

VAASAN YLIOPISTO

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

SÄHKÖTEKNIikka

Jussi Vesti

**KUPARIROOTTORIN KÄYTTÖ KORKEAN HYÖTYSUHTEN OIKOSUL-
KUMOOTTORISSA**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 25.4.2013

Työn valvoja

Professori Timo Vekara

Työn ohjaaja

TkT Jouni Ikäheimo

Työn tarkastaja

DI Bertil Brännbacka

ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty ABB Oy:n moottorit ja generaattorit -yksikön Vaasan tuotekehitysosastolle.

Kiitän ohjaajaani teknologiapäällikkö Jouni Ikäheimoa työn ohjaamisesta ja avustamisesta sekä innostuneesta asenteesta, joka motivoi entisestään työn tekemistä. Lisäksi haluan kiittää kaikkia muita työn teossa auttaneita motorsin henkilökuntalaisia sekä GTS:n Sami Patteria, joka omalta osaltaan mahdollisti pääsystäni osaksi motorsin organisaatiota. Yliopistosta haluan kiittää työn valvojaa professori Timo Vekaraa diplomityön ja opintojen aikaisista kommentteista sekä avusta ja Bertil Brännbackaa työn tarkastamisesta.

Kiitän vanhempiani tuesta sekä siskojeni ja Emiliaa kannustuksesta ja ohjeista opintojeni aikana. Lisäksi haluan esittää kiitokset parhaimmille opiskelukavereilleni Aleksi Sarajärvelle ja Nora Möttöselle, joiden kanssa olen saanut jakaa opiskeluaikani haasteet ja hauskuudet.

Vaasassa 25.4.2013

Jussi Vesti

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	1
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	4
TIIVISTELMÄ	6
ABSTRACT	7
1 JOHDANTO	8
2 OIKOSULKUMOOTTORIN HÄVIÖT JA HYÖTYSUHDE	10
2.1 Hyötysuhdevaatimukset	10
2.2 Häviöt	12
2.3 Keinot hyötysuhteen parantamiseksi	18
3 KUPARIROOTTORI	21
3.1 Yleistä kupariroottorista	21
3.2 Roottorin rakenne ja valmistusmenetelmät	22
3.3 Kuparin painevalu	25
3.4 Tutkimuksia painevalukupariroottorin käytöstä	28
3.5 Kupariroottorien valmistajia	35
3.6 Kupariroottorikokeilu Vaasassa	36
4 ROOTTORIURAMUODON OPTIMOINTI	40
4.1 Laskentaohjelmat	40
4.2 Optimointi Optimizer-työkalulla	41
4.2.1 IEC-runkokokoko 90	43
4.2.2 IEC-runkokokoko 132	48
4.2.3 IEC-runkokokoko 200	50
4.3 Tulosten vertailu	52
5 PROTOTYYPIN SUUNNITTELU JA TESTAUS	55
5.1 Prototyypin valmistaminen	55
5.2 Prototyypin hyötysuhdemittaus	57
5.3 Hyötysuhdemittauksen tulokset	59
5.3.1 Ensimmäinen versio	59
5.3.2 Toinen versio	60

5.4 Tuuletus- ja kitkahäviöiden tarkempi mittaus	63
6 TULOSTEN TARKASTELO JA POHDINTA	70
6.1 Laskettujen arvojen ja mittaustulosten vertailu	72
6.2 Pohdintaa prototyypistä	74
6.3 Tulevaisuuden näkymät	76
7 YHTEENVETO	77
LÄHDELUETTELO	80

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Käytetyt symbolit ja suureet

η	Hyötysuhde
ρ	Resistiivisyys
ρ_t	Tiheys
ω	Kulmanopeus
a	Johtimien määrä
B	Magneettivuon tiheys
\hat{B}	Magneettivuon tiheyden huippuarvo
d	Paksuus
E	Pyörimisenergia
f	Taajuus
H	Magneettikentän voimakkuus
I	Sähkövirran voimakkuus
I_K	Oikosulkuvirta
I_N	Nimellisvirta
I_S	Käynnistysvirta
J	Hitausmomentti
l	Pituus
M	Momentti
m	Massa
n	Pyörimisnopeus
n_s	Synkroninopeus
P_δ	Ilmaväliteho
$P_{cu,r}$	Roottorin virtalämpöhäviöt
$P_{cu,s}$	Staattonin virtalämpöhäviöt
P_{Fe}	Rautahäviöt
P_{Fr}	Mekaaniset häviöt
P_h	Hystereesihäviöt

P_{in}	Ottoteho
P_j	Jarrutusteho
P_K	Virtalämpöhäviöt
P_{loss}	Häviöteho
P_{LL}	Lisähäviöt
P_{out}	Antoteho
P_p	Pyörrevirtahäviöt
P_{Tot}	Kokonaishäviöt
P_0	Tyhjäkäyntihäviöt
P_{0Cu}	Tyhjäkäyntivirtalämpöhäviöt
R	Resistanssi
R_K	Oikosulkuresistanssi
r	Säde
S	Johtimen poikkipinta-ala
s	Jättämä
T_{Cu}	Staattorikäämityksen lämpenemä
T_{Frame}	Moottorin rungon lämpötila
T_{Max}	Kippimomentti
T_N	Nimellismomentti
T_S	Käynnistysmomentti
V	Tilavuus
X_K	Oikosulkureaktanssi
Z_K	Oikosulkuimpedanssi

Käytetyt lyhenteet

ATEX	Atmospheres Explosibles, räjähdysvaarallisiin tiloihin ja laitteisiin liittyvä direktiivi
IEC	International Electrotechnical Commission, sähköalan kansainvälinen standardisoimisjärjestö
PID	Product Info Database, tuotetietokanta

VAASAN YLIOPISTO**Teknillinen tiedekunta**

Tekijä:	Jussi Vesti	
Diplomityön nimi:	Kupariroottorin käyttö korkean hyötysuhteen oikosulkumoottorissa	
Valvoja:	Prof. Timo Vekara	
Ohjaaja:	TkT Jouni Ikäheimo	
Tarkastaja:	DI Bertil Brännbacka	
Tutkinto:	Diplomi- insinööri	
Oppiaine:	Sähkötekniikka	
Opintojen aloitusvuosi:	2008	
Diplomityön valmistumisvuosi:	2013	Sivumäärä: 83

TIIVISTELMÄ

Pyrkimys saavuttaa tämän hetken korkein IEC-hyötysuhdeluokka IE4 on osoittautunut haastavaksi etenkin pienissä oikosulkumoottoreissa. Oikosulkumoottorin tulisi täyttää asetetut korkeat hyötysuhdevaatimukset mahdollisimman kilpailukykyisellä rakenteella. Yhtenä merkittävänä parannuksena nähdään tässä työssä tutkittu kupariroottorin hyödyntäminen. Tyypillisesti roottorin käämitysmateriaalina käytetyn alumiinin korvaaminen kuparilla laskee roottorin virtalämpöhäviöitä ja parantaa täten hyötysuhdetta. Kuparin käyttö vaikuttaa kuitenkin myös moottorin muihin suoritusominaisuuksiin ja vaatii roottoriuramuodon optimointia kuparille sopivaksi.

Työn tarkoituksena on perehtyä kupariroottorin hyödyntämiseen korkean hyötysuhteen oikosulkumoottorissa julkaistujen tutkimusten, simulointien ja prototyypimoottorin kautta. Simulointeja varten valittiin kolme kupariroottorin käytölle potentiaalista moottoria runkokooltaan 90, 132 ja 200. Simuloinneissa moottoreiden roottorikäänitys vaihdettiin kupariin ja moottoreille suoritettiin uramuodon optimointi Adept-ohjelmiston Optimizer-työkalun avulla. Optimoidulla uramuodolla pyritään saavuttamaan mahdollisimman hyvät moottorin suoritusarvot säilyttäen samalla kuparin avulla saavutettu hyötysuhteen korotus.

Simuloiduista moottoreista prototyypimoottoriksi valittiin runkokoon 90 oikosulkumoottori. Aikaa vievän ja haasteellisen painevalun vuoksi sen roottorin valmistus toteutettiin kuparitangoilla ja tankojen päihin juotetuilla oikosulkurenkailla.

Työn tuloksena saatiin selvitys kuparin potentiaalista hyötysuhteen parantamisessa. Kirjallisuus tutkimuksen ja simulointien perusteella kuparilla olisi mahdollista saavuttaa noin 1–2 %:n parannus hyötysuhteeseen. Optimizer-työkalun avulla saatiin ehdotukset kolmen eri moottorin kupariroottorien uramuodoille. Lisäksi rakennetun prototyypin avulla saatiin arvokasta käytännön kokemusta kupariroottorin käytöstä tulevaisuuden jatkotutkimuksia varten.

AVAINSANAT: Painevalukupariroottori, oikosulkumoottori, hyötysuhde, paipainevalaminen

UNIVERSITY OF VAASA**Faculty of technology****Author:**

Jussi Vesti

Topic of the Thesis:

Utilization of copper rotor in high efficiency

Induction motor

Supervisor:

Prof. Timo Vekara

Instructor:

D.Sc. (Tech.) Jouni Ikäheimo

Evaluator:

M.Sc. (Tech.) Bertil Brännbacka

Degree:

Master of Science in Technology

Major of Subject:

Electrical Engineering

Year of Entering the University: 2008**Year of Completing the Thesis:** 2013**Pages:** 83

ABSTRACT

Reaching the currently highest IEC-efficiency class IE4 has proved to be challenging, especially within the small frame size induction motors. These high efficiency requirements should be met with competitive motor structure. One progressive solution for increased induction motor efficiency is to utilize copper rotor. As a comparison to commonly used rotor winding material aluminum, copper decreases rotor losses thus improving the motor efficiency. However, utilization of copper also affects other motor characteristics, thus requiring rotor slot shape optimization for copper.

The purpose of this thesis is to study the potential of utilizing copper rotor. Current state-of-the-art is presented, copper rotors are simulated and optimized and finally a prototype rotor is built. For simulation purpose three motors of frame sizes 90, 132 and 200 were investigated. Aluminum rotors were replaced with copper rotors and each of the three motors rotor slot shapes were optimized using Adept-software's Optimizer-tool. The purpose of the copper rotor slot shape optimization was to obtain improved motor characteristics while maintaining the improved efficiency.

The prototype was implemented using an induction motor of frame size 90. Due to the demanding and time consuming die-casting process, the prototype was built using copper bars and brazing the short circuit rings to the end of the copper bars.

The outcome of this thesis presents the potential of utilizing copper rotor in high efficiency induction motors. According to publications and simulation results copper rotor has potential to increase the overall efficiency 1–2 %. As an outcome of optimizing the rotor slot shapes with Optimizer-tool, three potential copper rotor slot shapes for three different motors were presented. In addition, the built prototype motor provides valuable practical experience for future copper rotor researches.

KEYWORDS: Die-cast copper rotor, induction motor, efficiency, die-casting

1 JOHDANTO

Vaatimukset oikosulkumoottoreiden hyötysuhteille ovat kiristyneet tasaisesti vuosien saatossa. Hyötysuhdevaatimuksiin ovat viime vuosina vaikuttaneet mm. kiristyneet alueelliset ja maakohtaiset lainsäädännöt, jotka asettavat vähimmäishyötysuhdevaatimuksia alueelle myytävälle oikosulkumoottoreille. Vähimmäishyötysuhdevaatimusten lisäksi tarvetta yhä korkeamman hyötysuhteen oikosulkumoottoreille ovat nostaneet yleinen kiinnostus kohti energiatehokkaampia ja sähköenergiaa säästäviä moottoreita. Moottorivalmistajien kannalta on yhä tärkeämpää, että tuotevalikoimasta löytyy vähimmäishyötysuhdevaatimusten täyttävien oikosulkumoottorien lisäksi laaja valikoima korkean hyötysuhteen oikosulkumoottoreita.

Korkea hyötysuhde tulisi kuitenkin saavuttaa mahdollisimman kilpailukykyisellä rakenteella. Korkean hyötysuhteen saavuttaminen onkin osoittautunut haastavaksi erityisesti pienissä oikosulkumoottoreissa. Yhtenä merkittävänä parannuksena pienten oikosulkumoottoreiden hyötysuhteeseen nähdään kuparin käyttö moottorin roottorikäänitysmateriaalina. Tyypillisesti painevaletulla alumiinilla toteutetun roottorikäänityksen korvaaminen kuparilla laskee roottorin virtalämpöhäviöitä ja parantaa täten moottorin hyötysuhdetta. Kuparin käyttö vaikuttaa kuitenkin myös oikosulkumoottorin muihin suoritusominaisuuksiin ja vaatii roottoriuramuodon uudelleen suunnittelua. Lisäksi roottorikäänityksen painevalaminen kuparista luo omat valmistustekniset haasteensa roottorin valmistamiseen.

Tällä hetkellä korkeimman IEC-hyötysuhdeluokan IE4 oikosulkumoottoreita on saatavilla hieman suuremmissa oikosulkumoottoreissa (n. 75 kW ylöspäin), mutta tarkoituksena on laajentaa IE4-hyötysuhdeluokan täyttävää pienjänniteoikosulkumoottorien valikoimaa kattamaan myös kaikista pienimmät oikosulkumoottorit. Tämän työn tarkoituksena onkin tutkia kupariroottorin käytön hyötyjä korkean hyötysuhteen oikosulkumoottoreissa julkaistujen tutkimusten, simulointien ja prototyypimoottorin kautta. Simuloinneissa keskitytään kupariroottorin hyödyntämisen kannalta oleellisten runkokoon 90, 132 ja 200 oikosulkumoottoreiden roottoriuramuodon optimoimiseen Adept-

ohjelmiston Optimizer-työkalun avulla. Simuloiduista moottoreista toteutetaan prototyypinä runkokoon 90 moottori. Prototyypimoottorin testien avulla pyritään keräämään käytännön kokemuksia kupariroottorista mahdollisten tulevaisuudessa kupariroottoreihin liittyvien tutkimusten referenssiksi.

Tämä työ on jaettu yhteensä seitsemään osaan. Johdannon jälkeen kappaleessa 2 käsitellään oikosulkumoottorin hyötysuhteeseen vaikuttavia standardeja ja tekijöitä, sekä eritellään oikosulkumoottorissa aiheutuvat häviöt. Seuraavassa kappaleessa keskitytään kupariroottorin teoriaan tarkastelemalla kuparin hyötyjä, valmistusmenetelmää sekä erilaisia tutkimustuloksia kupariroottorien käytöstä. Lisäksi kappaleessa esitellään moottorit ja generaattorit -yksikön Vaasan toimipisteessä aiemmin suoritettua kupariroottorikokeilua. Kappaleessa 4 tutkitaan oikosulkumoottorin roottorin uramuodon optimointia kuparille sopivaksi Adept-ohjelmiston Optimizer-työkalun avulla. Viidennessä kappaleessa esitellään työtä varten valmistetun prototyypin valmistusta sekä testaustuloksia. Kuudennessa kappaleessa on tarkasteltu mittaustuloksia yhteenvetona sekä esitetty pohdintaa työn tuloksista ja tulevaisuuden näkymistä. Viimeisessä eli seitsemännessä kappaleessa on yhteenveto työstä.

2 OIKOSULKUMOOTTORIN HÄVIÖT JA HYÖTYSUHDE

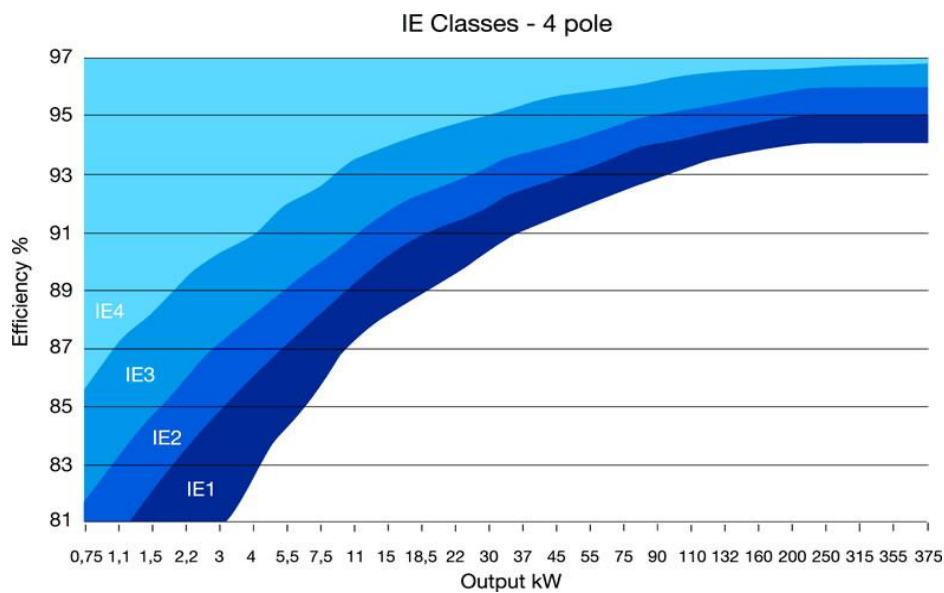
Oikosulkumoottorin hyötysuhteella on suuri vaikutus moottorin elinkaarenaikaisiin kustannuksiin. Onkin laskettu, että parhaimmillaan oikosulkumoottorin elinkaarenaikainen sähköenergian kulutus voi olla jopa 97 % moottorin koko eliniän rahallisista kustannuksista (Kortelainen 2010: 13). Korkean hyötysuhteen oikosulkumoottorilla onkin mahdollista vähentää moottorin elinaikaisia kustannuksia huomattavasti. Seuraavissa alaluvuissa on tutkittu eri standardien ja asetusten asettamia vaatimuksia oikosulkumoottorin hyötysuhteelle. Lisäksi alla on tarkasteltu hyötysuhteen kannalta oleellisten häviöiden muodostumista oikosulkumoottorissa, sekä luotu katsaus keinoihin, joilla oikosulkumoottorin hyötysuhdetta voitaisiin parantaa.

2.1 Hyötysuhdevaatimukset

Oikosulkumoottorin hyötysuhteen määrittämisen kannalta on tärkeää, että on olemassa yhtenäiset säännökset hyötysuhdeluokille sekä hyötysuhteen mittaamiselle. Kansainvälinen sähkö- ja elektroniikka -alan standardisointijärjestö IEC (International Electrotechnical Commission) määrittelee standardissaan oikosulkumoottoreille hyötysuhdeluokat sekä testausmenetelmät hyötysuhteen mittaamiselle.

Standardissa IEC 60034-30: 2008 määritellään kolme hyötysuhdeluokkaa: IE1 (Standard Efficiency), IE2 (High Efficiency) ja IE3 (Premium Efficiency). Lisäksi uudemmassa IEC:n standardissa 60034-31: 2010 on määritelty IE4 (Super Premium) hyötysuhdeluokka. Edellä mainitut standardit kattavat 2, 4 ja 6 -napaiset moottorit, tehoalueen 0,75 kW–375 kW sekä alle 1000 V:n jännitteet taajuuksilla 50 Hz ja 60 Hz. Standardiin sisältyvät myös Atex- ja jarrumoottorit. Hyötysuhdeluokkien jakautuminen 4-napaisille oikosulkumoottoreilla on esitetty kuvassa 1. (Kortelainen 2010: 7; ABB 2011: 4–6.)

Kuvasta 1 voidaan nähdä moottorin hyötysuhdevaatimusten nousevan moottorien nimellistehon kasvaessa. Erityisesti pienillä moottoreilla suuri osa häviötehosta kuluu



Kuva 1. Hyötysuhdeluokat standardien IEC 60034-30: 2008 ja IEC 60034-31: 2010 mukaisesti (ABB 2011: 4).

staattorikäimityksen virtalämpöhäviöihin. Moottorin tehon kasvaessa häviötehon suhteellinen osuus laskee ja moottorin hyötysuhde paranee.

Jotta eri valmistajien ilmoittamien hyötysuhteiden vertaileminen olisi mahdollista, tulee hyötysuhteen mittaaminen tapahtua yhteismitallisesti esim. IEC standardin 60034-2-1: 2007 mukaisesti. Uudessa standardissa on tarkemmat menetelmät oikosulkumoottorin häviöiden määrittämiseen, ja niiden avulla hyötysuhde pystytään laskemaan tarkemmin. (ABB 2011: 4.)

IEC:n standardit eivät kuitenkaan pakota valmistajia noudattamaan hyötysuhdevaatimuksia, vaan se on alueellisen lainsäädännön tehtävä (Alberti, Bianchi, Boglietti & Cavagnino 2011: 3391). Eri myyntialueilla on omia standardeja moottorien vähimmäishyötysuhteesta. Hyvänä referenssinä voidaan tarkastella Euroopan Unionin vuonna 2009 hyväksymää EU-MEPS -asetusta (Minimum Efficiency Performance standard), joka määrittelee vähimmäishyötysuhteen Euroopan alueella myytävälle oikosulkumoottoreille. Asetuksen vaiheittainen käyttöönotto on esitetty kuvassa 2. EU-MEPS -asetus sisältää muutamia poikkeuksia esim. erikoismoottoreille, kuten Atex- ja jarrumoottoreille, joita EU-MEMPS -asetus ei koske.

Vaihe 1: 16.6.2011 alkaen	Moottoreiden täytyy täyttää hyötysuhdeluokka IE2
Vaihe 2: 1.1.2015 alkaen	Tehoalue 7,5 – 375 kW, moottoreiden täytyy täyttää hyötysuhdeluokka IE3 TAI hyötysuhdeluokan IE2 moottori täytyy asentaa taajuusmuuttajakäyttöisenä
Vaihe 3: 1.1.2017 alkaen	Tehoalue 0,75 – 375 kW, moottoreiden täytyy täyttää hyötysuhdeluokka IE3 TAI hyötysuhdeluokan IE2 moottori täytyy asentaa taajuusmuuttajakäyttöisenä

Kuva 2. EU-MEPS -asetuksen siirtymäaika (Kortelainen 2010: 12). Kuvaa on muokattu.

Kuvasta 2 voidaan havaita, että tulevaisuudessa moottorien hyötysuhdevaatimukset tiukkenevat entisestään. Tämä ajaa moottorivalmistajat etsimään uusia keinoja moottorin hyötysuhteen nostamiseksi. Erityisesti pienten oikosulkumoottoreiden hyötysuhteen parantamiseksi tehdään jatkuvasti tutkimusta, jotta tulevaisuuden hyötysuhdevaatimukset pystytään täyttämään.

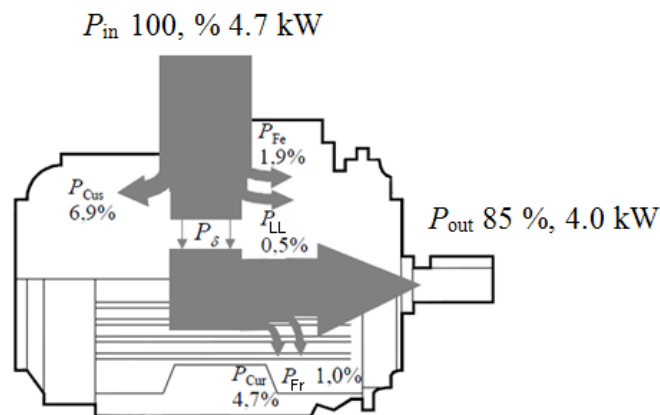
2.2 Häviöt

Oikosulkumoottorin häviöt koostuvat staattorissa ja roottorissa aiheutuvista virtalämpöhäviöistä, magneettipiirissä tapahtuvista rautahäviöistä, mekaanisista häviöistä sekä lisähäviöistä. Oikosulkumoottorin kokonaishäviöt saadaan laskemalla yhteen edellä mainitut häviöt. Lisäksi oikosulkumoottorin häviöt voidaan laskea, jos tiedetään oikosulkumoottorin ottama sähköinen teho sekä akselilta saatava mekaaninen teho. (Verkkonen 2007b: 54; Pyrhönen, Jokinen & Hrabovková 2008: 458)

Oikosulkumoottorin hyötysuhde η voidaan laskea moottorin ottaman sähköisen tehon P_{in} ja moottorin akselilta saatavan mekaanisen tehon P_{out} avulla tai syöttötehon ja moottorin häviöiden P_{loss} avulla (Verkkonen 2007b: 54).

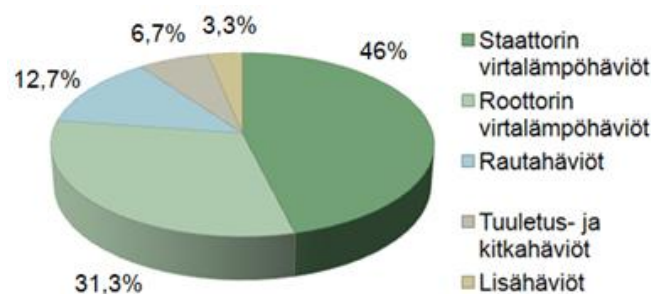
$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\text{in}} - P_{\text{loss}}}{P_{\text{in}}} \quad (1)$$

Häviöiden prosentuaalista jakautumista pienessä 4 kW:n oikosulkumoottorissa on havainnollistettu **kuvassa 3**.



Kuva 3. Häviöiden jakautuminen 4 kW oikosulkumoottorissa. Kuvassa esiintyvät häviöt ovat staattorin käämityksissä tapahtuvat virtalämpöhäviöt $P_{\text{Cu,s}}$, roottorin käämityksen virtalämpöhäviöt $P_{\text{Cu,r}}$, rautahäviöt P_{Fe} , laakeri- ja tuuletuskitkasta aiheutuvat mekaaniset häviöt P_{Fr} , sekä lisähäviöt P_{LL} (Pyrhönen ym. 2008: 459).

Yksittäisten häviöiden prosentuaalista osuutta kokonaishäviöistä samalla 4 kW:n oikosulkumoottorilla on vielä havainnollistettu kuvassa 4. Kuvasta voidaan erityisesti havaita virtalämpöhäviöiden merkittävä osuus kokonaishäviöistä.



Kuva 4. Esimerkki häviöiden jakautumisesta 4 kW:n oikosulkumoottorissa.

Staattorin virtalämpöhäviöt

Oikosulkumoottorin ottamasta sähköisestä tehosta osa kuluu häviöihin jo staattorissa. Kun staattorihäviöt saadaan laskettua, voidaan laskea kuormitustilanteessa pyörivän magneettikentän välityksellä, ilmavälin kautta roottoriin kulkeutuva ilmaväliteho P_{δ} . Seuraavassa on tarkasteltu staattorissa tapahtuvia virtalämpöhäviöitä. (Aura & Tonteri 2002: 327.) Yksinkertaistettuna staattorin virtalämpöhäviöt voidaan laskea

$$P_{\text{Cu,s}} = 3R_1 I_1^2, \quad (2)$$

missä R_1 on staattorin tasavirtaresistanssi ja I_1 on vaihevirta. Kun oikosulkumoottoria syötetään sinimuotoisella verkkotaajuisella jännitteellä, voidaan staattorivirtakin olettaa sinimuotoiseksi. Täten virranahdon merkitys voidaan olettaa vähäiseksi ja vaihtovirtaresistanssin voidaan ajatella vastaavan tasavirtaresistanssia. (Aura ym. 2002: 328; Malinen 2005: 14.)

Tasavirtaresistanssi voidaan laskea kun tiedetään johtimen pituus l , rinnakkaisten johtimien määrä a , johtimen poikkipinta-ala S ja materiaalin johtavuus σ (Pyrhönen ym. 2008: 255)

$$R = \frac{l}{\sigma a S}. \quad (3)$$

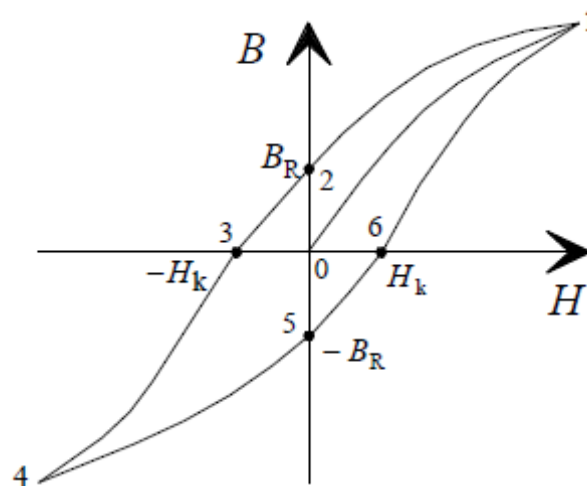
Resistanssin suuruus on hyvin riippuvainen lämpötilasta, mikä on syytä ottaa huomioon. Lämpötilariippuvuus voidaan ottaa huomioon laskemalla resistanssille lämpötilan huomioon ottava korjauskerroin. (Pyrhönen ym. 2005: 255.)

Rautahäviöt

Oikosulkumoottorissa tapahtuvat rautahäviöt P_{Fe} voidaan jakaa hystereesihäviöihin P_{h} ja pyörrevirtahäviöihin P_{p} . Hystereesihäviöiden osuus rautahäviöistä on noin 70 % ja pyörrevirtahäviöiden osuus noin 30 %. Rautahäviöitä tapahtuu oikosulkumoottorin

staattori- ja roottoriraudassa, mutta roottorirautahäviöiden voidaan olettaa kuitenkin olevan häviävän pieniä (Malinen 2005: 17).

Hystereesi-ilmiö aiheutuu vaihtovirralla alkeismagneettien välisestä kitkasta. Tällöin magneettidipolit vaihtavat suuntaansa muuttuvan magneettikentän tahdissa. Täten kun terästä magnetoidaan muuttuvalla kentällä, syntyy lämpöhäviöitä. Hystereesisilmukan pinta-ala on verrannollinen syntyviin hystereesihäviöihin. Lisäksi magneettivuon tiheys B ja taajuus, jolla hystereesisilmukkaa kierretään vaikuttavat hystereesihäviöiden suuruuteen. Periaatteellinen hystereesikäyrä on esitetty seuraavassa kuvassa. (Verkkonen 2007a:10; Aura ym. 2002:119.)



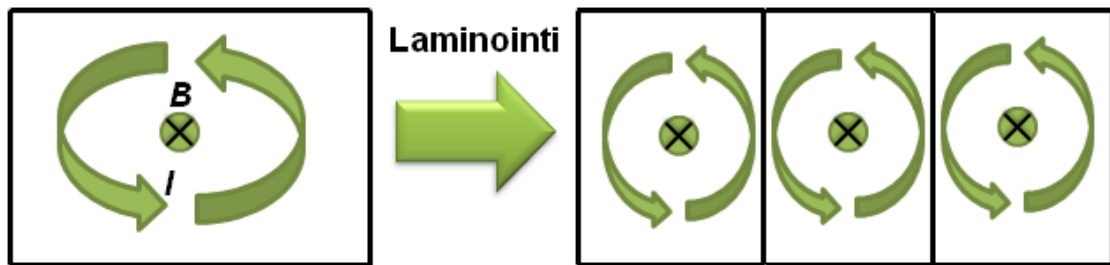
Kuva 5. Periaatteellinen hystereesikäyrä. (Parviainen 2000: 11)

Hystereesihäviöt voidaan määrittellä yhtälöllä

$$P_h = f \oint H \cdot dB, \quad (4)$$

missä f on taajuus, H on magneettikentän voimakkuus ja B on magneettivuon tiheys (Parviainen 2000:11).

Pyörrevirtahäviöitä syntyy kun muuttuva magneettivuo indusoi oikosulkumoottorin rautalevyihin jännitteitä, joiden seurauksena syntyy pyörrevirtoja. Ne pyrkivät vastustamaan magneettivuon muutosta. Erityisesti kiinteissä kappaleissa pyörrevirrat pystyvät vastustamaan tehokkaasti vuota lävistämästä rautaa, aiheuttaen kulkiessaan häviöitä, jotka lämmittävät rautaa. Pyörrevirtahäviöitä pystytään kuitenkin tehokkaasti ehkäisemään käyttämällä moottorin raudassa laminaarista rakennetta, jossa paketti muodostuu ohuista päällekkäin ladotuista rautalevyistä. Laminoinnin vaikutusta on havainnollistettu kuvassa 6. (Pyrhönen ym. 2008: 195.)



Kuva 6. Laminoinnin vaikutus rautaan indusoituviiin pyörrevirtasilmukoihin. (Vesala 2011: 42). Kuvaa on muokattu.

Pyörrevirtahäviöt voidaan määrittää yhtälöllä

$$P_p = \frac{V\pi^2 f^2 d^2 \hat{B}^2}{6\rho}, \quad (5)$$

missä V on materiaalin tilavuus, f on taajuus, d on materiaalin paksuus, \hat{B} on magneettivuontiheyden huippuarvo ja ρ on materiaalin resistiivisyys. Yhtälöstäkin nähdään siis että käytännössä pyörrevirtahäviöitä voidaan pyrkiä pienentämään levyn poikkipinta-alaa pienentämällä tai johtavuutta vähentämällä. Pinta-alan vähentäminen onnistuu raudan laminoinnilla ja johtavuuteen voidaan vaikuttaa seosaineilla. Ensimmäisen version yhtälöstä pyörrevirtahäviöiden laskemiseksi esitti Charles Steinmetz jo vuonna 1892. (Pyrhönen ym. 2008: 197; Verkkonen 2007a: 9.)

Lisähäviöt

Oikosulkumoottorin lisähäviöt koostuvat mm. hajavuosta ja magneettivuon vaihtelusta aiheutuvista häviöistä, mekaanista eroavaisuuksista ilmapälissä ja magneettivuon epäta-
saisesta jakautumisesta ilmapäliin aiheutuvista häviöistä. Vanhan standardin IEC 60034-2:1996 mukaan lisähäviöt oli mahdollista määrittää 0,5 %:ksi moottorin verkosta ottamasta sähkötehosta. Uudessa standardissa IEC-60034-2-1:2007 esitetään lisähäviöiden määrittämistä kuormitustestin perusteella tai 1,0–2,5 %:ksi moottorin nimellis-
kuormalla verkosta ottamasta tehosta. (Kortelainen 2010: 4–5.)

Roottorin virtalämpöhäviöt

Roottorin virtalämpöhäviöt määräytyvät staattorin virtalämpöhäviöiden tavoin roottori-
käämityksissä tapahtuvista resistiivisistä häviöistä. Roottorin virtalämpöhäviöitä ei kui-
tenkaan pystytä laskemaan suoraan joulen lain avulla, sillä kuormitetun moottorin root-
torikäämityksen resistanssia ja virtaa ei pystytä suoraan mittaamaan (Malinen s.16).
Roottorin virtalämpöhäviöt pystytään kuitenkin määrittämään ilmapälitehon P_{δ} ja suh-
teellisen jättämän s avulla. Ilmapäliteho voidaan laskea vähentämällä verkosta otetusta
sähköisestä tehosta staattorissa aiheutuneet häviöt (Aura ym. 2002: 328.)

$$P_{\delta} = P_{\text{in}} - (P_{\text{Cu,s}} + P_{\text{Fe}} + P_{\text{LL}}). \quad (6)$$

Suhteellinen jättämä kuvaa kuinka paljon roottorin pyörimisnopeus on jäljessä magneet-
tikentän pyörimisnopeutta. Suhteellinen jättämä prosentteina voidaan määrittää

$$s = 100 \frac{n_s - n}{n_s} \%, \quad (7)$$

missä n_s on synkroninopeus ja n on roottorin todellinen pyörimisnopeus (Aura ym.
2002: 323). Nyt roottorin virtalämpöhäviöt voidaan määrittää jättämän ja ilmapälitehon
tulona

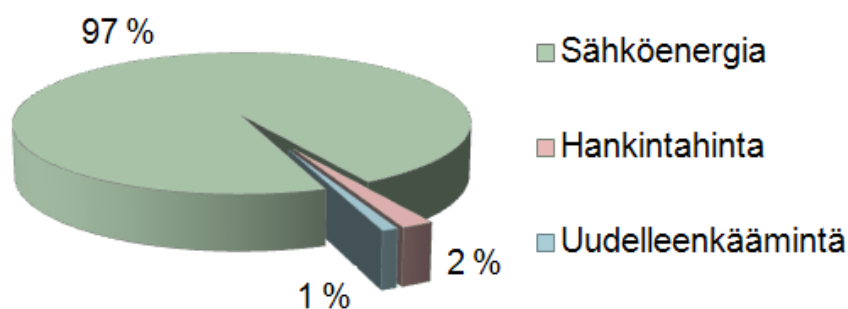
$$P_{Cu,r} = sP_{\delta}. \quad (8)$$

Tuuletus- ja kitkahäviöt

Oikosulkumoottorin tuuletus- ja kitkahäviöt P_{Fr} johtuvat moottorin pyöriessä aiheutuvista tuulettimien ja laakerien kitkasta. Oikosulkumoottorin tuulettimissa tapahtuvat häviöt ovat neliöllisesti ja kitkahäviöt suoraan verrannollisia moottorin pyörimisnopeuteen. Tyypillisessä oikosulkumoottorissa tuuletushäviöitä aiheuttavat akselille sijoitettu tuuletin sekä roottorin oikosulkurenkaiden tuuletinsiivekkeet. Laakereiden häviöt puolestaan johtuvat laakereiden vierintävastuksesta sekä tiivisteiden hankauksesta. (Ryöppö 2005: 10; Talvitie 2005: 42.)

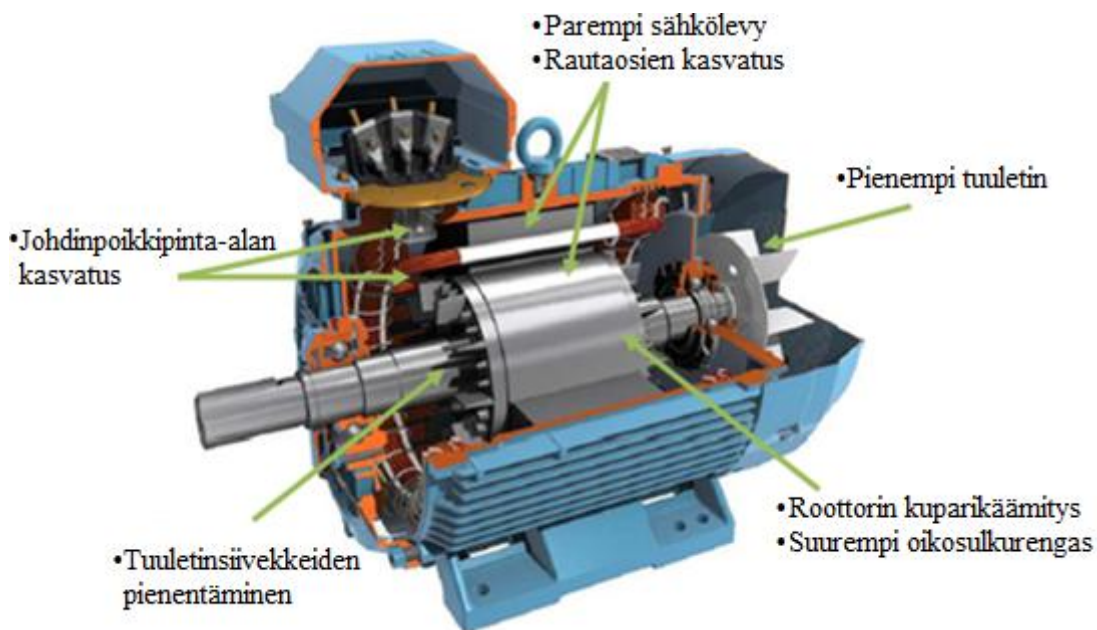
2.3 Keinot hyötysuhteen parantamiseksi

Oikosulkumoottorin hyötysuhteeseen kohdistuvat vaatimukset ovat kasvaneet tasaisesti vuosien saatossa. Hyötysuhteen parantaminen kasvattaa tyypillisesti moottorin hankintahintaa, mutta alentaa käyttökustannuksia. Moottorimarkkinoilla hankintahinta on usein vielä vallitseva tekijä, mutta kuluttajien tietoisuus korkean hyötysuhteen moottorin eduista on kuitenkin lisääntymässä. Hankintahinnan osuutta oikosulkumoottorin kokonaiskustannuksista on havainnollistettu graafisesti kuvassa 7, jossa on vertailtu moottorin hankintahintaa suhteessa moottorin elinkaaren aikaisiin kustannuksiin.



Kuva 7. Hankintahinnan osuus oikosulkumoottorin kokonaiskustannuksista (Kortelainen 2010:13). Kuvaa on muokattu.

Eräs helppo tapa nostaa hyötysuhdetta on kasvattaa moottorin kokoa, toisin sanoen ajaa suuremman koon moottoria aliteholla. Ajettaessa suurempaa moottoria aliteholla moottorin jäähdytyskyky paranee oleellisesti, jolloin moottori käy viileämmin. Viileämmän käynnin ansiosta häviötehot laskevat ja moottorin hyötysuhde paranee. Vastaavasti pienemmän moottorin rautaosia voidaan runkokoon ja rungonpituuden puitteissa kasvattaa. Staattori- ja roottoripaketin pituutta voidaan kasvattaa, mutta samalla myös staattorikäämityksen puolen vyyhdin pituus kasvaa, joka puolestaan lisää resistanssia. Myös staattoripaketin ulompaa halkaisijaa voidaan kasvattaa, mutta runkokoon maksimirajat tulevat nopeasti vastaan. Rautaosien kasvattaminen tai suuremman moottorin ajaminen aliteholla kuitenkin kasvattavat moottorin hankintahintaa, painoa ja moottoriin käytetyn materiaalin määrää. Suuremman moottorin aliteholla ajamisen tai rautaosien kasvattamisen lisäksi muita hyötysuhdetta parantavia ehdotuksia on esitelty kuvassa 8.



Kuva 8. Keinoja parantaa oikosulkumoottorin hyötysuhdetta. (Ryyppö 2005: 1). Kuvaa on muokattu.

Staattori- ja roottorikäämitysten poikkipinta-alaa kasvattamalla on mahdollista vähentää moottorissa tapahtuvia virtalämpöhäviöitä. Paksummassa johtimessa resistanssi piene-

nee ja täten staattori- ja roottorikämmityksessä muodostuvat virtalämpöhäviöt laskevat. Erityisesti staattorissa paksumpien johtimien käyttö nostaa kämmityksessä tarvittavan kuparin määrää, mikä puolestaan nostaa hankintahintaa.

Rautahäviöiden suuruuteen pystytään vaikuttamaan käyttämällä staattori- ja roottoripaketissa parempaa sähkölevyä, jossa alumiinin ja piin määrä on suurempi verrattuna huonompiin sähkölevyihin. Kitkahäviöitä voidaan puolestaan pienentää vaihtamalla moottorin akselille pienempi tuuletin tai muokkaamalla roottorin oikosulkurenkaan tuuletinsiivekkeitä.

Roottorikämmityksessä voidaan käyttää myös yleisesti käytetyn alumiinikämmityksen tilalla tässä työssä lähemmin tarkasteltua kuparikämmitystä. Kuparilla on alumiiniin verrattuna parempi sähkönjohtavuus, jonka ansiosta roottorin virtalämpöhäviöt laskevat ja hyötysuhde kasvaa. Kuten lähes kaikissa hyötysuhdetta kasvattavissa menetelmissä, kuparin käyttö nostaa moottorin hankintahintaa. Lisäksi alumiiniin verrattuna tiheämpi kupari kasvattaa roottorin painoa.

3 KUPARIROOTTORI

3.1 Yleistä kupariroottorista

Kuparin hyödyt oikosulkumoottorin roottorin käämityksen valmistamisessa on tiedostettu jo kauan. Kuparin paremman sähkönjohtavuuden ansiosta roottorin virtalämpöhäviöitä pystytään pienentämään ja täten nostamaan oikosulkumoottorin kokonaishyötysuhdetta. Kuparin käyttöä roottorin käämitysmateriaalina on kuitenkin hidastanut myös sen hankala painevalaminen. Painevalulla toteutetuissa oikosulkumoottoreissa alumiini onkin vakiintunut yleisesti käytettynä roottorikäämitysmateriaalina. Alumiinilla päästään kestäväan rakenteeseen hyvällä hinta-laatu -suhteella, sekä saadaan aikaiseksi hyvät sähköiset ominaisuudet (Englebretson 2009: 11).

Tarve etsiä uusia keinoja moottorin hyötysuhteen parantamiseksi on kuitenkin lisännyt kiinnostusta oikosulkumoottorin häkkikäämityksen valmistamiseen painevalulla kuparista (die cast copper rotor). Perinteisesti kuparia on käytetty suuremmissa oikosulkumoottoreissa ja roottorin käämitys on toteutettu käyttäen kuparitankoja, jotka on juotettu kiinni roottorin päihin asennettuihin oikosulkurenkaisiin (Finley & Hodowanec 2001: 1565). Tankoroottorin valmistaminen on kuitenkin hidasta verrattuna painevaluroottorin valmistamiseen ja roottorikäämityksen valmistus käsin nostaa valmistuskustannuksia. Erityisesti pienten oikosulkumoottoreiden kohdalla painevalun käyttö on suositeltavaa. Lisäksi erilaisten uramuotojen valmistaminen kuparitankoja käyttämällä on työläämpää verrattuna valmistamiseen painevalulla.

Kuparin tärkein ominaisuus verrattaessa alumiiniin on sen lähes 60 % parempi sähkönjohtavuus (Peters, Brush Jr., Van Son, Midson & Kirtley Jr. 2003: 3). Parempi sähkönjohtavuus johtaa pienempään roottoriresistanssiin ja täten pienempiin roottorin virtalämpöhäviöihin. Kuparin ja alumiinin muita tärkeimpiä ominaisuuksia on vertailtu taulukossa 1.

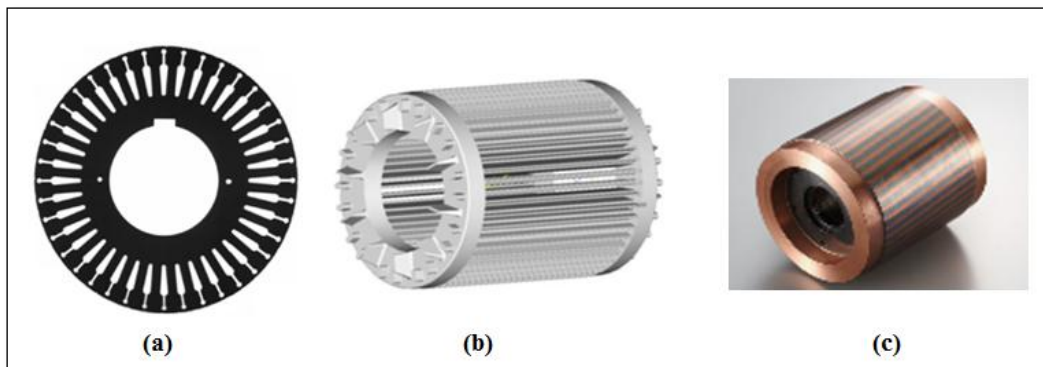
Taulukko 1. Kuparin ja alumiinin ominaisuudet (Englebretson 2009: 11; Aura ym. 2002: 50–51). Taulukkoa on muokattu.

	Alumiini	Kupari
Sähkönjohtavuus	35,3 MS/m	56,2 MS/m
Hinta	1,65 €/kg	5,73 €/kg
Tiheys	2700 kg/m ³	8960 kg/m ³
Sulamislämpötila	660 °C	1080 °C

Yksi suurimmista kuparin heikkouksista on sen korkea sulamislämpötila 1080 °C. Korkea sulamislämpötila aiheuttaa ongelmia painevalussa, erityisesti valumuotin kestävyys- ja kestävyyden kanssa (Peters ym. 2003: 4). Kuparin suuremmasta tiheydestä johtuen häkkikäämituksen valmistamiseen tarvittavaan sulamäärään tarvitaan kuparia enemmän kuin alumiinia. Lisäksi taulukosta 1 voidaan havaita kuparin korkeampi hinta verrattuna alumiiniin. Raaka-aineen korkeampi hinta sekä tarvittavan metallin määrä nostavat moottorin valmistuskustannuksia.

3.2 Roottorin rakenne ja valmistusmenetelmät

Tyypillinen oikosulkumoottorin roottoripaketti koostuu tyypillisesti useista päällekkäin ladotuista uritetuista, n. 0,5 mm ohuista dynamolevyistä sekä itse roottorikäädämyksestä. Ohuiden dynamolevyjen käytöllä yhden kiinteän paketin sijaan pystytään vähentämään raudassa esiintyviä pyörrevirtahäviötä. Roottorin dynamolevyjen uramuodolla taas pystytään vaikuttamaan moottorin käynnistys- ja käyntiominaisuuksiin. (ABB 2002: 4; Verkkonen 2007: 18.) Itse roottorin käädämys sijoitetaan rautapakettiin jätettyihin uriin. Tyypillisessä oikosulkumoottorissa roottorin rautapiirin uriin valetaan (painevaluroottorissa) roottorin häkkikäädämyksen tangot ja samassa valussa roottoripaketin päihin oikosulkurenkaat. Roottorin rautalevy, painevalulla toteutettu alumiinihäkkikäädämys sekä painevalulla toteutettu kuparikäädämys on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Roottorin rautalevy (a), roottorin alumiinihäkki (b) ja kupariroottori (c) (Sarhaluoma 2006: 26; ABB 2002: 3; Akashi Gohdoh 2012).

Vertailtaessa kuvassa 10 esitettyjä roottorin alumiinihäkkiä sekä kupariroottorin käämitystä, suurimpana erona huomataan pienten tuuletinsiivekkeiden puuttuminen kupariroottorista. Kuparin hankaluus valumateriaalina aiheuttaa helposti siivekkeiden lohkeamisen, ja näin ollen oikosulkurenkaan muoto on usein pyöreä. Tuuletinsiivekkeiden puuttuminen heikentää moottorin tuuletusta. Tuuletinsiivekkeiden puuttumista voidaan kuitenkin kompensoida esimerkiksi pienellä akselille sijoitettavalla lisätuulettimella. (Cowie ym. 2003: 46.)

Yleisesti oikosulkumoottorin roottorikämmityksen valmistamisessa käytetään neljää rakennetta: alumiinipainevalu (aluminium die cast), kuparipainevalu (copper die cast), alumiinitanko (aluminium bar) tai kuparitanko (copper bar). Mainituista rakenteista yleisimmin käytössä ovat alumiinipainevaluroottori sekä kuparitankoroottori, joskin kuparitankoroottorin käyttö on rajoittunut taloudellisista syistä vain suurempien oikosulkumoottorien roottoreiden valmistukseen. (Finley & Hodowanec 2001: 1563.) Valmistusmenetelmistä myös kuparipainevalu on lisännyt suosiotaan tavoiteltaessa entistä paremman hyötysuhteen oikosulkumoottoreita.

Tankoroottori

Roottorikämmityksen valmistaminen erillisistä metallitangoista ja oikosulkurenkaista vaatii paljon käsityötä ja nostaa helposti massatuotannossakin valmistuskustannuksia.

Valmistuksessa tangot syötetään roottorin uriin, jonka jälkeen tankojen päät muokataan oikosulkurenkaalle sopivaksi. Oikosulkurenkaiden asentaminen tapahtuu tyypillisesti induktiojuotoksella. **Kuvassa 10** on esitelty kuparitankoroottorin valmistusta.



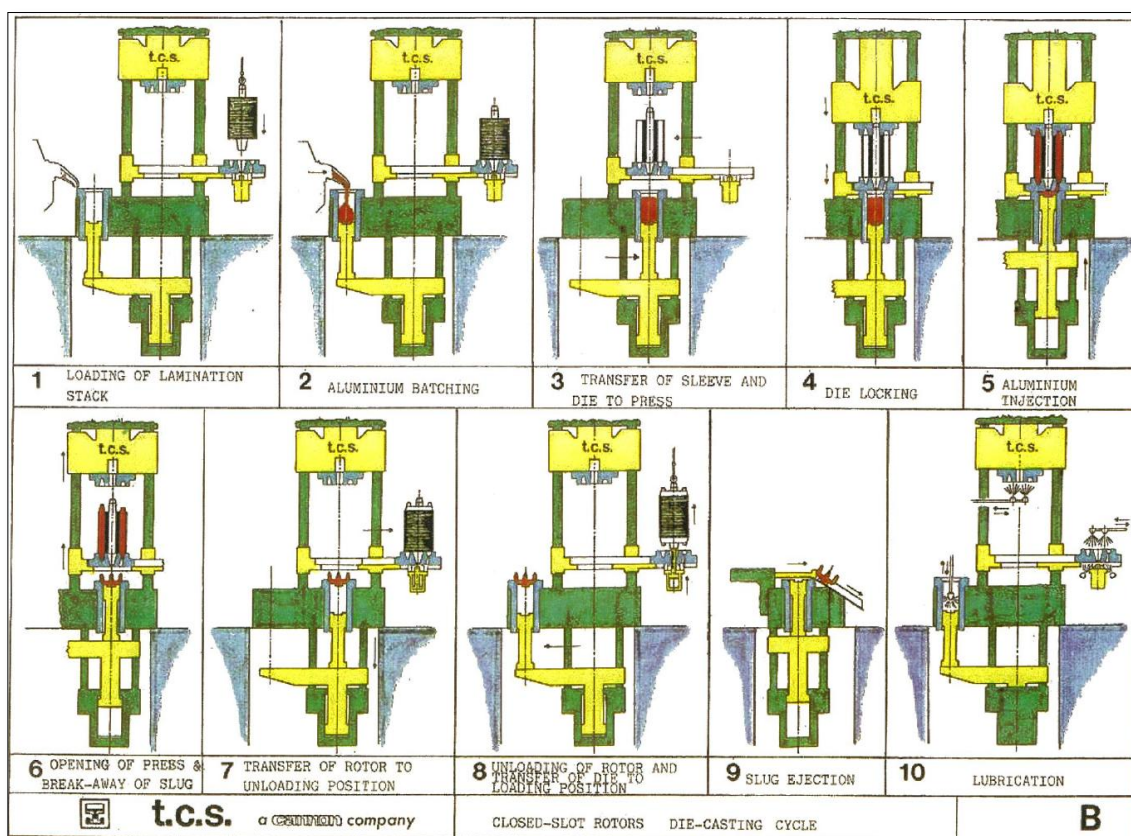
Kuva 10. Kuparitankoroottorin valmistus (ABB: 2010: 6)

Painevaluroottori

Seuraavaksi on tarkasteltu tulevaisuuden kupariroottorien kannalta oleellisempaa roottorin painevalumenetelmää. Valun peruseriaatteet alumiinin ja kuparin valamisessa ovat melko samanlaiset. Kuvassa 11 onkin havainnollistettu oikosulkumoottorin roottorikämmityksen valmistuksessa käytettävän tyypillisen alumiinipainevalukoneen toimintaa.

Ensimmäisessä vaiheessa valusylinteri, johon sula käämitysmateriaali annostellaan, sekä alamuotti ovat valukoneen ulkopuolella. Pinottu roottorin dynamolevypaketti nostetaan alamuottiin. Alumiini sulatetaan erillisessä sulatusuunissa, josta se annostellaan valukoneen viereiseen säiliöön. Toisessa vaiheessa säiliöstä annostellaan sula alumiini valusylinteriin. Seuraavissa vaiheissa alamuotti ja valusylinteri siirtyvät koneen sisälle ja muotti lukitaan paikalleen. Alumiini ruiskutetaan alamuotin pohjassa olevien sulanyöttökanavien läpi kovalla paineella roottorin uriin. Viimeisissä vaiheissa roottoripa-

ketti poistetaan koneesta, ylimääräiset karstat tyhjenetään pois ja aloitetaan koneen valmistelu seuraavaa painevalua varten. Tuloksena on valmis roottorikäänitys oikosulkurenkaineen. Roottorin oikosulkurenkaan muoto määräytyy käytetyn muotin mukaan. Esimerkiksi alumiiniroottoreille tyypilliset oikosulkurenkaan tuuletinsiivekkeet valmistuvat painevalun yhteydessä.



Kuva 11. Alumiinipainevalukoneen toimintakaavio.

3.3 Kuparin painevalu

Oikosulkumoottorin käämityksen painevalaminen kuparista tuo useita uusia haasteita roottorin valmistukseen. Erityisesti kuparin korkea sulamislämpötila 1083 °C verrattuna alumiinin sulamislämpötilaan 660 °C vaatii erityishuomiota valukoneistossa sekä käämitysmetallin sulatuksessa. Korkeammasta sulamislämpötilasta johtuen painevalussa

käytetty muotti altistuu kuparia valettaessa suuremmalle lämpötilan vaihtelulle verrattuna alumiiniin, mikä johtaa muotin metallin nopeampaan kulumiseen ja halkeiluun. Ilmiötä kutsutaan englannin kielisissä lähteissä termillä ”Heat Checking”, jossa kuuman sulan metallin ja viileämpien muotin sisäosien kanssa kosketuksissa oleva muotin pinta altistuu nopealle jaksottaiselle laajenemiselle. Ilmiön haittavaikutukset korostuvat korkean sulamislämpötilan metalleissa, kuten kuparissa. Erityisesti muotin sulansyöttökanaavat, joiden läpi sula käämitysmetalli syötetään roottorin uriin, kuluvat nopeasti kuparia valettaessa. (Englebretson 2009: 11; Cowie ym. 2003: 43.)

Muotin eliniän pidentämiseksi muottimateriaalina tulisikin käyttää tavallisesti alumiinin valussa käytetyn H13-teräksen sijasta paremmin korkeaa sulamislämpötilaa kestäviä muottimateriaaleja. Copper Development Associationin (CDA) edustajien vuoden 2003 julkaisussa *Die-cast Copper Rotors for Improved Motor Performance* raportoidaan tutkimustuloksista eri valumuottimateriaalien käytöstä. Tutkimuksessa tutkittiin tyypillisesti alumiinin valussa käytetyn H-13 teräksen lisäksi erillaisia nikkeli-, molybdeeni- ja volframipohjaisia metalliseoksia, kuten molybdenumpohjainen TZM, volframipohjainen Anviloy sekä nikkelipohjaiset INCONEL seokset. H13-teräsmuotissa havaittiin selkeää halkeilua jo ainoastaan 20 sulan kuparin valukerran jälkeen kun taas huomattavasti paremmin valutesteissa pärjäsivät muut edellä mainitut muottiseokset, jotka testeissä kestivät useita satoja valukertoja ilman näkyvää kulumista. Parhaimpina vaihtoehtoina kuparin valumuottimateriaaliksi tutkimuksessa esiteltiin nikkelipohjainen INCONEL 617 metalliseos sekä ko. tutkimuksessa käsittelemätön Haynes 230 metalliseos. (Cowie ym. 2003: 44)

Edellä mainitussa CDA:n raportoimassa tutkimuksessa sekä useissa muissa on havaittu valumuotin esilämmittämisen tärkeys muotin eliniän pidentämiselle. Tyypillisesti alumiinin painevalussa muotin sekä valusylinterin lämmitys tapahtuu öljykiertoisena, jossa muotin ja valusylinterin lämpötila nostetaan noin 150 °C:een. Muotin kulumisen ehkäisemisen lisäksi lämmityksellä pyritään hillitsemään sulan metallin jäähtymistä sen siirryessä uunista valusylinteriin. Alumiinin valussa sula alumiini lämmitetään noin 800 asteiseksi, sillä alumiini ehtii jäähtyä noin 100 °C ennen kuin se ehtii roottoriuriin. Su-

lan kuparin lämpötilan tulisi olla ainakin noin 1220 °C, jotta liialta jäähtymiseltä välttyttäisiin. (Cowie ym. 2003: 43)

Muotin eliniän pidentämisen kannalta lämpötilan nosto olisi kuitenkin suotavaa noin 500–600 asteiseksi. Yhtenä vaihtoehtona on käyttää sähköisiä lisälämmittimiä, jotka asennetaan valumuotin yhteyteen. Lämmittimien suunnittelu ja sijoittelu on erityisen tärkeää, jotta muotin lämpötila pysyy tasaisena sen eri pisteissä. Liang ym. esittelevät vuoden 2012 julkaisussaan ohjelmistoa, jonka avulla he ovat pystyneet mallintamaan valumuotin lämpenemistä. Elementtimenetelmään perustuvan ohjelmiston tuloksia on käytetty referenssinä valumuotin ja lämmittimien suunnittelussa. (Liang, Yang, Yu & Zhou 2012: 257.)

Muotin lämpötilasimuloinnin lisäksi samassa julkaisussa Liang ym. 2012 sekä julkaisussa Peters ym. 2003 esitellään valutapahtuman mallinnusta 3D-ohjelmistoilla. Mallintamisen ja simuloinnin avulla pyritään löytämään keinoja estää kuparin valamisessa usein esiintyvää huokoisuutta (porosity), jossa käämitysmetallin sisään jää ilmakuplia aiheuttaen sähkönjohtavuuden heikentymistä. Kuvassa 13 on esitelty 3D-simulaatiota valuprofiilista, sekä huokoistuneita oikosulkurenkaita. (Peters ym. 2003 :11)



Kuva 12. Läpileikkaus huokoistuneista oikosulkurenkaista (a) ja 3D-ohjelmistolla mallinnettu valuprofiili (b) (Peters ym. 2003 :11)

Kuvassa 12b on mustilla nuolilla havainnollistettu simulointimallin ennustamaa potentiaalista huokoisuuden muodostumista oikosulkurenkaissa. Kuvassa 12a on nähtävillä huokoisuutta, jota myös kuvan 12b mallinnuksen tuloksena havaittiin nuolilla osoituksissa kohdissa.

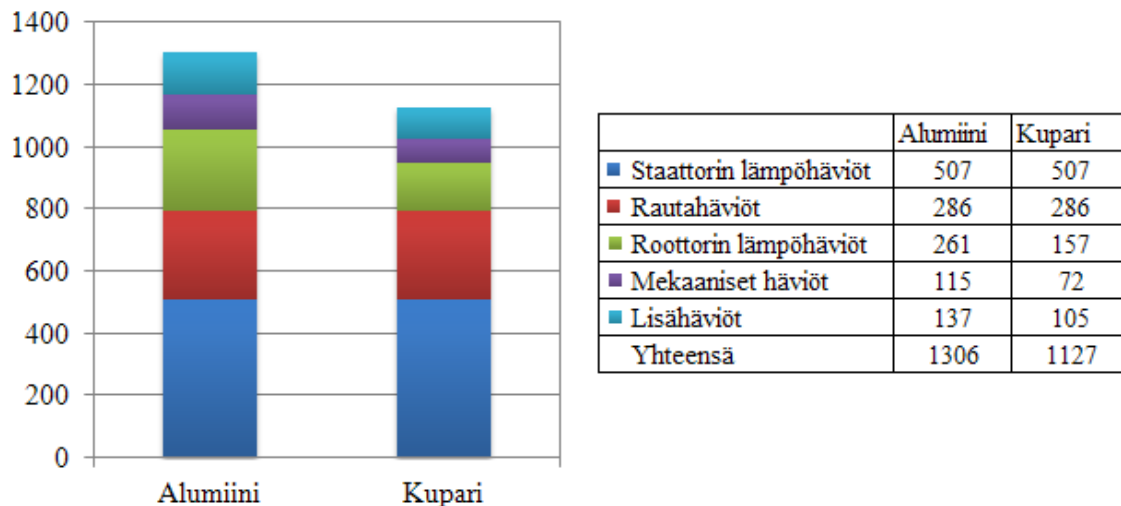
Kuparin sulattaminen lisää myös omat haasteensa kuparin valamiseen. Sula kupari reagoi ilman hapen kanssa ja alkaa muodostaa niin sanottua ”kupari happea” (cupros oxide), joka heikentää kuparin sähkönjohtavuutta. Hapettumisen ehkäisemiseksi International Copper Association (ICA) ja Yunnan Copper Die-casting (YCA) ovat kehittäneet niin kutsutun ”kaasupeiton” (gas planket), jonka avulla kuparin happipitoisuus voidaan laskea siedettävälle tasolle; noin 300–600 ppm. Hapettumisen välttämiseksi useissa lähteissä kuparin sulatus on toteutettu induktio-uuneilla, joissa kuparin sulatus tapahtuu pienemmissä erissä ”just in time” -periaatteella. Lisäksi sulan kuparin siirtymistä valusylinteristä roottoriin voidaan optimoida viemällä valun syöttö valukoneen sisälle. (Liang ym. 2012: 256–257; Cowie ym. 2003: 44.)

3.4 Tutkimuksia painevalukupariroottorin käytöstä

Painevalukupariroottorin hyödyntämistä oikosulkumoottorin hyötysuhteen parantamiseksi on tutkittu useissa kirjallisuuslähteissä kuten mm. Park, Jin, Kim, Lee, Koo, Ko & Lee 2008, Cowie, Peters & Brender 2003, Peters ym. 2003 ja Liang ym. 2012. Näissä tutkimuksissa on vertailtu saman teholuokan moottoreita roottorin alumiini- ja kupari-käämityksillä. Vertailuissa on tutkittu mm. moottorin häviöiden sekä sähköisten ja mekaanisten ominaisuuksien muutosta vaihdettaessa roottorin käämitysmateriaali alumiinista kupariin. Useissa tutkimuksissa saavutetut tulokset ovat samansuuntaisia ja seuraavassa on esitelty referenssinä muutamia.

Vuoden 2003 julkaisussa *Development of the Copper Motor Rotor-Manufacturing Considerations and Motor Test Results* (Cowie ym. :2003) vertailtiin 15 hevosvoiman (11,2 kW) moottorin ominaisuuksia alumiiniroottorilla sekä kupariroottorilla. Eri materiaaleista valmistettujen roottoreiden häviöitä on verrattu kuvassa 13. Kupariroottorin

tulokset on saatu yhteenvetona seitsemän saman teholuokan kupariroottorin testistä ja niitä on verrattu vastaavan teholuokan alumiiniroottoriin. Käytetty roottoripaketin laminointi on optimoitu alumiinille, toisin sanoen roottorin urarakennetta ei ole optimoitu kuparille.



Kuva 13. Alumiini- ja kupariroottorilla toteutettujen 11,2 kW:n moottorien häviöt (Cowie ym. 2003: 45). Käytetyt yksiköt ovat Watteja. Kuvaa on muokattu.

Kuvasta 13 voidaan havaita, että kuparin paremman sähkönjohtavuuden avulla on säästetty noin 40 % pienemmät roottorin virtalämpöhäviöt kuin alumiinilla. Tuulettimen ja laakerien kitkasta aiheutuviissa mekaanisissa häviöissä on nähtävissä noin 37 %:n pudotus. Pudotus johtuu testimoottorin kupariroottorin erilaisista oikosulkurenkaista ja sen myötä eritavalla toteutetusta tuuleuksesta. Kupariroottorin valussa roottorin päihin ei ole valettu alumiiniroottoreissa tyypillisesti esiintyviä pieniä tuuletinsiivekkeitä, vaan roottorin päädyt ovat pyöreät. Tuuletinsiivekkeiden puuttuminen heikentää erityisesti staattorikämmien päiden tuuleutusta, mutta roottorin pienen resistanssin vuoksi se lämpee vähemmän ja täten myös tuuletuksen tarve alenee. Testimoottorissa tuuletus toteutettiin akselille sijoitettavalla pienellä tuulettimella, joka pystyttiin optimoimaan viileämmän moottorin tuulettamiseen. (Cowie ym. 2003: 45–46.)

Samassa tutkimuksessa (Cowie ym. 2003) vertailtiin myös moottorien sähköisiä ja mekaanisia arvoja roottorin kupari- ja alumiinikäilyksillä. Mitattuja ominaisuuksia on esitelty taulukossa 2.

Taulukko 2. Alumiini- ja kupariroottorilla toteutettujen moottorien suoritusarvot (Cowie ym. 2003: 46).

	Alumiini	Kupari	Muutos	%
Hyötysuhde (%)	89,5	90,7	1,2	1,4
Lämpenemä (°C)	64	59,5	-4,5	-7
Pyörimisnopeus (rpm)	1760	1775	15	0,85
Jättämä (%)	2,22	1,37	-0,85	-38
Tehokerroin	0,815	0,79	-2,5	-3
Käynnistymomentti (Nm)	78,9	50,2	-28,7	-36
Kippimomentti (Nm)	206	170,7	-35,3	-17

Taulukosta 2 nähdään tärkeimmän ominaisuuden eli hyötysuhteen kasvaminen 1,2 prosenttiyksiköllä. Erityisen hyvää on myös lämpenemän aleneminen noin viidellä asteella. Lämpenemällä on erityisen suuri merkitys moottorin eliniälle, sillä yleisesti jo noin 10 asteen lämpenemän nousu lyhentää moottorin oletettua elinikää noin puolella. (Cowie ym. 2003: 46.)

Heikentyneinä ominaisuuksina voidaan puolestaan nähdä tehokertoimen putoaminen sekä myös jättämän laskemisen myötä kasvanut pyörimisnopeus. Tehokertoimen putoaminen aiheuttaa suuremman loistehon kulutuksen, joka voi johtaa sakkomaksuihin verkkoyhtiölle. Loistehon kulutus pystytään kuitenkin helposti kompensoimaan, ja yleisesti kompensointi suoritetaan isommalle kokonaisuudelle kuin yksittäiselle moottorille. Jättämän alenemisesta ja sen myötä kasvaneesta kierrosluvusta saattaa seurata ongelmia pumppu- ja puhallintyyppisissä käytöissä, joissa kuormitus kasvaa neliöllisesti nopeuden lisääntyessä. Edellä mainitussa käytössä yhden prosentin kasvu 100 %:n nopeudessa tarkoittaa noin kolmen prosentin lisäystä energian kulutukseen. (Cowie ym. 2003: 46.)

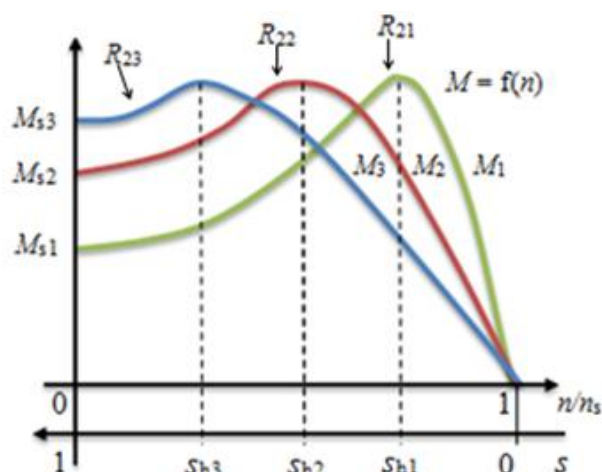
Käynnistys- ja kippimomentissa on nähtävissä selvää pudotusta siirryttäessä alumiinista kupariin. Suurin pudotus havaitaan kuitenkin käynnistysmomentissa, joka laskee noin kolmasosalla. Käynnistysmomentin lisäksi myös moottorin käynnistysvirta nousee siirryttäessä alumiinista kupariin, jota ei ole esitelty taulukossa 2. Moottorin käynnistysominaisuuksia pystytään kuitenkin parantamaan optimoimalla roottorin uramuotoa kuparille sopivammaksi

Taulukossa 3 on esitelty vielä painevalukupariroottoreiden hyötysuhteiden vertailua alumiiniroottoreihin kahdesta muusta lähteestä. Tuloksia tarkasteltaessa kannattaa olla kuitenkin hieman kriittinen, erityisesti lähteen 2 (Peters, Cowie, Brush Jr., Doppelbauer & Kimmich 2005) Intiassa mitattuihin tuloksiin, jossa mittausolosuhteet ovat vaihtelevat heikosta sähköverkosta johtuen. Taulukon tulokset antavat kuitenkin hyvää referenssiä kuparin mahdollisuuksista.

Taulukko 3. Hyötysuhdemittauksia alumiini ja kupariroottoreilla muista lähteistä. (Peters ym. 2003:10 (1) ; Peters ym. 2005: 991 (2))

Teho (kW)	Napaluku	Alumiini (%)	Kupari (%)	Lähde
1,5	2	81,14	82,54	1
2,2	4	83,55	85,88	1
3	4	83,20	86,40	2
3,7	4	83,01	85,97	1
11,2	4	89,50	90,70	2
18,8	4	90,90	92,50	2

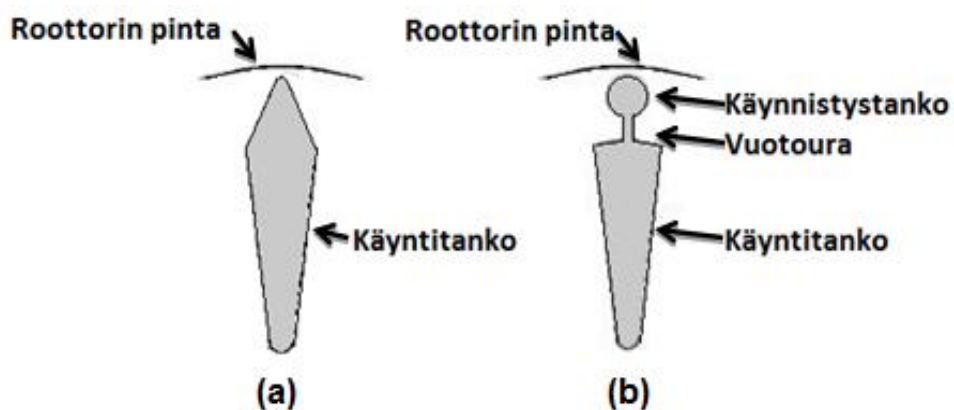
Kuparin käytön myötä pienentyneen roottoriresistanssin vaikutusta oikosulkumoottorin momenttikäyrään on havainnollistettu kuvassa 14. Kuvasta voidaan havaita, että roottoriresistanssin suuruus vaikuttaa käynnistysmomentin suuruuteen ja paikkaan jolla maksimimomentti syntyy. Suuri roottoriresistanssi nostaa käynnistysmomenttia, mutta lisää roottorin virtalämpöhäviöitä ja heikentää samalla hyötysuhdetta. Moottorin kannalta olisikin edullista suuri resistanssi käynnistyksessä ja pieni resistanssi käynnistyksen jäl-



Kuva 14. Roottorin vastusarvojen vaikutus moottorin vääntömomenttiin. $R_{21} < R_{22} < R_{23}$. (Aura ym. 2002: 329). Kuvaa on muokattu.

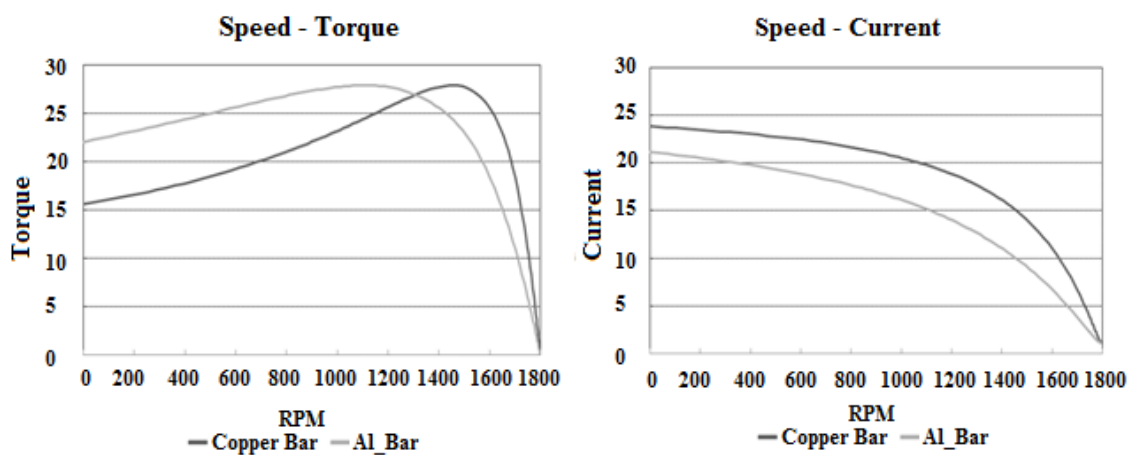
keen. Edellä mainittua resistanssin vaikutusta käytetään hyväksi esimerkiksi liukuren-gaskoneessa, jossa käynnistyksen ajaksi roottoriresistanssia voidaan lisätä käyttämällä erillistä käynnistysvastusta. Oikosulkumoottorin tapauksessa roottorisauvat voidaan muotoilla siten, että niiden resistiivinen häviökomponentti pienenee pyörimisnopeuden kasvaessa. (Aura ym. 2002: 333).

Useissa tutkimuksissa kupariroottorin uramuotoa on pyritty muokkaamaan kuvassa 15b esitetyn avainuran mukaiseksi. Useissa alumiiniroottorikämmityksellä toteutetuissa oikosulkumoottoreissa on käytössä avainuran tyyppisiä roottoriuuria, mutta hyvin pienissä oikosulkumoottoreissa on myös usein käytössä kuvassa 15a tyyppisiä hampaan muotoisia roottoriuuria. Kaksoisurarakenteen peruseriaatteena on, että roottorivirran taajuuden ollessa suuri (noin 50 Hz) uran alaosaan virta kohtaa suuren reaktanssin. Tämä pakottaa virran ahtautumaan uran yläosaan ja näin kohtaamaan suuren resistanssin. Näin ollen roottorin käynnistysmomentti nousee ja käynnistysvirta laskee. Pyörimisnopeuden kasvaessa roottorivirran taajuus laskee ja virran kohtaamasta impedanssista tulee lähes resistiivistä. Pyörimisnopeuden kasvamisen myötä virta jakaantuu tasaisesti koko roottorisauvan pinta-alalle, ja roottorivirran kohtaama resistanssi pienenee. (Verkkonen 2007b: 83.)



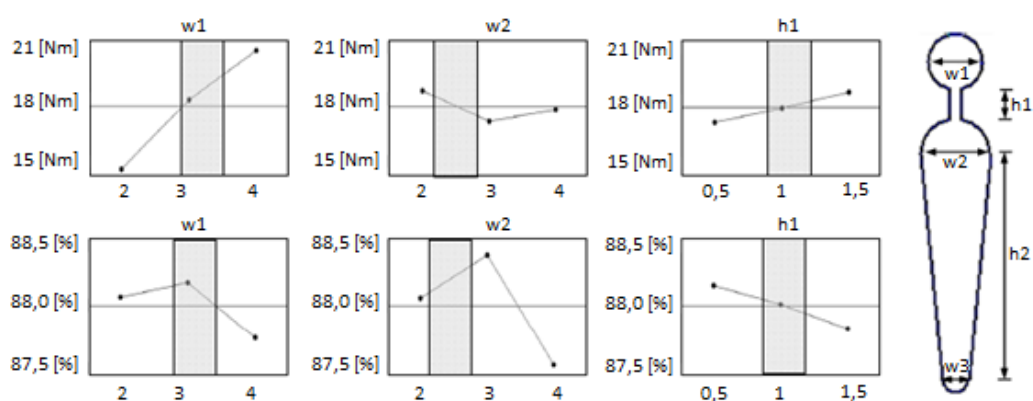
Kuva 15. Eräs alumiiniurarakenne (a) ja eräs kaksoisurarakenne (b) (Peters ym. 2003: 13–14. Kuvaa on muokattu)

Edellä mainittua kaksoisurarakennetta on hyödynnetty julkaisussa Park ym. 2008, jossa etsittiin elementtimenetelmän avulla optimaalista uramuotoa kupariroottorille. Aluksi elementtimenetelmällä määritettiin suoritusarvot alumiini- ja kupariroottorille ilman uramuodon optimoimista kuparille. Kuvassa 16 on esitetty tutkitun moottorin momentti ja virta nopeuden funktiona roottorin alumiini- ja kuparikäämityksillä. Käytetty ura muoto näissä simuloinneissa oli kuvan 15a tyyppinen ura.



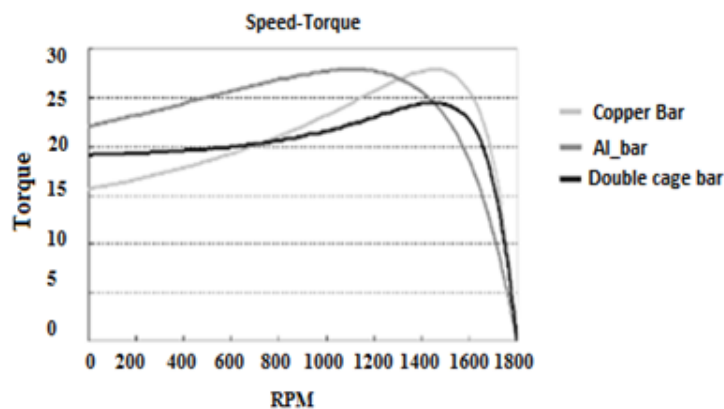
Kuva 16. Moottorin momentti ja virta nopeuden funktiona alumiini- ja kupariroottorikäämityksellä (Park ym. 2008: 61). Kuvaa on muokattu.

Tutkijoiden tarkoituksena oli parantaa moottorin käynnistysmomenttia roottoriuramuotoa optimoimalla, säilyttäen samalla mahdollisimman hyvin kuparin avulla parantunut hyötysuhde. Optimointia varten valittiin tyypillinen kuvassa 17 esitetty kaksoisurarakenne sekä tutkittiin käynnistysmomenttiin eniten vaikuttavien mittojen w_1 , w_2 ja w_3 vaikutuksia moottorin käynnistysmomenttiin ja hyötysuhteeseen.



Kuva 17. Uramittojen w_1, w_2 ja w_3 vaikutus käynnistysmomenttiin ja hyötysuhteeseen (Park ym. 2008: 62). Kuvaa on muokattu.

Kuvan 17 tuloksien avulla tutkijat määrittivät parannelun uramuodon kupariroottorille. Oikosulkumoottorin momenttikäyrä nopeuden funktiona on esitetty kuvassa 18. Lisäksi kuvassa on esitetty moottorin momenttikäyrät alumiini- ja kuparikäämityksellä.



Kuva 18. Alumii- ja kupariroottorien momenttikäyrät nopeuden funktiona (Park ym. 2008: 63).

Kuvasta 18 nähdään, että parannellulla uramuodolla on saavutettu tavallista kuparikäämitystä parempi käynnistysmomentti. Samalla kuitenkin maksimimomentista on jouduttu hieman tinkimään. Uuden uramuodon suunnitteleminen johtaakin usein kompromissiin, jossa painotetaan moottorin suunnittelulle asetettuja vaatimuksia.

3.5 Kupariroottorien valmistajia

Oikosulkumoottoreissa käytettävien painevalukupariroottoreiden tutkimukseen on panostettu viime vuosikymmeninä paljon, minkä tuloksena useat valmistajat ovatkin ottaneet kupariroottorit tuotevalikoimaansa mukaan. Eräitä tunnettuja painevalukupariroottorein valmistajia ovat moottorivalmistajat *Siemens Energy & Automation* ja *SEW-Eurodrive* sekä roottorivalmistaja *FAVI*.

Siemens Energy & Automation esitteli vuonna 2006 uudet kupariroottoreita hyödyntävät korkean hyötysuhteen tuotantolinjansa, joilla korkean hyötysuhteen oikosulkumoottoreita valmistetaan muutamasta kilowatista aina 14,9 kW:iin (20 hp). Uudet korkean hyötysuhteen moottorit ylittävät USA:n markkinoiden Nema Premium (IE3:a vastaava) hyötysuhdeluokan, ja lisäksi niiden on luvattu pienentävän moottorin painoa tai kokoa sekä pidentävän moottorin elinikää alumiiniroottorilla toteutettuihin moottoreihin verrattuna. Kupariroottorin lisäksi Siemensin korkean hyötysuhteen oikosulkumoottoreihin on tehty muita parannuksia, kuten jäähdytysjärjestelmän uudelleen suunnittelu, matalakitkaisten laakerien käyttö sekä polyureapohjaisen rasvan käyttö. Kupariroottorilla varustettujen oikosulkumoottoreiden hinta on noin 11 % korkeampi verrattuna vastaavaan alumiiniroottorilla varustettuihin oikosulkumoottoreihin. (Drives & Control 2006; EERE 2008.)

Toinen kupariroottoreita oikosulkumoottoreissaan hyödyntävistä valmistajista on *SEW-Eurodrive*, joka vuoden 2006 tiedon pohjalta tarjosi kupariroottoreita teholuokissa 0,75–37 kW. SEW:n mukaan tärkeä kupariroottorilla saavutettava ominaisuus on sillä saavutettava suurempi tehotiheys verrattuna alumiiniroottoriin. Suuremman tehotiheyden myötä korkean hyötysuhteen oikosulkumoottori voidaan tehdä fyysisesti pienemmäksi

kuin vastaava alumiiniroottorilla toteutettu korkean hyötysuhteen oikosulkumoottori. (Drives & Control 2006; EERE 2008.)

Kolmas tunnettu kupariroottoreiden valmistaja on kupariseosten painevaluihin erikoistunut *FAVI*, joka toimitti ensimmäiset oikosulkumoottoreihin asennetut kupariroottorit vuonna 2002. *FAVI* valmistaa kupariroottoreita asiakkailleen aina muutamasta watista 75 kW:iin. (*FAVI* 2013)

3.6 Kupariroottorikokeilu Vaasassa

Vaasan moottoritehtaalla tutkittiin vuosien n.1997–2004 aikana kuparin soveltuvuutta oikosulkumoottorin roottorin häkkikäämityksen painevalamiseen. Kupariroottoreita oli jo aikaisemmin valmistettu toteuttamalla häkkikäämitys kuparitangoista ja tankojen päihin juotetuista oikosulkurenkaista. Työlälle ja kalliille valmistusmenetelmälle haluttiin kuitenkin löytää tehokkaampi menetelmä. Kupariroottorin valmistaminen painevalulla tarjoaisi tehokkaan ja taloudellisen tavan valmistaa roottorien käämitys. Maailmalla kupariroottorien valusta oli saatu positiivisia kokemuksia pienen runkokoon (alle IEC 200) moottoreissa, mutta isompien runkokoiden moottorien painevalamisesta ei ollut vielä kattavaa tietoa. Kokeilujakson aikana projektiin osallistui useita eri henkilöitä *ABB:n* eri toimipisteistä sekä muita *ABB:n* yhteistyökumppaneita.

Tutkimuksen taustalla oli tarve tutkia ja kehittää erityisesti runkokoiden 355 ja 400 oikosulkumoottorien kupariroottorien valmistusta. Häkkikäämityksessä yleisesti käytetyn alumiinin korvaaminen kuparilla edesauttoi vähentämään sähkömoottorikäytön häviöitä erityisesti taajuusmuuttajakäytöissä, joiden kytkinkomponentteina toimivat nyt jo vanhentuneet puolijohteet, kuten tyristorit.

Kupariroottorien painevalamista varten hankittiin *THT Presses Inc:ltä* kuparin valamiiseen soveltuva painevalukone. *THT presses Inc* on painevalukoneita toimittava yritys, joka oli koneen hankinta-ajankohtana toiminut 20 vuotta alalla. Yhdysvalloissa Ohion osavaltiossa tehdastaan pitävällä *THT:llä* oli jo tuolloin kokemuksia oikosulkumoottori-

en kupariroottorien valamisesta. Näin ollen THT olikin luonteva vaihtoehto kuparivalukoneen hankintaan. Lisäksi THT:n lupaus, että kuparivalukone pystytään pienillä muutoksilla tarvittaessa muuttamaan alumiinivalukoneeksi, oli merkitsevä. Vaasan moottori-
tehtaalle hankitun valukoneen rakenne poikkesi myös rakenteellisesti hieman muista tehtaan valukoneista. Valukoneessa oli mm. kiinteä valusylinteri, johon sula kupari ensimmäisenä syötetään. Tästä johtuen sulan metallin syöttö oli viety koneen sisälle. Lisäksi kuparin sulattaminen oli toteutettu alumiinin sulattamisesta poiketen kahdella induktiounilla.

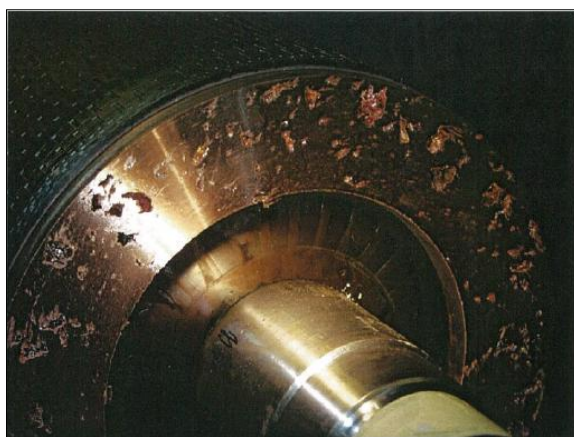
Roottorihäkin valaminen korkean sulamislämpötilan omaavasta kuparista aiheuttaa suurta räsitusta valussa käytettävälle muotille. Täten alumiinin painevalussa tavallisesti käytetylle H13-teräsmuotille tuli etsiä paremmin kuparin valamista kestävä muottirakennetta. Muotin rakennetta tutkittiin mm. kahdella rinnakkaisella projektilla joista toinen suoritettiin Yhdysvalloissa THT:llä ja toinen ABB:n sisäisenä CRC:n (Corporate Research Center) ja ABB Tools:in toimesta. Tutkimuksissa kartoitettiin mahdollisimman hyvin suuresta lämpötilan vaihtelusta aiheutuvaa räsitusta kestäviä materiaaleja, kuten erilaisia nikkelpohjaisia ja kuparipohjaisia seoksia. Muotin pinnan kulumisen lisäksi erityisesti muotin sulansyöttökanavat vaurioituivat helposti kuparin nopean syötön aikana.

Vuosituhannen vaihteen jälkeen suoritettiin ensimmäisiä kupariroottorivaluja Vaasan tehtaalla. Suoritetut testivalut keskittyivät silloin runkokokojen 355 ja 400 moottoreiden roottoreihin. Kuvassa 19 on esitelty Vaasassa painevalukoneella valmistettua kupariroottoria. Koevalu- ja testaustulokset kupariroottorikokeiluista ovat kuitenkin päässeet jo vuosien saatossa katoamaan.

Valun onnistumisessa ilmeni myös paikoin ongelmia. Kuvassa 20 on esitelty ulommalta halkaisijaltaan 420 mm prototyypiroottorin oikosulkurengasta kun oikosulkurenkaasta on tutkimustarkoituksessa sorvattu pois 8,5 mm. Siitä voidaan havaita oikosulkurenkaan sisälle muodostuneita halkeamia. Oikosulkurenkaisiin muodostuneiden halkeamien lisäksi myös roottoriurissa oli havaittavissa paikoin halkeamia.



Kuva 19. Kupariroottorin valmistusta Vaasan moottoritehtaalla.



Kuva 20. Prototyypimoottorin oikosulkurengas kun pinnasta on sorvattu pois 8,5 mm.

Valmistuksessa ilmenneistä lieivistä ongelmista huolimatta kupariroottoreiden painevalun sarjatuotanto olisi voitu aloittaa Vaasassa. Sarjatuotannon aloitus olisi kuitenkin vaatinut vielä hieman valuprosessin kehittämistä ja jatkotutkimusta. Samaan aikaan kuitenkin kehittyneemmät taajuusmuuttajat olivat yleistyneet moottorikäytöissä. Taajuusmuuttajatekniikan kehittymisen myötä sähkömoottorikäytön häviöt taajuusmuuttajaohjauksessa pienenevät huomattavasti. Tämä vei pohjaa projektin alkuperäiseltä tarkoitukselta, jossa alumiiniroottorimoottorin ja vanhemman tekniikan taajuusmuuttajan sähkömoottorikäytössä syntyviä häviöitä pyrittiin pienentämään kupariroottorin avulla. Kupariroottorien painevalaminen päätettiin lopettaa vuosien 2003–2004 vaihteessa.

Kupariroottorien valmistamista varten hankittu painevalukone muutettiin lopettamispäätöksen jälkeen roottorien alumiinivalulle sopivaksi. Kuparin sulattamiseen käytetyt induktiouunit korvattiin alumiinin sulatukseen soveltuvalla uunilla. Sulatusuunin viereen hankittiin säiliö sulan alumiinin valusylinteriin annostelua varten. Lisäksi painevalukoneen akustoille tehtiin toimenpiteitä, jotta niiden toimintaa pystytään säätämään.

4 ROOTTORIURAMUODON OPTIMOINTI

Tässä luvussa keskitytään oikosulkumoottorin roottorin uramuodon optimointiin Adeptin Optimizer-työkalua. Tarkoituksena on optimoida alumiinikäämitykselle suunniteltua roottoriuramuotoa kuparikäämitykselle sopivaksi. Tutkittaviksi valitut moottorit ovat IEC-runkokooltaan 90, 132 ja 200, mikä tarkoittaa että runkokoolla 90 moottorin akselin korkeus asennusalustasta on 90 mm, runkokoolla 132 ko. korkeus on 132 mm jne. Tarkasteltavien moottoreiden teholuokat ovat vastaavasti 1,5 kW, 7,5 kW ja 30 kW. Seuraavaksi esitellään lyhyesti käytettyjä laskentaohjelmia sekä roottoriuramuodon optimoinnissa käytettyä Optimizer-työkalua. Esittelyjen jälkeen suoritetaan roottoriuramuodon optimointilaskenta kolmelle edellä mainitulle oikosulkumoottorille. Viimeisenä on lyhyt yhteenveto ja pohdinta optimoinneista.

4.1 Laskentaohjelmat

Tässä työssä on käytetty sähkökoneiden laskentaan suunniteltua ABB:n Adept-ohjelmaa ja sen ratkaisijoita sekä aliohjelmia. Adept-ohjelma toimii käyttäjärajapintana ja sen laskentatyökaluna toimivat erilaiset analyttisiin kaavoihin perustuvat menetelmät ja elementtimenetelmään perustuvat laskentaohjelmat. Analyttiset laskentaohjelmat perustuvat sähkömagneetiikan perusyhtälöihin, joiden avulla laskettuja arvoja tarkennetaan kokemusperäisillä ja koestuksiin pohjautuvilla korjauskertoimilla. Esimerkkinä analyttisestä laskentaohjelmasta on S113-ratkaisija, jonka toiminta perustuu moottorin sijaiskytkennän ratkaisuun. Analyttisten ohjelmistojen etuna on tyypillisesti niiden nopea ratkaisunopeus verrattuna muihin menetelmiin. (Taipale 2008: 18; Ryyppö 2005: 10)

Analyttisiin menetelmiin pohjautuvat laskentaohjelmat soveltuvat hyvin laskettaessa tunnettuja ja koestettuja moottorirakenteita, mutta ne soveltuvat huonosti uusia moottorirakenteita tutkittaessa. Tässä työssä Tutkittavien moottorien suoritusarvojen ratkaisuun on käytetty Adept-ohjelman elementtimenetelmään perustuvaa FCSmek-aliohjelmaa. Elementtimenetelmässä laskenta-alue jaetaan osiin, tyypillisesti kolmion ja neliön muotoisiin elementteihin, ja jokaisessa elementissä muodostetaan paikallinen

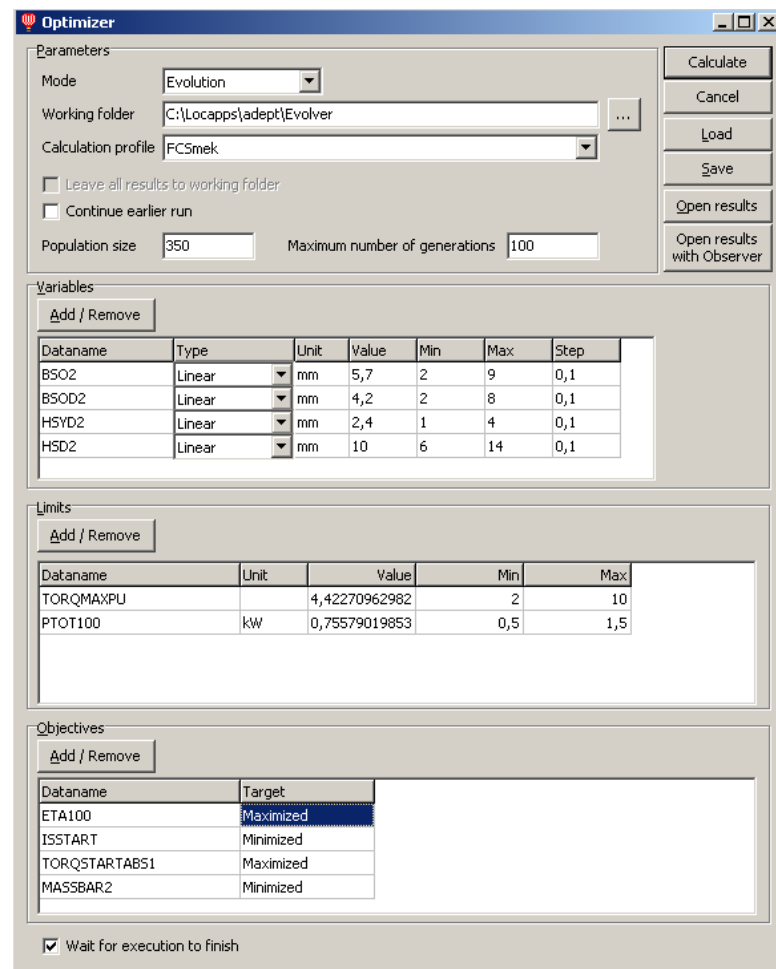
yhtälö. Jokaisen elementin yhtälö on riippuvainen viereisestä elementistä, jonka seurauksena kaikkien elementtien yhtälöt on ratkaistava samanaikaisesti. Seurauksena on suuri yhtälöryhmä, jonka tuloksena saadaan ratkaistua tuntemattomat arvot kaikissa elementeissä. Elementtimenetelmällä laskeminen nostaa tarvittavaa laskenta-aikaa, mutta laskemista voidaan tehostaa käyttämällä hajautettua laskentaa, jossa hyödynnetään toimistoverkkoon liittyneiden tietokoneiden laskentatehoa. (Taipale 2008: 18; Ryyppö 2005: 10.)

4.2 Optimointi Optimizer-työkalulla

Optimaalisen roottorin uramuodon määrittämiseen käytettiin tässä työssä Adeptin Optimizer-työkalua. Työkalun avulla on mahdollista valita optimoitavat rakenteet ja asettaa optimoinnin kannalta toivotut rajoitteet ja tavoitteet. Optimoinnissa Optimizer-työkalu käyttää monitavoiteoptimointia, jossa yhden optimiratkaisun sijaan se tuottaa joukon tasavertaisia ratkaisuja. Pareto-optimaaliseksi kutsutuille tasavertaisen hyvälle ratkaisuille on tyypillistä, että yhtä tavoitetta ei voi parantaa toista huonontamatta. Suunnittelijan tehtäväksi jääkin valita Pareto-optimaalista ratkaisusta suunnitteluun parhaiten sopiva ratkaisu. (Ryyppö 2005: 13)

Esimerkki optimointiparametrien asettelusta on esitetty kuvassa 21. Muuttujat-kenttään määritellään parametrit, jotka saavat muuttua simuloinnin aikana. Tässä työssä parametreiksi on valittu roottorin uramitat BSO2, BSOD2, HSYD2 ja HSD2. Uramittojen merkitykset on havainnollistettu ja selitetty kuvassa 22. Uramitoille asetetaan minimi- ja maksimiarvo, sekä askel jolla optimoitava arvo muuttuu. Varsinaiset optimointitavoitteet asetellaan tavoitekenttään. Tässä työssä optimointitavoitteiksi on määritelty hyötysuhteen (ETA100) ja käynnistysmomentin (TORQSTARTABS1) maksimoiminen sekä käynnistysvirran (ISSTART) ja roottorin tankojen massan (MASSBAR2) minimointi.

Rajoitteita optimoinnille määritellään rajoitteet-kenttään. Tässä työssä rajoitteiksi on määritelty nimellismomenttiin suhteutettu kippimomentti TORQMAXPU ja kokonais-



Kuva 21. Optimointiparametrien määrittäminen Optimizer-työkalulla.



- BSO2 = Uran leveys lähempänä ilmaväliä
- BSYD2 = Välikynnen leveys
- BSOD2 = Uran leveys, alahäkki, lähempänä ilmaväliä
- BSID2 = Uran leveys, alahäkki, lähempänä akselia
- HSY2 = Etäisyys ilmavälistä
- HSYD2 = Välikynnen korkeus
- HSD2 = Uran korkeus, alahäkki

Kuva 22. Roottoruriuran mitat ja selitykset.

häviöt PTOT100. Optimointirajoitteita ei kuitenkaan pidä asettaa liian tiukaksi. Jos rajoitteet on määritelty liian tiukasti, on vaarana että alussa satunnaisesti arvotusta populaatiosta yksikään yksilö ei pääse rajoitteiden sisään. Silloin optimointialgoritmi alkaa suosia laskennassa yksilöitä, jotka ovat lähimpänä määritettyjä rajoja. Pahimmassa tapauksessa on vaarana koko populaation homogenisoituminen, jonka seurauksena koko populaatio olisi käytännössä täynnä samanlaisia yksilöitä kun rajoitteiden sisään lopulta päästään.

Optimointimenetelmä on evoluutiopohjainen, joten optimoinnissa on määriteltävä optimoitavan populaation koko sekä laskettavien sukupolvien määrä. Kuten optimointirajoitteitakin määritettäessä, käytettävän populaation koon on oltava riittävän suuri jotta koko parametriavaruus saadaan katettua ensimmäisen sukupolven satunnaisesti valituilla parametreilla. Sukupolvien määrällä ei sinänsä ole merkitystä, sillä optimointia voidaan aina jatkaa tarvittaessa jatkaa uusilla sukupolvilla. (Ryypö 2009: 3.)

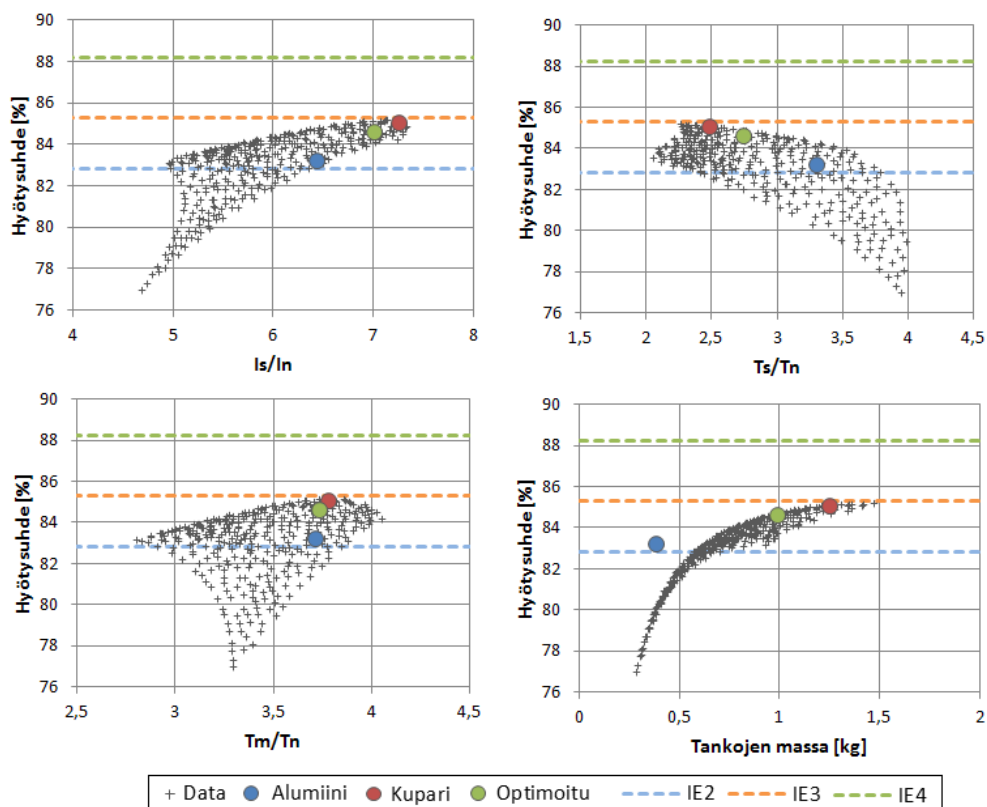
Käytännössä Optimizer pyrkii evoluutiolaskennan avulla tuottamaan annetuista urami-toista kombinaatioita, jotka toteuttavat annetut optimointitavoitteet rajoitteiden sisällä mahdollisimman hyvin. Sukupolvien edetessä ratkaisusta jalostuu evoluutioteorian mukaisesti entistä parempia, jotka täyttävät määritellyt tavoitteet mahdollisimman hyvin.

4.2.1 IEC-runkokoko 90

Tässä kappaleessa suoritetaan roottoriuramuodon optimointi nelinapaiselle IEC-runkokoon 90 oikosulkumoottorille. Roottorin käämitysmateriaali vaihdetaan alumiinista kupariin ja optimoidaan Optimizer-työkalun avulla roottorin uramuoto kuparille sopivaksi. Optimointiparametrit- ja tavoitteet asetellaan kappaleessa 4.2 esitellyllä tavalla; hyötysuhdetta ja käynnistysmomenttia pyritään maksimoimaan ja käynnistysvirtaa sekä roottoritankojen massaa minimoimaan. Ensimmäisessä optimoinnissa on tarkasteltu alkuperäisen hampaanmuotoisen roottoriuramuodon optimointia ja toisessa optimoinnissa roottoriuran optimointi suoritetaan vaihtamalla roottoriuran muoto avain-uraksi.

Pyöreä roottoriura

Ensimmäisen optimoinnin tuloksia on esitelty kuvassa 23. Optimizerin laskemia pareto-optimaalisia ratkaisuja on merkitty mustalla ristillä. Lisäksi kuvaan on merkitty FCSmekillä laskettuja tuloksia alumiinikäimityksellä (sininen), kuparikäimityksellä (punainen) sekä yhdellä pareto-optimaalisista tuloksista valitulla roottorigeometrialla (vihreä). Optimoitu geometria voisi olla käytännössä mikä vaan pareto-optimaalisista ratkaisuista, riippuen minkälaisia ominaisuuksia moottorilta halutaan. Tässä valitulla optimiratkaisulla on pyritty saamaan käynnistysvirta, käynnistysmomentti sekä maksimimomentti mahdollisimman lähelle alumiinilla saavutettuja ominaisuuksia. Samalla kuitenkin pyritään säilyttämään kuparikäimityksellä saavutettu hyötysuhde mahdollisimman hyvin.

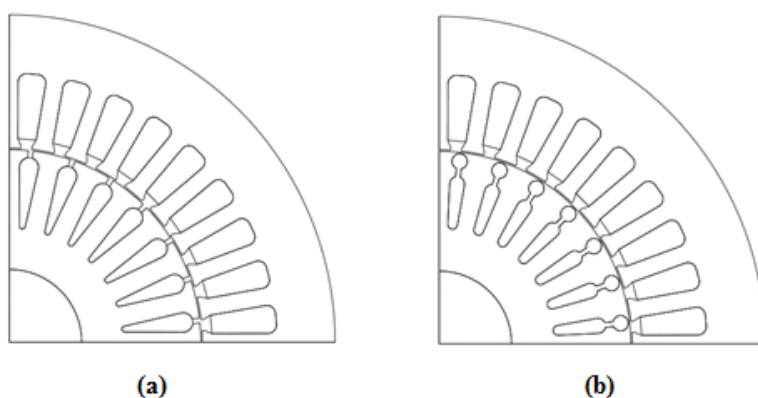


Kuva 23. IEC-runkokoon 90 moottorin optimoinnin tulokset pyöreällä roottoriuralla. I_s on käynnistysvirta, I_n nimellisvirta, T_s käynnistysmomentti, T_m huippumomentti ja T_n on nimellismomentti. IE2, IE3 ja IE4 ovat IEC-hyötysuhdeluokkia.

Vertailtaessa pelkästään kuparin ja alumiinin ominaisuuksia voidaan huomata että hyötysuhteeseen saadaan lähes 2 %:n parannus lasketuilla arvoilla. Kuparin käyttö roottorin käämitysmateriaalina kuitenkin laskee käynnistysmomenttia, nostaa käynnistysvirtaa ja roottoritankojen painoa. Optimoidulla rakenteella on pyritty parantamaan näitä ominaisuuksia, pitäen samalla hyötysuhde mahdollisimman hyvänä. Käynnistysvirtaa pystytään hieman laskemaan ja käynnistysmomenttia hieman nostamaan optimiratkaisulla ilman merkittävää hyötysuhteen laskua.

Avain-roottoriura

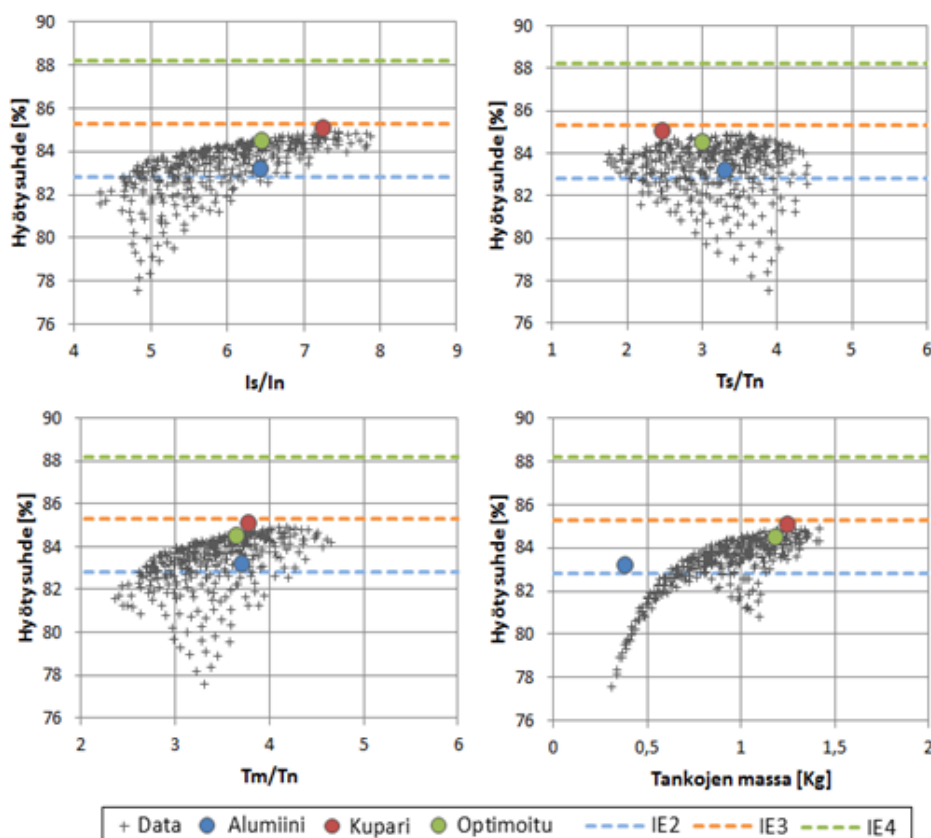
Tarkastellaan seuraavaksi saman runkokoon oikosulkumoottorin uramuodon optimointia vaihtamalla pyöreän roottoriuran tilalle avain-ura. Avain-uran hyödyntämisen mahdollisuuksia tarkasteltiin jo aiemmin luvun 3 kirjallisuuskatsauksessa, jossa esiteltiin kuinka avain-uran kaksoishäkki-rakenteen avulla pystytään parantamaan erityisesti moottorin käynnistysominaisuuksia. Avain-roottoriura onkin usein jo käytössä IEC-runkokokoon 132 moottoreissa. Alkuperäistä pyöreää alumiiniroottorin uramuotoa ja kuparille optimoitua avain-roottoriuramuotoa on esitelty kuvassa 24.



Kuva 24. Alumiiniroottorin uramuoto (a) ja kuparille optimoitu roottoriuramuoto (b).

Kuvassa 25 on esitetty Optimizerin laskemia tuloksia IEC-runkokokoon 90 moottorille, kun pyöreän roottoriuran tilalle on vaihdettu avain-roottoriura. Optimointitavoitteet ja

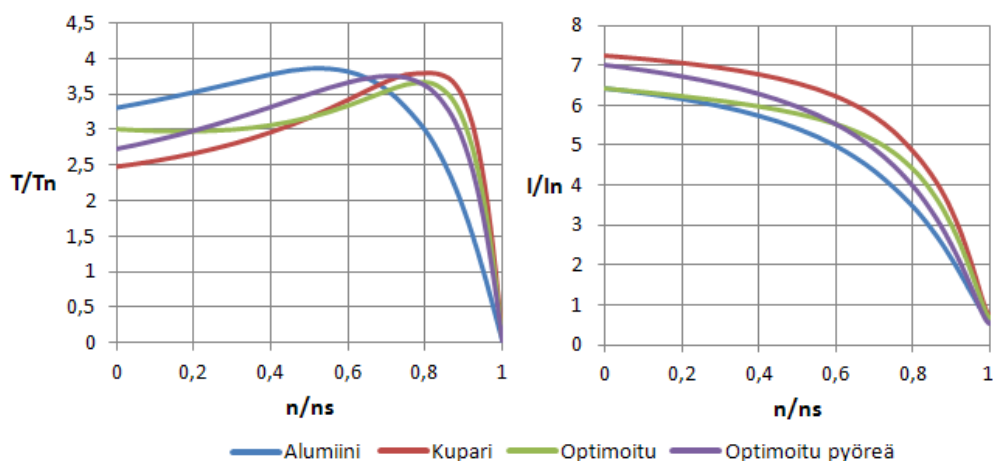
rajoitteet on määritelty kuten edellä. Ratkaisujoukosta poimittua optimiratkaisua on kuvassa merkitty vihreällä ympyrällä. Punaisella merkitty ”Kupari” sekä sinisellä merkitty ”alumiini” on laskettu alkuperäisellä pyöreällä uramuodolla.



Kuva 25. IEC-runkokoon 90 moottorin optimoinnin tulokset avain-roottoriuralla. I_s on käynnistysvirta, I_n nimellisvirta, T_s käynnistysmomentti, T_m huippumomentti ja T_n on nimellismomentti. IE2, IE3 ja IE4 ovat IEC-hyötysuhdeluokkia.

Kuvasta 25 voidaan havaita, että roottoriuramuodon vaihdon ja optimoinnin avulla pystytään parantamaan moottorin käynnistysominaisuuksia heikentämättä kuparilla saavutettua hyötysuhdetta merkittävästi. Lisäksi kuvan 25 oikeasta alareunasta voidaan havaita, että roottoriuramuodon vaihtaminen ei kasvattanut roottorikäymityksen tankojen massaa verrattuna alkuperäiseen uramuotoon, jossa materiaaliksi on vaihdettu kupari (punainen).

Edellä esiteltyjen optimointikuvaajien lisäksi eri uramuotojen vaikutuksia tarkastellun oikosulkumoottorin momentti- ja virtaominaisuuksiin voidaan tutkia lisäksi kuvasta 26. Kuvassa 26 on esitetty tarkastellun moottorin virta- ja momenttikäyrät alumiini- ja kuparikäämityksellä, pyöreän roottoriuramuodon optimoidulla rakenteella sekä avainuramuodon optimoidulla rakenteella. Alumiinikäämityksessä on alkuperäinen pyöreä roottoriuramuoto, kuparikäämityksessä alkuperäinen pyöreä roottoriuramuoto kuparikäämityksellä. Optimoiduissa rakenteissa käämitysmateriaalina on luonnollisesti kupari.

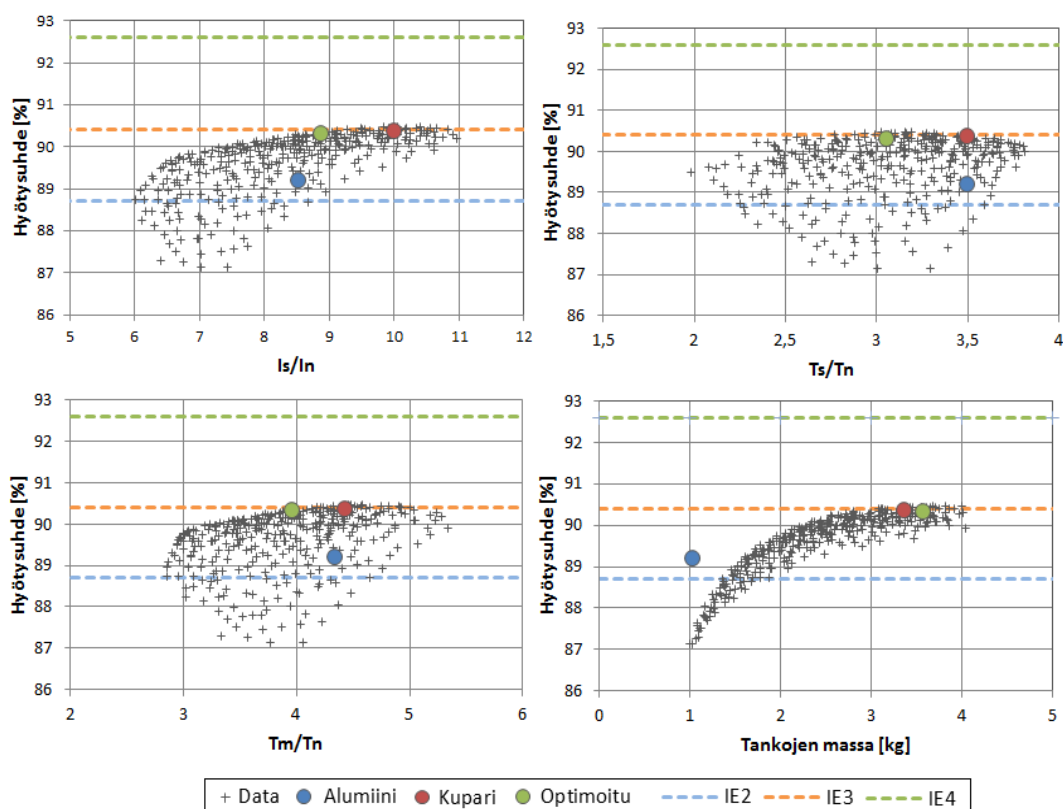


Kuva 26. Momentti- ja virtakäyrät IEC-runkokoon 90 oikosulkumoottorille eri materiaaleilla ja uramuodoilla

Kuvasta 26 nähdään, että optimoimalla alkuperäisessä moottorissa käytettyä pyöreää roottoriuraa kuparikäämitykselle moottorin suoritusominaisuuksia voidaan parantaa hieman (lilat käyrät). Hieman lähemmäs alumiinikäämityksellä saavutettuja suoritusarvoja päästään kuitenkin käyttämällä kuparikäämityksellä avain-roottoriuraa (vihreä). Kuvasta voidaan nähdä lisäksi tyypilliset erot momentti- ja virtakäyrissä pyöreän roottoriuran alumiini- ja kuparikäämityksillä. Momenttikäyristä nähdään myös kuparin käytön myötä pienentyneen jättämän vaikutus, joka siirtää huippumomentin esiintymiskohtaa lähemmäs synkroninopeutta.

4.2.2 IEC-runkokokoko 132

Seuraavaksi suoritetaan roottoriuramuodon optimointi nelinapaiselle IEC-runkokoon 132 oikosulkumoottorille. Kuten IEC-runkokoon 90 tapauksessa, tarkoituksena on vaihtaa roottorin käämitysmateriaali kupariksi ja suorittaa roottoriuramuodon optimointi käyttämällä Optimizer-työkalua. Tavoitteet ja rajoitteet on aseteltu tässäkin luvun 4.2 mukaisesti; hyötysuhdetta ja käynnistysmomenttia pyritään maksimoimaan ja käynnistysvirtaa ja roottoritankojen massaa minimoimaan. Optimointilaskennan tuloksia on esitelty kuvassa 27.

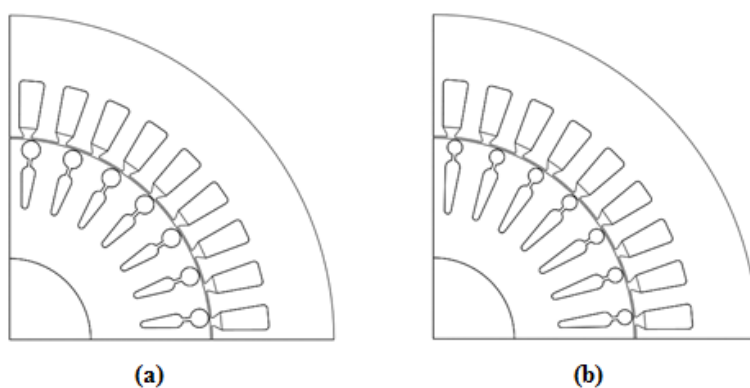


Kuva 27. IEC-runkokokoon 132 moottorin optimoinnin tulokset. I_s on käynnistysvirta, I_n nimellisvirta, T_s käynnistysmomentti, T_m huippumomentti ja T_n on nimellismomentti. IE2, IE3 ja IE4 ovat IEC-hyötysuhdeluokkia.

Vertailtaessa alkuperäistä uramuotoa käytettäessä käämitysmateriaalina alumiinia (sininen) ja kuparia (punainen), voidaan havaita hyötysuhteessa noin prosentin kasvu. Moot-

torin käynnistysvirta kasvaa, mutta käynnistys- ja maksimimomentti pysyvät lähes samoina. Pareto-optimaalisista datapisteistä on valittu optimaaliseksi ratkaisuksi yksi piste, jolla on pyritty lähestymään alumiinikäimityksellä saavutettuja suoritusominaisuuksia. Kuvasta 27 voidaan kuitenkin havaita, että pyrkimys pienentää käynnistysvirtaa samalla hyötysuhteella johtaa momenttien heikentymiseen. Uramuodon valinta datapisteistä johtaa kompromissiin, jossa täytyy valita mitä ominaisuuksia moottorilta halutaan ja mistä ollaan valmiita karsimaan.

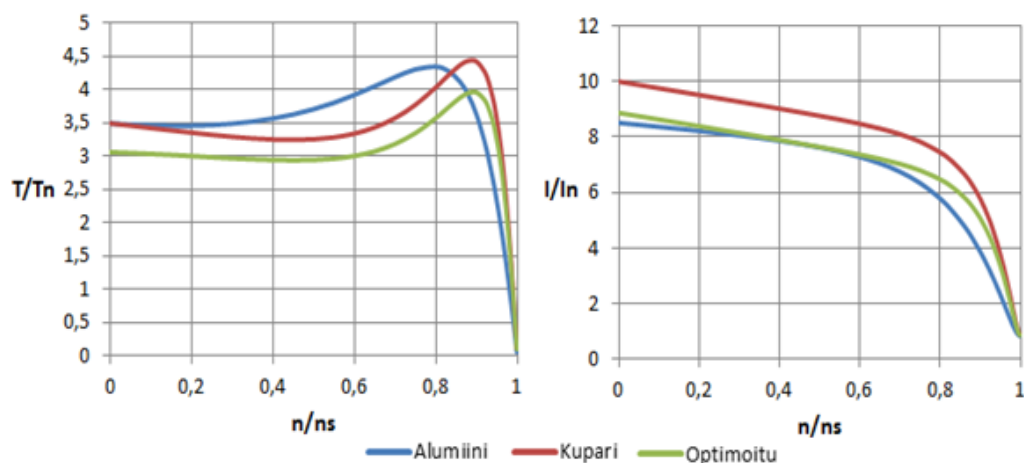
Käynnistysmomentissa ei näyttäisi tapahtuvan samanlaista pudotusta kuin IEC-runkokoon 90 moottorin pyöreällä roottoriuralla siirryttäessä roottorin alumiinikäimityksestä kuparikäimitykseen. Kuvasta 28a voidaankin havaita roottorin alkuperäisen uramuodon olevan avain-ura, jonka optimoitu rakenne on esitetty saman kuvan b)-kohdassa. Alkuperäisen uramuodon avain-uramuodolla moottorin momenttiominaisuudet näyttäisivät säilyvän roottorikäimitysmateriaalin vaihdoissa paremmin kuin runkoon 90 tapauksessa tarkastellun pyöreän uramuodon tapauksessa.



Kuva 28. Alumiiniroottorin uramuoto (a) ja optimoitu roottoriuramuoto kuparille (b).

Moottorin momentti- ja virtakäyriä IEC-runkokoon 132 oikosulkumoottorille on esitelty kuvassa 29. Kuvasta nähdään, että pelkällä kupariin vaihdolla saavutetaan lähes alumiinin tasoiset momenttiominaisuudet. Käynnistysvirran voidaan kuitenkin havaita kasvavan hieman. Tässä valitulla optimoidulla rakenteella (vihreä) pystytään laskemaan

käynnistysvirta alumiinin tasolle, mutta samalla joudutaan kuitenkin tinkimään momenttiominaisuuksista.

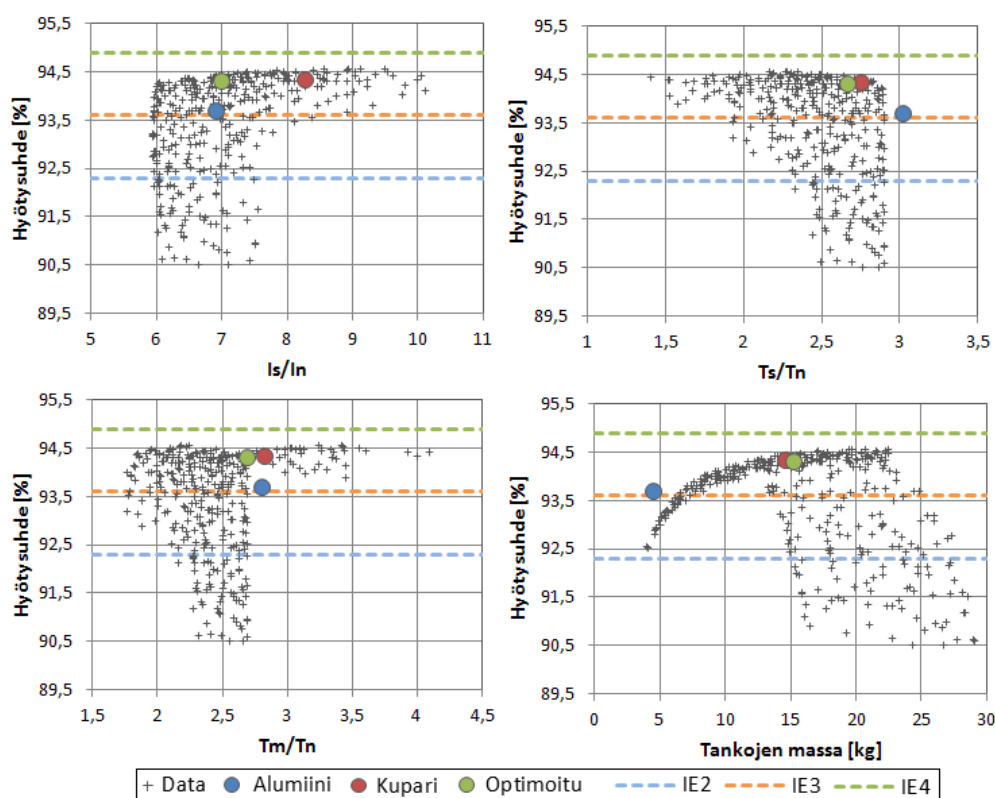


Kuva 29. Momentti- ja virtakäyrät IEC-runkokoon 132 oikosulkumoottorille eri materiaaleilla ja uramuodoilla

4.2.3 IEC-runkokoko 200

Viimeisenä tarkasteltavana moottorina on nelinapainen IEC-runkokoon 200 oikosulkumoottori. Toisin kuin edellä tarkastellut IE2-hyötysuhdeluokan 90 ja 132 runkokoiden oikosulkumoottorit, tässä tarkasteltava runkokoon 200 moottori kuuluu IE3-hyötysuhdeluokkaan. Kuten aiempien moottoreiden tapauksessa, tällekin moottorille suoritetaan roottoriuramuodon optimointilaskenta Optimizer-työkalulla. Optimointilaksennan tuloksia on esitelty kuvassa 30.

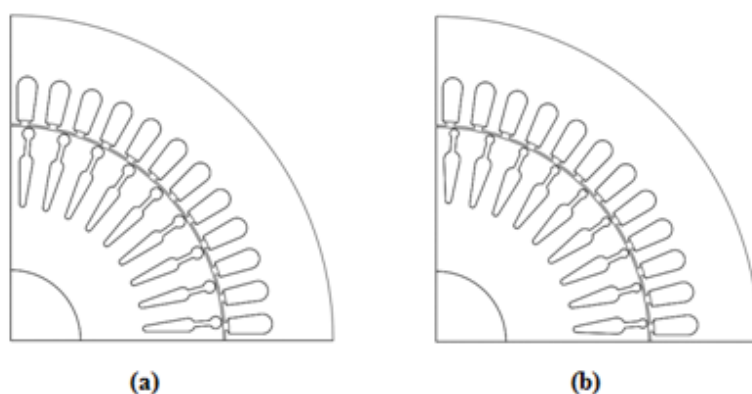
Siirryttäessä roottorin alumiinikäähämyksestä (sininen) kuparikäähämykseen (punainen) voidaan hyötysuhteessa havaita noin puolen prosentin kasvu. Kasvu on huomattavasti pienempää verrattaessa esimerkiksi runkokoon 90 moottoriin, jossa laskelmien mukaan hyötysuhteen kasvu voisi olla lähes 2 %. Kuten IEC-runkokoon 132 oikosulkumoottorin tapauksessakin, moottorin momenttiominaisuudet pysyvät kuparikäähämyksellä lähes



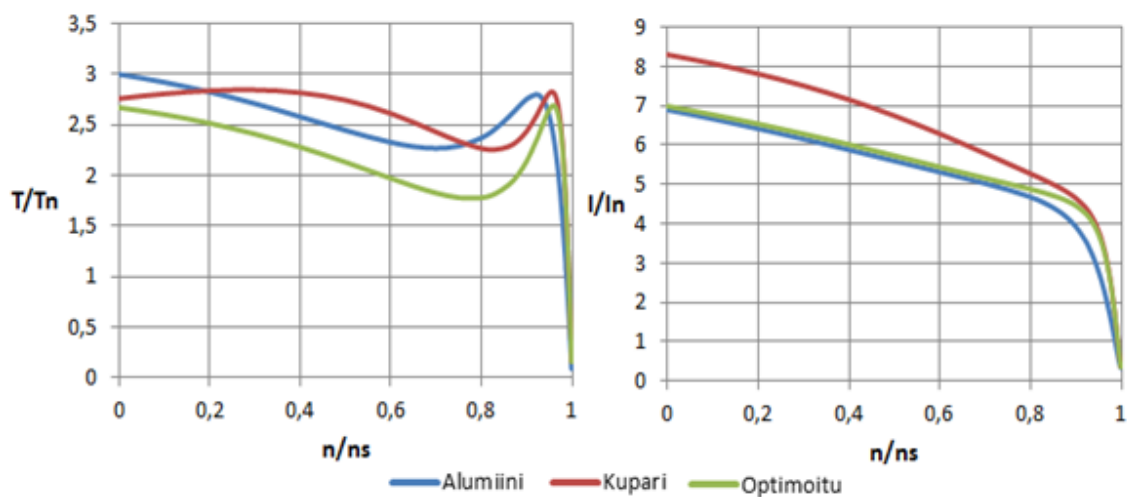
Kuva 30. IEC-runkokoon 200 moottorin optimoinnin tulokset. I_s on käynnistysvirta, I_n nimellisvirta, T_s käynnistysmomentti, T_m huippumomentti ja T_n on nimellismomentti. IE2, IE3 ja IE4 ovat IEC-hyötysuhdeluokkia.

samoina kuin alumiinikäämityksellä. Käynnistysvirran voidaan kuitenkin havaita kasvavan. Pareto-optimaalisista Optimizerin tuottamista ratkaisuksista on valittu yksi ratkaisu (vihreä), jolla on pyritty momenttien ja käynnistysvirran kannalta alumiinin kaltaisiin suoritusarvoihin. Valitun optimaalisen ratkaisun tuottama uramuoto ja alkuperäisen alumiiniroottorikäämityksen uramuotoa on esitelty kuvassa 31.

Optimointitulosten lisäksi runkokoon 200 moottorin käyttäytymistä voidaan tarkastella kuvassa 32 esitettyjen virta- ja momenttikäyrien avulla. Valitulla optimiratkaisulla on pystytty laskemaan käynnistysvirtaa, mutta momenttiominaisuuksissa joudutaan hieman tinkimään verrattaessa alumiiniin ja kupariin. Tarvittaessa ratkaisujoukosta voitaisiin hakea momenttiominaisuuksiltaan parempaa ratkaisua, jos käynnistysvirran annetaan olla hieman suurempi.



Kuva 31. Alumiiniroottorin uramuoto (a) ja optimoitu roottoriuramuoto kuparille (b).



Kuva 32. Momentti- ja virtakäyrät IEC-runkokoon 200 oikosulkumoottorille eri materiaaleilla ja uramuodoilla.

4.3 Tulosten vertailu

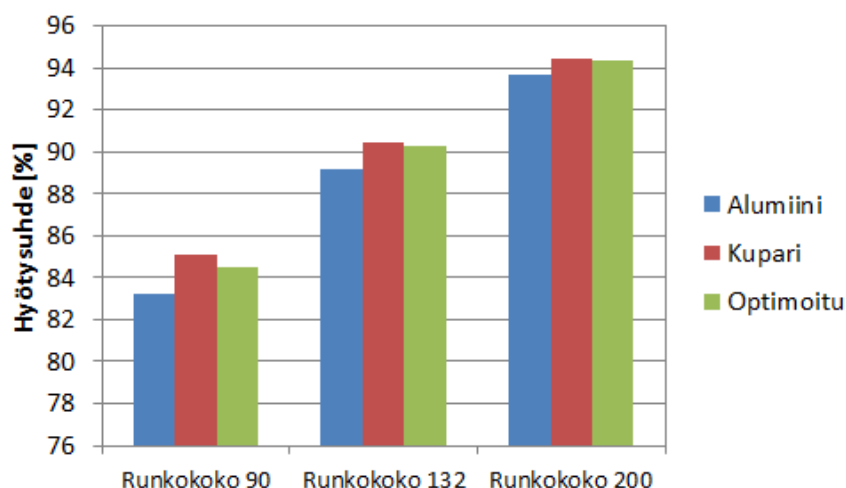
Edellisissä kappaleissa tarkasteltiin roottoriuramuodon optimointia Optimizer-työkalun avulla IEC-runkokoon 90, 132 ja 200 oikosulkumoottoreille. Seuraavaan taulukkoon on koottu yhteenvedona FCSmekillä laskettuja suoritusarvoja edellä mainituille moottoreille. FCSmekillä ratkaistut arvot on suhteutettu tuotetietokannan ja koestustulosten avulla vastaamaan paremmin todellisia arvoja.

Taulukko 4. IEC-runkokoiden 90, 132 ja 200 laskettujen suoritusarvojen yhteenveto.

IEC-runkokoko 90							
	Eff [%]	Is/In	Ts/Tn	Tm/Tn	Temp. rise [K]	rpm	cosfii
Al	83,2	6,60	3,30	3,70	35,5	1423	0,78
Cu	85,1	7,44	2,48	3,77	31,0	1454	0,78
Opt. Pyöreä	84,6	7,20	2,74	3,72	31,1	1444	0,78
Opt. Avain	84,5	6,58	3,07	3,64	31,6	1450	0,76
IEC-runkokoko 132							
	Eff [%]	Is/In	Ts/Tn	Tm/Tn	Temp. rise [K]	rpm	cosfii
Al	89,2	8,40	3,50	4,20	47,8	1463	0,76
Cu	90,4	9,94	3,52	4,19	42,4	1481	0,76
Optimoitu	90,3	8,71	3,10	3,75	44,9	1482	0,75
IEC-runkokoko 200							
	Eff [%]	Is/In	Ts/Tn	Tm/Tn	Temp. rise [K]	rpm	cosfii
Al	93,7	6,90	3,00	2,80	58,5	1477	0,83
Cu	94,4	8,29	2,76	2,83	51,7	1487	0,83
Optimoitu	94,3	6,99	2,67	2,69	51,7	1486	0,82

Taulukossa 4 esitettyjä hyötysuhteita tarkasteltaessa voidaan havaita hyötysuhteen kasvavan kun roottorin käämitysmateriaali vaihdetaan alumiinista kupariin. Kuparin hyödyt kuitenkin näyttävät laskevan mitä suurempaan moottoriteholuokkaan siirrytään. Pienemmällä moottoreilla häviötehojen suhteellinen osuus kaikesta verkosta otetusta tehosta on paljon suurempi kuin isommilla moottoreilla. Tämä näkyy esimerkiksi eri teholuokille asetetuilla IE-hyötysuhdevaatimuksilla, jotka ovat alhaisemmat pienemmän teholuokan moottoreille. Taulukossa 4 esitettyjen tulosten hyötysuhteita eri runkokoon moottoreille on havainnollistettu lisäksi kuvassa 33.

Eri moottorikokojen käynnistysvirtojen suhdetta nimellisvirtaan verrattaessa huomataan, että I_s / I_n -arvo kasvaa kaikilla kun roottorikämmityksen alumiini korvataan kuparilla. Käynnistysmomentin suhde nimellismomenttiin (T_s / T_n) voidaan havaita laskevan merkittävästi vain runkokoon 90 moottorilla, jossa alkuperäisenä roottoriuramuotona on



Kuva 33. Lasketut hyötysuhteet alumiini- ja kupariroottorilla sekä optimoidulla roottorirakenteella.

pyöreä uramuoto. Lasketuissa arvoissa maksimimomentin suhde nimellismomenttiin pysyi lähes muuttumattomana kaikilla moottoreilla.

Tarkasteltaessa taulukon muita arvoja voidaan havaita kupariin siirtymisen kasvattavan pyörimisnopeutta ja laskevan staattorikämmityksen lämpenemää. Kuten aiemmin luvussa 3 todettiin, suurempi pyörimisnopeus voi johtaa isompaan energian kulutukseen pumppu- ja puhallin tyyppisissä käytöissä, joissa kuormitus kasvaa neliöllisesti nopeuden lisääntyessä. Alentunut staattorikämmityksen lämpenemä on puolestaan aina edullinen moottorin eliniän kannalta, sillä staattorikämmityksen eristyksen rikkoontuminen on yksi suurimmista yksittäisistä syistä oikosulkumoottorin vikaantumiseen.

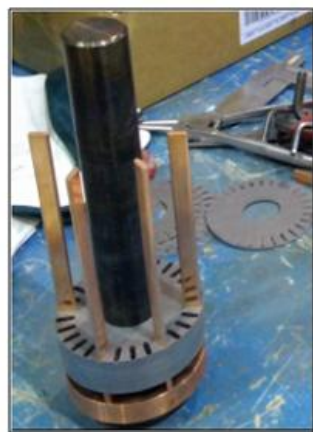
Laskennallisten tulosten perusteella kuparin käytön hyödyt tulevat erityisesti esiin pienissä oikosulkumoottoreissa. Runkokoon 90 ja 132 tapauksissa hyötysuhde pystyttiin nostamaan kuparin avulla IE2-hyötysuhdeluokasta IE3-hyötysuhdeluokan rajoille. Hyötysuhteen nostaminen korkeimmalle IE4-hyötysuhdeluokan tasolle vaatii kuitenkin lisätoimenpiteitä oikosulkumoottorin rakenteessa ja materiaaleissa. Laskennalliset tulokset ovat kuitenkin lupaavia, mutta kuparin todelliset hyödyt selviävät vasta kattavassa prototyypitestauksissa.

5 PROTOTYYPIN SUUNNITTELU JA TESTAUS

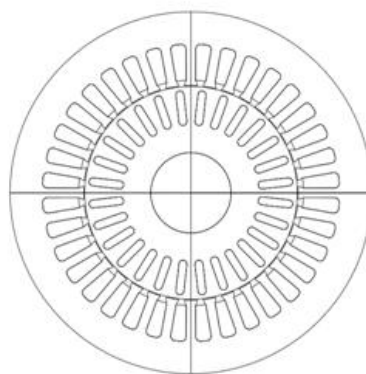
Kuparin vaikutuksia oikosulkumoottorin roottorin käämitysmateriaalina tutkittiin lisäksi pienen prototyypimoottorin avulla. Prototyypiksi valittiin kuparikäämityksen käytölle otollinen IEC-runkokoon 90 oikosulkumoottori. Prototyypin pohjana oli tavallinen 1,5 kW:n oikosulkumoottori, jonka alumiiniroottori korvattiin kupariroottorilla. Valmistusteknisistä syistä prototyypiroottorin käämitys toteutettiin painevalun sijasta kuparitangoilla ja tankojen päihin juotetuilla oikosulkurenkailla.

5.1 Prototyypin valmistaminen

Prototyypin suunnittelun pohjana käytettiin olemassa olevan IEC-runkokoon 90 oikosulkumoottorin laskelmaa. Kupariroottorin mekaaniset mitat ovatkin vertailun vuoksi pyritty pitämään mahdollisimman lähellä alumiiniroottorissa käytettyjä mittoja. Kupariroottorin latomista kasaustuurnaan ja suunnittelussa käytettyä roottoriuramuotoa on esitelty kuvassa 34.



(a)



(b)

Kuva 34. Prototyyppi kasaustuurnassa (a) ja suunniteltu roottoriuramuoto (b).

Valmistuksen helpottamiseksi roottoriurasta tehtiin suorakaiteen muotoinen, ja suorakaiteiden päihin tehtiin pienet pyöristykset. Kupariroottoriuran kokonaispinta-ala pyrittiin pitämään kuitenkin mahdollisimman lähellä alumiiniroottorin pinta-alaa. Käämitystankojen pituus mitoitettiin roottoripakettia 20 mm pidemmäksi (10 mm molempiin päihin), jotta oikosulkurenkaiden ja paketin väliin jäisi molempiin päihin tilaa tehdä oikosulkurenkaan ja tankojen välinen juotos. Juotettu kupariroottori ja alkuperäisessä oikosulkumoottorissa käytetty alumiiniroottori on esitetty kuvassa 35.



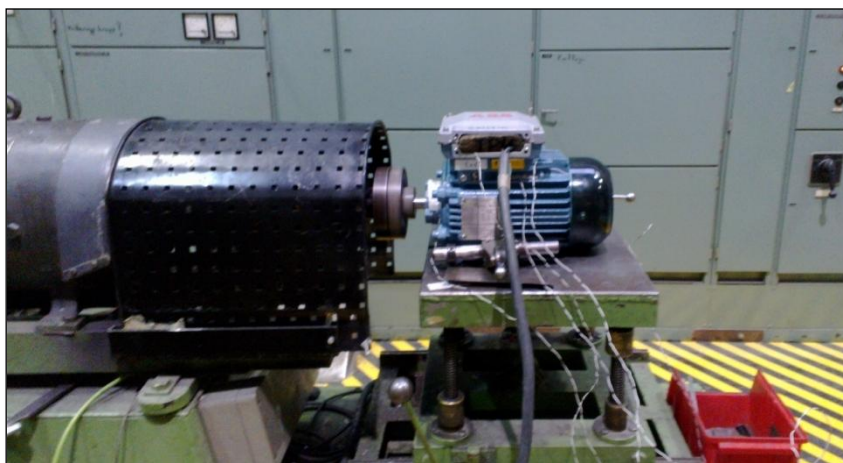
Kuva 35. Alhaalla alkuperäinen alumiiniroottori ja ylhäällä valmistettu kupariroottori.

Tarkasteltaessa kuvassa 35 esiteltyjä alumiiniroottoria ja prototyypiroottoria, voidaan havaita että prototyypiroottorin oikosulkurenkaissa ei ole samanlaisia tuuletinsiivekkeitä kuin alumiiniroottorissa. Tuuletinsiivekkeiden puuttuminen heikentää moottorin jäähdytystä. Oikosulkurenkaan ja rautapaketin välisen raon voidaan kuitenkin olettaa tuottavan viilentävää ilmavirtaa roottorin pyöriessä. Lisäksi suurehkot oikosulkurenkaat johtavat tehokkaasti lämpöä pois roottorista. Edellä esitellyistä kuvista 34 ja 35 voidaan lisäksi havaita prototyypiroottorin roottoriuran olevan täysin suora ilman vinoutettua rakennetta. Vinoutetussa rakenteessa sama roottoriura on akselipäässä esimerkiksi yhden staattoriuran verran oikealla tuuletin päähän verrattuna.

Uravinoudella pyritään mm. poistamaan yliaaltoja sekä karsimaan momenttivärähtelyä ja meluhaittoja.

5.2 Prototyypin hyötysuhdemittaus

Prototyypimoottorille suoritettiin standardin IEC 60034-2-1 mukainen hyötysuhdemittaus koekentällä, jossa mittaukset suoritettiin sekä kupari- että alumiinimoottorilla. Koekentällä koestettavan moottorin akseli kiinnitetään momenttianturin välityksellä generaattorina toimivaan kuormakoneeseen. Momenttianturin avulla pystytään mittaamaan akselilta otettava mekaaninen teho. Kolmivaiheinen verkkosyöttö moottorille on toteutettu säätömuuntajan kautta. Lisäksi moottorin runkoon ja käämin päihin on kiinnitetty lämpöanturit, joiden avulla pystytään mittaamaan rungon ja käämin lämpötila. **Kuvassa 36** on havainnollistettu koestusjärjestelyjä.



Kuva 36. Prototyypimoottori (kuvassa oikealla) testipenkissä.

Tyypillisesti mittaukset aloitetaan momentti- ja virtakäyrien mittaamisella koestettavalle moottorille. Tämän jälkeen vertailukelpoisten testitulosten saamiseksi koestettava moottori on ajettava normaaliin käyttölämpötilaan, jolloin käämin lämpötilan nousunopeus

on asettunut 2 K tunnissa. Näin pienellä 1,5 kW:n oikosulkumoottorilla lämpenemä-ajovie noin kahdesta kolmeen tuntiin. (IEC 2007: 30)

Kun koestettava moottori on saavuttanut riittävän käyttölämpötilan, voidaan varsinaiset testit aloittaa. Ensimmäisenä koestettava moottori pysäytetään ja määritetään moottorin jäähtymiskäyrä staattori-resistanssin mittauksella sekä roottorin lämpötila mittaamalla roottorin lämpötila erillisellä mittalaitteella roottorin oikosulkurenkaan päästä. Jäähtymiskäyrän määrittäminen tapahtuu aloittamalla staattori-resistanssin mittaus 30 sekunnin kohdalla moottorin pysäytyksestä ja mitataan väliajoin 45, 60, 75, 90, 120, 150, 180 ja 210 sekuntia. Mitattujen tulosten perusteella pystytään ekstrapoloimaan staattori-resistanssin arvo hetkellä 0 sekuntia.

Kuormituskoe

Resistanssimittauksien jälkeen koestettava moottori käynnistetään uudelleen ja moottorille suoritetaan kuormituskoe. Kuormituskoe suoritetaan kuudella eri kuormituksella, 25 %:n kuormituksen ja 150 %:n kuormituksen välillä. Kuormituskoe tulee aloittaa suurimmalla kuormituksella, ja edetä siitä järjestyksessä kohti pienintä kuormitusta. Kuormituskokeen avulla pystytään määrittämään koestettavan moottorin lisähäviöt P_{LL} .

Oikosulkukoe

Kuormituskokeen jälkeen suoritetaan koestettavalle moottorille oikosulkukoe, jossa koestettavan moottorin akseli lukitaan paikalleen. Oikosulkukokeessa koestettavan moottorin syöttö aloitetaan pienellä jännitteellä esim. 10 %:lla nimellisjännitteestä ja jännitettä kasvatetaan kunnes oikosulkuvirta on puolitoistakertainen nimellisvirtaan verrattuna. Oikosulkukoe täydellä jännitteellä ajettaessa saattaisi rikkoa staattorikämmityksen. Lisäksi pienellä jännitteellä ajettaessa jännitteestä riippuvat rautahäviöt ovat pieniä. Oikosulkukokeen avulla pystytään määrittämään mm. oikosulkuteho P_K , oikosulkuvirta I_K sekä oikosulkuimpedanssi Z_K .

Tyhjäkäyntikoe

Viimeisenä koestettavan moottorin akseli irrotetaan kuormakoneesta ja moottorille suoritetaan tyhjäkäyntikoe. Tyhjäkäyntikokeen avulla pystytään määrittämään koestettavan moottorin rautahäviöt P_{Fe} , tuuletus- ja kitkahäviöt P_{Fr} sekä tyhjäkäyntivirtalämpöhäviöt P_{0Cu} . Vähentämällä tyhjäkäyntivirtalämpöhäviöt kokonaistyhjäkäyntihäviöistä P_0 saadaan laskettua rautahäviöiden sekä tuuletus- ja kitkahäviöiden osuus kokonaistyhjäkäyntihäviöistä.

Varsinaisten tyhjäkäyntihäviöiden mittaaminen suoritetaan syöttöjännitteen funktiona 0,15 kertaista nimellisjännitteestä aina 1,2 kertaiseen nimellisjännitteeseen asti. Mittaustulosten perusteella voidaan piirtää kuvaaja, jossa tyhjäkäyntihäviöiden ja tyhjäkäyntivirtalämpöhäviöiden erotus on esitetty nimellisjännitteeseen suhteutetun syöttöjännitteen neliön funktiona. Tuuletus- ja kitkahäviöt pystytään määrittämään extrapoloimalla mittaustulosten perusteella tehoarvo nollajännitteelle.

5.3 Hyötysuhdemittauksen tulokset

5.3.1 Ensimmäinen versio

Ensimmäisenä testattiin prototyyppimoottori alkuperäisellä alumiinipainevaluroottorilla (Alumiini) sekä prototyyppikupariroottorin ensimmäisellä versiolla (Kupari 1). Testeistä saatuja tuloksia on esitelty taulukossa 5.

Tuloksista voidaan havaita, että ensimmäisellä kupariprototyypillä ei juuri saavutettu parempaa hyötysuhdetta kuin alkuperäisellä alumiiniroottorilla. Kupariroottorin jättämän voidaan havaita kuitenkin olevan jopa hieman alumiiniroottorilla mitattua jättämää suurempi. Teorian ja simulointien perusteella kuparin paremman sähkönjohtavuuden ansiosta roottoriresistanssin tulisi pienentyä ja täten jättämän tulisi laskea alle alumiiniroottorilla mitattun jättämän. Lisäksi pienemmällä roottoriresistanssilla olisi mahdollista saavuttaa vähennystä roottorin virtalämpöhäviöihin. Roottorin virtalämpöhäviöiden

Taulukko 5. Mittaustulokset alumiiniroottorilla ja kupariroottorilla.

	η [%]	U [V]	I [A]	$\text{Cos } \varphi$	n [rpm]	s [%]
Alumiini	82,6	400,1	3,39	0,772	1425,6	4,96
Kupari 1	82,9	400,1	3,44	0,758	1420,8	5,32
	P_{Fw} [W]	P_{Fe} [W]	$P_{\text{Cu,s}}$ [W]	$P_{\text{Cu,r}}$ [W]	P_{LL} [W]	P_{Tot} [W]
Alumiini	6	68,8	147,4	77,2	11,1	310,5
Kupari 1	5,8	50,8	154,6	85	11,8	308,3
	I_k [A]	X_k [Ω]	R_k [Ω]	P_0 [W]	I_0 [A]	Z_0 [Ω]
Alumiini	16,92	10,48	8,74	134,80	2,08	110,82
Kupari 1	14,27	13,71	8,58	108,80	1,97	117,41
	T_s/T_n	T_m/T_n	I_s/I_n	Lämpen. [K]	Runko [°C]	Root. [°C]
Alumiini	3,04	3,43	6,14	35,9	45,8	63,9
Kupari 1	1,54	1,85	-	36,9	40	62

voidaan ensimmäisessä prototyypissä havaita olevan hieman suuremmat kuin alumiiniroottorilla.

Prototyypiroottorissa on havaittavissa odottamatonta roottorin lisäresistanssia. Vertailtaessa alumiini- ja kupariroottorien oikosulkuvirtoja I_k , voidaan havaita kupariroottorin alhaisempi oikosulkuvirta. Oikosulkuvirran lasku johtuu taulukossa esitetystä suuremmasta kupariroottorin oikosulkureaktanssista X_k . Prototyypiroottorin rakenteessa voidaan havaita kaksi reaktanssia lisäävää tekijää: roottoriura-aukon päällä oleva rautakanas ja tangon lisäpituus paketin ja oikosulkurenkaan välissä. Tangon lisäpituudesta aiheutuva reaktanssi on kuitenkin ilmassa kulkevaa vuota, joten sen vaikutus voidaan olettaa vähäiseksi.

5.3.2 Toinen versio

Prototyypiä pyrittiin parantamaan avaamalla roottorin ura-aukot kuvassa 37 esitettyllä tavalla oikosulkureaktanssin pienentämiseksi. Tarkoituksena oli tutkia olisiko tässä ti-

lanteessa mahdollista että suuri oikosulkuimpedanssi rajoittaa virtaa, jonka seurauksena moottorin kippimomentti jää alhaiseksi, aiheuttaen loivalla momenttikäyrällä kasvaneen jättämän. Mitattuja arvoja prototyypin toisella versiolle on esitelty taulukossa 6. Paranneltu versio on merkitty taulukossa ”Kupari 2”. Lisäksi taulukossa on esitetty vertailua varten alkuperäisellä alumiiniroottorilla mitatut arvot (Alumiini) sekä ensimmäisellä prototyyppiversiolla mitatut arvot (Kupari 1).



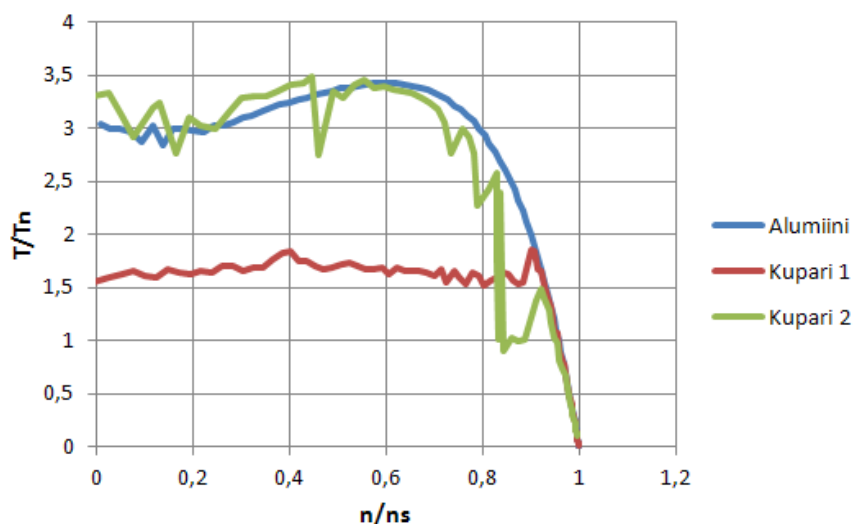
Kuva 37. Prototyyppirottori avatuilla roottoriura-aukoilla.

Taulukon 6 tuloksista voidaan havaita, että rautakannaksen poistaminen nosti prototyypin toisen version (Kupari 2) oikosulkuvirtaa I_k ja laski oikosulkureaktanssia X_k . Muutoksilla ei kuitenkaan saatu parannettua hyötysuhdetta ja jättämäkin pysyi lähes muuttumattomana. Rautahäviöiden P_{Fe} voidaan puolestaan havaita kasvaneen hieman uraukkojen avaamisen myötä.

Rautakannaksen poisto nostaa käynnistys ja kippimomenttia, mutta mitattuihin momenttikäyriin ei näiden kupariprototyyppien kohdalla voi täysin luottaa. **Kuvan 38** perusteella molempien kupariroottorien momenttikäyrissä on havaittavissa suurta äkillistä arvo-

Taulukko 6. Mittaustulokset alumiiniroottorilla ja kupariroottoreilla.

	η [%]	U [V]	I [A]	$\cos \varphi$	n [rpm]	s [%]
Alumiini	82,6	400,1	3,39	0,772	1425,6	4,96
Kupari 1	82,9	400,1	3,44	0,758	1420,8	5,32
Kupari 2	82,7	400,7	3,42	0,765	1422,9	5,14
	P_{Fw} [W]	P_{Fe} [W]	$P_{Cu,s}$ [W]	$P_{Cu,r}$ [W]	P_{LL} [W]	P_{Tot} [W]
Alumiini	6	68,8	147,4	77,2	11,1	310,5
Kupari 1	5,8	50,8	154,6	85	11,8	308,3
Kupari 2	4,9	62	153,8	82	12	314,4
	I_k [A]	X_k [Ω]	R_k [Ω]	P_0 [W]	I_0 [A]	Z_0 [Ω]
Alumiini	16,92	10,48	8,74	134,80	2,08	110,82
Kupari 1	14,27	13,71	8,58	108,80	1,97	117,41
Kupari 2	16,98	10,22	8,97	130,50	2,17	106,57
	T_s/T_n	T_m/T_n	I_s/I_n	Lämpen. [K]	Runko [°C]	Root. [°C]
Alumiini	3,04	3,43	6,14	35,9	45,8	63,9
Kupari 1	1,54	1,85	-	36,9	40	62
Kupari 2	3,3	3,49	-	36,7	-	-

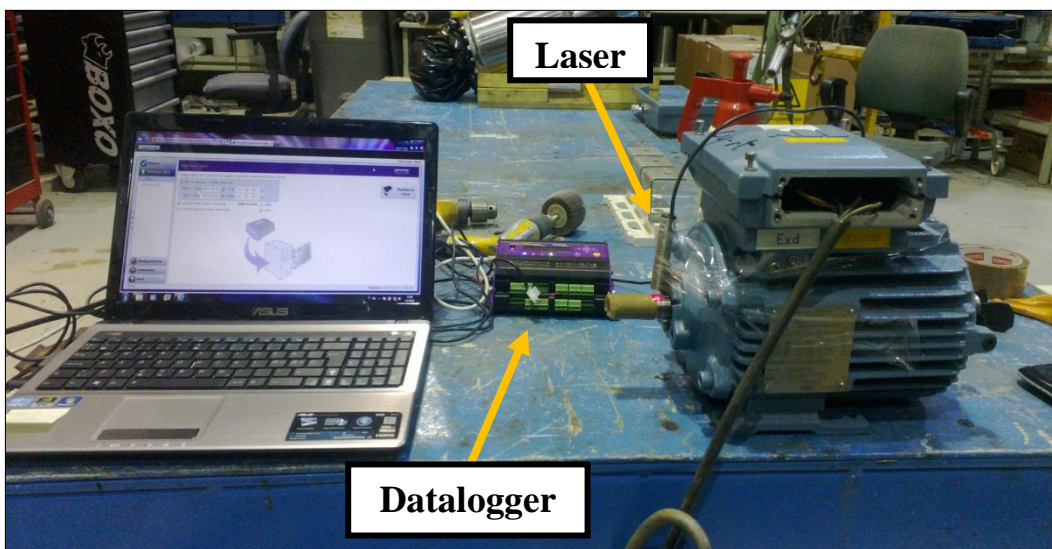
**Kuva 38.** Prototyypimoottorien momenttikäyrät.

jen vaihtelua. Momenttikäyrien perusteella voidaan todeta, ettei prototyypin rakenteellinen toteutus ole täysin optimaalinen.

5.4 Tuuletus- ja kitkahäviöiden tarkempi mittaus

Koekentällä tehtyjen mittausten lisäksi haluttiin selvittää tarkemmin prototyypimoottorin tuuletus- ja kitkahäviöt alumiini- ja kuparimoottorilla. Koekentällä mitattujen tuuletus- ja kitkahäviöiden voidaan olettaa todellisuudessa olevan hieman suuremmat. Varsinainen häviöiden laskenta on toteutettu Mathematica-ohjelmalla, mutta laskennan periaatteet ja tulokset on esitelty tässä kappaleessa.

Tuuletus- ja kitkahäviöiden tarkempaa mittausta varten rakennettiin kuvassa 39 esitetty mittauskyskentä. Mittauskytkennän avulla on tarkoitus mitata oikosulkumoottorin hidastuvuusikäyrä, kun täydessä tyhjäkäynnissä olevan moottorin syöttö katkaistaan ja moottorin annetaan pysähtyä vapaasti. Pyörimisnopeuden määrittäminen tapahtuu optisen takometrin avulla, jonka muodostavat moottorin akseliin osoittava laser ja tiedonkerääjä DTM80 data logger. Moottorin akselille on kiinnitetty pieni heijastetarra, jonka laser havaitsee tarran osuessa laserin valokeilaan. Laser lähettää tiedon data loggerille aina kun akselin tarran ohittaa laserin valon. Mittaustulokset rekisteröityvät mittaushjelmaa pyörittävälle PC:lle, josta voidaan lukea akselin kierrosten määrä sekunnissa.



Kuva 39. Tuuletus- ja kitkahäviöiden mittausrjestely.

Hidastuvuuskäyrämittaukset suoritettiin sekä alumiini- että kupariroottorille. Ensimmäisenä mitattiin hidastuvuuskäyrä tuulettimen kanssa ja toinen mittaus tehtiin ilman tuuletinta. Molemmat mittaukset toistettiin kolme kertaa. Taulukossa 7 on esitetty hidastuvuuskäyrämittauksen tulokset alumiiniroottorilla ja taulukossa 8 mittaukset kupariroottorilla. Ajan hetkellä 0 s moottorin syöttö katkaistaan ja sen annetaan pysähtyä vapaasti. Taulukoissa esitetyt arvot ovat optisen takometrin mittaamia kierroksia/sekunti.

Taulukko 7. Hidastuvuuskäyrämittauksen tulokset alumiiniroottorilla.

Aika [s]	Al_basic 1 [r/s]	Al_basic 2 [r/s]	Al_basic 3 [r/s]	Al_nofan 1 [r/s]	Al_nofan 2 [r/s]	Al_nofan 3 [r/s]
0	24,26	24,96	24,94	24,97	24,97	24,95
1	19,78	21,96	20,57	24,00	21,99	21,52
2	16,81	18,21	17,35	20,74	19,53	19,22
3	14,04	15,23	14,44	18,46	17,37	16,99
4	11,92	12,65	12,22	16,30	15,29	15,09
5	10,00	10,46	10,02	14,22	13,29	13,22
6	8,29	8,68	8,22	12,52	11,66	11,58
7	6,81	7,11	6,83	10,79	9,92	9,98
8	5,74	5,79	5,49	9,19	8,47	8,50
9	4,50	4,70	4,39	7,88	7,09	7,16
10				6,57	5,89	5,98
11				5,43	4,69	4,78
12				4,40	3,83	3,90
13					3,00	3,06

Mittausdatan lisäksi tuuletus- ja kitkahäviöiden laskemiseksi täytyy määrittää roottorin hitausmomentti. Tässä työssä hitausmomentti on määritetty roottoripaketin, oikosulkurenkaiden, akselinpäiden sekä käämitystankojen muodostamien hitausmomenttien summana. Sylinterin muotoiselle kappaleelle hitausmomentti voidaan laskea yhtälöllä

$$J = \frac{1}{2}mr^2, \quad (9)$$

missä m on kappaleen massa ja r kappaleen säde. Lisäksi kun tiedetään kappaleen tiheys ρ_t ja pituus l voidaan yhtälö kirjoittaa muotoon

Taulukko 8. Hidastuvuusikäyrämittauksen tulokset kupariroottorilla.

Aika [s]	Cu_basic1 [r/s]	Cu_basic2 [r/s]	Cu_basic3 [r/s]	Cu_nofan1 [r/s]	Cu_nofan2 [r/s]	Cu_nofan3 [r/s]
0	24,99	24,97	24,94	25,01	24,98	24,97
1	22,60	22,38	21,88	22,02	23,05	23,96
2	19,86	19,45	18,97	20,11	21,32	22,27
3	17,65	16,73	16,61	18,07	19,89	20,49
4	15,91	14,62	14,47	16,32	18,29	19,07
5	13,75	12,68	12,57	14,72	17,01	17,55
6	12,17	10,95	11,02	13,45	15,61	16,09
7	10,52	9,55	9,44	12,20	14,45	14,90
8	9,09	8,12	8,12	10,91	13,22	13,49
9	7,66	6,86	6,85	9,62	11,84	12,22
10	6,59	5,88	6,01	8,31	10,75	11,05
11	5,54	4,88	4,97	7,04	9,65	9,95
12		4,17		6,09	8,41	8,75
13				5,14	7,32	7,56
14					6,39	6,61
15					5,41	5,62

$$J = \frac{1}{2}\pi\rho_t l r^4. \quad (10)$$

Lisäksi ontoille kappaleille yhtälö voidaan kirjoittaa edelleen muotoon

$$J = \frac{1}{2}\pi\rho_t l (r_1^4 - r_2^4), \quad (11)$$

missä r_1 on sylinterin ulkosäde ja r_2 on sylinterin sisäsäde. Hitausmomenttien laskenta alumiiniroottorille on esitetty kuvassa 40. Roottoripaketin inertian laskennassa kappale on oletettu umpinaiseksi rautasynteriksi. Täten akselin inertiaa laskettaessa riittää, kun ottaa huomioon vain akselinpäät, jotka tulevat paketista ulos. Käämitystankojen vaikutus on huomioitu alumiinin tapauksessa negatiivisena inertiana: alumiinin tiheydestä 2700 kg/m^3 vähennetään umpinaisessa sylinterissä käytetty raudan tiheys 7800 kg/m^3 . Vastaavasti kuparitankojen tapauksessa käämitystankojen vaikutus tuo lisäinertiaa kuparin suuremman tiheyden 8960 kg/m^3 ansiosta.

```
In[7]= funcJ[r1_, r2_, ρ_, l_] := ρ * l * 1/2 * (r1^4 - r2^4) * Pi
```

```
Roottorin inertia // Raudan tiheys 7800 kg/m^3; paketin pituus 130 mm; Roottorin halkaisija 79,4 mm)
```

```
In[8]= j1 = funcJ[(79.4 * 10^-3) / 2, 0, 7800, 0.130]
```

```
Out[8]= 0.00395658
```

```
Oikosulkurenkaiden inertia
```

```
In[9]= j2 = 2 * funcJ[77.9 * 10^-3 / 2, 47.8 * 10^-3 / 2, 2700, 0.015]
```

```
Out[9]= 0.000251329
```

```
Akselinpäiden inertia
```

```
In[10]= j3 = funcJ[0.0125, 0, 7800, 0.15]
```

```
Out[10]= 0.0000448689
```

```
Käämistangoista tulevaa lisäinertia // (2700(al) - 7800(Fe) )kg/m^3 = -5100 kg/m^3
```

```
In[1]= mtanko = 0.003 * 0.013 * 0.13 * -5100
```

```
Out[1]= -0.025857
```

```
In[2]= jTanko = 26 * 0.5 * 0.033^2 * mtanko
```

```
Out[2]= -0.000366058
```

```
In[11]= J = j1 + j2 + j3 + jTanko
```

```
Out[11]= 0.00388672
```

Kuva 40. Hitausmomentin laskenta Mathematica-ohjelmalla alumiiniroottorille.

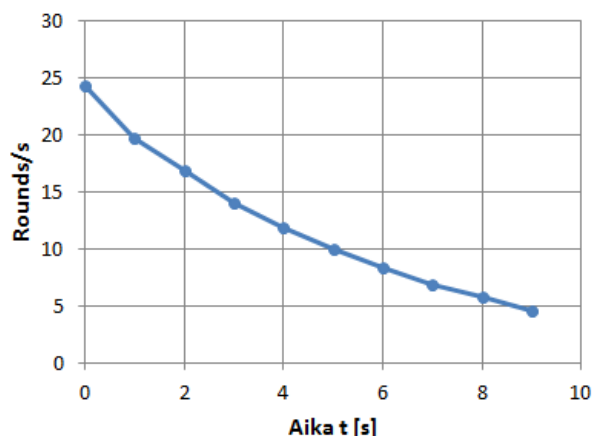
Jotta hidastuvuuskyrämittauksia pystytään käsittelemään laskennassa, täytyy mittausdata sovittaa kolmannen asteen polynomiin. Kuvassa 41 on esitetty graafisesti mittaus tulokset alumiiniroottorin ensimmäiselle hidastuvuuskyrälle.

Kuvassa esitetty mittausdata sovitetaan kolmannen asteen polynomiin Mathematican FIT-komennolla, jonka jälkeen kuvaajan approksimaatio kulmanopeudeksi muutettuna on

$$\omega(t) = 2\pi (-0,01587t^3 + 0,386t^2 - 4,37055t + 24,095). \quad (12)$$

Kulmanopeuden avulla voidaan laskea roottorin pyörimisenergia E

$$E(t) = \frac{1}{2}J\omega^2(t). \quad (13)$$



Kuva 41. Ensimmäinen alumiiniroottorin hidastuvuusikäyrä tuulettimen kanssa.

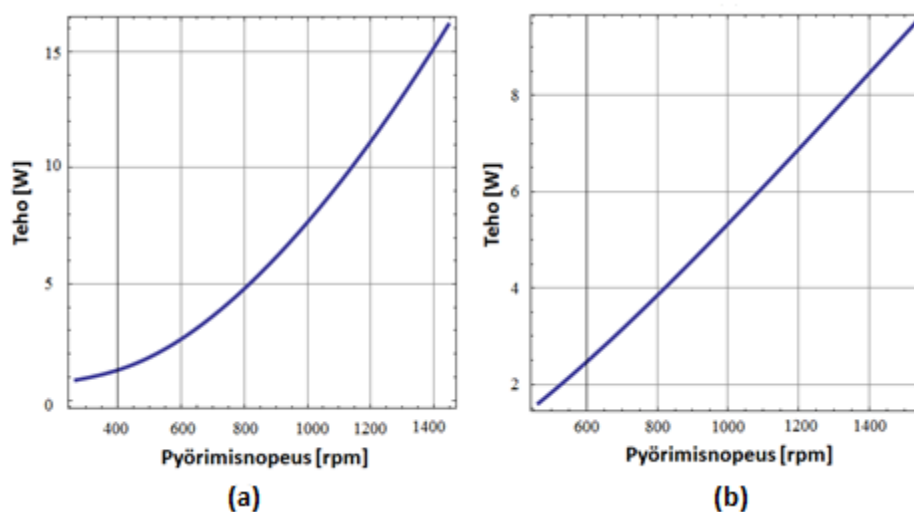
Jarrutusteho $P_j(t)$ voidaan nyt laskea derivoimalla yhtälö 13. Lisäksi soveltamalla yhdistetyn funktion derivoimissääntöä saadaan jarrutusteho kirjoitettua muotoon

$$P_j(t) = - \frac{dE}{dt} = - J \omega'(t) \cdot \omega(t). \quad (14)$$

Häviötehon kuvaaja pyörimisnopeuden funktiona on esitetty kuvassa 42a. Jarrutustehon kuvaajasta pystytään lukemaan tuuletus- ja kitkahäviöiden suuruudet. Saman kuvan b-kohtaan on piirretty häviötehon kuvaaja alumiiniroottorin ensimmäisestä testistä ilman tuuletinta. Ilman tuuletinta (b-kohta) saatujen häviöiden voidaan havaita kasvavan lineaarisesti pyörimisnopeuden kiihtyessä, kun taas tuulettimen kanssa häviöt kasvavat hieman neliöllisemmin pyörimisnopeuden noustessa.

Edellä esitetty häviöiden laskenta suoritettiin kaikille taulukoissa 7 ja 8 esitellyille mittaustilanteille. Laskennan tuloksia on esitelty taulukossa 9.

Laskennan perusteella tuuletus- ja kitkahäviöt olivat alumiiniroottorilla hieman suuremmat kuin kupariroottorilla. Tuulettimen aiheuttamien häviöiden voidaan havaita kattavan noin kolmasosan prototyypimootorin tuuletus- ja kitkahäviöistä. Verrattuna alumiiniroottoriin, kupariroottorilla oli kuparin suuremman tiheyden ansiosta suurempi hitausmomentti sekä lisäksi kupariroottorin oikosulkurenkaista puuttuivat alumiinroot-



Kuva 42. Jarrutusteho P_j pyörimisnopeuden funktiona alumiiniroottorin ensimmäisille testeille tuulettimen kanssa (a) ja ilman tuuletinta (b).

torissa käytetyt tuuletinsiivekkeet. Kupariroottorin roottoripaketin ja oikosulkurenkaan välisen aukon voidaan kuitenkin olettaa toimivan lähes alumiiniroottorin tuuletinsiivekkeiden veroisena lisätuulettimena.

Taulukko 9. Lasketut tuuletus- ja kitkahäviöt alumiini- ja kupariroottorilla normaalissa ajossa sekä ilman tuuletinta

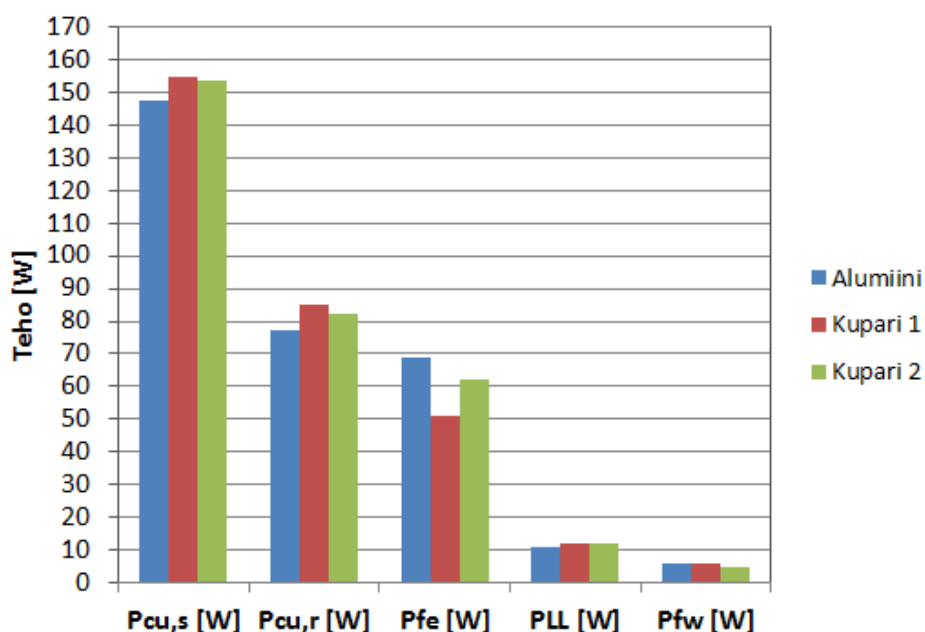
Ajokerta	Al_basic [W]	Al_no_fan [W]	Cu_basic [W]	Cu_no_fan [W]
1	16,10	9,50	13,03	12,40
2	14,76	10,75	15,50	8,60
3	16,71	10,97	15,90	7,80
ka.	15,85	10,41	14,81	9,60

Laskettuihin arvoihin vaikuttavat kuitenkin hieman toleranssi ja muut epävarmuustekijät. Hidastuvuuskäyrän mittauksessa käytetyn optisen takometrin data loggerin näytteenottotaajuus voisi olla hieman suurempi. Tehdyissä mittauksissa alhainen näytteenottotaajuus vaikuttaa erityisesti mittauksen alkuhetken 0 s ja ajanhetken 1 s välisiin mittauksituloksiin, jonka seurauksena mittaustuloksissa on nähtävissä jonkin verran heittoa

kolmen saman mittauksen välillä (esim. alumiiniroottorimittaus tuulettimella). Mittaustulosten vaihtelu johtaa hieman eroaviin hidastuvuuskäyriin joiden pohjalta häviöt lasketaan. Hidastuvuuskäyrien mittaustarkkuuden lisäksi hieman epävarmuutta laskettuihin häviöihin aiheuttaa Mathematica-ohjelman avulla suoritettu hidastuvuuskäyrän sovitus kolmannen asteen polynomiin. Sovituksen avulla saatu polynomi approksimoi hidastuvuuskäyrää melko tarkasti, mutta ei ole kuitenkaan täysin identtinen hidastuvuuskäyrän kanssa.

6 TULOSTEN TARKASTELU JA POHDINTA

Prototyypimoottorille suoritettiin ensimmäisenä standardin IEC 60034-2-1 mukainen hyötysuhdemittaus alkuperäisellä alumiiniroottorilla sekä kupariprototyypiroottorilla. Kupariroottorilla testejä suoritettiin kaksi kappaletta, joista toisessa kupariroottorin rakennetta oli pyritty parantamaan sahaamalla rautakannas pois roottorin ura-aukon päältä. Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että prototyypimoottorilla ei saavutettu täysin toivottuja tuloksia. Kupariroottorin avulla pyrittiin nostamaan prototyypimoottorin hyötysuhdetta roottorin virtalämpöhäviöitä pienentämällä. Kuvassa 43 on esitelty yhteenvetona mitatut häviötehot prototyypimoottoreissa. Alkuperäisen alumiiniroottorin lisäksi kuvassa on esitetty mittaustulokset kupariroottorin ensimmäiselle versiolle ”Kupari 1” ja toiselle versiolle ”Kupari 2”, josta on poistettu rautakannas roottoriura-aukon päältä.

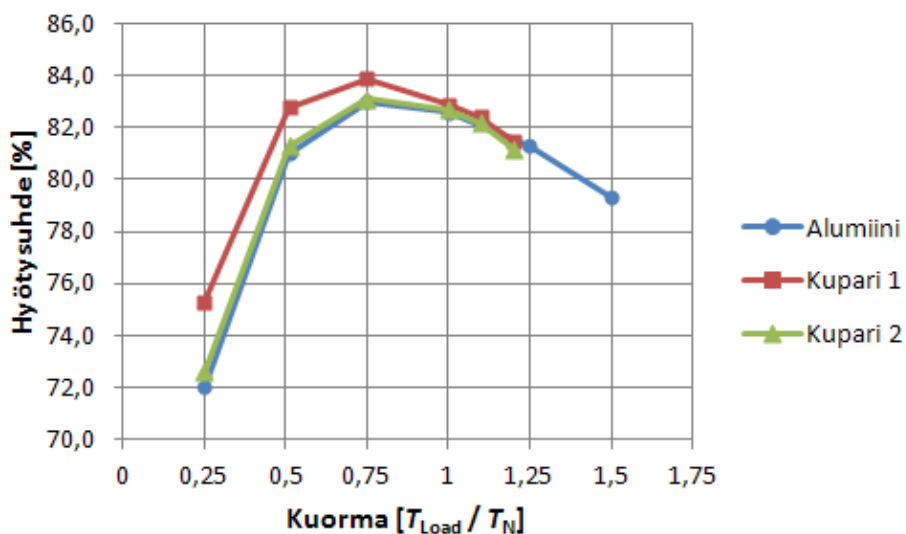


Kuva 43. Prototyypimoottorin häviöt alumiini- ja kupariroottorilla.

Kuvasta 43 voidaan havaita, että roottorin virtalämpöhäviöt $P_{Cu,r}$ eivät pienentyneet prototyypikupariroottorilla vaan ne olivat jopa hieman suuremmat verrattuna alumiini-

roottorin vastaaviin roottorin virtalämpöhäviöihin. Kuvasta voidaan nähdä lisäksi staatorin virtalämpöhäviöiden $P_{Cu,s}$ dominoiva osuus kokonaishäviöistä. Lisäksi rautahäviöiden P_{Fe} voidaan havaita olevan lähes yhtä suuret kuin roottorin virtalämpöhäviöt.

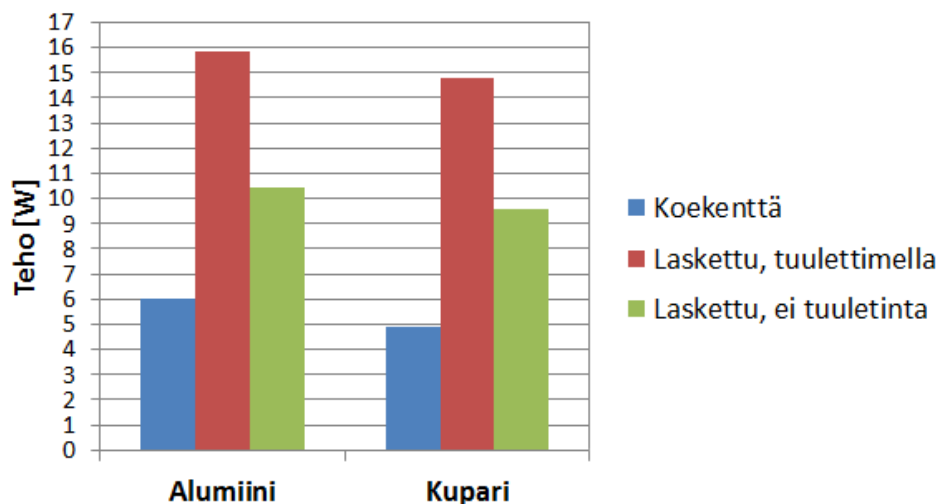
Alumiini- ja kupariroottorilla mitattuja hyötysuhteita on vertailtu kuvassa 44 moottorin kuormituksen funktiona. Mittaustulokset on saatu koestuksissa tehdyistä kuormitustesteistä. Kupariprototyypeillä moottoria ei pystytty kuormittamaan yli 1,2 kertaa nimelliskuormituksen, sillä moottorissa alkoi jo tällä kuormituksella esiintyä voimakasta värähtelyä. Kuvaajan pohjalta voidaan havaita, että kupariprototyyppien hyötysuhde on likimain sama kuin alumiiniroottorilla mitattu hyötysuhde. Prototyypin ensimmäisellä versiolla mitatussa hyötysuhteessa on havaittavissa hieman parannusta osakuormalla.



Kuva 44. Kupari- ja alumiiniroottorilla varustettujen moottoreiden hyötysuhteet kuormituksen funktiona

Hyötysuhdemittauksien lisäksi luvussa 5 tutkittiin tarkemmin prototyyppimoottorin tuuletus- ja kitkahäviöiden muodostumista. Tuuletus- ja kitkahäviöt laskettiin kupari- ja alumiiniroottoreille suoritettujen hidastuvuusikäyrämittausten sekä roottoreille laskettujen hitausmomenttien avulla. Kuvassa 45 on yhteenveto luvussa 5 lasketuista tuuletus-

ja kitkahäviöistä häviöistä sekä hyötysuhdemittauksesta saaduista tuuletus- ja kitkahäviöistä.



Kuva 45. Tuuletus- ja kitkahäviöt alumiini- ja kupariroottorilla.

Laskettujen tulosten perusteella tuuletus- ja kitkahäviöt voitaisiin olettaa hyötysuhdemittauksessa saatuja arvoja suuremmiksi. Mitatuissa ja lasketuissa arvoissa puolestaan alumiini- ja kupariroottorin häviöiden voidaan havaita olevan lähes yhtä suuret. Alumiini- ja kupariroottorin suurimmat rakenteelliset eroavaisuudet ovat kuparin suurempi tiheys verrattuna alumiiniin sekä kupariroottorin oikosulkurenkaista puuttuvat tuuletinsiivekkeet. Rakennetun kupariprototyypiroottorin oikosulkurenkaan ja roottoripaketin välinen tyhjä tila toimii kuitenkin lähes alumiiniroottorin tuuletinsiivekkeiden tasoisena lisätuulettimena.

6.1 Laskettujen arvojen ja mittaustulosten vertailu

Prototyypimoottorille Adept-ohjelmalla laskettuja arvoja alumiini- ja kupariroottoreilla sekä kupariroottorilla mitattuja arvoja on esitelty taulukossa 10. Adeptilla laskettua alumiiniroottorilaskelmaa on muokattu vastaamaan mahdollisimman hyvin testituloksis-

ta saatuja alumiiniroottorin laskelmia. Muut simuloidut kupariroottori laskelmat on suoritettu muokkaamalla toisessa sarakkeessa (Al) esitettyä alumiiniroottorilaskelmaa.

Taulukko 10. Adeptilla lasketut arvot alumiini- ja kupariroottoreille sekä kupariprototyypiroottorille mitatut arvot.

Arvot:	Al	Cu	Cu Proto	Cu Proto Meas.
Eff [%]	82,6	84,6	83,8	82,7
Cos φ	0,77	0,77	0,79	0,77
n [rpm]	1426	1458	1440	1423
Lämp. [K]	36,4	31,2	33,2	36,7
T_s	3,04	2,28	2,84	3,30
T_m	3,43	3,42	3,49	3,49
I_s/I_n	6,14	6,80	6,63	-
Häviöt:				
$P_{Cu,s}$ [W]	149	144	139	154
$P_{Cu,r}$ [W]	76	41	60	82
P_{Fe} [W]	66	66	65	62
P_{Fw} [W]	15	15	15	5
P_{LL} [W]	11	11	11	12
P_{tot} [W]	317	276	291	314

Kolmannessa sarakkeessa on esitetty kupariroottorilaskelma (Cu), joka on saatu muuttamalla alumiiniroottorilaskelman roottorikäänitys ja oikosulkurengas kupariksi. Neljännessä sarakkeessa on kupariprototyypille lasketut arvot (Cu Proto). Prototyypilaskelmassa roottoriuran muoto on muutettu prototyypissä käytetyksi suorakulmioksi ja oikosulkurenkaiden ja roottoripaketin väliin on lisätty 10 mm tyhjää tilaa. Viimeisessä sarakkeessa on esitetty kupariprototyypiroottorilla testikentällä mitatut arvot (Cu Proto Meas.).

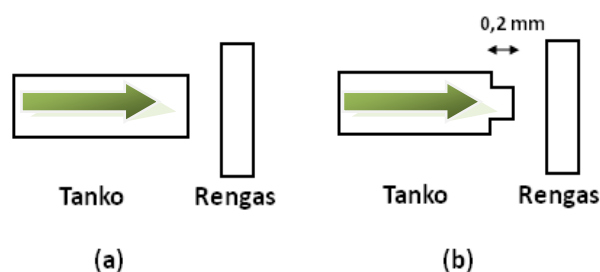
Kupariroottorille laskettuja tuloksia tarkasteltaessa (Cu ja Cu Proto) voidaan havaita, että siirryttäessä optimaalisen painevalukupariroottorin laskelmasta (Cu) prototyypiroottorin laskelmaan (Cu Proto) roottorihäviöt $P_{Cu,r}$ kasvavat hieman, minkä seurauksena myös hyötysuhde laskee. Lisäksi prototyypilaskelman jättämä kasvaa hieman aiheuttaen pyörimisnopeuden laskemisen. Kun verrataan kupariprototyypille laskettuja ja

mitattuja arvoja (Cu Proto ja Cu Proto Meas.), voidaan huomata että roottorihäviöt kasvavat entisestään aiheuttaen hyötysuhteen laskemisen. Lisäksi moottorin jättämä kasvaa entisestään aiheuttaen pyörimisnopeuden laskemisen.

Kupariprototyypin mittaustuloksista voidaan havaita, että kupariroottorin roottorisresistanssi on suurempi kuin laskelmien mukaan pitäisi. Teorian mukaan pienempi roottorisresistanssi johtaa pienempään jättämään ja roottorin virtalämpöhäviöiden laskemiseen. Kuitenkin vertailtaessa kupariprototyypille laskettuja ja mitattuja arvoja, voidaan huomata että prototyypimoottorilla olisi potentiaalista saavuttaa parempia arvoja kuin taukossa 10 esitetyt mittaustulokset.

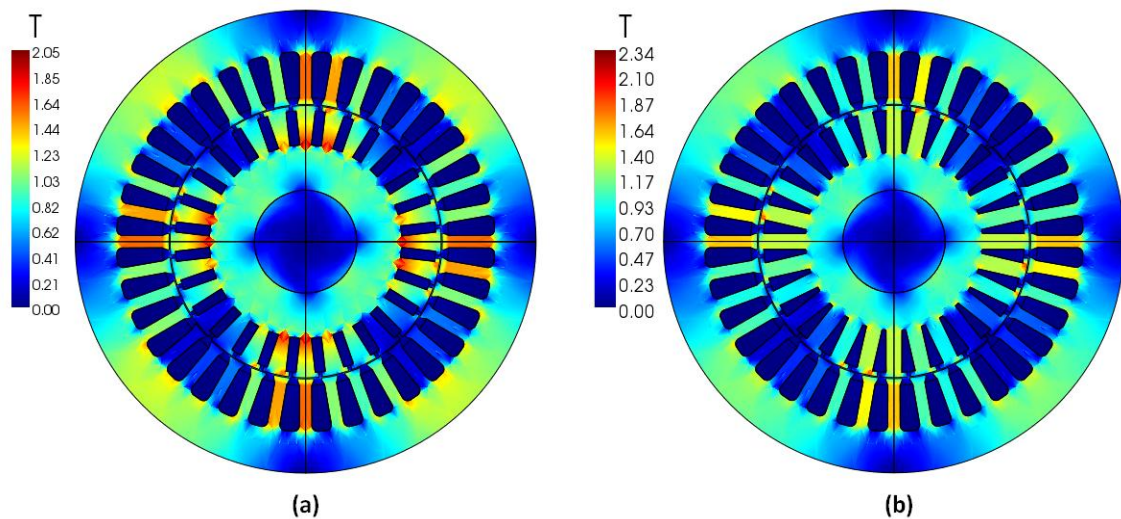
6.2 Pohdintaa prototyypistä

Kuparitankoprototyypin seuraavaan versioon voitaisiin tehdä hieman parannuksia. Mittaustuloksista nähtiin, että roottorin virtalämpöhäviöt olivat likimain samat kuin alumiiniroottorilla. Yhtenä syynä saattaa olla kuparitankojen ja oikosulkurenkaiden välisen juotoksen onnistuminen. Jos kuparitangon pää ei kiinnity juotoksessa oikosulkurenkaaseen kunnolla, se saattaa kasvattaa roottoriresistanssia, joka näkyy kasvaneina virtalämpöhäviöinä. Kiinnitystä voisi pyrkiä parantamaan esimerkiksi tekemällä tangon päähän pieni kannas kuvassa 46b havainnollistetulla tavalla. Tällä tavoin juotosmateriaali pääsisi paremmin tangon ja renkaan väliin ja saattaisi edesauttaa sähkönjohtavuutta.



Kuva 46. Kuparitangon ja oikosulkurenkaan kiinnitys prototyypissä (a) ja parannusehdotus (b)

Myös kuparitankoprototyypin roottorin uramuotoa voitaisiin parannella valmistusmahdollisuuksien mukaan. Kuvassa 47 on esitetty simuloitu magneettivuon tiheyden muodostuminen prototyypimootorissa (a) ja muokatussa versiossa (b). Prototyypimootorin roottoriuran alareunassa voidaan havaita korkeita, yli 2 Teslan magneettivuon tiheyden arvoja. Raudan kyllästymistä ja neliskanttisen uramuodon myötä kasvanutta virran kulutusta voitaisiin helpottaa muotoilemalla prototyypin roottoriura esim. alareunastaan suipommaksi kuvan b-kohdassa esitetyllä tavalla.



Kuva 47. Magneettivuon tiheys prototyypimootorissa (a) ja parannusehdotuksessa (b).

Kaikkiaan prototyypin valmistuksesta voidaan todeta, että prototyypin suunnittelu on haastavaa erityisesti pienillä moottoreilla. Pienikin rakenteellinen muutos saattaa vaikuttaa merkittävästi moottorin sähköisiin ja mekaanisiin ominaisuuksiin. Kuparitankoprototyypistä saatiin kuitenkin hyvää kokemusta ja dokumentaatiota tulevia tutkimuksia varten.

6.3 Tulevaisuuden näkymät

Tulevaisuuden tutkimuksissa olisi mielenkiintoista tehdä prototyypikokeilu myös painevalukupariroottorilla. Prototyypillä tehdyssä vertailussa alumiiniroottorilla oli pienoinen etu, sillä sen rakenne ja valmistus on vuosien saatossa hioutunut optimaaliseksi, kun taas testattu kuparitankoprototyyppi oli vasta ensimmäinen kokeilu. Mielenkiintoisen testidatan saamiseksi alumiinipainevaluroottorin ja kuparipainevaluroottorin ominaisuuksia voitaisiin tutkia esimerkiksi kahdella erilaisella kupariroottorilla. Ensimmäinen testiroottori voitaisiin valmistaa samalla uramuodolla kuin vastaava alumiiniroottorikin. Toiseen testiroottoriin voitaisiin puolestaan hakea sopivaa uramuotoa esimerkiksi Optimizer-työkalun avulla.

Kuparin käytöllä ei kuitenkaan yksin päästä merkittäviin parannuksiin oikosulkumoottorin hyötysuhteessa. Pienten oikosulkumoottoreiden IE4-hyötysuhdeluokan saavuttamiseen täytyy pyrkiä pienentämään roottorihäviöiden lisäksi myös muita häviökomponentteja, kuten staattorin virtalämpöhäviöitä sekä rautahäviöitä. Korkean hyötysuhteen oikosulkumoottoreissa häviöitä voidaan pyrkiä pienentämään mm. paremman sähkölevyn käytöllä, paketin pidennyksen ja halkaisijan kasvatuksen sekä johdin poikkipinta-alojen kasvatuksella. Optimaalisen rakenteen tulisi täyttää annetut hyötysuhterajoitukset, samalla kuitenkin pitäen moottorin hinta ja koko kilpailukykyisinä.

Kupariroottorille saattaa kuitenkin löytyä tulevaisuudessa käyttöä pienissä oikosulkumoottoreissa entistä kovempien hyötysuhdevaatimusten edessä, joissa kaikki apu paremman hyötysuhteen saavuttamiseksi on tarpeen. Kuparin ottaminen käyttöön roottorin käämitysmateriaalina vaatisi kuitenkin vielä jatkotutkimuksia ja uusia prototyypitestejä. Lisäksi kupariroottorien painevalun käytännön toteuttaminen vaatisi suunnittelua ja mahdollisesti lisäinvestointeja valukoneistoon, jos valutyötä ei teetettäisi alihankintana.

7 YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin kupariroottorin hyödyntämistä korkean hyötysuhteen oikosulkumoottorissa. Lähtökohtaisesti kupariroottorin hyödyt oikosulkumoottorin hyötysuhteelle olivat tiedossa. Kupariroottorien käytöstä haluttiin kuitenkin nykytilan selvitys, käytännön simulointeja sekä ensimmäinen prototyypikokeilu silmälläpitäen tulevaisuudessa suunniteltavia IEC-hyötysuhdeluokan IE4-oikosulkumoottoreita. IE4-hyötysuhdeluokka on pystytty saavuttamaan hieman suuremmissa oikosulkumoottoreissa (n. 75 kW ylöspäin), mutta pienissä oikosulkumoottoreissa hyötysuhteen saavuttaminen on osoittautunut haasteellisemmaksi. Korvaamalla roottorikäimityksessä tyypillisesti käytetty alumiini kuparilla pystytään laskemaan roottorin virtalämpöhäviöitä ja täten nostamaan hyötysuhdetta. Kuparin käyttö vaikuttaa kuitenkin myös moottorin muihin sähköisiin ja mekaanisiin ominaisuuksiin, joten optimaalisen moottorin saavuttaminen vaatii moottorin rakenteen optimointia kuparikäimitykselle.

Työn alussa on selvitetty korkean hyötysuhteen oikosulkumoottoreille asetettuja hyötysuhdevaatimuksia sekä keskitytty tarkastelemaan kuparin ominaisuuksia roottorikäimitysmateriaalina. Kuparin käytön valmistusteknisenä rajoitteena roottorin käänitysmateriaalina on ollut sen hankala painevalaminen. Korkean sulamislämpötilansa vuoksi kuparin valaminen ei onnistu tehokkaasti perinteisillä alumiinin valussa käytetyillä laitteistoilla vaan sen valaminen vaatii erityishuomiota. Kuparin painevaluun liittyvät ongelmat on kuitenkin pystytty ratkaisemaan ja nykyisin painevalukupariroottoreita on myös kaupallisesti saatavilla.

Työssä suoritetuissa simuloinneissa tutkittiin kolmea kupariroottorin käytölle otollista moottoria runkokooltaan 90, 132 ja 200. Simuloinneissa moottorien roottorikäänitys vaihdettiin alumiinista kupariin ja moottoreiden roottorien uramuodoille suoritettiin roottoriuramuodon optimointi käyttämällä Adept-ohjelman Optimizer-työkalua. Optimointilaskennan tuloksena saatiin pareto-optimaaliset ratkaisujoukot kaikkien moottoreiden roottorimittojen parametreille. Tässä työssä ratkaisujoukoista valittiin sellaiset

roottorimitat, joilla kupariroottorin avulla pystyttiin saavuttamaan mahdollisimman samanlaiset suoritusominaisuudet kuin alumiinilla.

Simuloiduista moottoreista prototyypimoottoriksi valittiin tavallinen alumiiniroottorilla varustettu runkokoon 90 oikosulkumoottori. Prototyypimoottorille valmistettiin kupariroottori, jonka valmistus toteutettiin aikaa vievän ja haasteellisen painevalun vuoksi kuparitangoista ja tankojen päihin juotetuista oikosulkurenkaista. Prototyypimoottorille suoritettiin kaikkiaan kolme koeajoa: yksi ajo alkuperäisellä alumiiniroottorilla sekä kupariroottorin ensimmäisellä ja muokatulla versiolla. Muokatussa prototyypissä tuloksia pyrittiin parantamaan sahaamalla pois roottoriuran päällä ollut ohut rautakannas. Hyötysuhdemittausten lisäksi prototyypimoottorille suoritettiin hidastuvuuskyärimittaukset alumiini- ja kupariroottorilla tuuletus- ja kitkahäviöiden tarkempaa laskentaa varten.

Prototyypien koeajoista saadut tulokset eivät olleet täysin teorian mukaisia ja kupari-prototyypillä saavutetut hyötysuhteet jäivät alumiinimoottorin tasolle. Mittaustuloksista ja moottorin epämääräisestä momenttikäyrästä voidaan kuitenkin havaita, että prototyypin rakenne ei ollut täysin optimaalinen. Kupariprototyypien jättämä ei pienentynyt oletetulla tavalla eivätkä roottorin virtalämpöhäviöt pienentyneet alumiiniin verrattuna. Prototyypiroottorin roottoriresistanssin voidaan havaita olevan oletettua suurempi. Oletettua suurempi roottoriresistanssi saattaa olla seurausta kuparitankojen ja oikosulkurenkaan heikosta kontaktista sekä prototyypin uramuotona käytetystä suorakulmaisesta rakenteesta.

Työn tuloksena saatiin kuitenkin hyvä selvitys painevalukupariroottoreiden käytön nykytilasta sekä ensimmäisiä karkeita käytännön mittaustuloksia kupariroottoriprototyypin avulla. Tämä työ toimii hyvänä referenssinä silmälläpitäen tulevaisuuden tutkimuksia korkean hyötysuhteen oikosulkumoottoreista. Työssä käytetty Optimizer-työkalu havaittiin hyödylliseksi välineeksi erityisesti ajatellen mahdollisesti tulevaisuudessa valmistettävien painevalukupariroottoreiden uramuotojen suunnittelua. Lisäksi tuuletus- ja kitkahäviöille suoritettujen laskentojen perusteella prototyypimoottorin tuuletus- ja kitkahäviöt voitaisiin olettaa hyötysuhdemittauksista saatuja häviöitä suuremmiksi.

Työn perusteella on kuitenkin selvää että yksin onnistuneella kupariroottorilla ei pystytä vielä nostamaan pienen oikosulkumoottorin hyötysuhdetta korkeimpiin hyötysuhdetavoitteisiin, vaan moottoriin on tehtävä muitakin hyötysuhdetta parantavia toimenpiteitä, kuten paremman sähkölevyn käyttö sekä rautaosien ja johdinpoikkipinta-alojen kasvat. Pyrkimyksessä valmistaa tulevaisuudessa entistä korkeamman hyötysuhteen oikosulkumoottoreita, voi kupariroottorille siis löytyä käyttöä eritoten pieneten oikosulkumoottoreiden toteutuksessa.

LÄHDELUETTELO

- ABB (2002). *Yleistä sähkömoottorin ja generaattorin suunnittelusta*. Koulutusmateriaali. Julkaisematon. ABB Oy. 46 s.
- ABB (2010). *Motors-posti*. Motorsin henkilöstölehti. ABB Oy. 16 s.
- ABB (2011). *Basics of efficiency*. Koulutusmateriaali. Julkaisematon. ABB Oy. 130 s.
- Akashi Gohdoh Oy (2012). Yhtiön verkkosivut. [siteerattu 18.2.2013]. Saatavana Internetistä: < http://akashigo.com/product/lothar_2_en.html>.
- Alberti, Luigi, Nicola Bianchi, Aldo Boglietti, Andrea Cavagnino (2011). Core Axial Lengthening as Effective Solution to Improve the Induction Motor Efficiency Classes. *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. Phoenix, AZ, USA, IEEE s. 3391–3398.
- Aura, Lauri & Antti J. Tonteri (2002). *Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteita*. 3.–4. Painos. Helsinki. WSOY. 448 s. ISBN 951-0-21385-3
- Cowie, John G., Dale T. Peters & David T. Brender (2003). Die-cast Copper Rotor for Improved Motor Performance. *Pulp and Paper Industry Conference*. New York, NY, USA. s. 42–49.
- Drives & Control (2006). *Ultra efficient motors have copper rotors*. Internet uutinen. [siteerattu 18.2.2013]. Saatavana Internetistä: < <http://www.drives.co.uk/fullstory.asp?id=978>>.
- EERE (2008). *New Motor Technologies Boost System Efficiency*. United States Department of Energy newsletter. Energy Efficiency & Renewable Energy.

[siteerattu 18.2.2013]. Saatavana Internetistä: < http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_deployment/summer2008.html>.

Englebretson, Steven C. (2009). *Induction Motor Stray Loss from Inter-bar Currents*. Väitöskirja, Massachusetts Institute of Technology, Sähkö- ja tietotekniikan laitos. 174 s.

FAVI (2013). Yhtiön internetsivut. Favi Oy. [siteerattu 18.2.2013]. Saatavana Internetistä: <<http://www.favi.com/ang/rotori.php>>.

Finley, William R. & Mark M. Hodowanec (2001). Selection of Copper versus Aluminum Rotors for Induction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 37:6. s. 1563–1573.

International Electrotechnical Commission (2007). *IEC 60034-2-1 Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)*. 149 s.

Kortelainen, Antti (2010). *Sähkömoottoreiden uudet hyötysuhdeluokitukset ja tulevat rajoitukset*. Koulutusmateriaali. Julkaisematon. ABB Oy. 16 s.

Liang, Daniel, Xu Yang, Jiabin Yu & Victor Zhou (2012). Experience in China on the Die-Casting of Copper Rotors for Induction Motors. *Electrical Machines Conference*. ICEM 2012. Marseille, France. s. 256–260.

Malinen, Jukka (2005). *Induktiomoottorin hyötysuhdemittaukset verkko- ja taajuusmuuttajakäytössä*. Diplomityö. Sähkötekniikka. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 86 s.

Park, Kyoung Jin, Kwangsoo Kim, Sang-hoon Lee, Dae-Hyuyn Koo, Kwang-Cheol Ko & Ju Lee (2008). Optimal Design of rotor slot of three phase induction motor with

die-cast copper rotor cage. *Electrical Machines and Systems Conference. ICEMS 2008*. s. 61–63.

Parviainen, Asko (2000). *Pyörivän magneettivuon aiheuttamien tehohäviöiden mittaussähkölevystä*. Diplomityö. Sähkötekniikka. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 84 s.

Peters, D.T., E.F. Brush Jr., J. Van Son, S.P. Midson & J.L. Kirtley Jr. (2003). *Development of the Copper Motor Rotor – Manufacturing Considerations and Motor test Results*. ELROMA 2003. 13 s.

Peters, D.T., J.G. Cowie, E.F. Brush Jr., M. Doppelbauer, R. Kimmich (2005). Performance of Motors with Die-cast Copper Rotors in Industrial and Agricultural Pumping applications. *Electric Machines and Drives conference*. New York, NY, USA. IEEE s. 987–992.

Pyrhönen, Juha, Tapani Jokinen, Valéria Hrabovková (2008). *Design of Rotating Electrical Machines*. 1. painos. Chicester: Wiley. 538 s.

Ryöppö, Tommi (2005). *Hajautetun laskentajärjestelmän soveltaminen epätahtikoneen roottorirakenteen optimointiin*. Diplomityö. Sähkötekniikka. Teknillinen korkeakoulu. 51 s.

Ryöppö, Tommi (2009). *Permanet Magnet Shape Optimization*. Tekninen raportti. ABB Oy. 13 s.

Sarhaluoma, Jarno (2006). *Roottori- ja staattorilevyjen laaduntarkastus konenäöllä*. Insinööri työ, Kajaanin ammattikorkeakoulu, Tietotekniikan koulutusohjelma 47 s.

Taipale, Juha (2008). *Korkean lämpenemäluokan omaavan sähkömoottorin suunnittelu*. Diplomityö. Sähkötekniikka. Teknillinen korkeakoulu. 73 s.

- Talvitie, Topi (2005). *FEM-ohjelmiston sopeuttaminen ja hyväksikäyttö nopeaan kes-
tomagneettimoottorisuunnitteluun*. Diplomityö. Sähkötekniikka. Tampereen tek-
nillinen yliopisto. 89 s.
- Verkkonen, Vesa (2007a). *Sähkömoottorikäytöt 1 – sähkökoneiden perusteita ja ta-
sasähkökoneet*. Luentomoniste. Julkaisematon. Vaasan ammattikorkeakoulu. 77 s.
- Verkkonen, Vesa (2007b). *Sähkömoottorikäytöt 2 – epätahtikoneet*. Luentomoniste.
Julkaisematon. Vaasan ammattikorkeakoulu. 103 s.
- Vesala, Jaakko (2011). *Suurnopeusmoottorin kolmiulotteinen sähkömagneettinen mal-
lintaminen*. Diplomityö. Sähkötekniikka. Tampereen teknillinen yliopisto. 88 s.