



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JOHANNA ELLÄ
HÄVIÖJAKAUMA KORKEAN HYÖTYSUHTTEEN SÄHKÖMOOTTO-
RISSA
Diplomityö

Tarkastaja: professori Seppo Val-
kealahti
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 12. elo-
kuuta 2015

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

JOHANNA ELLÄ: Häviöjakauma korkean hyötysuhteen sähkömoottorissa

Diplomityö, 56 sivua

Elokuu 2015

Pääaine: Vaihtoehtoiset sähköenergiateknologiat

Tarkastaja: professori Seppo Valkealahti

Avainsanat: hyötysuhde, hyötysuhdeluokka, IE4, sähkömoottori, häviöt.

EU-komission tiukentuneet hyötysuhdevaatimukset sähkömoottoreille ovat ajaneet valmistajat kehittämään uusia ratkaisuja hyötysuhdevaatimusrajojen saavuttamiseksi. Hyötysuhdeluokkia on tällä hetkellä IE1, IE2, IE3 ja IE4, joista IE4-hyötysuhdeluokan raja-arvo on korkein ja IE1-hyötysuhdeluokan raja-arvo matalin. ABB Oy Moottorit ja Generaattorit -yksiköllä on tuotetarjonnassaan Safe Area-sähkömoottoreita IE3-hyötysuhdeluokassa jokaiselle olemassa olevalle teholuokalle ja IE4-hyötysuhdeluokassa tehoalueella 75 kW-355 kW. Tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia, miten tehoalueeltaan alle 75 kW IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottoreista saataisiin mahdollisimman pienillä muutoksilla aikaan IE4-hyötysuhdeluokan sähkömoottoreita.

Sähkömoottorin hyötysuhde lasketaan jakamalla sähkömoottorin antama teho sähkömoottorin ottamalla teholla. Sähkömoottorin ottama teho kuluu tuotetun tehon lisäksi häviöihin, joita ovat staattorin ja roottorin resistiiviset häviöt, rautahäviöt, mekaaniset häviöt sekä lisähäviöt. Sähkömoottorilaskennassa ABB:lla on käytössä ADEPT-laskentaohjelma, jolla sähkömoottoreita mitoitetaan nimellistehon ja napaluvun mukaan. Hyötysuhdelaskennassa käytetään FCSmek- ja S113-laskentaprofiileita, mutta näillä laskiessa hyötysuhdetulokset ovat testattuja korkeampia. Väärät laskentatulokset perustuvat pääosin ADEPT-laskentaohjelman häviölaskentaan, jolla laskettaessa häviöt jäävät todellista pienemmiksi ja testituloksiin verrattaessa häviöjakauma on väärä. Häviöiden väärin laskeminen johtuu osittain myös virtojen laskemisesta liian pieneksi.

Tässä työssä sähkömoottorit testattiin ABB Oy Moottorit ja Generaattorit -yksikössä IEC 60034-30-1 -standardin mukaisesti. Sähkömoottoreille tehtiin lämpenemäajon lisäksi osakuormatesti, oikosulkukoe ja tyhjäkäyntikoe. Ennen lämpenemäajoa ja lämpenemäajon jälkeen mitattiin eristeen resistanssi. Näillä testeillä selvitettiin sähkömoottorin häviöjakauma ja mitattiin hyötysuhde sekä laskettiin mittaustulosten perusteella IEC-standardin mukaiset nimellisarvot.

Tässä tutkimuksessa käytettiin IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottoreita, joista yritettiin saada IE4-hyötysuhdeluokan sähkömoottoreita vaihtamalla sähkölevymateriaali paremmin sähköä johtavaan ja lisäksi osaan sähkömoottoreita muutettiin kaksitasokäämitys. Näillä muutoksilla tutkimuksen sähkömoottorit kuuluvat IE4-hyötysuhdeluokkaan.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in electrical engineering

ELLÄ, JOHANNA: Loss distribution in a high efficiency electric motor

Master of Science Thesis, 56 pages

August 2015

Major: Alternative Electric Energy Technology

Examiner: Professor Seppo Valkealahti

Keywords: Electric motor efficiency, IE4, efficiency category, energy losses.

The manufacturers of electric motors have been forced to develop new solutions in order to reach the tightened efficiency demands of European commission. Currently there are four efficiency categories: IE1, IE2, IE3 and IE4 where IE4 is for the highest and IE1 is for the lowest efficiency. In IE3 category ABB Oy Motors and Generators can offer Safe Area -electric motors over the entire power range and in IE4 category Safe Area -electric motors from 75 kW to 355 kW. The purpose of this thesis is to investigate how IE3 category electric motors that are below 75 kW can be turned into IE4 category electric motors.

The efficiency of an electric motor is calculated by dividing the produced power with power that the electric motor consumes. In addition to the mechanical power that the electric motor produces some energy is also spent to generating losses. These losses include resistive losses of stator and rotor, iron losses, mechanical losses and additional losses. ABB uses ADEPT-software in dimensioning electric motors according to nominal power and number of poles. FCSmek- and S113-calculation profiles are used in calculating efficiencies but they have been found to result in better efficiencies than have been measured. False calculation results are mainly caused by ADEPT calculating smaller losses than in reality and incorrect loss distribution. ADEPT also calculates the currents to be too small which also affects the efficiency calculations.

In this thesis the electric motors were tested in ABB Oy Motors and Generators premises according to IEC 60034-2-1 standard. Temperature rise test, partial load measurement, locked rotor test and no load test were done to the electric motors. The resistance of insulation was measured before and after the temperature rise test. With these tests the loss distribution was examined, efficiency was measured and nominal values were calculated according to IEC standard for measured values.

In this thesis IE3 category electric motors were aimed to upgrade to IE4 category by changing the sheet metal into a metal with better conductivity and also double winding was used in some of the electric motors. With these changes the examined motors reached the IE4 efficiency category.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty ABB Oy Moottorit ja Generaattorit Vaasan yksikössä ja työn ohjaajana toimi tekniikan tohtori Jouni Ikäheimo. Haluan kiittää Jounia mielenkiintoisesta aiheesta ja ohjaavasta palautteesta tutkimuksen aikana. Lisäksi haluan kiittää koko IE4-hyötysuhdeluokan sähkömoottorien suunnittelutiimiä, erityisesti DI Matti Fyhriä ja DI Ville Kivelää lukuisiin kysymyksiini vastaamisesta. Erityiskiitos myös tutkimuksen aikaisille työtovereilleni GTS-tiimissä kannustuksesta ja tuesta, joita ilman tämä tutkimus ei olisi ollut edes mahdollista.

Työni tarkastajana toimi Tampereen teknillisen yliopiston sähkötekniikan professori Seppo Valkealahti ja häntä haluan kiittää työni tarkastamisesta ja rakentavasta palautteesta tutkimuksen aikana.

Suurin kiitos perheelleni, jonka vankkumaton ja sinnikäs tuki mahdollistivat opiskelujeni etenemisen näin pitkälle ja isovanhemmilleni, joiden eväillä tämä tutkimus on suurimmaksi osaksi tehty. Kiitos Jukka kaikesta kannustuksesta ja avusta, jota tämä työ on vaatinut. Kiitos DI Jussi Sieväselle neuvoista ja avusta tämän tutkimuksen tekemisessä. Kiitos ystävät ja läheiset mukana elämisestä.

Helsingissä 31.7.2015

Johanna Ellä

SISÄLLYS

1	Johdanto.....	1
2	Sähkömoottorin hyötysuhde ja häviöjakauma.....	3
2.1	Sähkömoottorin hyötysuhteen muodostuminen.....	3
2.2	Resistiiviset häviöt	4
2.3	Rautahäviöt	4
2.3.1	Hystereesihäviöt	5
2.3.2	Klassiset pyörrevirtahäviöt	6
2.4	Sähkömoottorin lisähäviöt	7
2.5	Sähkömoottorin hankaushäviöt.....	7
2.6	Ilmavälin vaikutus sähkömoottorin hyötysuhteeseen.....	7
2.7	Sähkömoottorien hyötysuhdeluokat	8
3	Sähkömoottorin hyötysuhteen laskeminen ADEPT:lla.....	10
3.1	Laskennan haasteet.....	10
3.2	Laskenta	11
4	Sähkömoottorin testaaminen	15
4.1	Resistanssimittaus	15
4.2	Oikosulkumittaus	17
4.3	Testaus koestamossa.....	18
4.4	Hyötysuhteen määrittäminen	21
4.5	Häviöiden määrittäminen.....	22
4.5.1	Kuparihäviöt.....	22
4.5.2	Hankaus- ja rautahäviöt	23
4.5.3	Lisähäviöt.....	24
5	Hyötysuhteen parantaminen	25
5.1	Oberretl'in säännöt epätahtikoneen lisähäviöiden minimoimiseksi.....	25
5.2	Levymateriaali.....	26
5.3	Käämintä.....	27
5.3.1	Käynnistysvirta.....	27
5.3.2	Yliaallot.....	28
5.3.3	Jänteistys	28
5.3.4	Kuparin täyttöaste.....	29
5.3.5	Lankaluku.....	29
5.3.6	Kaksitasokäämitys	30
5.4	Ilmaväli.....	31
5.5	Tuulettimen vaihto	31
5.6	Karaistaminen	31
6	Testitulokset.....	33
6.1	2-napainen 30 kW sähkömoottori	33
6.2	4-napainen 30 kW sähkömoottori	36
6.2.1	4-napaiset 30 kW IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottorit.....	40

6.3	6-napainen 22 kW sähkömoottori	43
6.4	4-napainen 37 kW sähkömoottori	46
7	Päätelmät ja jatkotutkimuksen aiheet	52
	Lähteet.....	54

LYHENTEET JA MERKINNÄT

a	Regressiosuoran kulmakerroin
B	Magneettivuon tiheys
b	Regressiosuoran y-akselin leikkauskohta
B_k	Magneettivuon tiheyden huippuarvo
$\cos \varphi$	Tehokerroin
$\cos \varphi_n$	Nimellistehokerroin
ΔB_i	Vuossa esiintyvän värekomponentin i vaikutus päävuon amplitudiin
f	Taajuus
φ	Vaihejännitteen ja vaihevirran välinen siirtokulma
H	Magneettikentän voimakkuus
I	Virta
i	Värekomponentti
I_n	Nimellisvirta
I_l	Verkon virta
I_{lm}	Mitattu virta
I_{In}	IEC-standardin mukainen nimellisvirta
I_{Sr}	Staattorin virta
k	Kerroin väreelle
k_h	Magnetoinnin tyyppistä riippuva kokeellinen vakio
$k_{hväre}$	Väreen vaikutusta arvioiva korjauskerroin
m	Staattorin vaiheluku
m_v	Vaiheiden lukumäärä
n_n	Mitattu kierrosluku
n_s	Laskennallinen kierrosluku
P	Sähköteho
p	napaluku
P_1	Moottorin ottama sähköteho
P_2	Moottorin tuottama sähköteho
P_n	Nimellisteho
P_δ	Ilmaväliteho
P_{dyn}	Dynaaminen tehohäviökomponentti
P_h	Vuon hystereesihäviöt
P_{k1}	Staattorin resistiiviset häviöt
P_{k2}	Roottorin resistiiviset häviöt
P_l	Lisähäviöt
P_{lm}	Mitatut lisähäviöt
P_μ	Hankaushäviöt
P_r	Rautahäviöt
P_{rn}	IEC-standardin mukaiset nimelliset rautahäviöt

P_{rm}	Mitatut rautahäviöt
q	Vakoluku
Q_1	Staattorin uraluku
Q_2	Roottorin uraluku
P_{st}	Staattinen tehohäviökomponentti
R	Resistanssi
R_0	Vaiheresistanssi tyhjäkäyntikokeessa
R_{st}	Staattorin käämien resistanssi
S_1	Näennäisteho
T_s	Sähköinen vääntömomentti
U	Jännite
U_n	Nimellisjännite
U_1	Verkon jännite
U_{Im}	Mitattu jännite
U_{In}	IEC-standardin mukainen nimellinen jännite
V	Tilavuus
ω	Kulmanopeus
x	Materiaalista riippuva kokeellinen vakio
X_δ	Yliaaltoreaktanssi
X_m	Magnetointireaktanssi
σ_δ	Hajareaktanssi
ξ_n	Käämityskerroin

ABB	Asea Brown Boveri
ADEPT	Sähköinen mitoitustyökalu (Advanced Electrical Dimensioning Tool)
FEM	Elementtimenetelmä (Finite Element Method)
IEC	Kansainvälinen sähkökomissio (International Electrotechnical Commission)
NEMA	Kansallinen sähkövalmistajien yhdistys (National Electrical Manufacturers Association)
M350-50A	Sähkölevymateriaalin nimike
M270-50A	Sähkölevymateriaalin nimike

1 JOHDANTO

Vuodesta 2011 lähtien EU-komissio on vaatinut Euroopan unionin alueelle myyntiin tulevien ja käyttöönotettavien oikosulkumoottorien hyötysuhteeksi vähintään IEC-standardin mukaisen IE2-luokan, joka määrittää sähkömoottorin tehon ja napaluvun mukaan. Sähkömoottorit kuluttivat kaikesta maailmalla käytetystä sähköenergiasta 45 % ennen EU-komission tiukennusta. Sähkömoottoreita kehittämällä pyritään saamaan aikaan merkittäviä energia- ja päästösäästöjä. EU-komission päätöksen myötä sähköä säästyy vuosittain noin 135 TWh, joka vastaa noin 22 ydinvoimalan vuosittaista sähköntuotantoa. [1]

Vuoden 2015 tammikuusta lähtien EU-alueella myytävien ja käyttöönotettavien tehoalueeltaan 7,5–375 kW:n sähkömoottorien hyötysuhteen tulee olla IE3-luokkaa. IE2-luokan hyötysuhde riittää, jos sähkömoottori on taajuusmuuttajakäyttöinen. Vuodesta 2017 lähtien hyötysuhdevaatimusten tehoalueen alaraja laskee 0,75 kW:n. [2]

Hyötysuhdeluokat ovat tällä hetkellä IE1, IE2, IE3 ja IE4; IE5-luokka on tulossa lähivuosina. Hyötysuhdeluokissa suurempi numero kertoo korkeammasta vaatimuksesta hyötysuhteelle. Teknologian kehittyessä ja energiansäästövaatimusten tiukentuessa jatkuvasti sähkömoottorivalmistajat pyrkivät tuotteissaan yhä parempaan tarjontaan muun muassa hyötysuhteiden osalta. ABB:lla on jo tehoalueeltaan 75–355 kW:n valikoimassa IE4-luokan sähkömoottoreita kaksi-, neljä- ja kuusinapaisina ja työn alla on myös pienempien teholuokkien IE4-valikoima. Tässä tutkimuksessa tutkitaan 22 kW:n kuusinapaisen, 30 kW:n kaksi- ja nelinapaisen sekä 37 kW:n nelinapaisen sähkömoottorin eri mahdollisuuksia saada sähkömoottori hyötysuhteeltaan IE4-luokkaan. Tarkoituksena on pyrkiä selvittämään, kuinka mahdollisimman pienillä muutoksilla jo olemassa olevasta oikosulkumoottorivalikoimasta saataisiin muokattua hyötysuhteeltaan IE4-luokan sähkömoottoreita. Tutkimuksessa selvitetään sähkömoottorien hyötysuhdeluokat ABB:n omaa ADEPT-nimistä (Advanced Electrical Dimensioning Tool) laskentaohjelmaa käyttäen ja ADEPT-laskelmien pohjalta valitaan valmistettavat ja testattavat prototyyppimoottorit, jotka onnistuessaan tulevat tuotantoon.

Parempaan hyötysuhteen omaavien sähkömoottorien aikaansaamisen lisäksi tavoitteena on tutkia korkean hyötysuhteen sähkömoottorien häviöjakaumaa ja häviöiden muodostumista. Tavoitteena on myös selvittää, miten häviöitä saataisiin pienemmäksi, jotta hyötysuhde paranisi. Tutkimuksen pohjalla on myös ongelma, jossa käytössä oleva las-

kentaohjelma antaa liian optimistiset arviot esimerkiksi hyötysuhteesta laskentakohdeena oleville sähkömoottoreille ja työssä selvitetäänkin laskentaohjelma ADEPT:n laskennan perustaa ja verrataan laskentatuloksia testattuihin tuloksiin. Tutkittavana ovat myös häviöjakauman erot laskennallisesti ja testitilanteessa sekä voidaanko laskennan perusteella ennustaa sähkömoottorien häviöjakaumaa.

Tutkimuksessa käydään läpi myös sähkömoottorin testaaminen ABB Oy Moottorit ja Generaattorit Vaasan yksikössä ja IEC-standardin vaatimat testausmenetelmät. ABB:lla sähkömoottoreita ja –generaattoreita testataan asiakastilausten mukaan ja samaa välineistöä käytetään prototyypimoottorien testauksessa.

2 SÄHKÖMOOTTORIN HYÖTYSUHDE JA HÄVIÖJAKAUMA

Kolmivaiheisen epätahtimoottorin sähköverkosta ottama sähköteho P_1 lasketaan yhtälöllä

$$P_1 = \sqrt{3}U_1I_1\cos\varphi_1, \quad (1)$$

jossa U_1 on verkon jännite, I_1 on verkon virta ja $\cos\varphi_1$ on tehokerroin. Verkosta ottamansa sähkötehon sähkömoottori muuttaa mekaaniseksi tehoksi ja näiden tehojen suhde antaa sähkömoottorin hyötysuhteen. [3]

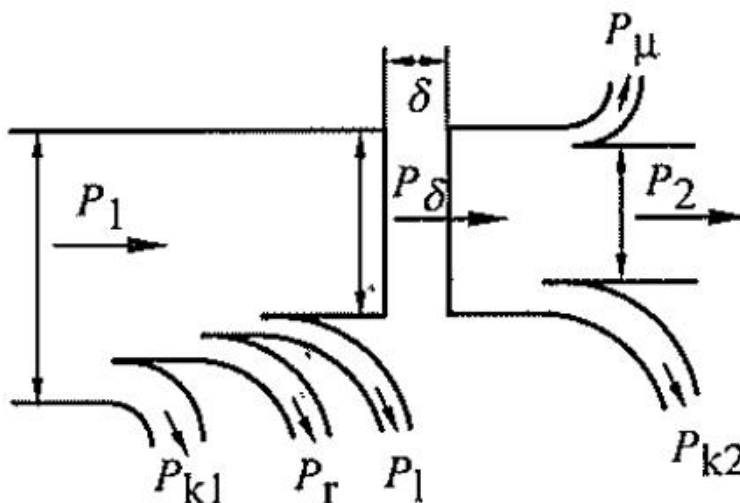
Sähkömoottorin nimellinen hyötysuhde η voidaan laskea yhtälöllä

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{\sqrt{3}U_1I_1\cos\varphi_1}, \quad (2)$$

jossa P_2 on sähkömoottorin antama teho. [4]

2.1 Sähkömoottorin hyötysuhteen muodostuminen

Epätahtimoottorin tehonottoa ja kulutusta kuvaa kuva 1, jossa P_1 on sähkömoottorin ottama sähköteho, P_2 on sähkömoottorin tuottama mekaaninen teho, P_δ on ilmaväliteho, P_{k1} on staattorin resistiiviset häviöt, P_{k2} on roottorin resistiiviset häviöt, P_r on rautahäviöt, P_μ on hankaushäviöt ja P_l on lisähäviöt. [4]



Kuva 1. Epätahtimoottorin tehonjakokaavio [4].

Sähkömoottorin ottama sähköteho ei siis suoraan muutu sähkömoottorin antamaksi tehoksi vaan tehoa kuluu sähkömoottorin sisällä erilaisiin häviöihin. [4]

Käämityksissä ja rautaosissa syntyvät häviöt on saatava mahdollisimman pieniksi, sillä ne lämmittävät konetta ja nostavat koneen lämpötilan sallittua suuremmaksi. Lämmön siirtyminen luonnollisesti ympäröivään ilmatilaan ei riitä vaan sähkömoottoria viilentämään tarvitaan tuuletinta tai puhallinta, joista syntyy hankaushäviöitä. [5]

2.2 Resistiiviset häviöt

Staattorin resistiiviset häviöt syntyvät virran kulkiessa staattorikäämityksessä. Resisttiiviset häviöt voidaan laskea yhtälöllä

$$P_{k1} = mI_{sr}^2 R_{sr}, \quad (3)$$

jossa m on staattorin vaiheluku, I_{sr} on staattorin virta ja R_{sr} on staattorin käämien resistanssi. Roottorin resistiiviset häviöt lasketaan vastaavalla yhtälöllä sijoittamalla staattorin virta-arvojen ja käämien resistanssien arvojen tilalle roottorin virta-arvo ja käämien resistanssin arvo. [4]

2.3 Rautahäviöt

Rautahäviöt P_r aiheutuvat muuttuvasta magneettivuosta. Magneettimateriaalissa rautahäviöt jaetaan kahteen komponenttiin, staattiseen P_{st} ja dynaamiseen P_{dyn} tehohäviökomponenttiin. [6]

Toisin sanoen rautahäviöt voidaan määrittää yhtälöllä

$$P_r = P_{st} + P_{dyn}. \quad (4)$$

Staattinen komponentti käsittää hystereesihäviöt P_h ja dynaamiseen komponenttiin kuuluvat klassiset pyörrevirtahäviöt P_{exc} sekä lisähäviöt P_l . Tällöin rautahäviön P_r kokonaistehohäviön yhtälö on [6]

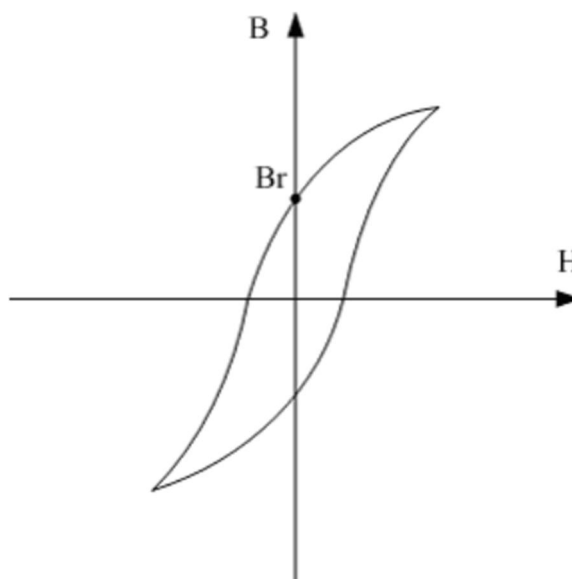
$$P_r = P_h + P_{exc} + P_l \quad (5)$$

Hystereesihäviöiden osuus on noin 60–70 % rautahäviöistä 50 Hz taajuudella hyvällä levymateriaalilla ja tätä suurempi huonommalla levymateriaalilla. Loput häviöistä aiheutuvat suunnilleen puoliksi klassisten pyörrevirtahäviöiden ja lisähäviöiden kesken.

Nämä osuudet pätevät kidesuuntaamattomille sähkölevymateriaaleille, joita on käytetty tässä tutkimuksessa staattorin ja roottorin levymateriaalina. [7]

2.3.1 Hystereesihäviöt

Rauta kuuluu ferromagneettisten materiaalien joukkoon. Ferromagneettisten materiaalien alkeishiukkaset pyrkivät suuntautumaan ulkoisen magneettikentän mukaisesti. Moottoreissa näitä materiaaleja käytetään staattorin ja roottorin sähkölevyissä. Hystereesihäviöt syntyvät hystereesi-ilmiöstä, jonka aiheuttaa materiaalin kiderakenteen virheiden vuorovaikutus magneettisia alkeisalueita erottavien Blochin seinämien kanssa. Hystereesihäviöiden suuruus on verrannollinen kuvassa 2 esittävään hystereesisilmukan pinta-alaan ja silmukkaa kierrettävään taajuuteen. [8]



Kuva 2. Raudan magneettivuontiheyden B muutos magneettikentän H muutoksen funktiona. B_r on remanenssivuontiheys. [9]

Hystereesihäviö voidaan laskea yhtälöstä

$$P_h = Vf \int HdB , \quad (6)$$

jossa V on kappaleen tilavuus, f taajuus, B magneettivuontiheys ja H magneettikentän voimakkuus. [10]

Kuvan 2 hystereesisilmukka sisältää vain magneettivuon perusaallon. Staattori- ja roottorilevyissä olevat uritukset aiheuttavat kuitenkin vuokomponentteihin väreitä, jolloin perussilmukan lisäksi hystereesikäyrässä ilmenee pienempiä silmukoita hystereesikäyrän sisällä. Nämä pienet silmukat lisäävät hystereesihäviöitä. Silmukkojen määrän kasvu aiheutuu väreestä, joka syntyy, kun magneettivuot sisältävät perusaallon lisäksi muita taajuuskomponentteja. [9]

Hystereesihäviöitä pystytään arvioimaan niin sanotulla Laversin menetelmällä. Menetelmä perustuu Steinmetzin yhtälöön

$$P_h = K_h f B_{max}^x, \quad (7)$$

jolla määritellään puhtaasti sinimuotoisen vuon hystereesihäviöitä P_h . Yhtälössä K_h ja x ovat magneettivuon ja materiaalin tyypistä riippuvia kokeellisia vakioita, B_{max} on vuon maksimiarvo ja f taajuus. Lisäämällä Steinmetzin yhtälöön kokeellisesti määritetty korjauskerroin $K_{h,väre}$ saa yhtälö muodon

$$P_h = K_{h,väre} K_h f B_{max}^x. \quad (8)$$

Toisin sanoen vuon väreeseen vaikutukset saadaan näin mukaan hystereesihäviölaskentaan.

Kerroin $K_{h,väre}$ määritellään yhtälöllä

$$K_{h,väre} = 1 + \frac{k}{B_{max}} \sum_{i=1}^n \Delta B_i, \quad (9)$$

jossa kerroin k vaihtelee välillä 0,6...0,7 ja ΔB_i on vuossa esiintyvän värekomponentin i vaikutus päävuon amplitudiin ja n on järjestysluku. [7]

2.3.2 Klassiset pyörrevirtahäviöt

Magneettivuon muutoksia pyrkivät vastustamaan pyörrevirrat, jotka syntyvät rautasydämessä esiintyvistä magneettivuon vaihtelun indusoimista jännitteistä. Pyörrevirrat saavat aikaan pyörrevirtahäviöitä P_{exc} , jotka voidaan laskea yhtälöllä

$$P_{exc} = \frac{V \pi^2 f^2 d^2 \hat{B}_m^2}{6\rho}, \quad (10)$$

jossa V on materiaalin tilavuus, f on taajuus, d on materiaalin paksuus, \hat{B}_m on magneettivuontiheyden huippuarvo ja ρ on materiaalin resistiivisyys. [7]

Yhtälö 10 ei kuitenkaan ota huomioon lisäpyörrevirtahäviöitä, jotka aiheutuvat Blochin seinämien liikkeistä. Tämä selittää, miksi piiteräkselle suoritettujen testien pyörrevirtahäviöt ovat 50 % laskettuja suurempia. Yhtälöstä 10 saatavaa arvioita voidaan siis pitää vain suuntaa antavana, koska se ei huomioi materiaalin kiteistä rakennetta ja virranahtoa. [7] Virranahdolla tarkoitetaan ilmiötä, jossa virrantiheys on johtimen reunoilla suurempi kuin sen keskellä. [11]

2.4 Sähkömoottorin lisähäviöt

Weissin alueella kaikkien atomien magneettiset momentit ovat samansuuntaisia. Weissin alueet ovat pieniä alueita ferromagneettisten aineiden kiderakenteessa. Weissin alueiden sisällä aine on magnetoitunut kyllästysarvoonsa asti, mutta kappale ei silti välttämättä ole magnetoitunut, koska erisuuntaisen magneettikentän omaava toinen Weissin alue kumoaa kappaleen magnetoitumisen. Blochin seinämät ovat erisuuntaisten Weissin alueiden välissä olevia pintoja. [7]

Blochin seinämien liikkeistä aiheutuvat virran pyörrehäviöt lasketaan usein lisähäviöihin. Näiden lisäksi lisähäviöitä aiheuttavat magneettivuon vaillinainen tunkeuma levy-materiaaliin, Blochin seinämien vääntyminen, muodostuminen ja tuhoutuminen sekä epäsinimuotoiset muutokset vuontiheydessä Weissin alueiden vaikutuksesta. Lisähäviöitä on hankalaa määrittellä laskemalla etukäteen. [7]

2.5 Sähkömoottorin hankaushäviöt

Tuulettimen ja laakeroinnin kitkan aiheuttamat häviöt lasketaan hankaushäviöiksi. Laakereiden vierintävastus ja tiivisteiden hankaus muodostavat laakereista johtuvat häviöt. Tuuletin sijaitsee sähkömoottorin akselilla ja aiheuttaa häviöitä ottamalla tehoa sähkömoottorista ja lisäämällä ilmavälin ilmavirtaushäviöitä. Tuuletushäviöitä aiheuttavat myös mahdolliset tuuletussiivet, jotka sijaitsevat roottorin oikosulkurenkaissa. [12]

2.6 Ilmavälin vaikutus sähkömoottorin hyötysuhteeseen

Sähkömoottorissa roottorin ja staattorin välistä tilaa kutsutaan ilmaväliksi, jonka läpi magneettipiirissä kulkeva sulkeutuva vuo menee kaksi kertaa. Koneen ilmavälissä siirtyvä ilmaväliteho P_δ määrittää yhdessä roottorin kulmanopeuden ω ($\omega=2\pi n$) kanssa sähkökoneen sähkövääntömomentin T_s suuruuden yhtälöllä

$$T_s = \frac{P_\delta}{\omega}. \quad (11)$$

Yhtälöllä 11 voidaan määrittää tarvittava moottoriteho. Aikaisemmissa luvuissa esitettyjen häviöiden vaikutuksesta ilmaväliteho jää pienemmäksi kuin sähkömoottorin verkosta ottama teho. Ilmavälin ansiosta roottori voi pyöriä vapaasti. Hyötysuhteen kannalta ilmaväli on optimaalisimmillaan mahdollisimman pieni, sillä ilman magneettinen johtavuus on huonompi kuin raudan. Liian pienellä ilmavälillä roottorin pinta kokee magneettivuon vaihtelun suuremmin, jolloin häviöt kasvavat. [5]

2.7 Sähkömoottorien hyötysuhdeluokat

Kansainvälinen sähköteknillinen komissio IEC (International Electrotechnical Commission) on luonut hyötysuhdeluokat, joihin sähkömoottorit määritellään hyötysuhteiden mukaan. IEC:n tavoitteena on edistää yhteistyötä kaikissa standardisointiin liittyvissä kysymyksissä sähkö- ja elektroniikka-alalla. [13]

Hyötysuhdeluokat perustuvat IEC 60034-30-1 –standardiin, joka määrittelee luokat IE1-IE4. Vaadittu hyötysuhde kullekin luokalle määräytyy sähkömoottorin tehon, taajuuden (50 Hz tai 60 Hz) ja napaluvun mukaan. IE4 on tällä hetkellä korkein hyötysuhdeluokka, mutta rajat IE5:lle ovat valmistelujen alla. Tässä työssä tutkituilla sähkömoottoreilla on tarkoitus saavuttaa IE4-hyötysuhdeluokan hyötysuhderajat 50 Hz:n taajuudella. Taulukossa 1 on esitetty tässä tutkimuksessa käytettävien sähkömoottorien nimellistehojen P_n ja napalukujen IE4 hyötysuhdevaatimusrajat. IEC-standardi myös määrittelee, miten sähkömoottorit tulee testata ja luvussa 16 esitetty ABB Oy Moottorit ja Generaattorien testausohjelma on IEC-standardin mukainen. [13]

Taulukko 1. Sähkömoottorien IE4-hyötysuhdeluokan hyötysuhderajat 50 Hz:n taajuudella [13].

P_n (kW)	Napaluku	Hyötysuhde (%)
22	4	94,5
22	6	93,7
30	2	94,5
30	4	94,9
37	4	95,2

IEC-standardi sallii hyötysuhteissa käytettävän toleransseja, joten sähkömoottorin saa hyötysuhderajan sisällä leimata IE4-hyötysuhdeluokan sähkömoottoriksi, vaikka suora testattu arvo ei rajaa saavuttaisikaan. Alin sallittu hyötysuhde η_t alle 150 kW:n sähkömoottorille lasketaan yhtälöllä

$$\eta_t = \eta - 0,15(1 - \eta), \quad (12)$$

jossa η on IEC taulukosta löytyvä hyötysuhteen raja-arvo. [14]

3 SÄHKÖMOOTTORIN HYÖTYSUHTEEN LASKEMINEN ADEPT:LLA

ADEPT on ABB Oy:llä kehitetty sähkömoottorin suunnitteluun käytettävä ohjelma, joka tuottaa ADEPT -laskelmia. Ohjelmalla voidaan suunnitella myös generaattoreita. ADEPT-laskentaohjelmalla voidaan muun muassa mitoittaa epätahtimoottoreita, laskea käynnistysaikoja ja lämpenemiä sekä luoda erilaisia graafisia esityksiä sähkömoottorista. ADEPT-laskentaohjelma tuottaa sähkömoottorilaskelmia siihen syötettyjen parametrien perusteella. ADEPT-laskentaohjelma on käytössä ABB Oy:lla Sveitsissä, Kiinassa, Suomessa, Intiassa, Italiassa ja Ruotsissa. ADEPT-laskentaohjelmaa kehitetään koko ajan globaalimpaan suuntaan, jolloin mikä tahansa ABB Oy:n sähkömoottori olisi laskettavissa ja suunniteltavissa, missä tahansa toimipisteessä. [15]

ADEPT-laskentaohjelma perustuu elementtimenetelmään FEM (Finite Element Method). FEM:iä käyttämällä pystytään käsittelemään suuria numerolaskumääriä kohtuullisessa ajassa.[16] ADEPT hyödyntää kaksiulotteisia FEM-ohjelmia, jolloin tulosten tarkkuus riippuu annetusta käämityksen reaktanssista, päättyvästä elementtiverkosta, malliyhtälöiden määrästä laskelmissa sekä magnetoitumiskäyrien oikeellisuudesta. [15]

ADEPT-laskentaohjelmassa on käytettävissä neljä päälaskentaohjelmaa, jotka kaikki tukevat laajan valikoiman sähkömoottoreiden laskemista. Päälaskentaohjelmat ovat ainakin vielä pääasiassa maakohtaisia ja tukevat eri maissa valmistettävien sähkömoottoreiden laskemista. [15]

Tässä tutkimuksessa tutkitaan runkokokojen 200–225 moottoreita sekä karaistuksen osalta 180 runkokoon sähkömoottoria. Runkokoolla tarkoitetaan mittaa sähkömoottorin akselin keskikohdasta alustaan ja se ilmoitetaan millimetreissä. Runkokoko perustuu IEC-standardiin ja ulostulotehoille on annettu napaluvun mukaan tietty runkokoko, jossa sen tulee olla ollakseen standardin mukainen ja näin ollen hyötysuhdeluokissa vertailukelpoinen. Runkokoon perässä oleva kirjainyhdistelmä kertoo sähkömoottorin asennusmitoista ja staattoripaketin pituudesta. [17]

3.1 Laskennan haasteet

Käytännön kokemus on osoittanut ADEPT-laskentaohjelmalla laskettavien sähkömoottorien hyötysuhteiden olevan korkeampia kuin oikeat testitulokset ja tämän vuoksi laskentatuloksiin onkin lisättävä marginaalia, jotta sähkömoottorista saadaan testattaessa IE4-luokan vaatima hyötysuhde. IEC sallii alle 150 kW:n sähkömoottoreille käytettävä 15 % toleranssia, mutta prototyyppien ollessa kyseessä sähkömoottorin hyötysuhteen tulisi ylittää IEC-standardin vaatima raja selvästi.

Tässä työssä tarkastellaan myös pitävätkö ADEPT-laskentaohjelmalla lasketut hyötysuhteet paikkaansa ja miten häviöjakauma mahdollisesti eroaa laskennallisesti ja todellisuudessa. Laskentaohjelmaan on mahdollista kirjata manuaalisesti arvioituja häviöitä ja aikaisemmista testeistä saatuja häviöitä, kuten tuulettimesta aiheutuvia hankaushäviöitä. Prototyyppejä laskettaessa aiempaa testidataa on tarjolla vähän, joten laskennassa käytettävät häviöarvot perustuvat arvioihin ja tämän takia laskuihin tulee lisätä marginaalia.

ADEPT-laskentaohjelmassa häviöitä lasketaan monella tavalla. Alustavasti jako tapahtuu käytettävän laskentaprofiilin perusteella. Laskentaprofiilit ovat joko analyttisiä tai elementtimenetelmään pohjaavia. Häviöt lasketaan jokaiselle sähkömoottorille erikseen ja lähtöarvoja muutettaessa ohjelma laskee häviöt alusta alkaen uudelleen ilman muutokertoimia. [18]

Laskentaohjelmassa häviöiden laskenta aloitetaan ratkaisemalla magneettiipiiri ja toimintapiste. Näiden avulla saadaan laskettua muun muassa magneettivuontiheydet, jättämä, staattorivirta ja roottorihäkin virta, joiden avulla saadaan laskettua kuparihäviöt. [18]

Rautahäviölaskuissa käytetään heuristiikkaa. Kun tulokset on laskettu analyttistä laskuohjelmaa käyttämällä, loppukäyttäjä voi valita, minkälaiset rautahäviöt laskutulokseen saadaan. Käyttäjän kertomien ollessa ykkösiä pohjaa laskutulos sähkölevyjen materiaaliparametreihin. Häviömalli ei tässä huomioi esimerkiksi vuon pyörimistä eikä irtusprosesseissa tapahtuvaa materiaaliominaisuuksien vaihtumista, joten laskutuloksia pitää muokata kertoimilla. Käyttäjä voi jopa kaksinkertaistaa rautahäviöt kertoimilla. [18]

3.2 Laskenta

Sähkömoottorien suunnittelulaskennassa käytettiin ADEPT-laskentaohjelman FCSmek ja S113 -laskentaprofiileja. FCSmek-laskentaprofiili pohjautuu elementtimenetelmään ja S113-laskentaprofiili on analyttinen laskentaohjelma. S113 -laskentaprofiili perustuu sähkömoottorin yksivaiheisen sijaiskytkennän ratkaisemiseen. Ohjelmassa on mahdollista hakea jo koestettuja arvoja laskennan pohjalle, mutta tässä tutkimuksessa pohjana käytetyille moottorilaskelmille ei ollut tehty aiempia koestuksia. FCSmek-laskentaprofiilissa pohjana on elementtimenetelmä, jolloin laskettava alue jaetaan osiin ja jokainen osa pystytään laskemaan yhtäaikaisesti. [19]

Suunniteltavien IE4-hyötysuhdeluokan sähkömoottorien pohjana käytettiin jo markkinoilla olevia IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottoreita. Koska IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottoreille ei ollut ollenkaan tehty koestuksia tai niitä oli tehty vain yksi, pää-

dyttiin käyttämään ohjelmien valmiiksi asettamia häviöitä. Pienemmän tuulettimen aiheuttama hankaushäviöiden pieneneminen arvioitiin manuaalisesti vastaavien tuulettimien omaavien moottoreiden testeihin vertailemalla. Laskennassa pyrittiin saavuttamaan mahdollisimman korkea hyötysuhde parametrisarvoja muuttamalla siten, että käynnistysvirta pysyy kohtuullisena ja tehokerroin järkevänä. Käynnistysvirran vaikutuksista löytyy enemmän tietoa luvussa 5.3.1. Osalle IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottoreista oli olemassa ennestään saatuja testiarvoja. ADEPT-laskelmista saatavia arvoja verrattiin näihin testattuihin arvoihin. Muita moottoreita vertailtiin katalogiarvoihin, jotka on laskettu oletuksia käyttämällä. Vertailu tehtiin laskemalla alkuperäinen ADEPT-laskelma samalla ohjelmalla, jolla uudet sähkömoottorit laskettiin. Laskuohjelmissa on todellisuuteen nähden heittoa siten, että ohjelma laskee hyötysuhteen ja käynnistysvirran todellisuutta suuremmiksi. Testi- tai katalogiarvoihin perustuen alkuperäisistä IE3-moottoreiden laskelmista laskettiin kertoimet, joilla uusien laskelmien arvoja suhteutettiin lähemmäs todellisuutta. Laskut suoritettiin ainoastaan täydellä kuormituksella ja osakuormat jätettiin kokonaan huomioimatta tässä vaiheessa. Laskentaohjelmassa käytettiin FCSmekkiä käyttäen 200 askelta jakson aikana jaksomäärän ollessa 5 sinimuotoisella jännitteellä. Koska laskentaohjelman arvioitiin laskevan hyötysuhteet moottoreille yläkanttiin, pyrittiin laskentatulokset saamaan hyötysuhteen osalta vaadittua rajaa paremmiksi. Prototyypeissä tavoitellaan hyötysuhderajoja ilman toleransseja.

Prototyypimoottorien mitoitus aloitettiin laskemalla ADEPT-ohjelmalla vastaavat IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottorit ja vertaamalla näitä tuloksia katalogi- tai testattuihin arvoihin. Tässä tutkimuksessa kohteena ovat 2-napainen 30 kW sähkömoottori, 4-napaiset 30 kW ja 37 kW sähkömoottorit sekä 6-napainen 22 kW sähkömoottori. Vertailusta saadaan suhdekerroin, jolla voidaan arvioida, mitä prototyypimoottorien hyötysuhde-, tehokerroin- ja käynnistysvirta-arvot olisivat todellisuudessa. IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottorien arvot hyötysuhteelle, tehokertoimelle ja käynnistysvirralle ovat taulukossa 2. 4-napaiselle 30 kW:n IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottorille on olemassa testitulokset, joten suhteutus tehdään testeissä saatuihin arvoihin. Katalogiarvot hyötysuhteelle, tehokertoimelle ja käynnistysvirralle on saatu arvioimalla ja suhteuttamalla samankokoisiin eri hyötysuhdeluokan testattuihin sähkömoottoreihin, joten näitä arvoja voi pitää vain suuntaa antavina.

Taulukko 2. IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottorien katalogiarvot, testatut arvot ja ADEPT-laskentaohjelmalla lasketut arvot hyötysuhteelle, tehokertoimelle ja käynnistysvirralle.

	ADEPT	Katalogi	Testatut
2-n. 30 kW sähkömoottori			
Hyötysuhde	94,2 %	94,1 %	-
Tehokerroin	0,89	0,87	-
Käynnistysvirta Is/In	8,8	7,7	-
4-n. 30 kW sähkömoottori			
Hyötysuhde	94,1 %	94,2 %	93,5 %
Tehokerroin	0,84	0,86	0,83
Käynnistysvirta Is/In	8,0	7,8	6,9
6-n. 30 kW sähkömoottori			
Hyötysuhde	93,4 %	92,9 %	-
Tehokerroin	0,84	0,84	-
Käynnistysvirta Is/In	8,7	8,2	-
4-n. 37 kW sähkömoottori			
Hyötysuhde	94,9 %	94,6 %	-
Tehokerroin	0,89	0,88	-
Käynnistysvirta Is/In	8,2	7,6	-

IE4-hyötysuhdeluokan raja-arvot ovat taulukossa 1 ja prototyypimoottorien laskennassa tavoitellaan hyötysuhdearvoksi suhteuttamalla vähintään raja-arvon mukaista hyötysuhdearvoa. Luvun 5.3.1 perusteella käynnistysvirta-arvon tavoiteltiin jäävän alle 9 ja tehokertoimen pysyvän vähintään pohjana olevan IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottorin tasolla. Taulukossa 3 ovat ADEPT-laskentaohjelmalla lasketut sekä suhteuttamalla taulukon 2 arvoihin saadut hyötysuhde-, tehokerroin- ja käynnistysvirta-arvot IE4-hyötysuhdeluokan prototyypimoottoreille.

Taulukko 3. IE4-hyötysuhdeluokan prototyyppimoottorien ADEPT-laskentaohjelmalla lasketut arvot ja suhteutetut arvot hyötysuhteelle, tehokertoimelle ja käynnistysvirralle.

	ADEPT	Suhteutetut
2-n. 30 kW sähkömoottori		
Hyötysuhde	95,1 %	95,0 %
Tehokerroin	0,90	0,88
Käynnistysvirta Is/In	10,2	8,9
4-n. 30 kW sähkömoottori		
Hyötysuhde	95,3 %	94,7 %
Tehokerroin	0,84	0,83
Käynnistysvirta Is/In	9,7	8,4
6-n. 30 kW sähkömoottori		
Hyötysuhde	94,2 %	94,2 %
Tehokerroin	0,85	0,85
Käynnistysvirta Is/In	9,2	8,7
4-n. 37 kW sähkömoottori		
Hyötysuhde	94,9 %	94,6 %
Tehokerroin	0,89	0,88
Käynnistysvirta Is/In	8,2	7,6

Jokaiselle prototyyppimoottorille vaihdettiin ADEPT-ohjelmasta roottori- ja staattorilevyjen parametreiksi paremmalla johtavuudella olevan sähkölevymateriaalin parametrit ja hyötysuhdetta saatiin näin parannettua laskennallisesti. Sähkölevymateriaaliksi vaihdettiin M270-50A IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottoreissa olevan M350-50A tilalle. ADEPT-ohjelma vaihtaa rautahäviöt sille syötetyn levymateriaalin perusteella. Moottoreita laskettiin läpi eri lankalukujen ja jänteistysten yhdistelmillä ja ilmaväliä kokeiltiin myös kasvattaa ja pienentää ja näistä parhaimmat tulokset valittiin protolaskelmaksi. Ilmavälin muutoksilla ei ollut huomattavaa parannusta hyötysuhteeseen. Kuparin täytekerroin suhteutettiin muihin kaksitasokäämityksiin nähden. Kaksitasokäämitys vaihdettiin 2-napaiselle 30 kW sähkömoottorille sekä 4-napaiselle 37 kW sähkömoottorille ja näille jänteistys asetettiin 5/6-jänteistykseksi säätämällä Ypitch-arvoa, joka on kääminän jakoluku. 4-napaiselle 37 kW sähkömoottorille A1-lukua eli samansuuntaisten haarojen lukumäärää säädettiin kahdesta neljään, jotta alkuperäinen lankaluku olisi mahdollinen kaksitasokäämilläkin. 4-napaiselle 30 kW sähkömoottorille lankalukua säädettiin 0,5 kierrosta pienemmäksi kuin IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottorin lankaluvun arvo oli, jotta hyötysuhdetta saataisiin paremmaksi. Muut arvot ja asetukset prototyyppimoottoreille pidettiin vastaavana kuin IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottoreilla. Muutosten taustalla olevat perusteet ovat luvussa 5.

4 SÄHKÖMOOTTORIN TESTAAMINEN

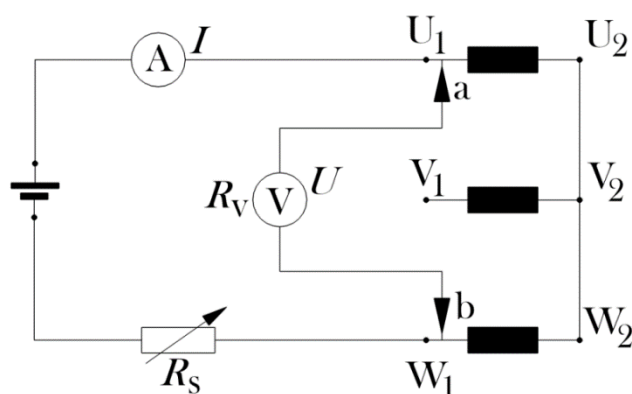
Epätahtimoottorin hyötysuhde saadaan määritettyä testautilanteessa vapaasti valittavissa olevassa kuormitusilanteessa, josta voidaan mitata sähkötehoa. Mekaaninen teho P_2 saadaan hyödyntämällä mittaamalla sähkömoottorin oma sähköteho P_1 ja vähentämällä tästä eri tehohäviöt P_h yhtälöllä

$$P_2 = P_1 - P_h. \quad (13)$$

Mekaanisen tehon laskemiseksi vaadittavat häviöt saadaan määritettyä resistanssi-, tyhjäkäynti- ja oikosulkumittauksilla. [4]

4.1 Resistanssimittaus

Resistanssimittauksessa käytetään tasasähköä, jotta saadaan määritettyä tehohäviöiden ja sähkömoottorin lämpenemisen lisäksi ympyrädiagrammin vääntömomenttisuora tasavirtaresistanssin avulla. Resistanssien arvot kertovat myös käämityksen symmetrisyydestä ja siitä, että käämi on oikein tehty. Sähkömoottorin kuormitus tuottaa lämpöä, joka nostaa käämien lämpötilaa. Käämien lämpötilan noustessa resistanssi kasvaa noin 20 %. Tämä tulee huomioida riittävällä mittaustarkkuudella resistanssia mitattaessa, sillä $\pm 0,5$ % mittaustarkkuus resistanssimittauksessa vastaa $\pm 2,5$ % mittaustarkkuutta sähkömoottorin lämpenemisessä. Resistanssimittaukseen käytetään kuvan 3 mukaista kytkentää tai se mitataan suoraan resistanssimittarilla. [4]



Kuva 3. Sähkömoottorin resistanssimittauksen kytkentä virtamittarin A ja jännitemittari V kanssa. [4]

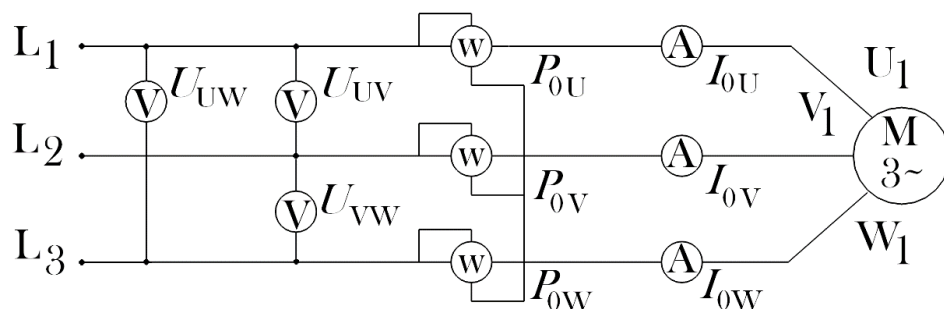
Mittausjännitealue on yleensä kahden ja kuuden voltin välillä ja sarjavastuksella R_s säädetään mittausvirtaa käämeille ja mittareille sopivaksi. Kuvassa 2 olevassa kytkennässä R_v vastaa jännitemittarin sisäistä resistanssia, U jännitettä ja I virtaa. Kuvassa 2 käämit

ovat kuvattu mustina laatikkoina ideaalikomponentteina ja R_1 kuvaa vaiheresistanssia. U_1 , U_2 , V_1 , V_2 , W_1 ja W_2 ovat vaihejänniteitä. Koska liian suuri mittausvirta aiheuttaisi resistanssin muuttumista lämpenemisen takia, mittausvirran tulee olla korkeintaan 20 % sähkömoottorin nimellisvirrasta. Mitatessa käämin lämpötilan on oltava tiedossa tarkalleen, jotta osataan laskea sen vaikutus resistanssiin. Mitattu resistanssi saadaan yhtälöstä

$$R = \frac{U}{I - \frac{U}{R_v}} \quad (14)$$

Jokaisen vaiheen U_1 , V_1 ja W_1 väliltä mitataan resistanssi ja näistä arvoista lasketaan keskimääräinen vaiheresistanssi R_1 .

Tyhjäkäyntimittauksessa sähkömoottoria pyöritetään ilman kuormitusta, jolloin saadaan selvitettyä tyhjäkäyntivirta. Sähkömoottorin pyöriessä tyhjäkäynnillä pyörimisnopeus on lähes synkroninen, jolloin roottoriin ei indusoidu virtaa ja roottorin häviöt ovat pieniä. Tyhjäkäyntimittauksella saadaan näin selvitettyä rautahäviöt P_r , hankaushäviöt P_μ sekä staattorin resistiiviset häviöt. Tyhjäkäyntimittaukseen käytetään kuvan 3 mukaista kytkentää. [4]



Kuva 4. Sähkömoottorin tyhjäkäyntimittauksen kytkentä. [4]

Kuvassa 3 L_1 , L_2 ja L_3 kuvaavat liitinjänniteitä. Vaiheiden väliset jännitteet U_{uw} , U_{uv} ja U_{vw} mitataan jännitemittarilla. Jokaisen vaiheen tyhjäkäyntitehot P_{0u} , P_{0v} ja P_{0w} mitataan erikseen. Vaiheiden tyhjäkäyntivirrat I_{0u} , I_{0v} ja I_{0w} mitataan. Sähkömoottorille tulevat vaihejännitteet merkitään U_1 , V_1 ja W_2 . Tyhjäkäyntimittauksesta saaduista tuloksista määritetään mittausjännite yhtälöllä

$$U = \frac{U_{UW} + U_{VW} + U_{WV}}{3}, \quad (15)$$

tyhjäkäyntivirta yhtälöllä

$$I_0 = \frac{I_{0U} + I_{0V} + I_{0W}}{3}, \quad (16)$$

tyhjäkäyntiteho yhtälöllä

$$P_0 = P_{0U} + P_{0V} + P_{0W} \quad (17)$$

sekä tyhjäkäynnin tehokerroin yhtälöllä

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}UI_0}. \quad (18)$$

Sähkömoottorin mekaaniset hankaushäviöt määritetään piirtämällä tyhjäkäyntiteho P_0 jännitteen ja nimellisjännitteen suhteen U/U_n funktiona. Mekaaniset hankaushäviöt ovat yhtä suuret kuin tyhjäkäyntiteho on liitinjännitteellä $U=0$. Käyttämällä jännitteen ja nimellisjännitteen suhteen neliölle lineaarista asteikkoa saadaan piirrettyä suora P_0 [4]

$$P_0 = f \left[\left(\frac{U}{U_n} \right)^2 \right]. \quad (19)$$

Suora P_0 leikkaa P_0 -akselin mekaanisia tehohäviöitä P_μ vastaavassa pisteessä. Staattorin resistiiviset tyhjäkäyntihäviöt P_{k0} lasketaan yhtälöllä

$$P_{k0} = 1,5I_0^2R = 3I_0^2R_1, \quad (20)$$

jossa R on staattorikäänityksen resistanssi mitattuna kahden liitinruuvien väliltä ja R_1 on staattorin vaihekäänin resistanssi. Staattorin resistiivisten tyhjäkäyntihäviöiden P_{k0} ja mekaanisen tehohäviön P_μ avulla saadaan laskettua sähkömoottorin rautahäviöt P_r vähentämällä kaksi ensimmäistä tyhjäkäyntihäviöstä yhtälöllä [4]

$$P_r = P_0 - P_{k0} - P_\mu. \quad (21)$$

4.2 Oikosulkumittaus

Oikosulkumittauksessa sähkömoottorin roottori jarrutetaan paikoilleen, jonka jälkeen staattoriin syötetään pieni kolmivaihejännite ja roottoria aletaan pyörittää hitaasti. Sähkömoottorin ottamaa virtaa seuraamalla etsitään piste, jossa virran arvo ei vaihtele ja roottori pysäytetään tähän asentoon, jolloin mekaanisia häviöitä ei pääse syntymään. Mittaukset suoritetaan eri virran arvoilla korkeimmasta alaspäin, jotta sähkömoottorin

lämpötila ei ehdi muuttua huomattavasti mittausten aikana. Oikosulkumittaus suoritetaan tekemällä mittaukset eri sähkövirran arvoilla, jotka ovat nimellisvirta kerrottuna kertoimilla 1,5-, 1,0-, 0,8- ja 0,5. [4]

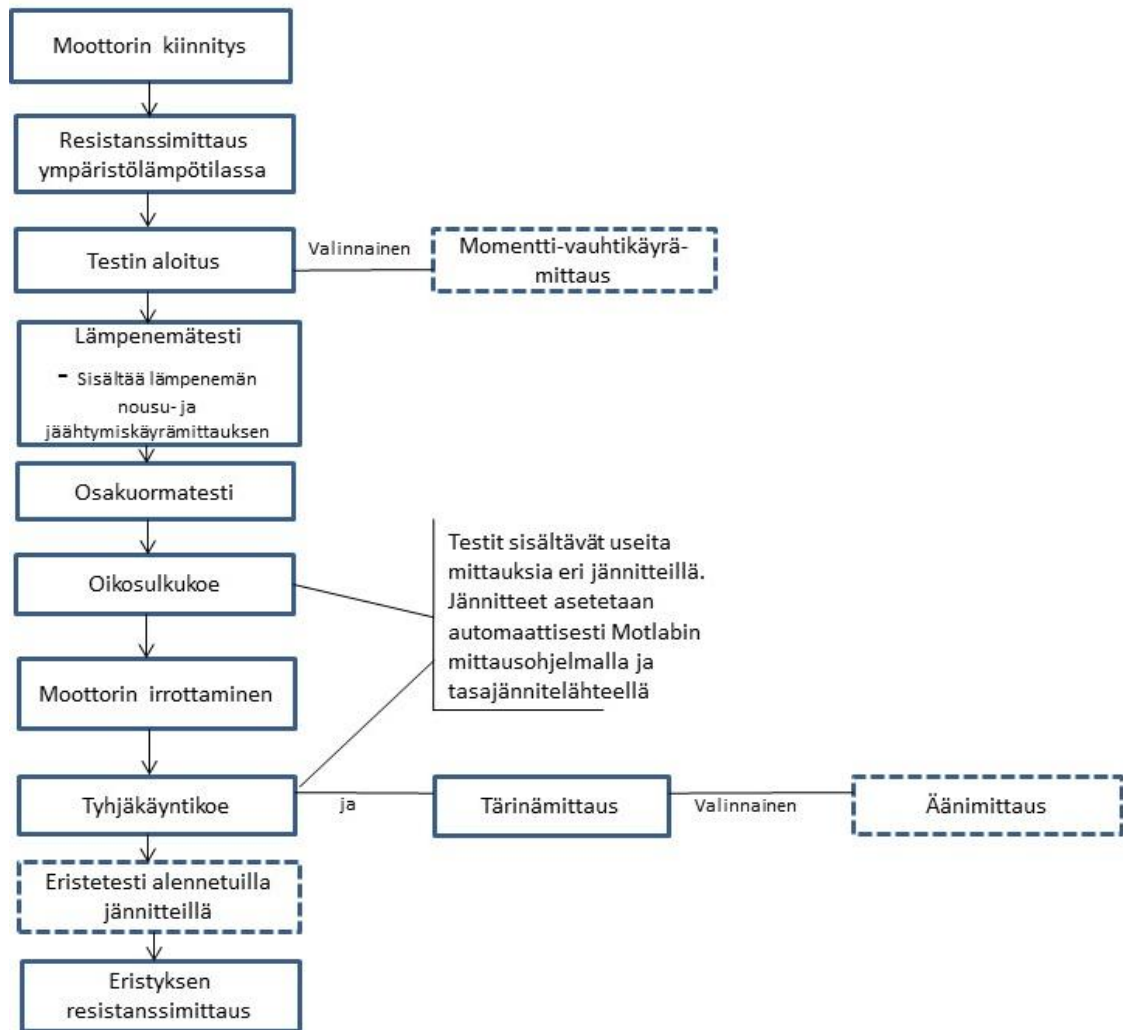
Oikosulkumittauksesta saadaan selville oikosulkuvirta I_k ja oikosulkukokeen aikana käytetyn oikosulkujännitteen U_k kanssa saadaan laskettua oikosulkuteho P_k . Sähkömoottorin kokonaisvirtahäviöt P_k saadaan piirtämällä käyrä P_k :n suhteesta virtaan I . Sähkömoottorin hyötysuhde η ratkaistaan vähentämällä ottotehosta P_1 sähkömoottorin häviötehot P_h ja jakamalla tämä erotus ottoteholla seuraavan yhtälön tapaan [4]

$$\eta = \frac{P_1 - P_h}{P_1} = \frac{\sqrt{3}U_1 I_1 \cos\varphi_1 - (P_k + P_r + P_\mu + P_l)}{\sqrt{3}U_1 I_1 \cos\varphi_1}. \quad (22)$$

Häviötehot P_h muodostuvat oikosulkutehosta P_k , mitatuista rautahäviöistä P_r , mitatuista hankaushäviöistä P_μ ja lisähäviöistä P_l .

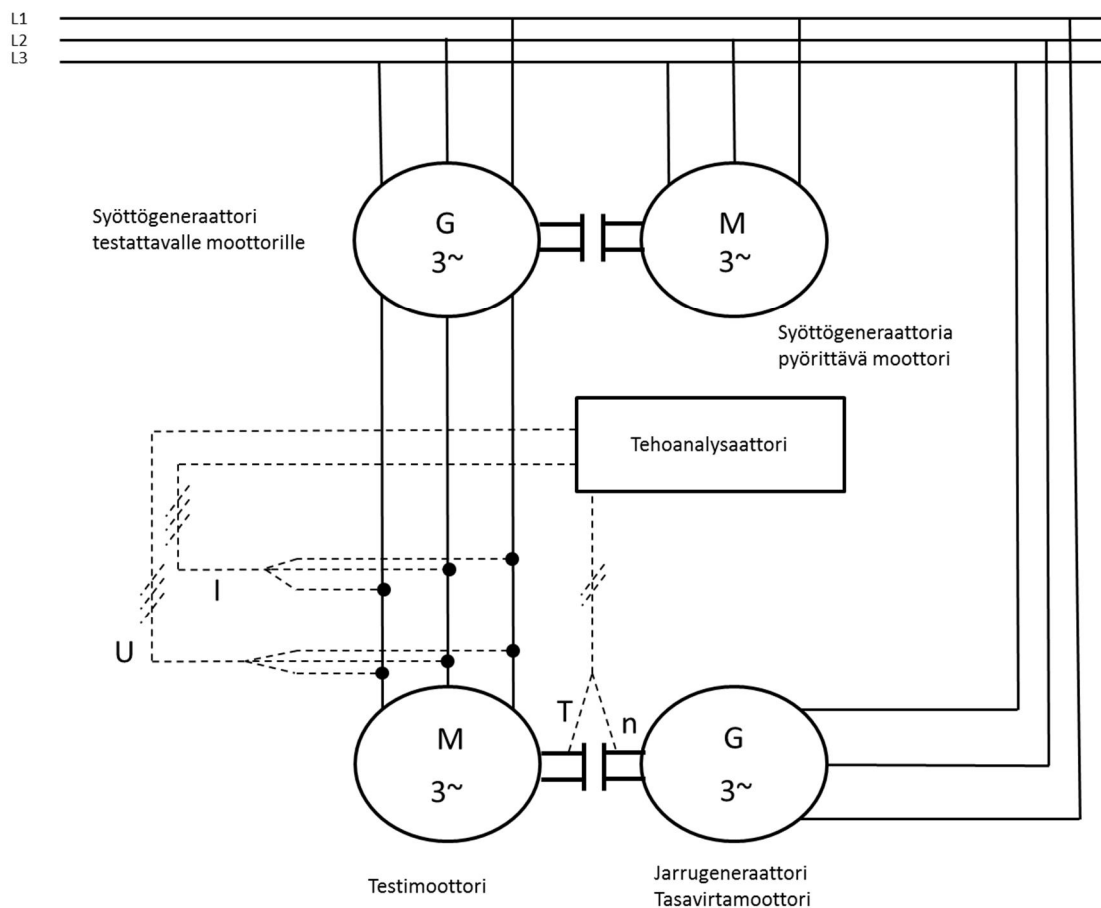
4.3 Testaus koestamossa

Edellä mainittuihin teorioihin perustuen ABB Oy Moottorit ja Generaattorit -tehtaan koekentällä suoritetaan mittaukset kuvan 5 mukaisessa järjestyksessä. [20]



Kuva 5. Sähkömoottorin koejärjestys koestamossa. [21]

Sähkömoottori kiinnitetään testipenkkiin, jossa sitä syöttää generaattori ja kuormaa säädetään jarrugeneraattorina toimivalla tasavirtamoottorilla. Kuvan 6 periaatekuva sähkömoottorin testauspaikasta antaa suuntaa, miten testauspaikka on sijoitettu kytkentöjen, mittauksen ja syöttölähteen suhteen. Sähkömoottorit testataan ilman hankaavia tiivisteitä ja imurenkaita paremman hyötysuhteen saamiseksi. IEC-standardi sallii imurenkaiden ja hankaavien tiivisteiden poiston testaamisen ajaksi. [20]



Kuva 6. Sähkömoottorin testipaikan periaatekuva.

Ennen lämpenemääjon aloittamista vaiheresistanssit mitataan ympäristölämpötilassa. Tämän jälkeen sähkömoottori käynnistetään ja sähkömoottorille suoritetaan momentti-vauhtikäyrämittaus pyörittämällä jarrugeneraattoria vastasuuntaan. Kippivirta sähkömoottorille saadaan kuormittamalla sähkömoottoria kippauspisteeseen asti. Kippauspisteeksi kutustaan hetkeä, jolloin sähkömoottorin kuormitus ylittää maksimimomentin ja sähkömoottori jää joko pyörimään hiljaa tai pysähtyy kokonaan. [21] Roottorin resistiiviset häviöt saadaan määriteltyä ajamalla testattavaa sähkömoottoria sen akseli paikoilleen lukittuna. Tämän jälkeen suoritetaan lämpenemääjo nimellisteholla ja –nopeudella. Sähkömoottorin annetaan pyöriä lämpenemätestin aikana monta tuntia, yleensä yön yli, kunnes lämpötilavaihtelu on tasaantunut kahden asteen sisälle. Lämpenemääjosta tallennetaan lämpenemäkäyrä. Sähkömoottorin saavutettua lämpenemänsä suoritetaan osakuormatellit testisähkömoottorin nimellismomenttiin nähden 1,5; 1,25; 1; 0,75; 0,5 ja 0,25 –kertaisilla momenteilla säätämällä jarrumoottorin magnetointia. Osakuormatesteissä Motlab kerää tietoa tehoanalyysaattorilta ja lämpötila-anturilta. Osakuormatettien jälkeen sähkömoottori jarrutetaan paikalleen ja akseli lukitaan lukolla oikosulkukokeen suorittamiseksi. Pysäytyksen jälkeen vaihevastukset mitataan uudelleen. Oikosulkukokeessa sähkömoottoria syötetään eri jännitteillä koestamon omaan Motlab-ohjelmaan asetettujen nimellisvirtaan nähden 1,5; 1; 0,8 ja 0,5 –kertaisten virtojen aikaansaamiseksi. Jos roottorissa on jotain vikaa, se ilmenee tässä vaiheessa. Mittauspisteistä

otetaan ylös antotehot, oikosulkuvirrat ja tehokertoimet. Oikosulkukokeen jälkeen sähkömoottori irrotetaan jarrumoottorista ja suoritetaan sillä tyhjäkäyntitesti. Tyhjäkäyntitestissä sähkömoottoria syötetään eri jännitteen arvoilla, nimellisjännitteelle käytetään kertoimia 1,2; 1,1; 1,0; 0,9; 0,8; 0,6; 0,4; 0,3; 0,2 ja 0,15. Tyhjäkäyntitestin aikana suoritetaan värinämittaus ja mahdollinen äänitasotesti. Näiden testien jälkeen sähkömoottorille on mahdollista tehdä ylijännitetestti, mutta se vanhentaa sähkömoottoria ennenaikaisesti. Lopuksi sähkömoottorista mitataan vielä eristysvastukset. [20]

Jännite U_1 on lämpenemätestin aikana mitattujen jännitteiden keskiarvo. Virran muutos ΔI_{1n} lasketaan yhtälöllä

$$\Delta I_{1n} = \frac{P_{2n} - P_2}{P_2} (I_1 - I_0 \sin \varphi), \quad (23)$$

missä P_{2n} on nimellinen ulostuloteho ja P_2 ulostuloteho. Mitatusta virrasta I_1 vähennetään tyhjäkäyntivirta I_0 . [22]

Tehokerroin $\cos \varphi$ lasketaan yhtälöllä

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3}UI}, \quad (24)$$

jossa P_1 on sisäänmenoteho, U jännite ja I virta. IEC-standardin mukainen nimellistehokerroin saadaan käyttämällä teholla, virralla ja jännitteellä korjauskertoimilla korjattuja arvoja. [22]

Sähköteho P_1 lasketaan lämpenemäajan aikana mitatuilla jännitteellä, virralla ja tehokertoimella yhtälön

$$P_1 = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos \varphi \quad (25)$$

avulla. IEC-standardin mukainen nimellinen sähköteho lasketaan laskemalla nimellinen ulostuloteho P_{2n} ja nimelliset kokonaishäviöt P_{tn} yhteen. Kokonaishäviöt saadaan laskemalla yhteen häviöt, jotka esitellään luvussa 4.5. [22]

Mitattu ulostuloteho P_2 lasketaan vähentämällä sisääntulotehosta P_1 kokonaishäviöt. Nimellinen ulostulohäviö P_{2n} on sähkömoottorin nimellinen teho. [22]

4.4 Hyötysuhteen määrittäminen

Lämpenemätestin aikana koestamon laskentaohjelma Motlab laskee hyötysuhteen η yhtälöllä [22]

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (26)$$

jossa P_2 on sähkömoottorin antoteho ja P_1 sisäänmenoteho. Myös osakuormatestien aikana Motlab laskee hyötysuhteet samalla periaatteella. Testituloksiin lisätään tämän suoran hyötysuhteen lisäksi IEC-standardin määrittelemä laskettu hyötysuhde. IEC-standardi olettaa, että sähkömoottorit testataan aina 25 °C:en lämpötilassa, mutta käytännön syistä näin ei juuri koskaan ole. Tästä syystä mitattu hyötysuhde lasketaan uudelleen korjauskerrointa käyttämällä. Korjauskertoimen k_θ laskenta perustuu lämpötilaan ja roottorissa käytettyyn materiaaliin. [22]

Tämän jälkeen nimellinen laskettu hyötysuhde η_n lasketaan korjatulla ottoteholla P_{1n} ja korjatulla antoteholla P_{2n} eri kuormilla, jotka ovat 1,5-, 1,25-, 1-, 0,75-, 0,5- ja 0,25-kertaa nimelliskuorma. [22]

$$\eta_n = \frac{P_{2n}}{P_{1n}}. \quad (27)$$

4.5 Häviöiden määrittäminen

Häviöt voidaan laskea tyhjäkäyntikokeen aikana mittaamalla käämin lämpötilaa. Käämin lämpötilamittaus voidaan suorittaa myös lämpenemäajan aikana. Jos käämin lämpötilaa mitataan lämpenemäajan aikana, testit suoritetaan CSA-standardin mukaisten laskelmien ja periaatteiden mukaan, jotka ovat yhtä päteviä IEC 60034-2-1 standardille. CSA-standardin mukaiset periaatteet parantavat mittaustuloksista saatavien laskutulosten tarkkuutta. Uusien IEC määräysten mukaisesti häviöt lasketaan mittaamalla lämpötilaa tyhjäkäyntikokeen aikana. [22]

Tyhjäkäyntitestin aikana Motlab suorittaa muutaman häviölaskun myöhempää käyttöä varten. Häviöt, jotka otetaan huomioon IEC 60034-2-1 standardissa, ovat kuparihäviöt P_{Cu} , hankaushäviöt P_μ , rautahäviöt P_r sekä lisähäviöt P_l . [22]

4.5.1 Kuparihäviöt

Kuparihäviöt P_{Cu} lasketaan tyhjäkäyntitestin aikana yhtälöllä

$$P_{Cu} = \frac{3}{2} (R_{uv}) I_0^2, \quad (28)$$

jossa R_{uv} on mitattu resistanssi, kun käämi on jäähtynyt testin jälkeen ja I_0 on nimellisjännitteellä mitattu virta tyhjäkäyntitestin aikana. [22]

4.5.2 Hankaus- ja rautahäviöt

Hankaushäviöt P_μ luetaan ohjelman antamalta tyhjäkäyntikäyrältä ja hankaushäviöiden avulla saadaan laskettua tyhjäkäyntiteho P_0 . [22] Rautahäviöt lasketaan vähentämällä tyhjäkäyntitehosta P_0 hankaushäviöt P_μ ja kuparihäviöt P_{Cu} . Rautahäviöillä huomioidaan jännitteenalenema sekä mitatuissa rautahäviöissä P_{rm} , että IEC-standardin mukaisissa nimellisissä rautahäviöissä P_m . P_{rm} lasketaan yhtälöllä

$$P_{rm} = P_r \left(\frac{U_{im}}{U_n} \right)^2, \quad (29)$$

missä IEC-standardin mukainen nimellinen jännite U_{im} lasketaan yhtälöllä

$$U_{im} = \sqrt{\left[\left(U_n - \frac{\sqrt{3}}{2} R_0 I_{1n} \cos\varphi \right) + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} R_0 I_{1n} \sin\varphi \right) \right]}, \quad (30)$$

jossa R_0 on vaiheresistanssi tyhjäkokeessa. Nimelliset rautahäviöt P_m lasketaan vastaavasti, mutta jännitteet ja virrat korvataan kertomalla nimelliset jännitteet ja virrat korjauskertoimella. [22]

IEC-standardin mukaiset nimelliset resistiiviset häviöt P_{k1n} lasketaan yhtälöllä

$$P_{k1n} = P_{k1m} k_\theta \left(\frac{I_{1n}}{I_{1m}} \right)^2, \quad (31)$$

jossa mitatut staattorin resistiiviset häviöt P_{k1m} kerrotaan korjauskertoimella ja toiseen potenssiin korotetulla IEC-standardin mukaisella nimellisvirralla I_{1n} ja mitatun virran I_{1m} osamäärällä. Roottorin mitatut resistiiviset häviöt P_{k2m} saadaan vähentämällä mitatut staattorin resistiiviset häviöt P_{k1m} ja mitatut rautahäviöt P_{rm} mitatusta lämpenemäestän tehosta P_{1m} . Tämä erotus kerrotaan jättämällä s . IEC-standardin mukaiset roottorin kuparihäviöt saadaan lisäämällä lämpenemän korjauskerroin k_θ mukaan yhtälöön, jolla roottorin kuparihäviöt lasketaan. [22]

Jättämä s lasketaan vähentämällä mitattu kierrosluku n_n laskennallisesta kierrosluvusta n_s (50 Hz:llä 1500 rpm) ja jakamalla tulos laskennallisella kierrosluvulla. IEC-standardin mukainen kierrosluku n_n lasketaan kertomalla laskennallinen kierrosluku jättämällä s_n [22]:

$$n_n = (1 - s_n)n_s. \quad (32)$$

4.5.3 Lisähäviöt

Mitatut lisähäviöt P_{lm} määritetään osakuorma-ajojen perusteella tehdyttä regressiosuoralta, jolta lisähäviöt P_l luetaan. Suora muodostetaan laskemalla jokaisessa osakuormapisteessä lisähäviöpiste vähentämällä sisäänmenotehosta P_1 ulostuloteho P_2 , staattorin resistiiviset häviöt P_{k1} , roottorin resistiiviset häviöt P_{k2} , rautahäviöt P_r ja hankaushäviöt P_μ ja laittamalla pisteet taulukkoon, jossa x-akselilla on momentti T korotettuna toiseen potenssiin. Pisteiden avulla saadaan muodostettua regressiosuora, joka on muotoa

$$P_l = aT^2 - b, \quad (33)$$

jossa a on kulmakerroin ja b y-akselin leikkauskohta. Nimelliset ja mitatut lisähäviöt saadaan omilta suoriltaan, kun tehojen tilalla käytetään mitattuja ja nimellisiä arvoja. [22]

5 HYÖTYSUHTEEN PARANTAMINEN

Sähkömoottorin hyötysuhdetta saadaan parannettua vähentämällä häviöitä. Lisähäviöitä voivat aiheuttaa väärin mitoitetut laakerit tai tuuletin ja näitä vaihtamalla saadaan häviöitä pienemmiksi. Sähkömoottorin materiaalien huono laatu lisää myös häviöitä. Sähkömoottorin hyötysuhdetta saadaan parannettua optimoimalla uramuotoa ja -kokoa staattorissa ja roottorissa. Tärkeintä on saada staattorin urat mahdollisimman täyteen kuparia, sillä korkea täyttöaste pienentää virrantiheyttä, jolloin sähkömoottorin käyttölämpötila alenee. [23]

Eräs tämän työn tutkimuskohteista on selvittää, miten olemassa olevien IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottorien hyötysuhdetta saataisiin parannettua IE4-hyötysuhdeluokkaa vastaavaksi. ABB Oy Moottorit ja Generaattorit –tehtaan valikoimassa olevia J-sukupolven IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottoreita on mahdollista saada kipinöimättömällä suojauksella ja näiden pohjalta on tarkoitus muokata esimerkiksi sähkölevymateriaalia vaihtamalla sähkömoottorit IE4-hyötysuhdeluokkaan.

5.1 Oberretl'in säännöt epätahtikoneen lisähäviöiden minimoimiseksi

Epätahtikoneen lisähäviöiden minimoimiseksi on tekniikan tohtori Kurt Oberretl 1960-luvulla laatinut yleispäteviä sääntöjä, joilla sähkömoottorin hyötysuhdetta saataisiin parannettua. Hyötysuhde paranee, kun

1. Staattorin uraluku on suurempi kuin roottorin.
2. Vakoluku q on mahdollisimman suuri.
3. Ei esiinny uravinoutta jos roottoriurat ovat eristämättömiä varsinkin jos staattorin uraluku $Q1$ on pienempi kuin roottorin uraluku $Q2$.
4. Staattorissa on kaksitasokäämitys, joka on jänteistetty 5/6-jänteistykseen.
5. D-kytkennässä $Q1-Q2$ on eri kuin 2p, 4p, 8p, 10p, 14p.
6. Rinnakkaisten haarojen kytkentä on siten, että toisen kertaluvun ankkurireaktio vältetään.
7. Roottorin ura-aukko on korkeuttaan kapeampi ja staattorin ura-aukko on kapeampi kuin 3 kertaa staattorin ura-aukon korkeus.
8. Roottorin pinnan sorvauksessa levyjä ei oikosuljeta toisiinsa.
9. Meistit ovat terävät, jos levyjä ei hehkuteta urituksen jälkeen.
10. Kiekot hehkutetaan tai niissä on erittäin hyvä levylaatu, erityisesti pikkukoneilla.
11. Sekä staattorissa että roottorissa on pienet ura-aukot.
12. Vinouraisilla koneilla on joko eristetyt roottorisauvat tai erittäin hyvä kosketus levyyn.

13. Sähkömoottorit varastoidaan, kuuden kuukauden varastoinnissa lisähäviöiden on osoitettu pienenevän noin 60 prosenttia meistituoreesta. [24]

Tässä työssä hyötysuhteen parantamiseksi vaihdettiin levymateriaalia, muutettiin jän-teistystä ja lankalukua sekä osaan moottoreista käytettiin karaistusmenetelmää. Näihin muutoksiin paneudutaan tässä työssä tarkemmin ja muut hyötysuhteen parantamismah-dollisuudet jätetään vaihtoehtoiksi. Taulukossa 4 on merkittynä, mitkä Oberretl:n toi-menpiteet toteutettiin millekin sähkömoottorille ja minkälaisia parannusmahdollisuuk-sia sähkömoottoreille on vielä mahdollista tehdä. Kirjainyhdistelmä na viittaa siihen, ettei se ole kyseisessä koneessa mahdollista tai kyseisen asian selvittäminen tälle ko-neelle ei onnistu. Sarakkeessa 6 ankkurireaktiota ei pystytä selvittämään. Sarakkeessa 9 meistin terävyyttä ei tarvitse huomioida, sillä levyihin ei ole käytetty meistotekniikkaa. Levyt leikataan laserilla, tarkempi selitys luvussa 6.2.1. Sarakkeessa 12 tiukkojen levy-jen takia roottorin uravinoutta on ollut hankala saada aikaan protomoottoreihin. Tämän tutkimuksen sähkömoottoreiden levyt leikattiin laserilla meistämisestä sijaan, joten va-rastointi ei vaikuta tähän tutkimustulokseen. Tämän takia sarakkeessa 13 on na.

Taulukko 4. IE4-hyötysuhdeluokan sähkömoottoreihin toteutetut Oberretl'in säännöt.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2-n 30 kW	x	x	x			na		x	na	x	x	na	na
4-n 30 kW	x	x	x	x	x	na	x	x	na	x	x	na	na
6-n 22 kW	x	x	x	x	x	na	x	x	na	x	x	na	na
4-n 37 kW	x	x	x			na	x	x	na	x	x	na	na

5.2 Levymateriaali

Tässä tutkimuksessa päädyttiin vaihtamaan staattorin ja roottorin levymateriaali parem-man sähkönjohtavuuden ja pienemmän maksimihäviötehon omaavaan levymateriaaliin. Aiemmissa IE3-hyötysuhdeluokan moottoreissa levymateriaalina oli M350-50A, joka vaihdettiin pienempihäviöiseen M270-50A-levyyn paremman hyötysuhteen saavutta-miseksi.

Levymateriaalin merkintä perustuu Euroopassa käytettyyn EN 10106 –standardiin, jonka mukaan M-kirjainta käytetään, kun kyseessä on sähköteräs. Tätä seuraava luku kertoo levyn maksimihäviötehon kerrottuna sadalla, jonka jälkeen oleva luku ilmaisee levyn paksuuden desimetreissä. Merkintäsarjan viimeisenä oleva A-kirjain kertoo ky-seessä olevan lämpökäsittely kidesuuntaamaton sähköteräs. Luvut pätevät 50 Hz:n taa-juisella vaihtovuolla magneettisen polarisaation huippuarvon ollessa 1,5 T. [7]

Levymateriaalit tilattiin ruotsalaiselta Surahammars Bruk sähköteräslevyvalmistajalta. Molempien levymateriaalien häviöarvojen vaihteluksi annetaan 10 %. M350-50A levyllä häviömääräksi annetaan 50 Hz taajuudella 1,5 T magneettisella polarisaatiolla 3,29 W/kg ja 1,0 T 1,39 W/kg. M270-50A levyllä vastaavat arvot samassa järjestyksessä ovat 2,52 W/kg ja 1,07 W/kg. Resistiivisyydeksi 50 Hz ja 1,5 T magneettisella polarisaatiolla annetaan M350-50A levyille $42 \mu\Omega\text{cm}$ ja M270-50A levyille $55 \mu\Omega\text{cm}$. [25]

5.3 Käämintä

Staattorikäämitystä ei ole mahdollista jakaa täysin tasaisesti staattorin kehälle, minkä vuoksi jokainen vaihe joudutaan käämimään useampaan staattoriuraan. [26] Kun staattorin sisäpinta ja roottorin ulkopinta ovat uritettuja ja käämitykset sijoitetaan uriin, ei vuo ole aivan sinimuotoinen ja näin syntyy yliaaltoja. Yliaaltoja voidaan rajoittaa erilaisilla käämitysteknisillä ratkaisuilla. [27]

5.3.1 Käynnistysvirta

Sähkömoottoria käämiessä tulee ottaa huomioon myös sähkömoottorin ottama käynnistysvirta. Käynnistysvirta on yleisesti sähkömoottoreilla 5-7 -kertainen nimellisvirtaan nähden. Suuri käynnistysvirta johtuu sähkömoottorin magnetoitumista varten tarvittavasta suuresta energiamäärästä, jota tarvitaan voittamaan paikallaan olevan systeemin inertia. [28]

Korkeaa hyötysuhdetta tavoiteltaessa sähkömoottorin lankalukua pienennetään, jolloin käynnistysvirta kasvaa ja tehokerroin heikkenee. Liian korkea käynnistysvirta voi aiheuttaa sähkömoottorille ongelmia kuten jännitteen alenemista, korkeita transientteja ja kontrolloimattomia sähkömoottorin pysähtymisiä. Korkea käynnistysvirta myös aiheuttaa suurta mekaanista stressiä roottorille ja kääminnälle ja se voi vahingoittaa sähkömoottoria ja siihen kytkettyjä laitteita. Tässä tutkimuksessa sähkömoottorin käynnistysvirralle pidettiin ylärajana yhdeksänkertaista starttivirtaa nimellisvirtaan nähden. [28]

Standardi IEC 60034-12 määrittää sähkömoottoreille käynnistysvirran näennäistehon S_1 rajat tehon mukaan. Näennäisteho S_1 määritetään suhteessa sähkömoottorin nimellistehoon. Käynnistysvirran näennäisteho S_1 lasketaan yhtälöllä

$$S_1 = \frac{\sqrt{3}U_n I_s}{P_n}, \quad (34)$$

jossa jännite U_n on sähkömoottorin nimellisjännite, I_s käynnistysvirta ja P_n sähkömoottorin nimellisteho.

Taulukossa 5 on kullekin teholuokalle määritetty suurin sallittu näennäisteho, jonka alapuolella sähkömoottorin näennäistehon tulee olla, jotta sähkömoottori on IEC-standardin mukainen. [29]

Taulukko 5. Standardin IEC 60034-12 määrittämät käynnistyksen näennäistehorajat tehojen mukaan (IEC-standardi).

Tehoalue (kW)	S_1
$0,4 < P_n \leq 6,3$	13
$6,3 < P_n \leq 25$	12
$25 < P_n \leq 63$	11
$63 < P_n \leq 630$	10

5.3.2 Yliaallot

Yliaallot syntyvät epätahtimoottorissa käämitysrakenteen takia sekä sähkömoottorin magneettiipiirin raudan kyllästymisestä. Yliaaltojen vaikutuksesta sähkömoottorin virtalämpöhäviöt, heilurimomentit sekä värinä- ja ääni-ilmiöt kasvavat. Värinällä ja äänitason nousulla ei ole vaikutusta hyötysuhteeseen, mutta häviöiden kasvaessa hyötysuhde pienenee. Heilurimomentit voivat saada aikaan käytön häiriöitä ja mekaanisia vahinkoja. Rautahäviöihin yliaalloilla ei ole juurikaan vaikutusta, joten suurin merkitys on virtalämpöhäviöillä. Kuormituksen suuruus ei myöskään vaikuta häviöiden kasvuun, joten häviöiden merkittävin haitta nähdään tyhjäkäynnissä. [27]

Roottorin käämityksellä vaikutetaan epätahtimoottorin kestävyysyteen yliaaltoja vastaan. Syväurainen käämitys yleensä lisää yliaaltojen aiheuttamaa lämpenemää. Vinouraisella roottorilla saadaan estettyä yliaaltojen indusoituminen sähkömoottoriin. [27]

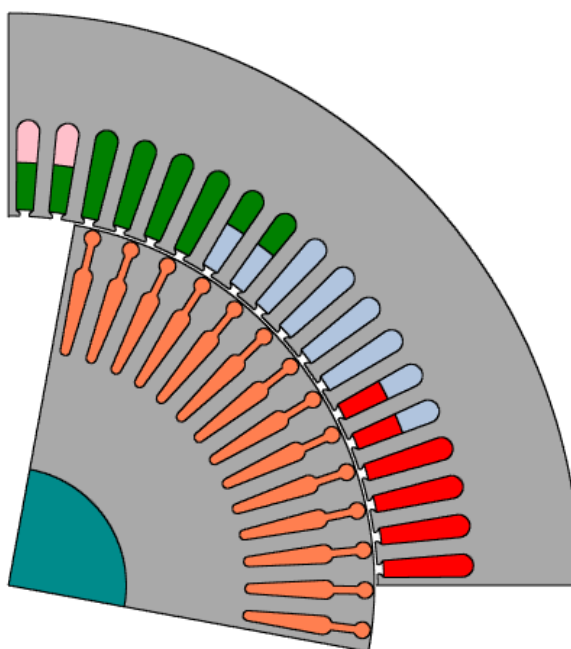
Myös staattorin rakenteella voidaan vaikuttaa yliaaltoihin. Yliaalloilla on merkittävä vaikutus ilmavälin roottoripinnalla esiintyviin pyörrevirtahäviöihin. Staattorin jänteistyksestä ja uraluvulla voidaan vaikuttaa yliaaltojen määrään. [26]

5.3.3 Jänteistys

Jänteistys tarkoittaa vaihekäämien perinteisestä poikkeavaa napajaon leveyttä. Jänteistyksestä pystytään vaikuttamaan käämityksen synnyttämän magnetomotorisen voiman yliaaltojakaumaan. Yliaaltoreaktanssilla X_δ pystytään mallintamaan yliaaltojen syntyä. Yliaaltoreaktanssi X_δ saadaan kertomalla magnetointireaktanssi X_m hajakertoimella σ_δ , joka saadaan yhtälöstä

$$\sigma_\delta = \sum_{n \neq 1} \left(\frac{\xi_n}{n\xi_1} \right)^2, \quad (35)$$

missä ξ_n on käämityskerroin ja n harmonisen aallon järjestysluku. Käämityskerroin ξ_n muodostuu ryhmä- ja vyyhtikertoimien tulosta. Yhtälöstä 35 saatavan hajakertoimen ollessa suuri yliaaltoreaktanssi pienentää magnetointireaktanssin aikaansaamaa magnetomotorisen voiman perusaaltoa, jolloin yliaaltojen määrä ilmavälissä kasvaa. Mahdollisimman pieni hajakertoimen arvo saavutetaan käyttämällä 5/6-jänteistystä. Jänteistys tehdään käyttämällä askellyhennystä, jossa vyyhden leveys saadaan napajakoa pienemmäksi siirtämällä normaalin kaksikerroskäämityksen ylempää käämikerrosta yhden tai useamman uravälin eteenpäin alemman käämityksen suhteen. Kuvasta 7 nähdään, miten päällekkäiset käämikerrokset limitetään, jotta saadaan käämitykseen 5/6-jänteistys. [26]



Kuva 7. Tämän tutkimuksen sähkömoottorin staattorin urat kuvattuna 5/6-jänteistyksellä. Värit urissa kuvaavat vaiheiden käämikerroksia. (ADEPT)

5.3.4 Kuparin täyttöaste

Staattoriuran kuparin täyttöasteen ollessa mahdollisimman korkea sähkömoottorin käyttölämpötila alenee lämmönjohtavuuden parantuessa metallien välillä, koska virrantiheys on pienempi kuparia ollessa enemmän. [23] Käytäntö on osoittanut korkeamman täyttöasteen parantavan hyötysuhdetta. Staattorin käämitystä muutettaessa kuparin täyttölukua tulee muuttaa sen mukaan, miten paljon uuteen käämitykseen mahtuu kuparia. Laskelmista on myös löydettävä optimaalinen lankojen suhde, jotta kuparin täyttöaste toteutuu toivotulla tavalla.

5.3.5 Lankaluku

Lankaluvulla tarkoitetaan johdinten lukumäärää urassa. Lankalukua muutettaessa suuremmaksi sähkömoottorin tehokerroin kasvaa käynnistysvirran sekä startti- ja kippimomenttikertoimien pienentyessä. Tehokertoimen kasvaessa hyötysuhde yleensä pienenee.

Liian pieni lankaluku käämissä aiheuttaa sähkömoottorin ylimagnetoitumista. Lankaluvulle antaa rajoituksia myös napaluku ja kaksikerrostasokäämitys, jolloin lankalukua voi säätää vain kokonaislukujen verran esimerkiksi kaksinapaisissa moottoreissa.

Käytännön kokemus on osoittanut lankaluvun pienentämisen kasvattavan vuontiheyttä, koska sähkömoottorin on toimittava samalla jännitteellä. Tästä seuraa käämin resistanssin väheneminen, jolloin kuparihäviöt pienenevät, mutta rautahäviöt kasvavat. ADEPT-laskentaohjelmalla on mahdollista parametreja asettamalla etsiä optimaalisin vaihtoehto lankaluvulle häviöiden perusteella.

Taulukossa 6 on 4-napaisen 30 kW sähkömoottorin lankaluvun muutoksen aiheuttamat muutokset magneettivuohon, rauta-, staattori-, roottori-, lisä- ja kokonaishäviöihin, virtaan, tehokerroimeen, vastukseen ja hyötysuhteeseen. Lankaluvun pienentyessä magneettivuo, rautahäviöt, virta ja hyötysuhde kasvavat. Lankaluvun suurentuessa rautahäviöt pienenevät, mutta kokonaishäviöt ovat suuremmat, koska staattori-, roottori- ja lisähäviöt kasvavat. Lankaluvun ollessa suurimmillaan tehokerroin on myös suurin ja vastus kasvaa ja virta pienenee lankalukua muutettaessa isommaksi. Näiden kaikkien yhteisvaikutusta arvioimalla saadaan valittua optimaalisin lankaluku sähkömoottorille.

Taulukko 6. Lankaluvun muutoksesta aiheutuvien magneettivuon, rauta-, lisä- ja kokonaishäviöiden sekä staattorin ja roottorin resistiivisten häviöiden ja virran, tehokerroimen, vastuksen ja hyötysuhteen muutosten vertailua 4-napaisella 30 kW sähkömoottorilla.

Lankaluku	10,5	11	11,5
Magneettivuo (Wb)	0,022	0,021	0,020
Rautahäviöt (W)	215	203	188
Staattorin resistiiviset häviöt (W)	640	633	673
Roottorin resistiiviset häviöt (W)	383	406	449
Lisähäviöt (W)	217	217	217
Kokonaishäviöt (W)	1549	1556	1623
Virta (A)	57	54	54
Tehokerroin	0,80	0,84	0,85
Vastus (ohm)	0,207	0,229	0,251
Hyötysuhde (%)	95,1	95,1	94,9

5.3.6 Kaksitasokäämitys

Staattorin tasokäämitys määritellään vakoluvun nimittäjän mukaan. Jos se on kahdella jaollinen, kyseessä on kaksitasokäämitys. Jos tuloksena on murtoluku, kyseessä on yksitasokäämitys. Vakoluku q saadaan staattorin urien lukumäärän Q , napapariluvun $2p$ ja vaiheiden lukumäärän m avulla [30]

$$q = \frac{Q}{2pm_v}. \quad (36)$$

Kaksitasokäämityksessä vyyhdenpäät lyhenevät, jolloin kuparia tarvitaan vähemmän. Myös kuparihäviöt vähenevät ja harmoniset komponentit vähenevät. Vyyhdenpäät ovat käämilangoista koostuvia nippuja, jotka on sidottava kääminnäissä.

5.4 Ilmaväli

Kuten luvussa 2.6 mainittiin, mahdollisimman pieni ilmaväli on hyötysuhteen kannalta optimaalinen. Ilmavälin optimointi on haastavaa, sillä pieni ilmaväli aiheuttaa yliaaltojen määrän kasvua, joka edelleen lisää virtalämpöhäviöitä. Myös roottorin resistiiviset häviöt kasvavat ilmaväliä pienentämällä. Tärkeintä onkin löytää optimaalisin ratkaisu hyötysuhteen kannalta. [26]

Tässä tutkimuksessa päädyttiin pitämään ilmavälit ennallaan kokeilulaskujen jälkeen, sillä ilmaväliden muutos kumpaankaan suuntaan ei tuonut huomattavaa muutosta hyötysuhteeseen. Pohjana olevissa IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottoreissa ilmavälit on jo optimoitu.

5.5 Tuulettimen vaihto

Vaihtamalla sähkömoottorin tuuletin pienemmäksi saadaan hankaushäviöitä pienemmäksi, jolloin hyötysuhdekin paranee. Tässä tutkimuksen kohteena olevien ABB:n J-sukupolven IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottoreissa tuulettimen vaihto pienempään kokoon on mahdollista sähkömoottorien ollessa lämpenemältään viileitä. NEMA on määrittänyt sähkömoottorin käämille lämpenemäraajat eri lämpenemäluokille. Luokan B lämpenemän raja on 80 K ympäristön lämpötilan ollessa 40 °C. Luokan ehdottomaan ylärajaan 130 °C jätetään 10 K:n turvaraja. [31]

Näille sähkömoottoreille tuulettimet pidettiin samoina kuin IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottoreiden laskelmissa. Pienempi tuuletin aiheuttaa lämpenemän takia käämin resistanssin kasvua, joka lisää häviöitä staattorissa. Tärkeää on löytää optimi tuulettimen koko, sillä suurempi tuuletin vähentää resistanssia, mutta kasvattaa kitkahäviöitä.

5.6 Karaistaminen

Karaistamisella tarkoitetaan roottorin lämmitystä ennen asennusta staattoriin 450-480 °C lämpöiseksi, jonka jälkeen se nopeasti jäähdytetään veden avulla 120 °C lämpötilaan. Roottoria ei saa jäädyttää kylmäksi asti vedessä, jottei roottoripaketin sisälle pääse vettä. Lämmitys kestää noin kolme tuntia. Karaistuksen aikana on tarkoitus saada roottorin sisään valetut alumiinitangot irtoamaan teräslevyistä, jolloin sauvojen väliset virrat

pienenevät. Tämän myötä sähköiset ominaisuudet paranevat ja hyötysuhde kasvaa. Sähkömoottorit testattiin ennen karaistusta ja karaistuksen jälkeen, jolloin huomattiin karaistuksen parantavan hyötysuhdetta.

Tässä tutkimuksessa karaistus tehtiin 180-runkokoon 6-napaiselle sähkömoottorille. 180-runkokoon sähkömoottori ei muuten ole tutkimuksessa mukana kuin vain esimerkkinä karaistuksen vaikutuksesta hyötysuhteeseen.

Ennen karaistusta 6-napaisen sähkömoottorin mitattu hyötysuhde oli 92,9 % ja nimellinen IEC-standardin mukainen hyötysuhde 92,8 %. Karaistuksen jälkeen mitattu hyötysuhde oli 93,2 % ja nimellinen IEC-standardin mukainen hyötysuhde 93,1 %, joka on yli IE4-luokan raja-arvon 92,9 %. Ennen karaistusta sähkömoottorin mitatut kokonaishäviöt P_t olivat 1140 W ja karaistuksen jälkeen mitatut kokonaishäviöt olivat 1095 W. Häviöiden kokonaismäärä väheni siis noin 45 W. Taulukossa 7 on mitatut sähkömoottorin häviöt ennen ja jälkeen karaistuksen. Hankaushäviöt P_μ ja rautahäviöt P_r kasvoivat karaistuksen jälkeen, mutta roottorin resistiiviset häviöt P_{k2} , staattorin resistiiviset häviöt P_{k1} ja lisähäviöt P_l vähenivät.

Taulukko 7. 6-napaisen 180-runkokoon sähkömoottorin mitatut häviöt ennen ja jälkeen karaistuksen.

	Ennen	Jälkeen
P_μ (W)	48	59
P_r (W)	291	274
P_{k1} (W)	379	372
P_{k2} (W)	213	221
P_l (W)	209	169
P_{tot} (W)	1140	1095

Ennen karaistusta sähkömoottorille mitattiin virraksi 30,7 A ja karaistuksen jälkeen 30,3 A. Virran ja kokonaishäviöiden pienentyminen vaikuttavat hyötysuhteen paraneamiseen.

6 TESTITULOKSET

Tässä luvussa vertaillaan laskettuja ja testattuja häviöarvoja. Häviövertailussa käytetään S113-laskentaprofiilia, jolla voi laskea ne lisähäviöt, joita ei FCSmek-laskentaprofiilissa ole. Muiden tulosten vertailussa käytetään FCSmeks-laskentaprofiililla laskettuja arvoja.

Sähkömoottorien testatut hyötysuhteet olivat pienempiä kuin lasketut hyötysuhteet, kun taas testatut häviöt olivat suuremmat kuin lasketut häviöt. Sähkömoottorien testatut arvot kirjattiin IEC –standardien mukaisesti sekä suoraan mitattuina arvoina että IEC-standardin mukaisesti laskettuina nimellisinä arvoina. Nimelliset arvot antavat hieman huonommat hyötysuhteet. Sähkömoottorien laakereihin annettiin ohjeistus laittaa asennusrasvaa maksimissaan 1/3 osaa normaalista rasvamäärästä, jotta häviöissä päästäisiin pitkään käytössä olleen sähkömoottorin tasolle. Liika rasvamäärä laakereissa lisää kitkahäviöitä.

6.1 2-napainen 30 kW sähkömoottori

2-napaisen 30 kW:n sähkömoottorin hyötysuhteeksi mitattiin 94,5 % ja nimelliseksi IEC hyötysuhteeksi muutettuna hyötysuhde oli 94,4 %, joka on virallinen hyötysuhde. IE4-hyötysuhdeluokan raja on 94,5 %, ja tulos on hyväksyttävien toleranssirajojen sisällä. ADEPT-ohjelmalla laskettu hyötysuhde oli 95,1 % ja IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottorin vertailuarvoihin suhteutettuna hyötysuhde oli 95,0 %.

Taulukossa 8 ovat FCSmek-laskentaprofiililla lasketut ja testauksessa mitatut arvot virralle I , käynnistysvirran suhteelle nimellisvirtaan I_s/I_n , tehokertoimelle $\cos \varphi$, pyörimisnopeudelle n ja jättämälle s . Laskentatuloksissa virta oli pienempi kuin testatessa ja tehokerroin suurempi. FCSmek-laskentaprofiili laski käynnistysvirran suhteen nimellisvirtaan testattua suuremmaksi. FCSmek-laskentaprofiililla lasketut pyörimisnopeus ja jättämä vastasivat testituloksia.

Taulukko 8. Lasketut ja mitatut arvot virralle I , käynnistysvirran suhteelle nimellisvirtaan I_s/I_n , tehokertoimelle $\cos \varphi$, pyörimisnopeudelle n ja jättämälle s 2-napaiselle 30 kW sähkömoottorille.

	FCSmek	Mitattu
I	50,4 A	53,5 A
I_s/I_n	10,2	7,1
$\cos \varphi$	0,90	0,87
n	2959 rpm	2960 rpm
s	1,36 %	1,28 %

Häviölaskennassa FCSmek-laskentaprofiililla laskettu yhteishäviömäärä on liian alhainen suurimmaksi osaksi lisähäviölaskennan puuttumisen takia. S113-laskentaprofiililla saadaan häviöiden kokonaismäärä laskettua lähelle todellisuutta tässä tapauksessa. Rautahäviömallissa FCSmek-laskentaprofiililla lasketut rautahäviöt ovat lähempänä todellisuutta kuin S113-laskentaprofiililla lasketut, jotka ovat 50 W pienemmät. Staattorin resistiiviset häviöt saadaan laskettua S113-laskentaprofiililla ja FCSmek-laskentaprofiililla lähelle toisiaan, mutta liian pieniksi testattuihin arvoihin verratessa. Tämä johtuu siitä, että laskentaprofiilit laskevat staattorivirran liian pieneksi. Roottorin resistiiviset häviöt ovat FCSmek-laskentaprofiililla laskettuna liian suuret, mutta nämä häviöt laskettuna S113-laskentaprofiililla ovat lähes vastaavia testattuihin roottorin resistiivisiin häviöihin verrattuna. Lisähäviöitä FCSmek-laskentaprofiili ei pysty laskemaan ja S113-laskentaprofiililla lasketut lisähäviöt ovat 120 W testattuja suuremmat. Suurempien lisähäviöiden takia S113-laskentaprofiililla lasketut kokonaishäviöt ovat todellisuutta vastaavat, vaikka rautahäviöt ja staattorin resistiiviset häviöt ovat laskettuina todellisuutta pienemmät. Yhteenlasketut häviöt P_{tot} ja mitatut yhteishäviöt P_t eroavat toisistaan ohjelman pyöristysten takia, jonka vuoksi myös ulostulotehon P_2 ja ottotehon P_1 erotus eroaa yhteenlasketuista häviöistä. Numeroarvot lasketuille ja mitatuille häviöille löytyvät taulukoista 9 ja 10.

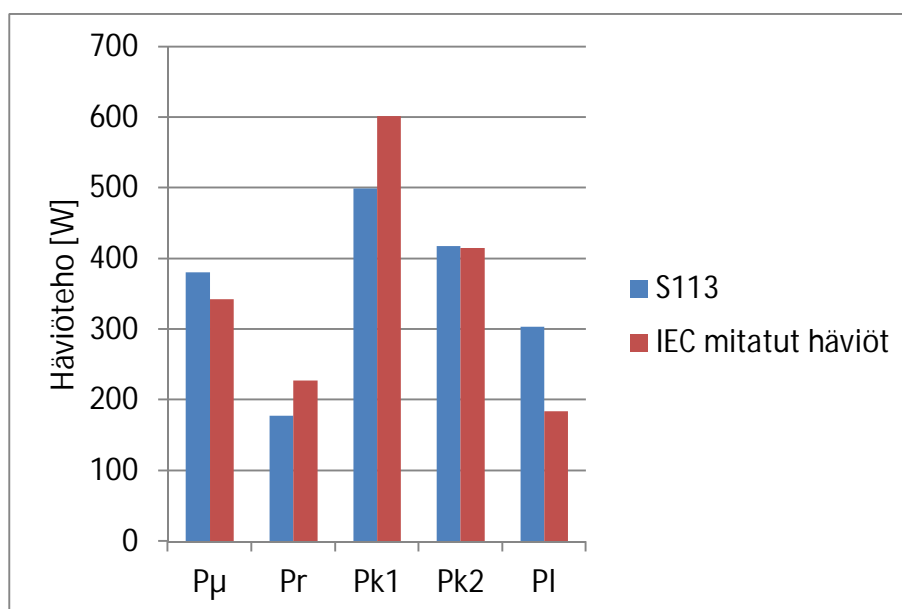
Taulukko 9. Häviöjakauma mitatuille ja nimellisille häviöille, sekä ulostuloteho P_2 ja ottoteho P_1 2-napaiselle 30 kW sähkömoottorille.

IEC mitatut häviöt		IEC nimelliset häviöt
P_μ (W)	343	343
P_r (W)	228	228
P_{k1} (W)	601	596
P_{k2} (W)	415	417
P_1 (W)	184	184
P_{tot} (W)	1771	1768
P_t (W)	1772	1767
P_2 (kW)	30	30
P_1 (kW)	32	32

Taulukko 10. FCSmek- ja S113-laskentaprofiileilla lasketut häviöt 2-napaiselle 30 kW sähkömoottorille.

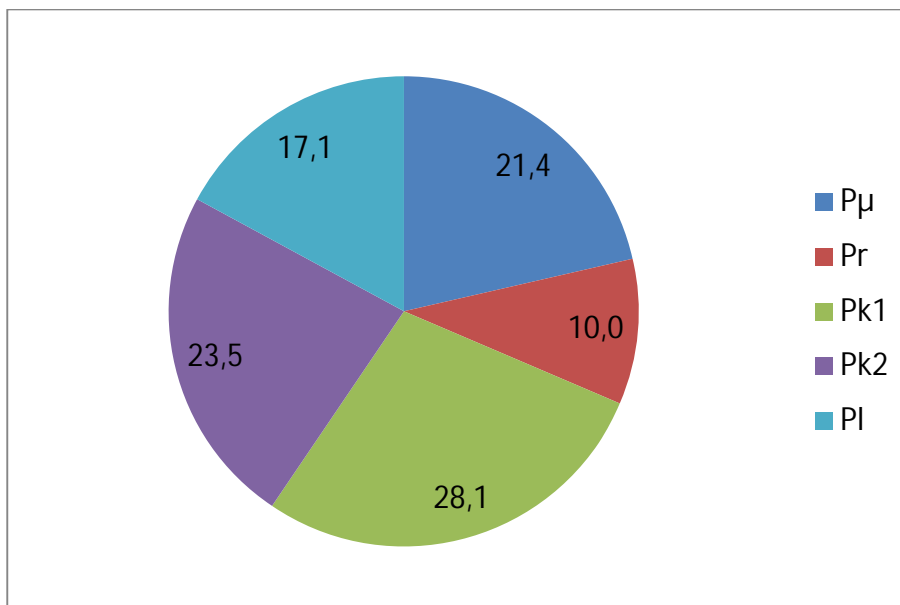
	FCSmek	S113
P_{μ} (W)	381	381
P_r (W)	210	178
P_{k1} (W)	493	500
P_{k2} (W)	462	418
P_l (W)	0	304
P_{tot} (W)	1546	1781

Kuvassa 8 verrataan pylväsdiagrammin avulla mitattuja ja S113-laskentaprofiililla laskettuja häviöosuuksia. Kuviossa arvot ovat watteina ja ovat vertailukelpoisempia kuin prosentiosuuksien vertailu. Rautahäviömallin virheet heijastuvat lisähäviölaskennan liian suuriksi laskettuihin arvoihin ja laskennallisesti liian pienestä staattorivirrasta johdettu staattorin resistiivisten häviöiden liian pieni osuus.

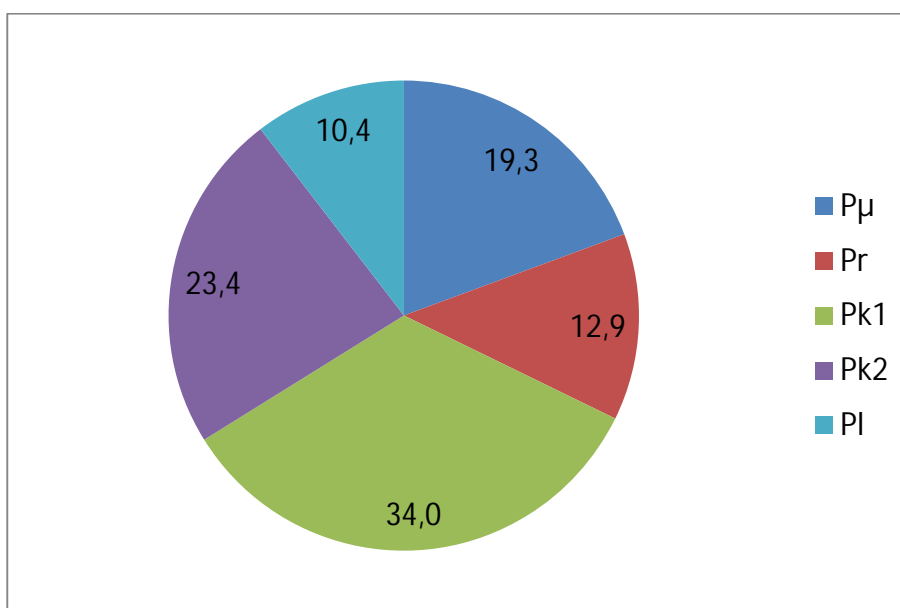


Kuva 8. Häviövertailu mitattujen ja S113-laskentaprofiililla laskettujen hankaushäviöiden P_{μ} , rautahäviöiden P_r , staattorin resistiivisten häviöiden P_{k1} , roottorin resistiivisten häviöiden P_{k2} ja lisähäviöiden P_l välillä 2-napaisella 30 kW sähkömoottorilla.

Kuvissa 9 ja 10 ovat laskettuina eri häviöiden osuudet kokonaishäviöistä. S113-laskentaprofiililla laskettu häviöjakauma ei ole suoraan verrannollinen mitattuihin häviöjakaumiin, sillä häviöiden kokonaismäärä on eri. Kuvioissa onkin tarkoituksena selvittää häviöjakauman prosentuaalisia osuuksia kokonaismäärästä. Staattorin resistiivisten häviöiden osuus on häviöjakaumissa suurin ja roottorin resistiivisillä häviöillä ja hankaushäviöillä on molemmilla lähes yhtä suuret prosentuaaliset osuudet. S113-laskentaprofiililla laskettuna lisähäviöiden osuus oli rautahäviöitä suurempi, kun taas mitatuissa tuloksissa lisähäviöiden osuus kokonaishäviöjakaumasta on pienempi.



Kuva 9. S113-laskentaprofiililla laskettu suhteellinen häviöjakauma 2-napaisella 30 kW sähkömoottorilla.



Kuva 10. Testitilanteessa mitattu suhteellinen häviöjakauma 2-napaisella 30 kW sähkömoottorilla.

6.2 4-napainen 30 kW sähkömoottori

4-napaiselle 30 kW:n sähkömoottorille vaadittu IE4-hyötysuhdeluokan hyötysuhderaja on 94,9 %. Laskennallinen tulos FCSmek-laskentaprofiililla on 95,3 %. Parannusta pohjana olevalle IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottorille haettiin vaihtamalla levymateriaali parempaan ja pienentämällä lankalukua 0,5 kierrosta alkuperäisen sähkömoottorin lankaluvusta. Aiempiin testituloksiin vertaamalla hyötysuhteen arvioitiin olevan noin

94,8 %. Testauksessa sähkömoottorin mitattu hyötysuhde oli 94,3 % ja nimellinen hyötysuhde oli 94,2 %, jolloin IE4-hyötysuhteen raja-arvo ei täyttynyt. Käytettäessä täyttää sallittua 15 % toleranssia testatut sähkömoottorit olivat IE4-hyötysuhdeluokassa.

Taulukossa 11 ovat FCSmek-laskentaprofiililla lasketut ja testeissä mitatut virta I , käynnistysvirta I_s/I_n , tehokerroin $\cos \varphi$, nopeus n ja jättämä s . Kuten 2-napaisilla sähkömoottoreilla myös 4-napaisille 30 kW:n sähkömoottoreille mitattu virta on laskettua suurempi ja käynnistysvirta pienempi. Tehokertoimet ovat näillekin sähkömoottoreille laskettua arvoa pienempiä ja suhteutettuna tehokertoimeksi saatiin 0,83, kun se mitattuna on 0,81. Hyötysuhteen arviointi on vaikeaa, vaikka vertailuna käytettiin IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottorin testituloksia. Jättämä s ja kierrosnopeus n ovat laskettuina lähes samoja kuin mitattuna.

Taulukko 11. FCSmek-laskentaprofiililla lasketut ja testitilanteessa mitatut arvot virralle I , käynnistysvirran suhteelle nimellisvirtaan I_s/I_n , tehokertoimelle $\cos \varphi$, kierrosnopeudelle n ja jättämälle s 4-napaisella 30 kW sähkömoottorilla.

	FCSmek	Mitattu
I	54,3 A	56,7 A
I_s/I_n	9,7	7,3
$\cos \varphi$	0,84	0,81
n	1480 rpm	1479 rpm
s	1,34 %	1,37 %

Taulukossa 12 on testatun IE4-hyötysuhdeluokan sähkömoottorin häviöarvot sekä mitattuina että nimellisinä. Taulukossa 13 on S113-laskentaprofiililla ja FCSmek-laskentaprofiililla lasketut arvioidut häviöarvot. Häviöarvoja vertaamalla huomataan, että ADEPT-laskentaohjelman laskentaprofiileille lasketut häviöt ovat pienempiä kuin testatut häviöt. Testatut kokonaishäviöt ovat 17 % suuremmat kuin S113-laskentaprofiililla lasketut kokonaishäviöt. ADEPT-laskentaohjelman laskentaprofiileille laskettaessa lisähäviöt P_1 ja roottorin resistiiviset häviöt P_{k2} ovat mitattuja suuremmat, mutta muissa häviöosuuksissa lasketut osuudet ovat pienempiä kuin mitattuna.

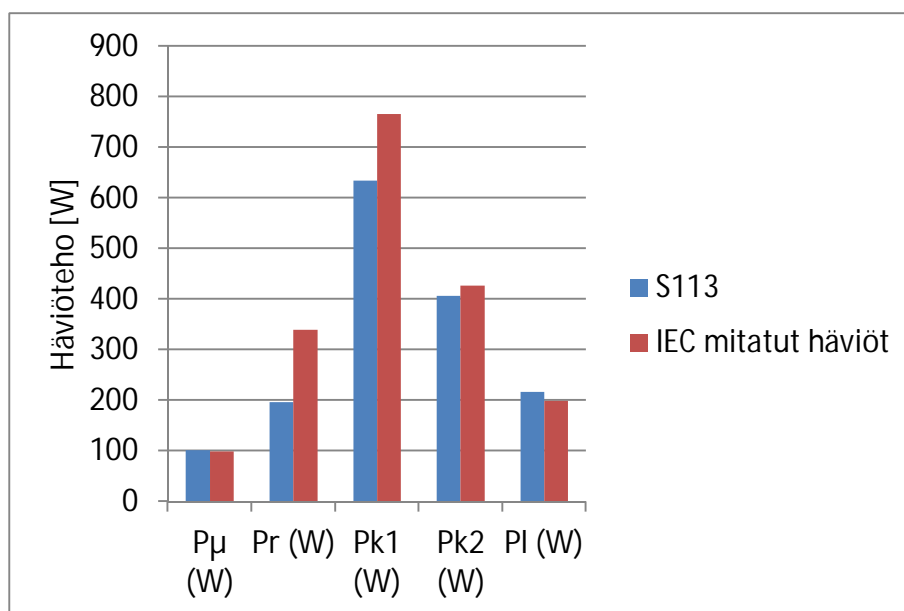
Taulukko 12. Häviöjakauma mitatuille ja nimellisille häviöille, sekä ulostuloteho P_2 ja ottoteho P_1 4-napaiselle 30 kW sähkömoottorille

IEC mitatut häviöt		IEC nimelliset häviöt
P_μ (W)	99	99
P_r (W)	339	339
P_{k1} (W)	766	782
P_{k2} (W)	427	436
P_1 (W)	199	198
P_{tot} (W)	1830	1854
P_t (W)	1828	1855
P_2 (kW)	30	30
P_1 (kW)	32	32

Taulukko 13. FCSmek- ja S113-laskentaprofiileilla lasketut häviöt 4-napaisella 30 kW sähkömoottorilla.

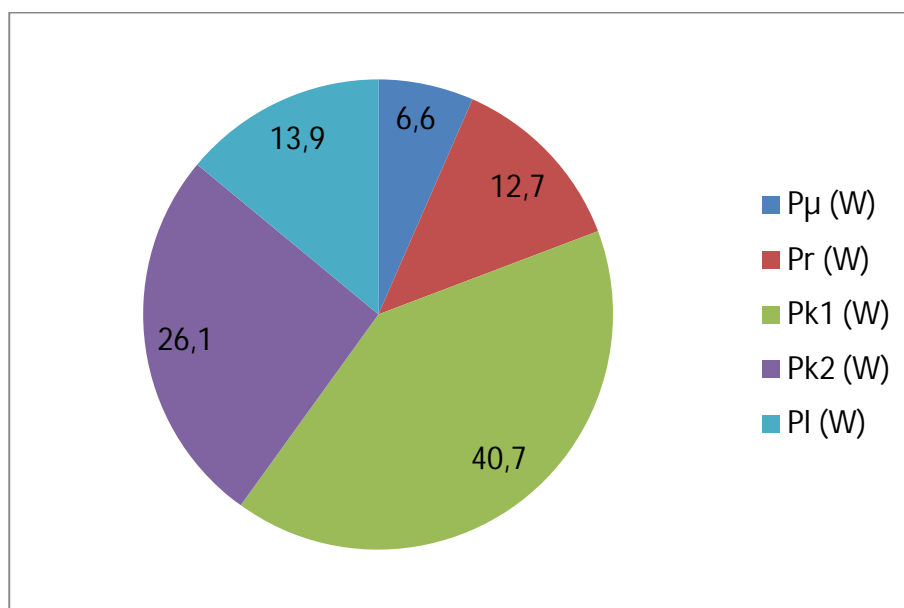
	FCSmek	S113
P_μ (W)	102	102
P_r (W)	233	197
P_{k1} (W)	633	634
P_{k2} (W)	525	406
P_1 (W)	0	217
P_{tot} (W)	1493	1556

Kuvasta 11 nähdään S113-laskentaprofiililla laskettujen staattorin resistivisten häviöiden P_{k1} osuuden olevan suurempi kuin se todellisuudessa on ja roottorin resistiivisten häviöiden P_{k2} osuuden olevan pienempi kuin testitilanteessa mitattuna. Suurin heitto mitattuihin häviöosuuksiin verrattuna lasketuilla osuuksilla on rautahäviöillä P_r , joiden osuus kokonaishäviöistä on S113-laskentaprofiililla laskettuna noin 45 % pienempi, mitä testitulokset osoittavat.

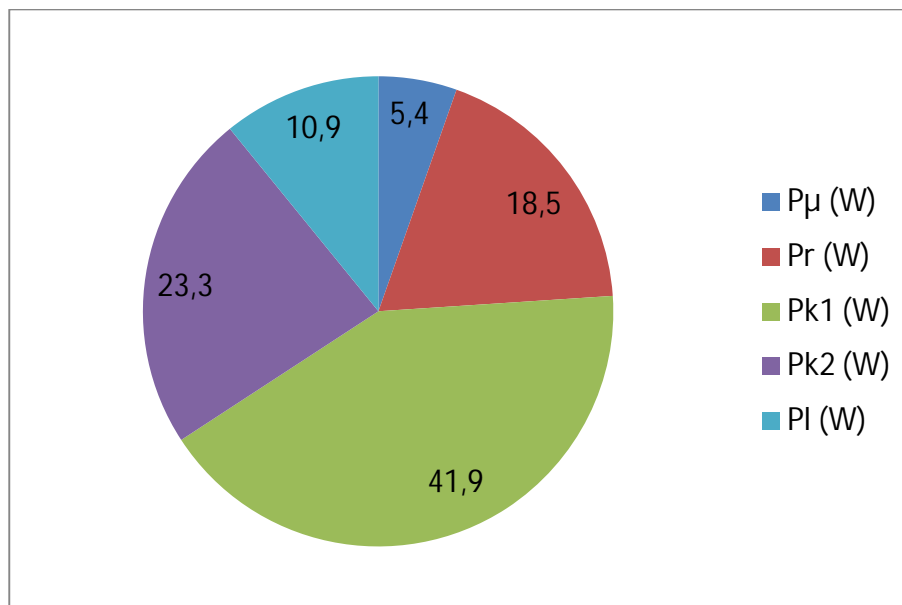


Kuva 11. Häviövertailu mitattujen ja S113-laskentaprofiililla laskettujen hankaushäviöiden P_{μ} , rautahäviöiden P_r , staattorin resistiivisten häviöiden P_{k1} , roottorin resistiivisten häviöiden P_{k2} ja lisähäviöiden P_1 välillä 4-napaisella 30 kW sähkömoottorilla.

Kuvissa 12 ja 13 on kuvattuna IE4-hyötysuhdeluokan sähkömoottorin häviöjakauma prosenttiosuuksittain. Suurin osa häviöistä aiheutuu staattorin resisiivisistä häviöistä P_{k1} ja roottorin resistiivisistä häviöistä P_{k2} . Rautahäviöt P_r ovat kolmanneksi suurin häviöiden aiheuttaja. Lisähäviöt P_1 ovat suuremman kuin hankaushäviöt P_{μ} . S113-laskentaprofiililla laskettuna rautahäviöiden osuus on toiseksi pienin, vaikka mitatut rautahäviöt ovat lisähäviöitä suuremman. Tällä sähkömoottorilla häviöjakauma on erilainen lisä- ja rautahäviöiden osalta mitattuna ja laskettuna.



Kuva 12. S113-laskentaprofiililla laskettu suhteellinen häviöjakauma 4-napaisella 30 kW sähkömoottorilla.



Kuva 13. Testitilanteessa mitattu suhteellinen häviöjakauma 4-napaisella 30 kW sähkömoottorilla.

6.2.1 4-napaiset 30 kW IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottorit

Koska tämän sähkömoottorin pohjana olevalle IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottorille löytyi mittausdataa, pystytään levymateriaalin häviöitä paremmin vertailemaan. Taulukossa 14 on vierekkäin S113-laskentaprofiililla lasketut häviöarvot ja mittauksissa saadut mitatut arvot. IE3-hyötysuhdeluokan 4-napaisia 30 kW testattuja sähkömoottoreita on kaksi kappaletta ja ne on erotettu toisistaan nimeämällä ne Moottori 1 ja Moottori 2.

Taulukko 14. IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottorien Moottori 1 ja Moottori 2 S113-laskentaprofiililla lasketut ja testatessa mitatut häviöt.

	S113 laskettu	Moottori 1 mitattu	Moottori 2 mitattu
P_{μ} (W)	102	210	127
P_r (W)	285	361	327
P_{k1} (W)	722	813	794
P_{k2} (W)	451	457	454
P_1 (W)	219	241	312
P_{tot} (W)	1779	2082	2014

IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottoreilla ja IE4-hyötysuhdeluokan sähkömoottorilla on aiemmin mainittujen kääminän ja levymateriaalin eroavaisuuksien lisäksi eroa roottorilevyjen valmistustavassa. IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottorit valmistetaan sarjatuotantotavalla, joka roottorilevyjen valmistuksessa tarkoittaa sitä, että levyt ovat uritettu meistillä. IE4-hyötysuhdeluokan sähkömoottorit ovat prototyyppisiä ja niiden levyt leikataan ja uritetaan laserleikkauksella. Leikkaustekniikasta riippuen levyt voivat olla oikosulussa, jos niiden leikkuureunaan on jäänyt jäysteitä, jotka tunkeutuvat eristeeseen.

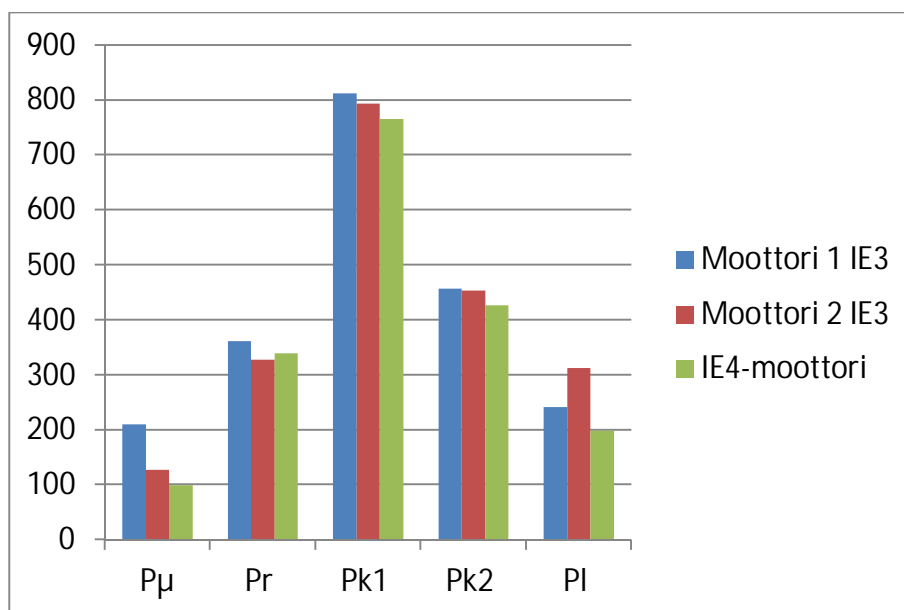
IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottoreihin käytetty meistitekniikka soveltuu suurien kappalemäärien valmistukseen. Meistitekniikassa käytetään leikkainta tai lävistäjää, meistiä ja vedintä. Näissä moottoreissa meistitekniikalla aiheutetaan roottorilevyihin suljettuja muotoja, joten kyseessä on lävistäminen. Lävistäjä painetaan voimalla halutun mukaisesti roottorikiekosta läpi. Koska lävistuspinta syntyy osittain leikkautumalla ja osittain murtumalla, leikkautuva reuna pyritään saamaan mahdollisimman tasaiseksi ja tässä auttaa leikkausvälin optimoiminen. Pieni leikkausväli antaa parhaimman tuloksen, mutta se taas vaatii työkalulta parempaa valmistustarkkuutta ja kestävyyttä, jolloin hinta kohoaa ylöspäin. [32]

Meistitekniikassa levyn leikkaus tapahtuu seuraavien vaiheiden mukaan. Ensin pistimen osuessa levyn yläpintaan levy taipuu kimmoisasti ennen kuin se leikkautuu pistimen mennessä läpi. Leikkautumista seuraa myös leikkauspinnan repeytyminen ja jäysteen muodostuminen levyn pintaan. Lisäksi levystä irtoaa pieniä osasia. Irti leikkautunut osa työntyy läpi levystä ja tähän liittyy pistintä alaspäin puristavan työkalun värähtely kuorimitetun jousen tapaan. Lopuksi pistin palautuu alkuperäiseen asentoon valmiiksi leikkaamaan seuraavaa levyä. [33]

Meistitekniikkaa käyttämällä syntyvä jäyste levyn reunoilla on pienenäkin määränä haitallista, sillä se voi esimerkiksi aiheuttaa roottorilevyjen aseman pyörähtämisen toisiinsa nähden merkittävästi, jolloin roottorista tulee käyttökelvoton. Valmiissa roottorissa jäyste saattaa lisätä kitkaa. [34]

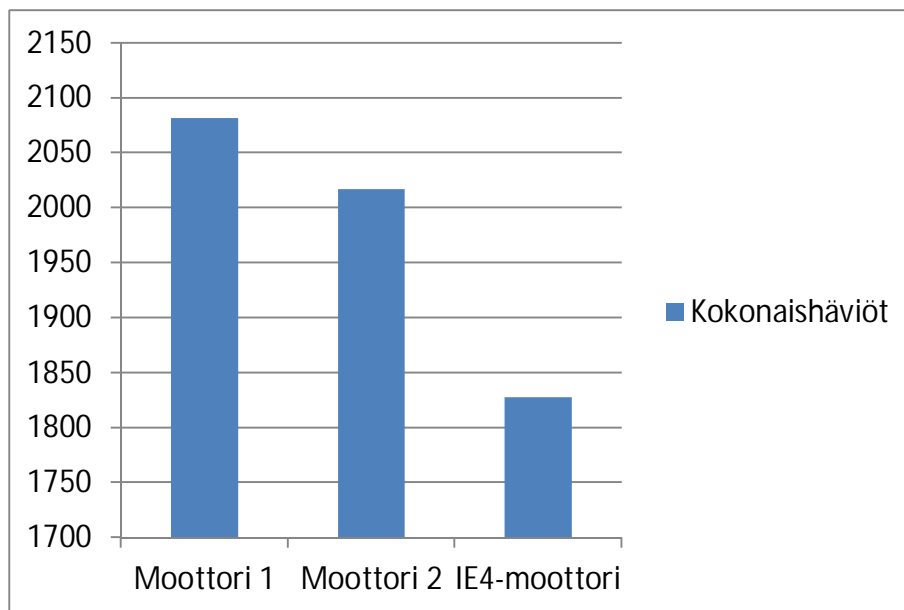
Laserleikkaus on terminen leikkausmenetelmä, jossa kuviot leikataan levystä irti laserilla polttamalla. Laservalon energialla kuumennetaan leikkauskohta syttymislämpötilaan ja leikkauskohtaan suunnataan leikkaushappisuihku, joka hapettaa metallia ja poistaa metallioksidin syntyvästä sulasta. Laserleikkauksessa reunan laadusta tulee suora-reunainen ja jäystettä ei synny. [35]

Kuvassa 14 on pylväsdiagrammeilla kuvattuna IE4-hyötysuhdeluokan sähkömoottorin pohjana olevan IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottorin kahden eri testituloksen häviöt erotettuna Moottori 1 ja Moottori 2 ja IE4-hyötysuhdeluokan sähkömoottorin testatut häviöt. IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottoreissa on halkaisijaltaan 210 mm:n tuuletin. Hankaushäviöissä P_{μ} on huomattava ero toisen IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottorin hankaushäviöiden ollessa 210 W ja toisen sähkömoottorin 127 W. IE4-hyötysuhdeluokan sähkömoottori on hankaushäviöiltään lähempänä IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottoria 2, sillä IE4-hyötysuhdeluokan sähkömoottorin hankaushäviöt ovat 99 W. Rautahäviöt P_r ovat pienimmät IE3-hyötysuhdeluokan Moottorilla 2, mutta IE4-hyötysuhdeluokan sähkömoottorin staattorin resistiiviset häviöt P_{k1} ja roottorin resistiiviset häviöt P_{k2} ovat pienimmät. Lisähäviöissä P_1 IE4-hyötysuhdeluokan sähkömoottorilla on selkeämpi ero IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottoreihin pienemmillä häviöarvoilla.



Kuva 14. Häviövertailu IE3- ja IE4 -hyötysuhdeluokkien sähkömoottorien välillä. IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottorit ovat nimetty Moottori 1 ja Moottori 2.

Kuvassa 15 ovat kokonaishäviöiden erot IE4-hyötysuhdeluokan sähkömoottorin ja IE3-hyötysuhdeluokan 4-napaisten 30 kW:n sähkömoottorien Moottori 1 ja Moottori 2 välillä. Moottorille 1 kokonaishäviöt ovat mitattuna 2082 W ja moottorille 2 2017 W sekä IE4-hyötysuhdeluokan sähkömoottorille 1828 W. IE4-hyötysuhdeluokan sähkömoottorilla on Moottoriin 2 verrattuna 10 % pienemmät kokonaishäviöt ja Moottoriin 1 verrattuna 12 % pienemmät kokonaishäviöt.



Kuva 15. Kokonaishäviövertailu testattujen IE3- ja IE4-hyötysuhdeluokkien sähkömoottorien välillä. IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottorit ovat nimetty Moottori 1 ja Moottori 2.

6.3 6-napainen 22 kW sähkömoottori

Vaadittu hyötysuhde 6-napaiselle 22 kW:n tehoiselle sähkömoottorille IE4-hyötysuhdeluokan saavuttamiseksi on taulukon 1 mukaisesti 93,7 %. Laskennallisesti hyötysuhde oli 94,7 % ja suhteutettuna alkuperäisen IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottorin katalogiarvoihin 94,2 %. Testituloksissa mitattu ja nimellinen hyötysuhde on 92,9 %, joka on 100 % toleranssia käytettäessä IE4-luokassa. Eräs syy alhaiseen hyötysuhteeseen voi olla roottorilevyjen pieleen mennyt leikkaus, koska osasta levyjen toisesta ulkoreunasta puuttui pala. Levyt kuitenkin sorvataan leikkauksen jälkeen, joten viallisten levyjen vaikutuksen pitäisi olla huomaamaton. Näille ei kuitenkaan ole vertailutuloksia virheettömistä roottoripaketeista.

Taulukossa 15 on vertailtuna FCSmek-laskentaprofiililla lasketut ja testitilanteessa mitatut virta I , käynnistysvirran suhde nimellisvirtaan I_s/I_n , tehokerroin $\cos \varphi$, kierrosnopeus n ja jättämä s . Kuten muidenkin tutkimuksen sähkömoottorien yhteydessä on huomattu virta on laskettu liian pieneksi ja tehokerroin liian suureksi. Käynnistysvirta noudattaa oletusta olemalla testattuna pienempi laskettua ja näin ollen hyväksyttävissä rajoissa IEC-standardeja ajatellen. FCSmek-laskentaprofiililla lasketut pyörimisnopeus ja jättämä vastasivat testituloksia.

Taulukko 15. FCSmek-laskentaprofiililla lasketut ja testitilanteessa mitatut arvot virralle I , käynnistysvirran suhteelle nimellisvirtaan I_s/I_n , tehokertoimelle $\cos \varphi$, kierrosnopeudelle n ja jättämälle s 6-napaiselle 22 kW sähkömoottorille.

	FCSmek	Mitattu
I	39,6 A	41,6 A
I_s/I_n	9,2	7,7
$\cos \varphi$	0,85	0,82
n	987 rpm	984 rpm
s	1,35 %	1,42 %

Taulukossa 16 on kuvattuna testauksessa mitatut häviöt ja lasketut nimelliset häviöt. Taulukossa 17 on FCSmek-laskentaprofiililla ja S113-laskentaprofiililla lasketut häviöt. Mitatuissa häviöissä ulostulotehon P_2 ja ottotehon P_1 erotus on 80 W pienempi kuin yhteenlasketut häviöt P_{yht} ja ohjelmalla laskettu yhteishäviöteho P_{tot} , nimellisten häviöiden osalta nämä yhteishäviöt ja tehojen välinen erotus ovat samassa suuruusluokassa. FCSmek-laskentaprofiililla laskettuna kokonaishäviöiden ero on nimellisiin verrattuna 316 W pienemmät ja S113-laskentaprofiililla laskettuna 247 W pienemmät. Hankaushäviöissä P_{μ} ero laskettujen ja testattujen arvojen välillä on 9 W, rautahäviöissä P_r ero on 86 W S113-laskentaprofiilin osalta ja FCSmek-laskentaprofiililla 92 W suurempi kuin testatuilla. Staattorin resistiiviset häviöt P_{k1} ovat mitattuna 64 W suuremmat kuin FCSmek-laskentaprofiililla lasketut ja 64 W suuremmat kuin S113-laskentaprofiililla lasketut. Nimellisillä häviöillä ero kasvaa 15 W verran suuremmaksi. Roottorin resistiiviset häviöt P_{k2} ovat FCSmek-laskentaprofiililla laskettuna 40 W mitattuja suuremmat ja S113-laskentaprofiililla laskettuna noin 60 W pienemmät. Lisähäviöitä P_1 FCSmek-laskentaprofiililla ei voi laskea ja S113-laskentaprofiililla laskettuna ne ovat 8 W pienemmät kuin mitatut ja nimelliset lisähäviöt.

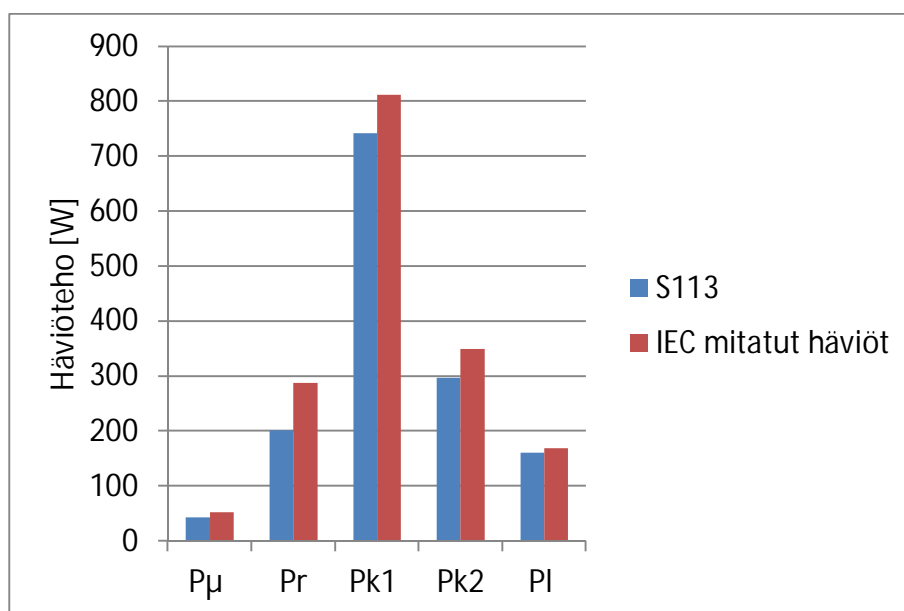
Taulukko 16. Häviöjakauma mitatuille ja nimellisille häviöille, sekä ulostuloteho P_2 ja ottoteho P_1 6-napaiselle 22 kW sähkömoottorille.

IEC mitatut häviöt		IEC nimelliset häviöt
P_{μ} (W)	53	53
P_r (W)	288	288
P_{k1} (W)	812	826
P_{k2} (W)	350	356
P_1 (W)	169	169
P_{tot} (W)	1672	1692
P_t (W)	1672	1692
P_2 (kW)	22	22
P_1 (kW)	24	24

Taulukko 17. FCSmek- ja S113- laskentaprofiileilla lasketut häviöt 6-napaiselle 22 kW sähkömoottorille.

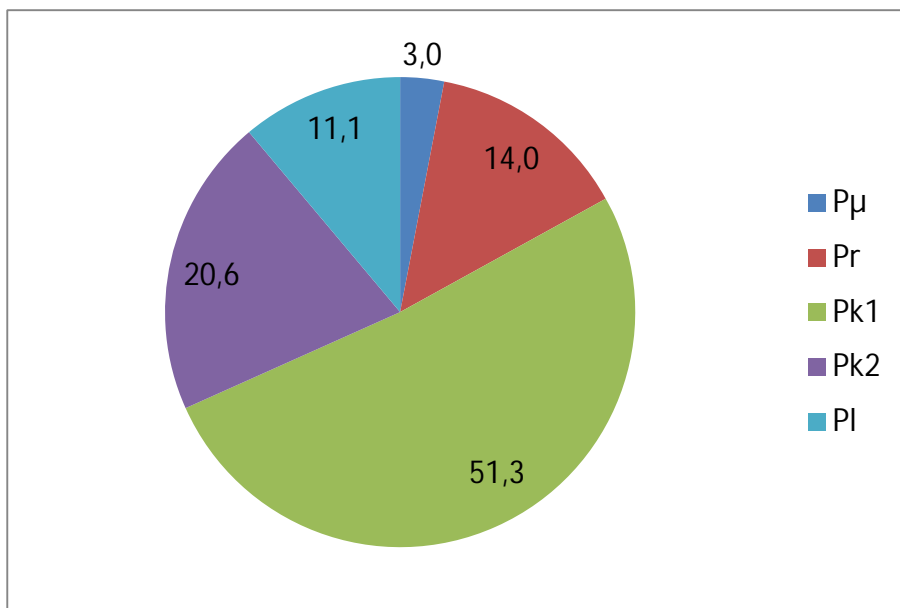
	FCSmek	S113
P_{μ} (W)	44	44
P_r (W)	196	202
P_{k1} (W)	748	742
P_{k2} (W)	389	297
P_l (W)	0	161
P_{tot} (W)	1377	1446

Kuvassa 16 vertaillaan mitattujen ja S113 laskemien häviöiden eroja. Suurimmat erot ovat rautahäviöissä P_r , staattorin resistiivisissä häviöissä P_{k1} ja roottorin resistiivisissä häviöissä P_{k2} . S113-laskentaprofiililla laskettuna häviöt ovat pienemmät kuin testitilanteessa.

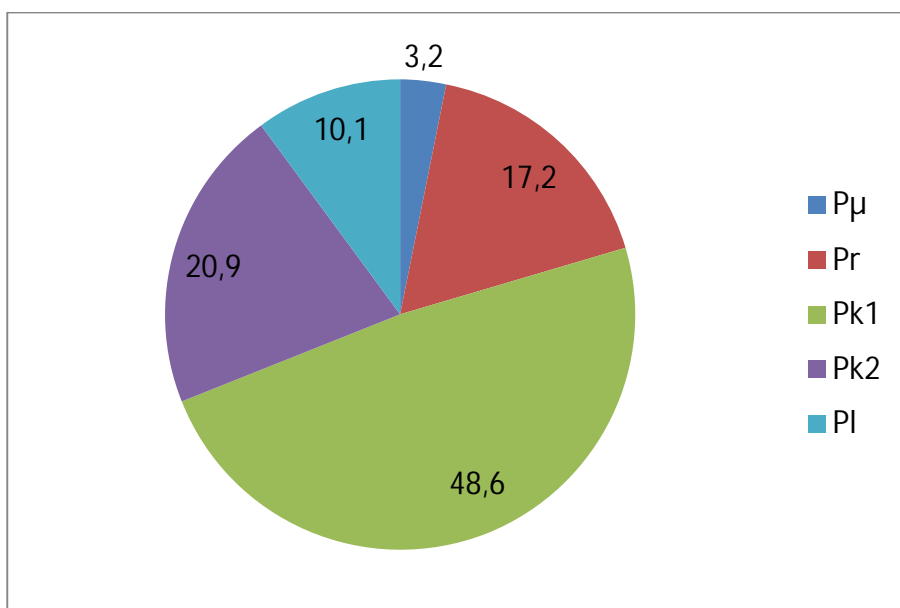


Kuva 16. Häviövertailu mitattujen ja S113-laskentaprofiililla laskettujen hankaushäviöiden P_{μ} , rautahäviöiden P_r , staattorin resistiivisten häviöiden P_{k1} , roottorin resistiivihäviöiden P_{k2} ja lisähäviöiden P_l välillä 6-napaisella 22 kW sähkömoottorilla.

Kuvissa 17 ja 18 ovat S113-laskentaprofiililla lasketut ja testauksessa mitattujen häviöiden prosentuaaliset häviöjakaumat. Kuviot eivät ole keskenään vertailukelpoisia, sillä niiden pohjana olevat kokonaishäviöt ovat erisuuruiset. Molemmissa tapauksissa staattorin resistiivisillä häviöillä P_{k1} on suurin osuus häviöjakaumasta ja seuraavaksi suurin osuus on roottorin resistiivisillä häviöillä P_{k2} . Mitatuissa häviöissä rautahäviöillä P_r on lisähäviöitä P_l huomattavasti suurempi osuus, kun taas S113-laskentaprofiililla laskettuna osuudet ovat lähempänä toisiaan. Hankaushäviöiden P_{μ} osuus on molemmissa häviöjakauman osuuksista pienin.



Kuva 17. S113-laskentaprofiililla laskettu suhteellinen häviöjakauma 6-napaisella 22 kW sähkömoottorilla.



Kuva 18. Testitilanteessa mitattu suhteellinen häviöjakauma 6-napaisella 22 kW sähkömoottorilla.

6.4 4-napainen 37 kW sähkömoottori

Nelinapaiselle 37 kW:n sähkömoottorille IE4-hyötysuhdeluokan hyötysuhderaja on taulukon 1 mukaisesti 95,2 %. Testitilanteessa hyötysuhteeksi mitataan 95,3 % ja nimelliseksi IEC-hyötysuhteeksi muutettuna se on 95,2 % eli sähkömoottori on IE4-hyötysuhdeluokassa ilman toleransseja. FCSmek-laskentaprofiililla laskettuna hyötysuhde on 95,8 % ja suhteutettuna katalogiarvoihin hyötysuhteeksi saatiin 95,5 %, joten mitattuun arvoon eroa on vain 0,2 %.

Taulukossa 18 verrataan FCSmek-laskentaprofiililla laskettuja ja testitilanteessa mitattuja virtaa I , käynnistysvirran suhdetta nimellisvirtaan I_s/I_n , tehokerrointa $\cos \varphi$, kierrosnopeutta n ja jättämää s . Kuten muillakin tutkimuksen sähkömoottoreilla virta I on laskettuna liian pieni ja käynnistysvirran suhde on mitattuna pienempi kuin laskettuna, jolloin se soveltuu IEC-standardiin. Tehokerroin on mitattuna pienempi, mutta jättämä ja kierrosnopeus vastaavat hyvin mitattuja arvoja.

Taulukko 18. FCSmekillä lasketut ja testitilanteessa mitatut arvot virralle I , käynnistysvirran suhteelle nimellisvirtaan I_s/I_n , tehokertoimelle $\cos \varphi$, kierrosnopeudelle n ja jättämälle s 4-napaiselle 37 kW sähkömoottorille.

	FCSmek	Mitattu
I	61,9 A	63,8 A
I_s/I_n	9,1	7,3
$\cos \varphi$	0,90	0,88
n	1483 rpm	1483 rpm
s	1,16 %	1,09 %

Taulukossa 19 on kuvattuna testauksessa mitatut häviöt ja lasketut nimelliset häviöt. Taulukossa 20 on FCSmek-laskentaprofiililla ja S113-laskentaprofiililla lasketut häviöt. FCSmek-laskentaprofiililla laskettuna kokonaishäviöt ovat 173 W pienempiä nimellisiin kokonaishäviöihin verrattuna, mutta S113-laskentaprofiililla laskettuna kokonaishäviöt ovat 94 W mitattuja suuremmiksi. Hankaushäviöt P_μ ovat S113-laskentaprofiililla ja FCSmek-laskentaprofiililla laskettuna 22 W suurempia kuin testatut hankaushäviöt. Rautahäviöissä P_r mitatut häviöt ovat laskettuja suurempia kuten muillakin tutkimuksen moottoreilla. Mitatut rautahäviöerot ovat S113-laskentaprofiililla laskettuihin verrattuna 55 W suuremmat ja FCSmek-laskentaprofiililla laskettuihin verrattuna 34 W suuremmat. Staattorin resistiivisten häviöiden P_{k1} osalta mitatut arvot ovat noin 75 W molempien laskentaprofiilien laskemia arvoja suurempia. Nimellisillä häviöillä ero vielä kasvaa 12 W verran suuremmaksi. Roottorin resistiiviset häviöt P_{k2} ovat S113-laskentaprofiililla laskettuna mitattuja häviöitä vastaavat ja näiden ero nimellisiin häviöihin on noin 7 W. FCSmek-laskentaprofiililla lasketut roottorin resistiiviset häviöt ovat mitattuja 76 W suuremmat. Lisähäviöitä P_l FCSmek-laskentaprofiililla ei pysty laskemaan ja S113-laskentaprofiililla laskettuna ne ovat yli kaksinkertaiset mitattuihin ja nimellisiin lisähäviöihin verrattuna.

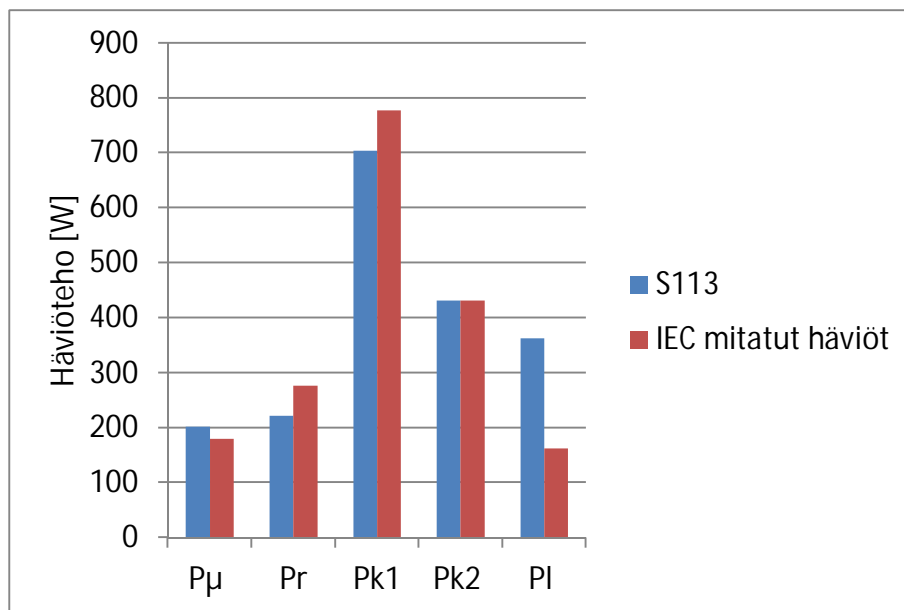
Taulukko 19. Häviöjakauma mitatuille ja nimellisille häviöille, sekä ulostuloteho P_2 ja ottoteho P_1 4-napaiselle 37 kW sähkömoottorille.

IEC mitatut häviöt		IEC nimelliset häviöt
P_μ (W)	180	180
P_r (W)	277	277
P_{k1} (W)	777	789
P_{k2} (W)	432	439
P_1 (W)	162	162
P_{tot} (W)	1828	1847
P_t (W)	1826	1846
P_2 (kW)	37	37
P_1 (kW)	39	39

Taulukko 20. FCSmek- ja S113- laskentaprofiileilla lasketut häviöt 4-napaiselle 37 kW sähkömoottorille.

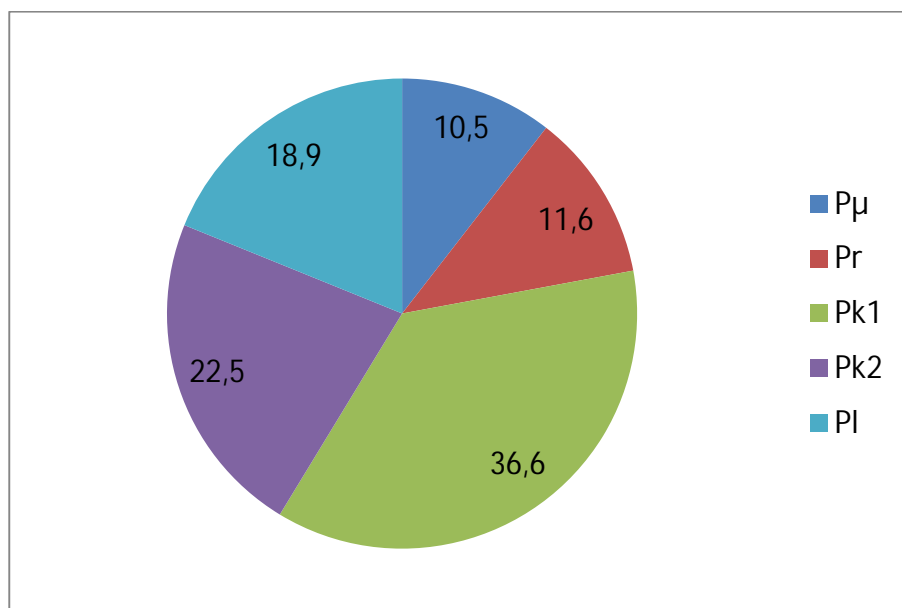
	FCSmek	S113
P_μ (W)	202	202
P_r (W)	243	222
P_{k1} (W)	703	704
P_{k2} (W)	507	431
P_1 (W)	0	362
P_{tot} (W)	1655	1921

Kuvassa 19 on häviövertailu S113-laskentaprofiililla laskettujen ja mitattujen häviöiden välillä. Hankaushäviöt P_μ ja lisähäviöt P_1 ovat suuremmat laskettuina kuin mitattuna. Roottorin resistiiviset häviöt P_{k2} ovat suunnilleen samat ja rautahäviöt P_r sekä staattorin resistiiviset häviöt P_{k1} ovat mitattuina suurempia.

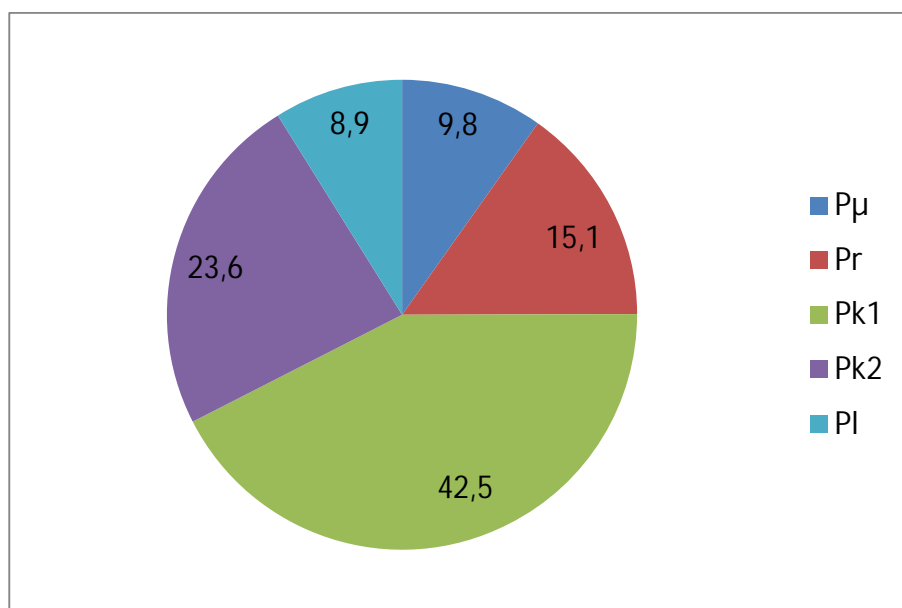


Kuva 19. Häviövertailu mitattujen ja S113-laskentaprofiililla laskettujen hankaushäviöiden P_{μ} , rautahäviöiden P_r , staattorin resistiivisten häviöiden P_{k1} , roottorin resistiivisten häviöiden P_{k2} ja lisähäviöiden P_1 välillä 4-napaisella 37 kW sähkömoottorilla.

Kuvissa 20 ja 21 näkyvät S113-laskentaprofiililla laskettujen ja testauksessa mitattujen häviöiden prosentuaaliset häviöjakaumat. Kuviot eivät ole keskenään vertailukelpoisia, sillä niiden pohjana olevat kokonaishäviöt ovat erisuuruiset. Molemmissa tapauksissa staattorin resistiivisillä häviöillä P_{k1} on suurin osuus häviöjakaumasta ja seuraavaksi suurin osuus on roottorin resistiivisillä häviöillä P_{k2} . Lasketuissa häviöarvoissa lisähäviöillä P_1 on kolmanneksi suurin osuus häviöjakaumasta, kun sillä mitatuissa on pienin osuus. Mitatuissa rautahäviöiden P_r ja hankaushäviöiden P_{μ} osuuksilla häviöjakaumasta on suurempi ero kuin lasketuissa arvoissa.



Kuva 20. S113-laskentaprofiililla laskettu suhteellinen häviöjakauma 4-napaisella 37 kW sähkömoottorilla.



Kuva 21. Testitilanteessa mitattu suhteellinen häviöjakauma 4-napaisella 37 kW sähkömoottorilla.

Onnistuneen IE4-hyötysuhdeluokan saavuttamisen takia tätä samaa sähkömoottoria käytetään pohjana 45 kW:n sähkömoottorille, jolle tavoitellaan IE4-hyötysuhdetta. Laskelmassa muutetaan lankalukua pienemmäksi vastaamaan suurempaa tehoa. Tähän tutkimukseen tämä liittyy siten, että testitulosten perusteella ADEPT-laskentaohjelman antamia arvoja lähdettiin muokkaamaan häviötuloksia vastaavaksi. Lisähäviöt P_1 asetettiin suoraan vastaaviksi ADEPT-ohjelman lisähäviölehdelle, rautahäviöitä säädettiin arvioi-

malla kertoimia rautahäviöille hammasta ja iestä kohden, hankaushäviöt laitettiin suoraan vastaaviksi mekaanisille häviöille ja virta saatiin säädettyä muuttamalla ilmaväliä ja staattorin puolen vyyhden pituutta. Ilmaväli ja puolen vyyhden pituus eivät vastaa todellisuutta vaan näillä toimilla saatiin laskettua virrat ja häviöt mitattuja vastaaviksi. Lisäksi säädettiin lämpenemät vastaamaan mitattuja ja näin pyrittiin saamaan 45 kW:n laskentatuloksille lähempänä todellisuutta oleva hyötysuhde. 37 kW:n sähkömoottorille saatiin näin laskettua hyötysuhteeksi 95,4 %, joka on vain 0,1 % mitattua suurempi. Kokonaishäviöt uusilla asetuksilla ovat 1781 W, kun ne mitattuina ovat 1829 W. Uusi laskettu virta on 63,0 A, kun se mitattuna on 63,8 A. Taulukosta 21 nähdään parhaimmin mitatut häviöt ja S113-laskentaprofiililla lasketut häviöt.

Taulukko 21. Uudelleenlasketut häviöt säädettyinä mitattuja vastaaviksi 4-napaisella 37 kW sähkömoottorilla.

	Mitatut	S113
P_{μ} (W)	180	180
P_r (W)	277	267
P_{k1} (W)	703	751
P_{k2} (W)	507	428
P_1 (W)	162	155
P_{tot} (W)	1829	1781

ADEPT-laskentaohjelmaan ei voi syöttää suoraan mitattuja arvoja, joten laskentatuloksia ei saada mitattuja vastaaviksi. Näillä asetuksilla ja asettamalla lankalukua pienemmäksi 45 kW:n hyötysuhteeksi saadaan laskettuna 95,6 %, kun sen IE4-hyötysuhdeluokan hyötysuhderaja on 95,4 %. Tähän tutkimukseen 4-napaisen 45 kW:n sähkömoottorin tulokset eivät ehdi.

7 PÄÄTELMÄT JA JATKOTUTKIMUKSEN AIHEET

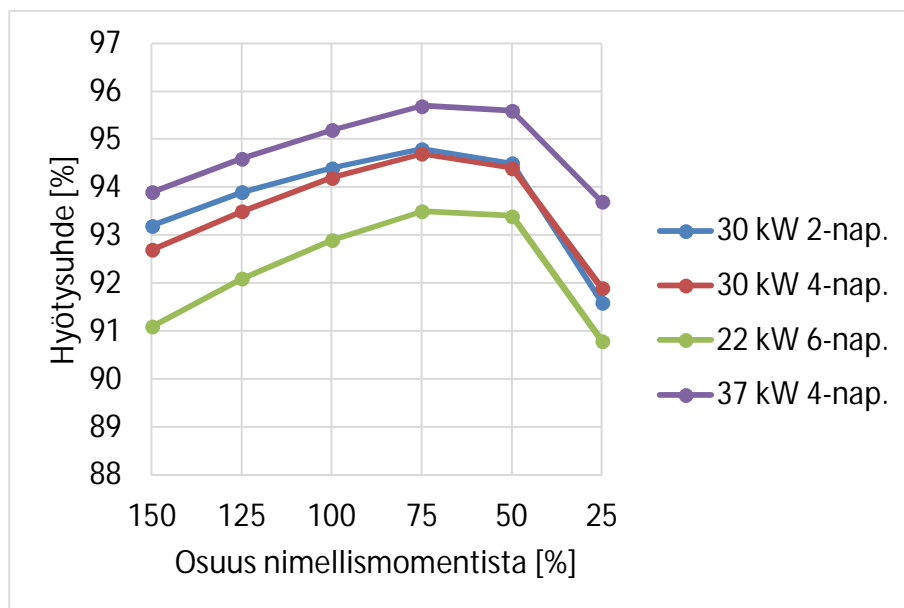
Tavoitteessa saada aikaan IE4-hyötysuhdeluokan sähkömoottoreita onnistuttiin tutkimuksen kohteena olevien sähkömoottorien kohdalla osittain. Kaikki sähkömoottorit olivat IE4-hyötysuhdeluokassa täyttä toleranssia käytettäessä ja 37 kW:n nelinapainen sähkömoottori oli ilman toleransseja hyötysuhderajan mukainen. 2-napainen 30 kW sähkömoottori oli mitattuna hyötysuhdevaatimusten mukainen, mutta nimelliseksi hyötysuhdeeksi muutettuna 0,1 prosenttiyksikön päässä hyötysuhdeluokan rajasta, mikä on toleranssien sisällä. ADEPT-laskentaohjelmalla laskettaessa kaikki tutkimuksen kohteena olevat sähkömoottorit olivat reilusti IE4-hyötysuhdeluokan hyötysuhderajojen yli, joten laskentaohjelmassa on parannettavaa parempien ennustustulosten saamiseksi sähkömoottoreille.

Testituloksiin verrattaessa ADEPT-laskentaohjelmalla lasketut nimellisvirrat olivat liian alhaiset. Staattorivirta on liian alhainen testituloksiin verrattuna ja staattorin resistiiviset häviöt ovat tämän takia väärin lasketut. Staattorin resistiiviset häviöt pystyttäisiin laskemaan paremmin, jos staattorivirta osattaisiin laskea oikein, koska staattorivasutus tiedetään. Staattorin resistiiviset häviöt saadaan kertomalla staattorin resistanssi staattorivirran neliöllä. Resistanssivaihtelu on mahdollinen, mutta vaihtelun aiheuttama virhe aiheuttaa pienempää muutosta staattorin resistiivisiin häviöihin. Jos resistanssivaihtelu on suurta, staattoripaketissa on jotain vialla.

Hankaushäviöitä ei voi ennustaa, sillä ne ovat tapauskohtaisia johtuen muun muassa laakereiden rasvamäärästä. Hankaushäviöt voidaan kirjata jälkepäin ADEPT-laskentaohjelmaan todellisuutta vastaaviksi ja näin ollen saada laskelmat paremmin todellisuutta vastaaviksi. Muita häviöitä lisähäviöiden lisäksi ADEPT-laskentaohjelmaan ei pysty kirjaamaan.

Kaikissa sähkömoottoreissa levymateriaali vaihdettiin, mutta vain kaksinapaisessa 30 kW:n ja nelinapaisessa 37 kW:n moottoreissa käytettiin kaksitasokäämitystä ja nämä onnistuivat parhaiten. Huomattavaa parannusta hyötysuhteeseen 22 kW:n kuusinapaiselle ja 30 kW:n nelinapaiselle sähkömoottorille kaksitasokäämitykseen vaihtaessa ei ollut ADEPT-laskentaohjelmalla laskettaessa, mutta tämän pienen otannan perusteella kaksitasokäämitys voisi parantaa näidenkin hyötysuhdetta. Kaksitasokäämityksellä vyyhdenpäät lyhenevät, jolloin kuparia tarvitaan vähemmän ja tämän myötä harmoniset komponentit ja kuparihäviöt vähenevät.

Kuvassa 21 ovat hyötysuhdekäyrät tutkimuksessa oleville sähkömoottoreille. Hyötysuhdekäyrien tarkoituksena on mallintaa sähkömoottorin tehokoon sopivuutta tutkimuksessa käytetyille parametreille. Hyötysuhdekäyrät ovat samanmuotoisia, eikä käyrillä ole jyrkkää nousua nimelliskuormasta 75 % osakuormaan. Käyrän jyrkkyys nimelliskuorman ja 75 % osakuorman välillä kertoo sähkömoottorin soveltuvuudesta paremmin pienemmälle nimellisteholle. Jos hyötysuhdekäyrä nousisi 75 % ja 50 % kuormapisteiden välillä huomattavasti, olisivat sähkömoottorien nimellistehot liian suuret. Kuvan 22 käyrien perusteella tutkimuksen sähkömoottoreilla on sopivat tehoalueet.



Kuva 22. Hyötysuhdekäyrät tutkimuksen sähkömoottoreille osakuormittain.

Jatkotutkimuksena tästä voitaisiin tutkia paremmin käytettyä sähkölevymateriaalia. IE4-hyötysuhdeluokan sähkömoottoreihin käytetyn sähkölevyn tulisi antaa 20 % vähemmän rautahäviöitä kuin lähtökohtana olevien IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottorien sähkölevymaterialin. Verratessa testituloksia ero on vain 6 % vähemmän kuin mitattuun IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottoriin verrattuna ja toiseen mitattuun IE3-hyötysuhdeluokan sähkömoottoriin verrattuna rautahäviöt jopa kasvavat 4 %. Tämän perusteella roottori- ja staattorilevyissä käytettävässä sähkömateriaalissa on jotain vialla.

Jatkotutkimuksen aiheena olisi hyvä paneutua ADEPT-laskentaohjelman rautahäviölaskentamalliin, sillä sitä parantamalla häviölaskenta olisi enemmän testitulosten kaltainen. ABB Ruotsilla on omassa ADEPT-versiossaan käytössään säätökertoimia rautahäviökomponenttien valmistukseen, mutta kertoimen pitäisi olla omanlaisensa joka sähkömoottorityypille ja –muunnokselle.

LÄHTEET

[1] ABB, Uusi moottoriaikakausi alkaa huomenna, 15.6.2011, [WWW], [viitattu 1.3.2015] Saatavilla:

<http://www.abb.fi/cawp/seitp202/417b452eb9e70de3c12578b0001e7609.aspx>

[2] Grundfos, EuP-direktiivi muuttaa moottoritekniikan tulevaisuuden, [WWW], [viitattu 1.3.2015] Saatavilla:

<http://energy.grundfos.com/fi/lainsaadaentoe/eup-direktiivi-saehkoemootorit>

[3] Aura, L., Tonteri, A. J., Sähkämiehen käsikirja: Sähkökoneet, nide 2, Söderström, 1986, ISBN 9510134791, 373 s.

[4] Aura, L., Tonteri, A. J., Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet, 1. painos, Werner Söderström Osakeyhtiö, 1996, ISBN 951-0-20167-7, 544 s.

[5] Korpinen, L., 10. luku Sähkökoneet, osa 1, [WWW], [viitattu 19.1.2015] Saatavilla:

http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf

[6] Bertotti, G., General properties of power losses in soft ferromagnetic materials, IEEE transactions on magnetics, vol 24, 1988, [WWW], [viitattu 13.1.2015], Saatavilla:

<http://www.teknik.uu.se/ftf/education/magnetmatr/Projektreferenser/Bertotti1.pdf>

[7] Parviainen, A., Pyörivän magneettivuon aiheuttamien tehohäviöiden mittaussähköteräslevystä, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, energiatekniikan osasto, 2000, 84 s.

[8] Matsch, L. W., Morgan, J. D., Electromagnetic and electromechanical machines. John Wiley & Sons, New York, kolmas painos, 1987. ISBN 0-471-60364-3. 592 s.

[9] LUT, Sähkömagnetismi, luku 11 magneettimateriaalit, luentomateriaali, [WWW], [viitattu 19.1.2015], saatavilla

<https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl30a0300/materiaali>

[10] Wang, L. Xiong, C., Wu, Y., Gan, Z., Study on Iron Loss in Two Kinds of Moving magnet Linear Motors, 2012, International Compressor Engineering Conference, [WWW], [viitattu 13.1.2015], Saatavilla:

<http://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3128&context=icec>

[11] Korpinen, L., 8. luku Sähkömagnetismi, [WWW], [viitattu 19.1.2015] Saatavilla:

http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/8sahkomagnetismi.pdf

[12] Ryyppö, T., Hajautetun laskentajärjestelmän soveltaminen epätahtikoneen roottorirakenteen optimointiin. Teknillinen korkeakoulu, 2005. 51 s.

[13] IEC 60034-30-1, edition 1.0, 2014

[14] IEC 60034-1, edition 10.2, 1999

[15] ADEPT-ohjelman ohjeet, viitattu 3.7.2014, vain sisäiseen käyttöön

[16] Lähteenmäki, M., Elementtimenetelmän perusteet, luentomateriaali, TAMK. [WWW] [Viitattu 9.3.14] Saatavilla:
http://home.tamk.fi/~mlahteen/arkistot/elpe_pdf/johdanto.pdf

[17] Sähköpostikeskustelu Tommi Ryyppön kanssa 8.9.2014

[18] Rantavuori, A., Oikosulkumoottorinimikkeiden standardointi, Metropolia, opinäytetyö [WWW] [Viitattu 1.3.2015] Saatavilla:
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/63999/Rantavuori_Antti.pdf?sequence=1

[19] Kuusisto, J., Ohje sähkömoottorin rutiinikoestusarvojen laskentaan, Vaasan ammattikorkeakoulu, 2012, Saatavilla:
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/43455/Kuusisto_Jarkko.pdf?sequence=1

[20] ABB Oy Moottorit ja Generaattorit ohjeet, FIMOT1418, vain sisäiseen käyttöön

[21] LUT, Pyrhönen, J., luku 7 Suunnittelu, luentomateriaali, [WWW], [viitattu 1.3.2015], Saatavilla:
<https://noppa.lut.fi>

[22] Nieminen, A., IEC60034-2-1 –standard calculations in Motlab software, Wapice, vain sisäiseen käyttöön

[23] Kortelainen, K., Sähkömoottorin hyötysuhde paranee paremmalla rakenteella, Tekniikka ja Talous, 7.5.2010, [WWW], [viitattu 8.6.2014] Saatavilla:
<http://www.tekniikkatalous.fi/metalli/metallitekniikka/sahkomoottorin+hyotysuhde+paranee+paremmalla+rakenteella/a400931>

[24] Oberretl, K., 13 Regeln für minimale Zusatzverluste in Induktionsmotoren, Bulletin Oerlikon 1969 Nr. 389,390 s. 1-11

[25] Surahammars Bruk, Sweden, [WWW], [viitattu 7.1.2015] Katalogi saatavilla:
http://www.sura.se/Sura/hp_main.nsf/startupFrameset?ReadForm

[26] Vesala, J., Suurnopeusmoottorin kolmiulotteinen sähkömagneettinen mallintaminen, Tampereen teknillinen yliopisto, 2011, 88s.

[27] Korpinen, L., Mikkola, M., Keikko, T., Falck, E., Yliaalto-opus, [WWW], [viitattu 19.1.2015] Saatavilla:
<http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf>

[28] ABB, Technical note, Starting methods for AC Motors, [WWW], [Viitattu 1.3.2015] Saatavilla:
[http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/e308f3e92d9a8fc5c1257c9f00349c99/20a5783a8b31d05748257c140019cc05/\\$FILE/Technical+note+TM008+low.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/e308f3e92d9a8fc5c1257c9f00349c99/20a5783a8b31d05748257c140019cc05/$FILE/Technical+note+TM008+low.pdf)

[29] IEC 60034-12, 1.1.1980

[30] Viertokoski, E., Murtovakokäämityksen soveltaminen hitaissa korkean hyötysuhteen sähkökoneissa, Tampereen teknillinen yliopisto, 2011, 73 s.

[31] ABB Oy, The Motor guide, 2nd edition, 2005, ISBN 952-91-0728-5

[32] Ihalainen, E., Aaltonen, K., Aromäki, M., Sihvonen, P., Valmistustekniikka, 2007, Hakapaino Oy, Helsinki, ISBN 978-951-672-333-7

[33] Aaltonen, K., Andersson, P., Kauppinen, V., Levytyö- ja työvälinetekniikat, 1997, WSOY, Porvoo, ISBN 951-0-21438-8

[34] Kuhalampi, J., Automatisoidun hiomapaperivaihdon suunnittelu, Vaasan ammattikorkeakoulu, 2012, Saatavilla:
<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/43547/Opinnaytetyo.pdf?sequence=1>

[35] Parviainen, T., levynleikkausmenetelmät sekä levynleikkauspalveluiden tuotteistaminen, Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, 2010, Saatavilla:
<http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/21550/Parviainen%20Tarja.pdf?sequence=1>