

VAASAN YLIOPISTO

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

SÄHKÖTEKNIikka

Ville Kivelä

**TUULETINROOTTOREILLA VARUSTETTU MURTOVAKOKÄÄMITTY
KESTOMAGNEETTITAHTIMOOTTORI**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 8.4.2008

Työn valvoja

Timo Vekara

Työn ohjaaja

Jouni Ikäheimo

ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty ABB Oy Motorsin tuotekehitysosastolla Vaasassa. Työn ohjaajana toimi tuotekehityspäällikkö Jouni Ikäheimo, jota haluan kiittää todella mielenkiintoisesta ja haastavasta aiheesta. Haluan myös kiittää työn tarkastajia, professori Timo Vekaraa ja Bertil Brännbackaa sekä kaikkia, jotka ovat neuvoneet, auttaneet ja tukenet minua diplomityön tekemisessä.

Vaasassa 8.4.2008

Ville Kivelä

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	2
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	4
TIIVISTELMÄ	6
ABSTRACT	7
1. JOHDANTO	8
2. MURTOVAKOKÄÄMITTY KESTOMAGNEETTITAHTIMOOTTORI	11
2.1. Kestomagneettimateriaalit	12
2.2. Kestomagneettien sijoitusvaihtoehdot	14
2.3. Kestomagneettitahtimoottorin käämitys	16
2.3.1. Kokovakokäämitys	17
2.3.2. Murtovakokäämitys	19
2.3.3. Murtovakokäämityksen symmetriavaatimukset	23
2.3.4. Murtovakokäämityksen suunnitteleminen	24
2.3.5. Käämityskertoimet	30
2.4. Yliaallot	34
2.4.1. Käämityksen aiheuttamat yliaallot	34
2.4.2. Kiertokentän syntyminen	38
2.4.3. Indusoituneen jännitteen yliaallot	40
3. SIMULOINTI ELEMENTTIMENETELMÄLLÄ	42
3.1. Alkuperäinen prototyypikone	44
3.2. Simuloinnit	47
3.2.1. Käämityksen synnyttämä magneetikenttä	49
3.2.2. Alkuperäisen tuuletinroottorin tutkiminen	49
3.2.3. Uusi tuuletinroottori A	52
3.2.4. Uusi tuuletinroottori B	55
3.2.5. Kaksiroottorisen rakenteen kolmiulotteinen simulointi	57
3.2.6. Muut simuloinnit	66
4. TESTIT PROTOTYYPILLÄ	67
4.1. Alkuperäisen tuuletinroottorin tutkiminen	68
4.2. Uuden tuuletinroottorin A rakentaminen	70
4.3. Uuden tuuletinroottorin A testaaminen	72
4.4. Muut testit	75
5. POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET	76
5.1. Moniroottorisen rakenteen ominaisuudet	79
5.2. Käämistysten suunnittelun pohdintaa	80
5.3. Tuuletinroottoreilla varustetun koneen ominaisuudet ja mahdolliset käyttökohteet	84
5.4. Jatkotutkimusmahdollisuuksia	86
6. YHTEENVETO	87
LÄHDELUETTELO	89

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

B	magneettivuontiheys
B_r	remanenssivuontiheys
$\cos \varphi$	tehokerroin
E	sähkömotorinen voima
f	taajuus
g	ilmavälin pituus
H	magneetikentänvoimakkuus
H_c	koersitiivikentänvoimakkuus
I	sähkövirran voimakkuus
m	vaiheluku
n	vakoluvun q nimittäjä
N	käämikierrosten lukumäärä
n_s	pyörimisnopeus
p	napapariiluku
p^*	napaparien lukumäärää peruskäämityksessä
P_{out}	akseliteho
q	vakoluku, saman vaiheen peräkkäisten osoittimien lukumäärä
Q	uraluku
Q^*	staattoriurien lukumäärä peruskäämityksessä
Q'	uratähden säteiden määrä
R	resistanssi
T	vääntömomentti
U	jännite
X	reaktanssi
X_m	magnetointireaktanssi
X_σ	hajareaktanssi
z	vakoluvun q osoittaja
α_n	urakulma
ω	kulmanopeus

α_z	osoitinkulma
ξ_1	perusaallon käämityskerroin
ξ_d	vyöhykekerroin
ξ_p	jännekerroin
ξ_{sk}	vinokerroin
ξ_v	v:n yliaallon käämityskerroin
τ_p	napajako
τ_v	vyöhykejako
Φ	magneettivuo
ABB	Asea Brown Boweri
AlNiCo	alumiini-nikkeli-koboltti
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
FFT	Fast Fourier Transform, nopea Fourier-muunnos
mmv	magnetomotorinen voima
NdFeB	neodyymi-rauta-boori
SmCo	samarium-koboltti

VAASAN YLIOPISTO**Teknillinen tiedekunta**

Tekijä:	Ville Kivelä	
Diplomityön nimi:	Tuuletinroottoreilla varustettu murtovakokäämitty kestromagneettitahtimoottori	
Tarkastajat:	Professori Timo Vekara ja DI Bertil Brännbacka	
Ohjaaja:	TkT Jouni Ikäheimo	
Tutkinto:	Diplomi-insinööri	
Oppiaine:	Sähkötekniikka	
Opintojen aloitusvuosi:	2001	
Diplomityön valmistumisvuosi:	2008	Sivumäärä: 91

TIIVISTELMÄ

Hitaasti pyörivissä kestromagneetikoneissa staattorin kääminpäiden jäähdytys on ongelmallista, koska pienellä pyörimisnopeudella perinteisten, roottorinpäihin kiinnitettyjen siivekkeiden jäähdytyskyky on huono. Hitaasti pyörivissä kestromagneetikoneissa usein käytetty murtovakokäämitys mahdollistaa täysin uudenlaisen jäähdytysratkaisun. Koska murtovakokäämitys tuottaa useita, eri napaparimäärän omaavia pyöriviä magneetikenttiä, voidaan koneen päihin asentaa erilliset pienemmät roottorit. Näitä pienemmän napaparimäärän omaavia, pääroottoria nopeammin pyöriviä tuuletinroottoreita käytetään kääminpäiden jäähdytykseen.

Tässä diplomityössä tutkitaan edellä kuvattua tuuletinroottoreilla varustettua konetta. Työn tutkimusmenetelmiä ovat rakenteen tutkiminen simuloimalla elementtimenetelmällä sekä kokeet prototyypikoneella. Myös analyyttisten laskukaavojen soveltuvuutta tuuletinroottoreilla varustetulle koneelle pohditaan. Lisäksi työssä perehdytään murtovakokäämitysten suunnitteluun ja pohditaan millainen käämitys olisi hyvä tuuletinroottoreilla varustettuun koneeseen.

Murtovakokäämityksen synnyttämiä magneetikenttiä tutkitaan sekä laskemalla analyyttisesti että simuloimalla elementtimenetelmällä. Erilaisia tuuletinroottorivaihtoehtoja simuloidaan elementtimenetelmällä ja tulosten pohjalta kehitetään kaksi erilaista uutta tuuletinroottoria. Toisesta uudesta tuuletinroottorista rakennetaan prototyypiroottori. Prototyypiroottoria kokeillaan olemassa olevassa murtovakokoneessa ja se todetaan toimivaksi.

Elementtimenetelmän avulla tutkitaan myös kolmiulotteisesti rakennetta, jossa on kaksi roottoria. Simuloimalla todetaan, että roottorit eivät juurikaan vaikuta toistensa toimintaan. Saatujen tulosten perusteella kehitetään sijaiskytkentä koneelle, jossa on useampi roottori. Lisäksi pohditaan tuuletinroottoreilla varustetun koneen mahdollisia käyttökohteita ja ominaisuuksia sekä verrataan sitä tavalliseen murtovakokäämittyyn kestromagneetikoneeseen. Tässä diplomityössä osoitetaan, että tutkittu rakenne on käytännössä toimiva ja luodaan pohja jatkotutkimuksille.

AVAINSANAT: Kestomagneettitahtikone, murtovakokäämitys, moniroottorinen kone, tuuletinroottori

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

Ville Kivelä

Topic of the Thesis:

Fractional slot permanent magnet synchronous motor with auxiliary fan rotors

Supervisors:

Professor Timo Vekara and M.Sc. Bertil Brännbacka

Instructor:

D.Sc. Jouni Ikäheimo

Degree:

Master of Science in Technology

Major of Subject:

Electrical Engineering

Year of Entering the University: 2001**Year of Completing the Thesis:** 2008**Pages:** 91

ABSTRACT

Cooling of the stator end windings is a challenge in slow rotating permanent magnet machines. Conventional cooling wings on rotor end are ineffective due slow rotation speed. Fractional slot winding, which is often used in slow rotating permanent magnet machines, may offer a new innovative solution. Because of many different rotating magnetic fields generated by the fractional slot winding, it may be possible to install small auxiliary rotors next to the main rotor. These fast rotating fan rotors, with smaller pole numbers, may be used for cooling of the stator end windings.

In this thesis the structure described above is studied using simulations and prototypes. In simulations, the finite element method, FEM is used. Suitability of analytical calculations for the studied structure is considered. The theory of fractional slot windings is studied and windings suitable for motors with auxiliary fan rotors are discussed.

The magnetic fields generated by fractional slot winding are studied with analytical methods and with FEM simulations. Many different auxiliary rotor structures are simulated and according to the simulation results a prototype fan rotor is build. The prototype fan rotor is tested and found to work properly.

FEM is also used for simulation of the 3d structure with two rotors. According the simulation results the rotors in same stator, have no effect to each others. The simplified circuit model of multi-rotor structure is developed according to these simulation results. Also, the properties of motor with auxiliary fan rotors are discussed and compared with fractional slot motor without fan rotors.

KEYWORDS: Permanent magnet synchronous machine, fractional slot winding, machine with multi-rotor structure, fan rotor

1. JOHDANTO

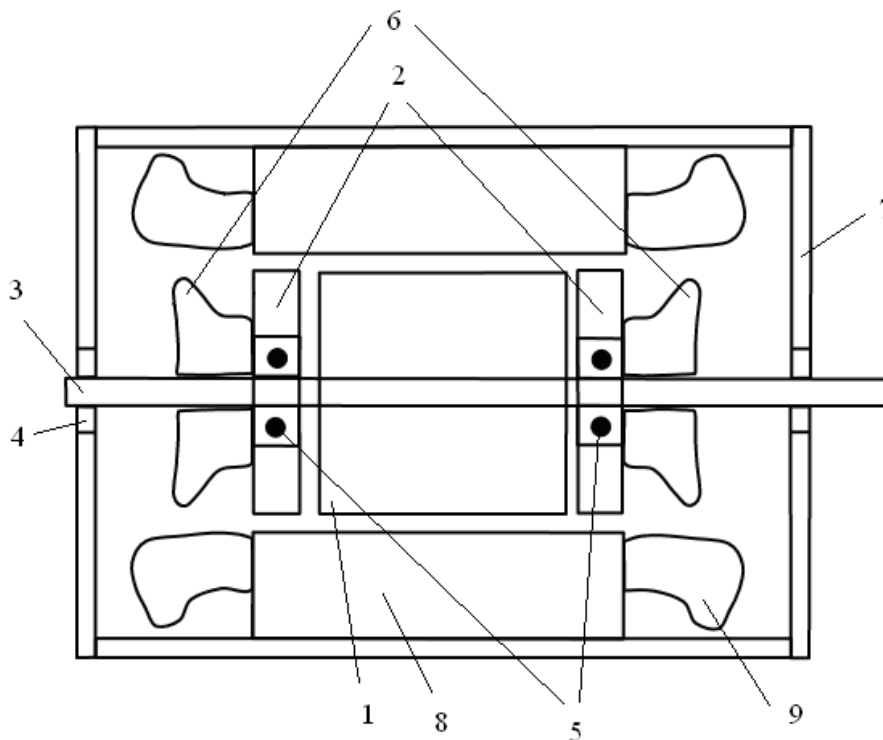
Kestomagneettimateriaalien ja siten kestopagneettikoneiden kehitys on ollut muutami-
en viime vuosien aikana huomattavaa. Siksi kestopagneettimoottorit ovat vähitellen
korvaamassa perinteisiä oikosulkumoottoreita hidasta pyörimisnopeutta vaativissa käy-
töissä. Kaikkein hitaimmin pyörivissä kestopagneettimoottoreissa käytetään usein mur-
tovakokäämitystä. Murtovakokäämityksen avulla saadaan moottorille suuri napaluku ja
siten hidas pyörimisnopeus, ilman että staattoriurien lukumäärä kasvaa tarpeettoman
suureksi. Hitaasti pyörivissä moottoreissa staattorin kääminpäiden jäähditys muodostuu
kuitenkin ongelmaksi. Yleensä sähkömoottoreissa kääminpäiden jäähditys hoidetaan
roottorin päissä sijaitsevien siivekkeiden avulla, mutta hitaasti pyörivissä moottoreissa
tämä ei ole tehokasta.

Murtovakokäämitys saattaa tarjota tähän ongelmaan uudentyyppisen ratkaisun. Murto-
vakokäämityksen koneen ilmaväliin synnyttämä magnetomotorinen voima ei ole puh-
taasti sinimuotoinen, vaan useiden eri napalukuisten ja eri nopeudella pyörivien kenttien
summa. Täten saattaisi olla mahdollista asentaa koneen akselille, pääroottorin molem-
mille puolille roottorit, joiden napaluku olisi pääroottorin napalukua pienempi. Näitä
nopeammin pyöriviä, pienempiä roottoreita voitaisiin käyttää kääminpäiden jäähdytyk-
seen kiinnittämällä niihin tuuletinsiivet. Nämä tuuletinroottorit kiinnitettäisiin laakerin
varassa akselille, jolloin ne pääsisivät pyörimään vapaasti pääroottoriin nähden. Tuule-
tinroottoreilla varustetun koneen rakenne selviää kuvasta 1.

Idea tuuletinroottoreiden lisäämisestä murtovakokäämityyn kestopagneettikoneeseen
on lähtöisin ABB Motors Oy:n tuotekehitysosastolta. Siellä ideaa oli, ilman tarkempaa
tutkimista, testattu prototyypin avulla. Koemoottorissa tuuletinroottoria ei kuitenkaan
saatu pyörimään, joten tarvittiin lisätutkimuksia, ja näistä lähtökohdista aloitin tämän
diplomityön tekemisen.

Tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia, onko edellä kuvattu toteutus mahdollinen ja
jos on niin millä ehdoilla. Aluksi tutkitaan toimimatonta prototyyppiä ja selvitetään syi-
tä siihen miksi se ei toiminut. Tulosten perusteella on tarkoitus suunnitella ja rakentaa
uusi prototyyppi ja kokeilla sen toimintaa käytännössä. Työn tarkoituksena ei ole val-

miin, lopullisen rakenteen kehittäminen, vaan ratkaisun alustava tutkiminen ja mahdollisten jatkotutkimuskohteiden pohtiminen. Lisäksi on tarkoitus tutkia moniroottorisen koneen toimintaa, eli miten roottorit reagoivat toisiinsa ja vaikuttavat toistensa toimintaan.



Kuva 1. Tuuletinroottoreilla varustetun koneen rakenne. 1. pääroottori, 2. tuuletinroottorit, 3. akseli, 4. akselin laakeri, 5. tuuletinroottoreiden laakerit, 6. tuuletinroottoreiden tuuletinsiivet, 7. koneen runko, 8. staattori, 9. kääminpäät.

Tutkimusmenetelminä käytetään pääasiassa simulointia elementtimenetelmällä (FEM, Finite Element Method) sekä kokeiluja todellisella prototyypillä. Lisäksi analyyttisiä menetelmiä käytetään apuna, varsinkin käämitysten suunnittelussa ja tutkimisessa. Tässä työssä tehdyissä simuloinneissa ja prototyypissä käytetään yksinkertaisuuden vuoksi vain yhtä tuuletinroottoria, vaikka todellisessa rakenteessa tuuletinroottori olisi koneen

molemmissa päissä. Tulokset, jotka saadaan tutkimalla rakennetta, jossa on yksi tuuletinroottori, pätevät myös kaksituuletinroottoriselle rakenteelle.

Työn alussa, luvussa 2 käydään läpi työn kannalta oleellinen teoria. Luvun pääpaino on käämityksen teoriassa, eli käämitysten suunnittelussa ja niiden tuottamissa magneettikentissä. Lisäksi käydään läpi kestopagneettimateriaalit, kestopagneettien sijoitusmahdollisuudet roottorissa sekä muu yleinen teoria. Luvussa 3 on kuvattu työssä tehdyt simuloinnit. Lisäksi luvussa on esitetty alkuperäisen prototyypikoneen rakenne ja elementtimenetelmän käyttö. Prototyypeillä tehdyt käytännön testit on kuvattu luvussa 4. Luvussa 5 pohditaan simulointien ja prototyypitestien tuloksia ja niiden perusteella tehdään johtopäätökset tuuletinroottoreilla varustetun koneen toiminnasta ja mahdollisista käyttökohteista. Luku 6 on yhteenveto diplomityöstä.

2. MURTOVAKOKÄÄMITTY KESTOMAGNEETTITAHTIMOOTTORI

Perinteisesti teollisuudessa eniten käytetty moottorityyppi on oikosulkumoottori. Kestomagneetteja sitä vastoin on käytetty lähinnä pienissä ja hinnaltaan edullisissa tasavirtamoottoreissa. Kestomagneettimateriaalien kehitys on kuitenkin ollut muutamien viime vuosien aikana huomattavaa. Täten kestopagneettitahtimoottoreista on tullut oikosulkumoottoreita parempi vaihtoehto joissain teollisuuden sovelluksissa, ja niiden käyttö lisääntyy jatkuvasti. Myös taajuusmuuttajien kehitys on edesauttanut kestopagneettikoneiden yleistymistä. Kestomagneettitahtimoottoreiden etuja oikosulkumoottoreihin verrattuna ovat parempi hyötysuhde ja tehokerroin, varsinkin osatehoilla. Lisäksi niitä voidaan valmistaa hitaammille pyörimisnopeuksille. Täten kestopagneettitahtimoottori voidaan kytkeä suoraan hidasta pyörimisnopeutta tarvitsevaan työkoneseen, kun taas oikosulkumoottori jouduttaisiin kytkemään alennusvaihteen kautta. Näin järjestelmästä jäävät pois vaihteiston hinta, huollot ja häviöt. Kestomagneettitahtikoneesta saadaan myös suurempi teho verrattuna samankokoiseen oikosulkumoottoriin, minkä vuoksi se soveltuu hyvin käytettäväksi kulkuneuvoissa, kuten junissa ja autoissa. Muita kestopagneettimoottoreille hyväksi osoittautuneita käyttökohteita ovat servokäytöt, paperikoneet sekä hissit. Kestomagneettitahtikone soveltuu hyvin myös tuulivoimalan generaattoriksi (Gieras & Wing 2002: 16–18, 333–335).

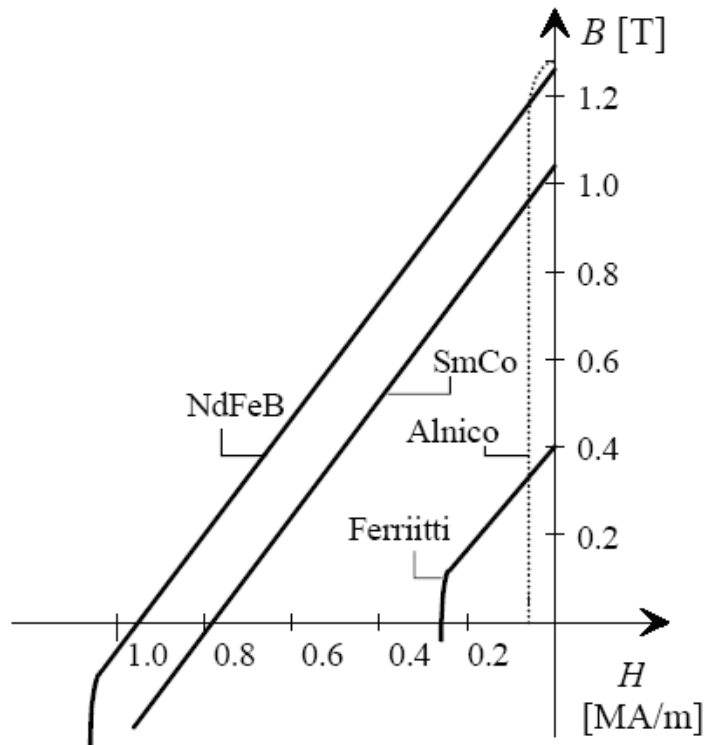
Kestomagneettitahtikone vastaa toimintaperiaatteeltaan perinteistä, sähköisesti magnetoitua tahtikonetta. Erona on, että roottorissa sijaitseva magnetointikäätymys on korvattu kestopagneeteilla. Täten roottorikäätymyksen aiheuttamat häviöt jäävät kokonaan pois ja moottorin rakenne on yksinkertaisempi. Monimutkaisesta rakenteesta johtuen pieniä sähköisesti magnetoituja tahtikoneita ei ole taloudellista valmistaa, ja siksi niiden pääasiällisin käyttökohde on suuret megawattiluokan generaattorit. Mutta yksinkertaisemman rakenteen ansiosta kestopagneettitahtikoneita voidaan kustannustehokkaasti käyttää pienemmässä teollisuusmoottoreiden teholuokassa.

2.1. Kestomagneettimateriaalit

Kestomagneettimateriaalien olemassaolo on tunnettu jo vuosituhansia, ja niitä on käytetty aikoinaan muun muassa kompassissa. Vasta 1900-luvulla on kehitetty ja otettu käyttöön teollisesti merkittäviä kestopomagneettimateriaaleja. Ensimmäinen teollinen kestopomagneettimateriaali oli AlNiCo, joka keksittiin Japanissa vuonna 1931 (Gieras & Wing 2002: 50). 1950-luvulla kehitettiin ferriitti, joka on 1960-luvulta lähtien ollut eniten käytetty kestopomagneettimateriaali. Harvinaiset maametallimagneetit keksittiin jo 1930-luvulla, mutta vasta 1970-luvulta alkaen niiden käyttö on yleistynyt, kun parempia seoksia on keksitty. Näiden magneettien kehitys on jatkunut aivan viime vuosiin saakka huomattavana ja on siten mahdollistanut kestopomagneettimoottoreiden kehittymisen kilpailukykyisiksi oikosulkumoottoreiden kanssa. (Heikkilä 2002: 14.)

AlNiCo-magneetit on valmistettu alumiinin, nikkelin, koboltin ja raudan seoksesta. AlNiCo:n etuja ovat suuri lämmönkesto ja suuri remanenssivuontiheys B_r , ks. kuva 2. Sen suurin käyttölämpötila on 520 °C ja remanenssivuontiheyden lämpötilakerroin on alhainen. AlNiCo:n huonona puolena on hyvin alhainen koersitiivikentänvoimakkuus H_c , mistä johtuen AlNiCo demagnetoiuu helposti. AlNiCo oli ylivoimaisesti suosituin sähkömoottoreissa käytetty kestopomagneettimateriaali aina 1960-luvun lopulle saakka, kunnes ferriitti syrjäytti sen. (Gieras & Wing 2002: 50–51.)

Ferriitti-magneeteilla on pienempi remanenssivuontiheys AlNiCo-magneetteihin verrattuna, mutta koersitiivikentänvoimakkuus on huomattavasti suurempi. Lisäksi sen sähköinen resistanssi on suuri, mistä johtuen siinä ei käytännössä muodostu pyörrevirtahäviöitä. Ferriitin suurin etu muihin kestopomagneettimateriaaleihin verrattuna on kuitenkin alhainen hinta, mikä tekee siitä eniten käytetyn kestopomagneettimateriaalin. Sen käyttökohteita ovat pienet ja hinnaltaan edulliset sähkömoottorit, joissa lähes kaikissa on ferriitti-magneetit. (Fitzgerald, Kingsley & Umans 1990: 33.)



Kuva 2. Yleisimpien kestopagneettimateriaalien demagnetoitumiskäyrät huoneenlämmössä (Heikkilä 2002: 14).

Harvinaiset maametallimagneetit ovat magneettisilta ominaisuuksiltaan parhaita käytettyjä magneetteja. Niiden koersitiivikentänvoimakkuus on huomattavasti muita magneettimateriaaleja suurempi ja myös remanenssivuontiheys on suuri. Ns. harvinaiset maametallit esiintyvät maaperässä hyvin pieninä pitoisuuksina ja siksi niiden jalostaminen on kallista. Täten näiden magneettien suurin huono puoli on korkea hinta. Yleisimmin magneeteissa käytetyt maametalliyhdisteet ovat samarium-koboltti (SmCo_5) ja neodyymi-rauta-boori ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$). (Gieras & Wing 2002: 52–53.)

Harvinaisista maametallimagneeteista samarium-koboltti keksittiin ensin ja sen teollinen valmistus käynnistyi 1970-luvun alussa. Se oli tuolloin ominaisuuksiltaan muita magneetteja huomattavasti parempi. Suuren koersitiivikentänvoimakkuuden ja remanenssivuontiheyden lisäksi sen remeanssivuontiheyden lämpötilakerroin on alhainen ja

suurin käyttölämpötila korkea, jopa 350 °C. Samarium-koboltin ainoa huono puoli on todella korkea hinta, sillä sekä samarium, että koboltti ovat kalliita jalostaa. (Gieras & Wing 2002: 53.)

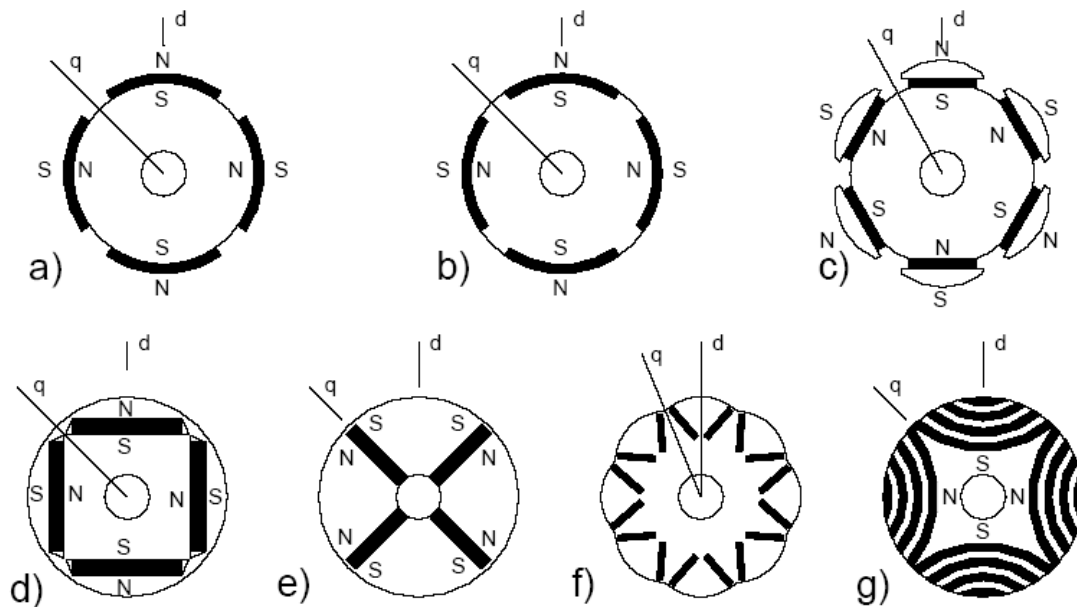
Neodyymi-rauta-boori-magneetit esiteltiin vuonna 1983 ja niiden suurin etu samarium-kobolttiin verrattuna oli alhaisempi hinta. Lisäksi niiden koersitiivikentänvoimakkuus ja remanenssivuontiheys ovat hieman suuremmat verrattuna samarium-kobolttiin. Huonona puolena Neodyymi-rauta-boorin remeanssivuontiheyden lämpötilakerroin on suurempi kuin samarium-koboltilla ja käyttölämpötila alhaisempi. Lisäksi se on myös altis korroosiolle, mutta korroosiota voidaan ehkäistä päällystämällä magneetit ohuella kerroksella nikkeliä, alumiinia tai epoksia (Parviainen 2005: 24–25). Ominaisuuksiensa vuoksi se on nykyään eniten käytetty kestmagneettimateriaali suuremmissa ja tehokkaimmissa kestmagneettimoottoreissa. (Gieras & Wing 2002: 53.)

2.2. Kestomagneettien sijoitusvaihtoehdot

Kestomagneetit voidaan sijoittaa sähkökoneen roottoriin monella eri tavalla, kuvassa 3 on esitelty joitakin käytettyjä rakenteita. Kuvaan on merkitty myös roottorikoordinaation d- ja q-akselien suunnat.

Yksinkertaisin tapa on magneettien sijoittaminen roottorin ulkopinnalle, ks. kuva 3a. Tällöin roottori on yksinkertainen valmistaa ja magneetit on helppo asentaa liimaamalla roottorin pinnalle. Koska magneetit ovat vain liimalla kiinni roottorissa, voi keskipakovoima aiheuttaa suurilla nopeuksilla vaaran, että magneetteja irtoaa. Siksi tätä asennustapaa käytetään pääasiassa vain hitaasti pyörivissä moottoreissa. Magneettien kiinnitystä voidaan kuitenkin haluttaessa vahvistaa päällystämällä roottorin pinta lasi- tai hiilikuidulla. Päällystämisen huonona puolena on, että päällyste toimii lämpöeristeenä heikentäen roottorin jäähdytystä. Toinen vaihtoehto magneettien kiinnipysymisen varmistamiseksi on asentaa roottorin pinnalle ohut, ruostumattomasta teräksestä valmistettu sylinteri. Tämän ratkaisun huono puoli on, että teräslevyyn indusoituu pyörrevirtoja, jotka aiheuttavat ylimääräisiä häviöitä. Siksi tällaista rakennetta käytetäänkin yleensä vain moottoreissa, joiden staattori tuottaa mahdollisimman vähän yliaaltoja. Myöskään

taajuusmuuttajan kanssa tällaista rakennetta ei ole hyvä käyttää taajuusmuuttajan aiheuttamista virran yliaalloista johtuen. (Parviainen 2005: 24–25.)



Kuva 3. Kestomagneettien sijoitusvaihtoehtoja: a) pinnalle asennetut magneetit b) pintaan upotetut magneetit c) pinnalle asennetut magneetit napakengillä d) tangentialisesti upotetut magneetit e) säteen suuntaisesti upotetut magneetit f) v-muotoon upotetut magneetit 1/sini-muotoisilla navoilla g) kestomagneettiavusteinen synkroninen reluktanssikone (Heikkilä 2002: 9).

Jos pinta-asennetuilla magneeteilla halutaan tuottaa sinimuotoinen magneettivuontiheyden jakauma, voidaan magneettien päälle asentaa muotoillut napakengät, ks. kuva 3c. Kestomagneetti voidaan asentaa myös roottorin pinnalle tehtyyn koloon, kuten kuvasta 3b nähdään. Tämä rakenne on fyysisesti kestävämpi verrattuna pinta-asennukseen, mutta tällöin magnetointivuo pienenee, koska hajavuo pääsee kulkemaan magneetin reunassa rautaa pitkin. (Heikkilä 2002: 10–11.)

Roottoriin upotettuja magneetteja käytettäessä on magneettien sijoitusvaihtoehtoja useampia, ks. kuva 3d-g. Vaikka roottorin valmistaminen on hankalampaa, saavutetaan upotetuilla magneeteilla useita etuja pinta-asennettuihin magneetteihin verrattuna. Esimerkiksi voidaan käyttää suurempia pyörimisnopeuksia ilman että roottoriin tarvitaan lisävahvistuksia. Lisäksi roottorin ulkopinnan muotoilulla saadaan helposti aikaiseksi sinimuotoinen magneettivuontiheys, kuvassa 3f roottori on muotoiltu $1/\sin$ -muotoiseksi. Upottamalla saadaan roottoriin asennettua tarvittaessa myös suurempia magneetteja, toisin kuin pintamagnetoituun roottoriin. Myös magneettien demagnetoitumisvaara pienenee, kun käytetään upotettuja magneetteja. Roottoriin upotettujen magneettien huonona puolena on monimutkaisemman rakenteen lisäksi se, että kestopagneettia tarvitaan enemmän. Tämä johtuu siitä, että magneettien reunoilla syntyy rautaan hajavuota, joten saman magnetoimisvuon tuottamiseksi tarvitaan suurempi määrä magneettia. (Parviainen 2005: 25.)

Kun käytetään rakennetta, jossa magneetit on upotettu säteen suuntaisesti, kuten kuvassa 3e, täytyy magneettivuon kulkeminen akselin kautta estää. Tämä voidaan tehdä käyttämällä magneettisesti johtamattomasta materiaalista valmistettua akselia tai eristämällä akseli muusta roottorista magneettisesti johtamattomalla holkilla (Gieras & Wing 2002: 194). Nykyään eniten käytetyt magneettien sijoitustavat ovat pinta-asennus sekä v-muotoon upotetut magneetit, katso kuvat 3a ja 3f.

2.3. Kestomagneettitahtimoottorin käämitys

Staattorikäämityksen tehtävä on synnyttää koneeseen pyörivä magneettikenttä. Pyörivä magneettikenttä syntyy kolmivaihekoneissa symmetrisen kolmivaihevirran ja symmetrisen käämityksen avulla. Moottorin vaiheluku voi olla periaatteessa mikä vain, mutta käytännössä se on yleensä kolme, johtuen käytössä olevasta kolmivaihejärjestelmästä. Tässä työssä käsitellään vain kolmivaiheisia moottoreita. Tahtikoneen pyörimisnopeus n_s riippuu roottorin napaparien lukumäärästä p ja syötettävän jännitteen taajuudesta f , yhtälön

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (1)$$

mukaan. Koneen staattorikäänitys suunnitellaan sellaiseksi, että se tuottaa mahdollisimman suuren magnetomotorisen voiman, jonka napaluku on sama kuin roottorin napaluku. Usein käämityksen suunnittelussa pyritään lisäksi minimoimaan magnetomotorisen voiman kentät, joiden napaluku on eri kuin roottorin. Näitä ylimääräisiä kenttiä syntyy käämityksestä riippuen aina jonkin verran, ja ne aiheuttavat muun muassa häviöitä. Tässä tutkimuksessa kuitenkin tarvitaan jokin tarpeeksi voimakas erinapainen magnetomotorisen voiman kenttä, koska tuuletinroottorin on tarkoitus pyöriä tämän toisen kentän avulla. (Aura & Tontteri 1996: 120–122.)

Staattorikäänityksen suunnittelu on tärkeä osa moottorin suunnittelua, sillä staattori voidaan käämiä monella eri tavalla. Tässä tutkimuksessa käsitellään vain käämityksiä, joissa johtimet on sijoitettu staattorin uriin. Käämitykset voidaan jakaa kokovakokäämityksiin ja murtovakokäämityksiin. Kumpikin näistä voidaan käämiä joko yksi- tai kaksoisena, lisäksi kokovakokäämitys yleensä vielä jänteistetään. Jänteistyskin voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Käämitystavan valinta riippuu koneelle halutuista ominaisuuksista.

Käämityksen suunnittelussa tärkeä suure on vakoluku q , joka kertoo kuinka monta uraa staattorissa on napaa ja vaihetta kohti. Vakoluku lasketaan

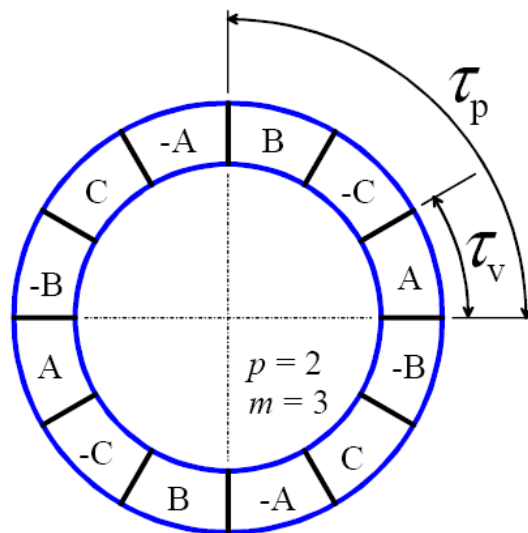
$$q = \frac{Q}{2pm}, \quad (2)$$

missä Q on uraluku, p napaparien määrä ja m vaiheluku. Jos q on kokonaisluku, on käämitys kokovakokäämitys ja jos q on murtoluku, on käämitys murtovakokäämitys.

2.3.1. Kokovakokäämitys

Kokovakokäämitys on yleisin vaihtovirtamoottoreissa käytetty käämitystyyppi. Käämityksen suunnittelu aloitetaan piirtämällä staattorin kehä ja jakamalla se tasan kaikille navoille, näin saadaan aikaiseksi napajako τ_p , ks. kuva 4. Yhden navan koko sähköastei-

na ilmoitettuna on aina 180° , joten kuvassa olevan koneen koko on $4 \cdot 180^\circ$, koska kone on nelinapainen. Seuraavaksi jokaisen navan alue jaetaan tasan kolmelle vaiheelle ja näin saadaan vyöhykejako τ_v . Vyöhykkeet jaetaan vaiheille A, B ja C siten, että positiiviset vaiheet tulevat sähköasteina 120° päähän toisistaan, joka on kolmivaihejärjestelmässä vaiheiden välinen kulma. Kun positiiviset vaiheet on merkitty, merkitään negatiiviset vaiheet tyhjiksi jääneisiin vyöhykkeisiin siten, että ne tulevat 180° päähän vastavista positiivisista vaihteista. (Pyrhönen 1995: 41–42.)



Kuva 4. Staattorin kehän jakaminen vyöhykkeiksi (Pyrhönen 1995: 41).

Jokaisessa vyöhykkeessä on vakoluvun q verran uria, joihin sijoitetaan vyöhykkeen määräämän vaiheen johdinniput. Vyöhykkeen etumerkki määrää virran suunnan. Yksinkertaisimmillaan, kun $q = 1$, jokaisessa vyöhykkeessä on vain yksi ura. Yleensä kuitenkin pyritään saamaan vakoluku suuremmaksi, koska tällöin käämityksen synnyttämä magnetomotorinen voima on lähempänä siniaaltoa ja sisältää näin ollen vähemmän yliaaltoja. (Pyrhönen 1995: 41–43.)

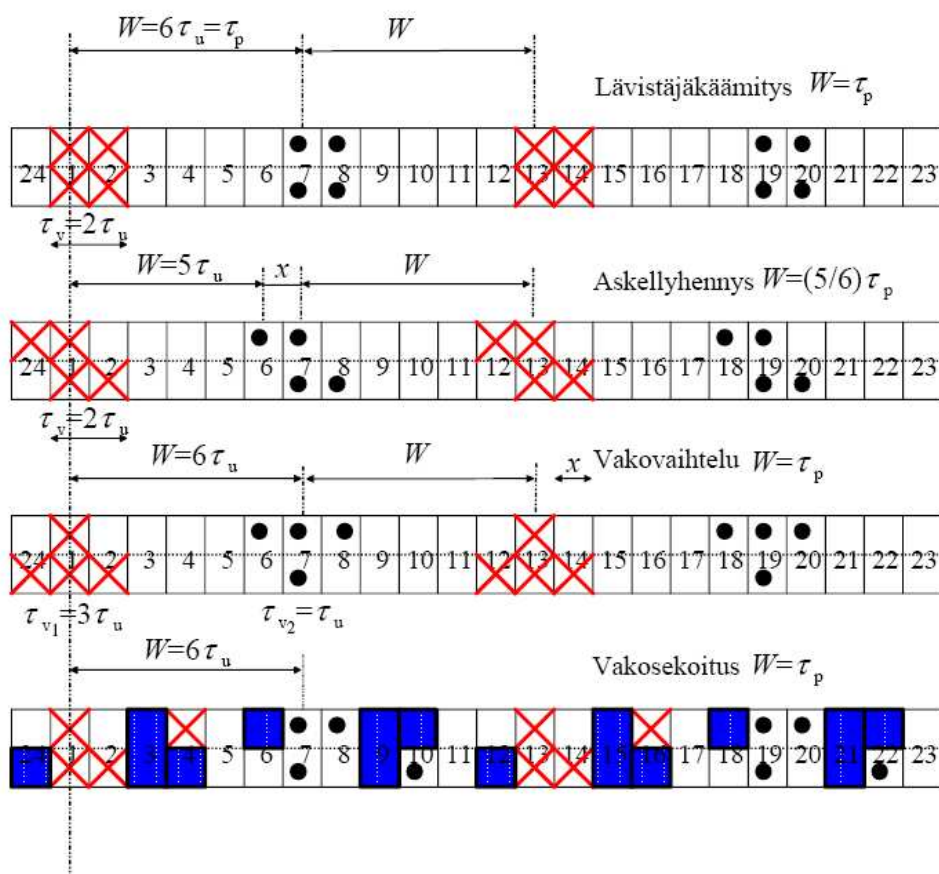
Käämitys voi olla joko yksi- tai kaksikerroksinen. Yksikerroksisessa käämityksessä jokaiseen staattorin uraan tulee yksi johdinnippu, eli vyyhden sivu, kun taas kaksikerroksisessa niitä tulee jokaiseen uraan kaksi. Täten kaksikerroksisessa käämityksessä kokonaisia käämivyyhtejä on Q kappaletta eli yhtä monta kuin uria. Yksikerroksisessa käämityksessä vyyhtejä on $Q/2$ kappaletta. Kaksikerroksista käämitystä käytetään yleensä silloin kun halutaan jänteistää käämitystä. Jänteistuksen avulla voidaan pienentää käämityksen aiheuttamia yliaaltoja sekä käämitykseen tarvittavan kuparin ja siten myös häviöiden määrää. Jänteistetyssä käämityksessä osa toisen tai molempien kerroksen johdinnipuista tulee viereisen vyöhykkeen alueelle. (Pyrhönen 1995: 46–47.)

Yleisimmin käytettyjä jänteistämistapoja, sekä jänteistämätön käämitys on esitelty kuvassa 5. Yksinkertaisin jänteistystapa on askellyhennys. Siinä toisen kerroksen käämityksiä siirretään esim. yhden uran verran sivulle ensimmäiseen kerrokseen nähden. Toinen yleinen jänteistystapa on vakovaihtelu, joka vastaa magneettisilta ominaisuuksiltaan askellyhennystä, mutta on kääminnältään hieman erilainen. Kuvassa 5 on vakovaihtelu saatu askellyhennyksestä vaihtamalla urissa 8, 12, 18 ja 24 ylä- ja alakerroksen vyyhdensivut keskenään. Vakosekoitus saadaan aikaiseksi, kun yksi tai useampi vyyhdensivu viedään viereisen vyöhykkeen alueelle. Vakosekoitus voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Yhdellä jänteistystavalla saadaan poistettua yksi haitallinen yliaalto. Jänteistystapoja voidaan myös käyttää yhtä aikaa, esim. vakosekoitusta ja askellyhennystä, näin on mahdollista poistaa kaksi haitallista yliaaltoa. (Pyrhönen 1995: 46–48.)

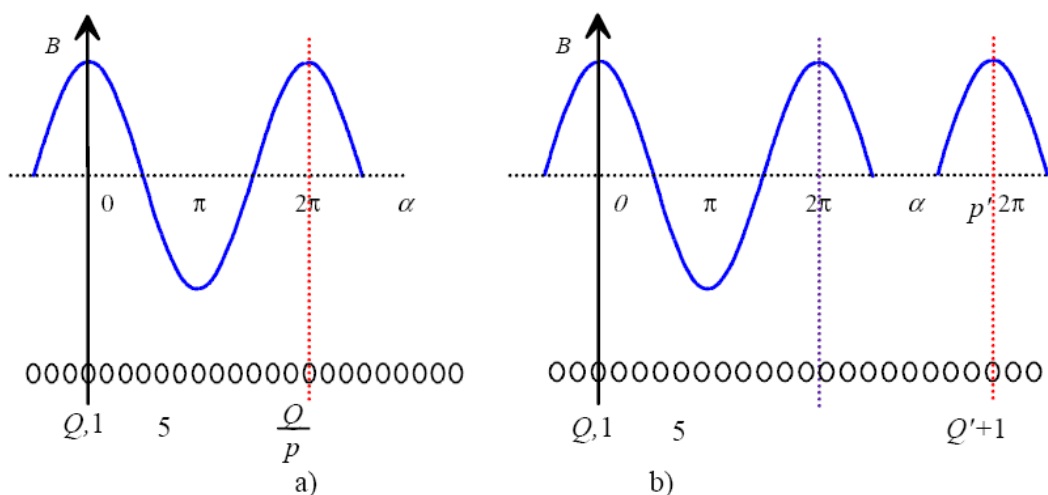
2.3.2. Murtovakokäämitys

Murtovakokäämityksellä tarkoitetaan käämitystä, jonka vakoluku q on murtoluku. Kun q on pienempi kuin yksi, saadaan halutulle napapariluvulle p toteutettua käämitys pienemmällä uraluvulla Q , kuin käytettäessä kokovakokäämitystä. Tästä on hyötyä varsinkin kun halutaan suunnitella hitaasti pyörivä moottori, eli moottori, jonka napaluku on suuri. Yleensä tällainen moottori on kestopagneettimoottori. Murtovakokäämityksessä q voi olla myös suurempi kuin yksi, mutta tässä työssä käsitellään vain murtovakokäämityksiä, joissa q on ykköstä pienempi. Murtovakokäämityksen toimintaperiaate on monimutkaisempi kuin kokovakokäämityksen. Kun kokovakokäämityksessä magneto-motorisen voiman aalto jakautuu tasan peruskäämityksen, eli Q/p uran matkalle, niin

murtovakokäämityksessä on kuljettava useamman aallon matka ennen kuin aalto osuu samanvaiheisen johtimen kohdalle. Koko- ja murtovakokäämitysten eroa voidaan havainnollistaa kuvalla 6.

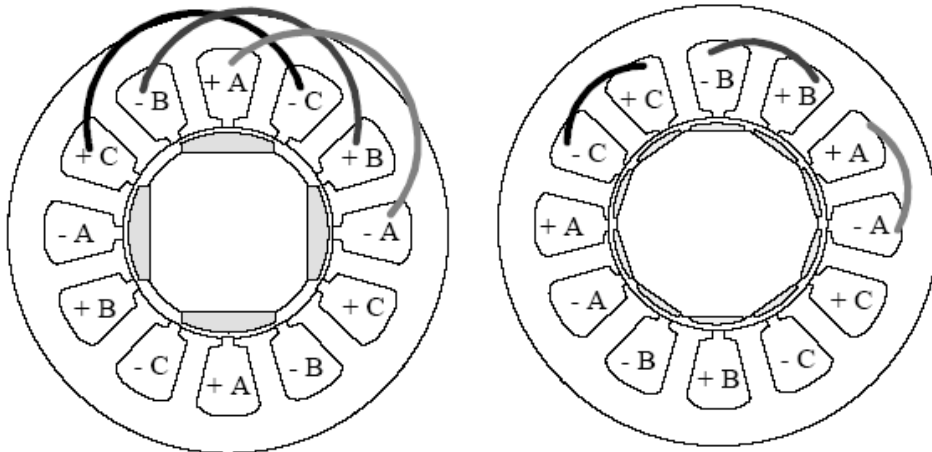


Kuva 5. Ylimpänä jänteistämätön käämitys, eli lävistäjäkäämitys. Sen alapuolella yleisimmät jänteistystavat eli askellyhennys, vakovaihtelu ja vakosekoitus (Pyrhönen 1995: 48).

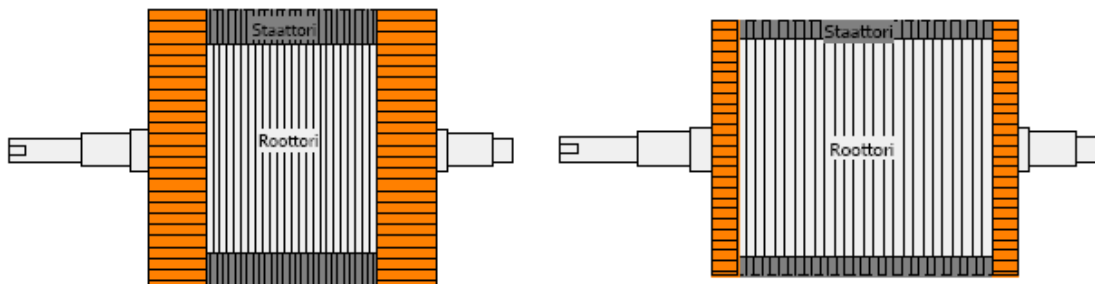


Kuva 6. Kokovakokäämityksen a) ja murtovakokäämityksen b) periaatteellinen ero (Pyrhönen 1995: 52).

Murtovakokäämityksen etuna kokovakokäämitykseen verrattuna on, että uraluku voidaan valita vapaammin tietylle napaluvulle, tai toisinpäin, napaluku voidaan valita vapaammin tietylle uraluvulle. Lisäksi murtovakokäämityksellä on laajat jänteistysmahdollisuudet (Pyrhönen 1995: 52). Yleensä murtovakokäämityksellä saadaan staattorin päissä olevat kääminpäät lyhyemmiksi kuin kokovakokäämityksessä, tätä on havainnollistettu kuvassa 7. Tällöin johdinkuparia tarvitaan vähemmän ja siten myös kuparihäviöt pienenevät. Lisäksi kääminpäät vievät vähemmän tilaa ja täten samankokoiseen runkoon voidaan laittaa pidempi staattori. Murtovakokäämityssä staattorissa voidaan myös käyttää ohuempaa staattorin selkää, koska moottorissa on enemmän napoja ja siten selässä ei kulje niin suurta magneettivuota, ks. kuva 8. Täten voidaan käyttää suurempaa roottoria ja moottorin tuottama vääntömomentti kasvaa.



Kuva 7. Koko- ja murtovakokoneen eroja. Molemmat on käämitty 12-uraiseen staattoriin, kokovakokone (vasemmalla) on 4-napainen ja murtovakokone 10-napainen. Murtovakokoneessa on käämitty yksi vyyhti yhden hampaan ympärille ja näin saatu lyhyemmät kääminpäätt (Jussila 2005: 19).



Kuva 8. Murtovakokoneessa (oikealla) voidaan samassa runkokoossa käyttää pidempää ja leveämpää roottoria kuin kokovakokoneessa, johtuen lyhyemmistä kääminpäistä sekä ohuemmasta staattorinselästä (Jussila 2005: 14).

Murtovakokäämityksen huono puoli on, että staattorin tuottama magnetomotorinen voima sisältää paljon enemmän muiden napapari lukujen aaltoja. Kun kokovakokoneissa

esiintyy perusaallon lisäksi ainoastaan suuremman napapariluvun yliaaltoja (esimerkiksi viides ja seitsemäs yliaalto), niin murtovakokoneissa esiintyy näiden lisäksi myös perusaaltoa pienemmän napapariluvun aaltoja. Näistä haitallisista magnetomotorisen voiman aalloista aiheutuu moottorissa pääasiassa pyörrevirtahäviöitä, mutta lisäksi ne aiheuttavat melua ja koneen tuottaman vääntömomentin epätasaisuutta. Näiden aaltojen vuoksi murtovakokäämitys (jonka $q < 1$) soveltuu käytettäväksi käytännössä ainoastaan kestmagneettikoneissa. Koneen suunnittelussa pitää kuitenkin huomioida, että roottori valmistetaan levyistä ja että käytettävä kestmagneettimateriaali on mahdollisimman vähän sähköä johtavaa. (Salminen 2004: 14–16.)

2.3.3. Murtovakokäämityksen symmetriavaatimukset

Käämityksen suunnittelussa on otettava huomioon, että käämitys toteuttaa ns. symmetriavaatimukset. Käämityksen sanotaan olevan symmetrinen, kun se symmetrisestä lähteestä syötettynä synnyttää pyörivän magneettikentän tai indusoi pyörivän magneettikentän vaikutuksesta symmetrisen monivaihejännitteen. Symmetrisyyden määrittämisessä tarvittava vakoluvun nimittäjä n saadaan yhtälöstä

$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{z}{n}, \quad (3)$$

missä z ja n ovat kokonaislukuja siten että z/n on supistumaton. Murtovakokäämitys on symmetrinen, kun se toteuttaa seuraavat kaksi ehtoa. Ensimmäisen ehto täyttyy yksikerroksisille murtovakokäämityksille, kun

$$\frac{p}{n} \in \mathbf{N} \quad (4)$$

ja kaksikerroksisille, kun

$$\frac{2p}{n} \in \mathbf{N}. \quad (5)$$

Toinen symmetriaehto täyttyy, kun

$$\frac{n}{m} \in \mathbf{N}. \quad (6)$$

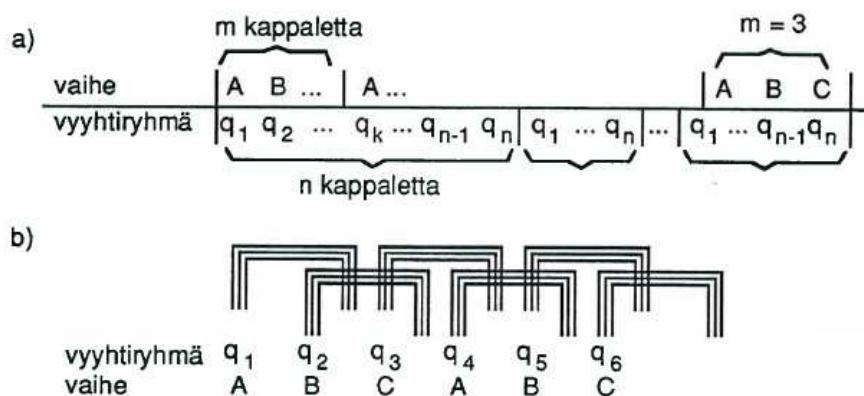
Yhtälöistä 4 ja 5 huomataan, että käytettäessä kaksikerroskäämistä on käämityksen toteutusvaihtoehtoja enemmän. (Perho 2006: 16.)

2.3.4. Murtovakokäämityksen suunnitteleminen

Murtovakokäämitys voidaan toteuttaa joko yksi- tai kaksikerroksisena. Yleensä käytetään kaksikerroksista käämistä, koska se tuottaa vähemmän ylimääräisiä magnetomotorisen voiman aaltoja. Tässä työssä kuitenkin perehdytään enemmän yksikerroksisiin käämistyksiin, koska pääroottorin kentän lisäksi tarvitaan riittävän voimakas, pienemmän napamäärän omaava magnetomotorinen voima tuuletinroottorin pyörittämiseen.

Murtovakokäämityksen suunnittelu voidaan tehdä useammalla eri menetelmällä. Eri menetelmillä suunnitellut käämitykset poikkeavat usein toisistaan (Hörtz, Herzog & Haas 2006: 37). Tässä työssä tutustutaan käämityksen suunnitteluun sekä vyyhtiryhmäkaavion että uratähden avulla. Yleensä kaksikerroskäämitykset suunnitellaan uratähden avulla ja yksikerroksiset vyyhtiryhmäkaavion avulla. Tässä työssä käydään läpi myös yksikerroksisten käämistysten suunnittelu uratähden avulla, koska syntyvä käämitys on ensimmäisen lajin käämistysten kohdalla erilainen.

Kokovakokäämityksessä jokaisen vyöhykkeen leveys oli q , mutta murtovakokäämityksessä tämä ei ole mahdollista, koska q on murtoluku. Tällöin q kuvaa keskimääräistä vyöhykkeenleveyttä. Vyyhtiryhmäkaavion avulla suunniteltaessa vyöhykkeitä on kahta eri leveyttä, q_a ja q_b , jotka ovat q :ta lähinnä olevat pienempi ja suurempi kokonaisluku. Kun $q < 1$ niin $q_a = 1$ ja $q_b = 0$. Vyöhykkeiden lukumäärät määritellään siten, että keskimääräiseksi vakoluvuksi tulee q , yhteensä niitä on vakoluvun jakajan verran, eli n kappaletta. Vyöhykkeiden järjestyksen määrää vyyhtiryhmäkaavio, ks. kuva 9a.



Kuva 9. Vyyhtiryhmäkaavio a) sekä sen mukaan toteutettu käämitys b). (Perho, Niemenmaa, Jokinen & Arkkio 1995: 18).

Vyyhtiryhmäkaaviossa on ylärivillä vaiheet ja alarivillä vyyhtiryhmät q_a ja q_b . Vyyhtiryhmien järjestys valitaan sellaiseksi, että vierekkäin on mahdollisimman vähän saman levyisiä vyyhtiryhmiä. Vyyhtiryhmien ja vaiheiden sarjoja toistetaan samanlaisina, kunnes ne päättyvät yhtä aikaa. Valmis käämitys saadaan kun staattoriin sijoitetaan vyyhtiryhmäkaavion alarivin osoittama määrä ylärivin osoittaman vaiheen johdinnippuja peräkkäin, ks. kuva 9b. Jos $q_b = 0$, ei kyseistä vaiheen johtimia sijoiteta kyseiseen väliin ollenkaan. (Perho 2006: 31–33.)

Seuraavaksi käydään läpi murtovakokäämityksen suunnittelemisen uratähden avulla, menetelmän on esittänyt Vogt (1996: 56–70). Uratähden sijasta voitaisiin käyttää myös ruudukkomuotoista napapariakaaviota, jolla saataisiin sama tulos. Uratähdellä suunniteltaessa murtovakokäämitykset jaetaan kahteen eri lajiin, sen mukaan onko uraluvun nimittäjä n parillinen vai pariton. Jos n on pariton, on käämitys ensimmäisen lajin, jos n on parillinen, on käämitys toisen lajin. Käämityksen suunnittelussa apuna käytettäviä muuttujia on esitetty taulukossa 1. Ensimmäisen lajin käämityksessä muuttujat ovat samat sekä yksi-, että kaksikerroksisille käämityksille, kun taas toisen lajin käämityksissä muuttujat riippuvat käämikerrosten määrästä. Muuttuja t tarvitaan muiden muuttujien määrittämiseen. Q^* kuvaa staattoriurien määrää peruskäämityksessä ja p^* napaparien

määrää peruskäämityksessä. Koko koneen käämitys muodostuu yhdestä tai useammasta, keskenään samanlaisesta peruskäämityksestä. (Salminen 2004: 30–31.)

Taulukko 1. Käämityksen suunnittelussa tarvittavia muuttujia.

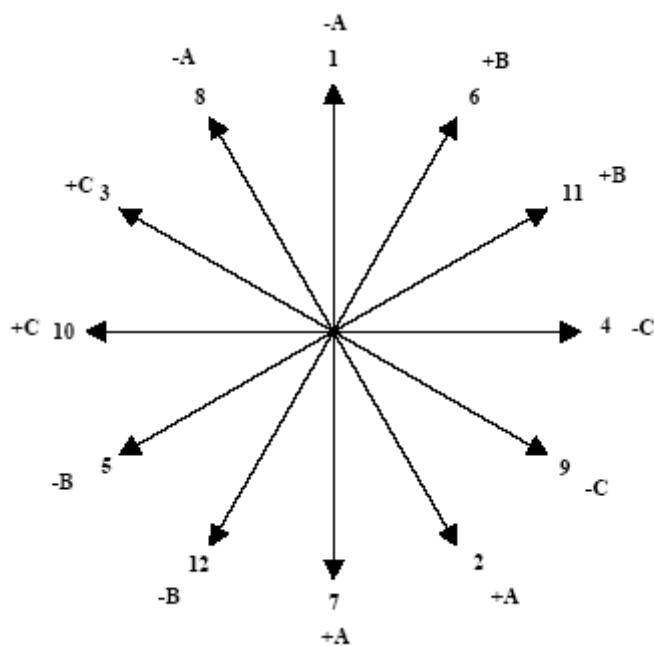
	1. laji	2. laji	
nimittäjä, n	pariton	parillinen	
t	p/n	$2 p/n$	
kerroksia	1 tai 2	1	2
Q^*	Q/t	$2 Q/t$	Q/t
p^*	n	n	$n/2$
t^*	1	2	1

Kun tiedetään p , Q ja haluttu käämikerrosten määrä, voidaan käämityksen suunnittelu aloittaa. Ensin tulee varmistaa käämityksen symmetrisyys. Seuraavaksi lasketaan taulukoiden 1 ja 2 mukaiset muuttujat, riippuen käämityksen lajista ja halutusta kerrosmäärästä. Seuraavaksi suunnittelu etenee hieman erilailla riippuen käämityksen lajista ja siitä halutaanko käämityksestä yksi vai kaksikerroksinen.

Yksikerroksisen ensimmäisen lajin käämityksen suunnittelussa piirretään ensin uratähti, jossa on Q' osoitinta, α_z päässä toisistaan, ks. kuva 10. Seuraavaksi uratähden osoittimet numeroidaan siten, että ylin osoitin saa numeron yksi, α_n :n päässä oleva numeron 2 jne. Osoittimet jaetaan tasan eri vaiheille siten, että saman vaiheen samansuuntaiset johtimet ovat vierekkäin. Vaiheiden järjestys on -A, +B, -C, +A, -B ja +C, kuten kuvasta 10 nähdään. Staattoria käämittäessä ensimmäiseen staattorin uraan sijoitetaan uratähden osoittimen, jonka numero on yksi, määräämä vaihejohdin jne. Kuvasta 10 muodostettu peruskäämitys olisi siten: -A, +A, +C, -C, -B, +B, +A, -A, -C, +C, +B, -B. Jos kone sisältää useamman peruskäämityksen toistetaan samaa järjestystä, kunnes kaikissa urissa on johtimet. (Hörtz ym. 2006: 35–36.)

Taulukko 2. Uratähden piirtämisessä apuna käytettäviä muuttujia.

t^*	Symmetriavaatimusten mukaan 1 tai 2, uratähden kerrosten lukumäärä
$Q^* = \frac{Q}{t^*}$	Uratähden säteiden lukumäärä, yhden uratähden kierroksen osoittimien lukumäärä
$p^* = \frac{p}{t^*}$	Uratähteä numeroitaessa yhden kierroksen kiertämisten lukumäärä
$\frac{p^*}{t^*} - 1$	Väliin jätettävien osoittimien lukumäärä uratähteä numeroitaessa
$\alpha_z = 360^\circ \frac{t^*}{Q^*}$	Osoitinkulma eli vierekkäisten säteiden välinen kulma uratähdessä
$\alpha_n = 360^\circ \frac{p^*}{Q^*}$	Urakulma määrää uratähden numeroinnin



Kuva 10. 10-napaisen, 12-uraisen moottorin käämimisessä käytettävä uratähti (Jussila 2005: 23).

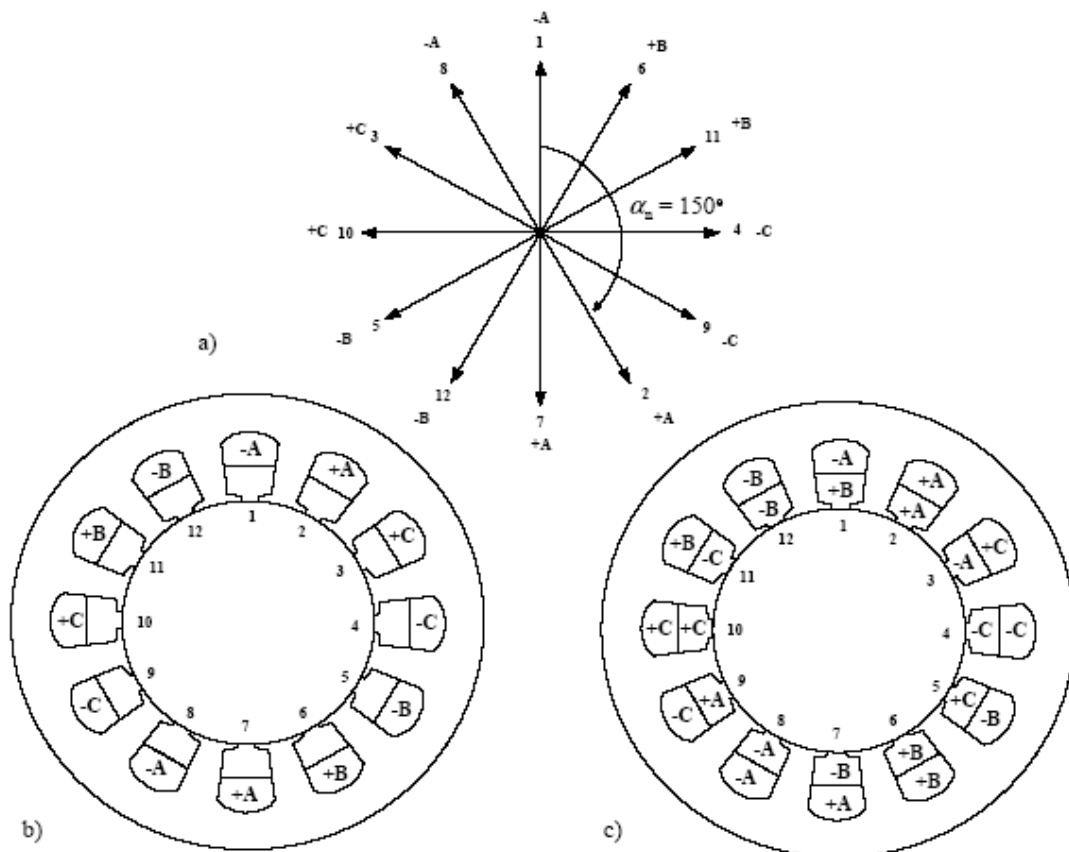
Toisen lajin yksikerroksisten käämitysten suunnittelu etenee samalla tavalla kuin ensimmäisen lajin käämitysten tapauksessa, mutta uratähteen tulee kaksi kerrosta. Käämityksen suunnittelu on myös huomattavasti hankalampaa, koska osa osoittimista pitää jakaa kahdelle eri vaiheelle. Osoitinten jakamiseen ei ole tarkkaa ohjetta ja tämä johtaa helposti huonoon käämitykseen. Toisen lajin yksikerroksisten käämitykset kannattaakin aina suunnitella vyyhtiryhmäkaavion avulla, koska tällöin virheen mahdollisuutta ei ole ja suunnittelu on muutenkin paljon helpompaa. Lisäksi toisen lajin yksikerroksisten käämityksestä syntyy samanlainen sekä uratähdellä, että vyyhtiryhmäkaaviolla suunniteltaessa.

Kaksikerroksisen ensimmäisen lajin käämityksen suunnittelu on hyvin samanlainen verrattuna yksikerroksiseen ensimmäisen lajin käämitykseen. Käämityksen ensimmäinen kerros suunnitellaan aivan samalla tavalla kuin yksikerroksisessa käämityksessä, ks. kuva 11 a ja b. Toinen kerros muodostetaan ensimmäisestä kerroksesta vaihtamalla vaihejohdinten etumerkit ja siirtämällä niitä yhden tai useamman uran sivulle. Yleensä pyritään, mikäli mahdollista, siirtämään toista kerrosta vain yhden uran verran sivulle, kuten kuvassa 11 c. Tällaista käämistä sanotaan napakäämistykseksi, ja sen etuna ovat lyhyet kääminpäätt muihin käämistystyypppeihin verrattuna.

Kaksikerroksisen toisen lajin käämityksen suunnittelu alkaa myös uratähden piirtämisellä ja osoitinten numeroimisella. Uratähden jakamisessa eri vaiheiden kesken tulee kuitenkin eroa ensimmäisen lajin käämistykseen verrattuna, koska jako ei mene tasan. Vaiheet tulee jakaa siten, että negatiivisia johtimia on kutakin yksi enemmän tai vähemmän kuin positiivisia, mutta johtimia jokaiselle vaiheelle on yhtä monta. Toinen kerros toteutetaan samalla tavalla kuin ensimmäisen lajin käämistyksessä, eli etumerkki vaihdetaan ja johtimia siirretään sivulle. Näin ollen positiivisia ja negatiivisia johtimia tulee lopulta yhtä paljon. (Salminen 2004: 33–34.)

Uratähden avulla pystytään myös muuttamaan kaksikerroksinen käämistys yksikerroksiseksi. Näin saadaan aikaiseksi erilainen käämistys, kuin suoraan suunnittelemalla yksikerroksinen käämistys. Syntyvä käämistys on yksinkertaisempi käämiä, mutta sen pääkentän käämistyskerroin on huonompi. Menetelmä on tarkoitettu napakäämistyille murto-

vakokäämeille. Sitä ei tässä tarkemmin käydä läpi, mutta perusajatus on jättää joka toinen käämivyhti käämimättä. (Bianchi & Dai Pré 2006.)



Kuva 11. Ensimmäisen lajin kaksikerrosmurtovakokäämityksen suunnittelemisen ura-tähden avulla (Salminen 2004: 26).

Käämitystä suunniteltaessa pitää myös kiinnittää huomiota johtimien sijaantiin staattorin kehällä. Vaarana on kuvassa 12a esitetty rakenne, jossa kaikki saman vaiheen johtimet ovat vierekkäin samalla puolella konetta. Tällaisessa rakenteessa esiintyy haitallisia radiaalisia voimia. Kuvassa 12b on parempi staattorirakenne, jossa haitallisia voimia ei esiinny, koska saman vaiheen johtimia sijaitsee aina vastakkaisella puolella staattoria.

ku $q = 1$. Kun $q \neq 1$, käämityskerroin on aina ykköstä pienempi. Mitä pienempi käämityskerroin on, sitä suurempaa virtaa tai enemmän johtimia joudutaan käyttämään, ja tällöin koneen hyötysuhde laskee. Kokovakokäämitys tuottaa perusaallon lisäksi ainoastaan suuremman napaluvun aaltoja, kun taas murtovakokäämitys tuottaa myös perusaaltoa pienemmän napaluvun aaltoja. Murtovakokäämitysten perusaallon käämityskerroin on yleensä pienempi ja muiden aaltojen käämityskerroimet suurempia verrattuna kokovakokäämitysten käämityskerroimiin. (Salminen 2004: 36–38.)

Käämityskerroimet voidaan laskea uratähden avulla tai käyttää käämitystyypistä riippuvia, valmiita kaavoja. Käämityskerroimet voidaan myös laskea matriisilaskennan avulla. Ennen käämityskerroimien laskemista voidaan murtovakokäämityksessä syntyvät yli- ja aliaallot määrittää. Kaksikerroksisen 1. lajin murtovakokäämityksen synnyttämät aallot voidaan laskea (Jokinen 1973: 17)

$$\frac{v}{p} = \pm \frac{1}{n}(2mg + 1), \quad g = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (7)$$

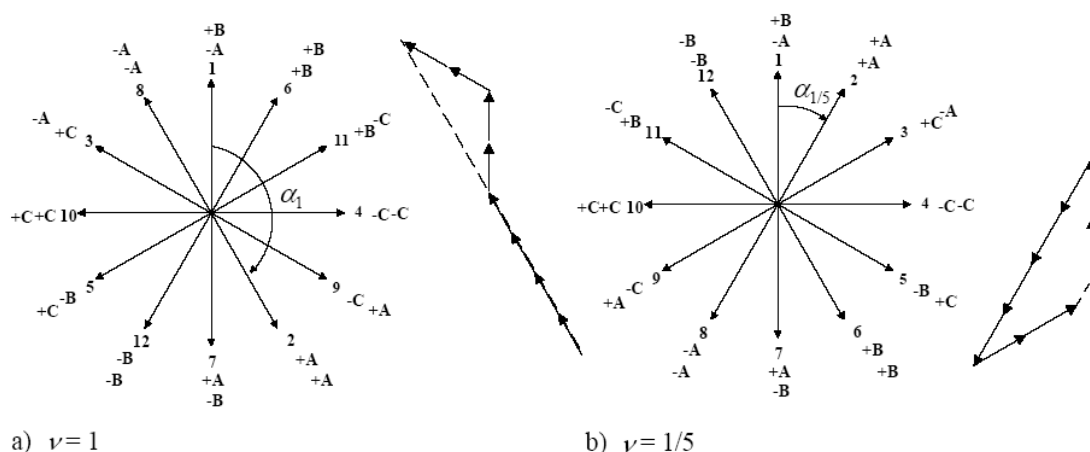
Kaksikerroksinen 2. lajin murtovakokäämityksen synnyttämät aallot voidaan puolestaan laskea (Jokinen 1973: 17)

$$\frac{v}{p} = \pm \frac{1}{n}(2mg + 2), \quad g = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (8)$$

Kaavoissa 7 ja 8 etumerkki valitaan siten, että se on positiivinen perusaallolle ($v = +1$). Kaavalla 7 voidaan myös laskea yksikerroksisen kokovakokäämityksen ja yksikerroksisen 1. lajin murtovakokäämityksen synnyttämät aallot. Yksikerroksiselle 2. lajin murtovakokäämitykselle nämä kaavat eivät päde, vaan käämitys synnyttää enemmän aaltoja.

Käämityskerroimet voidaan määrittää uratähden avulla, laskemalla yhden vaiheen jännitevektoreista geometrinen summa ja jakamalla se vektorien aritmeettisella summalla. Kuvassa 13a on perusaallon käämityskerroin laskettu 12-uraiselle, 10-napaiselle kaksikerroksikämitykselle. Uratähti on sama kuin aikaisemmassa kuvassa 10, paitsi että siihen on merkitty kummankin kerroksen vaiheet. Kuvaan 13a on piirretty myös jännitevektorit peräkkäin, josta nähdään niiden olevan lähes samansuuntaiset. Kun muodostetun

vektorijonon pituus jaetaan vektoreiden yhteispituudella, saadaan perusaallon $\nu = 1$ ($p = 5$) käämityskertoimeksi $\xi_1 = 0,933$. Kuvassa 13b on määritelty saman käämityksen $\nu = 1/5$ aliharmoninen käämityskerroin ($p = 1$). Tässä uratähti on muodostettu perusaallon uratähdestä järjestämällä numeroidut jännitevektorit uudelleen siten, että peräkkäisten vektoreiden välinen kulma on $\nu\alpha_n$. Kun taas muodostetaan vektoreista jono ja jaetaan sen pituus vektoreiden yhteispituudella, saadaan käämityskertoimeksi $\xi_{1/5} = 0,067$. (Salminen 2004: 33, 45.)



Kuva 13. Käämityskertoimien määrittäminen uratähden avulla käämitykselle, jonka $Q = 12$ ja $p = 5$ (Salminen 2004: 45).

Uratähteä hyödyntäen voidaan johtaa käämityskertoimille ξ_ν yleinen kaava

$$\xi_\nu = \frac{\sin \frac{\nu\pi}{2}}{Z} \sum_{\rho=1}^Z \cos \nu\alpha_\rho, \quad (9)$$

missä Z on yhteen vaiheeseen kuuluvien osoitinten määrä ja ρ on yksittäisen osoittimen järjestysluku (Vogt 1996: 81–83). Käämityskertoimet voidaan laskea tästä kaavasta

johdetuilla analyttisillä kaavoilla. Kaavan valinnassa tulee olla tarkkana, koska kaavoja on monia erilaisia riippuen käämikerrosten määrästä, käämityksen lajista sekä joskus myös vakoluvun jakajasta n . Esimerkiksi ensimmäisen lajin kaksikerroksisen murtova-kokäämityksen käämityskertoimet voidaan laskea

$$\xi_v = \frac{\sin\left(\frac{v \pi}{p 2m}\right)}{nq \sin\left(\frac{v \pi}{p 2nqm}\right)} \sin\left(\frac{v y \pi}{p qm 2}\right). \quad (10)$$

Käämityskertoimen voidaan myös ajatella muodostuvan kolmesta eri kertoimesta

$$\xi_v = \xi_p \xi_d \xi_{sk}, \quad (11)$$

missä ξ_p on jännekerroin, ξ_d on vyöhykekerroin ja ξ_{sk} on vinokerroin. Jännekerroin kuvaa jänteistämisen vaikutusta käämityskertoimeen. Vyöhykekerroin puolestaan kuvaa johdinten hajaantumista staattorin kehälle. Jos koneen roottori tai staattori on rakenteeltaan viistetty, kuvaa vinokerroin sen vaikutusta käämityskertoimeen. Kaikki nämä kertoimet lasketaan erikseen jokaiselle käämityksen tuottamalle yli- ja aliaallolle. Koska käämityskerroin muodostuu useammasta kertoimesta, voidaan käämitys suunnitella siten, että eri kertoimet ovat nollia eri yliaalloilla ja täten saadaan poistettua haluttuja haitallisia yliaaltoja. (Salminen 2004: 36–37; Jokinen 1973: 19–25; Heller & Hamata 1977: 18–22.)

Tässä diplomityössä tutkittujen käämitysten käämityskertoimien laskemiseen on käytetty menetelmää, jonka on kehittänyt Stepina, joka on julkaissut aiheesta useita artikkeleita, mm. (1968), (1986) ja (1987). Menetelmä perustuu sähkökoneiden avaruusvektorteoriaan. Tällä menetelmällä voidaan matriisilaskennan avulla, tietokoneavusteisesti laskea kompleksiset käämityskertoimet nopeasti monimutkaisillekin käämityksille.

2.4. Yliaallot

Sähkökoneen ilmaväliin muodostuu magneettivuon tiheyden yliaaltoja kolmesta erisyystä. Niitä aiheuttavat epäjatkuva käämitys, ilmavälin permeanssin vaihtelut sekä epäsinimuotoinen syöttöjännite (Perho ym. 1995: 68–69). Permeanssin vaihteluita puolestaan aiheuttavat avonapainen roottori, staattorin urat sekä raudan kyllästyminen. Tässä työssä keskitytään pääasiassa epäjatkuvan käämityksen aiheuttamiin yliaaltoihin. Nämä käämityksen johdinten sijainnista aiheutuvat yliaallot ovat magnetomotorisen voiman aiheuttamia magneettivuon tiheyden tilayliaaltoja moottorin ilmavälissä.

Yliaallot aiheuttavat koneessa häviöitä ja ääntä, sekä huonontavat koneen tuottaman vääntömomentin laatua aiheuttamalla siihen värettä. Häviöitä syntyy sekä hystereesihäviöinä, että pyörrevirtahäviöinä. Vääntömomentin värettä aiheuttavat ilmavälin magneettivuontiheyden yliaallot, jotka pyrkivät reagoimaan roottorin kanssa. Koska roottori pyörii eri nopeudella kuin nämä yliaallot, syntyy sykkivää vääntömomenttia. Värettä aiheuttavat yliaallot, joiden napaluku on sama kuin roottorin, mutta pyörivät eri nopeudella. Värettä syntyy myös, jos roottori reagoi myös muiden kuin perusaallon kanssa, näin voi käydä, jos roottorin tuottaman magneettivuontiheyden jakauma ei ole sinimuotoinen, vaan sisältää myös yliaaltoja. Vääntömomentin epätasaisuutta aiheuttaa myös ns. hammasvääntömomentti. Hammasvääntömomenttia syntyy, koska roottori pyrkii sellaiseen asentoon, jossa magneettien vuon reitin reluktanssi on mahdollisimman pieni. Tämän voi todeta myös käytännössä pyörittämällä käsin kytkemättömän moottorin akselista. Hammasvääntömomenttia pyritään minimoimaan mm. staattorin napakenkien muotoilulla sekä uraluvun ja napaparimäärän valinnalla. (Puranen 2006: 22–24; Bianchi, Bolognani, Dai Pré & Grezzani 2006.)

2.4.1. Käämityksen aiheuttamat yliaallot

Yleensä kestopagneettikoneiden käämitys on jaettu tasaisesti staattorin uriin. Johtimet on sijoitettu uriin siten, että ne synnyttävät koneen ilmaväliin magneettikentän, jonka perusaallon napaparimäärä p on sama kuin roottorin. Kuten jo aikaisemmin todettiin, voidaan käämityksen suunnittelulla vaikuttaa käämityskertoimiin ja siten yliaaltojen syntymiseen. Yliaallot ovat kokovakokäämityksessä aina perusaallon kerrannaisia.

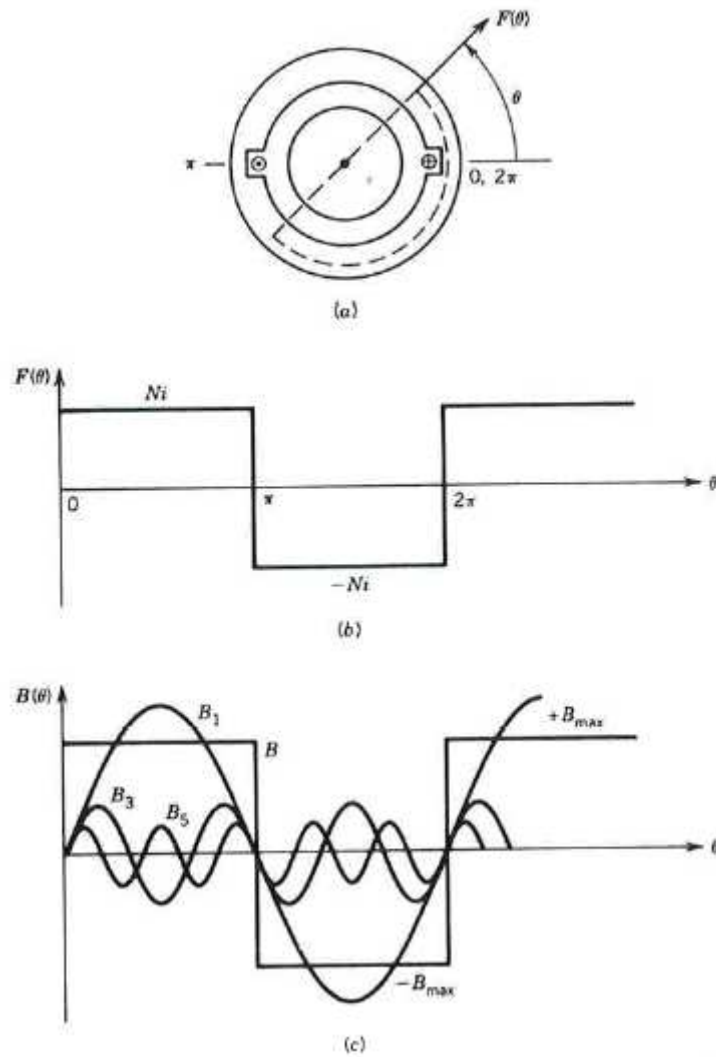
Esim. jos perusaalto on kaksinapainen, on sen viides yliaalto 10-napainen. Näiden aaltojen taajuus on kuitenkin sama. Tarkastellaan aluksi yksinkertaisinta tilannetta, eli yksi-vaiheista kokovakokäämitystä, jonka uraluku on yksi, ks. kuva 14a. Kuvaaja 14b kuvaa käämin synnyttämää magnetomotorista voimaa, mmv , koneen ilmavälin matkalla. Käämin muodostama mmv voidaan määritellä

$$F(\theta) = Ni, \quad (12)$$

missä N on käämikierrosten lukumäärä, i johtimessa kulkeva virta ja θ kulma pitkin koneen ilmaväliä. Kuvaaja 14 b on kanttiaalto eli käämitys tuottaa huomattavasti mmv :n yliaaltoja. Fourier-analyysiin perustuen voidaan päätellä, että käämitys tuottaa perusaallon lisäksi kaikkia parittomia yliaaltoja. Kuvaajaa on yksinkertaistettu olettamalla, että ura, jossa johtimet sijaitsevat on äärettömän kapea. Täten mmv :n muutos kuvaajassa on täysin askelmainen. Koneen ilmavälin magneettivuon tiheys B voidaan laskea

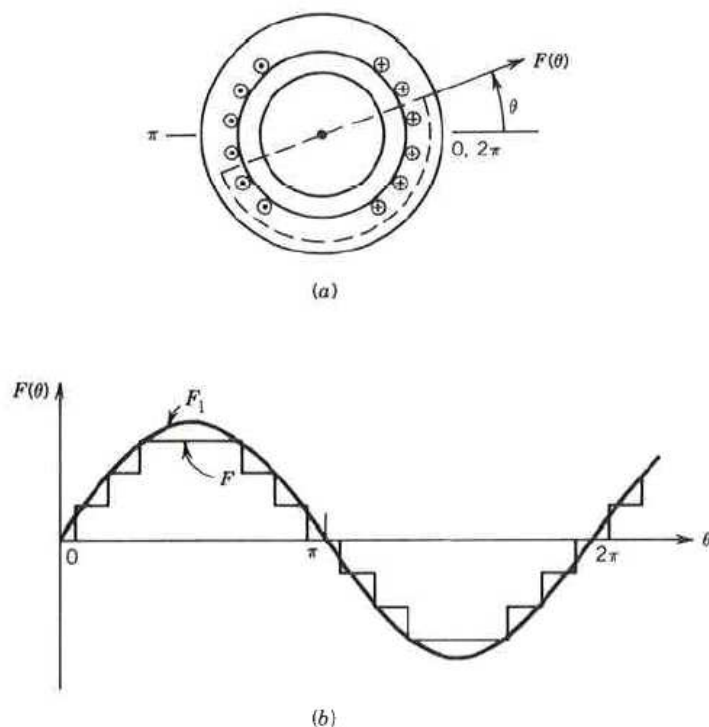
$$B(\theta) = \mu_0 \frac{Ni}{2g}, \quad (13)$$

jossa g on ilmavälin pituus. Kaavassa 13 ei huomioida staattorin selän ja roottorin reluktanssia vaan ne on jätetty yksinkertaisuuden vuoksi pois. Magneettivuon tiheys B on suoraan verrannollinen magnetomotoriseen voimaan, joten perusaalto ja yliaallot voidaan käsitellä myös B :n aaltolina. Kuvaan 14c on piirretty todellinen magneettivuontiheys B , kulman θ suhteen, sen perusaalto sekä kolmas ja viides yliaalto. (Sen 1997: 569–572; Fitzgerald ym. 1990: 162–163.)



Kuva 14. a) Yksivaiheinen staattori, jonka $q = 1$, b) sen tuottama mmv ja c) magneettivuontiheys ilmavälissä (Sen 1997: 570).

Yliaaltojen voimakkuutta pyritään yleensä pienentämään jakamalla käämi useampaan staattorin uraan. Tällöin myös perusaalto pienenee hiukan. Kuvassa 15a on yksivaiheinen kone, jonka uraluku on 6, tällöin käämityksen synnyttämä mmv on paljon lähempänä sinimuotoa, ks. kuva 15b, ja täten sisältää huomattavasti vähemmän yliaaltoja. (Sen 1997: 570.)



Kuva 15. a) Yksivaiheinen staattori, jonka $q = 6$, b) sen tuottama mmv (Sen 1997: 571).

Murtovakokäämitys, jonka vakoluku $q < 1$, tuottaa yliaaltojen lisäksi perusaaltoa pienemmän napapariluvun aliaaltoja. Murtovakokäämityksen tuottamien aaltojen napapariluvut ovat kuitenkin samat kuin kokovakokäämityksellä (1, -3, 5, -7...), joten murtovakokäämityksen moottorin perusaalto on itse asiassa käämityksen tuottama yliaalto. Kokovakokäämityksen moottorin perusaalto puolestaan on aina peruskäämityksen yksinapari-nen aalto. Sellaisen kokovakokoneen staattorikäämitys, jonka napapariluku on ykköstä suurempi, muodostuu käytännössä useasta vierekkäisestä peruskäämityksestä. Samoin myös murtovakokoneen staattori voi muodostua useasta peruskäämityksestä, tällöin kaikkien muodostuvien aaltojen napapariluvut kerrotaan peruskäämitysten lukumäärällä.

2.4.2. Kiertokentän syntyminen

Monivaiheisen tahtikoneen toiminta perustuu staattorin synnyttämään pyörivään magneettikenttään. Pyörivän magnetomotorisen voiman kentän syntymistä voidaan tarkastella yksivaiheisen staattorin synnyttämän kentän avulla. Yksivaiheisen käämityksen tai monivaiheisen käämityksen yhden vaiheen synnyttämä mmv määritellään

$$F_{a1} = \frac{4}{\pi} \xi \frac{N}{p} i_a \sin \theta . \quad (14)$$

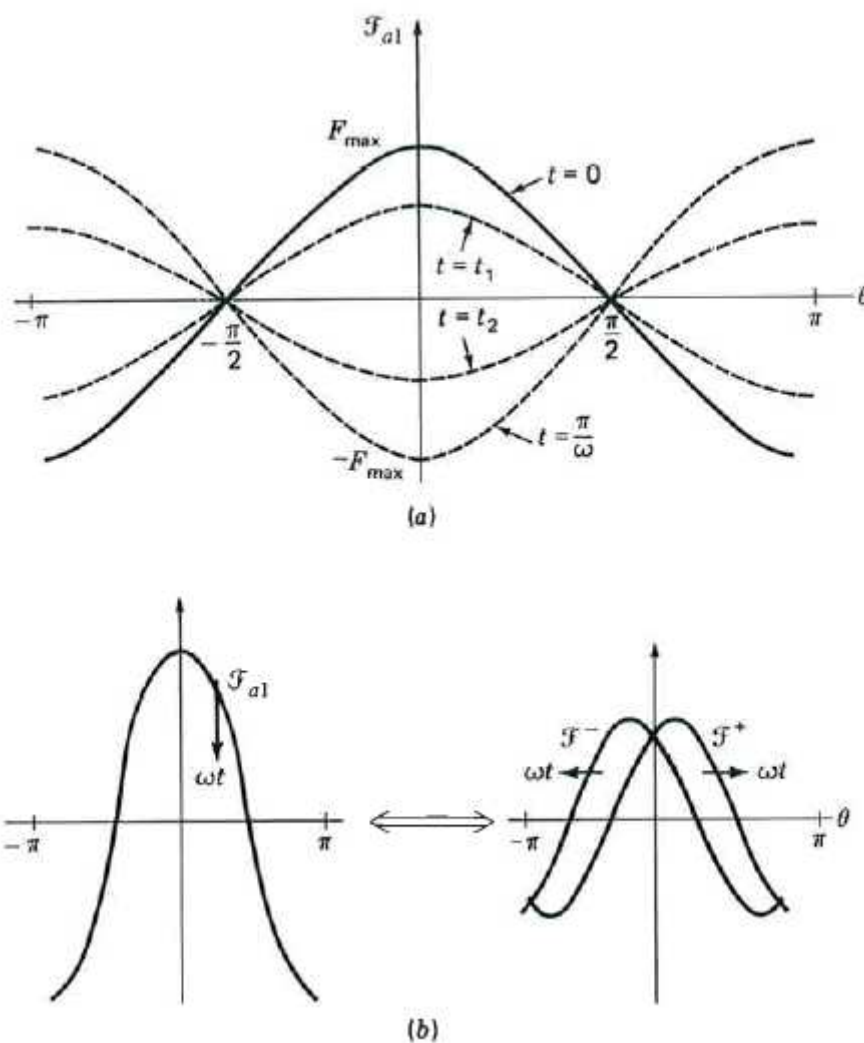
Kun tätä yksivaiheista käämitystä syötetään sinimuotoisella virralla,

$$i_a = I_a \sin \omega t , \quad (15)$$

saadaan mmv:n kaavaksi ajan ja ilmvälän kulman suhteen

$$F_{a1} = (F_{\max} \sin \theta) \sin \omega t . \quad (16)$$

Syntyvän mmv:n kentän kuvaaja on esitetty kuvassa 16a. Kuten kuvaajasta nähdään, mmv:n amplitudi vaihtelee ajan mukaan, mutta huippuarvon paikka koneen ilmvälissä pysyy jatkuvasti samana. Trigonometrian avulla voidaan johtaa, että tällaisen aallon voidaan ajatella syntyvän kahden vastakkaisiin suuntiin kulkevan sinimuotoisen aallon, joiden amplitudi on puolta pienempi, summana; ks. kuva 16b. Tämän päättelyn avulla voidaan myös päätellä kiertokentän syntyminen monivaiheisen käämityksen tapauksessa. Monivaiheisessa käämityksessä erivaiheiset käämit on sijoitettu koneen staattoriin siten, että niiden magneettiakselien väliset kulmat sähköasteissa ovat samat kuin niiden virtojen vaihe-erot (kolmivaiheisessa järjestelmässä 120°). Täten jokaisen vaiheen negatiiviseen suuntaan kulkevat mmv:n komponentit kumoavat toisensa vaihe-eron vuoksi, kun taas positiiviseen suuntaan kulkevat summautuvat keskenään muodostaen koneeseen pyörivän magneettikentän. (Fitzgerald ym. 1990: 172–181.)



Kuva 16. a) Yksivaiheisen staattorin synnyttämä mmv ajan suhteen, b) mmv:n aalto jaettuna kuvitteellisiin eri suuntiin kulkeviin mmv:n aaltoihin (Fitzgerald ym. 1990: 175).

Samalla tavalla syntyvät myös yliaaltojen pyörivät magneettikentät. Poikkeuksena vaihelukua m vastaavan napaparin ja sen kerrannaisten pyörivää magneettikenttää ei synny lainkaan. Täten kolmivaiheisessa staattorissa jää syntymättä 3,6,9... napapariset magneettikentät, vaikka niillä olisi käämityskerroin. Vastaavasti, jos staattorissa on kaksi peruskäämitystä, jää syntymättä 6,12,18... napapariset magneettikentät. Käämitysker-

toimet voidaan laskea myös kompleksilukuina, jolloin niillä on suuruuden lisäksi myös kulma. Kun lasketaan käämityskertoimien kulmat yliaallolle, joka on vaiheluvun kerrannainen, saadaan jokaisen vaiheen käämityskertoimen kulmaksi sama. Tällöin pyörivää magneettikenttää ei synny, koska käämit on sijoitettu avaruudellisesti eripuolille staattoria ja näin magneettikentän summa on nolla. Staattorin synnyttämistä eri napaparisista aalloista joka toinen kulkee vastakkaiseen suuntaan koneen ilmapälissä, myös tämä on nähtävissä käämityskertoimien kompleksisista kulmista.

2.4.3. Indusoituneen jännitteen yliaallot

Sähkökoneen pyöriessä indusoituu koneen käämeihin jännite E , koska ilmapälin läpi kulkeva magneettivuo leikkaa staattorin johtimia. Indusoitunut jännite ei ole yleensä täysin sinimuotoinen, vaan sisältää myös yliaalloja. Indusoituneen jännitteen käyrämuotoon vaikuttavat pääasiassa magneettivuon muoto moottorin ilmapälissä sekä staattorin käämitys, eli käytännössä käämityskertoimet. Varsinkin kun käytetään roottoria, jossa magneetit sijaitsevat pinnalla, on roottorin muodostama magneettivuon tiheysjakauma kaukana sinimuotoisesta, eli se sisältää paljon yliaalloja. Ilmapälin magneettivuon tiheyden voidaankin ajatella koostuvan useiden voiden, joiden napamäärät ovat erisuuruiset, summana. Täten jokainen näistä voista indusoi käämitykseen jännitteen, jonka taa-juus riippuu vuon napaparimäärästä ja voimakkuus vuon voimakkuudesta sekä käämityskertoimesta. Indusoituneen jännitteen voimakkuus voidaan laskea

$$E_h = 4.44(hf)N\Phi_h\zeta_h, \quad (17)$$

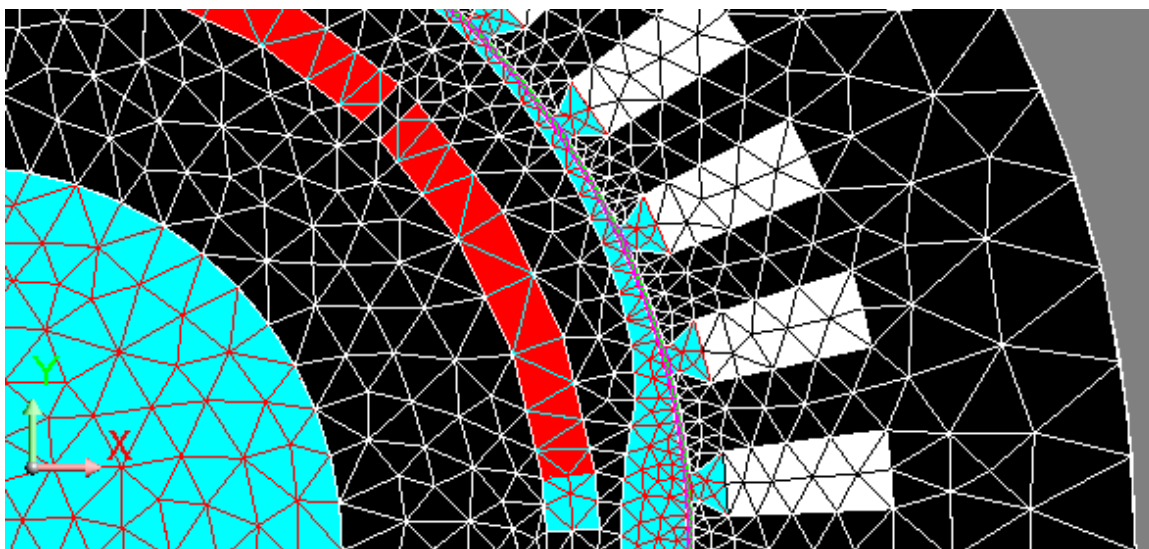
missä h on yliaallon järjestysnumero, f roottorin pyörimistaajuus, N käämikierrosten lukumäärä, Φ yhden navan magneettivuo ja ζ käämityskerroin. Käämeihin indusoitunut todellinen jännite on näiden jännitteiden summa. Käämityksen pääjännitteistä puuttuvat kuitenkin kaikki vaiheluvun kerrannaiset yliaallot, eli yleensä 3,6,9... Tämä on seurausta käämityskertoimien kompleksisista kulmista, samoin kuin käämityksen synnyttämien mmv:n kenttien tapauksessa. Vaihejännitteissä kaikki yliaallot kuitenkin esiintyvät. (Sen 1997: 578–580).

Indusoituneen jännitteen yliaaltoja voidaan vähentää joko valitsemalla käämitys, jonka käämityskertoimet ovat sellaiset, että haitalliset magneettivuon yliaallot eivät indusoidu käämitykseen. Tai muotoilemalla roottorin navat sellaisiksi, etteivät ne muodosta haitallisia magneettivuontiheyden yliaaltoja. Usein roottorin navat muotoillaan 1/sini-muotoisiksi, jolloin ne eivät tuota lähes ollenkaan yliaaltoja. Indusoituneeseen jännitteeseen kiinnitetään koneen suunnittelussa huomiota, koska se kertoo osaltaan koneen tuottaman vääntömomentin tasaisuudesta. Jos koneen tuottama jännite on puhtaasti sini-muotoista, ei roottori pyri reagoimaan staattorin mahdollisesti tuottamien mmv:n yliaaltojen kanssa ja siten koneen tuottama vääntömomentti on tasaisempaa.

3. SIMULOINTI ELEMENTTIMENETELMÄLLÄ

Elementtimenetelmällä tarkoitetaan menetelmää, jossa tutkittavan mallin geometria jaetaan useiksi pieniksi, yksinkertaisiksi paloiksi, joiden tila ratkaistaan numeerisen iteroinnin avulla. Elementtimenetelmän avulla voidaan tutkia magneettisilta ominaisuuksiltaan epälineaarisia materiaaleja ja hyvinkin monimutkaisia geometrioita käsittäviä malleja. Sillä saadaan tarkkoja tuloksia, kunhan käytetään riittävän tiheää elementtiverkkoa. Elementtimenetelmä vaatii paljon laskentatehoa ja siksi sen käyttö on vasta nykyään yleistymässä jokapäiväisessä koneensuunnittelussa, analyttisten menetelmien kustannuksella. Täysin uusien rakenteiden ja geometrioiden suunnittelussa sitä on kyllä käytetty pidempäänkin, johtuen sen ylivoimaisista ominaisuuksista analogisiin malleihin verrattuna. Analogiset laskentamallit sisältävät paljon yksinkertaistuksia ja kokeusperäisiä korjauskertoimia, ja siksi ne soveltuvat huonosti uusien ja monimutkaisten geometrioiden tutkimiseen. (Hameyer & Belmans 1999: 1–4.)

Elementtimenetelmän huono puoli on sen hitaus. Laskenta-ajan lisäksi aikaa kuluu myös laskettavan mallin määrittämiseen ja lasketun mallin analysointiin. Laskettavan mallin geometrian ja elementtiverkon määrittäminen on aikaa vievä prosessi. Elementtiverkko tulee määrittää mahdollisimman tiheäksi tuloksen kannalta tärkeimmistä paikoista, jotta lopputulos olisi riittävän tarkka. Tärkeitä paikkoja ovat sähkökoneessa mm. ilmaväli ja muut pikkutarkat kohdat, joissa kulkee suuri vuo. Vähemmän tärkeissä paikoissa elementtiverkko pyritään jättämään harvemmaksi, jottei laskenta-aika nouse kohtuuttoman suureksi. Kuvassa 17 on esitetty erään työssä käytetyn mallin elementtiverkko. Kun elementtiverkko on valmis, määritellään laskettavan mallin fysikaaliset ominaisuudet, kuten materiaalit, materiaalien ominaisuudet, johtimet, virta- tai jännitelähteet sekä kappaleiden liikkeet toisiinsa nähden, kuten roottorin pyöriminen staattoriin nähden. Kun malli on ratkaistu laskemalla, saadaan jälkikäsitteilyohjelman avulla selville halutut suureet, esim.: magneettivuoto, vuontiheydet ilmavälissä, käämityksen virrat ja jännitteet sekä staattorin ja roottorin välinen vääntömomentti. (Hameyer & Belmans 1999: 5–16.)



Kuva 17. Erään työssä käytetyn mallin elementtiverkko. Tässä kaksiulotteisessa mallissa on käytetty kolmion muotoisia elementtejä.

Elementtimenetelmällä voidaan ratkaista sekä kaksi- että kolmiulotteisia geometrioita. Mallinnettavasta rakenteesta riippuu, kumpaa näistä käytetään. Jos malli on yhden koordinaatiston akselin suuntaa leikkaavassa tasossa jatkuvasti samanlainen, voidaan se määrittää kaksiulotteisena. Avaruudellisesti monimutkaisempi malli määritellään kolmiulotteisena. Kaksiulotteista mallia pyritään käyttämään aina kun se on mahdollista, koska tällöin elementtien määrä ja siten laskenta-aika on huomattavasti pienempi, tai vastaavasti samassa ajassa pystytään ratkaisemaan huomattavasti tarkempi malli. Esim. tavallinen radiaalivuokone voidaan mallintaa kaksiulotteisena, jos kääninpäitä ei tarvitse mallintaa. Tässä työssä täytyi kuitenkin käyttää kolmiulotteista mallia silloin, kun haluttiin mallintaa sekä pää- että tuuletinroottori yhtä aikaa. Mallia voidaan yksinkertaistaa myös symmetrian perusteella, esim. koneesta voidaan mallintaa vain yhden navan alue. Tällöin alueen rajoille tulee määrittellä reunaehdot, jotta saadaan oikea tulos.

Tässä työssä oli tarkoitus tutkia elementtimenetelmän avulla kaksiroottorista rakennetta. Tarkoituksena oli ensin tutkia alkuperäistä prototyyppiä ja selvittää miksi se ei toiminut ja millä muutoksilla se saataisiin toimimaan. Lisäksi oli tarkoitus tutkia roottoreiden kykyä tuottaa vääntömomenttia ja tutkia miten ne reagoivat toisiinsa. Haluttiin myös

tukia, pätevätkö perinteiset analyttiset laskentakaavat kahden roottorin tapauksessa, vai tarvitaanko niihin muutoksia. Tässä työssä simuloinnit tehtiin Cedratin Flux2D 9.2.2 ja Flux3D 3.30 ohjelmilla.

3.1. Alkuperäinen prototyyppikone

Alun perin idea tähän koneeseen oli lähtenyt siitä, että jotkut murtovakokäämitykset tuottavat voimakkaita aliharmonisia magnetomotorisen voiman kenttiä. Täten voisi olla mahdollista saada toinen roottori pyörimään nopeammin saman staattorin sisällä. Tämän idean pohjalta oli ABB Motorsin Vaasan tehtaalla rakennettu prototyyppikone. Tätä prototyyppiä ei kuitenkaan ollut saatu toimimaan halutulla tavalla. Ongelmana oli, että tuuletinroottoria ei saatu pyörimään sille ominaisella nopealla nopeudella, vaan se vain täräsi ja jäi pyörimään pääroottorin nopeudella. Tässä vaiheessa sain tämän tutkimusaiheen, ja tarkoitukseni oli ensin tutkia miksi prototyyppi ei toiminut.

Prototyyppikone on 132-runkokoon valurautarunkoon valmistettu murtovakokäämitty kestopagneettitahtikone. Koneen kilpiarvot ja tärkeimmät mitat on lueteltu taulukossa 3. Kilpiarvot koskevat konetta ilman tuuletinroottoria, tosin tuuletinroottorin vaikutus niihin olisi vähäinen. Valokuvia prototyyppikoneesta on luvussa 4. Koneen pääroottori on 17-napaparinen ja tuuletinroottori yksinapaparinen. Näin pääroottorin pyörimisnopeus nimellistaajuudella on 250 kierrosta minuutissa ja tuuletinroottorin 4254 kierrosta minuutissa. Myös vaihtoehtoinen 5-napaparinen tuuletinroottori oli valmistettu, sen pyörimisnopeus on 851 kierrosta minuutissa. Sekä pääroottorissa, että alkuperäisissä tuuletinroottoreissa magneetit sijaitsevat roottorin pinnalla. Magneetit ovat neodyymi-rauta-boori-magneetteja. Sekä staattori, että pääroottori on valmistettu M600-50A-sähköteräslevyistä. Alkuperäiset tuuletinroottorit olivat massiivirunkoisia, mutta simulointien helpottamiseksi tässä työssä roottorit mallinnettiin käyttäen materiaalina M600-50A-sähköteräslevyä.

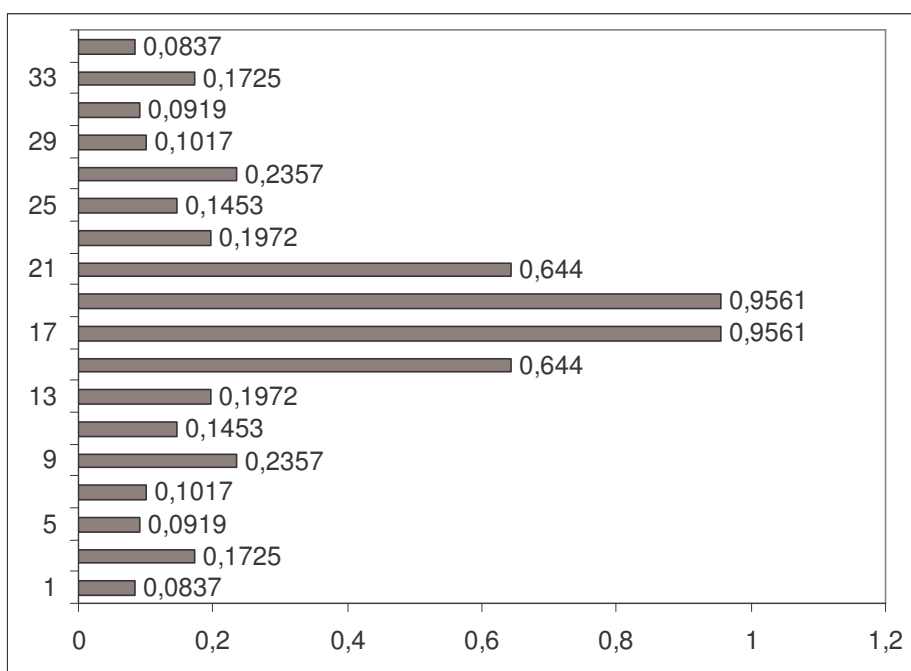
Taulukko 3. Prototyypimoottorin kilpiarvot ja tärkeimmät mitat.

P_{out}	3,15 kW
U, Y	380 V
F	70,9 Hz
I	7,5 A
$\cos \varphi$	0,9 Ind
T_N	120 Nm
Staattorin ulkohalkaisija	200 mm
Staattorin sisähalkaisija	125 mm
Ilmaväli	0.6 mm
Magneettien paksuus	4 mm
Pääroottorin pituus	180 mm
Tuuletinroottorin pituus	10 mm
Staattorin uraluku Q	36
Vakoluku q	0,353
Johtimia urassa	58

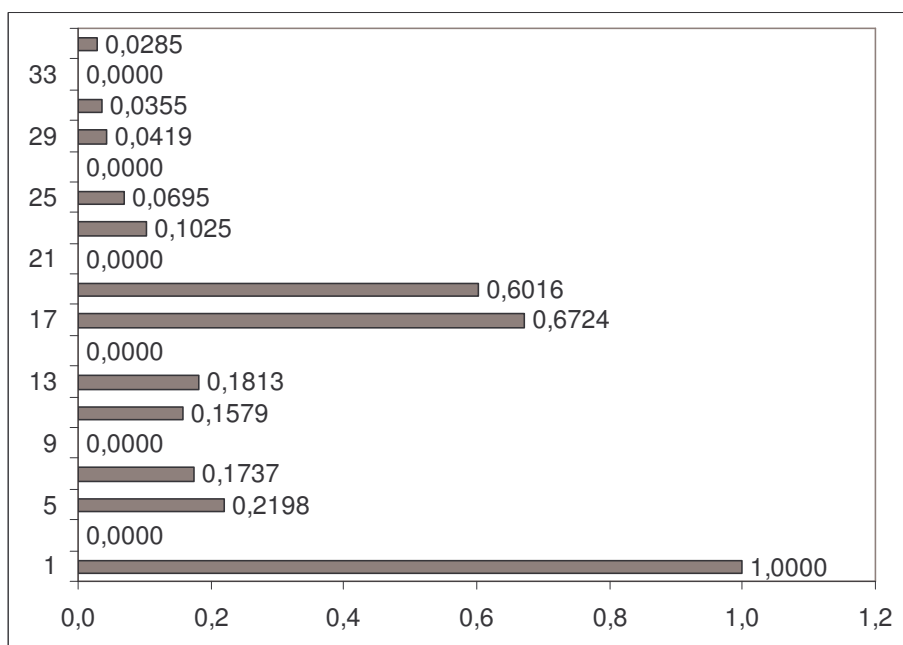
Prototyypikoneen käämitys on yksikerroksinen murtovakokäämitys, joka on suunniteltu pääroottorille uratähden avulla. Käämityksen johdinnippujen vaihejärjestys staattorin urissa on

+A, -A, +A, -A, +A, -A, -C, +C, -C, +C, -C, +C, +B, -B, +B, -B, +B, -B, -A, +A, -A, +A, -A, +A, +C, -C, +C, -C, +C, -C, -B, +B, -B, +B, -B, +B.

Käämityksen käämityskertoimet eri napaparimäärille on laskettu matriisilaskennalla, Stepinan menetelmällä ja ne on esitetty kuvassa 18. Kuvassa 19 puolestaan on suhteelliset mmv:n kenttien voimakkuudet eri napaparimäärille. Vaikka käämityksen yksinaparinen käämityskerroin on pieni, se synnyttää suhteellisen voimakkaan mmv:n kentän, koska mmv:n voimakkuus on kääntäen verrannollinen napaparimäärään. Kuvasta 19 nähdään, että voimakkaimmat mmv:n kentät syntyvät napaparimäärille 1, 17 ja 19. Täten tämä käämitys soveltuu hyvin kaksiroottoriseen koneeseen.



Kuva 18. Prototyypikoneen käämityskerroimet eri napaparimäärille.



Kuva 19. Prototyypikoneen käämityksen tuottamat mmv:n suhteellisarvot.

3.2. Simuloinnit

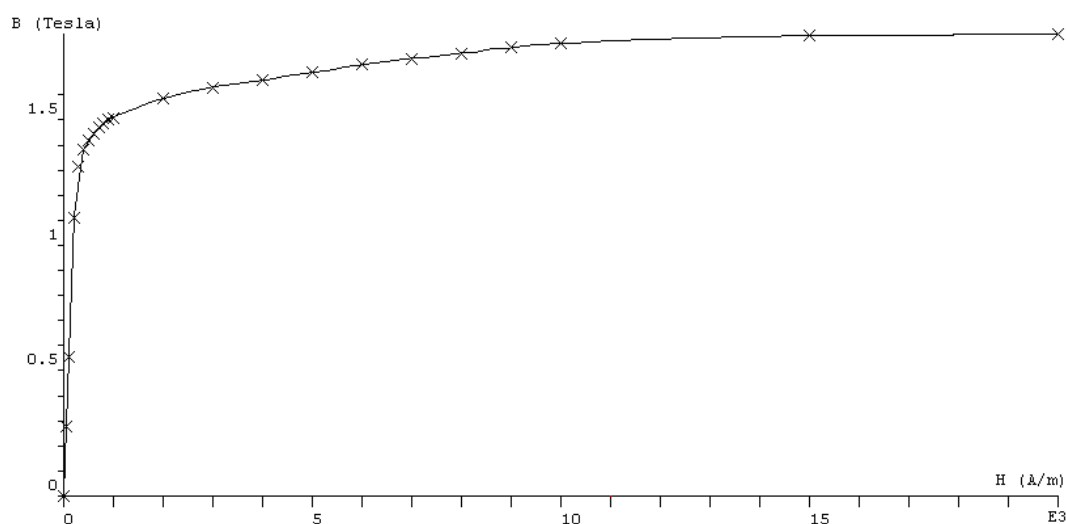
Kaikki simuloinneissa käytetyt mallit on tehty alkuperäisen prototyypimoottorin pohjalta. Moottorista tehtiin useita kaksi- ja kolmiulotteisia yhden roottorin malleja eri roottoreille. Lisäksi tehtiin kolmiulotteisia kahden roottorin malleja, joissa tuuletinroottori vaihtui, mutta pääroottori pysyi samana. Kaksiulotteisia malleja käytettiin tuuletinroottorien tutkimiseen ja suunnittelemiseen sekä käämityksen tuottaman magneettivuontiheyden tutkimiseen. Kolmiulotteisia malleja käytettiin, kun tutkittiin koneen käyttäytymistä kahdella roottorilla. Lisäksi kaksiulotteisia malleja käytettiin kolmiulotteisten mallien tulosten varmistamiseen ja vertailemiseen. Koska kaksiulotteisten mallien laskeminen on huomattavasti nopeampaa ja tulokset tarkempia, käytettiin niitä aina kun se oli mahdollista.

Mallit eivät täysin vastaa todellisuutta, vaan niitä on joiltain osin yksinkertaistettu, jotta laskenta-aikaa saadaan lyhyemmäksi. Yksinkertaistukset on pyritty tekemään siten, että ne vaikuttavat tuloksiin mahdollisimman vähän. Käytetyt yksinkertaistukset ovat joidenkin materiaalien määrittelemisen magneettisilta ominaisuuksiltaan lineaarisiksi sekä geometrian yksinkertaistaminen. Kaikki kestopagneettimateriaalit sekä kolmiulotteisissa malleissa käytetty pääroottorin rauta on määritelty magneettisilta ominaisuuksiltaan lineaarisiksi. Geometriaa on yksinkertaistettu mm. magneettien osalta sekä jättämällä kolmiulotteisesta mallista kääminpäät ja roottorien välinen alue mallintamatta. Pintamagneetit muodostuvat todellisuudessa suorakulmaisen särmiön muotoisista paloista, mutta ne on mallinnettu tasaisena kaarevana kerroksena roottorin pinnalla. Vaikka roottoreiden välinen alue on jätetty mallintamatta kolmiulotteisesta mallista, sitä on tutkittu erikseen yksinkertaistetulla kaksiulotteisella simuloinnilla.

Suurempien yksinkertaistusten lisäksi kolmiulotteisissa malleissa on käytetty huomattavasti harvempaa elementtiverkkoa verrattuna kaksiulotteisiin malleihin. Tästäkin huolimatta kolmiulotteiset mallit olivat hitaita laskea, monimutkaisimmissa malleissa laskenta-aika oli useampi vuorokausi. Laskenta-aikaa nosti myös se, että malleja ei yksinkertaistettu symmetrian avulla, vaan koko kone mallinnettiin. Symmetrian käyttämisestä ei olisi tämän koneen tapauksessa saavutettu suurta etua, koska tuuletinroottori oli vain kaksinapainen ja symmetrian käyttämisestä saadaan sitä suurempi hyöty, mitä mo-

ninapaisempi mallinnettava kone on. Tässä käytettyjen kolmiulotteisten mallien tuloksia ei voida pitää kovin tarkkoina, yksinkertaistuksista ja harvasta elementtiverkosta johtuen. Mutta koska kyseessä on kaksiroottorisen koneen yleinen tutkiminen, eikä tietyn yksittäisen moottorin tutkiminen, voidaan tarkkuutta pitää varmasti riittävänä.

Simulointimalleissa käytettiin staattorin ja tuuletinroottorin materiaalina M600-50A-sähköteräslevyä sekä magneetteina neodyymi-rauta-boori-magneetteja. M600-50A-sähköteräslevy mallinnettiin magneettisilta ominaisuuksiltaan epälineaarisenä ja sen magnetoitumiskäyrä on esitetty kuvassa 20. Kolmiulotteisissa malleissa pääroottorin rauta mallinnettiin kuitenkin magneettisilta ominaisuuksiltaan lineaarisena, koska kylästymisen vaikutus on pääroottorissa hyvin pieni. Myös kestopagneetit mallinnettiin magneettisilta ominaisuuksiltaan lineaarisina, koska niiden suhteellinen permeabiliteetti on pieni. Magneettien remanenssivuontiheydeksi asetettiin 1,1 T ja suhteelliseksi permeabiliteetiksi 1,04.



Kuva 20. Simuloinneissa käytetyn, magneettisilta ominaisuuksiltaan epälineaarisen teräksen BH-käyrä.

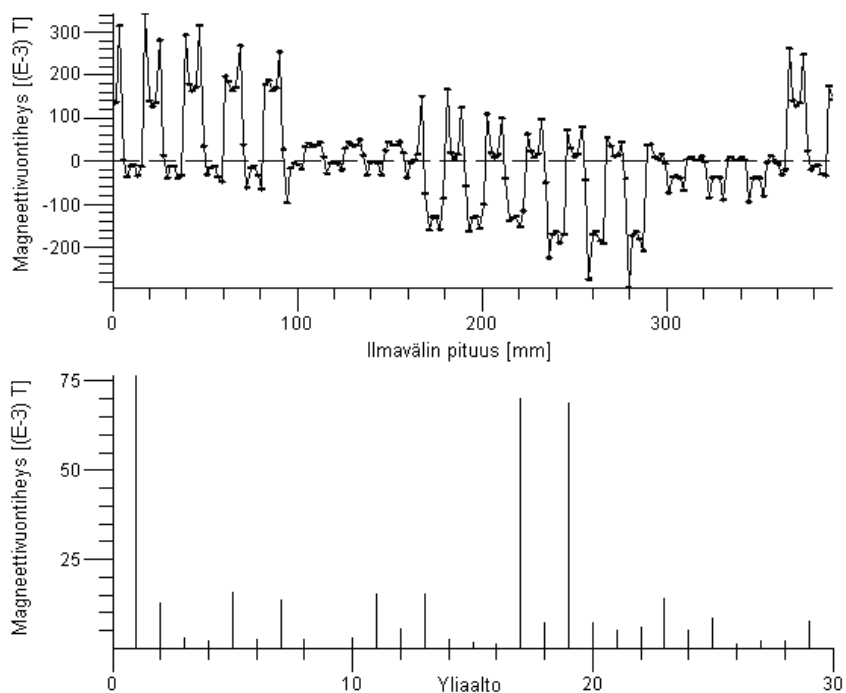
3.2.1. Käämityksen synnyttämä magneettikenttä

Ensimmäisessä simuloinnissa tutkittiin käämityksen tuottaman mmv:n yliaaltosisältöä ja verrattiin tulosta analyttisesti laskettuihin arvoihin. Moottorin ilmaväliin muodostuva magneettivuontiheys on suoraan verrannollinen käämityksen tuottamaan mmv:aan, jonka puolestaan määrää käämityskertoimet. Simuloinnissa tutkittiinkin magneettivuontiheyttä koneen ilmavälissä ja siitä laskettiin FFT:llä eli nopealla Fourier-muunnoksella yliaaltosisältö. Yliaaltosisältö kuvaa käämityksen synnyttämien eri napaparisten kenttien voimakkuuksia.

Simuloinnissa käytettiin kaksiulotteista mallia, johon syötettiin sinimuotoista nimellistä virtaa yhden jakson ajan. Mallista oli jätetty kestopagneetit pois, koska haluttiin mitata vain käämityksen synnyttämä magneettivuontiheys. Kestomagneettimateriaalit korvattiin simuloinnissa ilmalla, koska kestopagneettien ja ilman suhteelliset permeabiliteetit ovat lähes samat. Kuvassa 21 on kuvattuna magneettivuontiheys ilmavälin suhteen sekä siitä laskettu yliaaltosisältö. Kuvasta nähdään, että yliaaltosisältö vastaa analyttisesti laskettua, vertaa kuva 19. Magneettivuontiheyden kuvaajaa tutkittiin useilla eri ajanhetkillä, jolloin kuvaajan muoto muuttui, mutta yliaaltosisältö pysyi lähes samana. Kuvaajasta nähdään myös staattorinhampaiden aiheuttamat terävät piikit, jotka pysyvät samoilla paikoilla myös eri ajanhetkinä.

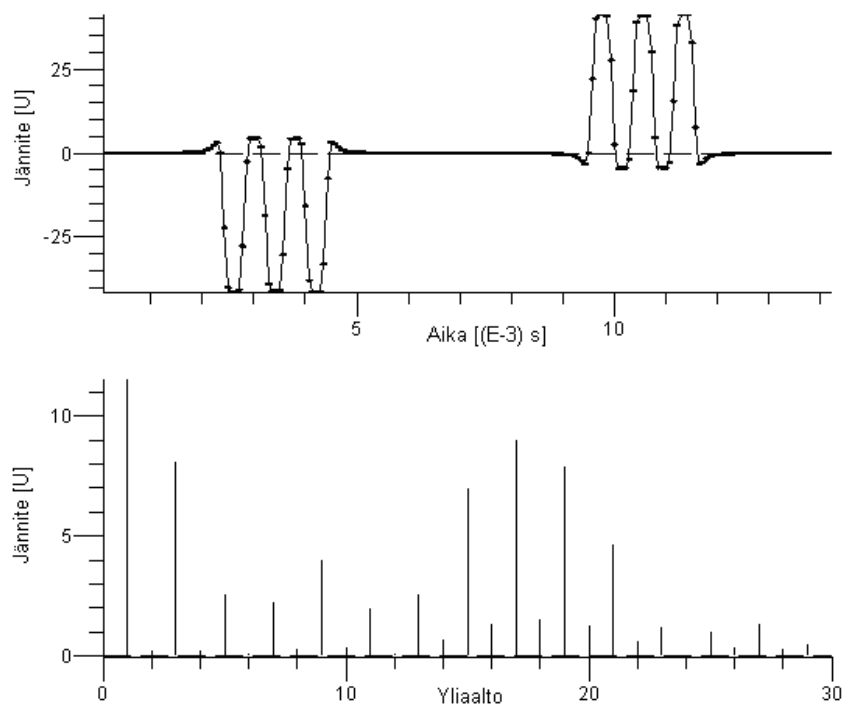
3.2.2. Alkuperäisen tuuletinroottorin tutkiminen

Tarkoitus oli tutkia aluksi alkuperäisen prototyypin kaksinapaista tuuletinroottoria ja pyrkiä selvittämään syitä, miksi se ei käynnistynyt. Tuuletinroottori mallinnettiin kaksiulotteisena. Kaksiulotteisen mallin ongelmana tässä tilanteessa on, että staattorin selkä kyllästyy enemmän kuin todellisuudessa. Tämä johtuu siitä, että todellisuudessa osa kestopagneettien tuottamasta vuosta pääsee kulkemaan pääroottorin kohdalla olevaa staattorin selkää pitkin. Tätä on pyritty kompensoimaan mallintamalla kaksiulotteisen mallin staattorinselkä todellista paksummaksi.



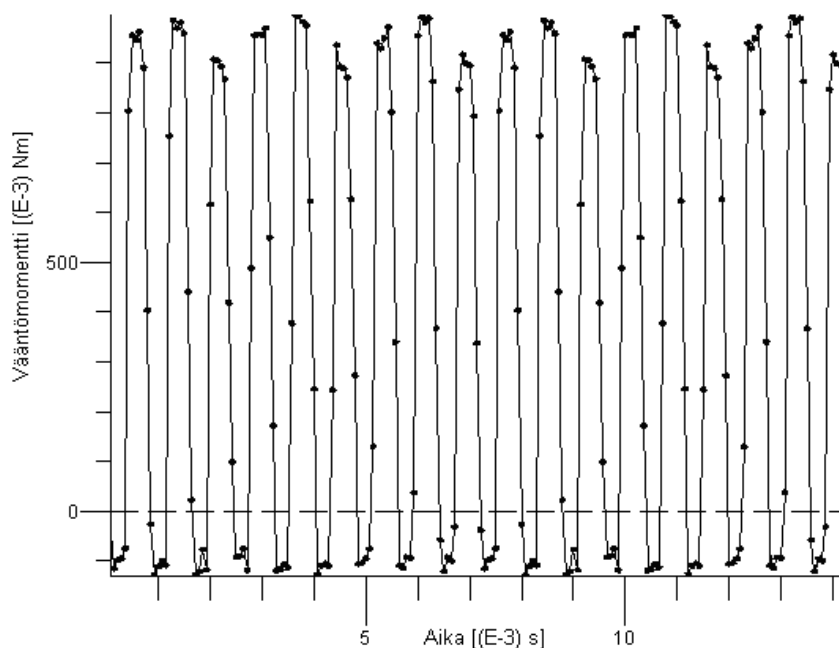
Kuva 21. Magneettivuontiheys koneen ilmavälistä mitattuna ja siitä FFT:llä laskettu yliaaltosisältö.

Ensimmäiseksi simuloitiin sähkömotorisen voiman moottorin käämeihin indusoima jännite roottorin nimellinopeudella, ks. kuva 22. Samanlainen jännitteen kuvaaja saatiin myös mittaamalla todellisesta prototyypistä, tätä on käsitelty luvussa 4.1. Kuvasta 22 nähdään, että indusoitunut jännite on kaukana puhtaasta sinimuotoisesta jännitteestä ja että se sisältää voimakkaita harmonisia yliaaltoja. Indusoituvan jännitteen määräävät magneettivuon eri napapariset yliaallot ja käämityskertoimet, kuten luvussa 2.4.3 on kuvattu. Koska tässä roottorissa on pintamagneetit ja roottori on kaksinapainen, voidaan roottorin muodostaman magneettivuontiheyden ilmavälin matkalla ajatella olevan lähes kanttiaalto. Fourier-analyysillä voidaan todeta, että kanttiaalto muodostuu kaikkien parittomien napaparisten kenttien summana. Indusoitunut jännite näyttää olevan teorian mukainen, koska se sisältää kaikkia parittomia yliaaltoja, joilla on suuri käämityskerroin.



Kuva 22. Tuuletinroottorin nimellisnopeudella yhden vaiheen käämeihin indusoitunut jännite ja sen FFT.

Tuuletinroottorilla näyttäisi näin ollen olevan myös 17:ta ja 19:ta napaparisuutta, mikä saattaa haitata sen toimintaa, koska se pyrkii reagoimaan staattorin tuottamien voimakkaimpien, hitaammin pyörivien, kenttien kanssa. Tätä tutkittiin simuloimalla tuuletinroottoria tilanteessa, jossa konetta syötetään roottorille q-suuntaisella, sinimuotoisella nimellisvirralla ja mitataan roottorin akselilta vääntömomentti. Kuvasta 23 nähdään, että roottorin tuottama vääntömomentti on hyvin epätasaista. Keskimääräinen vääntömomentti näyttää riittävän voimakkaalta jatkuvassa tilanteessa, mutta käynnistystilanne saattaa aiheuttaa ongelmia, jos roottorin tuottama vääntömomentti riippuu roottorin asennosta. Siksi haluttiin vielä selvittää riippuuko vääntömomentti roottorin asennosta vai onko se vain aikariippuvainen. Tätä pyrittiin selvittämään simuloimalla käynnistystilannetta.



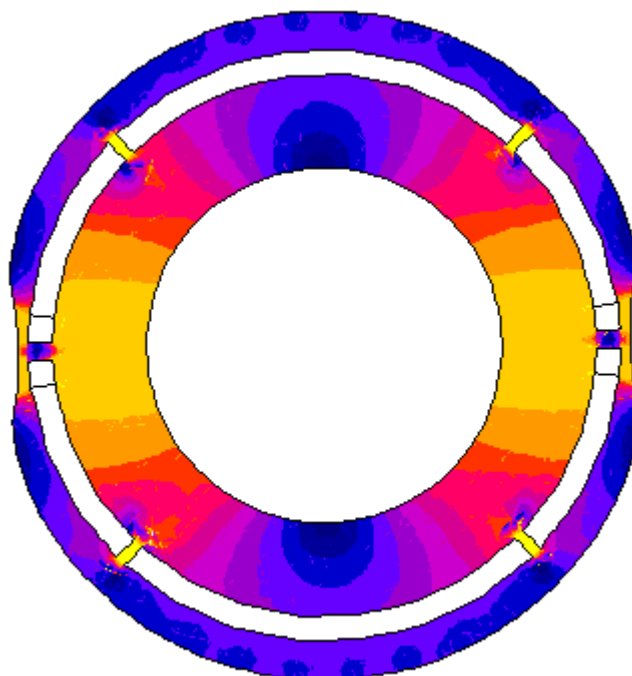
Kuva 23. Tuuletinroottorin tuottama vääntömomentti yhden jakson aikana.

Käynnistystilannetta simuloitiin siten, että koneelle syötettiin sinimuotoista nimellisvirtaa, mutta roottori pidettiin paikoillaan. Simuloinnissa mitattiin roottorin tuottama vääntömomentti ja simulointi tehtiin useilla eri tuuletinroottorin asennoilla. Tuloksista huomattiin, että osalla roottorin asennoista tuotettu vääntömomentti oli suuri, kun taas toisilla asennoilla roottori ei tuottanut lähes ollenkaan vääntömomenttia. Tästä voidaan päätellä, että roottorin tuottama vääntömomentti riippuu roottorin asennosta ja että kyseisellä roottorimallilla voi olla suuria vaikeuksia lähteä pyörimään.

3.2.3. Uusi tuuletinroottori A

Seuraavaksi tehtävänä oli suunnitella parempi roottori, jolla ei olisi käynnistymisongelmia. Päämääränä oli siis roottori, joka tuottaa mahdollisimman tasaisen vääntömomentin, eli reagoi mahdollisimman vähän staattorin yliaaltokenttiin. Roottoria lähdettiin suunnittelemaan simuloimalla useita erilaisia muunnoksia roottorigeometriasta. Huomattiin, että indusoituneet korkeat yliaallot pienenevät, kun ilmväliä suurennettiin

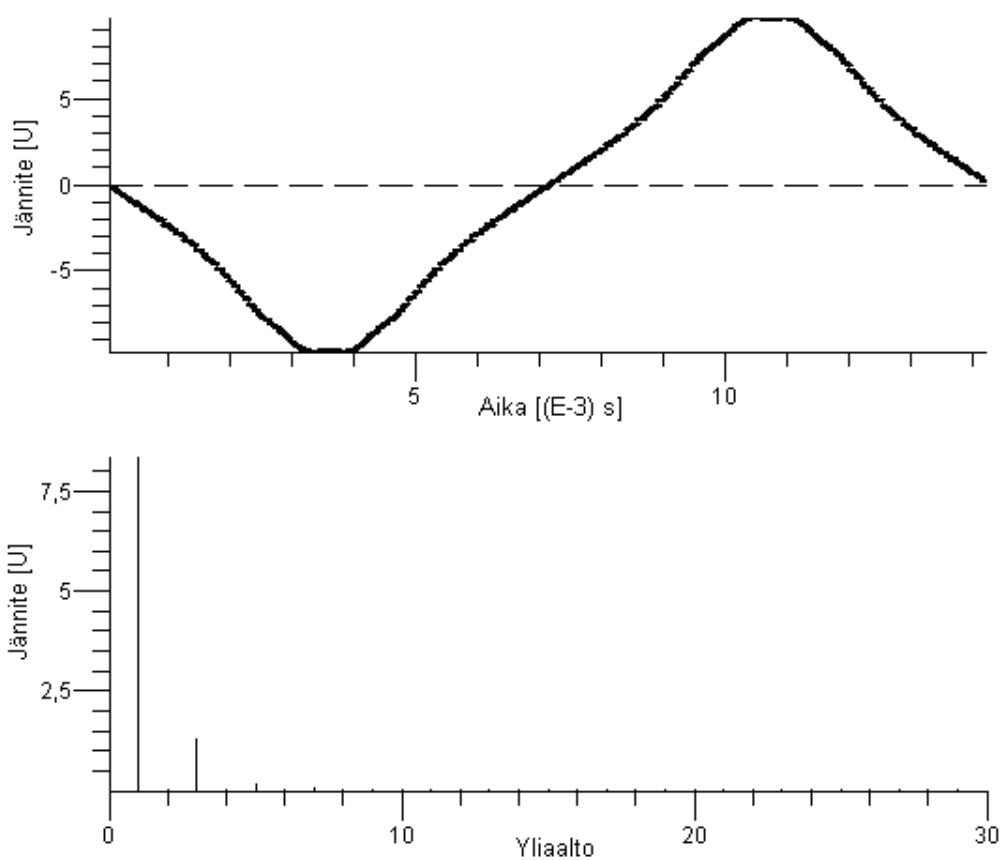
napojen vaihtumiskohdalta. Toisaalta, jos napoja kavennettiin, voimistui kolmas yliaalto merkittävästi. Lopulta päädyttiin muotoon, jossa ilmaväli on 1/sini-muotoinen, jolloin magneettivuontiheys roottorin ilmavälin matkalta on puhtaasti sinimuotoinen. Tällöin mikään yliaalto ei indusoidu käämitykseen, eikä roottori siten reagoi minkään yliaallon kanssa. Rakenteesta suunniteltiin sellainen, että magneetit upotettiin roottorin sisälle. Lopullinen malli, josta myös rakennettiin prototyyppi, on esitetty kuvassa 24. Käytetään tästä roottorista nimitystä: ”uusi tuuletinroottori A”.



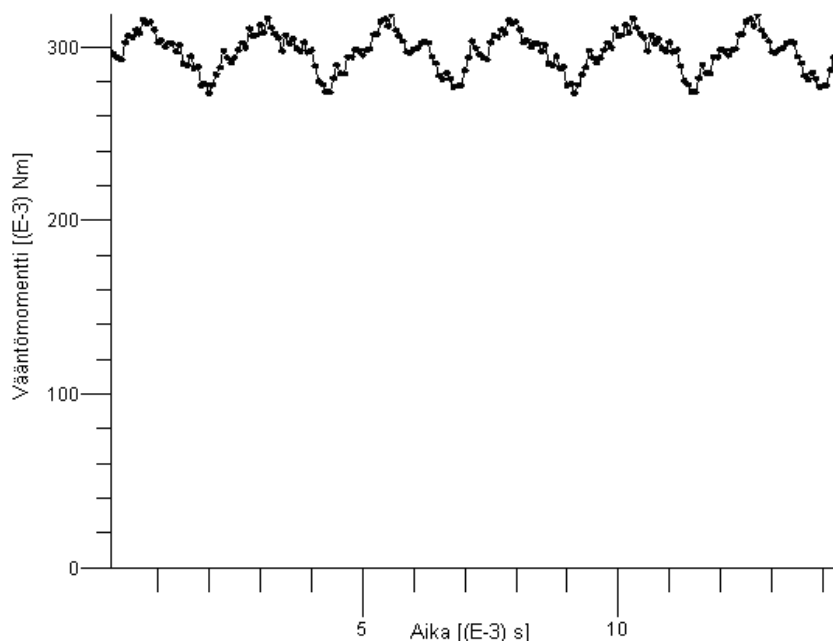
Kuva 24. Uusi tuuletinroottori A. Kuvaan on myös merkitty kestopagneettien aiheuttama magneettivuontiheys roottoriraudassa (keltainen suurin).

Kuvassa 25 on esitetty uuden tuuletinroottorin A, indusoima jännite. Kuvasta nähdään, että jännite on lähempänä sinimuotoista ja sisältää siten hyvin vähän yliaaltoja alkuperäiseen roottoriin verrattuna. Kuvassa 26 on puolestaan roottorin tuottama vääntömomentti, joka on huomattavasti tasaisempaa kuin alkuperäisen roottorin tuottama. Tämän

roottorin huonona puolena näyttää olevan hieman pienempi keskimääräinen vääntömomentti, mikä johtuu pienemmästä kokonaisvuosta. Roottorin kokonaisvuo on pienempi kahdesta syystä. Koska magneetit ovat upotettuja, niitä mahtuu roottoriin vähemmän ja tällöin kokonaisvuo pienenee. Lisäksi magneetit ovat lähempänä roottorin keskustaa, jolloin vuolla on vähemmän tilaa kulkea ja tällöin raudan kyllästyminen heikentää vuon kulkua.



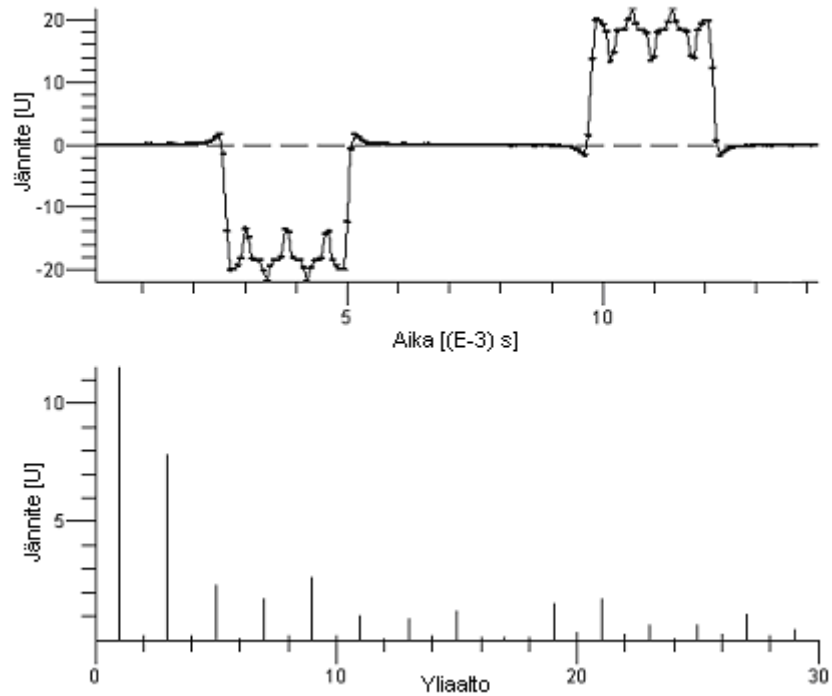
Kuva 25. Uuden tuuletinroottorin A, yhden vaiheen käämeihin indusoitunut jännite ja sen FFT.



Kuva 26. Uuden tuuletinroottorin A, tuottama vääntömomentti yhden jakson aikana.

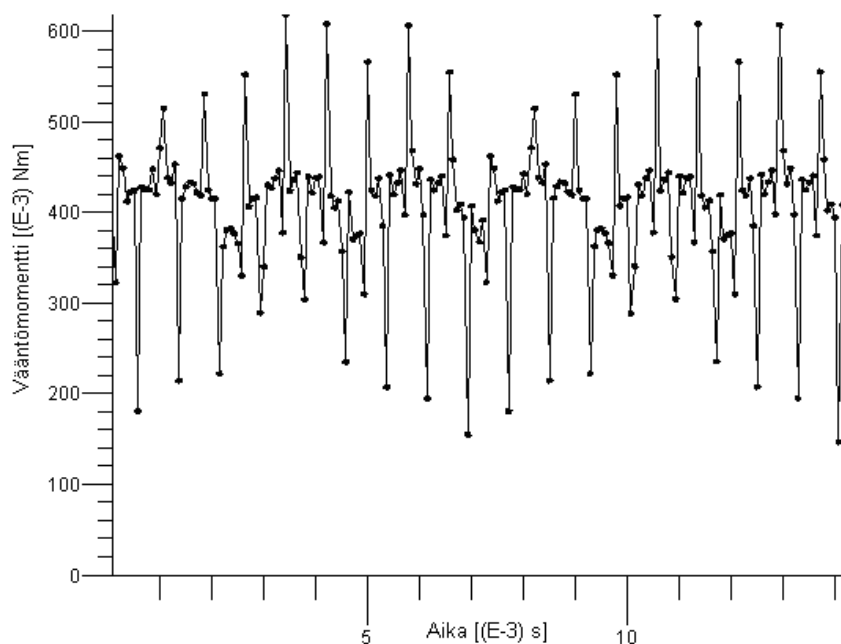
3.2.4. Uusi tuuletinroottori B

Mainittakoon, että myös toisenlainen uusi tuuletinroottori kehitettiin, tosin paljon edellä kuvattua myöhemmin. Tässä toisessa vaihtoehdossa magneetit sijaitsevat roottorin pinnalla ja roottorin rungon muoto vastaa alkuperäistä kaksinapaista roottoria. Ainoa ero alkuperäiseen on, että magneettinapojen leveydet eivät ole yhtä suuret, vaan toinen napa on 1/17 osan alkuperäistä napaa leveämpi ja toinen vastaavasti kapeampi. Tämä aiheuttaa sen, että roottorilla ei enää ole 17 napaparisuutta. Tämän roottorin ominaisuudet ovat hyvin lähellä alkuperäisen roottorin ominaisuuksia, mutta roottori ei reagoi voimakkaimpien staattorin muodostamien yliaaltokenttien kanssa. FFT:n avulla nähdään, että magneettien ilmapäliin muodostama magneettivuontiheysjakauma ei sisällä lainkaan 17-napaparista yliaaltoja ja 19-napaparin yliaalto on hyvin heikko. Tästä johtuen myös indusoituneen jännitteen yliaaltosisältö on huomattavasti vähäisempi, vaikka se silti sisältää pienemmän napapari-luvun yliaaltoja, katso kuva 27. Käytetään tästä roottorista nimitystä: ”uusi tuuletinroottori B”.



Kuva 27. Uuden tuuletinroottorin B, yhteen vaiheeseen indusoima jännite.

Myös tämän roottorin tuottamaa vääntömomenttia tutkittiin simuloimalla. Kuvasta 28 nähdään, että vääntömomentti on huomattavasti tasaisempaa verrattuna alkuperäiseen tuuletinroottoriin, muttei kuitenkaan yhtä tasaista kuin uuden tuuletinroottorin A tuottama vääntömomentti. Vääntömomentin epätasaisuus johtuu siitä, että roottori pyrkii vielä reagoimaan muiden, heikompien yliaaltokenttien kanssa. Uuden tuuletinroottorin B hyviä puolia, verrattuna uuteen tuuletinroottoriin A, ovat yksinkertainen rakenne sekä suurempi tuotettu keskimääräinen vääntömomentti.



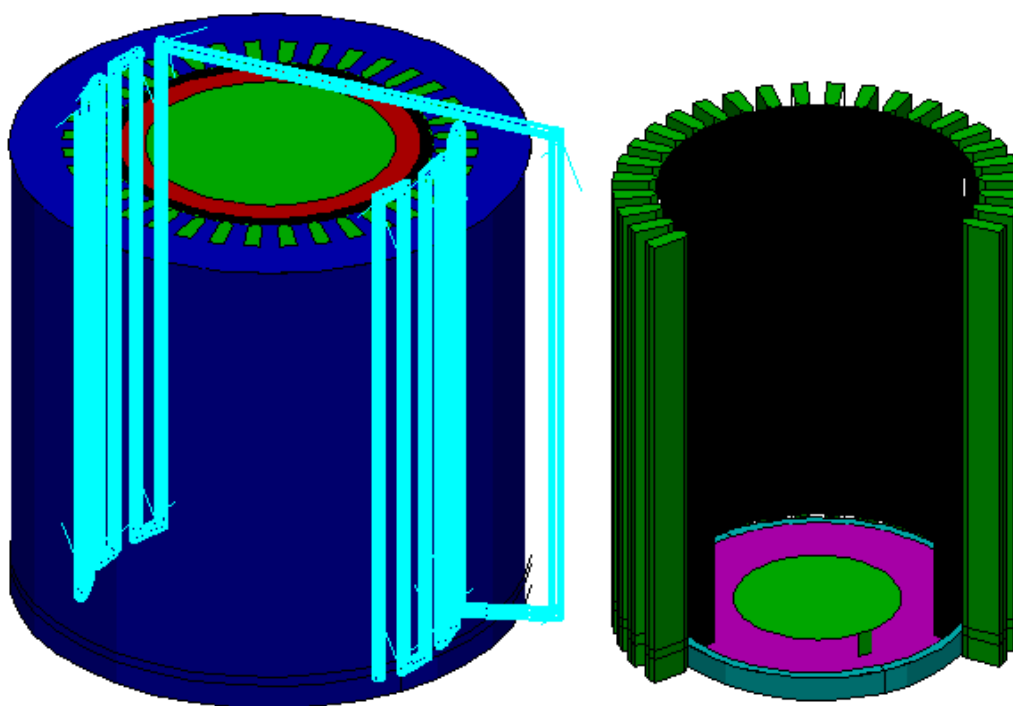
Kuva 28. Uuden tuuletinroottorin B, tuottama vääntömomentti.

3.2.5. Kaksiroottorisen rakenteen kolmiulotteinen simulointi

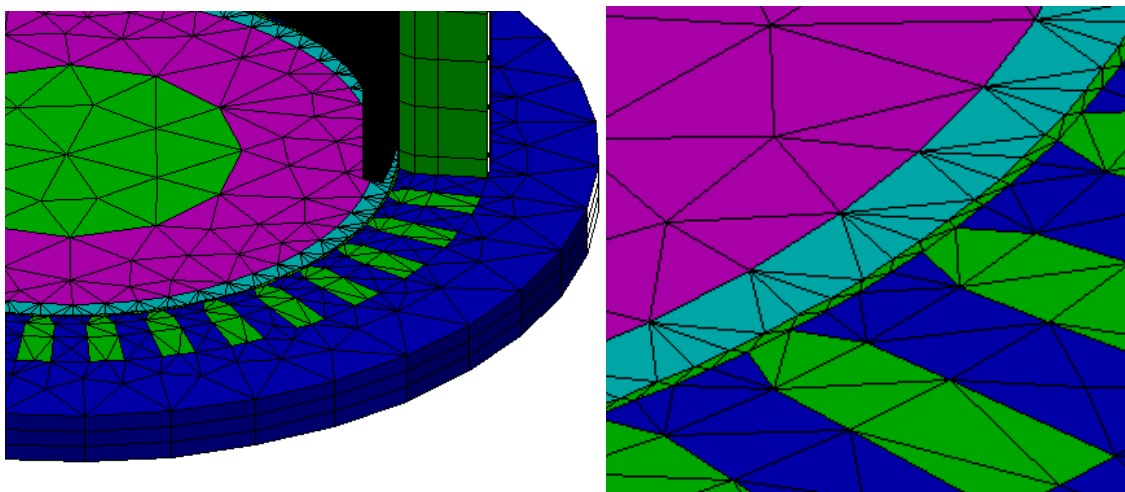
Kaksiroottorista rakennetta tutkittiin kolmiulotteisten simulointimallien avulla. Tarkoituksena oli tutkia miten roottorit reagoivat keskenään sekä selvittää miten kaksiroottorinen rakenne vaikuttaa roottorien tuottamaan vääntömomenttiin. Tarkoitusta varten tehtiin kolmenlaisia simulointimalleja, eli malleja joissa on vain pää- tai tuuletinroottori, sekä malleja, joissa on molemmat roottorit. Tarkoitus oli verrata mallien laskentatuloksia toisiinsa ja siten pohtia kaksiroottorisen rakenteen toimintaa. Myös malleissa, joissa on vain toinen roottori, staattori on mallinnettu täysipituuisena. Täten otetaan huomioon myös toisen roottorin kohdalla staattoriselässä kulkeva vuo, jonka osuus on suhteellisen suuri tuuletinroottorin tapauksessa. Kaikki mallit tehtiin erikseen kahdelle eri tuuletinroottorille, sekä alkuperäiselle roottorille, että uudelle tuuletinroottorille B. Uutta tuuletinroottoria A ei mallinnettu kolmiulotteisesti sen monimutkaisesta rakenteesta johtuen.

Malleille tehtiin kahdenlaisia simulointeja. Ensimmäisissä simuloinneissa roottoreita pyöritettiin nimellisnopeudella ja mitattiin indusoitunut jännite. Samalla pystyttiin mittaamaan myös roottorien hammasvääntömomentit. Toisissa simuloinneissa tutkittiin roottorien kehittämää vääntömomenttia. Nämä simuloinnit tehtiin pyörittämällä roottoreita nimellisnopeudella ja syöttämällä moottoreihin nimellisvirtaa, joka oli roottorille q-suuntaista.

Simuloinneissa käytettyjen mallien geometria on esitetty kuvassa 29. Kuvassa vasemmalla on esitettyä koko mallin rakenne ja lisäksi yhden vaiheen johtimet. Kuvassa oikealla on rakenteesta piilotettu staattori, pääroottori sekä osa ilmavälisestä. Näin kuvasta nähdään alhaalla sijaitseva tuuletinroottori. Kaikissa malleissa perusgeometria oli sama, yhden roottorin malleissa vain jätettiin toinen roottori mallintamatta. Malleissa käytettyä elementtiverkkoa, tuuletinroottorin alueelta on kuvattu kuvassa 30. Kuvasta nähdään, että elementtiverkko on tiheintä ilmavälissä.

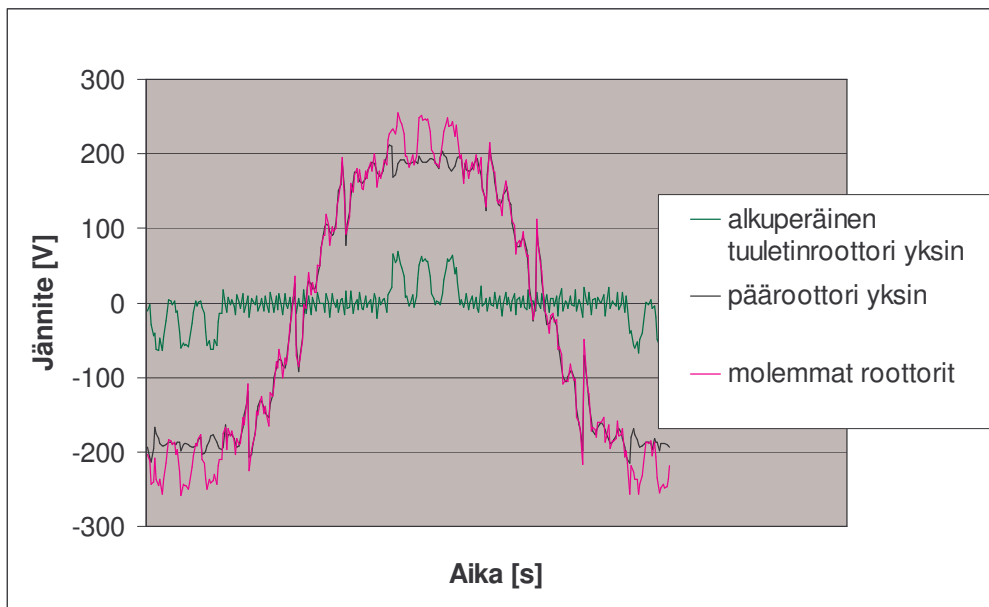


Kuva 29. Simuloinneissa käytettyjen mallien geometria.



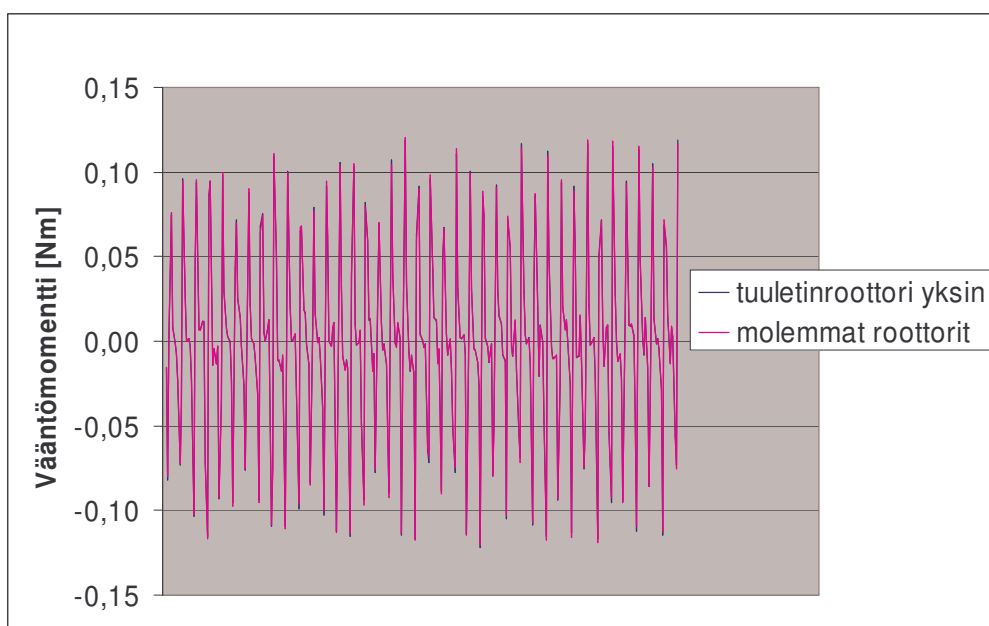
Kuva 30. Simuloinneissa käytettyjen mallien tuuletinroottorin alueen elementtiverkko.

Ensimmäiseksi simuloitiin käämeihin indusoituvaa jännitettä, roottorien pyöriessä nimellisa nopeuksillaan. Kuvassa 31 on nähtävissä kolmen eri mallin, yhden vaiheen käämeihin indusoitunut jännite yhden jakson ajalta. Kuvan simuloinneissa käytettiin tuuletinroottorina alkuperäistä roottoria. Kuvasta nähdään, että tuuletinroottorin indusoima jännite vastaa aikaisempaa kaksiulotteista simulointia, tosin jännite sisältää korkeataajuisia häiriötä, mikä johtunee epätarkemmasta mallista. Kuvasta nähdään myös, että mallin, jossa on kaksi roottoria, indusoima jännite näyttäisi olevan kahden muun mallin indusoiman jännitteen summa. Samat simuloinnit tehtiin myös malleille, joissa napojen leveys tuuletinroottorissa oli eri, ja saadut tulokset olivat vastaavat.



Kuva 31. Yhden vaiheen käämeihin indusoitunut jännite.

Samoista simulointimalleista saatiin myös roottorien hammasvääntömomentit. Kuvassa 32 on verrattu tuuletinroottorin hammasvääntömomenttia mallin, jossa tuuletinroottori on yksin, sekä mallin jossa on molemmat roottorit, välillä. Simuloinneissa tuuletinroottoria pyörytettiin täysi kierros ja mitattiin sen akselivääntömomentti. Pääroottorin asento oli toisessa simuloinnissa vastaava, mikä se olisi tuuletinroottoriin nähden roottorien pyöriessä täydellä kuormalla. Kuvasta nähtävä tulos on hieman yllättävä, koska käyrät näyttävät olevan lähes päällekkäin. Täten tuuletinroottori ei reagoi lainkaan pääroottorin kanssa, ja tuuletinroottorin tuottamaan hammasvääntömomenttiin ei vaikuta onko roottori yksin vai kaksin pääroottorin kanssa samassa staattorissa. Samasta simuloinnista todettiin myös, että tuuletinroottorin läsnäolo ei myöskään vaikuta pääroottorin hammasvääntömomenttiin.

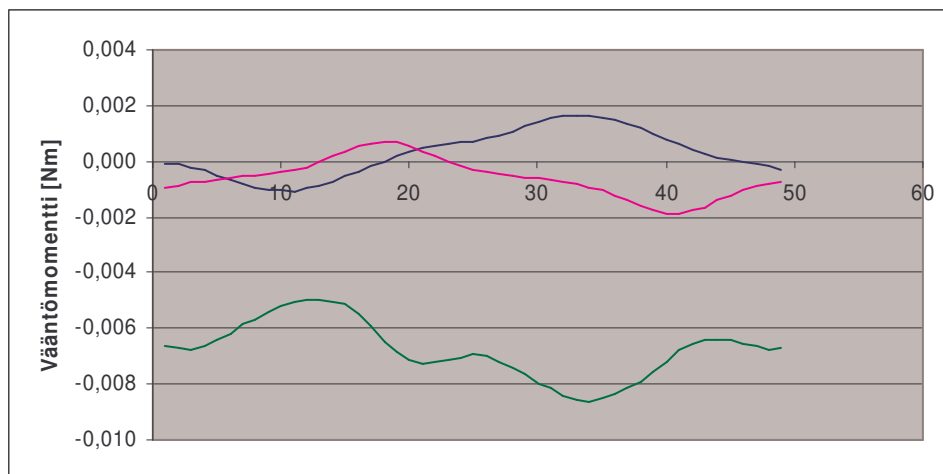


Kuva 32. Alkuperäisen tuuletinroottorin hammasvääntömomentti (cogging torque), kahdella eri mallilla.

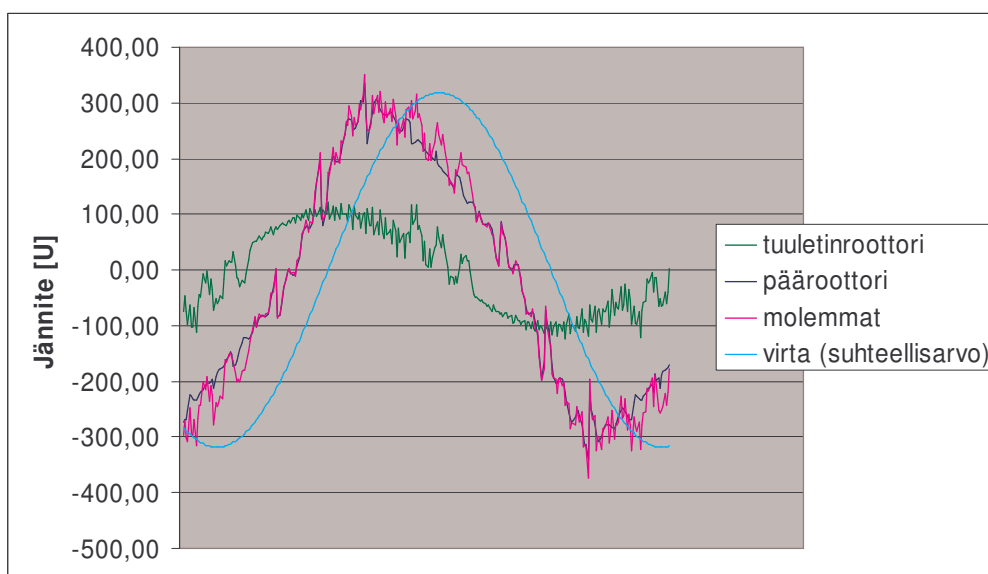
Edellisten tulosten johdosta haluttiin tutkia tarkemmin roottorien vaikutusta toisiinsa. Edellistä mallia muokattiin hieman ja saatiin malli, jossa tuuletinroottori on paikallaan ja pääroottori pyöri yhden napaparin matkan eteenpäin. Tästä mallista mitattiin tuuletinroottorin akselivääntömomentti kolmella eri tuuletinroottorin asennolla, katso kuva 33. Simuloinnin tuloksena voidaan todeta, että tuuletinroottori reagoi todella vähän pääroottorin asentoon, tässä enintään 0,004 Nm.

Seuraavaksi tutkittiin roottoreiden tuottamaa vääntömomenttia. Simuloinneissa roottorit pyörivät nimellisa nopeudella ja koneeseen syötettiin roottoreille q-suuntaista virtaa. Q-suuntaisella virralla roottorit tuottavat suurimman vääntömomentin. Simulointiaika oli yhden jakson aika. Kuvassa 34 on esitettyä simuloinnin ajalta jännitteet yhden vaiheen käämien yli ja yhden vaiheen virran suhteellisarvo. Kuvasta nähdään, että yhden vaiheen jännite muodostuu roottorin indusoiman jännitteen sekä virran ja käämityksen reaktanssien vaikutuksesta muodostuvan jännitteen summana. Näiden jännitteiden vaiheero on 90° , koska virta on q-suuntaista. Mallin, jossa on kaksi roottoria, yhden vaiheen

jännite näyttää olevan molempien roottoreiden indusoimien jännitteiden sekä virran ja käämityksen reaktanssien vaikutuksesta muodostuvan jännitteen summa.

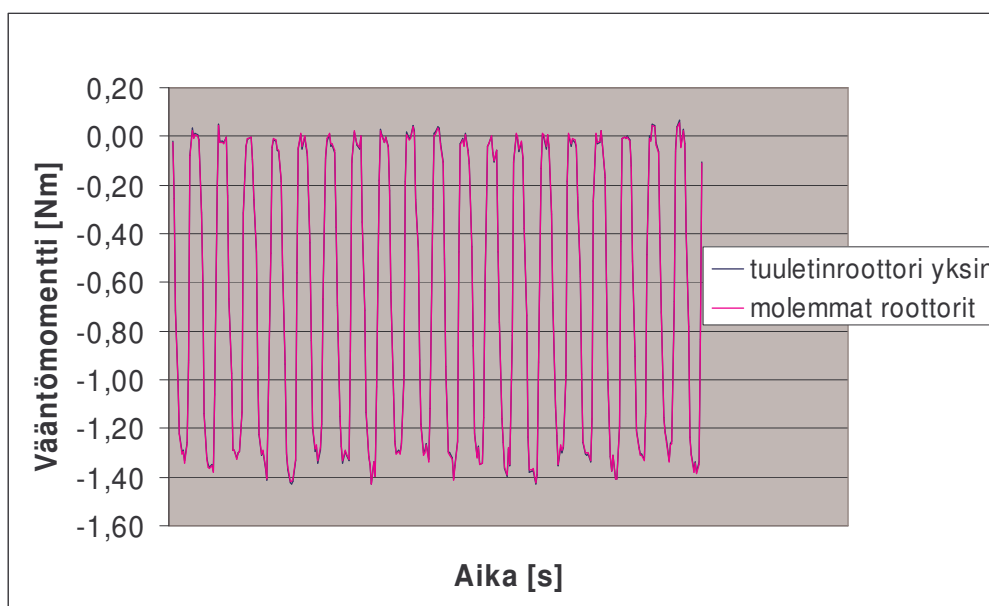


Kuva 33. Pääroottorin asennon vaikutus alkuperäiseen tuuletinroottoriin kolmella eri tuuletinroottorin asennolla.

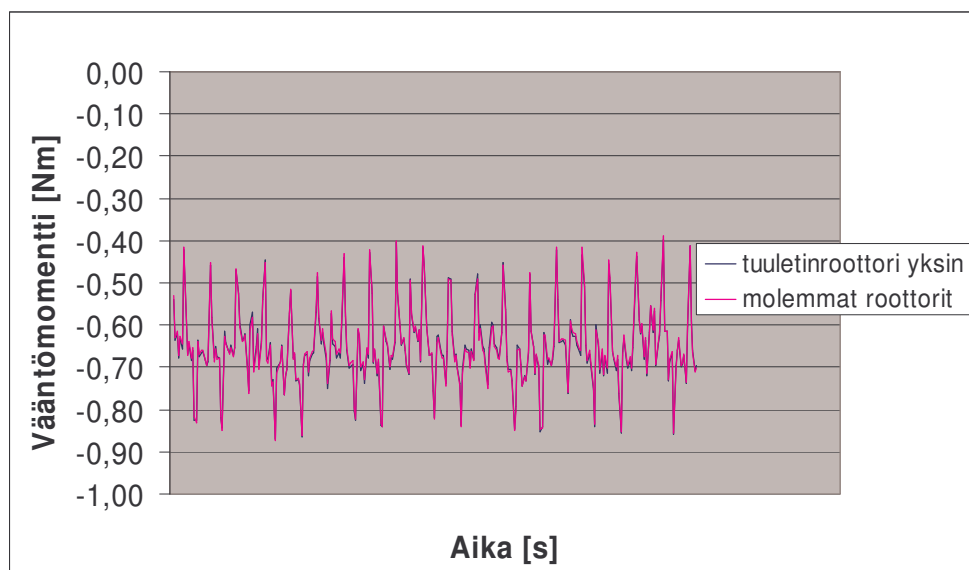


Kuva 34. Yhden vaiheen jännitteet eri malleille, kun konetta ajetaan q-suuntaisella virralla. Tuuletinroottori alkuperäinen.

Tuuletinroottorien tuottavat vääntömomentit on esitetty kuvissa 35 ja 36. Molemmissa kuvissa momenttikäyrät ovat lähes päällekkäin. Tämä tarkoittaa, että roottorin tuottamaan vääntömomenttiin ei vaikuta, onko tuuletinroottori yksin vai pääroottorin kanssa samassa staattorissa. Tämä pätee tietenkin vain kun konetta syötetään samalla virralla molemmissa tapauksissa. Roottorien tuottamien vääntömomenttien muoto vastaa kaksiulotteisten simulointien tulosta, tosin tässä vääntömomentit ovat hieman voimakkaampia, mikä johtuu luultavasti mallien eroista. Myöskään pääroottorin tuottamaan vääntömomenttiin ei vaikuttanut oliko roottori yksin vai tuuletinroottorin kanssa staattorissa.

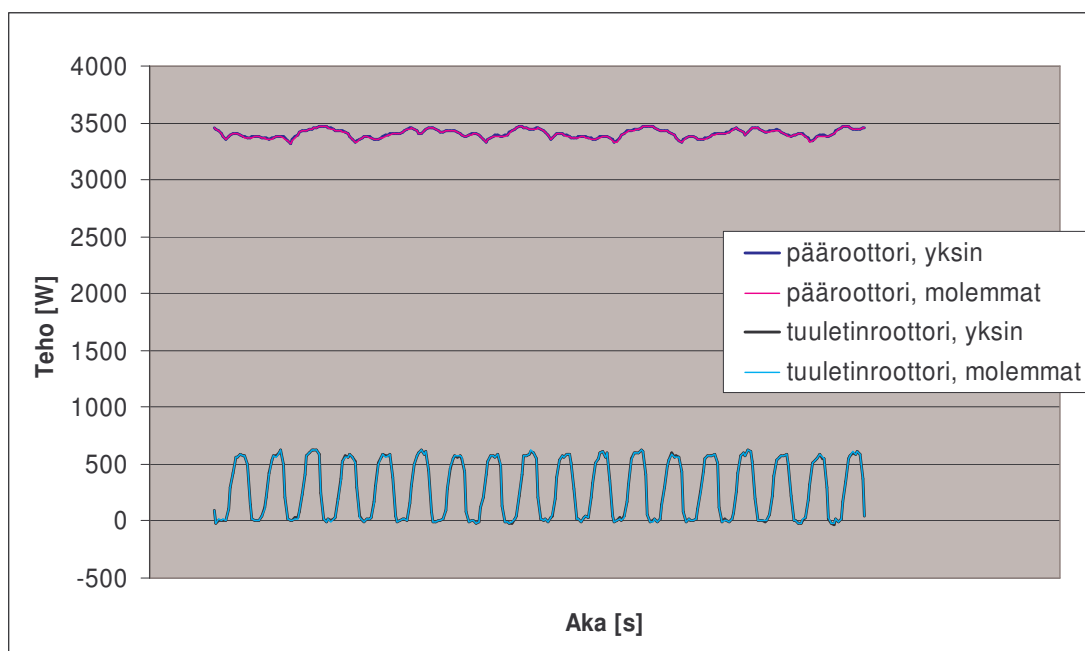


Kuva 35. Alkuperäisen tuuletinroottorin tuottama vääntömomentti, kun koneeseen syötettiin q-suuntaista nimellisvirtaa.

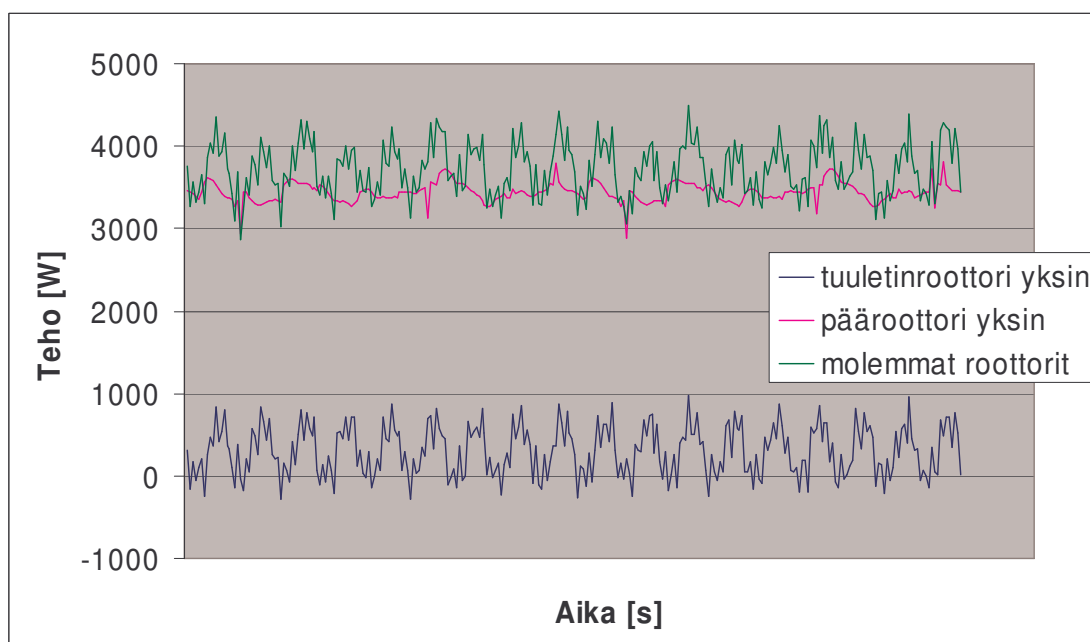


Kuva 36. Uuden tuuletinroottorin B, tuottama vääntömomentti, kun koneeseen syötettiin q-suuntaista nimellisvirtaa.

Myös eri roottoreiden tuottamia sekä eri koneiden ottamia tehoja tutkittiin. Kuvassa 37 on alkuperäisen tuuletinroottorin ja pääroottorin tuottamat tehot, roottorien ollessa sekä yksin että yhdessä staattorissa. Tehot on laskettu hetkellisten vääntömomenttien ja pyörimisnopeuden avulla. Kuvassa 38 puolestaan on eri mallien ottamat tehot, jotka on laskettu jännitteistä ja virroista. Tehojen kuvaajista nähdään, että koneen, jossa on kaksi roottoria, ottama hetkellinen teho on yhtä suuri kuin koneiden, joissa on yksi roottori, yhteenlaskettu hetkellinen teho. Tulos on ilmeinen, koska aikaisempien tulosten mukaan roottorien tehot eivät riippuneet toisesta roottorista.



Kuva 37. Roottorien teho, laskettuna vääntömomentista ja pyörimisnopeudesta. tuuletinroottorina alkuperäinen roottori.



Kuva 38. Koneiden ottamat tehot, laskettuna jännitteistä ja virroista. Tuuletinroottorina alkuperäinen roottori.

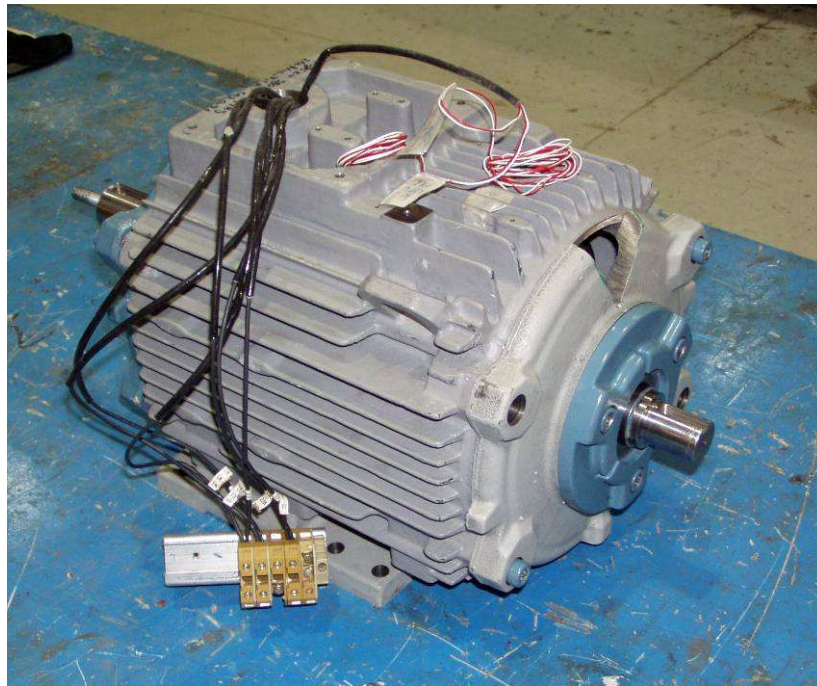
3.2.6. Muut simuloinnit

Edellä kuvattujen simulointien lisäksi tehtiin myös useita muita simulointeja, mutta niitä ei tässä käsitellä laajemmin, koska ne eivät olleet oleellisia työn tulosten kannalta. Mm. kaksiulotteisen mallin avulla tutkittiin 17-napaparista pääroottoria ja 5-napaparista tuuletinroottoria. 5-napaparinen roottori toimi odotetusti, mutta sen tuottama teho on niin pieni, ettei sitä luultavasti kannata käyttää jäähdytykseen prototyypimoottorissa käytetyn käämityksen kanssa.

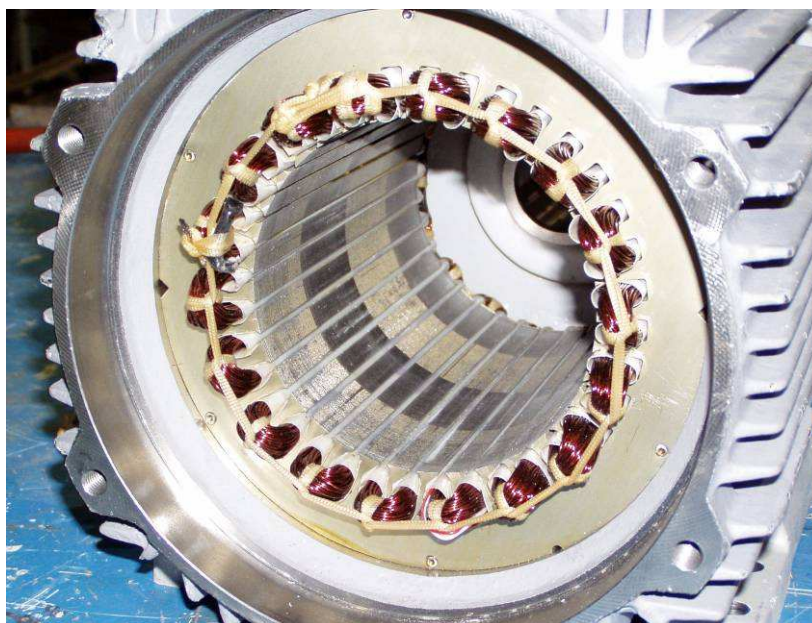
Koska roottoreiden välinen alue oli jätetty mallintamatta kolmiulotteisissa simuloinneissa, sen vaikutusta tutkittiin yksinkertaistetun kaksiulotteisen mallin avulla. Malli oli tavallaan leikkaus moottorin halki akselin suunnassa. Malli ei täysin vastaa todellista tilannetta, mutta se antaa siitä hyvän arvion. Roottorien välisen raon ollessa liian pieni, osa magneettien muodostamasta magneettivuosta kiertää toisen roottorin kautta pienentäen koneen tuottamaa vääntömomenttia ja lisäksi pyörrevirtahäviöitä. Jos taas roottorien välinen rako suunnitellaan liian suureksi, lisääntyy staattorin pituus turhaan. Simulointien perusteella hyvä mitta roottorien väliselle raolle on tässä koneessa vähintään yhdestä kahteen kertaa magneettien ja staattorin välinen ilmaväli.

4. TESTIT PROTOTYYPILLÄ

Jo ennen kuin sain tämän tutkimusaiheen, oli kaksiroottorisesta koneesta rakennettu prototyyppi. Alkuperäinen prototyyppi ei kuitenkaan ollut toiminut halutulla tavalla, eikä koneen tuuletinroottoria ollut saatu pyörimään. Tehdyissä ajoissa alkuperäinen tuuletinroottori oli vain tärisnyt paikallaan ja pyörinyt pääroottorin mukana samalla nopeudella. Prototyyppikone on esitetty kuvassa 39. Kuva 40 on puolestaan koneen sisältä, kun koneen toinen laakerikilpi sekä roottorit on poistettu. Prototyyppikone on esitelty tarkemmin luvussa 3.1.



Kuva 39. Tutkittu prototyyppi. Koneen n-pään laakerikilpeen on sahattu lovi, josta nähdään pyöriikö tuuletinroottori oikein.

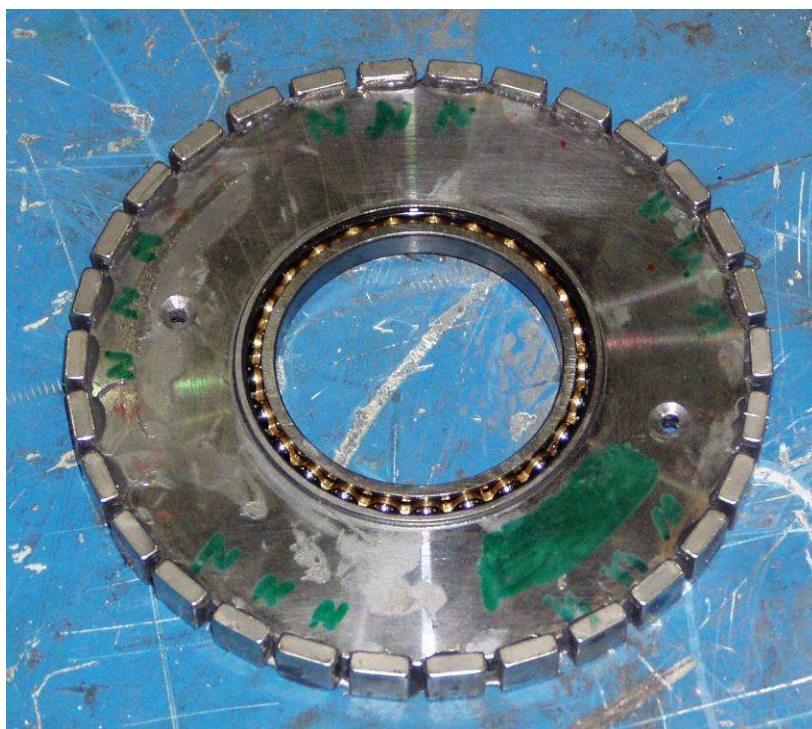


Kuva 40. Prototyypikoneen sisäosat, staattori ja kääminpäät.

Työni alkoi tutkimalla miksi alkuperäinen prototyyppi ei toiminut. Syitä prototyypin toimimattomuuteen etsittiin sekä simuloimalla, kuten luvussa 4 kuvattiin, että tutkimalla rakennettua prototyyppiä. Tämän jälkeen alkuperäiseen prototyyppiin rakennettiin uusi tuuletinroottori, joka oli suunniteltu simulointien tulosten avulla. Lopuksi uutta roottoria testattiin useissa testiajoissa. Tässä luvussa kerrotaan tästä fyysisen prototyypin tutkimisesta, uuden tuuletinroottorin rakentamisesta sekä sen testaamisesta.

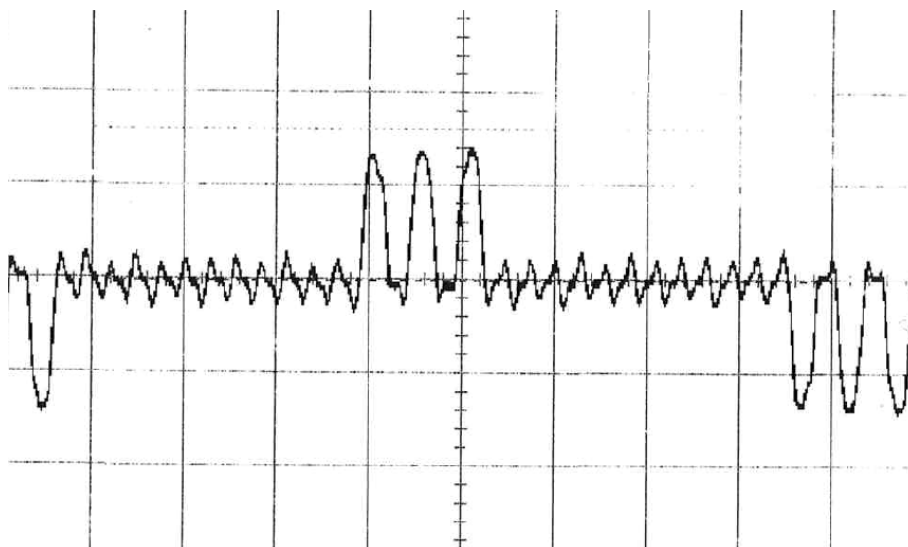
4.1. Alkuperäisen tuuletinroottorin tutkiminen

Alkuperäinen tuuletinroottori on massiivirunkoinen ja magneetit on liimattu roottorin pinnalle, ks. kuva 41. Kuvassa on 5-napaparinen roottori, mutta tässä työssä enemmän tutkittu kaksinapainen roottori on rakenteeltaan täysin samanlainen, ainoastaan magneettien napaisuus on eri. Kuvassa näkyy myös laakeri, jonka ansiosta roottori pyörii vapaasti akselin ympäri.



Kuva 41. Alkuperäinen tuuletinroottori ilman tuuletinsiipiä.

Prototyypimoottoria tutkittiin mittaamalla indusoitunutta jännitettä. Moottorista mitattiin sekä pääroottorin, että kaksinapaisen tuuletinroottorin indusoima jännite. Mittauksissa moottorissa oli vain mitattava roottori ja sitä pyöritettiin moottorin akselin päähän liitetyllä porakoneella. Prototyyppi oli suunniteltu siten, että kumpikin roottori voitiin helposti irrottaa akselista. Tuuletinroottorin indusoimaa jännitettä mitattaessa oli se lukittu teipillä moottorin akseliin, jottei se pääsisi pyörimään oman laakerinsa varassa. Oskilloskoopilla mitattu tuuletinroottorin yhden vaiheen käämeihin indusoima jännite, yhden kierroksen ajalta on esitetty kuvassa 42. Kuvan jännitteen käyrämuoto on samanlainen kuin luvussa 3.2.2 simuloinnin avulla saatu. Näin ollen simulointien tulosta voitiin pitää luotettavana ja päätettiin rakentaa simulointien avulla suunnitellusta uudesta tuuletinroottorista A prototyyppi.



Kuva 42. Tuuletinroottorin yhden vaiheen käämeihin indusoiman jännitteen käyrämuoto ajan funktiona.

4.2. Uuden tuuletinroottorin A rakentaminen

Uusi prototyypiroottori rakennettiin simulointimallin, jossa on $1/\text{sini}$ -muotoinen ilmaväli, mukaan. Roottorin muoto on esitetty kuvassa 24. Roottori suunniteltiin siten, että se käy olemassa olevaan prototyypikoneeseen, vanhan tuuletinroottorin tilalle. Tämä uusi roottori rakennettiin sähköteräslevyistä, jotka leikattiin haluttuun muotoon laserleikkauksella. Menetelmä sopii hyvin prototyyppien valmistukseen, koska laserleikkuri pystyy leikkaamaan levyt suoraan simulointiohjelmasta saatavan geometriatiedoston mukaan. Tässä työssä rakennettiin prototyypiroottori ainoastaan uudesta tuuletinroottorista A, uutta tuuletinroottoria B tutkittiin ainoastaan simuloimalla.

Prototyypiroottori päätettiin koota liimaamalla levyt ensin toisiinsa, kiinnittää magneetit liimalla koloihinsa ja lopuksi kiinnittää myös laakeri liimalla. Roottorin kokoaminen levyjä yksitellen liimaamalla oli työlästä, eikä tätä tapaa käytetä sarjatuotannossa. Yksittäisen prototyypin rakentamiseen menetelmä kuitenkin soveltui. Liimauksessa käytetty kaksikomponenttiepoksiliima ja roottorilevyt kuumennettiin, jotta liima olisi juoksevaa ja levittyisi levyjen pinnalle. Liima levitettiin siveltimellä ohueksi kerrokseksi yksittä-

sen roottorilevyn pinnalle, jonka jälkeen levyn päälle asetettiin seuraava levy. Levyt saatiin tarkasti päällekkäin käyttämällä apuna roottorin reiässä olevaa laakeria. Tuuletinroottoriin tuli yhteensä 20 sähköteräslevyä, joiden paksuus oli 0,5 mm. Kun levyjen liima oli kuivunut, liimattiin magneetit paikalleen samalla liimalla. Tuuletinroottori ilman laakeria ja tuuletinsiipiä on esitetty kuvassa 43.



Kuva 43. Uusi tuuletinroottori A, laakeri ja tuuletinsiivet vielä puuttuvat.

Tuuletinroottorin kiinnitys akseliin oli toteutettu siten, että akseli leveni vähitellen, jolloin roottorin laakeri kiinnittyi siihen, kun se painettiin tarpeeksi pitkälle akseliin. Ratkaisu oli yksinkertainen, mutta aiheutti myös ongelmia. Roottori pääsi helposti irtoamaan akselista kiinnityksen ja testiajojen aikana. Lisäksi roottori oli vaikea saada täysin suoraan ja roottorien välin säätäminen oli hankalaa. Näitä ongelmia aiheutti myös se, että laakeri pääsi myös helposti liikkumaan roottoriin nähden. Jos moottorista suunnitellaan tuotantomallia, täytyy tuuletinroottorin mekaanista rakennetta kehittää, mutta testi-

käyttöön nykyinen rakenne soveltui välttävästi. Suurin osa testiajoista ajettiin ilman roottoriin kiinnitettyjä tuuletinsiipiä, mutta muutamassa testiajossa siivet olivat kiinni. Siivet oli tehty alkuperäistä roottoria varten. Ne olivat alumiinia ja kiinnitettiin liimamalla. Kuvassa 44 ovat molemmat roottorit akselilla, tuuletinsiivet ovat kiinni tuuletinroottorissa.



Kuva 44. Pääroottori sekä tuuletinroottori koneen akselilla.

4.3. Uuden tuuletinroottorin A testaaminen

Ensimmäisenä testinä mitattiin uuden tuuletinroottorin indusoima jännite. Mittaus tehtiin kuten alkuperäiselläkin roottorilla. Mittauksessa tuuletinroottori oli yksin moottorin sisällä lukittuna akseliin, jota pyöritettiin porakoneella. Indusoituneen jännitteen voimakkuutta, käyrämuotoa ja yliaaltosisältöä mitattiin yhden vaiheen käämien johtimiin liitetyllä analysaattorilla. Saadut mittaustulokset olivat lähellä aikaisemmin tehtyjen simulointien tuloksia. Ainoastaan matalataajuisia yliaaltoja esiintyi simuloiteja enemmän, tämä voi johtua siitä, että simuloinneissa magneettien muotoa oli yksinkertaistettu.

Alkuperäisen prototyypin indusoimia haitallisia 17- ja 19-napaparisia yliaaltoja ei uusi tuuletinroottori indusoinut juuri lainkaan. Tämän testin tulosten perusteella uuden prototyypiroottorin pitäisi pyöriä oikealla nopeudella.

Seuraavaksi haluttiin testata lähteekö tuuletinroottori pyörimään käytännössä simulointien mukaisesti. Hieman hankaluuksia tuotti aluksi käytettävän taajuusmuuttajan sekä siinä käytetyn ohjelman ja parametrien valinta. Simuloinneissa pystyttiin suoraan määrittämään käytetty virta ja taajuus, mutta tällaista ohjelmaa yleensä taajuusmuuttajissa ei ole. Moottorien ohjaukseen yleensä käytettyjä vektorisäätöjä ei voitu käyttää, koska ohjelmat on tehty tavallisille yksiroottorisille koneille, eivätkä ne toimisi oikein kaksiroottoristen koneiden kanssa. Lopulta päädyttiin käyttämään skalaariohjausta siten, että taajuusmuuttajalle annettuja moottorin kilpiarvoja muutettiin aina tarvittaessa, jotta saatiin moottorille haluttu virta halutulla taajuudella.

Skalaariohjauksessa taajuusmuuttajalle annetaan haluttu taajuus ja se laskee syötettävän jännitteen kilpiarvojen mukaan. Taajuuden kasvaessa myös jännite kasvaa aina nimellistaajuuteen asti. Näin ollen kaksiroottorisen koneen testeissä halutun virran ja taajuuden valinta vaati myös kilpiarvojen, lähinnä nimellisjännitteen ja nimellistaajuuden, muuttamista taajuusmuuttajaan. Taajuusmuuttajalle aseteltavat moottorin kilpiarvot riippuvat myös siitä, onko moottorissa molemmat roottorit vai pelkästään tuuletinroottori. Jos koneessa on pelkästään tuuletinroottori, koneen induktanssi on huomattavasti pienempi kuin kahdella roottorilla. Tällöin koneen kilpiarvoista nimellisjännite piti säätää pienemmäksi, jottei virta kasva liian suureksi. Testiajoja tehtiin kahdella eri ABB:n valmistamalla taajuusmuuttajalla, niiden mallit olivat ACS 600 ja ACS 800.

Aluksi kokeiltiin ajaa konetta, kun siinä oli vain tuuletinroottori. Ensimmäisillä kokeilla roottori ei lähtenyt pyörimään, vaan jäi tärisemään paikalleen. Ongelmaksi osoittautui se, että taajuusmuuttaja oli säädetty antamaan nimellisjännite suurilla nopeuksilla. Tällöin virta oli alhaisilla taajuuksilla liian pieni, jotta roottori lähtisi pyörimään ja suurilla nopeuksilla roottori ei enää pääse tahdistumaan suuresta nopeuserosta johtuen, vaikka virta olisikin riittävä. Seuraavia kokeita varten taajuusmuuttajan asetuksista muutettiin moottorin nimellisjännitettä suuremmaksi, jotta virta olisi suurempi pienillä pyörimisnopeuksilla. Tällöin tuuletinroottori lähti pyörimään ilman ongelmia ja oikealla nopeu-

della. Tosin näillä taajuusmuuttajan asetuksilla moottoria voitiin vain ajaa hitailla pyörimisnopeuksilla, koska suuremmilla nopeuksilla virta nousi liian suureksi. Tässä testissä konetta ajettiin alle 10 Hz taajuuksilla, kun koneen nimellistaajuus on 70 Hz.

Roottorin käynnistämistä kokeiltiin useilla eri asetuksilla ja mitattiin virta, jolla roottori lähti pyörimään. Roottorin käynnistymisen todettiin riippuvan myös roottorin asennosta. Konetta voitiin ajaa lopulta myös suurilla nopeuksilla, kun taajuusmuuttajan asetuksista huomattiin ottaa IR-kompensointi käyttöön. IR-kompensointi kasvattaa jännitettä ja siten virtaa matalilla taajuuksilla. Tällöin taajuusmuuttajan asetukset voitiin säätää siten, että moottori sai tarpeeksi virtaa pienillä nopeuksilla käynnistyäkseen, mutta virta ei kasvanut liian suureksi suurilla nopeuksilla. Tuuletinroottori toimi ilman ongelmia myös suurilla nopeuksilla.

Seuraavaksi koneeseen kiinnitettiin myös toinenkin roottori ja konetta kokeiltiin ajaa kahdella roottorilla. Ajot suoritettiin ilman ulkoista kuormaa pääroottorille. Myös kahdella roottorilla koneen toiminta oli odotusten mukaista, eli tuuletinroottori pyöri 17-kertaisella nopeudella vastakkaiseen suuntaan kuin pääroottori. Näissä ensimmäisissä testeissä tuuletinsiivet eivät olleet kiinni tuuletinroottorissa, mutta myöhemmin testattiin myös toimintaan tuuletinsiipien kanssa. Moottorin käynnistämistä kokeiltiin useilla eri taajuusmuuttajan asetuksilla ja todettiin, että tuuletinroottorin käyttäytyminen oli samantapaista kuin yksin ajettaessa. Roottorin tahtiin pääsemiseen vaikutti virran voimakkuuden ja roottorin asennon lisäksi myös käynnistymisnopeus, eli nopeus jolla syöttötaajuus muuttuu. Samoin tuuletinroottori saattoi tippua tahdista koneen käydessä, jos syöttötaajuus muuttui liian nopeasti koneen käyntinopeutta muutettaessa. Myös koneen kiihdytys- ja hidastusajan pystyi muuttamaan taajuusmuuttajasta. Todettiin myös, että tuuletinroottori tarvitsee jatkuvasti tietyn virran pysyäkseen tahdissa. Jos roottori putoaa tahdista, se ei enää pääse takaisin tahtiin, vaikka virtaa kasvatettaisiin.

Koska tuuletinroottorin tuottamaa momenttia ei pystynyt mitenkään mittaamaan, on tarkempien testitulosten puuttuessa vain tyydyttävä toteamaan, että roottori näyttää toimivan suunnitellulla tavalla. Tuuletinroottorin pyörimistä vastustava suurin voima on laakerihäviöt, joiden arvioiminen on tässä tapauksessa myös vaikeaa. Tuuletinroottorin laakeri oli tarkoitukseen huono, koska sen aiheuttaman kitkan tunsin käsin kokeil-

taessa. Tästä johtui myös se, että tuuletinroottori pysyi käynnissä yksin pienemmällä virralla kuin yhdessä pääroottorin kanssa. Silloin kun tuuletinroottori oli yksin, pyöri koko akseli sen mukana ilman, että tuuletinroottorin oma laakeri olisi pyörinyt. Mutta kun akselilla oli kaksi roottoria, tuuletinroottori joutui pyörimään oman huonomman laakerinsa varassa.

4.4. Muut testit

Uuteen tuuletinroottoriin A kiinnitettiin tuuletinsiivet ja sen jäähdytyskykyä testattiin käytännössä. Tuuletinroottorin puoleisten kääminpäiden lämpötilaa seurattiin kääminpäissä sijaitsevilla pt100-mitta-antureilla. Koneessa ei ollut mitään ulkoista jäähdytystä, joten koneen kuumentumisen vuoksi lämpenemäajojen pituus oli vain 15 minuuttia. Ajoja tehtiin kaksi, toisessa tuuletinroottori pyöri ja toisessa se ei ollut tahdissa. Kääminpäiden lämpötilojen ero mittausten kesken oli n. 10 °C. Tulosta ei voida pitää luotettavana, sillä se olisi luultavasti huomattavasti suurempi normaalikäytössä, kun koneessa on ulkoinen jäähdytys. Tällöin koneen rungon lämpötila olisi huomattavasti matalampi ja tuuletin siirtäisi siten tehokkaammin lämpöä kääminpäistä ilman kautta runkoon. Myöskään siipien rakenne ei luultavasti ole lopullinen.

Lopuksi prototyypikonetta kokeiltiin ajaa, kun siinä oli kiinni pääroottori sekä 5-napaparinen alkuperäinen pintamagnetoitu tuuletinroottori. Myös tämä tuuletinroottori lähti pyörimään oikeaa nopeutta, tosin se vaati suuremman virran. Tämä johtuu siitä, että staattorin käämityskerroin on 5-napapariselle aallolle huomattavasti pienempi. Tämän tuuletinroottorin käyttäytyminen erosi uuden tuuletinroottorin A käyttäytymisestä kahdella tavalla. Se ei tippunut läheskään yhtä helposti tahdista taajuuden muuttuessa, mikä johtuu sen huomattavasti pienemmästä pyörimisnopeudesta ja siten pienemmästä pyörimisnopeuden muutoksesta. 5-napaparisen roottorin ongelmana kuitenkin oli pyöriminen hitaalla nopeudella. Se pyöri nykien ja pysähdellen, mutta suuremmilla nopeuksilla ongelmaa ei ollut. Tämä johtuu todennäköisesti suurehkosta hammasvääntömomentista, mikä pystyttiin myös huomaamaan pyörittämällä roottoria käsin. Uudesta tuuletinroottorista A ei kädellä pyörittämällä tuntenut lainkaan hammasvääntömomenttia.

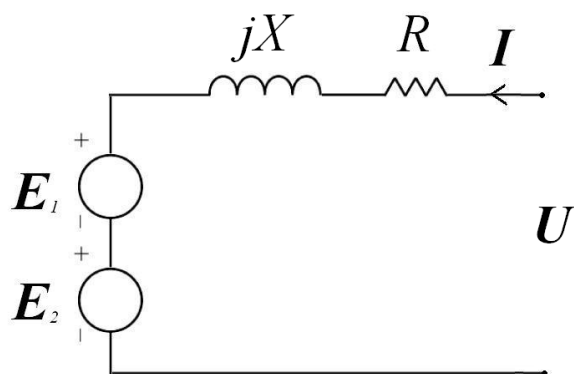
5. POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Luvussa 3.2.3 tehtyjen simulointien perusteella voidaan pohtia kaksiroottorisen rakenteen toimintaa. Simulointien tuloksista nähdään, että jos koneelle syötettävä virta pidetään vakiona, kummankaan roottorin tuottamaan vääntömomenttiin ei vaikuta, onko roottori yksin vai toisen roottorin kanssa samassa staattorissa. Näin ollen koneen voidaan ajatella koostuvan kahdesta erillisestä koneesta, jotka on kytketty sarjaan. Koska koneet voidaan ajatella erillisiksi, ne voidaan kumpikin suunnitella erillisinä, samalla tavalla kuin tavalliset yksiroottoriset koneet. Suunnittelussa on huomioitava kuitenkin, että koneiden staattorit ovat pituutta lukuun ottamatta samanlaiset. Koska kaksiroottorisen koneen ajatellaan muodostuvan kahden koneen sarjaankytkennästä, vaatii kone erikoisen ohjauksen, joka huomioi kaksiroottorisen rakenteen. Sarjakytkentä myös rajaa osan koneen mahdollisista käyttökohteista pois.

Kaksiroottorisen koneen toimintaa voidaan tarkemmin pohtia kuvitteellisten sarjaan kytkettyjen koneiden avulla. Koska koneet on kytketty sarjaan, ei niitä voida erikseen ohjata, vaan syötettävän virran suuruus ja taajuus ovat molemmille koneille samat. Kaksiroottoriselle koneelle voidaan myös muodostaa yksinkertainen yksivaiheinen sijaiskytkentä, joka on esitetty kuvassa 45. Sijaiskytkentä pätee vain umpinapaisille roottoreille ja se on muodostettu tavallisten tahtikoneiden sijaiskytkennästä kytkemällä sarjaan kaksi konetta. Kuvassa 45 U on liitinjännite, E roottorin sähkömotorinen voima ja R käämin resistanssi. Reaktanssi X voidaan muodostaa

$$X = X_{m1} + X_{m2} + X_{\sigma1} + X_{\sigma2}, \quad (18)$$

missä X_m on koneen magnetointireaktanssi ja X_σ koneen hajareaktanssi. Alaindeksit 1 ja 2 viittaavat eri roottoreihin.



Kuva 45. Kaksiroottorisen koneen yksinkertainen yksivaiheinen sijaiskytkentä.

Tuuletinroottoreilla varustetussa koneessa pääroottori on tuuletinroottoria huomattavan paljon suurempi ja siten myös sen E , X_m ja X_σ ovat myös huomattavasti suuremmat. Tästä johtuen tuuletinroottorin vaikutus koneen toimintaan on hyvin pieni. Esimerkiksi konetta jännitteellä syötettäessä pääroottorin kuorma määrää lähes kokonaan koneen ottaman virran ja tuuletinroottorin kuormalla on siihen hyvin pieni vaikutus. Tästä seuraa että, tuuletinroottorin tuottama suurin vääntömomentti riippuu pääroottorin kuormasta. Näin ollen ongelmia syntyy tilanteissa, joissa pääroottorilla on vain pieni kuorma, mutta tuuletinroottorilla suuri. Tällainen tilanne syntyy esimerkiksi silloin kun pääroottori pyörii maksiminopeudella tyhjäkäynnillä. Tällöin tuuletinroottorin kuorma on suurin, koska tuulettimen kuorma kasvaa nopeuden kasvaessa, mutta koneen ottama virta on vain hieman yli magnetointivirran. Periaatteessa tilanteissa, joissa koneen virta on pieni, ei tarvittaisi tuuletinroottoria jäähdyttämään ja tuuletinroottorin voisi antaa tippua tahdista. Tämä ratkaisu ei olisi useinkaan järkevä, sillä virran noustessa ei tuuletinroottoria saada takaisin tahtiin pysäyttämättä konetta välillä.

Tuuletinroottorin tuottama riittävä vääntömomentti voidaan varmistaa kahdella eri tavalla. Tuuletinroottorit voidaan suunnitella niin suuriksi, että niiden tuottama momentti riittää magnetointivirralla pyörittämään suurinta tuuletinkuormaa. Tai koneen ohjaus voidaan suunnitella sellaiseksi, että se syöttää koneelle ylimääräistä virtaa tilanteissa, joissa pääroottorin kuorma on liian pieni ja nopeus suuri. Tuuletinroottorien koon kas-

vattaminen ei luultavasti ole järkevä vaihtoehto, koska niiden pituus kasvaisi moninkertaiseksi ja tällöin tarvittaisiin myös pidempi staattori, mikä kasvattaisi huomattavasti kustannuksia ja häviöitä. Parempi vaihtoehto olisi luultavasti käyttää ohjausta, joka tietää tuuletinroottorin tarvitseman minimivirran eri nopeuksilla, eikä antaisi syötetyn virran laskea tätä pienemmäksi. Ohjaus pitäisi virran halutulla tasolla syöttämällä koneelle tarvittaessa ylimääräistä, pääroottorille d-suuntaista, magnetointivirtaa tai yksinkertaisen jänniteohjauksen tapauksessa nostaisi jännitettä, mikä kasvattaisi magnetointivirtaa. Tämänkaltainen ohjaus kuitenkin lisää koneen häviöitä huomattavasti tilanteissa, joissa virtaa joudutaan nostamaan. Tämä luultavasti rajaa tuuletinroottoreilla varustetun koneen käyttökohteista pois käytöt, joissa konetta ajetaan pääasiassa lähellä koneen maksiminopeutta, pienellä kuormalla.

Kuvassa 45 esitetyn yksinkertaisen sijaiskytkennän toimivuus on varmistettu simuloimalla kaksiroottorista konetta elementtimenetelmällä erilaisissa tilanteissa: molemmat roottorit moottoreina, pääroottori moottorina ja tuuletinroottori generaattorina, sekä pääroottori tyhjäkäynnillä ja tuuletinroottori moottorina. Tämä sijaiskytkentä pätee kuitenkin vain umpinapaisille roottoreille, koska niille moottorin reaktanssi on sama riippumatta roottorin asennosta. Avonapaisten koneiden laskemisessa käytetään usein ns. kaksiakselimallia. Kaksiakselimallissa käytetään roottorille dq-koordinaatistoa, joka muodostuu kestopagneettien muodostaman magneettivuon ja siten roottorin navan suuntaisesta d-akselista sekä napojen välissä sijaitsevasta q-akselista. Kaksiakselimallissa käytetään kummallekin akselin suunnalle omaa sijaiskytkentää, näin voidaan huomioida avonapaisuudesta johtuvat eri reaktanssit eri akselien suuntiin. Kaksiroottoriselle koneelle voitaisiin luultavasti johtaa myös monimutkaisempi sijaiskytkentä, mikä huomioisi avonapaisuuden. Mutta sijaiskytkentää ei voida muodostaa pelkästään kytkemällä sarjaan kummankin akselin suuntaisia sijaiskytkentöjä, koska roottorit voivat olla myös eri asennoissa toisiinsa nähden. Tällaisesta sijaiskytkennästä tulisi monimutkainen ja se vaatisi mahdollisesti neljä eri sijaiskytkentää, joissa olisi toisista riippuvia termejä. Tässä työssä ei monimutkaisempaa sijaiskytkentää johdettu, mutta jos halutaan kehittää avonapaiselle kaksiroottoriselle koneelle hyvä ohjausmalli, täytyy sijaiskytkentä johtaa. Tarkoitusta varten suunnitellun ohjauksen avulla kaksiroottoriselle koneelle saataisiin suhteellisen tarkka säätö, mutta säädön nopeus olisi luultavasti sarjakytkennästä johtuen

hitaampi kuin yksiroottorisilla koneilla. Tämä karsisi koneelta kaikkein nopeinta säätöä vaativat käyttökohteet.

5.1. Moniroottorisen rakenteen ominaisuudet

Simulointien tulosten ja prototyypikoneen testien perusteella voidaan pohtia syitä, miksi alkuperäistä tuuletinroottoria ei saatu pyörimään prototyypikoneessa. Simulointien avulla, luvussa 3.2.2 huomattu vääntömomentin väre haittaa selvästi käynnistymistä, lisäksi vääntömomentti oli riippuvainen roottorin asennosta. Simulointien avulla suunnitellussa ja rakennetussa prototyypissä tätä ongelmaa ei ollut. Tuuletinroottorin käynnistymistä kuitenkin hankaloittaa koneiden teoreettinen sarjakytkentä. Käynnistettäessä pääroottori, jonka napamäärä on suuri, ei tarvitse suurta virtaa kiihdytykseen ja siten se, sarjakytkennästä johtuen, rajoittaa tuuletinroottorin virtaa ja tuottamaa maksimummomenttia. Tämä havaittiin myös prototyypikokeissa, kun tuuletinroottori vaati suhteellisen suuren virran käynnistyäkseen. Roottorin nopeuden tasaantuessa virrantarve pieneni. Tuuletinroottoreilla varustetun koneen ohjauksen tulisikin huomioida käynnistyksessä ja pyörimisnopeuden muutoksissa tarvittava lisävirta.

Tässä tutkimuksessa simuloinneissa ja prototyypinä on käytetty pääasiassa rakennetta, jossa roottorien napaparimäärät ovat 1 ja 17. Myös muita napaparimäärien yhdistelmiä voidaan käyttää, jos pystytään muodostamaan käämitys, joka tuottaa tarpeeksi suuren $mmv:n$ kummallekin napaparimäärälle. Käämityksen suunnittelua pohditaan kohdassa 5.2. Pääroottorin napaparimäärään ei yleensä pystytä kovinkaan paljoa vaikuttamaan, koska sen määrää koneen käyttökohde. Sen sijaan tuuletinroottorille voidaan valita vapaammin napaparimäärä. Tuuletinroottorin napaparimäärä tulisi valita tarpeeksi pieneksi, jotta sen pyörimisnopeus ja siten jäähdytyskyky olisivat tarpeeksi suuret. Myös roottorin tehotiheys on sitä parempi, mitä pienempi on sen napaparimäärä. Toisaalta jos napaparimäärä on kovin pieni, kuten tutkitussa koneessa, on tuuletinroottorin hitausmomentti suuri suhteessa vääntömomenttiin. Tämä aiheuttaa sen, että tuuletinroottori ei kykene nopeisiin nopeuden muutoksiin. Pienen napaparimäärän huono puoli on myös se, että tarvitaan paksumpi staattoriselkä, koska vuo kulkee selässä pidemmän matkan.

Tämä on ongelmana varsinkin kaksinapaisen roottorin kanssa. Tällöin koko koneen staattoriselkä joudutaan valmistamaan paksuksi, vaikka suurinapamääräisen pääroottorin etu nimenomaan on se, ettei selän tarvitse olla paksu.

Tutkitussa koneessa staattorin selkä ei ollut aivan tarpeeksi paksu, mutta rakenne toimi, koska tuuletinroottorin ylimääräinen vuo pääsi kiertämään staattoriselässä osittain pääroottorin alueelta. Tämä ei kuitenkaan ole hyvä ratkaisu, koska vuo kulkee osittain koh-tisuorassa staattorilevyjen läpi, mikä aiheuttaa pyörrevirtahäviöitä. Lisäksi tämä vaikeuttaa koneen suunnittelua, koska jos koneen ajatellaan koostuvan kahdesta irrallisesta koneesta, on simuloitu vuo todellisuutta pienempi ja hammasvääntömomentti todellisuutta suurempi. Eli tässä tapauksessa koneet käyttäytyvät yhdessä ja yksin isossa staattorisessa mallin mukaan, mutta tuuletinroottori ei toimi lyhyessä staattorisessa oikein, staattoriselän kyllästymisestä johtuen. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että tuuletinroottoreilla varustetussa koneessa paras tuuletinroottorin napaparimäärä näyttäisi olevan mahdollisimman pieni, mutta suurempi kuin yksi.

5.2. Käämitysten suunnittelun pohdintaa

Käämityksen suunnitteleminen kaksiroottoriselle koneelle on ongelmallista, koska ei ole olemassa menetelmää, minkä avulla voisi helposti suunnitella käämityksen siten, että kummallekin roottorille saataisiin hyvä käämityskerroin. Perinteiset menetelmät, jotka tässäkin työssä on esitelty, on tarkoitettu yksiroottoriselle koneelle, jolloin tuloksena on käämitys, jossa on pääroottorille hyvä käämityskerroin. Tällöin tuuletinroottorin käämityskerroin saattaa olla tarpeeksi hyvä, kuten prototyyppikoneessa, mutta yleensä näin ei ole. Tätä diplomityötä varten perehdyttiin myös erilaisiin käämityksiin, joten tässä käydään läpi hieman kaksiroottorisen koneen käämitykseen vaikuttavia tekijöitä.

Käämityksiä suunniteltiin paljon erilaisia, staattorin uramäärän ja roottorin napamäärän vaihtuessa. Käämityksiä suunniteltiin erikseen uratähden ja vyyhtiryhmäkaavion avulla, sekä yksi- että kaksikerroksisina. Todettiin, että kaksikerroksinen käämitys ei sovi tuuletinroottoreilla varustetulle koneelle, koska tuuletinroottorille ei saada riittävän suurta käämityskerrointa. Tällöin soveltuvat uraluvut pienenevät puolella, koska yksikerros-

käämitys voidaan käämiä vain staattoriin, jonka uraluku on jaollinen kuudella, kun taas kaksikerroksinen käämitys voidaan käämiä myös kolmella jaollisiin uralukuihin.

Sopiva käämitys tietyille tuuletinroottoreilla varustetulle koneelle on mahdollista löytää siten, että suunnitellaan kummallakin esitellyistä menetelmistä useita käämityksiä, joiden uraluku sekä napaluku ovat lähellä haluttuja. Näistä sitten valitaan sellainen, jonka käämityskertoimet ovat tarpeeksi hyvät kummallekin roottorille, jos tällainen löytyy. Tämä tapa ei kuitenkaan ole kovin hyvä, koska mahdollisia symmetrisiä käämityksiä on olemassa todella suuri määrä, eikä näin välttämättä löydetä tuuletinroottoreilla varustetulle koneelle parhaita mahdollisia käämityksiä. Mahdollisten käämitysten määrää voidaan lisätä huomattavasti jos vyyhtiryhmäkaavion avulla suunniteltaessa vyyhtiryhmien q_a ja q_b järjestystä muutetaan. Tällöin käämityksen suunnittelu on todella aikaavievää, koska läpikäytäviä käämityksiä on todella suuri määrä, lisäksi paras käämitys saattaa silti jäädä löytymättä, sillä näinkään ei kaikkia mahdollisia käämityksiä käydä läpi. Käämityksen valinnassa täytyy lisäksi huomioida miten käämitys on käytännössä mahdollista käämiä. Monessa tapauksessa johdinten sijainti on sellainen, että kääminpäät tulisivat kohtuuttoman pitkiksi.

Jatkotutkimuskohde olisikin kehittää tietokoneohjelma, joka muodostaisi erilaisia käämityksiä ja laskisi niiden käämityskertoimet eri napaluvuille. Ohjelmalle annettaisiin syöttötietona uraluku ja vaihemäärä, ja ohjelma muodostaisi näille kaikki mahdolliset symmetriset käämitykset ja laskisi niiden käämityskertoimet. Ohjelma antaisi ulostulona vain parhaat käämitykset haluttujen napalukujen käämityskertoimien mukaan järjestettynä. Näistä ohjelmaa käyttävä suunnittelija voisi sitten valita käämityksen, joka olisi helposti käämittävissä. Tämä nopeuttaisi ja helpottaisi tuuletinroottoreilla varustettujen koneiden käämitysten suunnittelua huomattavasti.

Taulukossa 4 on verrattu prototyyppikoneessa käytettyä käämitystä A kolmeen muuhun käämitykseen, jota voisi mahdollisesti käyttää vastaavassa koneessa. Käämitykset A, B ja C ovat 36-uraisia ja käämitys D on 18-urainen. Taulukossa on esitetty kunkin käämityksen eri napaparimäärien p käämityskertoimet sekä vaihejohtimien sijainti staattorin urissa. Selvyyden vuoksi yhden vaiheen johtimet on merkitty taulukkoon korostetulla taustavärillä. Punaisilla numeroilla merkityt käämityskertoimet tarkoittavat peruskäämi-

Taulukko 4. Neljän eri käämityksen käämityskertoimet ja johdinten sijainti staattoris-
sa.

Käämityskertoimet					Johdinten sijainti				
p	A	B	C	D	Ura	A	B	C	D
1	0,0837				1	1	1	1	1
2			0,1466		2	-1	2	-1	-3
3	0,1725	0,2588		1	3	1	-2	1	2
4			0,1536		4	-1	-3	-1	-1
5	0,0919				5	1	3	1	3
6					6	-1	1	-1	-2
7	0,1017				7	-2	-1	2	1
8			0,1884		8	2	-2	-2	-3
9	0,2357	0,7071		1	9	-2	2	2	2
10			0,2245		10	2	3	-2	-1
11	0,1453				11	-2	-3	2	3
12					12	2	-1	-2	-2
13	0,1972				13	3	1	3	1
14			0,422		14	-3	2	-3	-3
15	0,644	0,9659		1	15	3	-2	3	2
16			0,8312		16	-3	-3	-3	-1
17	0,9561				17	3	3	3	3
18			1		18	-3	1	-3	-2
19	0,9561				19	-1	-1	1	
20			0,8312		20	1	-2	-1	
21	0,644	0,9659		1	21	-1	2	1	
22			0,422		22	1	3	-1	
23	0,1972				23	-1	-3	1	
24					24	1	-1	-1	
25	0,1453				25	2	1	2	
26			0,2245		26	-2	2	-2	
27	0,2357	0,7071		1	27	2	-2	2	
28			0,1884		28	-2	-3	-2	
29	0,1017				29	2	3	2	
30					30	-2	1	-2	
31	0,0919				31	-3	-1	3	
32			0,1536		32	3	-2	-3	
33	0,1725	0,2588		1	33	-3	2	3	
34			0,1466		34	3	3	-3	
35	0,0837				35	-3	-3	3	
36					36	3	-1	-3	

tyksen kolmella jaollisia napaparimääriä, jotka eivät tuota pyörivää magneettikenttää ja joita ei siten voida käyttää.

Käämitys B voisi sopia hyvin tuuletinroottoreilla varustettuun koneeseen, koska siinä tuuletinroottorin napapariluku on 3, mikä on prototyypikonetta parempi. Tähän käämitykseen pääroottoriksi sopisi 15-napaparinen roottori. Tämän käämityksen hyvä puoli on myös se, että se ei tuota muita pieninapaparimääräisiä yliaaltoja. Tämä johtuu siitä, että käämitys muodostuu kolmesta peruskäämityksestä, minkä näkee myös johdinten sijainnista. Samaa peruskäämistä voidaan käyttää myös käämityksissä, joiden uramäärä on eri. Jos peruskäämistä olisi kaksi, saataisiin 24-uraiseen staattoriin 2- ja 10-napapariset roottorit, jos neljä niin 48-uraiseen staattoriin 4- ja 20-napapariset roottorit. Käämityskertoimet pysyisivät kuitenkin samoina.

Käämitys C puolestaan koostuu kahdesta peruskäämityksestä. Siinä tuuletinroottorin napapariluku on 2 ja pääroottorin 16. Tämän käämityksen etu on neljänapainen tuuletinroottori, mikä on ehkä paras napamäärä tuuletinroottorille. Pääroottorin käämityskerroin on hieman huonompi verrattuna käämityksiin A ja B. Toisaalta taas tässä käämityksessä kääminpäät jäävät lyhyemmiksi kuin käämityksessä B. Käämitys on rakenteeltaan lähes sama kuin käämitys A, jota käytettiin prototyypimoottorissa.

Käämitys D on puolestaan erikoisempi. Siinä staattorin uraluku on 18 ja se koostuu kolmesta peruskäämityksestä. Käämityksen voimakkain tuottama magneettikenttä on 3-napaparinen, jota käytettäisiin tässä tuuletinroottorille. Pääroottorille puolestaan voitaisiin käyttää ensimmäistä urayliaaltokenttää, jonka napapariluku on 15. Koska tässä rakenteessa tuuletinroottori toimii voimakkaimmalla kentällä, saattaa syntyä ongelmia. Tämä rakenne vaatii tarkempaa tutkimusta ennen kuin voidaan todeta onko se hyvä ratkaisu.

5.3. Tuuletinroottoreilla varustetun koneen ominaisuudet ja mahdolliset käyttökohteet

Vaikka työssä tutkitaankin pääasiassa kaksiroottorista rakennetta, olisi todellinen tuuletinroottoreilla varustettu kone kuitenkin kolmiroottorinen, jolloin koneen kummassakin päässä olisi tuuletinroottori. Kaksiroottorista rakennetta on käytetty tutkimuksissa siksi, että simulointi ja prototyypikokeet ovat yksinkertaisempia. Kaikki johtopäätökset ja sijaiskytkentä pätevät kuitenkin myös kolmiroottoriselle koneelle.

Tuuletinroottoreiden tarkoituksena on kierrättää ilmaa koneen sisällä ja siten jäähdyttää staattorin kääminpäitä. Kääminpäiden jäähdytys on muilla menetelmillä hankalaa hitaasti pyörivissä koneissa, joiden kotelorakenne on suljettu. Tällaisissa koneissa kääminpäät ovatkin yleensä koneen kuumin osa ja niiden lämpötila on siten koneen kuormittavuutta rajoittava tekijä. Täten tuuletinroottoreilla jäähdytettyä konetta voidaan kuormittaa enemmän, eli samankokoisesta koneesta saadaan enemmän tehoa tuuletinroottoreiden avulla. Tuuletinroottorit kuitenkin myös kasvattavat koneen kokoa, koska staattorin tulee olla pidempi. Suurin hyöty tuuletinroottoreista saadaankin mahdollisimman pitkässä koneessa, jolloin tuuletinroottorien pituus on pieni suhteessa pääroottorin pituuteen.

Tuuletinroottoreilla varustetuilla koneella on kuitenkin myös useita huonoja puolia verrattuna tavalliseen yksiroottoriseen koneeseen. Koneen rakenne on monimutkaisempi ja siten se saattaa vikaantua helpommin. Lisäksi monimutkainen rakenne on kalliimpi valmistaa. Valmistuskustannuksia on kuitenkin vaikea verrata tavalliseen koneeseen, koska niitä myös vähentää koneen pienentynyt koko, joka on seurausta suuremmasta tehotiheydestä. Tuuletinroottoreilla varustetun koneen hyötysuhde on hieman huonompi verrattuna tavalliseen koneeseen, johtuen tuuletinroottorin tuuletin-, kitka- ja rautahäviöistä sekä kuparihäviöistä, joita syntyy staattorinjatkeen johtimissa. Lisäksi koneen suurempi kuormittaminen laskee hyötysuhdetta. Tuuletinroottoreilla varustetun koneen käämistystä ei voida yhtä vapaasti valita kuin tavallisessa koneessa, johtuen siitä, että tuuletinroottori tarvitsee yliaaltoja toimiakseen. Tällöin yliaaltoja ei voida vähentää käämistyksen valinnalla ja siten niiden aiheuttamat haitat ovat suuremmat. Yliaallot lisäävät koneen häviöitä ja voivat aiheuttaa koneen tuottamaan vääntömomenttiin väreitä.

Tuuletinroottoreilla varustettu kone ei sovellu läheskään kaikkiin käyttökohteisiin, joihin tavallista yksiroottorista konetta käytetään. Joissakin sovelluksissa se saattaa kuitenkin olla parempi. Ominaisuuksiensa vuoksi se ei sovellu tarkkaa säätöä eikä suuria kiihdytyksiä vaativaan käyttöön. Tuuletinroottorin jatkuvan virrantarpeen takia se ei sovellu myöskään käyttöihin, joissa kone pyörisi paljon vajaakuormilla suurilla nopeuksilla, koska tällöin häviöt olisivat suuret. Hyviä käyttökohteita koneelle sitä vastoin ovat käytöt, joissa vaaditaan suurta vääntömomenttia ja hidasta pyörimisnopeutta, ja joita ajetaan tasaisella nopeudella, lähellä nimelliskuormaa. Lisäksi koneen suurempi tehotehitys voi olla eduksi joissain käyttökohteissa.

Simuloinneissa tutkittiin sekä uutta tuuletinroottoria A, jossa on 1/sini-muotoinen ilmaväli, että uutta tuuletinroottoria B, jossa napojen leveys on eri. Nämä molemmat rakenteet todettiin toimiviksi, mutta niillä kummallakin on omat hyvät ja huonot puolensa. Uuden tuuletinroottorin A indusoima jännite sisälsi vähemmän yliaaltoja ja tuotti tasaisempaa vääntömomenttia. Mutta myös uuden tuuletinroottorin B, tuottama vääntömomentti on tarkoitukseen riittävän tasaista. Koska uusi tuuletinroottori B on rakenteeltaan yksinkertaisempi, tuottaa suuremman magneettivuon ja siten vääntömomentin, on se luultavammin parempi vaihtoehto. Tämä pätee kuitenkin vain tutkitulle kaksinapaiselle koneelle ja siten muotoiltu roottori saattaa olla parempi vaihtoehto koneissa, joissa on suurempi napamäärä.

Koska uudessa tuuletinroottorissa A magneetit ovat upotettuja ja roottorin ulkoreunat ovat sähköterästä, saattaa käydä niin, että osa staattorin tuottamasta suurempinapapariääräisestä vuosta kulkee tämän reunan kautta. Tämä pienentäisi pääroottorin tuottamaa vääntömomenttia. Lisäksi, jos tuuletinroottorissa on upotetut magneetit ja pääroottorissa pinnalla olevat magneetit, tai päinvastoin, täytyy roottorien välin olla suurempi kuin tilanteessa, jossa roottorit ovat samanlaiset. Tämä johtuu siitä, että jos roottorien rakenne on eri, saattaa osa roottorin magneettien tuottamasta vuosta kulkea vain roottorien välisen ilman kautta roottorista toiseen ja takaisin.

5.4. Jatkotutkimusmahdollisuuksia

Koska tämä diplomityö on pääasiassa alustava tutkimus uudeltaisesta rakenteesta, jatkotutkimusmahdollisuuksia löytyi paljon. Tutkimuksissa käytetty prototyyppi oli toimiva ratkaisu, mutta siinä on paljon kehittämismahdollisuuksia. Tuuletinroottorille parempi napaparimäärä olisi luultavasti 2 tai 3. Tällaisia roottoreita voisi tutkia simuloimalla ja myös prototyyppien avulla. Tässä työssä kehitettyjä roottorivaihtoehtoja ei suoraan voida muuttaa useampinapaisiksi, mutta työssä tehdyistä havainnoista on varmasti suunnittelussa apua. Myöskään koneen käämitys ei ollut optimaalinen. Erilaisten käämistysten vertailu ja suunnittelumenetelmien kehittäminen on myös jatkotutkimuskohde, jos tuuletinroottoreilla varustettua konetta halutaan vielä tutkia.

Myös koneen mekaanisessa rakenteessa on paljon kehittämistä. Tuuletinroottorin kiinnitysmenetelmä vaatii parantamista. Tuuletinroottorin laakeriinkin liittyy monta ongelmaa. Laakerin tulee luultavasti olla kestovoideltu, koska koneen sisällä olevan laakerin voitelemine on hyvin hankalaa. Kestovoidellun laakerin ongelmana ovat kuitenkin suuremmat kitkahäviöt ja laakerin riittävä käyttöikä suurella pyörimisnopeudella. Lisäksi tulee käyttää erikoislaakeria, joka ei johda magneettivuota koneen akselin läpi ja aiheuta siinä siten häviöitä. Toinen mahdollisuus on käyttää akselia, joka ei johda magneettivuota.

Käytetyn prototyypin ongelmana oli, ettei tuuletinroottorin tuottamaa vääntömomenttia pystytty mittaamaan. Tätä voitaisiin tutkia rakentamalla suurempi tuuletinroottori, joka kiinnitettäisiin pääakseliin, jolloin mittaaminen olisi mahdollista. Paras ratkaisu olisi prototyyppi, josta pystyttäisiin mittaamaan kummankin roottorin tuottamat vääntömomentit. Myös simuloimalla voitaisiin tutkia erilaisia kaksiroottorisia rakenteita ja näin tutkia tarkemmin useampiroottorisen koneen käyttäytymistä. Koneen ohjausta tulisi myös tutkia ja kehittää aiemmin kuvattu ohjaustapa, joka syöttää koneelle suurempaa virtaa vajaakuormilla.

6. YHTEENVETO

Diplomityössä tutkittiin tuuletinroottoreilla varustettua kestromagneettimoottoria, jossa koneen akselilla on pääroottorin lisäksi molemmissa päissä nopeammin pyörivä tuuletinroottori. Rakenteen toiminnan mahdollistaa staattorin murtovakokäämitys, joka tuottaa sekä pääroottorin että tuuletinroottorien napamäärän omaavia magneettivuon kenttiä. Työssä tutkittiin tätä uudenlaista rakennetta yleisesti monelta eri kannalta. Siten työ soveltuu myös lähtökohdaksi monelle jatkotutkimukselle.

Työn pääpaino oli rakenteen simuloinnissa, jossa käytettiin elementtimenetelmää. Ensimmäiseksi muodostettiin simulointimalli alkuperäisestä, toimimattomasta prototyypikoneesta ja pyrittiin simuloimalla selvittämään miksi se ei toiminut. Simuloimalla todettiin, että käytetty kaksinapainen pintamagnetoitu tuuletinroottori tuotti hyvin epätasaisen vääntömomentin. Tämän todettiin olevan suurin syy siihen, että tuuletinroottori ei pyörinyt. Seuraavaksi simulointien avulla suunniteltiin uusi tuuletinroottori, jossa magneetit olivat upotettuja ja roottorin sähköteräslevyt muotoiltuja siten, että roottorin ja staattorin välinen ilmaväli oli 1/sini-muotoinen. Tämä roottori tuotti simulointien mukaan tasaista vääntömomenttia ja siten siitä rakennettiin myös prototyyppi. Uusi prototyyppituuletinroottori todettiin myös käytännössä toimivaksi.

Diplomityössä kehitettiin simulointien avulla myös toinen, vaihtoehtoinen tuuletinroottoriratkaisu. Tämä tuuletinroottori on rakenteeltaan huomattavasti yksinkertaisempi ja tuottaa suuremman vääntömomentin, joka on myös riittävän tasainen käyttötarkoitukseen. Tämä tuuletinroottori on pintamagnetoitu, mutta napojen leveys on keskenään erisuuri. Tästä johtuen se ei reagoi pääroottorin magneettikentän kanssa ja sen vääntömomentti on tasaisempaa kuin alkuperäisessä, toimimattomassa prototyypissä.

Tuuletinroottoreilla varustetusta koneesta tehtiin myös kolmiulotteinen simulointimalli, jossa oli kaksi roottoria. Tämän mallin avulla tutkittiin roottorien toimintaa yhdessä ja vaikutusta toisiinsa. Simulointien tuloksista todettiin, että roottorit eivät reagoi juuri ollelleen toisiinsa ja täten kaksiroottorinen kone käyttäytyy kuten kaksi sarjaankytkettyä erillistä konetta. Tulosta voidaan käyttää apuna erilaisten tuuletinroottoreilla varustettujen koneiden suunnittelussa. Työssä kehitettiin myös yksinkertainen sijaiskytkentä use-

amproottoriselle koneelle. Myös käämityksen suunnitteluun perehdyttiin ja esitettiin joitain periaatteita, joiden avulla on mahdollista suunnitella tuuletinroottoreilla varustetulle koneelle soveltuva käämitys.

Simulointien ja prototyypitestiä tulosten pohjalta pohdittiin tuuletinroottoreilla varustetun koneen ominaisuuksia sekä mahdollisia käyttökohteita. Se on rakenteeltaan monimutkaisempi ja vaatii monimutkaisemman ohjauksen kuin vastaava kone ilman tuuletinroottoreita. Lisäksi sen hyötysuhde on huonompi, jos konetta ajetaan paljon vajaateholla. Tuuletinroottoreilla varustetun koneen paremman kääminpäiden jäähdytyksen takia sitä voidaan kuitenkin kuormittaa enemmän ja siten koneen tehotiheys on parempi. Hyvä käyttökohte koneelle olisi käyttö, jossa siltä vaaditaan pientä kokoa, suurta vääntömomenttia ja hidasta pyörimisnopeutta, sekä sitä ajetaan enimmäkseen lähellä nimelliskuormaa.

LÄHDELUETTELO

- Aura, Lauri & Antti J. Tontteri (1996). *Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet*. 1. painos. Porvoo: WSOY. 544 s. ISBN 951-0-20167-7.
- Bianchi, N. & M. Dai Pré (2006). Use of the star of slots in designing fractional-slot single-layer synchronous motors. *IEE Proceedings - Electric Power Applications* 153:3, 459–466. ISSN 1350-2352.
- Bianchi, Nicola, Silverio Bolognani, Michele Dai Pré & Giorgio Grezzani (2006). Design considerations for fractional-slot winding configurations of synchronous machines. *IEEE Transactions on Industry Applications* 42:4, 997–1006. ISSN: 0093-9994.
- Fitzgerald, A. E., Charles Kingsley & Stephen D. Umans (1990). *Electric Machinery*. 5. painos. New York: McGraw-Hill Inc. 599 s. ISBN 0-07-021134-5.
- Gieras, Jacek F. & Mitchell Wing (2002). *Permanent Magnet Motor Technology – Design and Applications*. 2. painos. New York: Marcel Dekker Inc. 590 s. ISBN 0-8247-0739-7.
- Hameyer, K. & R. Belmans (1999). *Numerical Modelling and Design of Electrical Machines and Devices*. Southampton: WIT Press. 305 s. ISBN 1-85312-626-8.
- Heikkilä, Tanja (2002). *Permanent Magnet Synchronous Motor for Industrial Inverter Applications – Analysis and Design*. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. 109 s. Väitöskirja. ISBN 951-764-699-2.
- Heller, B. & V. Hamata (1977). *Harmonic Field Effect in Induction Machines*. Amsterdam: Elsevier scientific publishing company. 330 s. ISBN 0-444-99856-X.

- Hörtz, M., H.-G. Herzog & A. Haas (2006). Axial flux machine with single tooth fractional slot winding – Comparison of different winding design approaches. *SPEEDAM 2006 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 1444–1448. ISBN: 1-4244-0193-3.
- Jokinen Tapani (1973). *Utilization of Harmonics for Self-Excitation of a Synchronous Generator by placing an Auxiliary Winding in the Rotor*. Helsinki: Helsinki University of Technology. 82 s. Väitöskirja. ISBN 951-666-024-X.
- Jussila, Hanne (2005). *Napakäämityn murtovakokestomagneettitahtikoneen suunnittelu*. 63 s. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.
- Parviainen, Asko (2005). *Design of Axial-Flux Permanent-Magnet Low-Speed Machines and Performance Comparison between Radial-Flux and Axial-Flux Machines*. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 153 s. Väitöskirja. ISBN 952-214-029-5.
- Perho, J., A. Niemenmaa, T. Jokinen & A. Arkkio (1995). *Vaihtosähkökoneiden yliaaltoilmiöt Sähkömekaniikan lisensiaattiseminaari*. Otaniemi: Teknillinen korkeakoulu. 181 s. ISBN 951-22-2850-5.
- Perho, Jarmo (2006). *Winding Design*. Espoo: Teknillinen korkeakoulu. 50 s. Opetusmoniste. ISBN 951-22-8225-9.
- Puranen, Jussi (2006). *Induction Motor versus Permanent Magnet Synchronous Motor in Motion Control Applications: a comparative Study*. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 147 s. Väitöskirja. ISBN 952-214-297-2.
- Pyrhönen, Juha (1995). *Pyörivän sähkökoneen suunnitleminen*. Opetusmoniste. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. 279 s. ISBN 951-763-868-X.

- Salminen, Pia (2004). *Fractional Slot Permanent Magnet Synchronous Motors for low Speed Applications*. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 150 s. Väitöskirja. ISBN 951-764-983-5.
- Sen, P. C. (1997). *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. 2. painos. New York: John Wiley & Sons. 615 s. ISBN 0-471-02295-0.
- Stepina, J. (1968). Fundamental equations of the space vector analysis of electrical machines. *Acta Technica CSAV* 2, 184–198.
- Stepina, J. (1986). Matrix calculation of inductances for the general theory of electrical machines. *Electric Machines and Power Systems* 11:1, 53–64.
- Stepina, J. (1987). Matrix analysis of space harmonics of asymmetrical stator windings. *IEE Proceedings B. Electric Power Applications* 134, 207–210.
- Vogt, K. (1996). *Berechnung elektrischer Maschinen*. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH. 524 s. ISBN 3-527-28391-9.