

VAASAN YLIOPISTO

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

SÄHKÖTEKNIikka

Tero Käsäkangas

**OIKOSULKURENKAAN PITUUDEN VAIKUTUS
SUURNOPEUSMOOTTORIN SUORITUSARVOIHIN**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 24.05.2012

Työn valvoja

Professori Timo Vekara

Työn ohjaaja

TkT Jouni Ikäheimo

Työn tarkastaja

DI Bertil Brännbacka

ALKULAUSE

Työ on tehty ABB Motors Oy:n Vaasan yksikössä. Kiitän lämpimästi kaikkia, jotka ovat tukeneet ja auttaneet tämän diplomityön valmistumisessa.

Haluaisin erityisesti kiittää TkT Jouni Ikäheimoa mielenkiintoisesta työn aiheesta, tuesta työn aikana ja hyvästä ohjaamisesta. Kiitokset myös Professori Timo Vekaralle ja DI Bertil Brännbackalle työn valvomisesta, tarkastamisesta ja viisaista kommentteista työn aikana. Lisäksi haluaisin erityisesti kiittää DI Ville Kivelää ABB:ltä loistavasta tuesta ja opastuksesta työn käytännön toteutuksessa.

Kiitokset myös vanhemmilleni, muulle perheelleni ja ystäväilleni kaikesta siitä jaksamisesta ja tuesta, jota olen saanut osakseni työn teon aikana.

Vaasassa 24.05.2012

Tero Käsäkangas

SISÄLLYSLUETTELO		sivu
ALKULAUSE		2
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO		5
TIIVISTELMÄ		11
ABSTRACT		12
1	JOHDANTO	13
	1.1 Työn aihe ja tavoitteet	14
	1.1 Työn eteneminen ja toteutus	15
2	SUURNOPEUSOVELLUKSET	16
	2.1 Kompressorisovellukset	18
	2.2 Edut perinteisiin teknologioihin verrattuna	21
3	SUURNOPEUSMOOTTORIN RAKENNE	23
	3.1 Staattori	23
	3.1.1 Uramäärän valinta ja yliaaltojen järjestysluvut	24
	3.1.2 Uramuodon vaikutukset magneettivuossa esiintyviin yliaaltoihin	25
	3.1.3 Ilmavälin pituuden vaikutus roottorihäviöihin	29
	3.1.4 Taajuusmuuttajakäytön vaatimukset	29
	3.1.5 Kääminnän merkitys ilmavälin yliaaltoihin	30
	3.2 Roottori	31
	3.2.1 Massiiviroottori	33
	3.2.2 Uritettu massiiviroottori	34
	3.2.3 Komposiittimassiiviroottori	37
	3.2.4 Päälläytämisen vaikutukset roottorin ominaisuuksiin	39
	3.3 Laakerointi	41
	3.4 Jäähdytys	44
4	TEHO, HÄVIÖT JA HYÖTYSUHDE	48
	4.1 Moottorin teho	49
	4.2 Staattorin häviöt	49
	4.3 Roottorin häviöt	50
	4.4 Kitka- ja kaasuvirtaushäviöt	52
	4.5 Hyötysuhde	57
5	SÄHKÖINEN FEM-LASKENTA	58
	5.1 Raja-arvo-ongelmat	59
	5.2 Elementtimenetelmän vaiheet	62
	5.2.1 Laskenta-alueen osittaminen	63
	5.2.2 Interpolointifunktioiden valinta	64
	5.2.3 Järjestelmää kuvaavien yhtälöiden muodostaminen	65
	5.2.4 Yhtälöiden ratkaiseminen	66
	5.3 Elementtiverkko ja sen optimointi	67

5.4	Tulosten analysointi	68
6	SIMULOINTIMALLIN RAKENTAMINEN	71
6.1	Mallin rakentaminen	71
6.1.1	Käämityksen parametrit	74
6.1.2	Staattorin uramuodon mitat	75
6.1.3	Oikosulkurengaan pituuksien mallintaminen	76
6.1.4	Mallissa käytetyt materiaalit	77
6.2	Elementtiverkon hienosäätö	77
6.3	Simulointiaika	78
6.4	Kohdattuja haasteita simuloinneissa	79
6.5	Jälkiprosessointina toteutetut laskennat	81
7	SIMULOINTITULOKSET	82
7.1	Suorat tulokset	82
7.2	Epäsuorasti lasketut tulokset	85
7.3	Roottorin pinnoitteessa kulkevat virrat	89
7.4	Huomiotta jätetyt häviöt	92
8	POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET	93
8.1	Ajatuksia moottorin ominaisuuksien parantamiseksi	94
8.2	Mahdolliset jatkotutkimukset ja -selvitykset	95
9	YHTEENVETO	96
	LÄHDELUETTELO	99
	LIITTEET	102
	Liite 1. Käytetyn teräsmateriaalin (S355J2G3) BH-käyrä	102
	Liite 2. Käytetyn staattorilevymateriaalin BH-käyrä	103
	Liite 3. Numeeriset oikosulkurengas kohtaiset simulointitulokset	104
	Liite 4. Adeptin ja Ansys Maxwell [®] Rmxpert-työkalun arvojen vastaavuudet	105

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Symbolit

<i>A</i>	Ominaisarvotehtävänasettelun kerroinmatriisi
<i>B</i>	Magneettivuon tiheys materiaalissa
<i>B_{fem}</i>	Ominaisarvotehtävänasettelun kerroinmatriisi
<i>B_{max}</i>	Suurin magneettivuon tiheys uran ulkopuolella
<i>B_{min}</i>	Pienin magneettivuon tiheys uran kohdalla
<i>B_n</i>	Magneettivuon tiheyden alenema uran kohdalla
<i>b</i>	Elementtimenetelmän ratkaisun matriisiyhtälön tunnettu oikea puoli
<i>b_i</i>	Matriisiyhtälön oikean puolen vektorin alkio
<i>C</i>	Kerroin laskettaessa roottorin tangentiaalista voimaa
<i>C_f</i>	Kitkakerroin
<i>C_T</i>	Kokeellisesti saatava vääntömomenttikerroin
<i>c</i>	Elementtimenetelmän vakiokerroinvektori
<i>c_j</i>	Elementtimenetelmässä ratkaistava vakiokerroin
<i>D</i>	Sähkövuon tiheys materiaalissa
<i>D_r</i>	Roottorin halkaisija
<i>E</i>	Sähkökentän voimakkuus materiaalissa
<i>E_s</i>	Roottorin pinnoitteessa oleva sähkökentän voimakkuuden suuruus
<i>F</i>	Kappaleeseen kohdistuva voima
<i>f</i>	Signaalin taajuus
<i>f_e</i>	Elementtimenetelmän voima- tai herätefunktio
<i>f_{r,slip}</i>	Roottorin jättämätaajuus
<i>f_{sw}</i>	Taajuusmuuttajan kytkentätaajuus
<i>f_s</i>	Taajuusmuuttajan taajuusohje
<i>f_{stat}</i>	Staattorille syötetty taajuus
<i>g</i>	Positiivinen kokonaisluku
<i>H</i>	Magneettikentän voimakkuus materiaalissa
<i>H_s</i>	Roottorin pinnoitteessa oleva magneettikentän voimakkuuden suuruus
<i>J</i>	Virrantiheys materiaalissa

K	Elementtimenetelmän välivaiheiden kautta saatava $N \times N$ kerroinmatriisi
k_1	Roottorin pinnanmuotokerroin, joka kertoo pinnan sileydestä
k_2	Nopeuskerroin
L_r	Roottorin pituus
M	Elementtien lukumäärä
m	Vaiheiden lukumäärä
N^e	Interpolointifunktiovektori
N	Koko järjestelmän solmupisteiden lukumäärä
N_j^g	Interpolointifunktio koko järjestelmän laajuisella solmupistenumeroinnilla
N_j^e	Interpolointifunktio
n	Elementin solmupisteiden lukumäärä
n_{speed}	Pyörimisnopeus
o	Uran avauman pituus
o'	Havaittavan magneettivuon muutoksen alue uran kohdalla
P_{anto}	Laitteen teoreettinen antoteho
$P_{\text{Cu,r}}$	Roottorin kuparihäviöt
$P_{\text{Cu,s}}$	Staattorin kuparihäviöt
P_{exc}	Staattorin hajahäviöt
$P_{\text{Fe,r}}$	Roottorin rautahäviöt
$P_{\text{Fe,s}}$	Staattorin rautahäviöt
$P_{\text{f,a}}$	Kaasun tangentiaalisesta liikkeestä johtuvat häviöt
$P_{\text{f,end}}$	Roottorin päätyjen aiheuttamat kaasuhäviöt
$P_{\text{fr, bearings}}$	Moottorin laakerihäviöt
$P_{\text{fr,total}}$	Roottorissa tapahtuvat kaasu- ja kitkahäviöt
$P_{\text{fund,r}}$	Roottorissa sähkömagneettisen vääntömomentin tuottamiseen liittyvät häviöt
P_{gas}	Kaasuhäviöt
$P_{\text{hyst,r}}$	Roottorin ferromagneettisissa materiaaleissa tapahtuvat hystereesihäviöt
P_{in}	Moottorin ottoteho
$P_{\text{J,r}}$	Roottorissa tapahtuvat Joule-häviöt
P_{mech}	Moottorin mekaaninen teho

P_{otto}	Laitteen teoreettinen ottoteho
P_r	Teho, joka halutaan poistaa roottorihäviöistä johtumisen avulla
$P_{r,\text{loss}}$	Roottorihäviöt
$P_{s,\text{loss}}$	Staattorihäviöt
$P_{\text{surf},r}$	Roottorin pinnassa tapahtuvat ilmavälin harmonisista johtuvat pyörrevirtahäviöt
P_{δ}	Ilmaväliteho
p	Napaparien lukumäärä
Q_t	Roottorin uraluku
Q_s	Staattorin uraluku
q_m	Jäähdytyskaasun massanopeus
q_s	Urien lukumäärä per napa
Re_{δ}	Kaasuvirtauksen Reynoldsin luku
R_i	Galerkinin menetelmän painotettujen jäännösten integraali
r	Sylinterin säde
r_{fem}	Galerkinin menetelmän jäännös
$r_{\text{end},1}$	Roottorin päädyn ulompi säde
$r_{\text{end},2}$	Roottorin päädyn sisempi säde
r_1	Roottorin säde
r_2	Staattorin sisähalkaisija
S	Elementtimenetelmän ratkaisun matriisiyhtälön kerroinmatriisi
S_{ij}	Matriisiyhtälön kerroinmatriisin alkio
s	Suhteellinen jättämä
s_{shift}	Virtuaalinen siirtymä
T	Moottorin vääntömomentti
T_{em}	Moottorin tuottama sähkömagneettinen vääntömomentti
ΔT	Roottorin ja staattorin välinen lämpötilaero
t	Aika
Δt	Siniaaltojen vaihe-eroa kuvaava aika
u	Yhtälöstä 5 saatava apukerroin laskettaessa suhdetta β
u_m	Roottorin tangentiaalinen nopeus
u_1	Roottorin kehänopeus

V	Tilavuus
\mathbf{v}	Elementtimenetelmän ratkaisufunktiovektori
ν	Kolmivaihekäämityksen synnyttämien tilaharmonisten yliaaltojen järjestysluku
ν_i	Elementtimenetelmän ratkaisua approksimoiva funktio
ν_j	Elementtimenetelmässä alueen kattava ratkaisufunktio
ν_m	Kaasun aksiaalisen virtausnopeuden keskiarvo
ν_p	Materiaalin Poisson-kerroin
ν_{slot}	Urien synnyttämien aika-harmonisten yliaaltojen järjestysluku
W_{co}	Magneettinen liittoenergia
w	Vyyhden leveys
w_i	Galerkinin menetelmän painofunktio
Z	Impedanssi roottorin pinnan tuntumassa
\mathcal{L}	Differentiaalioperaattorit

Kreikkalaiset kirjaimet

α	Lämmönsiirtokerroin
β	Ilmavälin pituuden ja uran avauman välinen suhde
Γ	Elementtimenetelmän raja-arvot
Δ_i	Roottorin pinnoitekerroksen paksuus suhteessa edelliseen kerrokseen
δ	Ilmavälin pituus
ε	Materiaalin permittiivisyys
η	Hyötysuhde
η_{max}	Suurin saavutettava hyötysuhde
θ	Virtuaalinen kulman muutos
λ	Ominaisarvotehtävänasettelun tuntemattomat ominaisarvot
μ	Materiaalin permeabiliteetti
$\mu_{1..n}$	Roottorin pinnoitekerroksen permeabiliteetti
ρ	Tiheys (Kiinteä tai kaasumainen)
ρ_c	Varaustiheys
σ	Materiaalin johtavuus

$\sigma_{1..n}$	Roottorin pinnoitekerroksen johtavuus
σ_{\max}	Roottorin maksimi tangentiaalinen rasitus
σ_{\tan}	Roottorin tangentiaalinen rasitus
τ_p	Napajako
$\boldsymbol{\phi}$	Tuntemattomien interpolointifunktioiden kerroinvektori
ϕ	Elementtimenetelmän tuntematon ratkaisu
$\boldsymbol{\phi}^e$	Ratkaisun arvovektori solmupisteittäin
$\tilde{\phi}$	Elementtimenetelmän ratkaisun testifunktio
$\tilde{\phi}^e$	Yksittäisen elementin ratkaisua kuvaava testifunktio
ϕ_j^e	Ratkaisun ϕ arvo elementin solmupisteessä j
φ	Signaalien vaihe-ero radiaaneina
Ω	Elementtimenetelmän määrätty laskenta-alue
Ω_r	Roottorin kulmanopeus
Ω_{syn}	Synkronikulmanopeus
ω	Roottorin kulmanopeus
ω_m	Magneettivuon kulmanopeus
ω_s	Staattorin kulmanopeus

Lyhenteet

2D	Kaksiulotteinen (Two-dimensional)
3D	Kolmiulotteinen (Three-dimensional)
ABB	Asea Brown Boveri
DSP	Digitaalinen signaaliprosessori (Digital Signal Processor)
EGR	Pakokaasujen kierrätysjärjestelmä (Exhaust Gas Recirculation)
FEM	Elementtimenetelmä (Finite Element Method)
HST	High Speed Tech
LTKK	Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu
LUT	Lappeenrannan teknillinen yliopisto (Lappeenranta University of Technology)
PID	Proportional-Integral-Derivative -säädin
PWM	Pulssinleveysmodulaatio (Pulse Width Modulation)

RMS	Tehollisarvo (Root Mean Square)
R134a	1,1,1,2-Tetrafluoroethane
TEKES	Teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskus
TKK	Teknillinen korkeakoulu

VAASAN YLIOPISTO**Teknillinen tiedekunta****Tekijä:**

Tero Käsäkangas

Diplomityön nimi:Oikosulkurenkaan pituuden vaikutus
suurnopeusmoottorin suoritusarvoihin**Valvoja:**

Professori Timo Vekara

Ohjaaja:

TkT Jouni Ikäheimo

Tarkastaja:

DI Bertil Brännbacka

Tutkinto:

Diplomi- insinööri

Oppiaine:

Sähkötekniikka

Opintojen aloitusvuosi:

2004

Diplomityön valmistumisvuosi:

2012

Sivumäärä: 105

TIIVISTELMÄ

Lähtökohtana oli tutkia elementtimenetelmän avulla suurnopeusmoottorin oikosulkurenkaiden pituuden vaikutusta moottorin ominaisuuksiin. Työn kohteena oli 20 kW:n massiiviroottorinen suurnopeusmoottori, jonka nimellisnopeus on 50 krpm ja jota käytetään asiakkaan pakokaasujen kierrätysjärjestelmässä. Elementtimenetelmään perustuvilla laskelmilla moottorin tehokerrointa, roottorin pyörrevirtojen aiheuttamia virtalämpöhäviöitä eli Joule-häviöitä ja hyötysuhdetta vertaillaan oikosulkurenkaiden pituuksilla 0, 10, 20, 30, 40 ja 50 mm.

Suurnopeusmoottorissa tavanomaisen häkkikäämiroottorin tilalle on vaihdettu yhtenäisestä materiaalista valmistettu massiiviroottori suuren pyörimisnopeuden ja termisen rasituksenkestokyvyn vuoksi. Roottorin rakenteisiin on monia toteutustapoja ja ratkaisuja, mutta tässä työssä keskityttiin lopulta tutkimaan 2 mm:n kuparikerroksella päällystetyn teräsroottorin sisältävän moottorin ominaisuuksia. Koska häviöt ja niiden hallinta on olennainen osa tehokkaan suurnopeusmoottorin suunnittelua, työn teoriaosuudessa käydään läpi moottorin teknisten ratkaisujen vaikutukset moottorissa syntyviin häviöihin. Lisäksi diplomityö sisältää lyhyen elementtimenetelmän esittelyosuuden.

Simulointien perusteella voitiin todeta, että oikosulkurengas on tarpeellinen massiiviroottorissa. Ilman oikosulkurengasta moottorin sähköiset arvot ja teho olivat huonoimmat verrattuna kaikkiin muihin simuloituihin rakenteisiin. Simulointien perusteella sopiva oikosulkurenkaan pituus on 10 mm tai 20 mm. Mitä lyhyempi oikosulkurengas on, sitä korkeammalle se nostaa roottorin kriittistä taajuutta, mikä mahdollistaa moottorin ajamisen korkeammalla pyörimisnopeudella. Tästä on etua kompressorisovelluksissa, missä ahdinpyörän hyötysuhde paranee nopeuden kasvaessa.

AVAINSANAT: Suurnopeusmoottori, massiiviroottori, oikosulkurengas,
elementtimenetelmä, kompressori

UNIVERSITY OF VAASA**Faculty of technology**

Author:	Tero Känsäkangas
Topic of the Thesis:	The Effects of End Ring Lengths of Solid Rotor on the Properties of High Speed Motor
Supervisor:	Professor Timo Vekara
Instructor:	D.Sc.(Tech.) Jouni Ikäheimo
Evaluator:	M.Sc. Bertil Brännbacka
Degree:	Master of Science in Technology
Major of Subject:	Electrical Engineering
Year of Entering the University:	2004
Year of Completing the Thesis:	2012

Pages: 105

ABSTRACT

The focus of the study was to use finite element method in simulation of the high speed motor with different end ring lengths and effects they have on key motor performance parameters. The induction motor was a 50 krpm 20 kW solid rotor high speed motor designed for ABB's customer use in an EGR-project. The finite element method was the main tool analyzing motor power factor, Joule losses and efficiency with end ring lengths of 0, 10, 20, 30, 40 and 50 mm.

A high-speed motor is otherwise the same as a traditional induction motor but the squirrel cage rotor must be exchanged into solid rotor. Use of solid rotor is recommended when dealing with high rotational speeds and thermal stresses. There are many ways and methods to create a solid rotor with different properties but this work focuses directly on a solid steel rotor with copper coating which is the chosen rotor type for this project. Because losses and loss management are a crucial part of efficient high speed motor design, the study holds sections dedicated for ways to technically achieve lower loss levels, losses and loss types. Additionally, there is a short theory section of the finite element method used through the work.

Judging from simulation results, the end ring is necessary piece of solid rotor. With no end rings, which means 0 mm end ring in simulations, the motor's electrical parameters and performance were the poorest of all simulated end ring lengths. The best end ring will be either a 10 mm or a 20 mm in length. A shorter end ring results in a shorter rotor which raises the critical speeds. Raising critical speeds allows running the motor at a higher nominal speed. In compression applications the greater speed of the impeller will result in better overall performance of the compressor.

KEYWORDS: High speed motor, solid rotor, end ring, finite element method, compressor

1 JOHDANTO

Induktiomoottori on mullistanut maailmaamme enemmän kuin usein huomataankaan; induktiomoottorit pyörittävät teollisuudessa prosesseja, kuljetusratoja, pumppuja, puhaltimia ja monia muitakin toimilaitteita, joita ilman nykyaikainen, tehokas teollinen tuotanto ei ole mahdollista. Tässä työssä tutustutaan vielä harvinaiseen induktiomoottoreiden alaluokkaan eli suurnopeusmoottoriin ja sen ominaisuuksiin. Suurnopeusmoottoreilla tarkoitetaan induktiomoottoreita, jotka pyörivät huomattavasti tavallisen verkkotaajuuden määräämää pyörimisnopeutta nopeammin. Näihin nopeuksiin ollaan päästy vasta taajuusmuuttajakäyttöjen kehittymisen myötä. Suurnopeusmoottori ja induktiomoottori toimivat samalla periaatteella, mutta induktiomoottorissa käytetyn häkkikämmiroottorin sijaan suurnopeusmoottorissa on massiiviroottori, jonka toteutukseen on useampia eri tekniikoita. Seuraavissa kappaleissa käsitellään lyhyesti induktiomoottorin historiaa, suurnopeustekniikan historiaa sekä ABB Oy:n tavoitteita suurnopeustekniikan alueella.

Induktiomoottorin keksi alunperin Nikola Tesla kehittäessään kolmivaiheisen vaihtosähköjärjestelmän. Patentti Teslalle myönnettiin vuonna 1888. Teslan idea sähkömoottorin parantamiseksi lähti liikkeelle hänen nähdessään tasavirtamoottorin kommutaattorilla varustettuna. Tesla halusikin päästä eroon kuluvaan ja hiilet vaativasta kommutaattorista. Tämän lisäksi useat tutkijat olivat demonstroineet liikkuvan magneettikentän synnyttävän voiman kuparijohtimeen. Ensimmäisessä patentissaan Tesla kuvaa sähkömoottorin toiminnan ja roottoreista sekä käämityn roottorin että massiiviroottorin. Häkkikämmitys kehitettiin vasta myöhemmin. (Jarvis 1969: 436 - 468.)

Suomessa on huippuosaamista suurnopeustekniikassa. Jo 1980-luvulla Suomessa aloitettiin valtion tuella panostus suurnopeustekniikan kehitykseen. Yrityspoolellakin otettiin askelia suurnopeustekniikan kehittämisessä, kun muun muassa Rauma-Repola suuntasi katseensa suurnopeustekniikan mahdollisuuksiin sukellusveneprojektissaan. Tämän jälkeen kehitystä on tehty eri sovellusten ja tekniikoiden parissa, sekä Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa että Teknillisen korkeakoulun (nykyinen Aalto

yliopisto) toimesta. (Larjola, Arkkio & Pyrhönen 2010: 3 - 4.) Kuvassa 1 nähdään yksi mahdollisista suurnopeusmoottorin roottorirakenteista.



Kuva 1. Eräs suurnopeusmoottorin roottorirakennevaihtoehto. (Larjola, Arkkio & Pyrhönen 2010: 65).

1.1 Työn aihe ja tavoitteet

Työn tarkoituksena on simuloida Ansys Maxwell[®] -ohjelmistolla suurnopeusmoottorin oikosulkurenkana toimivan roottoriosuuden pituuden vaikutuksia moottorin sähköisiin ominaisuuksiin. Mallinnettavana moottorina on 50 krpm:n ja 20 kW:n pakokaasujen takaisinkierrätyssovellukseen (Exhaust Gas Recirculation, EGR) suunniteltava suurnopeusmoottori. Moottorissa on roottorina massiiviroottori, jonka pinnalle on räjäytyshitsattu 2 mm paksuinen kuparikerros sähköjohtavuuden parantamiseksi. Simuloinnit toteutetaan kokonaisuudessaan elementtimenetelmälaskennalla (Finite Element Method, FEM), jolla voidaan ratkaista monimutkaisiakin ongelmia.

Työn tavoitteena on laskea simulointien tulosten perusteella roottorin häviöt, moottorin tehokerroin sekä hyötysuhde ja vertailla eri renkaiden tuloksia keskenään. Tulosten perusteella pohditaan renkaan optimikokoa, joka vaikuttaa moottorin mekaanisiin ja

sähköisiin ratkaisuihin. Varsinkin roottorissa tapahtuvat häviöt kiinnostavat moottorin jäähdytyksen suunnittelijaa.

1.1 Työn eteneminen ja toteutus

Työssä käytetään Ansys Maxwell[®] -ohjelmistoa. Ohjelmisto mahdollistaa sähköisen FEM-laskennan toteuttamisen monimutkaisissakin malleissa. Ratkaisut on mahdollista toteuttaa joko kaksi- (Two-dimensional, 2D) tai kolmiulotteisessa (Three-dimensional, 3D) tilassa. Ratkaisijalla voidaan laskea niin aika-askel kuin myös aikaharmonisia laskentoja riippuen halutusta ratkaisusta. Maxwell[®] -ohjelma on myös mahdollista yhdistää muihin Ansysin ohjelmistoratkaisuihin esimerkiksi termisten ja mekaanisten ongelmien ratkaisemiseksi samalla kertaa. (ANSYS Inc. 2011.)

Simuloinneissa tarkastellaan moottorin toimintaa virtaohjauksella ja vakiojättämällä. Oikosulkurenkaat, joita tutkitaan, ovat pituudeltaan 0, 10, 20, 30, 40 ja 50 mm. Pituudeltaan 0 mm:n oikosulkurengas vastaa tilannetta, jossa roottorin kupariosuus ei tule ulos staattorin sisältä lainkaan. Jokaiselle oikosulkurenkaalle on arvioitu 20 kW:n mekaanisen tehon jättämää muuttuvan jättämän simuloinnilla, jonka jälkeen jokainen rengas simuloidaan vakiojättämällä, kunnes vääntömomenttikäyrä tasoittuu. Jälkimmäisestä simuloinnista saatujen tulosten perusteella lasketaan suhteelliset arvot moottorin sähköisille ominaisuuksille. Suhteellisarvojen avulla vältetään jälkimmäisen simuloinnin pieneltä epätarkkuudelta mekaanisen ja sähköisen tehon kannalta.

Työssä käsitellään ensin teoriaosuuden avulla suurnopeussovelluksia, suurnopeusmoottorin rakennetta ja laskentaan liittyvää teoriaa. Teoriaosuus koostuu kappaleista 2 - 5. Käytännön työtä ja simulointituloksia käsitellään kappaleissa 6 - 7. Kappaleessa 8 on koostettuna työn tulokset ja pohdinta tulosten yhtenevyydestä teorian kanssa.

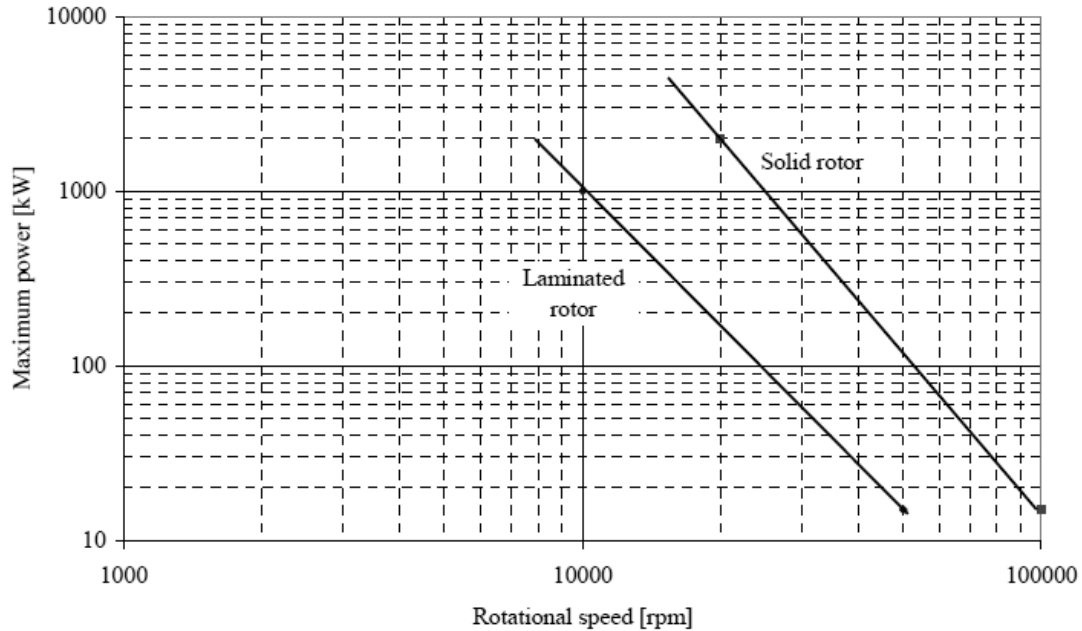
2 SUURNOPEUSSOVELLUKSET

Suurnopeustekniikan kehitystä on tuettu Suomessa vahvasti Teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskuksen (TEKES) projektien kautta. Ensimmäinen TEKES-projekti aloitettiin jo vuonna 1985, jolloin professori Larjolan työryhmä sai tutkimusrahan kompressorisovellusten tutkimista varten. Jo suhteellisen alusta lähtien projekteissa oli mukana myös Rauma-Repola Oy, joka Teknillisen korkeakoulun (TKK, nykyään Aalto-yliopisto) ja Lappeenrannan teknillisen korkeakoulun kanssa (LTKK, nykyään Lappeenrannan teknillinen yliopisto LUT) yhteistyössä kehitti käytännön sovelluksia teknologiakehityksen lisäksi. (Larjola, Arkkio & Pyrhönen 2010: 3 - 4.) Jo melko varhaisessa vaiheessa myös LTKK lanseerasi ensimmäisenä maailmassa käsitteen ”suurnopeustekniikka,” mikä sisälsi vaihteettomasti yhdistetyt työ- ja sähkökoneen sekä taajuusmuuttajan (Larjola, Arkkio & Pyrhönen 2010: 11).

Suurnopeustekniikan käyttöalueeksi voidaan laskea ne nopeusalueet, joilla tavanomainen laminoitu roottori ei enää kestä mekaanisia rasituksia. Kriittiset nopeudet laminoiduille roottoreille vaihtelevat 50 krpm ja 10 krpm välillä, kun taas massiiviroottorit kestävät jopa 100 krpm nopeuksia. Edellä esitetyt nopeudet laminoiduille roottoreille vaativat jo erikoisrakenteiden käyttöä, mikä lisää kustannuksia. Massiiviroottorisille moottoreille rajoittava tekijä on moottorin lämmönkesto ja jäädytyksen suunnittelu. (Huppunen 2004: 18 - 19.) Myös massiiviroottorisen oikosulkukoneen kestävyys vaikeissa olosuhteissa on synnyttänyt kiinnostusta sitä kohtaan. Ensin moottorityyppiä käytettiin kestävyytensä ja pienen kokonsa takia avaruus- ja sotilasjärjestelmissä. Myöhemmin kuvaan ovat nousseet myös siviilisovellukset, joissa tarvitaan varmatoimisuutta vaikeissa olosuhteissa. (Aho 2007: 14.) Kuvassa 2 on esitettyä laminoitua roottorin ja massiiviroottorisen moottorin nopeus tehon suhteen. Kuvasta nähdään, että massiiviroottorilla on huomattavasti parempi teho-nopeussuhde tavanomaiseen laminoituun roottoriin verrattuna.

Suurnopeustekniikan eri sovellusalueiksi voidaan laskea turbiinit, pumput, kompressorit ja työstökoneiden karat (Larjola, Arkkio & Pyrhönen 2010: 7). Kaupallisiksi

sovelluksiksi ovatkin nousseet eri ilmauskompressorit, korkeapainekompressorit, alipainekompressorit sekä kaasukompressorit.



Kuva 2. Laminoidun roottorin ja massiiviroottorin teho nopeuden suhteen, kun käytetyn teräksen vahvuus on 700 MPa (Huppunen 2004: 19).

Suurnopeussovellusten yksi suurimmista käyttökohteista ovatkin erilaiset turboratkaisut, kompressorituotteet, puhaltimet ja kaasuturbiinit. Näiden sovellusten käytössä voidaan saavuttaa suuria etuja, kun nopeutta nostava ja huoltoa vaativa vaihteisto voidaan poistaa järjestelmästä. (Huppunen 2004: 19 - 20.) Uudentyyppiset suurnopeussovellukset vaativat myös huomattavasti pienemmän tilan verrattuna tavanomaiseen vaihteistolliseen ratkaisuun verrattuna. Koon pieneminen johtuu pääosin vaihteiston poistumisesta ja siitä, että suurnopeusmoottori on kooltaan vain kolmannes vastaavan tehoisen vakio moottorin koosta. (Aho 2007: 18 - 19.) Kuvassa 3 on nähtävissä High Speed Tech Oy Ltd:n (HST) päätuote, ilmaistuskompressorit, jossa suurnopeusmoottori on magneettilaakereilla varustettuna.

Yliopistoissa tutkitaan tällä hetkellä suurnopeusmoottoreiden hyötysuhteen parantamista. Suurimmat panostukset tutkimuksessa on tällä hetkellä nähtävissä vuon

hallinnassa roottorin pinnalla, missä mahdollisimman sinimuotoinen vuo takaa pienet häviöt ja suuren hyötysuhteen.



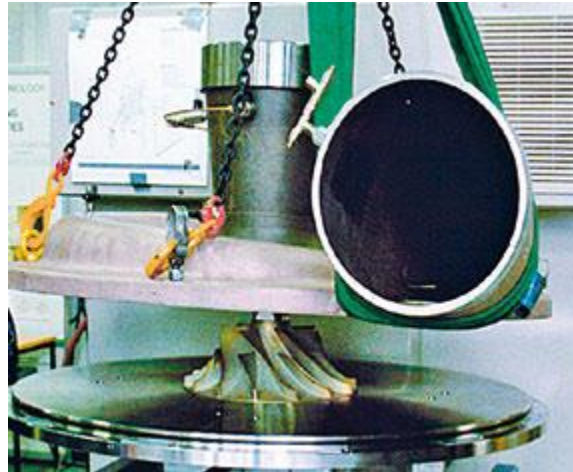
Kuva 3. HST:n ilmaistuskompressori (Larjola, Arkkio & Pyrhönen 2010: 21).

Tutkimusmoottoreilla on jo päästy hyötysuhteessa hyvin lähelle vastaavan tehoisten kaupallisten häkkikämmimoottorien tasoa. Yliopistot tekevät myös keskenään paljon yhteistyötä, josta osoituksena ovatkin Lappeenrannan yliopiston kehitysprojektit kestopagneettimoottoreiden kehittämiseksi. Valitettavasti kestopagneettimoottorit eivät hankalan teknisen toteutuksensa vuoksi sovellu keski- ja suurtehoisiin moottoriluokkiin. (Huppunen 2004: 17.)

2.1 Kompressorisovellukset

Suurnopeusmoottoreiden käyttö kompressorisovelluksissa tuo kiistattomia etuja niiden koon, hyötysuhteen kuin myös kokonaiskustannusten kannalta. Kompressorisovelluksilla tarkoitetaan kaasun paineistamista suurella nopeudella pyörivän turbopyörän avulla. Kuvassa 4 on esitettyä radiaalikompressorin ahdinpyörä.

Joissakin tapauksissa itse ahdinpyörä ja moottori voidaan sisällyttää samalle akselille ja kotelointiin, jolloin itse käsiteltävä kaasu toimii moottorin jäähdytyksessä aktiivisesti. Tällöin voidaan käyttää myös yksinkertaisempia laakerointirakenteita, sillä akselin ei tarvitse tulla ulos koteloinnista.

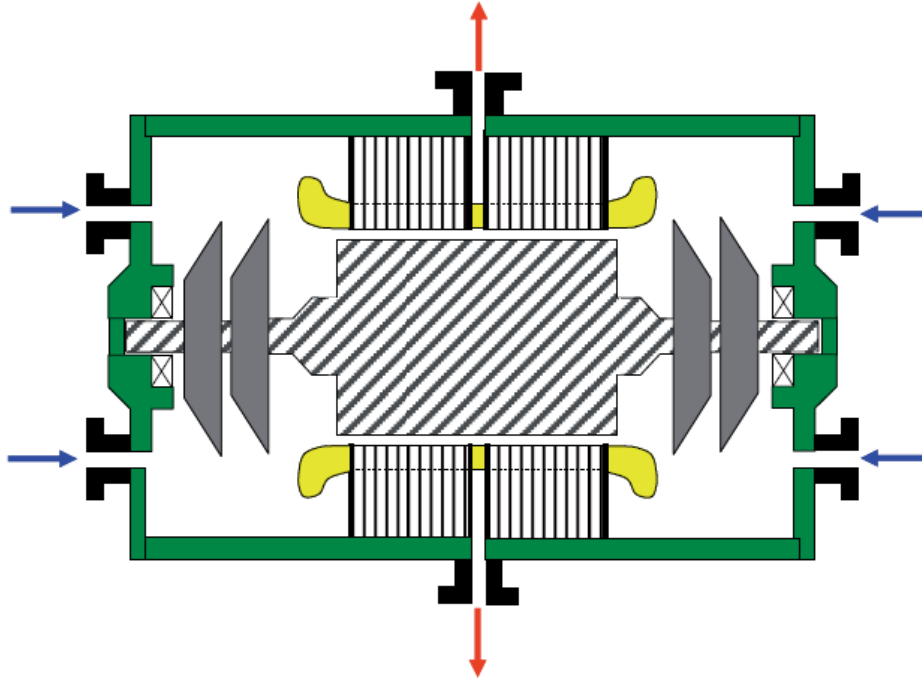


Kuva 4. Radiaalikompressoripää käytettäväksi suurnopeusmoottorin kanssa (Larjola, Arkkio & Pyrhönen 2010: 27).

Lisäksi magneettisella laakeroinnilla varustettuna voidaan kompressorista tehdä täysin öljytön ja suljettu järjestelmä. Tämän tyyppiset järjestelmät soveltuvat hyvin esimerkiksi merenalaisiin pumppusovelluksiin, joissa merenpohjaan asennettu putki sisältää valmiiksi kompressorin. (Aho 2007: 20.)

Käytettäessä kompressoria muuhun kuin ilman ahtamiseen syntyy haasteita järjestelmän kestävyudessa. Maakaasujärjestelmissä raakakaasu sisältää suuria määriä epäpuhtauksia, joiden vaikutuksesta joudutaan tekemään erityisratkaisuja komponenttien materiaaleille. Varsinkin raakakaasun vesi, rikkihappo, vety-yhdisteet ja hiekka tekevät kuparin mahdottomaksi materiaaliksi suurnopeusmoottorin roottorissa. Tällöin roottori onkin tehtävä teräksestä, mikä vaikuttaa huomattavasti moottorin ominaisuuksiin. (Pyrhonen J., Nerg J., Kurronen P. & Lauber U. 2009: 272 - 273.) Edellä mainittu sovellus antaa hyvän esimerkin siitä, miksi suurnopeussovellusten moottorit joudutaan toteuttamaan aina ottaen huomioon sovelluskohtaiset erityisrajoitukset ja ehdot. Kuvassa 5 on eräs kompressorin ja suurnopeusmoottorin integroiva ratkaisu. Siinä nähdään, että työkaasua voidaan myös käyttää hyväksi moottorin jäähdytyksessä.

Sovellukset ulottuvat myös raskaan liikenteen dieselmootoreiden turboahtimiin asennettaviin massiiviroottorimootoreihin. Näissä sovelluksissa moottorille asetetaan tiukat vaatimukset sekä koon että kestävyysvaatimusten suhteen.

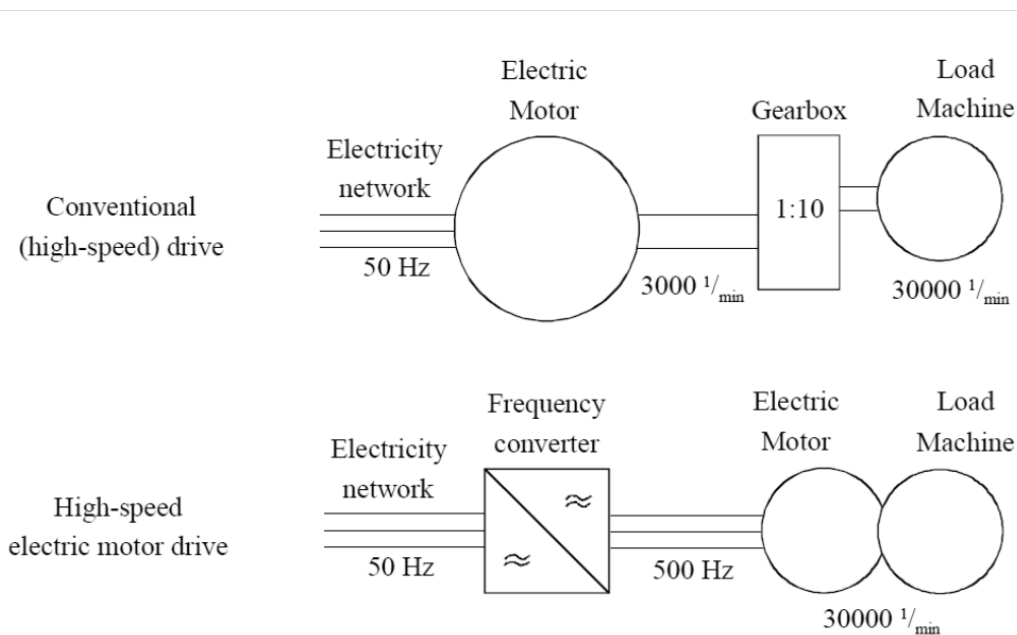


Kuva 5. Kompressorin ja suurnopeusmoottorin integroiva rakenne (Aho 2007: 19).
Kuvaa muokattu.

Raskaan liikenteen – esimerkiksi bussien ja tavarankuljetuksen-käytöissä – yleinen työkierto sisältää paljon pysähdyksiä, moottorin uudelleenkäynnistyksiä ja raskaita kiihdytyksiä, mitkä asettavat kestävyysvaatimukset korkealle. Jos nämä vaatimukset saadaan täytetyksi, se näkyy moottorin kulutuksen laskuna, koska sähkömoottori kykenee transienttilanteissa kiihdyttämään turbon moottorin vaatimalle kierrosalueelle. Tällöin turbo kykenee antamaan täyden hyödyn moottorille kaikissa tilanteissa. Sähkönenergian varastointi pakokaasujen hukkalämpöenergiasta turbon avulla on nostettu esille, jolloin polttoainetaloutta voitaisiin parantaa vieläkin enemmän. (Bumby, Spooner & Jagiela 2006: 32.)

2.2 Edut perinteisiin teknologioihin verrattuna

Suurnopeuskäytöllä voidaan poistaa perinteisesti käytetty vaihteisto suurta pyörimisnopeutta vaativissa sovelluksissa. Taajuusmuuttajien käyttö on laajalti mahdollistanut vaihteiston poistamisen työkoneen ja voimakoneen väliltä, mikä mahdollistaa huomattavasti kestävämmän ja huoltovapaamman järjestelmän rakentamisen. Taajuusmuuttaja tosin aiheuttaa uudenlaisia haasteita moottorin suunnittelulle. Taajuusmuuttajasta saatu jännite ja virta eivät ole sinimuotoisia, mikä aiheuttaa moottoriin lisähäviöitä muun muassa pyörrevirtahäviöiden muodossa. Pyörrevirtahäviöiden ollessa vahvasti taajuuteen sidottuja kasvaa niiden osuus kokonaishäviöiden määrästä huomattavasti suuremmaksi kuin tavanomaisessa induktiomoottorissa, mikä synnyttää tarpeen erilaiselle suunnittelulle. Kuvassa 6 on esitettyä periaatekuvat vaihteistolla ja taajuusmuuttajalla toteutetuista suurnopeussovelluksista. (Lähteenmäki 2002: 11 - 13.)



Kuva 6. Periaatekuvat taajuusmuuttaja- ja vaihteistokäyttöisistä sovelluksista (Lähteenmäki 2002: 13).

Taajuusmuuttajan häviöt ovat suunnilleen samat, kuin yksiportaisen vaihteiston eli noin 1 - 1,5 %. Vaihteistoa käytettäessä häviöt riippuvat vaihteistossa käytettävästä

porrasluvusta ja kuormituksesta. Vaihteiston hyötysuhde pienenee kuormituksen keventyessä. Lisäksi vaihteisto tarvitsee voiteluöljyn, huoltoa ja jäähdytyksen, mitkä tekevät vaihteistosta jopa hieman kalliimman komponentin taajuusmuuttajaan verrattuna. (Aho 2007: 18.) On myös muistettava, että taajuusmuuttajia käytettäessä voidaan moottorin nopeutta säätää huomattavasti joustavammin verrattuna vaihteistokäyttöön (Huppunen 2004: 16). Lisäksi suurnopeusmoottorin koko on perinteisesti suunnilleen kolmasosa tai jopa neljäsosa perinteiseen induktiomoottoriin verrattuna. Tämä edellyttää tehokkaan jäähdytyksen suunnittelua. (Aho 2007: 19.)

3 SUURNOPEUSMOOTTORIN RAKENNE

Tässä luvussa käydään läpi suurnopeusmoottorin perusrakenne, jäähdytys ja sähköisiä ominaisuuksia. Samoin kuin tavallinen induktiomoottori, suurnopeusmoottorikin muuntaa sähkömagneettisen energian mekaaniseksi energiaksi. Erona näiden moottorien välillä on, että suurnopeusmoottorilla saavutetaan suuri akseliteho, kun taas induktiomoottorilla saavutetaan yleensä suurempi vääntömomentti. Tämä ominaisuus tekee suurnopeusmoottorista erityisen hyvin soveltuvaksi puhallin-, pumppu- ja kompressorisovelluksiin. (Aho 2007: 33.)

Sähköisesti suurnopeusmoottori on erittäin heikko. Suurnopeusmoottorin laskeminen analyyttisillä menetelmillä, kuten sijaiskytkentään perustuvalla laskennalla, on haastava tehtävä. Varsinkin roottorin impedanssin laskeminen on erityisen haasteellinen toimenpide, koska massiiviroottorin impedanssi riippuu virranahtoilmiön kautta jättämästä ja roottorin magneettisesta tilasta. (Aho 2007: 29.) Tavanomaiseen häkkikäämiin verrattuna suurnopeusroottorin impedanssi on suurempi ja suurimmaksi osaksi induktiivinen (Huppunen 2004: 26). Suurnopeusmoottorin suunnitteleminen kiteytyy käytännössä jättämän ja roottorissa tapahtuvien häviöiden minimointiin. Jättämää pyritään minimoimaan mahdollisimman hyvän vuon tunkeutuman saamiseksi. (Aho 2007: 51.)

3.1 Staattori

Staattorin rakenne on periaatteessa vastaava kuin tavanomaisessakin induktiomoottorissa. Pienillä staattorin uramuodon, käämityksen, urien lukumäärän ja ilmavälin pituuden muutoksilla massiiviroottorisen moottorin ominaisuuksia voidaan kuitenkin huomattavasti parantaa. Tässä kappaleessa käydäänkin läpi edellä mainittuja muutoksia ja niiden vaikutuksia moottorin ominaisuuksiin. Tärkeimpänä tavoitteena on saavuttaa roottorille mahdollisimman sinimuotoinen magnetomotorinen voima, jolloin voidaan massiiviroottorinen moottori saavuttaa hyvät sähköiset ominaisuudet (Huppunen 2004: 63).

3.1.1 Uramäärän valinta ja yliaaltojen järjestysluvut

Suurnopeuskoneiden tavanomainen staattori on kaksinapainen. Kolmivaihekäämitys synnyttää ilmaväliin pelkästään parittomia yliaaltoja, mutta 5. ja 7. yliaalto synnyttävät roottorin pinnalle 6. harmonisen yliaaltovirran, mikä taas aiheuttaa kuusinkertaisella taajuudella vaikuttavan momentin roottoriin, mikä näkyy moottorin tärinänä. Tätä momenttia voidaan vaimentaa käyttämällä staattorissa urien lukumäärää, joka on jaollinen $2pm$:llä, missä p on napaparien lukumäärä ja m on vaiheiden lukumäärä. Tällöin kaksinapaiselle kolmivaihemoottorille mahdolliset uralukumäärät ovat 12, 24, 36, 48, 60, jne. (Aho 2007: 92 - 93.)

Yliaallot muodostavat ison haasteen staattorin rakenteen suunnittelulle. Staattorin optimoinnissa tehdäänkin iso työ juuri staattorin muodostamien tila- ja aikaharmonisten yliaaltojen vähentämiseksi. Kuten edellä mainittiin, urien lukumäärää muuttamalla voidaan vähentää roottorille indusoituvan 6. yliaaltovirran tuottamaa vääntömomenttia. Staattorin tuottamien yliaaltojen järjestysnumerot voidaankin laskea yhtälöillä 1 ja 2. Kolmivaihekäämityksen tuottamien tilaharmonisten yliaaltojen järjestysluvut saadaan laskettua

$$v = 2mk_s + 1, \quad (1)$$

missä

m on vaiheiden lukumäärä ja

k_s on 0, ± 1 , ± 2 , ± 3 , jne.

Urien aiheuttamien aikaharmonisten yliaaltojen järjestysluvut saadaan laskettua

$$v_{\text{slot}} = 1 + 2mq_s k_{\text{slot}} = 1 + \frac{Q_s}{p} k_s, \quad (2)$$

missä

m on vaiheiden lukumäärä,

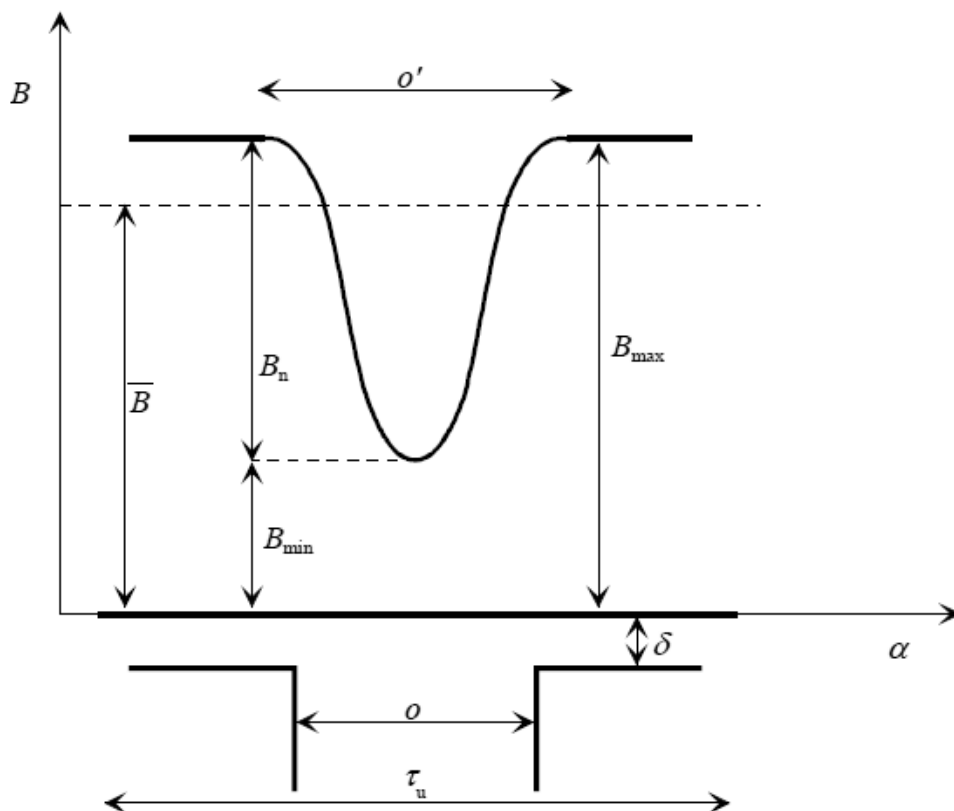
q_s on urien lukumäärä per napa,

- k_s on $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ jne. ja
 Q_s on staattoriurien lukumäärä. (Aho 2007: 92.)

Yhtälöt eivät kuitenkaan kerro yliaaltojen suuruusluokista ja ne antavatkin vain suuntaa antavan kuvan moottorin yliaalloista. Lisäksi tulee muistaa, että käytetty taajuusmuuttaja syöttää yliaaltoja, joihin ei voida staattorin optimoinnilla vaikuttaa.

3.1.2 Uramuodon vaikutukset magneettivuossa esiintyviin yliaaltoihin

Staattorin urista johtuvan magneettivuon tiheyden vääristymän aiheuttamia yliaaltoja voidaan vähentää pienillä muutoksilla staattorin uriin ja urien lukumääriin. Staattorin urat vääristävät magneettivuon tiheyttä pienentämällä sitä uran avauman kohdalta. Tästä on esimerkki nähtävissä kuvassa 7.



Kuva 7. Magneettivuon tiheyden vääristyminen roottorin pinnalla uran avauman kohdalla (Huppunen 2004: 70).

Kuvassa 7 nähdään uran kohdalla poikkeava magneettivuon tiheys B_{\min} , mikä poikkeaa selvästi nimellis- tai maksimiarvosta, B_{\max} . Muut merkitykselliset kuvassa näkyvät symbolit ovat: o on uran avauman pituus, o' on alue, jolla magneettivuon tiheyden vääristymä on havaittavissa, δ on ilmavälin pituus sekä B_n on magneettivuon tiheyden alenema. Viimeksi mainittu voidaan laskea

$$B_n = 2\beta B_{\max}, \quad (3)$$

missä

β on yhtälöllä 4 saatava ilmavälin pituuden ja uran avauman suhde ja B_{\max} on magneettivuon tiheyden maksimiarvo.

Edellä oleva kerroin β on

$$\beta = \frac{B_n}{2B_{\max}} = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{2B_{\max}} = \frac{1 + u^2 - 2u}{2(1 + u^2)}, \quad (4)$$

missä

B_n on magneettivuon tiheyden alenema,
 B_{\min} on magneettivuon tiheyden minimiarvo,
 B_{\max} on magneettivuon tiheyden maksimiarvo ja
 u on yhtälön 5 mukainen kerroin.

Ilmavälin pituuden ja staattoriuran avauman suhde voidaan laskea

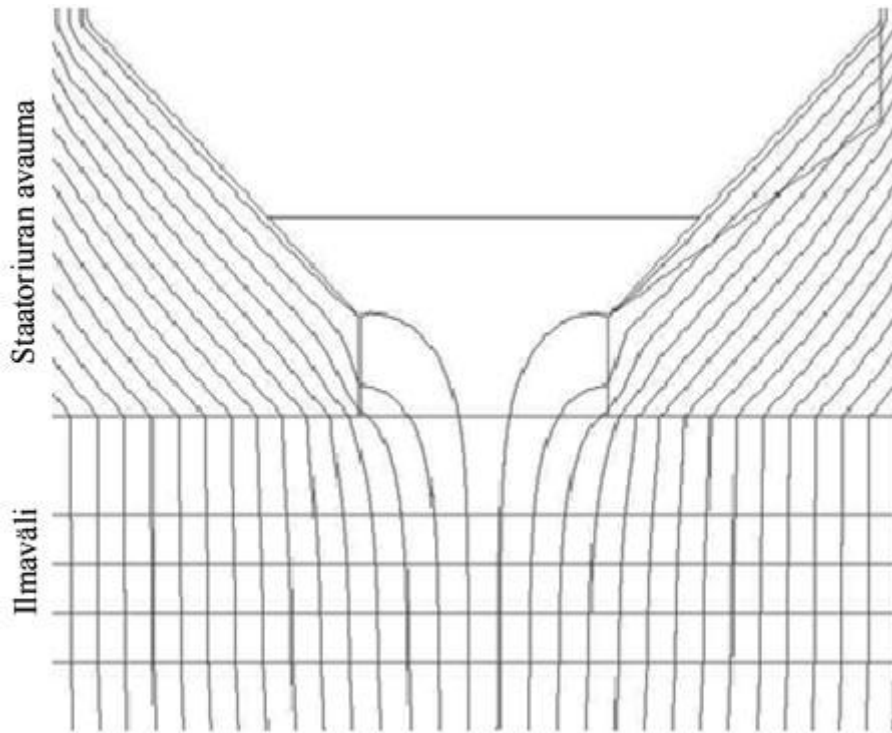
$$u = \frac{o}{2\delta} + \sqrt{1 + \left(\frac{o}{2\delta}\right)^2}, \quad (5)$$

missä

o on staattoriuran avauman pituus ja
 δ on ilmavälin pituus. (Huppunen 2004: 70 - 71.)

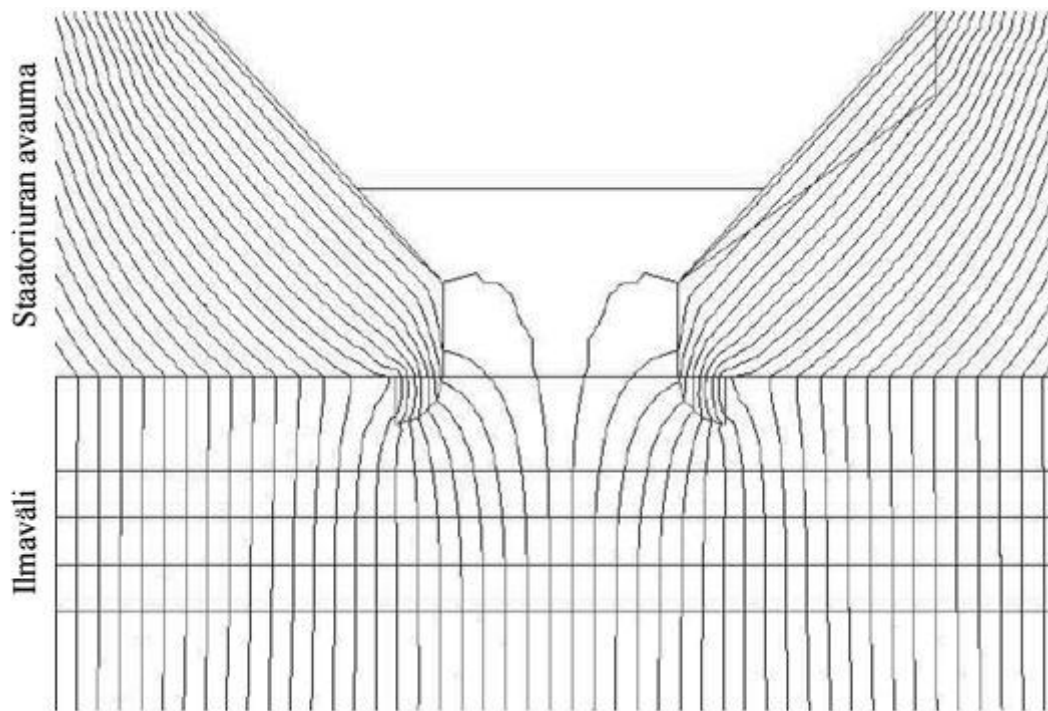
Tarkemmin magneettivuon tiheyden vääristymä ja sen laskeminen on esitetty lähteessä Huppunen (2004). Kuvassa 8 on nähtävillä staattorin uran avauman aiheuttama magneettivuon vääristymä.

Muutamilla muutoksilla voidaan urien avaumista johtuvaa magneettivuon vääristymää pienentää huomattavasti, jolloin yhdessä ilmavälin pituuden optimoinnin kanssa saadaan roottorille mahdollisimman tasainen vuo. Muutoksiin kuuluvat puolimagneettisesta materiaalista valmistettujen urakiilojen käyttö ja urien avaumien muodon muokkaaminen.



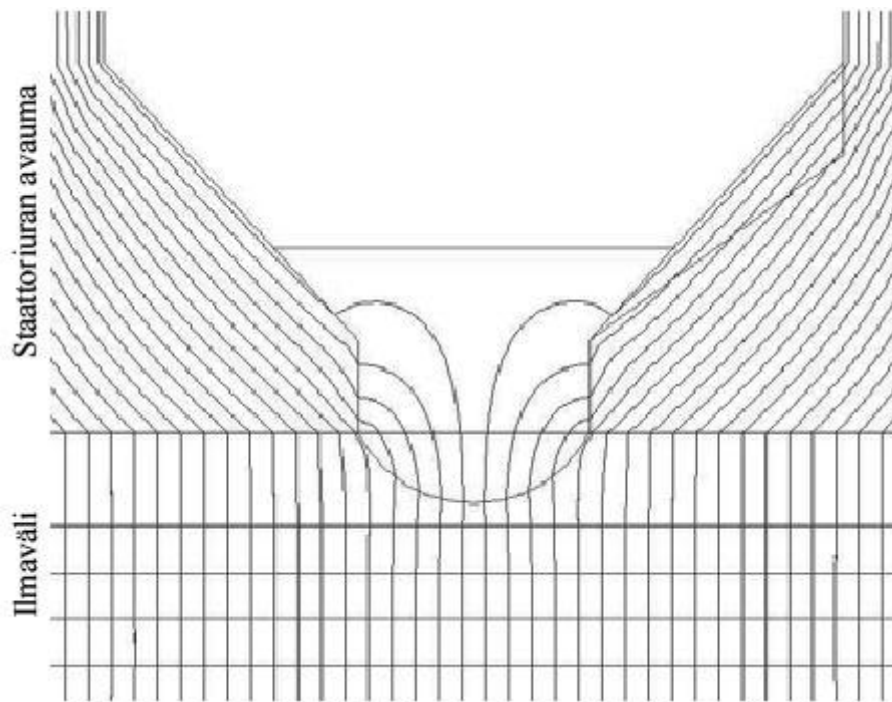
Kuva 8. Uran avauman aiheuttama vääristymä staattorin tuottamassa magneettivuossa (Huppunen 2004: 72). Kuvaa muokattu.

Kuvassa 8 on esitettyä staattorin uran avauma ja ilmaväli. Kuvaan on myös piirretty magneettivuon vuoviivat sekä niiden käyttäytyminen uran avauman kohdalla. Lisäämällä urien avaumien molemmille puolille neljäosaympyrän muotoiset nystyrät saadaan vuo niiden avulla ohjattua huomattavasti tasaisemmaksi. Valitettavasti nystyröiden tekninen toteutus saattaa varsinkin pienillä staattoreilla olla haasteellista, mikä vähentää niiden käytettävyyttä. Nystyröiden käyttöä on harkittava tapauskohtaisesti. (Huppunen 2004: 80.) Kuvassa 9 on nähtävillä nystyröiden tasoittava vaikutus magneettivuohon.



Kuva 9. Nystyröillä on tasoittava vaikutus magneettivuon vääristymään uran avaumien kohdalla (Huppunen 2004: 80). Kuvaa muokattu.

Puolimagneettisesta materiaalista valmistetut uralukot on mahdollisesti nystyröitäkin parempi ratkaisu vähentää tehokkaasti urien avaumien aiheuttamia vuon vääristymiä. Materiaalilla tulee olla pieni permeabiliteetti (välillä 2 - 5). Lukko tulee valmistaa magneettisen linssin muotoiseksi, jotta se tulee hieman ulos urasta ilmavälin puolelle. Tällöin lukko toimii mahdollisimman hyvänä vuon ohjaajana. Haasteina tämäntyyppiselle ratkaisulle ovat tarkkuusvaatimukset, joiden saavuttaminen pitkille lukoille ei välttämättä ole helppoa. Lisäksi lukkojen kestävyys voi joutua kovalle koetukselle, joten niiden käyttöä joudutaan pohtimaan tarkkaan. (Huppunen 2004: 81.) Kuvassa 10 on nähtävillä puolimagneettisen lukon magneettivuota tasoittava vaikutus.



Kuva 10. Puolimagneettisen uralukon tasoittava vaikutus staattorin tuottamaan magneettivuohon (Huppunen 2004: 82). Kuvaa muokattu.

3.1.3 Ilmavälin pituuden vaikutus roottorihäviöihin

Staattori vaikuttaa monellakin tavalla moottorin ominaisuuksiin. Staattoriurien avaukset synnyttävät magneettivuohon vääristymiä, jotka aiheuttavat roottorin pinnalle pyörrevirtoja. Lisäksi käämityksen aiheuttamat yliaallot aiheuttavat oman osuutensa pyörrevirtoihin, jotka taasen aiheuttavat roottorin pinnalla pyörrevirtahäviöitä. Urien avaumien aiheuttamaa vääristymää voidaan hoitaa ilmavälin pituutta kasvattamalla. Tällöin magneettivuo ehtii tasoittua ennen roottoria, mikä vähentää magneettivuon vääristymästä johtuvia pyörrevirtoja. Pitkä ilmaväli tosin pienentää ilmavälin yli vaikuttavaa magnetointi-induktanssia, mikä kasvattaa staattorivirtaa. (Aho 2007: 105.)

3.1.4 Taajuusmuuttajakäytön vaatimukset

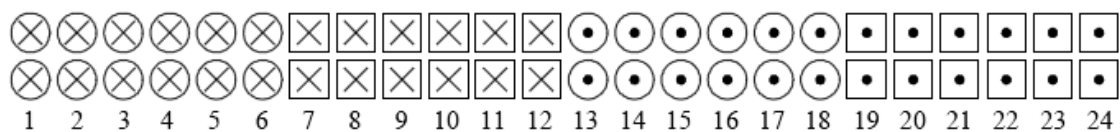
Nykyisillä tavanomaisilla taajuusmuuttajilla on mahdollista päästä 1,5 - 4 kHz kytkentätaajuuksiin, mutta käytännössä saatua taajuutta rajoittaa kytkentätaajuuden ja taajuusohjeen suhde (f_{sw}/f_s) tulisi olla vähintään 21. Suhteen ollessa riittävän suuri

moottorille saadaan hyvälaatuinen virran käyrämuoto. Täten työssä simuloidun moottorin nimellistaajuudelle 833,33 Hz, tulisi kytkentätaajuuden olla vähintään noin 17,5 kHz. Nykyisillä taajuusmuuttajilla voidaan ajaa 400 Hz:n moottoreita ongelmitta. Lisäksi taajuusmuuttajan ulostulo on hyvä ajaa riittävän kokoisen LC-suodattimen läpi, jotta taajuusmuuttajan tuottamat yliaallot pysyvät kohtuullisena. Suodattimen induktanssin tulisi olla noin puolet moottorin hajainduktanssista ja kapasitanssin tulee kyetä täyttämään 80 % moottorin virrantarpeesta kuormittamattomassa tilanteessa. Taajuusmuuttaja tuplaa roottorihäviöt, joten syötöllä on merkittävä vaikutus moottorin ominaisuuksiin. (Huppunen 2004: 86 - 87.)

3.1.5 Kääminnän merkitys ilmavälin yliaaltoihin

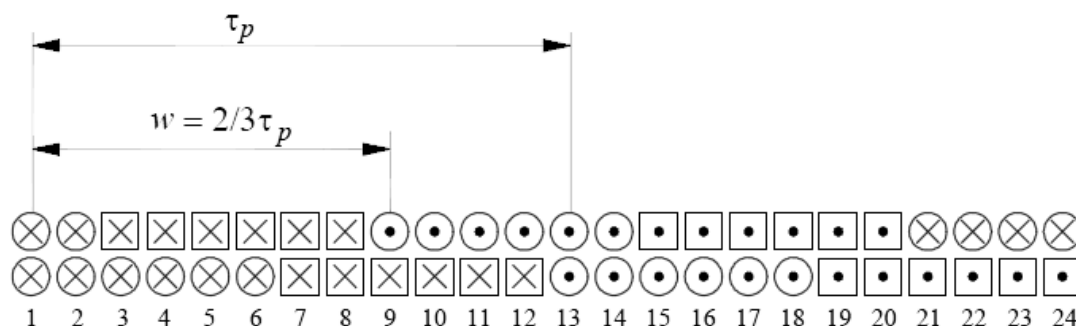
Käämityksen vaikutuksesta magnetomotorinen voima on askelmainen. Tämä johtuu käämien johtimien äärellisestä paksuudesta, mikä taas johtaa askeleiden syntymiseen. Magnetomotoriseen voimaan syntyy siksi harmonisia yliaaltoja. (Huppunen 2004: 63 - 64.)

Käämitystä muuttamalla voidaan käämeistä johtuvia yliaaltoja vähentää huomattavasti. Käämien asettaminen kahteen normaaliin kerrokseen on yksi tapa, mutta kaikkein tehokkain tapa on käyttää askellyhennettyä käämitystä, missä w/τ_p -suhde on 5/6. (Huppunen 2004: 76.) Tässä siis w on vyyhden leveys ja τ_p on napajako. Tällöin toinen käämikerros asetetaan hieman eri kohtaan kuin toinen, jolloin magnetomotorinen voima on vähemmän askelmainen, joten käämityksessä syntyvät yliaallot ovat merkittävästi vähäisemmät. (Niemelä 1994: 35.) Lisäksi 5/6 -käämitys vähentää merkittävästi magneettivuon 5. ja 7. yliaaltoa pienentäen roottorille syntyvän 6. yliaaltovirran suuruutta (Aho 2007: 92). Esimerkki tavallisesta kaksikerroskäämityksestä on esitettyinä kuvassa 11 ja askellyhennetty 2/3-käämitys on esitettyinä kuvassa 12.



Kuva 11. Tavanomainen kaksikerroskäämitys (Niemelä 1994: 34). Kuvaa muokattu.

Kuvassa 12 on nähtävillä kuinka käämitys muuttuu verrattuna tavanomaiseen kaksikerroskäämitykseen, kun käytössä on askellyhennetty käämitys.



Kuva 12. 2/3 askellyhennetty käämitys (Niemelä 1994: 34). Kuvaa muokattu.

3.2 Roottori

Roottorin materiaalien ominaisuuksista resistiivisyyden ja permeabiliteetin vaikutukset moottorin ominaisuuksiin ovat kiistattomat. Moottorin käynnistymisessä on kuitenkin syytä huomioida, että virrantiheys on suuri pienellä alueella. Suuri virrantiheys aiheuttaa roottorin lämpenemisen pieneltä alueelta, jolloin resistiivisyyttä ei voida pitää vakiona, mikä vaikeuttaa moottorin ominaisuuksien laskentaa käynnistystilanteessa. (Gibbs 1948: 411 - 412.) Näin sekä permeabiliteetti että resistiivisyys tulee ajatella muuttujina, jolloin käsinlaskenta vaikeutuu entisestään. Tietokoneella toteutettavan FEM-laskennan avulla ongelma voidaan kiertää laskentaohjelmiston hoitaessa monimutkaisetkin arvojen muutokset. Aho yhdisti väitöskirjassaan Pyrhösen ja Lähteenmäen ajatukset siten, että roottorin teräsmateriaalin kyllästymisen tulisi tapahtua suhteellisen matalalla vuon tiheydellä noin 1,0 T ja kuitenkin materiaalin permeabiliteetin tulisi olla mahdollisimman korkea (yli 250). Tämäntyyppinen materiaali antaa selkeän edun moottorin vääntömomentin tuottamisessa. Vaikka suurehko vääntömomentti on saatavilla myös matalammilla permeabiliteetin arvoilla, tällöin roottorin tehokerroin jää heikoksi, mikä heikentää kokonaisuudessaan moottorin ominaisuuksia. (Aho 2007: 48.) Materiaalin valinta on yksi keinoista, joilla pyritään saamaan vuo tunkeutumaan mahdollisimman syvälle roottoriin. Kun vuon tunkeuma on

mahdollisimman hyvä, saadaan mahdollisimman iso osa roottorin materiaalista mukaan vääntömomentin tuottamiseen. (Aho 2007: 55.)

Suurnopeusmoottoreissa roottoriin vaikuttavat huomattavasti suuremmat mekaaniset voimat kuin esimerkiksi tavanomaisessa oikosulkumoottorissa. Mekaanisista voimista suurimmat löytyvät roottorin keskeltä tai ontossa sylinterissä sisemmän pinnan puolelta. Roottorin maksimirasitus σ_{\max} voidaan laskea

$$\sigma_{\max} = C\rho r^2\Omega_r^2, \quad (6)$$

missä

- C on yhtälöillä 7a, 7b ja 7c laskettava kerroin sylinterille,
 ρ on materiaalin tiheys,
 r on sylinterin säde ja
 Ω_r on roottorin kulmanopeus.

Yhtälöä 6 varten tarvittava kerroin C lasketaan yhtälöillä

$$C = \frac{3 + \nu_p}{8}, \quad \text{kun kyseessä on sileä yhtenäinen sylinteri,} \quad (7a)$$

$$C = \frac{3 + \nu_p}{4}, \quad \text{kun kyseessä on pienellä sisäläpimitalla varustettu} \quad (7b)$$

sylinteri ja

$$C \approx 1 \quad \text{ohutseinäinen sylinteri,} \quad (7c)$$

missä

- ν_p on Poisson-kerroin materiaalille.

Materiaalin Poisson-kerroin on teräkselle 0,29 ja kuparille 0,34. Moottorin vääntömomentti lasketaan tietyllä rasituksella σ_{\tan}

$$T = \sigma_{\tan} 2\pi r^2 L_r, \quad (8)$$

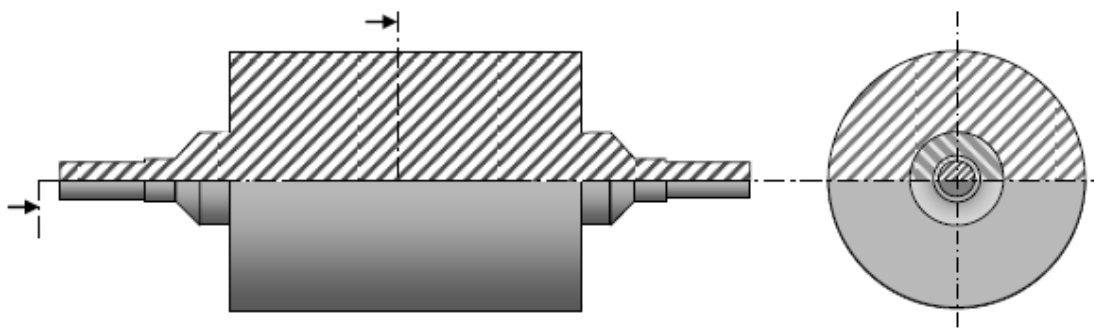
missä

- σ_{\tan} on roottoriin vaikuttava radiaalinen rasitus,
 r on roottorin säde ja
 L_r on roottorin pituus.

Roottorin luonnolliset resonanssitaajuuudet tulee ottaa huomioon suunnittelun yhteydessä. Paras roottorin nimellispyörimisnopeus olisi ensimmäisen kriittisen pisteen alapuolella, mutta yleensä moottorit ajetaan nopeasti ensimmäisen kriittisen pisteen yli ensimmäisen ja toisen kriittisen pisteen väliin. (Aho 2007: 21 - 24.) Seuraavaksi käsitellään hieman tarkemmin eri massiiviroottorityyppejä ja niiden ominaisuuksia.

3.2.1 Massiiviroottori

Massiiviroottori on induktiomootorin keksimisestä lähtien ollut yksi varteenotettava roottorivaihtoehto. Tutkimuksissa on kuitenkin todettu, että perinteinen massiiviroottori on sähköisiltä ominaisuuksiltaan heikko verrattuna siitä kehitettyihin vaihtoehtoihin. Esimerkiksi massiiviroottorin jättämä on yleensä melko suuri, mutta muutamilla muutoksilla roottorin toimintaa voidaan parantaa huomattavasti. Näitä ovat esimerkiksi roottorin aksiaalinen urittaminen, päällystäminen sähköisesti johtavalla materiaalilla tai häkkikäälityksen rakentaminen roottorin osaksi. Lisäykset roottoriin tulee kuitenkin toteuttaa siten, että ne eivät vaaranna roottorin mekaanista kestävyyttä. (Huppunen 2004: 23.) Massiiviroottori on kuitenkin hyvä perusta, minkä takia senkin esittäminen on tarpeen pohjana ennen kehittyneempiä roottorivaihtoehtoja. Kuvassa 13 on esitettyä massiiviroottorin läpileikkaus.



Kuva 13. Massiiviroottorin läpileikkauskuva (Aho 2007: 39).

Kuvassa 13 nähdään roottorin koostuvan samasta materiaalista kuin akselikin. Monesti massiiviroottori valmistetaan akselinsa kanssa samasta kappaleesta, jolloin tuotannolliset edut ovat kiistattomat. Käytännössä mekaanisen työstön ja kustannusten kannalta pelkän massiiviroottorin tekeminen ei ole kannattavaa, koska aksiaalisen

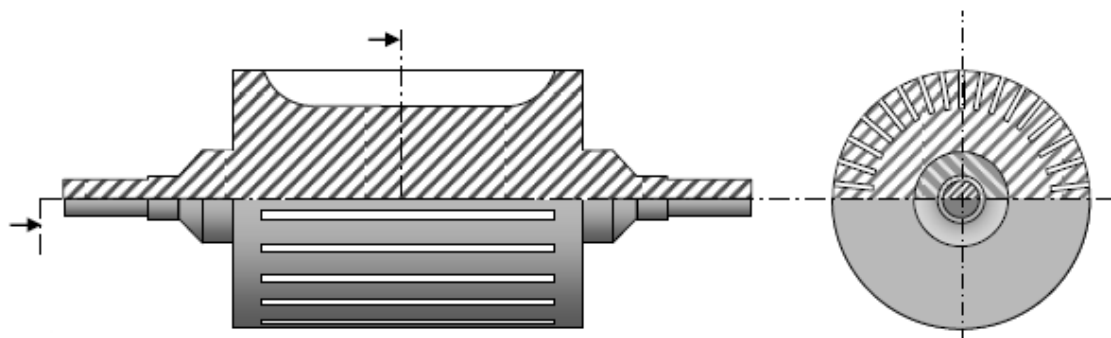
urituksen lisääminen parantaa huomattavasti roottorin sähköisiä ominaisuuksia kuitenkin lisäämättä tuotantokustannuksia. (Huppunen 2004: 23 - 24.) Lisäksi Lorentzin voiman perusteella sähkömagneettinen vääntömomentti syntyy roottoriin syntyvien virtojen ja ilmapälissä vaikuttavan magneettikentän keskinäisestä vaikutuksesta. Valitettavasti virranahtoilmiön vuoksi pyörrevirrat muodostuvat massiiviroottorin pintakerrokseen erittäin vähäisellä tunkeumalla, mikä heikentää vuon tunkeutumista roottorin sisäosiin. Tällöin roottorin sisäosat eivät osallistu vääntömomentin tuottamiseen. (Aho 2007: 52.) Roottorin ydinmateriaalin resistiivisyyden tulisi olla myös suhteellisen pieni, jolloin saadaan suurempi vääntömomentti pienemmällä jättämällä, jolloin myös muut häviöt ovat pienemmät ja tehokerroin on parempi (Aho 2007: 70 - 71).

3.2.2 Uritettu massiiviroottori

Verrattuna massiiviroottoriin aksiaalisilla urilla varustettu roottori on sähköisesti parempi vaihtoehto. Kuten edellisessä kappaleessa todettiin, aksiaalisten urien lisääminen massiiviroottoriin ei lisää tuotantokustannuksia merkittävästi, jolloin urien lisäämiselle ei sinällään estettä. Roottorin urittaminen antaa magneettivuon pääkomponentille paremman väylän roottorin sisäosiin, kun taas harmonisten yliaaltojen ja pyörrevirtojen tuottamat komponentit kohtaavan suuremman impedanssin. Urien lisääminen kuitenkin ei kaikissa tapauksissa automaattisesti johda parempaan tulokseen. Lisäämällä urat roottoriin, menetetään roottorin sileän pinnan tuottama etu kaasuhäviöissä. Tästä johtuen ilman roottorin pinnoitusta urittamisen jälkeen voidaan saavutettu etu menettää kasvaneiden kitka- ja kaasuhäviöiden johdosta. (Lähtenmäki 2002: 30 - 31.) Kuvassa 14 on nähtävillä uritetun massiiviroottorin läpileikkaus.

Kuten massiiviroottorinkin tapauksessa, pienempi ydinmateriaalin resistanssi parantaa roottorin ominaisuuksia, mutta uritetun roottorin tapauksessa se myös mahdollistaa suurtaajuisten ilmapälissä vaikuttavien yliaaltojen synnyttämien pyörrevirtojen syntymisen, jolloin niistä johtuvat häviöt kasvavat (Aho 2007: 73). Roottorin urittaminen myös pienentää roottorin matalan taajuuden impedanssia, jolloin massiiviroottoria vastaavalle teholle tarvittava jättämä on pienempi. Kun jättämä on

pienempi, aiheuttaa se jättämään sidottujen häviöiden pienenemisen, mikä taas on merkittävä asia roottorin jäähdytysratkaisuja mietittäessä. (Aho 2007: 75 - 76.)



Kuva 14. Aksiaalisesti uritetun massiviroottorin läpileikkauskuva (Aho 2007: 39).

Roottoriin tehtyjen urien lukumäärällä on väliä roottorin toiminnan kannalta. Jotta harmonisten yliaaltojen tuottamat synkroniset ja ei-synkroniset vääntömomentin harmoniset pysyisivät kurissa, roottorin urien lukumäärä Q_r tulee valita tarkasti suhteessa staattorin urien lukumäärään Q_s . Ei-synkronisia vääntömomentin harmonisia voidaan vähentää, kun roottorin urien lukumäärä toteuttaa ehdon

$$Q_r < 1,25Q_s, \quad (9)$$

missä

Q_s on staattorin urien lukumäärä.

Käämitys kolmivaiheisessa moottorissa tuottaa vain parittomia yliaaltoja. Roottorin ollessa jumissa synkroniset vääntömomentin harmoniset voidaan minimoida esittämällä urien lukumäärä

$$Q_r \neq 6pg, \quad (10)$$

missä

p on napaparien lukumäärä ja

g mikä tahansa positiivinen kokonaisluku.

Käytännössä tämä on hyvin teoreettinen tilanne, koska moottoria ajetaan aina taajuusmuuttajalla, jolloin syöttötaajuus nostetaan ylös asteittain. Taajuusmuuttajakäytössä roottori ei siis koskaan ole jumitilanteessa.

Jatkuvassa tilassa pyöriessään roottoriin syntyy haitallisia synkronisia vääntömomenteja. Näitä voidaan välttää kun roottorin urien lukumäärä toteuttaa yhtälön

$$Q_r \neq 6pg \pm 2p, \quad (11)$$

missä

- p on napaparien lukumäärä ja
- g mikä tahansa positiivinen kokonaisluku.

Yhtälössä 11 plus-merkki tarkoittaa positiivista pyörimissuuntaa ja miinus-merkki tarkoittaa negatiivista pyörimissuuntaa. Molemmille suunnille on omat uralukumääränsä.

Urien avaumat aiheuttavat monenlaisia ongelmia. Avaumat synnyttävät synkronisia vääntömomentin harmonisia, jolloin roottorin urien lukumäärän tulee toteuttaa yhtälö

$$Q_r \neq Q_s, Q_r \neq \frac{1}{2}Q_s \text{ ja } Q_r \neq 2Q_s, \quad (12)$$

missä

- Q_s on staattorin urien lukumäärä ja
- Q_r on roottorin urien lukumäärä.

Lisäksi, jotta vaaralliset avaumien tuottamat harmoniset vältetään, uralukumäärän tulee toteuttaa ehdot 13a ja 13b:

$$Q_r \neq Q_s \pm 2p, Q_r \neq 2Q_s \pm 2p \quad \text{ja} \quad (13a)$$

$$Q_r \neq Q_s \pm p, Q_r \neq \frac{Q_s}{2} \pm p, \quad (13b)$$

missä

- Q_s on staattorin urien lukumäärä,

Q_r on roottorin urien lukumäärä ja
 p on napaparien lukumäärä.

Kun halutaan roottorilta mekaanisesti mahdollisimman värähtelemätön toiminta, niin urien lukumäärän valinnassa tulee ottaa huomioon yhtälöiden 14a, 14b ja 14c asettamat vaatimukset:

$$Q_r \neq 6pg \pm 1, \quad (14a)$$

$$Q_r \neq 6pg \pm 2p \pm 1 \quad \text{ja} \quad (14b)$$

$$Q_r \neq 6pg \pm 2p \mp 1, \quad (14c)$$

missä

g on mikä tahansa positiivinen kokonaisluku ja
 p on napaparien lukumäärä. (Aho 2007: 93 - 94.)

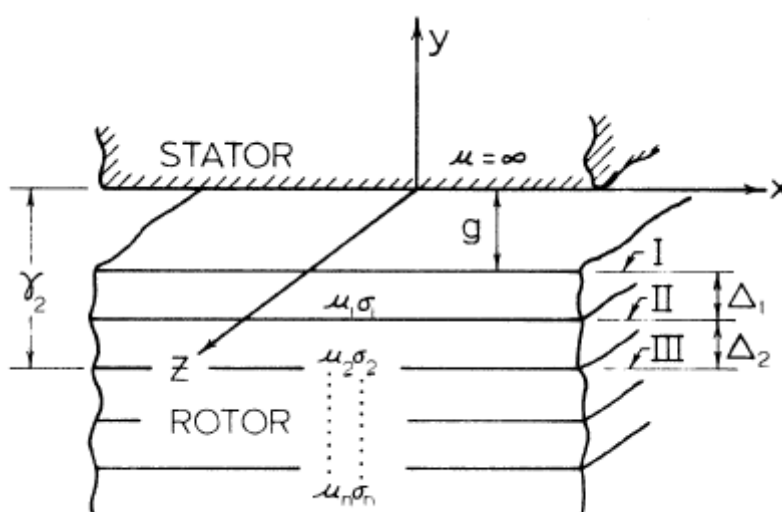
Edellä esitettyjen ehtojen perusteella voidaan todeta helposti, että roottorin uralukumäärän valinta ei ole aivan yksiselitteistä. Täten uralukumäärän valinnassa onkin käytettävä suurta harkintaa.

3.2.3 Komposiittimassiiviroottori

Komposiittiroottoriajatus kehitettiin alunperin avaruus- ja sotilaskäyttöihin 60-luvulla. Idean takana oli saada kehitettyä roottori, joka kykenee kestämään suuria nopeuksia, mutta joka silti olisi sähköisesti parempi kuin teräksestä valmistettu massiiviroottori. Komposiittiroottori koostuu kahdesta tai useammasta kerroksesta. Kerrokset eroavat toisistaan permeabiliteetin, sähkönjohtavuuden ja paksuuden osalta. Näillä ratkaisuilla roottorin alhaisen jättämän resistanssi pyritään saamaan mahdollisimman pieneksi. (Wilson, Erdelyi & Hopkins 1965: 18.) Kuvassa 15 on esitettyä komposiittiroottorin rakenne.

Vuonna 1965 julkaistun tutkimuksen mukaan parhaat tulokset roottorin ominaisuuksille saadaan, kun ensimmäinen kerros on hyvän permeabiliteetin omaavaa materiaalia ja toinen kerros taas mahdollisimman johtavaa. Ensimmäinen kerros tulee olla mahdollisimman ohut, jotta johtavaan materiaaliin saataisiin mahdollisimman suuri

vääntömomenttia tuottava virta. Ensimmäinen kerroksen tarkoituksena onkin lähinnä parantaa magneettivuon tiheyttä roottorin pinnalla. Johtavan kerroksen paksuntaminen auttaa tiettyyn pisteeseen asti, kunnes roottorin ominaisuudet alkavat heiketä magneettisen reluktanssin takia, jolloin vuo ei pääse roottorin syvempiin osiin. (Wilson, ym. 1965: 23.) Kyseisen tutkimuksen aikaan laskennat on tehty pääosin käsin, joten tutkimuksen toistaminen modernin FEM-laskennan avulla voisi olla mielenkiintoinen tutkimuskohde.



Kuva 15. Komposiittiroottori koostuu useammasta eri materiaalista ja on valmistettu eri paksuisista kerroksista (Wilson, ym. 1965: 18).

Kuvassa 15 nähdään roottorin pinnan eri kerrokset. Kullakin kerroksella on oma paksuutensa Δ_i , permeabiliteettinsa $\mu_{1..n}$ ja johtavuutensa $\sigma_{1..n}$.

Tarkastellaan ensimmäisen kerroksen materiaalin vaikutusta moottorin ominaisuuksiin. Eräässä tutkimuksessa on todettu, että rauta-nikkeli-seos (seostussuhde 79/21) on toimiva materiaali ensimmäistä kerrosta varten. Tämä seos kyllästyy helposti, jolloin moottorista saadaan suurempi teho ja vääntömomentti. Vertailumateriaalina käytettiin rauta-koboltti-seosta (seostussuhde 50/50), jolla moottorin tuottama vääntömomentti jättämään suhteutettuna oli huomattavasti pienempi. (Sharma, Anbarasu, Nataraj, Dangore & Bhattacharjee 1996: 918.) Lisäksi on havaittu, että alumiini-rauta-kerros

roottorin pinnalla parantaa huomattavasti vuon tunkeumaa roottorin sisälle. Vieläkin parempiin tuloksiin päästään kun alumiini-raudan ja ydinmateriaalin väliin asetetaan kuparikerros, jolloin syntyvillä pyörrevirroilla on matalan resistanssin väylä, mikä parantaa edelleen vuon pääsyä roottorin ydin osiin. (Lähteenmäki 2002: 31.)

3.2.4 Päälylystämisen vaikutukset roottorin ominaisuuksiin

Sharma ym. tutkivat massiiviroottorin elektrolyyttiprosessilla muodostetun kuparikerroksen vaikutuksia moottorin ominaisuuksiin. Elektrolyyttiprosessin huomattiin liittävän hyvin materiaalit, koska roottorit kestivät 24 krpm kierrosnopeudet ongelmitta. Tutkimuksessa käytettiin 5, 50 ja 75 mikronin (0,005; 0,05 ja 0,075 mm) paksuisia kerroksia. Kohteena oli tavanomainen induktiomoottori, jonka häkkikäämiroottori oli poistettu ja sen tilalla oli käytetty massiiviroottoria tai eri paksuisilla kuparikerroksilla varustettuja massiiviroottoreita. Alkuperäisen moottorin tehon ollessa 540 W voitiin havaita, että parhaat tulokset saatiin 0,05 mm paksuisella kerroksella. Tutkimuksessa paksuimmalla 0,075 mm kerroksella roottorin Joule-häviöt kasvoivat huomattavasti pyörrevirroista johtuen, jolloin moottorin kokonaishyötysuhde laski. Lisäksi paksummalla kuparikerroksella magneettivuon tuottamat pyörrevirrat sijaitsivat kerroksen ylemmissä osissa, vähentäen raudan vaikutusta. Täten moottorin ominaisuuksien optimoinnissa kuparikerroksen paksuudella on suuri merkitys. (Sharma ym. 1996: 915 - 916.)

Hieman paksummalla kuparikerroksella roottorille saadaan paremmat sähköiset ominaisuudet. Päälylystämällä roottori paksummalla kuparikerroksella voidaan luoda roottorin päävirtakomponentille loputon määrä johdinsauvoja, joita pitkin virta pääsee kulkemaan vapaasti. Samalla saadaan luotua roottorin päihin oikosulkurenkaat, joilla roottorissa kulkevat virrat saadaan yhdistettyä yhtenäisellä virtapiirillä. Tämäntyyppisessä ratkaisussa ongelmana on mekaanisen ja sähköisen ilmavälin ero. Tämä johtuu siitä, että magneettivojo kohtaa kuparin ikään kuin se olisi ilmaa, jolloin paksu kuparikerros toimii ilmavälin tavoin. Tämä aiheuttaa suuremman magnetointivirran ja suuremman Joule-häviöt staattorin käämityksessä. (Lähteenmäki 2002: 36.)

Toinen vaihtoehto erittäin hyvällä johtavuudella varustetulle materiaalille on erittäin huonosti johtava ferromagneettinen materiaali, jolla on suuri permeabiliteetti. Tämäntyyppinen materiaali ei kaappaa korkeataajuisia yliaaltoja pyörrevirroiksi itseensä vaan toimii suodattimena, joka suodattaa vuossa olevia yliaaltoja ennen kuin ne kohtaavat roottorin ydinmateriaalin. Suodatus tapahtuu, koska huonosti johtavalla ferromagneettisella materiaalilla on suuri impedanssi pinnan tuntumassa. (Aho 2007: 110.) Tätä impedanssia voidaan arvioida yhtälöllä

$$Z = \frac{E_s}{H_s} = \frac{1 + j}{\sigma\sqrt{2}} \sqrt{\omega_m \sigma \mu}, \quad (15)$$

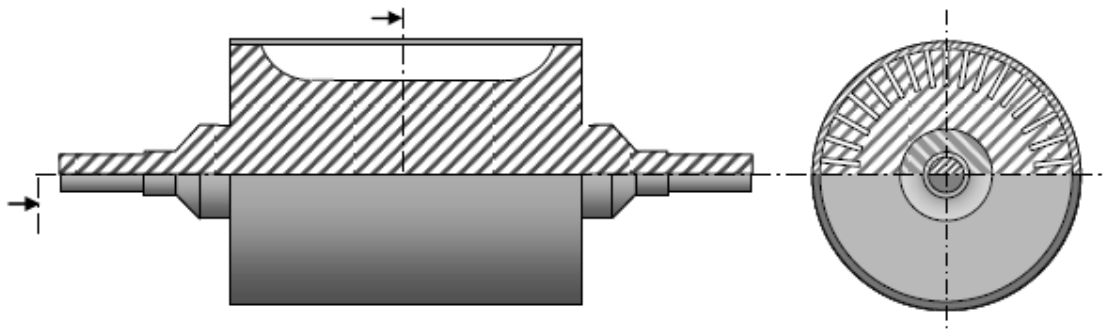
missä

- E_s on roottorin pinnoitteessa oleva sähkökentän voimakkuus,
- H_s on roottorin pinnoitteessa oleva magneettivuon voimakkuus,
- σ on pinnoitemateriaalin johtavuus,
- ω_m on magneettivuon kulmanopeus ja
- μ on pinnoitemateriaalin permeabiliteetti. (Aho, Nerg, & Pyrhönen 2006: 104.)

Valmistuksen kannalta ferromagneettisen teräksen käyttäminen on jopa helpompaa kuin kuparin, minkä lisäksi teräs kasvattaa merkittävästi roottorin kestävyyttä suurilla nopeuksilla. (Aho 2007: 106 - 108.) Ahon tutkimuksissa on todettu, että materiaalin resistanssilla on suuri merkitys ja mitä suurempi resistanssi on sitä paremmin roottorin häviötä saadaan pienennettyä (2007: 108). Pinnoituksen paksuuden vaatimuksia voidaan arvioida tunkeutumissyvyyden avulla. Tällöin riittävän paksu pinnoitekerros antaa magneettivuontiheydelle mahdollisuuden tasaantua ennen roottorin ydinmateriaalia. (Aho 2007: 110.) Roottorin ferromagneettinen pinnoite vähentää tehokkaasti magneettivuossa olevien yliaaltojen aiheuttamia häviöitä, mutta samalla roottorin jättämästä riippuvat häviöt kasvavat. Näin ollen roottorin pinnoitus tuleekin pyrkiä suunnittelemaan tapauskohtaisesti siten, että staattoriurien aiheuttamat magneettivuon harmoniset yliaallot saadaan eliminoitua ilman jättämästä riippuvaisten häviöiden liiallista kasvua. (Aho 2007: 114.) Käytännön tutkimuksissa on havaittu, että testissä

olleen moottorin roottorissa tapahtuvat häviöt vähenivät 1,5 % kun roottori päällystettiin ferromagneettisella materiaalilla (Aho, Nerg, & Pyrhönen 2006: 107).

Uritetun roottorin päällystäminen tehostaa roottorin toimintaa ja vähentää roottorin urista johtuvia kitka- ja kaasuhäviöitä. Tällöin voidaan yhdistää sekä urien tuottamat edut roottorin sähköiseen toimintaan että päällystyksen antama suoja korkeataajuisia harmonisia yliaaltoja vastaan. Lisäksi urien päällystäminen parantaa roottorin mekaanista kestävyyttä. Kestävyyden paraneminen toteutuu roottorin pinnoituksen toimiessa vaippana sitoen roottorin ytimen tiukasti ja pitäen näin roottorin paremmin kasassa. (Aho 2007: 106.) Kuvassa 16 on esitettyä aksiaalisesti uritettu ja päällystetty roottori.



Kuva 16. Aksiaalisesti uritetun ja yhtenäisellä pinnoituksella varustetun massiviroottorin läpileikkauskuva (Aho 2007: 39.)

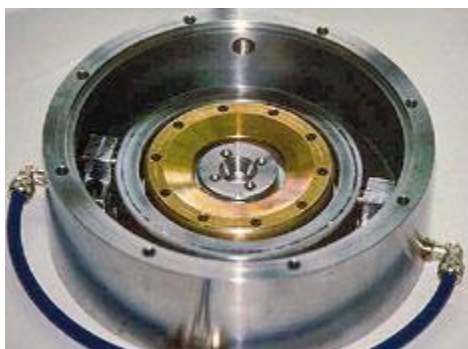
Aksiaalisesti uritetun ja päällystetyn roottorin uralukumäärän valinnassa pätevät edellä annetut ehdot. Päällystyksen tarkoituksena on vain vielä entisestään parantaa roottorin sähköistä ja mekaanista toimintaa.

3.3 Laakerointi

Laakerointi on suurnopeusmoottorin toiminnan kannalta tärkeä. Suurnopeuskäytössä laakerointi toteutetaan yleensä kaasu-, magneetti- tai öljy-laakereilla. Kolmesta vaihtoehdosta kaasu- ja magneettilaakerit ovat öljyttömiä, soveltuen näin sovelluksiin, missä vaaditaan ahdetun kaasun öljyttömyyttä. (Larjola, Arkkio & Pyrhönen 2010: 7.)

Suomessa tehdyissä ensimmäisissä suurnopeusmoottoreissa käytettiin pääosin kaasulaakerointia. Kaasulaakeroinnin ongelmana on erittäin tarkat toleranssirajat (mikrometriluokkaa), mikä vaikeuttaa kaasulaakeroinnin käyttöä moottoreissa huomattavasti. (Larjola ym. 2010: 30.) Kuvassa 17 on esitettyä eräs kaasulaakerilaitteisto.

Magneettinen laakerointi voidaan toteuttaa joko aktiivisena tai passiivisena. Passiivisessa magneettilaakeroinnissa laakeroitava objekti on kestopolttien välissä ilman takaisinkytkentää. Stabiili passiivimagneettilaakerointi onnistuu ilman tuentaa ainoastaan, jos magneettikentällä tuettava objekti on suprajohte tai diamagneettinen. Edellä mainittujen materiaalivaatimusten vuoksi aktiivinen magneettilaakerointi on käytännönsovelluksissa paras vaihtoehto.

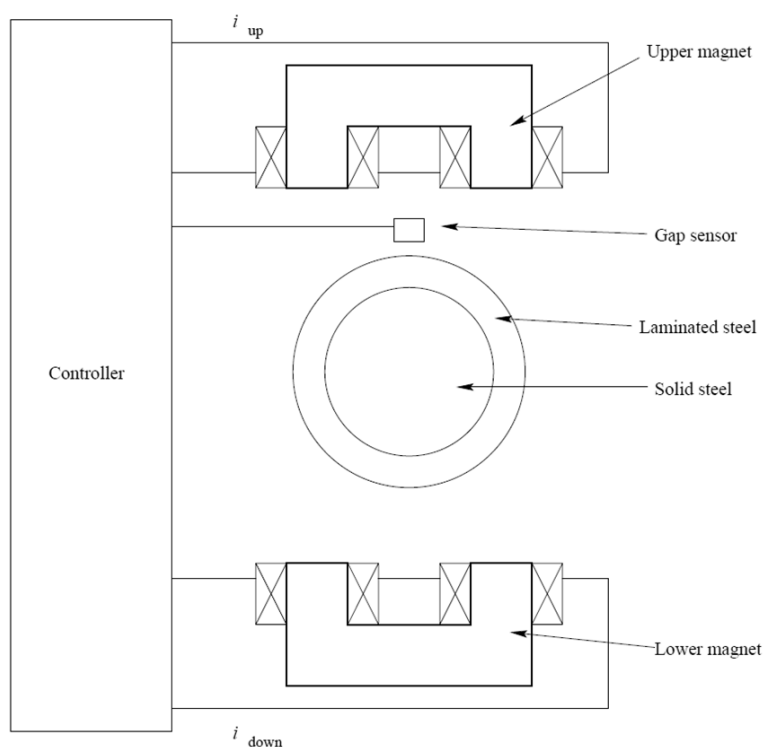


Kuva 17. Aksiaalikaasulaakerilaitteisto (Larjola ym. 2010: 30).

Aktiivilaakeroinnissa objekti pidetään sähkömagneeteilla paikallaan. Sähkömagneettien ohjaus toteutetaan ohjausyksiköllä ja asentoanturilla. Asentoanturina tulee käyttää suojattua anturia, joka ei häiriinny moottorin sähkömagneettisista kentistä. Anturiton toiminta voidaan toteuttaa myös laskemalla objektin asento sähkömagneeteille syötettyjen jännite- ja virtatietojen avulla. Kun aktiivista magneettilaakerointia käytetään akselin laakeroinnissa, on suositeltavaa, että akselin pinnalla on laminointikerros. Laminointikerros toimii pyörrevirtojen vähentäjänä, kun magnetointia muutetaan. (Antila 1998: 12 - 13.) Kuvassa 18 nähdään aktiivisen magneettilaakeroinnin periaate.

Kuten periaatekuvasta nähdään, sama ohjausyksikkö hoitaa molempien magneettien ohjauksen yhden asentoanturin tietojen perusteella. Ohjausyksikkö käyttää anturin tietoja hyväkseen määritellessään sähkömagneettien ohjausta. Anturi voi olla induktiivinen, kapasitiivinen, pyörrevirtoihin perustuva tai optinen. Anturin näytteenottotaajuuden tulee olla yli 1 kHz eikä signaalissa saa olla suuresti häiriöitä tai kohinoita. Kohinainen asentotieto aiheuttaa laakereissa kuuluvan äänen syntymisen. Lämpö aiheuttaa haasteita niin lämpölaajeneman kuin myös anturin sähköisten ominaisuuksien muutosten kautta. Lämpöongelma voidaan ratkaista pitämällä anturi tarkasti paikallaan ja mittaamalla differentiaali-anturin avulla etäisyyttä roottorin vastapuolelle. (Antila 1998: 15.)

Aktiivilaakeroinnin ohjaus tapahtuu ohjausyksikön ja tehoelektroniikan avulla. Ohjaus on käytännössä säätötekninen ongelma, jonka ratkaiseminen tapahtuu säätösilmukan avulla.



Kuva 18. Aktiivisen magneettilaakerin periaate (Antila 1998: 13).

Säätimenä voidaan käyttää esimerkiksi tavanomaista PID-säädintä (Proportional-Integral-Derivative, PID), minkä parametrien virittämisen avulla säädöstä voidaan saada nopea ja kestävä. Aikaisemmin säätimet olivat käytännössä analogisia, mutta uusimmat säätimet ovat signaaliprosessorilla (Digital Signal Processor, DSP) toteutettuja säätöjärjestelmiä, jotka käyttävät hyväksi uusimpia säätöstrategioita. Säädön tuottaman referenssivirran avulla lasketaan virta-ero nykyhetken ja uuden ohjauksen välillä. Jännitekerrointa käyttämällä saadaan virta-ero muutettua jänniteohjeeksi pulssinleveysmodulille (Pulse Width Modulation, PWM). PWM:n KytKentätaajuus on 30 - 125 kHz ja jännitetaso voi vaihdella välillä 50 - 300 V. (Antila 1998: 16.)

3.4 Jäähdytys

Suurnopeusmoottoreissa jäähdytykseen on erityisesti kiinnitettävä huomiota. Moottoria lämmittävien häviöiden suhde muuttuu huomattavasti moottorin pyöriessä suurella nopeudella. Kuten aiemmin jo todettiin, niin Joule-häviöt muodostavat ison osan roottorin häviöistä. Joule-häviöitä kutsutaan myös yleisesti roottorin kuparihäviöiksi, mutta tarkemmin häviöt eritellään häviöitä käsittelevässä luvussa. Nopeuden kasvaessa myös kitka- ja kaasuhäviöt kasvattavat osuuttaan häviöistä kasvaneen jäähdytyksen myötä. Tästä syystä avoimen piirin jäähdytysratkaisu on yksi suositeltavista jäähdytysmuodoista. Avoimen piirin jäähdytyksessä moottorin sisällä olevan jäähdytysilman ja ulkona olevan jäähdytysilman välillä on staattinen paine-ero. Paine-ero saadaan aikaiseksi käyttämällä jäähdytystuuletinta. Jäähdytyskaasu aiheuttaa myös omat häviönsä moottorille, koska jäähdytyskaasun virtaussuunta muuttuu roottorin pyörimisen takia tangentiaaliseksi. Tästä virtaussuunnan muutoksesta syntyy edellä mainitut häviöt. (Saari 1998: 31 - 34.) Ilmavälin pituuden muutoksilla moottorin häviöiden painopistettä voidaan siirtää roottorin ja staattorin välillä. Pienellä ilmavälillä, iso osa häviöistä tapahtuu roottorin puolella, kun taas suuremmalla ilmavälillä staattorin käämityksessä tapahtuvat häviöt kasvavat. (Saari 1998: 51.) On hyvä muistaa, että juuri jäähdytyksen tehokkuus, staattorin ja roottorin lämpeneminen ovat merkitsevässä asemassa, kun määritellään moottorin maksimitehoa (Saari 1998: 8). Kun mietitään jäähdytyspuhallinten toimintaa, on edullisempää, jos puhaltimet asetetaan

imemään jäähdytyskaasu moottorin läpi puhaltamisen sijaan. Tällöin moottorin ympärillä tapahtuva pieni paineen lasku ei lämmitä moottoria. (Lähtenmäki 2002: 25.) Tavanomaisen konvektion kautta tapahtuvassa jäähdytyksessä tämä toimii roottorin koon rajoittavana tekijänä. Roottorin pituuden ja halkaisijan minimi voidaan määrittellä yhtälöllä

$$D_r L_r \geq \frac{P_r}{\pi \alpha \Delta T}, \quad (16)$$

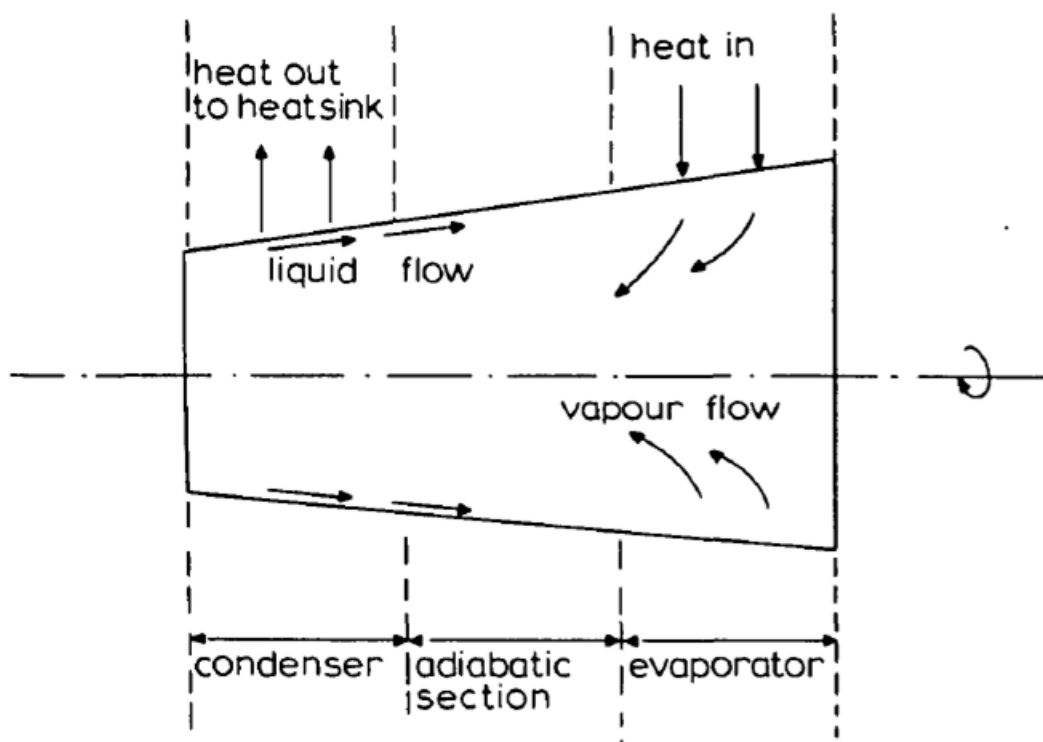
missä

- D_r on roottorin halkaisija,
- L_r on roottorin pituus,
- P_r on halutun tehon osuus roottorihäviöistä,
- α on lämmönsiirtokerroin ja
- ΔT on roottorin ja staattorin välinen lämpötilaero.

Tällöin roottorissa tapahtuvista häviöistä siirtyy P_r verran johtumisen kautta jäähdytysilmaan. Jos jäähdytysilma pakotetaan puhaltimilla roottorin ja staattorin väliin, voidaan lämpötilaero ΔT ottaa roottorin ja ilmavälin jäähdytysilman väliltä. (Lähtenmäki 2002: 35.)

Yhtenä jäähdytysvaihtoehtona on 1977 julkaistussa tutkimuksessa esitetty jäähdytysputkien (heat pipe) käyttämistä massiiviroottorin jäähdyttämiseen. Kapillaarisen lämpöputken perusideana on, että tyhjiöidyn putken sisällä työaine vuoroin höyrystyy lämmönlähteestä saamansa lämmön avulla ja kondensoituu taas jäähdyttävässä päässä putkea. Työaineen palautuminen tapahtuu kapillaari-ilmion avulla putkeen valmistettuja ohuita väyliä pitkin. Tämäntyyppisillä putkilla on onnistuttu saamaan jopa 10^4 -kertainen lämmönsiirtokyky verrattuna vastaavankokoiseen kuparitankoon. Julkaisussa ehdotetaan keskipakoislämpöputkea roottorin jäähdyttämiseen. Roottorin akseli korvattaisiin kartion muotoisella putkella. Työaineen palauttamisen hoitaa keskipakoisvoima kartion reunaa pitkin. Artikkelin idea oli testattu prototyyppimoottorilla, joka toimi 50 Hz:n taajuudella. Voikin miettiä, miten vastaavan voisi toteuttaa todellisessa suurnopeusmoottorissa. (Chalmers B. & Herman J. 1977: 450.) Kuvassa 19 on esitettyä keskipakoisvoimaan perustuvan lämpöputken periaate.

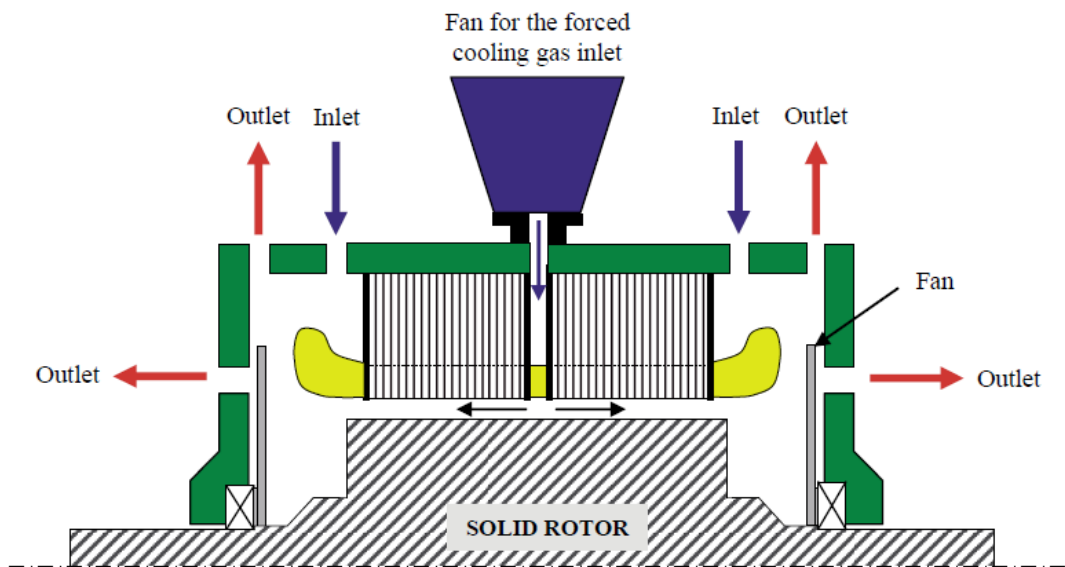
Suurnopeusmoottorin massiiviroottori kestää suuria lämpötiloja helposti. Ongelmia tuottaakin suurimmaksi osaksi roottorin lämmitessä kasvava resistanssi. Staattorin jäähdyttäminen onkin suurnopeusmoottorissa avainasemassa, jotta käämitys ei ylikuumenisi. Staattorin jakaminen osiin, kahteen tai useampaan, ja jäähdytyskaasun puhaltaminen staattorin osien välisestä raosta mahdollistaa tehokkaan jäähdytyksen niin staattorille kuin myös roottorille. Kun jäähdytyskaasu puhalletaan moottorin sisälle ulkoisella puhaltimella staattorin väleistä, moottorin omat puhaltimet puhaltavat lämpimän jäähdytyskaasun ulos moottorin rungon avaumista.



Kuva 19. Keskipakoisvoimaan perustuvan lämpöputken periaatekuva (Chalmers B. & Herman J. 1977: 450).

Kuten kappaleessa 2.1 todettiin, tämäntyyppisessä konstruktiossa voi käyttää jäähdytyskaasuna myös kompressorisovelluksen työkaasua. (Aho 2007: 28 - 29.) Kuvassa 20 on nähtävillä eräs tapa toteuttaa jäähdytys staattorin jakamisella kahteen osaan.

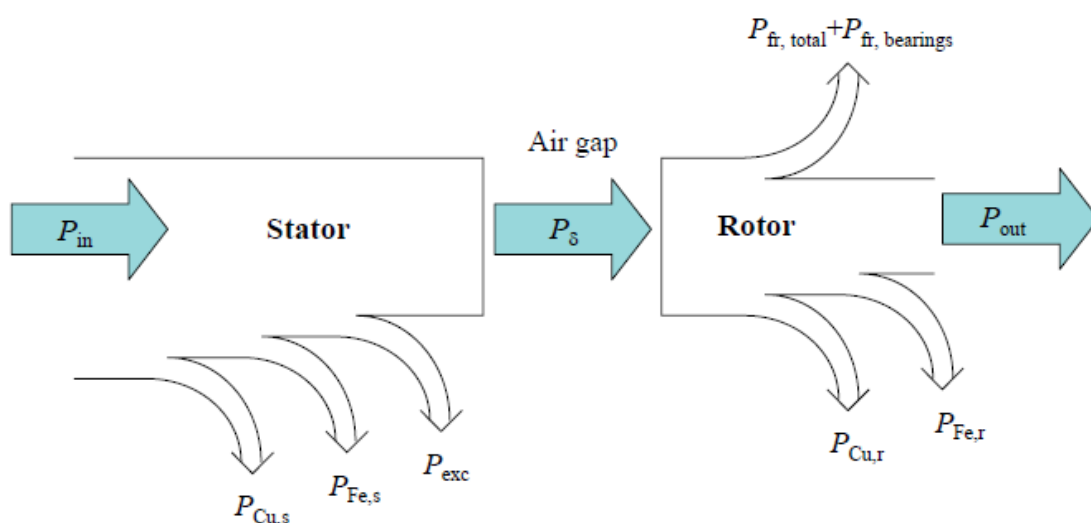
Jäähdytyskaasua valittaessa ei välttämättä tarvitse tyytyä ilmajäähdytykseen. Suljettua jäähdytyspiiriä käytettäessä voidaan käyttää esimerkiksi vetyä tai heliumia. Näiden kaasujen etuina voidaan nähdä alentuvat kitka- ja kaasuhäviöt sekä huomattavasti ilmaa tehokkaampi lämmönsiirtokyky. Lisäksi, jos staattoria jäähdytetään esimerkiksi vedellä tai R134a:lla (1,1,1,2-Tetrafluoroethane), moottorin jäähdytys saadaan maksimoitua. (Lähteenmäki 2002: 25.)



Kuva 20. Suurnopeusmoottorin jäähdytysratkaisu jakamalla staattori osiin ja puhaltamalla jäähdytyskaasu staattorin osien välistä moottorin sisään (Aho 2007: 28).

4 TEHO, HÄVIÖT JA HYÖTYSUHDE

Induktiomoottorissa on useita eri häviölajeja. Moottorin hyötysuhteeseen ja häviöihin vaikuttavat sekä staattori että roottori. Moottorin roottorissa tapahtuvat häviöt ovat ongelmallisempia vaikeammin toteutettavan jäähdytyksen takia. Seuraavaksi käsitellään staattorissa ja roottorissa tapahtuvia häviöitä yleisesti. Kuvassa 21 on esitettyä yksinkertainen kaavio moottorin häviöistä.



Kuva 21. Ottotehosta poistamalla häviöt saadaan akseliteho (Aho 2007: 24).

Kuten kuvan 21 perusteella nähdään on staattorissa tapahtuvia häviöitä kuparihäviöt $P_{Cu,s}$, rautahäviöt $P_{Fe,s}$ ja hajahäviöt P_{exc} . Näiden staattorissa tapahtuvien häviöiden jälkeen ottotehosta P_{in} on jäljellä ilmaväliteho P_{δ} . Ilmavälitehosta vähennetään lopuksi roottorissa tapahtuvat häviöt: kuparihäviöt $P_{Cu,r}$, rautahäviöt $P_{Fe,r}$, kitka- sekä kaasuvirtaushäviöt $P_{fr, total}$ ja laakerihäviöt $P_{fr, bearings}$. Kaasu- ja kitkahäviöt syntyvät pääosin laakereissa ja roottorin pyöriessä ilmanvastusta vastaan. Tarkemmin näihin häviöihin pureudutaan kappaleissa 4.1, 4.2 ja 4.3, joissa käydään läpi niiden synty ja vaikutukset suurnopeusmoottoreissa. (Aho 2007: 24 - 27.)

4.1 Moottorin teho

Laskennallisesti suurnopeusmoottori voidaan nähdä suuren resistanssin ja jättämän häkkikäänimoottorina, mutta toisin kuin häkkikäänimoottori, massiivimoottori kestää huomattavasti suurempia mekaanisia ja termodynaamisia rasituksia. (Sharma ym. 1996: 913.) Moottorin mekaaninen teho P_{mech} voidaan laskea yhtälöllä

$$P_{\text{mech}} = T_{\text{em}} \Omega_r = T_{\text{em}} \left((1 - s) \frac{\omega_s}{p} \right) = T_{\text{em}} \left((1 - s) \frac{2\pi f_s}{p} \right), \quad (17)$$

missä

- T_{em} on moottorin tuottama sähkömagneettinen vääntömomentti,
- Ω_r on roottorin kulmanopeus,
- s on suhteellinen jättämä,
- ω_s on staattorin kulmanopeus,
- p on napapariluku ja
- f_{stat} on staattorille syötetty taajuus (Aho 2007: 26).

4.2 Staattorin häviöt

Staattorissa tapahtuvat häviöt vaikuttavat ilmavälitehon suuruuteen. Tässä työssä ei keskitytä staattorissa tapahtuviin häviöihin, mutta työn yhtenäisyyden vuoksi listataan häviöt, joista staattorihäviöt koostuvat. Kappaleen lopussa käydään myös hieman läpi laminointilevyjen vaikutusta staattorissa tapahtuviin häviöihin, erityisesti suurnopeusmoottoreissa. Staattorihäviöt koostuvat kolmesta osasta

$$P_{\text{s,loss}} = P_{\text{Cu,s}} + P_{\text{Fe,s}} + P_{\text{exc}}, \quad (18)$$

missä

- $P_{\text{Cu,s}}$ on staattorin käämityksessä tapahtuvat kuparihäviöt,
- $P_{\text{Fe,s}}$ on staattorin rautahäviöt ja
- P_{exc} on hajahäviöt.

Kun tiedossa on staattorissa tapahtuvat häviöt voidaan ilmaväliteho laskea yhtälöllä

$$P_{\delta} = P_{in} + P_{s,loss}, \quad (19)$$

missä

P_{in} on ottoteho ja

$P_{s,loss}$ on staattorihäviöt. (Aho 2007: 25.)

Staattorin laminoinnilla on merkittävä osa suurnopeusmoottorin staattorin häviöissä, koska suurilla taajuuksilla pyörrevirtahäviöt muuttuvat dominoiviksi. Tällöin staattorilevyjen tulisi olla pyörrevirtojen ehkäisemiseksi mahdollisimman ohuet. Siksi tavallinen 50 Hz moottorille suunniteltu staattori ei ole paras mahdollinen suurnopeuskäytössä. (Huppunen 2004: 94.) Laminointimateriaalin tulee olla myös laadukas, jotta ilmavälissä vaikuttavaa vuota voidaan hallita moottorin ominaisuuksien kannalta. Kun moottorin käyttötaajuus on yli 400 Hz tulee ilmavälin magneettivuota heikentää mahdollisimman suuren hyötysuhteen saavuttamiseksi ja alle 300 Hz:n taajuuksilla vuon tulee olla mahdollisimman vahva, jotta moottorista saadaan riittävän suuri vääntömomentti. (Huppunen 2004: 96.)

4.3 Roottorin häviöt

Roottorissa tapahtuvat sähköiset häviöt voidaan jakaa useampaan eri häviöluokkaan. Sähköiset häviöt voidaankin määritellä siten, että

- $P_{fund,r}$ on sähkömagneettisen vääntömomentin tuottamiseen liittyvät häviöt,
- $P_{surf,r}$ on roottorissa tapahtuvat ilmavälin harmonisista yliaalloista syntyvät pyörrevirtahäviöt ja
- $P_{hyst,r}$ on roottorin ferromagneettisissa materiaaleissa tapahtuvat hystereesihäviöt.

Täten roottorin kokonaishäviöt voidaan laskea

$$P_{r,loss} = P_{fund,r} + P_{surf,r} + P_{hyst,r} + P_{fr,total}, \quad (20)$$

missä

$P_{fund,r}$ on sähköisenvääntövoiman tuottamiseen liittyvät häviöt,

- $P_{\text{surf},r}$ on roottorissa tapahtuvat magneettivuon yliaalloista johtuvat pyörrevirtahäviöt,
- $P_{\text{hyst},r}$ on roottorin ferromagneettisissa materiaaleissa tapahtuvat hystereesihäviöt ja
- $P_{\text{fr,total}}$ on kitka- ja kaasuhäviöt.

Roottorissa tapahtuvista häviöistä hystereesihäviöt on kaikista vähäisin. Tällöin pyörrevirtahäviöt sekä momentin tuottamiseen liittyvät häviöt ovat merkittävimpiä sähköisiä häviöitä. Nämä merkittävät häviöt ovat verrannollisia moottorin suhteelliseen jättämään. Koska hystereesihäviöt ovat häviävän pienet verrattuna muihin sähköisiin häviöihin, hystereesihäviöt jätettiin laskenta-ajan säästämiseksi huomiotta tässä työssä. Huomattavaa on, että pyörrevirtahäviöt ovat verrannollisia taajuuden neliöön, joten suurnopeusroottorissa laminoinnin puuttuminen merkitsee suuriakin pyörrevirtahäviöitä. Yhdistettäessä pyörrevirtahäviöt $P_{\text{surf},r}$ ja vääntömomentin tuottamiseen liittyvät häviöt $P_{\text{fund},r}$ voidaan puhua yhteisellä nimityksellä Joule-häviöistä. Joule-häviöt ovat roottorissa resistanssissa virran aiheuttamia lämpöhäviöitä, jotka ovat suurnopeusroottorissa merkitsevässä roolissa. Monesti induktiomoottorissa puhutaan resistiivisistä häviöistä kuparihäviöinä, mutta tällöin mukaan lasketaan myös staattorissa tapahtuvat resistiiviset häviöt. Siksi lähdemateriaaleissakin on haluttu erottaa roottorissa tapahtuvat resistiiviset häviöt erikseen Joule-häviöiksi selvyiden takia. Roottorin Joule-häviöt saadaan

$$P_{J,r} = \iiint_V \rho J^2 dV, \quad (21)$$

missä

- ρ on materiaalin resistiivisyys ja
- J on tilavuudessa olevan virrantiheyden suuruus.

Jos momentti häviöt halutaan erilleen Joule-häviöistä niiden suuruus voidaan laskea ilmvälitehon ja jättämän avulla

$$P_{\text{fund},r} = P_\delta s, \quad (22)$$

missä

P_{δ} on ilmväliteho ja
 s on moottorin jättämä.

Oletetaan, että hystereesihäviöt roottorissa ovat mitättömät, jolloin pyörrevirtahäviöt voidaan laskea Joule-häviöistä yksinkertaisen vähennyslaskun avulla

$$P_{\text{surf},r} = P_{J,r} - P_{\text{fund},r}, \quad (23)$$

missä

$P_{\text{fund},r}$ on momentin tuottamisesta syntyvät häviöt ja
 $P_{J,r}$ on roottorin Joule-häviöt. (Aho 2007: 25 - 26.)

Tavanomaisessa induktiomootorissa laminoitussa roottorissa tapahtuvista häviöistä yliaaltojen osuus on noin 2 - 5 %. Suurnopeusmootorissa yliaaltojen aiheuttamien häviöiden osuus on tyypillisesti noin 10 %, mutta jos roottoria ei ole tarkkaan suunniteltu, yliaalloista johtuvat häviöt voivat nousta jopa 50 %:iin kaikista roottorihäviöistä. Tästä syystä roottorissa tapahtuvia häviöitä tulee tarkastella huolellisesti. (Huppunen 2004: 62 - 63.)

4.4 Kitka- ja kaasuvirtaushäviöt

Suurnopeusmoottorin pyörivä roottori on pääsääntöisesti sileäpintainen sylinteri. Jäähdytyksessä käytetty jäähdytysilma aiheuttaa kuitenkin kahdenlaisia häviöitä roottorin sileästä pinnasta huolimatta. Syntyvät häviöt ovat kitkahäviöt ja jäähdytyskaasun viskositeetista ja liikkeistä syntyvät häviöt. Varsinkin kitkahäviöt ovat suurnopeusmoottoreissa merkitseviä vahvan pyörimisnopeuden kytköksensä takia (Aho 2007: 25). Tutkittaessa häviöitä kitkahäviöt voidaan suhteuttaa roottorin pintanopeuteen kuutiollisena ja kaasuhäviöt neliöllisenä. Kitkahäviöt syntyvät kaasun atomien hidastaessa roottorin pyörimistä ja kaasuhäviöt syntyvät kaasun tangentialisesta liikkeestä. Kaasuhäviöissä on mukana myös kaasun aksiaalinen virtaama. (Saari 1998: 9 - 10.) Kitka- ja kaasuhäviöitä voidaan arvioida yhtälöiden 24 ja 25 avulla

$$P_{fr,r} = k_1 C_f \rho \pi \Omega_r^3 r_1^4 L_r, \quad (24)$$

missä

- k_1 on roottorin pinnanmuotokerroin (täysin sileä roottori saa arvon 1,0),
- C_f on kaavalla 27a tai 27b laskettava kitkakerroin,
- ρ on kaasun tiheys,
- Ω_r on roottorin kulmanopeus,
- r_1 on roottorin säde ja
- L_r on roottorin pituus.

ja

$$P_{gas} = \frac{2}{3} \pi \rho (r_2^3 - r_1^3) v_m u_m \Omega_r, \quad (25)$$

missä

- r_1 on roottorin säde,
- r_2 on staattorin sisähalkaisija,
- ρ on kaasun tiheys,
- Ω_r on roottorin kulmanopeus,
- v_m on kaasun aksiaalisenvirtausnopeuden keskiarvo ja
- u_m on roottorin tangentiaalinen nopeus, joka saadaan yhtälöstä 26.

Käytännön kokeissa on osoitettu, että uritetun roottorin k_1 pinnanmuotokerroin on 2,5. Käytännössä pinnanmuotokertoimien määrittäminen tapahtuu kokeellisten mittausten avulla. Yhtälössä 25 käytetty roottorin tangentiaalinen nopeus puolestaan saadaan laskettua

$$u_m = k_2 u_1, \quad (26)$$

missä

- k_2 on nopeuskerroin ja
- u_1 on roottorin kehänopeus.

Nopeuskerroin k_2 on 0,48 jos molemmat ilmvälän pinnat ovat sileät. Käytännössä, jos roottori on epätasainen ja staattori on sileä, niin nopeuskerroin kasvaa. Toisaalta jos

staattori on epätasainen ja roottori sileä niin tällöin nopeuskerroin pienenee. Lopuksi yhtälöillä 27a ja 27b saadaan laskettua kitkakertoimet yhtälöä 24 varten

$$C_f = 0,515 \frac{\left(\frac{\delta}{r_1}\right)^{0,3}}{Re_\delta^{0,5}} \quad (500 < Re_\delta < 10^4) \text{ ja} \quad (27a)$$

$$C_f = 0,0325 \frac{\left(\frac{\delta}{r_1}\right)^{0,3}}{Re_\delta^{0,2}} \quad (10^4 < Re_\delta), \quad (27b)$$

missä

- r_1 on roottorin säde,
- δ on ilmvälän pituus ja
- Re_δ on kaasuvirtauksen Reynoldsin luku ilmvälissä.

Reynoldsin luku kertoo ilmvirtauksen ominaisuuksista. Luvun ollessa alle 2000 voidaan virtausta pitää laminaarisena. (Saari 1998: 9 - 20.) Tarkemmin kaasu- ja kitkahäviöitä on esitetty lähteessä Saari.

Koska roottorin ilmvälissä oleva kaasu joutuu tangentialiseen liikkeeseen, tästä syntyy lisää häviöitä, jotka voidaan laskea

$$P_{f,a} = k_2 q_m u_1^2, \quad (28)$$

missä

- k_2 on nopeuskerroin,
- q_m on jäähdytyskaasun massanopeus ja
- u_1 on roottorin kehänopeus.

Lisäksi roottorin päädyt tuottavat oman häviöosuutensa kaasu- ja kitkahäviöihin. Tämä johtuu siitä, että roottorin päädyt toimivat keskipakoispumppuina pumpaten jäähdytyskaasua. Päädyn aiheuttama häviö voidaan laskea

$$P_{f,end} = \frac{1}{2} C_T \rho \omega^3 (r_{end,2}^5 - r_{end,1}^5), \quad (29)$$

missä

- C_T on vääntömomenttikerroin,

- $r_{\text{end},1}$ on roottorin päädyn ulompi säde,
 $r_{\text{end},2}$ on roottorin päädyn sisempi säde,
 ρ on jäähdytyskaasun tiheys ja
 ω on roottorin kulmanopeus.

Yhtälössä 29 vääntömomenttikerroin C_T on kokeellisesti ratkaistu ja sen on mahdollista saada Ahon tutkimuksen lähteestä (Bilgren & Boulos 1973). Lopuksi kaikki moottorin kaasuhäviöt saadaankin laskettua

$$P_{\text{fr,total}} = P_{\text{fr,r}} + P_{\text{f,a}} + 2P_{\text{f,end}} \quad (30)$$

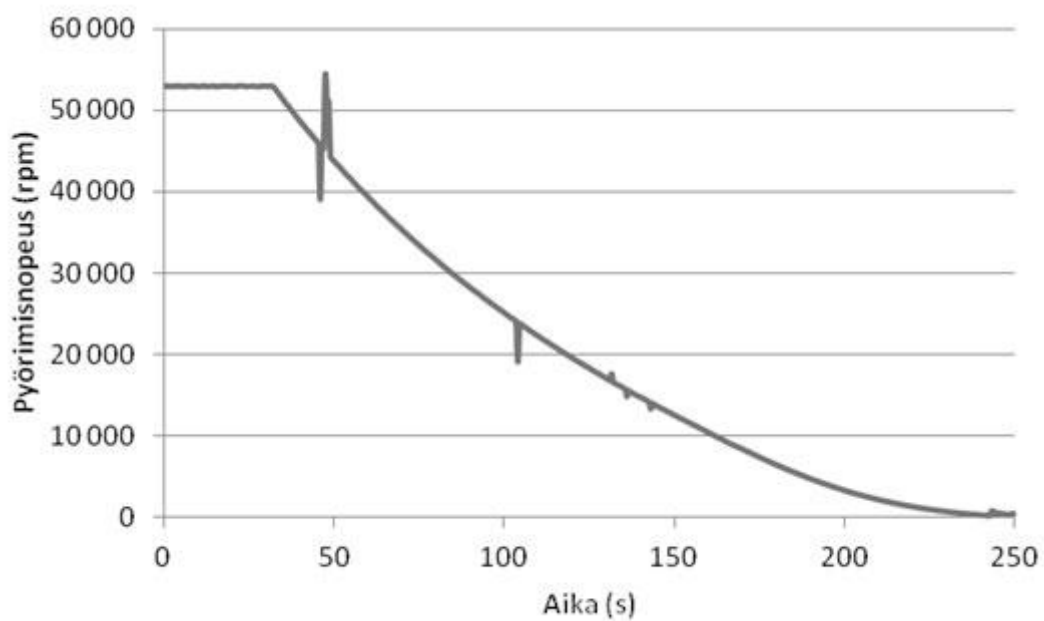
Täten moottorin kaasuhäviöiden pienentämiseksi sileäpintainen roottori on suositeltavampi uritettuun roottoriin verrattuna. (Aho 2007: 27.) Hidastuvuusikäyrästä voidaan laskea kuvaajan 23 mukainen kitkahäviöesitys

$$P_{\text{fr,total}} = J\omega \frac{d\omega}{dt}, \quad (31)$$

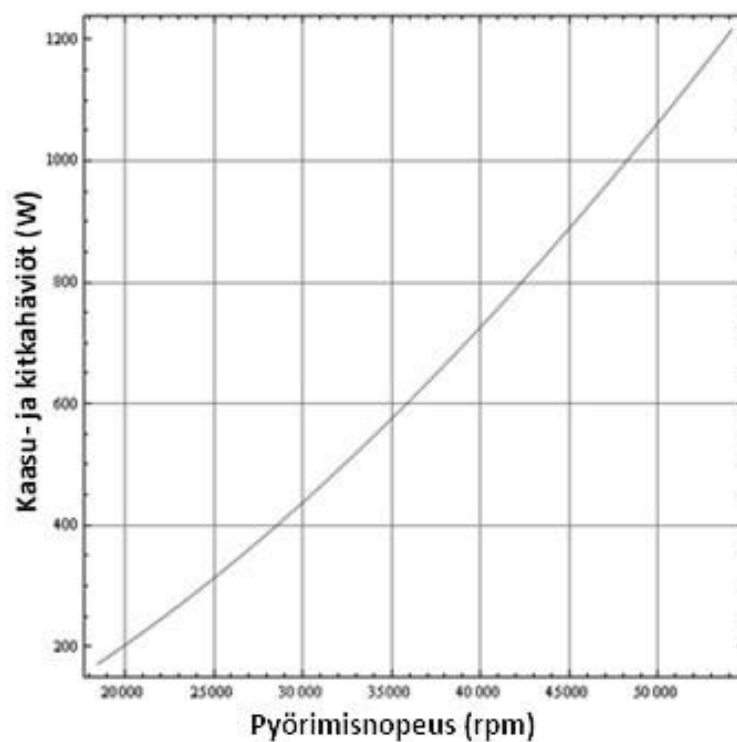
missä

- ω on kulmanopeus,
 t on aika ja
 J on roottorin hitausmomentti.

Kuvassa 23 on esitettyä esimerkki moottorin kitkahäviöistä pyörimisnopeuden funktiona ja kuvassa 22 on esitettyä moottorin hidastumiskäyrä, minkä perusteella voidaan määrittää moottorin kaasu ja kitkahäviöt.



Kuva 22. EGR-prototyypin hidastuvuusikäyrä (Ikäheimo & Turunen: 2012).



Kuva 23. Moottorin kitkahäviöt pyörimisnopeuden suhteen (Ikäheimo & Turunen: 2012).

4.5 Hyötysuhde

Induktiomoottoreiden maksimihyötysuhde voidaan laskea teoreettisesti käyttäen hyväksi moottorin jättämän suhdetta synkroninopeuteen

$$\eta_{max} \cong 1 - s = 1 - \frac{\Omega_{syn} - \Omega_r}{\Omega_{syn}} = \frac{\Omega_r}{\Omega_{syn}} = \frac{2\pi(f_s - f_{r,slip})/p}{\Omega_{syn}}, \quad (32)$$

missä

- η_{max} on suurin mahdollinen saavutettava hyötysuhde,
- s on jättämä,
- Ω_{syn} on synkronikulmanopeus,
- Ω_r on roottorin todellinen kulmanopeus,
- f_s on staattorin syöttöjännitteen taajuus,
- $f_{r,slip}$ on roottorin jättämätaajuus ja
- p on moottorin napaparien määrä.

Edellä annetun yhtälön 32 perusteella voidaankin nähdä, että suurnopeusmoottorin teoreettinen hyötysuhde on huomattavasti parempi kuin tavanomaisen induktiomoottorin. Tämä johtuu siitä, että suurnopeusmoottorilla sama jättämätaajuus roottorissa synnyttää pienemmän suhteellisen jättämän ja näin laskennallinen maksimihyötysuhde kasvaa suuremmaksi. (Pyrhonen J., ym. 2009: 273.) Moottorin todellinen hyötysuhde lasketaan jakamalla moottorin tuottama mekaaninen teho, moottoriin syötetyllä pätöteholla

$$\eta = \frac{P_{anto}}{P_{otto}} = \frac{P_{in} - (P_{r,loss} + P_{s,loss})}{P_{in}}, \quad (33)$$

missä

- P_{anto} on teoreettinen laitteen antoteho,
- P_{otto} on teoreettinen laitteen ottoteho,
- P_{in} on moottoriin syötetty pätöteho,
- $P_{r,loss}$ on roottorihäviöt ja
- $P_{s,loss}$ on staattorihäviöt.

5 SÄHKÖINEN FEM-LASKENTA

Elementtimenetelmän (Finite element method, FEM) historia alkaa sen esittelemisestä 1940-luvulla. Ensimmäisen kerran elementtimenetelmää käytettiin 1950-luvulla lentokoneiden suunnittelussa. Elementtimenetelmästä onkin syntynyt yksi tärkeimmistä työkaluista eri fysiikan alojen matemaattisten ongelmien ratkaisemisesta. (Jin 1993: 11.) Massiiviroottorisen induktiomootorin ominaisuuksien laskenta onnistuu parhaiten käyttämällä sähköistä FEM-laskentaa. Muitakin laskentamenetelmiä on tutkittu, mutta esimerkiksi sijaiskytkentään perustuva menetelmä on liian monimutkainen ja vaikea laskettaessa massiiviroottorista induktiomootoria (Aho 2007: 15). Tässä kappaleessa käsitelläänkin hieman FEM-laskennan historiaa mekaniikan puolelta ja sitä kuinka FEM-laskenta on yleistynyt muillekin tieteen aloille, kuten sähkötekniikkaan. Lisäksi käsitellään hieman FEM-laskentaa yleisellä tasolla ja sen antamia mahdollisuuksia. Suurnopeusmoottoreita käsittelevissä tutkimuksissa käytetään edelleenkin paljon kaksiulotteista FEM-laskentaa, mikä aiheuttaa ongelmia juuri oikosulkurenkaiden tutkimisen kanssa. 2D-laskennan yhteydessä oletetaan roottori äärettömän pitkäksi, jolloin roottorin päiden induktansseja ei oteta huomioon. Tämä aiheuttaa liian optimistisia tuloksia varsinkin tutkittaessa tehokertoimia. Tässä työssä käytetään ongelmanratkaisemiseen kolmeulotteista laskentaa, jolloin oikosulkurenkaiden laskenta jää täysin FEM-laskennan hoidettavaksi.

Sähköisen elementtimenetelmän perusajatuksena on soveltaa Maxwellin yhtälöitä elementtiverkon yli. Maxwellin yhtälöt voidaan kirjoittaa:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{Faradayn induktiolaki}), \quad (34a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (\text{Amperen virtalaki Maxwellin korjauksella}), \quad (34b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{Gaussin magnetismilaki}), \quad (34c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_c \quad (\text{Gaussin laki}), \quad (34d)$$

missä

\mathbf{E} on sähkökentän voimakkuus,

\mathbf{B} on magneettivuon tiheys,

H	on magneettikentän voimakkuus,
J	on virrantiheys,
D	on sähkövuon tiheys,
t	on aika ja
ρ_c	on varaustiheys.

Lisäksi yhtälöihin 34(a, b) liittyy olennaisesti materiaalien ominaisuudet huomioon ottavat lainalaisuudet. Nämä voidaan esittää seuraavasti

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (35a)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad \text{ja} \quad (35b)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (35c)$$

missä

μ	on materiaalin permeabiliteetti,
ε	on materiaalin permittiivisyys ja
σ	on materiaalin johtavuus.

Huomattavaa on kuitenkin, että permeabiliteetti on epälineaarinen ja lämpötilariippuvainen (Aho 2007: 30.) Sähköisen FEM-laskennan suurin haaste on sen suuri laskentakapasiteetin tarve, mikä kasvattaa laskenta-aikoja huomattavasti. Monesti laskenta-aikoja pyritään nopeuttamaan esimerkiksi käyttämällä käämien sijalla yhtenäisiä kuparikiskoja, joille syöttövirta on tasaisesti jakautunut. Tällöin myös johtimien johtavuus σ ajatellaan vakioksi. Huomattavaa on, että jos käytössä on 2D-FEM-laskenta, ei roottorin päätyjen impedanssia oteta huomioon laskennassa, mikä aiheuttaa tuloksissa hieman ylioptimistisen arvon moottorin teholle. (Aho 2007: 36 - 37.) Seuraavaksi tarkastellaan hieman tarkemmin elementtimenetelmän ratkaisuun johtavia käsitteitä ja osa-alueita.

5.1 Raja-arvo-ongelmat

Raja-arvo-ongelmat muotoutuvat reaali maailman ongelman matemaattisesta mallintamisesta. Seuraavassa kappaleessa käsitelläänkin raja-arvo ongelmien

määrittämistä ja niiden ratkaisuun suunniteltuja menetelmiä. Ratkaisun saamisessa on mahdollista käyttää Rayleigh-Ritzin tai Galerkinin menetelmää.

Raja-arvo-ongelma voidaan määrittellä määrättyllä alueella Ω differentiaaliyhtälöiden avulla, siten että yhtälö 36 toteutuu raja-arvoilla Γ

$$\mathcal{L}\phi = f_e, \quad (36)$$

missä

\mathcal{L} on differentiaalioperaattori,

ϕ on tuntematon ratkaisu ja

f_e on voima- tai herätefunktio.

Raja-arvot voivat olla yksinkertaisia Dirichletin tai Neumannin ehtoja tai monimutkaisia impedanssi- ja säteilyehtoja. Differentiaalit sähkömagneettisissa ongelmissa voivat olla yksinkertaisia Poisson-yhtälöitä tai monimutkaisia aaltoyhtälöitä.

Ratkaistaessa raja-arvo ongelmia on luonnollisesti aina suotavaa, että ratkaisu saataisiin analyttisesti. Analyttisen ratkaisun löytyminen voi kuitenkin monesti olla joko erittäin hankalaa tai jopa mahdotonta, jolloin ratkaisua on approksimoitava jotenkin. Edellä jo mainittujen Galerkinin ja Rayleigh-Ritzin menetelmien tarkoituksena on approksimoida ratkaisua raja-arvoihin määritellyn alueen yli. (Jin 1993: 11 - 12.) Seuraavissa kappaleissa käsitellään ratkaisun hakemista hieman tarkemmin esittelemällä Galerkinin menetelmä.

Galerkinin menetelmä

Galerkinin menetelmän idea on niin sanottu painotettujen jäännösten menetelmä. Se hakee ratkaisua painottamalla differentiaaliyhtälön jäännöstä. Tähän perustuen voidaan yhtälö 36 kirjoittaa siten, että sijoitetaan ϕ tilalle testifunktio $\tilde{\phi}$, jolloin saadaan nolasta poikkeava jäännös

$$r_{\text{fem}} = \mathcal{L}\tilde{\phi} - f \neq 0, \quad (37)$$

jossa

$\tilde{\phi}$ on ratkaisun testifunktio.

Paras approksimaatio testifunktiolle $\tilde{\phi}$ saadaan, kun jäännös r saadaan minimoitua kaikissa määritellyn alueen Ω pisteissä. Täten yhtälön 38 tulee toteutua, siten että R_i tarkoittaa painotettua jäännösten integraalia yli alueen

$$R_i = \int_{\Omega} w_i r d\Omega = 0, \quad (38)$$

missä

w_i on määritelty painofunktio.

Kun painofunktiot valitaan siten, että ne on samat kuin approksimoidulle ratkaisulle kehitetty koko alueen kattava funktio, voidaan tällöin määrittellä painofunktiot

$$w_i = v_i, \quad (39)$$

missä

v_i on approksimoidulle ratkaisulle kehitetty funktio ja

i on 1,2,3, ... ,N.

Tällöin ratkaisu voidaan esittää

$$\tilde{\phi} = \sum_{j=1}^N c_j v_j = \mathbf{c}^T \mathbf{v} = \mathbf{v}^T \mathbf{c}, \quad (40)$$

missä

v_j on koko alueen kattava ratkaisufunktio ja

c_j on ratkaistavat vakiokertoimet.

Täten jäännös saadaan muotoon

$$R_i = \int_{\Omega} (v_i \mathcal{L} \mathbf{v}^T \mathbf{c} - v_i f) d\Omega = 0, \quad (41)$$

missä

i on 1,2,3, ... ,N.

Matriisimuodossa ratkaistavat yhtälöryhmät ovat

$$S\mathbf{c} = \mathbf{b}, \quad (42)$$

missä

S on saadaan laskettua yhtälön 43 avulla ja

\mathbf{b} on saadaan laskettua yhtälön 44 avulla.

Yhtälön 42 osat saadaan seuraavasti

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \int_{\Omega} (v_i \mathcal{L} v_j + v_j \mathcal{L} v_i) d\Omega \quad \text{ja} \quad (43)$$

$$b_i = \int_{\Omega} v_i f d\Omega, \quad (44)$$

missä

i on 1,2,3, ... ,N.

Ratkaisu saadaan hakemalla ratkaisu matriisiyhtälölle 42, missä yhtälön 43 sisällä on nähtävissä jäännöslauseke 41. (Jin 1993: 12 - 14.) Tarkemmin Galerkinin menetelmästä voi lukea lähteestä. (Jin 1993)

5.2 Elementtimenetelmän vaiheet

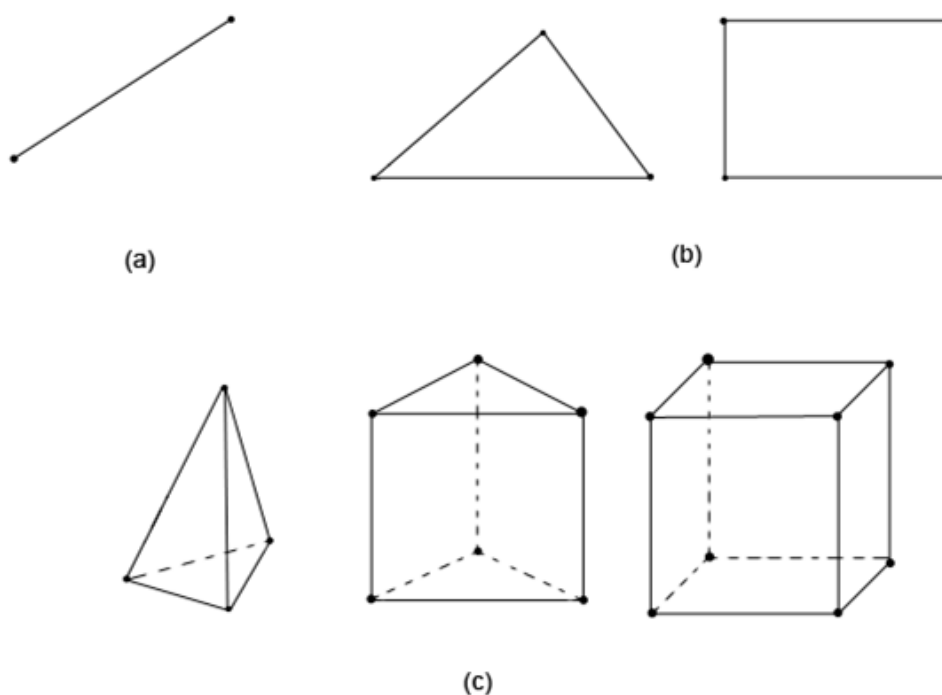
Elementtimenetelmässä eli FEM-laskennassa laskenta etenee tietyssä järjestyksessä. Menetelmän tavoitteena on, kuten edellä jo on mainittu, numeerisen approksimaation hakeminen laskettavan fysikaalisen ilmiön osittaisdifferentiaaliyhtälöille. Laskenta voidaan jakaa karkeasti neljään eri osa alueeseen, jotka lisäksi käsitellään hieman tarkemmin tässä kappaleessa. Nämä neljä vaihetta ovat:

1. laskenta-alueen jakaminen osa-alueisiin,
2. interpolointifunktioiden valinta,
3. järjestelmää kuvaavien yhtälöiden muodostaminen ja
4. yhtälöiden ratkaiseminen. (Jin 1993: 23.)

Seuraavissa kappaleissa käsitellään näitä yksittäisiä osa-alueita hieman tarkemmin.

5.2.1 Laskenta-alueen osittaminen

Laskenta-alueen osittamisella alue jaetaan äärellisen kokoiseen alialueisiin. Näitä alialueita kutsutaan tavanomaisesti elementeiksi, mistä laskentamenetelmän nimikin juontaa juurensa. Alueen osittaminen tulee tehdä huolella, koska tietokoneen käyttämä aika ongelman ratkaisemiseen riippuu vahvasti siitä, kuinka alue on saatu jaettua tehokkaasti elementteihin. Lisäksi elementtien määrällä on vaikutusta laskennan tarkkuuteen. (Jin 1993: 23 - 24.) Kuvassa 24 on esitetty tavanomaisimmat elementtityypit, joilla yksi-, kaksi- ja kolmiulotteiset laskenta-alueet voidaan pilkkoa osiin.



Kuva 24. Eri elementtityypit yksiulotteisia (a), kaksiulotteisia (b) ja kolmiulotteisia (c) laskenta-alueita varten (Jin 1993: 24). Kuvaa muokattu.

Kaksiulotteisten laskenta-alueiden jakamiseen käytetään yleisimmin kolmioita ja kolmiulotteisilla alueilla tetraedreja. Nämä muodot ovat laskennallisesti helppoja käsitellä ja niiden avulla pystytään helposti jakamaan mielivaltaisia muotoja elementtien verkoksi. Elementtien solmupisteet ovat tärkeässä osassa tuntemattoman ratkaisun ϕ löytämisessä. Solmupisteille määritellään arvo, minkä elementin ratkaisua

approksimoiva funktio yhdistää toisiin solmupisteisiin. Yksiulotteisessa elementissä eli janassa on kaksi solmupistettä, siis kummassakin päässä, muissa peruselementeissä, kuten kolmiossa ja tetraedrissä, solmupisteitä on vastaavasti kolme ja neljä. Solmupisteiden numerointi ja koordinaatit sekä niiden valinta ovat merkityksellisiä laskennan tehokkuuden kannalta. Numeroinnissa solmupisteillä on paikallinen ja koko systeemin laajuinen numero. Näiden numerointien vaikutus käy selväksi järjestelmäfunktioiden muodostamisvaiheessa. Tästä syystä optimaalinen numerointi on tärkeää. Nykyaikaiset FEM-laskentaohjelmistot sisältävät valmiin ja tehokkaan laskenta-alueen jakamisen, jolloin ohjelmistojen käyttäjän tarvitsee hyvin vähän puuttua peruselementtiverkon luomiseen. (Jin 1993: 24 - 25.)

5.2.2 Interpolointifunktioiden valinta

Tuntemattoman ratkaisun approksimoinnissa tarvitaan interpolointifunktioita, jotka interpoloivat tuntematonta ratkaisua elementin sisällä. Interpolointifunktioksi valitaan yleensä jokin yksinkertainen polynomi. Se voi olla ensimmäisen, toisen tai korkeamman asteen polynomi. Mitä korkeamman asteen polynomia interpoloinnissa käytetään sitä tarkempia ratkaisuja laskennassa on mahdollista saavuttaa. Kun elementtiä interpoloivan funktion aste on päätetty, yhtälön 45 avulla voidaan laskea jokaisen elementin ratkaisua kuvaava esitys

$$\tilde{\phi}^e = \sum_{j=1}^n N_j^e \phi_j^e = \mathbf{N}^{eT} \boldsymbol{\phi}^e = \boldsymbol{\phi}^{eT} \mathbf{N}^e, \quad (45)$$

missä

- n on elementin solmupisteiden määrä,
- ϕ_j^e on ϕ arvo solmupisteessä j ja
- N_j^e on interpolointifunktio.

Interpolointifunktion N_j^e korkein aste kertoo elementin asteen. Interpolointifunktion ominaisuuksiin kuuluu, että elementin ulkopuolella se katoaa ja saa nollostaan eroavan arvon ainoastaan elementtinsä sisällä. (Jin 1993: 26.)

5.2.3 Järjestelmää kuvaavien yhtälöiden muodostaminen

Järjestelmään liittyvien ratkaistavien yhtälöiden muodostaminen koostuu kolmesta osalueesta. Ensimmäinen vaihe sisältää elementtien yhtälöiden muodostamisen, seuraavassa vaiheessa elementtikohtaiset yhtälöt summataan koko elementtiverkon yli muodostaen koko järjestelmää kuvaavat yhtälöt ja lopuksi raja-arvoehdot otetaan käyttöön systeemyhtälöissä, jotka muodostavat lopullisen ratkaistavan systeemyhtälöryhmän. Tietokoneelle toteutetuissa sovelluksissa nämä vaiheet toteutetaan yleensä yhtä aikaa systeemyhtälöiden muodostuessa. (Jin 1993: 29.) Seuraavaksi esitellään Galerkinin menetelmästä muunneltu versio, jota käytetään nykyisin monissa tietokonepohjaisissa FEM-laskentasovelluksissa.

Hieman muokatun järjestelmäyhtälöiden muodostuksen kantava ajatus on käyttää $\tilde{\phi}$ esittämiseen elementtien koko systeemin kattavia solmupistenumeroiteja. Tämä johtuu siitä syystä, että paikallisella solmupistenumeroinnilla interpolointifunktio N_j^e saanollasta eroavan arvon ainoastaan elementin sisällä. Täten voidaankin testiratkaisu $\tilde{\phi}$ esittää

$$\tilde{\phi} = \sum_{e=1}^M \sum_{j=1}^n N_j^e \phi_j^e, \quad (46)$$

missä

M on elementtien määrä ja

n on elementin solmupisteiden lukumäärä.

Kun otetaan huomioon paikallinen ja koko järjestelmän kattava solmupisteiden numerointi voidaan yhtälö 46 kirjoittaa muotoon

$$\tilde{\phi} = \sum_{j=1}^N N_j^g \phi_j, \quad (47)$$

missä

N on koko systeemin solmupisteiden lukumäärä ja

N_j^g on interpolointifunktio järjestelmän laajuisella solmupistenumeroinnilla.

Täten interpolointifunktio N_j^g on järjestelmänlaajuisen solmupistenumeroinnin takia nollasta eroava kaikissa elementeissä, jotka ovat yhteydessä solmupisteeseen j . Galerkinin menetelmään liittyen edellä esitetyn yhtälön perusteella voidaan kirjoittaa painotettu jäännösfunktio

$$R_i = \int_{\Omega} N_j^g (\mathcal{L}\tilde{\phi} - f) d\Omega = 0, \quad (48)$$

missä

n on 1,2,3, ..., N.

Systeminlaajuisen interpolointifunktion hakeminen on työläs ja monimutkainen prosessi, mutta tietokoneohjelman kannalta edellä esitetty tapa toimii paremmin kuin perinteinen Galerkinin menetelmä. Seuraavaksi voidaan jatkaa Galerkinin menetelmän tavoin, jotta järjestelmäyhtälöt saadaan

$$\mathbf{K}\boldsymbol{\phi} = \mathbf{b}, \quad (49)$$

missä

\mathbf{K} on N x N kerroinmatriisi,

$\boldsymbol{\phi}$ on tuntemattomat interpolointifunktioiden kertoimet ja

\mathbf{b} on tunnettu järjestelmän vektori joka saadaan yhtälöllä 44.

(Jin 1993: 26 - 31.)

Tarkempi määritelmä järjestelmäyhtälöihin liittyvästä matematiikasta löytyy lähteestä (Jin 1993).

5.2.4 Yhtälöiden ratkaiseminen

Viimeinen vaihe elementtimenetelmässä on rakennettujen järjestelmäyhtälöiden ratkaiseminen. Järjestelmän yhtälöt voivat olla muodossa

$$\mathbf{K}\boldsymbol{\phi} = \mathbf{b} \quad (50)$$

tai

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\phi} = \lambda \mathbf{B}_{\text{fem}}\boldsymbol{\phi}, \quad (51)$$

missä

\mathbf{A} on matriisi \mathbf{K} kirjoitettuna yhtälön 52 esittämässä muodossa,

\mathbf{B}_{fem} on ominaisarvoihin liittyvä kerroinmatriisi ja

λ on tuntemattomat järjestelmän ominaisarvot.

Yhtälön 51 muodossa esitetty systeemyhtälöryhmä muodostuu ei-homogeenisista differentiaaliyhtälöistä, ei-homogeenisista raja-arvoista tai molemmista. Yhtälön 51 mukainen järjestelmä muodostuu taas edelliseen nähden vastakohtaisesti homogeenisista differentiaaleista ja raja-arvoista. Yleensä yhtälön 51 mukaisia ominaisarvojärjestelmiä muodostuu sähkömagneettisissa järjestelmissä esimerkiksi laskettaessa aallon etenemistä aaltoputkissa tai resonanssien laskemisessa onkaloissa. Tällöin matriisi \mathbf{K} voidaan kirjoittaa muodossa

$$\mathbf{K} = \mathbf{A} - \lambda \mathbf{B}_{\text{fem}}. \quad (52)$$

Kun järjestelmäyhtälöt on ratkaistu, ratkaisun perusteella voidaan jälkikäsitellyssä laskea halutut arvot ja esittää tulokset halutulla tavalla. Jälkikäsitelyä ei käydä tarkemmin tässä läpi, koska jälkikäsitelyyn liittyvää laskentaa on käsitelty niille tarkoitetuissa omissa kappaleissaan. (Jin 1993: 29 - 30.)

5.3 Elementtiverkko ja sen optimointi

Sähköisessä mallinnuksessa moottorin malli pilkotaan äärellisen kokosiin elementteihin, kuten edellisissä kappaleissa on kuvattu, laskennan helpottamiseksi. Elementtien määrän tulee olla riittävä moottorin geometrian esittämiseksi. Erityisesti tulee kiinnittää huomiota ilmavälin elementtiverkon rakentamiseen. Tavanomainen ilmaväliin rakennettava verkko koostuu kolmesta samanpaksuisesta kerroksesta, joista keskimmäinen on niin sanottu dynaaminen. Dynaaminen verkko luodaan jokaisella laskentakierroksella uudestaan. Elementtien koon tulisi varsinkin kyllästyvissä osissa

(roottori) olla kolmannes tunkeutumissyvyydestä, mutta ongelmaksi yleensä muodostuu lähinnä elementtien kokonaislukumäärä. (Aho 2007: 34.) Suuri elementtiverkko vaikuttaa radikaalisti laskenta-aikaan, jolloin kompromisseilta ei voida välttyä. Tässä työssä käytetyissä malleissa on keskimäärin noin 130 000 elementtiä, simulointiaikojen ollessa noin 48 tuntia.

Elementtiverkon optimoinnissa on syytä kiinnittää huomiota muutamiin kriittisiin kohtiin moottorin geometriassa laskennan ja tulosten kannalta. Edellä mainittiinkin jo ilmavälin tärkeä elementtiverkko, mutta myös roottorissa, varsinkin massiiviroottorisessa tapauksessa, on omat huomioitavat kohtansa. Massiiviroottorin pyörrevirrat ovat erityisen suuret, jolloin elementtiverkon tulisi olla mahdollisimman tiheä roottorin pintakerroksissa. Tällöin pyörrevirrat voidaan laskea mahdollisimman tarkasti. Myös symmetrian ja rajapintaehtoien käyttö on yleinen tapa rajoittaa ja optimoida elementtiverkon kokoa. Sähkömoottorissa riittää yleensä, että simuloidaan vain yhden navan tai napaparin kokoista siivua moottorista. (Aho 2007: 34.) Kun mallinnuksessa ei haluta tutkia käämien pyörrevirtoja tai käämien keskinäisvaikutuksia, käämit voidaan korvata yhdellä kiinteällä johtimella, mikä vähentää verkon elementtien määrää huomattavasti (Aho: 2007: 36).

5.4 Tulosten analysointi

Tämän työn tulosten analysoinnin kannalta kiinnostavat tulokset ovat moottorin tuottama mekaaninen teho ja roottorissa tapahtuvat häviöt. Roottorin häviöt ovat pääosin Joule-häviöitä – joiden laskeminen esiteltiin kappaleessa 4.2 – sekä suurilla nopeuksilla tapahtuvat kaasu- ja kitkahäviöt, joiden laskemiseen ei sähköinen FEM-laskenta ota kantaa. Sähköisen FEM-laskennan avulla voidaan myös arvioida moottorissa tapahtuvia hystereesihäviöitä, mutta niiden aiheuttaman lisälaskennan aiheuttaman simulointiaikojen pitkittymisen vuoksi niiden ei tässä työssä koettu tuovan lisäarvoa tuloksille, koska hystereesihäviöt ovat vain murto-osa moottorin häviöistä.

Laskettaessa moottorin tuottamaa vääntömomenttia, käytetään hyväksi niin sanottua näennäisen eli virtuaalisen työn määritelmää. Tällä menetelmällä voidaan melko tarkasti

laskea sekä muotonsa säilyttäviin kappaleisiin kohdistuva voima että moottorin tuottama vääntömomentti. Voiman laskennassa käytetään hyväksi magneettista liittoenergiaa W_{co} sekä virtuaalista siirtymää s_{shift} . Ensimmäisenä lasketaan kappaleeseen kohdistuva voima

$$F = \frac{\partial W_{co}}{\partial s_{shift}} = \frac{\partial}{\partial s_{shift}} \int_V \int_0^H \mathbf{B} d\mathbf{H} dV, \quad (53)$$

missä

- W_{co} on magneettinen liittoenergia (coenergy),
- s_{shift} on virtuaalinen siirtymä,
- \mathbf{B} on magneettivuon tiheys,
- \mathbf{H} on magneettivuon voimakkuus ja
- V on laskettava tilavuus.

Huomattavaa on, että 2D-laskennassa tilavuusintegraali muuttuu pintaintegraaliksi laskettavan pinnan ylitse.

Edellisen yhtälöön perustuen voidaan muodostaa vastaavalla periaatteella yhtälö 54, missä virtuaalisen siirtymän s_{shift} tilalle vaihdetaan virtuaalinen kulma θ . Tällöin laskenta antaa kappaleeseen kohdistuvan vääntömomentin. Tämä moottorin laskennan vääntömomentti on moottorin tuottama mekaaninen vääntömomentti.

$$T_{em} = \frac{\partial W_{co}}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial \theta} \int_V \int_0^H \mathbf{B} d\mathbf{H} dV, \quad (54)$$

missä

- W_{co} on magneettinen liittoenergia,
- θ on virtuaalinen kulman muutos,
- \mathbf{B} on magneettivuon tiheys,
- \mathbf{H} on magneettivuon voimakkuus ja
- V on laskettava tilavuus. (Aho 2007: 37.)

Varsinkin tämä yhtälö 54 on tärkeä moottorin vääntömomentin ja tehon laskennan kannalta.

6 SIMULOINTIMALLIN RAKENTAMINEN

Simulointimallin rakentaminen lähtee liikkeelle aina simuloitavan kohteen teknisistä tiedoista ja mitoista. EGR-moottoriprojektissa jo oli alunperin tiedossa työssä käsiteltävässä moottorin tekniset mitat ja Ville Kivelä oli Adept-simulointien avulla määritellyt alustavat sähköiset parametrit moottorille. Koska Adeptin käyttämä FCSMEK-paketti on suunniteltu pelkästään 2D-simulointeja ajatellen, ei oikosulkurenkaiden pituuden vaikutuksia ole näillä keinoilla kyetty arvioimaan. Tähän tarkoitukseen soveltuu erinomaisesti Ansys Maxwell[®] -ohjelma. Se sisältää yksinkertaisen apuohjelman Rmxpert, joka mahdollistaa sähkömoottorin mallin luomisen moottorin teknisten tietojen perusteella.

Mallien toimivuus varmistettiin niiden valmistuttua testisimuloinneilla. Alkuperäisenä ajatuksena oli laskea jokainen malli vaihtuvalla jättämällä. Tämä osoittautui vääräksi tavaksi ratkaista ongelma. Edellä esitetyn haasteen jälkeen malleihin vaihdettiin vakiojättämä, minkä jälkeen haettiin haarukoimalla vääntömomentti siten, että moottorin mekaaninen teho saatiin $\pm 10\%$ sisään annetusta nimellistehosta. Tehon ja jättämän vaihdellessa esimerkiksi häviöihin liittyvät tulokset annetaan suhteellisarvoina. Lopulta löydettiin yksi jättämä, millä kaikkien simuloitujen mallien mekaaninen teho pysyi edellä annettujen rajojen sisällä.

6.1 Mallin rakentaminen

Simuloinnit suoritettiin Ansys Maxwell[®] -ohjelmistolla. Mallien rakentamisessa käytettiin hyväksi moottorin teknisiä mittoja sekä Adeptin avulla simuloidun 2D-mallin sähköisiä arvoja. Kappaleessa käydään läpi moottorin simulointimallin luominen Rmxpert-työkalulla sekä moottorin tekniset tiedot. Myöhemmissä kappaleissa tutustutaan tarkemmin staattorin uramuotoon, käämitykseen ja eri oikosulkurenkaiden mallintamiseen. Taulukossa 1 on esitettyä moottorin tärkeimmät mitat.

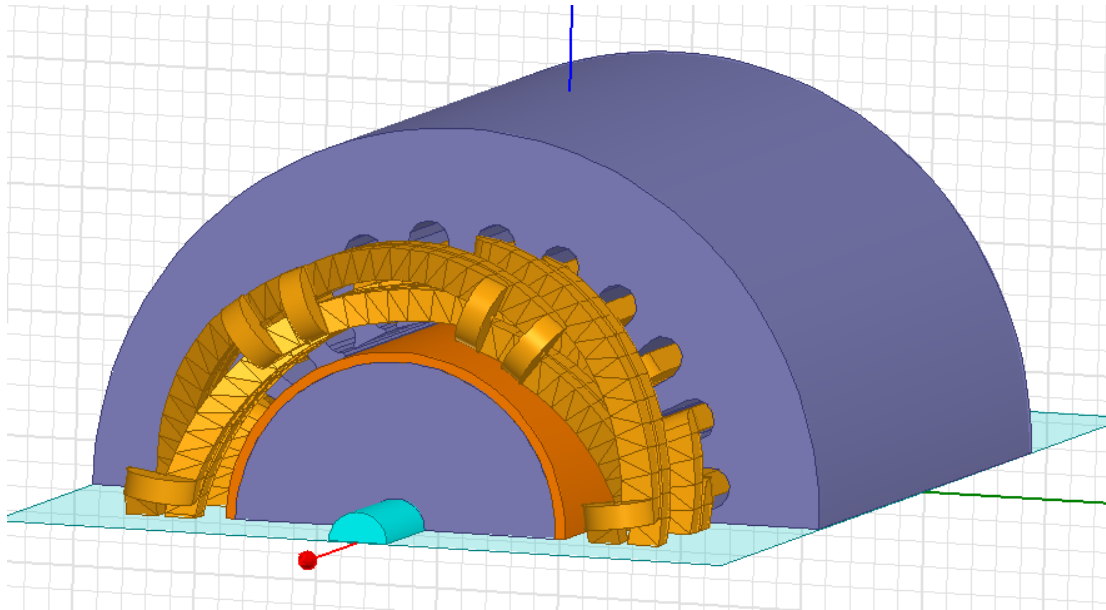
Taulukko 1. Suurnopeusmoottorin tärkeimmät mitat.

Staattori		Roottori	
Ulkohalkaisija	150 mm	Halkaisija	70 mm
Sisähalkaisija	74 mm	Akseli	12 mm
Pituus	140 mm	Pituus	140 mm
Uria	24	Oikosulkurengas	0 - 50 mm
Materiaali	Sura No 25	Materiaali	Cu/Fe

Suunnitellussa moottorissa ilmvälän pituus oli 2 mm. Tarkemmin moottorin mallissa käytettyjä mittoja ja materiaaleja eritellään seuraavissa kappaleissa. Materiaalien ominaisuuksia voi tarkastella tarkemmin myöhemmässä kappaleessa.

Simulointimallin tekeminen aloitettiin Rmxpert-työkalulla. Työkalun tarkoituksena on nopeuttaa ja helpottaa sähkömoottorien simulointimallien tekemistä. Rmxpert osaa itsenäisesti tehdä esimerkiksi toimivat rajapintaehdot, luoda moottorin symmetriaan perustuvan mallin ja rakentaa käämit. Lisäksi käämeille luodaan valmiiksi virta- tai jännite-ohjaukset, joten malli on suurimmaksi osaksi simulointivalmis Rmxpert:n käytön jälkeen. Rmxpert ei sisällä mahdollisuutta erikoisten roottorivaihtoehtojen luomiseen kuten kyseisessä projektissa, joten seuraavassa vaiheessa valmiista 3D-mallista poistettiin Rmxpertin suunnittelema häkkikäämiroottori ja se korvattiin massiiviroottorilla. Massiiviroottori suunniteltiin siten, että ensin määriteltiin kuparisylinteri, josta Boolean operaatiolla poistettiin säteeltään 2 mm pienempi sylinteri, jolloin muodostui 2 mm kuparikerros. Seuraavaksi mukaan liitettiin massiiviroottorin ydin, joka valmistettiin normaalista sylinteristä. Lopuksi roottori puolitettiin Boolean operaation avulla, jolloin saatiin aikaiseksi malliin sopiva puolikasroottori, olihan malli itsekin puolikas symmetriaehtojen ansiosta. Viimeisenä operaationa uusi roottori tuli liittää osaksi Motion-objektia, jotta ohjelmisto osaa käsitellä roottoria vapaasti pyörivänä kappaleena.

Mallin valmistuttua sen pätevyys haluttiin tarkastaa simuloimalla Adept-ohjelmiston asetuksia vastaava konfiguraatio. Muutamien hienosäätöjen jälkeen voitiin todeta moottorimallin tuottavan Adeptin tulosten kanssa riittävän hyvin vastaavan vääntömomentin. Kuvassa 25 on esitetty lopullinen malli.



Kuva 25. Kuvassa näkyvillä valmis moottorimalli Ansys Maxwell[®]-ohjelmistossa.

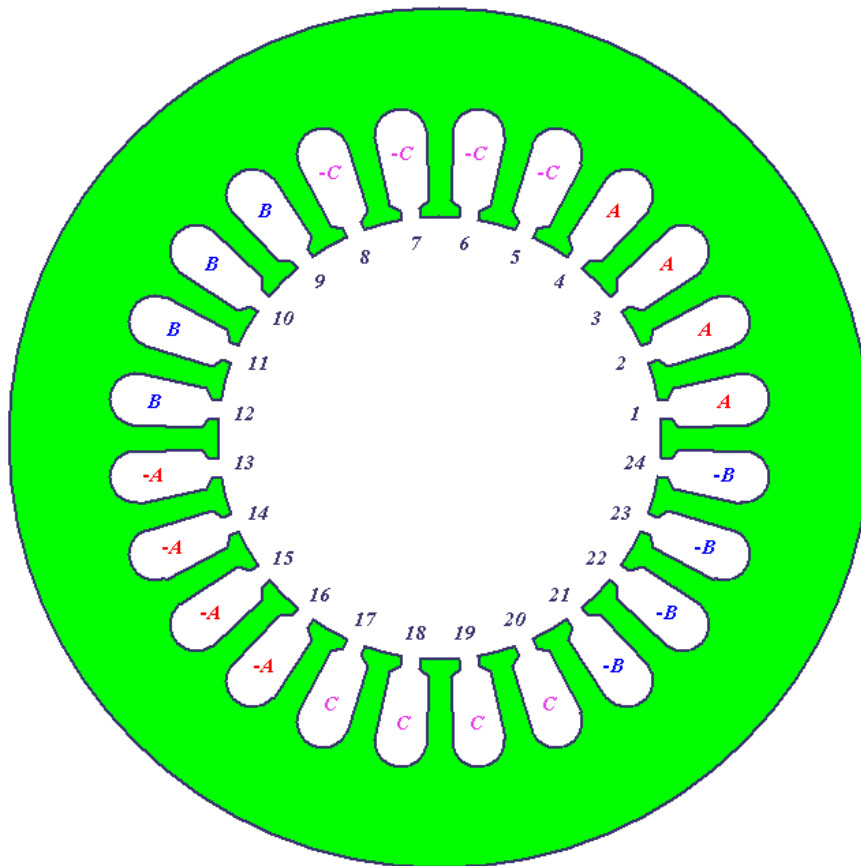
Kuvan 25 malli toteutettiin puolikkaana moottorina, koska symmetrian vuoksi voidaan olettaa toisen puoliskon toimivan vastaavalla tavalla. Täten mallissa säästetään huomattavasti elementtejä ja laskenta-aikaa. Moottoria mallinnettaessa toimivan mallin luomiseen riittää ainoastaan napojen vastapuolten esittäminen mallissa. Täten kyseessä olevassa kaksinapaisessa moottorissa pitää mallintaa moottorin puolikas kun taas nelinapaisessa moottorissa riittäisi neljäsosa moottorista.

Simulointimallin tarkastamiseksi suoritettiin tarkastuslaskenta, missä 30 mm oikosulkurenkaalla olevan roottorin vääntömomentti laskettiin vastaavalla jättämällä ja virtaerähteellä. Tarkastuslaskennan tuloksena voitiin todeta mallin antavan riittävän lähelle sama vääntömomentti 2D-mallin kanssa. Malli kuitenkin eroaa hieman 2D-mallista, koska 2D-malli ei yhtä hyvin ota huomioon massiiviroottorin oikosulkurenkaiden aiheuttamaa todellista vaikutusta roottorin impedanssiin. Tämä

olikin yksi suurimmista syistä massiiviroottorisen suurnopeusmoottorin simuloimiseksi 3D-elementtimenetelmällä.

6.1.1 Käämityksen parametrit

Staattoriin asetettu käämitys sisältää monia parametreja, joiden avulla käämien toimintaa ja vaikutuksia moottorin suoritusarvoihin voidaan muuttaa. Koska tässä työssä ei tutkita tarkemmin käämityksen parametrien muutosten vaikutuksia moottorin suorituskykyyn, käämit pysyvät identtisinä mallista toiseen. Vaikka käämien lankojen ja kierrosten tarkat tiedot annetaan Rmxpert:lle, niitä käytetään ainoastaan lopullisten käämien poikkipinta-alan, resistanssin ja induktanssin määrittämiseen. Lopullisessa mallissa käämit onkin mallinnettu kuparitankoina, jolloin niihin käytettyjen elementtien määrä voidaan pitää mahdollisimman pienenä. Kuvassa 26 on nähtävissä käämien vaihekaavio.



Kuva 26. Staattorin käämien vaihekaavio.

Kuvasta 26 nähdään käämien vastinparit staattorin vastakkaisella puolella. Taulukossa 2 on nähtävillä käämien tärkeimmät parametrit.

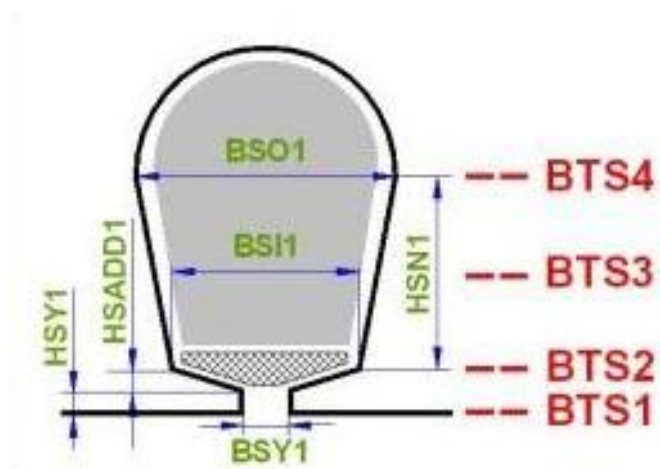
Taulukko 2. Käämien tärkeimmät parametrit.

Parametri	Arvo
Kerrokset	1
Rinnakkaisia haaroja	2
Johtimia uraa kohti	9
Säikeitä	15
Johtimen paksuus	0,607 mm

Koska Adept ja Ansys Maxwell[®] käyttävät hieman eri termejä ja ilmaisutapoja moottoria kuvaavissa parametreissa. On tällöin hyvä huomioida liitteessä 4 annetut vastaavuustaulukot, jotka ovat alunperin Ville Kivelän selvittämiä.

6.1.2 Staattorin uramuodon mitat

Staattorin uramuodolla on vaikutusta moottorin käyttäytymiseen ja häviöihin. Moottorimallissa käytettiin Adept-mallin staattoriurien muotoa. Uramuoto pysyi vakiona simulointien ajan. Kuvassa 27 on nähtävillä staattoriurien merkintöjä vastaavat uran geometria parametrit.



Kuva 27. Staattoriuran parametrien selitykset.

Uraa kuvaavat parametrit on esitettyinä taulukossa 3. Ansys Maxwell[®] -ohjelmistossa ei kaikille kuvassa 27 annetuille ole vastinetta, joten esitettävät parametrit ovat ne parametrit, jotka otettiin käyttöön Maxwell[®]:ssa.

Taulukko 3. Staattoriuran parametrit.

Parametri	Mitta (mm)
HSY1	0,704
HSN1	12,252
BSY1	2,5
BSI1	6,101
BSO1	8,217

6.1.3 Oikosulkurenkaan pituuksien mallintaminen

Oikosulkurenkaiden tutkimiseksi alkuperäisestä mallista luotiin kaikki loput viisi eri variaatiota. Koska alkuperäinen malli luotiin 30 mm oikosulkurenkaan mallin perusteella, joka oli alunperin ensimmäisen prototyypimootorin suunniteltu oikosulkurenkaan pituus ja täten eniten Adept-ohjelmiston 2D elementtimenetelmäpaketin FCSMEK:in avulla laskettu, muut tarvittavat mallit luotiin joko lyhentämällä tai pidentämällä alkuperäisen mallin roottorin pituutta. Käytännön ratkaisuna alkuperäinen malli kopioitiin siten, että saatiin luotua projektin sisälle mallit jokaiselle oikosulkurenkaan pituudelle. Tämän jälkeen jokaiselle eri oikosulkurenkaalle määriteltiin uudelleen roottorin pituus, roottorin asema suhteessa staattoriin sekä tarkistettiin rajapintojen, virtojen ja simulointi parametrien arvot. Näillä toimenpiteillä varmistettiin, että jokainen malli oli toisiinsa nähden vastaava jättämää ja oikosulkurenkaan pituutta lukuun ottamatta.

Syy miksi eri oikosulkurenkaiden pituuksia ei kyettä tehokkaasti vertailemaan Adept-ohjelmistolla on se, että Adept käsittelee oikosulkurenkaat erillisinä elementteinä muusta roottorista, jolloin esimerkiksi 0 mm oikosulkurengas on mahdoton laskea. Se, miksi 0 mm on mahdoton laskea, johtuu siitä, että Adept ei tällöin kykene laskemaan

virralle paluureittiä, mikä johtaa virheilmoitukseen. Muilla oikosulkurenkaan pituuksilla taas virrantiheys kasvaa luonnottoman suureksi, koska normaalissa tapauksessa osa virrasta kääntyy jo ennen oikosulkurengasta, jolloin todelliset virrantiheydet lyhyillä oikosulkurenkailla ovat huomattavasti Adeptin ilmoittamia pienemmät. Täten tehokas vertailu lyhyillä oikosulkurenkailla ei ole mahdollista.

6.1.4 Mallissa käytetyt materiaalit

Mallissa käytettiin Ansys Maxwell[®] -ohjelmiston kirjastosta löytyviä materiaaleja. Roottorin ytimen teräsmateriaali (S355J2G3) ja staattorin laminointimateriaali (Sura NO25) muutettiin BH-käyrän osalta vastaamaan Adept-ohjelmiston materiaalien arvoja. Muutoksella pyrittiin saamaan mallista tarkempi, koska Adept-ohjelman materiaalikirjaston materiaalit ovat ABB:llä käytössä ja niiden sähköiset ominaisuudet on mitattu. Taulukossa 4 on esitettynä malleissa käytettyjen materiaalien perusominaisuudet. Teräs ja laminointimateriaalien BH-käyrät löytyvät liitteistä 1 ja 2.

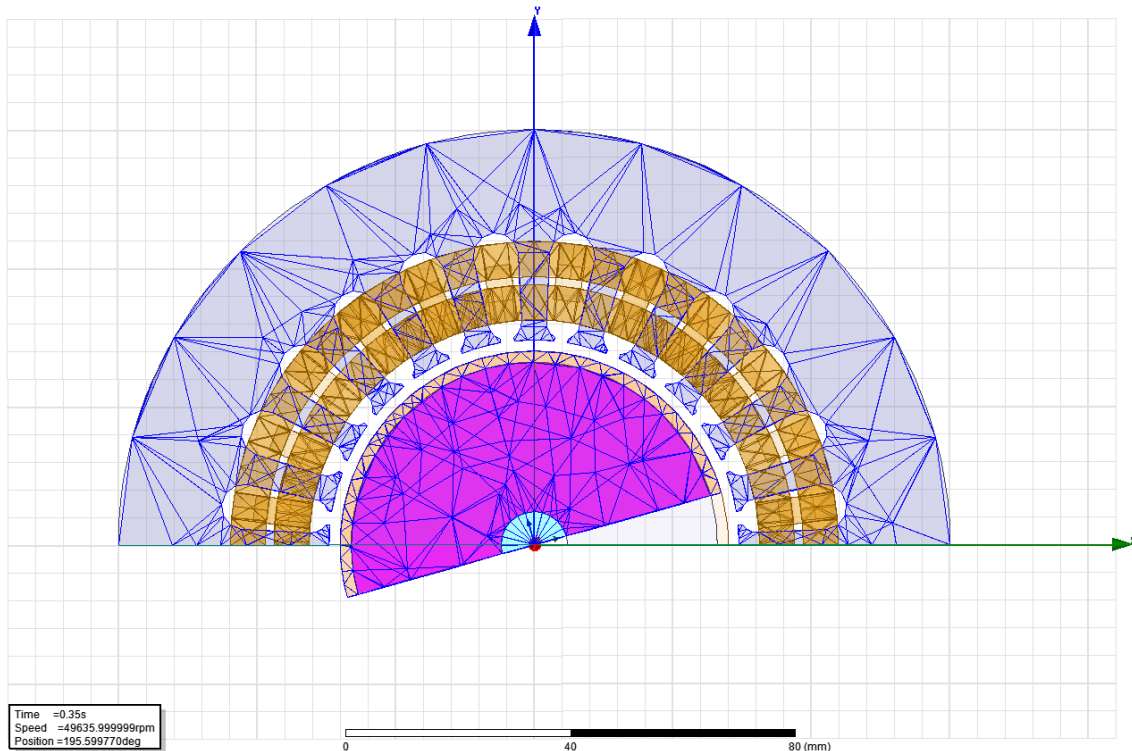
Taulukko 4. Mallissa käytettyjen materiaalien perusominaisuudet.

Materiaali	Johtavuus (siemens/m)	Suht. permeabiliteetti	Tiheys (kg/m ³)
Kupari	58 000 000	0,999991	8933
S355J2G3	4 330 000	Ks. liite 1.	7872
Sura NO25	0	Ks. liite 2.	7600
Tyhjiö	0	1,0	0

6.2 Elementtiverkon hienosäätö

Ansys Maxwell[®] -ohjelmisto osaa jo perusasetuksillaan toteuttaa melko toimivan ja tarkan elementtiverkon. Elementtiverkon tulee ilmavälissä ja kuparikerroksessa olla melko tiheä, jotta häviöt saadaan laskettua riittävän tarkasti. Täten näille kappaleille asetettiin vaatimus tiheämmästä elementtiverkosta perusverkkoon verrattuna. Jotta edellisen muutoksen lisäämät elementit saatiin kompensoitua vähennettiin hieman staattorin, käämien ja roottorin akselin esittämisessä käytettyjen elementtien määrää. Näillä muutoksilla ja parannuksilla elementtiverkkojen keskimääräinen koko saatiin

pysymään noin 130 000 elementissä. Näin laskenta-aika ei kasvanut merkittävästi. Esimerkki lasketusta elementtiverkosta on esitettyä kuvassa 28.



Kuva 28. Esimerkki käytetystä elementtiverkosta.

Kuten kuvasta 28 nähdään elementtiverkko on tiheimmillään juuri kuparikerroksessa ja staattorin hampaissa. Kuvassa ei näy ilmapälin elementtiverkkoa, mutta jotta moottorin mallinnus toimisi mahdollisimman tarkasti, elementtiverkon on oltava ilmapälinäkin riittävän tiheä. Tällöin, kuten teoriasta tiedetään, on elementtien sisälle luotavien interpolointifunktioiden approksimoitava alue mahdollisimman pieni, jolloin approksimoinnin aiheuttamat virheet ovat myös pienet.

6.3 Simulointiaika

Simulointien työstäminen toteutettiin ABB:n tehoyöasemalla (Lenovo Thinkstation D20) etäyhteyden välityksellä. Malleissa elementtien lukumäärä oli keskimäärin noin 130 000 elementtiä, mikä on suurin yksittäinen simulointiaikaan vaikuttava tekijä.

Keskimäärin yhden 350 ms simulointiajon laskeminen kesti noin 36 - 48 tuntia riippuen tietoverkon kuormituksesta. Tietoverkon vaikutukset simulointiaikaan olivat suhteellisen merkittävät ottaen huomioon, että simulointia suorittava etäkone toimi toisessa rakennuksessa. Lisäksi koska simuloinnin yhteydessä siirrettiin keskimäärin 25 Gt dataa simulointiohjelman ja etälaskennan välillä, on selvää että tietoverkolla on oma vaikutuksensa. Siirrettävän datamäärään oli mahdollista vaikuttaa tallennettavien pisteiden lukumäärää muuttamalla, jolloin simulointiaikoja pystyi hieman hienosäätämään. Kuitenkin laskelmia varten tallennettiin jokaisesta simuloinnista vähintään viimeiset 50 ms.

Jälkikäsitteilyn yhteydessä koottiin simulointien tuloksista Joule-häviöitä esittävä kuvaaja niin roottorin pinnoitteen kuin roottorin ydinmateriaalinkin osalta häviöiden keskiarvon laskemista varten. Laskennassa hyödynnettiin Joule-häviöiden laskemiseen tarkoitettua yhtälöä 21. Laskenta suoritettiin paikallisesti, jonka aikana kone oli käytännössä käyttökelvoton raskaan kuormituksen vuoksi. Käyttökelvottomassa tilassa koneen annettiin suorittaa prosessi loppuun valvomatta, mikä kesti useamman tunnin, joten läheskään yhtä tarkkaa arviota tämän prosessin suoritusajasta ei ole.

6.4 Kohdattuja haasteita simuloinneissa

Simulointiprojektin aikana kohdattiin useampia haasteita, jotka hidastivat simulointityön valmistumista. Tässä kappaleessa käsittelemme näistä hidasteista suurimpia. Näitä haasteita olivat jänniteherätteen käyttäminen, Maxwell[®]-ohjelmiston tapa käsitellä indusoituja jännitteitä ja roottorin nopeuden dynaaminen mallintaminen. Jokaiselle haasteelle on seuraavaksi varattu oma kappaleensa, jossa niitä käsitellään hieman syvällisemmin.

Simulointimallit simuloitiin virtaerähteellä sen takia koska jänniteheräätteellä törmättiin erikoisiin ongelmiin. Yksi näistä ongelmista oli vääntömomentin holtiton värähtely, eli käytännössä moottori vain resonoi. Ongelma korjaantui käyttämällä virtaerätettä, mutta silti oli erikoista, että tavanomaisen jännitteellä ohjaaminen ei antanut lähellekään haluttua tulosta.

Virtaohjauksen käyttäminen jänniteohjauksen sijaan, kuten edellisessä kappaleessa kerrottiin, vaikutti laskentaan siten, että Maxwell[®] laski jokaiselle käämille indusoituneen jännitteen virran perusteella. Tämä aiheutti muutamia haasteita. Jännite ei pysy normaalin verkkojännitteen tavoin vakiona eri oikosulkurenkaiden välillä, mikä ei sinällään estä vertailua oikosulkurenkaiden välillä, mutta aiheuttaa hieman hämmennystä tuloksia tutkittaessa. Lisäksi Maxwell[®]:stä on havaittu ominaisuus, että sen laskemat jännitteet eivät ole täysin oikeassa tahdissa virran käyrämuodon kanssa, mikä sotkee esimerkiksi tehokertoimen määrittämistä. Ratkaisuksi on ehdotettu Maxwell[®]:in laskeman vuon käyrämuodon käyttämistä jännitteen sijaan tehokertoimen määrittämisessä, mutta tätäkin ratkaisua on syytä epäillä. Syy epäilyihin johtuu siitä, että laskettaessa moottorin tehokerroin lisäämällä moottorin häviöt moottorin mekaaniseen tehoon, saadaan huomattavasti realistisempi tehokerroin kuin kummastakaan käyrämuodosta laskemalla. On myös hyvä muistaa, että Maxwell[®]:n laskemat jännitteet ovat vaihejännitteitä, jolloin tehokertoimen laskemiseksi pitää selvittää pääjännite. Lopullisena ratkaisuna päädyttiin laskemaan teoriaan perustuen moottorin tehokerroin lisäämällä mekaaniseen tehoon häviöt ja laskemalla näin saadun pätötehon ja näennäistehon avulla moottorille tehokerroin.

Roottorin dynaamisen pyörimisen mallintaminen oli jo odotetusti haastava ja todennäköisesti epäonnistuva toimenpide. Tähän tulokseen oltiin päädytty jo Jaakko Vesalan diplomityön aikana Kivelän mukaan (Vesala 2010). Tässäkin työssä yritettiin antaa Maxwell[®]:n laskea roottorille sen tasapainotilaa vastaava pyörimisnopeus, mutta ongelmaksi muodostui juuri sama ongelma, johon aiemminkin on törmätty; roottorin pyörimisnopeus jatkaa vajoamista loputtomiin ilman minkäänlaisia merkkejä tasaantumisesta mihinkään järkevään arvoon. Tästä syystä jokainen simulointimalli ajettiin aluksi kokeilun vuoksi vaihtuvalla jättämällä, jotta saataisiin piste, jossa 20 kW:n mekaaninen teho saavutettiin. Tämä ei onnistunut, koska roottorin ollessa jatkuvassa muutostilassa, simulointi ei päässyt missään tilanteessa hakemaan tasapainotilaansa, jolloin saavutettu moottorin mekaanisen tehon piste oli väärä. Näin saatuja tuloksia ei voitu käyttää hyväksi myöhemmissä laskennoissa yrityksistä huolimatta. Lopulta päädyttiin edellä kuvattuun ratkaisuun, missä moottorin jättämä pidettiin vakiona ja oikosulkurenkaat simuloitiin löydetyllä yhteisellä jättämällä, jolla

simuloitujen mallien tuottama mekaaninen teho pysyi $\pm 10\%$ sisällä simuloidun moottorin nimellistehosta.

6.5 Jälkiprosessointina toteutetut laskennat

Jälkiprosessoinnissa lasketaan tallennettujen tilojen avulla moottorin arvoja, joita ei simuloinnin aikana lasketa. Tässä työssä Maxwell[®]-ohjelmistolla laskettiin jälkiprosessointina periaatteessa vain Joule-häviöt. Nämä häviöt kuvastavat kaikkien virtojen tuottamia häviöitä, jotka lämmittävät roottoria. Joule-häviöiden laskemiseen käytettiin hyväksi teoriassa esitettyä yhtälöä 21.

Luonnollisesti jälkiprosessointilaskennaksi voidaan myös laskea laskettujen tulosten avulla lasketut tehokertoimet ja mekaaniset tehot. Tuloksissa esitetäänkin laskettujen tilanteiden tehokerroin, häviöt suhteellisarvoina ja moottorille laskettu hyötysuhde. Aluksi uskottiin, että häviöt joudutaan esittämään suhteellisarvoina, koska epäiltiin, että jättämää ei voida pitää vakiona eri oikosulkurenkaiden välillä. Lopulta löydettiin kuitenkin yhteinen jättämä, jolla jokaisen mallin mekaaninen teho saatiin sopivan lähelle haluttua nimellistehoa, minkä avulla välttyttiin tehollisarvojen käytöltä häviötuloksissa.

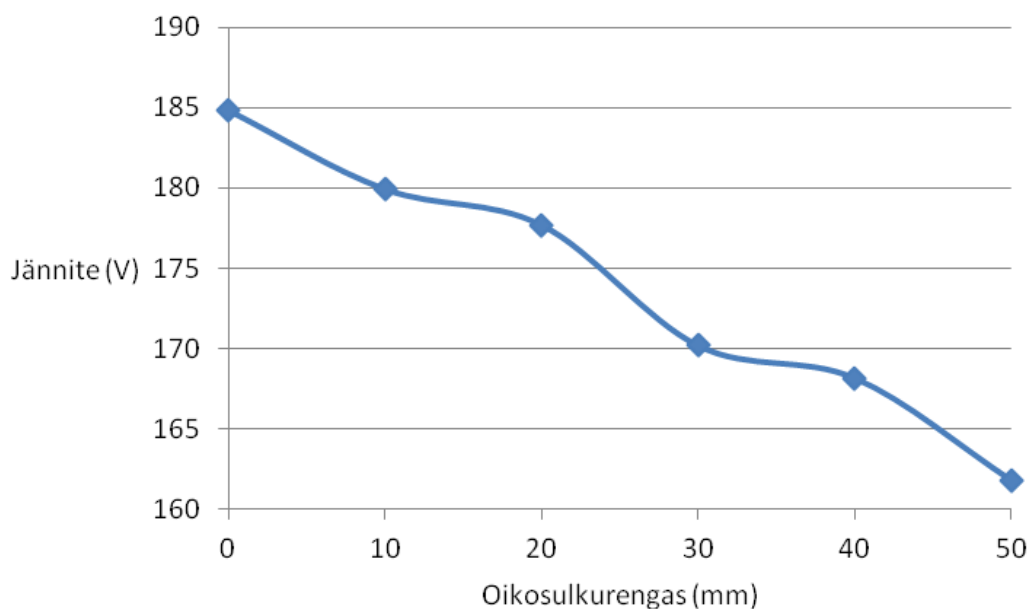
7 SIMULOINTITULOKSET

Simuloinnit suoritettiin useamman viikon aikana ja niitä hieman pitkittivät edellisessä kappaleessa kuvatut haasteet. Eri simulointimallit ajettiin siten, että ensin ajettiin mallista riippuen noin 220 - 300 ms siten, että käytettiin 4 aika-askelta jaksoa kohti. Kun malli näytti merkkejä vääntömomentin tasaantumisen, vaihdettiin aika-askelen pituus niin, että käytettiin 40 askelta per jakso. Askeleen tihentäminen vaikutti mallin induoitujen jännitteiden käyrämuotoihin, induoitujen jännitteiden piikkiarvojen tasaantumiseen suunnilleen toisiaan vastaaviksi ja Joule-häviöiden kasvamiseen. Tiheämmällä askeleella laskettiin vähintään 10 ms, jotta malli ehti tasaantua aika-askelen aiheuttamasta transientista ja saatiin vähintään 5 ms lopullisia laskentoja varten sopivaa simulointia. Tiheämmällä aika-askeleella on siis tärkeä merkitys mallin tarkan ratkaisun kanssa. Tässä kappaleessa tarkastellaan simuloitujen mallien tuloksia, niistä laskettuja välillisiä moottorin parametreja ja havainnollisia kuvia roottorissa kulkevista virroista. Tarkemmat numeeriset tulokset löytyy liitteestä 3. Kappaleessa 7.4 käsitellään häviöitä, joita ei otettu laskennassa huomioon. Koska välillisesti lasketuissa tuloksissa ei ole kaikkia häviöitä huomioitu, ei laskennan tuloksia voida suoraan verrata prototyypimoottoreihin, vaan tulosten perusteella voidaan nähdä erot eri oikosulkurenkaiden perusteella ja siten mahdollisesti tehdä johtopäätöksiä prototyypimoottoreiden oikosulkurenkaiden pituuksista.

7.1 Suorat tulokset

Suorat tulokset saadaan nimensä mukaisesti suoraan Maxwell[®]-ohjelmasta. Näitä tuloksia ovat muun muassa jännitteet, vääntömomentti ja häviöt. Häviöinä ohjelma laskee kuparihäviöt eli Joule-häviöt ja muut moottorissa tapahtuvat häviöt. Joule-häviöistä suurin osa on roottorissa tapahtuvia häviöitä. Suorien tulosten perusteella voidaan moottorille laskea muita suoritusparametreja. Laskettaessa moottorin vääntömomenttia ja häviöitä, käytettiin viimeisen 5 ms keskiarvoa. Viimeinen laskentapiste jätettiin huomiotta, koska monesti simuloinnin päättyminen aiheutti epämääräisen transienttipiikin tuloksiin. Jännitteiden RMS-arvot laskettiin piikkiarvojen

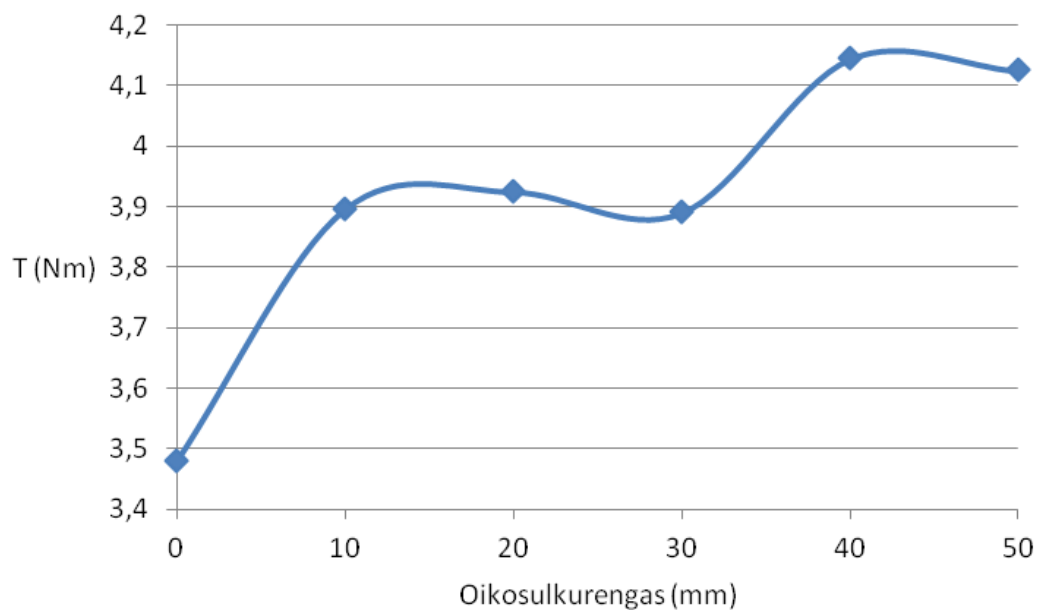
perusteella viimeisestä täydestä puolijaksosta. Vaihtelu jännitteiden piikkiarvoissa viimeisen 5 ms aikana oli minimaalista. Kuvassa 29 on esitettyä 1-vaiheen vaihejännitteen vaihtelu eri oikosulkurenkailla.



Kuva 29. 1-vaiheen vaihejännitteen vaihtelu eri oikosulkurenkailla.

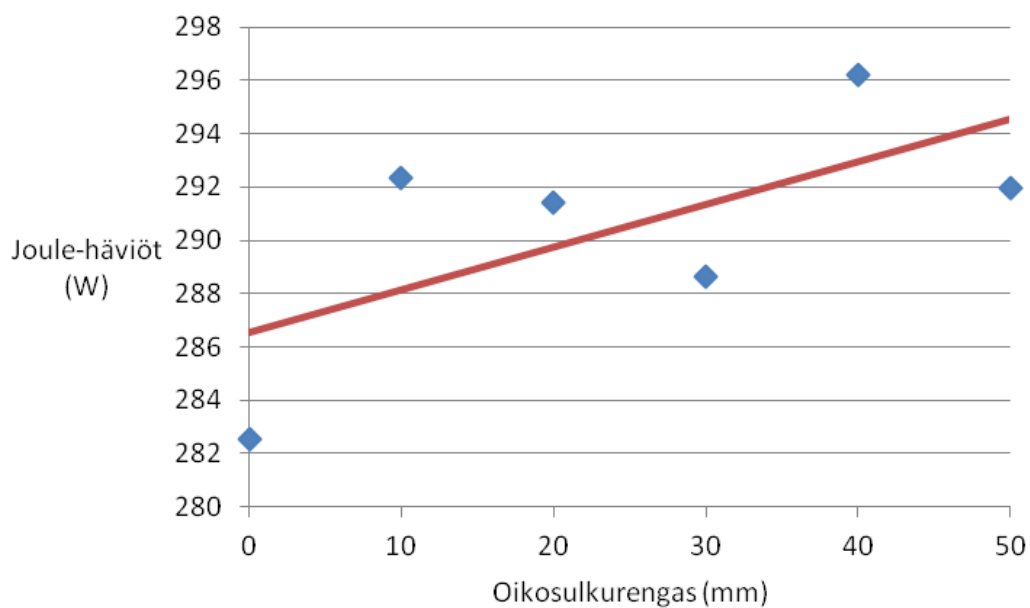
Kuvaajasta nähdään kuinka oikosulkurenkaan pituuden kasvaessa vaihejännite laskee melko tasaisesti. Vaihejännite pääsee vapaasti muuttumaan, koska kuten edellä on mainittu, simuloinnit suoritettiin vakiovirtaerätteellä jänniteherätteen sijaan.

Vääntömomentti on tärkeä moottorin tehon mittari. Maxwell[®]-ohjelmisto laskee moottorille automaattisesti kehitetyn vääntömomentin. Oikosulkurenkaita simuloidessa valittiin jättämä siten, että simulointitulokset saatiin, jokaisella oikosulkurenkaalla, samalla jättämällä. Täten tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia. Kuvassa 30 on esitettyä vääntömomentti eri oikosulkurenkailla.



Kuva 30. Vääntömomentti eri oikosulkurenkailla.

Maxwell[®]-ohjelmisto laskee valmiiksi myös moottorin Joule-häviöt, joihin kuuluu siis myös roottorissa tapahtuvat häviöt. Kuvassa 31 on esitettyä Joule-häviöiden vaihtelu eri oikosulkurenkailla.

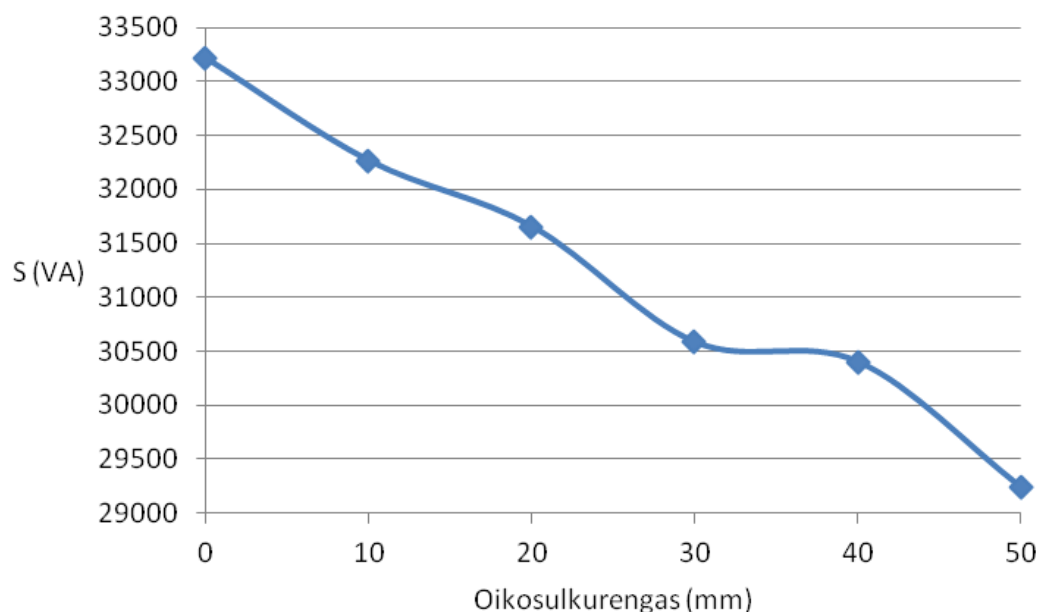


Kuva 31. Joule-häviöt eri oikosulkurenkailla.

Joule-häviöiden osalta voidaan kuvasta 31 nähdään mite hävit vaihtelevat hyvin vähän eri oikosulkurenkaiden välillä. Kokonaisuudessaan kaikki Joule-häviöistä lasketut pisteet mahtuvat 10 W sisään, joten suurista eroista ei ole kyse. Tästä syystä kuvaajaan lisättiin trendilinja kuvaamaan paremmin häviöiden kehitystä. Vaihtelut eri oikosulkurenkailla selittyvät parhaiten mallien epätarkkuuksilla.

7.2 Epäsuorasti lasketut tulokset

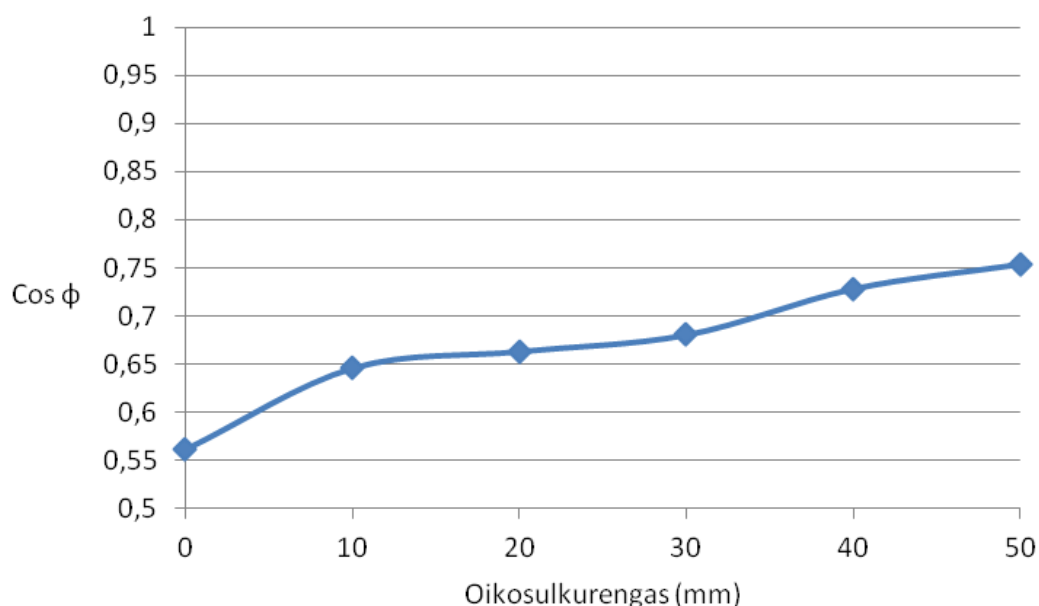
Luvussa esitetyt tulokset on saatu laskemalla suorien tulosten perusteella. Laskettaessa moottorin ottamaa näennäistehoa laskettiin teho erikseen jokaisen vaiheen vaihejännitteen kanssa, koska vaihejännitteet vaihtelivat muutaman voltin verran. Tällöin saatiin moottorin ottama näennäisteho määritettyä mahdollisimman tarkasti. Kuvassa 32 on esitettyä näennäistehon vaihtelu eri oikosulkurenkailla.



Kuva 32. Näennäisteho eri oikosulkurenkailla.

Kuten kuvasta 32 nähdään, näennäisteho laskee melko tasaisesti oikosulkurenkaan pituuden kasvaessa. Tämä käytös on vastaava edellisessä kappaleessa esitetyn 1-vaiheen vaihejännitteen käytöksen kanssa.

Tehokertoimen määrittämiseksi jouduttiin tekemään eniten töitä. Alkuperäinen ajatus tarkasti teorian mukaan pääjännitteen ja virran välisen vaihe-eron kautta tapahtuvasta tehokertoimen määrittämisestä ei toiminut. Tarkemmin ongelmaa pohditaan kappaleessa kahdeksan. Koska edellä kerrottu tapa tehokertoimen määrittämiseksi ei toiminut jostain syystä, päätettiin tehokerroin määritellä teoriaan pohjautuen toisella tavalla. Määrittelyssä laskenta aloitettiin mekaanisesta tehosta, johon lisättiin kaikki laskennassa saadut häviöt. Tämän jälkeen teorian mukaan käsillä oli pätöteho ja kun näennäisteho oli jo saatavilla, voitiin tehokerroin määritellä näennäistehon ja pätötehon perusteella. Tällä tavalla määriteltynä tehokertoimet näyttivät olevan linjassa Adept-simulointien kanssa. Kuvassa 33 on esitettyä tehokerroin eri oikosulkurenkailla.

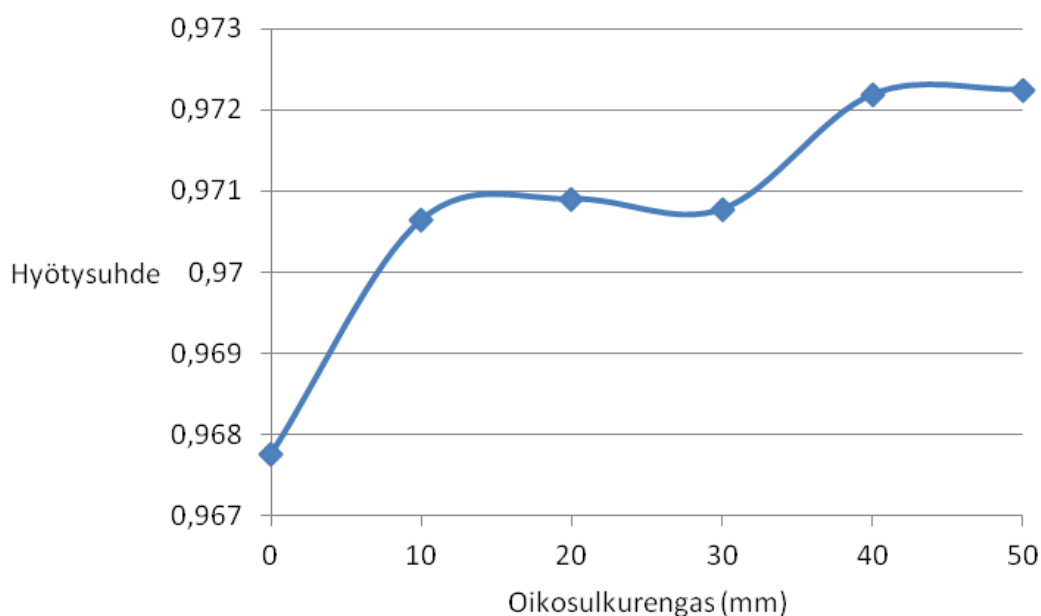


Kuva 33. Tehokerroin eri oikosulkurenkailla.

Kuvasta 33 nähdään, että oikosulkurenkaan pituuden kasvattaminen parantaa moottorin tehokerrointa. Kuitenkin on huomattava, että vaikka 50 mm oikosulkurenkaalla päästään tehokertoimessa jo 0,7 paremmalle puolelle, ei moottorin tehokerroin siltikään ole erityisen hyvä jos moottoria verrataan tavanomaiseen induktiomoottoriin.

Koska oikosulkurenkailla oli jo määritetty tehokerroin, missä jouduttiin moottorin pätöteho selvittämään lisäämällä moottorin mekaaniseen tehoon häviöt, ei moottorin

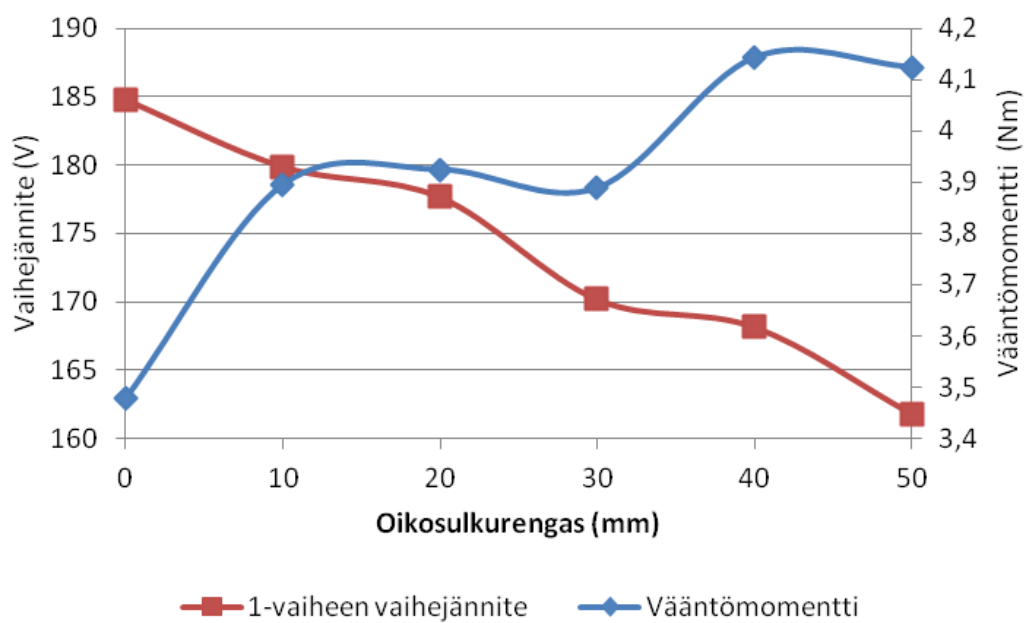
hyötysuhteen määrittäminen ollut haasteellista. Kuvassa 35 on esitettyä moottorin hyötysuhde eri oikosulkurenkailla.



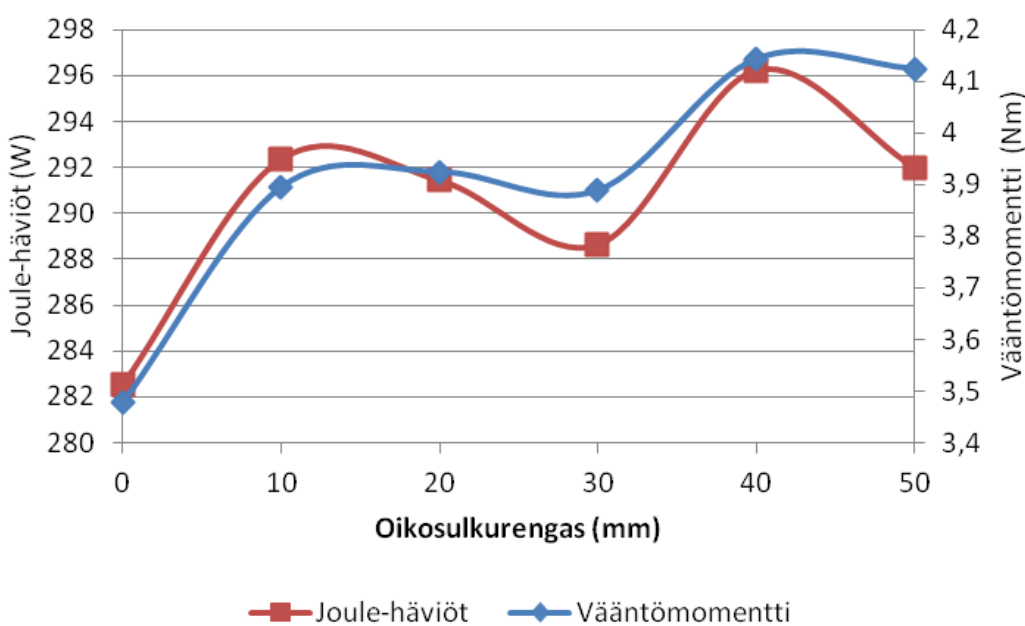
Kuva 34. Moottorin hyötysuhde eri oikosulkurenkailla.

Moottorin hyötysuhde ei kuvan 34 perusteella vaihtele suuresti eri oikosulkurenkaiden välillä. Oikosulkurenkailla 10 - 30 mm hyötysuhde jopa pysyy periaatteessa vakiona. Kokonaisuudessaan moottorin hyötysuhde on kuitenkin korkea kaikilla oikosulkurenkailla. On kuitenkin huomattava, että kappaleessa 7.4 esitetyt häviöt, joita ei ole otettu laskennoissa huomioon vaikuttavat luonnollisesti heikentävästi moottorin hyötysuhteeseen.

Lopuksi haluttiin hieman vertailla eri muuttujien keskinäisiä suhteita. Molemmissa tapauksissa tarkasteluun haluttiin ottaa toiseksi osapuoleksi moottorin tuottama vääntömomenti, koska se kertoo hyvin moottorin todellisesta suorituskyvystä. Kuvan 35 kuvaajassa vertailtiin moottorin vääntömomentin suhdetta vaihe-jännitteeseen. Kuvan 36 kuvaajassa verrataan Joule-häviöitä jättämään. Molemmissa kuvaajissa kuvaajat leikkaavat toisensa 10 mm ja 20 mm kohdalla.



Kuva 35. Vaihejännitteen ja vääntömomentin välinen yhteys.

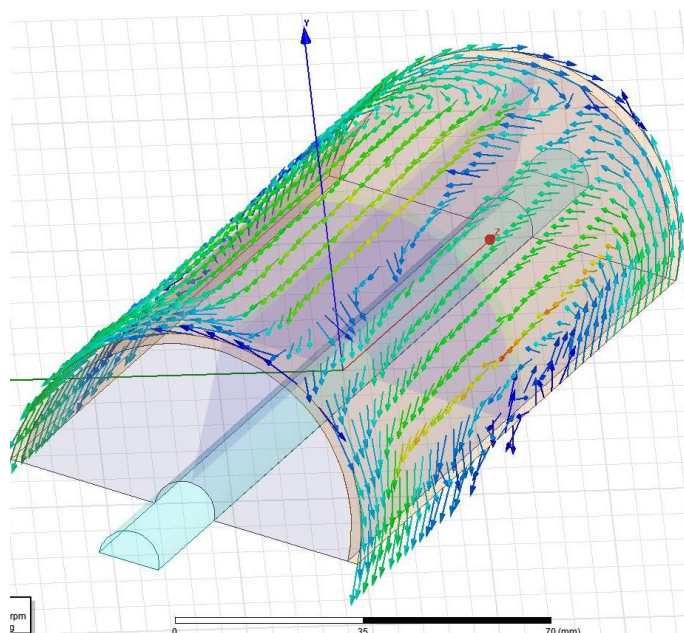


Kuva 36. Joule-häviöiden ja vääntömomentin välinen yhteys.

Molemmissa kuvaajissa, kuvat 35 ja 36, nähdään miten 10 mm ja 20 mm oikosulkurenkaiden kohdalla kuvaajat risteävät. Tarkempaa pohdintaa moottorin oikosulkurenkaan pituudesta on kappaleessa 8.

7.3 Roottorin pinnoitteessa kulkevat virrat

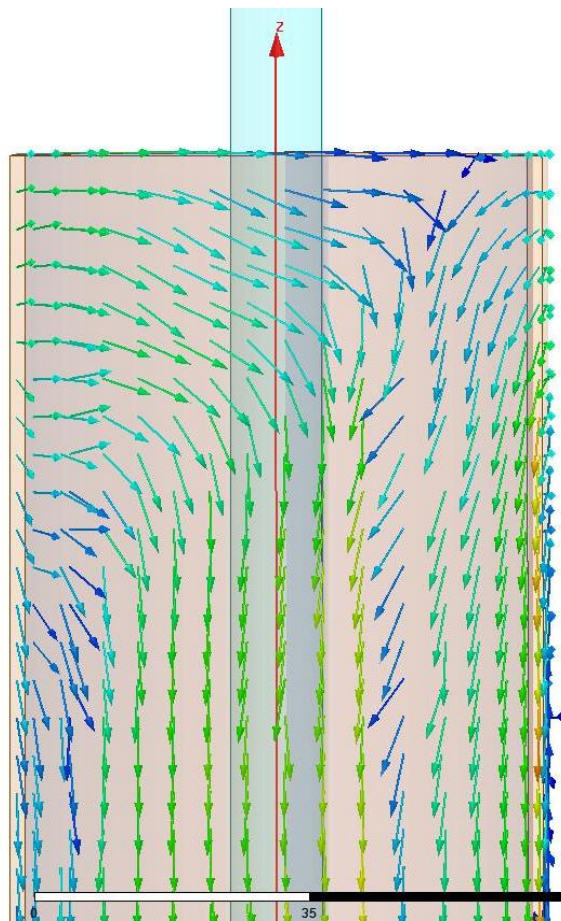
Työn keskeisenä kohteena on kuparilla päällystetty massiiviroottori. Tästä syystä ja mielenkiinnosta haluttiin tutkia roottorin pinnassa kulkevia virtoja hieman tarkemmin. Numeeristen arvojen sijaan roottorissa liikkuvien virtojen suunnat kiinnostivat, mistä syystä roottorin virroista otettiin muutamia kuvia. Kaikki kuvat on otettu 30 mm oikosulkurenkaan tapauksesta, koska virtojen suunnilla ei ole merkitystä oikosulkurenkaan pituuden kanssa. Kuvassa 37 on nähtävillä 3D-kuva roottorin pinnasta, missä on nähtävillä virtojen suunnat vektoreilla esitettynä.



Kuva 37. Virrantiheys vektorien avulla 30 mm oikosulkurenkaalla.

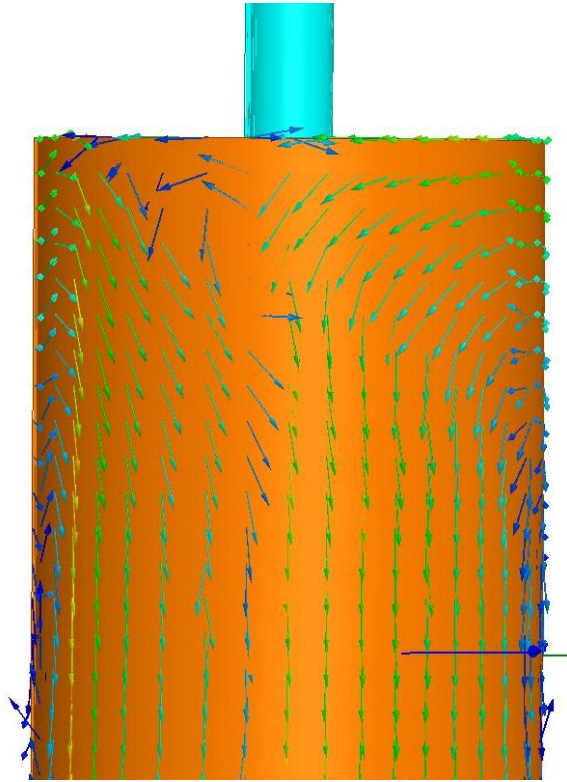
Kuten kuvasta 37 nähdään ja muutenkin voidaan päätellä, niin kaksinapaisen moottorin roottorin pinnalla on teoriassa kaksi erillistä virtapiiriä. Näissä virtapiireissä virrat kulkevat omia renkaanomaisia reittejään pitkin. Mielenkiintoinen kohta kuitenkin

kuvassa on nämä virtapiirit toisistaan erottava alue (siniset nuolet). Sinisten nuolten perusteella alueella ei kulje suurta virtaa, mutta virran suunta on suurin mielenkiinnon kohde. Kuten voidaan havaita roottorin toisessa päässä virran suunta välialueella on vastakkainen verrattuna toiseen päähän roottoria. Aksiaalisesti keskellä roottoria virran suunta kääntyy pikkuhiljaa toiseen suuntaan. Kuvassa 38 on esitetty virran kääntyminen roottorin päädyssä. Myös tässä kuvassa nähdään virtapiirejä erottava alue.



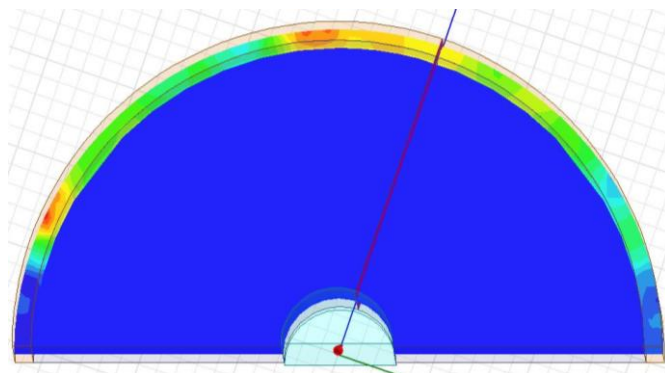
Kuva 38. Roottorin päädyssä tapahtuva virran kääntyminen 30 mm oikosulkurenkaalla.

Kuvan 38 perusteella voidaan nähdä roottorin päädyssä alue, missä virran suunnat ovat suorastaan kaoottiset. Tälläkään alueella virtojen suuruudet eivät ole suuret kuten nuolten sinisestä väristä voidaan päätellä. Vertailun vuoksi kuvassa 39 on nähtävillä 0 mm oikosulkurenkaan päädyssä kääntyvät virrat.



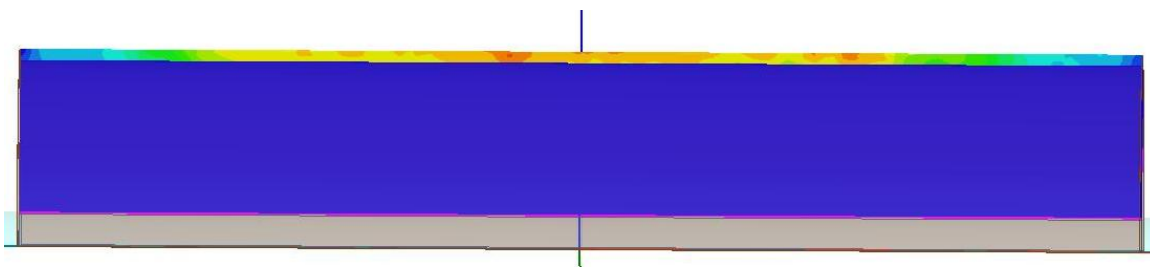
Kuva 39. Roottorin päädyssä tapahtuva virran kääntyminen 0 mm oikosulkurenkaalla.

Kuvasta nähdään kuinka virrat alkavat kääntyä jo suhteellisen aikaisessa vaiheessa, vaikka staattori jatkuu aina roottorin päähän asti. Tämä lienee yksi syy 0 mm oikosulkurenkaan heikkoihin suoritusarvoihin. Lopuksi kuvassa 40 on esitettyä roottorin läpileikkaus kuva roottorin keskeltä, missä näkyy roottorin pinnan virtojen tiheyksien suhteet toisiinsa.



Kuva 40. 30 mm oikosulkurenkaalla roottorin pinnoitteen virrantiheyden itseisarvo läpileikkauskuvassa.

Pinnoitteen virrantiheydet kuvassa 40 korostavat myös 3D-FEM-laskennan yhtä heikkoutta. Johtuen simulointimallin suuresta elementtien määrästä, yksittäisten objektien elementtimäärä on suhteellisen pieni. Kuvasta nähdään, kuinka karkea virrantiheyden kuvaus on roottorin pinnoitteen sisällä. Lisäksi kuvassa 41 on esitettyä roottorin pinnoitteen virrantiheys sivusta katsottuna, missä voidaan nähdä virran tiheyden olevan suurimmillaan roottorin keskikohdan kohdalla.



Kuva 41. 30 mm oikosulkurenkalla roottorin pinnoitteen virrantiheyden itseisarvo läpileikkauksessa sivusta katsottuna.

7.4 Huomiotta jätetyt häviöt

Laskennan aikana tarkasteltiin moottorin sähköisiä häviöitä. Joitakin häviöitä ei niiden aiheuttaman laskenta-ajan lisäyksen ja niiden pienen vaikutuksen vuoksi otettu huomioon. Näitä häviöitä olivat esimerkiksi hystereesihäviöt, jotka teoriansikin mukaan ovat erittäin pienet. Koska työssä tärkeimpänä tehtävänä oli eri oikosulkurenkaiden keskinäinen vertailu, hystereesihäviön lisääminen ei olisi tuonut merkittävästi eroa eri renkaiden välille.

Toisena häviöryhmänä, mikä jätettiin kokonaan huomioimatta laskettaessa moottorin suoritusarvoja olivat kitka- ja kaasuhäviöt. Luonnollisesti Maxwell[®]-ohjelmisto on suunniteltu sähkömagneettiseen FEM-laskentaan, joten se ei kykene laskemaan moottorissa aiheutuvia mekaanisia häviöitä. Prototyypimoottorilla on arvioitu, että tämäntyyppisen moottorin kitkahäviöt ovat noin 1 kW luokkaa, mutta koska niihin liittyy huomattavasti epävarmuutta, tulosten laskennassa ei käytetty hyväksi tätä tietoa.

8 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä tutustuttiin suurnopeusmoottorin oikosulkurenkaan pituuden vaikutuksiin moottorin ominaisuuksiin. Simulointien aikana havaittiin tulosten vastaavan lähtökohtaisesti oletettuja tuloksia ja tulosten perusteella pyrittiin selvittämään, että voisiko nykyisen prototyypissä käytettävän oikosulkurenkaan pituuden muutoksella saada merkittäviä etuja. Lähdekirjallisuudessa ei vastaavanlaista päällystetyn roottorin oikosulkurenkaan tutkimusta ole toteutettu. Seuraavissa kappaleissa käsitellään tarkemmin oikosulkurenkaan pituuden vaikutuksia, tuloksista tehtäviä päätelmiä, muita ajatuksia moottorin toiminnan parantamiseksi sekä pohditaan jatkotutkimusmahdollisuuksia.

Oikosulkurenkaalla on moottorin toimintaan merkittävät vaikutukset, varsinkin jos oikosulkurenkaan pituus on 0 mm eli oikosulkurengasta varsinaisesti ole. Tällöin roottorissa vääntömomenttia tuottavat virrat joutuvat kääntymään staattorin sisällä, mikä heikentää moottorin toimintaa ja potentiaalista tehoa. Simuloinneissa havaittiin, että jo lyhyt 10 mm oikosulkurengas parantaa moottorin sähköisiä ominaisuuksia huomattavasti. Tulosten perusteella voikin perustellusti sanoa, että roottorin oikosulkurenkaan pituuden lyhentämisen 20 mm tai jopa 10 mm ei merkittävästi heikennä moottorin suorituskykyä ja sähköisiä arvoja. Lyhyemmän oikosulkurenkaan kokeileminen prototyypimoottorissa onnistuu helposti sorvaamalla oikosulkurengas 30 mm lyhyemmäksi. Taas oikosulkurenkaan pituuden kasvattaminen 40 mm tai 50 mm ei tuo kuitenkaan niin paljon hyötyä jos moottorin suunniteltu nimellisteho tulee olemaan 20 kW. Lyhyempi roottori antaa enemmän joustovaraa roottorin mekaanisten värähtelyiden hallintaan ja voi jopa mahdollistaa moottorin kokonaispituuden lyhentämisen. Roottorin värähtelyiden väheneminen vähentää merkittävästi laakereihin kohdistuvia rasituksia, mikä parantaa moottorin luotettavuutta.

Simuloimalla saatujen tulosten vertailtavuus todellisen prototyypimoottorin kanssa on mutkikasta ellei jopa mahdotonta. Syynä on simulointimalleista pois jätetyt häviöt. Varsinkin kaasun- ja kitkahäviöiden puuttuminen vaikuttaa merkittävästi tuloksiin.

Lisäksi simulointimallin ajaminen virtaherätteellä vaikeuttaa simuloitujen tulosten suoraa vertailua.

8.1 Ajatuksia moottorin ominaisuuksien parantamiseksi

Työn aikana niin lähdekirjallisuutta tutkiessa syntyi ajatuksia moottorin yleisen suorituskyvyn parantamiseksi. Tässä kappaleessa käydäänkin läpi niin roottoriin tehtäviä muutoksia kuin staattoriinkin tehtäviä muutoksia moottorin suoritusarvojen kehittämiseksi. Suurin osa muutoksista pyrkii vähentämään ilmavälissä olevan magneettivuon yliaaltoja. Yliaaltojen vähentäminen alentaa myös roottorissa syntyviä häviöitä, koska rakenteensa takia massiiviroottori on altis pyörrevirtahäviöille.

Roottorin toimintaa voidaan parantaa lisäämällä roottorin ydinmateriaaliin uritus ennen roottorin pinnoittamista. Tämä hieman vähentää roottorissa tapahtuvia pyörrevirtahäviöitä, mutta tärkeimpänä muutoksena magneettivuo joutuu urien takia tunkeutumaan syvemmälle roottoriin synnyttäen näin paremman vääntömomentin. Lisäksi roottorin pinnoituksen jälkeen tulisi kaasu- ja kitkahäviöiden välttämiseksi roottorin pinta hioa sileäksi. Tällöin jäädytyskaasun molekyylit eivät synnyttäisi niin paljo kitkaa osuessaan roottorin pinnan epätasaisuuksiin.

Staattorissa tehtävien muutosten pääasiallinen tarkoitus on staattorinrakenteesta johtuvien yliaaltojen vähentäminen ilmavälin magneettivuossa. Uran avauman aiheuttamia yliaaltoja saadaan hallittua asentamalla uriin linssin muotoiset puolimagneettisesta materiaalista valmistetut uralukot. Näiden lukkojen tehtävänä on suoristaa magneettivuota ja vähentää sen vääristymää uran avauman kohdalla. Suurempana muutoksena voisi mainita kaksikerroskäämityksen käytön, mikä vähentää muuten melko askelmaisen magneettivuon yliaaltoja. Vähennys tapahtuu sillä, että kaksikerroskäämitys mahdollistaa pienemmät askeleet magneettivuossa. Lisäksi kitka- ja kaasu- ja kaasuhäviöitä voidaan vähentää staattorin puolella tekemällä staattorin ilmaväliin kosketuksissa oleva pinta mahdollisimman sileäksi esimerkiksi hartsaamalla staattorin sisäpinta.

8.2 Mahdolliset jatkotutkimukset ja -selvitykset

Tutkimuksen aikana heräsi kysymyksiä tutkimuksen ulkopuolelta. Näiden kysymysten huomioon ottaminen sekä mahdolliset jatkotutkimukset kertoisivat enemmän niin suurnopeusmoottoreiden toiminnasta sekä käytettävistä simulointityökaluista. Tässä kappaleessa käydään läpi molemmat edellä mainitut jatkotutkimusalueet ja niihin liittyvät kysymykset.

Maxwell[®]-ohjelmistossa havaittiin ongelmia jännitteen ja virran käyrämuotojen kautta tapahtuvassa tehokertoimen määrittämisessä. Jostain syystä edellä mainituilla keinoilla ei simuloitulle moottorille saatu hyväksyttäviä tehokertoimia määritettyä. Lisäksi väärä tehokerroin sotki kaikki muut laskennat. Tästä syystä olisikin hyvä selvittää tarkemmin miksi Maxwell[®]-ohjelmisto ei vastannut odotuksia tehokertoimen määrittämisen yhteydessä.

Simuloimalla voisi hieman tarkemmin tarkastella seuraavien muuttujien vaikutuksia moottorin käyttäytymiseen: roottorin kuparipinnoitteen paksuus, roottorin urittaminen ja mahdollisten urien lukumäärän vaikutukset. Näillä tutkimuksilla olisi mahdollista selvittää, olisiko urista hyötyä tässä tapauksessa ja onko 2 mm kuparikerros liian paksu vai ohut moottorin päävirtojen kuljettamiseen. Molemmissa tapauksissa moottorin konstruktion optimoinnilla saataisiin mahdollisesti parannettua moottorin sähköisiä ominaisuuksia ja saataisiin säästöjä valmistuskustannuksissa.

9 YHTEENVETO

Tämän diplomityön tarkoituksena oli tutustua ABB:llä toteutettavan suurnopeusmoottorin massiiviroottorin pituuden avulla toteutettavien oikosulkurenkaiden pituuden vaihteluiden vaikutuksiin moottorin toimintaan ja ominaisuuksiin. Projektin pohjana oleva suurnopeusmoottori on tarkoitettu erääseen EGR-sovellukseen, jossa moottori toimii kaasua pumppaavan turbiinin voimanlähteenä. Juuri erilaiset ahdin- ja kaasujenpumppaussovellukset ovat yksi suurimmista suurnopeusmoottoreiden sovellusalueista tällä hetkellä. Näissä sovelluksissa yleensä moottoriin kiinnitettävä turbiini tarvitsee tehokkaasti toimiakseen erittäin suuren pyörimisnopeuden, mikä perinteisissä sovelluksissa on toteutettu tavanomaisen moottorin ja vaihteiston yhdistelmällä. Nykyään vanhahtavat moottorin ja vaihteiston yhdistelmät voidaan korvata taajuusmuuttajan ja suurnopeusmoottorin yhdistelmällä, mitkä tuovat niin sovelluksen koon kuin myös huollon kannalta huomattavia etuja. Lisäksi lennokkaimmissa ajatuksissa nähdään suurnopeusmoottorin ja kompressorin yhdistäminen samaan kotelointiin, jolloin työkaasua käyttää moottorin jäähdyttämisessä sekä saadaan moottorin rakenteita yksinkertaistettua.

Massiiviroottori on rakenteellisesti suurnopeusmoottorissa yksi merkittävin eroavaisuus tavanomaiseen induktiomoottoriin verrattuna. Syy laminoitun roottorin vaihtamiseksi massiiviroottoriin on selkeä. Laminoitu roottori ei kestä erittäin suurten nopeuksien aiheuttamia rasituksia. Tästä syystä teräksestä – yleensä samasta materiaalista akselin kanssa – valmistettu roottori on niin termiseltä kuin mekaaniseltakin kestävyydeltään huomattavasti laminoitua roottoria parempi. Tavallinen teräksestä valmistettu umpinainen sylinteri roottorina kuitenkin aiheuttaa ongelmia sähköisellä puolella. Yleensä tämäntyypiset roottorit kärsivät suurehkosta jättämästä ja suurista roottorihäviöistä johtuen materiaalin heikosta sähkönjohtavuudesta ja pyörrevirtojen vapaasta liikkumisesta. Nämä häviöt ja ongelmat johtuvat yleensä ilmvälissä olevista tila- ja aikaharmonisista yliaalloista, jotka syntyvät niin taajuusmuuttajan toimintatavan synnyttäminä ja staattorin geometrian sekä käämityksen synnyttäminä. Ongelmaan on kehitelty useampia ratkaisuja, joihin kuuluu muun muassa roottorin urittaminen, roottorin päällystäminen hyvin johtavalla materiaalilla tai huonosti johtavalla

ferromagneettisella materiaalilla sekä roottorin koostaminen useammasta eri materiaalia olevasta kerroksesta. Roottoriin kehittämiseen käytetyt tekniikat eivät ole täysin toisensa pois sulkevia, jolloin esimerkiksi roottorin urittamisen jälkeen roottori voidaan edelleen päällystää kaasu- ja kitkahäviöiden vähentämiseksi. Roottorirakenteen kannalta yhtä tärkeää on staattorin sekä laakeroinnin suunnittelu projektiin soveltuviksi. Staattorin ja käämityksen suunnittelun lähtökohtana on minimoida ilmavälin yliaallot taten minimoiden roottorissa tapahtuvia Joule-häviöitä. Yleensä staattorin teknisen toteutuksen muutokset perinteiseen induktiomoottoriin liittyy urien avaumien optimointiin sekä käämityksen kaksikerrostamiseen. Urissa juuri urien avaumat synnyttävät ison osan yliaalloista ilmavälissä ja urien avaumiin suunniteltavat nystyrät tai urien lukkoina käytettävät puolimagneettisesta materiaalista valmistetut linssin muotoiset lukot ovat tärkeimpiä ratkaisuja häviöiden vähentämisessä. Vaikka sähköiset ominaisuudet ovat tärkeitä suurnopeusroottorin suunnittelussa ei voida unohtaa kuitenkaan laakeroinnin merkitystä roottoria tukevana rakenteena. Tässä työssä lyhyehkösti käsitellyistä laakereista ehkäpä parhaiten suurnopeussovelluksiin soveltuvat magneettilaakerit, jotka sovelluskohtaisen ohjauksensa ansiosta kykenevät tarjoamaan käytännössä kitkattoman vaihtoehdon laakerointiin.

Eri häviöt ovat suurnopeusmoottorin suunnittelussa merkittävässä roolissa. Suurimpina häviöinä ovat roottorissa tapahtuvat yliaalloista johtuvat pyörrevirtahäviöt sekä kaasu- ja kitkahäviöt. Pyörrevirtahäviöt johtuvat pääosin ilmavälissä vaikuttavista magneettivuontiheyden vääristymistä eli aika- ja tilaharmonisista yliaalloista. Nämä vääristymät syntyvät sekä staattorin rakenteesta että taajuusmuuttajan tuottamasta syötöstä. Juuri edellisessä kappaleessa kerrottujen teknisten muutosten avulla pyritään vähentämään näitä roottorissa syntyviä Joule-häviöitä. Kitka- ja kaasuhäviöt ovat suuresti roottorin pyörimisnopeuteen kytköksissä, mikä aiheuttaa niiden kasvamisen vastaavasti nopeuden kuutiona ja neliönä. Kitkahäviöt syntyvät jäähdytysilman atomien hidastaessa roottorin liikettä ja kaasuhäviöt taasen syntyvät jäähdytyskaasun joutuessa tangentialiseen liikkeeseen roottorin pyörimisen mukana. Kitka- ja kaasuhäviöiden kanssa onkin pyrittävä tekemään roottorin ja staattorin pinnoista mahdollisimman sileät, mikä vähentää häviöiden vaikutusta jonkin verran.

Elementtimenetelmä kehitettiin alunperin lujuuslaskentaan. Myöhemmin sen huomattiin tarjoavan huomattavia etuja monella eri laskennallisen fysiikan alalla. Menetelmän perusajatuksena on pyrkiä approksimoimaan ratkaisua halutulla laskenta-alueella. Laskenta-alueelle määritellään raja-arvoehdot ja ratkaisun osittaisdifferentiaaliyhtälöt. Näiden jälkeen alue jaetaan osa-alueisiin eli elementteihin, jotka yleensä kaksi- ja kolmiulotteisessa laskennassa ovat vastaavasti kolmioita ja tetraedrejä. Elementeille kehitetään ratkaisua elementin sisällä approksimoiva polynomi, jonka asteluku on vapaasti valittavissa. Lopuksi elementeistä koostuvan laskenta-alueen elementtejä approksimoivien polynomien kertoimet ratkaistaan esimerkiksi Galerkin menetelmällä, minkä jälkeen käytettävissä on approksimaatio koko laskenta-alueen kattavasta ratkaisusta.

Simulaatiomalli rakennettiin käyttämällä Rmxpert-apuohjelmaa Maxwell[®]-ohjelmistossa. Rmxpert-apuohjelma mahdollistaa toimivan moottorimallin luomisen pelkästään moottorin tekniset tiedot ohjelmaan syöttämällä. Mallille suoritettujen testisimulointien perusteella voitiin todeta, että simulointi toimii luotettavasti ainoastaan virtaerähteellä. Simuloinnit itsessään toteutettiin siten, että moottoria simuloitiin jokaisella oikosulkurengaan pituudella 220 - 300 ms, neljä askelta jaksoa kohti. Kun moottorin tuottama vääntömomentti osoitti tasaantumisen merkkejä, simuloinnissa siirryttiin 40 askeleeseen jaksoa kohti. Askelpituuden lyhentämisellä simulointimallin tulokset saatiin laskettua 10 ms ajalta erittäin tarkasti. Lopullisten tulosten analysoinnissa käytettiin vain viimeistä 5 ms siten, että viimeinen piste jätettiin huomioimatta simuloinnin lopetuksen aiheuttaman transientti-ilmiön takia.

Simuloinnin tuloksena nähtiin, että 10 - 20 mm oikosulkurengas voisi olla hyvä vaihtoehto. Näillä kahdella vaihtoehdolla moottorin ominaisuudet eivät merkittävästi heikkenet verrattuna tällä hetkellä prototyypissä käytettyyn 30 mm oikosulkurengaaseen. Tästä syystä, jos moottorin nimellisteho halutaan säilyttää 20 kW:ssa, oikosulkurengaan lyhentämiselle ei ole mitään estettä. Lyhentynyt roottori mahdollistaa myös suuremmat kriittiset taajuudet vähentäen näin rasituksia laakereissa sekä mahdollistaen tarvittaessa moottorin ajamisen suuremmalla pyörimisnopeudella parantaen käytössä olevan ahdin pyörän hyötysuhdetta.

LÄHDELUETTELO

- Aho T. (2007). Electromagnetic design of a solid steel rotor motor for demanding operation environments. Väitöskirja. *Acta Universitatis Lappeenrantaensis*, No 292. Lappeenranta. 147 s. ISBN: 978-952-214-498-0.
- Aho T., Nerg J. & Pyrhönen J. (2006). Analysing the effect of the rotor coating on the rotor losses of medium-speed solid-rotor induction motor. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2006. SPEEDAM 2006. 103 - 107. ISBN: 1-4244-0193-3.
- ANSYS Inc. (2011). ANSYS Maxwell [online]. ANSYS Maxwell [siteerattu 4.10.2011]. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://www.ansoft.com/products/em/maxwell/>>.
- Antila M. (1998). Electromechanical properties of radial active magnetic bearings. Väitöskirja. *Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series*, No 92. Espoo. 96 s. ISBN: 952-5148-73-4.
- Bilgren E. & Boulos R. (1973). Functional dependence of torque coefficient of coaxial cylinders on gap width and Reynolds numbers. *Transactions on ASME, Journal of Fluids Engineering, series I*, Vol. 95, 1973, 122 - 126.
- Bumby J., Spooner E. & Jagiela M. (2006). Equivalent circuit analysis of solid-rotor induction machines with reference to turbocharger accelerator applications. *IEE Proceedings - Electric Power Applications* 153:1, 31 - 39. IET. ISSN: 1350-2352.
- Chalmers B. & Herman J. (1977). Induction-motor fan drive with unlaminated rotor and heat-pipe cooling. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* 124:5, 449 - 454. IET. ISSN: 0020-3270.

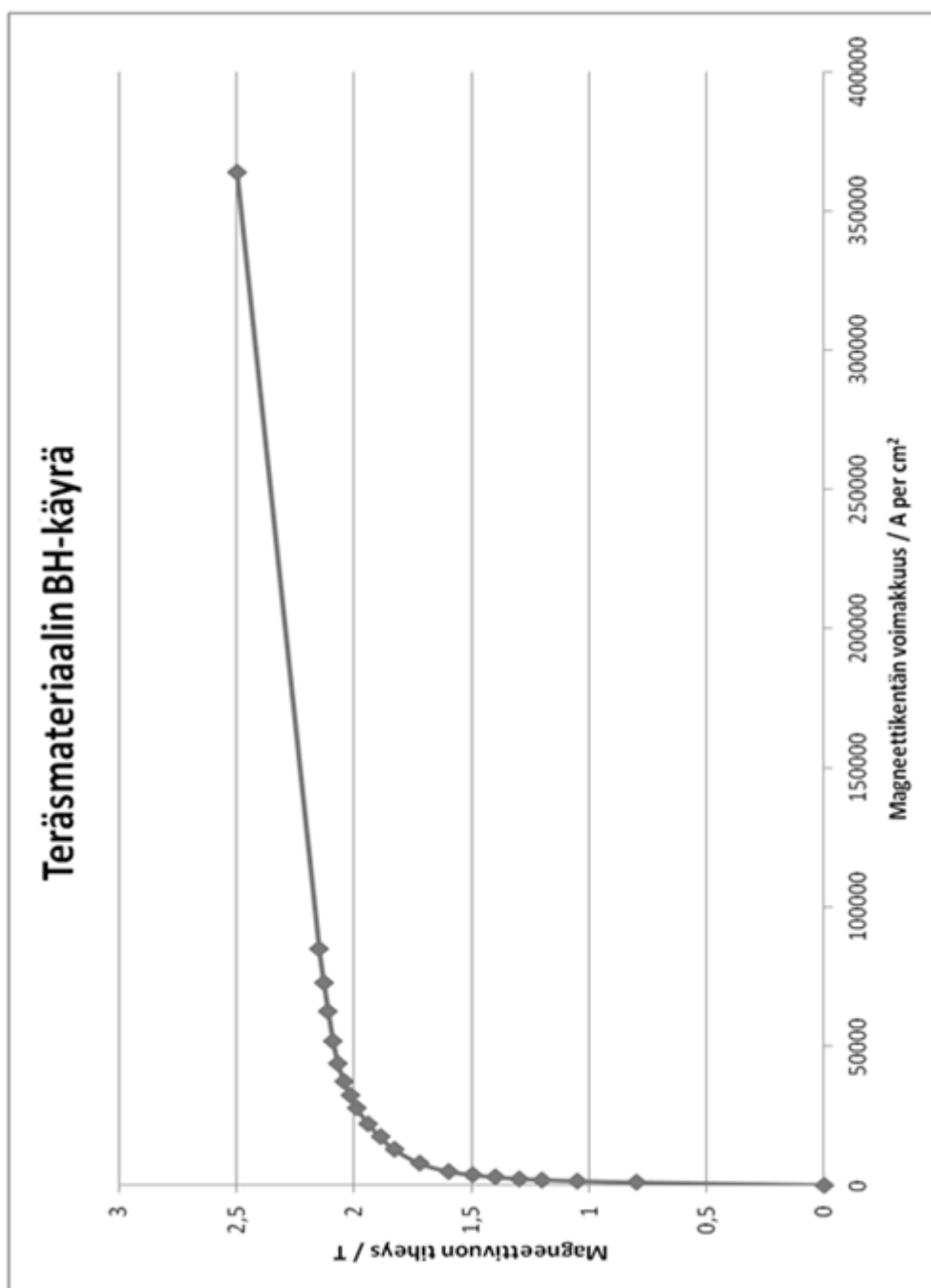
- Gibbs W. J. (1948). Induction and synchronous motors with unlaminated rotors. *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part II: Power Engineering* 95:46. 411 - 420.
- Huppunen J. (2004). High-speed solid-rotor induction machine – Electromagnetic calculation and design. Väitöskirja. *Acta Universitatis Lappeenrantaensis*, No 197. Lappeenranta. 168 s. ISBN: 951-764-981-9.
- Ikäheimo J. & Turunen J. (2012). *Prototyyppi EGR 20 kW EGR moottorin kitkahäviöt pyörimisnopeuden suhteen ja mitattu moottorin pyörimisnopeuden vapaa hidastuminen*. Julkaisematon. ABB Motors Oy, Tuotekehitys.
- Jarvis C. M. (1969). Nikola Tesla and the induction motor. *Electronics and Power* 15:12, 436 - 440. FIEE. ISSN: 0013-5127.
- Jin, J. (1993). *The finite element method in electromagnetics*. John Wiley & Sons Inc., New York, US. 442 s. ISBN: 0-471-58627-7.
- Larjola J., Arkkio A. & Pyrhönen J. (2010). *Suurnopeustekniikka - High speed technology in Finland*. Helsinki: Yliopistopaino. ISBN: 978-952-214-949-7.
- Lähteenmäki J. (2002). Design and voltage supply of high-speed induction machines. Väitöskirja. *Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series*, No 108. Espoo. 140 s. ISBN: 951-666-607-8.
- Niemelä M. (1994). *Massiiviroottori yksivaiheisesti syötetyssä epätahtimoottorissa*. Diplomityö. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. s 87. Saatavana World Wide Webistä: <http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical_engineering/research/electricaldrives/publications/Documents/Diplomityöt/markku_niemela.pdf>.
- Pepper W. & Heinrich J. (2006). *The finite element method: Basic concepts and applications*. 312 s. Taylor & Francis Group, Florida, US. ISBN: 1-59169-027-7.

- Pyrhönen J., Nerg J., Kurronen P. & Lauber U. (2009). High-speed high-output solid-rotor induction-motor technology for gas compression. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 57:1. 272 - 280. ISSN: 0278-0046.
- Saari J. (1998). Thermal analysis of high-speed induction motor. Väitöskirja. *Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series*, No 90. Espoo. 73 s. ISBN: 952-5148-43-2.
- Sharma N., Anbarasu R., Nataraj J., Dangore A. & Bhattacharjee B. (1996). Experimental investigations on high speed solid and composite rotor induction motor. *Proceedings of the 1996 International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth*, 1996, vol 2. 913 - 919. ISBN: 0-7803-2795-0.
- Vesala J. (2010). *Suurnopeusmoottorin kolmiulotteinen sähkömagneettinen mallintaminen*. Diplomityö. Tampere. 94 s.
- Wilson J., Erdelyi E. & Hopkins, R. (1965). Aerospace composite-rotor induction motors. *IEEE Transactions on Aerospace* 3:2. 18 - 23. ISSN: 0536-1516.

LIITTEET

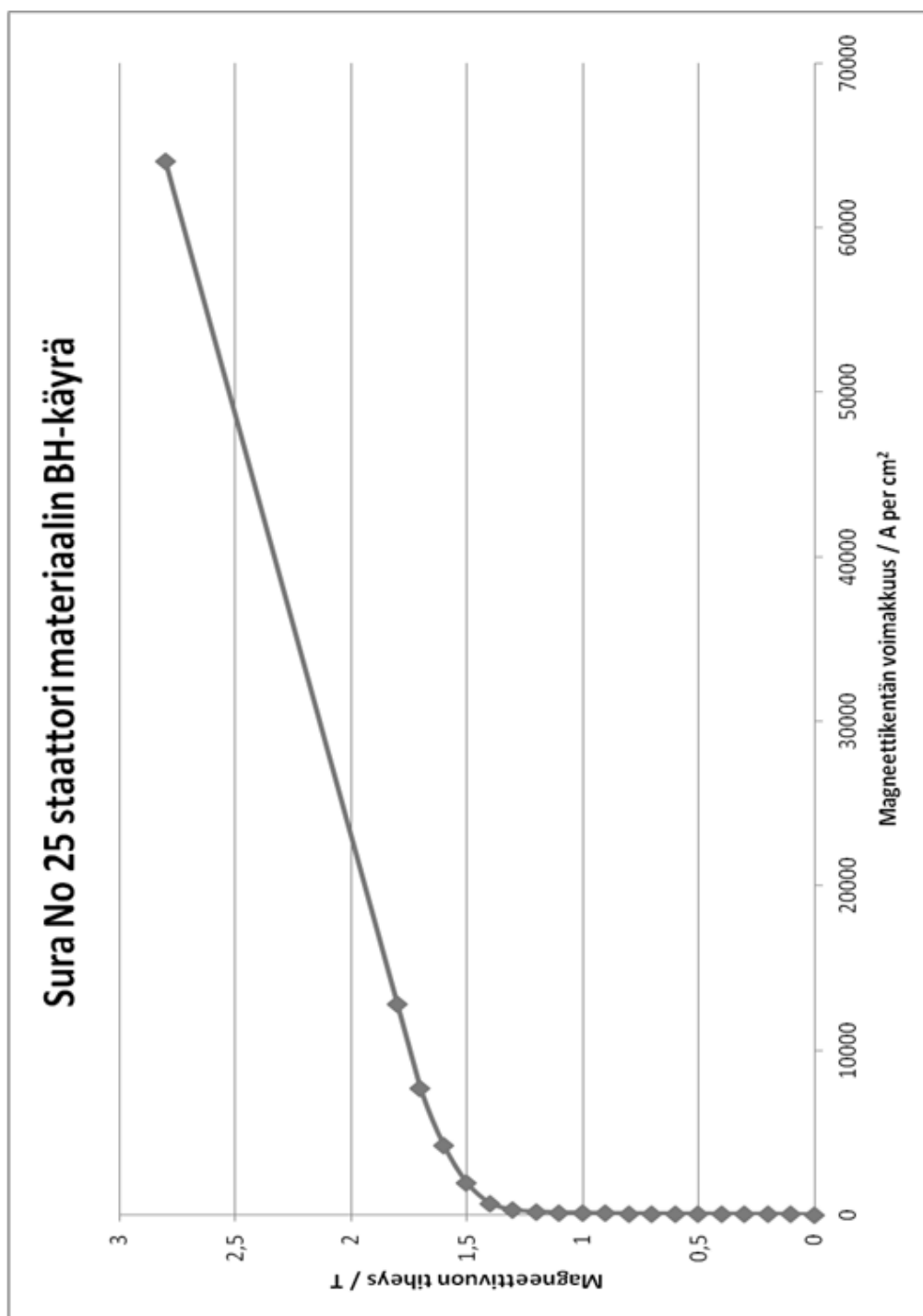
Liite 1. Käytetyn teräsmateriaalin (S355J2G3) BH-käyrä

H	0	990	1470	1890	2270	2830	3700	4900	7700	12700	17200	21800	27500	32300	37200	43500	51500	62500	72800	85000	363700
B	0	0,8	1,05	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,72	1,83	1,89	1,94	1,99	2,02	2,045	2,07	2,09	2,112	2,13	2,15	2,5



Liite 2. Käytetyn staattorilevymateriaalin BH-käyrä

H	0	26	33	38	43	48	55	62	71	83	99	124	171	283	688	1937	4230	7688	12808	64008
B	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	2,8



Liite 3. Numeeriset oikosulkurengas kohtaiset simulointitulokset

L / mm	N / rpm	T / Nm	Pm / W	U / V	V / V	W / V
0	49590	3,478696	18065,05187	184,8030644	182,0015	185,4677
10	49590	3,895543	20229,75856	179,8992788	177,2356	179,3859
20	49590	3,924672	20381,0291	177,6676498	173,3211	175,4183
30	49590	3,889546	20198,61694	170,1815103	170,2176	168,2193
40	49590	4,143716	21518,5339	168,1641347	170,8179	166,6071
50	49590	4,124395	21418,20227	161,8100732	162,2032	162,2457

L / mm	I / A	S / VA	Joule-häviöt / W	Muut häviöt / W	P / W	cos ϕ	η
0	60,13236	33209,44	282,5183869	319,4826675	18667,05	0,562101	0,967751
10	60,13236	32262,26	292,355409	319,5470629	20841,66	0,646007	0,97064
20	60,13236	31654,1	291,4280427	319,4844138	20991,94	0,663167	0,970898
30	60,13236	30584,42	288,624437	319,5157358	20806,76	0,680306	0,970772
40	60,13236	30402,27	296,2315522	319,4175605	22134,18	0,728044	0,972186
50	60,13236	29239,9	291,9673026	319,4652625	22029,63	0,75341	0,972245

Liite 4. Adeptin ja Ansys Maxwell® Rmxpert-työkalun arvojen vastaavuudet

Huomioituina ovat ne arvot ja muuttujat, joita käytettiin tämän projektin aikana. Esimerkiksi roottorin arvoja ja muuttujia ei huomioitu, koska Rmxpert-työkalussa ei ollut massiiviroottorin tekemiseen valmiita työkaluja.

Yleiset

Ansys Maxwell®	Adept
Reference speed	FN x 60

Staattori

Ansys Maxwell®	Adept
Outer Diameter	DO1
Inner Diameter	DI1
Length	L_TOT1
Number of Slots	Q1

Staattoriurat

Ansys Maxwell®	Adept
Hs0	HSY1
Hs2	HSN1
Bs0	BSY1
Bs1	BSI1
Bs2	BSO1

Käämitys

Ansys Maxwell®	Adept
Winding Layers	NLAYER1
Parallel Branches	A1
Conductors per Slot	Z1/E1
Number of Strands	E1
Wire Size	DMAXCU1

Roottori

Ansys Maxwell®	Adept
Ei huomioitu projektissa	