

**VAASAN YLIOPISTO**

**TEKNILLINEN TIEDEKUNTA**

**SÄHKÖTEKNIikka**

Jarkko Sivunen

**MITTAUSTULOKSIIN PERUSTUVA TAHTIRELUKTANSSIMOOTTORIN  
LASKENTAMALLIN TARKENTAMINEN**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten  
Vaasassa 3.11.2011

Työn valvoja

Professori Timo Vekara

Työn ohjaaja

FT Jere Kolehmainen

Työn tarkastaja

DI Bertil Brännbacka

## ALKULAUSE

Tämä diplomityö tehtiin Vaasan ABB Oy moottorit ja generaattorit -yksikön tuotekehitysosastolle. Haluaisin kiittää mielenkiintoisesta aiheesta teknologiapäällikkö Jouni Ikäheimoa ja FT Jere Kolehmaista. Jereä tahdon kiittää myös työn ohjauksesta ja kommentoinnista. Kiitos kuuluu myös tuotekehitysosaston sähkösuunnittelijoille, kaikista tähänastisista neuvoista. Vaasan yliopistolta haluan kiittää professori Timo Vekaraa opintojen ja diplomityön aikaisista neuvoista ja kommenteista sekä DI Bertil Brännbackaa työn tarkastamisesta.

Lisäksi haluan esittää lämpimät kiitokset ystävilleni ja läheisilleni, erityisesti Eveliinalle, jotka ovat olleet korvaamaton tuki koko opiskelujeni ajan.

Vaasassa 27.10.2011

Jarkko Sivunen

<b>SISÄLLYSLUETTELO</b>	<b>sivu</b>
ALKULAUSE	1
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	4
TIIVISTELMÄ	8
ABSTRACT	9
1 JOHDANTO	10
2 TAHTIRELUKTANSSIMOOTTORI	12
2.1 Yleinen toimintaperiaate	13
2.2 Aktiiviosien rakenteet	21
2.1.1 Staattorin rakenne	22
2.1.2 Roottorin rakenne	23
2.3 Tahtireluktanssimootorin suorituskyky	26
2.3.1 Vääntömomentti ja -värähtely	27
2.3.2 Tehokerroin	30
2.4 Häviöiden jaottelu ja lämpenemä	32
2.4.1 Kokonaishäviöt ja hyötysuhde	33
2.4.2 Staattorikäämityksen virtalämpöhäviöt	34
2.4.3 Rautahäviöt	35
2.4.4 Tuuletus- ja kitkahäviöt	37
2.4.5 Lisähäviöt	38
2.4.6 Lämpenemä ja lämmönsiirto	39
3 TAHTIRELUKTANSSIMOOTTORIN SUORITUSARVOJEN MITTAAMINEN JA LASKEMINEN	42
3.1 Suoritusarvojen mittaaminen protomoottorista	42
3.1.1 Mittauslaitteet ja niiden tarkkuus	43
3.1.2 Mittausproseduuri	44
3.2 Suoritusarvojen laskeminen Adept-laskentaohjelmalla	48

4	TAHTIRELUKTANSSIKONEIDEN PROTOTYYPPIEN MITATUT JA LASKETUT SUORITUSARVOT	52
4.1	Mitatut suoritusarvot	53
4.1.1	M3BL 280SMA 4	54
4.1.2	M3BL 315SMC 4	60
4.2	Lasketut suoritusarvot	64
4.2.1	M3BL 280SMA 4	66
4.2.2	M3BL 315SMC 4	68
5	LASKETTUIJEN JA MITATTUIJEN TULOSTEN VERTAILU	71
5.1	Hyötysuhteiden vertailu	71
5.2	Virtojen vertailu	72
5.3	Tehokertoimien vertailu	73
5.4	Staattorikäämityksen maksimilämpenemien vertailu	74
5.5	Häviöiden jaottelu ja vertailu	75
6	POHDINTAA LASKENTAMALLIEN TEHOSTAMISEKSI	78
6.1	Staattorin virtalämpöhäviöt	78
6.2	Mekaaniset häviöt	79
6.3	Rautahäviöt	80
6.4	Staattorikäämityksen maksimilämpenemät	83
6.5	Pohdinnan yhteenveto	85
7	YHTEENVETO	87
	LÄHDELUETTELO	90
	LIITTEET	96
	Liite 1 M3BL 280SMA 4 -moottorin laskennalliset lämpenemäkäyrät	96
	Liite 2 M3BL 280SMB 4 -moottorin hidastuvuuskoe	97
	Liite 3 M3BL 280SMA 4 -moottorin lasketut suoritusarvot	98
	Liite 4 M3BL 315SMC 4 -moottorin lasketut suoritusarvot	99

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

*Käytetyt symbolit ja suureet*

$\nabla$	Vektorioperaattori
$\Re$	Reluktanssi
$\delta$	Tehokulma
$\mathcal{O}_{mmv}$	Magnetomotorinen voima
$\Phi$	Magneettivuo
$\Phi_d$	Magneettivuon d-komponentti
$\Phi_q$	Magneettivuon q-komponentti
$\beta$	Vääntömomentin kulma
$\theta$	Virran kulma
$\theta_{Cu,avg}$	Staattorikäämityksen keskimääräinen lämpenemä
$\theta_{Cu,max}$	Staattorikäämityksen maksimi lämpenemä
$\theta_m$	Roottorin mekaaninen asentokulma
$\kappa$	Staattorivirran kulma
$\mu$	Suhteellinen permeabiliteetti
$\rho$	Sähkövaraustiheys
$\rho_r$	Materiaalin resistiivisyys
$v$	Ympäristön lämpötila
$\varphi$	Tehokertoimen kulma
$\varphi_i$	Sisäisen tehokertoimen kulma
$\omega$	Kulmanopeus
$\mathcal{G}$	Anisotrooppisuussuhde
$\mathbf{B}$	Magneettivuon tiheys
$\hat{B}$	Magneettivuon tiheyden huippuarvo
$\mathbf{D}$	Sähkövuontiheys
$\Delta E_{st}$	Kontrollitulavuuteen varastoituneen mekaanisen ja termisen energian muutos
$\mathbf{E}$	Sähkökentänvoimakkuus
$E_{gen}$	Kontrollitulavuudessa generoitu mekaaninen ja terminen energia

$E_{in}$	Kontrollitulavuuteen tuleva terminen ja mekaaninen energia
$E_{out}$	Kontrollitulavuudesta poistuva terminen ja mekaaninen energia
$e$	Staattorikäämityksen sisäinen jännite
$f$	Taajuus
$H$	Magneettikentänvoimakkuus
$I$	Käämissä kulkeva staattorivirta
$i_c$	Rautahäviövirta
$i_D$	Vaimennuskäämivirran pitkittäiskomponentti
$i_d$	Virran pitkittäiskomponentti
$i_Q$	Vaimennuskäämivirran poikittaiskomponentti
$i_q$	Virran poikittaiskomponentti
$i_s$	Staattorivirta
$J$	Virrantiheys
$k_\theta$	Lämpötilan korjauskerroin
$\Delta L_d$	Pitkittäisinduktanssin amplitudimuutos
$\Delta L_{dq}$	Keskinäisinduktanssin amplitudimuutos
$\Delta L_q$	Poikittaisinduktanssin amplitudimuutos
$L_d$	Kokonaisinduktanssi pitkittäissuunnassa
$L_{d0}$	Pitkittäisinduktanssin vakio-osuus
$L_{dm}$	Magnetoimisinduktanssin pitkittäiskomponentti
$L_q$	Kokonaisinduktanssi poikittaissuunnassa
$L_{q0}$	Poikittaisinduktanssin vakio-osuus
$L_{qm}$	Magnetoimisinduktanssin poikittaiskomponentti
$L_{s\sigma}$	Hajainduktanssi
$l_s$	Magneetti-piirin pituus
$N_w$	Staattorikäämikierrosten lukumäärä
$P_\delta$	Ilmaväliteho
$P_{add,r}$	Roottorin lisähäviö
$P_{add,s}$	Staattorin lisähäviö
$P_{Cu,s}$	Staattorin virtalämpöhäviö
$P_{Cu,s\theta}$	Staattorin lämpötilakorjattu virtalämpöhäviö
$P_{em}$	Sähkömagneettinen teho

$P_{\text{Fe,r}}$	Roottorin rautahäviö
$P_{\text{Fe,s}}$	Staattorin rautahäviö
$P_{\text{h}}$	Hystereesihäviö
$P_{\text{in}}$	Sähköteho
$P_{\text{loss}}$	Kokonaishäviö
$P_{\text{p}}$	Pyörrevirtahäviö
$P_{\text{out}}$	Akseliteho
$P_{\text{Fr}}$	Mekaaninen kitkahäviö
$R_{\text{s}}$	Staattorin vaihekäämin resistanssi
$R_{\text{TT}}$	Kahden liitäntäterminaalien väliltä mitattu resistanssi
$p$	Napaluku
$q$	Staattoriurien lukumäärä
$R_{\text{s}}$	Staattorikäämityksen resistanssi
$T_{\text{e}}$	Sähkömagneettinen vääntömomentti
$U_{\text{h}}$	Moottoriin syötetyn pääjännitteen perusaallon tehollisarvo
$U_{\text{in}}$	Moottoriin syötetyn pääjännitteen tehollisarvo
$u_{\text{s}}$	Staattorijännite
$W_{\text{e}}$	Syötetty sähköenergia
$W_{\text{f}}$	Magneettikentän energia
$W_{\text{f}}'$	Liitosenergia
$W_{\text{m}}$	Mekaaninen energia
$x$	Pistejoukko
$\bar{x}$	Otoskeskiarvo
$y$	Pistejoukko
$\bar{y}$	Otoskeskiarvo

*Käytetyt lyhenteet*

ALA	Axially Laminated Anisotropic, aksiaalinen laminointi
CIMAC	Aikaharmoninen ratkaisija
CIMTD	Aika-askel ratkaisija
DTC	Direct Torque Control, suora vääntömomenttisäätö
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
IEC	International Electrotechnical Commission, sähköalan kansainvälinen standardisoimisjärjestö
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers, kansainvälinen tekniikan alan järjestö
mmv	Magnetomotorinen voima
PWM	Pulse-Width Modulation, pulssileveysmodulointi
SYDC	Staattinen ratkaisija
SynRM	Tahtireluktanssimoottori, synkroninen reluktanssimoottori
TLA	Transversally Laminated Anisotropic, radiaalinen laminointi

---

**VAASAN YLIOPISTO****Teknillinen tiedekunta**

<b>Tekijä:</b>	Jarkko Sivunen
<b>Diplomityön nimi:</b>	Mittaustuloksiin perustuva tahtireluktanssimoottorin laskentamallin tarkentaminen
<b>Työn valvoja:</b>	Professori Timo Vekara
<b>Työn ohjaaja:</b>	FT Jere Kolehmainen
<b>Työn tarkastaja:</b>	DI Bertil Brännbacka
<b>Tutkinto:</b>	Diplomi-insinööri
<b>Yksikkö:</b>	Sähkö- ja energiatekniikan yksikkö
<b>Koulutusohjelma:</b>	Sähkö- ja energiatekniikan koulutusohjelma
<b>Suunta:</b>	Sähkötekniikka
<b>Opintojen aloitusvuosi:</b>	2007
<b>Diplomityön valmistumisvuosi:</b>	2011

**Sivumäärä: 99**

---

**TIIVISTELMÄ**

ABB Oy:n moottorit ja generaattorit -yksikkö on tuomassa markkinoille tahtireluktanssimoottorisarjaa. Tahtireluktanssimoottoreille ei ole olemassa vielä mittausdata-massaa, jonka avulla suunnittelijat voisivat hienosäätää moottorirakenteet kohdalleen. Tämän vuoksi laskentamallien on oltava tarkkoja, jotta lasketut toimintapisteiden suoritusarvot vastaavat mahdollisimman tarkasti moottorien todellisia suoritusarvoja.

Tämän diplomityön tarkoituksena oli tarkentaa laskentamalleja mitattujen tuloksien avulla, jotka on mitattu ABB Oy:n toimesta ennen tätä työtä. Tarkentamisessa käytetään tahtireluktanssimoottoreiden prototyyppien aivan ensimmäisiä mittaustuloksia ja lasketaan elementtimenetelmään perustuvalla työkalulla vastaavien toimintapisteiden suoritusarvot. Laskettuja suoritusarvoja vertaillaan mitattuihin, jotta laskentamalleilla laskettujen suoritusarvojen ja todellisten suoritusarvojen erot voidaan havaita. Vertailtavat suureet määräytyivät pääsääntöisesti mittaustuloksista, mutta ne ovat samalla moottorin loppukäyttäjää kiinnostavat suureet, kuten hyötysuhde, virta ja staattorikäämityksen lämpenemä.

Työn teoriaosuudessa käsitellään tahtireluktanssimoottorin yleisen toimintaperiaatteen ja aktiiviosien rakenteiden lisäksi moottorin suorituskykyyn, häviöiden ja lämpenemän määrittämiseen liittyvät oleelliset seikat. Työn tutkimusosuudessa vertaillaan mitattujen ja laskettujen toimintapisteiden suoritusarvoja sekä häviöiden jakautumista. Vertailun avulla havaittiin suurimmat eroavaisuudet olevan häviöissä sekä lämpenemissä.

Työn tuloksena saatiin tarkennuksia laskentamallien virtalämpöhäviöiden määrittämiseen ja muiden häviöiden osalta jatkotutkimusehdotuksia. Laskettuihin lämpenemiin saatiin myös tarkennuksia niiden ollessa trendiltään mitattujen kaltaisia. Otoskorrelaation avulla voitiin todistaa laskettujen ja korjauskertoimella muokattujen lämpenemien antavan tarkan approksimaation moottorien todellisista lämpenemistä.

---

**AVAINSANAT:** Tahtireluktanssimoottori, mittausta, FEM -laskenta

---

**UNIVERSITY OF VAASA****Faculty of technology**

<b>Author:</b>	Jarkko Sivunen
<b>Topic of the Thesis:</b>	Improving Calculation Model of Synchronous Reluctance Motor Based on Measured Results
<b>Supervisor:</b>	Professor Timo Vekara
<b>Instructor:</b>	Ph.D. Jere Kolehmainen
<b>Inspector:</b>	M.Sc. Bertil Brännbacka
<b>Degree:</b>	Master of Science in Technology
<b>Department:</b>	Department of Electrical Engineering and Energy Technology
<b>Degree Programme:</b>	Degree Programme in Electrical and Energy Engineering
<b>Major of Subject:</b>	Electrical Engineering
<b>Year of Entering the University:</b>	2007
<b>Year of Completing the Thesis:</b>	2011

**Pages: 99**

---

**ABSTRACT**

ABB Oy, motors and generators BU is launching a synchronous reluctance motor series to markets. For the synchronous reluctance motor there is not yet such a mass of measured data existing which could help designers to fine-tune motor structures. Therefore calculation models must be accurate in order to calculated performances of the operating points being correct.

The purpose of this master's thesis was to improve the calculation models by using the test results measured by ABB Oy before this thesis. For improving process, the first test results of prototype motors and performance data of the corresponding operating points calculated with FEM-tool are used. Calculated performance data is compared to measured performance data in order that differences between calculated and actual performance data can be noticed. Compared quantities are mainly determined through test results data but at the same time the end-users of the motors are interested in same quantities such as efficiency, power and temperature rise of stator.

The theory part of this work consist general operating principle, active components and structures of the synchronous reluctance motor. Also the main points of performance, losses and temperature rise were treated. In the research part the measured and the calculated operating points are compared as well as the distribution of losses. The outcome of the comparisons is that major differences between measured and calculated results can be found in the losses and temperature rise.

The outcomes of this work were improvements of calculation models; copper losses can be determined more precisely and also further research suggestions for other losses types came up. Calculated temperature rise can be used to determine the actual temperature rise if the correction factors are used. The correction factors can be used because of same trend between measured and calculated temperature rise data. This can be proved with the sample correlation coefficient. Modified temperature rise gives an accurate approximation of real temperature rise.

---

**KEYWORDS:** Synchronous reluctance motor, measurement, FEM-calculation

## 1 JOHDANTO

ABB Oy:n moottorit ja generaattorit -yksiköllä on toimipisteet Helsingissä ja Vaasassa. Tämä työ on tehty Vaasan yksikölle, joka valmistaa ja myy pienjännitteisiä vaihtovirtamoottoreita ja -generaattoreita. Standardikoneiden lisäksi Vaasassa valmistetaan erikoismoottoreita ja -generaattoreita. Yksi uusi valmistettava moottorisarja tulee olemaan tämän työn aiheena oleva tahtireluktanssimoottori.

Suurin osa tuotetusta sähköstä käytetään sähkömoottoreiden, nimenomaan epätahtimoottoreiden pyörittämiseen (IET Fact files 2008). Sähkömoottoreiden merkittävän energian kulutuksen vuoksi niiden hyötysuhteet on otettu päivitettyissä kansallisissa ja kansainvälisissä standardeissa tarkemmin huomioon. Hyötysuhde on tärkeä kriteeri myytäessä sähkömoottoreita, koska moottorin elinkaaren aikana sen kuluttama kokonaissähköenergia on suurin kustannustekijä (ABB 2010: 13). Mielenkiinto tahtireluktanssimoottoreita kohtaan johtuukin pääosin niiden paremmasta suorituskyvystä kuten hyötysuhteesta. Myös laaja tehoalue eri pyörimisnopeuksilla sekä tahtikäyttö lisäävät tahtireluktanssimoottoreiden tutkimusarvoa.

ABB Oy:n moottorit ja generaattorit -yksikkö on tuomassa markkinoille tahtireluktanssimoottorisarjaa, jonka etuna ovat induktiomootoria pienemmät häviöt ja suurempi tehotehous valmistuskustannusten kuitenkin kasvamatta. Tuotteen myyntivaiheen onnistunut sovellussuunnittelu edellyttää tarkkoja mitoitustyökaluja, jotta kalliilta ylimitoitukselta voidaan välttyä. Induktio-moottoreille on olemassa merkittävä määrä todellisia mittaustuloksia, joiden avulla suunnittelija voi hienosäätää moottorirakenteen kohdalleen. Tahtireluktanssimoottoreille ei tällaista datamassaa ole, vaan laskentamallin on oltava tarpeeksi tarkka suoritusarvojen määrittämiseen. Tarkan laskentamallin avulla suunnittelija saa laskettua halutun toimintapisteen suoritusarvot oikein.

Työn tarkoituksena on tarkentaa laskentamalleja mitattujen tuloksien avulla. Tarkentamisessa käytetään protoreluktanssimoottoreiden aivan ensimmäisiä mittaustuloksia ja lasketaan elementtimenetelmään pohjautuvalla työkalulla vastaavien

toimintapisteiden suoritusarvot. Protomoottoreiden mittaukset on suoritettu ennen tämän työn aloittamista ABB Oy:n toimesta ja ne muodostuvat kuormituskokeista erilaisilla tehoilla sekä muutamista lämpenemäkokeista. Ensimmäisten mittauksien pääasiallinen tavoite on ollut tukea uuden tuotesarjan tutkimuksia. Tässä diplomityössä lasketaan Adept- ja FCSMEK-laskentaohjelmilla mittauspisteitä vastaavat suoritusarvot. Laskettuja suoritusarvoja vertaillaan mitattuihin, jotta laskentamalleilla laskettujen suoritusarvojen ja todellisten suoritusarvojen erot voidaan havaita. Vertailtavina suorituskyky suureina ovat pääasiassa mittauksien mahdollistamat suureet ja samalla loppukäyttäjiä kiinnostavat suureet, kuten hyötysuhde, virta ja lämpenemä.

Laskettujen suoritusarvojen halutaan siis vastaavan mahdollisimman tarkasti mitattuja suoritusarvoja, koska mitattuja suoritusarvoja voidaan pitää todellisina. Ideaalisessa tilanteessa lasketut suoritusarvot olisivat aina moottorin todelliset suoritusarvot, jolloin moottoreita ei tarvitsisi koskaan mitata.

Tämä diplomityö koostuu kuudesta luvusta. Aluksi luvussa kaksi käsitellään tahtireluktanssimoottorin toimintaperiaatetta, aktiiviosien rakennetta sekä moottorin suorituskykyä. Luvun loppuosassa tarkastellaan tahtireluktanssimoottorin häviöitä ja niiden jakautumista sekä häviöistä johtuvaa lämpenemää. Kolmannessa luvussa käydään läpi tahtireluktanssimoottorin suoritusarvojen määrittämisessä käytetyt menetelmät. Ensin luvussa läpikäydään suoritusarvojen mittaamiseen liittyvät asiat. Mittaamisesta käsitellään mittauslaitteet tarkkuuksineen sekä mittausproseduuri, sitten esitellään suoritusarvojen laskentaan käytettävä Adept-laskentaohjelma. Neljännessä luvussa esitetään mitatut ja lasketut suoritusarvot. Viidennessä luvussa vertaillaan mitattuja ja laskettuja suoritusarvoja ja luodaan mittaus- ja laskentapisteistä häviöiden jaottelu. Luvussa kuusi pohditaan laskentamallin tehostamista erityisesti häviöjaottelun avulla. Seitsemäs luku on diplomityön yhteenveto.

## 2 TAHTIRELUKTANSSIMOOTTORI

J. K. Kostko esitti ensimmäisenä pyörivään magneettikenttään perustuvan tahtireluktanssimoottorin vuonna 1923, kun sopiva roottorin geometria löydettiin (Kostko 1923: 1162–1168; Haataja 2003: 19; Moghaddam 2007: 11–12). 1960-luvulla tahtireluktanssimoottoreiden käyttö yleistyi teollisuudessa, mutta suosio hiipui 1980-luvulla induktiomootoreiden ja kehittyneiden taajuusmuuttajien tarkan nopeuden säädön myötä. Lisäksi kestopagneettien ja niiden myötä kestopagneettimoottoreiden kehittyminen pienensi tahtireluktanssimoottorin osuutta teollisissa sovelluskohteissa. Tahtireluktanssimoottori ei ole saavuttanut vielä suurta jalansijaa teollisuudessa, mutta suosion trendi on nouseva. Suosion taustalla on vastaavan tehoista induktiomootoria parempi hyötysuhde ja kokonaisuudessaan viileämpi toimintalämpötila. Viileämmän toimintalämpötilan ansiosta tahtireluktanssimoottorin staattorikäymistysten eristykset ja laakerit ovat pitkäikäisempiä. Viileästä moottorista voidaan vaihtoehtoisesti ottaa enemmän tehoa, mikä mahdollistaa pienemmän runkokoon käytön suuremmalla teholla. (Lendenmann, Moghaddam, Tammi & Thand 2011: 58.) Vertailtaessa induktiomootoria ja tahtireluktanssimoottoria samalla runkokoolla voidaan tahtireluktanssiroottorilla saavuttaa jopa 10–15 % suurempi nimellisvääntömomentti (Boglietti & Pastorelli 2008: 2041).

Paremmen hyötysuhteen ja viileyden lisäksi tahtireluktanssimoottorilla (SynRM) on muutamia muita etuja induktiomootoriin nähden. SynRM:n roottorin rakenne on yksinkertainen, jolloin häkkikäymistä tai kestopagneetteja ei tarvita. Yksinkertaisen rakenteen ansiosta roottorin valmistaminen on helppoa ja edullista ja lisäksi roottorin inertia on induktiomootorin roottoria pienempi. SynRM:n roottorissa ei myöskään esiinny virtalämpöhäviöitä. (Haataja 2003: 22; Lendenmann 2011: 58.)

Taulukossa 1 vertaillaan induktiomootorin ja tahtireluktanssimoottorin suoritusarvoja. Molemmissa moottoreissa käytetään samaa staattoria. Tahtireluktanssimoottorille on tehty kaksi mittausta, joista ensimmäisessä mittauksessa moottorin teho on asetettu vastaamaan induktiomootorin tehoa ja toisessa mittauksessa kääminpään keskimääräinen lämpenemä  $\theta_{Cu,avg}$  on sama kuin induktiomootorissa. Mittaustuloksista

ilmenee, että tahtireluktanssimoottorista saadaan induktiomootoria vastaava teho paremmalla hyötysuhteella. Tällöin moottori on toimintalämpötilaltaan viileä. Vastaavasti tahtireluktanssimoottorista voidaan ottaa induktiomootoria enemmän tehoa, aina määritettyyn lämpenemärajaan asti. (Boglietti, Cavagnino, Pastorelli & Vagati 2005: 477.)

**Taulukko 1.** Erään induktiomootorin ja tahtireluktanssimoottorin suoritusarvovertailu samalla staattorilla (Boglietti 2005: 477).

	<b>Induktio</b> moottori	<b>Tahtireluktanssimoottori</b> (Cool Motor)	<b>Tahtireluktanssimoottori</b> (High Output)
$T$ [Nm]	15,2	15,1	16,6
$P_{\text{out}}$ [W]	1894	1897	2086
$n$ [rpm]	1190	1200	1200
$\theta_{\text{Cu,avg}}$ [K]	102	85	103
$U_{\text{rms}}$ [V]	350	336	346
$I_{\text{rms}}$ [A]	5,32	5,45	5,92
$\cos \varphi$	0,830	0,754	0,757
$\eta$ [%]	70,9	79,4	77,5

Taulukosta 1 voidaan havaita myös tahtireluktanssimoottorin heikompi tehokerroin induktiomootoriin verrattuna. Heikko tehokerroin johtuu pääosin pitkittäisakselin demagnetisoitumisesta suuren poikittaisakselin virran vuoksi. (Moghaddam 2007: 8–15).

## 2.1 Yleinen toimintaperiaate

Tahtireluktanssimoottori muistuttaa ominaisuuksiltaan perinteistä tahtimoottoria, mutta rakenteeltaan se on roottoria lukuun ottamatta induktiomootorin kaltainen. Tahti-

reluktanssimoottorin vääntömomentin tuotto perustuu roottorin reluktanssieroihin. Tämä toimintaperiaate on tunnettu jo yli 160 vuotta (Haataja 2003: 19).

Jokainen sähkömagneettinen ilmiö voidaan määritellä Maxwellin yhtälöiden ja materiaaliyhtälöiden avulla. Sähkökoneiden sähkömagneettiset ilmiöt voidaan kuvata Maxwellin neljän yhtälön yhtälöryhmällä. Maxwellin yhtälöt differentiaalimuodossa ovat

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (4)$$

missä  $\mathbf{E}$  on sähkökentänvoimakkuus,  $\mathbf{B}$  magneettivuontiheys  $\mathbf{H}$  magneettikentänvoimakkuus,  $\mathbf{J}$  virrantiheys,  $\mathbf{D}$  sähkövuontiheys ja  $\rho$  sähkövarausitiheys.  $\nabla$  (nabla) on vektorioperaattori, joka voidaan esittää karteesisessä koordinaatistossa

$$\nabla = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z}. \quad (5)$$

Maxwellin yhtälöistä yhtälö 1 tunnetaan Faradayn induktiolakina, mikä kuvaa kiertävän sähkökentän syntyä magneettivuontiheyden muuttuessa. Yhtälö 2 tunnetaan Ampèren lakina. Se kuvaa, miten muuttuva sähkövuo ja sähkövirta aiheuttavat niitä kiertävän magneettikentänvoimakkuuden. Yhtälöt 3 ja 4 tunnetaan Gaussin lakeina sähkö- ja magneettikentille. (Pyrhönen 1998: 2–3.)

Sähkökoneissa Faradayn ja Ampèren lait ovat erityisen tärkeitä. Erityisesti Ampèren virtalaki auttaa käämityksiin indusoituneiden jännitteiden laskemisessa sekä määrittäessä pyörrevirtoja ja virranähtöilmiötä. Ampèren lain integraalimuotoesitys kuuluu

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} + \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = i(t) + \frac{d\psi}{dt}, \quad (6)$$

missä termi

$$\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \frac{d\psi}{dt} \quad (7)$$

on Maxwellin siirrosvirta. Sähkökoneita tarkasteltaessa Ampèren laki voidaan esittää kvasistaattisessa muodossaan, jolloin siirrosvirta voidaan jättää pois, koska tällöin ilmiön taajuus  $f$  on Maxwellin siirrosvirran kannalta matala. Kvasistaattisessa muodossa Ampèren laki

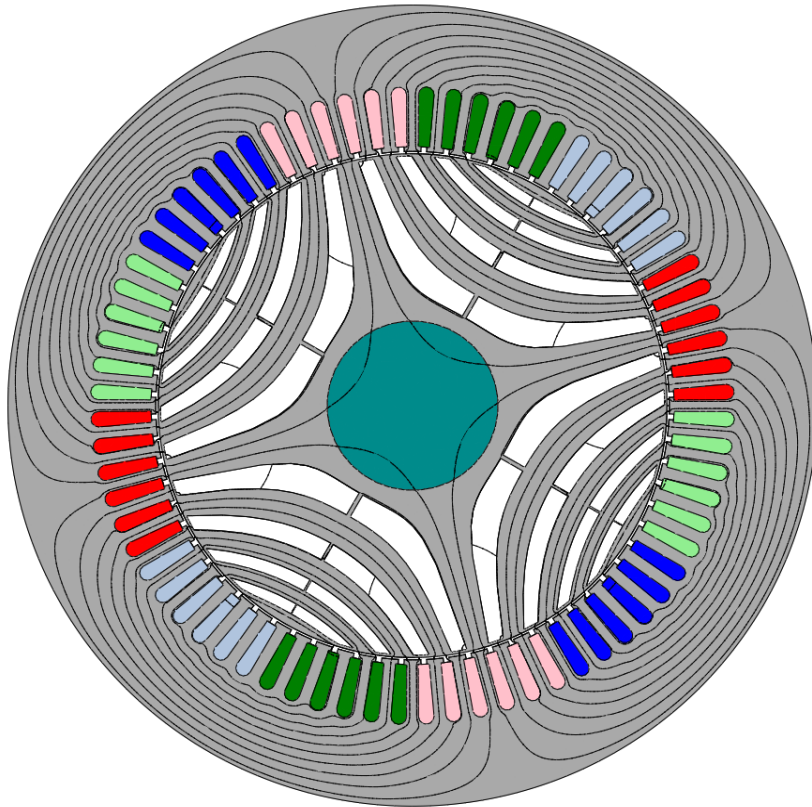
$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = \Theta_{\text{mmv}} = N_w I, \quad (8)$$

missä  $\Theta_{\text{mmv}}$  on magnetomotorinen voima,  $N_w$  staattorikämmikierrosten lukumäärä ja  $I$  käämissä kulkeva staattorivirta. (Pyrhönen 1998: 3–4; Molenaar 2000: 15.) Kuten yhtälöstä 8 käy ilmi, niin staattorikämeihin syötetty virta luo Ampèren lain mukaisesti johtimen ympärille magneettikentän, joka luo staattorin, roottorin ja näiden väliin jäävän ilmapälin muodostamaan magneettiipiiriin magnetomotorisen voiman  $\Theta_{\text{mmv}}$ . Magneettikentän suuruus on riippuvainen magneettikentän voimakkuudesta  $\mathbf{H}$  ja magneettiipiirin pituudesta  $l$ .

Tahtireluktanssimoottorin magneettiipiirissä tapahtuva reluktanssin vaihtelu aiheuttaa roottorin akselille vääntömomentin. Magneettiipiirissä muodostuva magnetomotorinen voima voidaan kirjoittaa muodossa

$$\Theta_{\text{mmv}} = N_w I = Hl = BA \left( \frac{l_s}{\mu A} \right) = BA\mathfrak{R} = \Phi\mathfrak{R}, \quad (9)$$

missä  $A$  on materiaalin poikkipinta-ala,  $l_s$  magneettipiirin pituus,  $\mu$  suhteellinen permeabiliteetti,  $\mathfrak{R}$  reluktanssi ja  $\Phi$  magneettivuo (Molenaar 2000 15). Kuvassa 1 on esitetty tahtireluktanssimoottorin magneettiapiirissä kulkevan magneettivuon periaatteellinen reitti. Magneettivuon reitti kulkee magneettiapiirissä staattorin navasta ilmavälin kautta roottorin rautaan, josta se jatkaa kulkuaan takaisin staattorin napaan ja selkään sulkien magneettiapiirin. Osa magneettivuoreiteistä ei läpäise roottoria ja tämä aiheuttaa hajavuon, mikä kuluttaa magneettiapiirin energiaa. (Krishnan 2001: 30 – 31.)

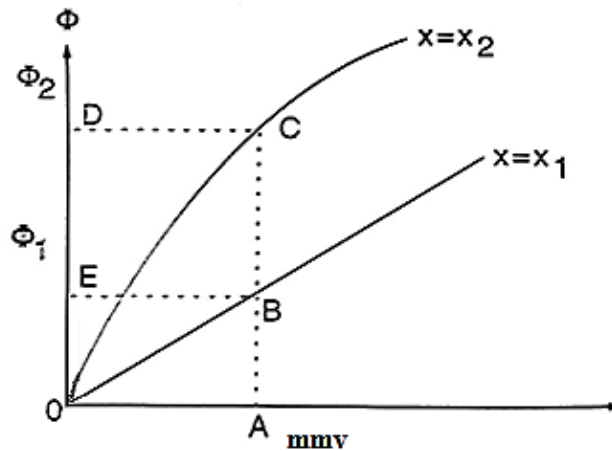


**Kuva 1.** Tahtireluktanssimoottorin magneettiapiirissä kulkevan magneettivuon periaatteellinen reitti.

Magneettiin syötetty sähköenergia  $W_e$  voidaan kirjoittaa muodossa

$$W_e = W_f + W_m \Rightarrow \partial W_e = \partial W_f + \partial W_m, \quad (10)$$

missä  $W_f$  on magneettikentän energia ja  $W_m$  mekaaninen energia. Kuvassa 2 on esitetty sähköenergian muutos magneettiin ilmavälin suhteen  $mmv$ -magneettivuo -koordinaatistossa. Koordinaatistossa on kaksi eri kuvaajaa, joista  $x_1$  on lineaarinen suuremman ilmavälin ja tätä myötä suuremman reluktanssin myötä. Linearisessa tilanteessa permeabiliteetti on vakio ja tällöin magneettikenttään varastoitunut energia ja liitosenergia ovat samansuuruiset. Epälinearisessa tilanteessa permeabiliteetti ei ole vakio ja liitosenergian osuus suurenee pienentäen magneettikenttään varastoituneen energian osuutta. (Krishnan 2001: 3–4; Lee 2009: 66–67.) Kuvassa 2 pinta-alat  $OBE0$  ja  $OCD0$  vastaavat magneettikentän energian määrää ja pinta-alat  $OBA0$  ja  $OCA0$  vastaavat liitosenergian määrää eri ilmaväleillä. Erilaiset ilmavälit saadaan aikaan aktiiviosien mittoja muuttamalla (Moghaddam 2007: 3).



**Kuva 2.** Magneettiin varastoituneen energian ja liitosenergian käyttäytyminen ilmavälin suhteen  $mmv$ -magneettivuo -koordinaatistossa, kun ilmaväli  $x_1 > x_2$  (Krishnan 2001: 4).

Kun pisteessä A on vakion suuruinen magnetointi, yhtälön 10 energiat ovat

$$\partial W_e = \int_{\phi_1}^{\phi_2} \Theta_{mmv} d\Phi = \Theta_{mmv} (\Phi_2 - \Phi_1) = \text{pinta-ala (BCDEB)} \quad (11)$$

$$\partial W_f = \partial W_{f|x=x_2} - \partial W_{f|x=x_1} = \text{pinta-ala (0CD0)} - \text{pinta-ala (0BE0)}. \quad (12)$$

Yhtälöiden 11 ja 12 avulla voidaan ratkaista yhtälöstä 10 osittaisderivaattana mekaaninen energia, joka sähkökoneissa vastaa sähkömagneettisen väännön  $T_e$  ja roottorin mekaanisen asentokulman  $\theta_m$  osittaisderivaatan tuloa. Tällöin yhtälö voidaan kirjoittaa muotoon

$$\partial W_m = T_e \partial \theta_m = \partial W_e - \partial W_f = \text{pinta-ala (0BC0)}. \quad (13)$$

Magnetoinnin ollessa vakio mekaaninen energia ja liitosenergia ovat samansuuruisia

$$\partial W_m = \partial W_f', \quad (14)$$

jolloin vääntömomentti voidaan määrittää liitosenergian osittaisderivaattana roottorin mekaanisen asentokulman suhteen, kun staattorivirta on vakio (Krishnan 2001: 3–5.)

$$T_e = \left. \frac{\partial W_f'(i, \theta)}{\partial \theta_m} \right|_{i=\text{vakio}}. \quad (15)$$

Sinimuotoisella virralla staattorin muodostama magneettivuo kiertää ilmvälissä luoden jatkuvan vääntömomentin. Energiaperiaatteen mukaisesti anisotrooppinen roottori pyrkii synkronisesti kääntymään magneettivuon suuntaiseksi, jolloin systeemiin varastoituu mahdollisimman vähän energiaa ja roottorin akselilta saadaan mekaanista energiaa (Kokkonen 2007: 21).

Tahtireluktanssimoottorin toimintaa voidaan tarkastella myös vektoriavaruudessa. Kaikkien sähkökoneiden staattorijännitteen yhtälö voidaan esittää vektorimuodossa

$$\mathbf{u}_s = R_s \mathbf{i}_s + \frac{d\Phi}{dt}, \quad (16)$$

missä  $\mathbf{u}_s$  on staattorijännite,  $R_s$  staattorikäämityksen resistanssi,  $\mathbf{i}_s$  staattorivirta ja  $\Phi$  magneettivuo. Tahtireluktanssimoottorin staattorijännite voidaan esittää kaksiakselimallin mukaisesti dq-koordinaatistossa. Tällöin staattorijännitteen  $\mathbf{u}_s$  jännitekomponentit  $u_d$  ja  $u_q$  ovat

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\Phi_d}{dt} - \omega \Phi_q \quad \text{ja} \quad (17)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\Phi_q}{dt} + \omega \Phi_d, \quad (18)$$

missä termi  $\omega \Phi$  on roottorin pyörimisestä aiheutuva jännitekomponentti ja pitkittäis- ja poikittaissuuntaiset vuot ovat

$$\Phi_d = L_{s\sigma} i_d + L_{dm} (i_d + i_D) \quad \text{ja} \quad (19)$$

$$\Phi_q = L_{s\sigma} i_q + L_{qm} (i_q + i_Q), \quad (20)$$

missä  $L_{s\sigma}$  on hajainduktanssi,  $L_{dm}$  magnetoimisinduktanssin pitkittäiskomponentti,  $L_{qm}$  magnetoimisinduktanssin poikittaiskomponentti,  $i_q$  staattorivirran q-komponentti,  $i_d$  staattorivirran d-komponentti,  $i_D$  vaimennuskäämivirran pitkittäiskomponentti ja  $i_Q$  vaimennuskäämivirran poikittaiskomponentti. (Luukko 1996: 15–17; Haataja 2003: 24–27.)

Kokonaisinduktanssit  $L_d$  ja  $L_q$  muodostuvat magnetoimisinduktanssien ja ilmavälissä sulkeutuvan hajainduktanssin summasta (Luukko 1996: 18)

$$L_d = L_{dm} + L_{s\sigma} \quad \text{ja} \quad (21)$$

$$L_q = L_{qm} + L_{\sigma}. \quad (22)$$

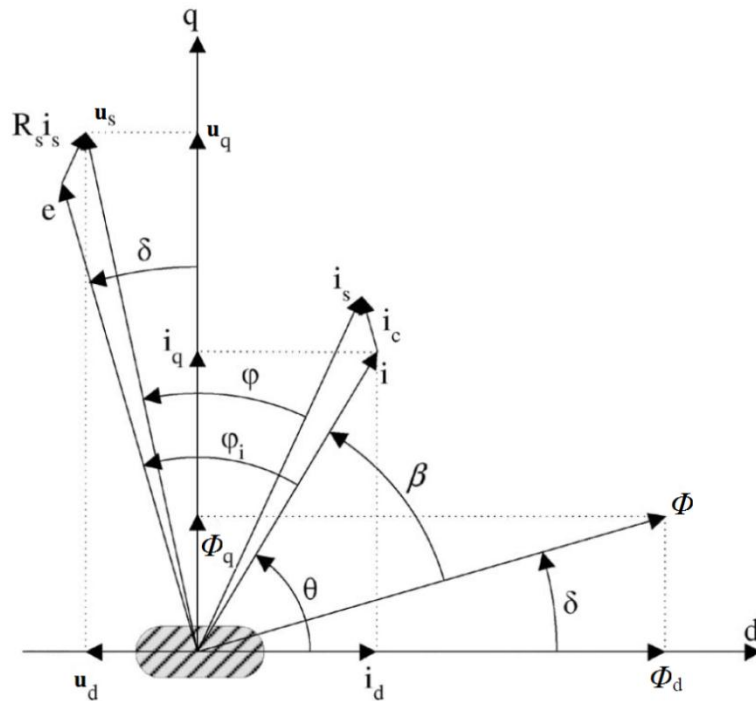
Kokonaisinduktanssien suhteesta eli anisotrooppisuussuhteesta  $\mathcal{g}$

$$\mathcal{g} = \frac{L_d}{L_q}, \quad (23)$$

voidaan pitkälti päätellä tahtireluktanssimoottorin tehokerroin ja sen myötä moottorin kokonaissuorituskyky. Suuremman anisotrooppisuussuhteen myötä moottorin suorituskyky on parempi (Staton, Miller & Wood 1993: 251.)

Anisotrooppisuussuhde voi sylinterin muotoisella roottorilla olla korkeintaan synkroni-induktanssin suuruinen. Ideaalisessa tilanteessa suhdeluku voi saavuttaa arvon 60. Vastaavasti suhdeluvun alarajana voidaan pitää staattorin hajainduktanssin arvoa. (Staton 1993: 252; Boldea, Fu & Nasar 1994: 977; Fukami, Momiyama, Shima, Hanaoka & Takata 2008: 494–495.)

Kuvassa 3 on esitetty tahtireluktanssimoottorin kaksiakselimallin mukainen jatkuvan tilan vektoridiagrammi, josta ilmenee edellä esitettyjen suureiden välinen yhteys. Kuvassa 3  $\mathbf{u}_s$  on staattorijännite,  $\mathbf{i}_s$  staattorivirta,  $\mathbf{i}_q$  staattorivirran q-komponentti,  $\mathbf{i}_d$  staattorivirran d-komponentti,  $\mathbf{i}_c$  rautahäviövirta,  $R_s$  staattorikäämityksen resistanssi,  $e$  staattorikäämityksen sisäinen jännite,  $\Phi$  magneettivuo,  $\Phi_q$  magneettivuon q-komponentti,  $\Phi_d$  magneettivuon d-komponentti,  $\varphi$  tehokertoimen kulma,  $\varphi_i$  sisäisen tehokertoimen kulma,  $\beta$  vääntömomentin kulma,  $\theta$  virran kulma ja  $\delta$  tehokulma.



**Kuva 3.** Tahtireluktanssimoottorin jatkuvan tilan vektoridiagrammi (Moghaddam, Magnussen & Sadarangani 2010: 6–7).

## 2.2 Aktiiviosien rakenteet

Tahtireluktanssimoottori on rakenteeltaan induktiomoottorin kaltainen. SynRM:ssä voidaan käyttää samoja osia kuin induktiomoottorissa, kuten samaa staattorin runkoa, liitäntäkoteloa, tuuletinta, laakereita, roottorin akselia ja sähkölevyä (Lovatt, McClelland & Stephenson 1997: 361; Lendenmann 2011: 59). Eroavaisuudet näiden kahden moottorin välillä ilmenevätkin aktiiviosissa; staattorissa ja roottorissa. Staattorissa ei vaadita kuitenkaan suuria muutoksia, sillä staattorin rakenne ja ilmaväli voivat olla samoja molemmissa moottoreissa (Lovatt 1997: 362; Boglietti 2008: 2041). Merkittävin ero tahtireluktanssimoottorin ja induktiomoottorin välillä onkin roottorin rakenteessa. Napalukumääräksi valitaan tyypillisesti neljä, sillä kyseisellä napalukumäärällä tahtireluktanssimoottorin sähköiset ominaisuudet ovat parhaimmillaan (Moghaddam 2011: 166–167).

### 2.1.1 Staattorin rakenne

Tahtireluktanssimoottorin staattorin rakenteen suunnittelun lähtökohtana voidaan käyttää induktiomoottorin staattoria. Tahtireluktanssimoottorin tapauksessa staattorin rakenne kannattaa kuitenkin tapauskohtaisesti analysoida parasta suorituskykyä haettaessa. Myös staattorikäymitysten suojauksen täytyy olla kunnossa, koska moottoria ohjataan taajuusmuuttajan avulla.

Staattorin uramäärän, uramuodon sekä ilmavälin muutoksilla voidaan vaikuttaa tahtireluktanssimoottorin suorituskykyyn. Staattorin uramäärä sekä -muoto vaikuttavat roottorin häviöihin. Suuremmalla uramäärällä voidaan pienentää roottorissa tapahtuvia häviöitä, koska staattorikäymityksen tasaisemmalla jakautumisella staattoriuriin saavutetaan sinimuotoisempi vuo. Myös suljetut staattoriurat vähentävät roottorin häviöitä. Staattorioptimointina voidaan pitää myös ilmavälin muuttamista, sillä ilmaväliä pienennettäessä anisotrooppisuussuhde kasvaa, mutta toisaalta roottorihäviöt kasvavat myös. Vastaavasti suurentamalla ilmaväliä anisotrooppisuussuhde ja roottorihäviöt pienenevät. (Hofmann & Sanders 2000: 534–535.) Ilmavälin muuttaminen vaikuttaa siis magneettiipiiriin ja täten moottorin suorituskykyyn (Krishnan 2001: 3). Erityisesti pitkittäissuuntainen kokonaisinduktanssi  $L_d$  on herkkä ilmavälimuutoksille (Moghaddam 2011: 94).

Kaikki moottorit eivät sovellu suoraan taajuusmuuttajan ohjaamiksi, vaan taajuusmuuttajakäyttöä suunniteltaessa on varmistettava, että moottori on yhteensopiva taajuusmuuttajakäyttöön. Taajuusmuuttajakäyttöisissä moottoriratkaisuissa onkin staattorin kämminnän eristyksessä huomioitava oleellinen asia. Eristykset voivat vanhentua tai jopa tuhoutua taajuusmuuttajien syöttämien korkeiden ja jyrkkäreunaisten jänniteimpulssien vuoksi. Käämien ensimmäiset käämikierrokset joutuvat kovimmalle rasitukselle, koska koko taajuusmuuttajan välipiirin jännite vaikuttaa niiden yli hetkellisesti. Jännitepulssi jakautuu ensimmäisen käämikierroksen jälkeen useammalle käämikierrokselle, joten muut kierrokset eivät ole yhtä alttiita jännitepulssin piikille. Tämän vuoksi moottorin käämien eristys tulee olla vahvennettu. Moottorin yhteyteen

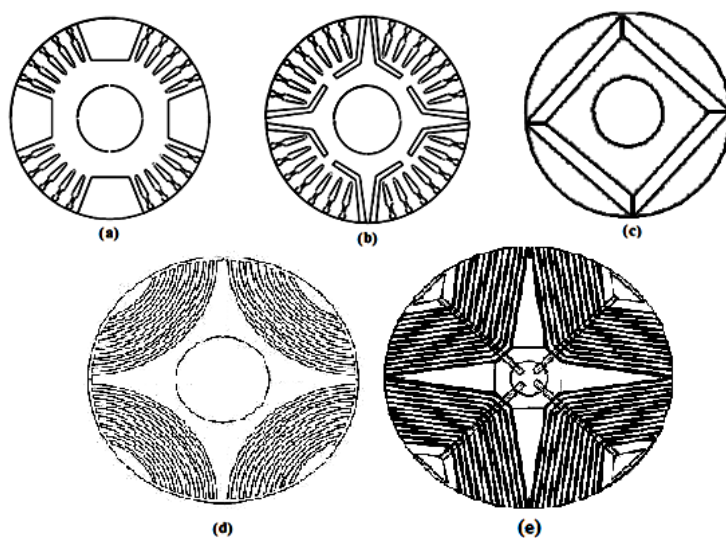
voidaan myös asentaa  $dU/dt$  -suodattimia, jotka pidentävät jännitteen nousuaikaa. (Kokkonen 2007: 46.)

Toinen huomioitava asia taajuusmuuttajakäytöissä on taajuusmuuttajan luomat laakerivirrat. Laakerivirrat kulkeutuvat nimensä mukaisesti moottoreiden laakereiden läpi kuluttaen niiden pintoja. Laakerivirrat syntyvät jännitteen epäsymmetrian vuoksi ja ne kasvavat syöttöjännitteen kasvaessa. (Kokkonen 2007: 46.) Erityisen haastavia ovat suurtaajuiset kiertävät laakerivirrat. Nämä suurtaajuiset kiertävät laakerivirrat syntyvät nopean syöttöjännitteen nousun ja staattorin ja roottorin hajakapasitanssin seurauksena. Virrasta aiheutuva vuo kiertää staattoria induoiden suurtaajuisen jännitteen moottorin akselille. (Särkimäki 2009: 20.) Laakerivirtoja voidaan pienentää hyvällä kaapeloinnilla ja moottorin maadoittamisella. Tyypillistä on kuitenkin, että taajuusmuuttajakäyttöinen moottori varustetaan eristävillä laakereilla ja laakerirasvoilla. (Kokkonen 2003: 46.) Käyttäessä ABB:n taajuusmuuttajaa ja moottoria eristävä laakeri laitetaan moottorin N-päähän (ABB 2009: 12).

### 2.1.2 Roottorin rakenne

Tahtireluktanssimoottorissa roottorin rakenne on erilainen induktiomoottorin roottoriin nähden. Molemmissa moottoreissa roottorin ominaisuuksilla on suuri vaikutus moottorin suorituskykyyn. Tahtireluktanssimoottorin roottorin topologia vaikuttaakin pitkittäis- ja poikittaisinduktansseihin, jotka puolestaan määrittävät vääntömomentin, tehokertoimen ja hyötysuhteen käyttäytymisen eri toimintapisteissä (Boldea 1994: 977; Haataja 2003: 38).

Ensimmäiset tahtireluktanssimoottorit soveltuivat käytettäväksi suoraan syöttöverkkoon roottorirakenteiden vuoksi. Rakenteita suunniteltaessa tuli huomioida häkkikäälämyksen tarve, mutta toisaalta pitää mielessä suuri anisotrooppisuussuhde. (Haataja 2003: 20.) Näiden moottoreiden suorituskyky oli heikko, koska anisotrooppisuussuhde nousi harvoin yli kolmen. Huonon suorituskykynsä vuoksi niistä ei ollut induktiomoottorin haastajaksi. (Haataja 2003: 20; Moghaddam 2007: 11.)



**Kuva 4.** Roottorirakenteiden kehitys. Induktiomoottorin roottorin muunnelmät (a) ja (b), roottori yhdellä vuoesteellä (c), roottori useammalla vuoesteellä ja radiaalinen laminointi (TLA) (d) sekä roottori useammalla vuoesteellä ja aksiaalinen laminointi (ALA) (e) (Staton 1993: 250; Haataja 2003: 21).

Kuvassa 4 on esitetty erilaisia tahtireluktanssimoottorin roottorirakenteita. Roottorirakenteet (a), (b) ja (c) pohjautuvat vahvasti induktiomoottorin roottorirakenteeseen ja ne ovat kykeneviä toimimaan suoraan syöttöverkosta (Haataja 2003: 20–21). Rakenne (a) on avonapainen ja se on valmistettu poistamalla osa roottorin materiaalista. Rakenne (b) puolestaan on umpinainen ja anisotrooppisuussuhdetta on pyritty kasvattamaan vuoesteiden avulla. Myös roottorissa (c) on (b) roottorin tapaan vuoeste, mutta rakenteessa on keskitytty enemmän parempaan anisotrooppisuussuhteeseen.

Roottorirakenteessa (d) on J. K. Kostkon esittelemän geometrian pohjalta jatkokehitetty radiaalisesti laminoitu roottori. Kyseinen rakenne on ollut suosittu sen helpon valmistamisen vuoksi. Ratkaisussa roottorin rakenteeseen lisätään huomattavasti vuoesteitä, jolloin tahtireluktanssimoottorin suorituskyky tulee paremmaksi anisotrooppisuussuhteen myötä. (Moghaddam 2007: 11–12.) Vuoesteet pyrkivät ohjaamaan magneettivuota yhtälön 23 mukaisesti, jolloin vuo kulkisi hyvin d-akselin suuntaisesti ja huonosti q-akselin suuntaisesti.

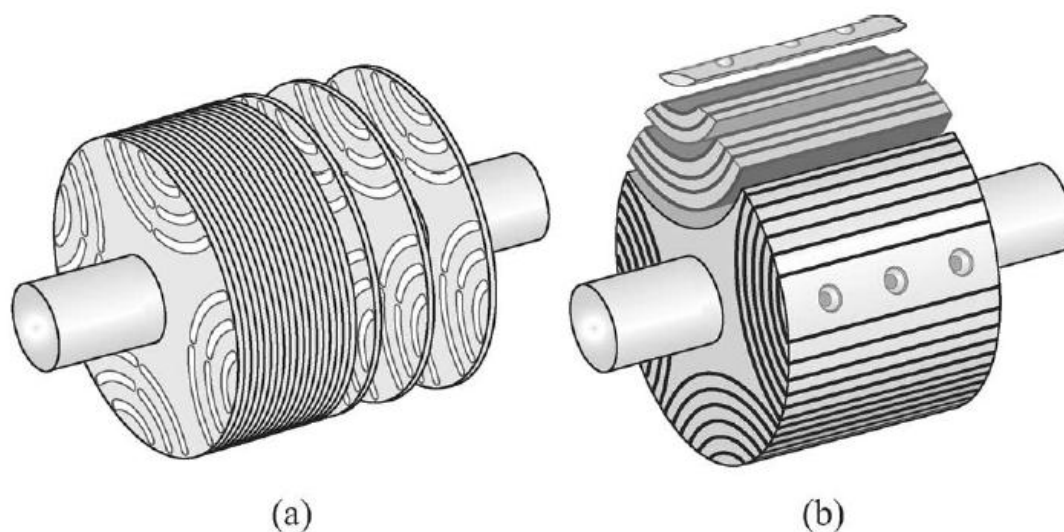
Kuvan 4 roottorirakenteessa (e) on laminointi tehty aksiaalisesti. Aksiaalisella laminoinnilla saavutetaan hieman parempi anisotrooppisuussuhde kuin radiaalisella laminoinnilla, mutta roottorin valmistaminen on huomattavasti vaikeampaa (Haataja 2003: 39).

Tahtireluktanssimoottorin anisotrooppisuussuhteen pitää olla tarpeeksi suuri, että se on suorituskyvyltään perinteistä induktiomoottoria parempi. Taajuusmuuttajien kehittyessä ovat tahtireluktanssimoottorit nousseet uudelleen mielenkiinnon kohteeksi, koska nykyaikaisten taajuusmuuttajien sisältämien vaihtosuuntaajien ja kehittyneiden ohjaustapojen myötä ei tahtireluktanssimoottorin roottorissa tarvitse olla häkkipäämääntä, mikä mahdollistaa paremman suorituskyvyn (Staton 1993: 249). Edellä esitetyistä roottorirakenteista on parempaan suorituskykyyn edellytyksiä vain TLA- ja ALA -roottorirakenteilla (Haataja 2003: 38).

Kuvassa 5 on esitetty käytetyimpien roottoritopologioiden – aksiaalisesti ja radiaalisesti laminoitujen roottorien poikkileikkaukset. Radiaalisesti laminoitu roottori (TLA) valmistetaan induktiomoottorin roottorin tapaan sähkölevystä, johon isketään vuoesteet. Radiaalisesti laminoitu roottori saadaan valmistettua myös induktiomoottorin roottoria edullisemmin, koska roottoria ei tarvitse valaa. Tällöin se soveltuu paremmin teolliseen tuotantoon. Radiaalisesti laminoitujen roottorien etuihin kuuluvat myös mahdollisuus vinouttaa roottorin uria induktioroottorin tavoin ja vaikuttaa täten vääntömomentin värähtelyyn. (Moghaddam 2007: 13–14.) Kuvassa 5a on havaittavissa myös vuoesteiden väliin jäävät sillat sekä levyn reunalle jäävä alue. Näiden tarkoituksena on vahvistaa roottorin rakennetta. Sillat mahdollistavat kuitenkin magneettivuon kulun q-suunnassa, mikä heikentää moottorin suorituskykyä (Staton 1993: 254). Tutkimuksien mukaan radiaalisesti laminoitulla roottorilla saavutetaan anisotrooppisuussuhteeksi noin 8–10 (Staton 1993: 253; Haataja 2003: 39).

Kuvassa 5b on esitetty aksiaalisesti laminoitujen roottorien poikkileikkaus (ALA). Aksiaalisen laminoinnin myötä on roottorirakenteessa mahdollista käyttää useita vuoesteitä ja rakenteen tukemisessa ei tarvitse käyttää radiaalisia tukisilloja jokaisessa kohdassa (Haataja 2003: 39). Näiden ansiosta anisotrooppisuussuhteeksi saadaan

keskimäärin 9–11, joka on radiaalisella laminoinnilla saavutettavaa suhdetta suurempi (Staton 1993: 253; Haataja 2003: 39). Aksiaalisen laminoinnin etuja ovat myös radiaalista laminointia pienemmät rautahäviöt ja vääntömomentin värähtely. Muotoonsa taivutettujen rautalaminaattien vuoksi aksiaalisesti laminoidun roottorin valmistaminen ei sovi kuitenkaan hyvin teolliseen tuotantoon ja valmistuskustannukset voivat nousta jopa induktiomootorin roottoria kalliimmaksi. (Haataja 2003: 39.)



**Kuva 5.** Radiaalisesti laminoidun (TLA) (a) ja aksiaalisesti laminoidun (ALA) (b) roottorien poikkileikkaukset (Fukami 2008: 493).

### 2.3 Tahtireluktanssimootorin suorituskyky

Moottoreiden tärkeimpinä suorituskyky suureina voidaan pitää tuote-esitteissä esitettyjä suureita. Tyypillisesti erikoismoottoreiden suureista ilmoitetaan moottorin akselitehon lisäksi moottorin akselikorkeus, pyörimisnopeus, hyötysuhde, tehokerroin, nimellisvirta, nimellistäntömomentti, maksimi vääntömomentti, hitausmomentti ja moottorin kokonaispaino.

Tahtireluktanssimoottorin suorituskyky ei ole ollut aikaisemmin kilpailukykyinen induktiomootorin suorituskykyyn nähden. Pääsyyinä huonoon suorituskykyyn voidaan pitää roottorin rakennetta, jossa tuli ottaa huomioon suora verkkokäyttö. Kehittyneiden taajuusmuuttajien ansiosta, tahtireluktanssimoottorin roottorin rakenteessa on voitu keskittyä parempaan anisotrooppisuussuhteeseen, mikä näkyy moottorin parempana suorituskykynä (Moghaddam 2007: 11). Paremman suorituskyvyn mahdollistamat edut voidaan ajatella kaksijakoisesti. Yksi ajattelutapa on, että tahtireluktanssimoottorista voidaan ottaa induktiomootoria enemmän tehoa. Täten se mahdollistaa moottorin runkokoon pienentämisen. Toisen ajattelutavan mukaisesti moottoria voidaan käyttää induktiomootoriin verrattavalla teholla, mutta paremmalla hyötysuhteella. (Moghaddam 2011: 100.)

### 2.3.1 Vääntömomentti ja -värähtely

Akselilta saatava vääntömomentti on moottorin käytön kannalta oleellisin suorituskykyosuus. Tahtireluktanssimoottorilla saadaan tuotettua vastaava vääntömomentti akselille kuin induktiomootorilla. Vääntömomentti voidaan kuitenkin tuottaa paremmalla hyötysuhteella (Moghaddam 2011: 12.) Tämä tieto lisää todennäköisesti reluktanssimoottorin suosiota hyötysuhdevaatimusten kiristyessä.

Reluktanssimoottorin keskimääräinen vääntömomentti voidaan esittää kaksiakselimallin reluktanssivääntömomenttiyhtälön avulla

$$T_r = \frac{3}{2} \frac{p}{2} (L_d - L_q) i_d i_q, \quad (24)$$

missä  $p$  on napaluku (Moghaddam 2007: 34). Teoreettinen maksimimomentti saavutetaan, kun virran pitkittäiskomponentin kulma on  $\frac{\pi}{4}$  (Haataja 2003: 29).

Yhtälöstä 24 käy ilmi pitkittäis- ja poikittaisinduktanssien ja sitä myötä anisotrooppisuussuhteen vaikutus moottorin vääntömomenttiin. Keskimääräistä vääntömomenttia arvioitaessa oletetaan, että induktanssit ovat vakioita roottorin mekaanisen

asentokulman suhteen. Tällöin reluktanssivääntömomentti muodostuu pääosin vuon ja virran komponenteista. (Fratta, Troglia, Vagati & Villata 1993: 165.)

Vääntömomenttia arvioidessa on kuitenkin huomioitava, että tahtireluktanssimootorin vääntömomentissa esiintyy vääntömomenttivärähtelyä, mikä johtuu pääosin roottorin ja staattorin urista, ja niiden muodoista sekä roottorin käyttäytymisestä staattorin luoman magnetomotorisen voiman suhteen (Moghaddam 2011: 125). Roottorin rakenteessa värähtelyyn vaikuttavat muun muassa vuoesteiden paksuus ja lukumäärä. Myös ilmavälin pituudella on vaikutusta. Vuoesteiden ja ilmavälin muutoksilla voidaan osin vähentää vääntömomenttivärähtelyä. (Haataja 2003: 93–106.) Magnetomotorinen voima on harvoin ideaalisen sinimuotoinen, jolloin ilmavälivuossa esiintyy yliaaltokomponentteja, jotka lisäävät myös vääntömomenttivärähtelyä. Vääntömomenttivärähtelyä yleisesti arvioitaessa on huomioitava, että induktanssien arvot ovat riippuvaisia roottorin mekaanisesta asentokulmasta. (Fratta 1993: 163–165.) Vääntömomentti voidaan kirjoittaa muotoon, jossa induktanssien vaihtelut otetaan huomioon roottorin mekaanisen asentokulman  $\theta_m$  suhteen. Tällöin vääntömomentti on

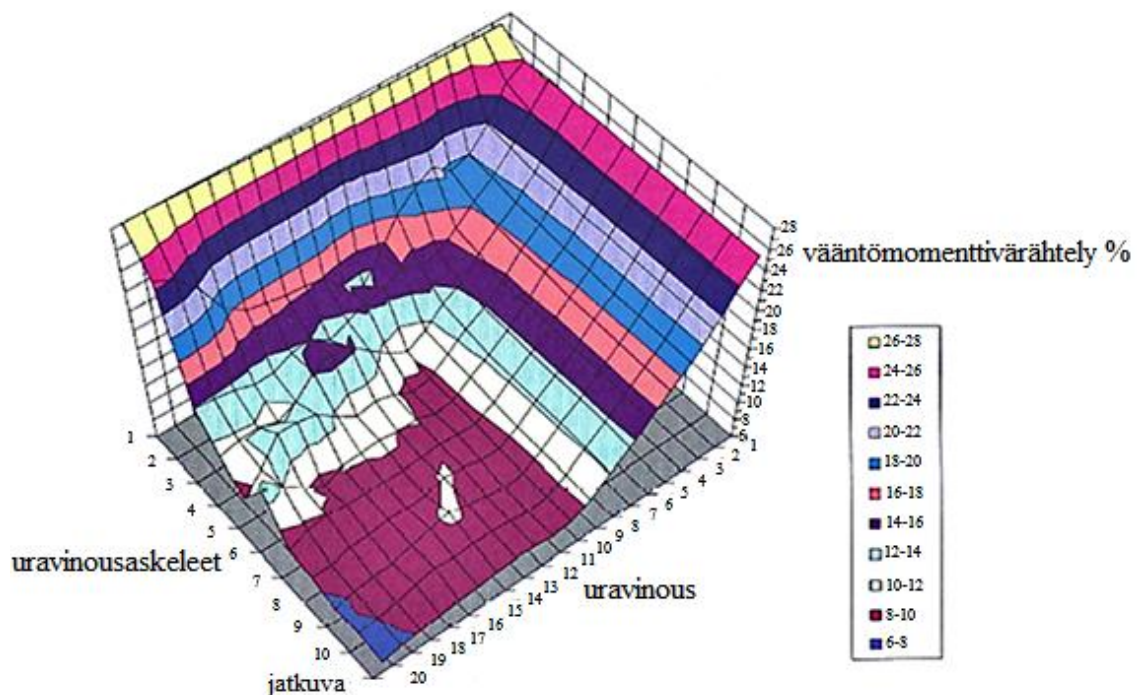
$$T(\theta_m) = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \left( \frac{3q}{\pi} \sin \frac{\pi}{3q} \right) \left[ (L_{d0} - L_{q0}) i_d i_q + \right. \\ \left. (\Delta L_d + \Delta L_q) i_d i_q \cos(3pq\theta_m) - \Delta L_{dq} (i_d^2 - i_q^2) \sin(3pq\theta_m) \right], \quad (25)$$

missä  $q$  on staattoriurien lukumäärä,  $L_{d0}$  pitkittäisinduktanssin vakio-osuus,  $L_{q0}$  poikittaisinduktanssin vakio-osuus,  $\Delta L_d$  pitkittäisinduktanssin amplitudimuutos,  $\Delta L_q$  poikittaisinduktanssin amplitudimuutos ja  $\Delta L_{dq}$  keskinäisinduktanssin amplitudimuutos. (Fratta 1993: 164–165; Moghaddam 2007: 37–38.)

Vääntömomenttivärähtelyä voidaan vähentää pienentämällä ilmavälissä esiintyviä yliaaltokomponentteja (Fratta 1993: 163). Yliaaltokomponenttien poistaminen on kuitenkin hankalaa. Luontevampi tapa vähentää vääntömomenttivärähtelyä on vinouttaa staattorin tai roottorin uria, joista roottorin uravinouttaminen on helpompi toteuttaa käytännössä. Roottorissa tapahtuvien häviöiden muutos voidaan katsoa olevan mitätön verrattaessa suorauraista ja vinoutettua roottoria (Fratta, Vagati & Villata 1992: 1083;

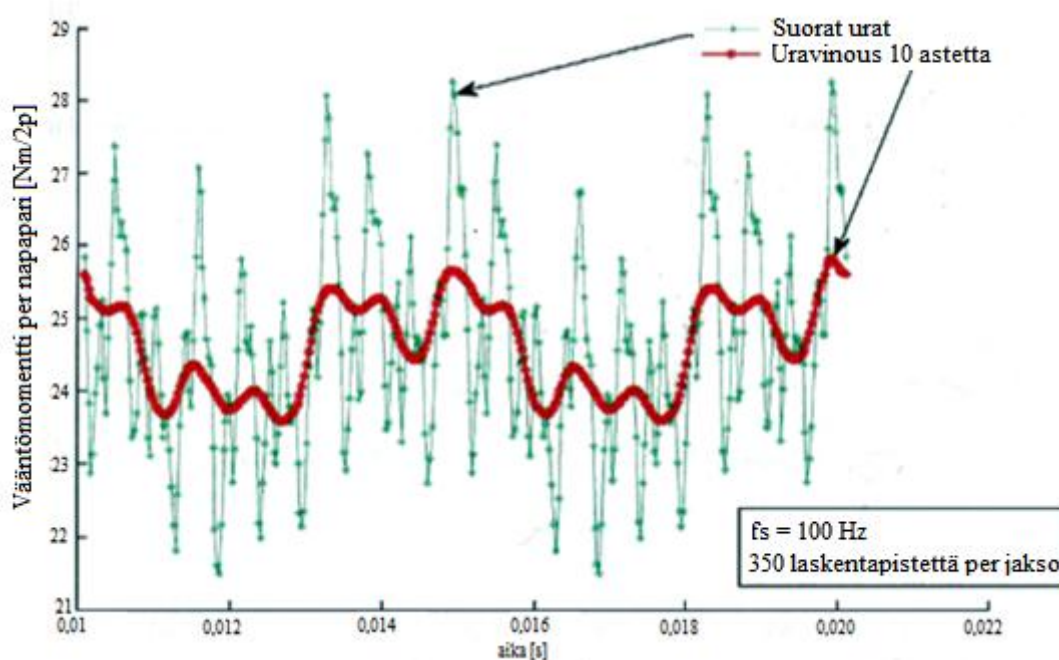
Moghaddam 2011: 174). Roottorin uravinoudella on vääntömomenttivärähtelyn vähenemisen lisäksi myönteisiä vaikutuksia moottorin käynnistyksen aikaiseen suorituskykyyn sekä moottorin käyntiäänien hiljenemiseen (Matsch & Morgan 1986: 270).

Kuvassa 6 on esitetty roottorin uravinouden vaikutus vääntömomenttivärähtelyyn. Uravinous määrittää vinoutetun uran kulman suhteessa keskipisteen kautta kulkevaan suoraan uraan. Uravinousaskeleet määrittävät puolestaan käännettävien sähkölevyryhmien määrän, jotta haluttu uravinous saavutetaan. Esimerkiksi käyttäen seitsemää uravinousaskelta, uravinous saavutetaan kääntämällä roottoripaketista seitsemää osaryhmää siten, että ensimmäisen ja viimeisen sähkölevyn väliin jää seitsemän porrasta.



**Kuva 6.** Roottoriuoravinouden vaikutus vääntömomenttivärähtelyyn (Moghaddam 2011: 174).

Kuvassa 7 on esitetty erään moottorin vääntömomentti, kun roottori on suoraurainen ja kun roottorin uravinous on 10 astetta koko roottoripaketin matkalta eli jokainen sähkölevy on eri asennossa. Kuvasta 7 ilmenee, että vääntömomentin värähtelyä voidaan merkittävästi vähentää roottoriurien vinouttamisella.



**Kuva 7.** Erään tahtireluktanssimoottorin vääntömomentti, kun roottoriurat ovat suorat ja roottorin uravinous on 10 astetta (Moghaddam 2011: 175).

### 2.3.2 Tehokerroin

Tahtireluktanssimoottoreita kehittäessä on niiden tehokerroin saatu nousemaan merkittävästi. Perinteisten reluktanssimoottoreiden kohdalla nimenomaan tehokerrointa pidettiin reluktanssimoottoreiden heikkoutena (Lovatt 1997: 363). Tehokerroin voidaan määrittää yhtälöllä

$$\cos \varphi = \frac{(L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}}{\sqrt{(L_d i_{sd})^2 + (L_q i_{sq})^2} \sqrt{i_{sd}^2 + i_{sq}^2}}, \quad (26)$$

missä

$$i_{sd} = |i_s| \cos \kappa \quad (27)$$

$$i_{sq} = |i_s| \sin \kappa, \quad (28)$$

kun  $\kappa$  on staattorivirran  $i_s$  kulma d-akselin suhteen (Haataja 2003: 27–33). Yhtälöstä huomataan, että tehokerrointa määritettäessä hyvän anisotrooppisuussuhteen merkitys korostuu. Tehokertoimen maksimiarvo voidaan laskea yhtälöllä (Staton 1993: 251; Haataja 2003: 33)

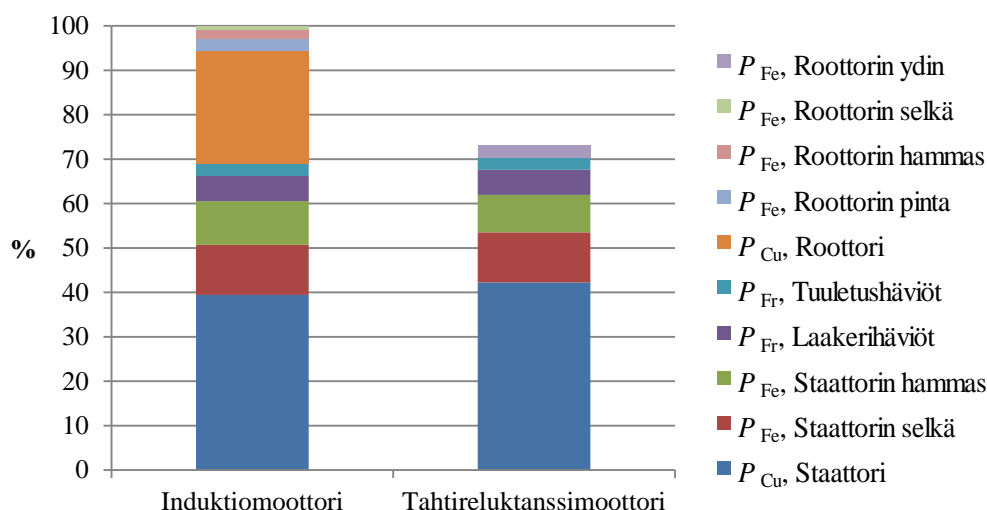
$$\cos \varphi_{\max} = \frac{\frac{L_d}{L_q} - 1}{\frac{L_d}{L_q} + 1}. \quad (29)$$

Tehokertoimen merkitys näkyy erityisesti taajuusmuuttajakäytöissä. Huonomman tehokertoimen vuoksi moottorin ottama näennäisteho on suurempi, jolloin taajuusmuuttajan tulee olla tarpeeksi suuri kyetäkseen syöttämään moottorille sen tarvitseman näennäistehon (Moghaddam 2011: 101). Vastaavasti suuremmalla tehokertoimella ja vakio jännitteellä, moottori tarvitsee vähemmän virtaa tietyn tehon tuottamiseksi. Parempi tehokerroin voi rajatapauksissa ratkaista pienemmän taajuusmuuttajan käyttömahdollisuuden, mikä mahdollistaa hankintakustannusten pienenemisen.

## 2.4 Häviöiden jaottelu ja lämpenemä

Tahtireluktanssimoottorit muuttavat muiden sähkömoottoreiden tavoin niihin syötetyn sähköenergian mekaaniseksi energiaksi. Muutoksessa tapahtuu tehohäviöitä, minkä vuoksi sähköenergiaa ei voida kokonaisuudessaan muuttaa mekaaniseksi energiaksi. Tehohäviöt muuttuvat kokonaisuudessaan lämmöksi, joka täytyy johtaa moottorista ympäristöön optimaalisen toiminnan takaamiseksi.

Jatkuvan tilan toimintalämpötila on verrannollinen moottorin häviöihin, jotka ovat suoraan verrannollisia moottorin hyötysuhteeseen. Toimintaperiaatteensa ja roottorin rakenteen vuoksi tahtireluktanssimoottori lämpenee vastaavan tehoista induktiomootoria vähemmän (Lendenmann 2011: 58). SynRM:n hyötysuhde onkin vastaavan tehoista induktiomootoria parempi huonommasta tehokertoimesta huolimatta (Moghaddam 2010: 11). Kuvassa 8 on esitetty erään 15 kW:n induktio- ja tahtireluktanssimoottorin häviöiden suhteellinen jakautuminen. Kuvasta ilmenee selkeästi, että reluktanssimoottorin kokonaishäviöt ovat induktiomootoria pienemmät. Vertailtavista moottoreista riippuen, tahtireluktanssimoottorin kokonaishäviöt voivat olla 10–40 % pienemmät kuin induktiomootorin kokonaishäviöt (Moghaddam 2011: 204).



**Kuva 8.** Induktio- ja tahtireluktanssimoottorin häviöiden suhteellinen jakautuminen (Haataja 2003: 119; Moghaddam 2011: 204).

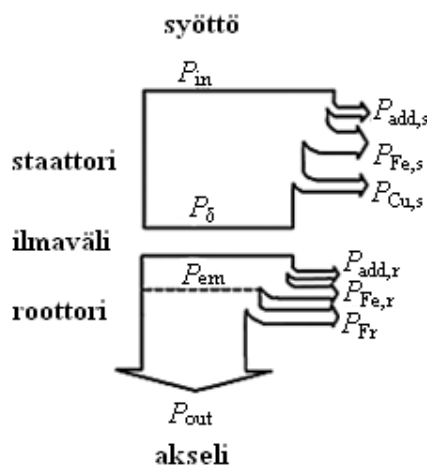
### 2.4.1 Kokonaishäviöt ja hyötysuhde

Reluktanssimoottorin häviöt voidaan karkeasti luokitella kolmeen luokkaan fyysisen esiintymisensä perusteella. Nämä häviöluokat muodostuvat staattorin sähkömagneettisiin häviöihin lukeutuvista virtalämpöhäviöistä, staattorin ja roottorin rautahäviöistä sekä roottorin tuuletus- ja kitkahäviöistä. Kokonaishäviöt  $P_{\text{loss}}$  saadaan laskemalla yhteen yksittäiset häviökomponentit. Kokonaishäviö voidaan myös laskea, jos akseliteho  $P_{\text{out}}$  on mitattu ja sähköteho  $P_{\text{in}}$  tunnetaan. (Aura & Tonteri 1996: 155; Malinen 2005: 10.)

Moottorin hyötysuhde  $\eta$  saadaan laskettua akselitehon ja sähkötehon suhteen avulla tai häviöiden ja sähkötehon avulla

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = 1 - \frac{P_{\text{loss}}}{P_{\text{in}}}. \quad (30)$$

Häviöiden jakautuminen on esitetty kuvassa 9, missä  $P_{\delta}$  on ilmväliteho,  $P_{\text{add},r}$  roottorin lisähäviö,  $P_{\text{add},s}$  staattorin lisähäviö,  $P_{\text{Cu},s}$  staattorin virtalämpöhäviö,  $P_{\text{em}}$  sähkömagneettinen teho,  $P_{\text{Fe},r}$  roottorin rautahäviö,  $P_{\text{Fe},s}$  staattorin rautahäviö,  $P_{\text{in}}$  sähköteho,  $P_{\text{out}}$  akseliteho ja  $P_{\text{w,fr}}$  mekaaninen kitkahäviö.



**Kuva 9.** Tahtireluktanssimoottorin sankey-diagrammi (Malinen 2005: 13).

Moottorin teholuokan kasvaessa myös hyötysuhde kasvaa. Tämä selittyy pääosin sillä, että staattorin virtalämpöhäviöiden osuus kokonaishäviöistä pienenevät. Vastaavasti rautahäviöiden suhteellinen osuus kokonaishäviöistä pysyy suunnilleen vakiona ja mekaanisten häviöiden suhteellinen osuus kokonaishäviöistä kasvaa lineaarisesti moottorin tehon kasvaessa. (Haataja 2003: 72.)

#### 2.4.2 Staattorikäämityksen virtalämpöhäviöt

Virtalämpö- eli kuparihäviöt ovat tahtireluktanssimoottorin staattorikäämityksissä tapahtuvia häviöitä. Staattorikäämityksissä syntyvät virtalämpöhäviöt  $P_{Cu,s}$  voidaan kirjoittaa

$$P_{Cu,s} = 3R_s I_s^2 = 1,5R_{TT} I_s^2, \quad (31)$$

missä  $R_s$  on staattorin vaihekäämin tasaresistanssi,  $R_{TT}$  kahden liitäntäterminaalien väliltä mitattu tasaresistanssi ja  $I_s$  on vaihevirta (Malinen 2005: 14; IEC 2007: 44).

Staattorikäämityksen resistanssin arvo on sidoksissa käämityksen lämpötilaan. Lämpötilaan vaikuttaa paljon ympäristön lämpötila ja moottorin kuormitustaso. (Malinen 2005: 14.) IEC 60034-2-1 -standardissa määritetään staattorikäämityksen resistanssille lämpötilan korjauskerroin  $k_\theta$ , jota voidaan soveltaa myös reluktanssimoottoreiden staattorin virtalämpöhäviöihin. Mitattua resistanssia muokataan korjauskertoimen avulla standardijäähdytyslämpötilaan (25°C)

$$k_\theta = \frac{235 + \theta_w + 25 - \theta_c}{235 + \theta_w}, \quad (32)$$

missä  $\theta_w$  on käämityksen mitattu lämpötila ja  $\theta_c$  jäähdyttävän ilman lämpötila. Nyt 235 on kerroin kuparille ja alumiinille vastaava kerroin on 225. Lämpötilakorjatuksi virtalämpöhäviöksi  $P_{Cu,s\theta}$  saadaan

$$P_{Cu,s\theta} = P_{Cu,s} k_\theta \quad (33)$$

Tarkemmassa määrittelyssä virtalämpöhäviöihin kuuluvat myös virranahtoilmiöstä johtuvat häviöt. Virranahtoilmiössä virrantiheys on suurimmillaan aivan johtimen ulkoreunalla, kun johtimen ytimessä se on pienin. Virranahtoilmiö on huomioonotettava vain suurilla taajuuksilla ja paksuilla johtimilla. Myös johtimen materiaali vaikuttaa virranahtoilmiöön. (Winders 2002: 74–75.) Taajuusmuuttajakäyttöisissä ratkaisuisissa virranahtoilmiö on merkittävämpi kuin sinisyöttökäytössä. Taajuusmuuttajan suuren kytkentätaajuuden seurauksena suuritaajuiset virtakomponentit lisäävät virranahtoilmiötä. Toisaalta erityisesti pienitehoisten moottorien staattorin lankapaksuus on niin ohut, että virranahtoilmiö ei ole merkittävä. (Malinen 2005: 24.)

#### 2.4.3 Rautahäviöt

Rautahäviöt syntyvät staattorissa ja roottorissa. Roottorin rautahäviöitä pidetään kuitenkin merkityksettöminä, koska roottorin rautahäviöitä aiheuttavat staattorivirran yliaallot ovat yleensä suhteellisen pieniä varsinkin sinijännitesyötöllä. (Parviainen 2000: 9.) Taajuusmuuttajakäytöissä staattorivirta sisältää kuitenkin enemmän staattorivirran yliaaltoja, joten roottorin rautahäviöt kasvavat (Haataja 2003: 55). Enemmän merkityksellisiä staattorin rautahäviöitä aiheuttavat ajan suhteen vaihtelevat vuot. Rautahäviöt  $P_{Fe}$  voidaan kirjoittaa yhtälöksi

$$P_{Fe} = P_h + P_p, \quad (34)$$

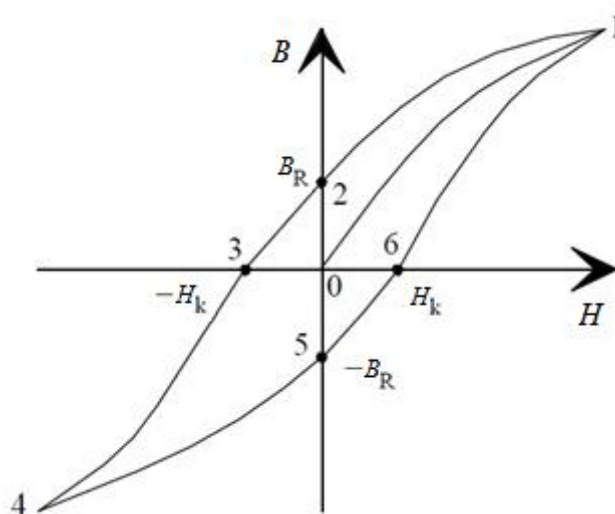
missä  $P_h$  hystereesihäviö ja  $P_p$  on pyörrevirtahäviö (Parviainen 2000: 9).

Hystereesi-ilmiö ferromagneettisessa aineessa johtuu molekyyli- ja atomien välisestä kitkasta. Hystereesihäviöiden suuruus kokonaisrautahäviöistä on sidoksissa taajuuteen  $f$  ja hystereesisilmukan pinta-alaan. Hystereesihäviö voidaan määrittää yhtälöllä

$$P_h = f \oint H \cdot dB, \quad (35)$$

missä  $f$  on taajuus,  $H$  magneetikentän voimakkuus ja  $B$  magneettivuon tiheys. (Parviainen 2000: 11; Malinen 2005: 15.)

Hystereesisilmukan periaatteellinen muoto on esitetty kuvassa 10. Silmukan muoto on riippuvainen taajuudesta ja staattorilevyn materiaalin magneettisista ominaisuuksista kuten kyllästysvuontiheydestä (Malinen 2005: 15). Pääsilman lisäksi siinä voi esiintyä myös lisähystereesihäviösilmukoita (Matsch 1986: 48).



**Kuva 10.** Hystereesisilmukka. Raudan magneettivuon tiheys  $B$  magneettikentän voimakkuuden  $H$  funktiona. (Parviainen 2000: 11.)

Pyörrevirtahäviöt  $P_p$  syntyvät, kun vaihtovirran aiheuttama muuttuva magneettivuon indusoi rautalevyihin sähkömotorisia voimia. Syntyneet pyörrevirrat ovat suuruudeltaan sellaisia, että ne pyrkivät vastustamaan magneettivuon muutoksia. Pyörrevirrat lämmittävät rautalevyä, minkä vuoksi laminoidulla rakenteella pyritään pienentämään pyörrevirtojen voimakkuutta. Pyörrevirtahäviöitä voidaan kuvata yhtälöllä

$$P_p = \frac{V \pi^2 f^2 d^2 \hat{B}^2}{6 \rho_r}, \quad (36)$$

missä  $V$  on materiaalin tilavuus,  $f$  taajuus,  $d$  materiaalin paksuus,  $\hat{B}$  magneettivuontiheyden huippuarvo ja  $\rho_r$  materiaalin resistiivisyys. Yhtälöstä käy ilmi levypaksuuden ja taajuuden suuri vaikutus pyörrevirtahäviöihin. (Matsch 1986: 50–51; Pyrhönen 1998: 142; Malinen 2005: 15; Ryyppö 2005: 8).

Taajuusmuuttajakäytössä ilmenevät perusaallon kerrannaiset ovat haastavia. Koska vain perusaallon voidaan ajatella synnyttävän mekaanista tehoa, ovat perusaallon kerrannaiset vain puhtaita häviöitä. Sinimuotoisempaa virtaa saadaan nostamalla taajuusmuuttajan kytkentätaajuutta, mikä vähentää harmonisten määrää ja niistä aiheutuvia häviöitä. Toisaalta suurempi kytkentätaajuus lisää rautahäviöitä, koska suuritaajuiset virtakomponentit aiheuttavat päävuohon suuritaajuisia komponentteja, aiheuttaen rautahäviöihin lisähäviökomponentin. (Malinen 2005: 22–26.)

#### 2.4.4 Tuuletus- ja kitkahäviöt

Tuuletus- ja kitkahäviöt  $P_{Fr}$  ovat moottorin mekaanisia häviöitä. Tuuletushäviöt muodostuvat roottorin akselilla olevan tuulettimen aiheuttamasta ilmanvastuksesta, ilmavälin ilmavirtauksien aiheuttamista häviöistä ja mahdollisista roottorin päätylevyjen tai sähkölevyjen aukoista. Kitkahäviöt muodostuvat laakereiden vierintävastuksesta ja tiivisteiden hankauksesta. Tuuletushäviöt kasvavat neliöllisesti ja kitkahäviöt suoraan verrannollisesti moottorin pyörimisnopeuteen nähden. (Talvitie 2005: 42; Ryyppö 2005: 10.) Kitkahäviöihin vaikuttaa paljon laakerin tyyppi, käytetty voiteluaine, sen määrä ja ikä (Malinen 2005: 17). Myös lämpötila vaikuttaa häviöihin (Talvitie 2005: 42). Tuuletus- ja kitkahäviöt ovat myös erittäin riippuvaisia roottorin pyörimisnopeudesta. Pyörimisnopeus ja taajuus vaikuttavat kuutiollisesti mekaanisiin häviöihin, joten nopeuden nostaminen viidenneksellä esimerkiksi 1500 rpm:stä 1800 rpm:ään lisää mekaanisia häviöitä miltei kolmeneljäsosan (Gieras 1999: 676).

Tuuletus- ja kitkahäviöt voidaan mitata roottorin vapaalla hidastuvuuskokeella, jolloin kulmanopeuden muutos saadaan selville tietyllä ajanjaksolla. Tällöin roottoria hidastava voima on yhtä kuin mekaaniset häviöt. Tuuletus- ja kitkahäviötehot voidaan mittauksesta tällöin laskea yhtälöllä

$$P_{\text{Fr}} = \omega \cdot T = \omega \cdot J \frac{\Delta\omega}{\Delta t}, \quad (37)$$

missä  $J$  on roottorin hitausmomentti.

#### 2.4.5 Lisähäviöt

Sinijännitesyötöllä perusaallon taajuus aiheuttaa rautahäviöiden ja virtalämpöhäviöiden lisäksi lisähäviöitä. Nämä johtuvat pääosin siitä, että ilmavälin vuojakauma ei ole kuitenkaan ideaalisen sinimuotoinen. Tästä syystä roottoria leikkaava vuo sisältää perusaallon lisäksi taajuuden kerrannaisella eteneviä vuoharmonisia. Tämä voidaan todeta vääntömomenttimittauksesta, sillä vääntömomentti ei ole tasaista. (Malinen 2005: 18.)

Lisähäviöiden osuus voidaan melko tarkasti määrittää mittaustuloksista, mikä vaatii moottorin täydellistä testaamista. Tyhjäkäyntikokeiden avulla voidaan selvittää edellä esitetyt staattorin rautahäviöt ja mekaaniset häviöt. Kuormituskokeen avulla voidaan selvittää staattorin virtalämpöhäviöt. Vähennettäessä edellisten kokeiden tuloksista kokonaishäviöt, jotka saadaan vääntömomenttimittauksen sisältävän kuormituskokeen avulla, voidaan todeta erotuksen olevan eri suuri kuin nolla. Niinpä tätä erotusta kutsutaankin lisähäviöksi. Lisähäviöt ovat sidonnaisia moottorin kuormitustasoon, vaikka tosiasiasa lisähäviöitä esiintyy myös moottorin tyhjäkäynnillä määritelmistä huolimatta. (Malinen 2005: 18.)

Analyttisin menetelmin moottorin lisähäviöksi määritettiin puoli prosenttia moottorin sähkötehosta vanhan IEC 60034-2 -standardin mukaisesti (Ryyppö 2005: 10). Uuden IEC 60034-2-1 -standardin avulla lisähäviöihin on otettu tarkemmin kantaa, koska mittausstandardeja on haluttu tarkentaa ja yhtenäistää (ABB 2010: 5). Uuden standardin myötä lisähäviön suuruus on noin 0,5–2,5 % sähkötehosta (IEC 2007: 53).

#### 2.4.6 Lämpenemä ja lämmönsiirto

Moottorissa syntyvät häviöt ovat karkeasti verrannollisia kuormitukseen. Syntyneet häviöt muuttuvat lämpötehoksi, joka varastoituu moottorin massaan, säteilee ympäristöön ja poistuu väliaineeseen, joka useimmiten on ilmaa. (Taipale 2008: 30.) Moottori voidaan valita suljetuksi systeemiksi ja tarkastella tätä systeemiä. Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan systeemin kokonaisenergia säilyy. Energian määrä voi suljetussa systeemissä muuttua vain, jos energia läpäisee systeemin rajat. Suljetulla systeemillä energia voi läpäistä systeemin rajan lämpönä tai systeemiin kohdistuvana työnä tai systeemin tekemänä työnä. Tarkasteltavaan kontrollitilavuuteen varastoituneen mekaanisen ja termisen energian muutosta  $\Delta E_{st}$  aika-askeleella voidaan esittää muodossa

$$\Delta E_{st} = E_{in} - E_{out} + E_{gen}, \quad (38)$$

missä  $E_{in}$  on kontrollitilavuuteen tuleva terminen ja mekaaninen energia,  $E_{out}$  kontrollitilavuudesta poistuva terminen ja mekaaninen energia ja  $E_{gen}$  kontrollitilavuudessa generoitu mekaaninen ja terminen energia. (Incropera, DeWitt, Bergman & Lavine 2007: 14–15.)

Moottorin häviöiden syntymekanismien ja moottorin massan vuoksi sen sisäiset komponentit lämpenevät eri nopeuksilla. Tämä vaikeuttaa moottorin lämpenemän tutkimista. Myös moottorin käyttö- ja jäähdytystapa vaikuttavat paljon lämpenemään ja sitä myötä moottorin loppulämpötilaan. Jatkuvakäyttöisen S1-luokan moottorin lämpenemä saavuttaa loppulämpötilan lineaarisesti. (Taipale 2008: 31.)

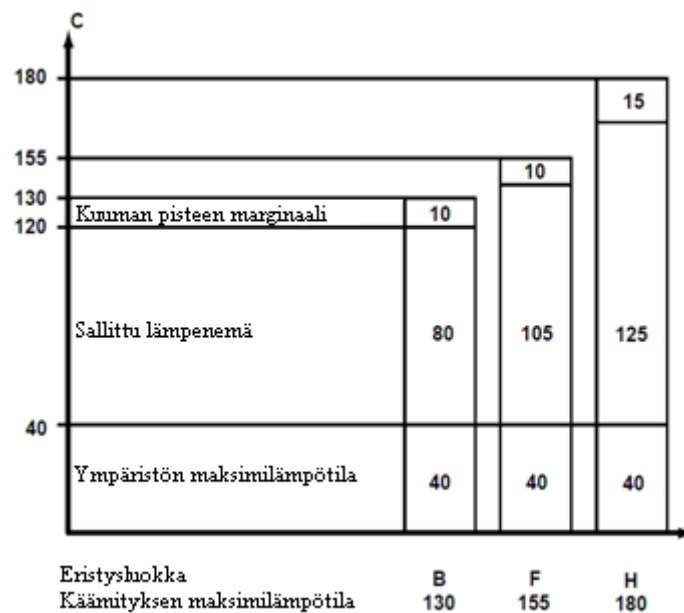
Uuden moottorin lämpenemää on vaikea määrittää laskennallisesti. Simulointityökalut ovat vasta viime vuosina kehittyneet sen verran, että niiden tuloksiin voidaan luottaa ja laskennat tapahtuvat kohtuullisessa ajassa. Uuden moottorin lämpenemää määrittäessä turvaudutaan usein vanhan vastaavan rakenteen moottorin lämpenemäkokeen tietoihin, joista painotuskertoimien avulla määritetään uuden moottorin lämpenemä (Taipale 2008: 31).

Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan lämmönsiirto on energian siirtymistä lämpötilojen välillä (Incropera 2007: 14). Epätahtimoottoreiden tuottaessa mekaanista energiaa, häviöiden synnyttämä ylimääräinen lämpöenergia pitää saada siirrettyä moottorista pois optimaalisen toiminnan takaamiseksi. Materiaalien valinnalla sekä rakenteiden suunnittelulla lämmönsiirtoa voidaan parantaa moottorin ja ympäristön välillä. (Taipale 2008: 32–33.) Tahtireluktanssimoottorissa pätevät samat lämmönsiirtotavat, kuin muissakin sovellutuksissa; johtuminen, konvektio ja lämpösäteily (Incropera 2007: 2; Taipale 2008: 33).

Johtumista tapahtuu, kun moottorin lämpö johtuu käämeistä eristeiden läpi staattorirautaan ja edelleen staattoriraudasta moottorin runkoon. Konvektio eli kulkeutuminen voi tapahtua vapaana tai pakotettuna konvektiona. Vapaassa konvektiossa lämmönsiirto tapahtuu väliaineessa lämpötilaerojen vuoksi painovoiman avulla. Pakotetussa konvektiossa lämmönsiirtoa tehostetaan tuulettimen tai pumpun avulla, jolloin konvektio nopeutuu. Reluktanssimoottorissa konvektiota tehostetaan akselilla olevan tuulettimen avulla. Konvektio tapahtuu rungon, rungossa olevien jäähdytyskanavien ja ympäröivän ilman kesken. Konvektiota tapahtuu myös moottorin sisällä kääminpäiden ja sisäisen ilman välillä sekä staattorin ja roottorin välisessä ilmvälissä. Roottorin avonaisen rakenteen vuoksi konvektiota tapahtuu myös roottorin sisällä. Reluktanssimoottorissa lämpöä siirtyy ympäristöön myös säteilyn avulla, jolloin erillistä väliainetta ei tarvita. Moottorin lämpötila on absoluuttista nolapistettä korkeampi, jolloin lämpösäteilyä tapahtuu. (Incropera 2007: 3–9; Taipale 2008: 33–36.)

Tahtireluktanssimoottori on vastaavantehoista induktiomoottoria viileämpi. Pääsyyinä viileydelle voidaan pitää parempaa hyötysuhdetta, mutta myös lämmönsiirrossa, erityisesti sisäisessä konvektiossa, on eroavaisuuksia. Suurin ero ilmenee roottorin rakenteessa. Induktio-moottorissa roottori on muodoltaan kiinteä kappale ja se painaa tahtireluktanssimoottorin roottoria enemmän. Tällöin sen lämmönvarauskyky on suurempi. Reluktanssimoottorin roottori puolestaan on avoin, jolloin se painaa vähemmän ja sisäinen konvektio pääsee täten vaikuttamaan roottorin sisällä viilentäen roottoria. Tämä näkyy kokonaisuudessaan moottorin viileämpänä lämpötilana.

Lämpenemäraajat tulee ottaa huomioon moottorin toimintaa tarkastellessa. Kuvassa 11 on esitetty eristeaineiden yleisimmät eristysluokat (B, F ja H) sekä niiden rajalämpötilat. Lämpenemäraajat 80, 105 ja 125 on määritetty käämityksestä mitattavan vastusarvon ja siitä lasketun lämpenemän raja-arvoiksi. Vastaavasti käytettäessä termoparia tai vastaavaa erillistä anturia, jotka ovat käämityksessä kiinni, lämpenemän raja-arvot ovat 90, 115 ja 135 (IEC 2004: 89).



**Kuva 11.** IEC 60034-1 -standardin määrittämät eristeaineiden lämpötilaluokat (ABB 2005: 49).

### 3 TAHTIRELUKTANSSIMOOTTORIN SUORITUSARVOJEN MITTAAMINEN JA LASKEMINEN

Työn tarkoituksena on vertailla protomoottoreiden mitattuja ja laskettuja suoritusarvoja. Tässä luvussa käydään läpi protomoottoreiden suoritusarvojen mittaamisessa huomioon otettavat asiat ja laskentaohjelmiston esittely.

Tahtireluktanssimoottoreille ei ole toistaiseksi olemassa niiden suoritusarvojen mittaamiseen tarkoitettua standardia, koska nykyiset standardit eivät tunne tahtireluktanssimoottoreita tai taajuusmuuttajakäyttöjä. Induktiomoottorille on puolestaan olemassa useita eri mittausstandardeja, joista vuonna 2007 päivitetty IEC 60034-2-1 -standardi on merkittävin. Yksi syy IEC -standardin päivittämiseen oli, että sen haluttiin harmonisoituvan muiden kansainvälisten mittausstandardien kanssa. Harmonisoinnissa on onnistuttu hyvin kalorimetrikokeiden perusteella (Wenping 2009). Tulevaisuudessa on odotettavissa, että standardit tulevat koskemaan myös taajuusmuuttajakäyttöisiä tahtireluktanssimoottoreita. Tämän vuoksi on todennäköistä, että IEC 60034-2-1 -standardia päivitetään edelleen.

Seuraavaksi käydään läpi protomoottoreille tehdyt kokeet ja itse mittausproseduuri. Lisäksi esitetään protomoottoreiden mittaamisessa käytetyt mittausvälineet tarkkuuksineen. Tämän jälkeen tutustutaan protomoottoreiden laskentaan käytettävään Adept-laskentaohjelmistoon.

#### 3.1 Suoritusarvojen mittaaminen protomoottorista

Protomoottoreiden suoritusarvojen mittaamisessa on käytetty ABB Oy:n moottorit ja generaattorit Vaasan -yksikön testikentän laitteistoa. Täydellinen moottorin testaaminen vaatii useita eri mittauksia, jotka määritetään standardien avulla. Niinpä esimerkiksi IEC 60034-2-1 -standardin kanssa harmonisoituva IEEE 112 -standardi määrittelee hyvinkin tarkasti mittausmenetelmät induktiokoneille. Tarkka häviöiden jakautuminen vaatii

moottorille lämpenemä-, kuormitus- ja tyhjäkäyntikokeet. Tyypillisesti myös staattorin resistanssi mitataan kylmästä moottorista. (Malinen 2005: 45.) Edellä mainittujen kokeiden avulla moottorin häviöt voidaan jakaa kuormasta riippumattomiin häviöihin, kuormasta riippuviin häviöihin ja lisähäviöihin. Kuormasta riippumattomat häviöt muodostuvat kuormattoman tilan eli tyhjäkäyntitilan tuuletus- ja kitkahäviöistä ja rautahäviöistä. Kuormasta riippuvat häviöt muodostuvat puolestaan staattorin lämpötilakorjatusta virtalämpöhäviöstä moottoria kuormitettaessa. Lisähäviöt voidaan määrittää kuormituskokeen ja vääntömomenttimittauksen sekä tyhjäkäyntikokeen avulla. (IEC 2007: 44–49.)

Tämän työn protomoottoreiden mitatut suoritusarvot määräytyvät lähinnä kuormituskokeiden ja lämpenemäkokeiden tuloksista. Useista teknisistä syistä johtuen tyhjäkäyntikokeen suorittaminen ei ollut mahdollista. Oleellisin este oli, että moottori olisi pitänyt saada käynnistettyä tyhjäkäynnille käyttäen verkkosyöttöä. Tahtimoottorin käynnistäminen sinimuotoisella verkkosyötöllä ja moottorin saattaminen synkroninopeuteen ilman voimakonetta osoittautui tässä vaiheessa testikentän laitteistolle liian haastavaksi.

### 3.1.1 Mittauslaitteet ja niiden tarkkuus

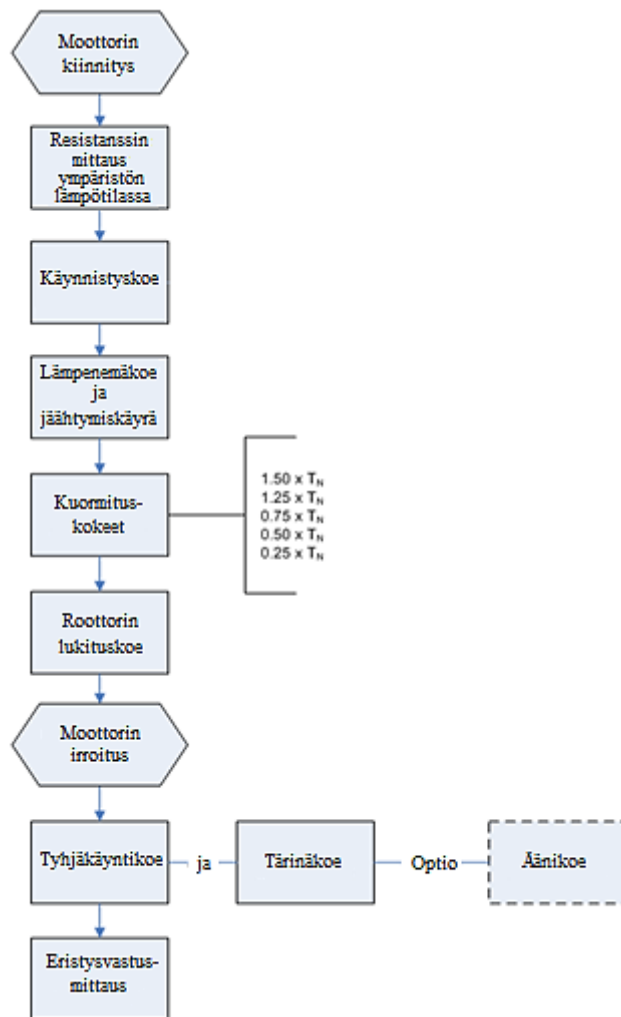
Taulukossa 2 on esitetty protomoottoreiden mittaamisessa käytetyt laitteet sekä kyseisten laitteiden tarkkuudet. ABB Oy:n moottorit ja generaattorit -yksikössä on järjestelmällinen seuranta laitteiden kalibroimiseen. Tietyn aikavälein suoritettu kalibrointi onkin edellytys useassa mittausstandardissa. Mittauslaitteiden tarkkuus on oleellinen asia tarkasteltaessa mittaustuloksia. Esimerkiksi usean kymmenyksen virhe vääntömomentin mittaavassa anturissa heijastuu suoraan hyötysuhteen vääristymiseen. Taulukosta 2 ilmenee myös IEEE 112 ja IEC 60034-2-1 -standardien yhteinen linja mittauslaitteille asetetuista tarkkuusvaatimuksista (Wenping 2009: 802). Laitteiden hyvistä tarkkuuksista huolimatta jokainen mittaus on yksilöllinen tapaus, mikä näkyy erityisesti lyhyissä mittaussarjoissa. Mittauslaitteiden tarkkuuden tarkka huomioiminen vertailuissa vaatisi useita mittaussarjoja sekä toistoja identtisissä olosuhteissa että niiden todellisen tarkkuuden osuus mittaussarjoissa selviäisi.

**Taulukko 2.** Tahtireluktanssimoottorien mittaamisessa käytetyt laitteet ja niiden tarkkuus.

Suure	Yksikkö	Laite	Tarkkuus	IEEE 112 ja IEC 60034-2-1
Teho	W	Norma D6266ME	± 0,025 %	± 0,2 %
Vaihevirta	A	Norma D6266ME	± 0,047 %	± 0,2 %
		Virtamuuntaja	± 0,2 %	
Vaihejännite	V	Norma D6266ME	± 0,074 %	± 0,2 %
Taajuus	Hz	Norma D6266ME	± 0,01 %	± 0,1 %
Pyörimisnopeus	1/min	Norma D6266ME	± 0,01 %	± 1 %
Vääntömomentti	Nm	T10F-005R	± 0,1 %	± 0,2 %
Resistanssi	Ω	Cropico Do 5000	± 0,03 %	± 0,2 %
Lämpötila	°C	Yokogawa LR8100	± (0,05 % + 0,2 °C)	± 1

### 3.1.2 Mittausproseduuri

Kuvassa 12 on esitetty ABB Oy:n moottorit ja generaattori -yksikössä käytettävä tyyppitestin mittausproseduuri. Esitettävä mittausproseduuri on tarkoitettu induktiomoottorille ja se on IEC:n ja IEEE:n standardien mukainen. Mittausproseduuria voidaan kuitenkin osittain soveltaa myös tahtireluktanssimoottoreille, jolloin protomoottoreiden suoritusarvot voidaan mitata. Tulevaisuudessa on odotettavissa, että tahtireluktanssimoottoreille tehdään omat standardit hyötysuhteen määrittämisestä. Standardit voisivat käsittää myös muut taajuusmuuttajan ohjaamat moottorit.

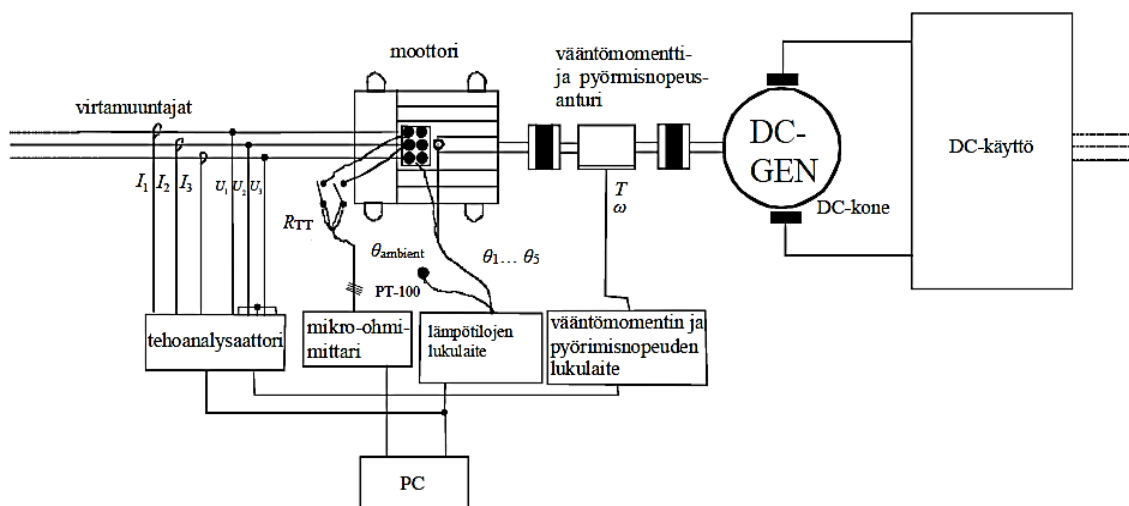


**Kuva 12.** ABB Oy:n moottorit ja generaattorit -yksikön käyttämän tyyppitestin mittausproseduuri induktiomootorille.

Tahtireluktanssimoottoreille on suoritettu mittausproseduurin mukaisesti ensin kylmän staattorin resistanssin mittaus ja lämpenemäkoje. Näistä kylmän staattorin resistanssin mittaus voidaan suorittaa kytkentäalustasta kahden liitäntäterminaalien välillä  $R_{TT}$ , esimerkiksi U1 ja V1. Vastaavasti sama tulos saadaan mittaamalla yhden vaihekäähmin resistanssi  $R_s$ , esimerkiksi U1 ja U2 ja kertomalla mittaustulos kahdella. Ympäristön lämpötila luetaan samanaikaisesti, jotta mitatulle resistanssille saadaan referenssi.

Mittausproseduurin mukaisesti resistanssimittauksen jälkeen suoritettaisiin moottorille käynnistyskoe, mistä selviäisi käynnistykseen aikainen suorituskyky. Tämä koe ei ole synkroniselle moottorille tai taajuusohjatulle moottorille aiheellinen.

Seuraavaksi moottorille voidaan tehdä lämpenemäkoje. Lämpenemäkojeita on suoritettu pääsääntöisesti myös tämän työn protomoottoreille. Kuvassa 13 on esitetty lämpenemäkojeen järjestelyssä käytetyt laitteet sekä periaatteellinen kytkentä.

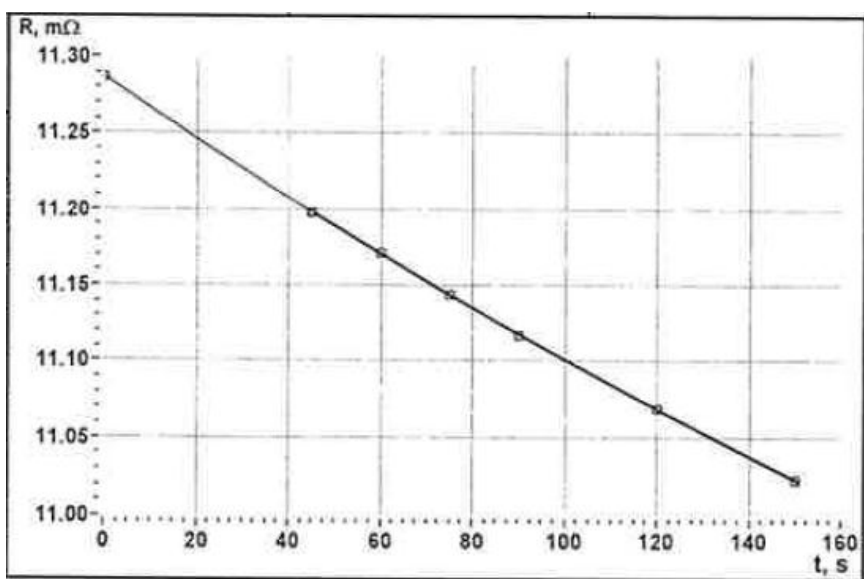


**Kuva 13.** Lämpenemäkojeessa käytettävät laitteet ja niiden periaatteellinen kytkentä (Malinen 2005: 47).

Lämpenemäkojeen tarkoituksena on selvittää moottorin lämpeneminen tietyllä kuormituksella. Mittauspisteet sijaitsevat tyypillisesti eri vaiheiden käämityksissä, laakeripesässä ja staattorirungon pinnassa. Myös ympäristön lämpötila mitataan. Moottoria kuormitetaan, kunnes sen lämpötila ei enää muutu. IEEE 112 -standardissa mainitaan, että koe päättyy kun lämpötila ei muutu yhtä celsiusastetta enempää 30 minuutin aikana. Kokeen päättymisen jälkeen moottorin syöttöteho katkaistaan ja moottori pyritään pysäyttämään nopeasti. Tämän jälkeen mitataan kahdesta

liitäntäterminaalista vaiheiden välinen resistanssi, minkä avulla staattorin virtalämpöhäviöihin vaikuttava staattorikäimityksen resistanssi saadaan selville.

Kuvassa 14 on esitetty erään moottorin lämpenemäkokeen jälkeen suoritettavan resistanssimittauksen tulos. Kuvaajaa kutsutaan jäähtymiskäyräksi. Siinä esitetään staattorikäimityksen resistanssi suhteessa aikaan, jonka nolлахetki on moottorin virransyötön katkaiseminen. Käämin lämpötila tasaantuu ja sen lämpö johtuu staattorin rautaan kohtalaisen nopeasti. Lämpötila voi pudota 10 kelviniä 90 sekunnin aikana. Kuvaajassa esitetyn staattorin lämpenemä on yhden sekunnin kohdalla 81,4 kelviniä ja vastaavasti 90 sekunnin kohdalla lämpenemä on 76,2 kelviniä.



**Kuva 14.** Erään protomoottorin jäähtymiskäyrä.

Kuten kuvasta 13 käy ilmi, niin lämpötilojen lisäksi moottorin virrat, jännitteet, pyörimisnopeus ja tehot mitataan lämpenemäkokeen yhteydessä. Myös tehokerroin saadaan mittalaitteiden avulla selville. Moottorin hyötysuhde puolestaan voidaan

selvittää moottoriin syötetyn ja akselilta saatavan tehon suhteesta. Kokonaisuudessaan lämpenemäkokeen avulla moottorin suorituskyky saadaan melko hyvin selvitettyä.

Mittausproseduurin loppuosion kokeita ei protomoottoreille tässä vaiheessa vielä suoritettu. Protomoottoreille ei myöskään suoritettu standardin mukaista kuormituskoetta eikä roottorin lukitsemiskoetta. Protomoottoreita kuormitettiin kuitenkin erilaisilla kuormilla, jotta useamman toimintapisteen suoritusarvot saatiin selville. Tyhjäkäyntikoetta ei myöskään suoritettu tahtireluktanssikoneille. Tyhjäkäyntikokeen avulla voitaisiin moottorista selvittää kuormasta riippumattomien häviöiden osuus kokonaishäviöistä. Näitä häviöitä ovat rautahäviöt sekä tuuletus- ja kitkahäviöt. Tyhjäkäyntikoekkeesta on hyvä huomioida, että joissakin standardeissa, kuten IEEE 112 –standardissa, on erikseen mainittu, että ennen tyhjäkäyntikoetta on moottoria käytettävä tyhjäkäynnissä useita tunteja, kunnes laakerien voitelurasva on tasaantunut (Institute of Electrical and Electronics Engineers 2004: 12). Tämä toimenpiteen johdosta ei mittaustuloksiin vaikuta laakerirasvan käyttömäärästä aiheutuvat häiriöt.

### 3.2 Suoritusarvojen laskeminen Adept-laskentaohjelmalla

Sähkökoneiden suoritusarvot ja häviöt voidaan laskea analyyttisiin kaavoihin perustuvilla menetelmillä tai elementtimenetelmään perustuvilla ohjelmilla. Analyyttisiin kaavoihin perustuvat menetelmät nojautuvat sähkömagneettisiin perusyhtälöihin, joiden tarkkuus on riippuvainen kokeellisista korjauskertoimista. (Nyblin 2002: 8.) Adept-laskentaohjelman S113-ratkaisija perustuu moottorin sijaiskytkennän analyttiseen ratkaisemiseen. Yksivaiheisesta sijaiskytkennästä voidaankin ratkaista moottorin kaikki halutut suorituskykyarvot analyttisesti. Käsin laskettaessa tähän kuluisi kohtuuttoman paljon aikaa. Adept-laskentaohjelmiston ja S113-ratkaisijan tarkoituksena on nopeuttaa sähkökoneiden suoritusarvojen laskemista. (Taipale 2008: 18.)

Elementtimenetelmään (FEM) perustuvat ohjelmat mahdollistavat analyttisiin menetelmiin nähden tarkemmat tulokset. Elementtimenetelmän tarkkuus on riippuvainen geometrian diskretoinnista. Elementit muodostavat alkuperäisen tehtävän osaratkaisut, joita laskemalla tulos saadaan lineaarisesti elementtien solmupisteistä. Tiheämpi elementtiverkko vaatii kuitenkin enemmän laskentatehoa ja täten laskenta-aikaa, mikä ei kuitenkaan ole ongelma käytettäessä nykyaikaisia tietokoneita tai hajautettua laskentaa. (Kinnunen 2004: 39; Ryyppö 2005: 35–36; Talvitie 2005: 55.) Elementtimenetelmän laskemat tulokset ovat numeerisia toimituksia laitteen sähkömagneettisista ja termisistä tiloista laskettavassa geometriassa. Elementtimenetelmä tarvitsee tyypillisesti vähintään kaksiulotteisen CAD -mallin laskettavasta geometriasta. Geometriassa olevan elementtiverkon kokoa voidaan tihentää laskennan tarkkuuden kannalta tärkeissä kohdissa ja harventaa vastaavasti kohdista, joissa suuri laskentatarkkuus ei ole oleellista. Pääsyy elementtimenetelmän vaatimaan pitkään laskenta-aikaan on suuri datamäärä, jota edellä mainitulla keinolla pyritään vähentämään. (Kinnunen 2004: 39.) FEM -laskenta jaetaan tyypillisesti kolmeen osaluokkaan, jotka ovat esikäsittely, tulosten laskenta ja jälkikäsittely. Esikäsittelyssä käsitellään tyypillisesti moottorin geometriaa, elementtiverkon rakentamista, materiaalien ominaisuuksia sekä virta- ja jännitelähteitä. Laskennan jälkeisessä jälkikäsittelyssä voidaan laskennan tuottamia tuloksia käyttää tutkiessa moottorin suorituskykyä eri kuormilla. (Kinnunen 2004: 39–40; Talvitie 2005: 56–69.)

Adept-laskentaohjelman FCSMEK-aliohjelma on Aalto-yliopiston sähkötekniillisen korkeakoulun kehittämä numeeriseen FEM -laskentaan perustuva ohjelma (Arkkio 2001). FCSMEK toimii Adeptissa S113:n ohella yhtenä ratkaisijana ja sen toimii kolmeosaisesti sisältäen esikäsittelyn, laskennan ja jälkikäsittelyn. Adept-ohjelma toimii esi- ja jälkikäsittelyohjelmana ja se on myös varsinaisten laskentaohjelmien ylin taso.

Varsinainen laskeminen suoritetaan FCSMEK-ratkaisijalla. FCSMEK sisältää useita sisäisiä ohjelmia ja asetuksia, joilla voidaan vaikuttaa laskentamenetelmään, -nopeuteen ja -tarkkuuteen. (Talvitie 2005: 56–69.)

Seuraavaksi käsitellään tämän työn kannalta FCSMEK:n oleelliset ominaisuudet, kuten sisäiset ratkaisijat SYDC, CIMAC ja CIMTD. Ennen FCSMEK:n sisäisiä ratkaisijoita FCSMEK käyttää MESH-lisäohjelmaa. MESH:n tehtävänä on muodostaa asetusten mukainen elementtiverkko esikäsittelystä saatavalle moottorin geometrialle. Elementtiverkon käsittelyssä on apuna sisäänrakennettu tiedosto, jossa on materiaalikohtaisia tietoja. (Arkkiio 2001: 5–11.)

*SYDC* on erityisesti tahtikoneille tarkoitettu kenttäratkaisija, jonka lasketatimet perustuvat staattorin kaksiakselimallin piiri- ja kenttäyhtälöihin. Toimintapisteen määrittämiseen tarvitaan kolme parametria, jotka ovat verkon pääjännite, virta ja navan kulma. Tuloksena saadaan kaksiakseliparametrien lisäksi ilmaväliteho ja tarkasteltavan toimintapisteen (Arkkiio 2001: 12–14.) *SYDC* hyvänä puolena on laskennan nopeus, mutta laskentatarkkuus ei ole hyvä.

*CIMAC* on aikaharmoninen ratkaisija, jossa kenttäsuureet oletetaan muuttuvan sinimuotoisesti. Tämän vuoksi aikariippuvuus eliminoidaan ja suureet voidaan esittää osoittimien avulla. Tämä vähentää merkittävästi laskenta-aikaa. Todellisuudessa kenttäsuureet eivät käyttäydy ideaalisen sinimuotoisesti ajan suhteen, joten *CIMAC* laskee erityisesti rautahäviöt väärin. *CIMAC*:n laskema tulos sisältää tavanomaisten suureiden, kuten tehon, vaihejännitteiden ja -virtojen lisäksi resistiivisten häviöiden jaottelun. (Arkkiio 2001: 15–19.)

*CIMTD* on aika-askelmenetelmään perustuva ratkaisija. *CIMTD* ratkaisee kenttä- ja piiriyhtälöt yhtäaikaaisesti. Tämä lisää laskenta-aikaa, mutta tulos on muita menetelmiä huomattavasti tarkempi. Roottorin pyörivä liike otetaan myös laskennassa huomioon. Roottorin pyörivä liike saadaan laskennassa aikaiseksi muuttamalla ilmavälin elementtiverkkoa ajan suhteen. *CIMTD* tuloksena saadaan tarkka tulos moottorin suorituskyvystä, mutta tulos on myös hyvin monimuotoinen. Tulos sisältää perustietojen lisäksi tarkan häviöjaottelun. Häviöjaottelusta käy ilmi, missä moottorin osissa resistiiviset häviöt ja rautahäviöt tapahtuvat. *CIMTD* hyvinä puolina voidaan lisäksi mainita mahdollisuus muuttaa syöttöjännitteen muotoa. (Arkkiio 2001: 19–24.) Adeptista voidaan muokata näitä aika-askelmenetelmän parametreja. Käytettävissä on

ideaalisen sinimuotoisen jännitteen lisäksi muun muassa yksinkertaistetut PWM ja kaksitasoinen DTC. Myös muita laskentaan liittyviä parametreja on muutettavissa. Laskentatarkkuutta voidaan muuttaa muokkaamalla muun muassa laskettavien jaksojen lukumäärää sekä askelten määrää jaksoa kohden. Kokemukseni osoittavat kuitenkin, että suhteettoman suurilla askelmäärillä ei saavuteta tarkkuudessa mitään merkittäviä etuja. Sitä vastoin laskenta-aika kasvaa kohtuuttomasti.

#### 4 TAHTIRELUKTANSSIKONEIDEN PROTOTYYPPIEN MITATUT JA LASKETUT SUORITUSARVOT

Tässä luvussa esitetään protomoottoreiden mitatut sekä vastaavien moottoreiden lasketut suoritusarvot. Käsiteltävinä protomoottoreina ovat 280- ja 315-runkokokojen moottorit. Protomoottoreiden roottorit ovat radiaalisesti laminoituja roottoreita. Passiiviosat kuten runko, liitäntäosat ja laakeri ovat samat kuin induktiomootorissa. Tuulettimien halkaisijat vaihtelevat mittauksittain. Protomoottoreiden staattorit perustuvat vastaavien kokoisten induktiomootoreiden staattoreihin. Staattorin rakenteeseen on kuitenkin suoritettu pieniä muutoksia, lähinnä tehollista lankalukua on muutettu. Myös käämitysten eristykset ovat samat, koska ABB käyttää pääsääntöisesti vahvennettua eristystä induktiomootoreissaan. Tällöin taajuusmuuttajan aiheuttamat korkeat ja jyrkkäreunaiset jänniteimpulssit eivät ole vaaraksi käämitykselle. Käytännössä tahtireluktanssimootoreissa ja induktiomootoreissa voidaankin käyttää identtisiä staattoreita, eristyksiä lukuun ottamatta. Tämä todetaankin useissa tutkimuksissa, jotka vertailevat induktiomootoria ja tahtireluktanssimootoria.

Laskettaessa protomoottoreiden suoritusarvoja ei kyseisten moottoreiden laskentaparametreja muuteta. Parametrit ovat peräisin protomoottoreiden suunnittelun aikaisista lähtöarvoista. Myöhemmin vertailuosiossa käsitellen mitattujen ja laskettujen moottoreiden suoritusarvojen eroavaisuudet. Suurimpien eroavaisuuksien syitä ja laskentamallien tarkentamista pohditaan työn lopussa.

Mitatut ja lasketut suoritusarvot eri toimintapisteissä painottuvat mittauksien mahdollistamiin ja samalla loppukäyttäjää kiinnostaviin suoritusarvoihin, kuten moottorin hyötysuhteeseen, sen kuluttamaan virtaan ja lämpenemään mekaanista tehoa kohden.

#### 4.1 Mitatut suoritusarvot

Mitatut suoritusarvot -luku jakautuu kahteen osaan. Ensin esitetään M3BL 280SMA 4 -moottorin mitatut suoritusarvot ja sitten M3BL 315SMC 4 -moottorin mitatut suoritusarvot. Mitatuille moottoreille oli pääsääntöisesti suoritettu kuormituskokeita ja lämpenemäkokeita, minkä ohella oleellisimmat mittaukset oli suoritettu. Kuormituskokeissa moottoreita on kuormitettu eri toimintapisteissä niin, että mitatut toimintapisteet painottuvat suuremmille tehoille eli moottoria käsitellään enemmän high-output -moottorina. Täten mittausten mielenkiintona on moottoreiden tarjoama suuri tehotiheys kuin niiden paras mahdollinen hyötysuhde tai moottorin viileys.

Tässä työssä tutkitaan mittaustuloksia, jotka on suoritettu ensimmäisille protomoottoreille. Kokeiden pääasiallinen tavoite on ollut tukea tutkimuksia uuden tuotesarjan parissa ja auttaa moottorin tuotteistamisprosessia. Kokeiden aikana myös tahtireluktanssikoneiden mittaustuloksia kehitettiin. Protomoottoreiden suoritusarvot on mitattu pääosin kevään ja kesän 2011 aikana ABB Oy:n testikentän henkilökunnan toimesta ennen tätä työtä. Mittauksia on suoritettu kohtalaisen paljon, mutta yhtenäistä mittaussarjaa ei ole. Täten mittaustuloksia on haasteellista käsitellä selkeimpien virheiden karsimiseksi.

Häviöiden jakautumista olen pohtinut saatavilla olevien mittausten avulla. Mittausten perustuessa kuormitus- ja lämpenemäkokeisiin, on häviöiden jakautumista haastavaa selvittää, koska tyhjäkäyntikokeen mahdollistama kuormasta riippumattomien häviöiden osuus ei ole tiedossa. Tahtireluktanssimoottoreista tiedetään kuitenkin, että häviöistä dominoivin ryhmä on staattorin virtalämpöhäviöt. M3BL 280SMA 4 -moottorille oli lisäksi suoritettu moottorin hidastuvuuskoe, joten mekaaniset häviöt saadaan selville.

Protomoottorit toimivat pääsääntöisesti taajuusmuuttajakäyttöisinä, jolloin moottorien hyötysuhdeprosentti on hieman huonompi niille syötettävän epäsinimuotoisen jännitteen ja -virran vuoksi. Myös systeemin kokonaishyötysuhde on taajuusmuuttajakäytössä tällöin hieman heikompi. Taajuusmuuttajakäytöissä on hyvä huomioida, että uusimpien

taajuusmuuttajien hyötysuhde vaihtelee kuormitusalueella tyypillisesti noin 94–96 %, joten suurempi painoarvo on moottorin hyötysuhteilla tutkiessa systeemin kokonaishyötysuhdetta. (Sivunen 2011: 42–43.) Tämän työn tahtireluktanssimoottoreiden hyötysuhde on laskettu perusaallon ensimmäisen harmonisen perusteella. Tämän johdosta toimintapisteiden suoritusarvojen tulkitsemisesta ja laskemisesta tulee suoraviivaisempaa, koska vääntömomenttiin suoraan vaikuttava perusaallon suuruus on tiedossa. Myös protomoottoreiden vertailu induktiomootoreihin onnistuu helpommin.

#### 4.1.1 M3BL 280SMA 4

M3BL 280SMA 4 -protomoottorin mitatut suoritusarvot eri toimintapisteissä on esitetty taulukossa 3. Eri toimintapisteitä mitattiin neljällä eri pyörimisnopeudella. Kunkin nopeuden testaaminen on loppunut maksimimomenttiin, jossa moottori ei putoa vielä tahdistä. 280SMA 4 -moottorin mittaukset painottuvat kentänheikennysalueelle, jossa jännite ei riitä moottorin optimaaliseen suorituskykyyn. Moottori oli pääsääntöisesti ACS850-taajuusmuuttajan syöttämä. ACS850 perustuu DTC- tekniikkaan eli suoraan momentinsäätöön. Protomoottorissa käytettiin vakiotuuletinta kooltaan 270 mm, joka on käytössä myös vastaavan kokoisessa induktiomootorissa.

Taulukon 3 mittaustuloksista voidaan todeta, että tahtireluktanssimoottorin hyötysuhde on erittäin hyvä jokaisessa toimintapisteessä. Myös suurilla high-output -tehoilla hyötysuhde on hyvä. Tehokerroin on kohtalaisen hyvä, vaikka reluktanssimoottoreiden heikkoutena on nimenomaan ollut huono tehokerroin. Vertailun vuoksi M3BP 280SMA 4 induktiomootorin tuote-esitteissä ilmoitettu hyötysuhde 75 kW:n teholla on 94,5 % ja tehokerroin 0,85, joten tahtireluktanssimoottori tarjoaa samalla teholla paremman hyötysuhteen, vaikka pyörimisnopeus olisikin enemmän kuin 1500 rpm. Protomoottorin mitattuja hyötysuhteita tulee kuitenkin tulkita kriittisesti.

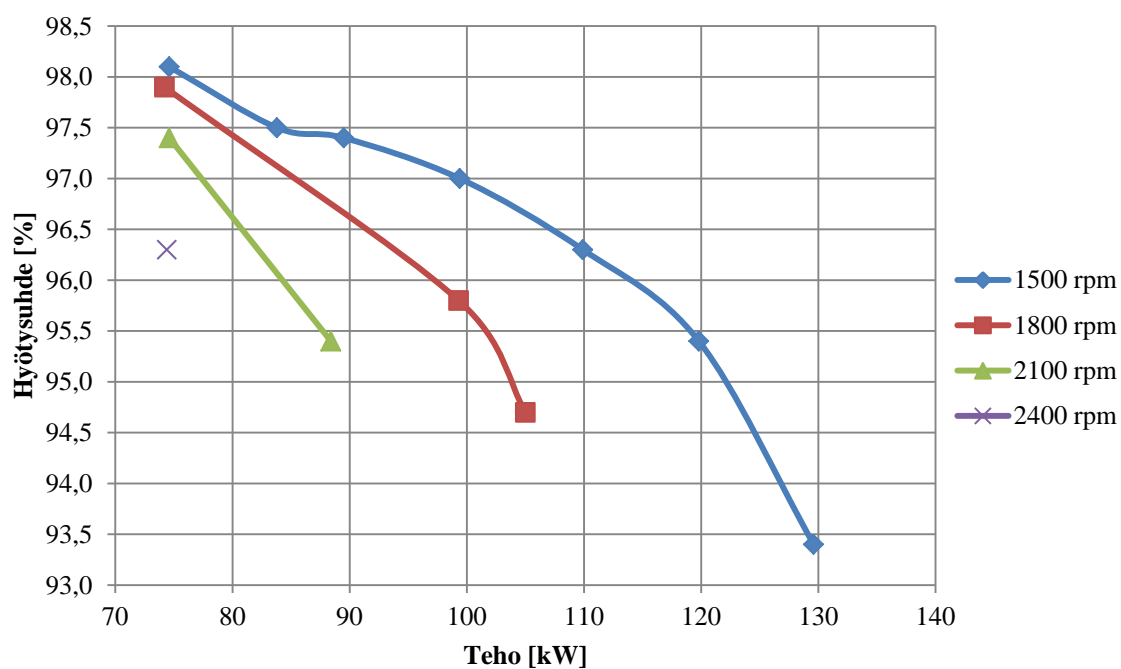
Taulukossa 3 on ilmoitettu moottoriin syötetyn pääjännitteen tehollisarvon  $U_{in}$  lisäksi moottoriin syötetyn pääjännitteen perusaallon tehollisarvo  $U_{h1}$ . Tämä mittaus on oleellinen, koska vain perusaallon voidaan katsoa olevan vääntömomenttia tuottava

komponentti. Viimeisessä sarakkeessa on ilmoitettu staattorikäimityksen maksimilämpenemä  $\theta_{Cu,max}$ .

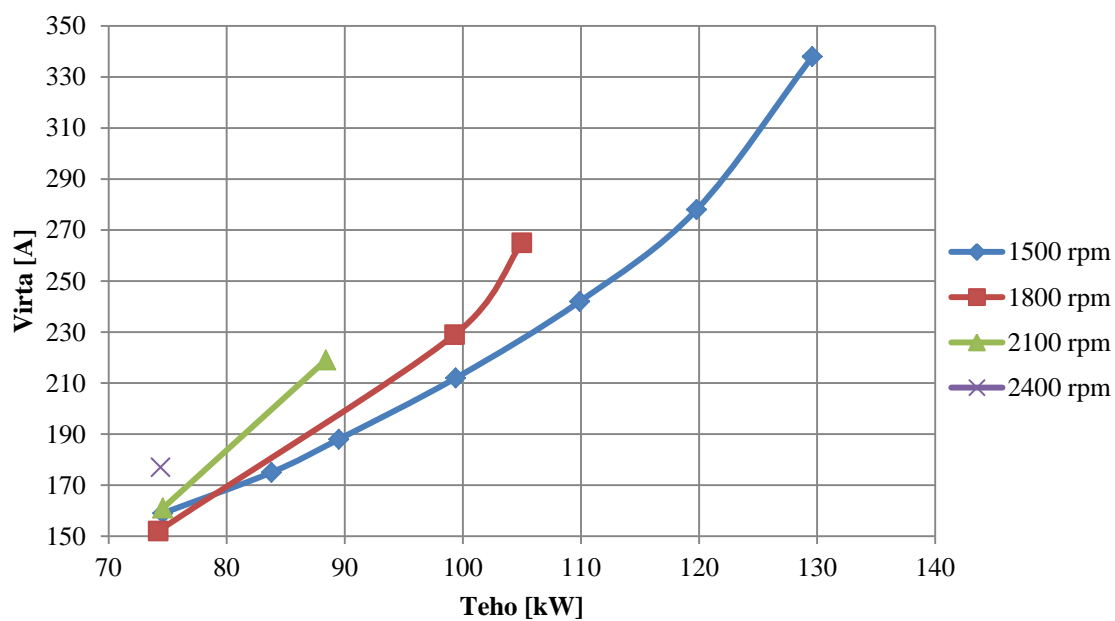
**Taulukko 3.** M3BL 280SMA 4 -protomoottorin mitatut suoritusarvot eri toimintapisteissä.

$P_{out}$ [kW]	$T$ [Nm]	$I_s$ [A]	$U_{in}$ [V]	$U_{hl}$ [V]	$n$ [rpm]	$\cos \varphi$	$\eta$ [%]	$\theta_{Cu,max}$ [K]
74,6	474,92	159	380,9	354,3	1500	0,78	98,1	42,5
83,8	533,49	175	381,0	364,5	1500	0,78	97,5	46,0
89,5	569,77	188	380,9	364,9	1500	0,77	97,4	50,0
99,4	632,80	212	381,2	362,7	1500	0,77	97,0	62,0
109,9	699,65	242	381,1	361,7	1500	0,75	96,3	72,4
119,8	762,67	278	381,2	360,9	1500	0,72	95,4	90,0
129,6	825,06	338	381,4	360,1	1500	0,66	93,4	125,8
74,2	393,64	152	380,7	367,0	1800	0,78	97,9	70,9
99,3	526,80	229	381,1	362,2	1800	0,72	95,8	98,4
105,0	557,04	265	381,2	361,5	1800	0,67	94,7	108,4
74,6	339,23	161	380,7	356,9	2100	0,75	97,4	84,5
88,4	401,98	219	380,9	363,3	2100	0,67	95,4	88,2
74,4	296,03	177	380,7	365,4	2400	0,69	96,3	74,7

Kuvassa 15 on esitetty mittaustuloksista piirretty hyötysuhde tehon funktiona. Kuvasta ilmenee, että hyötysuhde laskee miltei lineaarisesti mitatulla kuormitusalueella. Kokonaisuudessaan hyötysuhde on hyvä kaikilla nopeuksilla koko tehoalueella. Hyötysuhde laskee suuremmilla taajuuksilla ja pyörimisnopeuksilla, koska erityisesti mekaaniset häviöt ja rautahäviöt lisääntyvät. Mittauspisteiden pääasiallinen sijainti kentänheikennysalueella myös romahduttaa hyötysuhteen nopeasti. Viimeisin mittauspiste vaikuttaa eniten hyötysuhteen alenemiseen, koska kyseisessä pisteessä moottori toimii maksimiteholla. Mittauksien maksimitehoa kuvastaa se, että pienikin tehon lisääminen pudottaisi moottorin tahtinopeudesta.



**Kuva 15.** Mitattu M3BL 280SMA 4 -moottorin hyötysuhde tehon funktiona.



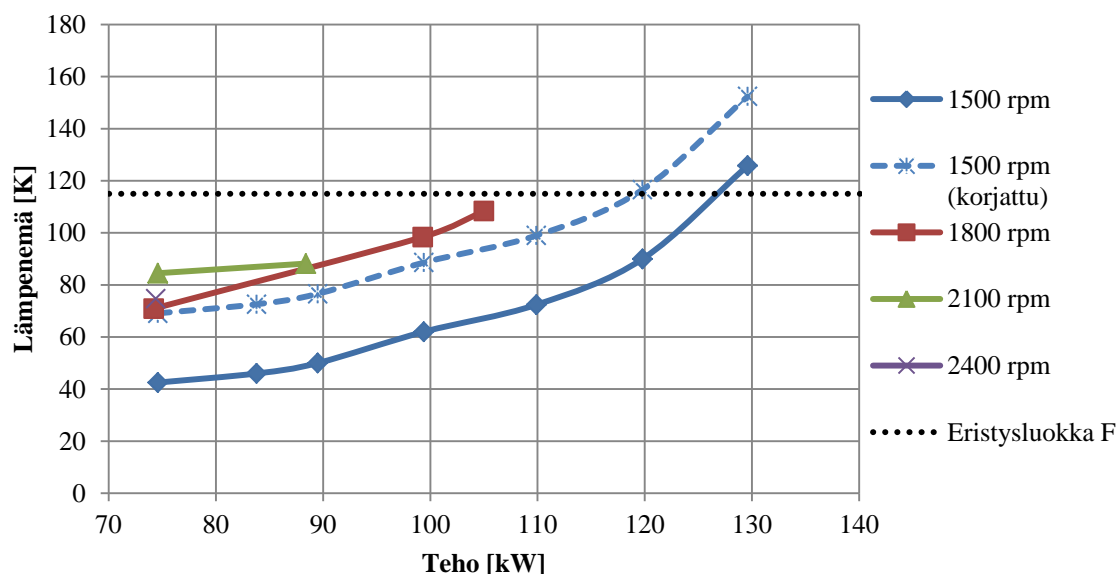
**Kuva 16.** Mitattu M3BL 280SMA 4 -moottorin virra tehon funktiona.

Suurempi teho ja suuremmat häviöt ilmentyvät myös kuvasta 16. Tehoa nostaessa virran tarve kasvaa lineaarisesti. Samanaikaisesti kokonaishäviöiden suhteellinen osuus kasvaa syöttötehon kasvaessa, mikä näkyy suurempana virtana. Suuremman virran ohella moottori lämpenee enemmän.

Kuvassa 17 on esitetty staattorikämmityksen maksimilämpenemät. Suuremman tehon myötä staattorihäviöihin neliöllisesti vaikuttava virran kasvu vaikuttaa voimakkaasti staattorikämmityksen lämpenemään. Kuvasta 17 on huomioitava, että suuremmat pyörimisnopeudet vaatisivat enemmän mittauksia, että korrekti lämpenemä ilmenisi. Pyörimisnopeuden ollessa 1500 rpm staattorikämmityksen lämpenemään tulee myös suhtautua kriittisesti. Mittausten suoritusajat näyttävät, että moottori ei ole saavuttanut ensimmäisessä mittauspisteessä toimintalämpötilaansa. Tämä vaikuttaa lämpenemän lisäksi myös hyötysuhteeseen. 75 kW:n teholla on suoritettu myös useamman tunnin kestänyt koeajo, jonka avulla voidaan luoda korjattu käyrä lämpenemälle. Korjattu käyrä käyttäytyy odotetummin ja viimeisen tehon lämpenemän arvo voidaan tarkistaa Adept-laskentaohjelmistolla.

Liitteessä 1 on esitetty lämpenemälaskennan tulos suurimmalla teholla. Stator max ja stator Average -kohdat ilmaisevat staattorin maksimi- ja keskiarvolämpenemää. Lämpenemälaskentaa ei ole vielä viritetty toimimaan täydellisesti tahtireluktanssimoottoreiden kanssa, mutta tähän saakka kertyneet kokemukset osoittavat, että laskettu lämpenemä saadaan oikein korjauskertoimien avulla. Maksimilämpenemää arvioidessa korjauskerroin on 1,2. Nyt liitteen 1 tuloksesta loppuhetken staattorikämmityksen maksimilämpenemäksi saadaan korjauskertoimen avulla noin 165 K. Kuvan 17 korjattu lämpenemäkäyrä 1500 rpm pyörimisnopeudella ja suurimmalla teholla näyttää loppulämpenemäksi noin 155 K. Täten yhden mitatun ja yhden lasketun pisteen avulla voidaan korjauskäyrän todeta olevan todennukaisempi, kuin mitä mittaustulokset antavat lämpenemästä ymmärtää.

Kuvaan 17 on lisätty myös eristysluokan F lämpenemäraja, joka on termoparilla mitattuna 115 kelviniä. Suurin osa mittauksista jää tämän raja-arvon alapuolelle, joten moottorit kuuluvat rajan alle jäävien tehojen suhteen eristysluokkaan F.



**Kuva 17.** Mitattu M3BL 280SMA 4 -moottorin staattorikäimityksen maksimilämpenemä tehon funktiona.

Protomoottorin häviöt voidaan karkeasti jaotella, mikä on apuna vertailtaessa ja pohdittaessa mitattujen ja laskettujen suoritusarvojen eroja. Mittaustuloksista löytyy kuormituskokeiden ohella yksi lämpenemäkoee, jossa moottoria on kuormitettu neljä tuntia noin 90 kW teholla. Lisäksi M3BL 280SMB -moottorille on suoritettu hidastuvuuskoee. Näiden kokeiden avulla saadaan selville kohtalaisen hyvin, kuinka suuri on kuormasta riippuvien ja tuuletus- ja kitkahäviöiden osuus kokonaishäviöistä. Jäljelle jäävä häviöosuus muodostuu rauta- ja lisähäviöistä.

Lämpenemäkoeeissa staattorikäimityksen lämpötila ei nouse enää yhtä kelviniä enempää viimeisen puolen tunnin aikana, joten koee päättyy. Taulukossa 4 on esitetty lämpenemäkoeeen lopputulokset, missä  $v$  on ympäristön lämpötila.

**Taulukko 4.** M3BL 280SMA 4 -protomoottorin lämpenemäkoeeen tulokset.

$P_{out}$ [kW]	$T$ [Nm]	$I_s$ [A]	$U_{in}$ [V]	$U_{h1}$ [V]	$n$ [rpm]	$\cos \varphi$	$\eta$ [%]	$\theta_{Cu,max}$ [K]	$R_{TT}$ [m $\Omega$ ]	$v$ [°C]
90,48	576,14	191,67	416,9	364,7	1500	0,77	96,43	87,6	41,298	23,5

Yhtälön 31 avulla voidaan laskea kyseisen moottorin staattorin virtalämpöhäviöt. Taulukon 4 tiedoilla virtalämpöhäviöiksi saadaan 2276 W. Käyttäen yhtälöitä 32 ja 33 saadaan virtalämpöhäviöt korjattua lämpötilakertoimella. Lämpötilakorjattuna virtalämpöhäviöt ovat 2286 W.

Liitteessä 2 on esitetty M3BL 280SMB 4 -moottorin hidastuvuuskokeen tulokset. Käyrästä voidaan kulmakertoimen avulla määrittää yhtälössä 37 tarvittavat tiedot. SMB:ssä roottorin pituus on 250 mm ja se on 40 mm pitempi kuin SMA:n roottori. Roottorin hitausmomentti on SMB:ssä  $0,9999 \text{ kgm}^2$  ja se on 16,5 % suurempi kuin SMA:ssa. Induktiomoottoreiden mittaustulosten perusteella ei M3BP 280SMA 4 - ja M3BP SMB 4 -moottoreiden välillä ei ole selvää eroa mekaanisten häviöiden suuruudessa, joten kyseisten moottorien laskennassa voidaan käyttää molemmissa samansuuruisia häviötä. Tätä tietoa voidaan soveltaa myös tämän työn tahtireluktanssimoottoreihin. Mekaanisten häviöiden mittaamisesta tulee myös huomioida, että moottorin kokoonpano vaikuttaa voimakkaasti mittaustuloksiin. Suuri laakerirasvamäärä tai hankaava tiiviste voivat aiheuttaa useiden kymmenien wattien lisähäviöt mekaanisiin häviöihin. Liitteen 2 tuloksesta voidaan mekaanisten häviöiden tulkita olevan M3BL 280SMA 4 -moottorissa noin 500 W.

Taulukon 4 tulosten perusteella moottorin kokonaishäviöksi saadaan 3350 W, hyötysuhteen ollessa 96,43 %. Kokonaishäviöistä 2276 W on staattorin virtalämpöhäviöitä ja 500 W on mekaanisia häviöitä. Kokonaishäviöistä jäljelle jäävä osuus muodostuu rauta- ja lisähäviöistä. Näiden häviöiden osuus on yhteensä 574 W. Tästä häviötehosta rautahäviön osuus on merkittävästi suurempi. Tyypillisesti elementtimenetelmään perustuvat laskentaohjelmat eivät ilmoita erikseen lisähäviöiden osuutta vaan ne sisältyvät myös rautahäviöihin. Virtalämpöhäviöiden lämpötilan korjauskertoimen käyttämisestä on huomioitava, että se vaikuttaisi suoraan rauta- ja lisähäviöihin, jotka määritetään nyt kokonaishäviöistä erotuksena. Korjauskertoimen käyttäminen mahdollistaisi kuitenkin virtalämpöhäviöiden vertaamisen keskenään.

## 4.1.2 M3BL 315SMC 4

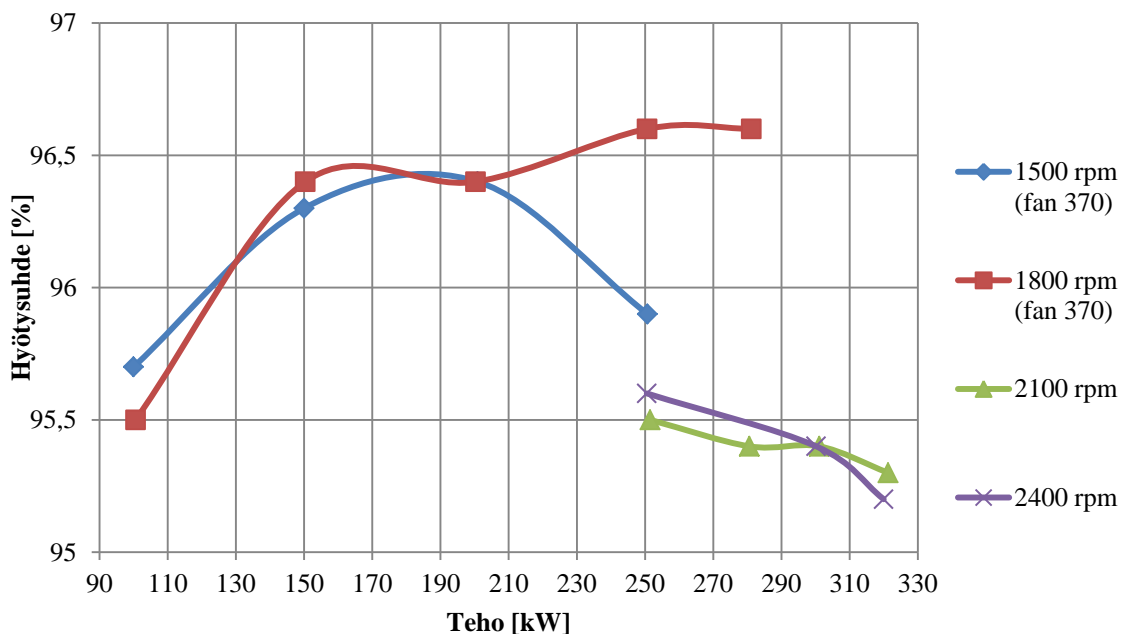
M3BL 315SMC 4 -protomoottoreiden mitatut suoritusarvot eri toimintapisteissä on esitetty taulukossa 5. Toimintapisteitä on mitattu neljällä eri pyörimisnopeudella. Pyörimisnopeudet ja taajuudet ovat samat kuin 280-runkokoon mittauksissa. Myös 315SMC 4 -moottorit olivat pääsääntöisesti ACS850-taajuusmuuttajan syöttämiä. Moottoreissa käytettiin kahta erikokoista tuuletinta. Hitaammilla pyörimisnopeuksilla 1500 ja 1800 rpm käytettiin tuuletinta, jonka halkaisija oli 370 mm. Suuremmilla nopeuksilla 2100 ja 2400 rpm käytettiin hieman pienempää tuuletinta, jonka halkaisija oli 350 mm. Tämä tulee ottaa huomioon vertailtaessa mittaustuloksia keskenään.

**Taulukko 5.** M3BL 315SMC 4 -protomoottoreiden mitatut suoritusarvot eri toimintapisteissä.

$P_{out}$ [kW]	$T$ [Nm]	$I_s$ [A]	$U_{in}$ [V]	$U_{h1}$ [V]	$n$ [rpm]	$\cos \varphi$	$\eta$ [%]	$\theta_{Cu,max}$ [K]
100,0	636,49	258,37	460,6	329,6	1500	0,691	95,7	102,9
150,0	955,06	356,47	444,6	360,6	1500	0,702	96,3	90,2
200,9	1278,97	451,27	433,0	378,3	1500	0,704	96,4	95,9
250,7	1596,01	547,67	476,8	394,1	1500	0,698	95,9	143,9
100,6	533,49	233,6	421,3	363,7	1800	0,714	95,5	51,4
150,3	797,53	325,0	417,4	360,6	1800	0,768	96,4	52,4
200,3	1062,52	436,7	413,6	357,2	1800	0,768	96,4	59,8
250,6	1329,53	468,9	494,7	431,7	1800	0,739	96,6	100,0
281,2	1491,55	524,3	492,8	429,8	1800	0,745	96,6	98,1
251,5	1143,64	576,9	408	350,7	2100	0,752	95,5	90,6
280,6	1275,97	634,4	409,3	355,8	2100	0,752	95,4	104,6
301,1	1369,19	675,4	410,2	358,6	2100	0,752	95,4	116
321,3	1461,04	717,6	410,4	361,1	2100	0,752	95,3	130,4
250,5	996,71	526,9	420,4	373,5	2400	0,769	95,6	80,5
300,2	1194,46	637,8	417,2	368,1	2400	0,774	95,4	106,4
320,0	1273,24	684,6	415,7	367,6	2400	0,771	95,2	121,1

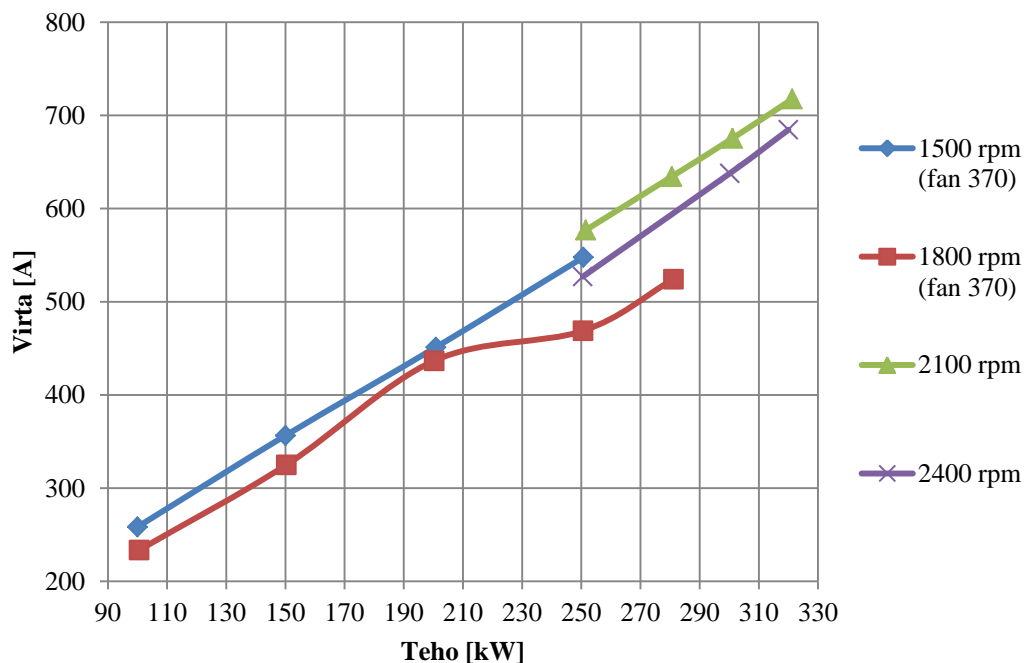
Protomoottorin suorituskykyä voidaan verrata vastaavan kokoiseen induktiomoottoriin. M3BP 315SMC 4 -induktiomoottorin tuote-esitteessä ilmoitettu hyötysuhde 160 kW:n teholla on 95,6 % ja tehokerroin 0,85. Taulukossa 5 esitetyistä mittaustuloksista ilmenee, että protomoottorin hyötysuhde on noin 0,7 prosenttiyksikköä parempi, kun pyörimisnopeus on 1500 rpm, mikä vastaa nelinapaista induktiomoottoria.

Kuten taulukon 5 tuloksista ja kuvasta 18 käy ilmi, niin protomoottoreita on kuormitettu kahdella eri tehoalueella. Pienemmillä pyörimisnopeuksilla mittaukset painottuvat pienemmille tehoille ja suuremmilla pyörimisnopeuksilla suuremmille tehoille. Kuvasta 18 ilmenee myös, että vaikka eri pyörimisnopeuksien mittaustulosten hyötysuhteet eroavat vain marginaalisesti toisistaan, on 1800 rpm kahdessa viimeisessä mittauspisteessä, eli kyseisen mittaussarjan suurimmissa tehotoimintapisteissä, jotain muiden mittausten trendistä eroavaa. Tämä selittyy sillä, että kyseisissä mittauspisteissä käytetään suurempaa pääjännitettä. Pääjännite on kuitenkin rajoitettu, joten joissakin toimintapisteissä moottori voisi toimia optimaalisemminkin.



**Kuva 18.** Mitattu M3BL 315SMC 4 -moottorin hyötysuhde tehon funktiona.

Kuvassa 19 on esitetty virrat tehon funktiona. Tulokset vahvistavat, että pyörimisnopeuden 1800 rpm mittauspisteet eivät käyttäydy yhtä lineaarisesti kuin muut mittaukset, koska pääjännitettä on muutettu. Poislukien 1800 pyörimisnopeudella tehdyt mittaukset, ovat virtamittaukset johdonmukaisia – tehon kasvaessa virta kasvaa lineaarisesti.

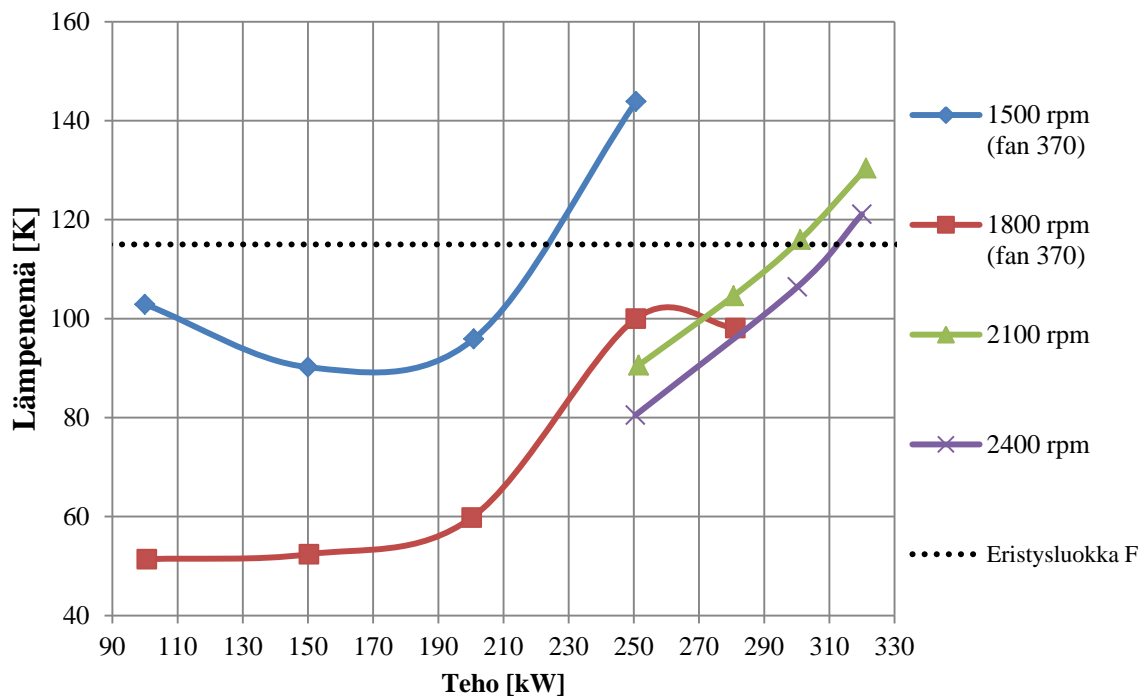


**Kuva 19.** Mitattu M3BL 315SMC 4 -moottorin virta tehon funktiona.

Staattorikäämyksien maksimilämpenemässä on enemmän poikkeamia kuin muissa mitatuissa suureissa. Tulokset on esitetty kuvassa 20. Suuremmilla pyörimisnopeuksilla lämpenemä käyttäytyy tehon suhteen oletetusti. Pienemmillä pyörimisnopeuksilla on havaittavissa muutama poikkeama mittaussarjan trendistä. Pyörimisnopeudella 1800 rpm staattorikäämyksen lämpenemä käyttäytyy oletetulla tavalla, pienemmillä tehoilla lämpenemä ei ole suurta ja nostettaessa tehoa kohti maksimitehoa, lämpenemä kasvaa

voimakkaasti. Viimeinen mittaus ei ole kuitenkaan linjassa muiden mittauspisteiden kanssa.

Pyörimisnopeuden ollessa 1500 rpm staattorikäätymyksen maksimilämpenemä käyttäytyy oletetusti vain suuremmilla tehoilla, erityisesti kaksi viimeistä mittauspistettä on lämpenemäkokeiden tuloksilla varmistettuja. Kaksi ensimmäistä tehoa sitä vastoin eivät mukaile muita mittaussarjoja. Tämä johtuu siitä, että teholtaan pienimmät toimintapisteet ovat osakuormakokeista, joissa moottoria on ennen näitä mittauksia kuormitettu jo kyseisen sarjan kahdella suurimmalla teholla. Tämän vuoksi moottorin massaan on varastoitunut edellisistä mittauksista vielä lämpöenergiaa, mikä näkyy vielä näissä pienemmän tehon mittauspisteissä. Suurin osa mittauspisteistä, muutamaa mittauspistettä lukuun ottamatta, sijaitsee eristysluokan F raja-arvon alapuolella. Rajan yli menevät mittauspisteet kuuluvat H-eristysluokkaan.



**Kuva 20.** Mitattu M3BL 315SMC 4 -moottorin staattorikäätymyksen maksimilämpenemä tehon funktiona.

Taulukossa 6 on esitetty erään onnistuneen lämpenemäkokeen tulokset M3BL 315SMC 4 -moottorille. Tuloksista ilmenee, että ne ovat yhdenmukaiset vastaavan toimintapisteen mittaustuloksien kanssa. Lämpenemäkokeen tuloksissa on kuitenkin häviöiden jaotteluun olennaisia tietoja, joita ei kuormituskokeesta saada.

**Taulukko 6.** M3BL 315SMC 4 -protomoottorin lämpenemäkokeen tulokset.

$P_{out}$ [kW]	$T$ [Nm]	$I_s$ [A]	$U_{in}$ [V]	$U_{h1}$ [V]	$n$ [rpm]	$\cos$ $\phi$	$\eta$ [%]	$\theta_{Cu,max}$ [K]	$R_{TT}$ [m $\Omega$ ]	$v$ [°C]
200,6	1277	449,3	419,6	365,2	1500	0,73	96,63	98,9	11,287	23,7

Taulukon 6 tulosten perusteella moottorin kokonaishäviöksi saadaan 7000 W, hyötysuhteen ollessa 96,63 %. Yhtälön 31 avulla voidaan laskea kyseisen moottorin staattorin virtalämpöhäviöt, jolloin taulukon 6 tiedoilla virtalämpöhäviöiksi saadaan 3418 W. Lämpötilakorjattuna virtalämpöhäviöt ovat 3430 W. Tälle moottorityypille ei ole mitattu roottorin hidastuvuutta, joten mekaanisten häviöiden mitattua osuutta ei ole tiedossa. Mekaanisten häviöiden osuus voidaan kuitenkin päätellä vastaavan kokoisen induktiomootorin mekaanisista häviöistä, jotka ovat 1000 W. Tällöin kokonaishäviöistä jäljelle jäävä rauta- ja lisähäviöiden osuus on 2582 W.

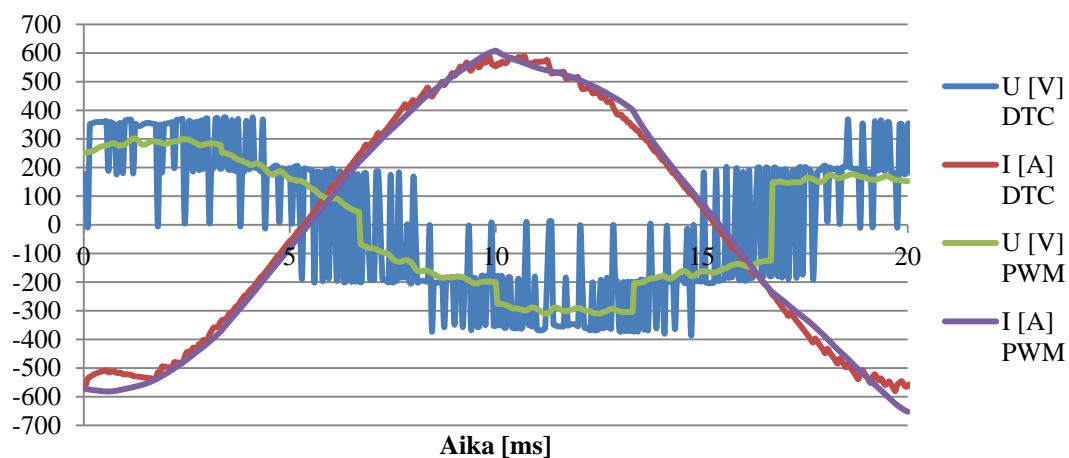
#### 4.2 Lasketut suoritusarvot

Suoritusarvojen laskemisessa käytettiin Adept-laskentaohjelmaa sekä FCSMEK-ratkaisijaa. FCSMEK:ssä suoritusarvojen laskemisessa hyödynnettiin CIMTD:tä, joka on aika-askelmenetelmään perustuva ratkaisija. Aika-askelmenetelmällä laskenta-ajat ovat staattiseen ratkaisijaan nähden huomattavasti pidemmät, mutta hajautetun laskennan ansiosta yhden moottorin suoritusarvot voitiin ratkaista kohtalaisessa 5–20 minuutin ajassa. Aika-askelmenetelmän asetuksien parametreja voitiin lisäksi käyttää

laskemisessa hyväksi. Mitatut pisteet simuloitiinkin ideaalisella sinisyötöllä sekä DTC- ja PWM -syötöillä. Kullakin syöttötyypillä pääjännitteeksi määritettiin sama pääjännitteen ensimmäisen harmonisen tehollisarvo kuin mittauspisteissä oli mitattu. Tämä siksi, että joissakin mittauspisteissä pääjännitettä oli nostettu merkittävästi.

Syöttöjen laskentaparametrit asetettiin niin, että sinisyöttö laski laskut kolmella periodilla ja aika-askeleita oli 200. DTC:ssä aika-askeleet olivat 400 ja periodeja oli kaksi. Vaikka periodeja oli vain kaksi, niin DTC:n laskenta-aika oli selvästi pisin. Lisäksi FCSMEK:n sisäisiä parametreja muutettiin siten, että DTC:llä kytkentätaajuus oli noin 3 kHz. PWM:ssä laskentajaksoja oli yksi ja aika-askeleita 500. Aika-askeleiden määrästä voidaan todeta, että jo 200 aika-askelta riittää tarpeeksi tarkkaan laskentatulokseen. Aika-askeleita lisäämällä ei laskentatarkkuutta saada merkittävästi nostettua suhteessa laskenta-ajan lisääntymiseen. Koska eri syötöissä käytetään erilaisia jaksomääriä, eivät tulokset ole keskenään täysin vertailukelpoisia.

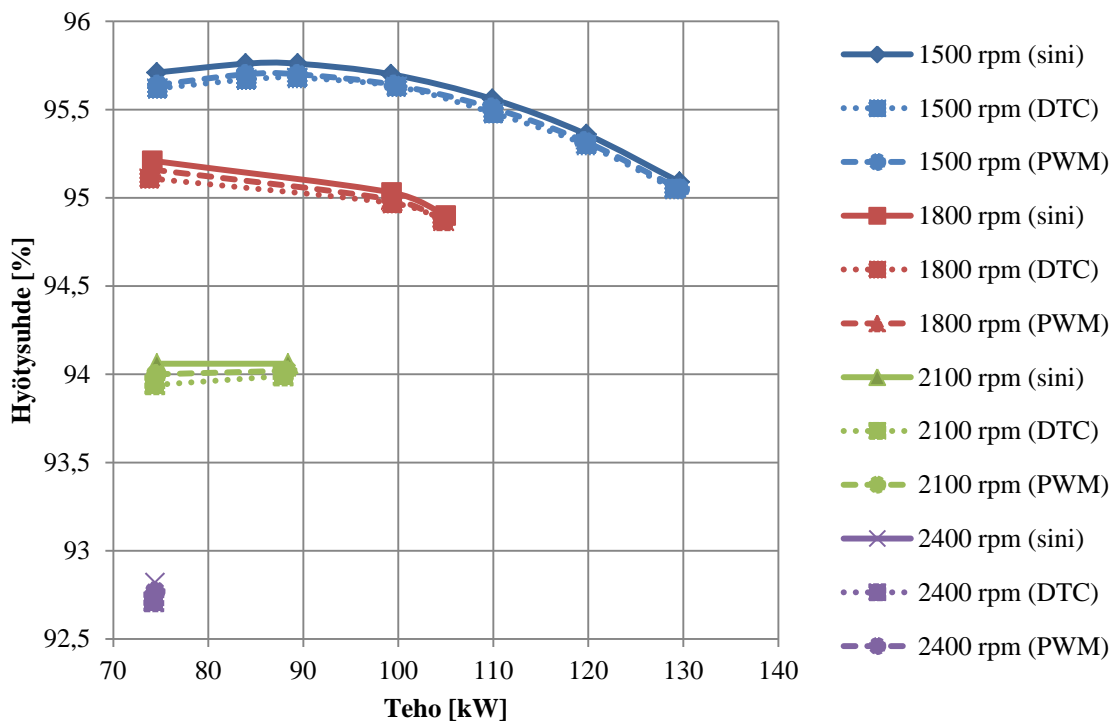
Kuvassa 21 on esitetty DTC- ja PWM -syöttöjen vaihejännitteiden ja -virtojen käyrät. Jännitteet ja virrat on piirretty Adeptin jälkikäsittelytiedoista. Merkittävin huomio kuvaajista on, että DTC:n vaihejännite on huomattavasti säröytyneempää kuin PWM:n. Tämä ero tulee näkymään laskentatuloksissa.



**Kuva 21.** DTC ja PWM -syöttöjen vaihejännitteet ja -virrat.

## 4.2.1 M3BL 280SMA 4

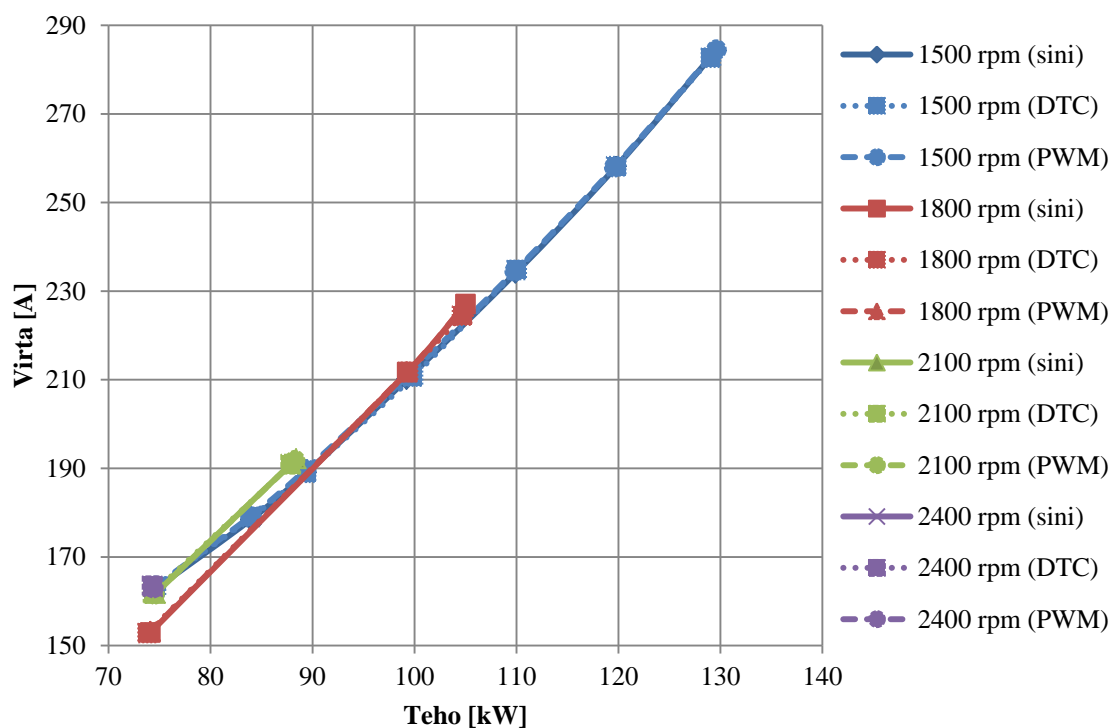
Liitteessä 3 on esitetty Adeptin ja FCSMEK:n lasketut suoritusarvot mittauspisteitä vastaavilla arvoilla. Liitteen 3 tuloksista on piirretty kuvat 22–24. Kuvassa 22 on esitetty hyötysuhteet. Kuvasta ilmenee, että lasketut hyötysuhteet käyttäytyvät loogisesti – maksimitehoilla ja suurella pyörimisnopeudella hyötysuhde heikkenee. Kuvasta ilmenee myös, että syötön muoto vaikuttaa vain marginaalisesti hyötysuhteisiin. Erot ovat kuitenkin havaittavissa siten, että sinimuotoisella syötöllä FCSMEK laskee parhaimmat hyötysuhteet. Myös PWM:n ja DTC:n jännitteen säröytymisen vaikutukset ilmenevät marginaalisina eroina hyötysuhteissa.



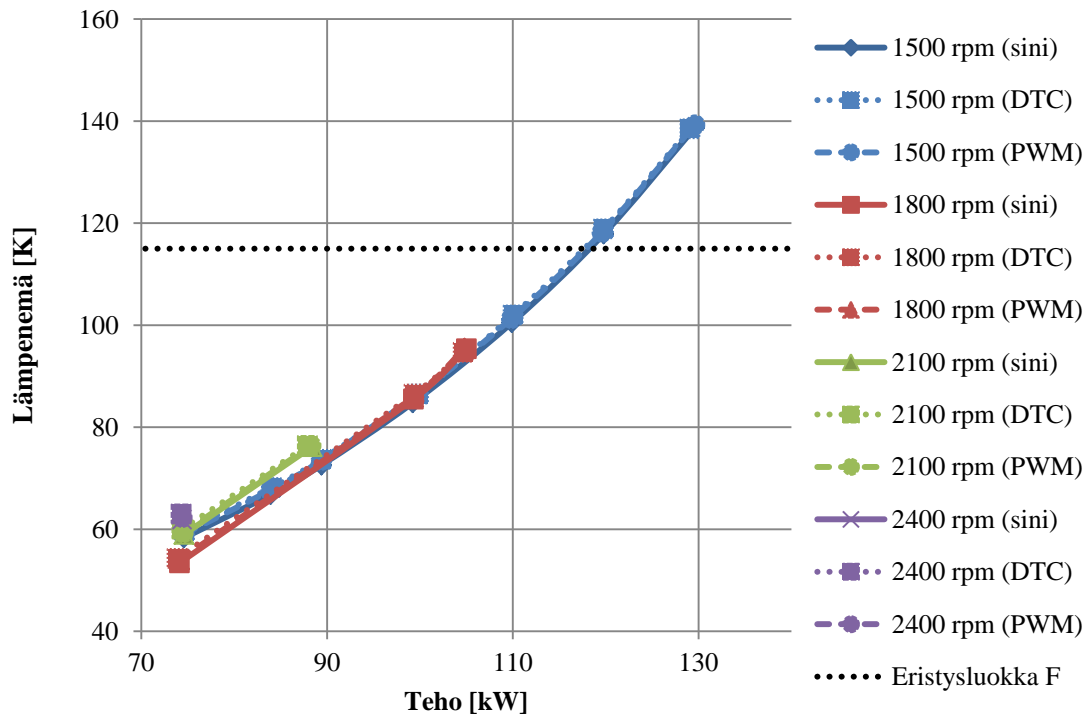
**Kuva 22.** Laskettu M3BL 280SMA 4 -moottorin hyötysuhde tehon funktiona.

Kuvassa 23 on esitetty lasketut virrat eri pyörimisnopeuksilla ja tehoilla. Niin mitatuissa kuin lasketuissakin pisteissä pääjännitteen perusaallon tehollisarvo oli eri pisteissä likimain sama. Täten virrat kasvavat lineaarisesti tehon kasvaessa. Eri syötöillä saadaan miltei identtisiä virran arvoja, koska virran säröytyminen on olematonta niin PWM:llä kuin DTC:llä.

Kuvassa 24 on esitetty lasketut staattorikäämyksen lämpenemät eri pisteissä. Lämpenemien käyttäytyminen tehon suhteen on loogista, mutta tulokset vaikuttavat olevan mitattuihin lämpenemiin nähden alhaisemmat. Suurin osa lasketuista maksimilämpenemäpisteistä sijaitsee eristysluokan F raja-arvon alapuolella.



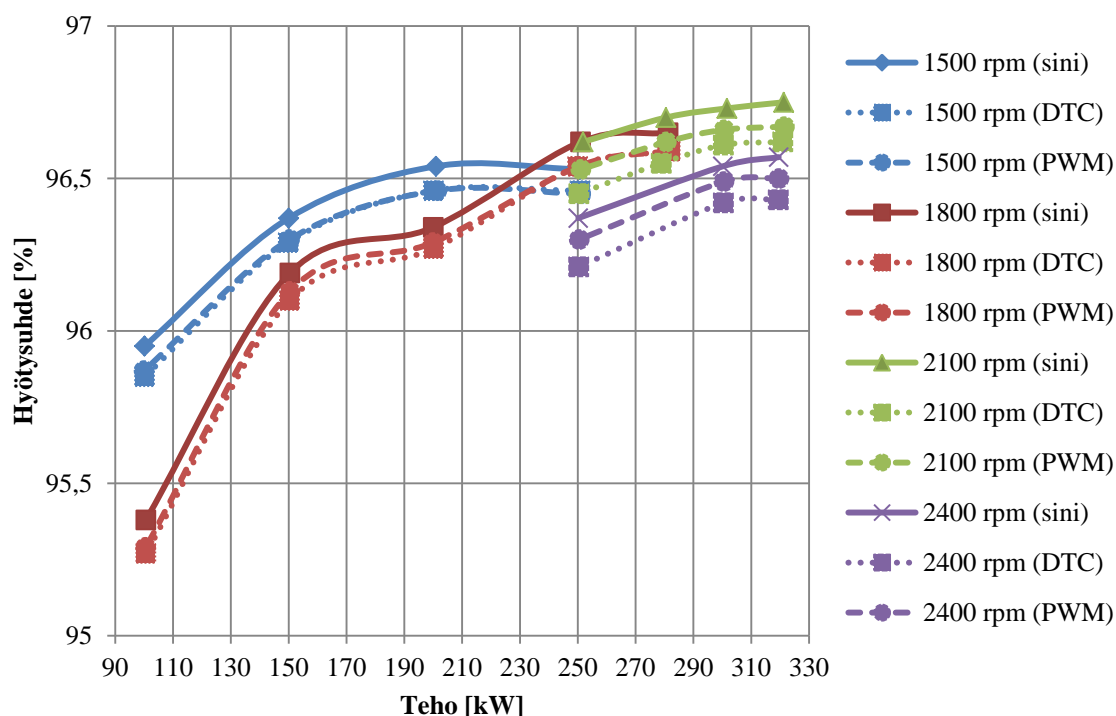
**Kuva 23.** Laskettu M3BL 280SMA 4 -moottorin virta tehon funktiona.



**Kuva 24.** Laskettu M3BL 280SMA 4 -moottorin staattorikäämityksen maksimilämpenemä tehon funktiona.

#### 4.2.2 M3BL 315SMC 4

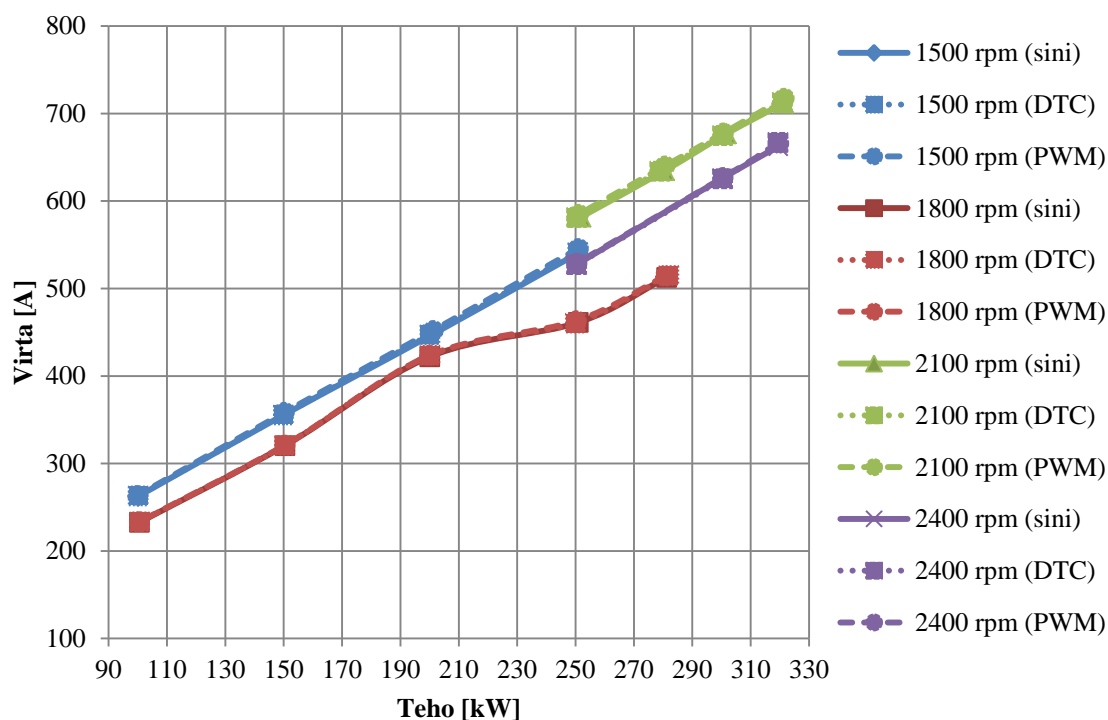
Liitteessä 4 on esitetty protomoottorin 315SMC 4 lasketut suoritusarvot. Laskentapisteet ovat vastaavat kuin mittauspisteet. Liitteessä 4 esitetyistä tuloksista on luotu kuvat 25–27. Kuvan 25 lasketuista hyötysuhteista ilmenee eroavaisuudet eri syötöillä. Sinimuotoisella syötöllä saadaan oletetusti parhaimmat lasketut hyötysuhteet ja säröytyneillä DTC:llä ja PWM:llä hiukan heikommät arvot. 1800 rpm -mittaussarjan kahden viimeisen mittauspisteiden eroavaisuudet käyrän trendistä on selitettävissä pääjännitteen muutoksella. Vastaavasti mittaussarjojen 2100 ja 2400 rpm lasketut hyötysuhteet ovat muihin pyörimisnopeuksiin nähden oletettua suuremmat. Tämä ei yksinään selity sillä, että suuremmilla pyörimisnopeuksilla käytetään pienempää tuuletinta.



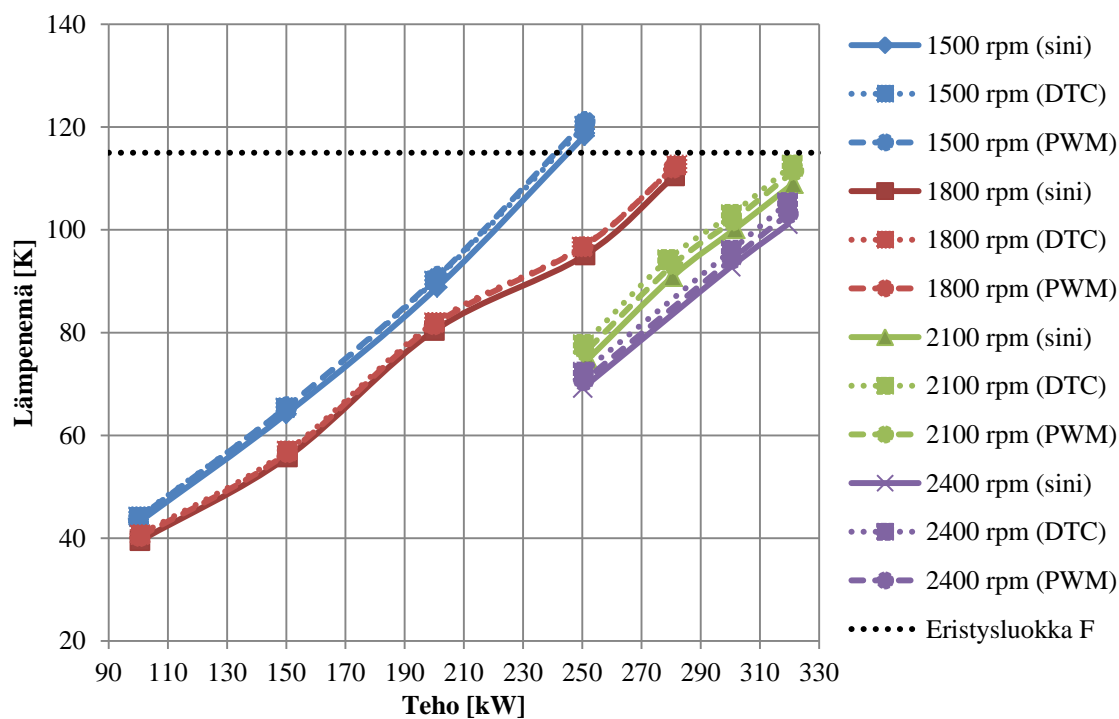
**Kuva 25.** Laskettu M3BL 315SMC 4 -moottorin hyötysuhde tehon funktiona.

Lasketut virrat on esitetty kuvassa 26. Virtojen suuruuksissa ei ole syöttölähteiden kesken käytännössä minkäänlaisia eroja. Virrat kasvavat lineaarisesti tehon kasvaessa, paitsi pyörimisnopeudella 1800 rpm, missä kahdessa viimeisessä laskentapisteessä on muita pisteitä suurempi pääjännite.

Kuvassa 27 on esitetty lasketut staattorikäimityksen maksimilämpenemät. Lämpenemät vaikuttavat olevan loogisia – samalla teholla mutta suuremmalla pyörimisnopeudella staattorikäimityksen maksimilämpenemä on pienempi kuin hitaammalla pyörimisnopeudella. Lämpenemät ovat alle eristysluokan F raja-arvon, mutta lasketuissa lämpenemissä vaikuttaa olevan järjestelmällinen virhe, kuten pienemmän runkokoon lasketuissa maksimilämpenemissäkin todettiin.



**Kuva 26.** Laskettu M3BL 315SMC 4 -moottorin virta tehon funktiona.



**Kuva 27.** Laskettu M3BL 315SMC 4 -moottorin staattorikäimityksen maksimilämpenemä tehon funktiona.

## 5 LASKETTUJEN JA MITATTUJEN TULOSTEN VERTAILU

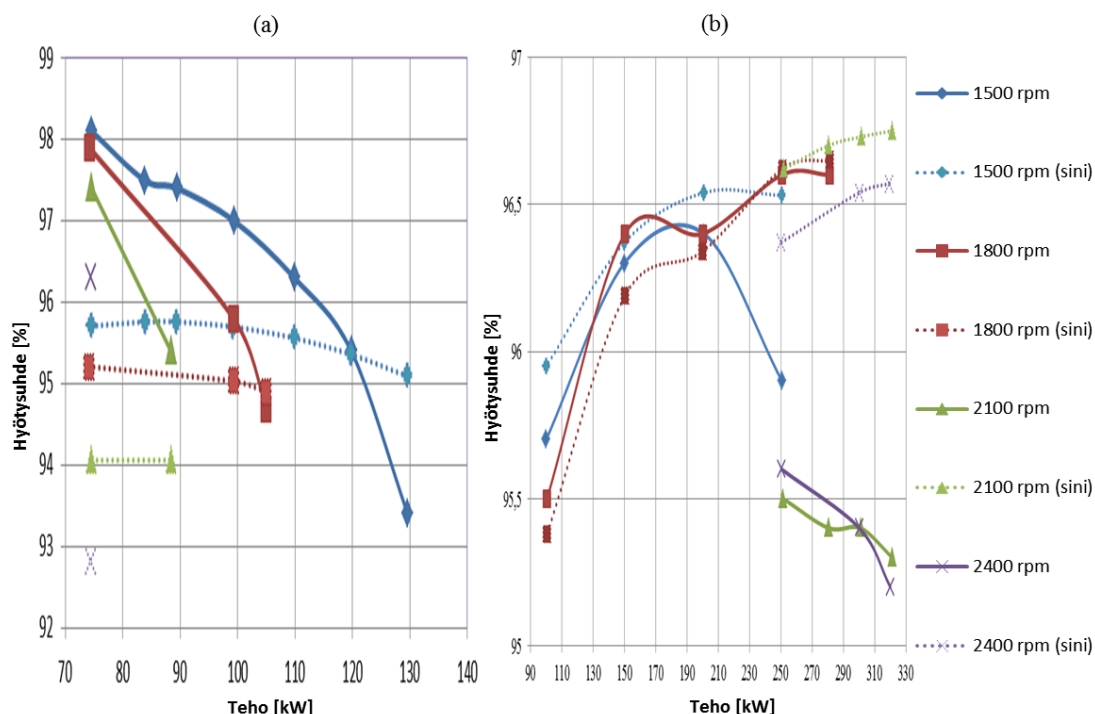
Tässä luvussa vertaillaan laskettuja ja mitattuja tuloksia. Lasketuista tuloksista vertailuun otetaan vain ideaalisen sinisyötön tulokset. Täten kuvaajista saadaan selkeämpiä. Luvun lopussa vertaillaan protomoottorien häviöiden jakautumista niin mitatuissa kuin lasketuissa pisteissä.

Kuvissa 28–31 on esitetty mitattujen ja laskettujen suoritusarvovertailujen tulokset. Vertailussa on mukana kaikki mitatut toimintapisteet, vaikka mittauspisteistä kaikki eivät olleetkaan korrekkeja. Vertailussa vasemmalla puolella on M3BL 280 SMA 4 -moottorin ja oikealla puolella 315SMC 4 -moottorin tulokset. Kuvaajissa yhtenäinen viiva kuvaa mitattuja ja katkonainen viiva laskettuja suoritusarvoja. Mitatuista suoritusarvoista on hyvä huomioida, että mittaussarjojen viimeisissä mittauspisteissä, missä akseliteho on mittaussarjan suurin, moottorit toimivat useimmiten suorituskykynsä äärirajoilla. Tahtireluktanssimoottoreita käsiteltäessä tämä tarkoittaa sitä, että moottori on tahdistusta putoamisen vaarassa viimeisimmissä mittauspisteissä. Näitä epävakaita pisteitä on haastavaa käsitellä laskennallisesti.

### 5.1 Hyötysuhteiden vertailu

Mitattuja hyötysuhteita käsiteltäessä on huomioitava, että hyötysuhdearvot eri pisteissä ovat hyvin herkkiä pienillekin muutoksille. Kuvassa 28 vertaillaan mitattujen ja laskettujen protomoottoreiden hyötysuhteita. Protomoottorin 280SMA 4 vertailusta huomataan, että mitatut ja lasketut tulokset eroavat toisistaan erittäin paljon. Mitattujen toimintapisteiden epäsäännöllinen käyttäytyminen vahvistaa näkemyksen, että protomoottori ei ole mittauksien aikana ollut oikeassa toimintalämpötilassaan ja että toimintapisteet sijaitsivat kentänheikennysalueella. Nämä näkemykset voidaan vahvistaa yhden lämpenemäkokeen tuloksella 1500 rpm:llä, missä teholla 90,48 kW ja hyötysuhteella 96,43 % staattorikämmityksen maksimilämpenemä on 87,6 K. Mittaussarjassa vastaavassa toimintapisteessä hyötysuhde on 97,4 % ja maksimi-

lämpenemä vain 50,0 K. Täten 280SMA 4 mittaussarja ei ole hyötysuhteen vertailun kannalta korrekti. 315SMC 4 protomoottorissa lasketut ja mitatut hyötysuhteet vastaavat hyvin toisiaan pienemmillä pyörimisnopeuksilla, mutta suuremmilla pyörimisnopeuksilla tulosten erot ovat jo suurehkot, noin yhden prosenttiyksikön verran. Laskentamalli ei täten pidä paikkansa suuremmilla pyörimisnopeuksilla. On kuitenkin huomioitava, että suuremmilla pyörimisnopeuksilla 315SMC 4 -protomoottori toimii mekaanisen kestävyytensä rajamailla.

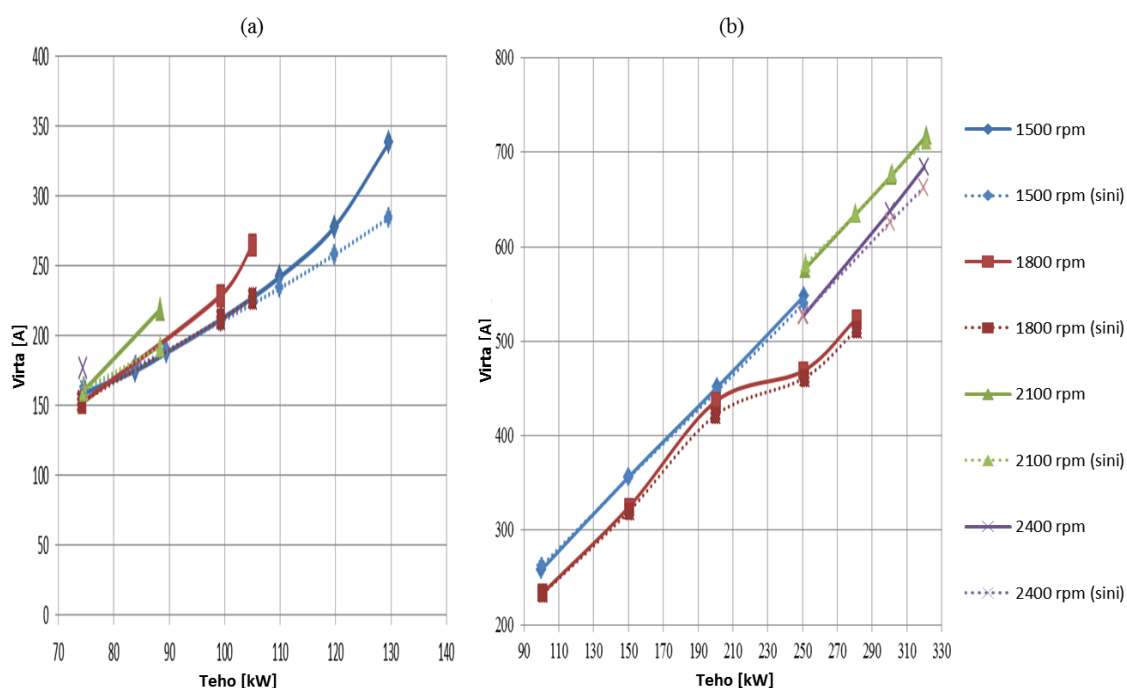


**Kuva 28.** Mitattujen ja laskettujen hyötysuhteiden vertailu. M3BL 280SMA 4 -moottori (a) ja M3BL 315SMC 4 -moottori (b).

## 5.2 Virtojen vertailu

Kuvassa 29 on esitetty vertailu protomoottoreiden mitatuista ja lasketuista virroista. Kuvasta ilmenee heti, että Adept ja FCSMEK laskevat virrat oikein. Suurimmat eroavaisuudet ovat 280SMA 4 -moottorin viimeisimmässä mittauspisteissä, joissa

moottori toimii maksimaalisella teholla. Taajuusmuuttajien soveltuvuus moottoreihin määritetään pitkälti virtakestoisuuden perusteella. Virran määrittäminen laskennallisesta ja tulokseen luottaminen auttaakin määrittämään tahtireluktanssimoottoreille oikean taajuusmuuttajan.

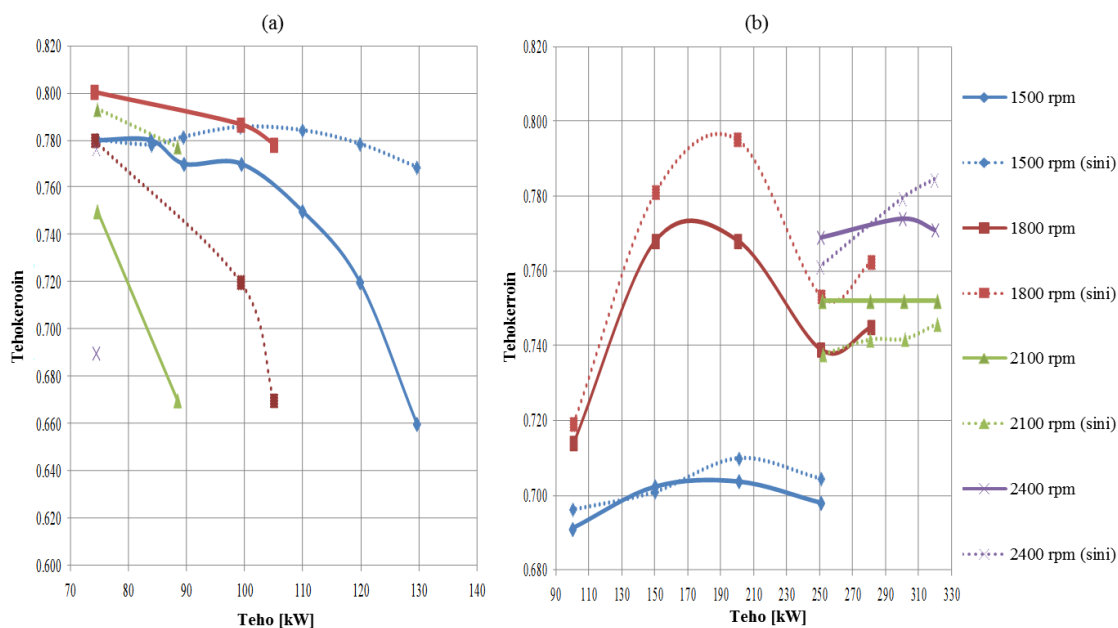


**Kuva 29.** Mitattujen ja laskettujen virtojen vertailu. M3BL 280SMA 4 -moottori (a) ja M3BL 315SMC 4 -moottori (b).

### 5.3 Tehokertoimien vertailu

Mitattujen ja laskettujen tehokertoimien eli pätötehojen suhde näennäistehoihin on esitetty kuvassa 30. Pienemmän protomoottorin 280SMA 4 mittaussarjan epästabiilisuus ilmenee myös tehokertoimien heilahteluissa. Laskettujen ja mitattujen tehokertoimien tulokset eroavat toisistaan niin paljon, ettei vertailulle voi antaa suurta painoarvoa. 315SMC 4 moottorin mitatut ja lasketut tehokertoimet saadaan virtojen ohella laskettua kohtalaisen hyvin. 1800 rpm:llä suurimmat eroavaisuudet on

selitettävissä virran määrittämisessä tapahtuvien pienien eroavaisuuksien avulla. Vakiojännitteellä laskennallisesti saadun pienemmän virran vuoksi tehoyhtälössä tehokertoimen arvo täytyy olla suurempi, että määritetty akseliteho saavutetaan.

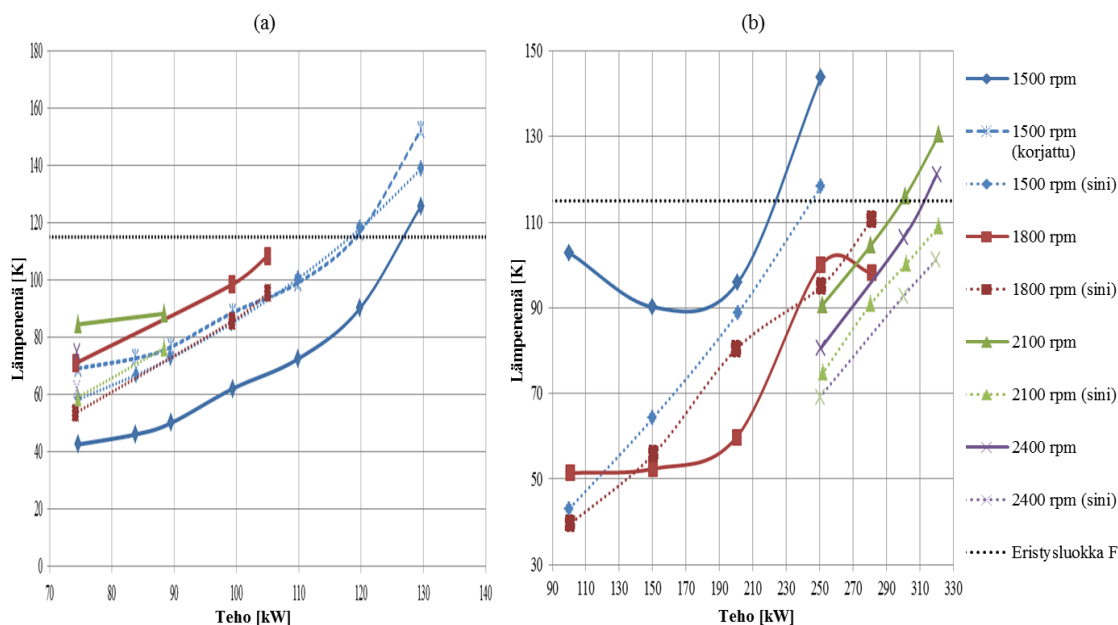


**Kuva 30.** Mitattujen ja laskettujen tehokertoimien vertailu. M3BL 280SMA 4 -moottori (a) ja M3BL 315SMC 4 -moottori (b).

#### 5.4 Staattorikäimityksen maksimilämpenemien vertailu

Staattorikäimityksen maksimilämpenemien vertailut on esitetty kuvassa 31. Molemmassa protomoottoreissa 1500 rpm:n mittaussarjat ovat osittain epäonnistuneet. Tämän pyörimisnopeuden lämpenemien tulkintaan tuleekin käyttää yksittäisiä mittauspisteitä, joissa loppulämpenemä on varmasti saavutettu. 315SMC 4 moottorin mitatuissa maksimilämpenemissä pyörimisnopeudella 1800 rpm on myös epälinearisuutta muihin nopeuksiin nähden. Muissa pyörimisnopeuksissa molemmissa protomoottoreissa sen sijaan lasketut lämpenemät ovat trendiltään mitattujen kaltaisia.

Maksimilämpenemien laskennalliseen oikeellisuuteen otetaan enemmän kantaa pohdinta luvussa.



**Kuva 31.** Mitattujen ja laskettujen staattorikäymitysten maksimilämpenemien vertailu. M3BL 280SMA 4 -moottori (a) ja M3BL 315SMC 4 -moottori (b).

### 5.5 Häviöiden jaottelu ja vertailu

Tässä luvussa käsitellään muutaman toimintapisteen häviöiden jakautuminen sekä mitattujen ja laskettujen häviöiden vertailu kyseisissä pisteissä. Mittauspisteet on valittu siten, että molempien moottorien pyörimisnopeuden 1500 rpm tulokset on valittu onnistuneista lämpenemäkokeista. Pyörimisnopeuden 2100 rpm ja 2400 rpm mittauspisteet ovat 315SMC 4 -moottorin mittausarjoista. 280SMA 4 -moottorista ei ole kuin yksi luotettava lämpenemäkoe, jota voidaan käyttää hyödyksi häviöiden vertailussa. Lasketut häviöt määräytyvät alkuperäisen laskentamallin tuloksista. Vertailtavat pisteet on esitetty taulukossa 7.

Taulukon 7 vertailusta ilmenee, että 280SMA 4 moottorin lasketut kokonaishäviöt  $P_{\text{loss}}$  ovat suuremmat kuin mitatut. Tämä poikkeaa 315SMC 4 -moottorien lasketuista kokonaishäviöistä, jotka ovat pienemmät kuin mitatut. Yhtenäistä kaikille vertailupisteille on, että lasketut staattorin virtalämpöhäviöt  $P_{\text{Cu}}$  ovat vähemmän kuin mitatut. Koska laskennalliset virrat vastaavat mitattuja, on virtalämpöhäviöiden eroavaisuuden pääsyyntä staattorikäännyksen resistanssi. Resistanssiin vaikuttavat niin käännyksen pituus kuin lämpötila.

Mekaaniset häviöt  $P_{\text{Fr}}$  ovat laskentamalleissa miltei kohdallaan. Laskentamalleissa on käytetty induktiomootorin mekaanisia häviöitä, joten laskennallisia mekaanisia häviöitä voidaan hieman pienentää, koska sisäiset tuuletushäviöt ovat induktiomootoria pienemmät. Ainoastaan 280SMA 4 -moottorin mekaaniset häviöt on johdettu vastaavasta reluktanssimootorista.

Rautahäviöt  $P_{\text{Fe}}$  ja lisähäviöt  $P_{\text{add}}$  on määritetty kokonaishäviöiden ja muiden häviöiden erotuksesta. Rautahäviöt voidaan tarkemmin määrittää tyhjäkäyntikokeella. Tämän työn protoreluktanssimootoreille ei kuitenkaan tässä vaiheessa voitu suorittaa tyhjäkäyntikoetta. Rautahäviöitä tapahtuu niin staattorissa kuin roottorissakin. Staattorin rautahäviöt muodostuvat staattorin selkäosassa, staattorin hampaissa ja hampaiden kärjissä tapahtuvista häviöistä. Näissä pisteissä magneettivuon tiheys on suurimmillaan. Roottorissa suurimmat rautahäviöt tapahtuvat lähellä roottorin pintaa, jossa myös on suurin magneettivuon tiheys.

Rauta- ja lisähäviöiden mitattujen ja laskettujen tuloksien välillä on eroavaisuuksia siten, että pyörimisnopeudella 1500 rpm lasketut rauta- ja lisähäviöt ovat mitattuja suuremmat ja muilla pyörimisnopeuksilla mitattuja pienemmät. Tuloksista tulee huomioida, että pyörimisnopeuden ja taajuuden muuttuessa hystereesihäviöt ja pyörrevirtahäviöt lisääntyvät. Erityisesti pyörrevirtahäviöihin taajuuden vaikutus huomioidaan neliöllisesti, kuten yhtälöstä 36 käy ilmi. Lisähäviöiden tarkka määrittäminen ei onnistu, koska tyhjäkäyntikokeen seurauksena rautahäviöitä ei tiedetä. Lisäksi Adept ja FCSMEK laskevat lisähäviöt rautahäviöiden yhteyteen, joten näiden häviöiden erittelystä ei saada apua. Seuraavassa luvussa pohditaan muiden häviöiden

ohella myös rautahäviöiden mitattujen ja laskettujen tulosten eroavaisuuksien syitä. Rautahäviöiden tulkinnessa voidaan käyttää apuna muun muassa FCSMEK:n jälkikäsitteilykuva.

**Taulukko 7.** Häviöiden jakautuminen sekä mitattujen ja laskettujen häviöiden vertailu.

M3BL	280SMA 4 mitatut	280SMA 4 lasketut	315SMC 4 mitatut	315SMC 4 lasketut	315SMC 4 mitatut	315SMC 4 lasketut	315SMC 4 mitatut	315SMC 4 lasketut
$n$ [rpm]	1500	1500	1500	1500	2100	2100	2400	2400
$P_{out}$ [kW]	90,48	90,48	200,6	200,6	251,5	251,5	250,51	250,51
$\eta$ [%]	96,43	95,76	96,63	96,69	95,49	96,61	95,61	96,38
$I_s$ [A]	191,67	190,98	449,3	443,92	576,9	581,74	526,9	527,22
$P_{loss}$ [W]	3350	4002	7000	6872	11890	8813	11510	9413
$P_{Cu}$ [W]	2276	1970	3418	3102	2728	2476	2226	1984
$P_{Fr}$ [W]	500	657	1000	1000	1980	1980	2577	2577
$P_{Fe}+P_{add}$ [W]	574	1375	2582	2770	7182	4357	6707	4852

## 6 POHDINTAA LASKENTAMALLIEN TEHOSTAMISEKSI

Tässä luvussa pohditaan laskentamallien tehostamista. Pohdinnassa käytetään hyväksi erityisesti häviöiden jakautumisesta saatuja tuloksia, joiden avulla pyritään havaitsemaan laskennasta löytyvät selkeimmät virheet. Pohdinta painottuu vertailussa havaittuihin selkeimpiin eroihin – häviöihin ja staattorikäämityksen maksimilämpenemään. Viimeisessä luvussa kootaan yhteen pohdinnan päätelmät laskentamallien tehostamiseksi.

### 6.1 Staattorin virtalämpöhäviöt

Taulukossa 8 on eritelty tarkemmin staattorin virtalämpöhäviöihin vaikuttavat tekijät. Tulosten perusteella voidaan todeta, että lasketut staattorin virtalämpöhäviöt käyttäytyvät yhdenmukaisesti mittauspisteiden häviöihin nähden. Jokaisessa vertailupisteessä lasketut staattorin virtalämpöhäviöt ovat pienemmät kuin mitatut. Staattorin virtalämpöhäviöihin vaikuttavaa staattorikäämityksen resistanssin suuruus. Resistanssiin puolestaan vaikuttavaa staattorin lämpötila sekä käämityksen pituus. Taulukon 8 tuloksista voidaan todeta, että terminaalien välinen resistanssi on lasketuissa mitattuja pienempi. Myös staattorikäämityksen lämpötila on kokonaisuudessaan lasketuissa pisteissä alhaisempi. Korjaamalla lämpötilat oikein laskentamalliin, saadaan virtalämpöhäviöt kohdennettua kohti mitattuja. Lämpötilojen korjaaminen ei kuitenkaan yksin riitä korjaamaan terminaalien välistä resistanssiarvoa oikeaksi vaan myös käämityksen pituutta on lisättävä. Tämä onnistuu lisäämällä kuhunkin laskentamalliin puolen vyyhdin pituutta, jotta resistanssi saadaan oikeaksi. Laskettujen virtojen vastatessa miltei mitattuja, saadaan staattorien virtalämpöhäviöt laskettua oikein.

**Taulukko 8.** Staattorin mitatut ja lasketut virtalämpöhäviöt.

M3BL	280SMA 4 mitatut	280SMA 4 lasketut	280SMA 4 korjatut	315SMC 4 mitatut	315SMC 4 lasketut	315SMC 4 korjatut	315SMC 4 mitatut	315SMC 4 lasketut	315SMC 4 korjatut	315SMC 4 mitatut	315SMC 4 lasketut	315SMC 4 korjatut
$n$ [rpm]	1500	1500	1500	1500	1500	1500	2100	2100	2100	2400	2400	2400
$P_{out}$ [kW]	90,48	90,48	90,48	200,6	200,6	200,6	251,5	251,5	251,5	250,51	250,51	250,51
$P_{Cu}$ [W]	2276	1970	2277	3418	3102	3419	2728	2476	2727	2226	1984	2223
$P_{Cu,k_0}$ [W]	2286	1970	2287	3430	3131	3431	2755	2516	2755	2252	2017	2250
$R_{TT}$ [mΩ]	41,298	35,51	41,24	11,287	10,349	11,391	5,464	4,816	5,322	5,346	4,713	5,335
$\theta_{Cu,max}$ [K]	87,6	58,0	87,6	98,9	90,0	98,9	90,6	72,0	90,6	80,5	65,0	80,5
$v$ [°C]	23,5	25,0	23,5	23,7	22,0	23,7	21,5	20,0	21,5	21,1	20,0	21,1

## 6.2 Mekaaniset häviöt

Mekaanisten eli tuuletus- ja kitkahäviöiden kohdalla olisi tarkentamisen varaa niin mitatuissa kuin lasketuissa tuloksissa. Mitatuista moottoreista ei tiedetä kuin yhdestä moottorista johdetut mekaaniset häviöt. Mittauksia pitäisi siis suorittaa tulevaisuudessa enemmän ja näin varmasti tulee tapahtumaankin, viimeistään asiakastestien myötä, jotta mekaanisten häviöiden osuus saadaan tarkemmin määritettyä. Induktiomoottorin tavoin tahtireluktanssimoottorin mekaaniset häviöt ovat kuitenkin sidoksissa pyörimisnopeuteen ja tuuletushäviöihin. Tuuletushäviöiden suuruus määräytyy pitkälti tuulettimen halkaisijasta ja tuulettimen aiheuttamasta ilmanvastuksesta nopeuden suhteen. Taulukossa 9 on esitetty mitatut, lasketut ja korjatut mekaaniset häviöt. Lasketuissa mekaanisissa häviöissä on pyritty arvioimaan tuulettimen halkaisijamuutoksien vaikutukset mekaanisiin häviöihin. Mekaaniset häviöt määritetään suoraan numeerisesti Adeptille, joka ottaa ne huomioon kokonaishäviöissä.

**Taulukko 9.** Mitatut ja lasketut mekaaniset häviöt.

M3BL	280SMA 4 mitatut	280SMA 4 lasketut	280SMA 4 korjatut	315SMC 4 mitatut	315SMC 4 lasketut	315SMC 4 korjatut	315SMC 4 mitatut	315SMC 4 lasketut	315SMC 4 korjatut	315SMC 4 mitatut	315SMC 4 lasketut	315SMC 4 korjatut
$P_{out}$ [kW]	90,48	90,48	90,48	200,6	200,6	200,6	251,5	251,5	251,5	250,51	250,51	250,51
$n$ [rpm]	1500	1500	1500	1500	1500	1500	2100	2100	2100	2400	2400	2400
$P_{Fr}$ [W]	500	657	500	1000	1000	1000	1980	1980	1980	2577	2577	2577

### 6.3 Rautahäviöt

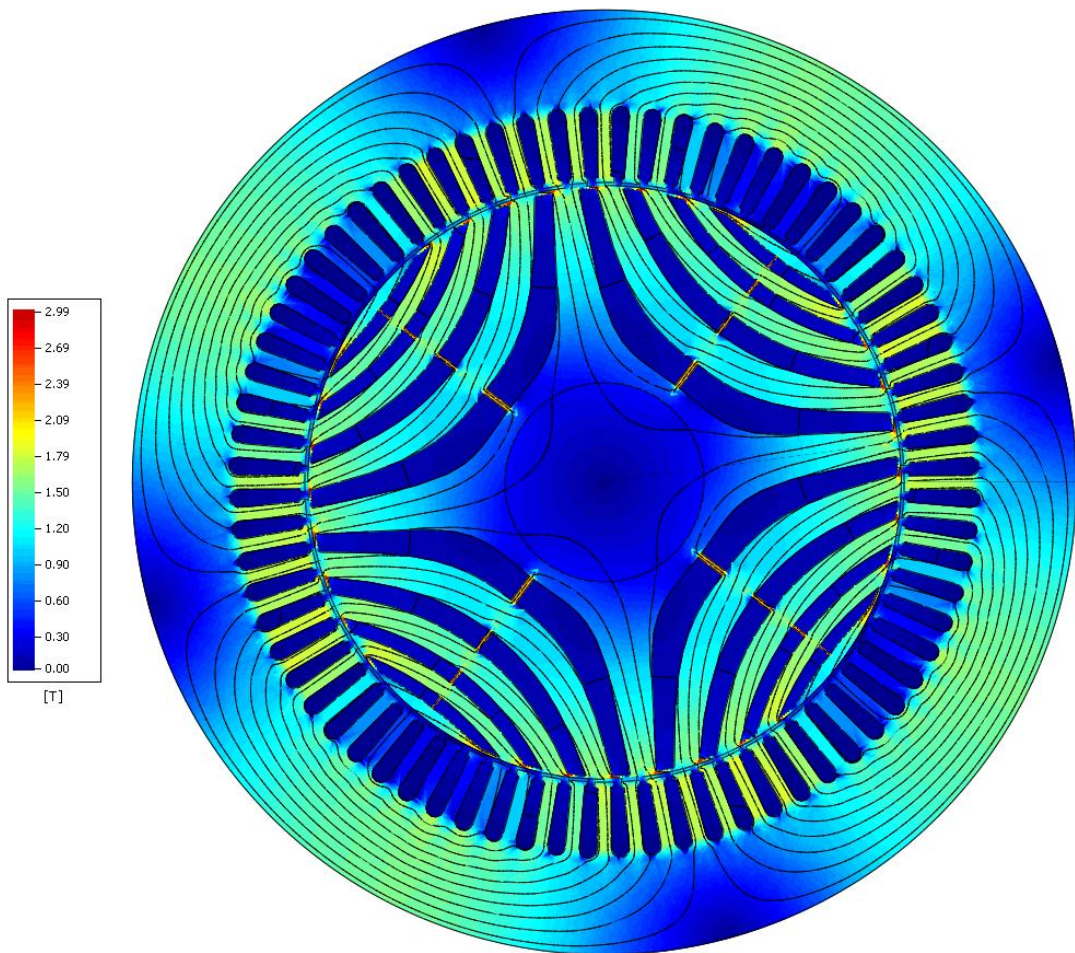
Rauta- ja lisähäviöiden osuus mitatuissa ja lasketuissa pisteissä eroavat paljon eikä selkeää yhteneväisyyttä ole havaittavissa. 280SMA 4 -protomoottorin lasketut rauta- ja lisähäviöt ovat mitattuja suuremmat. Vastaava tilanne on 315SMC 4 -protomoottorin mittauspisteessä, missä pyörimisnopeus on 1500 rpm. 315SMC 4 -protomoottorilla tuloksien vertailu muuttuu siten, että lasketut rauta- ja lisähäviöt ovat mitattuja pienemmät, kun pyörimisnopeus ja taajuus kasvavat. Taulukossa 10 on esitetty mitattujen ja laskettujen rauta- ja lisähäviöiden vertailu. Lisäksi taulukossa on eritelty staattorin ja roottorin lasketut rauta- ja lisähäviöt, mistä voidaan samalla todeta, että suurin osa rauta- ja lisähäviöistä tapahtuu staattorissa. Roottorissa tapahtuvien häviöiden osuus on noin 20 % kokonaisrautahäviöistä.

**Taulukko 10.** Mitattujen ja laskettujen rauta- ja lisähäviöiden vertailu.

M3BL	280SMA 4 mitatut	280SMA 4 lasketut	315SMC 4 mitatut	315SMC 4 lasketut	315SMC 4 mitatut	315SMC 4 lasketut	315SMC 4 mitatut	315SMC 4 lasketut
$n$ [rpm]	1500	1500	1500	1500	2100	2100	2400	2400
$P_{out}$ [kW]	90,48	90,48	200,6	200,6	251,5	251,5	250,51	250,51
$P_{Fe}+P_{add}$ [W]	574	1375	2582	2770	7182	4357	6707	4852
$P_{S,Fe}+P_{S,add}$ [W]	NA	1085	NA	2352	NA	3588	NA	3913
$P_{R,Fe}+P_{R,add}$ [W]	NA	290	NA	418	NA	769	NA	939

Rauta- ja lisähäviöiden summaosuutta on haastavaa jakaa erikseen tarkkoihin rautahäviöihin ja lisähäviöihin. Kokonaisuudesta merkittävin osuus on kuitenkin perusaallon rautahäviöitä. Rauta- ja lisähäviöiden laskettujen tuloksien eroavaisuutta mitattuihin voidaan pohtia rautahäviöiden, staattorissa ja roottorissa vallitsevien magneettivuon tiheyksien ja sähkölevymateriaalien avulla.

Kuvassa 32 on esitetty 315SMC 4 -protomoottorista FCSMEK:n piirtämä jälkikäsitteilykuva. Tästä kuvasta ilmenee magneettivuon tiheys staattorin ja roottorin eri pisteissä. Staattisesta tilasta voidaan havaita, että magneettivuon tiheys on suurimmillaan roottorin voesteiden välisissä silloissa sekä aivan roottorin ulkoreunoilla. Merkittävä voimakkuus vallitsee kuitenkin voesteiden väliin jääviin rakenteisiin, joissa magneettivuon tiheys on noin 1,2–2,0 T. Staattorissa suurimmat magneettivuon tiheysalueet sijaitsevat staattorin hampaissa sekä staattorin selkäosassa, magneettivuon tiheyden vaihdellessa noin 0,0–2,0 T.



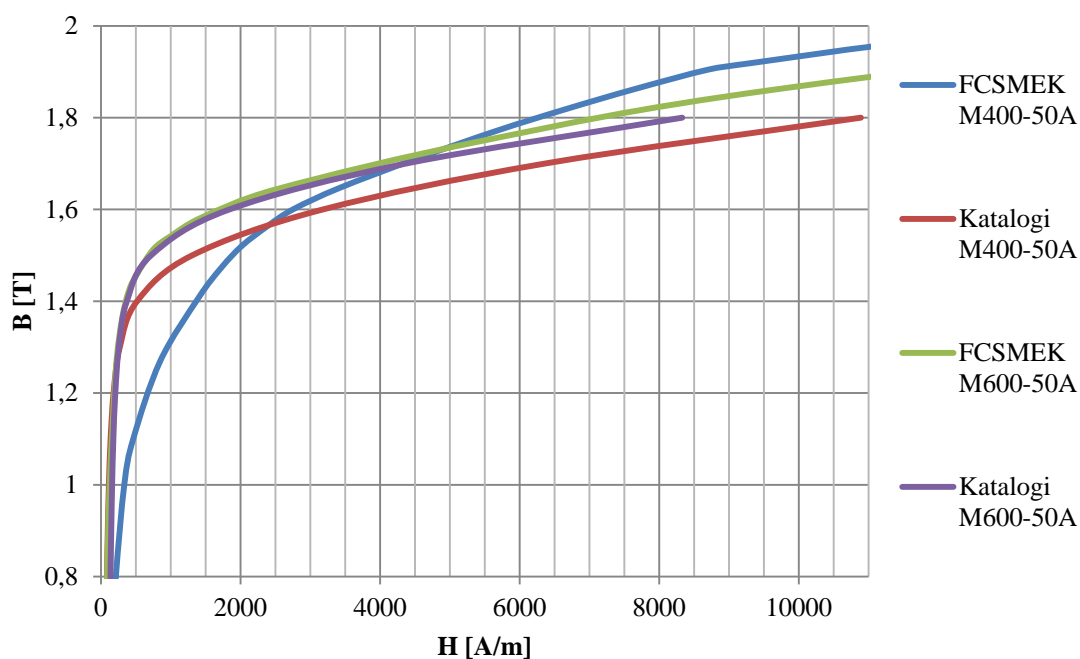
**Kuva 32.** FCSMEK:n jälkikäsitteilyn piirtämä kuva 315SMC 4 protomoottorista, missä on esitetty magneettivuon tiheyden käyttäytyminen roottorin ja staattorin eri pisteissä.

Pääosin protomoottoreiden roottoreissa on käytetty M400-50A ja staattoreissa M600-50A sähkölevyjä. Nämä valinnat ovat käytössä myös Adeptissa ja FCSMEK:ssä. FCSMEK:n materiaalikirjasto on integroitu vahvasti koodaukseen, joten sähkölevyjen korrektisuudesta voi löytyä eroavaisuuksia, jotka vaikuttavat rautahäviöihin. FCSMEK:n materiaalikirjastosta ei löydy suoraan M400-50A ja M600-50A sähkölevyjä vaan käytettävät levy materiaalit ovat häviöltään kyseisiä sähkölevyjä vastaavia. Näin on tehty koska sähkölevymateriaalien vaihtaminen koodaukseen on erittäin työläs prosessi. Vuosien varrella on koodauksessa olevia sähkölevyjä kuitenkin hienosäädetty vastaamaan ominaisuuksiltaan haluttuja sähkölevyjä.

Kuvassa 33 on esitetty sähkölevyjen BH-käyrien vertailu. Katalogi BH-käyrät on piirretty Cogent–Surahammarsin tuoteluettelon tiedoista ja FCSMEK:n käyrät on piirretty hienosäädettyjen sähkölevyjen tiedoista. Pääosin roottorin sähkölevynä käytettävästä M400-50A sähkölevystä löytyy katalogiarvojen ja FCSMEK:ssä käytettyjen hienosäädettyjen arvojen välillä suuria eroavaisuuksia. Suurin ero näiden välillä ilmenee magneettivuon tiheydellä 1,8 T, jolloin laskenta käyttää magneettikentän voimakkuutta, joka on noin 4220 A/m pienempi kuin katalogiarvo. Vastaavasti magneettivuon tiheydellä 1,4 T tilanne on päinvastainen. Tällöin laskennassa käytetään 883,2 A/m suurempaa magneettikentän voimakkuutta. Vertailtaessa tyypillisesti staattorissa käytettävää M600-50A sähkölevyä, erot ohjelman käyttämissä arvoissa ja katalogiarvoissa eivät ole suuret. Merkittäviä eroja löytyy kuitenkin suuremmilla magneettivuon tiheyksillä. 1,8 Teslan arvolla laskennan magneettikentän voimakkuus on 1250 A/m pienempi kuin katalogiarvo.

BH-käyrien vertailun myötä voidaan todeta, että laskennassa käytettävien sähkölevyjen arvoja tulisi uudelleen hienosäätää FCSMEK:iin. Erityisesti M400-50A sähkölevyn arvot tulisi päivittää. BH-käyrien eroavaisuuksien myötä voidaan päätellä, että myös levyjen häviöissä on eroja erilaisilla magneettivuon tiheyksillä. Taajuuksien kasvaessa voivat laskennan ja levyjen todelliset ominaisuuserot olla suurehkot. Sähkölevyjen määritetyt arvot voivat täten olla pääsyy suurimpien eroavaisuuksien syntyyn vertailtaessa laskettuja rautahäviöitä mitattuihin. BH-käyrät vaikuttavat myös

tehokertoimiin pitkittäis- ja poikittaisinduktanssien ja niissä vallitsevien virtamuutoksien myötä.



**Kuva 33.** FCSMEK:n sisäisten ja Surahammarsin luettelossa esitettyjen BH-käyrien vertailu.

#### 6.4 Staattorikämmityksen maksimilämpenemät

Staattorikämmityksen mitatuissa ja lasketuissa maksimilämpenemissä voidaan vertailun perusteella havaita yhtenäinen trendi, eriarvoisista tuloksista huolimatta. Yhtenäisen trendin perusteella voidaan päätellä, että lämpenemät laskeva ohjelmisto-osa Motorheats toimii osittain oikein, mutta todellista lämpenemää ei saada kohdalleen.

Taulukossa 11 on esitetty staattorikämmityksen maksimilämpenemien mitatut ja lasketut arvot. Taulukon vertailuun on pyritty valitsemaan niin 280SMA 4 - kuin 315SMC4 - moottoreita. Vertailuun on otettu kuitenkin vain sellaiset mittauspisteet, joiden todennäköisyydestä voidaan olla varmoja. Taulukon vertailusta voidaan todeta, että

lasketut pisteet käyttäytyvät mitattujen pisteiden mukaisesti. Täten lasketuista pisteistä voidaan korjauskertoimen avulla määrittää todellinen lämpenemä suhteellisen tarkasti. Laskettujen maksimilämpenemien kertominen kertoimella 1,2 antaa suunnittelijalle hyvän approksimaation moottorin maksimilämpenemästä.

**Taulukko 11.** Staattorikääläytymisen maksimilämpenemän mitatut ja lasketut arvot.

M3BL	$n$	$P_{out}$ [kW]	Mitattu maksimilämpenemä	Laskettu maksimilämpenemä
280SMA 4	1500	90,5	87,6	72,6
280SMA 4	1800	74,2	70,9	53,4
280SMA 4	1800	99,3	98,4	85,5
280SMA 4	1800	105,0	108,4	95,4
280SMA 4	2100	74,6	84,5	59,0
280SMA 4	2100	88,4	88,2	76,2
280SMA 4	2400	74,4	74,7	61,9
315SMC 4	1500	200,6	98,9	95,9
315SMC 4	2100	251,5	90,6	74,8
315SMC 4	2100	280,6	104,6	90,9
315SMC 4	2100	301,1	116,0	100,2
315SMC 4	2100	321,3	130,4	109,0
315SMC 4	2400	250,5	80,5	69,2
315SMC 4	2400	300,2	106,4	92,8
315SMC 4	2400	320,0	121,1	101,1

Mitattujen ja laskettujen mittauspisteiden yhtenäinen trendi ja korjauskertoimen käyttäminen voidaan tarkistaa otoskorrelaatiolla. Otoskorrelaation avulla voidaan tutkia laskettujen pisteiden riippuvuutta mitatuista. Otoskorrelaatio voidaan määrittää

$$\text{Korrelaatio } (x, y) = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}}, \quad (39)$$

missä  $x$  ja  $y$  ovat pistejoukkoja ja  $\bar{x}$  ja  $\bar{y}$  ovat otoskeskiarvoja (Kreyszig 2006: 1089). Otoskorrelaation määrittäminen löytyy myös taulukkolaskentaohjelmista. Taulukon 11

mittaus- ja laskentapisteiden korrelaatiokertoimeksi saadaan taulukkolaskentaohjelman avulla 0,9555. Korrelaatiokertoimen ollessa lähellä arvoa 1, voidaan laskettujen maksimilämpenemien sanoa korreloituvan mitattuihin maksimilämpenemiin. Täten korjauskertoimien käyttäminen on perusteltua.

## 6.5 Pohdinnan yhteenveto

Laskennalliset suoritusarvot vastaavat kokonaisuudessaan kohtalaisen hyvin mitattuja arvoja. Erityisesti oikein laskettu virta on jo tällä hetkellä erinomainen etu, koska taajuusmuuttajien virtakestoisuus tulee jokaisen moottorin kohdalla määrittää. Myös lasketut tehokertoimet vastaavat hyvin niitä mittauspisteitä, jotka ovat onnistuneet. Selkeimmät erot olivat havaittavissa hyötysuhteissa eli häviöissä ja staattorikäämitysten maksimilämpenemissä.

Hyötysuhteiden jaottelun avulla voitiin määrittää selkeimpien eroavaisuuksien juurisyitä. Vertailun perusteella staattorin virtalämpöhäviöt olivat jokaisessa tarkastelupisteessä mitattuja virtalämpöhäviöitä pienemmät. Osaltaan tämä johtui väärin oletetusta ja asetetusta ympäristön ja staattorin lämpötiloista. Yksinään lämpötilan oikein määrittäminen ei kuitenkaan riittänyt laskettujen virtalämpöhäviöiden täsmäämiseen mitattuihin. Täten staattorikäämityksen puolen vyyhden pituutta tulee lisätä jokaisessa laskentamallissa, jotta virtalämpöhäviöt lasketaan oikein.

Mekaanisten häviöiden tarkkaa osuutta kokonaishäviöistä on tässä vaiheessa tahtireluktanssimoottorin kehitystä haastavaa arvioida ilman laajempia mittauksia. Hidastuvuuskokeita tulisin suorittaa jokaiselle moottorille, jotta mekaanisten häviöiden osuus saadaan selville.

Rauta- ja lisähäviöissä olivat vertailupisteiden suurimmat eroavaisuudet. Osassa vertailtavista moottoreista lasketut rauta- ja lisähäviöt olivat mitattuja pienemmät, toisaalta taas suuremmat. Adept ja FCSMEK määrittävät rauta- ja lisähäviöt samaan arvoon, joten yksinään rautahäviöosuuden määrittäminen on haastavaa. Yksi syy rauta- ja lisähäviöiden eroavaisuuteen löytyi sähkölevyjen ominaisuuksista. Laskennassa

käytettävien M400-50A ja M600-50A sähkölevyn hienosäädetyt BH-parametrit erosivat huomattavan paljon katalogeissa esitetyistä arvoista. Nyt eri vertailupisteissä erilaisilla tehoilla ilmenevät magneettivuon tiheyden arvot ja väärät BH-arvot voivat olla juurisyy rautahäviöiden ja sitä myötä rauta- ja lisähäviöiden laskettujen ja mitattujen arvojen eroavaisuuteen. Mitatuista rauta- ja lisähäviöistä pitää kuitenkin huomioida, että niitä ei ole mitattu tyhjäkäyntikokeen avulla. Tämä koe tulisi suorittaa tulevaisuudessa, jotta rautahäviöitä voitaisiin hienosäätää paremmin vastamaan mitattuja arvoja. Myös tuotannossa nykyisin käytettäville sähkölevyille tulisi suorittaa analyysi, että niiden mitatut ominaisuudet saadaan selville optimointia varten.

Lasketuista lämpenemistä todettiin, että ne ovat trendiltään mitattujen kaltaisia, mutta arvoltaan pienempiä. Korrelaatiotarkastelun avulla voitiin todistaa, että korjaukskertoimien käyttäminen on mahdollista. Täten Adeptilla ja Motorheats-lisäohjelmalla laskettujen maksimilämpenemien kertominen kertoimella 1,2 approksimoi kohtalaisen hyvin staattorikäymysten maksimilämpenemiä. Vastaavasti keskimääräisiä lämpenemiä tarkasteltaessa kerroin 1,1 antaa kohtalaisen hyvän arvion lämpenemistä.

Kokenut sähkösuunnittelija pystyy ottamaan huomioon edellä mainitut asiat laskiessaan tahtireluktanssimootoreita. Laskentamallien tarkentaminen on kuitenkin jatkuvaa työtä. Tulevien mittauksien avulla laskentamallia voidaan tarkentaa entisestään, erityisesti kun mekaanisten häviöiden osuus vakiintuu. Mikäli tulevat mittaukset mahdollistavat myös tyhjäkäyntikokeiden suorittamisen reluktanssimootoreille, voidaan rautahäviöt määrittää tarkemmin ja täten etsiä juurisyytä laskettujen ja mitattujen eroavaisuuteen. Muutamalla mittaussarjalla tehdyt korjaukset laskentamalleihin uudelle moottorisarjalle ovat vasta suuntaa-antavia, koska jokaiset mittaustapahtumat ja mitattavat moottorit ovat yksilöllisiä. Laskentamallien eksakti tarkentaminen tulee tehtäväksi vasta, kun mittausdataa on huomattavasti enemmän.

## 7 YHTEENVETO

Tässä työssä käsiteltiin uutta tahtireluktanssimoottoria, jonka ABB Oy:n moottorit ja generaattorit -yksikkö on tuomassa markkinoille. Onnistunut sovellussuunnittelu uudelle tahtireluktanssimoottorille vaatii jo myyntivaiheessa tarkkoja mitoitusyökaluja toimintapisteiden suoritusarvojen määrittämiseksi, koska perinteisen induktiomoottorin kaltaista mittausdatamassaa ei ole olemassa. Työn tarkoituksena oli pohtia laskentamallien tehostamista.

Tämän työn lähtökohtana oli käyttää hyväksi M3BL 280SMA 4 - ja M3BL 315SMC 4 - protoreluktanssimoottoreiden aivan ensimmäisiä mittaustuloksia ja laskea elementtimenetelmään pohjautuvalla laskentaohjelmalla edellä mainittujen moottoreiden toimintapisteitä vastaavat suoritusarvot ja vertaillaan näitä keskenään. Protomoottoreiden suoritusarvot oli mitattu kevään ja kesän 2011 aikana ABB Oy:n testikentän henkilökunnan toimesta ennen tätä työtä. Tahtireluktanssimoottorille ei ole toistaiseksi olemassa mittausstandardia, joten mittausproseduurina on sovellettu induktiomoottorin mittausproseduuria. Tässä työssä laskettiin protomoottoreiden suoritusarvot mittauspisteitä vastaavissa toimintapisteissä. Suoritusarvojen laskemisessa käytettiin Adept-ohjelmaa, joka ohjasi FCSMEK-ohjelmaa.

Tutkimusosuudessa esitettiin protomoottoreiden mittaustuloksien suoritusarvot sekä vastaavien toimintapisteiden FCSMEK:lla lasketut suoritusarvot. Suoritusarvoissa keskityttiin mittauksien mahdollistamiin ja loppukäyttäjää kiinnostaviin suoritusarvoihin kuten hyötysuhteeseen, virtaa ja staattorikämmityksen maksimilämpenemään. Protomoottoreille ei ollut selkeää mittaussarjaa, joten mittaustuloksia oli haasteellista käsitellä. Mittaukset perustuivat pitkälti erilaisiin kuormituskokeisiin, mutta myös muutama lämpenemäkoe ja yksi hidastuvuuskoe oli protomoottoreille suoritettu. Oheisten kokeiden avulla molemmista protomoottoreista voitiin eritellä häviöt. Lasketuista suoritusarvoista esitettiin toimintapisteiden suoritusarvot ideaalisen sinisyötön lisäksi PWM ja DTC -syötöillä. Lasketuista suoritusarvoista tarkasteltiin tuloksia yleisellä tasolla ja verrattiin syöttöjen vaikutuksia tuloksiin. Syöttöjen erot havaittiin olevan marginaalisia eri laskentatarkkuuksista huolimatta.

Mitattujen ja laskettujen tulosten vertailussa keskityttiin hyötysuhteiden, virtojen, tehokertoimien ja staattorikäimityksen maksimilämpenemien ohella häviöiden jaotteluun. Kokonaisuudessaan lasketut suoritusarvot vastasivat kohtalaisen hyvin mitattuja suoritusarvoja, erityisesti lasketut virrat vastasivat tarkasti mitattuja virtoja, mikä auttaa oikean taajuusmuuttajan valinnassa. Selkeimmät erot voitiin todeta johtuvan mittaussarjojen epäjohdonmukaisuudesta ja moottorin epästabiilisuudesta. Hyvien mittaussarjojen ja vastaavien mittauspisteiden lasketuissa suoritusarvoissa voitiin kuitenkin havaita jatkuvia eroavaisuuksia. Erot olivat havaittavissa staattorikäimityksien maksimilämpenemissä ja häviöissä.

Pohdinnassa käsiteltiin jatkuvien eroavaisuuksien juurisyitä. Apuna käytettiin häviöiden jaottelua laskentamallien tehostamiseksi. Häviöiden jaottelun avulla havaittiin, että lasketut staattorin virtalämpöhäviöt ovat jokaisessa vertailupisteessä mitattuja pienemmät. Tämä saadaan korjattua laskentamalleihin määrittämällä staattorin lämpötila oikein sekä muokkaamalla staattorikäimityksen puolenvyyhden pituutta. Mekaanisten häviöiden tarkkaa osuutta oli haastavaa määrittää mittauksien vähäisyyden vuoksi. Mekaanisista häviöistä voitiin kuitenkin todeta niiden olevan vastaavaa induktiomoottoria pienemmät. Tulevien testien ohella olisi suotavaa, että mekaaniset häviöt saadaan mitattua laskentamallien tarkentamisen vuoksi.

Rauta- ja lisähäviöiden lasketut osuudet erosivat selkeästi mittaustuloksista johdetuista osuuksista. Tästä kokonaisuudesta tutkittiin rautahäviöitä. Rautahäviöiden muodostuessa pyörrevirta- ja hystereesihäviöistä, tutkittiin laskentaohjelmaan määritettyjen sähkölevyjen ominaisuudet. Sähkölevyjen BH-käyristä löytyikin merkittäviä eroavaisuuksia katalogeissa esitettyihin arvoihin. Rautahäviöiden oikein laskemiseksi nykyisten sähkölevyjen ominaisuuksia tulisikin päivittää laskentaohjelmien materiaalikirjastoihin. Ominaisuuksien tarkemman määrittämisen vuoksi käytetyille sähkölevyille tulisi suorittaa analyysi ja tuleville reluktanssi-moottoreille pitäisi suorittaa tyhjäkäyntikoe, jotta kuormasta riippumattomien häviöiden osuus saadaan selville.

Laskettuja ja mitattuja staattorikäymysten maksimilämpenemiä vertailtaessa eroavaisuuksia löytyi, mutta myös yhteinen trendi oli havaittavissa. Korrelaatiotarkastelun avulla voitiin todeta, että vertailtavat tulokset ovat yhteneviä ja korjauskertoimen käyttäminen lämpenemien arvioinnissa on mahdollista.

Ensimmäisten protomootoreiden mitattujen suoritusarvojen avulla laskentamalleja saatiin tarkennettua niiltä osin, joilta se oli mahdollista. Ensimmäiset mittaukset palvelivat pääsääntöisesti tuotesarjan kehittämisprosessia eivätkä varsinaisesti tätä työtä. Ensimmäisten mittausten onnistunut hyödyntäminen kuitenkin myös tässä työssä, kaikin mahdollisin tavoin, on suuri etu tulevia mittauksia ja laskentoja ajatellen. Tämän suhteen työ onnistui hyvin, koska tuloksena saatiin tarkennuksia laskentamalleihin ja jatkotutkimusehdotuksia. Laskentamallien tarkentaminen on kuitenkin jatkuvaa työtä ja kehitystä sillä vasta mittausdatan lisääntyessä voidaan olla kohtalaisen varmoja kyseisten moottorityyppien todellisista arvoista, joita laskentamallit pyrkivät jäljittämään.

## LÄHDELUETTELO

- ABB Oy (2005). *The Motor Guide - Basic Technical Information about Low Voltage Standard Motors*. 2. painos. 135 s.
- ABB Oy (2009). *Low voltage motors manual* [verkkodokumentti]. [Lainattu 11.10.2011]. Saatavana Internetistä: <[http://abblibrary.abb.com/global/scot/scot259.nsf/veritydisplay/e91c4310d39e913ac12577fc003278fb/\\$file/Standard\\_LV\\_Motors\\_Manual\\_EN\\_01\\_2009%20Rev%20D.pdf](http://abblibrary.abb.com/global/scot/scot259.nsf/veritydisplay/e91c4310d39e913ac12577fc003278fb/$file/Standard_LV_Motors_Manual_EN_01_2009%20Rev%20D.pdf)>.
- ABB Oy, Kortelainen Antti (2010). *Sähkömoottoreiden uudet hyötysuhdeluokitukset ja tulevat rajoitukset* [verkkodokumentti]. [Lainattu 20.8.2011]. Saatavana Internetistä: <[http://www.lut.fi/fi/pumpingday/program/Documents/03\\_Kortelainen\\_Antti.pdf](http://www.lut.fi/fi/pumpingday/program/Documents/03_Kortelainen_Antti.pdf)>.
- Arkkio, Antero (2001). *FCSmek, Part C, User's Guide*. Käyttäjän opas. Teknillinen korkeakoulu. 138 s.
- Aura, Lauri & Antti J. Tonteri (1996). *Sähkökoneet ja tehoelektronikan perusteet*. 1. painos. Porvoo: WSOY:n graafiset laitokset. 544 s.
- Boglietti, A., A. Cavagnino, M. Pastorelli & A. Vagati (2005). Experimental Comparison of Induction and Synchronous Reluctance Motors Performance. *IEEE Industry Applications Conference, 2005. Fortieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005*. 474–479.
- Boglietti, A. & M. Pastorelli (2008). Induction and synchronous reluctance motors comparison. *34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2008. IECON 2008..* 2041–2044.
- Boldea, I., Z. X. Fu, S. A. Nasar (1994). Performance Evaluation of Axially-Laminated Anisotropic (ALA) Rotor Reluctance Synchronous Motors. *IEEE Transactions on Industrial Applications*. 30:4, 977–985.

- Cogent–Surahammars (2011). *Non oriented electrical steel – Typical data*. [verkkodokumentti]. [siteerattu 29.9.2011]. Saatavana Internetistä: <[http://www.sura.se/Sura/hp\\_products.nsf/vOpendocument/03A8B2433FAE16C4C1256AA8002280E6/\\$FILE/datasheets.pdf?OpenElement](http://www.sura.se/Sura/hp_products.nsf/vOpendocument/03A8B2433FAE16C4C1256AA8002280E6/$FILE/datasheets.pdf?OpenElement)>.
- Fratta, A., G.P. Troglia, A. Vagati & F. Villata (1993). Evaluation of Torque Ripple in High Performance Synchronous Reluctance Machines. *Conference Record of the Industry Applications Society Annual Meeting 1993, 1993 IEEE*. 163–170.
- Fratta, A., A. Vagati & F. Villata (1992). On the Evolution of ac Machines for Spindle Drive Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 28:5, 1081–1086.
- Fukami, Tadashi, Masatoshi Momiyama, Kazuo Shima, Ryoichi Hanaoka & Shizo Takata (2008). Steady-State Analysis of a Dual-Winding Reluctance Generator With a Multiple-Barrier Rotor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 23:2, 492–498.
- Gieras, J.F. (1999). Comparison of High-Power High-Speed Machines: Cage Induction versus Switched Reluctance Motors. *1999 IEEE Africon–5<sup>th</sup> Africon Conference in Africa*. 675–678.
- Haataja, Jorma (2003). *A comparative performance study of four-pole induction motors and synchronous reluctance motors in variable speed drives*. Väitöskirja. Sähkötekniikka. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 138 s.
- Hofmann, Heath & Seth R. Sanders (2000). High-Speed Synchronous Reluctance Machine with Minimized Rotor Losses. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 36:2, 531–539.
- IET Fact files (2008). *Standards for Energy Efficient Motors*. [Lainattu 4.9.2011]. Saatavana Internetistä: <<http://www.theiet.org/factfiles/energy/iet-motors.cfm?type=pdf>>.

- Institute of Electrical and Electronics Engineers (2004). *112-2004 IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*. 79 s.
- International Electrotechnical Commission (2004). *IEC 60034-1 Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance*. 137 s.
- International Electrotechnical Commission (2007). *IEC 60034-2-1 Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)*. 149 s.
- Incropera, F., D. DeWitt, T. Bergman & S. Lavine. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6. painos. USA: John Wiley & Sons. 995 s.
- Kinnunen, Janne (2004). *Reluktanssiverkkomalli kestomagneettitahtikoneen staattisen ilmavälivuontiheyden mallinnukseen*. Diplomityö. Sähkötekniikka. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 100 s.
- Kokkonen, Jesse (2007). *Sähkökäytön valintaperiaatteet ja monimoottorikäytöt malmin laaduntasauksessa*. Diplomityö. Sähkötekniikka. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 68 s.
- Kostko, J.K. (1923). Polyphase Reaction Synchronous Motors. *Journal of American Institute of Electrical Engineers*. 42:1, 1162–1168.
- Kreyszig, Erwin (2006). *Advanced Engineering Mathematics*. 9. painos. Singapore: John Wiley & Sons, Inc. 1248 s.
- Krishnan, Ramu (2001). *Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications*. *Industrial Electronics Series*. 1. painos. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC. 432 s.

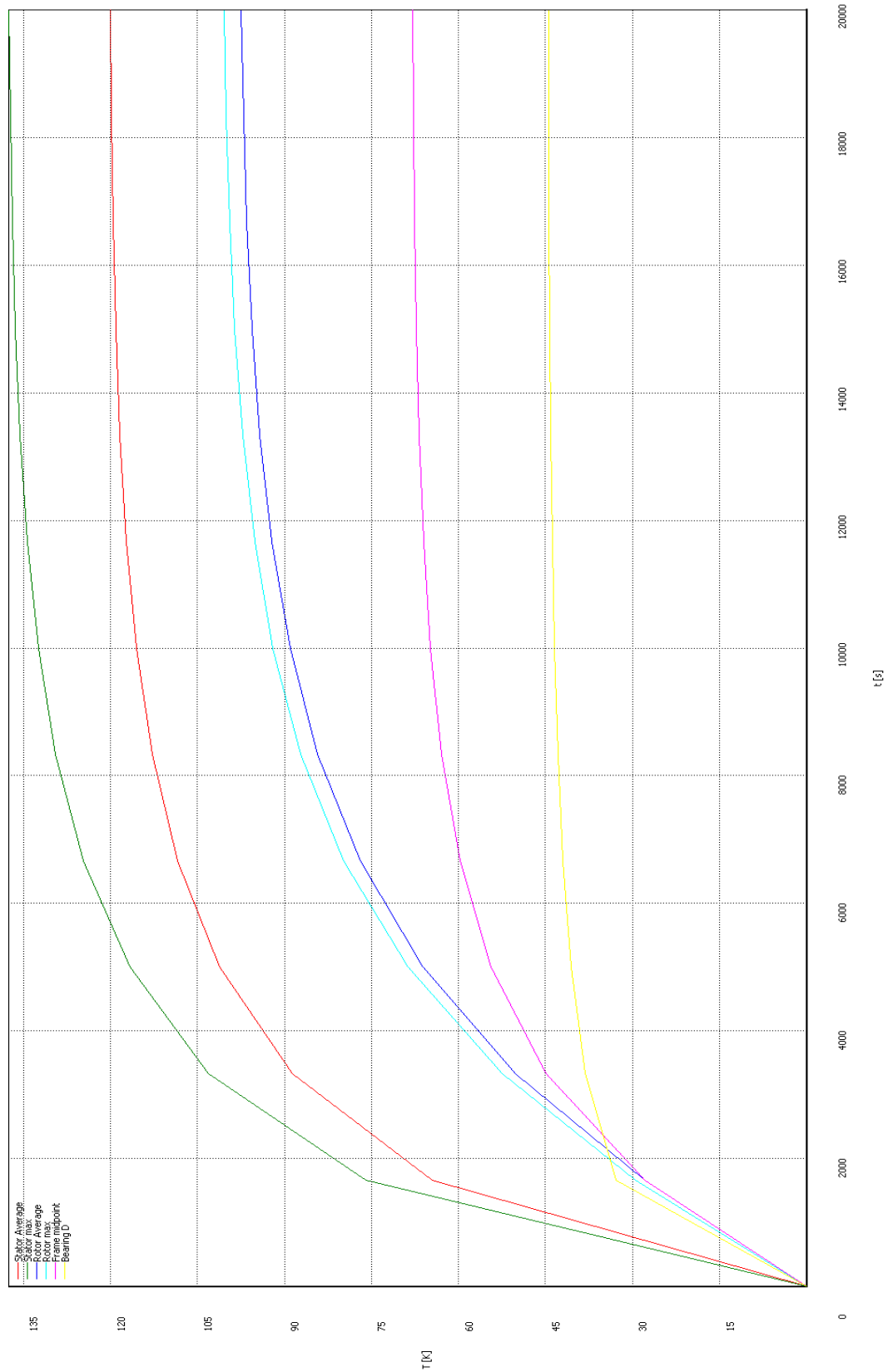
- Lendenmann, Heinz, Reza Rajabi Moghaddam, Ari Tammi & Lars-Erik Thand (2011). Motoring ahead. *ABB Review* [verkkodokumentti] 11:1 [siteerattu 13.7.2011], 56–61. Saatavana Internetistä: <<http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK105152A9986&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>>.
- Lovatt, H.C., M.L. McClelland & J.M. Stephenson (1997). Comparative performance of singly salient reluctance, switched reluctance, and induction motors. *Electrical Machines and Drives, Eighth International Conference on 1997 (Conf. Publ. No. 444)*. 361–365.
- Lee, Seon Taek (2009). *Development and Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor with Field Excitation Structure*. Väitöskirja. Sähkötekniikka. Tenneseen yliopisto. 190 s.
- Luukko, Julius (1996). *Käämivuon ja vääntömomentin suoraan säätöön perustuva kestomagneettitahtikonekäyttö*. Diplomityö. Sähkötekniikka. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 88 s.
- Matsch, Leander W. & J. Derald Morgan (1986). *Electromagnetic and Electromechanical Machines*. 3. painos. New York: John Wiley & Sons, Inc. 573 s.
- Moghaddam, Reza Rajabi (2007). *Synchronous Reluctance Machine (SynRM) Design*. Diplomityö. Sähkötekniikka. KTH, Tukholma. 95 s.
- Moghaddam, Reza Rajabi, Freddy Magnussen & Chandur Sadarangani (2010). Theoretical and Experimental Reevaluation of Synchronous Reluctance Machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 57:1, 6–13.
- Moghaddam, Reza Rajabi (2011). *Synchronous Reluctance Machine (SynRM) in Variable Speed Drives (VSD) Applications*. Väitöskirja. Sähkötekniikka. KTH, Tukholma. 260 s.

- Molenaar, Alexander (2000). *A novel Planar Magnetic Bearing and Motor Configuration applied in a Positioning Stage*. Väitöskirja. Sähkötekniikka. Delftin teknillinen yliopisto. 239 s.
- Nyblin, Henrik (2002). *Oikosulkumoottorin laskentaohje*. ABB Oy, Electrical Machines, LV Motors. 57 s.
- Pyrhönen, Juha (1998). *Pyörivän sähkökoneen suunnitteleminen*. Opetusmoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 279 s.
- Ryypö, Tommi (2005). *Hajautetun laskentajärjestelmän soveltaminen epätahtikoneen roottorirakenteen optimointiin*. Diplomityö. Sähkötekniikka. Teknillinen korkeakoulu. 51 s.
- Parviainen, Asko (2000). *Pyörivän magneettivuon aiheuttamien tehohäviöiden mittaus sähkölevystä*. Diplomityö. Sähkötekniikka. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 84 s.
- Sivunen, Jarkko (2011). *Sähkön laatu ja taajuusmuuttajakäytön kokonaishyötysuhde*. Erikoistyö. Sähkötekniikka. Vaasan yliopisto. 46 s. (julkaisematon)
- Staton, D.A., T.J.E. Miller & S.E. Wood (1993). Maximising the saliency ratio of the synchronous reluctance motor. *Electric Power Applications, IEE Proceedings B*. 140:4, 249–259.
- Särkimäki, Ville (2009). *Radio Frequency Measurement Method for Detecting Bearing Currents in Induction Motors*. Väitöskirja. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 118 s.
- Taipale, Juha (2008). *Korkean lämpenemäluokan omaavan sähkömoottorin suunnittelu*. Diplomityö. Sähkötekniikka. Teknillinen korkeakoulu. 73 s.

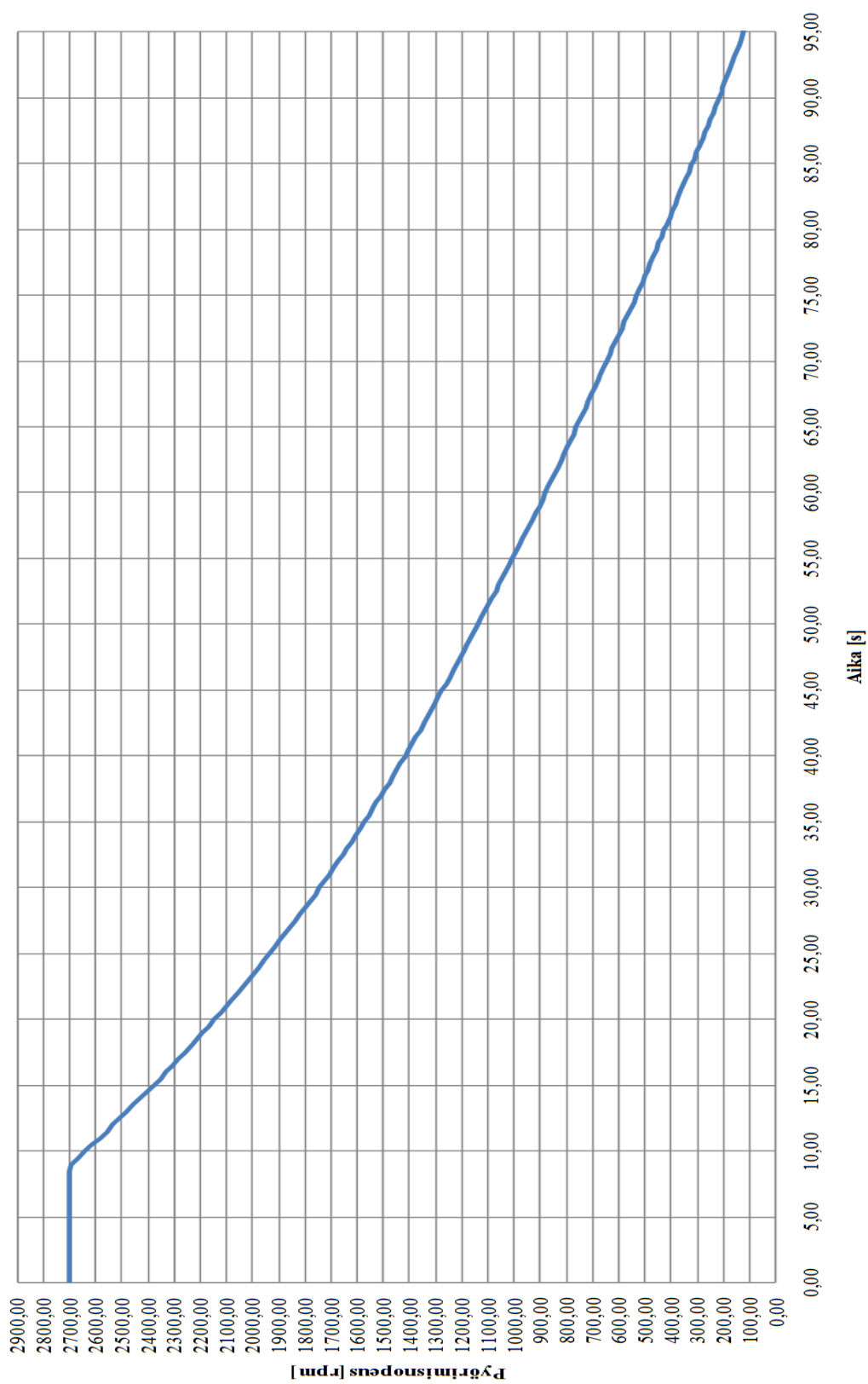
- Talvitie, Topi (2005). *FEM-ohjelmiston sopeuttaminen ja hyväksikäyttö nopeaan kestopagneettimoottorisuunnitteluun*. Diplomityö. Sähkötekniikka. Tampereen teknillinen yliopisto. 89 s.
- Wenping, Cao (2009). Comparison of IEEE 112 and New IEC Standard 60034-2-1. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 24:3, 802–808.
- Winders, John J. Jr. (2002). Power Transformers: Principles and Applications. *Power Engineering*. 1. painos. New York: Marcel Dekker, Inc. 283 s.

## LIITTEET

Liite 1 M3BL 280SMA 4 -moottorin laskennalliset lämpenemäkäyrät



Liite 2 M3BL 280SMB 4 -moottorin hidastuvuuskoe



Liite 3 M3BL 280SMA 4 -moottorin lasketut suoritusarvot

Syöttö	$P_{out}$ [kW]	$T$ [Nm]	$I_s$ [A]	$U_{h1}$ [V]	$n$ [rpm]	$\cos \varphi$	$\eta$ [%]	$\theta_{Cu,max}$ [K]
sini	74,6	474,8	162,8	354,3	1500,0	0,7802	95,71	58,3
DTC	74,6	475,2	163,2	352,7	1500,0	0,7830	95,62	59,5
PWM	74,6	475,2	163,5	354,4	1500,0	0,7778	95,64	59,1
sini	83,9	534,3	178,4	364,5	1500,0	0,7781	95,76	66,8
DTC	84,0	534,9	179,0	363,4	1500,0	0,7792	95,67	68,2
PWM	83,9	534,3	179,2	364,6	1500,0	0,7751	95,70	67,7
sini	89,4	569,2	189,1	364,9	1500,0	0,7814	95,76	72,6
DTC	89,4	569,0	189,0	365,5	1500,0	0,7808	95,68	73,7
PWM	89,4	569,0	189,8	365,0	1500,0	0,7786	95,70	73,5
sini	99,2	631,7	210,1	362,7	1500,0	0,7857	95,70	84,8
DTC	99,9	635,7	210,7	364,6	1500,0	0,7847	95,63	86,5
PWM	99,6	633,8	211,4	362,8	1500,0	0,7837	95,64	86,2
sini	109,9	699,6	234,1	361,7	1500,0	0,7843	95,56	100,5
DTC	110,0	700,5	234,8	361,5	1500,0	0,7840	95,48	102,0
PWM	109,8	699,3	234,5	361,8	1500,0	0,7826	95,51	101,3
sini	119,8	762,7	258,2	360,9	1500,0	0,7785	95,36	117,9
DTC	119,8	762,6	258,2	361,0	1500,0	0,7785	95,30	118,9
PWM	119,6	761,4	258,0	361,0	1500,0	0,7779	95,32	118,2
sini	129,6	825,1	284,3	360,1	1500,0	0,7686	95,09	138,7
DTC	129,1	821,8	282,7	360,5	1500,0	0,7693	95,05	138,5
PWM	129,6	825,2	284,5	360,2	1500,0	0,7686	95,05	139,3
sini	74,1	393,1	153,0	367,0	1800,0	0,8005	95,21	53,4
DTC	73,8	391,7	152,8	366,4	1800,0	0,8005	95,11	54,3
PWM	74,1	393,2	153,2	367,1	1800,0	0,7997	95,16	54,0
sini	99,3	526,8	211,7	362,2	1800,0	0,7866	95,03	85,5
DTC	99,4	527,1	211,8	361,7	1800,0	0,7888	94,97	86,5
PWM	99,3	526,7	211,8	362,3	1800,0	0,7865	94,99	85,9
sini	105,0	557,0	227,1	361,5	1800,0	0,7781	94,90	95,4
DTC	104,7	555,3	224,5	363,6	1800,0	0,7804	94,88	94,7
PWM	104,8	556,1	226,6	361,6	1800,0	0,7787	94,87	95,5
sini	74,6	339,2	161,8	356,9	2100,0	0,7931	94,06	59,0
DTC	74,4	338,2	161,8	356,2	2100,0	0,7929	93,94	60,0
PWM	74,5	338,8	161,6	357,0	2100,0	0,7934	94,00	59,3
sini	88,4	402,0	192,1	363,3	2100,0	0,7773	94,06	76,2
DTC	87,9	399,6	190,9	363,4	2100,0	0,7782	93,99	76,4
PWM	88,3	401,5	191,8	363,4	2100,0	0,7778	94,02	76,4
sini	74,4	296,0	163,1	365,4	2400,0	0,7765	92,82	61,9
DTC	74,3	295,6	163,5	364,8	2400,0	0,7759	92,71	63,0
PWM	74,4	296,0	163,0	365,5	2400,0	0,7774	92,77	62,3

## Liite 4 M3BL 315SMC 4 -moottorin lasketut suoritusarvot

Syöttö	$P_{out}$ [kW]	$T$ [Nm]	$I_s$ [A]	$U_{h1}$ [V]	$n$ [rpm]	$\cos \varphi$	$\eta$ [%]	$\theta_{Cu,max}$ [K]
sini	100,1	637,5	262,6	329,6	1500,0	0,6963	95,95	43,1
DTC	100,2	637,7	262,9	329,7	1500,0	0,6960	95,85	44,2
PWM	100,0	636,5	263,5	329,7	1500,0	0,6931	95,87	43,9
sini	150,0	955,1	355,6	360,6	1500,0	0,7010	96,37	64,2
DTC	149,9	954,1	355,6	360,2	1500,0	0,7017	96,29	65,4
PWM	150,3	956,8	358,6	360,7	1500,0	0,6967	96,30	65,6
sini	201,0	1279,4	447,5	378,3	1500,0	0,7099	96,54	88,8
DTC	200,1	1273,9	447,2	377,9	1500,0	0,7087	96,46	90,1
PWM	201,3	1281,3	452,3	378,4	1500,0	0,7040	96,46	91,0
sini	250,8	1596,4	540,2	394,1	1500,0	0,7045	96,53	118,3
DTC	250,8	1596,8	541,2	393,9	1500,0	0,7042	96,46	120,2
PWM	251,0	1597,9	545,9	394,2	1500,0	0,6982	96,45	121,1
sini	100,6	533,7	232,8	363,7	1800,0	0,7191	95,38	39,5
DTC	100,6	533,8	233,4	362,7	1800,0	0,7204	95,27	40,7
PWM	100,6	533,5	233,5	363,8	1800,0	0,7172	95,29	40,3
sini	150,4	798,0	320,5	360,6	1800,0	0,7811	96,19	55,8
DTC	150,3	797,5	320,5	361,0	1800,0	0,7804	96,10	57,0
PWM	150,5	798,3	321,3	360,7	1800,0	0,7800	96,13	56,6
sini	200,1	1061,3	422,1	357,2	1800,0	0,7952	96,34	80,4
DTC	200,1	1061,8	424,0	357,1	1800,0	0,7928	96,27	82,0
PWM	200,0	1060,8	423,6	357,3	1800,0	0,7922	96,29	81,5
sini	251,0	1331,4	461,3	431,7	1800,0	0,7532	96,62	95,1
DTC	250,0	1326,1	460,5	431,4	1800,0	0,7525	96,54	96,7
PWM	250,3	1327,8	463,3	431,7	1800,0	0,7483	96,54	96,7
sini	281,2	1492,0	512,7	429,8	1800,0	0,7624	96,65	110,5
DTC	282,0	1496,0	514,9	429,6	1800,0	0,7621	96,59	112,6
PWM	280,8	1489,6	514,3	429,9	1800,0	0,7591	96,59	112,0
sini	251,9	1145,4	581,7	350,7	2100,0	0,7377	96,62	74,8
DTC	250,4	1138,7	581,2	351,2	2100,0	0,7343	96,45	77,7
PWM	251,1	1141,8	585,0	350,8	2100,0	0,7319	96,53	76,3
sini	280,5	1275,6	634,7	355,8	2100,0	0,7416	96,70	90,9
DTC	278,9	1268,3	634,1	356,5	2100,0	0,7378	96,55	94,2
PWM	280,7	1276,2	640,2	355,9	2100,0	0,7361	96,62	93,2
sini	301,7	1371,7	676,8	358,6	2100,0	0,7418	96,73	100,2
DTC	300,4	1366,1	674,9	356,8	2100,0	0,7455	96,61	103,0
PWM	300,7	1367,4	677,9	358,7	2100,0	0,7387	96,66	101,7
sini	321,3	1461,1	712,0	361,1	2100,0	0,7458	96,75	109,0
DTC	320,9	1459,4	713,0	362,0	2100,0	0,7431	96,62	112,6
PWM	321,5	1462,0	717,7	361,2	2100,0	0,7408	96,67	111,5
sini	250,2	995,5	527,2	373,5	2400,0	0,7611	96,37	69,2
DTC	250,4	996,2	527,3	374,0	2400,0	0,7619	96,21	72,3
PWM	250,5	996,8	529,2	373,6	2400,0	0,7597	96,30	70,6
sini	300,2	1194,4	625,8	368,1	2400,0	0,7793	96,54	92,8
DTC	300,4	1195,3	625,4	368,7	2400,0	0,7802	96,42	96,0
PWM	300,6	1196,0	627,0	368,2	2400,0	0,7791	96,49	94,3
sini	319,5	1271,2	662,5	367,6	2400,0	0,7843	96,57	101,1
DTC	319,4	1270,9	666,9	366,5	2400,0	0,7824	96,43	105,3
PWM	319,6	1271,8	666,0	367,6	2400,0	0,7810	96,50	103,1