

Napakäämityn murtovakokestomagneettitahtikoneen suunnittelu

Diplomityön aihe on hyväksytty Lappeenrannan teknillisen korkeakoulun sähkötekniikan osaston osastoneuvoston kokouksessa 12.10.2005.

Työn tarkastajina ja ohjaajina toimivat professori Juha Pyrhönen ja TkT Pia Salminen.

Lappeenrannassa 19.12.2005

Hanne Jussila

Kaivosuonkatu 2 A 20

53850 Lappeenranta

TIIVISTELMÄ

Tekijä: Jussila, Hanne

Nimi: **Napakäämityn murtovakokestomagneettitahtikoneen suunnittelu**

Osasto: Sähkötekniikan osasto

Vuosi: 2005

Paikka: Lappeenranta

Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 63 sivua, 21 kuvaa ja 9 taulukkoa.

Tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen ja TkT Pia Salminen

Hakusanat: kestromagneettitahtikone, murtovakokäämitys, napakäämitys, sähkökoneen suunnittelu

Diplomityössä tutustutaan napakäämittyihin murtovakokestomagneettitahtikoneisiin sekä syvennyttään niiden suunnitteluun analyyttisen laskennan avulla. Analyyttisen laskennan haasteena on perinteisesti käytettyjen kestromagneettitahtikoneiden laskentayhtälöiden soveltaminen murtovakokäämityille kestromagneettitahtikoneille. Työn lopussa analyyttisen laskennan tuloksia verrataan kenttälaskentaohjelmalla saatuihin tuloksiin. Tärkeimmät analyyttiset yhtälöt sekä laskentamallin rakenne on esitetty työssä.

ABSTRACT

Author: Jussila, Hanne

Subject: **Design of concentrated-winding fractional-slot permanent-magnet synchronous machine**

Department: Electrical engineering

Year: 2005

Place: Lappeenranta

Master's Thesis. Lappeenranta University of Technology. 63 pages, 21 figures and 9 tables.

Examiners: Professor Juha Pyrhönen and D.Sc. Pia Salminen

Keywords: permanent magnet machine, fractional slot, concentrated-winding, design of electrical machine

In this master's thesis concentrated-winding fractional-slot permanent-magnet machines and their analytical design are studied. The challenge of the analytical calculation is to convert the method used conventionally in the design of permanent magnet machine suitable to the design of fractional-slot permanent-magnet synchronous machine. At the end of this master's thesis the results of analytical calculations are compared to the results found by finite element analysis. The most essential analytical equations and the analytical structural schematic drawing are brought out in this master's thesis.

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston sähkötekniikan osastossa. Kiitos kaikille, jotka osallistuivat työn ohjaamiseen sekä minun neuvomiseen. Kiitos myös kaikille kannustajille ja tukijoille.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT.....	3
ALKUSANAT	4
SISÄLLYSLUETTELO	5
LYHENTEET JA MERKINNÄT	6
1 NAPAKÄÄMITYT MURTOVAKOKESTOMAGNEETTITAHTIKONEET	12
1.1 Kestomagneettien sijainti roottorissa.....	14
1.1.1 Pintamagneetit	15
1.1.2 Upotetut magneetit.....	16
1.2 Käämitysrakenne	18
1.2.1 Symmetrisyys.....	19
1.2.2 Käämitysten suunnittelu	21
1.2.3 Yksikerrosmurtovakokäämitykset	22
1.2.4 Kaksikerrosmurtovakokäämitykset	23
2 ANALYYTTINEN LASKENTA	28
2.1 Johdatus	28
2.2 Analyyttisen laskentamallin rakenne	29
2.3 Tärkeimmät yhtälöt.....	32
2.3.1 Käämityskerroin.....	32
2.3.2 Ilmavälivuontiheyden ja vuon määritys.....	33
2.3.3 Tahti-induktanssi ja vääntömomentti.....	41
2.3.4 Vääntömomentti.....	47
2.3.5 Resistanssi ja virta	49
2.3.6 Häviöt.....	51
2.3.7 Hyötysuhde	53
3 TULOKSIA	54
3.1 Vastasähkömotorinen voima.....	54
3.2 Huippuvääntömomentti	55
3.3 Häviöt.....	58
4 JOHTOPÄÄTÖKSET	61
LÄHTEET	62

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Symbolit

a	Rinnakkaisten käämihaarojen lukumäärä
A	Virtakate
A_{cond}	Johtimen pinta-ala
A_s	Uran pinta-ala
A_{1n}	Kerroin ilmavälivuontiheyden määrittämiseen
A_{2n}	Kerroin ilmavälivuontiheyden määrittämiseen
A_{3n}	Kerroin ilmavälivuontiheyden määrittämiseen
B_r	Remanenssivuontiheys
B_t	Hampaan vuontiheys
B_y	Staattoriselän vuontiheys
$B_{\delta,PM}$	Ilmavälivuontiheys
b_b	Vyyhdenpään leveys
b_m	Magneetin leveys
b_s	Staattorin uran leveys
b_{ds}	Staattorin hampaan leveys
$\cos\varphi$	Tehokerroin
d_{se}	Staattorin ulkohalkaisija
d_s	Staattorin sisähalkaisija
d_r	Roottorin ulkohalkaisija
E_{PM}	Vastasähkömotorinen voima
f	Taajuus
f_s	Staattorikentän taajuus
f_{Br}	Kerroin ilmavälivuontiheyden määrittämiseen
g	Kerroin
H_c	Koersiivikentänvoimakkuus
h_b	Vyyhdenpään korkeus, radiaalisesti
h_m	Kestomagneetin korkeus
h_{ys}	Staattorin selän korkeus
h_s	Staattorin uran korkeus
$I_{d,ph}$	Pitkittäissuuntainen vaihevirta

$I_{q,ph}$	Poikittaissuuntainen vaihevirta
I_n	Nimellisvirta
J	Virran tiheys
k	Indeksi, kerroin
k_{cond}	Johtimien lukumäärä käämissä
k_{Cu}	Kuparin materiaalikerroin
k_e	Lisähäviökerroin
k_f	Täytekerroin
$k_{Fe, t}$	Kerroin rautahäviöiden määrittämiseen staattorin hampaassa
$k_{Fe, y}$	Kerroin rautahäviöiden määrittämiseen staattorin selässä
k_h	Kerroin hystereesihäviöiden määrittämiseen
k_{cond}	Yhden urassa olevan johtimen rinnakkaisten säikeiden lukumäärä
k_{rb}	Kerroin laakerihäviöiden määrittämiseen
K_B	Kerroin ilmavälivuontiheyden määrittämiseen
l	Staattorilevypaketin fyysinen pituus
l_b	Keskimääräinen vyyhdenpään pituus
l_e	Staattoripaketin efektiivinen pituus
l_{cond}	Yhden kuparisilmukan pituus
L_d	Pitkittäisakselin suuntainen induktanssi
L_{md}	Pitkittäisakselin suuntainen magnetointi-induktanssi
L_{mq}	Poikittäisakselin suuntainen magnetointi-induktanssi
L_n	Uran hajainduktanssi
L_q	Poikittäisakselin suuntainen induktanssi
$L_{s\sigma}$	Staattorin hajainduktanssi
L_z	Hampaanpään induktanssi
L_σ	Hajainduktanssi
L_χ	Hajainduktanssi, vinoutus
m	Vaiheluku, Massa
m_{Cu}	Kuparin massa
$m_{Fe, y}$	Raudan massa, selkä
$m_{Fe, t}$	Raudan massa, hampaat
M_n	Kerroin vuontiheyden laskentaan
M_m	Kerroin vuontiheyden laskentaan

n	Vakoluku q :n jakaja, Pyörimisnopeus, Harmonisten järjestysluku
N_c	Urassa olevien käämikierrosten lukumäärä
N_{ph}	Käämikierrosten määrä yhdessä vaiheessa
p	Napapariluku
p_{10}	Kerroin rautahäviöiden määrittämiseen
P	Lähtöteho
P_{Br}	Laakerihäviöt
P_{Cu}	Kuparihäviöt
P_{Fe}	Rautahäviöt
P_h	Kokonaishäviöt
P_n	Nimellisteho
P_{Str}	Hajahäviöt
Q	Staattoriurin lukumäärä
q	Vakoluku (urien määrä vaihetta ja napaa kohti)
q_k	Saman vaiheen peräkkäisten osoittimien lukumäärä
r	Staattorin säteen ja kestopagneetin pintaan olevan säteen keskiarvo
r_{PM}	Kestomagneetin pintaan oleva säde
r_r	Roottorin säde
r_s	Staattorin säde
R_{ph}	Vaiheresistanssi
R_T	Resistanssi lämpötilassa T
t	Aika, Muuttuja, Määrittää käämitysjärjestyksen
T	Vääntömomentti, Lämpötila
U_{ph}	Vaihejännite
x_4	Uransuun leveys
y	Halkaisijavyyhden vyyhdenleveys
y_2	Staattoriuran käämityksen yläreunasta viiston osan alkuun
y_3	Staattoriuran viiston osan korkeus
y_4	Staattoriuran uransuun korkeus
z	Vakoluku q :n kertoja

Kreikkalaiset kirjaimet

α	Sähköinen kulma
α_i	Vuontiheyden aritmeettista keskiarvoa osoittava kerroin
α_n	Urakulma
α_p	Kestomagneetin leveys napajaon leveyteen
α_z	osoitinkulma
δ	Ilmavälin pituus
δ_a	Kuormituskulma
δ_e	Efektiivinen ilmavälin pituus
η	Hyötysuhde
θ	Integroinnin sijaintikulma
A_g	Kuvitteellinen permeanssi
A_{go}	Ylemmän kerroksen kuvitteellinen permeanssi
A_{gu}	Alemman kerroksen kuvitteellinen permeanssi
A_{so}	Ylemmän kerroksen permeanssi
A_{su}	Alemman kerroksen permeanssi
λ	Permeanssikerroin
λ_e	Vyyhdenpään reaktanssikerroin
λ_{ns}	Permeanssikerroin, kuvaa kaikkia λ kertoimia
λ_w	Vyyhdenpään reaktanssikerroin
λ_z	Hajainduktanssikerroin
Φ	Vuo
$\Phi_{\delta,PM}$	Kestomagneettien luoma ilmavälivuo
σ	Hajakerroin
σ_s	Staattorin hajakerroin
σ_T	Kuparin johtavuus lämpötilassa T
μ_{Fe}	Raudan permeabiliteetti
μ_{PM}	Kestomagneetin suhteellinen permeabiliteetti
μ_r	Suhteellinen permeabiliteetti
μ_0	Ilman permeabiliteetti (tyhjä)
ν	Harmoninen
ν_s	Uraharmoninen
τ_p	Napajako

τ_s	Urajako
ω	Sähköinen kulmataajuus
ω_s	Sähköinen kulmataajuus staattorikentässä
ξ_v	Käämityskerroin, v:s harmoninen
ξ_1	Käämityskerroin, perusharmoninen
Ψ	Käämivuo
Ψ_{PM}	Kestomagneettien aiheuttama käämivuo
Ψ_s	Staattorin käämivuo
Ψ_δ	Ilmavälin käämivuo

Lyhenteet

Cu	Kupari
Fe	Rauta
FEM	Finite element method , Kenttälaskentamenetelmä
NdFeB	Neodyymi-rauta-boori
PM	Permanent magnet, Kestomagneetti
p.u.	Per unit, Suhteellisarvo
RMS	Root mean square, Tehollisarvo
SMV	Sähkömotorinen voima

Tärkeimmät alaindeksit

b	Vyyhdempää
d	Pitkittäinen
q	Poikittainen
r	Roottori
s	Staattori
σ	Hajaannus
l	Perusaalto
v	Harmoninen
n	Nimellinen
y	Selkä
t	Hampaat

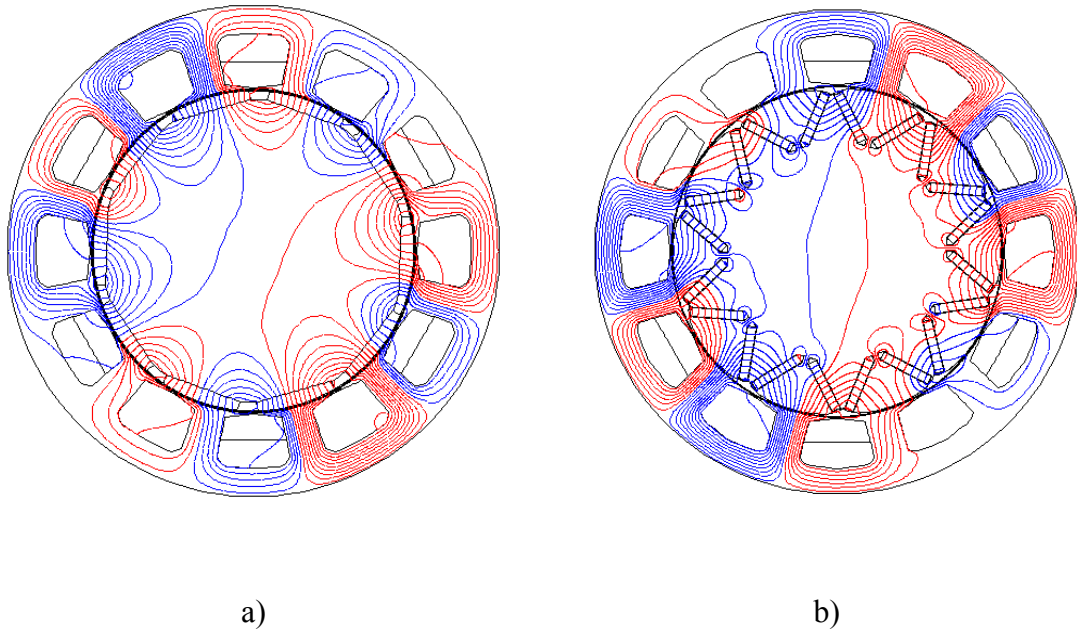
Muut

N Kokonaislukujoukko

1 NAPAKÄÄMITYT MURTOVAKOKESTOMAGNEETTI- TAHTIKONEET

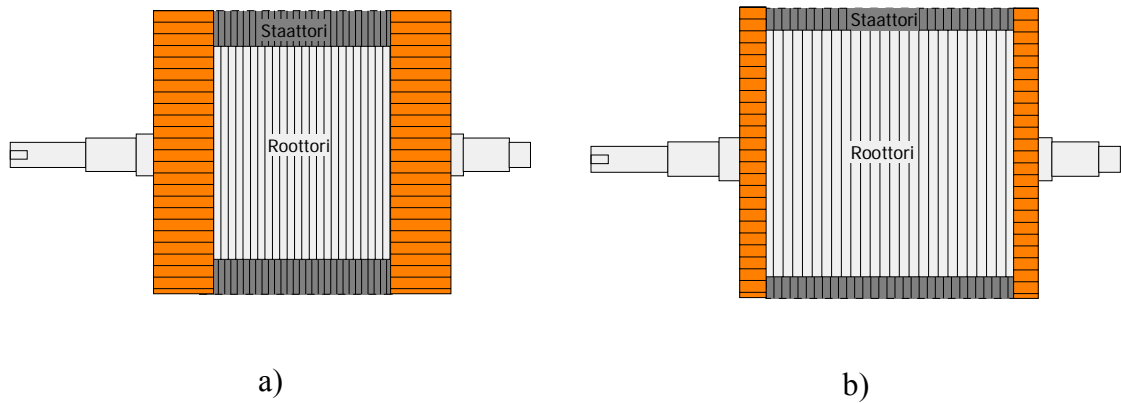
Kestomagneettitahtikoneessa pääosa magneettivuosta synnytetään kestomagneettien avulla. Tällöin ei tarvita perinteisen tahtikoneen tasavirralla syötettyä roottorikäännyttä, jolloin koneen rakenne yksinkertaistuu, hinta alenee sekä hyötysuhde paranee verrattuna perinteiseen rakenteeseen. Kestomagneettien avulla voidaan valmistaa tahtikoneita kilpailukykyiseen hintaan myös melko pienelle tehoalueelle. Tahtikoneen nimitys tulee siitä, että sen roottori pyörii stationaaritilassa koneen ilmavälimagneetikentän ja siten myös syöttävän verkon kanssa tarkalleen samalla nopeudella eli tahtinopeudella. Napakäämityt murtovakotahtikoneet ovat mielenkiintoisia, koska niiden avulla voidaan tietynkokoiseen runkoon valmistaa suurin mahdollinen roottori ja tuottaa siten perinteisiä konetyyppejä enemmän vääntömomenttia samasta tilavuudesta.

Napakäämityissä murtovakokestomagneettitahtikoneissa vakoluku eli staattoriurien määrä napaa ja vaihetta kohti on ykköstä pienempi murtoluku. Perinteisesti murtovakokäämityksissä vakoluku on ollut suurempi kuin yksi, mutta nykyisin heikosti johtavien kestomagneettiroottoreiden ansiosta voidaan varsinaisten kiertokenttäkäämitysten sijaan käyttää vakolukua alle ykkösen. Koneilla, joilla vakoluku on alle yhden, vuo voi esim. kulkea yhdestä hampaasta staattoriin ja palata kahta hammasta pitkin, kuva 1.



Kuva 1. a) Napakäämitty kestmagneettitahtikone, jossa kestmagneetit on asennettu moottorin pinnalle.
b) Kestomagneetit voivat myös olla upotetut moottorin sisälle esim. V-muotoon.

Koska vakoluvultaan alle ykkösen olevalla murtovakokäämityllä kestmagneettitahtikoneella on paljon napoja suhteessa urien määrään, voidaan staattoriselästä tehdä ohuempi kuin kokovakokoneella ja siten kasvattaa ilmaväliahkaisijaa. Moottorin vääntömomentin tuottokyky on verrannollinen ilmaväliahkaisijaan ja näin ollen ilmaväliahkaisijan suurentaminen kasvattaa moottorin tuottamaa vääntömomenttia. Oikein valituilla uralukunapapariyhdistelmillä voidaan käämiä yksi vyyhti yhden hampaan ympärille ja näin viereiset urat voivat muodostaa yhden vyyhdin, jolloin vyyhdenpituus on kaikista lyhyin mahdollinen. Kuparihäviöt ovat luonnollisesti pienimpiä, koska resistanssi on tapauskohtaisesti pienin mahdollinen lyhyiden vyyhdenpäiden vuoksi. Lyhyet vyyhdenpäät mahdollistavat koneen aktiiviosien pidentämisen. Suuren ilmaväliahkaisijan ja pitkän staattoripaketin johdosta vääntömomentti koneen rajoittamaa ulkoista tilavuutta kohti on suuri näillä koneilla. (Salminen 2004) Kuvassa 2 on esitetty kokovakokoneen ja murtovakokoneen fyysisiä eroavaisuuksia.



Kuva 2. a) Kokovakokoneen ja b) napakäämityn murtovakokoneen vyyhdenpäät. Vertaa myös roottorin kokoa, joka napakäämityssä koneessa on sekä halkaisijaltaan että pituudeltaan suurempi kuin kokovakokäämityssä koneessa. Esim. 45 kW kokovakokäämityn koneen ($p = 4$) vyyhdenpäissä on 22 kg kuparia, kun vastaavankokoisessa murtovakokäämityssä koneessa on vain 8 kg kuparia.

Vaikka roottorimateriaali on heikosti johtavaa, syntyy murtovakokäämityillä kestmagneettitahtikoneillakin merkittäviä roottorihäviöitä erityisesti suurilla pyörimisnopeuksilla. Tämän vuoksi konetyyppi soveltuu parhaiten alhaisen pyörimisnopeuden sovelluksiin, joissa vaaditaan korkeaa vääntömomenttia. Murtovakokäämityt kestmagneettitahtikoneet soveltuvat hyvin hitaisiin vaihteettomiin käyttöihin, esimerkiksi tuulimyllyihin, hisseihin, laivojen potkurijärjestelmiin, paperikoneisiin ja kulkuneuvoihin. (Salminen 2004)

1.1 Kestomagneettien sijainti roottorissa

Kestomagneetiksi kutsutaan materiaalia, jolla on erittäin laaja hystereesisilmukka – suuri remanenssi ja koersiivivoima. Kansanomaisesti ilmaistuna materiaali jää pysyvästi magneettiseksi jouduttuaan voimakkaaseen magneettikenttään. Suurin osa teollisuuden magneeteista valmistetaan pulverista puristamalla, eli ne ovat keraamisia magneetteja. Ylivoi- maisia magneettisilta ominaisuuksiltaan ovat neodyymi-rauta-boori-magneetit (NdFeB), koska niillä on suuri koersiivikentänvoimakkuus (H_c) sekä suuri remanessivuontiheys (B_r). Niiden heikkoutena ovat korkeahko hinta sekä heikko lämpötilan ja korroosion sieto. Eri- tyisesti voimakkaat NdFeB-magneetit ovat herkkiä kosteudelle. Ne voidaan kuitenkin pääl- lystää suoja-aineilla, joita ovat esim. tina, tina-nikkeli, sinkki tai orgaaniset päällysteet.

Roottori voi olla rakenteeltaan pintamagneetikone, jossa kestromagneetit ovat asennetut roottorin pinnalle. Vaihtoehtoisesti kestromagneetit voivat olla upotetut roottorin sisälle. Kuvassa 1 on esitetty pintamagneetikone, jonka roottorissa on 10 yksittäisestä magneetista muodostuvaa napaa ja uppomagneetikone, jossa yhtä roottorinapaa kohti on kaksi magneettia V-muodossa. Molempiin magneettien asennustapoihin liittyy omia huonoja ja hyviä ominaisuuksia.

1.1.1 Pintamagneetit

Yksinkertaisimmassa ja yleisimmässä roottorirakenteessa käytetään tällä hetkellä roottorin pinnalle asennettavia magneetteja. Koska magneetit asennetaan pyöreän roottorin pinnalle, on käytettävä joko muotoiltuja magneetteja tai pieniä magneettipaloja. Liimaamalla kiinnitetyt magneetit kestävät kiinni roottorissa vain pienillä pyörimisnopeuksilla. Suurilla pyörimisnopeuksilla keskipakovoiman vuoksi joudutaan käyttämään esimerkiksi hiilikuitupantoja liiman lisäksi varmistamaan magneettien kiinnipysyminen roottorin pinnalla. (Heikkilä 2002 s. 9 - 13) Hiilikuitupanta on toisaalta ongelmallinen, sillä se muodostaa lämpöeristyksen magneettien ympärille, jolloin pienetkin häviöt roottorissa saattavat nostaa magneettien lämpötilan kestävämmän korkeaksi.

Kestomagneettien permeabiliteetti on lähes sama kuin ilmalla (neomagneeteille $\mu_r = 1.05$) joten koneen efektiivinen ilmavälin pituus on suuri. Suuresta ilmavälin pituudesta johtuen koneen magnetointi-induktanssi on pieni. Pitkittäinen (d-akselin suuntainen) sekä poikittainen (q-akselin suuntainen) magnetointi-induktanssi ovat likimain samat riippumattomasta roottorin asennosta. Kestomagneettitahtikoneissa staattorin luoma vuo on usein pieni, luokkaa 0.1... 0.6 suhteessa kestromagneettien luomaan vuohon, joten ankkurireaktio on suhteellisen pieni. Mikäli roottorin metalliosat eivät aiheuta reluktanssieroja, pintamagneetikone on pääasiallisesti luonteeltaan umpinapainen kone, sillä neomagneettien permeabiliteetti on hyvin lähellä ilman permeabiliteettia ($\mu_r \approx 1.05$). (Heikkilä 2002 s. 9 – 13, Salminen 2004)

Pintamagneetit voidaan asentaa myös niin, että niiden väliin jäävä tila täytetään raudalla. Tässä tapauksessa magneetit ovat mekaanisesti paremmin suojatut ja kiinnitetyt roottoriin. Magneettien hajaannus valitettavasti kasvaa tätä asennustapaa käytettäessä. Koneita, jossa

on upotetut magneetit tai magneettien väli täytetty raudalla, voidaan pitää magneettisesti avonapaisena. Tällaisen koneen ilmapäli vaihtelee d- ja q-suunnissa, ja q-akselin suuntaisen magnetointi-induktanssi on suurempi. Koska induktanssit d- ja q-suunnissa ovat erilaiset, moottori tuottaa myös reluktanssivääntömomenttia. Suuri poikittainen magnetointi-induktanssi johtaa korkeampaan ankkurireaktioon kuin pintamagneetikoneilla, mikä puolestaan johtaa napakulman suurentumiseen samalla vääntömomentilla verrattuna vastaavaan pintamagneetikoneeseen. (Heikkilä 2002 s. 9 - 13)

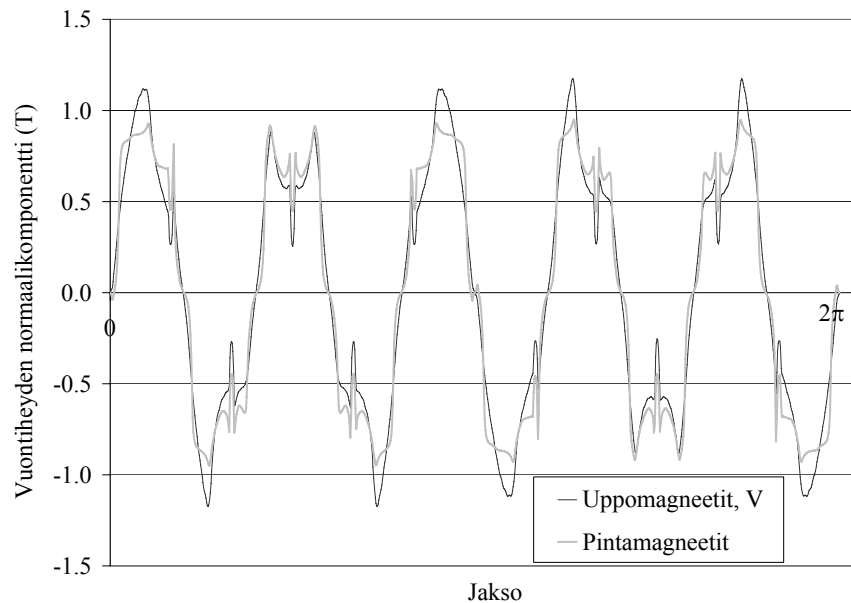
Pienten induktanssien vuoksi kestopagneetikoneiden kentänheikennys on vaikeaa. Kentänheikennyksessä pyörimisnopeuden tulisi kasvaa, vaikka käytettävissä oleva jännite on saavuttanut jo maksimiarvonsa. Kestomagneetikoneiden kentänheikennys on mahdollista vain lisäämällä negatiivista d-akselin suuntaista virtakomponenttia. Pienten induktanssien tapauksessa voidaan merkittävää kentänheikennystä saavuttaa vain suurella demagnetointivirralla, jolloin vääntömomentin tuottamiseen jää vain vähän virtaa. (Heikkilä 2002 s. 9 - 13)

1.1.2 Upotetut magneetit

Upotettuja magneetteja käytettäessä voidaan magneetit asentaa eri asentoihin. Tällaisessa tapauksessa magneetit ovat suorakaidemagneetteja, jolloin ne ovat hieman edullisempia kuin muotoillut magneetit. Upotettuja magneetteja voidaan käyttää myös suurnopeuskoneissa, sillä niissä upporakenne on mekaanisesti vahvempi. Magneetit ovat suojassa sekä sähköisiä että mekaanisia rasituksia vastaan. Upotetuilla magneeteilla on pienempi demagnetoitumisriski kuin pintamagneeteilla. (Heikkilä 2002 s. 9 - 13)

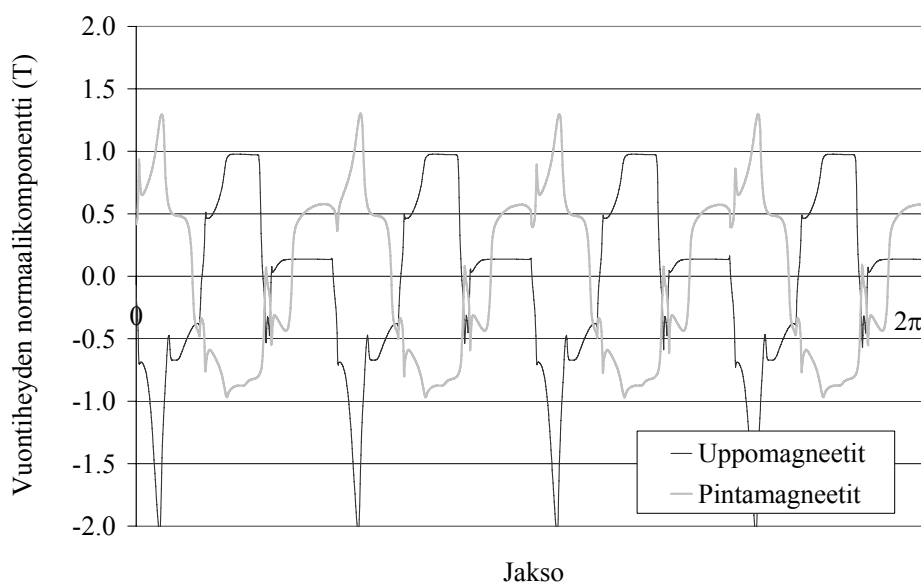
Roottoriin upotetuilla magneeteilla murtovakokäämityissä kestopagneettahtikoneissa voidaan saavuttaa parempi hyötysuhde kuin pinta-asennetuilla magneeteilla. Saman vääntömomentin tuottamiseen tarvittava johdinkierrosmäärä voi olla alhaisempi, jolloin kuparia tarvitaan vähemmän. Lisäksi uppomagneetikoneilla on rautaa roottorin pinnalla toisin kuin pintamagneetikoneilla, ja tämä johtaa pienempiin magneettien pyörrevirtahäviöihin sekä pienempään vääntöväreeseen. (Heikkilä 2002 s. 9 - 13) Rakenteen ongelmana ovat reluktanssivaihtelut roottorin kehää edetessä, jolloin on mahdollista, että syntyy haitallisia harmonisia reluktanssivääntömomentteja (Kasinathan 2003).

Kuvassa 3 on esitetty pintamagneetikoneen ja uppomagneetikoneen ilmvälivuontiheydet tyhjäkäynnissä (vain magneettien luoma vuo). Kuva havainnollistaa hyvin, miten säröytynyttä vuontiheys on ihanteelliseen sinimuotoon verrattuna näissä konetyypeissä.



Kuva 3. Kestomagneettien luoma vuontiheys ilmvälissä: 12-urainen 10-napainen pintamagneetikone ja uppomagneetikone, jossa V-magneetit.

Kuormitetussa koneessa vaikuttavat sekä magneettien luoma vuo että virran vaikutuksesta käämityksissä syntyvä magnetomotorinen voima, mmv. Murtovakokoneen mmv on muodoltaan lähinnä kanttiaaltoa. Kuvasta 4 nähdään ilmvälivuontiheys nimelliskuormituksessa.

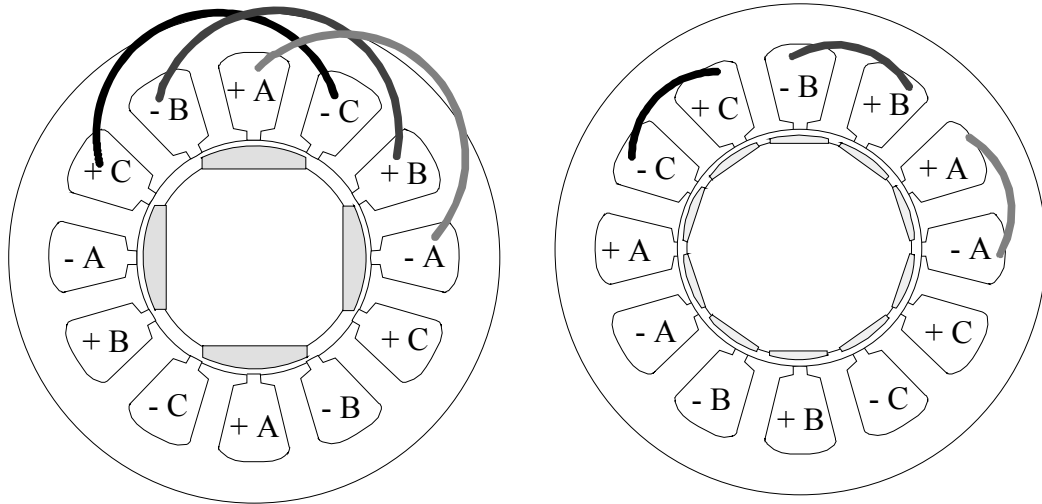


Kuva 4. Ilmavälivuontiheys nimelliskuormituksessa: 12-urainen 10-napainen pintamagneettikone ja uppomagneettikone, jossa V-magneetit. Kuvassa esiintyvä vaihesiirto on tarkoitettu helpottamaan kuvan luettavuutta.

Kuvan 4 ilmavälivuo nimelliskuormituksessa koostuu siis kestopagneettien synnyttämästä vuosta (kuva 3) ja käämityksessä syntyvästä mmv:stä. Kuvasta 4 huomataan, että uppomagneettikoneen vuo on tässä tapauksessa muodoltaan lähempänä kantiaaltoa kuin pintakoneen vuo.

1.2 Käämitysrakenne

Murtovakokäämitys voi olla joko yksi- tai kaksikerroskäämitys. Kaksikerroskäämityksessä samassa urassa on kahden eri käämityksen vyyhdet: ura on siis jaettu kahteen osaan. Osa urista voi olla tavalliseen tapaan käämittyjä ja osassa taas voi sijaita kahden eri vaiheen vyyhtejä. Murtovakokoneessa voidaan käämiä yksi vyyhti yhden hampaan ympärille, jolloin vyyhdenpituus on lyhyin mahdollinen. Kuvassa 5 on havainnollistettu kokovakokäämityksen ja murtovakokäämityksen eroa.



Kuva 5. Kokovakokoneen (12-4) ja murtovakokoneen (12-10) yksikerroskäämitys. Murtokoneessa voidaan käämiä yksi vyyhti yhden navan ympärille.

Vakoluku q kertoo montako uraa on napaa ja vaihetta kohden. Se ilmaistaan murtolukuna

$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{z}{n}, \quad (1)$$

jossa Q on staattorin uraluku, p on napaluku ja m vaiheluku. Sievennetään q niin, että osoittajassa ja nimittäjässä on pienimmät mahdolliset kokonaisluvut: osoittajassa z ja nimittäjässä n .

1.2.1 Symmetrisyys

Käämityksen tulee olla symmetrinen, jotta se symmetrisestä lähteestä syötettynä synnyttäisi pyörivän magneettikentän tai siinä pyörivän magneettikentän vaikutuksesta indusoituisi symmetrinen monivaihejännite. Murtovakokäämitykset eivät välttämättä ole symmetrisiä.

Murtovakokäämityksen symmetrisyydelle on olemassa kaksi ehtoa. Ensimmäinen symmetriaehto täyttyy yksikerroskäämitykselle, kun

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

ja kaksikerroskäämitykselle, kun

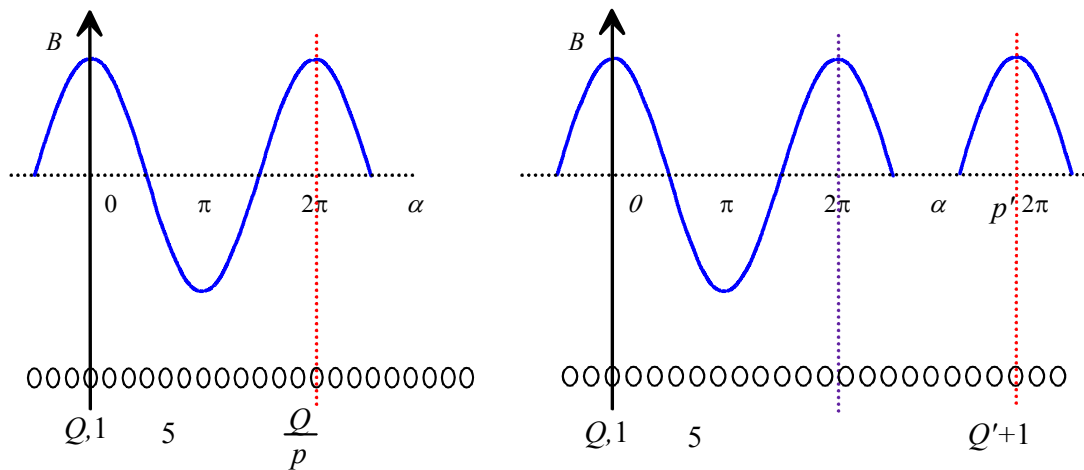
$$\frac{2p}{n} \in \mathbf{N}. \quad (3)$$

Verrattaessa yhtälöitä (2) ja (3) huomataan, että kaksikerroskäämityksillä saadaan paljon enemmän valinnanvaraa murtovakokäämityksiin kuin yksikerroskäämityksillä.

Toinen symmetriaehto täyttyy, kun

$$\frac{n}{m} \notin \mathbf{N} \quad (4)$$

Kokovakokäämityksissä peruskäämitys, eli pienin itsenäinen symmetrisen käämityksen osa, jakautuu tasan aallonpituuden matkalle, mutta murtovakokäämityksissä täytyy mennä eteenpäin useampi aalto ennen kuin uratähden osoitin osuu samalle kohdalle aaltoa. Murtovakokäämityksissä täytyy siis edetä p napaparia ennen kuin saman vaiheen vyyhdensivu osuu uudelleen vuontiheyden huippuarvon kohdalle (kuva 6).



Kuva 6. a) Kokovakokäämityksen ja b) murtovakokäämityksen periaatteellinen ero. Staattoriurien määrä on Q . Kokovakokäämityksessä peruskäämityksen pituus on Q/p uraa (tässä 12 uraa), mutta murtovakokäämityksessä tämä lasku ei mene tasan. (Vogt, 1996)

Kun käämitys sisältää useita peruskäämityksiä, joiden virta ja jännite ovat geometrisistä syistä samanvaiheisia ja -suuruisia, voidaan kokonaiskäämitys muodostaa kytkemällä peruskäämityksiä rinnan tai sarjaan. (Vogt 1996, Pyrhönen 1998)

1.2.2 Käämitysten suunnittelu

Murtovakokäämitysten suunnittelu voidaan tehdä joko uratähden tai kaavion avulla. Jos nimittäjä n on pariton, niin on kyseessä 1. lajin käämitys, ja kun n on parillinen, on kyseessä 2. lajin käämitys. Peruskäämitysten määrittely on esitetty taulukossa 1. (Vogt 1996, Pyrhönen 1998)

Taulukko 1. Ensimmäisen ja toisen lajin peruskäämitysten määrittely.

	1.laji	2.laji	
nimittäjä n	pariton	parillinen	
jakaja t	$\frac{p}{n}$	$\frac{2p}{n}$	
käämitys	yksikerros, kaksikerros	yksikerros	kaksikerros
käämityksen uraluku Q^*	$\frac{Q}{t}$	$\frac{2Q}{t}$	$\frac{Q}{t}$
peruskäämityksen napapariiluku p^*	$\frac{p}{t} = n$	$\frac{2p}{t} = n$	$\frac{p}{t} = \frac{n}{2}$
peruskäämityksen uratähden kerrosten lukumäärä t^*	1	2	1

Kun piirretään uratähteä murtovakokäämityille kestromagneettitahtikoneille, voidaan käyttää taulukossa 2 esitettyjä tunnuslukujen määrittelyä.

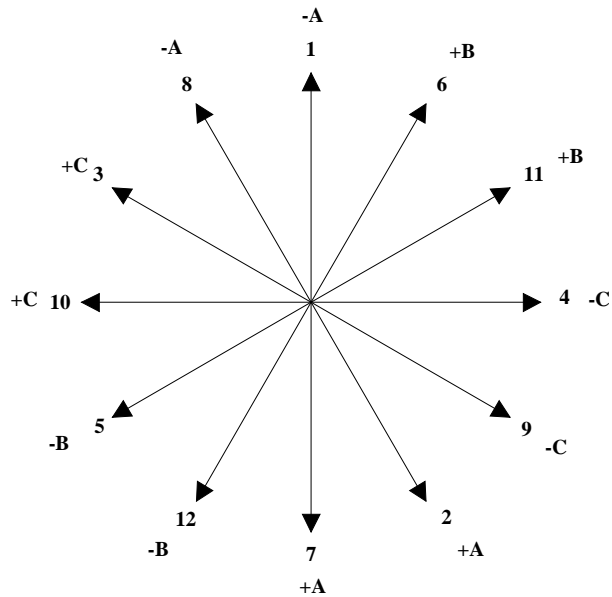
Taulukko 2. Tunnuslukuja uratähden piirtoon.

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

1.2.3 Yksikerrosmurtovakokäämitykset

Taulukossa 1 ja taulukossa 2 on määritelty uratähden piirtämiseen tarvittavia parametreja. Ensimmäisen lajin yksikerroskäämitysten piirtäminen aloitetaan piirtämällä Q' :a vastaava määrä osoittimia, jotka ovat osoitinkulman α_z päässä toisistaan. Ensimmäinen osoitin, nu-

mero 1 (vaihe -A), piirretään suoraan ylöspäin ja toinen osoitin siitä α_z :n päähän. Näin jatketaan, kunnes kaikki osoittimet on piirretty. Vaihekäämit asetetaan vyyhtiryhmäkaavion määräämässä järjestyksessä aloittaen joko viimeisestä tai ensimmäisestä osoittimesta (-A, +B, -C, +A, -B, +C), jossa q_k määrää saman vaiheen peräkkäisten osoittimien lukumäärän. Kuvassa 7 on esimerkki yksikerroskäämityn 12-10-koneen uratähdestä.



Kuva 7. Ensimmäisen lajin yksikerrosмурtovakokäämityksen 12-uraisen 10-napaisen koneen uratähti.

Toisen lajin yksikerrosмурtovakokäämitysten suunnittelu on samanlainen kuin ensimmäisen lajin käämitystenkin, mutta nyt uratähti on kaksinkertainen ja käämitysten suunnittelu on uratähden avulla hieman vaikeampaa.

1.2.4 Kaksikerrosмурtovakokäämitykset

Kaksikerrosмурtovakokäämitysten jokaisen vyyhdin toinen sivu on uran pintakerroksessa ja toinen pohjakerroksessa. Koska kaikkien vyyhtien leveys on sama, niin oikeanpuoleisten vyyhtien sivujen paikat tulevat automaattisesti määräytyiksi vasemman puoleisten sivujen määräämisen seurauksena. Tässä on ero yksikerrosмурtovakokäämityksiin verrattuna. (Pyrhönen 1998)

Kaksikerrosmurtovakokäämitys suunnitellaan käyttäen uratähteä. Uratähden asemesta voidaan myös käyttää ruudukkomuotoista napapariakaaviota. Ruudukko kuvaa käämityksen käämikerroksen urien jakautumista vyöhykkeisiin. Napapariakaavio koostuu ala- ja yläruudukoista. Napapariakaavion laatiminen aloittaa alakäämikerroksesta:

1. Koko staattorikehä muodostuu nQ -määrästä ruutuja, n on vakoluvun nimittäjä yhtälöstä (1).
2. Napapari p määrää rivien määrän, jolloin yhteen riviin tulee kahden napajaon verran ruutuja eli $nQ/p = 6z$ ruutua, jossa z on vakoluvun osoittaja.
3. Napajako jaetaan kolmeksi vyöhykkeeksi ja z määrää vyöhykkeen leveyden ruuduissa.
4. Vyöhykkeet nimetään järjestyksessä +A, -C, +B, -A, +C, -B.
5. Ruudukon täyttäminen aloitetaan vasemmasta yläkulmasta laittamalla ensimmäiseen ruutuun numeron 1.
6. Numero 2, eli seuraava ura, sijoitetaan ensimmäisestä ruudusta vakoluvun nimittäjän mukaan n ruudun päähän. Tästä eteenpäin uranumerot sijoitetaan n ruudun päähän toisistaan, kunnes ruudukko loppuu. Jos ruutuja numeroitaessa päädytään heti toisen rivin ensimmäiseen ruutuun, ruudukkoon on muodostunut täydellinen käämityksen peruskäämitys ja numerointi voidaan lopettaa. Tällöin seuraavat urat ja niihin tulevat vyyhdet voidaan nimetä samalla tavoin jo valmistuneen peruskäämityksen avulla.
7. Seuraavaksi täytetään ruudukon yläkäämikerros. Kaavio on alemman kerroksen kaavion kanssa identtinen. Ainoastaan uranumerointi eroaa vyyhdenleveyden W mukaan eli ensimmäiseen ruutuun tuleva numero on 2 murtovakokäämityille koneille. Tässä vyöhykkeet nimetään järjestyksessä etumerkiltään vastakkaisessa järjestyksessä -A, +C, -B, A, -C, +B.

8. Napapariikaavioon tehdyn vyöhykejakauman avulla voidaan sitten täyttää vyöhykekaavio. Vyöhykekaavioon tulee napapariikaavioon täytettyjen numeroiden eli urien mukainen määrä rivejä ylä- ja alakäämille. Vyöhykekaavioon tulee siis yläriville yläkäämitys ja alariville alakäämitys. Poimitaan napapariikaaviosta numeroiden kohdalta vaiheet vyöhykekaavion ruudukkoon. Näin saadaan käämitysjärjestys selville kaksikerroskäämitykselle. (Perho et al. 1995)

Taulukossa 3 on esitetty esimerkki 12-10-koneen kaksikerroskäämityksen napapariikaavion laatimisesta.

Taulukko 3. Kaksikerroskäämityksen muodostaminen, kun 12-uraa-10-napaa $p = 5, q = 0,4, z = 2, n = 5$.

12-uraa-10-napaa

ala

	A+	A+	C-	C-	B+	B+	A-	A-	C+	C+	B-	B-
1	1					2					3	
2				4					5			
3		6					7					8
4					9					10		
5			11				12					

ylä

	A-	A-	C+	C+	B-	B-	A+	A+	C-	C-	B+	B+
1	2					3					4	
2				5					6			
3		7					8					9
4					10					11		
5			12				1					

ylä
ala

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A+	A-	B-	B+	C+	C-	A-	A+	B+	B-	C-	C+
A+	B+	B-	C-	C+	A+	A-	B-	B+	C+	C-	A-

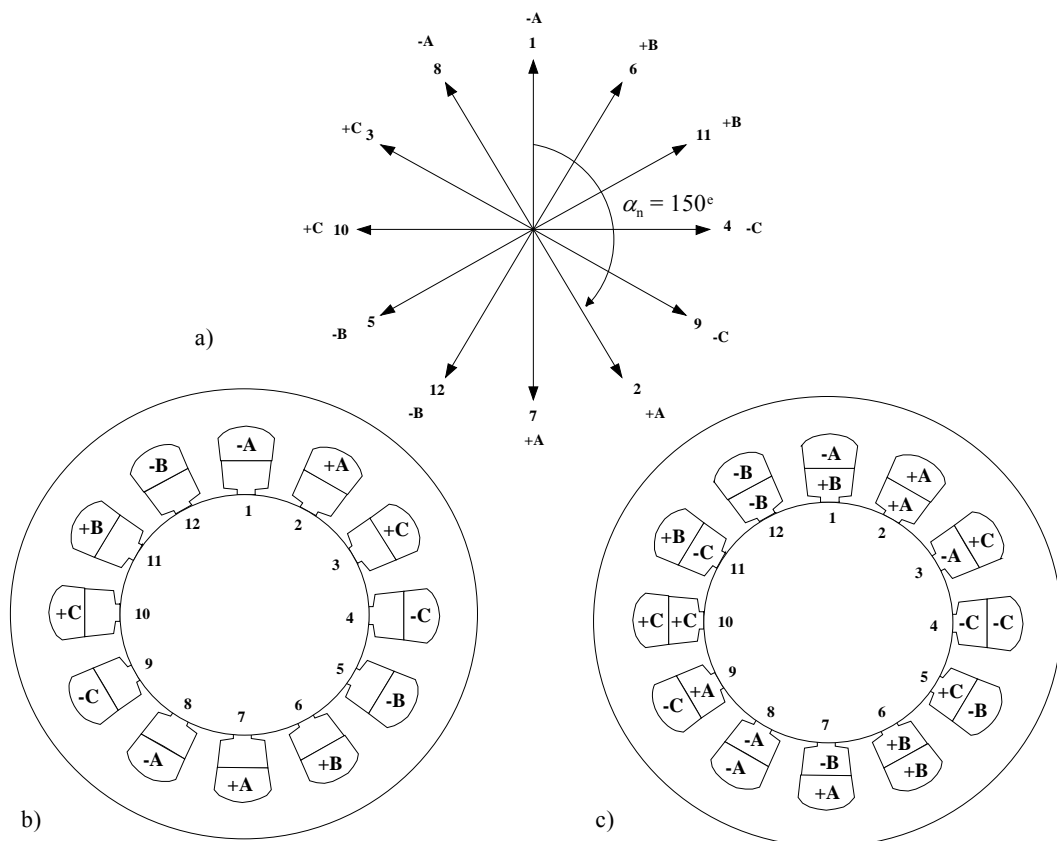
Kaksikerrosмуртовakokäämityksen uratähdessä on vain yksi kerros, joten symmetrisen kaksikerrosмуртовakokäämityksen suunnittelu uratähden avulla on varsin suoraviivaista. Uratähden piirto kaksikerrosмуртовakokäämitykselle aloitetaan piirtämällä Q' määrä osoittimia, jotka ovat osoitinkulman α_z päässä toisistaan. Ensimmäinen osoitin, numero 1, piirretään suoraan ylöspäin ja toinen osoitin siitä α_z :n päähän. Ensimmäisen lajin kaksikerrosмуртовakokäämityksen uraosoittimet voidaan jakaa yhtä leveisiin vyöhykkeisiin. Nimetään vyöhykkeet vyöhykejärjestyksessä -A, +B, -C, +A, -B, +C aloittaen osoittimesta numero 1 tai viimeisestä osoittimesta. Kun uratähti on valmis, niin on käämityksen pohjakerros kiin-

nitetty. Ensimmäisen lajin kaksikerrosmurtovakokoneen urien pintakerroksen käämitys saadaan määritellyksi, kun pohjakerroksen käämityksessä siirretään vyyhdenleveyden verran uria eteenpäin ja kunkin \pm merkki vaihdetaan.

Murtovakokäämityksille on halkaisijavyyhtien toteuttaminen mahdotonta, koska $q \notin \mathbf{N}$. Halkaisijavyyhden vyyhdenleveys urajakoina olisi

$$y = mq \tag{5}$$

Kun $q \leq 0,5$, käytetään yleensä vyyhdenleveyttä 1, koska se on lähin kokonaisluku ja näin saadaan käämityksestä toteuttamiskelpoinen. (Pyrhönen 1998) Kuvassa 8 on 12-10-koneen kaksikerroskäämityksen uratähti ja sen avulla muodostettu käämintäjärjestys.



Kuva 8. a) Ensimmäisen lajin kaksikerrosmurtovakokäämityksen uratähti koneelle, jossa 12-uraa-10-napaa. b) Alimman kerroksen käämitysjärjestys ensin. c) Toisen kerroksen käämitys, kun vyyhdenleveys yksi.

Toisen lajin kaksikerrosmurtovakokäämityksen uratähdessä eivät kaikki vyöhykkeet ole samanlaisia. Tässä vaiheilla voi olla pariton määrä osoittimia, jolloin täytyy käyttää vyöhykevaihtelua. Valitaan joko positiivisiin tai negatiivisiin uriin seuraavan kokonaisluvun määrä vaihekäämejä ja sitten toiseen alemman kokonaisluvun määrä vaihekäämejä. Kun pohjakäämitys on saatu valmiiksi, sijoitetaan pintakäämitys, jossa pohjakerroksen käämityksessä siirretään vyyhdenleveyden verran uria eteenpäin ja kunkin \pm merkki vaihdetaan. Näin saadaan positiivisia ja negatiivisia käämejä yhtä monta. (Salminen 2004)

2 ANALYTTINEN LASKENTA

2.1 Johdatus

Tässä työssä kehitettiin yksinkertainen analyttinen laskentamalli hitaasti pyöriville napakäämityille murtovakokestomagneettitahtikoneille. Analyttisen laskennan avulla voidaan selvittää koneelle alkuparametrit raskasta kentälaskentaa varten. Näin koneensuunnittelun kokonaiskesto aika lyhenee. Analyttisessä laskennassa käytettiin MatLabTM-laskentaohjelmistoa ja elementtimenetelmässä Flux2DTM-laskentaohjelmistoa.

Kehitetty laskentamalli on suunniteltu koneille, joissa on roottorin pinnalle asennetut kestomagneetit sekä staattorissa kaksikerroskäämitys. Pintamagneetikoneet hyödyntävät magneettimateriaalin parhaiten ja tarjoavat vähintään reittiä poikittaiselle ankkurireaktiota aiheuttavalle magneettivuolle. Myös hammaspäähajaannus on ratkaisevasti pienempi kuin uppomagneetikoneilla. Kaksikerroskäämityksellä saadaan puolestaan enemmän valinnanvaraa käämityksiin sekä pienempi vääntövare ja pienemmät vyyhdenpäät verrattuna yksikerroskäämityksiin.

Analyttistä menetelmää on testattu hitaasti pyörivien 45 kW:n runkokooltaan 225 olevien murtovakokäämitysten kestomagneettitahtikoneiden laskentaan. Lasketut murtovakokäämitykset ovat vakoluvultaan $q \leq 0,5$. Analyttisen laskentamallin vertailun pohjana käytettiin kentälaskentaohjelmasta saatuja tuloksia. Taulukossa 4 on esitetty laskettujen koneiden yhteiset perusparametrit.

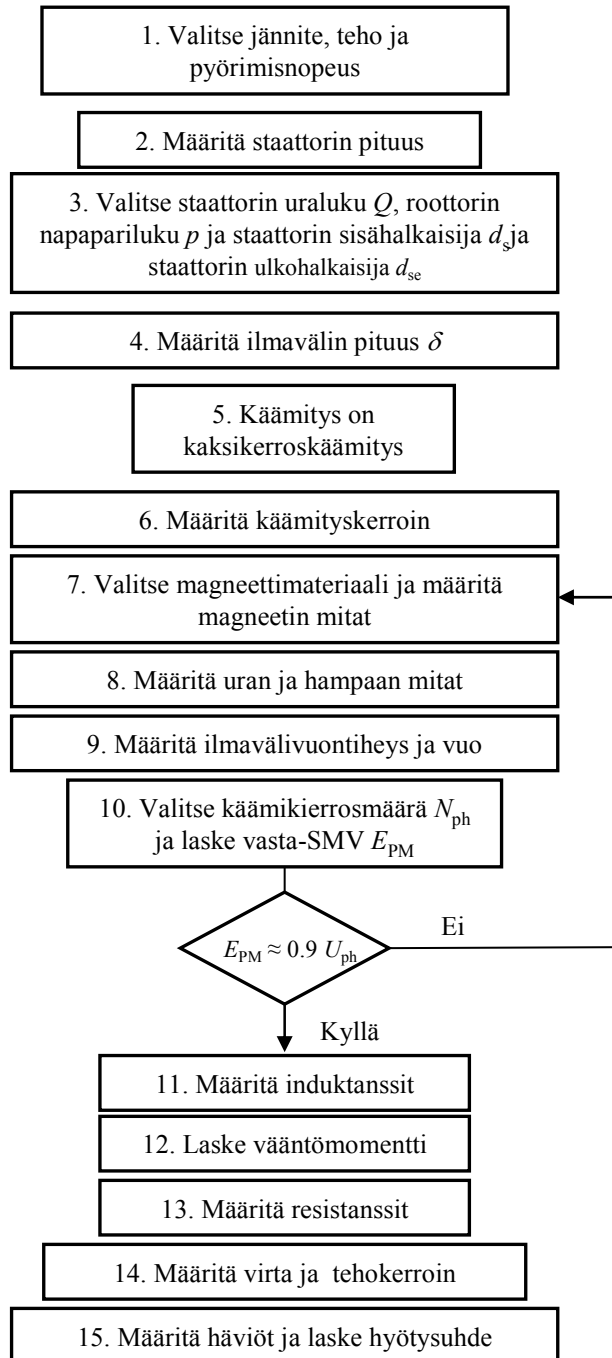
Taulukko 4. Laskettujen koneiden yhteiset perusparametrit.

Vakoluku	$\leq 0,5$
Teho (kW)	45
Runkokoko	225
Pyörimisnopeus (rpm)	400
Magneettien massa (kg)	$10,3 \pm 0,1$
Nimellinen vääntömomentti (Nm)	1074
Ilmaväli (mm)	1,2 – 1,25

Kun koneiden taulukossa 4 esitetyt parametrit pidettiin vakioina, voitiin vertailla koneiden ominaisuuksia silloin, kun staattorin uraluku pysyy samana mutta napaparien lukumäärä muuttuu. Lisäksi voitiin vertailla saman vakoluvun omaavia koneita eri uraluvuilla. Tällaisia saman vakoluvun omaavia koneita ovat esimerkiksi 12-urainen 10-napainen kone sekä 24-urainen 20-napainen kone, joilla molemmilla $q = 0,4$.

2.2 Analyttisen laskentamallin rakenne

Työssä kehitetty laskentamalli perustuu kuvan 9 mukaiseen rakennekaavioon.



Kuva 9. Laskentamallin rakennekaavio.

Kuvassa 9 olevasta kaaviosta kohtien 1 - 4 perusparametrit koneelle valitaan itse. Valittavia parametreja ovat koneen haluttu jännite, akseliteho ja pyörimisnopeus sekä uraluku ja napaluku. Ura- ja napaluvun valinnassa tulee ottaa huomioon, että laskentamalli on suunniteltu vakoluvuille $q \leq 0,5$ (kts. yhtälö (1)). Lisäksi valitaan koneen staattorin mitat. Staattorin ulkomitat määräytyvät koneen halutun runkokoon mukaan. Koneen roottorin koko määräytyy tässä prosessissa niin, että se tuottaa tarvittavan vääntömomentin. Roottorin

kokoa määritettäessä voidaan käyttää hyväksi keskimääräistä tangentiaalista jännitystä. Tyypillisesti täysin suljetuissa kestopagneettikoneissa jännitys vaihtelee välillä 25 ... 30 kN/m². Lasketuilla murtokoneilla arvo oli likimain 35 kN/m².

Analyttisessä mallissa oletuksena on kaksikerroskäämitys, ja siihen liittyvä käämityskerroin valitaan laskentamallissa taulukosta staattorin urien ja napojen määrän mukaan. Kohdassa 7 valitaan magneettimateriaali ja magneetin mitat. Magneettimateriaalina on laskuissa käytetty NdFeB-magneetteja sen korkean remanessivuontiheyden vuoksi. Magneetin mitat määräävät syntyvän vuon suuruuden ilmvälissä. Magneetin leveys on likimäärin 0,8 - 0,85 -kertainen napajakoon verrattuna. Kohdassa 8 valitaan staattoriuran ja hampaan mitat. Alkuarvaus laskettujen koneiden mitoille oli: uran leveys likimäärin 2/3 ja hampaan leveys 1/3 urajaan leveydestä.

Kohdassa 9 lasketaan ilmvälivuontiheys ja siitä vuo. Vuon analyttinen määräytyminen murtovakokäämitylle kestopagneettiakoneelle on osoittautunut erittäin vaikeaksi vuontiheyden epäsymmetrisyyden vuoksi. Kohdassa 10 valitaan käämikierrosmäärä, arvioimiseen voidaan käyttää halutun vastasähkömotorisen voiman arvoa, jonka tulisi tavallisesti moottorikäytössä olla likimain 90 % syötetystä vaihejännitteestä. Kohdan 10 jälkeen voidaan tarkastaa, saatiinko haluttu vastasähkömotorinen voima. Käämikierrosten määrää arvioitaessa tulee tarkistaa, että käämikierrokset mahtuvat uraan. Suuresta määrästä kuparia aiheutuu myös paljon kuparihäviöitä. Jos vastasähkömotorista voimaa ei saada riittävän suureksi, voidaan palata kohtaan 7 ja muokata magneetin mittoja uudelleen suuremman ilmvälivuontiheyden ja vuon saavuttamiseksi.

Lopussa määritellään kohdassa 11 koneen induktanssit ja niiden perusteella lasketaan koneen tuottama vääntömomentti. Vääntömomentin suhteellisesta arvosta nähdään heti, kuinka paljon vääntöä kone tuottaa verrattuna nimelliseen vääntömomenttiin. Kohdassa 13 määritellään vaiheen resistanssit ja lasketaan koneen virta. Laskennassa ei oteta huomioon koneen jäähdytystapaa, mutta virtakate ja virrantiheydet voidaan tarkistaa virran laskennan jälkeen. Virtakatteelle ja virrantiheydelle voidaan ennalta määrätä raja-arvot ja laskennan aikana voidaan tarkkailla, ettei ylitetä näitä raja-arvoja. Käytettävän virtakatearvon täytyy vastata yllämainittua tangentiaalista jännitystä.

Viimeisessä kohdassa määritellään koneen häviöt ja hyötysuhde. Häviöt syntyvät pääosin staattorin kuparikäämityksissä sekä staattoriraudassa.

2.3 Tärkeimmät yhtälöt

Tässä esitellään tärkeimmät yhtälöt analyyttiseen laskentaan napakäämityille murtovakokestomagneettitahtikoneille.

2.3.1 Käämityskerroin

Vakoluku q määrää koneen käämityskertoimen. Koska käämitys on avaruudellisesti jaettu staattorin pinnalla oleviin uriin, ei roottorin synnyttämä vuo leikkaa kaikkia käämejä samalla tavalla samanaikaisesti, vaan tietyllä vaihesiirrolla. Käämityskertoimesta pyritään saamaan mahdollisimman suuri, eli lähelle ykköstä. Korkea käämityskerroin ei kuitenkaan takaa, että kone tuottaisi korkean vääntömomentin. Koneet, joilla $q = 0,5$, tuottavat korkean vääntömomentin, mutta niillä voi puolestaan olla suuri vääntömomenttiväre. Suuri vääntömomenttiväre voi esiintyä myös koneilla, joiden $q = 0,25$. Jos urien määrä on pariton sekä uria on likimain yhtä paljon kuin napoja, niin saattaa esiintyä joitain epäsymmetrisiä magneettisia vetovoimia, esimerkiksi koneissa, joissa on 9-uraa-8-napaa ja 15-uraa-14-napaa. Epäsymmetriset magneettiset vetovoimat aiheuttavat säteen suuntaisia voimia, joiden summa ei ole nolla. (Salminen 2004 s. 36 - 33) Tällaiset voimat taivuttavat koneen akselia ja synnyttävät melua.

Käämityskerroin voidaan määrittää piirretyn uratähtikuvion avulla tai käyttäen taulukoita 5 ja 6, joissa on esitetty murtovakokäämitysten koneiden käämityskertomet sekä yksi- sekä kaksikerroskäämityksille, kun $q \leq 0,5$. (Salminen 2004, Libert & Soulard 2004).

Taulukko 5. Yksikerrosmurtovakokäämitysten käämityskertoimet eri uraluku-napapariluvuille.

Uraluku Q	Napapariluku 2p									
	4	6	8	10	12	14	16	20	22	26
6	0,866		0,866							
9		0,866	0,960	0,960						
12			0,866	0,966		0,966	0,866			
15				0,866		0,957	0,957			
18					0,866	0,844	0,960			
21		$q > 0,5$				0,866				
24							0,866	0,966	0,958	0,958

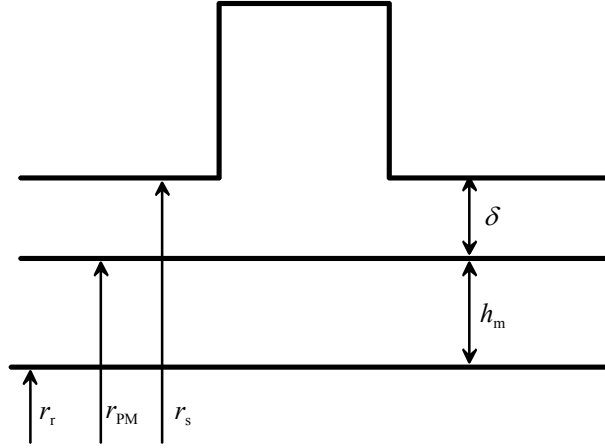
Taulukko 6. Kaksikerrosmurtovakokäämitysten käämityskertoimet eri uraluku-napapariluvuille. *merkittyjä ei suositella epäsymmetristen magneettisten vetovoimien vuoksi.

Uraluku Q	Napapariluku 2p															
	4	6	8	10	12	14	16	20	22	24	26	28	30	32	34	42
6	0,866		0,866	0,500		0,500	0,866	0,866	0,500		0,500	0,866		0,866	0,500	
9		0,866	0,945*	0,945*	0,866	0,617	0,328	0,328	0,617	0,866	0,949	0,949	0,866	0,617	0,328	0,866
12			0,866	0,933		0,933	0,866		0,250		0,25			0,866	0,933	
15				0,866		0,951*	0,951*	0,866	0,621		0,39					
18					0,866	0,902	0,945	0,945	0,902	0,866	0,647					
21						0,866	0,890	0,953*	0,953*		0,89	0,866				
24							0,866	0,933	0,949		0,949	0,933		0,866	0,760	
27								0,877	0,915	0,945	0,954	0,954	0,945	0,915	0,877	
30		$q > 0,5$						0,866	0,874		0,936	0,951		0,951	0,936	
33									0,866		0,903	0,928		0,954	0,945	
36										0,866	0,867	0,902	0,933	0,945	0,953	0,933

2.3.2 Ilmavälivuontiheyden ja vuon määrittäminen

Kestomagneettien luoman vuon määrittämiseksi tutkittiin aluksi reluktanssiverkkomenetelmän soveltuvuutta. Toisin kuin perinteisten kokovakokäämien tapauksessa murtovakokäämityksen kestopomagneettitahtikoneen magneettiipiiriä ei voida mallintaa vain yhden napajalon matkalta, koska napaparit eivät ole samanlaisissa magneettisissa olosuhteissa samanaikaisesti. Tämän vuoksi reluktanssiverkkomenetelmän soveltaminen havaittiin todella työlääksi. Jokaiselle koneelle täytyisi tehdä oma verkkomalli. Tämän vuoksi reluktanssiverkkomallin käyttämisestä tässä yhteydessä luovuttiin.

Seuraavaksi vuon määrittämiseksi tutkittiin Zhu:n (1993) kehittämän yhtälön soveltamista. Yhtälö on alun perin esitetty kokovakokestopomagneettitahtikoneille. Kuvassa 10 on mallinnettu Zhu:n yhtälöön liittyviä mittoja.



Kuva 10. Kuvassa koneen säteet: r_s on staattorin säde, r_{PM} on magneettien pintaan oleva säde, r_r on roottorin säde ja r on r_s :n ja r_{PM} :n keskiarvo. Lisäksi h_m on magneetin paksuus ja δ ilmavälin pituus.

Kuvasta 10 koneen säteet $r_s > r > r_{PM} > r_r$, missä r_s on staattorin säde, r_{PM} on magneettien pintaan oleva säde, r_r on roottorin säde ja r on r_s :n ja r_{PM} :n keskiarvo. Zhun mukaan kestopagneettitahtikoneen magneettien luoma ilmavälivuontiheys voidaan laskea alla olevan yhtälön mukaisesti

$$B_{\delta,PM} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} M_n \frac{\mu_0}{\mu_{PM}} \frac{np}{(np)^2 - 1} \cdot \left[\frac{(np-1) + 2\left(\frac{r_r}{r_{PM}}\right)^{np+1} - (np+1)\left(\frac{r_r}{r_{PM}}\right)^{2np}}{\frac{(\mu_{PM}+1)}{\mu_{PM}} \left[1 - \left(\frac{r_r}{r_s}\right)^{2np}\right] - \frac{(\mu_{PM}-1)}{\mu_{PM}} \left(\frac{r_{PM}}{r_s}\right)^{2np} - \left(\frac{r_r}{r_{PM}}\right)^{2np}} \right] \cdot \left[\left(\frac{r}{r_s}\right)^{np-1} \left(\frac{r_{PM}}{r_s}\right)^{np+1} + \left(\frac{r_{PM}}{r}\right)^{np+1} \right] \cos(np\theta) \quad (6)$$

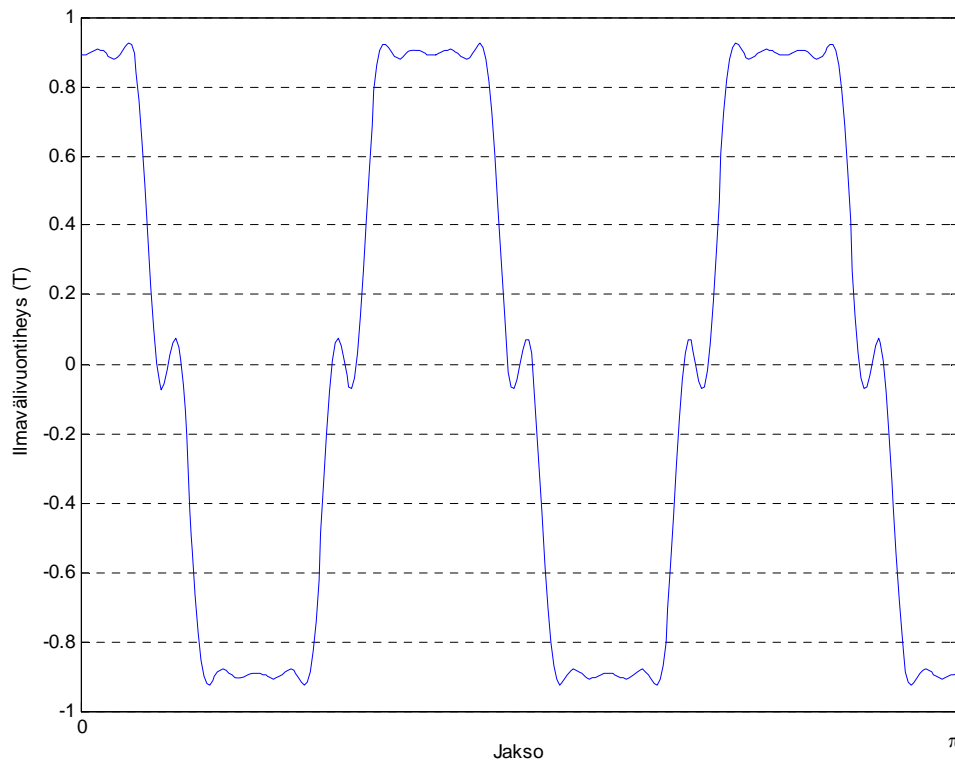
missä $B_{\delta,PM}$ on kestopagneetin aiheuttama vuontiheys, μ_0 on tyhjiön suhteellinen permeabiliteetti, μ_{PM} on kestopagneetin suhteellinen permeabiliteetti, n on laskennassa mukaan otettujen harmonisten lukumäärä ja θ on integroinnin sijaintikulma

$$M_n = \frac{2B_r}{\mu_0} \alpha_p \frac{\sin\left(\frac{n\pi\alpha_p}{2}\right)}{\frac{n\pi\alpha_p}{2}} \quad (7)$$

ja

$$\alpha_p = \frac{b_m}{\tau_p} \quad (8)$$

missä B_r on remanessivuontiheys, α_p on kestomagneetin leveys napajaan leveyteen, b_m on magneetin leveys ja τ_p on roottorin napajako (Zhu 1993). Kuvasta 11 nähdään, että vuontiheyskuvaajan aaltomuoto on melko sinimuotoinen, kun murtokoneella muoto on lähempänä kanttiaaltoa tai sini- ja kanttiaallon välimuotoa.



Kuva 11. Kestomagneettien luoma vuontiheys ilmavälissä 12-10-koneelle Zhu:n (1993) yhtälön mukaisesti puolijaksolla π . Harmonisista on otettu huomioon 1, 3, 5, 7, 9 ja 11.

Kuvan 11 malli ei kuitenkaan vastaa tarkasti murtokoneen kuvaajaa, mutta tulos on melko yhteneväinen todellisuuden kanssa. Malli ei ota huomioon permeanssivaihtelujen vaikutuksia, joten ne olisi mallinnettava permeanssiyhtälöllä, jolla ym. tulos tulisi kertoa.

Lopuksi päädyttiin soveltamaan Zhu:n (2005) uusinta menetelmää vuontiheysaallon määrittämiseksi koneen ilmapälissä. Zhu:n menetelmää täydennettiin permeanssikertoimella, jonka avulla staattorin urituksen vaikutus saadaan otetuksi huomioon. Murtovakokäämityn kestopagneettitahtikoneen magneettien luoma ilmapälivuontiheys voidaan laskea alla olevan yhtälön mukaisesti

$$B_{\delta, \text{PM}}(r, \theta) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} K_B(n) f_{\text{Br}}(r) \cos(np\theta), \quad (9)$$

missä

$$K_B(n) = \frac{\mu_0 M_n}{2\mu_{\text{PM}}} \frac{np}{(np)^2 - 1} \cdot \left[\frac{(A_{3n} - 1) + 2\left(\frac{r_r}{r_{\text{PM}}}\right)^{np+1} - (A_{3n} + 1)\left(\frac{r_r}{r_{\text{PM}}}\right)^{2np}}{\frac{(\mu_{\text{PM}} + 1)}{\mu_{\text{PM}}} \left[1 - \left(\frac{r_r}{r_s}\right)^{2np}\right] - \frac{(\mu_{\text{PM}} - 1)}{\mu_{\text{PM}}} \left(\frac{r_{\text{PM}}}{r_s}\right)^{2np} - \left(\frac{r_r}{r_{\text{PM}}}\right)^{2np}} \right] \quad (10)$$

$$f_{\text{Br}}(r) = \left(\frac{r}{r_s}\right)^{np-1} \left(\frac{r_{\text{PM}}}{r_s}\right)^{np+1} + \left(\frac{r_{\text{PM}}}{r}\right)^{np+1} \quad (11)$$

$$M_{\text{rn}} = 2 \frac{B_r}{\mu_0} \alpha_p \frac{\sin\left(\frac{n\pi\alpha_p}{2}\right)}{\frac{n\pi\alpha_p}{2}} \quad (12)$$

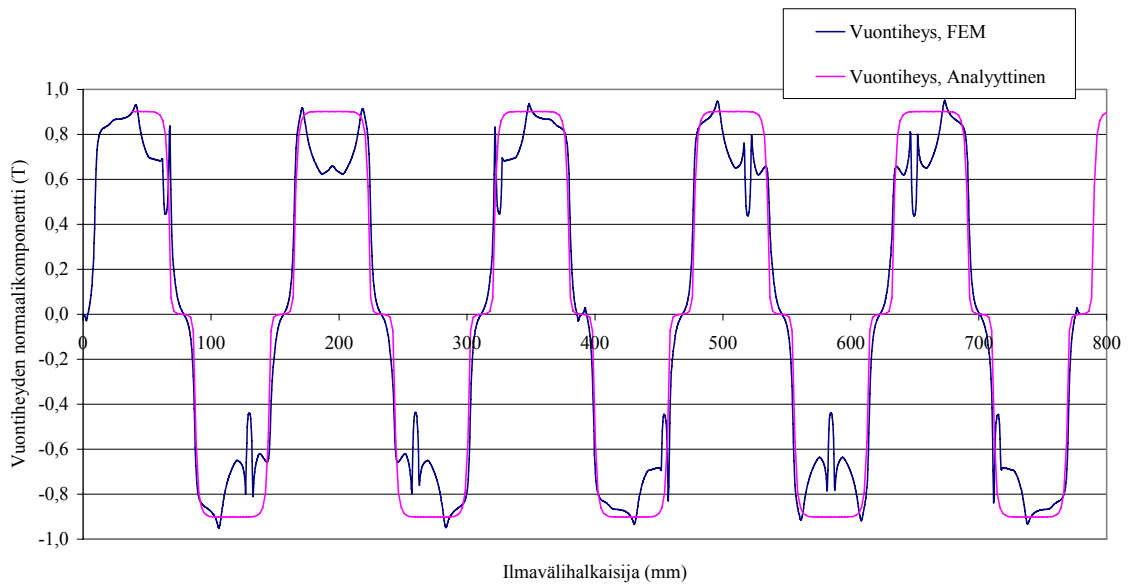
$$M_n = \frac{B_r}{\mu_0} \alpha_p (A_{1n} + A_{2n}) + np \frac{B_r}{\mu_0} \alpha_p (A_{1n} - A_{2n}) \quad (13)$$

$$A_{1n} = \frac{\sin \left[(np+1) \alpha_p \frac{\pi}{2p} \right]}{(np+1) \alpha_p \frac{\pi}{2p}} \quad (14)$$

$$A_{2n} = \frac{\sin \left[(np-1) \alpha_p \frac{\pi}{2p} \right]}{(np+1) \alpha_p \frac{\pi}{2p}} \quad (15)$$

$$A_{3n} = \left(np - \frac{1}{np} \right) \frac{M_m}{M_n} + \frac{1}{np} \quad (16)$$

Yhtälön (9) avulla on piirretty kuvan 12 magneettien luoma ilmvälivuontiheys ja verrattu sitä kenttälaskentamenetelmällä laskettuun vuontiheyteen.



Kuva 12. Kuvassa on esitetty ilmaväliVuontiheyden kuvaajat FEM-laskennalla ja analyttisellä menetelmällä (Zhu 2005) 12-10-koneelle.

Kuvasta 12 nähdään, että staattoriuritus aiheuttaa suuria notkahduksia kentälaskentamenetelmällä laskettuun ilmaväliVuontiheyteen, mikä vaikuttaa siten myös indusoituvan vuon suuruuteen. Lisäksi urituksen aiheuttamista permeanssvaihteluista voidaan päätellä, mikä osuus vuosta kuuluu millekin hampaalle ja siten tarkasteltavalle vaiheelle.

Vuon huippuarvo on perinteisesti kokovakokoneille laskettu seuraavasti

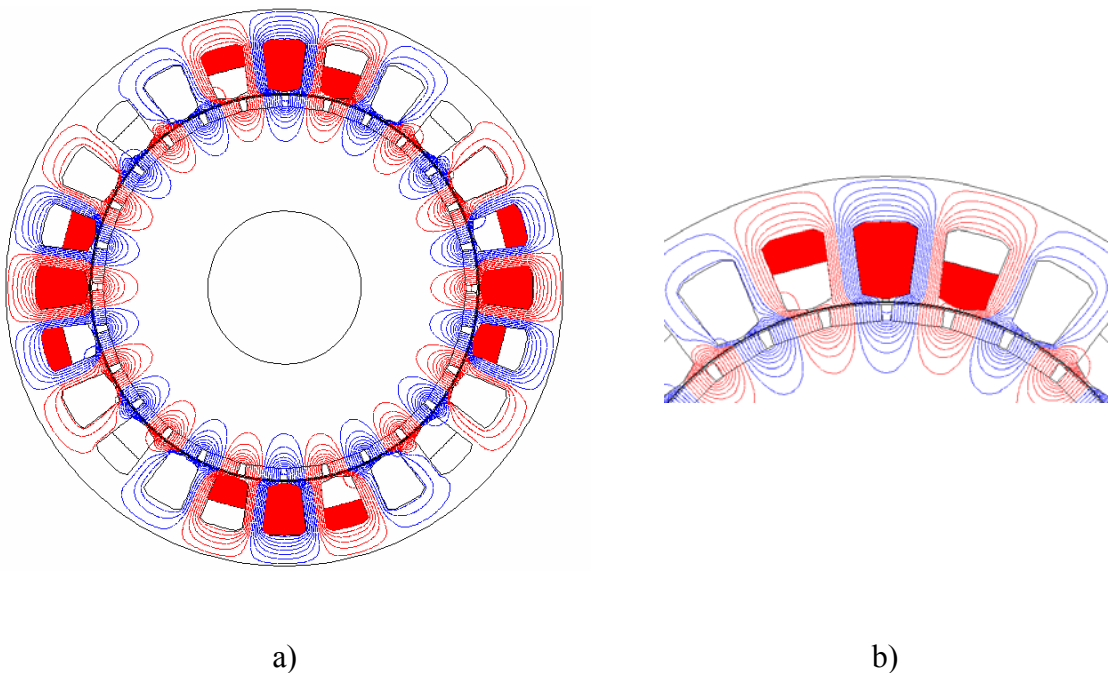
$$\hat{\Phi}_{\delta,PM} = \alpha_i \tau_p L_e \hat{B}_{\delta,PM} \quad (17)$$

missä α_i on vuontiheyden aritmeettista keskiarvoa osoittava kerroin, joka sinimuotoisella jakaumalla on $2/\pi$. Murtovakokoneilla vuontiheysaalto muistuttaa sinimuotoista vain sellaisilla konetyypeillä, joissa uria on likimain yhtä paljon kuin napoja ($Q \approx 2p$). Analogisessa laskennassa on käytetty yhtälöstä (9) laskettua perusaallon vuontiheyden huippuarvoa ja sen avulla on laskettu vuon huippuarvo olettaen jakauman olevan sinimuotoinen. Urien aiheuttama vuontiheyden alenema otetaan huomioon permeanssikertoimella, joka riippuu mm. ura-aukon leveydestä. Lisäksi vuontiheyden määrittämisessä pitäisi ottaa huomioon magneettien hajaannus.

Likimain samanlaiseen vuon arvoon päästään laskemalla pintaintegraali yhtälön (9) mukaisesti ilmvälivuontiheydestä sekä ottamalla huomioon urien aiheuttama vuontiheyden alenema permeanssikertoimella. Näillä lasketuilla koneilla permeanssikerroin on likimäärin 10 – 12 prosenttia vuontiheyden maksimiarvosta.

Staattoriuran vaikutus vuojakaumaan laskettiin myös Hellerin ja Hamatan (1997) permeanssiyhtälöllä, mutta tämä yhtälö ei suoraan näyttänyt soveltuvan murtovakokäämityille koneille. Murtokoneen tapauksessa yhtälö antaa staattoriurien aiheuttamien vuokuoppien synnyttämiksi häviöiksi liian pieniä arvoja verrattuna FEM-laskentaan. Kokovakokoneessa yhden navan kohdalle osuu useampi staattoriura, kun murtokoneella puolestaan navan kohdalla on keskimäärin yksi ura.

Kuvassa 13 on esitetty murtovakokoneen vuon kulkureittejä.



Kuva 13. a) ja b) 24-uraisen 28-napaisen murtovakokoneen vuon kulkureitit.

Kuvassa 13 a) on 24-uraisen 28-napaisen koneen vuon kulkureitit esitetty vuoviivoilla. Avaiheen käämien sijainnit on esitetty tummennettuna. Ideaalitapauksessa yhden magneetin

luoma vuo kulkisi kokonaisuudessaan ilmvälin läpi staattorihampaaseen. Koska napoja on 28 ja hampaita vain 24, ei ole mahdollista että jokaisen magneetin vuo menisi kokonaisuudessaan staattorihampaaseen. Näin ollen indusoitunutta jännitettä ei voi laskea suoraan perinteisestä analogisesta yhtälöstä. Perinteisestihän vuo lasketaan napajaon leveydeltä. Kokovakokoneessa napajaon leveydellä on useampikin hammas, johon magneetin vuo voi kulkea, mutta murtovakokoneella saattaa olla napajaon leveydellä vain yksi hammas tai peräti vain hampaan osa, jota kohti vuo voi kulkea. Kun napojen määrä eroaa hampaiden määrästä suuresti, on murtovakokoneen vuon määrittämiseksi periaatteessa otettava laskentaan mukaan aina kaikki yhteen vaiheeseen kuuluvat hampaat yhden peruskäämityksen matkalta. Yksinkertaistaen voidaan vuon huippuarvo laskea käyttämällä kerrointa, joka perustuu koneen geometriaan. Kuvassa 13 b) A-vaiheen muodostaa kaksi käämiä, joista kumpikin on käämitty yhden hampaan ympäri. Kuvasta 13 b) voi nähdä, että A-vaiheen vuoviivoista osa ei kulje uran ympäri, joten ne eivät indusoi jännitettä staattoriin.

Käämeihin induoituva vastasähkömotorinen voima E_{PM} voidaan esittää murtovakokesto-magneettitahtikoneella (Hendershot and Miller, 1994, s. 6-22)

$$E_{PM} = 2\pi \frac{f_s N_{ph} \xi_1 \hat{\Phi}_{\delta, PM}}{\sqrt{2}}, \quad (18)$$

jossa N_{ph} on sarjassa oleva käämikierrosmäärä vaihetta kohti. Käämikierrosten määrä voidaan valita niin, että haluttu induoituva vastasähkömotorinen voima on likimäärin 90 % syötettävästä vaihejännitteestä. Vaiheessa olevien käämikierrosten lukumäärä N_{ph} määritellään urassa olevien johtimien lukumäärän avulla seuraavasti

$$N_{ph} = 2N_c \frac{Q}{2am}, \quad (19)$$

jossa N_c on urassa olevien johtimien lukumäärä ja a on rinnakkaisten käämihaarojen lukumäärä. Koneilla, joilla analyttistä mallia on testattu, $N_{ph} \approx 104$.

2.3.3 Tahti-induktanssi ja vääntömomentti

Tahti-induktanssi koostuu magnetointi- sekä hajainduktanssien summasta. Magnetointi-induktanssi riippuu efektiivisestä ilmavälisestä δ_e , joka riippuu mekaanisesta ilmavälisestä δ ja magneetin korkeudesta h_m (ja myös kyllästyneen raudan vaikutuksesta, joka ei sisälly alla olevaan yhtälöön). Efektiivinen ilmaväli voidaan määrittää

$$\delta_e = \delta + h_m. \quad (20)$$

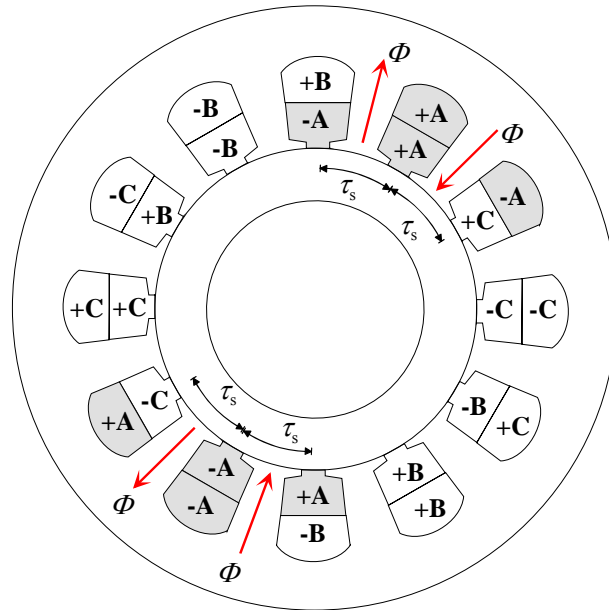
Normaalisti Carterin kerrointa käytetään efektiivisen ilmavälin pituuden määrittämisessä. Tässä tapauksessa voidaan todeta, että Carterin esittämä menetelmä ei kovin hyvin sovellu käytettäväksi napakäämittyjen murtovakokoneiden suunnitteluun. Tässä tapauksessa uraukkot eivät samalla tavalla moduloi ilmavälivuontiheyden käyttäytymistä kuin kokovakokoneilla. Sen sijaan yksittäinen ura-aukko saattaa lohkaista merkittävän määrän vuota kokonavan vuosta. (Pyrhönen 2005)

Keskeisesti käämityssä murtovakokoneessa koko koneen magnetointi-induktanssi on ratkaistu

$$L_{md} = \frac{2m\mu_0}{\pi} \frac{\tau_s}{\frac{Q}{m}\pi\delta_e} L_e (\xi_1 N_{ph})^2 \quad (21)$$

jossa μ_0 on ilman permeabiliteetti, τ_p on napajako ja L_e on efektiivinen staattorin pituus ($L_e \approx L + 2\delta$: L on staattorin fyysinen pituus, kun staattorissa ei ole jäähdytyskanavia).

Koneilla, joilla vakoluku on alle yhden, vuo voi esimerkiksi kulkea yhdestä hampaasta staattorin ja palata kahta hammasta pitkin, kuva 14. Napakäämityksen murtovakokoneen käämivuo syntyy vaikuttava ilmavälin pinta-ala on pinta-ala, jonka A-vaiheen käämitys kattaa eli $Q/m\tau_s L_e$. Kuvassa 14 esitettyyn 12-10-koneen A-vaiheeseen kuuluu 4 urajakoa ($Q/m = 12/3 = 4$), jotka synnyttävät A-vaiheen käämivuon. (Salminen 2004)



Kuva 14. Vuon kulku 12-10 koneessa ajanhetkellä, jolla A-vaiheen vuo saa huippuarvonsa.

Hajainduktanssi L_σ voidaan laskea sen osainduktanssien summana. Hajainduktanssit voidaan määrittää Richterin mukaan (1963, 1967). Kokovakokäämityksille tämä menetelmä antaa hyvät tulokset. Richter jakaa hajainduktanssin viiteen osaan:

- L_δ ilmaväli-induktanssi
- L_n urainduktanssi
- L_z hammaspääinduktanssi
- L_w vyyhdenpääinduktanssi
- L_χ vinoinduktanssi.

Koneen hajainduktanssi on näiden induktanssien summa

$$L_\sigma = L_\delta + L_n + L_z + L_w + L_\chi. \quad (22)$$

Näissä napakäämityissä murtovakokoneissa ei ole vinoinduktanssia. Myös ilmaväli-induktanssi on jätetty laskennasta pois koneen suuren ilmavälin vuoksi. Ilmaväli-induktanssilla on huomattavaa merkitystä vain pieni-ilmavälisissä koneissa. Yleensä se on merkittävä epätahtikoneissa.

Ilmaväli-induktanssin alkuperäinen idea on, että staattorin ja roottorin virtasummat eivät lokaalisti ole nollia, vaan syntyy pieniä vuokomponentteja, jotka ylittävät ilmavälin ylös alas. Staattoriin indusoituu jännitteitä, mutta vääntöä ei tule, joten ilmiö kuvataan hajaannuksena. Murtokoneissa ei ole uria lainkaan navan alueella, joten syntymekanismi pitää pohtia uudelleen. Lisäksi pinta-asennetut kestopagneetit kasvattavat efektiivisen ilmavälin erittäin pitkäksi, joten ilmaväli-induktanssin merkitys heikkenee ellei suorastaan katoa kokonaan. Näillä koneille voidaan ilmaväli-induktanssi jättää suurta virhettä tekemättä jättää pois. (Pyrhönen 2005)

Uran hajainduktanssi

Kaksikerroskäämityksen tapauksessa induktanssikerroin määritellään magneettikentän voimakkuuden integraalista. Molempien vyyhtien keskinäisinduktanssi tulisi ottaa huomioon samoin kuin se, että vyyhdit voivat kuulua eri vaiheisiin, jolloin virran vaihesiirto vaikuttaa niihin. Vyyhden itseisinduktanssi (Richter, 1967, s. 269)

$$L_c = N_c^2 (A_{su} + A_{so}) \quad (23)$$

missä N_c on johdinsauvojen (käämikierrosten) määrä uraa kohti ja A_{su} ja A_{so} ovat ideaaliset ala- ja yläkerroksen permeanssit.

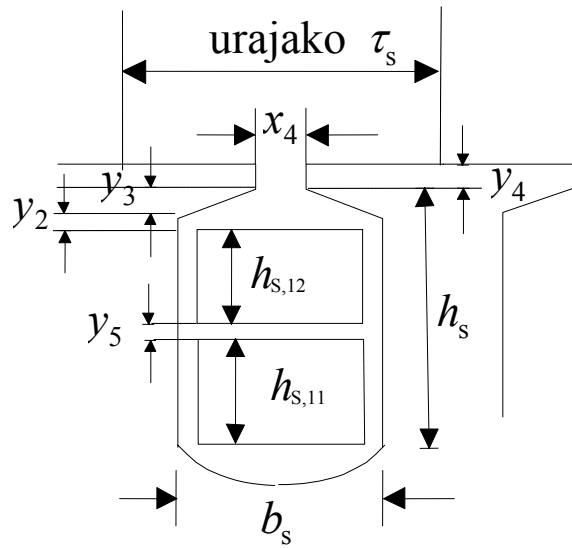
$$A_{su} = \mu_0 L_e \lambda_{su} \text{ ja } A_{so} = \mu_0 L_e \lambda_{so} \quad (24)$$

missä L_e staattorikuoren efektiivinen pituus, λ_{su} and λ_{so} ovat permeanssikertoimet. Permeanssikertoimet λ_{su} and λ_{so} voidaan määrittää käyttämällä Richterin (1967, s. 269) tapaa

$$\lambda_{su} = \frac{4b_{s,11}}{3b_s} + \frac{y_5 + y_2}{b_s} + \lambda_{n3} + \frac{y_4}{x_4} \quad (25)$$

$$\lambda_{so} = \frac{b_{s,12}}{3b_s} + \frac{y_2}{b_s} + \lambda_{n3} + \frac{y_4}{x_4} \quad (26)$$

Kuvassa 15 on esitetty staattoriuran muoto ja mitat.

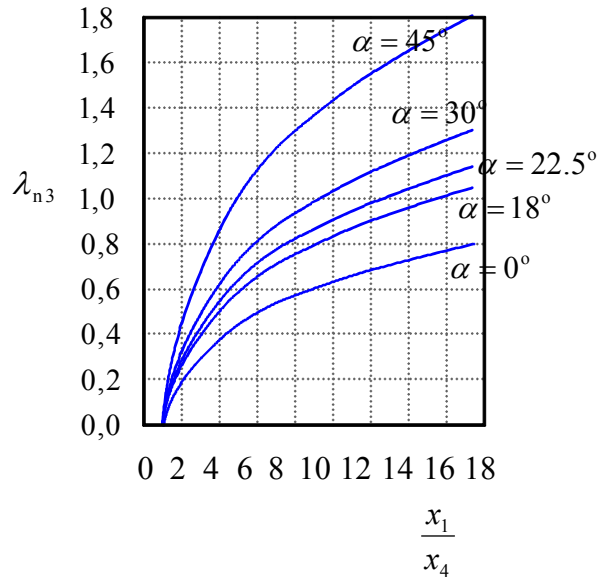


Kuva 15. Uran mittojen valinta. b_s on uran leveys, x_4 uransuun leveys, h_s uran korkeus, $h_{s,11}$ ja $h_{s,12}$ ovat käämityksen korkeus urassa, y_2 käämityksen yläreunasta viiston osan alkuun ja y_3 viiston osan korkeus ja y_4 on uransuun korkeus.

Kerroin λ_{n3} riippuu uran muodosta (pyöreä, neliö, ...). Teräväkulmaiselle uralle voidaan kerroin määrittää (Richter, 1967) seuraavasti

$$\lambda_{n3} = \frac{y_3}{b_s - x_4} \ln \frac{b_s}{x_4} \quad (27)$$

Koska urahajaannus on hajainduktanssien merkittävin osatekijä, on sen määrittäminen tärkeää napakäämityksen murtovakokoneen tapauksessa. Kuvassa 16 on esitetty λ_{n3} :n riippuvuus uransuun kaltevuudesta ja ura-aukon suhteellisesta leveydestä.



Kuva 16. Uransuun kaltevuudesta ja ura-aukon suhteellisesta leveydestä johtuvan reaktanssikertoimen suuruus. (Richter 1967)

Itseisinduktanssin lisäksi myös keskinäisinduktanssi täytyy ottaa huomioon. Jos urassa olevissa vyyhdensivuissa on yhtä monta sauvaa kummassakin, niin keskinäisinduktanssi voidaan määrittellä

$$L_c = N_c^2 (A_{gu} + A_{go}) \quad (28)$$

Jos ylä- ja alakerrokset kuuluvat samaan vaihekäämiin, voidaan kirjoittaa

$$\begin{cases} A_{gu} = \mu_0 L_e \lambda_{gu} \\ A_{go} = \mu_0 L_e \lambda_{go} \end{cases} \quad (29)$$

Kun käytetään kuvan 15 mittoja, voidaan permeanssikerroin määrittellä

$$\lambda_{gu} = \lambda_{go} = \lambda_g = \frac{y_5}{2x_1} + \frac{y_2}{b_s} + \lambda_{n3} + \frac{y_4}{x_4} \quad (30)$$

Ylä- ja alakerroksen käämit eivät aina kuulu samaan vaiheeseen, joten Richterin (1967) mukaan voidaan määrittää kerroin

$$g = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \cos \gamma_k, \quad (31)$$

joka on urassa eri vaiheessa olevien vyyhdensivujen välinen permeanssi. Kulma γ_k on urassa olevien vyyhdensivujen välinen vaihe-ero. Summa sisältää kaikki yhden vaiheen käämit. Vaihekäämin resultoivaksi urahajainduktanssiksi saadaan (Richter, 1967, s. 271)

$$L_n = 2pq \left(\frac{N_c}{a} \right)^2 L_e \mu_0 (\lambda_{su} + \lambda_{so} + 2g\lambda_g) \quad (32)$$

missä a on rinnakkaisten haarojen lukumäärä.

Kirjoitetaan kaikkien permeanssikertoimien λ vaikutus lyhyemmin λ' n avulla

$$\lambda_{ns} = \frac{\lambda_{su} + \lambda_{so} + 2g\lambda_g}{4} \quad (33)$$

N_{ph} on yhden vaiheen käämikierrokset sarjassa

$$N_{ph} = \frac{2pqN_c}{a} \quad (34)$$

Uran hajainduktanssi kaksikerroskäämitykselle voidaan kirjoittaa muotoon

$$L_n = \frac{4m}{Q} \mu_0 L_e N_{ph}^2 \lambda_{ns} \quad (35)$$

Hammaspääinduktanssi

Hammaspääpermeanssin määrittämiseen esitetään kerroin

$$\lambda_z = \frac{5\delta/x_4}{5 + 4\delta/x_4} \quad (36)$$

Koko vaihekäämin hammaspääinduktanssi, jossa otettu huomioon kertoimella $(1+g)/2$, että osassa ylä- ja alakerroksista kuuluvat eri vaihekäämeihin

$$L_z = \frac{4m}{Q} \mu_0 L_e \frac{1+g}{2} N_{ph}^2 \lambda_z \quad (37)$$

Vyyhdenpääinduktanssi

Vyyhdenpäissä kulkee erilaisia virtoja ja nämä virrat yhdessä muodostavat vyyhdenpään hajavuon

$$L_w = \frac{4m}{Q} \mu_0 L_e N_{ph}^2 q \lambda_s, \quad (38)$$

missä λ_s on määritelty $2h_b \lambda_e + b_b \lambda_w$. Kerroin h_b on vyyhdenpään korkeus ja b_b leveys. Vyyhdenpään reaktanssikertoimet λ_e ja λ_w riippuvat monista parametreista, kuten käämitysrakenteesta, vyyhdenpäiden sijoittelusta kerroksiin, roottorin rakenteesta jne. Tässä laskennassa käytettiin reaktanssikertoimia $\lambda_e = 0.518$ [1/m] ja $\lambda_w = 0.138$ [1/m], jotka Richter (1963) on määritellyt tahtikoneelle. Vyyhdenpään leveys on murtovakokäämityksessä keskimäärin sama kuin urajako τ_s . Koska vyyhdenpääat ovat lyhyitä ja lähellä hammasta murtokoneissa, ei vyyhdenpääinduktanssi ole kovin suuri murtovakokoneilla, joten sen laskennassa voidaan käyttää kokeellisia kertoimia. (Salminen 2004)

2.3.4 Vääntömomentti

Murtovakokoneen huippuvääntömomentti voidaan määrittää kokovakotahtikoneiden tapaan tehokulmayhtälöä käyttäen.

$$\hat{T} = \frac{mp}{\omega_s^2} \frac{E_{PM} U_{ph}}{L_d} \sin(\delta_a) \quad (39)$$

Erityisenä ongelmana tämän yhtälön käytössä on tahti-induktanssin oikea määrittäminen laskennan edetessä.

Teho on vastaavasti

$$P = \frac{mp}{\omega_s} \frac{E_{PM} U_{ph}}{L_d} \sin(\delta_a) = \frac{mp}{\omega_s} \frac{E_{PM} U_{ph}}{L_{md} + L_{s\sigma}} \sin(\delta_a). \quad (40)$$

Huippuvääntömomentti voidaan myös ratkaista toisella tapaa. Tätä menetelmää kutsutaan yksinkertaiseksi menetelmäksi. Kun vääntömomenttiyhtälöä tarkastellaan eri uralukunapapariyhdistelmillä, voidaan supistaa saman arvon eri koneilla omaavia tekijöitä, jolloin lopulta jää jäljelle verrannollisuus vakolukuun kuten seuraavaksi esitetään. Tahtikoneen huippuvääntömomentti voidaan ratkaista yhtälöstä (39) myös muotoon

$$\hat{T} = \frac{3p}{2\pi np} \frac{U_{ph} E_{PM}}{2\pi np L_d} = \frac{3}{4\pi^2 n^2} \frac{U_{ph} E_{PM}}{p L_d} \quad (41)$$

joka on riippumaton tehokulmasta δ_a . Kun syöttöjännite U_{ph} , indusoitunut vastasähkömotorinen voima E_{PM} ja moottorin nopeus n ovat vakiot, on vääntömomentti kääntäen verrannollinen napaparilukuun ja tahti-induktanssiin.

$$\hat{T} \propto \frac{1}{p L_d} \quad (42)$$

Kun napoja on paljon ja vakoluku q on pieni, haja-induktanssi voi olla suurempi kuin magnetointi-induktanssi. Tällöin tahti-induktanssille pätee likimäärin

$$L_d \propto \frac{1}{pq} (\lambda_{ns} + \lambda_z + q\lambda_s) \quad (43)$$

Sijoittamalla yhtälön (43) yhtälöön (42) saadaan vääntömomentille verrannollisuus

$$\hat{T} \propto \frac{1}{\frac{\lambda_{\text{ns}} + \lambda_z}{q} + \lambda_s} \quad (44)$$

Kun urien ja napojen määrää muuteltiin 45 kW koneille, huomattiin että kertoimet λ_{ns} ja λ_z eivät muuttuneet paljoa. Kyseisessä tapauksessa kertoimet voidaan siis merkitä vakioiksi. Lisäksi yhtälössä (44) olevan permeanssikerroin λ_s voidaan olettaa merkityksettömäksi, koska se on huomattavasti pienempi kuin $(\lambda_{\text{ns}} + \lambda_z)/q$. Joten kun napoja on paljon, niin vääntömomentti on verrannollinen vakolukuun.

$$\hat{T} \propto q \quad (45)$$

Valitaan yksi kone vertailukohteeksi ja lasketaan koneen vääntömomentti käyttäen esimerkiksi kenttälaskentaa. Vääntömomentin ja vakoluvun verrannollisuudesta saadaan kerroin, joka on sitten vertailukohde muille koneille. (Salminen et al. 2005)

2.3.5 Resistanssi ja virta

Virran laskemiseksi täytyy ensin määrittää vaiheresistanssi. Resistanssin määrittämiseen aloitetaan määrittämällä yhden urassa olevan käämin rinnakkaisten johtimien lukumäärä

$$k_{\text{cond}} = \frac{0,5k_{\text{Cu}}A_s}{N_c A_{\text{cond}}}, \quad (46)$$

missä A_s on uran pinta-ala, A_{cond} johtimen pinta-ala ja kuparin täytekerroin $k_{\text{Cu}} = 0,55$. Lisäksi kerroin 0,5 kertoo urassa olevan kaksi kerrosta. Johtimien lukumäärä k_{cond} pyöristetään lähimpään pienempään kokonaislukuun, jotta käämit mahtuvat uraan. Yhdessä urassa olevien käämien resistanssi lämpötilassa T voidaan määrittää

$$R_T = \frac{l_{\text{cond}} N_c}{\sigma_T k_{\text{cond}} A_{\text{cond}}}, \quad (47)$$

missä σ_T on kuparin johtavuus lämpötilassa T ja l_{cond} on yhden kuparijohdinsilmukan pituus.

Vaiheen resistanssi määritetään kertomalla käämin resistanssi vaiheessa olevien staattorien lukumäärällä

$$R_{\text{ph}} = \frac{Q}{am} R_T. \quad (48)$$

Koneen d- ja q-suuntaiset virrat saadaan murtovakokoneelle, kun oletetaan koneen olevan umpinapakone $L_q = L_d$. Pitkittäinen vaihevirta on

$$I_{\text{d,ph}} = \frac{U_{\text{ph}} (\omega_s L_q \cos(\delta_a) - R_{\text{ph}} \sin(\delta_a)) - E_{\text{PM}} \omega_s L_q}{\omega_s^2 L_q L_d + R_{\text{ph}}^2} \quad (49)$$

ja poikittainen vaihevirta on

$$I_{\text{q,ph}} = \frac{U_{\text{ph}} (R_{\text{ph}} \cos(\delta_a) + \omega_s L_d \sin(\delta_a)) - E_{\text{PM}} R_{\text{ph}}}{\omega_s^2 L_q L_d + R_{\text{ph}}^2}. \quad (50)$$

Nimellinen virta määritellään pitkittäisen ja poikittaisen virran avulla seuraavasti

$$I_n = \sqrt{(I_{\text{d,ph}}^2 + I_{\text{q,ph}}^2)}. \quad (51)$$

Virrantiheys voidaan laskea seuraavasti

$$J = \frac{I_n}{A_{\text{cond}} k_{\text{cond}}}. \quad (52)$$

Lasketuilla koneilla virrantiheyden maksimiksi määriteltiin $J = 5,2 \text{ A/mm}^2$. Ilmajäähdytteillä tahtikoneilla tyypilliset raja-arvot ovat $3 \dots 5 \text{ A/mm}^2$.

Keskimääräisen virtakatteen laskenta voidaan suorittaa alla olevan mukaisesti

$$A = \frac{mN_{\text{ph}}I_n}{\pi r_s}. \quad (53)$$

Lasketuilla koneilla virtakatteen maksimiksi määriteltiin $A = 80$ kA/m. Ilmajäähdytteisillä koneilla tyypilliset raja-arvot ovat 30...80 kA/m.

2.3.6 Häviöt

Resistiiviset häviöt eli kuparihäviöt staattorin käämityksessä voidaan laskea määritellyn vaiheresistanssin ja nimellisvirran avulla

$$P_{\text{Cu}} = mR_{\text{ph}}I_n^2. \quad (54)$$

Rautahäviöt staattorissa koostuvat hampaan sekä selän pyörrevirta- ja hystereesihäviöistä ja ne voidaan määrittää (Vogt, 1996)

$$P_{\text{Fe}} = m_{\text{Fe,y}}k_{\text{Fe,y}}p_{10}\hat{B}_y^2\left(\frac{f}{50}\right)^{3/2} + m_{\text{Fe,t}}k_{\text{Fe,t}}p_{10}\hat{B}_t^2\left(\frac{f}{50}\right)^{3/2} \quad (55)$$

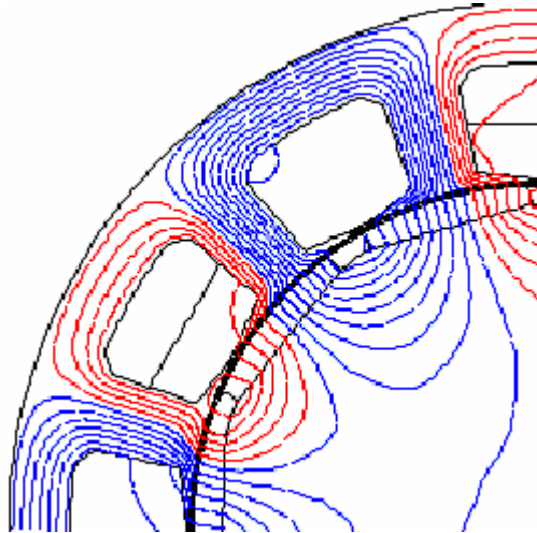
missä f on taajuus, materiaalikertoimet $k_{\text{Fe,y}} = 1.5$, $k_{\text{Fe,t}} = 1.2$ ja $p_{10} = 2.7$ (kun 1 T ja 50 Hz, alaindeksi y tarkoittaa selkää ja t hampaita). Vuontiheydet voidaan määrittää staattorin hampaissa seuraavasti

$$\hat{B}_t = \frac{\hat{\Phi}_{\delta,\text{PM}}}{Lb_{\text{ds}}}, \quad (56)$$

jossa b_{ds} on staattorin hampaan leveys ja selässä

$$\hat{B}_y = \frac{\hat{\Phi}_{\delta,PM}}{2Lh_{ys}}, \quad (57)$$

jossa h_{ys} on staattorin selän korkeus. Vuontiheyksien laskennassa on otettu huomioon ura-jaon suhde magneetin leveyteen. Magneetin leveydestä huomioidaan vain uranleveyden verran. Oletuksena vuon kululle staattorin selässä on, että hampaassa kulkeva vuo jakautuu tasan kahteen osaan selässä. Näin ei kuitenkaan tapahdu kaikilla murtovakoneilla todellisuudessa, joten vuontiheys selässä voi olla jopa kaksinkertainen laskettuun verrattuna, kuva 17. Tällöin huomataan rautahäviöiden yhtälöstä (55), että rautahäviöt kasvavat selän vuontiheyden kasvaessa.



Kuva 17. Kuvassa nähdään 12-10 koneella vuonkulku staattorin hampaissa ja selässä. Vuo ei jakaudu hampaasta tasan kahteen osaan staattorin selässä.

Rautahäviöiden tarkka laskenta tarkasti on tavanomaista vaikeampaa pienen vakoluvun murtokoneille. Rautahäviöitä on tässä laskettu myös Mi:n (2001) väitöskirjassa esitellyn menetelmän avulla, jolloin häviöiksi saatiin likimain samat kuin Vogt:n (1996) esittelemän laskentamallin mukaan. Häviöiden laskentaan vaikuttavat suuresti erilaiset materiaaliker- toimet, jotka ovat pitkälle kokeellisia. Lisäksi tarkka vuon määrittäminen on murtovakokäämityl- lä koneella vaikeaa, kuten kappaleessa 2.3.2 on esitetty. Hampaaseen kulkeva vuo riippuu paljolti magneetin ja hampaan suhteesta, eli paljonko magneetti peittää hampaasta.

Laakerihäviöt määritellään

$$P_{Br} = k_{rb} D_r (L + 0.6 \tau_p) \left(\frac{n_s}{60} \right) \quad (58)$$

Pintajähdytetyllä moottorilla kerroin k_{rb} on 8 ... 10 Ws^2/mm^4 .

Hajahäviöt Gieras and Wing (1997) mukaan voidaan laskea yksinkertaisesti

$$P_{Str} = 0.0075 \cdot P \quad (59)$$

Laminoidulla rungolla varustetussa roottorissa rautahäviöt ovat melko pienet. Itse magneettien ”rautahäviöt” sen sijaan voivat saada kohtalaisia arvoja riippuen staattoriurituksen aiheuttamista permeanssiharmonisista. Jos pyörimisnopeus on matala, ovat roottorin rautahäviöt pienet, ja ne jätetäänkin tässä tapauksessa huomiotta.

2.3.7 Hyötysuhde

Hyötysuhteen määrittäminen edellä lasketuista häviöistä on esitetty alla

$$\eta = \frac{P}{P + P_h} = \frac{P}{P + P_{Fe} + P_{Cu} + P_{Str} + P_{Br}} \quad (60)$$

Kestomagneettitahtikoneilla on oikosulkukoneeseen nähden suurempi hyötysuhde ja teho-
tiheys. Koneita valittaessa on tärkeää hyötysuhteen lisäksi laskea koneen tuottama suhteellinen vääntömomentti. Koneen hyötysuhde voi antaa hyviä arvoja, vaikka koneen tuottama vääntömomentti olisi riittämätön esimerkiksi kippiväännön suhteen.

3 TULOKSIA

Tässä kappaleessa verrataan analyyttisen laskennan tuloksia kenttälaskentamenetelmällä FEM (finite element method) saatuihin tuloksiin. Laskettavana oli 15 eri uralukunapapariyhdistelmää ja koneiden ehtona oli 400 rpm, 45 kW, runkokoko 225.

3.1 Vastasähkömotorinen voima

Vastasähkömotorinen voima laskettiin Zhu:n (1993) määrittelemän ilmavälivuontiheyden perusteella lasketusta vuon huippuarvosta kerrottuna permeanssikertomella. Taulukko 7 esittelee analyyttisen laskennan ja FEM-laskennan välisiä eroja.

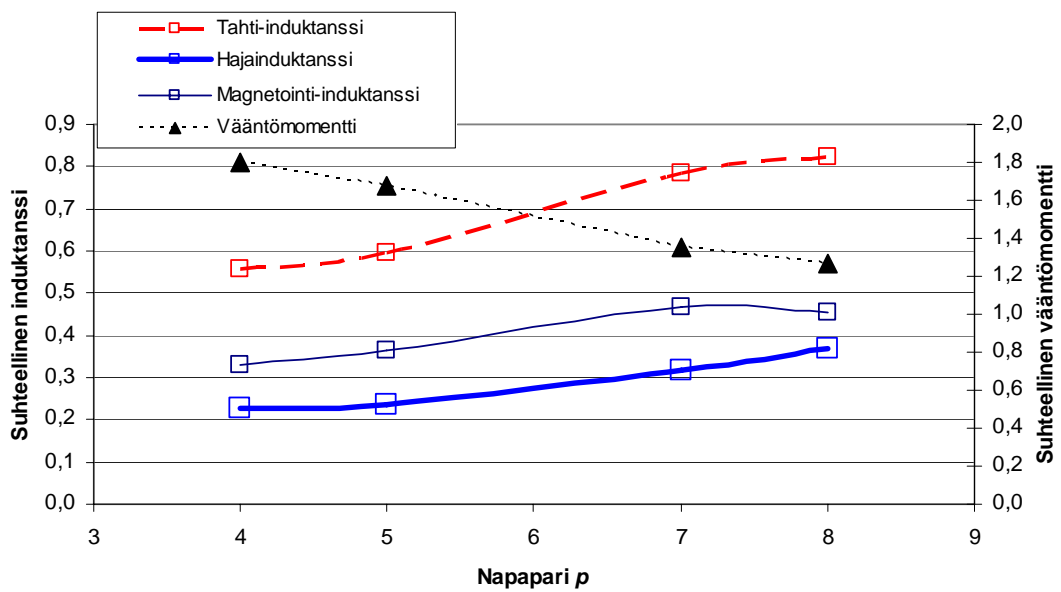
Taulukko 7. Analyyttisen laskennasta ja kenttälaskennasta saatujen vastasähkömotorisen voiman E_{PM} tulosten vertailu.

Navat	8	10	14	16		
q	0,5	0,4	0,29	0,25		
E_{PM} [V], FEM	180	179	177	171		
E_{PM} [V], Analyyttinen	183	178	193	170		
Navat		12	14			
q		0,5	0,43			
E_{PM} [V], FEM		175	179			
E_{PM} [V], Analyyttinen		178	169			
Navat			16	20	22	26 28
q			0,5	0,4	0,36	0,31 0,29
E_{PM} [V], FEM			184	188	190	195 192
E_{PM} [V], Analyyttinen			184	188	191	191 188
Navat				24	30	42
q				0,5	0,4	0,29
E_{PM} [V], FEM				173	189	184
E_{PM} [V], Analyyttinen				178	191	166

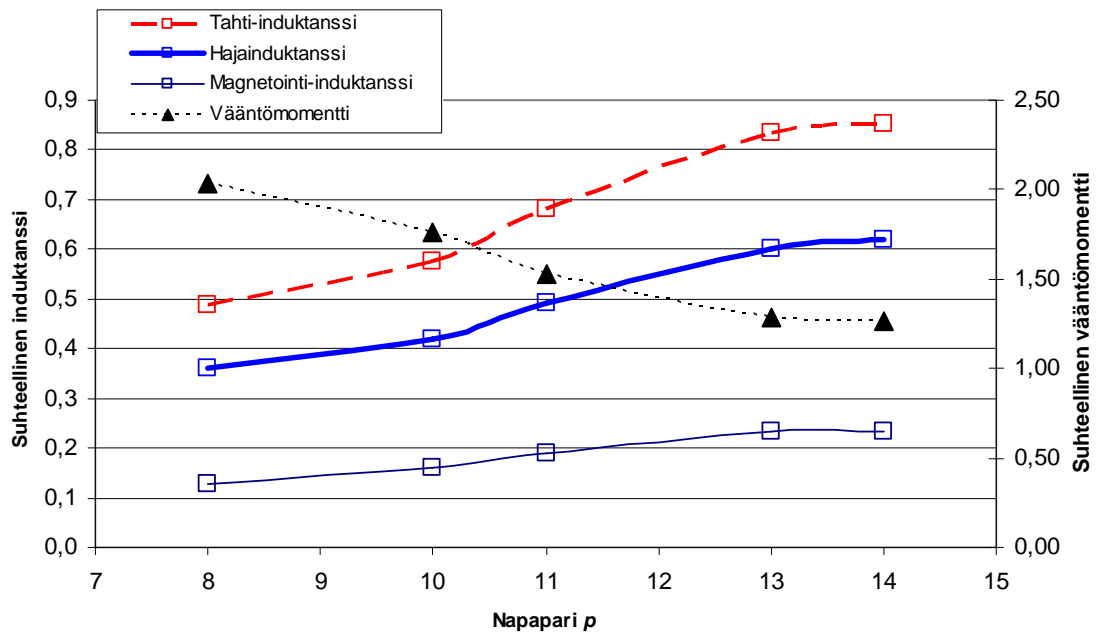
Taulukosta 7 nähdään analyyttisesti lasketun vastasähkömotorisen voiman noudattavan likimain FEM-laskettuja arvoja. Suurin vaikeus vuontiheyden määrittämisessä on staattoriurituksen aiheuttamien vuontiheyskuoppien tarkka määrittäminen.

3.2 Huippuvääntömomentti

Vääntömomentti lasketaan yhtälön (39) mukaisesti. Yhtälöstä nähdään, että vääntömomenttiin vaikuttavat sekä staattorin taajuus että tahti-induktanssi. Tahti-induktanssi muodostuu haja- ja magnetointi-induktanssien summasta. Kuvissa 18 ja 19 on esitetty suunnittelun yhteydessä laskettujen 12- ja 24-uraisten koneiden suhteelliset induktanssit sekä suhteellinen vääntömomentti napaparin funktiona.



Kuva 18. 12-uraisten koneiden suhteelliset induktanssit sekä suhteellinen vääntömomentti napapariluvun funktiona.



Kuva 19. 24-uraisten koneiden suhteelliset induktanssit sekä suhteellinen vääntömomentti napapariluvun funktiona.

Kuvista 18 ja 19 huomataan, että suhteellisten induktanssien kasvavan napapariluvun funktiona ja samalla myös taajuuden funktiona, kun pidetään uraluku vakiona ja muutetaan napaparilukua. Tarkasteltaessa murtovakokoneen suhteellista vääntömomenttia nähdään sen pienenevän napapariluvun funktiona. Vääntömomentti on yksinkertaisen menetelmän mukaan kääntäen verrannollinen tahti-induktanssiin sekä napaparilukuun, yhtälö (42).

Lisäksi nähdään, että 12-uraisilla koneilla magnetointi-induktanssi on hallitseva. Kun uralukua suurennetaan, huomataan 24-uraisilla koneilla hajainduktanssin olevan magnetointi-induktanssia suurempi. Hajaannus kasvaa suuremmilla uraluvuilla mm. siksi, että niillä on enemmän magneetteja.

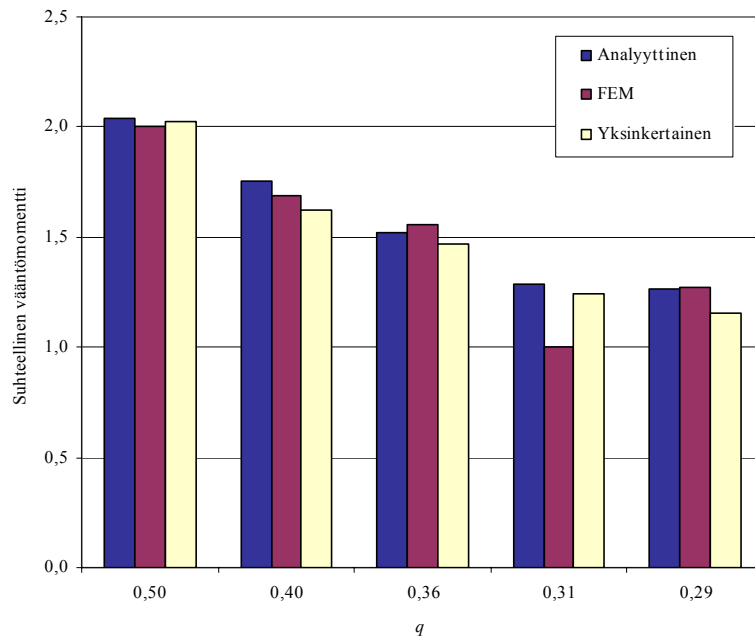
Huippuvääntömomentit laskettiin analyttisesti yllä mainittujen induktanssien avulla. Lisäksi huippuvääntömomentit laskettiin yksinkertaisella analyttisellä menetelmällä. Kentälaskennan, analyttisen laskennan ja yksinkertaisen menetelmän tulokset suhteellisina arvoina on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Vääntömomenttien suhteellisarvojen vertailu

Navat	8	10	14	16			
q	0,5	0,4	0,29	0,25			
Vääntömomentti p.u., FEM	1,66	1,66	1,17	1,04			
Vääntömomentti p.u., Analyytinen	1,80	1,68	1,36	1,26			
Vääntömomentti p.u., yksink.	2,03	1,62	1,16	1,01			
Navat		12	14				
q		0,5	0,43				
Vääntömomentti p.u., FEM		2,00	1,79				
Vääntömomentti p.u., Analyytinen		1,91	1,83				
Vääntömomentti p.u., yksink.		2,03	1,74				
Navat			16	20	22	26	28
q			0,5	0,4	0,36	0,31	0,29
Vääntömomentti p.u., FEM			2,00	1,78	1,56	1,00	1,27
Vääntömomentti p.u., Analyytinen			2,04	1,76	1,52	1,29	1,26
Vääntömomentti p.u., yksink.			2,03	1,62	1,47	1,25	1,16
Navat					24	30	42
q					0,5	0,4	0,29
Vääntömomentti p.u., FEM					1,91	1,67	1,02
Vääntömomentti p.u., Analyytinen					1,94	1,55	1,20
Vääntömomentti p.u., yksink.					2,03	1,62	1,16

Taulukosta 8 huomataan kenttälaskennan, analyttisen laskennan ja yksinkertaisen menetelmän suhteellisten vääntömomenttiarvojen seurailevan melko hyvin toisiaan sekä napaluvun että vakoluvun muuttuessa. Voidaan päätellä induktanssien laskennan analyttisesti onnistuneen kohtalaisen hyvin. Suurimmat eroavaisuudet taulukon 8 mukaan tapahtuvat pienimmillä vakoluvuilla, joilla analyttinen malli antaa FEM:iin verrattuna hieman suurempia arvoja.

Kuvassa 20 on esitetty pylväsdiagrammina suhteellisten vääntömomenttien vertailu 24-uraisille koneille laskettuna eri menetelmillä.



Kuva 20. Eri menetelmillä laskettujen suhteellisten vääntömomenttien vertailu vakoluvun funktiona 24-uraisille koneille.

Kuvan 20 perusteella vääntömomenttien laskenta 24-uraisien koneiden tapauksessa kolmella eri menetelmällä antaa kaikilla tulokset, jotka ovat lähellä toisiaan. Voidaan todeta analyttisen sekä yksinkertaisen menetelmän toimivan hyvin ainakin 24-uraisille koneille.

3.3 Häviöt

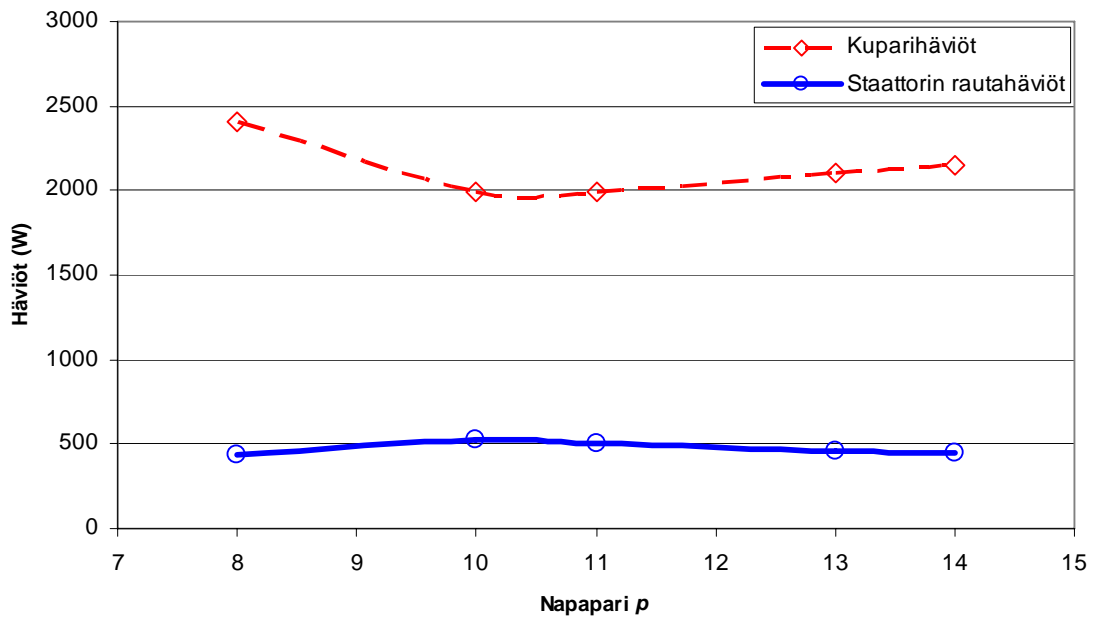
Staattorin rautahäviöiden määrittämisen sekä sitä kautta hyötysuhteen määrittämisen analyttisesti tekee hyvin vaikeaksi vuontiheyksien määrittäminen staattorin hampaissa sekä selässä, koska murtovakokoneilla vuo ei kulje symmetrisesti. Kuvasta 2 nähdään 12-10-koneen vuon kulkureitti. Taulukossa 9 on vertailtu analyttisesti sekä kentälaskentaohjelmalla laskettuja rautahäviöitä.

Taulukko 9. Rautahäviöiden vertailu.

Navat	8	10	14	16		
q	0,5	0,4	0,29	0,25		
f	27,7	33,3	46,7	53,3		
P_{Fe} [W], FEM	281	280	314	358		
P_{Fe} [W], Analyyttinen	261	274	272	230		
Navat		12	14			
q		0,5	0,43			
f		40	46,7			
P_{Fe} [W], FEM		356	401			
P_{Fe} [W], Analyyttinen		384	393			
Navat			16	20	22	26 28
q			0,5	0,4	0,36	0,31 0,29
f			53,3	66,7	73,3	86,7 93,3
P_{Fe} [W], FEM			365	394	524	427 537
P_{Fe} [W], Analyyttinen			434	532	506	464 451
Navat					24	30 42
q					0,5	0,4 0,29
f					80	100 140
P_{Fe} [W], FEM					525	715 1008
P_{Fe} [W], Analyyttinen					666	820 663

Taulukosta 9 nähdään, että rautahäviöiden analyttinen laskenta poikkeaa FEM-laskennasta eniten koneilla, joilla on uralukuun nähden paljon napoja. Rautahäviöt riippuvat voimakkaasti yhtälön (55) mukaan sekä vuontiheyksistä hampaassa ja selässä että taa-juudesta. Koneilla voi tapahtua kuvan 17 mukainen ilmiö, eli hampaassa kulkeva vuo menee kokonaisuudessaan vain yhteen suuntaan selässä sen sijaan, että jakautuisi tasan kah-teen osaan. Koska vuontiheyden määrittäminen on hyvin vaikeaa, on myös rautahäviöiden mää-rittämisessä tämän myötä epätarkkuutta.

Kuvassa 21 verrataan kuparihäviöitä ja staattorin rautahäviöitä napaparin funktiona 24-uraisilla koneilla.



Kuva 21. 24-uraisten koneiden kuparihäviöt ja staattorin rautahäviöt napapariluvun funktiona.

Kuvassa 21 kuparihäviöt ovat pienimmällä napapariluvulla suurimmat johtuen suuresta käämikierrosmäärästä. Suuremmilla napapariluvuilla on myös suurempi taajuus, jolloin virranahtoilmiö lisää kuparihäviöitä. Paras tulos saavutetaan vakoluvulla $q = 0.4$.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tarkoituksena oli kehittää analyyttinen laskentamalli napakäämityille murtovakokes-tomagneettitahtikoneille, joiden vakoluku $q \leq 0,5$. Analyyttistä laskentamallia kehitettäessä käytettiin apuna FEM-laskennasta saatuja tuloksia. Analyyttisen laskentamallin tarkoituk-sena on lyhentää kenttälaskelmaohjelman avulla tehtävää suunnittelua ajallisesti selvittä-mällä laskennan alkuarvot iteratiivisesti käyttäen analyyttistä mallia.

Laskentamallia testattiin 14 erilaisella koneella samoilla mitoilla ja parametreilla kuin kenttälaskentaohjelmalla lasketut koneet. Koneiden runkokoko oli 225 ja teho 45 kW.

Analyttisestä laskentamallista ei nähdä, tuottaako kone epäsymmetrisiä magneettisia ve-tovoimia, joita esim. koneet, joiden uraluku on pariton sekä uraluku on likimain sama kuin napojen määrä, tuottavat. Lisäksi laskentamallissa ei ole otettu vääntömomenttivärettä huomioon.

Jatkokehitystä varten tarvittavat yhtälöt saatiin selvitettyksi. Kestomagneettitahtikoneiden laskentayhtälöiden sovittaminen murtovakokäämityille kestomagneettitahtikoneille on vai-keaa, koska murtovakokoneet magneettiset ominaisuudet ovat epäsymmetrisiä ja vuonti-heydet epäsinimuotoisia. Analyyttistä mallia tulisi tulevaisuudessa kehittää tässä esitettyä tarkemmaksi ja algoritminomaiseksi. Etenkin ilmavälivuon laskentaa permeanssifunktion avulla tulisi tutkia. Permeanssiyhtälön kehittäminen staattoriurituksen aiheuttamiin ilmavä-livuontiheyden vuontiheyskuoppiin on olennaisen tärkeää tarkan vuoarvon laskemiseksi. Myös vuontiheyksien tarkempaa laskentaa staattorin selässä sekä hampaissa on kehitettävä, jotta saataisiin nykyistä tarkempi menetelmä rautahäviöiden määrittämiselle sekä mitoitettua staattorin rautaosat tarkemmin.

Kaikkiaan työn kuluessa napakäämityjen murtovakokoneiden laskenta osoittautui huomattavasti vaikeammaksi kuin etukäteen osattiin odottaa. Kokovakokoneille laaditut laskenta-menetelmät eivät sovellu kunnolla käytettäviksi näiden koneiden yhteydessä, vaan on kehi-tettävä aivan uusia laskentamenetelmiä napakäämityjen koneiden tarkkaan analyyttiseen laskentaan. Nyt esillä oleva laskentamenetelmä antaa kuitenkin kohtalaisia arvioita suunnittelun pohjatiedoksi, mutta tulokset on aina syytä varmentaa numeerista analyysiä käyt-täen.

LÄHTEET

Heikkilä T., 2002. Permanent Magnet Synchronous Motor for Industrial Inverter Applications – Analysis and Design, Dr.thesis, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta. ISBN 951-764-699-2, ISSN 1456-4491

Heller B., Hamata V., 1997. Harmonic Field Effects in Induction Machines, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York.

Hendershot Jr, J.R., Miller, T.J.E., 1994. Design of Brushless Permanent-Magnet Motors. Magna physics publishing and Clarendon press, Oxford, USA. ISBN 1-881855-03-1. 574 s.

Kasinathan, P., 2003. Integrated in-wheel motors for low power traction applications. Dissertation. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Ruotsi. 198 s.

Koch, Th., Binder, A., 2002. Permanent Magnet Machines with Fractional Slot winding for Electric Traction. Proceedings of the International Conference on Electrical Machines. ICEM 2002, Brugge, Belgia. CD-ROM.

Libert, F., Soulard, J., 2004. Investigation on Pole-Combinations for Permanent-Magnet Machines with Concentrated Windings. Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, ICEM 2004, Krakow, Puola. CD-ROM.

Mi C., 2001. Modelling of iron losses of permanent magnet synchronous motors. A thesis submitted in conformity with the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in the Department of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto, Kanada.

Perho J., Niemenmaa A., Jokinen T., Arkkio A., 1995. Vaihtosähkökoneiden yliaaltoilmiöt. Sähkömekaniikan lisensiaattiseminaari. Teknillinen korkeakoulu, Helsinki. ISBN 951-22-2850-5.

Pyrhönen J., 1998. Pyörivän sähkökoneen suunnittelu. Opetusmoniste. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Lappeenranta. ISBN 951-763-868-X.

Keskustelut professori Juha Pyrhösen kanssa lokakuussa 2005.

Richter, R., 1963. *Electrische Maschinen, Band II, Synchronmaschinen und Einankerumformer*. Dritte Auflage. Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart, Saksa. 707 s.

Richter, R., 1967. *Electrische Maschinen, Band I, Allgemeine Berechnungselemente die Gleichstrommaschinen*. Dritte Auflage. Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart, Saksa. 691 s.

Salminen P., 2004. *Fractional Slot Magnet Synchronous Motors for Slow Speed Applications*, Dr.thesis, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta. ISBN 951-764 982-7, ISSN 1456-4491.

Salminen P., Jokinen T., Pyrhönen J., 2005. 'The Pull-Out Torque of Fractional-slot PM-Motors with Concentrated Winding' for IEE Proc. Electric Power Applications. Artikkelin on hyväksytty IEE:hen.

Vogt, K., 1996. *Berechnung elektrischer Maschinen*. VCH Verlagsgesellschaft mbH Weinheim, Saksa. ISBN 3-527-28391-9. 524 s.

Zhu Z. Q., Howe D., Ekkehard B., Ackermann B., 1993. 'Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet motors, part I: open-circuit field', IEEE Trans. Magn., vol. 29, s. 124–134.

Zhu Z. Q., Ishak, Z. Q., Howe D., 2005. "Unbalanced Magnetic Forces in Permanent Magnet Brushless Machines with Diametrically Asymmetric Phase Windings," Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Sheffield, Iso-Britannia. Email: Z.Q.Zhu@sheffield.ac.uk