaluvusta ja vaihteistosta. Pyörimisnopeus voidaan säätää halutuksi generaattorin magnetoinnilla ja turbiinin lapakulmalla. Vaikka vakionopeuksisen tuulivoimalan keskimääräinen hyötysuhde jää pienemmäksi kuin muuttuvanopeuksisen, on se silti tähän mennessä oikosulkugeneraattorin kanssa yleisimmin käytetty tuulivoimalatyyppeiksi kaupallisen tuulivoiman alalla.

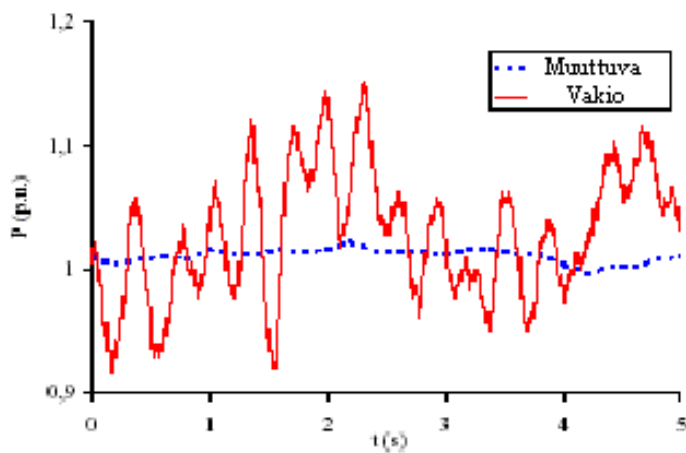
Vakionopeuksisiin tuulivoimaloihin luetaan myös kaksinopeuksiset tuulivoimalat. Niissä epätahtigeneraattorit ovat kaksoiskäämittyjä, käämit staattoriurassa päällekkäin, eli niillä on kaksi eri napalukua, jolloin ne voivat pyöriä kahta eri vakionopeutta. Kaksoiskäämitys on hieman yksikäämistä kalliimpi vaihtoehto, mutta sijoituspaikasta riippuen voimala voi olla huomattavasti tuotollisempi. Kaksinopeuksisuus voidaan tehdä myös kahdella erillisellä eri napalukuisella generaattorilla. Kaksinopeuksisuudella saadaan parempi hyötysuhde ja pienemmillä nopeuksilla saadaan hiljaisempi käyntiäänä.

Vakionopeuksisten tuulivoimaloiden tehon vaihtelut ovat suuria ja se näkyy verkossa niin sanottuna välkyntänä.

### 3.1.2 Muuttuvanopeuksinen tuulivoimala

Muuttuvanopeuksinen tuulivoimala on varustettu yleensä tahtigeneraattorilla tai epätahtigeneraattorilla, mutta verkkoon kytkentä on tehtävä epäsuorasti tehonmuokkaimilla eli taajuusmuuttajakäyttöillä. Taajuusmuuttajakäyttö on juuri se keskeinen asia joka antaa mahdollisuuden pyörimisnopeuden vaihteluun ja loistehon säätöön. Rahallisesti ei kuitenkaan ole järkevää asentaa epätahtigeneraattoria ja taajuusmuuttajaa samaan laitteistoon, koska epätahtigeneraattori on mahdollista kytkeä suoraan verkkoon. Kestomagneettitahtigeneraattoria käytettäessä voimala ei tarvitse vaihteistoa generaattorin moninapaisuuden ansiosta, tai vaihteisto on joka tapauksessa huomattavasti pienempi.

Muuttuvanopeuksisesta voimalasta ulos saatava teho on vakionopeuksista huomattavasti tasaisempaa, jolloin tehon vaihtelut eivät heijastu verkkoon välkyntänä ja sähkön laatu on siten parempaa. Kuvassa 1 on vertausesimerkki vakionopeuksisen tuulivoimalan ja muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan tehokäyrästä.



Kuva 1 Vakionopeuksisen ja muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan tehokäyrät (Laaksonen & Repo 2003, 16)

Muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan tehonvaihtelu samoissa tuuliolosuhteissa on huomattavasti tasaisempaa kuin vakionopeuksisen. Kuvassa pystyakselilla teho  $P$ (p.u.) ja vaaka-akselilla aika  $t$ (s).

Muuttuvanopeuksisessa tuulivoimalassa koneisto määrää itse pyörimisnopeutensa, jolloin generaattori pyrkii toimimaan lähellä maksimihyötysuhdettaan tuulennopeudesta riippumatta. Pyörimisnopeuden ei anneta kuitenkaan enää kasvaa huomattavasti nimellistehon saavutettuaan. Voimalan tehokerrointa ja sen tuottamaa loistehoa on myös mahdollista säätää taajuusmuuttajilla. Hidas pyörimisnopeus antaa hiljaisemmän käyntiäänien ja paremman kestoiän laitteistolle. Sijoituspaikasta riippumatta tuotanto on optimaalista. Turbiinin lavat voivat olla muihin laitoksiin verrattuna kapeampia ja kevyempiä, jolloin koko tornin rakenne saadaan kevyemmäksi. Laitteisto voi olla kuitenkin kovin monimutkainen ja viikaantumisherkkyytensä takia voi vaatia paljon huoltoa. Myös hinta on perinteistä vakionopeuksista suurempi. Kuitenkin tulevaisuudessa odotetaan muuttuvanopeuksisille tuulivoimaloille suurta kasvua kaupalliseen tuulivoiman tuotantoon.

### **3.1.3 Osittain muuttuvanopeuksinen tuulivoimala**

Osittain muuttuvanopeuksinen tuulivoimala on varustettu epätahtiliukurengasgeneraattorilla. Pyörimisnopeutta voidaan säätää muutamia prosentteja jättämällä säätämällä ja verkkoon kytkentä on suora. Pyörimisnopeuden säädöllä voidaan jonkin verran tasoittaa tehonvaihteluita ja puuskittaisen tuulen energia voidaan varastoida pyörimisenergiaksi.

Epätahtiliukurengasgeneraattorilla voidaan tehdä myös kaksoissyöttökytkentä, joka sallii pyörimisnopeuden vaihtelun tuulen tehon mukaan. Tässä kytkennässä generaattorin roottori on kytketty taajuusmuuttajakäytön kautta verkkoon ja staattori kytketty suoraan verkkoon. Taajuusmuuttaja säätää roottorikäimityksen virtaa ja noin 25–30 % tehosta siirtyy taajuusmuuttajan kautta verkkoon. Alle synkroninopeudella toimittaessa osa tehosta virtaa taajuusmuuttajan kautta verkosta roottorikäimitykseen, sieltä edelleen staattorikäimitykseen ja takaisin verkkoon. Tässäkin kytkennässä taajuusmuuttaja tasoittaa tehonvaihteluita tehokkaasti.

## 3.2 Tuulivoimaloiden generaattorit

### 3.2.1 Epätahtigeneraattori

Oikosulkugeneraattori on kaikkein yleisin tuulivoimaloiden generaattorityyppi. Sitä käytetään lähes kaikissa vakionopeuksisissa tuulivoimaloissa. Oikosulkugeneraattorit ovat epätahtigeneraattoreita ja rakenteeltaan melko yksinkertaisia, kestäviä ja hinnaltaan halvimmasta päästä. Yleisimmin käytetään 4- tai 6-napaista generaattoria.

Jättämänsä ansiosta epätahtigeneraattori tarjoaa tuuliturbiinille edullisia mekaanisia ominaisuuksia. Esimerkiksi vääntömomentin muuttuessa generaattorin nopeus tekee mukana pieniä muutoksia ja tämä vähentää vaihteiston kulumista. Luonnollinen jättämä kuitenkin pienenee generaattorin koon kasvaessa, jolloin epätahtigeneraattorin eivät voi olla kovin suuria. Lyhyesti jättämä kertoo, kuinka monta prosenttia roottorin nopeus eroaa verkon tahtinopeudesta. Moottorikäytössä roottori pyörii jättämän verran staattorikenttää jäljessä ja generaattori käytössä jättämän verran staattorikenttää edellä. Toisin sanoen, tuottaakseen energiaa on epätahtigeneraattorin roottorin pyörimisnopeus oltava suurempi kuin tyhjäkäyntinopeus. Vakionopeutta säädetään tuulivoimalan lapojen säädöllä sekä koneen magnetoinnilla siten, että tuulen nopeuden vähentyessä magnetointia vähennetään ja tuulennopeuden kasvaessa magnetointia kasvatetaan, jolloin generaattori jarruttaa roottoria ja antaa ulos suuremman tehon.

Epätahtigeneraattoria voidaan käyttää myös kaksinopeuksisessa tuulivoimalassa. Silloin generaattori on kaksoiskäämitty, eli sillä on kaksi napalukua, ja samalle roottorille saadaan kaksi eri pyörimisnopeutta. Tätä käytetään usein tuotannon lisäämiseksi paikoissa joissa tuulennopeus on muuttuva. Joskus käytetään myös kahta erillistä generaattoria.

Epätahtigeneraattori tarvitsee kompensointikondensaattorin tuottamaan loistehoa, jota se tarvitsee magneettikentän ylläpitoa varten. Loistehon tarve kasvaa tuotetun pätötehon mukaan. Yleensä kondensaattori mitoitetaan tuottamaan tyhjäkäyntitarvetta vastaavan osan tarvittavasta loistehosta ja loput generaattori

ottaa verkosta. Jos kondensaattori olisi kuitenkin tarpeeksi suuri tuottamaan kaiken tarvittun loistehon ja yhteys generaattorin ja verkon välillä katkeaisi, voisi generaattori jatkaa edelleen jännitteen kehittämistä. Generaattorin ominaisuuksista riippuen nämä itsemagnetoitumisesta johtuvat jännitteet voivat olla kovin säröytyneitä ja aiheuttaa vahinkoa generaattorin saarekkeeseen jääneille kuorimituksille.

Suorassa täyden jännitteen käynnistyksessä generaattori ottaa nimellisvirtaan nähden suuren, noin 3–10-kertaisen, käynnistysvirran magnetointiin. Tällöin amplitudi- ja taajuusvaihtelut ovat suurehkoja ja voi aiheutua myös suurehkoja lyhytaikaisia jännitteen alenemia. Tämä on estetty generaattoriin kytketyllä pehmokäynnistimellä, joka nostaa jännitettä asteittain ja siten pienentää virran amplitudia. Pehmokäynnistin ja kompensointikondensaattori ovat korvattavissa taajuusmuuttajakäytöllä, kun taajuusmuuttajalla voidaan säätää loistehoa.

### **3.2.2 Liukurengasepätahtigeneraattori**

Liukurengasepätahtigeneraattoria voidaan käyttää osittain muuttuvanopeuksissa tuulivoimaloissa, kun tarvittavan pyörimisnopeuden vaihtelualue on pieni. Roottoriresistanssia säätämällä voidaan säätää generaattorin jättämää noin 1–10 %, joka mahdollistaa roottorin pyörimisnopeuden vaihtelun. Säätö voidaan tehdä ulkoisella vastuksella, mutta jättämäsäätö on häviöllinen, jolloin generaattorin hyötysuhde heikkenee.

Liukurengasepätahtigeneraattori kuluttaa induktiivista loistehoa ja voidaan kytkeä myös suoraan verkkoon, mutta se vaatii paljon erilaista elektroniikkaa säätöihin. Siten rakenne on hieman oikosukugeneraattoria monimutkaisempi, sekä hinta ja huollon tarve suurempi. Huollon tarpeen heikkouksina ovat liukurenkaat ja hiiliharjat.

### 3.2.3 Tahtigeneraattori

Tahtikoneita käytetään paljon teollisuuden hitaissa ja paljon vääntömomenttia vaativissa käytöissä. Generaattorikäyttö on yleistä sekä vesivoimaloissa että tuulivoimaloissa.

Tahtigeneraattori on kiertokenttäkone ja pyörii verkon määräämällä tahtinopeudella, eli jättämää ei ole. Tahtinopeus syntyy, kun roottori pyörii ankkurikäimityksen synnyttämän magneettikentän kanssa samassa tahdissa. Kuormitettaessa tahtigeneraattoria liikaa, se putoaa tahdistista ja on välittömästi irrotettava verkosta. Roottorilla on oma magnetointikäimitys, johon johdetaan tasavirtaa, joka synnyttää päävuoksi kutsutun magneettivuon. Magnetointivirta johdetaan harjallisessa koneessa liukurenkaiden tai hiiliharjojen kautta. Harjattomassa koneessa on koneen akselilla erillinen magnetointigeneraattori tuottamassa napakäämivirtaa. Roottorin pyöriessä vuoviivat leikkaavat staattorin käämityksiä ja staattoriin indusoituu sinimuotoinen jännite.

Tahtigeneraattoria kuormitettaessa ankkurivirta muodostaa pyörivän vuoaallon, joka reagoi magnetointikäymien muodostaman päävuon kanssa. Tämän ankkuri-reaktioksi kutsutun ilmiön seurauksena syntyy sähkömagneettinen momentti magneettikenttien pyrkiessä samansuuntaisiksi. Generaattorin momentti on pyörimissuunnalle vastakkainen, jolloin se vaatii mekaanisen momentin roottorin pyörittämiseen.

### 3.2.4 Kestomagneettitahtigeneraattori

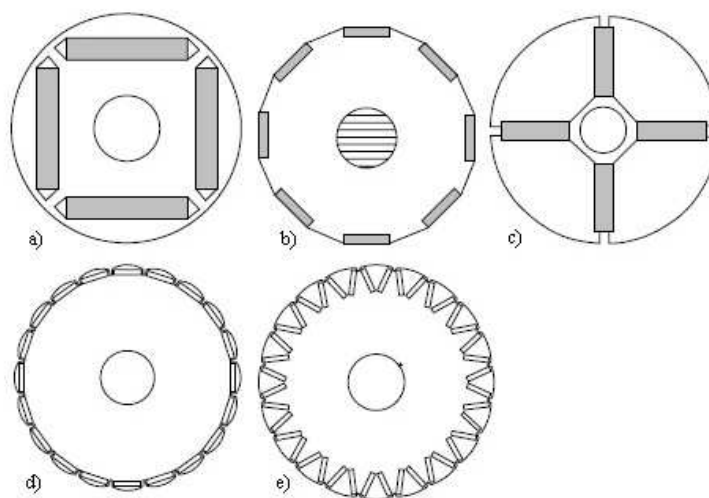
Kestomagneetikoneessa roottorikäimitys on korvattu kestopagneeteilla. Toimintaperiaate on melko samanlainen kuin perinteisillä tahtikoneilla, mutta erillinen magnetointipiiri voidaan jättää pois, jolloin hyötysuhdekin paranee. Kun roottorin magnetointia ei voida säätää, on magnetointi vakio ja tehokerroin muuttuu kuorman mukana. Kestomagneeteista johtuen vastajännite on pyörimisnopeudesta riippuvainen, jolloin kentänheikennys on rajallista. Lyhyesti kentänheikennys tarkoittaa käämivuon pienentämistä, pyörimisnopeuden nostamista yli nimellisnopeuden, jännitteen säilyessä nimellisarvossa. Kentänheikennys

onnistuu induktiokoneilla helpommin. Kestomagneetikoneen kentän heikennys joudutaan tekemään demagnetoivalla staattorivirralla.

Kestomagneettirakenne on yksinkertaistanut tahtikoneita, ja kun magneettien muotoja ja asennustapoja on useita, on siten kestomagneetikoneiden suunnittelu joustavampaa, konetyyppejä on useita ja kaikilla on omia erikoisominaisuuksia. Tehotiheys ja vääntömomentti tilavuutta kohden suurenevät kestomagneettien ansiosta, jotka parantavat koneen dynaamisia ominaisuuksia. Kestomagneettien remanenssivuo muuttuu lämpötilan mukaan ja magneetit sijaitsevat generaattorissa erittäin kuumassa paikassa, jolloin niillä on vaarana demagnetoitua. Siten myös koneen toimintapiste muuttuu jonkin verran lämpötilan mukaan. Kuitenkin ulkoroottorirakenteisissa generaattorimalleissa voi roottori olla rakennettu staattorin ympärille magneettien paremman jäähdytyksen takia.

Kestomagneetikoneen staattori on periaatteessa induktiokoneen kaltainen. Se kostuu runkoon kiinnitetystä dynamolevypaketista, jossa on urat staattorikämmitystä varten. Roottori on tavallisesti laminaateista valmistettu teräsrunko, johon kestomagneetit asennetaan.

Kuvassa 2 on esimerkkejä kestomagneettien asennusvaihtoehdoista roottoriin.



Kuva 2 Kestomagneettien asennustapoja roottoriin (Seppä 1997, muotoillut Vahvaselkä 2009, 27)

Kuvasta näkee että, roottorin rakenteita on useita ja rakenne voidaan helposti valita ja muokata sopivaksi käyttövasta riippuen. Kuvassa a) magneetit on upotettu roottoriin, b) magneetit on upotettu roottorin pintaan, c) magneetit on upotettu roottorin sisään pystysuorasti, d) magneetit on asennettu roottorin pinnalle ja päälle on asennettu napakengät ja e) kaksi magneettia napaa kohden on asennettu roottorin sisään V-asentoon.

Kestomagneettitahtigeneraattoria käytetään vain muuttuvanopeuksisissa tuuli-voimaloissa. Verkkoon kytkentä on tehtävä epäsuorasti taajuusmuuttajilla. Taajuusmuuttajakäyttö mahdollistaa generaattorin pätö- ja loistehon sekä tehoker-toimen säädön. Generaattorin moninapaisuuden ansiosta voimalat ovat yleensä vaihteettomia. Vaihteiston pois jättäminen vähentää voimansiirrossa hukattua energiaa, huoltoja, meluhaittoja sekä rakennelman massaa. Kestomagneetti-generaattoreilla saadaan aikaan tasaisempi teho, jolloin verkossa ei ilmene väl-kyntää ja sähkön laatu on parempi.

Kestomagneettitahtigeneraattoreiden kysyntä on jatkuvassa kasvussa kesto-magneettimateriaalien kehittymisen johdosta. Kysyntään ja koneiden kehityk-seen ovat vaikuttaneet myös taajuusmuuttajakäyttöjen kehittyminen koneiden säädössä ja hallittavuudessa. Aiemmin kestopmagneettigeneraattorit olivat vain joidenkin kymmenien kilowattien luokkaa, mutta kehityksen myötä koneet ovat jo megawattiluokkaa.

### **3.2.5 Suurjännitegeneraattori**

Suurjännitegeneraattori voi olla sekä epätahti- että tahtigeneraattori. Etuina sillä on pienempi virta ja siten pienemmät kuparihäviöt sekä mahdollisuus suoraan verkkokytkentään ilman muuntajaa. Muuten verkkoonkytkentä- ja ohjausvaati-mukset ovat samat kuin alempijännitteisilläkin generaattoreilla. Suurjännite-generaattorin käyttö soveltuu parhaiten suuriin, yli 3 MW, voimalaitoksiin gene-raattorin ja lisäkomponenttien korkeiden kustannusten takia. Maailmassa tällai-sia voimaloita on käytössä vain muutamia.



### **3.2.6 Taajuusmuuttaja**

Taajuusmuuttajalla muutetaan generaattorin tuottama eri taajuinen vaihtovirta verkkotaajuiseksi. Tällöin generaattorin pyörimisnopeus ei enää ole riippuvainen napaluvustaan ja verkon taajuudesta. Taajuusmuuttaja koostuu tasasuuntaajasta ja vaihtosuuntaajasta ja niiden välisestä välipiiristä.

Puuskittaisessa tuulessa taajuusmuuttajalla voidaan varastoida ylimääräistä energiaa pyörimisenergiaksi. Samalla voidaan taajuusmuuttajalla muuttaa vääntömomenttia ja siten vähentää laitteistoon kohdistuvia epätasaisia rasituksia.

Taajuusmuuttajaratkaisulla on kuitenkin suuret pääomakustannukset ja suuri vikaantumisherkkyys nostaa huollon tarvetta ja laskee käytettävyydestä. Muuttajan suuntaajien AC-DC-AC-prosessi aiheuttaa huomattavia tehohäviöitä. Muuttaja syöttää verkkoon myös jonkin verran yliaaltoja, kun kaikkia ei voida poistaa suodattimilla, jolloin sähkön laatu huononee.

## **4 KESTOMAGNEETTITAHTIGENERAATTORIN TYYPPITESTAUS**

Tässä osiossa esitetään kestopagneettitahtigeneraattorin tyyppitestauksen vaatimat testit käytännöllisessä järjestyksessä. Testaus suoritetaan IEC (International Electrotechnical Commission) 60034-standardin vaatimusten mukaan ja sovelletaan The Switch Drive Systems Oy:n testauskäytäntöjä. Standardi ei kuitenkaan selvitä juurikaan kestopagneettitahtikoneen testauksesta, joten testatessa joudutaan soveltamaan normaalin vierasmagnetoidun tahtikoneen ja epätahtikoneen testausstandardeja.

IEC 60034-standardi, Rotating Electrical Machines, on maailman laajuinen, enimmäkseen EU-alueilla käytetty, sähkökoneiden energiatehokkuuteen liittyvä standardi ja määrittelee muun muassa hyötysuhdeluokituksia ja hyötysuhdemittauksia sekä koneen parametrien selvitystä. Kun moottorivalmistajat ilmoittavat

koneidensa hyötysuhdearvot, ovat ne keskenään verrannollisia vain, mikäli ne perustuvat samaan mittausstandardiin.

Mitatut suureet olisi hyvä muuttaa suhteellisarvoiksi, jotka perustuvat jännitteen  $U_n$  ja näennäistehon  $S_n$  nimellisarvoihin. Vain aika  $t$  ilmoitetaan todellisena arvona.

Kun testejä tehdään taajuusmuuttajasyötöillä, on otettava huomioon taajuusmuuttajien parametrien vaikutus koneiden toimintaan.

#### **4.1 Ulkopuolisten laitteiden testaukset**

Ulkopuolisten laitteiden testaukset on selvitetty standardissa IEC 60034-1. Testaus käsittää generaattoriin liittyvät ulkopuoliset laitteet, kuten lämmönvaihtimen puhaltimet, lämmitysvastukset ja suojakomponentit. Laitteiden tulisi olla silmämääräisesti päällisin puolin kunnossa ja niiden toiminta on myös testattava sekä mitattava niiden käyttämä jännite, virta ja teho hyötysuhdelaskentaa varten.

#### **4.2 Kylmän generaattorin staattori-resistanssimittaus**

Staattori-resistanssimittaus on selvitetty standardissa IEC 60034-4. Mittauksella varmistetaan käämityksen kunto ja voidaan selvittää esimerkiksi generaattorin kuparihäviöitä.

Mittauksessa mitataan staattorin jokaisen vaihekäämin DC-resistanssi. Jos käämityksessä on avattava tähtipiste, on se avattava ja mitattava jokainen vaihe alku- ja loppupään väliltä, U1-U2, V1-V2, W1-W2. Jos tähtipiste on sisäinen, voidaan resistanssi mitata vaiheparien väliltä, U-V, U-W, V-W. Mittaus tehdään nelijohtimisena, DC-jännitteellä ja vähintään viiden ampeerin virralla. Käämi-resistanssien ero toisiinsa nähden saisi olla korkeintaan 2 % ja resistanssiarvon tulisi olla 5 % tarkkuudella suunnitellun arvon suuruinen. Mittaustiedoissa tulee myös ilmetä käämityksen lämpötila, josta resistanssi on riippuvainen.

### **4.3 Kylmän generaattorin tyhjäkäyntitesti**

Kylmän koneen tyhjäkäyntitesti on selvitetty standardissa IEC 60034-4. Testissä pyritään selvittämään generaattorin tyhjäkäyntijännite ja nimellisnopeutta vastaava taajuus sekä voidaan määrittää tahti-induktanssi, tyhjäkäyntihäviöt sekä kitkahäviöt momenttianturilla mitattaessa.

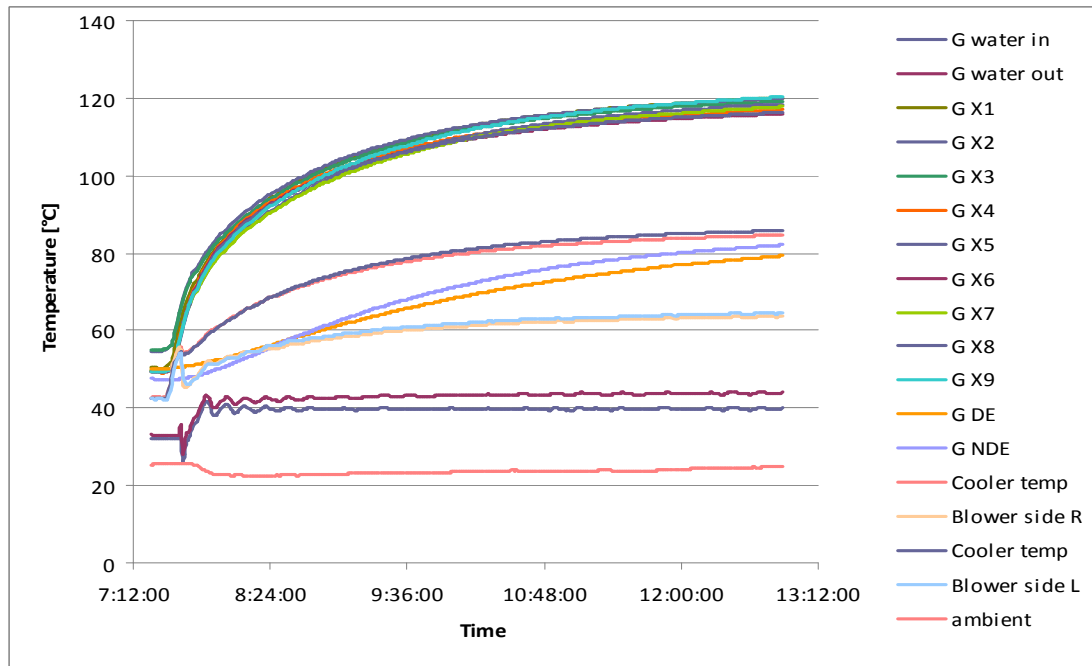
Generaattoria pyöritetään voimakoneella, ja sen staattorikäimityksen on oltava avattuna. Jokaisen vaiheen tyhjäkäyntijännite voidaan mitata suoraan generaattorin kytkentäterminaalista. Jännitteiden ero saisi olla korkeintaan 2 % ja THD-arvo eli kokonaisharmoninen särö korkeintaan 3 %. Mittaustulokset on tallennettava harmonisten virta- ja jännitekomponenttien taajuusanalyysiä varten. Testin aikana roottorin lämpötilan ei saisi ehtiä nousemaan huomattavasti lähtötilanteesta. Lisäksi on mitattava ympäristön lämpötila.

Tyhjäkäyntihäviöt voidaan mitata tyhjäkäyntitestin lopuksi, kun konetta ajetaan moottorina. Mittaustulokset ovat hyväksyttäviä, mikäli mitattu tyhjäkäyntiteho vaihtelee alle 3 % nimellisestä tyhjäkäyntitehosta ja voidaan mitata kaksi 30 minuutin aikajaksoa.

### **4.4 Generaattorin lämpenemäajo**

Generaattorin lämpenemätesti on selvitetty standardeissa IEC 60034-1, 60034-2 ja 60034-11. Testissä pyritään selvittämään muun muassa hyötysuhdetta, kuormitushäviöitä ja koneen nimellislämpötilaa sekä tutkitaan termistä kestävyyttä ja jäähtymisen toimintaa.

Generaattoria pyöritetään voimakoneella generaattorin nimellisessä toimintapisteessä. Generaattoria pyöritetään niin kauan, kunnes se on saavuttanut loppulämpötilansa, joka määritetään saavutetuksi kun generaattorin lämpötilojen nousu on enää suurimmillaan 2 °C/h. Jäähdytysaineen ja ympäristön lämpötilaa pyritään pitämään vakiona. Kuvassa 3 on esitetty erään generaattorin lämpötilojen muutos lämpenemäajossa.



Kuva 3 Generaattorin lämpenemä

Kuvaajassa näkyy muun muassa staattorikäymitysten, laakereiden jäähdytysilman ja -veden sekä ympäristön lämpötilat.

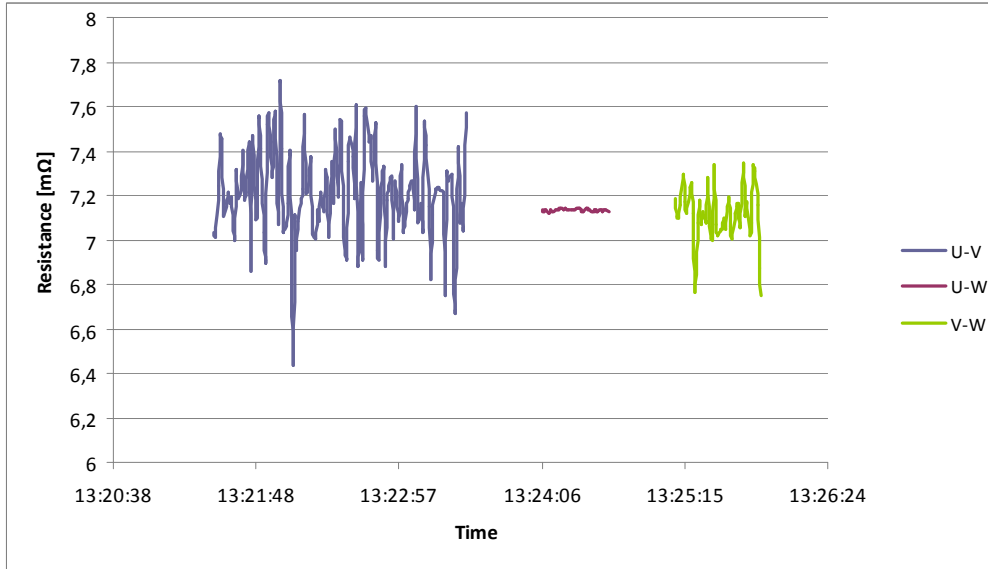
Lisäksi generaattorista mitataan ja tallennetaan jännite, virta, teho ja tehokerroin. Jos generaattorin ja voimakoneen välillä ei ole momenttianturia, on koneiden oltava identtiset. Silloin myös voimakoneesta mitataan samat sähköiset suuret.

#### 4.5 Kuumen generaattorin staattoriresistanssimittaus eli jäähtymiskäyrä

Jäähtymiskäyrä on selvitetty standardissa IEC 60034-1. Testissä pyritään selvittämään staattorikäymityksen keskimääräistä tasaantunutta loppulämpötilaa ja koneen lämpenemää staattoriresistanssin  $R_S$  perusteella.

Mittaus suoritetaan kuumasta koneesta heti lämpenemääjon jälkeen. Generaattorin teholuokasta riippuen mittaus on aloitettava 30, 90 tai 120 sekunnin sisällä generaattorin pysähtymisestä. Mittaus on periaatteessa melko samanlainen kuin kylmän generaattorin staattoriresistanssimittaus. Staattorikäymityksiin syötetään tasavirtaa ja PC piirtää mittauskäyrän vaiheiden välisestä resistanssista

ajan funktiona. Mittauksen aloituksen myöhästyessä pysähtymishetken kuuma-resistanssi on arvioitava mittauskäyrän perusteella. Kuvassa 4 on esimerkki eräästä generaattorista mitatusta jäähtymiskäyrästä.



Kuva 4 Esimerkki jäähtymiskäyrästä

Kuvaajasta voi todeta, että käämiresistanssien keskiarvot, noin 7,1 mΩ, ovat lähes symmetrisiä vaikka amplitudi onkin huomattavan suuri. Voidaan myös olettaa, että U-V-vaiheparin mittauksen aikana on signaalissa ollut häiriötä, joka voi johtua myös roottorin asennosta.

Käämityksen lämpenemä voidaan laskea kaavasta

$$\frac{\theta_2 + k}{\theta_1 + k} = \frac{R_2}{R_1} \quad (1)$$

josta saadaan

$$\Delta T = \theta_2 - \theta_a = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \times (k + \theta_1) + \theta_1 - \theta_a \quad (2)$$

missä  $\Delta T$  on käämityksen lämpenemä,  $\theta_1$  on käämityksen lämpötila kylmä-resistanssimittauksen aikana,  $\theta_2$  on käämityksen lämpötila lämpenemääjon jälkeen,  $\theta_a$  on jäähdytysaineen lämpötila ja  $k$  on käämityksen materiaalikerroin.

#### **4.6 Kuuman generaattorin tyhjäkäyntitesti**

Kuuman koneen tyhjäkäyntitesti on selvitetty standardeissa IEC 60034-1 ja 60034-4. Testissä pyritään arvioimaan roottorin lämpötilaa generaattorista mitattua vastajännitteestä, kun tiedetään myös kylmän koneen vastajännite. Testissä voidaan selvittää myös tyhjäkäyntihäviöitä ja rautahäviöitä, jotka voidaan laskea tyhjäkäyntikäyrästä edellyttäen, että tuuletus- ja kitkahäviöt on laskettu.

Käytännössä testi on samanlainen, kuin kylmän koneen tyhjäkäyntitesti.

#### **4.7 Generaattorin kuormituspisteajo**

Kuormituspisteet on selvitetty standardissa IEC 60034-1. Testissä pyritään selvittämään kuormitushäviöitä simuloimalla eri kuormitusolosuhteita. Testi sisältää kaksi eri osaa.

Kummassakin testissä generaattoria pyöritetään voimakoneella ja talteen mitataan jännite, virta, teho, tehokerroin, pyörimisnopeus, vääntömomentti ja hyötysuhde jokaisessa kuormituspisteessä. Käämitysten lämpötilojen muutos kuormitusajon aikana saisi olla korkeintaan 5 °C.

Ensimmäisessä testissä pyörimisnopeutta muutetaan nimellisnopeudesta alaspäin porrastettuna. Samalla muutetaan vääntömomenttia eli kuormitusta erillisen ohjeen mukaan, joka määräytyy generaattorin toimintapisteiden pohjalta suunnitellusta käyrästä. Testi ei ole standardien määräämä, mutta sillä saa hyvän kuvan hyötysuhteen käyttäytymisestä nopeuden muuttuessa.

Toisessa testissä, joka on standardien määräämä, pyörimisnopeus pidetään nimellispisteessä ja kuormitusta muutetaan porrastettuna.

Käämitysten keskimääräistä lämpötilaa kuormituspisteissä voidaan arvioida, kun käämiresistanssit mitataan ennen ensimmäistä kuormituspistettä ja viimeisen kuormituspisteen jälkeen.

#### **4.8 Ylikuormitustesti**

Ylikuormitustesti on selvitetty standardissa IEC 60034-1. Tarkoituksena on varmistaa generaattorin mekaaninen toiminta ylikuormalla.

Testissä generaattoria pyöritetään voimakoneella ja ylikuormitetaan 1,5-kertaisella nimellisvirralla 30 sekunnin ajan.

#### **4.9 Ylinopeustesti**

Ylinopeustesti on selvitetty standardissa IEC 60034-1. Testissä halutaan tutkia generaattorin roottorin mekaanista selviytymistä, kun sitä pyöritetään voimakoneella 1,2-kertaisella nopeudella nimellisuopeudesta, kahden minuutin ajan.

#### **4.10 Generaattorin tärinämittaus**

Ylinopeuden jälkeen generaattorista on mitattava sen tärinäarvot aksiaali- ja radiaalisuunnassa nimellisuopeudella. Tärinöitä on hyvä mitata myös muilla pyörimisnopeuksilla. Mittauksissa pyörimisnopeuden määräämä taajuus on tiedettävä. Tärinämittaus on selvitetty standardissa IEC 60034-14.

#### **4.11 Generaattorin tyhjäkäyntikäyrä**

Generaattorin tyhjäkäyntikäyrä on selvitetty standardeissa IEC 60034-1, 60034-2 ja 60034-4. Testistä voidaan selvittää muun muassa generaattorin rauta- ja kuparihäviöitä sekä lisähäviöitä.

Generaattoria ajetaan moottorina, irti voimakoneesta, nimellisellä pyörimisnopeudella ja loppulämpötilassa. Koneen syöttöjännitettä pudotetaan portaittain nimellisjännitteestä. Mittauspisteitä on oltava vähintään 7, joista vähintään neljä

pistettä mitataan syöttöjännitteen ollessa 1,25–0,6-kertainen ja vähintään kolme pistettä syöttöjännitteen ollessa 0,5–0,2-kertainen nimellisjännitteestä.

Mittauspisteistä tulee mitata talteen jännite, virta, teho ja taajuus sekä ympäristön lämpötila. Mittaukset on suoritettava siten, että generaattorin lämpötila ei ehdi juurikaan muuttua.

#### **4.12 Oikosulkutesti**

Oikosulkutesti on selvitetty standardissa IEC 60034-4. Testissä selvitetään koneen mekaanista kestävyyttä suurissa vääntömomentti-iskuissa. Kuumasta generaattorista voidaan määrittää myös tahti-induktanssi  $L_d$ , subtransientti-induktanssi  $L_d''$  ja subtransienttiaikavakio  $\tau_d''$  oikosulkuvirroista.

Generaattoria pyöritetään voimakoneella tyhjäkäyntinopeudella, josta generaattorille tehdään kolmivaiheinen oikosulku. Koneiden välissä olisi syytä olla helposti aukeava kytkentä suuren momentti-iskun takia. Generaattorin on kestettävä vähintään 30 sekunnin oikosulku, ja oikosulkupisteen olisi oltava mahdollisimman lähellä generaattorin kytkentäterminaalia. Oikosulku on tehtävä minuttin sisällä generaattorin kuorman poiskytkennästä. Generaattorista mitataan oikosulussa vaihevirrät ja ennen oikosulkua vastajännite.

#### **4.13 Ylijännitetesti**

Ylijännitetesti on selvitetty standardeissa IEC 60034-1 ja 60034-15. Testissä todetaan generaattorin hyvä eristys.

Testissä syötetään staattorikäymykseen  $1000VAC + 2U_nVAC$  ja vuotovirta maahan saa olla erillisen suunnitteluvarvon sisällä.



#### 4.14 Muita mittauksia ja määräyksiä

KytKentäterminaalin merkinnät U, V, W, N, PE, TC<sub>x</sub> tulee olla näkyvissä ja asianmukaiset. Myös generaattorin pyörimissuunta on merkittävä. Merkinnät on selvitetty standardissa IEC-60034-8.

Lämpötiloja voidaan mitata esimerkiksi PT-100-lämpötila-antureilla, joita sijoitetaan esimerkiksi staattorikämmityksiin, roottoriin, kytKentäterminaaliin, laakereille, jäähdytysilmalle ja -vedelle sekä generaattorin ulkoympäristöön. Generaattoriin kiinteästi asennetuista PT-100-antureista mitataan jokaisen anturin yksittäiset vastusarvot, joiden ero saisi olla  $\pm 2\%$ . Anturien paikat olisi hyvä valita niin, että ne ovat koneen oletettavasti kuumimmassa paikassa.

Ennen generaattorin kytkemistä ja asentamista testilaitteistoon siitä mitataan PT-100-lämpötila-anturien yhteinen ja staattorikämmityksen eristysvastus eristysvastusmittarilla. Eristysvastusmittaukset ja kämmiresistanssit mitataan myös testiajokokonaisuuden jälkeen. Lisäksi mitataan lisälaitteiden ja laakerien eristysvastus. Eristysvastusmittauksia on selvitetty standardissa IEC 60851-5 ja IEE 43.

Akseli- ja laakerivirtojen mittaus on selvitetty standardissa IEC 60034-17. Akselista mitataan akselin päiden välinen virta ja akselin ja rungon välinen jännite sekä laakerin maadoitushiiliharjan kautta kulkeva virta.

Samat mittaukset suoritetaan varmistukseksi myös testiajokokonaisuuden jälkeen. Lisäksi mitataan myös generaattorin polarisaatioindeksi, joka tarkoittaa eristysvastusmittauksen loppuarvon ja alkuarvon suhdetta ajan hetkellä, esimerkiksi  $PI = R_{E(600\text{sek})} / R_{E(60\text{sek})}$ . Kaikissa mittauksissa mittalaitteiden tulisi olla kalibroituja ja muuten hyväkuntoisia.

Standardissa IEC 60034-1 on ehtoja generaattorin käyttöympäristöstä nimellispisteen määrittämiseen. Esimerkiksi ympäristön lämpötila ei saisi ylittää 40 °C, eikä olla alle -15 °C. Generaattorin ympäristössä olevien lämpötilan mittauspisteiden tulisi olla noin metrin etäisyydellä testattavasta koneesta ja korkeudeltaan

puolet koneen korkeudesta. Jäähdytystavasta riippuen myös jäähdytysaineiden ja koneessa kiertävien jäähdytysilmojen lämpötilat tulee mitata. Käytettäessä vesi-ilmalämmönvaihtimia ei veden lämpötila saisi ylittää 25 °C. Käytetyistä lämpötiloista voi kuitenkin sopia tapauskohtaisesti. Esimerkiksi ilmajäähdytteisen generaattorin sisään menevää ilmaa yritetään pitää arvossa 40 °C säätämällä joko lämmönvaihtimen jäähdytysveden lämpötilaa tai ympäristön lämpötilaa.

## **5 TESTISEGMENTTI**

### **5.1 Tausta**

PMR3150-kone on tuuliturbiinikäyttöön tarkoitettu suoravetoinen kestopäätitahtigeneraattori, joka on maksimiteholtaan 4,25 MW. Nimellisjännite on 690 V, nimellisyörimisnopeus on  $15 \frac{1}{\text{min}}$  ja mekaaninen maksiminopeus 1,7-kertainen nimellisuopeudesta. Kone on jäähdytykseltään ilmajäähdytteinen, suljettu sisäinen kierto, toisiopuoli on nestejäähdytteinen ja välissä on lämmönvaihdin. Staattorikämmityksen lämpötiloja tarkkaillaan 108 kappaleella PT-100-antureita ja lisäksi lämpötiloja tarkkaillaan laakereista, roottorista, jäähdytyksestä ja ympäristöstä. Erikoispiirteenä on uusi tuplaradiaalijäähdytys.

PMR3150-generaattori on massaltaan noin 84 tonnia, pituudeltaan noin 3 m ja suurin halkaisija on noin 7,45 m. Sen staattori koostuu 12:ta yhtäläisestä segmentistä. Generaattorin koeajaminen kasattuna on jokseenkin rajallista ja mittatietojen kerääminen käyttöpaikalta onkin osoittautunut teknisesti hankalaksi ja hintavaksi. Siksi pyritään hyödyntämään generaattorin segmenttirakennetta testaamalla siitä yhtä segmenttiä.

### **5.2 Tavoitteet**

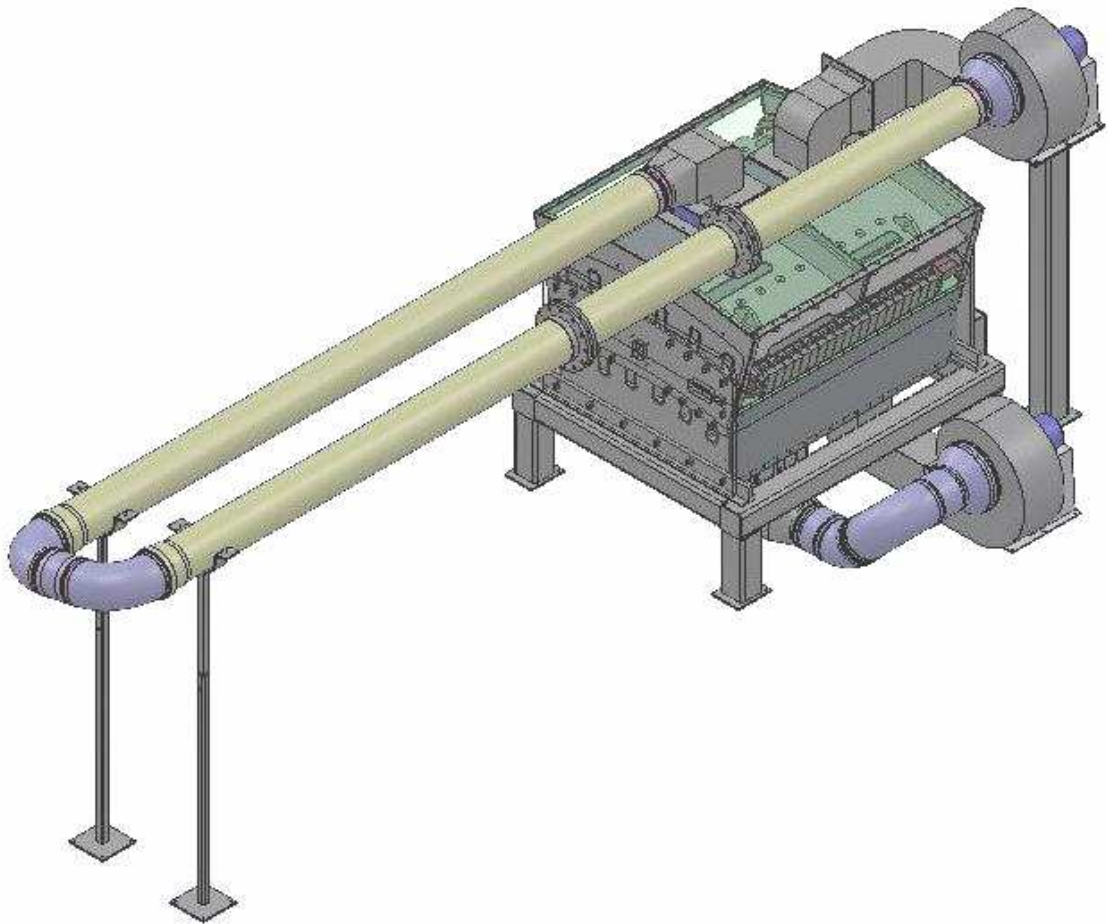
Ensisijaisena tavoitteena The Switchillä oli rakentaa segmentille testilaitteisto, jolla voi mahdollisimman hyvin simuloida generaattorin todellisia käyttöolosuh-

teita. Laitteistolla oli määrä testata muun muassa PMR3150-generaattorin ns. tuplaradiaalijäähdytysjärjestelmän suorituskykyä erilaisilla lämpökuormilla, testauskonstruktioiden käytettävyyttä mekaanisten voimien mittaamisessa sekä generaattoritoiminnan demonstroimista mitattaessa roottorin ja staattorin välistä voimaa erilaisilla ilmapölyvuon tiheyksillä. Tärkeää laitteiston toteutuksessa oli staattorisegmentin ja roottorisimulaattorin välisen ilmapölyn säädettävyys.

Mitattavat suureet otetaan tarkoin talteen, jotta testipenkkiä voidaan kehittää mahdollisimman paljon, sillä konstruktiolla voidaan simuloida todellisen koneen toimintaa hyvinkin tarkasti tietyssä mittakaavassa. Tulevaisuutta ajatellen laitteisto sopii hyvin tuotekehityksen apuvälineeksi sekä sarjatuotannossa segmenttien testaukseen ennen lopullista kokoonpanoa.

### **5.3 Rakenne**

Testilaitteiston periaatteellinen rakenne koostuu taajuusmuuttajalla magne- toidusta, uritetusta roottoriosasta ja toisella taajuusmuuttajalla kuormitetusta aktiivistaattorisegmentistä. Staattorisegmentti on käytännössä kokoon puristettu levypakka käämityksineen. Roottori- ja segmenttiosat on kiinnitetty niin kutsut- tuun testipenkkiin. Kuvassa 5 on testipenkin suunnitelma laitteistoineen ja ku- vassa 6 testipenkki käytännössä.



Kuva 5 Testipenkin suunnitelma

Kuvassa näkyy staattori ja roottoripuolen puhaltimet ja segmentit kiinni penkissä. Pitkä putkisto on jäähdytyksen virtaus- ja painemittauksia varten.



Kuva 6 Testipenkki käytännössä

Testipenkki koostuu samanlaisista metallirakenteista kuin generaattori itse. Alemmassa osassa on kiinteä roottorikäänitys, jonka päälle asennetaan testattava segmentti. Segmentti koostuu itse staattorikäänityksestä ja sitä vastaavasta runko-osasta. Staattori- ja roottoripuoliskoilla on molemmilla oma jäähdytyslaitteistonsa. Penkin runkoon on kiinnitetty syöttökaapeleiden kytkentäkotelot, ja yhteen erilliseen koteloon on kytketty kaikki mittausanturit ja mittalaitteet.

Todellisen kestopagnetoidun roottorin tuottamaa ilmavälivuota simuloidaan roottorisegmentin omalla kolmivaihekäänityksellä. Kolmivaihekäänitystä syötetään taajuusmuuttajalla, jolloin ilmavälivuosta muodostuu suurin piirtein sinimuotoinen, vaikka generaattorikäytössä ilmavälivuo onkin lähempänä kanttiaaltoa. Ilmavälivuota voidaan säätää muuttamalla taajuusmuuttajan syöttötaajuutta. Kuvassa 7 näkyy staattori- ja roottorisegmentit päällekkäin testipenkissä.



Kuva 7 Staattori- ja roottorisegmentit päällekkäin

Kuvassa 8 näkyy staattori- ja roottorisegmenttien vyyhdenpäät ja segmenttien ilmaväli.



Kuva 8 Vyyhdenpäät ja ilmaväli

Roottorin pinta on suljettu pleksilasilla, koska sähköisesti magnetoituna roottorirakenteen häviöt eroavat kestmagnetoidusta roottorirakenteesta. Siten roottorin jäähdytys voidaan tehdä erilliseksi ja jäähdytysratkaisun suorituskykyä voidaan mitata mahdollisimman suurella tarkkuudella.

Staattorin ja roottorin taajuusmuuttajat kytketään yhteen välipiireistään, jolloin käytännössä magnetoivan ja kuormana olevan invertterin vaihesiirron on oltava  $180^\circ$ . Taajuusmuuttajat on synkronoitu testilaboratorion logiikkaohjelmalla.

Muita rakennevaihtoehtoja kyseiselle laitteistolle olisi ollut esimerkiksi:

- Taajuusmuuttajalla magnetoitu, uritettu roottori ja PMR3150-generaattorin aktiivistaattorisegmentti kytkettynä kuormavastukseen, jolloin staattori ja roottori muodostavat muuntajan ja roottorin virtaa säädetään vastuskuormalla

- Taajuusmuuttajalla magnetoitu, uritettu roottori ja staattorisegmentti jossa aktiivitasasuuntaaja ja verkkovaihtosuuntaaja
- PMR3150-generaattorin roottorisegmentti ilman magneetteja ja taajuusmuuttajalla tai tasavirralla magnetoitu staattorisegmentti
- PMR3150-generaattorin roottorisegmentti kestomagneetteineen ja taajuusmuuttajalla tai tasavirralla magnetoitu staattorisegmentti

Kyseinen vaihtoehto valittiin, koska se soveltuu monipuolisiin mittauksiin sekä termisten että voimien kannalta.

#### **5.4 Testitavoitteet**

Testiohjelma on liitteessä 1.

Laitteiston ensisijaiset testitavoitteet ovat seuraavat:

- Staattorin häviöjakauman selvitys
- Staattorin lämpötilajakauman selvitys
- Roottorille tulevan jäähdytysilman lämpötilat ja virtaukset roottorisuunnittelua varten
- Aktiiviosan painehäviöt
- Liitosten lämpenemät
- Vyyhdenpään taipumat
- Aktiiviroottorin levypaketin kiinnitysmahdollisuudet
- Segmentin suorituskyvyn mittaus
- Mekaaniset kuormitukset
- Muodonmuutokset

Testatessa pyritään saamaan roottorisegmentin toimintapiste mahdollisimman lähelle todellista tuulivoimageneraattorikäyttöä vastaavaa toimintapistettä.



## 5.5 Mekaaniset kestävyys- ja lujuustestit

Laitteistoa pyritään kuormittamaan mekaanisesti mahdollisimman todellisia olosuhteita vastaten ja tutkitaan seuraavaa:

1. Mekaaninen taipuma
  - simuloidaan dynaamisia kuormia
  - simuloinnin vastaavuus todellisuuteen
  - venymäliuskamittaus
2. Vyyhdempään taipumat
3. Liitosten lämpenemät
  - PT-100-anturit
4. Aktiiviroottorin levypaketin kiinnitys hitsaamalla, sormilevyn jäykkyys
5. Muodonmuutokset
  - siirtymän mittaus staattisessa tilassa
  - siirtymän mittaus hitaasti muuttuvassa tilassa
6. Testisegmentin sähköpakan levyjen välinen puristusvoima:
  - moodianalyysi
  - kynäveitsi
  - magneettihaarukka
  - tactile pad-anturi, herkkyysanturi
  - taajuusanturianalyysi

Kyseiset testit ovat apuna tuotekehitykselle ja materiaalivalinnoille.

## 5.6 Sähköiset testit

Seuraavia sähköisiä testejä pyritään tekemään samoin kuin normaalisti generaattoria koeajettaessa, mikäli mahdollista:

1. Staattorin aktiiviosa ja selkärauta
  - simuloidaan dynaamisia kuormia
  - venymäliuskat
2. Staattorin häviöjakauman selvitys

3. Staattorin aktiiviosan lämpötilat
  - käämityksen lämpötilat
  - kytkentäpään lämpötilat
  - lämpötilat sähköpakan pinnassa
  - lämpötilat pakan sisällä, sormen keskellä
4. Roottorin aktiiviosan lämpötilat
  - käämityksen lämpötilat
  - kytkentäpään lämpötilat
  - lämpötilat sähköpakan pinnassa
5. Segmentin suorituskyvyn mittaaminen
  - segmentin toimintapiste mahdollisimman lähelle todellista
6. Eristysresistanssi
7. Kylmäresistanssi
8. Jännitekestoisuus
9. Vastajännite
10. Lämpenemäaajo nimellisteholla
11. Lämpenemäaajo moottori-moodissa
12. Lämpenemäaajo, lämpöluokka B
13. Kuormituspisteet (nimellinopeus, kuorma 20–100 %)
14. Tehokäyrä (muuttuva nopeus, muuttuva virta)
15. Ylikuorma

Sähköisissä testeissä pyritään soveltamaan myös IEC-standardeja.

### **5.7 Virtaus- ja lämpötilamittaukset**

Laitteistonjäähdytyksen suorituskykyä tutkitaan seuraavilla testeillä:

1. CFD-mallinnuksen (Computational Fluid Dynamics) verifiointi
2. Excel-mallin verifiointi
3. Staattorin aktiiviosan painehäviöt eri virtauksilla
4. Virtauksen jakautuminen staattoriselän aksiaalikanaviin
5. Virtauksen jakautuminen staattoriselän radiaalikanaviin
6. Virtauksen jakautuminen vyyhdenpäille

7. Vuotovirtaus ilmavälistä vyyhdenpäille
8. Derating-laskennan verifiointi
9. Tuplaradiaalijäähdytyksen suorituskyvyn arviointi erilaisilla lämpökuormilla
10. Jäähdytyspuhaltimien ominaisuudet

Jäähdytysmittauksista on mahdollista eritellä myöhemmin sähköiset häviöt hyötysuhdelaskentaa varten.

## **6 TESTIJÄRJESTELYT**

### **6.1 Lämpötilamittaukset**

Staattorisegmentistä mitataan lämpötiloja useissa eri pisteissä, jotta saadaan selville aktiiviosien lämpenemä eri toimintapisteissä ja pystytään vertaamaan eri osien lämpötiloja laskennan tuloksiin. Toimintapiste, jossa lämpötiloja mitataan, määrätään muuttamalla staattorin häviötehoa ja -jakaumaa, staattoriin sisään menevän jäähdytysilman lämpötilaa ja jäähdytysilman tilavuusvirtaa.

Staattorisegmentin käämitysten lämpötiloja mittaa vyyhdenpäissä kuusi PT-100-anturia ja kolme kappaletta keskempänä segmenttiä levypakkojen välissä. Kylmä- ja kuumakanavissa on kummassakin kaksi PT-100-anturia, jotka mittaavat käämien ja levypakkojen pintalämpötilaa kanavien kohdalta. Staattoripakan sormilevyjen sisällä on neljä kappaletta termopareja. Staattorista ulos poistuvan ilman lämpötilaa ennen lämmönvaihdinta mittaa yksi PT-100-anturi, ja sisään menevän ilman lämpötilaa ennen puhallinta mittaa yksi termopari. Staattorisegmentin kolmivaihekäämityksiä syöttää kolme SIWO-KUL-kaapelia, joiden lämpötiloja mittaa kutakin yksi PT-100 anturi. Staattoripuolen lämmönvaihtimen sisään menevää ja ulos tulevaa nestettä mittaa yhden PT-100-anturit.

Roottorisegmentin käämitysten lämpötiloja mittaa vyyhdenpäissä neljä PT-100-anturia. Roottorisegmentin kolmivaihekäämityksiä syöttää kolme SIWO-KUL-

kaapelia, joiden lämpötiloja mittaa kutakin yksi PT-100-anturi. Roottoripuolen lämmönvaihtimen sisään ja ulos menevien veden lämpötiloja mittaavat yhdet PT-100-anturit.

PT-100-anturien arvot mitataan tietojenkeruulaitteella, jonka tiedoista tietokoneohjelma piirtää PC:lle lämpenemän kuvaajan.

Mittaukset näkyvät testijärjestelmissä seuraavilla nimikkeillä:

1. Staattorisegmentin käämitysten lämpötilat: *STcoil1...STcoil9*
2. Kylmä- ja kuumakanavien lämpötilat: *ColdDuct1, ColdDuct2, WarmDuct1, WarmDuct2*.
3. Staattoripakan sormilevyjen termoparit: *stack1...stack4*
4. Staattorista ulos poistuvan ilman lämpötila: *AirOut1*
5. Staattorin sisään menevän ilman lämpötila: *TempBeforeFan1*
6. Staattorisegmentin SIWO-KUL-kaapelit: *STsiwo-kul1... STsiwo-kul3*
7. Staattoripuolen lämmönvaihtimen nesteet: *STwaterIN, STwaterOUT*
8. Roottorisegmentin käämitysten lämpötilat: *ROcoil1...ROcoil4*
9. Roottorisegmentin SIWO-KUL-kaapelit: *ROsiwo-kul1...ROsiwo-kul3*
10. Roottoripuolen lämmönvaihtimen nesteet: *ROwaterIN, ROwaterOUT*

Myöhempanä esitettävissä mittauksissa ei kuitenkaan näytetä kuin staattorin käämitysten ja jäähdytyksen lämpötilat

## **6.2 Jäähdytysilmavirran mittaukset**

Testisegmentin staattoripuolen jäähdytysilmavirtauksesta mitataan kokonaistilavuusvirtaa, painehäviötä staattorin yli, paikallisia virtausnopeuksia selkäräudan eri osissa sekä virtauksen lämpötilaa ennen lämmönvaihdinta ja lämmönvaihtimen jälkeen.

Staattorin sisään menevään jäähdytysilmaputkeen on asennettu kuristuselementti, jolla mitataan jäähdytysilman kokonaistilavuusvirtaa. Tilavuusvirran mittaaminen perustuu kuristuselementin yli tapahtuvaan paine-eromittaukseen

elementin omista mittausyhteistä. Absoluuttista painetta ennen kuristuselementtiä mitataan painekytkimellä. Staattorisegmentin painehäviöitä mitataan sisään ja ulos menevästä ilmasta. Paineenmittausyhteet on sijoitettu puhaltimen ulostulokanavaan ja staattorin jäähdytysilman ulostulokanavaan enne lämmönvaihdinta, koska itse generaattorissa käytetään eri lämmönvaihdinta. Mittatiedot siirretään mittausohjelmistoon painelähettimillä ja paine-erolähettimillä.

Paikallisia virtausnopeuksia aksiaali- ja radiaalikanavissa mitataan kuumalankaanemometrillä. Anturi työnnetään testipenkin sisään koteloon poratuista tulpa- tuista rei'istä. Tiedot tallentuvat mittalaitteeseen myöhempää analysointia varten.

Ilmavirran lämpötilaa mitataan ennen puhallinta ja ennen lämmönvaihdinta. Ilman lämpenemän ja tilavuusvirran avulla voidaan laskea jäähdytysilmaan siirtynyt lämpöteho.

Jäähdytysilman mittaukset ja jäähdytyksen lämpötilatiedot, kuten termoparit, tallentuvat eri järjestelmään kuin muut PT-100-anturien tiedot jäähdytys suunnittelua varten.

### **6.3 Sähköisten suureiden mittaukset**

Sähköiset suureet, kuten jännite ja virta, mitataan kuusikanavaisella digitaalisella tehoanalyysointilaitteella, joka analysoi suureista muun muassa tehon, taajuuden ja tehokertoimen. Tietokoneohjelma tallentaa mittaussuureet PC:lle myöhemmin analysoitavaksi. Virranmittaukseen käytetään kuutta mittausvastusta eli virtashunttia, jotka ovat tarkempia ja käyttöalueeltaan laajempia kuin virtamuuntajat, eli niin sanotut virtakelat, varsinkin korkea- ja matalataajuisien virtojen mittauksissa. Laitteiston sähkönsyöttö- ja mittausjärjestelyt näkyvät liitteessä 2.

Staattorin ja roottorin käämiresistanssi mitataan milliohmimittarilla ja kirjataan talteen. Jäähdytyskäyrämittaus tapahtuu syöttämällä käämitykseen tasavirtaa, josta tietojenkeruulaite mittaa käämiresistanssin jännite- ja virtatiedon avulla ja tietokoneohjelma piirtää resistanssin muutoksesta kuvaajan PC:lle.

Eristysvastusmittaukset mitataan eristysvastusmittarilla ennen ja jälkeen koeajojen ja tiedot kirjataan talteen. Koeajojen jälkeen jännitekestoisuutta ja vuotovirtaa mitataan ylijännitekoestimella ja tiedot kirjataan talteen.

Taulukossa 1 on esitetty mittauksissa käytettävät mittalaitteet ja komponentit.

Taulukko 1 Mittalaitteet

LAITE	MALLI / VALMISTAJA	MUUTA
Tasavirtalähde, (Dc power suply)	GW Instek GPR-1810HD	
Milliohmimittari, (Milli ohm meter)	Microhmmeter MGR10	
Tehoanalysointilaitte, (Digital power meter))	Yokogawa WT 1600, 6-channel	
Tietojenkeruulaite, (Datalogger)	Keithley 2700/E	
Virtashuntti, (Current shunt)	Hilo Test WSM2500	6 kpl
Ylijännitekoestimen, (AC-high voltage tester)	Hilo Test HS6000/1	
Eristysvastusmittari, (10 kV insulation tester)	Megger Mit1020/2	
Tärinämittari (FAG detector)	DETECT3-KIT	
Kuumalanka-anemometri	TSI Instruments TA440	
Virtausmittari		
Kuristuselementti	Flow How Sesca DN250	
Virtauksentasaaja	Elster-Instromet K2 DN250	
Paine-erolähetin	Huba Control DTT25-420	
Paine-erolähetin	Huba Control DTT50-420	
Painelähetin	Huba Control PSS11-420	
Termoelementti	Nokeval TCS8-K-150-2	
Termoelementti	Nokeval TCT-K-150-1.0	4 kpl
PT-100-lämpötila-anturi		29 kpl

Kaikki mittalaitteet tulee olla testattuja ja kalibroituja, mikäli kalibrointia vaaditaan.

## 7 TESTIT JA TULOKSET

### 7.1 Tyhjäkäyntipiste ja kuormituspiste

Roottorisegmenttiä syöttävälle taajuusmuuttajalle määriteltiin tietty U/f-suhde PMR3150-generaattorin nimellisarvojen perusteella. Taajuutta kasvattamalla nostettiin syöttöjännitettä ja staattorisegmentin vastajännitettä samassa suhteessa, samoin kuin generaattorin vastajännite kasvaa roottorin pyörimisnopeuden kasvaessa.

Roottoripuolen taajuusmuuttajaa ajettiin nimellistaajuudella, jolloin jännitekin oli nimellisarvossa. Staattoripuolen taajuusmuuttaja oli kytketty irti verkon kuormituksesta. Samalla staattoripuolen kolmivaihekäämityksiin indusoitui vastajännite. Tällöin staattoripuolen taajuusmuuttaja luulee kyseistä sinimuotoista jännitettä pyörivästä kestopagneettitahtigeneraattorista tulevaksi jännitteeksi.

Staattoripuolen taajuusmuuttaja tahdistettiin vastajännitteen ja verkkojännitteen mukaan, samoin kuin tuuliturbiinijossa, ilman kuormaa eli nollamomentilla. Lopuksi staattoripuolen momenttia nostettiin nimellispisteeseen ja roottoripuolen taajuusmuuttaja nostatti pätötehoa, jolloin kuormitusvirta vastasi  $\frac{1}{12}$  PMR3150-generaattorin nimellisvirrasta.

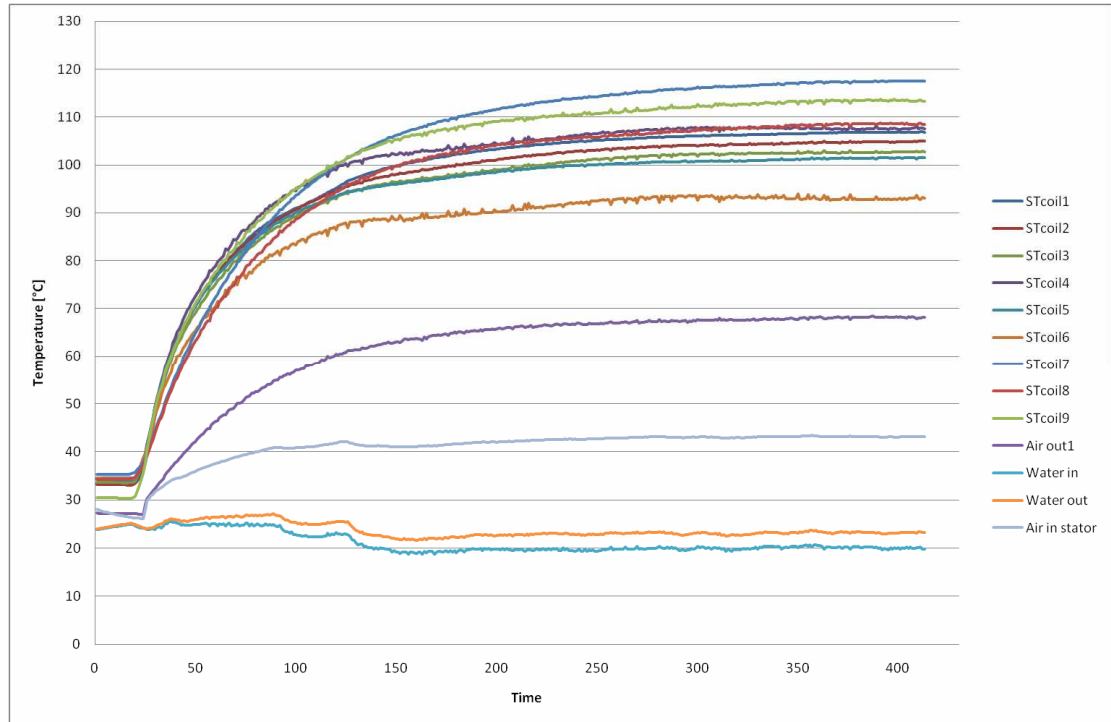
## 7.2 Lämpenemäajot

Laitteistolle suoritettiin neljä eri lämpenemäajoa. Testiajoissa sovellettiin kahden eri PMR3150-generaattorin kehitysversion virtoja ja erilaisia lämpökuormia. Seuraavassa kehitysversioista käytetään keksittyjä nimityksiä "X" ja "Y". Lämpenemäajoissa testattiin pääasiassa segmentin termistä kuormitettavuutta ja jäähtymisen toimintaa. Lämpenemää seurattiin 13 PT-100-lämpötila-anturin mittatiedoista, joista 9 oli käämityksissä ja 4 jäähtytyspiirissä. Lämpenemä laskettiin jäähtymiskäyrän perusteella saadusta staattorisegmentin käämityksen loppulämpötilan ja sisään menevän jäähtytysveden tilavuusvirta pidettiin vakiona. Lämpenemäajon aikana mitattiin myös koneen sähköisiä arvoja tehoanalysaattorilla.

Ennen lämpenemäajoja laitteistolle tehtiin silmämääräinen tarkastus, jossa tarkastettiin kaapeloinnit, liitokset, PT-100-anturit, muut mittalaitteet ja merkinnät. Eristysresistanssit mitattiin käämityksistä ja PT-100-antureista. Mittaukset tehtiin 1000 V:n tasajännitteellä ja mittauksen kesto oli 60 sekuntia. Käämiresistanssit mitattiin milliohmimittarilla käämien väliltä, josta laskettiin jokaisen käämin oma resistanssi. Eristysresistanssien alaraja oli The Switchin sisäisen ohjeen määräämä 1 GΩ ja käämiresistanssien tuli olla standardin mukaan 2 % tarkkuudella

samansuuruisia ja 5 % tarkkuudella suunnitellusta arvosta. Mittauksissa tuli olla käämityksen lämpötila tiedossa.

Lämpenemääjossa 1 laitteistoa ajettiin PMR3150-kehitysversion Y nimellisarvojen mukaan ja noin 43 °C staattorin sisään tulevalla ja jäähdytysilmalla. Kuvassa 9 on esitetty staattorisegmentin lämpenemä PT-100-anturien mittauksista.



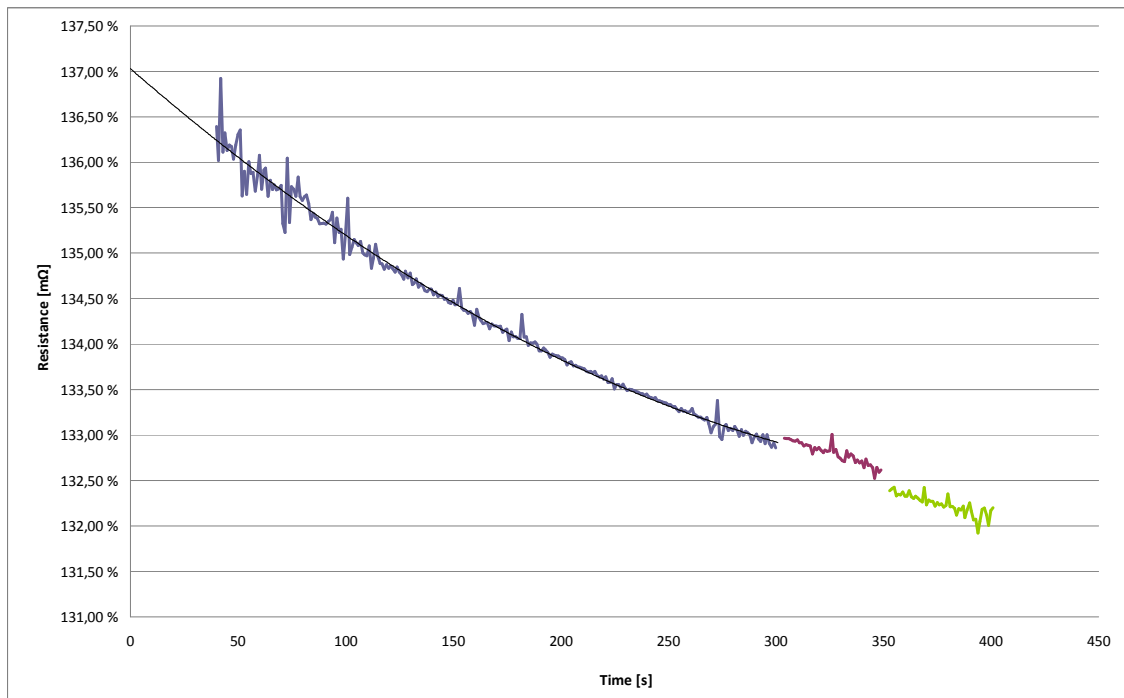
Kuva 9 Staattorisegmentin lämpenemä lämpenemääjossa 1

Kuvaajasta nähdään, kuinka lämpötilat käyttäytyvät lämpöaikavakion mukaisesti ja lämpötila on tasaantunut, kun sen nousu on enintään 2 °C/h. Hitaasti lämpiävillä koneilla ei lämpöaikavakiolla ole sinänsä mitään erityistä merkitystä. Oletettavaa on vain, että lämpötilat nousevat kyseisen kuvaajan mukaisesti. Jos kuvaajassa on jotain suuria poikkeuksia, voidaan jossain olettaa jossain olevan vikaa. Vian voi havaita helposti esimerkiksi generaattorin laakerin lämpenemän kuvaajasta.

Lämpenemääjon lopuksi segmentille tehtiin jäähtymiskäyrämittaus, josta voitiin laskea käämitysten keskimääräinen lämpötila ja lämpenemä. Kuvassa 10 on esitetty PC-ohjelman piirtämä kuvaaja jäähtymiskäyrämittauksesta. Seuraavissa



kuvaajissa jäähtymiskäyrät on muokattu alkuperäisestä kylmäresistanssimittauksesta suhteellisarvoiksi.

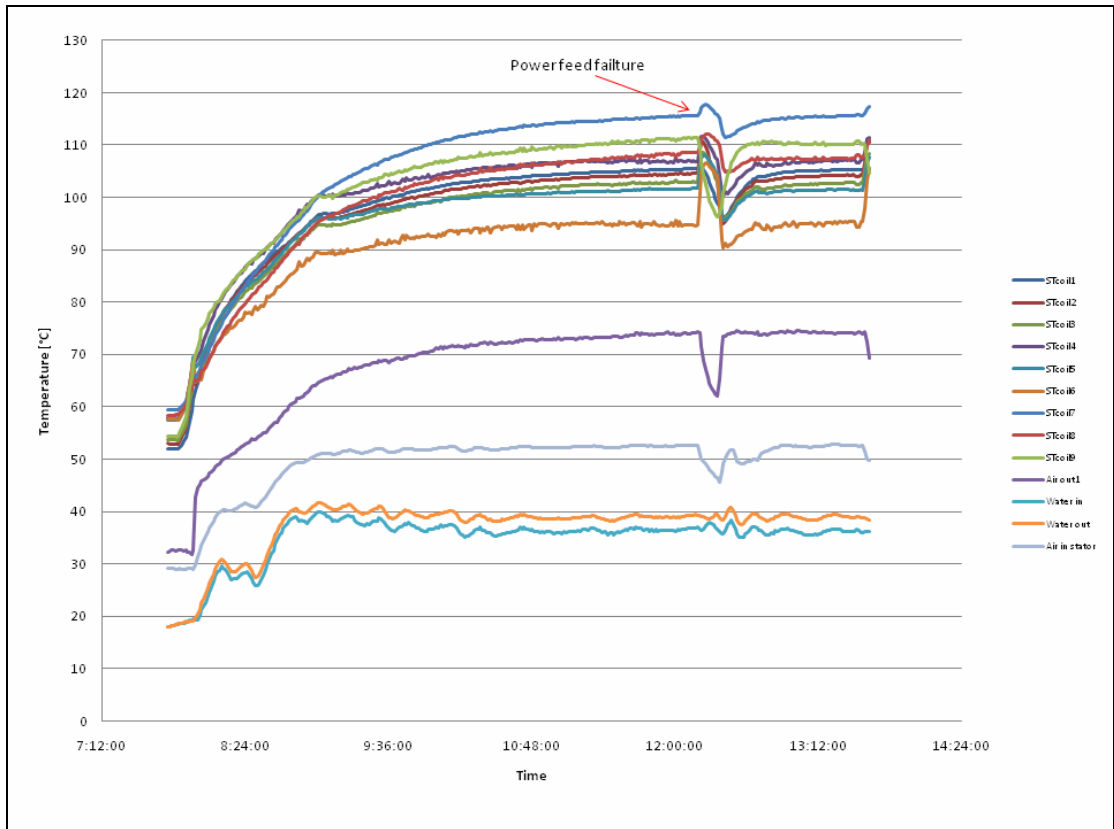


Kuva 10 Jäähtymiskäyrämittaus lämpenemäjossa 1

Kuvaaja esittää käämiresistanssien muutoksen käämityksen jäähtyessä ajan suhteen. Kuvaajassa sininen käyrä esittää U-V-, punainen käyrä U-W- ja vihreä käyrä V-W-välisen käämiresistanssin. Kuvasta nähdään, että mittaus on alkanut standardien määräämän ajan sisällä laitteiston pysäytyksestä, joten lämpötila voidaan laskea (2) mukaan. Voidaan myös todeta, että käämiresistanssin suuruus on lämpötilasta riippuvainen.

Loppulämpötilaksi laskettiin 119,7 °C ja lämpenemäksi 76,6 °C. Kun laskettua lämpötilaa verrataan PT-100-antureiden loppulämpötiloihin, kuumin piste 117,7 °C, voidaan todeta että anturit on onnistuttu sijoittamaan melko lähelle segmentin kuumimpia paikkoja. Testattava segmentti oli lämpöluokkaa F, lämpenemän raja 105 K ja jäähtymiskäyrästä mitatun loppulämpötilan raja 145 °C, joten lämmöt pysyivät hyvin rajojen sisällä.

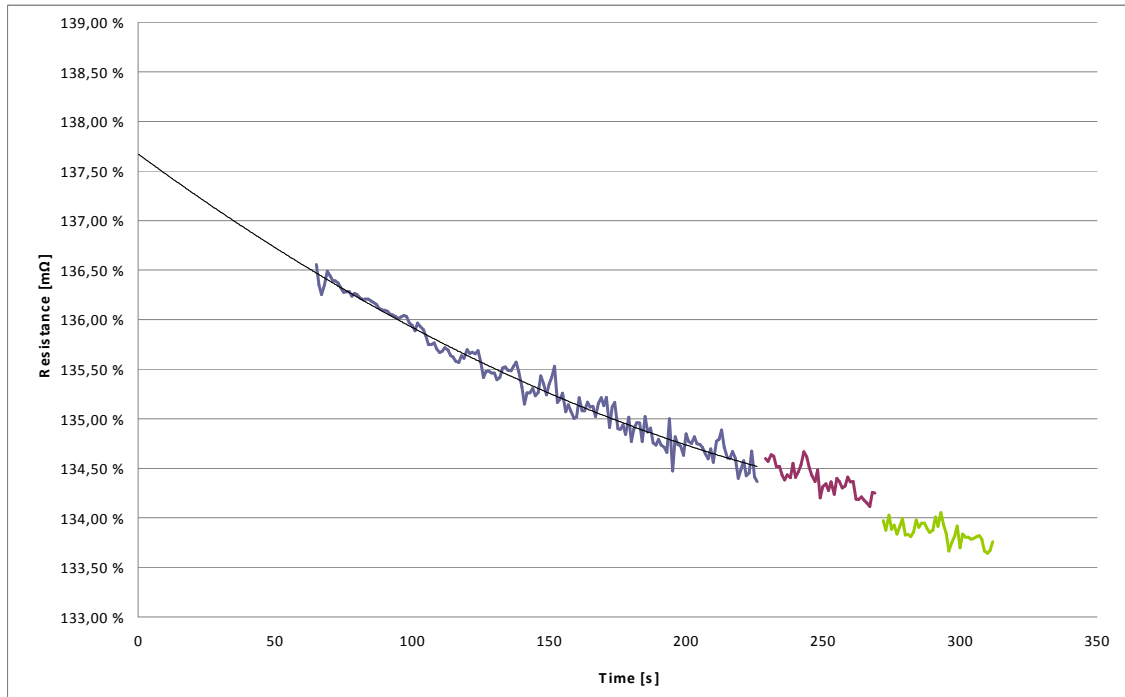
Lämpenemääjossa 2 laitteistoa ajettiin PMR3150-kehitysversion X nimellisarvoilla, eli virta oli noin 90 % edellisestä ja staattorisegmentin sisään menevän jäähdytysilman lämpötila oli nostettu noin 55 °C:een. Kuvassa 11 on esitetty staattorisegmentin lämpenemä PT-100-anturien mittauksista.



Kuva 11 Staattorisegmentin lämpenemä lämpenemääjossa 2

Kuvaajaa voi verrata edellisen lämpenemääjon kuvaajaan ja todeta, että taantunut lämpötila on hyvin saman suuruinen virrasta ja jäähdytysilman suuremmasta lämpötilasta riippumatta. Jäähdytyksen voidaan myös todeta toimineen hyvin, kun suurempi jäähdytysilman lämpöenergia on saatu sitoutumaan jäähdytykseen. Suurissa hitaasti lämpiävissä generaattoreissa suurin osa häviöistä on virtalämpöhäviöitä, ja kuvaajasta voidaan todeta, että käämityksen lämpeneminen pienemmällä virralla on hieman hitaampaa. Kuvaajasta erottuu selvästi myös kohta, jossa sähkön syöttö on katkennut.

Lämpenemääjon lopuksi segmentille tehtiin jäähdytyskäyrämittaus, joka on esitetty kuvassa 12.

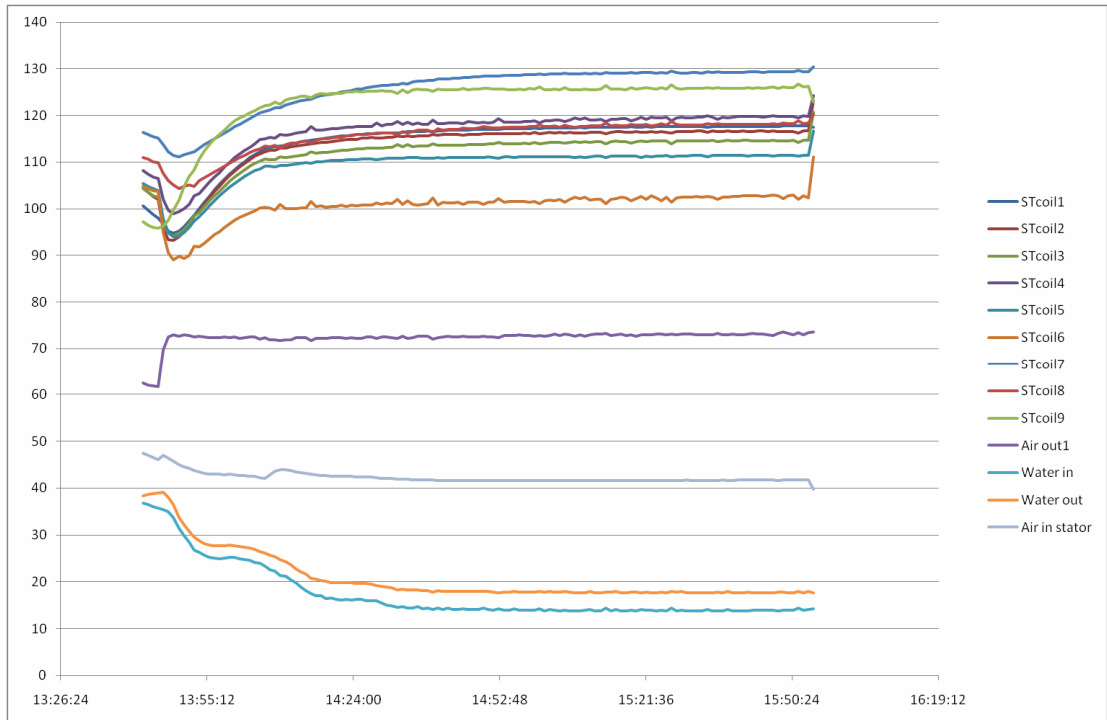


Kuva 12 Jäähtymiskäyrämittaus lämpenemäjossa 2

Kuvaajaan piirretystä apuviivasta voidaan arvioida käämityksen kuumaresistanssia pysäytys hetkellä ja todeta resistanssin olevan lähes sama kuin edellisessä mittauksessa.

Käämiresistanssista laskettiin käämityksen loppulämpötilaksi 117,3 °C ja lämpenemäksi 64,6 °C. Voidaan todeta, että loppulämpötila on hyvällä tarkkuudella sama suuremmasta jäähdytysilman lämpötilasta huolimatta.

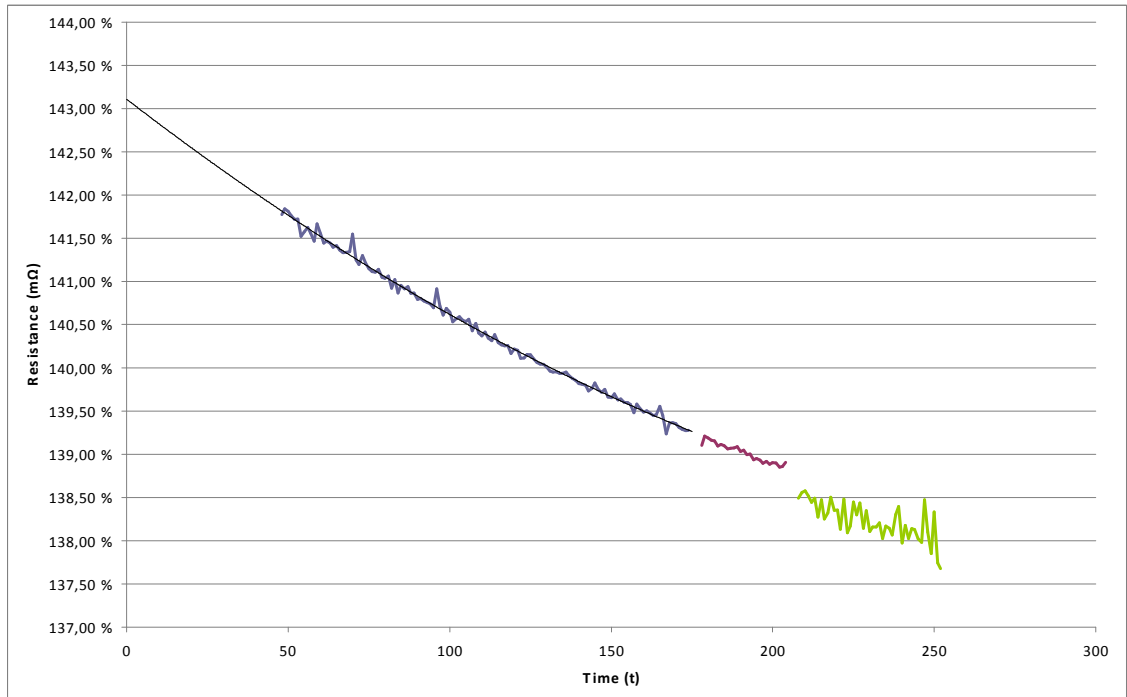
Lämpenemäjossa 3 testattiin segmentin termistä kestävyyttä ja jäähdytyksen suorituskykyä kovemmissa olosuhteissa ajamalla laitteistoa pienellä ylijännitteellä. Jännite oli noin 103,5 % ja virta noin 101/122 % nimellisarvoista kehitysversiona riippuen. Käytännössä kokeiltiin kentänheikennystä, jolloin jännite ja virta kasvavat yli nimellisen, taajuuden pysyessä nimellisenä. Staattorisegmentin sisään tulevaa jäähdytysilmaa pidettiin kuitenkin noin 41 °C:ssa, jotta sähkötehon aiheuttama lämpeneminen on paremmin erotettavissa. Kuvassa 13 on esitetty staattorisegmentin lämpenemä lämpenemäjossa 3.



Kuva 13 Staattorisegmentin lämpenemä lämpenemäajossa 3

Kuvaajasta näkee, kuinka pieni yliteho nostaa staattorikäätymyksen lämpötilaa edellisiä tilanteita suuremmaksi. Voidaan todeta myös, että staattorista ulostulevaan jäähdytysilmaan on sitoutunut enemmän lämpötehoa kuin aiemmin.

Kuvassa 14 on esitetty lämpenemäajon 3 lopuksi tehty jäähdytyskäyrämittaus.

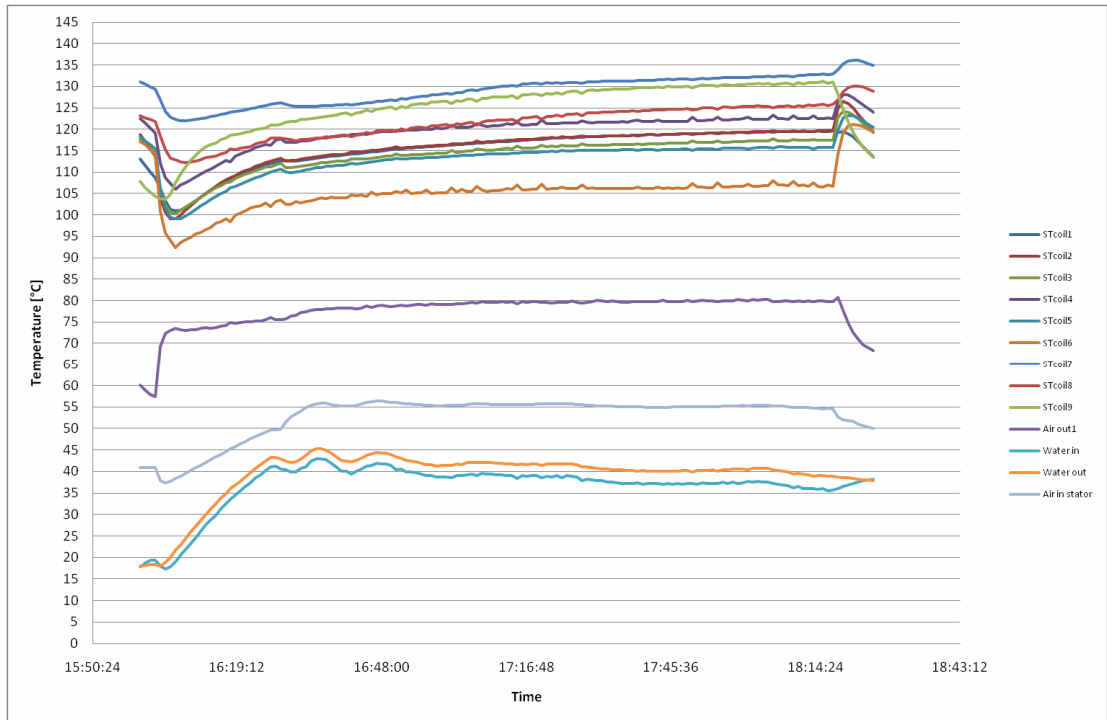


Kuva 14 Jäähymiskäyrämittaus lämpenemääjossa 3

Kuvaajaan piirretystä apuviivasta voidaan arvioida käämityksen kuumaresistanssin pysäytys hetkellä olevan aiempia suurempi. Käämiresistanssista laskettiin käämityksen loppulämpötilaksi 135,0 °C ja lämpenemäksi 93,3 °C.

Lämmöistä voidaan todeta, että haitallisiin lämpötila-arvoihin päästään vain pitkäaikaisella yliteholla.

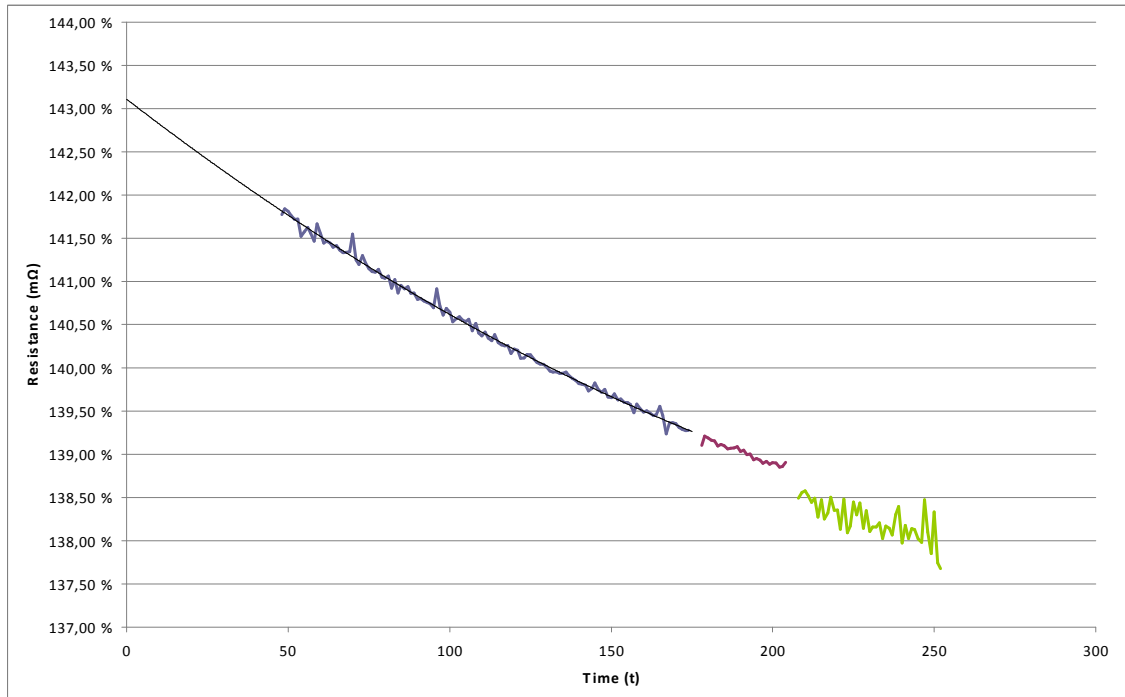
Lämpenemääjossa 4 simuloitiin PMR3150-kehitysversion Y nimellisarvoja, mutta staattorisegmentin sisään menevän jäähdytysilman lämpötila oli nostettu noin 55 °C:een. Testissä haluttiin tutkia pääasiassa jäähdytyksen suorituskykyä normaalia kuumemmissa olosuhteissa. Kuvassa 15 on esitetty staattorisegmentin lämmöt lämpenemääjossa 4.



Kuva 15 Staattorisegmentin lämpenemä lämpenemäajossa 4

Kuvaajasta nähdään, että jäähdytysilman lämpenemä on sama kuin lämpenemäajossa 1. Voidaan siis todeta, että nimellisarvoilla ajettaessa virtalämpöhäviöt ovat samat ja haitallisiin lämpötiloihin päästään vain pitkäaikaisella häiriöllä jäähdytyslaitteistossa.

Lämpenemäajan 4 jälkeinen jäähtymiskäyrämittaus on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16 Jäähtymiskäyrämittaus lämpenemäjossa 4

Käämiresistanssista laskettiin käämityksen loppulämpötilaksi 137,0 °C ja lämpenemäksi 82,3 °C.

Taulukossa 2 näkyy yhteenvetona simulointiin vaikuttavimmat lämpötilat.

Taulukko 2 Lämpötilojen yhteenveto

	°C			
	Ajo 1	Ajo 2	Ajo 3	Ajo 4
Ilma sisään	43,1	52,7	41,7	54,7
Ilma ulos	68,1	74,1	73,2	79,8
Ilman lämpenemä	25,0	21,4	31,5	25,1
Vesi sisään	20,0	36,3	13,9	35,9
Vesi ulos	23,2	39,0	17,7	39,1
Veden lämpenemä	3,2	2,7	3,8	3,2
Käämin kuumin piste (PT-100)	117,7	115,5	129,3	132,7
Jäähtymiskäyrästä	119,7	117,3	135,0	137,0
Käämien keskilämpenemä, ΔT	76,6	64,6	93,3	82,3

Kaikki lämpenemät muuttuvat selvästi kuormitusvirran mukana. Lopuksi voidaan todeta, että mittaukset ovat onnistuneet, kun samanlaisilla lämpenemillä saatiin lasketuksi jäähtymiskäyrästä sopivalla tarkkuudella samanlaiset tulokset.

Lämpenemääjoista laskettiin taulukon 3 mukaiset lämpöhäviöt.

Taulukko 3 Ilmaan siirtynyt teho

	Ajo 1	Ajo 2	Ajo 3	Ajo 4
Ilmavirta [m <sup>3</sup> /s]	0,7	0,7	0,7	0,7
Ilman lämpötila sisään [°C]	43,1	52,7	41,7	54,7
Ilman lämpötila ulos [°C]	68,2	74,1	73,2	79,8
Ilman tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]	1,07	1,04	1,06	1,03
Ilman ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg/°C]	1,008	1,008	1,008	1,008
Ilmaan siirtynyt teho [kW]	<b>19,0</b>	<b>15,7</b>	<b>23,6</b>	<b>18,2</b>

Taulukoista voidaan todeta, että ilmaan siirtynyt teho on enimmäkseen virtalämpöhäviöitä, kun ajoissa 1 ja 4 ilman lämpenemä on sama. Kuitenkin kuormitettaessa laitteistoa nimellispisteen yli, ajo 3, häviöt kasvavat radikaalisti verrattaessa ajoon 1, kun virta  $I_3 = 1,1 \cdot I_1$  ja häviöt  $P_{h3} = 1,24 \cdot P_{h1}$ .

### 7.3 Venymäliuskamittaukset

Venymäliuskatesteissä mitattiin staattorisegmentin selkärataan kohdistuvia mekaanisia voimia. Voimia tutkittiin aksiaali- ja tangentialisuunnissa. Vaikuttavina tekijöinä olivat lämpölaajenemat ja sähkövirran aiheuttamat vääntömomentit.

Testejä tehtiin kahdella eri ilmavälillä. Fyysiset ilmavälit olivat 9,8 mm ja 5,8 mm. Ilmavälin säätö oli kuitenkin rajallista segmenttien välisen jäähdytystä eristävän pleksilasin takia. Liian pienellä ilmavälillä segmenttien pintajäähdytys voisi jäädä liian tehottomaksi ja pahimmassa tapauksessa pleksilasi voisi tuhoutua lämmöstä.

Käytännössä laitteistolle ajettiin ensin lämpenemäajo tasaantuneeseen lämpötilaan asti. Lämpenemä ajossa kuormitus oli 100 %, eli roottorisegmentin magnetointivirta oli PMR3150-generaattorin mukaan noin  $\frac{1}{12}$  generaattorin nimellisvirrasta. Tarvittaessa staattoripuolen magnetointia muutettiin vastajätteen pitämiseksi samana kummallakin ilmavälillä. Dynaamisia kuormia simuloitiin siten,



että laitteistolle suoritettiin pisteajo. Pisteajossa roottoripuolen virtaa ajettiin tietyissä pisteissä noin 10 sekunnin ajan. Virta pudotettiin täydeltä kuormalta nopeasti haluttuun pisteeseen, jolloin sähköisten voimien vääntömomentti voitaisiin selvästi erottaa lämpövoimista. Ajetut pisteet virroille olivat 100, 63,6; 57,7; 40,8 ja 28,9 % nimellisvirrasta. Talteen kirjattiin virrat, jännitteet, lämmöt ja aika venymäliuskatietojen yhteyteen, joista voi piirtää graafisen kuvaajan ja tarkastella sähkövirtojen aiheuttamia voimia. Laitteiston lämpötilaa pyrittiin pitämään vakiona.

## 8 POHDINTA

Valitettavasti kaikkia suunniteltuja testejä ei ehditty laitteistolle tekemään tämän opinnäytetyön aikana. Opinnäytetyö kuitenkin antanee hyvän kuvan siitä, kuinka pyörivän koneen testauksia voidaan soveltaa erilaiseen konstruktion.

Valitettavasti myös oman käytännön työn osuus projektiin liittyen jäi suppeaksi. Työselkkauksen vuoksi fyysisen työn tekeminen ja muiden työntekijöiden työpanoksen korvaaminen kiellettiin. Työpanokseni olikin enimmäkseen raporttien tutkimista, analysoimista ja muokkaamista opinnäytetyössä julkaistavaan muotoon. Käytännön kokemusta kestoplaneetta-generaattorien testaamisesta ja niihin liittyvistä sähkötoista sain kuitenkin The Switchillä jo kesällä 2009 kesätoistani.

Mittaustulokset olivat hyväksyttäviä ja hyvällä tarkkuudella yhdenmukaisia. Jäähdytys suunnittelua varten tietoja saatiin tarpeeksi, ja ne olivat lähes odotettuja, suunnittelun kannalta hyviä tuloksia. Segmentin koeajaminen erilaisissa pisteissä onnistui myös lähes odotetusti, mutta pisteajo vaatii vielä yksinkertaisempaa toimintaa sarjatestauksia ajatellen. Esimerkiksi erilaisten taajuusmuuttajakäyttöjen kokeileminen voisi säästää aikaa. Vaikka käytetty rakennevaihtoehto onkin teknisesti haastava, mahdollistaa se monipuoliset mittaussuunnitelmat. Laitteistoon voisi myös soveltaa eri rakennevaihtoehtoja, kuten kuormavas-

tusta, jolloin päästään eroon toisen taajuusmuuttajan mahdollisesti aiheuttamista ongelmista ja häiriötekijöistä.

Laitteisto tulee toimimaan hyvänä tuotekehityksen apuvälineenä ja segmenttien sarjatuotannon testilaitteena. Laitteistoa tulisi kuitenkin kehittää vielä jonkin verran yksinkertaisemmaksi esimerkiksi johdotusten osalta, ja osakokonaisuudet voisivat olla suurempia ja siten nopeammin irrotettavissa. Segmentin vaihtaminen tällä hetkellä olisi erittäin hidasta ja työlästä sarjatestauksia ajatellen.

Segmentin kestävyys oikeissa generaattorin käyttöolosuhteissa lienee hyvä, koska lämmöt pysyvät hyvin rajoissaan. Varmuus segmenttien oikeaan kestävyteen ja tehokkuuteen saadaan kuitenkin vasta useamman testiajon ja segmentin sekä koottujen generaattorien jälkeen.

Opinnäytetyön kannalta työ oli erittäin kiinnostava uutuutensa ja kehitysmahdollisuksiensa kannalta. Käytännön laajuus oli sopiva kun työ kattoi generaattorien testaukset, taajuusmuuttajakäytöt sekä mekaaniset, sähköön ja jäähdytyksen mittaustekniikat.

## KUVAT

- Kuva 1 Vakionopeuksisen ja muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan tehokäyrät, s. 10
- Kuva 2 Kestomagneettien asennustapoja roottoriin, s. 15
- Kuva 3 Generaattorin lämpenemä, s. 20
- Kuva 4 Esimerkki jäähtymiskäyrästä, s. 21
- Kuva 5 Testipenkin suunnitelma, s. 28
- Kuva 6 Testipenkki käytännössä, s. 29
- Kuva 7 Staattori- ja roottorisegmentit päällekkäin, s. 30
- Kuva 8 Vyyhdenpäät ja ilmaväli, s. 31
- Kuva 9 Staattorisegmentin lämpenemä lämpenemäajossa 1, s. 40
- Kuva 10 Jäähtymiskäyrämittaus lämpenemäajossa 1, s. 41
- Kuva 11 Staattorisegmentin lämpenemä lämpenemäajossa 2, s. 42
- Kuva 12 Jäähtymiskäyrämittaus lämpenemäajossa 2, s. 43
- Kuva 13 Staattorisegmentin lämpenemä lämpenemäajossa 3, s. 44
- Kuva 14 Jäähtymiskäyrämittaus lämpenemäajossa 3, s. 45
- Kuva 15 Staattorisegmentin lämpenemä lämpenemäajossa 4, s. 46
- Kuva 16 Jäähtymiskäyrämittaus lämpenemäajossa 4, s. 47

## TAULUKOT

- Taulukko 1 Mittalaitteet, s. 38
- Taulukko 2 Lämpötilojen yhteenveto, s. 47
- Taulukko 3 Ilmaan siirtynyt teho, s. 48

## LÄHTEET

Laaksonen, H, Repo, S. 2003. Tuulivoimateknologia sähköjakeluverkossa. Tampereen teknillinen yliopisto. Raportti. ISBN 952-15-1045-5, ISSN 1459-529X, UDK 621.31

Seppä M. 1998. Kestomagneettitahtikoneiden rakennevaihtoehdot hitaisiin käyttöihin. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, energiatekniikan osasto, sähkötekniikan laitos.

STY. Suomen Tuulivoimayhdistys ry. Saatavilla www-muodossa: <http://www.tuulivoimayhdistys.fi> (Luettu 17.5.2010)

The Switch 2010. The Switch annual report 2009.

Vahvaselkä, A. 2009. Erikoissähkökoneen tyyppitestaus. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Sähkötekniikka, Sähkökäytöntekniikka / Lappeenranta University of Technology, Faculty of Technology, Electrical Engineering, Electrical Drives Technology.

PMR3150 1/12 segmentin testiohjelma

Rutiini- ja tilaustestit	Raja / Toleranssi	Standardi
<b>Silmämääräinen tarkastelu</b>		
<b>Eristysresistanssi</b>		
Vaihekäämit	>1000MΩ	IEEE 43 or IEC 60851-5
Lämpötila-anturit	>1000MΩ	
Apulaitteet	>5MΩ	
<b>Lämpötila-anturit</b>		
Lämpötila-anturien resistanssit	±2%	
<b>Staattorikäänin kylmäresistanssi</b>		IEC 60034-4
U-V, U-W, V-W	T20°C < x mΩ, sym 2%	
U1-U2, V1-V2, W1-W2	T20°C < x mΩ, sym 2%	
<b>Kytkenämerkinnät</b>		IEC 60034-8
Pääkytkentäkotelon ja apulaitekotelon merkinnät	U,V,W,N,PE,TCx	IEC 60034-8
<b>Jäähdytystietojen mittaukset</b>		
CFD-mallinnuksen vertifiointi (malli)		
Staattorin aktiiviosan paineheviöt eri virtauksilla		
Virtauksen jakautuminen staattoriselän aksiaalikanaviin		
Virtauksen jakautuminen staattoriselän radiaalikanaviin		
Virtauksen jakautuminen vyyhdenpäille		
Vuotovirtaus ilmaväliltä vyyhdenpäille		
Derating-laskennan verifiointi		
Tupliradiaalijäähdytyksen suorituskyvyn arviointi erilaisilla lämpökuormilla		
Jäähdytyspuhaltimien ominaisuudet	I ? x A, P ? x kW	
<b>Jännitekestoisuus</b>		
Vaihtojännitekestoisuus	1000VAC + 2U <sub>n</sub> VAC, I <sub>max</sub> < 1000mA	IEC 60034 -1, -15

Tyyppitestit	Raja / Toleranssi	Standardi
<b>Vastajännite</b>		IEC 60034 -1, -4
RMS-arvo	x ? E <sub>ph</sub> ? y, Symm. 2%	
THD (kokonaisharmoninen särö)	< 5 %	
<b>Lämpenemäajo, nimellisteho</b>	x ? I <sub>ph</sub> ? y, Symm. 2%	IEC 60034 -1, -4, -11
Lämpötilat	T <sub>coil_max</sub> < x°C, T <sub>coil_avg</sub> < x°C, T <sub>bear</sub> < x°C	
Jäähdytyksen lämpötilat	Air in/out, Liquid in/out, ΔT	
Hyötysuhde ja häviöt	η ? xx %	
Sähköiset mittaukset (U, I, P, f, cos φ)	U <sub>n</sub> ± xV, I <sub>n</sub> ± xA	
Vaihekäyrät (U, I, P), nimellisteho		
Jäähdytyskäyrä	ΔT < x °C	IEC 60034-1
<b>Kuormituspisteet (nimellisnopeus, kuorma 20%-100%)</b>		IEC 60034-1
Lämpötilat	T <sub>coil_max</sub> < x°C, T <sub>coil_avg</sub> < x°C, T <sub>bear</sub> < x°C	
Jäähdytyksen lämpötilat	Air in/out, Liquid in/out, ΔT	
Hyötysuhde ja häviöt	η ? xx %	
Sähköiset mittaukset (U, I, P, f, cos φ)	U <sub>n</sub> ± xV, I <sub>n</sub> ± xA	
Vaihekäyrät (U, I, P)		

Lisätestit	Raja / Toleranssi	Standardi
<b>Lämpenemäajo moottori-moodissa</b>	ΔT <sub>bearing</sub> < x °C	IEC 60034-4
Lämpötilat	T <sub>coil_max</sub> < x°C, T <sub>coil_avg</sub> < x°C, T <sub>bear</sub> < x°C	
Jäähdytyksen lämpötilat		
Sähköiset mittaukset (U, I, P, f, cos φ)	U <sub>n</sub> ± xV, I <sub>n</sub> ± xA	
Vaihekäyrät (U, I, P)		
<b>Lämpenemäajo, lämpöluokka B</b>		IEC 60034-1
Lämpötilat	T <sub>coil_max</sub> < x°C, T <sub>coil_avg</sub> < x°C, T <sub>bear</sub> < x°C	
Jäähdytyksen lämpötilat	Air in/out, Liquid in/out, ΔT	
Hyötysuhde ja häviöt	η ? xx %	
Sähköiset mittaukset (U, I, P, f, cos φ)	U <sub>n</sub> ± xV, I <sub>n</sub> ± xA	
Vaihekäyrät (U, I, P), nimellisteho		
Jäähdytyskäyrä	ΔT < x °C	IEC 60034-1
<b>Tehokäyrä (muuttuva nopeus, muuttuva virta)</b>		
Lämpötilat	T <sub>coil_max</sub> < x°C, T <sub>coil_avg</sub> < x°C, T <sub>bear</sub> < x°C	
Jäähdytyksen lämpötilat	Air in/out, Liquid in/out, ΔT	
Hyötysuhde ja häviöt	η ? xx %	
Sähköiset mittaukset (U, I, P, f, cos φ)	U <sub>n</sub> ± xV, I <sub>n</sub> ± xA	

