



MODULAARISEN HYBRIDIOHJATUN HYDRAULISEN MAGNEETTIGENERAATTORIN JATKOKEHITYS

Antti Pantsar

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2013
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikan
suuntautumisvaihtoehto

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto

PANTSAR, ANTTI:

Modulaarisen hybridiohjatun hydraulisen magneettigeneraattorin jatkokehitys

Opinnäytetyö 60 sivua, joista liitteitä 5 sivua
Huhtikuu 2013

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia modulaarisen hybridiohjatun hydraulisen magneettigeneraattorin (HMGE) jatkokehitysmahdollisuuksia. Työ toteutettiin Dynaset Oy:lle ja sen tarkoituksena oli saada vielä prototyyppiasteella oleva 20 kW:n HMGE kehitettyä vaaditulle tasolle tuotannon aloittamiseksi. Työn toteutushetkellä tuotannossa olivat jo pienemmät 6 kW:n ja 10 kW:n HMGE:t.

HMGE on hydrauliiikan voimalla toimiva työkonene lisälaitte, jota voidaan käyttää esimerkiksi kaivinkoneissa tai puomillisissa kuorma-autoissa. HMGE tuottaa hydrauliiikan voimalla metallinkäsittelymagneetille magnetointitehon metallitavaran käsittelyyn. HMGE:n avulla metallitavaran käsittely käy helposti esimerkiksi romuttamoilla tai purkutyömailla, joissa metallitavaran käsittelyn ja lajittelun täytyy sujua helposti ja nopeasti. Työkonene lisälaitteena HMGE on tehoonsa nähden hyvin kompakti eikä rajoita työkonene muuta käyttöä.

Työssä perehdytään HMGE:n kuormituksen aikana toteutuvaan laitteen liialliseen lämpenemiseen. Käytönaikainen liiallinen lämpeneminen johtaa lopulta HMGE:n käyttökatkoihin ja materiaalin käsittelyn keskeytymiseen. Työssä suunniteltiin ja toteutettiin HMGE:n kuormituskoe, josta nähtiin sen käytönaikainen liiallinen lämpenemä. Kuormituskokeen tulosten ja teorian perusteella ratkaistiin tarvittavat rakennemuutokset. Kuormituskokeessa todettiin HMGE:n rakenteessa olevan useita käytönaikaiseen liialliseen lämpenemään vaikuttavia asioita. Teoreettisella määrityksellä todettiin, että alkuperäisen jäädytystavan toteutuksen olevan liian tehoton kuormituksen vaatimuksiin. Näiden määritysten perusteella suunniteltiin tarvittavat rakennemuutokset jäädytystehon kasvattamiseksi lämpenemän vaatimalle tasolle. Rakennemuutoksia suunniteltaessa oli otettava huomioon laitteen käyttökohteen asettamat fyysisen koon rajoitukset sekä tuotannaikaiset kustannusvaikutukset.

Tämän opinnäytetyön tulosten perusteella on tarkoitus toteuttaa muutokset 20 kW:n HMGE:n rakenteeseen. Rakennemuutosten toteuttamisen jälkeen suoritettavalla kuormitusmittauksella varmistetaan laitteen toiminta, minkä jälkeen laite on valmis siirrettäväksi tuotantoon. Tulosten perusteella aloitetaan myös suurempien HMGE:iden suunnittelu. Tuotteen jatkokehitystarpeet selviävät myöhemmin suoritettavien kuormituskokeiden tulosten sekä asiakkailta saatujen käyttökokemusten perusteella.

Asiasanat: generaattori, tehoelektroniikka, lämpenemä, jäädytys.

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Electrical Engineering
Degree Programme in Electrical Power Engineering

PANTSAR, ANTTI:

Further Development of Modular Hybrid Control Hydraulic Magnet Generator

Bachelor's thesis 60 pages, appendices 5 pages

April 2013

The purpose of this bachelor's thesis was to research possibilities of modular hybrid control hydraulic magnet generator's (HMGE) further development. The thesis was done for Dynaset Oy, and its purpose was to develop 20 kW HMGE from prototype to the demanded level in order to start its production. During the thesis, smaller 6 kW and 10 kW HMGE models were already under production.

HMGE is an add-on for construction machines, and it's powered by hydraulics. It is designed to be used, for example, on hydraulic excavators and heavy trucks with a hydraulic crane. HMGE transforms hydraulic power into high quality electricity, which is used for exciting metal handling magnets. Thanks to HMGE, it's easy and fast to collect metals in places such as scrapyards or demolition sites. Comparing to its size, HMGE is very powerful and it doesn't restrict the use of the other functionalities of the working machines.

This bachelor's thesis focuses mainly on HMGE's temperature rise during operation. During operation its temperature rises, and finally results HMGE's operation failures and material handling operation interruptions. During this thesis at first was planned and carried out HMGE's load measurement test to see its excessive temperature rise. On the basis of measurements results and theory, necessary modifications in the structure must be solved. During load measurement tests, many things affecting its excessive temperature rise were discovered. Theoretical determination showed that the original cooling solution was too weak at load requirements. By these determinations necessary structure modifications were designed to increase the cooling performance, preventing excessive temperature rise. When designing the structure modifications it was important to consider limitations related to physical size as well as changes in production costs.

On the basis of the conclusions of this thesis, it's intended to make structure modifications to 20 kW HMGE. After carrying out structure modifications, 20 kW HMGE is tested to ensure its proper operation, and after this it will be ready to start production. Based on thesis results, the designing of bigger HMGE's will begin. Need for further development will be shown later after several load tests and feedback from clients who use the device daily.

Key words: generator, power electronics, temperature rise, cooling.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
2	MODULAARINEN HYBRIDIOHJATTU HYDRAULINEN MAGNEETTIGENERAATTORI.....	9
2.1	Toiminta	9
2.2	Rakenne	12
2.2.1	Hydrauliikkamoottori.....	13
2.2.2	Sähkögeneraattoriosa	13
2.2.3	Ohjauskeskus.....	14
3	SÄHKÖGENERAATTORIOSA	15
3.1	Tahtikone	15
3.2	Tahtigeneraattorin toiminta	16
3.3	Tahtikoneen magnetointi	17
3.4	Tahtigeneraattorin teho.....	18
4	OHJAUSKESKUS	19
4.1	Modulaarinen rakenne ja teho.....	19
4.2	Magnetointitehon ohjaus	20
5	LÄMPENEMÄ	24
5.1	Tehoelektroniikan lämpenemä.....	26
5.2	Generaattorin lämpenemä.....	28
6	LÄMMÖNPOISTO.....	29
6.1	Johtuminen.....	30
6.2	Säteily	30
6.3	Konvektio	30
6.4	Tehoelektroniikan lämmönpoisto	32
6.5	Generaattorin lämmönpoisto	37
7	TYÖN TAVOITTEET	40
8	TYÖN TOTEUTUS	41
8.1	HMGE:n valmistelu	41
8.2	Kuormituskoe.....	42
8.2.1	Kuormituskokeen toteutus	43
8.2.2	Mittauspisteet ja mitattavat suureet	43
8.3	Lämpenemä.....	45
8.4	Lämmönpoisto	46
9	TULOKSET	47
9.1	Tulokset alkuperäisellä rakenteella	47
9.1.1	Lämpenemä	47

9.1.2 Lämmönpoisto.....	50
9.2 Teoreettiset muutokset	51
9.3 Rakenteelliset muutokset.....	55
10 POHDINTA	57
LÄHTEET	59
LIITTEET.....	61
Liite 1. Mittauspöytäkirjapohja	61
Liite 2. Alkuperäisen rakenteen mittauspöytäkirja	62
Liite 3. Alkuperäisen rakenteen DynaData-sovelluksen mittaustulokset	63
Liite 4. Ohjauskeskuksen ilmanohjaimen mittakuva	64
Liite 5. Laitetuulettimen tekniset tiedot	65

LYHENTEET JA TERMIT

LYHENTEET

HMGE	modular hybrid control hydraulic magnet generator; modulaarinen hybridiohjattu hydraulinen magneettigeneraattori
IGBT	insulated gate bipolar transistor; eristehilabipolaaritransistori
PTC	positive temperature coefficient resistor; lämpövastus

TERMIT

A	pinta-ala
c	ominaislämpökapasiteetti
d	paksuus
d-pää	drive head, akselin liitos pää
E	lähdejännite
e	Neperin luku
f	taajuus
g	putoamiskiihtyvyyys
I	virta
l	pituus
n	pyörimisnopeus
n-pää	non-drive head, ei akselin liitos pää
Nu	Nusseltin luku
p	paine
p_{napa}	roottorin napaparien lukumäärä
Pr	Prandtlin luku
Q	virtaus
R	resistanssi, lämpövastus
Re	Reynoldsin luku
S_{opt}	optimaalinen ripaväli
T	lämpötila
U	jännite
v_{aine}	aineen virtausnopeus
v_{kin}	virtaavan aineen kinemaattinen viskositeetti
X	reaktanssi

α	konvektiokerroin
β	tilavuuden lämpölaajenemiskerroin
θ	lämpenemä
λ	lämmönjohtokyky
ρ	tiheys
τ	aikavakio
φ	jännitteen ja virran välinen vaihe-erokulma
ω	kulmanopeus

ALAINDEKSIT

A	ambient, ympäröivä ilma
ac	vaihtojännite tai -virta
C	case, kotelo
dc	tasajännite tai -virta
H	häviö
IGBT	IGBT -aste
J	junction, liitos
k1	korotuslevy 1
kjr	käyttöjänniteregulointi
tss	tasasuuntaussilta
max	suurin sallittu
ok	ohjauskeskus
P	piitahna
pl	pohjalevy
S	heat sink, jäähdytinlevy

1 JOHDANTO

Modulaarinen hybridiohjattu hydraulinen magneettigeneraattori (HMGE; modular hybrid control hydraulic magnet generator) on lisälaite, jonka avulla työkoneeseen pystytään liittämään metallinkeräysmagneetti. Metallinkeräysmagneetti kytketään työkoneen puomiin ja sitä käytetään esimerkiksi purkutyömailla sekä romuttamoilla metallitavaran keräykseen. HMGE on generaattori, joka muodostaa hydrauliiikan voimalla sähköä metallinkeräysmagneetin käyttöön.

HMGE:n ohjauskeskusmoduulien koko ja lukumäärä määrittää laitteen nimellistehon. Sähkögeneraattoriosa ja hydraulikkamoottori määräytyvät käytettävien ohjauskeskusmoduulien mukaan. Modulaarisuuden takia ohjauskeskuksen jäähdytystehon tulee olla riittävä kaikilla tehoalueilla.

Tässä opinnäytetyössä tarkoitus oli tutkia tehoelektroniikan ja sähkökoneiden lämpenemää ja jäähdytystä. Opinnäytetyössä tutkittiin alkuperäisen rakenteen mukaisen 20 kW:n HMGE:n toiminta lämpenemän ja jäähdytyksen osalta. 20 kW:n HMGE:a kuormitettaessa oli havaittu ongelmia sen liiallisen lämpenemän kanssa. Nimelliskuormituksella laite lämpenee käytössä liikaa ja turvarajojen ylimitäessä laite lopettaa toimintansa aiheuttaen metallitavaran keräykseen katkoja.

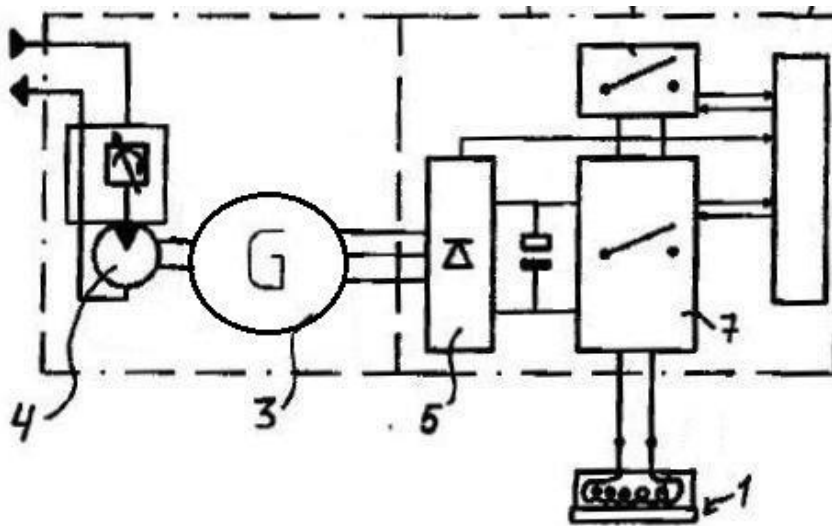
Opinnäytetyön tavoitteena on pienentää 20 kW:n HMGE:n lämpenemistä mitoittaen sille tarvittava jäähdytys. Opinnäytetyössä määritetään 20 kW:n HMGE:n tarvittavat rakennemuutokset, jotka toteuttamalla voidaan laite saattaa lopulta Dynaset Oy:n tuotantoon. Työn perusteella aloitetaan suurempien HMGE:iden suunnittelu ja valmistus.

2 MODULAARINEN HYBRIDIOHJATTU HYDRAULINEN MAGNEETTIGENERAATTORI

2.1 Toiminta

HMGE on työkoneeseen asennettava lisälaitte, joka mahdollistaa työkoneen muuttamisen metallinkäsittelyyn soveltuvaksi materiaalinkäsittelykoneeksi. HMGE muuttaa hydraulikasta saamansa voiman metallinkäsittelymagneetin käyttöön tarvittavaksi magnetointitehoksi. Täten työkoneeseen liitetyllä metallinkeräysmagneetilla voidaan siirtää helposti metallikappaleita aina pienestä metalliromusta suurempiin metallikappaleisiin. Tehon ja painon suhde on erinomainen nykyaikaisen rakenteensa takia (HMGE 2010, 2).

HMGE:n ollessa työkoneen lisälaitteena sen ominaisuuksista tärkeässä roolissa ovat sekä laitteen kompakti koko että jatkuva altistuminen vaativille ympäristöolosuhteille. Työkoneiden käyttöolosuhteet vaihtelevat kesähelteistä paukkupakkasiin, minkä lisäksi olosuhteet ovat usein myös likaiset ja pölyiset. HMGE pyritään asentamaan työkoneen omien kotelointien suojaan. Aina tämä ei kuitenkaan ole mahdollista ja tällöin se joudutaan asentamaan työkoneen päälle. Koteloitu asennus suojaa sääolosuhteilta ja suuremmalta lialta, mutta vastaavasti ilmankierto on yleensä heikompi kuin työkoneen päälle asennettaessa. Nämä ovat haasteita, jotka työkoneiden lisälaitteiden suunnittelussa täytyy ottaa huomioon. Hydraulikkaletkut mahdollistavat voiman syötön HMGE:lle sen asennuspaikasta riippumatta eikä sitä tarvitse asentaa työkoneen moottorin välittömään läheisyyteen tai linjaan tämän akselin kanssa. HMGE:n rakennekuva on esitetty kuviossa 1 (Patentti 20080192, 2008).



Kuvio 1. HMGE:n rakennekuva (Patentti 20080192, 2008. Muokattu).

Kuviosta 1 nähdään hydraulikkamoottorin (4) pyörittävän sähkögeneraattoriosaa (3). Generaattorin muodostama jännite tasasuunnataan (5) ohjaukskortilla ja ohjataan (7) magnetointitehoksi metallinkeräysmagneetille (1).

Työkoneen hydraulikkajärjestelmään liittyvien hydraulikkaletkujen lisäksi HMGE:n asennukseen kuuluu vain puomin kautta kulkeva metallinkeräysmagneetin syöttökaapeli sekä sähköisen ohjauksen varustelulla hyttiin asennettavat ohjauspainikkeet. Seuraavassa kuvassa (kuva 1) on ympyröiden korostettu vasemmalta lukien metallinkeräysmagneetti työkonekohtaisella kauhasovitteella, työkoneen puomin ja metallinkeräysmagneetin kaapelin liitospiste sekä työkoneen päälle asennettu HMGE. (HMGE 2010, 8-9.)



Kuva 1. HMGE asennettuna työkoneeseen, kuvassa kauhakuormaajasta muutettu materiaalinkäsittelykone (Dynaset Arkisto. Muokattu).

HMGE:n käyttöä voidaan ohjata sähköisen ohjauksen lisäksi hydraulikkaohjauksella. Hydraulikkaohjattu magnetointi toimii työkoneen hallintalaitteista sähköohjatulla hydraulikkaventtiilillä. Venttiilin avautuessa hydraulikkaöljy alkaa virrata hydraulikkamoottorissa ja HMGE alkaa syöttää metallinkeräysmagneettiin magnetointitehoa, kun tarvittava virtausnopeus saavutetaan. Vastamagnetointi tapahtuu hydraulikkaöljyn virtauksen lakattua. (HMGE 2010, 10.)

Sähköisellä ohjauksella ohjatun HMGE:n hydraulikkaöljyn virtaus on koko käytön ajan kytkettynä päälle. Sähköisellä ohjauksella ohjattua magnetointia operoidaan työkoneiden hyttiin, muiden ohjainlaitteiden läheisyyteen, asennettavilla käyttökytkimillä. HMGE:n sähköinen ohjaus sisältää virtakytkimen sen asettamiseksi käyttövalmiuteen, palautuvan ohjauspainikkeen HMGE:n magnetoinnin ohjaukseen sekä merkkivalon osoittamaan magnetoinnin tilaa päällä / pois päältä. Sähköinen ohjain kytketään HMGE:in siihen kuuluvilla liittimillä. (HMGE 2010, 11.)

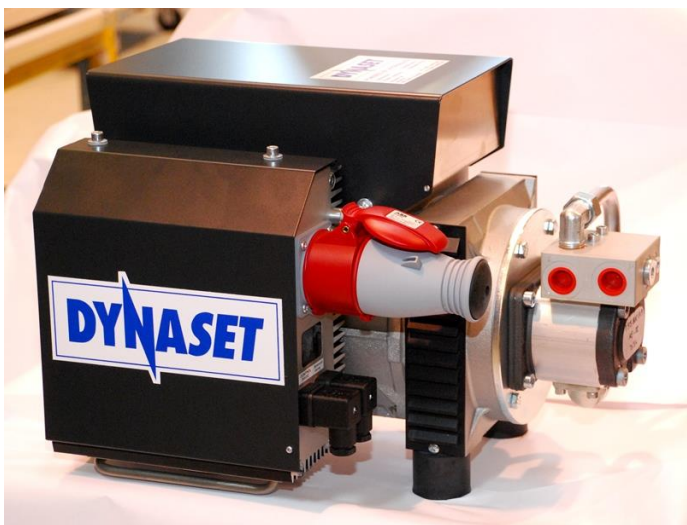
Metallinkeräysmagneetin toiminta perustuu sähkömagneettiin. Sähkömagneetin muodostaa rautainen kappale ja sen ympärille käämiksi kierretty sähköjohdin. Magneetin voimakkuutta kuvaa sen magneettinen momentti. Käämiin syötettäessä

tasasähköä siihen muodostuu käämin läpi kulkeva yhdensuuntainen magneettinen voima, jota kutsutaan magneettimomentiksi. Kun virran kulku käämissä lakkaa, jää sähkömagneettiin heikkoa jäännösmagnetismia.

2.2 Rakenne

HMGE:n rakenne koostuu hydraulikkamoottorista, sähkögeneraattoriosasta ja ohjauskeskusmoduulista. Hydraulikkamoottorissa on työkoneen hydraulikkajärjestelmään HMGE:n liittävät paine- ja tankkiliittimet. Hydraulikkamoottorin akseli pyörittää sähkögeneraattoriosan roottoria. Hydraulikkaöljyn virtauksella ja paineella saadaan aikaan sähkögeneraattoriosan roottorin tarpeellinen pyörimisnopeus kuormitettuna. (HMGE 2010, 2.)

Sähkögeneraattoriosia tuottaa sen staattoriin kolmivaiheista vaihtosähköä pyörivään roottoriin synnytetyn magneettivuon indusoimana. Ohjauskeskus ohjaa HMGE:n käyttöä ja tasasuuntaa sähkögeneraattoriosan tuottaman kolmivaihevaihtojännitteen metallinkeräysmagneetin magnetointitehoksi. HMGE:n suojausluokka on IP23 ja ohjauskeskuksen osalta IP44. Lisätilauksesta HMGE:n saa suojausluokalla IP54. 6 kW:n HMGE on esitetty kuvassa 2. (HMGE 2010, 2.)



Kuva 2. 6 kW:n HMGE:n rakenteeseen kuuluu pieni ohjauskeskus, sähkögeneraattoriosia sekä hydraulikkamoottori (Dynaset Arkisto).

2.2.1 Hydraulikkamoottori

Hydraulikkamoottori pyörittää hydraulikan voimalla sen akselilla olevaa sähkögeneraattoriosan roottoria tasaisella kierrosnopeudella kuorman suuruudesta riippumatta (HMGE 2010, 3). Hydraulikkajärjestelmän hydraulikkaöljyn virtauksella toteutetaan HMGE:n sähkögeneraattoriosan pyörimisnopeus. Sen paineella toteutetaan kuormituksen vaatima momentti. Tällöin työkoneen hydraulikkajärjestelmän tuotto vaikuttaa siinä käytettävän HMGE:n tehoon. Riittävällä virtauksen ja paineen tuotolla saadaan HMGE:a kuormitettua nimellistehollaan. Työkoneen hydraulikkajärjestelmän tuottaman hydraulikkaöljyn virtauksen ja paineen ollessa tarvittavaa pienempi, ei HMGE:n nimellistehoa saavuteta.

Hydraulikkamoottori on varustettu automaattisella pyörintänopeudensäätöventtiilillä, joka estää liian suuren hydraulikkaöljyn virtauksen aiheuttaman pyörimisnopeuden kasvamisen ja siten lähdejännitteen kasvamisen. Tämä suojaa HMGE:a ylikuormitustilanteilta. (HMGE 2010, 2.) Hydraulikkamoottorin käytön aikaiseen lämpenemään vaikuttaa hydraulikkaöljyn lämpötila. Tämän lämpenemä riippuu työkoneen oman hydraulikkajärjestelmän jäähdytystehosta.

2.2.2 Sähkögeneraattoriosia

HMGE:n sähkögeneraattoriosia tuottaa hydraulikkamoottorin muodostamasta pyörivästä liikkeestä metallinkeräysmagneetille magnetointitehoa. Sähkögeneraattoriosana on yleisesti generaattorikäytöissä käytettävä tahtikone. Tahtigeneraattori tuottaa sähköä johtamalla pyörivään roottoriin tasajännitettä, joka muodostaa roottoriin yhdensuuntaisen magneettivuon. Magneettivuo pyöriessään indusoi staattorin käämityksiin kolmivaiheisen sinimuotoisen vaihejännitteen. (HMGE 2010, 2.) Sähkögeneraattoriosan toiminnasta on kerrottu tarkemmin kappaleessa 3.

2.2.3 Ohjauskeskus

HMGE:n ohjauskeskus tasasuuntaa sähkögeneraattoriosan tuottaman vaihtosähkön tasasähköksi ja ohjaa metallinkeräysmagneetin magnetointitehoa. Tasasuuntaus ja magnetointitehon ohjaus tapahtuu tehoelektronikan komponenteilla. Suurella teholla kuormitettaessa osa näiden komponenttien läpi kulkemasta sähkötehosta muuttuu tehohäviöiksi, eli lämpötehoksi. HMGE:n luotettavan toiminnan ja käyttöiän kannalta onkin tärkeää näiden komponenttien tarpeellisen jäähdytyksen toteutus. Ohjauskeskuksen toiminnasta on kerrottu tarkemmin kappaleessa 4.

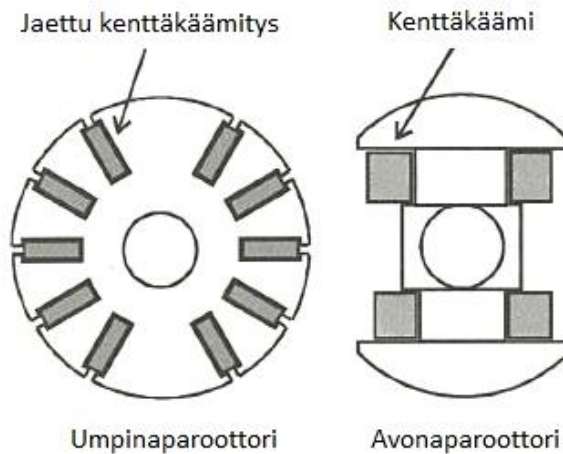
3 SÄHKÖGENERAATTORIOSA

Sähkögeneraattoriosana toimii tahtikone, eli tahtigeneraattori. Tahtigeneraattoria pyörittää aina jokin voimakone, jonka mekaaninen teho synnyttää tahtikoneen roottorin pyörivän liikkeen (Aura & Tonteri 1996, 215; Hietalahti 2011a, 88). Voimakoneena HMGE:ssa toimii hydraulikkamoottori ja mekaanisena tehona hydraulikkaöljyn virtaus ja sen paine. Hydraulikkaöljyn virtaus muodostaa hydraulikkamoottorin akselille mekaanisen tehon, pyörimistehon. Tahtigeneraattorin roottori pyörii hydraulikkamoottorin asettamalla kierrosnopeudella, joka määrää tahtigeneraattorin tuottaman taajuuden. (HMGE 2010, 2.)

3.1 Tahtikone

Yleisesti tahtikoneita on kahta tyyppiä jotka eroavat toisistaan roottorin rakenteen osalta. Ne jaetaan umpinapa- ja avonapakoneisiin. (Aura & Tonteri 1996, 214; Hietalahti 2011a, 87.) Umpinapakoneen roottori on sylinterimäinen ja magnetointikäänitys on sijoitettu roottorin uriin. Magneettiset ominaisuudet ovat tällöin lähes symmetriset koko kehällä ja roottorin kierrosnopeus yleisesti suurempi. (Hietalahti 2011a, 87; Searle 2002, 150.)

Avonapakoneen roottori koostuu avonavoista, joiden ympärille magnetointikäänitys on käänmitty. Avonapakoneen roottori on magneettisilta ominaisuuksiltaan epäsymmetrinen, johtuen epätasaisesta staattorin ja roottorin välisestä ilmvälisestä. Avonapaiset tahtikoneet ovat yleensä useampinapaparisia ja tästä johtuen roottorin kierrosnopeus yleisesti pienempi verrattuna umpinapaisiin tahtikoneisiin. (Hietalahti 2011a, 87.) Tahtikoneiden roottorirakenteet on esitetty kuviossa 2.



Kuvio 2. Umpinapa- ja avonapatahtikoneen roottorin rakenne (Searle 2002, 149. Muokattu).

Kuviossa 2 vasemmalla esitetty umpinaparoottori on käytössä suurilla kierrosnopeuksilla, kuten 1500 r/min tai 3000 r/min, esimerkiksi höyryturbiinigeneraattoreissa. Kuviossa 2 oikealla esitettyä avonaparoottoria käytetään pienemmillä kierrosnopeuksilla, yleisesti <math><1000\text{ r/min}</math>, esimerkiksi vesivoimageneraattoreissa. (Aura & Tonteri 1996, 215; Hietalahti 2001a, 87-88.) HMGE:ssä käytetty sähkögeneraattoriosa on rakenteeltaan avonapatahtikone.

3.2 Tahtigeneraattorin toiminta

Ulkoinen voimakone pyörittää tahtigeneraattorin roottoria. Roottoriin syötetään tasajännitettä, joka muodostaa magneetokämeihin yhdensuuntaisen magneettivuon, päävuon. Päävuon pyörivä liike indusoi staattorin käämitykseen roottorin kanssa samassa tahdissa pyörivän sinimuotoisen kolmivaiheisen jännitteen, lähdejännitteen. (Aura & Tonteri 1996, 215; Hietalahti 2011a, 88.)

Sähkögeneraattoriosan lähdejännitteen säätö toteutetaan compound jännitteen säätimellä. Säätimen ensiökäämitys mittaa generaattorin kuormitusta staattorin käämityksestä ja säätimen toisiokäämitys syöttää kuorman mukaan tasajännitettä generaattorin magnetoinnille. Tällöin HMGE:n kuormitus onnistuu vaihekohtaiseen maksimivirtaan asti. Säätimellä sähkögeneraattoriosan ulostulojännite pystytään pitämään vakiona koko tehoalueella $\pm 5\%$ tarkkuudella. (HMGE 2010, 2.)

Tahtigeneraattorin tuottamaan taajuuteen vaikuttaa roottorin pyörimisnopeus. Roottorin pyörimisnopeus riippuu voimakoneen kierrosnopeudesta. Tahtigeneraattorin tuottama taajuus f saadaan pyörintänopeuden yhtälöstä seuraavasti (Aura & Tonteri 1996, 215; Searle 2002, 148; Hughes 2006, 341).

$$n = \frac{60 \cdot f}{p_{\text{napa}}} \rightarrow f = \frac{n \cdot p_{\text{napa}}}{60}, \quad (1)$$

jossa n on roottorin pyörimisnopeus [r/min] ja p_{napa} on tahtigeneraattorin napapariluku.

3.3 Tahtikoneen magnetointi

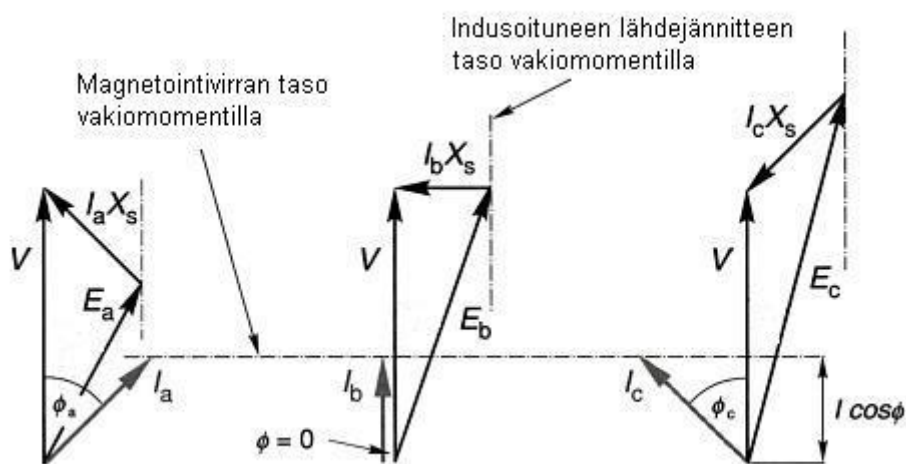
Roottorin magnetointi voidaan toteuttaa harjattomasti tai harjallisesti liukurenkaiden välityksellä. Harjaton magnetointi toteutetaan tahtikoneen akselilla olevalla erillisellä ulkonapaisella vaihtosähkögeneraattorilla joka toimii magnetointikoneena. Akselin pyöriessä magnetointikoneen roottoriin indusoituu vaihtojännite, joka tasasuunnataan ja syötetään tahtikoneen roottorin magnetoimiskäämiin. Tasasuunnattu jännite ja virta muodostavat tahtikoneen roottorin magnetointikäämeihin yhdensuuntaisen magneettivuon. Roottorin magnetoimistehon muodostaa magnetoimisjännitteen ja -virran tulo. (Aura & Tonteri, 1996, 217-218.)

Harjallinen magnetointi toteutetaan tuomalla magnetoimisvirta roottorilla olevien liukurenkaiden ja niillä lepäävien hiiliharjojen välityksellä pyörivään roottorikäämiin. Ulkoisesta tasajännitelähteestä tai vaihtosähkölähteestä säätäjän välityksellä syötetään liukurenkaiden välityksellä tasajännitettä tahtikoneen roottorin magnetointikäämeille, joihin magneettivuo muodostuu. (Aura & Tonteri 1996, 217-218.) HMGE:n roottorin magnetointi on toteutettu harjallisesti liukurenkaiden välityksellä.

3.4 Tahtigeneraattorin teho

Tahtikoneilla on erikoinen ominaisuus epätahtikoneisiin verrattuna. Tahtikoneen tehokerrointa pystytään muuttamaan magneitointia säätämällä. Siitä johtuen hitailla nopeuksilla tahtikoneet eivät kärsi huonosta hyötysuhteesta kuten epätahtikoneet. (Searle 2002, 147.) Magneitoinnin säätö mahdollistaa sen, että tehokertoimen $\cos\phi$ ollessa 1, voidaan generaattorista ottaa pätötehona koko nimellisen näennäistehon suuruinen teho (Aura & Tonteri 1996, 258).

Tahtigeneraattorin tuottama pätötehon määrä riippuu aina sitä pyörittävästä voimakoneesta. Magneitoinnilla saadaan säädettyä tahtigeneraattorin tuottamaa loistehon määrää. Alimagneitoina tahtigeneraattori antaa kapasitiivista loistehoa ja ylimagneitoina induktiivista loistehoa. Magneitointi vaikuttaa täten staattorivirran ja -jännitteen väliseen vaihekulmaan, minkä avulla saadaan laskettua koneen pätö- loisteho tasapaino. (Hietalahti 2011a, 97.) Tahtigeneraattorin ali- ja ylimagneitoinnin vaikutus pätö- loisteho tasapainoon on esitetty kuviossa 3, jonka kohdassa a) on esitetty induktiivinen-, kohdassa b) resistiivinen ja kohdassa c) kapasitiivinen kuormitus, kun momentti on vakio (Hughes 2006, 347.)



Kuvio 3. Tahtigeneraattorin magneitoinnin vaikutus pätö- loisteho tasapainoon (Hughes 2006, 348. Muokattu).

4 OHJAUSKESKUS

HMGE:n ohjauskeskus tasasuuntaa sähkögeneraattoriosan tuottaman vaihtojännitteen tasajännitteeksi ja ohjaa metallinkeräysmagneetin magnetointitehoa. 20 kW:n HMGE:n ohjauskeskus koostuu kahdesta ohjauskortista, kelakortista sekä ohjauskeskuksen runkona ja komponenttien jäähdytyslevynä toimivasta alumiiniprofiilista sekä kannesta. Näiden lisäksi ohjauskeskuksessa on kytkentään kuuluva kaapelointi ja muutamia asennukseen sekä sähköiseen ohjaukseen kuuluvia komponentteja.

4.1 Modulaarinen rakenne ja teho

HMGE on modulaarinen tuote. Sen tuottaman magnetointitehon ratkaisee ohjainkorttien käsittelemän tehon määrä ja asennetun sähkögeneraattoriosan koko. Pieni ohjauskeskus sisältää yhden ohjauskortin ja sillä pystytään tuottamaan enintään 10 kW:n magnetointiteho. Sitä käytetään 6 ja 10 kW:n HMGE:ssa. Suuri ohjauskeskus sisältää kaksi ohjauskorttia ja sillä pystytään ohjaamaan 20 kW:n magnetointiteho. Sitä käytetään 12, 15 ja 20 kW:n HMGE:ssa.

Jos käytössä on kaksi tai useampi ohjauskortti, toimii tällöin yksi ohjauskortti ohjaavana (Master), ja loput ohjattavina (Slave) kortteina (Dynaset 2010, 6). Näitä pieniä ja suuria ohjauskeskusmoduuleita yhdistämällä saadaan HMGE:n kokoa kasvatettua. Esimerkiksi myöhemmin kehitettävään 30 kW:n HMGE:in asennetaan sekä pieni- että suuri ohjauskeskusmoduuli rinnan, ja näiden yhteensä käsittelemä magnetointiteho on enintään tarvittavat 30 kW.

Rinnankytkettyjen ohjauskorttien magnetointiteho ohjataan kelakortin kautta metallinkeräysmagneetille (HMGE 2010, 7). Kelakortti toimii tasoituskuristimena kahdelle rinnakkaiselle tasajännitesyötölle. Tasoituskuristimen resistanssit ja induktanssit toimivat virtaa tasaavina impedansseina. Näiden rinnankytkennällä mahdollistetaan suuren virran tuotto ja rinnankytkennässä onkin tärkeää taata komponenttien välinen tasainen virran jakautuminen. Johtoviiveiden erilaisuudet sekä päästötilassa päästöjännitteiden hajonnat asettavat haasteet rinnankytkennän virran tasaiseen jakautumiseen. (Hietalahti 2011b, 27.)

Johtoviive tarkoittaa ensiksi syttyneen johtavan komponentin romahduttaessa jännitteen, muiden komponenttien syttymisvarmuus heikkenee tai estyy kokonaan. Vastaavasti sammutettaessa viimeisenä johtava komponentti voi joutua katkaisemaan koko kuormitusvirran. Tällöin koko kytkennän virta voi johtua kokonaan ensimmäiseksi syttyneen tai viimeisenä johtavan komponentin läpi, mikä aiheuttaa sen ylikuormittumisen. (Hietalahti 2011b, 27.)

Päästöjännitteen hajonta tarkoittaa rinnankytkennässä enemmän virtaa vievän komponentin nopeamman lämpenemisen, siitä johtuvan ylimenojännitteen pientymisen, mikä vaikuttaa virran jaon heikkenemiseen ja siten lämpenemiseen entisestään. Tämä voi johtua myös valmistajien ilmoittamista toleransseista, joten tehokkain tapa estää päästöjännitteen hajonta on käyttää mahdollisimman samanlaisia komponentteja kiinnitettynä samaan jäähdytyslevyyn lämpötilaerojen tasaamiseksi. Myös rinnankytkennän kaapeloinnin symmetrisyys vaikuttaa johtoresistanssien symmetrisyyteen ja siten päästöjännitteen hajontaan. (Hietalahti 2011b, 27.)

4.2 Magnetointitehon ohjaus

Sähkögeneraattoriosan tuottama lähdejännite tasasuunnataan ohjauskortin kolmevaiheisella diodeista muodostetulla siltakytkennällä. Muodostunutta tasajännitettä ohjataan IGBT -yksiköiden muodostaman H-siltakytkennän avulla metallinkeräysmagneetille magnetointitehoksi.

Diodi on yksinkertainen, mutta tärkein tehopuolijohteista (Bose 2006, 32). Diodille on ominaista virran kulku vain toiseen suuntaan, anodilta katodille. Tätä suuntaa nimitetään päästösuunnaksi. Vastaavasti estosuuntaan, katodilta anodille, diodin jännite on nolla, joten se ei ole johtavassa tilassa. Diodi koostuu p- (anodi) ja n-tyyppisen (katodi) puolijohteen rajapinnasta. Positiivisen jännitteen ollessa anodilla ja negatiivisen katodilla, pn-rajakerroksen tyhjennysalue kaventuu ja siihen syntyy sähkökenttä missä rajapinnan varauksenkuljettajat alkavat liikkua ja piirissä alkaa kulkea sähkövirta. Napaisuuden vaihtuessa pn-rajakerrokseen syntyy vastakkaisuuntainen sähkökenttä ja varauksenkuljettajat siirtyvät pois rajapinnalta, synnyttäen siihen vapaan tyhjennysalueen mikä estää sähkövirran kulkemisen. (Hietalahti 2011b, 6-7; Silvonen 2009, 89, 94, 98.)

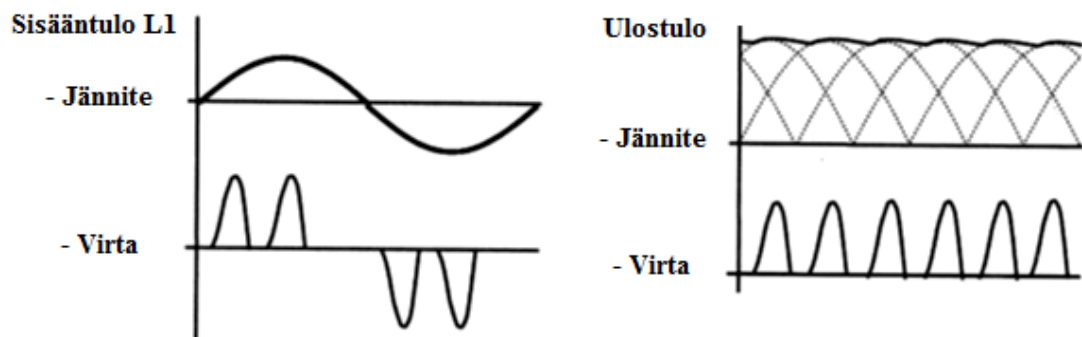
Kokoaaltotasasuuntaajaa käytetään vaihtovirran muuttamiseen tasavirraksi. Tehoelektronikassa kolmivaiheista kokoaaltotasasuuntaajaa kuudella diodilla toteutettuna kutsutaan kuusisykesuuntaajaksi (Silvonen 2009, 233). Kirjallisuudessa sitä kutsutaan myös kolmivaiheiseksi kuusipulssiseksi siltakytkennäksi. Tasasuunnatun jännitteen U_{dc} suuruus määräytyy tällöin integroimalla yhden kuudesta muotoutuneesta pulssista, joka noudattaa seuraavaa lauseketta. (Hietalahti 2011b, 44-45.)

$$U_{dc} = \sqrt{2} \cdot U \cdot \cos \omega t, \text{ kun } -\frac{1}{6}\pi < \omega t < \frac{1}{6}\pi \quad (2)$$

$$\rightarrow U_{dc} = \frac{1}{\pi/3} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{2} \cdot U \cdot \cos \omega t \, d(\omega t) = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} \cdot U = 1,35 \cdot U,$$

jossa U on pääjännite
 ω on kulmanopeus

Tarkasteltaessa kuusipulssisiltakytkennän vaikutusta syöttävään lähteeseen huomataan sen ottavan lähteestä epäsinimuotoista virtaa. Kuusipulssisiltakytkennän sisään- ja ulostulojännite sekä -virta on esitetty kuviossa 4.



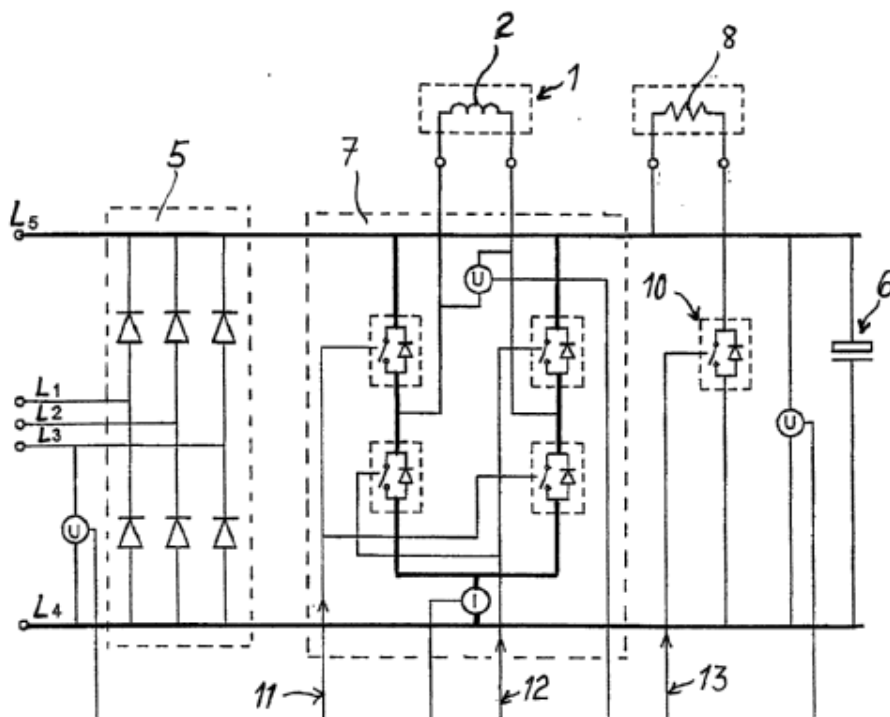
Kuvio 4. Kuusipulssisiltakytkennän ja tasasuuntauksen kondensaattorin vaikutus syöttävään lähteeseen (Brown 2010, 32, Muokattu).

H-siltakytkennässä käytetty IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor, suom. eristehila biboplaaritransistori) on tehoelektronikan kytkinkomponentti mikä soveltuu hyvin suuritehoisiin ja pienitehoisiin (1k – 100k Hz) tehoelektronikan käyttöihin (Bose 2006, 29; Silvonen 2009, 285). IGBT on risteytetty bipolaaritransistorista (suom. puolijohdekytkimestä) (BJT) ja kanavatransistorista (fet) (Silvonen 2009, 285). IGBT:ssä on yhdistetty näiden parhaat ominaisuudet, kuten eristehilaisen kanavatransistorin (MOSFET) matalatehoinen päälle- ja pois ohjaus sekä puolijohdekytkimen (BJT) pieni kollektori emitteri piirin tehohäviö, minkä takia se on

keskitehoisissa ja -jännitteisissä käytöissä yleisin tehoelektroniikan kytkinkomponentti (Hughes 2006, 74).

IGBT:n ohjaaminen tapahtuu jännitteen kytkemisellä sen hilalle. Tällöin komponentissa alkaa kulkea virta sen pääpiirin, kollektori - emitteri, kautta. Virran katkaisu tapahtuu kytkemällä hila estotilan jännitearvoonsa. IGBT komponentit kestävät nykyään 400 V - 3000 V jännitteitä ja ovat ohjattavissa tyristöreita huomattavasti suuremmalla taajuudella. Näiden saavutettujen jännite ja virta-arvojen perusteella voidaan hallita taajuusmuuttajakäytöt usean sadan kilowatin tehoon asti. (Hietalahti 2011b, 17.)

Kuviosta 5 nähdään ohjauksortin magnetointitehon ohjauksen kytkennän muodostuvan kuuden diodin kolmivaiheisesta siltakytkennästä sekä IGBT -yksiköin toteutetun H-siltakytkennän muodostamasta tasajännitteen ohjauksen kytkennästä. (Patentti 20080192, 2008.)



Kuvio 5. Ohjauksortin magnetointitehon ohjaukskytkentä (Patentti 20080192, 2008).

Kuviossa 5 nähdään kelan (2) muodostama metallinkeräysmagneetti (1) ja tasasuuntaussilta (5). Kuviossa 5 on esitetty myös magnetoinnin (11) ja vastamagnetoinnin (12) ohjaus. Magnetointienergia on purettavissa taajuussäädinkytkennän (7) kautta tasasuuntauksen kondensaattoriin (6) ja

vastamagnetointitilanteessa takaisin metallinkeräysmagneetille (1). Kondensaattorin (6) varausta tai magneettiin jäänyttä induktiivista jäännösenergiaa on johdettavissa (10) ohjauksella (13) purkausvastukselle (8). (Patentti 20080192, 2008.)

Hydraulisella ohjauksella hydraulikkaöljyn virtauksen käynnistyessä tai sähköisellä ohjauksella palautuvaa ohjauspainiketta painettaessa sähkögeneraattoriosan tuottama teho ohjataan magnetointitehoksi metallinkeräysmagneetille (HMGE 2010, 10-11). Hydraulisella ohjauksella hydraulikkaöljyn virtauksen lakattua tai sähköisellä ohjauksella palautuvaa ohjauspainiketta painettaessa HMGE vastamagnetoituu ja metallinkeräysmagneetissa olevat metallikappaleet irtoavat.

Vastamagnetoinnin toiminta-aika on todella nopea (0,8 s) johtuen IGBT-yksiköiden nopeasta ohjattavuudesta. Vastamagnetoinnissa ohjaustiedosta metallinkeräysmagneetin magnetointiteho puretaan ohjauskeskuksen ohjauksorteilla oleviin tasasuuntauskondensaattoreihin. Niiden energiavarauksen täytyessä ohjataan varautunut energia takaisin metallinkeräysmagneetille sen napaisuus käännettynä, jolloin saadaan metallinkeräysmagneettiin jäänyt jäännösmagnetismi purettua ja kappaleet irrotettua. (Patentti 20080192, 2008.)

Sähköistä ohjausta käytettäessä voidaan HMGE:n metallinkeräysmagneetin kuormitus purkaa myös laskevalla ramppiajolla. Tällöin kuorma purkautuu hitaasti ja esimerkiksi suurempien metallilevyjen purkaminen käy yksitellen ja siten turvallisemmin. Ramppiajolla purku tapahtuu palautuvaa ohjauspainiketta pidempään (>0,5 s) painettaessa, jolloin metallinkeräysmagneetille syötetty virta alkaa pienentyä ja magnetointiteho laskea hitaammin. Kun ohjauspainikkeen päästää, HMGE alkaa syöttää metallikeräysmagneetille nimellisvirtaa ja magnetointiteho on taas nimellinen. (HMGE 2010, 11.)

5 LÄMPENEMÄ

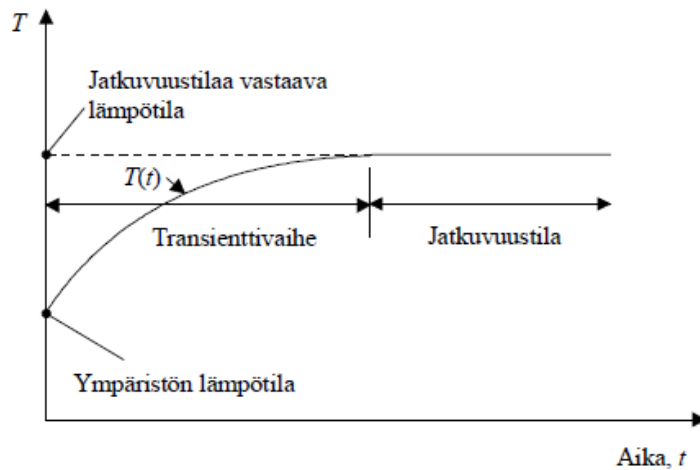
Tehoelektroniikan ja sähkökoneiden käytön aikainen lämpeneminen vaikuttaa olennaisesti niiden toimintaan. Ohmin lain mukaan komponentin läpi kulkiessa virtaa, syntyy siinä aina häviöteho joka johtaa komponentin lämpenemiseen (Terminen Laitesuunnittelu 2010c, 1). Virran kulkiessa resistanssin läpi syntyy aina virran neliön ja resistanssin tulon verrannollinen lämpöteho (Terminen Laitesuunnittelu 2010c, 2).

Lämmön, kuten sähkökin johtuminen on täysin analogista. Tästä johtuen voidaan käyttää samoja laskentamenetelmiä ja käsitteitä. Systemi usein ajatellaan homogeeniseksi, ettei lämmönjohtavuus riipu paikasta ja pienillä lämpötilaeroilla voidaan lämmönjohtavuutta pitää vakiona, vaikka lämmönjohtavuus yleisesti onkin lämpötila paikan funktiona. (Terminen Laitesuunnittelu 2010c, 6.) Kuorman muutoksesta aiheutuva virran muutosilmiö noudattaa homogeenisen differentiaaliyhtälön ratkaisua muutosvaiheen aikana (Tarkka & Hietalahti 2004, 128). Lämpötilan muutos $d\theta$ ajan suhteen dt muodostuu homogeenisen differentiaaliyhtälön mukaan seuraavasti.

$$\frac{d\theta}{dt} + k \cdot \theta = 0, \quad (3)$$

jossa k on systeemin lämpenemää vastustava kerroin ja θ on lämpötila muutosilmiön aikana.

Vakiokuormituksen aiheuttamasta lämpenemästä muodostuu tällöin alkuun muutostilassa jyrkemmin kasvava ja lopulta jatkuvuustilaansa tasoittuva lämpenemän kuvaaja. Lämpenemän muodostamasta kuvaajasta pystytään helposti ratkaisemaan kuvaajan lämpenemisaikavakio τ sekä lopullinen lämpötilan arvo, loppulämpenemä θ_∞ . Lämpenemisaikavakio on piste kuvaajan aika-akselilla, jolloin 63 % loppulämpenemästä on saavutettu. Loppulämpenemä voidaan katsoa saavutetuksi, kun aikaa on kulunut $4 \cdot \tau$ verran (TTT-käsikirja 2000-07, 6). Lämpötilan kasvuvaihetta kutsutaan transienttivaiheeksi ja loppulämpenemän saavuttamisen jälkeistä aikaa jatkuvuustilaksi. Lämpenemän kuvaaja on esitetty kuviossa 6.



Kuvio 6. Sähkölaitteen lämpötilan kehitys ajan funktiona (Terminen Laitesuunnittelu 2010a, 6).

Kuvion 6 mukaisesta lämpenemän kuvaajasta saadaan ratkaistua lämpenemä seuraavalla yhden aikavakion lämpenemismallilla (Hietalahti 2013, 29-30).

$$\Delta\theta(t) = (\theta_{\infty} - \theta_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \theta_0, \quad (4)$$

jossa $\Delta\theta(t)$ on lämpenemä ajanhetkellä t ,
 θ_0 on lämpötila ajanhetkellä $t = 0$ ja
 e on Neperin luku.

Sähkökoneiden ja komponenttien valmistajat ilmoittavat niiden suurimmat sallitut lämpötilat luotettavan toiminnan takaamiseksi. Sähkökoneilla on IEC 60034-1 -standardin mukaiset suurimmat sallitut käyttölämpötilat. Ylitettäessä nimelliskuormituksella suositellut käyttölämpötilat, elinikä lyhenee huomattavasti. Myös tehoelektronikan komponenteilla liian suuri käytön aikainen lämpenemä vaikuttaa huomattavasti niiden elinikään ja käyttöasteeseen.

Tehoelektronikan ja sähkökoneiden liiallisen lämpenemän suojaukseen voidaan käyttää yksinkertaista lämpökytkintä tai useimmin PTC -vastusta (Positive Temperature Coefficient resistor). PTC voi olla sijoitettu elektroniikkakortille, tai sähkökoneissa sen käämityksen läheisyyteen. PTC:n vastusarvo kasvaa lämmitessään tietyn verran, jonka avulla liiallinen lämpeneminen on helppo havaita. (Brown 2010, 134)

5.1 Tehoelektroniikan lämpenemä

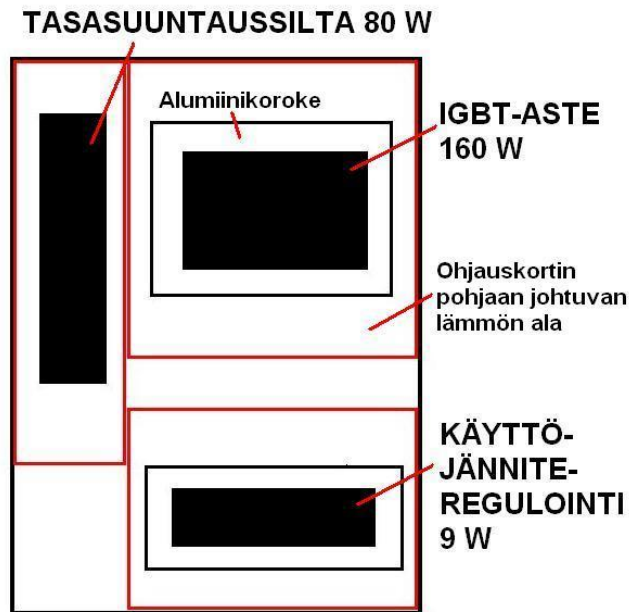
Tehoelektroniikan komponentit ovat niiden käsittelemään tehoon nähden pieniä. Kuormitettaessa osa niiden läpi kulkevasta tehosta muuttuu lämpöhäviöiksi ja ilman riittävää jäähdytystä ne ylikuumenevat ja lopulta rikkoontuvat. Luotettavan toiminnan takaamiseksi on tärkeää, ettei komponentin sisäisten liitosten lämpötila nouse yli turvallisen rajan. (Hughes 2006, 75-76.) Puolijohdekomponentilla suurin sallittu liitoslämpötila on noin 125 - 200 °C, kun sen kotelon suurin sallittu lämpötila on esimerkkinä mikroprosessoreilla 70 °C (Silvonen 2009, 283).

Komponentti lämpenee niin kauan kun virta kulkee sen läpi. Jos lämpöä ei saada poistettua komponentista, se kasvaa niin kauan kunnes komponentti tuhoutuu. Tämän vuoksi lämmön pois johtaminen on tärkeää. Lämpötilan kasvun tasaamiseksi täytyy komponentista syntyvän lämmön olla yhtä suuri kuin siitä poistuva lämmön. Tämän perusteella nähdään käyttölämpötilan suuruuden olevan suoraan verrannollinen komponenttien vikataajuuteen. (Terminen Laitesuunnittelu 2010c, 3.)

Sähkölaitteissa lämpökuorma voidaan määrittää laitteen otto- ja lähtötehon erotuksena. Lämpökuorman laskenta voidaan tehdä myös askel askeleelta määrittämällä jokaisen komponentin häviöteho ja summaamalla ne yhteen. Määritettyyn lämpökuormaan on hyvä lisätä vielä varmuusmarginaali. Tällä mahdollistetaan myöhemmin samalle kortille lisättävien komponenttien jäähdytys. Varmuusmarginaalia lisättäessä on huomioitava sen kasvattavan jäähdytystä ja siten laitteen kokoa. (Terminen Laitesuunnittelu 2010a, 5.)

Ohjauskeskuksen tehoelektroniikan komponentit, kuten tasasuuntaussilta sekä IGBT:t, ovat suurimmilla virroilla kuormitetut ja siten eniten lämpenevät yksittäiset komponentit. Ne ovat sijoitettu ohjauskortille siten, että niissä muodostuva lämpö johtuu suoraan ohjauskortin pohjana toimivaan alumiinilevyyn. Ohjauskortti kiinnitetään pohjastaan suoraan ohjauskeskuksen runkona toimivaan alumiiniprofiiliin ja tehokkain lämmönjohtuminen varmistetaan näiden väliseen liitospintaan levitettävällä piitahnalla. Ohjauskortin tehokkaimpien yksittäisten komponenttien tuottama lämpö saadaan täten johtumaan parhaiten jäähdytyslevyn välityksellä ympäröivään ilmaan ja komponenttien liiallinen lämpeneminen minimoitua. Piirilevyllä olevat muut komponentit johtuvat ohjauskeskuksen ilmaan. Ohjauskortin pohjalevyyn johtuvien

komponenttien sijoittelu ja niissä muodostuneen lämmön johtuminen on esitetty kuviossa 7.



Kuvio 7. Ohjauskortin suurimpien lämmönlähteiden sijoittuminen ohjauskortilla

Ohjauskorteista tiedetään jäähdytyksen mitoittamisen kannalta tärkeimpien komponenttien tuottama tehohäviö nimelliskuormituksella. Ilmoitetut tehohäviöt ovat ilmoitettu taulukossa 1.

Taulukko 1. Ohjauskortin tehohäviöt

Komponentti	Tehohäviö P_H (W)
Tasasuuntaussilta	80
IGBT-aste	160
Käyttöjännite regulointi	9
Virranmittausvastukset	6
Kuormanjakovastukset	12
Kelakortin kelat (4 kpl)	20

Taulukossa 1 ilmoitetuista ohjauskortilla muodostuvista tehohäviöistä kolme ensimmäistä jäähtyy suoraan pohjalevyyn ja loput kolme pääasiallisesti ohjauskeskuksen kotelon sisäilmaan. Jäähdytyslevyn mitoituksen osalta otetaan huomioon kaikki ilmoitetut tehohäviöt jäähdytyslevyn kautta jäähdytettäväksi. 20 kW:n HMGE:n ohjauskeskuksen kokonaistehohäviöksi P_H saadaan 554 W.

5.2 Generaattorin lämpenemä

Tahtigeneraattorissa syntyy käytön aikana häviöitä sekä sen käämeissä virtalämpöhäviöinä että rautarakenteessa hystereesi ja pyörrevirtahäviöinä (Hietalahti 2013, 29.) Verrattuna sähkömagneettiseen suunnitteluun, sähkökoneen lämmön ja -aineensiirto on vaikeammin hallittavaa ja siksi monimutkaisempaa suunnitella. Tämän tekee haastavaksi lämpötilan jakautuminen koneen eri osissa, esimerkiksi lämmön siirtyminen eristetyistä kuparijohtimesta staattorirunkoon. Asiaa vaikeuttaa entisestään lämmön jakautuessa täysin erilaisilla muutostiloissa kuin vakiokuormitetussa tilassa. (Terminen Laitesuunnittelu 2010e, 1.)

Sähkökoneet on määritetty IEC standardin 60034-1 mukaisiin eristysluokkiin. Standardin mukaisella eristysluokituksella nähdään nimelliskuormituksen aikaiset suurimmat sallitut lämpötilat ja millaiseen käyttöön sähkökone on soveltuva. Standardin eristysluokkia ovat esimerkiksi B, F ja H. H-eristysluokan generaattorin korkein lyhytaikainen ympäristön lämpötila saa olla enintään 40 °C. Standardin määrittämänä sallittu kuumimman pisteen lämpötila on 180 °C ja vastusmittauksella määritetty käämityksen lämpötila enintään 125 °C. Jos sähkökonetta joudutaan kuormittamaan siten, että nämä lämpötilat ylitetään, sen eristyksen elinikä puolittuu aina 8 ... 10 °C nousua kohti. (TTT-käsikirja 2000-07, 13-14.) Jos käyttölämpötila on standardin asettamaa lämpötilaa pienempi, kuormitus voidaan tällöin asettaa hetkellisesti nimellistä suuremmaksi, kunhan standardin mukaiset eristysluokan lämpötilarajat eivät ylitä.

Sähkögeneraattoriosan lämpeneminen vaikuttaa olennaisesti HMGE:n toimintaan. Mitä kuumemmassa lämpötilassa HMGE toimii, sitä vähemmän sitä voidaan kuormittaa. Sähkögeneraattoriosia ja ohjauskeskus on varustettu suojalla liiallista lämpenemää vastaan. Sähkögeneraattoriosia on suojattu lämpökytkimellä ja ohjauskeskuksessa lämpötilan mittauspiiri mittaa ohjauskeskuksen sisätilan ilmaa. Suurin sallittu lämpötila on 100 °C. Sähkögeneraattoriosan lämpökytkimen avautuessa HMGE:n magnetointi lakkaa ja se on syytä jättää pyörimään tyhjäkäynnille mahdollisimman nopean jäähtymisen mahdollistamiseksi. Ohjauskeskuksen lämpötilan mittauspiirin hälyttäessä ohjauskeskuksen näyttöön, saa työsyklin vielä suorittaa loppuun, mutta metallinkeräysmagneetin uudelleenmagnetointi on sallittu vasta lämpötilan laskiessa alle 90 °C. (HMGE 2010, 12.)

6 LÄMMÖNPOISTO

Lämmön siirtyminen on itsestään tapahtuva prosessi, missä kahden eri lämpötilaisen aineen tai kappaleen lämpötilat tasaantuvat siten, että lopulta niiden välinen lämpötilaero on nolla. Lämmönpoistuminen tapahtuu tällöin aina kuumemmasta lämpötilasta pienempään. (Terminen Laitesuunnittelu 2010c, 6). Lämmönpoistomenetelmiä ovat johtuminen, säteily sekä konvektio. Johtumista tapahtuu aina aineiden sisällä lämpötilan tasaamiseksi. Säteilylämmönsiirron osuus on yleensä vaatimaton, muttei merkityksetön. Yleensä ilman, nesteen tai höyryn välityksellä tapahtuva konvektio on tärkein. (Terminen Laitesuunnittelu 2010e, 3.)

Toimintajakson pituus vaikuttaa olennaisesti jäähdytysteon määrittämiseen. Jos laitteen käyttöjakso on vain 40 % kokonaisajasta, on siinä muodostuva häviöteho myös 40 % kokonaishäviötehosta. Mitoituksellisesti on kuitenkin tärkeää tietää saavuttaako komponentti käyttöjakson aikana tasapainotilaa vastaavan lämpötilan. Kun komponentin lämpötila ei enää jatka kasvuaan, jäähdytysteho on yhtä suuri kuin lämpöhäviöteho, ja komponentti on saavuttanut termisen jatkuvuustilan. (Terminen Laitesuunnittelu 2010b, 5.)

HMGE:n normaalit käyttöolosuhteet, kuten suuret lämpötilaerot, pölyisyys sekä likaisuus, asettavat haasteet HMGE:n jäähdytyksen toteutukseen. Käyttöolosuhteiden johdosta HMGE:n ohjauskeskuksen on rakenteeltaan oltava suljettu sen sisällä olevien tehoelektronikan komponenttien suojaamiseksi. Ohjauskeskuksen komponentit ovat pyritty asentamaan ohjauskeskukseen siten, että niiden muodostama lämpö saadaan johdettua ohjauskeskuksen alumiiniprofiilin välityksellä ympäröivään ilmaan mahdollisimman tehokkaasti. Sähkögeneraattoriosan on rakenteeltaan avoin. Sähkögeneraattoriosan akselilla olevan tuulettimen aiheuttama pakotettu konvektio virtaa sen läpi jäähdyttäen tehokkaasti sen eniten lämpeneviä osia, staattoria ja roottoria. Hydraulikkamoottorin osalta lämmönpoisto toteutuu hydraulikkaöljyn aiheuttamalla pakotetulla konvektiolla.

6.1 Johtuminen

Lämmön johtuminen tapahtuu molekyylien keskinäisten törmäysten välityksellä, eli systeemin sisällä ilman aineensiiroja (Terminen Laitesuunnittelu 2010c, 4). Lämpö siirtyy johtumalla kuumemmasta aineesta viileämpään, sähkökoneissa staattorin käämityksestä runkoa pitkin aina koneen ulkokehälle asti. Tällä matkalla liitospintojen ja eristeiden lämpövastukset muodostavat suurimmat haasteet lämmön johtumisen määrittämiselle. Nämä vastukset määräävät pääasiassa koneen lämmönsiirron. Lämmön siirtymisen tehokkuuteen johtumalla vaikuttaa eniten sähkökoneiden ja komponenttien materiaalivalinnat. (Terminen Laitesuunnittelu 2010e, 3.)

6.2 Säteily

Säteilylämmönsiirto on lämmön siirtoa ilman väliainetta ja sitä tapahtuu kaikissa olomuodoissa. Absoluuttista nolapistettä korkeammassa lämpötilassa olevat kappaleet lähettävät lämpösäteilyä. Kappaleen säteilyenergian määrä riippuu materiaalin ja pinnan ominaisuuksista sekä pinnan lämpötilasta. Kappaleen pinnan emissiivisyys määrittää pinnan säteilyominaisuuden verrattuna mustaan kappaleeseen, joka on säteilyn kannalta täydellinen säteilijä ja absorboija. Mustalla kappaleella emissiivisyys saa arvon 1, kun esimerkiksi hyvin kiillotetun metallin, kuten kullan tai hopean emissiivisyys on jopa 0,02. (Terminen Laitesuunnittelu 2010f, 1-5.)

6.3 Konvektio

Konvektio on kahden aineen välistä lämpövirtausta, eli nesteestä tai kaasusta kiinteään pintaan tai toisinpäin. Konvektion matemaattisessa määrittämisessä täytyy yhdistää aineensiiirron ja lämmönjohtumisen peruslait. Vapaaksi konvektioksi kutsutaan lämpövirtausta, joka tapahtuu materiaalien välillä itsestään. Pakotetuksi konvektioksi taas kutsutaan, jos jäähdyttävän aineen virtaus on aiheutettu ulkoisesti, esimerkiksi pumpuin tai puhaltimin. Lämmönsiirron johtuessa rajapintojen läpi, vaikuttaa rajapintakerroksen paksuus kääntäen verrannollisesti lämmönsiirron tehokkuuteen. (Terminen Laitesuunnittelu 2010d, 1.)

Halutuin lämmönsiirtomuoto on vapaa konvektio, koska siinä ei ole liikkuvia osia ja siten se on menetelmänä varmin. Vapaassa konvektiossa kuitenkin lämmönsiirtotehokkuus on pakotettua konvektiota huomattavasti pienempi, mistä johtuen jäähdytyslevyn koko on huomattavasti suurempi tai jäähdytettävien komponenttien lämpötila korkeampi. Konvektiokertoimen arvo riippuu useista käytettävän materiaalin ominaisuuksista, kuten väliaineen viskositeetista, lämmönjohtavuudesta sekä ominaislämpökapasiteetista. (Terminen Laitesuunnittelu 2010d, 10; Terminen Laitesuunnittelu 2010e, 3.)

Vapaata konvektiota käytetään normaalisti pienitehoisissa alle 50 W:n sovelluksissa. Myös suuritehoisissa sovelluksissa, missä laitteen suuria rakenteita voidaan käyttää lämmön johtumiseen tai tuulettimien käyttö ei ole mahdollista, käytetään vapaata konvektiota. (Wintrich ym. 2011, 304.)

Konvektiokerroin α saadaan laskettua Nusseltin luvun Nu avulla seuraavasti (Terminen Laitesuunnittelu 2010c, 3).

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \rightarrow \alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}, \quad (5)$$

jossa l on kappaleen pituus ja
 λ on lämmönjohtokyky.

Jäähdyttävän aineen virratessa litteän pinnan yli, se on ensin laminaarista, mutta kuljettuaan tietyn etäisyyden se muuttuu turbulenttiseksi. Laminaarinen virtaus on järjestäytyntä ja virtaviivaista, kun turbulenttinen on suunnaltaan hyvin vaihtelevaa ja epäjärjestäytyntä. Reynoldsin luvun Re avulla saadaan määritettyä onko jäähdytettävällä pinnalla laminaarista ($Re < 5 \cdot 10^5$) vai turbulenttista ($5 \cdot 10^5 \leq Re \leq 5 \cdot 10^7$) virtausta seuraavasti. (Terminen Laitesuunnittelu 2010c, 4, 7.)

$$Re = \frac{v_{aine} \cdot l}{v_{kin}}, \quad (6)$$

jossa v_{aine} on aineen virtausnopeus ja
 v_{kin} on virtaavan aineen kinemaattinen viskositeetti.

Tapauksissa, joissa virtaus muuttuu turbulenttiseksi, mutta virtauksen laminaarinen osuus on vielä merkityksellinen, saadaan Nusseltin luku määritettyä litteällä pinnalla seuraavasti (Terminen Laitesuunnittelu 2010c, 6).

$$Nu = \left(0,037 \cdot Re^{\frac{4}{5}} - 871\right) Pr^{\frac{1}{3}}, \quad (7)$$

jossa Pr on Prandtin luku (arvo kaasuille 0,7 ... 1,0)

Konvektiokerroin saadaan täten ratkaistua yhdistämällä kaavat 5, 6 ja 7 seuraavasti.

$$\alpha = \frac{\left(0,037 \cdot \left(\frac{v_{aine} \cdot l}{v_{kin}}\right)^{\frac{4}{5}} - 871\right) Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \lambda}{l} \quad (8)$$

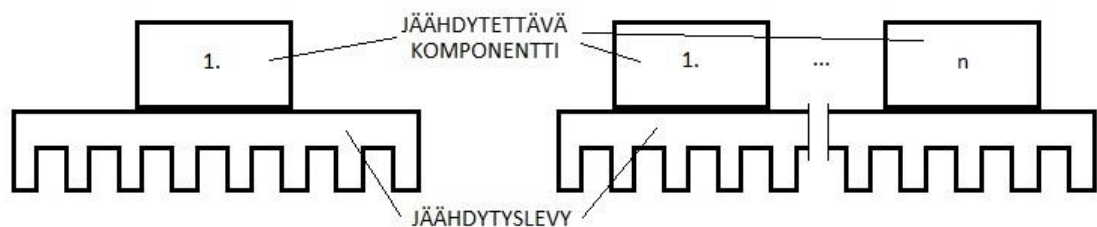
6.4 Tehoelektroniikan lämmönpoisto

Tehoelektroniikan komponentteja käytettäessä tärkeä suunnitteluvaihe komponenttien valinnan jälkeen on jäähdytuselementin mitoitus. Jäähdytuselementin tarkoituksena on johtaa komponentista muodostuva lämpöhäviö mahdollisimman pienellä lämpövastuksella ympäristöön. Yleisesti jäähdytuselementin jäähdytys on toteutettu vapaalla- tai pakotetulla konvektiolla. Tehokkaammissa tehoelektroniikan käytöissä pakotettu konvektio voi olla toteutettu virtaavalla nesteellä.

Komponentin kuormitus johtaa sen sisäisten liitosten lämpötilan kasvuun. Tämä aiheuttaa komponentin kotelon lämpenemistä joka sitoo osan lämmöstä sen kasvaessa. Jos komponentti on liitetty jäähdytinlevyyn, alkaa se komponentin lämpenemisen vaikutuksesta lämmetä ja lämpö alkaa johtumaan ympäröivään ilmaan. Osien lämpötilat jatkavat kasvuaan ja jäähdytys saavuttaa tasapainotilan, kun ympäröivään ilmaan johtuvat lämpöhäviöt ovat samansuuruiset kuin komponentin sisäiset tehohäviöt. Tasapainotilan saavuttaminen siis riippuu jäähdytyksen lämpövastustuksesta komponentin sisäisen liitoksen ja ympäröivään ilmaan johtumisen välillä. (Hughes 2006, 76.)

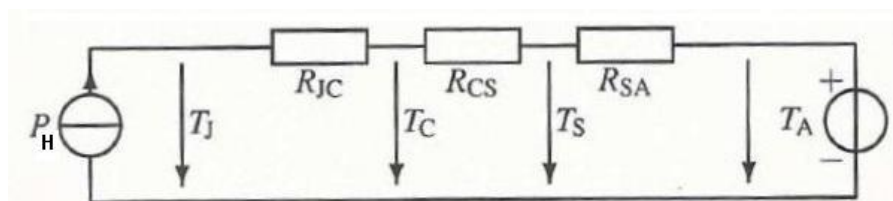
Lämpövastus tarkoittaa kappaleen ominaisuutta johtaa lämpöä. Lämpövastus vakaassa tilassa esitetään lämpötilan kasvuna jokaista lämpöhäviöwattia kohden, °C/W. Haluttaessa jäähdytystehoa lisättävän, täytyy jäähdytyslementtien lämpövastus minimoida. Jäähdytyslementin tehokkuuteen, eli lämpövastuksen pienuuteen vaikuttaa sen materiaali, koko, muoto, asento ja ilmankierron toteutus. (Hughes 2006, 76-77)

Tehoelektronikan komponenttien jäähdytyslevy on joko erillinen komponenttikohtainen tai useammalle komponentille yhteinen jäähdytyslevy. Asia on esitetty kuviossa 8. Komponenttien tarvitsema jäähdytyslementti pitää olla riittävän tehokas jäähdytyksen tasapainotilan saavuttamiseksi. Tasapainotilaan pyrkiminen on tärkeää komponenttien nimellisen tehonkeston saavuttamiseksi.



Kuvio 8. Erillinen komponenttikohtainen sekä useammalle komponentille yhteinen jäähdytyslevy.

Jäähdytyksen mitoituksessa voidaan käyttää virtapiirianalogiasta tuttua mitoitusta, missä lämpötila vastaa jännitettä, häviöteho virtaa ja lämpövastus vastusta (Silvonen 2009, 282; Terminen Laitesuunnittelu 2010a, 1). Lämpövastuksen sijaiskytkentä on esitetty kuviossa 9.



Kuvio 9. Jäähdytyslementin mitoitus virtapiirianalogian perusteella (Silvonen 2009, 282).

Mitoituksen eri kohdista on tällöin määritettävissä eri rajapintojen lämpötilat, kuten liitoksen lämpötila T_J , kotelon lämpötila T_C , jäähdytinlevyn lämpötila T_S sekä ympäröivän ilman lämpötila T_A . Kokonaislämpövastus R_{JA} on kuvion 9 lämpövastusten summa. Komponenteilla ja jäähdytystarvikkeilla yleensä tuotteen valmistaja ilmoittaa kuvion 9 mukaiset lämpövastukset, kuten komponentilla R_{JC} ja jäähdytyslementeillä

R_{SA} . Lämpöresistanssi voidaan antaa myös käyrämuodossa, missä kuvataan suurin sallittu tehohäviö lämpötilan funktiona. (Silvonen 2009, 283)

Vain silloin, kun jäähditys on täydellinen, eli $R_{CA} = 0$, voidaan komponenttia käyttää maksimiteholla. Komponentin kotelon ja jäähdityslevyn välinen lämpövastus R_{CS} on yleensä pieni, luokkaa 0,1 °C/W, piitahnaa käytettäessä vielä vähemmän. Jos komponentin pinta ja jäähdytinlevyn välinen alue täytyy eristää jännitteestä esimerkiksi kiille-eristeellä, se suurentaa pintojen välisen lämpövastuksen moninkertaiseksi. (Silvonen 2009, 283)

Tasaisen jäähdityslevyn lämpövastus R_{SA} saadaan määritettyä käytettävän jäähdityslevyn materiaalin mukaan seuraavasti (Wintrich ym. 2011, 82).

$$R_{SA} = \frac{d}{\lambda \cdot A}, \quad (9)$$

jossa d on materiaalin paksuus ja
 A on pinta-ala.

Kaavasta 9 nähdään, että materiaalin ohuus vaikuttaa suuresti lämpövastukseen. Materiaalin paksuutta ei voida kuitenkaan pienentää kohtuuttomasti rakenteellisten ominaisuuksien takia varsinkin suurten jäähdityslevyjen toimiessa jäähditysominaisuuksiensa lisäksi keskusten rakenteellisina osina.

Lämpövastus voidaan määrittää muodostuneen lämpöhäviön perusteella seuraavasti (Wintrich ym. 2011, 82).

$$R_{CS} = \frac{T_C - T_S}{P_{HC}}, \quad (10)$$

jossa P_{HC} on komponentin kotelon tehohäviö.

Konvektiokertoimen mukaan saadaan lämpövastus määritettyä seuraavasti (Terminen Laitesuunnittelu 2010e, 6).

$$R_{CS} = \frac{1}{\alpha \cdot A} \quad (11)$$

Elektroniikkalaitteiden jäähtyöksessä käytetään usein rivoitettuja jäähtyiselementtejä. Ne ovat kompakteja ja komponentissa syntyvä lämpö johtuu hyvin ympäröivään ilmaan joko vapaan tai pakotetun konvektion avulla. Rivoitetussa pinnassa on suuri lämmönsiirtopinta-ala, mutta rivoituksen liiallinen tihentäminen aiheuttaa virtausvastuksen kasvamisen mikä vaikuttaa lämmönsiirtokertoimen pienentymiseen. Yleisesti tiiviillä rivoituksella olevat jäähtyislevyt soveltuvat vain pakotetun konvektion järjestelmiin. Lämmönsiirron maksimoimiseksi ripojen tiheyden optimaalinen ripajako S_{opt} pystysuorassa asennuksessa vapaalla konvektiolla saadaan laskettua seuraavasti. (Terminen Laitesuunnittelu 2010d, 10-11.)

$$S_{opt} = 2,714 \cdot \frac{l}{Ra^{\frac{1}{4}}} \quad (12)$$

Rayleighin luku määritetään rivoitetulla pinnalla seuraavasti (Terminen Laitesuunnittelu 2010d, 11).

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)l^3}{\nu^2} Pr, \quad (13)$$

jossa g on putoamiskiihtyvyyys ja

β on tilavuuden lämpölaajenemiskerroin.

Optimaalisella ripajaolla konvektiokerroin saadaan seuraavasti (Terminen Laitesuunnittelu 2010d, 11).

$$\alpha = 1,31 \frac{\lambda}{S_{opt}} \quad (14)$$

Jäähtyislevyä mitoitettaessa on pyrittävä hyvään lämmönjohtavuuteen kohtuullisilla työstö- sekä valmistuskustannuksilla. Näiden ominaisuuksien takia alumiini on käytössä suosituin. Vaativissa käytöissä käytetään myös kuparia. Paras tapa pienentää lämpövastusta on kasvattaa jäähtyislevyn rivoituksen pinta-alaa, jäähtyisripojen lukumäärää tai niiden pituutta. (Wintrich ym. 2011, 305.) Yleisimmin käytettyjen jäähtyismateriaalien ominaisuuksia on esitetty taulukossa 2.

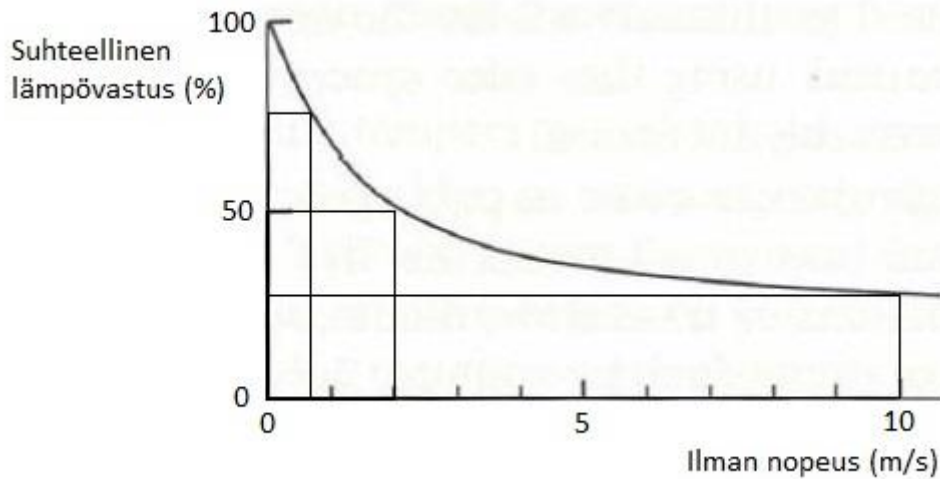
Taulukko 2. Jäähdytysmateriaalien ominaisuuksia. Rauta vertailukohteena. (MAOL taulukot 2005, 72-73)

Materiaali	Lämmönjohtavuus λ [W/(m · K)]	Ominaislämpökapasiteetti c [kJ/(kg · K)]	Tiheys ρ 10 ³ kg/m ³
Rauta (Fe)	80,4	0,450	7,87
Alumiini (Al)	237	0,900	2,70
Kupari (Cu)	400	0,387	8,96

Taulukosta 2 nähdään rautaan verrattuna tehoelektronikan jäähdytykseen käytettyjen materiaalien ominaisuuksia. Alumiinin lämmönjohtavuus on lähes kolminkertainen verrattuna huomattavasti painavampaan rautaan. Kuparin lämmönjohtavuus on parempi kuin alumiinilla, mutta valmistuskustannukset rajaavat sen kustannustehokkaita jäähdytyslementin materiaaleja valittaessa. Kuparia käytetään yksittäisten paljon lämpenevien komponenttien jäähdytykseen kun tilantarve on pieni.

Jäähdytyslevyn tehokkuuteen voidaan vaikuttaa myös asennon ja viimeistelyn avulla. Pystyyn asennetun jäähdytyslevyn jäähdytysteho on 15 - 20 % parempi verrattuna vaakaan asennettuun jäähdytyslevyyn, johtuen luonnollisen konvektion parantumisesta (Silvonen 2009, 282). Jäähdytysprofiilin pinnan musta-anodisoitu viimeistely parantaa säteilyn jäähdytystehokkuutta lämpövastuksen pienentyessä jopa 25 % (Wintrich ym. 2011, 304).

Pakotettu konvektio vaikuttaa suuresti jäähdytinlevyn tehoon. Jo 2 m/s ilman virtauksella saadaan lämpövastus puolitettua verrattuna jäähdytinlevyn vapaaseen konvektioon ja sama lämpötilan kasvu saavutetaan puolta pienemmällä jäähdytysprofiililla (Hughes 2006, 78). Tätä suurempi pakotetun konvektion jäähdytyslevyyn vaikuttava ilmanvirtaus ei vaikuta lämpövastuksen pienemiseen merkittävästi, vaan pakotetun konvektion jäähdytystehon kasvu alkaa vaimentua ilmavirtauksen kasvaessa. Pakotetun konvektion jäähdytysilman virtauksen määrä vaikuttaa jäähdytinlevyn lämpövastukseen kuvion 10 mukaisesti.

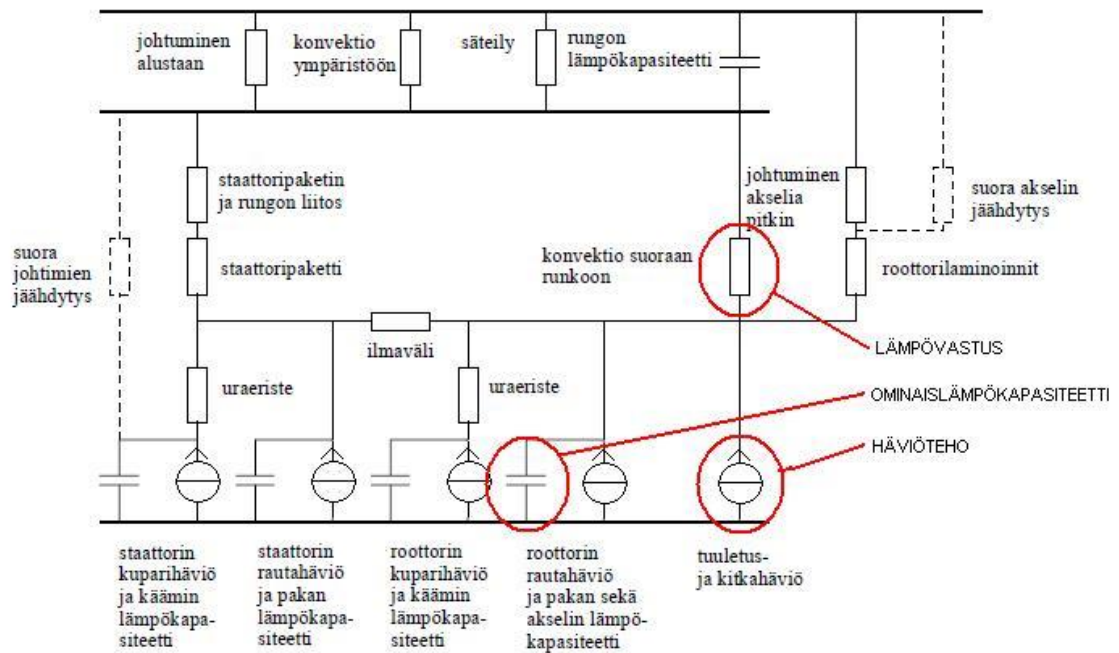


Kuvio 10. Jäähdytysilman virtauksen vaikutus jäähdytyslevyn lämpövastukseen (Hughes 2006, 78. Muokattu)

Ohjauskeskuksen alumiiniprofiilia jäähdytetään osittain vapaalla konvektiolla, mutta tärkeänä osana myös pakotetulla konvektiolla. Sähkögeneraattoriosan akselilla oleva tuuletin aiheuttaa ohjauskeskuksen alumiiniprofiiliin pakotetun konvektion, kun sähkögeneraattoriosan imuilman virtaus on ohjattu suureksi osin profiilin kautta. Ohjauskeskuksen runkona toimivan jäähdytyslevyn rivoitus on vaakaan asennettu, osin sen valmistusmenetelmän sekä sähkögeneraattoriosan tuulettimen aiheuttaman pakotetun konvektion takia.

6.5 Generaattorin lämmönpoisto

Sähkökoneen lämmönpoiston määrittämiseen vaikuttaa moni asia. Koneen sisäinen lämpötilajakauma on hyvä valmistajan pystyä määrittämään koneen toiminnan kannalta. Lämpötilajakauman määrittämiseksi käytetään sähköverkkoanalogiasta hahmoteltua sijaiskytkentää. Lämpötilajakaumassa lämmön syntyä vahvistaa kuormitus-, rauta-, tuuletus- sekä kitkahäviöt. Näitä kuvataan virtalähteinä. Levysydämet, eristykset ja rungon jne. lämpövastukset tuottavat lämpöhäviötä jotka kuvataan resistansseina. Tarvittava lämmönpoisto on näin määritettävissä teoreettisesti, mutta lopullinen riittävä lämmönpoisto varmistetaan aina valmistajan mittauksilla. Sähkökoneen lämpötilajakauman määrittämisen yksinkertainen sijaiskytkentä on esitetty kuviossa 11. (Terminen Laitesuunnittelu 2010e, 5.)



Kuvio 11. Sähkökoneen lämmönsiirron yksinkertainen sijaiskytkentä (Terminen Laitesuunnittelu 2010e, 5. Muokattu).

Vapaan konvektion ja säteilyn maksimitaso lämmön siirtoon sähkökoneen pinnalta 40 °C lämpötilaerolla on noin 800 W/m². Pakotetulla konvektiolla siirrettävän lämpövirran tiheyden maksimi voi nousta arvoon 3000 W/m² ja suoralla nestejäähdytyksellä arvoon 6000 W/m². Tätä suurempaa lämpövirtaa muodostavat koneet joutuvat varastoimaan ylimääräisen lämpöenergian rakenteisiinsa ja menetelmää voidaan käyttää vain lyhytaikaisessa käytössä. (Terminen Laitesuunnittelu 2010e, 4.)

Mikäli nimellismomenttia vaaditaan nimellistä alemmalla pyörimisnopeudella, ei koneen akselille kiinnitetty puhallin riitä tuottamaan riittävän voimakasta pakotettua konvektiota. Oikosulku- ja DC-koneen lämpötehosta suurin osa muodostuu roottorissa joten akselille kiinnitetyn puhaltimen synnyttämä tehokas jäähdytysvirtaus on tärkeä lämmön poistamiseen. Tahti- ja reluktanssikoneissa suurimmat häviöt syntyvät staattorissa ja siksi niiden jäähdytys on periaatteessa helpompi toteuttaa. (Terminen Laitesuunnittelu 2010e, 4-5.)

Sähkökoneen jäähdytysilman tarve Q_{ilma} [m³/s] voidaan arvioida (jäähdytysilman lämpötilan nousulla 9 ... 22 °C) seuraavasti (TTT-käsikirja 2000-07, 13).

$$Q_{ilma} = \frac{(0,1...0,04) \cdot P_H}{1000} \quad (15)$$

Häviöiden siirtyminen on siis verrannollinen generaattorin lämpenevän osan ja ympäröivän ilman lämpötilaeron suuruuteen. Johtuen generaattorin rungon staattorin ja roottorin heikohkosta lämpötilan siirtymisestä sitä ympäröivään ilmaan johtumalla sekä vapaalla konvektiolla, on koneen roottorin akselilla asennettu tuuletin. Normaalilla rakenteella akselin tuuletin puhalttaa ilmaa generaattorin lävitse jäähdyttäen roottoria ja staattorin sisäkehää. Jos kyseessä on suljettu generaattorirakenne, puhallettu ilma johdetaan generaattorin rungon ulkopuolella olevien jäähdytysripojen kautta.

HMGE:n sähkögeneraattoriosan on luokiteltu IEC standardin 60034-1 H-eristysluokan generaattoriksi. Sähkögeneraattoriosan lämmönpoisto toteutuu riittävän tehokkaasti eli eristysluokan H sallittuja suurimpia lämpötiloja ei ylitetä, kun standardin mukaista käyttöympäristön lämpötilaa ei ylitetä nimelliskuormituksella. Sähkögeneraattoriosan jäähdytysteho on tällöin riittävä. Sähkögeneraattoriosan lämmönpoisto on toteutettu pakotetun konvektion lisäksi ulkopinnasta säteilemällä ja vapaalla konvektiolla. Alkuperäisen rakenteen mukaisen 20 kW:n HMGE:n sähkögeneraattoriosan jäähdytysilma ohjataan ohjauskeskuksen jäähdytyslevyn kautta. Tämän lisäksi toiseen d-päässä olevaan sähkögeneraattoriosan ulostuloilman aukkoon on asennettu ilmanohjain, estääkseen ulostuloilman johtuvan takaisin imuilmaan.

7 TYÖN TAVOITTEET

HMGE:n ollessa työkoneen lisälaitteena, täytyy sen kestää paljon käytöstä aiheutuvia kuormituksia ja rasituksia. Muun muassa vaativat työolosuhteet ja pitkät kuormitusjaksot asettavat suuret haasteet työkoneiden lisälaitteiden suunnittelulle. 20 kW:n HMGE:a käytettäessä on havaittu liiallista käytönaikaista lämpenemistä, mikä lopulta johtaa HMGE:n käyttökatkoihin. Pienten (6 ja 10 kW:n) HMGE:iden kohdalla vastaavaa ongelmaa ei ole havaittu.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on löytää ratkaisu 20 kW:n HMGE:n jäähtymisen optimaaliselle toteutukselle. Jäähtymys on optimaalinen silloin, kun nimellisteholla pitkäaikaisesti kuormitettaessa 20 kW:n HMGE:a sen lämpenemä pysyy sallituissa rajoissa eikä siten aiheuta ongelmia laitteen käytön kannalta. HMGE valmistetaan kansainvälisille markkinoille, joten jäähtymisen toteutuksen täytyy toimia vaihtelevissa käyttölämpötiloissa riittävän tehokkaasti.

Työssä suunnitellaan ja toteutetaan HMGE:n lämpenemistä mittaava kuormituskoe. Kuormituskokeen tuloksista pyritään löytämään kohdat, joita kehittämällä voidaan vaikuttaa tehokkaasti lämpenemän pienentämiseen sekä riittävään lämmönpoistoon. Työn lopuksi määritetään teoreettisesti riittävä lämmönpoisto, jonka perusteella laaditaan suunnitelma tarpeellisista rakennemuutoksista HMGE:n tehokkaan jäähtymisen toteuttamiseksi. 20 kW:n HMGE:n rakennemuutosten toteuttaminen ja tuotantoon saattaminen ovat omia prosesseja ja ne eivät sisälly tämän opinnäytetyön toteutukseen.

8 TYÖN TOTEUTUS

Opinnäytetyössä suunniteltiin HMGE:n lämpenemää mittaava kuormituskoe, joka toteutettiin 20 kW:n HMGE:n alkuperäisen rakenteen jäähdytystehon määrittämiseksi. Kuormituskokeen tulosten perusteella määritettiin teoreettisesti lämmönpoiston kehitystarve. Teoreettisen määrityksen pohjalta suunnitellaan 20 kW:n HMGE:n tarvittava ja toteutettava rakennemuutos.

8.1 HMGE:n valmistelu

Työvaihe aloitettiin 20 kW:n HMGE:n prototyypin viimeistelyllä mittauskuntoon. Prototyyppiä oli viimeksi testattu vuonna 2009, eikä senhetkisestä toiminnallisuudesta ollut varmuutta. Oletettavaa oli, että viimeksi konetta kuormitettaessa, sitä ei saatu nimelliskuormalla toimimaan optimaalisella lämpöalueella. Lisäksi mahdollisena pidettiin, että sitä on kuormitettu liikaa, eikä laite siten vastaa enää toiminnallisuudeltaan mitä sen pitäisi.

Näiden asioiden johdosta ohjauskeskuksen ohjauskortit sekä kelakortti vaihdettiin uusiin ja kytkennät tarkastettiin. Ohjauskortit vaihdettiin uusiin myös senkin takia, että prototyypissä kiinni olleet, viimeksi vuonna 2009 käytetyt kortit, olivat jo vanhentunutta mallia ja uusi päivitetty ohjainkortti oli otettu jo käyttöön pienemmissä HMGE malleissa. Hydraulikkamoottoria sekä sähkögeneraattoriosaa ei vaihdettu uusiin silmämääräiseen kuntotarkastukseen perustuen.

Toimenpiteiden jälkeen 20 kW:n HMGE:a koeajettiin sen oikean toiminnan tarkastamiseksi sekä kuormituskokeen suunnittelemiseksi. Koeajon aikana todettiin kokonaisuudessaan 20 kW:n HMGE oikein toimivaksi myös hydraulikkamoottorin ja sähkögeneraattoriosan osalta, eikä käytössä havaittu mitään normaalista toiminnasta poikkeavaa.

8.2 Kuormituskoe

Kuormituskoe suoritettiin Dynaset Oy:n valmistamalla koeajokoneikolla. Koneikko on sähkökäyttöinen hydraulikkaöljyä pumppaava järjestelmä. Koneikosta nähdään kuormituskokeen aikana hydraulikkaöljyn lämpötila, virtausnopeus sekä paine. Koneikolla säädetään hydraulikkaöljyn virtaus jokaiselle testattavalle generaattorille sopivaksi siten, että haluttu sähkögeneraattoriosan tuottama jännite saavutetaan. 20 kW:n HMGE:a käytettäessä haluttu kierrosnopeus on saavutettu, kun sen metallinkeräysmagneetille syöttämä tasajännite on 225 – 230 V. Kaavan 2 mukaan sähkögeneraattoriosan tuoton on tällöin oltava 170 V. Lyhyiden kuormitusjaksojen aikana saadaan HMGE:n ja koneikon oikeanlainen toiminta todettua kuormituskoeita varten. Näiden jälkeen HMGE vastamagnetoidaan ja koneikko jää ajamaan sitä tyhjäkäynnillä muiden mittausvalmistelujen ajaksi.

Kuormituskokeen kuormitusprofiiliksi valittiin IEC 60034-1 standardin mukainen S1 -käyttötavan jatkuvan käytön kuormitus, missä vakiokuorma kytketään päälle kunnes loppulämpötila saavutetaan (TTT-käsikirja 2000-07, 11). Tämä käytötapa valittiin siksi, että näin näemme HMGE:n käyttäytymisen vaativimmassa käytössä, pitkäkestoisessa nimellistehoisessa kuormituksessa.

Kuormituskokeen kestoksi valittiin 20 minuuttia. Kuormituskokeen aikana mittaustulokset kirjataan mittauspöytäkirjaan, mikä on esitetty liitteessä 1. Kuorma kytkettiin ajanhetkellä $t = 0$ min ja poiskytkentä tapahtui ajanhetkellä $t = 20$ min. Kuormituskokeen sähköisten suureiden mittaukset toteutettiin 6 minuutin välein. Ensimmäinen mittaus tapahtui juuri kuorman kytkemisen jälkeen ajanhetkellä $t = 0$ min ja viimeinen, neljäs mittaus ajanhetkellä $t = 18$ min. Koeajokoneikon hydraulikkaöljyn ja sähkögeneraattoriosan imuilman mittaustulokset kirjattiin kolmen minuutin välein.

HMGE:n valittujen kohtien lämpötilojen mittaus aloitettiin ajanhetkellä $t = 0$ min ja mittauksen lopetus tapahtui ajanhetkellä $t = 23$ min. Lämpötilan mittausjakso on pidempi kuin kuormitusjakso siksi, että näin nähdään lämpenemän kehitys kuorman poiskytkennän jälkeen. 20 minuutin kuormituskoe on riittävän pitkäkestoinen HMGE:n eri osien lämpenemän määrittämiseen sekä sen oikeanlaisen toiminnan toteamiseen.

8.2.1 Kuormituskokeen toteutus

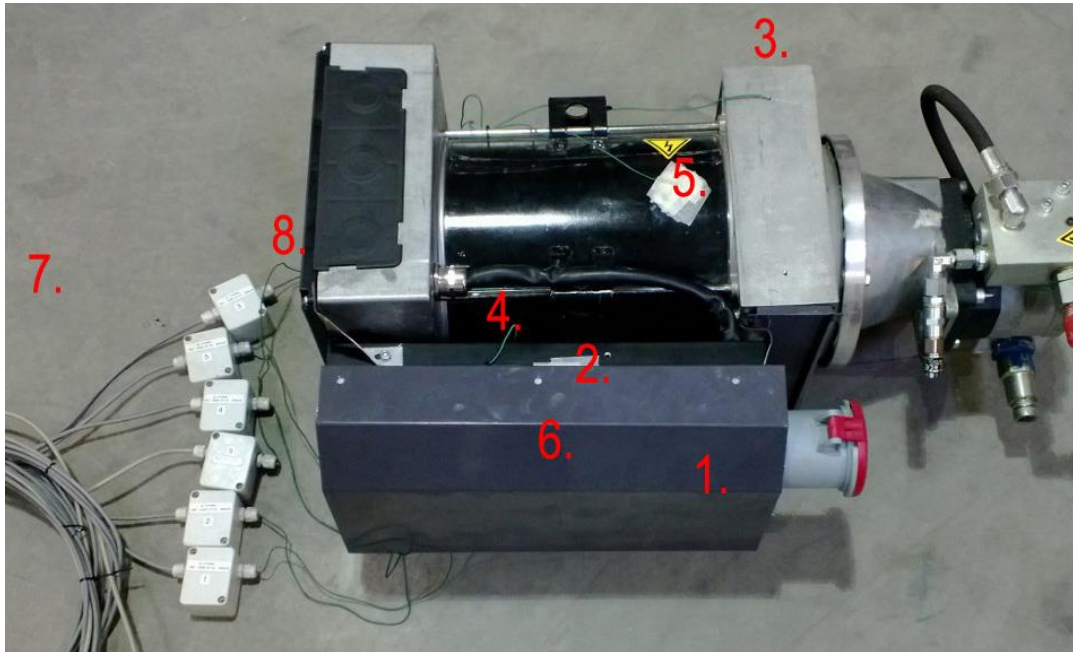
Kuormituskokeessa on käytettävissä 3, 6 ja 9 kW:n metallinkeräysmagneetit. Näillä kuormitetaan 20 kW:n HMGE:a 6, 12 ja 18 kW:n magnetointiteholla. Täten 20 kW:n HMGE:a saadaan kuormitettua 30, 60 ja 90 %:n kuormituksella nimellistehosta. Kuormituskokeessa HMGE:n ohjaus toteutetaan sähköisesti ohjauspainikkeesta päälle / pois. 20 kW:n HMGE:n alkuperäisen rakenteen mukaista toimintaa mitattaessa kuormituskoe suoritettiin jokaisella kolmella tehoalueella nähdäksemme sen toiminnan erisuuruksilla kuormilla. Myöhemmissä kuormituskokeissa, rakenteen eri kehitysversioita testattaessa, kuormitetaan vain 12 kW:n magnetointiteholla, eli 60 % nimellistehosta. Näin toimitaan siksi, että osakuormituksella muutosten vaikutukset on havaittavissa, mutta koeajokoneikkoon ja HMGE:in ei tällöin kohdistu ylimääräistä kuormitusta.

Kuormituskokeessa mittauksista tärkeimpänä on mitata HMGE:n valittujen pisteiden lämpenemistä. Lämpötilojen mittaukseen käytettiin Dynaset Oy:n valmistamaa DynaData-sovellusta, millä pystytään tallentamaan samanaikaisesti kuutta eri anturikanavaa. Sovelluksen mittauskanaviin liitettiin ja ne kalibroitiin K-tyypin lämpöantureille. DynaData-sovellus mittaa mittauspisteiden lämpötilat ajan funktiona halutulla mittaustaajuudella (1 s – 1 ms välein). Sovelluksen mittaustaajuudeksi valittiin 1 mittaustaajuus sekunnissa. Mittauksen jälkeen mittaustuloksista otetaan keskiarvot 50 mittaustaajuuden jaksoista sovelluksen muodostaman kuvaajan paremman havainnollisuuden takia.

8.2.2 Mittauspisteet ja mitattavat suuret

Kuormituskokeen aikana DynaData-sovelluksella mitattiin 20 kW:n HMGE:n lämpötiloja kuudesta valitusta pisteestä. Lämpöanturit sijoitettiin HMGE:n toiminnan kannalta kriittisiin pisteisiin niiden lämpenemän havainnollistamiseksi. Lisäksi kuormituskokeen aikana mitattiin HMGE:n sähköisten suureiden käyttäytymistä kuormitettaessa. Kirjattavien mittaustulosten mittausta ja niiden mittauspöytäkirjaan kirjaus kestää noin minuutin ja 30 sekuntia, jonka aikana ohjauskeskus on avoin sen kannen ollessa pois paikoiltaan.

Aina kuormituskokeen alussa mitattiin ympäröivän ilman lämpötila Fluke 179 – yleismittarilla ja siihen liitetyllä Fluke 80BK K-tyyppin lämpötila-anturilla. Kuormituskokeen aikana edellä mainitulla mittarilla mitattiin sähkögeneraattoriosan imuilman lämpötilaa. Lämpötiloja mitattaessa työssä käytettiin myös Fluke Ti9 - lämpökameraa, millä kuvattiin HMGE:n eri osien lämpenemistä kuormituskokeen aikana. Kuormituskokeen lämpötilojen mittauspisteet on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Kuormituskokeen lämpötilojen mittauspisteet

Kuormituskokeen mittauspisteiden selitteet sekä mittalaitteet ja anturit ovat esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Kuormituskokeen mittauspisteet ja mitattavat suureet.

Mittauspiste ja selite	Suure / Tunnus	Mittalaite	Anturi
1. Kelakortti (n. 2mm käämistä)	T / °C	DynaData	INOR K-tyyppi
2. Ohjauskeskuksen profiili (yläreuna keskellä)	T / °C	DynaData	INOR K-tyyppi
3. Generaattoriosan poistoilma (d-pää)	T / °C	DynaData	INOR K-tyyppi
4. Ohjauskeskuksen profiilin keskellä	T / °C	DynaData	INOR K-tyyppi
5. Generaattoriosan runko (päällä)	T / °C	DynaData	INOR K-tyyppi
6. Ohjauskeskuksen sisäilma (yläreuna)	T / °C	DynaData	INOR K-tyyppi
7. HMGE:n ympäröivä ilma (n-pää, etäisyys 50 cm)	T / °C	Fluke 179	Fluke 80BK (K -tyyppi)
8. Generaattoriosan imuilma (n-pää)	T / °C	Fluke 179	Fluke 80BK (K -tyyppi)
9. Hydraulikkaöljyn lämpötila	T / °C	Koneikko	Lämpöanturi
10. Hydraulikkaöljyn virtaus	Q / lpm	Koneikko	Virtausanturi
11. Hydraulikkaöljyn paine	p / bar	Koneikko	Paineanturi
12. Generaattorin tuottama vaihtojännite	U_{AC} / V	Fluke 179	Fluke mittapiuhat
13. Generaattorin tuottama taajuus	f / Hz	Fluke 179	Fluke mittapiuhat
14. Generaattorin tuottama vaihevirta	I_{AC} / A	Unitest chb 15	Pihtivirtamittari
15. Ohjaukortin (master) tasajännite	U_{DC} / V	Fluke 179	Fluke mittapiuhat
16. Ohjaukortin (master) tasavirta	I_{DC} / A	Unitest chb 15	Pihtivirtamittari
17. Ohjaukortin (slave) tasavirta	I_{DC} / A	Unitest chb 15	Pihtivirtamittari
18. Kelakortilta lähtevä tasavirta	I_{DC} / A	Unitest chb 15	Pihtivirtamittari
19. Kelakortilta lähtevä tasajännite	U_{DC} / V	Fluke 179	Fluke mittapiuhat
Yleismittaukset lämpökameralla kuvattuna	T / °C	Fluke Ti9	Lämpökamera

8.3 Lämpenemä

20 kW:n HMGE:n käytön aikainen lämpenemä määritetään DynaData-sovelluksen lämpötilan mittaustuloksista. Sovelluksen tallentamista mittaustuloksista muodostuu kuvaajat, mistä nähdään kuormituksen aikainen lämpenemä. Kuvaajista saadaan ratkaistua loppulämpenemät ja aikavakiot kaavalla 3. Saatujen lämpenemän tulosten perusteella nähdään kuormitettaessa liikaa lämpenevät kohteet ja ratkaistaan näiden jäähtymisen toteutus liiallisen lämpenemän pienentämiseksi. Lämpenemän tulee olla sähkögeneraattoriosan osalta standardin asettamissa rajoissa. Ohjauskeskuksen lämpenemä määritetään siten, että komponenttien suurin sallittu lämpötila on 100 °C.

8.4 Lämmönpoisto

Hydrauliikkamoottorin käytön aikainen lämmönpoisto toteutuu virtaavan hydrauliikkaöljyn avustuksella, jonka jäähdytys on toteutettu työkoneiden hydrauliikkajärjestelmien omilla jäähdyttimillä. Sähkögeneraattoriosan akselilla olevalla tuulettimella toteutuu sen tarpeellinen lämmönpoisto nimelliskuormituksella standardin mukaisissa lämpötiloissa. Ohjauskeskuksen osalta lämmönpoistoon merkittävimmin vaikuttaa sähkögeneraattoriosan akselilla olevan tuuletin, jonka imuilma on pyritty ohjaamaan lähes kokonaan ohjauskeskuksen jäähdytyslevyn kautta. Pakotetun konvektion lisäksi HMGE jäähtyy myös luonnollisella konvektiolla ja säteilemällä.

HMGE:n rakenteesta nähdään, että sen sähkögeneraattoriosan akselin tuulettimella on tarkoitus toteuttaa koko laitteiston jäähdytys pakotetun konvektion osalta. Sen jäähdytysilma ohjataan n-päähän asennetulla ilmanohjainpellillä ohjauskeskuksen profiilin läpi. Sen lisäksi, että sähkögeneraattoriosan imuilma lämpenee ohjauskeskuksen profiilista, myös sen jäähdytysilman kiertoon vaikutetaan sulkemalla toinen d-pään jäähdytysilman ulostuloaukko lähes kokonaan ilmanohjaimella. D-pään ilmanohjain on lisätty siksi, että lämmin ulostuloilma ei menisi suoraan takaisin imuilmaan. Tästä voidaan päätellä, että kuormitettaessa tehoelektronikan komponentit lämpenevät huomattavasti lämmittäen ohjauskeskuksen profiilia ja näin sähkögeneraattoriosan jäähdytysilmaa. Sähkögeneraattoriosan akselilla olevan tuulettimen muodostaessa pakotetun konvektion generaattorin staattorin ja roottorin lisäksi ohjauskeskuksen jäähdytyslevyyn, on varmistettava sähkögeneraattoriosan sekä ohjauskeskuksen riittävän lämmönpoiston toteutuminen.

9 TULOKSET

9.1 Tulokset alkuperäisellä rakenteella

Alkuperäisen rakenteen mukaisen 20 kW:n HMGE:n kuormituskokeen mittauspöytäkirja on esitetty liitteessä 2. DynaData-sovelluksen mittauspisteiden lämpenemien kuvaajat on esitetty liitteessä 3. Myöhemmin mittautuloksia tutkittaessa viitataan mittautuloksiin 18 kW:n kuormalla.

9.1.1 Lämpenemä

DynaData-sovelluksen muodostamasta lämpenemän kuvaajasta saadaan mittauspisteen lämpenemisaikavakiot ja loppulämpenemät määritettyä kaavan 4 mukaan. Mittauspisteiden 1, 2 ja 3 (Liite 3, kanavat 11, 12, 13) lämpenemisaikavakiot ja loppulämpenemät on esitetty taulukossa 4. Mittauspisteiden 4, 5 ja 6 (Liite 3, kanavat 14, 15 ja 16) lämpenemän kuvaajista ei saada ratkaistua lämpenemisaikavakiota sekä loppulämpenemää yhden aikavakion mallilla, joten niitä arvioidaan sanallisesti.

Taulukko 4. Mittautulokset alkuperäisellä rakenteella 18 kW kuormalla.

Mittauspiste	Lämpenemisaikavakio τ	Loppulämpötila θ_{∞}
1. Kelakortti	13,46 min	140,69 °C
2. Jäähdytyslevyn yläreuna	9,72 min	76,35 °C
3. Generaattorin poistoilma	11,36 min	71,80 °C

Taulukossa 4 esitetyistä loppulämpenemistä huomataan etenkin kelakortin lopullisen lämpötilan nousevan hyvin suureksi. Pitkäkestoisessa kuormituksessa se alkaa lämmittää huomattavasti ohjauskeskuksen sisäilmaa, mikä vaikuttaa suuresti muiden komponenttien käyttöikänsä. Mittauspisteiden 2 ja 3 loppulämpenemä ei ole toiminnan kannalta liian korkealla, mutta lämpenemää pyritään pienentämään luotettavan toiminnan parantamiseksi.

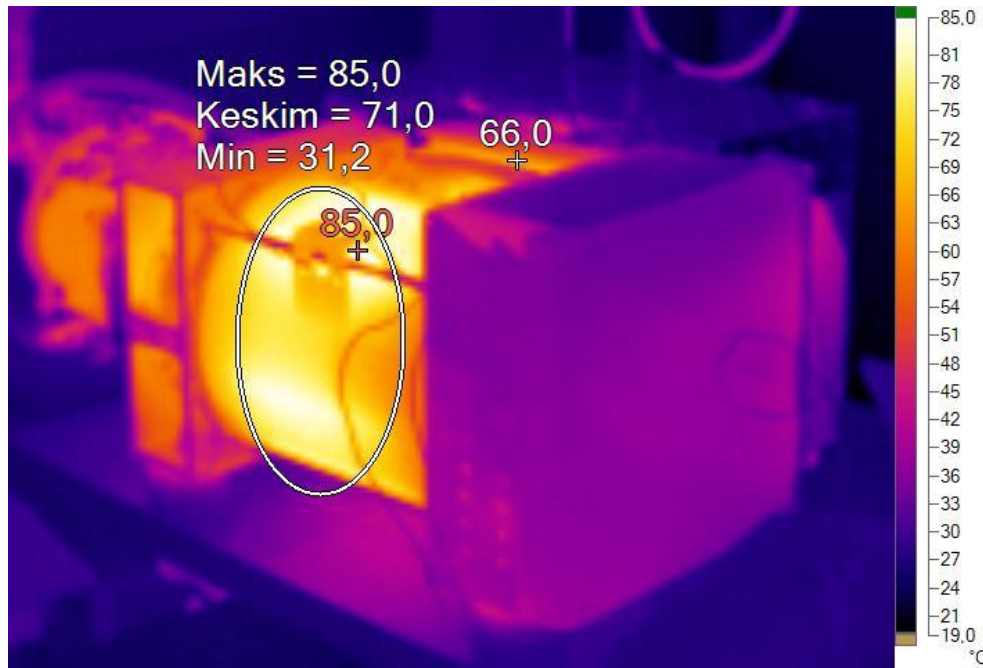
Mittauspisteen 4 jäähdytyslevyn keskeltä mitatusta lämpenemän kuvaajasta (Liite 3, kanava 14) huomataan sen kasvavan portaittain ja kuormituskokeen lopussa olevan lähellä standardin asettamaa suurimman sallitun käyttöympäristön tasoa. Kuvaajan muodosta voidaan päätellä sen kasvavan yli standardin salliman ja täten vaikuttavan sähkögeneraattoriosan liialliseen lämpenemään.

Mittauspisteen 5 sähkögeneraattoriosan rungon päältä mitatusta lämpenemän kuvaajasta (Liite 3, kanava 15) nähdään sen kasvavan lähes lineaarisesti koko 20 minuutin kuormituskokeen ajan, sen pintalämpötilan ollen lopulta yli 69 °C. Lämpenemän kuvaajasta ei voida ratkaista yhden aikavakion mallilla loppulämpenemää, mutta lämpenemän kehityksen perusteella voidaan päätellä generaattorin rungon lämpötilan nousevan yli standardin asettamien rajojen ja siten lämpenevän liikaa kuormitettaessa.

Mittauspisteen 6 ohjauskeskuksen sisäilman lämpenemän kuvaajasta (Liite 3, kanava 16) nähdään sen mittaustuloksen huomattavasti vaihtelevan kuormituskokeen aikana. Tämä johtuu 4 minuutin 30 sekunnin välein tapahtuvista sähköisten suureiden mittauksista, joiden ajaksi ohjauskeskuksen kansi joudutaan avaamaan. Tällöin lämmennyt jäähdytysilma jäähtyy huoneilmaan, eikä lämpenemän mittaustulos ole normaalin käytön mukainen. Voidaan kuitenkin olettaa lämpötilan nousevan kuormitettaessa liikaa, lähinnä mittauspisteen 1 johdosta, vaikuttaen lopulta käyttökatkoihin.

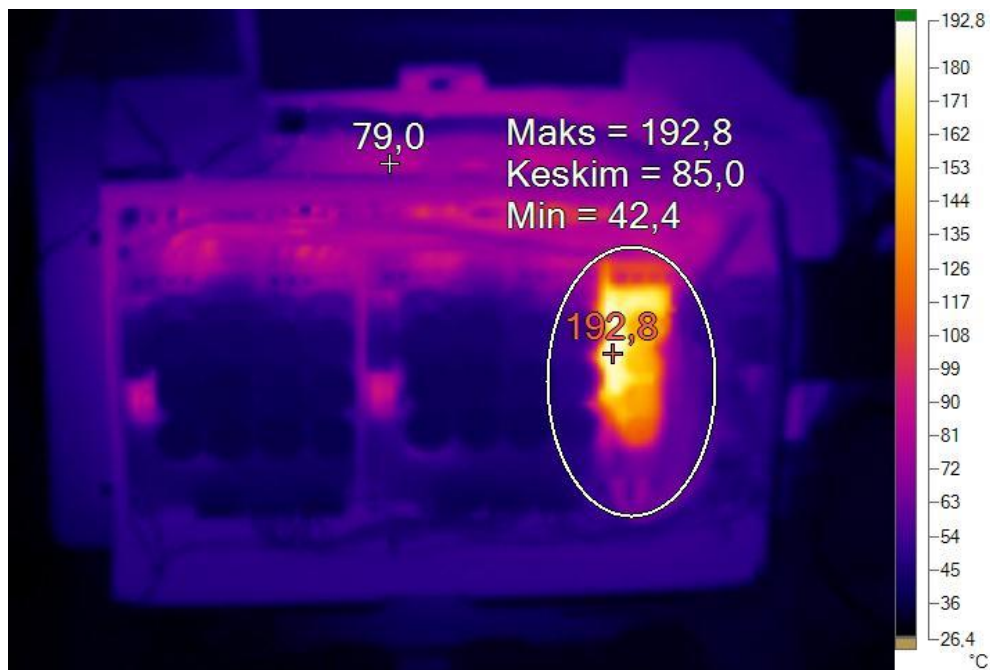
Mittauspöytäkirjasta (Liite 2) huomataan mittauspisteen 7 sähkögeneraattoriosan imuilman lämpötilan olevan 9 minuutin kohdalla jo 40,1 °C ja 18 minuutin kohdalla 44,3 °C. Sähkögeneraattoriosan standardin mukainen käyttölämpötila näin ylitetään jo 9 minuutin kohdalla ja kuormitettavuus ei tällöin ole enää standardin mukainen jatkuvassa käytössä. Imuilman lämpenemiseen vaikuttaa ohjauskeskuksen lämpenemä, jonka jäähdytyslevyn kautta sähkögeneraattoriosan jäähdytysilma ohjataan.

Lämpökamera oli lämpötilaa mitattaessa mittauslaitteista havainnollistavin, koska sillä sai luotua tarkan kuvan tarkasteltavan kohteen lämpötilasta sekä lämpöjakautumasta kuvattavan kohteen pinnalla. Alkuperäisen rakenteen kuormituskokeessa, 90 % nimelliskuormasta kuormitettaessa, lämpökamerakuvat 17 minuutin kohdalla on esitetty kuvassa 4 ja 18 minuutin kuormituksen kohdalla kuvassa 5.



Kuva 4. Sähkögeneraattoriosia. Kuormituskoee 90 % nimelliskuormituksesta, 17 minuutin kohdalla.

Kuvasta 4 nähdään sähkögeneraattoriosia 18 kW:n kuormalla 17 minuutin kuormitusjakson jälkeen, sen pintalämpötilan olevan jopa 85 °C. Ohjauskeskuksen jäähdityslevyn yläpinnan lämpötila on mittaushetkellä 66 °C. Kuvassa 4 oikealla nähdään sähkögeneraattoriosan n-päähän asennettu ilmanohjain ja sen keskilämpötila on noin 40 °C. Tästä voidaan päätellä sähkögeneraattoriosan imuilman lämpötilaksi vähintään 40 °C, sen vaikuttaen eniten ilmanohjaimen pintalämpötilaan.



Kuva 5. Ohjauskeskus. Kuormituskoee 90 % nimelliskuormituksesta, 18 minuutin kohdalla.

Kuvasta 5 nähdään 20 kW:n HMGE:n ohjauskeskus. 18 minuutin kuormitusjakson kohdalla ohjauskeskuksen sisältä otetusta lämpökamerakuvasta huomataan kelakortin käyvän todella kuumana, kuumimman pisteen lämpötilan ollessa 192,8 °C. Kelakortin kelojen käämilangan ollessa H-eristysluokan mukaiset, ylitetään näin niiden osalta standardin sallima kuumimman pisteen lämpötila 180 °C. Todellisessa käytössä, jossa ohjauskeskuksen kansi pysyy suljettuna, on kelakortin lämpenemä vielä suurempaa. Kelakortin kelojen liiallinen lämpeneminen johtaa ohjauskeskuksen sisäilman ja muiden komponenttien lämpenemiseen sekä lopulta ainakin kelakortin tuhoutumiseen. Kuvassa 5 sähkögeneraattoriosan pintalämpötila on noin 80 °C.

9.1.2 Lämmönpoisto

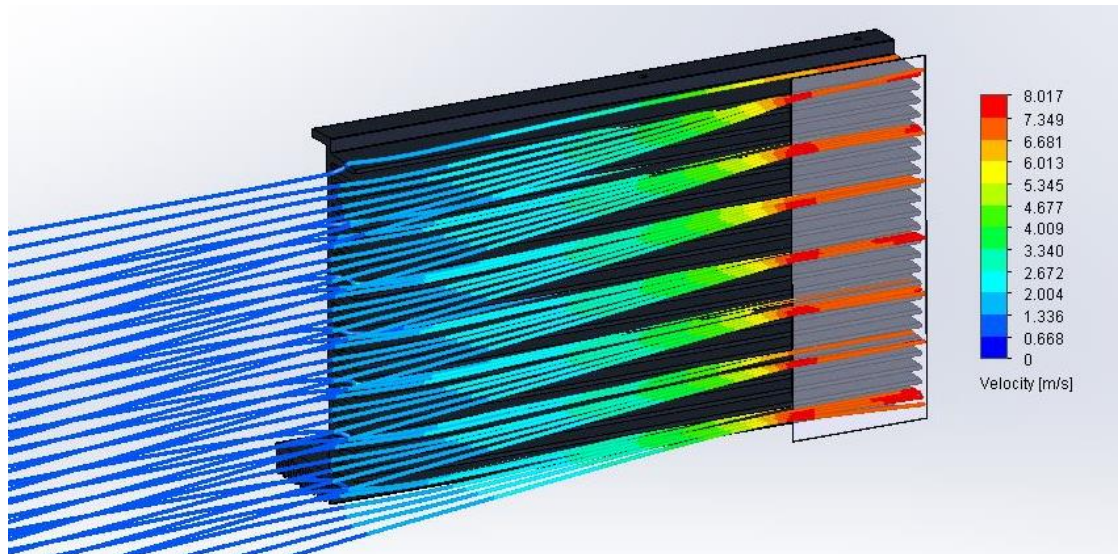
20 kW:n HMGE:n sähkögeneraattoriosia tuottaa 50 Hz taajuudella 230 V vaihejännitteen. Sähkögeneraattoriosan nimellisyörimisnopeus on 1500 r/min, joten generaattori on nelinapainen. Ohjauskeskukselle syötettävä vaihtojännite tulee olla kaavan 2 mukaan 170 V, joten tästä huomataan, että sähkögeneraattoriosaa kuormitetaan alinopeudella halutun jännitteen saamiseksi. Tahtigeneraattorin tuottama jännite ja taajuus kasvavat lineaarisesti nimellisnopeuteen asti. Kuormituskokeen mittaustuloksista (Liite 2) nähdään sähkögeneraattoriosan tuottaman taajuuden 90 % nimelliskuormalla olevan 38 Hz. Sähkögeneraattoriosan pyörintänopeus on kaavan 1 mukaan 1140 r/min.

Sähkögeneraattoriosan tuuletin tuottaa nimellisyörimisnopeudellaan 4,5 m³/min puhallustehon. HMGE:n n-päähän asennetun ilmanohjaimen ilmanottoon muodostuu täten 4,9 m/s ilmavirtaus. Mallintamisessa täytyy ottaa huomioon sähkögeneraattorin n-, ja d-päähän asennetut ilmanohjaimet, mitkä ahdistavat ilmavirtausta sähkögeneraattoriosan läpi. Tuulettimen tuoton ollessa sen pyörimisnopeuteen nähden neliöllinen, tuulettimen tuotto putoaa tällöin nimellisestä seuraavasti.

$$v_{ilma} = \left(\frac{1140 \text{ r/min}}{1500 \text{ r/min}} \right)^2 \cdot 4,9 \text{ m/s} = 2,8 \text{ m/s}$$

Kuvion 10 mukaan tällaisella ilmavirtauksella jäähdytyslevyn lämpövastus on 10 % suurempi nimellisyörimisnopeuden tuottamaan ilmavirtaukseen verrattuna.

Alkuperäisen rakenteen mukainen jäähdytysilmanvirtaus mallinnettiin Solid Works -ohjelmalla, josta nähdään alkuperäisen rakenteen mukaisen ilmavirtauksen vaikutus jäähdytysprofiiliin. Jäähdytysilmanvirtauksen mallinnus on esitetty kuviossa 12.



Kuvio 12. Mallinnettu alkuperäinen jäähdytysilmanvirtaus jäähdytyslevyllä (Dynaset Arkisto).

Kuviosta 12 nähdään jäähdytyslevyyn aiheutuvan pakotetun konvektion ilmavirtauksen nopeudeksi sähkögeneraattoriosan päässä jopa 8 m/s. Kuviosta 12 nähdään kuitenkin alkuperäisen rakenteen takia jäähdytysilmanvirtauksen ohjautuvan täysin jäähdytyslevyn rivoituksen läpi vasta jäähdytyslevyn lopussa, kuvion 12 oikeassa laidassa. Määrittämisessä on käytettävä koko jäähdytyslevyn alueen keskimääräistä ilmavirtausta, joten kuviosta 12 voidaan arvioida ilmavirtauksen olevan enintään 1,3 m/s koko rivoituksen matkalla. Kuvion 10 mukaan näin sähkögeneraattoriosan akselilla olevalla tuulettimella toteutettu pakotettu konvektio pienentää jäähdytyslevyn lämpövastusta noin 30 % vapaaseen konvektioon verrattuna.

9.2 Teoreettiset muutokset

Alkuperäisellä rakenteella suoritetusta kuormituskokeesta nähdään selvästi 20 kW:n HMGE:n lämpenevän käytössä liikaa. Kuormituskokeen mittaustulosten (Liite 2) ja mittauspisteiden lämpenemän kuvaajien (Liite 3) perusteella joudutaan 20 kW:n HMGE:n rakennemuutoksiin vaikuttamaan siten, että kelakortin, ohjauskeskuksen ja sähkögeneraattoriosan lämpenemää täytyy pienentää sekä sähkögeneraattoriosan imuilman lämpötilaa laskea luotettavan toiminnan takaamiseksi.

Sähkögeneraattoriosan liiallisen lämpenemän eliminoimiseksi ohjauskeskuksen jäähditys tullaan toteuttamaan erillisin tuulettimin. Tällä saavutetaan alhaisempi sähkögeneraattoriosan jäähdytysilma ja vapaampi ilmankierto, kun ilmanohjaimet voidaan poistaa käytöstä.

Tarpeellisen lämmönpoiston toteuttava jäähdytysteho määritettiin saatujen tehohäviöiden mukaan. Käytön aikana muodostuvien lämpöhäviöiden siirtoon tarvittava jäähdytysteho määritettiin kaavoilla 10, 11 ja 12. Määritettäessä mitoitettiin tarvittavan jäähdytyslevylle tarvittava jäähdytysteho pakotettua konvektiota jäähdystapana käyttäen. Näin määritetyn jäähdytyslevyn jäähdytystehokkuus riittää 20 kW:n HMGE:n ohjauskeskuksessa muodostuvan lämmön poistoon ja estämään sen liiallinen käytönaikainen lämpenemä.

Ohjauskeskuksessa muodostuvan lämpötehon mukaan määritetään sen jäähdytyslevyn jäähdytystehokkuus ja jäähdytystarve. Ensin määritetään komponenttien käytönaikainen lämpenemä. Taulukosta 1 ilmoitettujen IGBT -asteen, tasasuuntauksen ja käyttöjännitereguloinnin lämpötehoksi muodostunut tehohäviö nimellisteholla täytyy pystyä johtamaan ohjauskeskuksen jäähdytinlevyyn.

Komponenttien lämmönpoisto tapahtuu johtamalla ohjauskortin alumiiniseen pohjalevyyn siten, että tasasuuntauksen komponentit ovat asennettu suoraan ohjauskortin pohjalevyyn lämmönjohtumisen maksimoinnin takia. Tasasuuntauksen suuremman fyysisen koon takia IGBT -asteen ja käyttöjännitereguloinnin lämmönjohtumista ohjauskortin alumiiniseen pohjalevyyn on jouduttu parantamaan alumiinista valmistetuilla korotuspaloilla. Tämä on esitetty kuviossa 7.

Komponenttien kotelon maksimilämpötilaksi on asetettu $T_{C \max} = 100 \text{ °C}$. Suurimman sallitun käyttölämpötilan ollessa $T_{A \max} = 40 \text{ °C}$ jäähdytyksen kokonaislämpötilaeroksi saadaan $\Delta T_{CA \max} = 60 \text{ °C}$. Tämä on suurin sallittu lämpötilaero lämpötehon siirtymiseen komponentin pinnalta ympäröivään ilmaan. Tällöin saavutetaan tilanne, milloin jäähditys toimii juuri riittävän tehokkaasti.

Aluksi lasketaan komponenttien johtama lämpenemä jäähdytyslevyn sisäpintaan. IGBT -asteen kokonaislämpövastus $R_{CS \text{ IGBT}}$ muodostuu korotuspalan R_{k1} , pohjalevyn alueen

$R_{pl\ IGBT}$ ja kolmesta näiden välisten piitahnakerrosten R_P ($R_{C\ IGBT} - R_{k1}$, $R_{k1} - R_{pl\ IGBT}$ sekä $R_{pl\ IGBT} - R_{S\ IGBT}$) lämpövastusten summasta. Liitospinnoissa on käytetty piitahnaa paremman lämmönjohtavuuden varmistamiseksi. Koska ei ole tarkkaa tietoa kuinka paljon pienempi todellisuudessa piitahnaa käytettäessä pintojen välinen lämpövastus on, käytetään määrittämisessä pintojen väliselle lämpövastukselle samaa arvoa kuin ilman piitahnaa $R_P = 0,1\ \text{°C/W}$ siksi, että näin haluttu lämmönpoisto saavutetaan varmasti.

IGBT -asteen alumiinisen korotuspalan lämpövastukseksi saadaan kaavan 9 mukaan seuraavasti.

$$R_{k1} = \frac{0,0025m}{237\frac{W}{\text{°C}\cdot m} \cdot 0,0074m^2} = 0,00143\ \text{°C/W}$$

IGBT -asteen muodostama lämpöhäviö johtuu vain ohjauskortin pohjalevyn kuviossa 7 osoitettuun osaan ja sen lämpövastukseksi saadaan kaavan 9 mukaan seuraavasti.

$$R_{pl\ IGBT} = \frac{0,004m}{237\frac{W}{\text{°C}\cdot m} \cdot 0,014m^2} = 0,00121\ \text{°C/W}$$

IGBT asteen kokonaislämpövastukseksi saadaan seuraavasti.

$$R_{CS\ IGBT} = R_{k1} + R_{pl\ IGBT} + 3 \cdot R_P = 0,30249\ \text{°C/W}$$

Kokonaislämpövastuksen mukaan saadaan määritettyä komponentin kotelon ja jäähdytyslevyn sisäpinnan lämpötilaeroksi $\Delta T_{CS\ IGBT}$ kaavan 10 mukaan seuraavasti.

$$\Delta T_{CS\ IGBT} = P_{H\ IGBT} \cdot R_{CS\ IGBT} = 160\ W \cdot 0,30249\ \text{°C/W} = 48,40\ \text{°C}$$

Kaikkien ohjauskortin pohjaan johtuvien tehohäviöiden lämpövastus ja lämpötilaero on ilmoitettu taulukossa 5.

Taulukko 5. Ohjaukortin lämpötehon siirtyminen

Komponentti	lämpövastus °C/W	lämpötilaero °C
IGBT -aste (160 W)	$R_{CS\ IGBT} = 0,30249$	$\Delta T_{CS\ IGBT} = 48,40$
Käyttöjänniteregulointi (9 W)	$R_{CS\ kjr} = 0,30489$	$\Delta T_{CS\ kjr} = 2,74$
Tasasuuntaussillat (80 W)	$R_{CS\ tss} = 0,10261$	$\Delta T_{CS\ tss} = 16,21$
Piitahna kerros	$R_P = 0,1$	-

Taulukosta 5 huomataan käyttöjännitereguloinnin ja tasasuuntaussiltojen lämpenemän olevan huomattavasti IGBT -astetta pienempiä. Tämän perusteella voidaan olettaa lämpötilojen jakautuvan tasaisesti siten, että ohjaukortin pohjalevyyn johtama suurin lämpöhäviö on IGBT -asteen lämpöhäviö joka on myös pohjalevyn suurin muodostunut lämpötilaero. Jäähdytyslevyn suurin sallittu lämpötilaero $\Delta T_{SA\ max}$ saadaan tämän perusteella seuraavasti.

$$\Delta T_{SA\ max} = T_{C\ max} - T_{S\ max} - T_{A\ max} = 100^{\circ}\text{C} - 48,40^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C} = 11,6^{\circ}\text{C}$$

Yhden ohjaukortin muodostaman tehohäviön (267 W) osuus koko ohjauskeskuksen tehohäviöstä (554 W) on 48,19 %. Tämän perusteella ohjaukortin muodostama tehohäviö on pystyttävä siirtämään ohjauskeskuksen jäähdytyslevyn 48,19 % osuudella sen kokonaispinta-alasta. Osuudesta muodostuvaa kerrointa 0,4819 käytetään pituuden kertoimena jäähdytyslevyn jäähdytystehokkuuden määrittämisessä.

Seuraavaksi määritetään käytettävän jäähdytyslevyn lämpövastus R_{SA} . Jäähdytyslevyn ollessa rivoitettu, määritetään pystysuoraan asennetun vapaalla konvektiolla jäähdytetyn jäähdytysseinän konvektiokerroin kaavalla 14. Kaavaan 14 sijoitetaan optimaalisen ripävälän kaava 12 sekä Rayleighn luvun ratkaisu rivoitetulla jäähdytyslevyllä kaava 13 seuraavasti.

$$\alpha = 1,31 \cdot \frac{\lambda}{2,714 \cdot \frac{l}{\left(\frac{g\beta(T_s - T_{\infty})l^3}{\nu^2} Pr\right)^{\frac{1}{4}}}} = 1,31 \cdot \frac{237 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}}{0,42m \cdot 0,4819} = 49,35 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}$$

$$\left(\frac{9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{1}{40^{\circ}C} \cdot 11,6^{\circ}C \cdot (0,42 \cdot 0,4819)^3}{(17,4 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 1\right)^{\frac{1}{4}}$$

Jäähdytyslevyn ollessa asennettuna vaakatasoon muuttuu lämpövastus kertoimen 0,8 mukaan ja pinta-alan kertoimena käytetään 0,4819. Jäähdytyslevyn konvektiokerroimesta saadaan sen lämpövastus kaavalla 11 seuraavasti:

$$R_{SA} = 0,8 \cdot \frac{1}{\alpha \cdot 0,4819 \cdot A} = 0,8 \cdot \frac{1}{49,35 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \cdot 0,4819 \cdot 0,7 m^2} = 0,07548 \text{ } ^\circ C/W$$

Ohjaukskortin pohjaan muodostaman lämpötehon ollessa $P_{Hok} = 267 \text{ W}$ ja suurimman sallitun jäähdytyslevyn lämpenemän $\Delta T_{SA \text{ max}} = 11,6 \text{ } ^\circ C$, saadaan suurimmaksi sallituksi jäähdytyslevyn lämpövastukseksi $R_{SA \text{ max}}$ kaavan 10 mukaan:

$$R_{SA \text{ max}} = \frac{\Delta T_{SA \text{ max}}}{P_{Hok}} = \frac{11,6 \text{ } ^\circ C}{267 \text{ W}} = 0,04345 \frac{^\circ C}{W}$$

Tuloksesta huomataan, että vapaalla konvektiolla jäähdytetyn ohjauskeskuksen jäähdytyslevyn lämpövastusta on pienennettävä 42,4 %. Riittävä jäähdytyslevyn lämmönpoisto saavutetaan varmasti kun sen lämpövastusta pienennetään 50 %. Kuviosta 10 nähdään jo 2 m/s ilmavirtauksella rivoitetun jäähdytyslevyn lämpövastuksen pienenevän 50 %. Lisäksi täytyy huomioida käyttöolosuhteiden mukaiset likaiset ja pölyiset käyttöympäristöt. Näiden perusteella ohjauskeskuksen jäähdytyslevyyn rivoitettuun osaan tullaan muodostamaan pakotettu konvektio siten, että sen ilmanvirtauksen nopeus on vähintään 3 m/s.

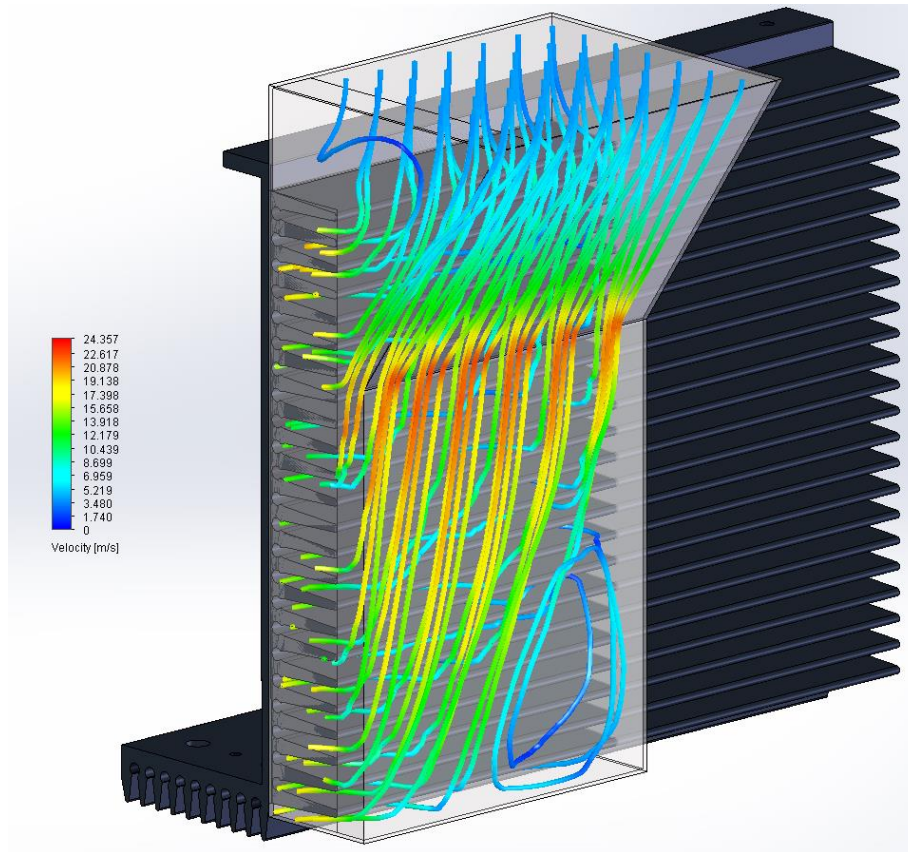
9.3 Rakenteelliset muutokset

Sähkögeneraattoriosan alkuperäiseen rakenteeseen tehdään seuraavat muutokset:

- N-pään ilmanohjainpelti poistetaan käytöstä sähkögeneraattoriosan ilmankierron parantamiseksi.
- D-päässä ohjauskeskuksen puolella oleva ilmanohjainpelti poistetaan käytöstä sähkögeneraattoriosan ilmankierron parantamiseksi.
- Sähkögeneraattoriosaksi vaihdetaan 50 Hz taajuudella 170 V tuottava generaattori. Tällöin generaattori tuottaa 20 kW:n HMGE:n tarvittavan jännitteen nimellispyörimisnopeudellaan ja generaattorin jäähdytys saadaan toimimaan riittävän tehokkaasti.

Ohjauskeskuksen jäähdytys toteutetaan laitetuulettimien (2 kpl) muodostamalla pakotetulla konvektiolla. Tilankäytön minimoimiseksi laitetuulettimet asennetaan HMGE:n päälle sähkögeneraattoriosan ja ohjauskeskuksen väliin asennettavaan

ilmanohjaimeen. Ilmanohjaimen mittakuva on esitetty liitteessä 4. Laitetuulettimen tekniset tiedot on esitetty liitteessä 5. Ohjauskeskuksen ilmavirtaus laitetuulettimien tuoton mukaan on mallinnettu Solid Works -ohjelmalla luodulla ilmanohjaimen mallilla ja se on esitetty kuviossa 13. Kuvioista 13 nähdään laitetuulettimien aiheuttama ilmavirtaus jäähdytyslevyn rivoitetulla osalla, joka on vähintään 5 m/s.



Kuvio 13. Rakennemuutoksen jälkeinen ilmavirtauksen mallinnus ohjauskeskuksen jäähdytysprofiiliin.

Näiden muutosten lisäksi ohjauskeskuksen asennuksissa on käytettävä symmetristä kaapelointia ohjauskorttien kesken. Tällä vaikutetaan pääsääntöisesti kelakortin päästöjännitteen hajontaan ja sen kuormitusasteen pienentämiseen. Rakennemuutosten suorittamisen jälkeen toteutettavassa kuormituskokeessa nähdään pieneneekö kelakortin käytönaikainen lämpenemä riittävästi vai tarvitseeko kelakortin komponentteja muuttaa muodostuvan häviötehon pienentämiseksi.

10 POHDINTA

20 kW:n HMGE:n ohjauskeskuksen tehohäviöiden muodostama lämpenemä on liian suuri jäädytettäväksi täysin vapaalla konvektiolla. Sähkögeneraattoriosan tuulettimen aiheuttama pakotettu konvektio ei riitä jäädyttämään generaattorin lisäksi vielä ohjauskeskusta. Jos sähkögeneraattoriosan jäähdytysilma ohjataan ensin ohjauskeskuksen läpi ja sitten vasta sähkögeneraattoriosan läpi, se aiheuttaa sähkögeneraattoriosan liiallista lämpenemää. Toisaalta jos sähkögeneraattorin jäähdytysilma ohjataan ohjauskeskuksen jäähdytyslevylle vasta sähkögeneraattoriosan jälkeen, jäähdytysilma on lämmennyt liikaa eikä sen ilmavirtaus silloin riitä jäädyttämään ohjauskeskusta.

Kuormituskokeessa havainnollistettiin HMGE:n käytönaikaista lämpenemistä selkeästi ja tuloksista nähtiin, että mittauksen toteutus ja mittausvälineiden valinta oli onnistunut. Kuormituskokeen tulokset olivat yhdenmukaisia ja niistä nähdään selvästi minkä osien lämpenemä on liian suurta ja mihin komponentteihin tai rakennekohtiin suunnittelussa täytyy keskittyä.

Lämpökameran käyttö oli tärkeä lisä kuormituskokeen aikana. Sitä käytettäessä huomattiin, että DynaData-sovellukselle valitut lämpötilojen mittauspisteet eivät olleet mitattavan kohteen eniten lämpeneviä kohtia. Lisäksi lämpökameralla nähtiin kokonaisvaltaisesti HMGE:n käytönaikainen lämpenemä ja sillä pystyttiin helposti etsimään kuumimmat pisteet ja ongelmakohdat. Esimerkkinä DynaData-sovelluksen yhdeksi mittauspisteeksi oli valittu ohjauskeskuksen kelakortin lämpötilan mittaus, jonka tulokseksi saatiin hieman yli 110 °C kuormituskokeen lopussa. Lämpökameralla mitattaessa vastaavalla hetkellä kelakortin pinnan saman kohdan lämpötilaksi saatiin yli 180 °C kelakortin kelan kuumimman pisteen pintalämpötilan ollessa jopa 192,8 °C. Mittaustuloksen ero selittyy pääosin sillä, että lämpökamera mittaa pinnan lämpösäteilyä, kun sovelluksen käyttämä K-tyypin lämpötila-anturi mittaa puolestaan ilman lämpötilaa mittauspisteen lähellä. DynaData-sovelluksen mittaustulokseen vaikuttaa näin ollen osaltaan myös ohjauskeskuksen avaamisesta johtuva ohjauskeskuksen sisäilman jäähtyminen. Kannen avaaminen vaikutti siten myös suuresti sisäilman lämpötilan mittaustulokseen, mistä johtuen sisäilman tarkkaa lämpenemää ei saatu määritettyä.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli ratkaista 20 kW:n HMGE:n käytönaikaisen liiallisen lämpenemän aiheuttavat ongelmat ja suunnitella rakennemuutos siten, että laitetta voidaan käyttää huolelta standardin asettamissa rajoissa maailmanlaajuisesti. Työssä ratkaistiin tarvittavat rakennemuutokset liiallisen lämpenemisen poistamiseksi, jonka lisäksi määritettiin ja suunniteltiin HMGE:n kuormituksen aikaisen jäädytystehon tarve. Mielestäni työn toteutus oli erittäin onnistunut tuotekehityksellisesti, sillä työn aikana huomattiin lisäksi asioita, joiden avulla pystytään kehittämään laitetta myös muilta osin paremmaksi ja luotettavammaksi asiakkaiden käyttöön.

LÄHTEET

Aura, L. & Tonteri, A. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. 1. painos. Porvoo: WSOY.

Aura, L. & Tonteri, A. 2009. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. 3.-6. painos. Porvoo: WSOYpro.

Bose, B. 2006. Power Electronics and Motor Drives. Advances and Trends. Yhdysvallat: Academic Press.

Brown, M. 2010. Power Electronics in Motor Drives. Principles, Application and design. Iso-Britannia: Elektro International Media BV.

Dynaset Arkisto.

Hietalahti, L. 2011a. Muuntajat ja Sähkökoneet. 1. painos. Vantaa: Tammertekniikka.

Hietalahti, L. 2011b. Tehoelektroniikan perusteet. 1. painos. Vantaa: Tammertekniikka.

HMGE. 2010. Hydraulic Magnet Generators. Instructions. Dynaset Oy.

Hughes, A. 2006. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications. 3. painos. Iso-Britannia: Nevnes.

Patentti 20080192, Magneettinostin. Luettu 15.2.2013.

<http://patent.prh.fi/patinfo/default2.asp>

Searle, D. 2002. Guide to European electric motors. Drives and controls. 2. painos. Iso-Britannia: Professional Engineering Publishing.

Seppänen, R., Kervinen, M., Parkkila, I., Karkela, L. & Meriläinen, P. 2006 Maol taulukot. 2. painos. Keuruu: Otava

Silvonen, K. 2009. Elektroniikka ja puolijohdekomponentit. Helsinki: Otatieto.

Terminen Laitesuunnittelu. 2010a. Elektroniikkalaitteiden koostumus. LUT Energia. Luettu 20.03.2013.

https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0100/luennot/luento_4.pdf

Terminen Laitesuunnittelu. 2010b. Ilmajäähdytys vapaalla konvektiolla ja säteilemällä. LUT Energia. Luettu 20.03.2013.

https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0100/luennot/luento_5.pdf

Terminen Laitesuunnittelu. 2010c. Johdanto. LUT Energia. Luettu 20.03.2013.

https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0100/luennot/luento_1.pdf

Terminen Laitesuunnittelu. 2010d. Konvektio. LUT Energia. Luettu 20.03.2013.

https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0100/luennot/luento_2.pdf

Terminen Laitesuunnittelu. 2010e. Pyörivän sähkökoneen jäähdytys. LUT Energia. Luettu 20.03.2013.

https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0100/luennot/luento_7.pdf

Terminen Laitesuunnittelu. 2010f. Säteily. LUT Energia. Luettu 20.03.2013.

https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0100/luennot/luento_3.pdf

TTT-käsikirja 2000-07, Luku 17. ABB. Luettu 19.01.2013.

<http://cna.mikkeli.ammk.fi/Public/JormPekk/ABB/TTT-KIRJA%202000/MOOTTORIT%20JA%20GENERAATTORIT.pdf>

Wintrich, A., Nicolai, U., Tursky, W. & Reimann, T. 2011. Application Manual Power Semiconductors. Saksa: Semikron International GMBH.

Liite 2. Alkuperäisen rakenteen mittauspöytäkirja

HMGE 20kW

MITTAUS 1 HUOM: Alkuperäinen rakenne
 PVM 5.2.2013 Fluke 179 T, U, f Unitest chb15 A
 koneikko tyhjäkäynti 44 l/min, 79 bar, 29 °C

Kuorma 6 kw Lämpötila 26,1

t/min	Imuilma		Koneikko		AC	AC	AC	DC	DC, M	DC, S	DC, coil	DC, coil
	T/°C	T/°C	Q/lpm	P/bar	U/V	f/Hz	I/A	U/V	I/A	I/A	I/A	U/V
0	26,9	44	77,9	79	178,2	41,7	9,9	229,3	12,7	13,3	25,4	229
3	28,1	47	78	77								
6	28,6	49	78,2	74	177,8	41,8	9,4	229,3	11,7	12,4	24	229,1
9	28,8	49	78,3	74								
12	29,3	49	78,2	73	177,3	41,8	9,11	229,7	11,4	11,9	22,3	229,5
15	29,7	50	78,3	71								
18	30,2	51	78,4	71	177,8	41,8	8,76	230,2	10,6	11,3	22	230,5

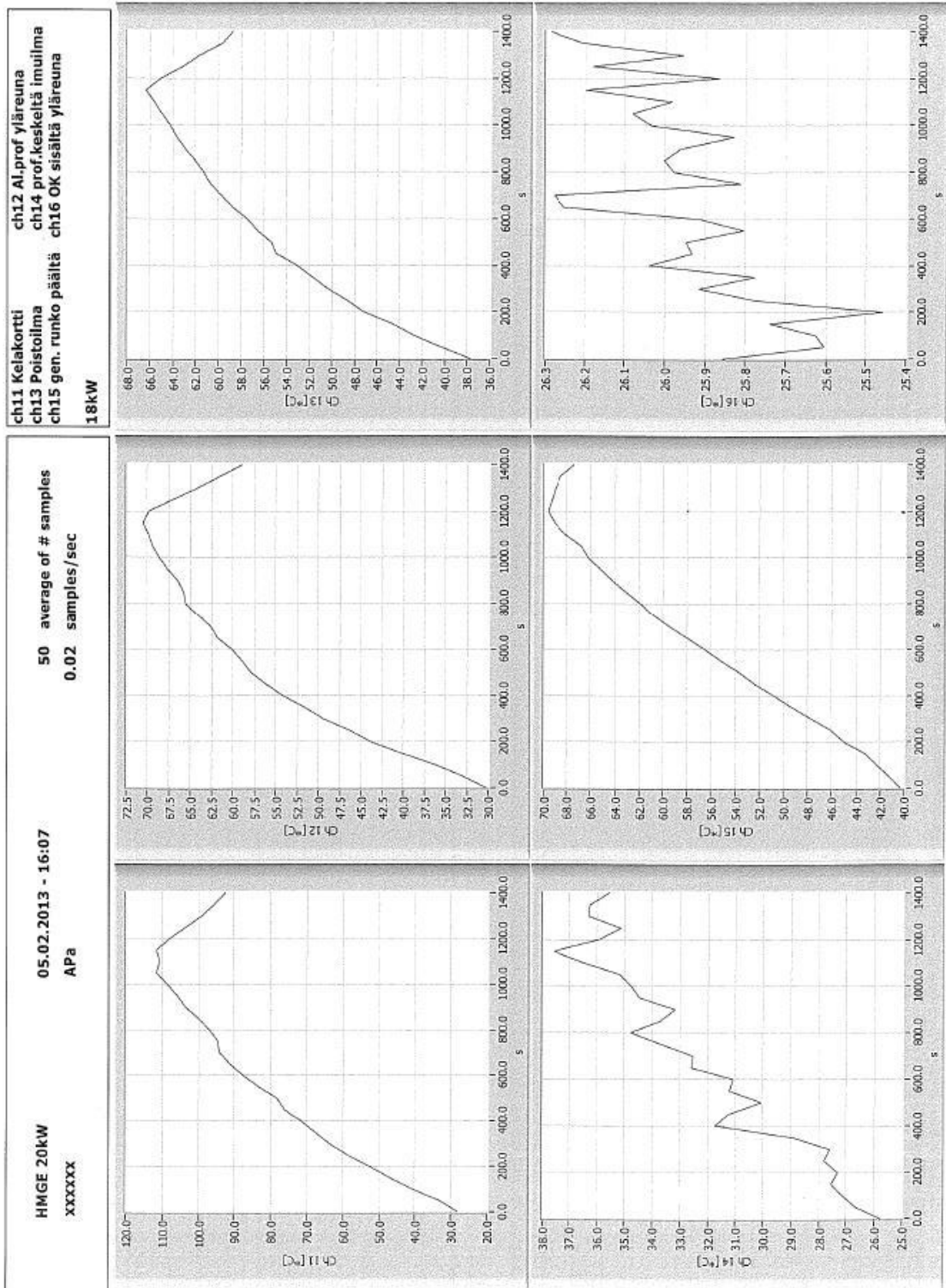
Kuorma 12 kw Lämpötila 25,1

t/min	Imuilma		Koneikko		AC	AC	AC	DC	DC, M	DC, S	DC, coil	DC, coil
	T/°C	T/°C	Q/lpm	P/bar	U/V	f/Hz	I/A	U/V	I/A	I/A	I/A	U/V
0	28	41	73,9	164	180	39	24,7	225,2	30,5	31,8	62,3	224,1
3	30,2	44	74	161								
6	31,8	47	73,9	152	175,4	38,9	22,9	220,3	28,4	29,8	58	219,6
9	33,4	50	74	149								
12	34,5	52	74	145	173,5	38,8	21,75	218,6	27	28,3	55,1	218
15	35,5	53	74,1	142								
18	36,3	54	74,1	140	172,6	38,9	20,9	217,6	26	27,2	52,9	216,5

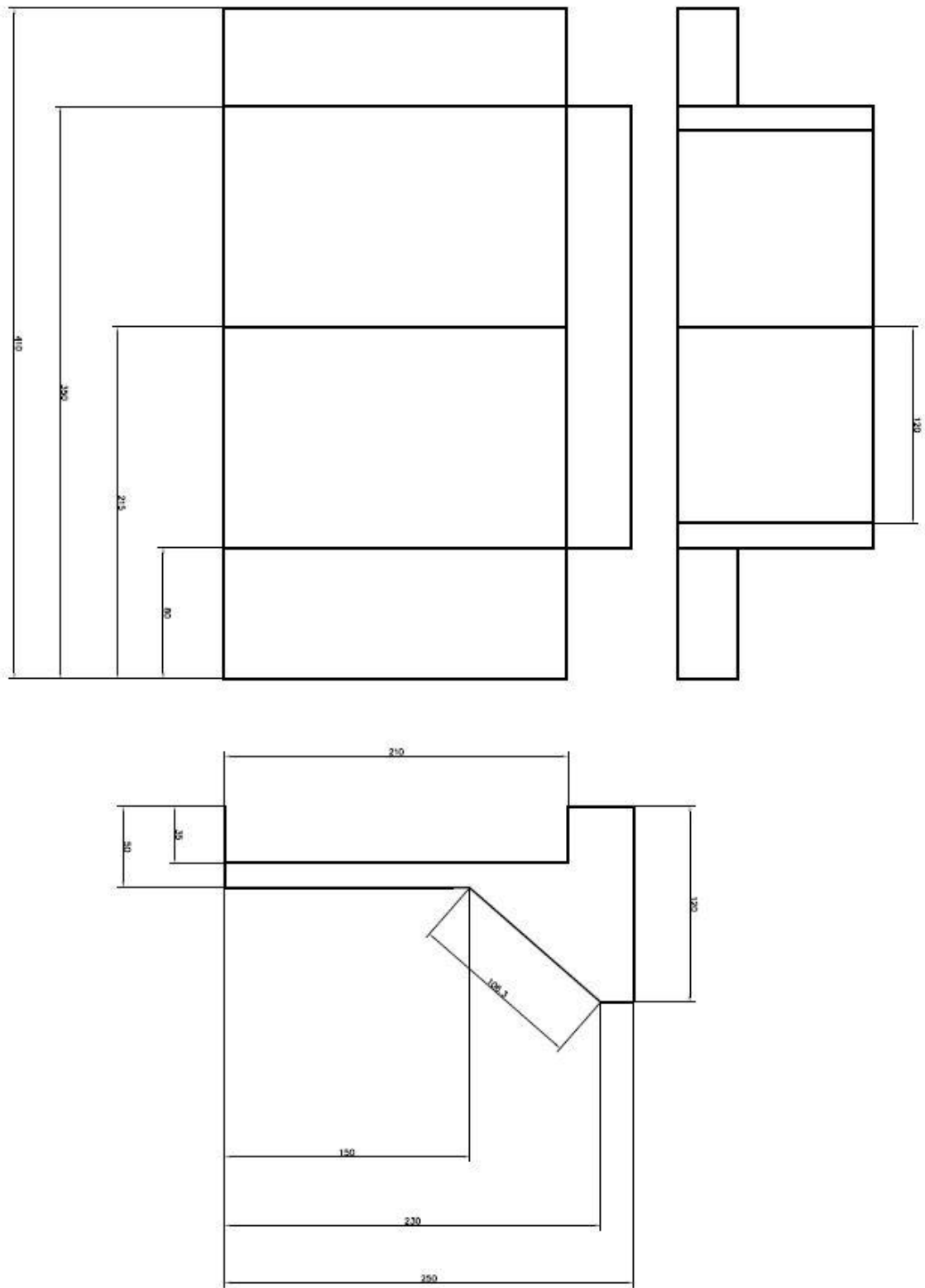
Kuorma 18 kw Lämpötila 25,2

t/min	Imuilma		Koneikko		AC	AC	AC	DC	DC, M	DC, S	DC, coil	DC, coil
	T/°C	T/°C	Q/lpm	P/bar	U/V	f/Hz	I/A	U/V	I/A	I/A	I/A	U/V
0	28,9	41	73	200	175,7	38,3	30,4	219,3	37,6	39,5	76,9	216,9
3	34	45	73,1	192								
6	37,1	48	73,3	186	169,4	38,3	28,2	211,9	34,9	36,5	71,3	210,7
9	40,1	52	73,5	180								
12	41,7	54	73,4	176	168,3	38,3	26,9	209,4	33,6	35,2	68,6	208,7
15	43	55	73,5	172								
18	44,3	57	73,5	169	166,4	38,3	26,1	208,7	32,5	34,2	66,5	207,5

Liite 3. Alkuperäisen rakenteen DynaData-sovelluksen mittaustulokset



Liite 4. Ohjauskeskuksen ilmanohjaimen mittakuva

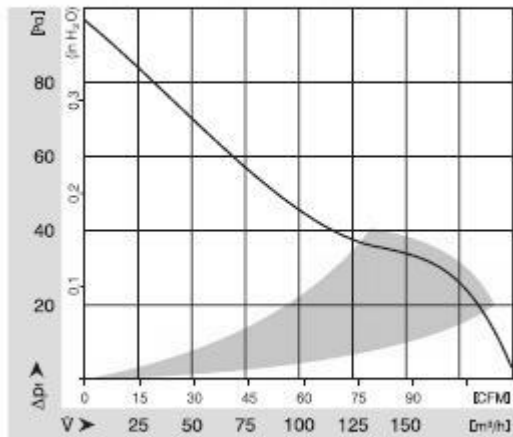


Liite 5. Laitetuulettimen tekniset tiedot



AC4300H

Aksiaalituuletin ACmaxx 119x119x32 mm



Tekniset tiedot	
Kuvaus	Aksiaalituuletin ACmaxx 119x119x32 mm
Jännite	115/230 VAC
Jännitealue	85-265 VAC
Taajuus	50 / 60 Hz
Teho	11 W
Kierrosluku	3400
Ilmavirta	56.70 Vs
Ilmavirta	204.0 m³/h
Ilmavirta	120.1 CFM
Käyttölämpötila-alue	-20...+70 °C
Moottorin malli	ACmaxx
Suojausluokka	IP54
Äänenpaine	51.0 dB(A)
Ääniteho	6.4 Bel
Elinikä L10	45000 tim 40 °C / 22500 tim 70 °C
Hyväksynnät	VDE, UL, CSA, CCC, CE
Koko	119x119x64 mm
Paino	325 g
Tuotenumero	9204305001

Katso päivitetty tiedot netistä www.abmpapst.fi