



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

**Kestomagneettitahtikoneen vääntömomentin tuotto-
kyvyn optimointi hybridibussikäyttöön
Optimization of Torque Production Capability of Per-
manent Magnet Synchronous Machines for Hybrid Bus
Application**

Mika-Markus Kepsu

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Mika-Markus Kepsu

Kestomagneettitahtikoneen vääntömomentin tuottokyvyn optimointi hybridibussi- käyttöön

2014

Kandidaatintyö.
38 s.

Tarkastaja: TkT Pia Lindh

Työssä tarkastellaan hybridi- ja sähköajoneuvojen voimankäyttöjärjestelmiä ja bussin ajomoottorina toimivan kestoplaneettitahtikoneen toimintaa ja sen soveltuvuutta ajoneuvokäyttöön. Esitetään analyyttinen työkalu kestoplaneettitahtikoneen induktanssisuunnittelun ja koneen vääntömomentin tuottokyvyn optimoinnin tueksi. Työkalua hyödynnetään esitettävässä ajomoottorin mitoituslaskelmassa.

Työssä päätellään, että kestoplaneettitahtimoottori soveltuu hyvin ajoneuvokäyttöön. Maksimaalisen vääntömomentin saavuttamiseksi sen roottorin rakenne ja induktanssit on optimoitava. Analysoimalla ajoneuvokäyttöön tarkoitettua kestoplaneettitahtimoottoria työkalun avulla havaitaan, että yhtä suuremmalla induktanssisuhteella vääntömomentti on pienempi kentänheikennyksessä kuin ajettaessa konetta taajuusmuuttajalla vakioteholla nimelliskuormalla. Vastaavasti yhtä pienemmillä induktanssisuhteilla vääntömomentti on pienempi kentänheikennyksessä. Todetaan, että vääntömomentti kasvaa induktanssisuhteen poiketessa yhdestä. Suuri vääntömomentti saadaan pienillä induktanssisuhteilla. Induktanssisuhteen kasvattaminen yhdestä ei lisää moottorin tuottamaa vääntömomenttiä yhtä paljon kuin induktanssisuhteen pienentäminen.

Työn lopuksi verrataan työkalun laskemia tuloksia kirjallisuudesta löytyvillä yhtälöillä laskettuihin tuloksiin. Työkalun laskemat tulokset vaikuttavat ristiriidattomilta ja yhteneväsiltä teorian kanssa. Työkalun toteutuksessa tehdyt teoreettiset yksinkertaistukset aiheuttavat todennäköisesti epätarkkuutta tuloksissa erityisesti suurella kuormituksella.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Technology
LUT Institute of Technology, Electrical Engineering

Mika-Markus Kepsu

Optimization of Torque Production Capability of Permanent Magnet Synchronous Machines for Hybrid Bus Application

2014

Bachelor's Thesis.
38 p.

Examiner: PhD Pia Lindh.

In this work the propulsion systems of hybrid and electric vehicles, and the Permanent Magnet Synchronous Machine acting as the drive motor of the bus, its operation, and adaptability to vehicle propulsion, are discussed. An analytical tool to assist in the inductance design and optimization of torque production capability of PMSMs is presented. The tool is put to practice in a demonstrative dimensioning calculation of a bus drive motor.

The conclusion of the thesis is that the PMSM is well adapted to vehicle propulsion. In order to achieve maximal torque production capability its rotor structure and inductances need to be optimized. By analyzing a PMSM intended for vehicle propulsion, it is found that with inductance ratio smaller than one, the torque of the motor is smaller in field weakening than when driving the motor with a frequency converter at constant power with rated current. Analogously, with inductance ratio greater than one the torque is greater in field weakening. In addition, the torque production capability of the PMSM improves when inductance ratio deviates from one. Great torque is achieved with small inductance ratios. Increasing the inductance ratio from one does not improve the torque production capability of the motor as much as decreasing it.

To finalize the work, the calculations of the tool are compared to those calculated by using corresponding equations found in literature. The results calculated by the tool seem consistent with theory. However, the theoretical simplifications made when implementing the model are likely to cause inaccuracy in the results, especially at high loading.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet	5
1. Johdanto	7
2. Hybridi- ja sähköbussien voimankäyttöjärjestelmät	8
2.1 Sarjahybridin voimankäyttöjärjestelmä	8
2.2 Rinnakkaishybridin voimankäyttöjärjestelmä	9
2.3 Sähköajoneuvon voimankäyttöjärjestelmä	10
2.4 Voimankäyttöjärjestelmien vertailu	10
3. Bussin vaatima nopeus ja vääntö	12
4. Kestomagneettitahtikone	15
4.1 Kestomagneettikoneen rakenne ja toiminta	15
5. Kestomagneettitahtikoneen matemaattinen mallinnus	18
5.1 Vääntöprofiiliohjelman rakenne	22
5.1.1 Induktanssisuhde ja maksimaalinen sähkömotorinen voima	22
5.1.2 Virran laskenta	23
5.1.3 Nimellispisteen kuormituskulman interpolointi	23
5.1.4 Vääntömomentin laskenta	24
6. Vääntöprofiili	25
6.1 Kestomagneettitahtikoneen vääntömomentin mitoituslaskelma	31
6.2 Ohjelman toimivuuden testaus	33
7. Yhteenveto	34
LÄHTEET	36
LIITTEET	38

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

IPMSM	Internal Permanent Magnet Synchronous Machine, uppomagneettitahtikone
LTU	Lappeenranta University of Technology
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Machine, kestopermanenttimagneettitahtikone
pu	per unit, nimellispisteeseen suhteutettu arvo

Kreikkalaiset muuttujat ja vakiot

δ	kuormituskulma
ϵ	induktanssisuhde
ρ	tiheys
φ	tehokulma
ω	sähköinen kulmanopeus
ψ	käämivuo
Ω	mekaaninen kulmanopeus

Roomalaiset muuttujat ja vakiot

a	kiihtyvyys
f	taajuus
g	putoamiskiihtyvyys maan pinnalla
h	askelpituus
j	imaginääriyksikkö
m	massa
n	pyörimisnopeus
p	napapariluku
r	säde
v	velocity, nopeus
C	liikeyhtälöön liittyvä vakio
E	elektromotorinen voima
F	voima
I	sähkövirta
L	induktanssi
P	teho

S	pinta-ala, esim. bussin otsalohkon pinta-ala
T	vääntömomentti
U	jännite

Kreikkalaiset alaindeksit

σ	haja-, liittyy magneettiseen hajaannukseen
----------	--

Roomalaiset alaindeksit

a	acceleration, kiihtyvyys
air	ilma
d	direct axis, roottorikoordinaatiston d-akseli
h	huippu, suurin
l	load, kuormittava
max	maksimaalinen, suurin
md	d-suuntainen magnetointi
m_q	q-suuntainen magnetointi
n	nimellinen
PM	permanent magnet, kestmagneetti
q	quadrature axis, roottorikoordinaatiston q-akseli
rr	rolling resistance, vierimisvastus
s	syöttö tai staattori
v	velocity, nopeus, esim. nopeuteen liittyvä ilmanvastus
w	wheel, pyörä
$+$	jäljempi
$-$	aiempi

1. JOHDANTO

Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Saimaan ammattikorkeakoulu ja Etelä Karjalan Ammattiopisto rakentavat yhdessä hybridibussin prototyyppiä. Hybridibussi CAMBUS on osa yliopiston Green Campus –ohjelmaa. Bussin voimankäyttöjärjestelmästä tavoitellaan kaupallisia hybridijärjestelmiä energiatehokkaampaa. Energiatehokkuus perustuu kaupallisia järjestelmiä pienempään iskutilavuudeltaan 2,5 l dieselmoottoriin ja tehokkaampaan akkujärjestelmään. Bussia voidaan ajaa kaupunkialueilla bussin pysähdellessä toistuvasti pelkällä sähkömoottorilla, mikä vähentää merkittävästi kaupunkialueiden hiukkaspäästöjä. (LUT)

Hybridibussiin asennetaan LTY:ssä suunniteltu voimankäyttöjärjestelmä, jota varten kehitetään kestopagneettiteknologiaa hyödyntävä sähköinen ajomoottori. Voimankäyttöjärjestelmän tarkoitus on kyetä tuottamaan riittävän suuri voima takaamaan bussin toiminnan pelkän sähkömoottorin avulla. Tämä kandidaatintyö liittyy yliopiston Green Campus -hybridibussiprojektiin. Sen tarkoitus on:

1. tarkastella hybridi- ja sähköajoneuvojen voimankäyttöjärjestelmiä
2. määrittää kuormituksen voimankäyttöjärjestelmälle asettamat vaatimukset bussin ajosyklin avulla
3. tarkastella kestopagneettitahtikoneen toimintaa ja koneen soveltuvuutta ajomoottoriksi
4. luoda kestopagneettitahtikonetta mallintava analyyttinen työkalu ajomoottorin suunnittelun tueksi
5. tutkia induktanssien vaikutusta kestopagneettitahtikoneen vääntömomentin tuottokykyyn työkalun avulla
6. esittää suuntaa-antava kestopagneettitahtikoneen mitoituslaskelma työkalun avulla

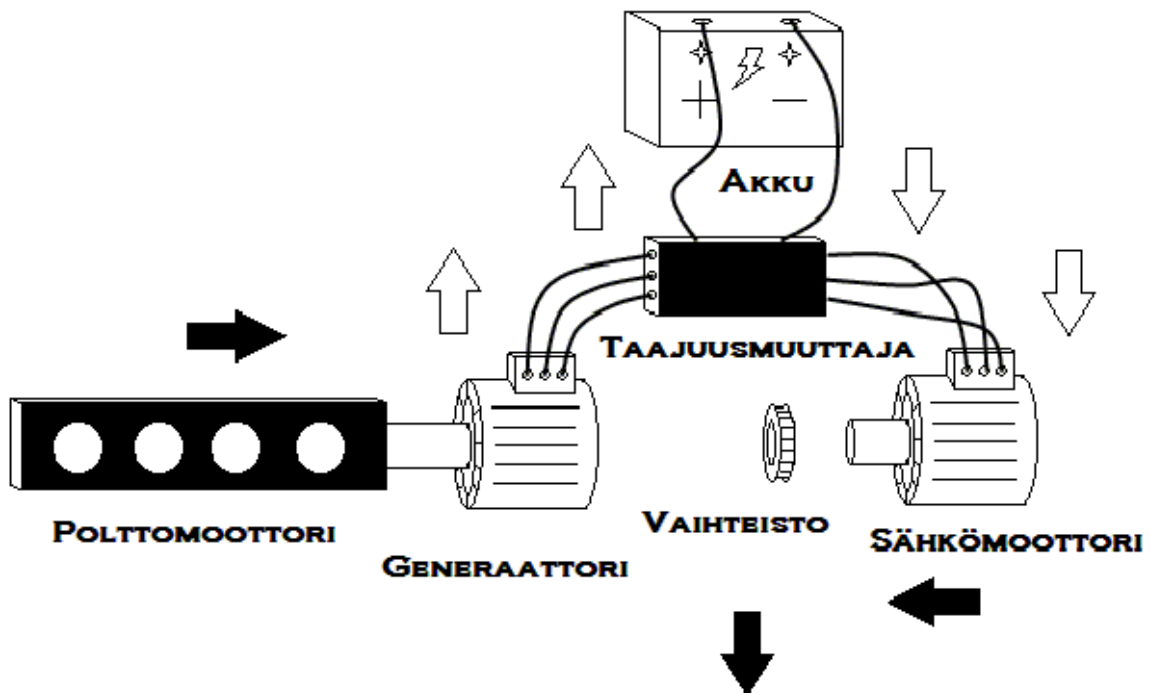
Luotavaa työkalua voidaan hyödyntää ajomoottorin induktanssien optimoinnissa. Ajomoottorin induktanssit on tarkoitus optimoida siten, että koneen vääntömomentti alinopeusalueella on mahdollisimman suuri. Toisaalta vääntömomentin on oltava riittävä kentänheikennysalueella mahdollistamaan ajoneuvon huippunopeuden.

2. HYBRIDI- JA SÄHKÖBUSSIEN VOIMANKÄYTTÖJÄRJESTELMÄT

Maapallon öljyvarat ehtyvät ja polttoaineen hinta nousee. Kansainväliset yhteisöt ja valtiot asettavat tiukempia päästörajoituksia kulkuneuvoille ja työkoneille. Kuluttajat vaativat ajoneuvojen valmistajilta ympäristöystävällisempiä ja vähemmän polttoainetta kuluttavia kulkuneuvoja. Kansainvälisten yhteisöjen, valtioiden ja kuluttajien vaatimusten vuoksi kulkuneuvojen valmistajat pyrkivät soveltamaan vihreämpää ja energiatehokkaampaa teknologiaa ajoneuvoissaan. Yleistyviä valmistajien käyttämiä menetelmiä ovat ajoneuvon voimansiirtojärjestelmän hybridisointi tai sähköistäminen. Hybridiajoneuvon voimansiirtojärjestelmä sisältää yleisesti teknologiaa polttomoottorikäyttöisistä ja sähkökäyttöisistä ajoneuvoista. Hybridiajoneuvot jaetaan kahteen eri luokkaan: sarjahybrideihin tai rinnakkaishybrideihin. (Rilla 2012; Toyota 2011; Cutchet 2013)

2.1 Sarjahybridin voimankäyttöjärjestelmä

Sarjahybridiajoneuvon voimankäyttöjärjestelmä sisältää polttomoottorin, vaihteiston, akun, taajuusmuuttajan ja kaksi sähkökonetta: vaihtosähkömoottorin ja generaattorin. Sarjahybridin voimankäyttöjärjestelmän toimintaa havainnollistetaan kuvassa 2.1.



Kuva 2.1 Sarjahybridin voimansiirtojärjestelmän osat ja energian kierto. Nuolet kuvaavat komponentista toiseen siirtyvää energiaa. Mustat nuolet kuvaavat mekaanisen energian siirtymistä ja valkoiset sähköisen.

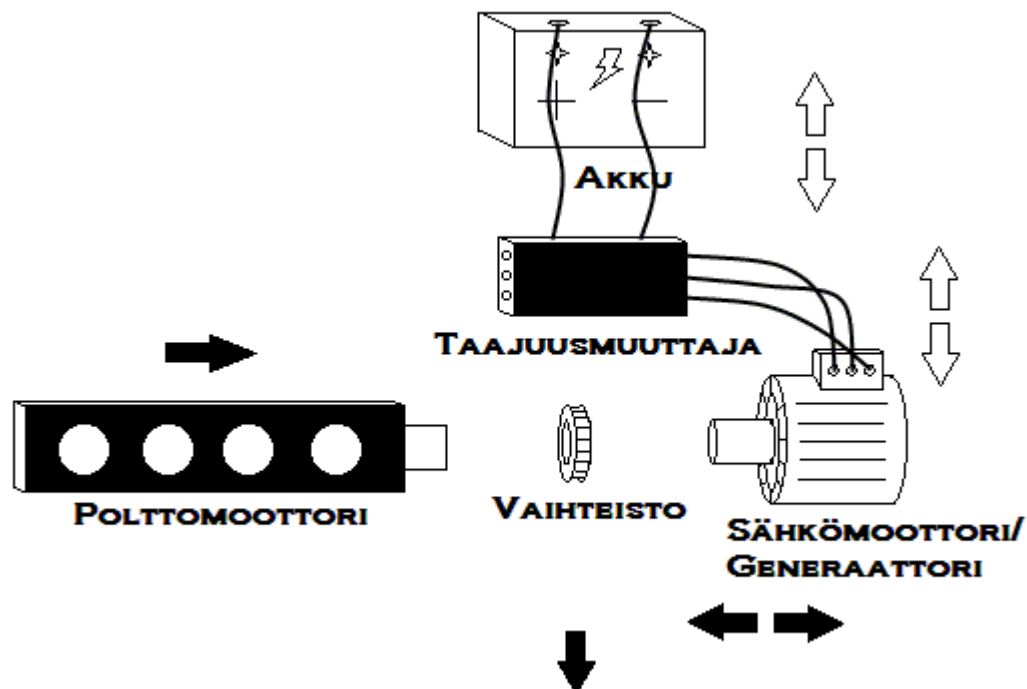
Generaattori ja sitä pyörittävä polttomoottori toimivat ajoneuvon sisäisenä voimalaitoksena. Voimalaitos tuottaa jatkuvasti sähköistä energiaa, jota muokataan taajuusmuuttajalla

ja varastoidaan ajoneuvon akkuun. Voimalaitoksen polttomoottori toimii vakionopeudella ja on mitoitettu siten, että se toimii parhaimmalla hyötysuhteellaan. (Gamburger 2009)

Taajuusmuuttajan tarkoitus on muuntaa generaattorin indusoima vaihtojännite tasajännitteeksi akun latausta varten ja akun tasajännite vaihtojännitteeksi vaihtosähkömoottorin syöttöä varten. Ajettaessa ajoneuvoa vaihtosähkömoottorilla erillistä vaihteistoa ei välttämättä tarvita, koska moottorin pyörimisnopeutta ja vääntöä voidaan säätää portaattomasti taajuusmuuttajalla. Moottorin tuottama vääntömomentti välittyy vaihteiston ja/tai sähkömoottorin akselin kautta pyöriin.

2.2 Rinnakkaishybridin voimankäyttöjärjestelmä

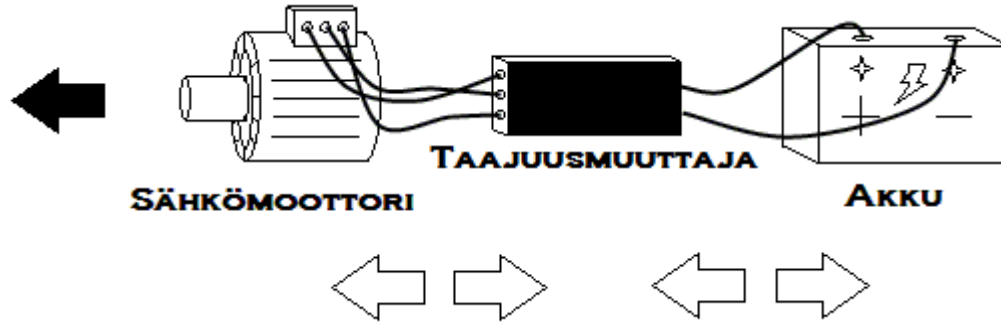
Rinnakkaishybridin voimankäyttöjärjestelmän toiminta on kiteytetty kuvaan 2.2. Kuvan mukaisesti rinnakkaishybridissä polttomoottori ja sähkökone tuottavat yhdessä ajoneuvon käyttövoiman. Sekä polttomoottori että sähkökone ovat kytkettynä ajoneuvon pyöriin vaihteiston välityksellä. Sähkökone on kytketty taajuusmuuttajan välityksellä akkuun ja voi toimia vuorotellen joko moottorina tai generaattorina. Toimiessaan moottorina sähkökone ottaa tarvitsemansa sähköisen energian akusta. Generaattorina sähkökone toimii jarrutettaessa, jolloin akselin mekaaninen energia muunnetaan akun sähköiseksi energiaksi. (Gamburger 2009)



Kuva 2.2 Rinnakkaishybridin voimankäyttöjärjestelmän osat ja energian siirtyminen. Nuolet kuvaavat propulsiojärjestelmän sisäistä energian liikettä.

2.3 Sähköajoneuvon voimankäyttöjärjestelmä

Sähköajoneuvon voimankäyttöjärjestelmä on sähköisiltä osiltaan samanlainen kuin hybridien. Voimankäyttöjärjestelmän toimintaa havainnollistetaan kuvassa 2.3. Järjestelmä ei sisällä polttomoottoria eikä välttämättä vaihteistoakaan, koska moottorin pyörimisnopeuden ja vääntömomentin säätö voidaan toteuttaa täysin sähköisesti taajuusmuuttajan avulla varioimalla koneelle syötettävän jännitteen taajuutta ja amplitudia.



Kuva 2.3 Sähköisen ajoneuvon propulsiojärjestelmän kaaviokuva. Nuolet kuvaavat propulsiojärjestelmässä siirtyvää energiaa.

Vaihtosähkömoottoria ei voida säätää pelkän vaihteiston avulla polttomoottorin tapaan, sillä nimellisarvoilla ajettaessa moottori pyörii vakionopeudella. Vaihteisto mahdollistaa pyörimisnopeuden ja vääntömomentin muutoksen vaihdelaatikon välityssuhteiden mukaisesti. Siksi vaihtosähkömoottorin ja vaihteiston avulla pystytään tuottamaan ainoastaan pieni lukumäärä eri pyörimisnopeuksia. Jotta ajoneuvon nopeutta voitaisiin muuttaa järkevästi, vaihtosähkömoottorin ohjaukseen tarvitaan taajuusmuuttaja. Sen avulla pystytään tuottamaan ajoneuvon vaatimat ajonopeudet koko nopeusalueelle, esim. 0-100 km/h.

Taajuusmuuttajakäytöllä saavutetaan korkea hyötysuhde koko nopeusalueella, koska syötettävän virran taajuutta muutettaessa moottorin nimellinen toimintapiste siirtyy eri pyörimisnopeusalueille. Se mahdollistaa koneen jatkuvan toiminnan optimaalisessa toimintapisteessä.

2.4 Voimankäyttöjärjestelmien vertailu

Sähköisen voimankäytön etuja sarja- ja rinnakkaisybrideihin verrattuna on käyttöjärjestelmän komponenttien pieni lukumäärä, järjestelmän yksinkertaisuus ja toiminta jatkuvasti korkealla hyötysuhteella ilman paikallisia päästöjä. Sähköisen voimankäyttöjärjestelmän keskeiset tekniset ongelmat ovat riittävän suuren energiamäärän varastointi ajoneuvon akkuun ja akun pitkä latautumisaika.

Sähköinen voimankäyttöjärjestelmä voi periaatteessa olla kevyempi kuin hybridijärjestelmä, koska esimerkiksi sarjahybridiin verrattuna järjestelmä ei sisällä polttomoottoria, toista sähkökonetta eikä välttämättä vaihteistoakaan. Käytännössä ajomatka hybridiajoneuvoa vastaavalla akulla jää kuitenkin niin lyhyeksi, että akusta on tehtävä suurempi ja raskaampi, jotta yhden latauksen ajomatka saadaan riittävä. Siksi sähköajoneuvo voi olla hybridiajoneuvoa raskaampi. (Kauppila 2010)

Sarjahybridin voimankäyttöjärjestelmä on monimutkaisempi ja raskaampi kuin rinnakkaishybridin, koska se sisältää kaksi sähkökonetta ja rinnakkaishybridi yhden. Sarjahybridi toimii heikosti tasaisessa ajossa maantie- tai moottoritienopeuksilla polttomoottoriajoneuvoon verrattuna, koska polttomoottorin hyötysuhde paranee tasaisessa ajossa ja polttomoottorikäyttöinen ajoneuvo on sarjahybridiä kevyempi (Manninen 2011). Sarjahybridi soveltuu parhaiten taajama-ajoon, jossa ajoneuvo ajaa epätasaista vauhtia, koska sarjahybridin ajomoottorina käy pelkästään sähkömoottori, joka toimii taajuusmuuttajakäytössä korkealla hyötysuhteella koko nopeusalueella (Gamburger 2009).

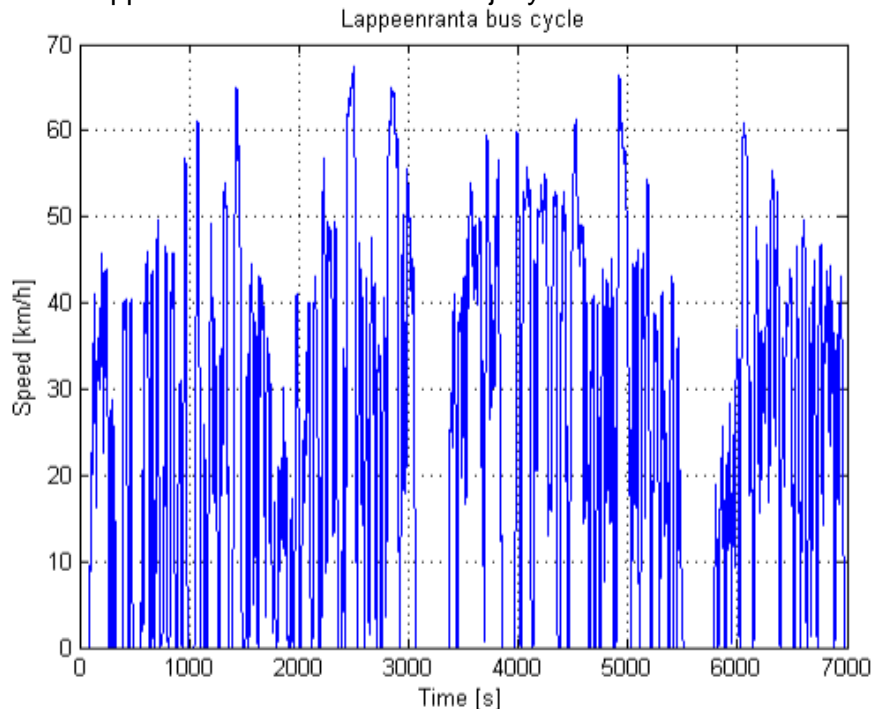
Rinnakkaishybridin voimankäyttöjärjestelmän etu sarjahybridiin verrattuna on järjestelmän monipuolisuus. Rinnakkaishybridin ajovoima tuotetaan yhdessä polttomoottorin ja sähkömoottorin avulla. Moottoreiden voimantuottosuhteet voidaan valita vapaasti siten, että ajoneuvo toimii parhaimmalla mahdollisella tavalla. Siksi rinnakkaishybridin suunnittelijalla on enemmän vapautta ja mahdollisuus tehdä rinnakkaishybridistä monipuolisempi voimankäyttöjärjestelmä. Siksi rinnakkaishybridi voi toimia hyvällä hyötysuhteella taajama-ajossa ja/tai tasaisessa maantieajossa.

Sähköisen voimantuottojärjestelmän soveltuvuutta ajoneuvokäyttöön rajoittavat tekniset ongelmat poistunevat vähitellen tekniikan kehityksen myötä. Japanilainen yritys Sekisui Chemical väittää kehittäneensä pihin pohjautuvan uudensukupolven litiumioniakun. Se kykenee varastoimeen merkittävästi enemmän energiaa massaan ja kokoonsa suhteutettuna kaupallisesti saataviin litiumioniakkuihin verrattuna. Sekisuiin litiumioniakuilla sähköajoneuvon ajomatka yhdellä latauksella vastaa polttomoottoriajoneuvon ajomatkaa täydellä tankillisella (Electric-vehiclenews 2013). Saksalainen sähköalan yritys Ubitricity on kehittänyt älykkään latauskaapelin, jonka avulla akkua voi ladata helposti suoraan julkisesta sähköverkosta esimerkiksi kadun lamppupylvästä (Turtiainen 2014). Lisäksi ABB on kehittänyt sähköbussin pysäkeille asennettavan 15 s akun pikalatausjärjestelmän (Kane 2013). Teknisten innovaatioiden myötä sähköinen voimankäyttöjärjestelmä voi kehittyä teknisiltä ominaisuuksiltaan hybridijärjestelmää kilpailukykyisemmäksi. (Sekisui 2013)

Ajoneuvon toimintaan parhaiten soveltuvan voimankäyttöjärjestelmän valinta on vaativa suunnittelukysymys. Valinta perustuu suunniteltavan ajoneuvon toimintaa kuvaavaan ajo-sykliin, joka määrittää ajon keston ja voimankäyttöjärjestelmältä vaadittavat nopeudet ja väännöt. Ajosykli kertoo lisäksi, kuinka usein mitäkin nopeutta ja vääntöä tarvitaan. Se ratkaisee, mille nopeus- ja vääntöalueelle voimankäyttöjärjestelmän paras toimintapiste tulisi asettaa, jotta ajoneuvon kokonaishyötysuhde olisi mahdollisimman suuri ja kuinka kauan voimankäyttöjärjestelmän tulee pystyä toimimaan. Siksi esimerkiksi sähköinen voimankäyttö voi soveltua parhaiten, jos ajoneuvo on vähän aikaa toiminnassa ja sillä ajetaan lyhyitä matkoja. Sarjahybridi voi soveltua käyttöön, jos ajoneuvolla ajetaan pääasias- sa taajamissa ja ajoneuvon on tarvittaessa kyettävä ajamaan pitkiä matkoja. Toisaalta rin- nakkaisybridijärjestelmä voi soveltua parhaiten ajoneuvoon, kun sillä ajetaan eri ympäris- töissä ja ajoneuvon on kyettävä ajamaan pitkiä matkoja. Edellä mainitut voimankäyttöjär- jestelmien ominaisuudet ja ehdotukset ovat yleistäviä ja tarkoitettu suuntaa antaviksi. To- dellinen hybridijärjestelmä on yksilöllinen ja voi esimerkiksi sisältää ominaisuuksia sekä sarjahybridistä että rinnakkaisybridistä.

3. BUSSIN VAATIMA NOPEUS JA VÄÄNTÖ

Ajoneuvon voimankäyttöjärjestelmän tulee kyetä tuottamaan ajoneuvon huippunopeuden edellyttämä voima ja ajoneuvolta vaadittava kiihtyvyys. Voimankäyttöjärjestelmän mitoitus perustuu kulkuneuvon ajosykliin, josta käy ilmi ajoneuvon nopeus ja vääntömomentti aje- tulla nopeudella. Lappeenrannan bussireitti 1:n ajosykli esitetään kuvassa 3.1.

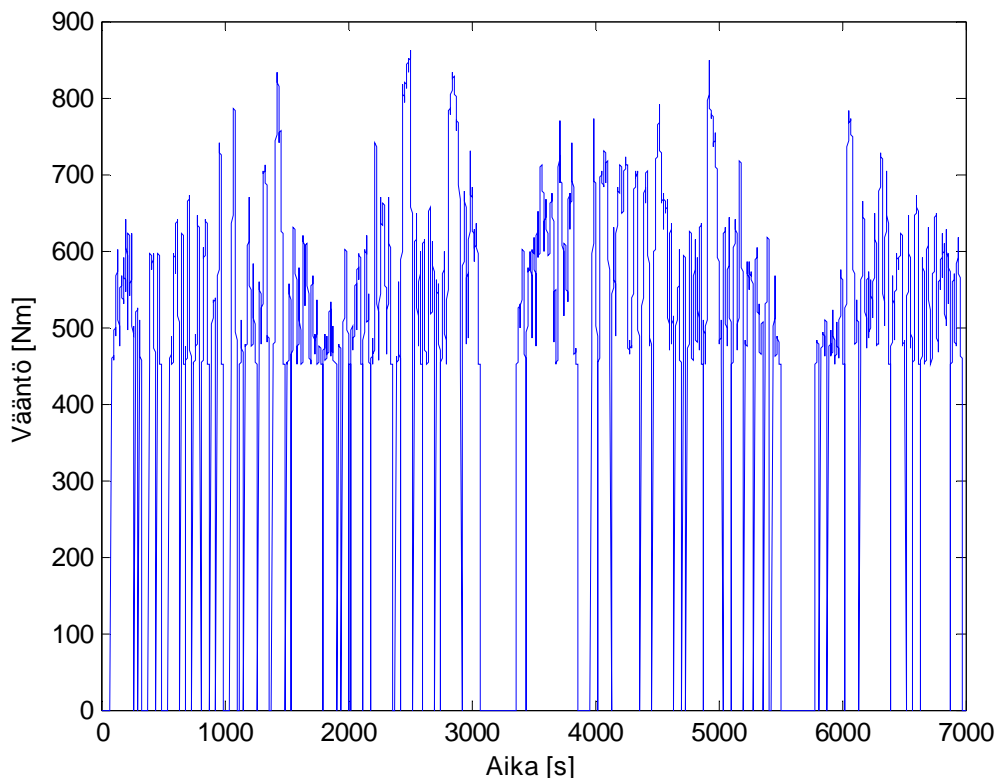


Kuva 3.1 Lappeenrannan bussireitin ajosykli (Immonen et al.). Sykli kuvaa mitattua ajonopeutta yksikössä kilometriä tunnissa bussin kulkiessa kaupunkireitillä eri ajan hetkinä.

Kuvan 3.1 ajosyklin nopeuksien voimankäyttöjärjestelmältä edellyttämä vääntömomentti T voidaan laskea ajoneuvon liikeyhtälön avulla. Ajoneuvon voimankäyttöjärjestelmän pyöriin kohdistaman voiman tulee Newtonin toisen lain mukaisesti olla ajoneuvoa kiihdyttävän voiman ja liikettä vastustavien voimien summan suuruinen. Liikeyhtälö voidaan kirjoittaa ajoneuvon liikkuessa M . Rillan esittämässä muodossa

$$\frac{T}{r_w} = ma + C_{rr}mg + \frac{1}{2}\rho_{\text{air}}v^2SC_v \quad (\text{Rilla}). \quad (3.1)$$

Yhtälössä r_w on pyörien säde, m ajoneuvon massa, a kiihtyvyys, C_{rr} vierimisvastuskerroin, g putoamiskiihtyvyys maan pinnalla, ρ_{air} ilman tiheys, v ajoneuvon nopeus, S ajoneuvon otsan pinta-ala ja C_v väliaineen vastuskerroin. Liikeyhtälön vasemman puoleinen termi vastaa voimankäyttöjärjestelmän tuottamaa voimaa. Sen ensimmäinen termi oikealta puolelta vastaa ajoneuvoa kiihdyttävää voimaa, toinen termi vierimisvastusta ja kolmas ajoneuvon liikkuessaan syrjäyttämän väliaineen vastustusta. Ajonopeuksien edellyttämä vääntömomentti esitetään kuvassa 3.2.



Kuva 3.2 Bussin voimansiirtojärjestelmää kuormittava vääntömomentti. Laskennassa on oletettu, että bussi ei yritä liikkua ollessaan paikallaan. Silloin yhtälö (3.1) ei päde, vaan voimankäyttöjärjestelmää kuormittava vääntö on nolla. Maaston korkeuden vaihtelua ei ole huomioitu. Vääntömomentti on laskettu bussille, jonka kokonaismassa on 16 tonnia, pyörien säde 47,8 cm ja otsapinta-ala on 8 m². Vierimisvastuskertoimen oletetaan olevan 0,006 ja ilmanvastuskertoimen 0,5.

Vertailemalla kuvia 3.1 ja 3.2 huomataan, että suurilla nopeuksilla voimankäyttöjärjestelmää kuormittava vääntömomentti on suuri. Yhdistämällä mekaanisen tehon yhtälö

$$P = \Omega T \quad (3.2)$$

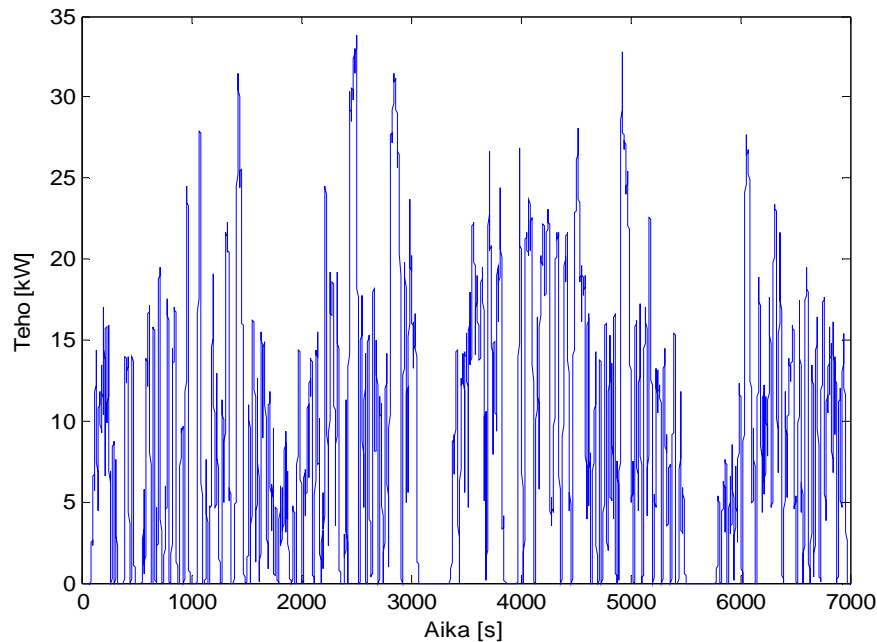
ja kulmanopeuden yhteys ratanopeuteen

$$v = \Omega r_w \quad (3.3)$$

voidaan lausua ajoneuvon vaatima teho ajoneuvon nopeuden ja kuormittavan vääntömomentin avulla yhtälöllä

$$P = \frac{1}{r_w} v T \text{ (Young ja Freedman).} \quad (3.4)$$

Yhtälön (3.4) mukaisesti voimankäyttöjärjestelmältä vaadittava teho on suoraan verrannollinen nopeuden ja tehon tuloon. Sillä laskettava voimankäyttöjärjestelmää kuormittava teho esitetään kuvassa 3.3. Yhtälöiden 3.1 ja 3.4 perusteella voimankäyttöjärjestelmää kuormittava teho on suurimmillaan vastusvoimien ollessa huipussaan ts. ajettaessa ajoneuvon huippunopeudella. Siksi voimankäyttöjärjestelmän tuottaman huipputehon täytyy olla vähintään yhtä suuri kuin ajoneuvon huippunopeutta vastaavan tehon, jotta huippunopeus voidaan saavuttaa.



Kuva 3.3 Bussin voimansiirtojärjestelmää kuormittava teho. Teho on laskettu yhtälöllä (3.2) bussille, jonka kokonaismassa on 16 tonnia, pyörien säde 47,8 cm ja otsapinta-ala on 8 m². Vierimisvastuskertoimen oletetaan olevan 0,006 ja ilmanvastuskertoimen 0,5.

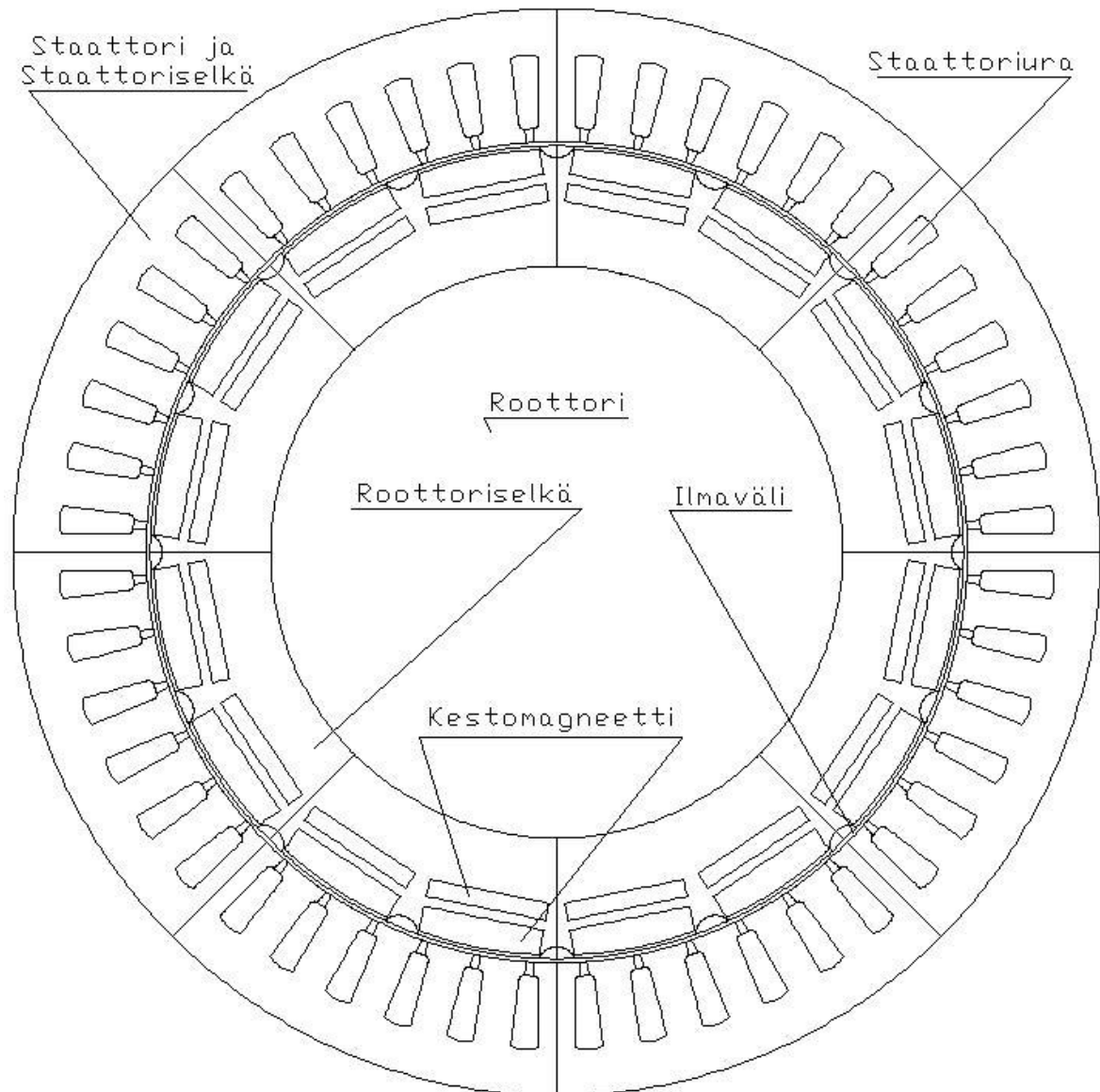
Voimankäyttöjärjestelmän on tuotettava kuvien 3.1, 3.2 ja 3.3 ajosyklin nopeus, vääntö ja teho, jotta bussin tavoitteellinen toiminta on mahdollista saavuttaa. Siksi voiman tuottava ajomoottori tulee suunnitella siten, että se pystyy tuottamaan ajosyklin mukaisen väännön koko nopeusalueella. Moottorin on erityisesti kyettävä tuottamaan riittävä teho ajoneuvon huippunopeuden saavuttamiseksi ja riittävän suuri vääntömomentti, jotta ajoneuvo voidaan kiihdyttää tavoitenoiteen riittävän nopeasti.

4. KESTOMAGNEETTITAHTIKONE

Kestomagneettitahtikone valitaan bussin ajomoottoriksi, koska se soveltuu erinomaisesti ajoneuvokäyttöön. Sillä on kokoonsa nähden suuri vääntömomentin tuottokyky. Se on rakenteeltaan yksinkertainen ja kestävä, koska siinä on vähän kuluvia osia. Tasavirtakone ei sovellu ajoneuvokäyttöön yhtä hyvin, sillä sen kuluvat hiiliharjat vaativat jatkuvaa huoltoa. Toisaalta epätahtimoottori on myös rakenteeltaan yksinkertainen ja kestävä, mutta moottori vaatii korkean pyörimisnopeuden voidakseen tuottaa suuren vääntömomentin. Siksi epätahtimoottori edellyttää mekaanisen vaihteiston käyttöä ajoneuvoissa, jotta riittävän suuri vääntö voidaan tuottaa pienellä nopeudella. Kestomagneettitahtikone puolestaan kykenee tuottamaan suuren vääntömomentin matalalla pyörimisnopeudella. Siksi vaihteistoa ei välttämättä tarvita. Sillä saavutetaan erittäin korkea hyötysuhde, koska roottorin häviöt ovat pienet. Koneesta voidaan tehdä pieni ja kevyt, mikä on tärkeää ajoneuvokäytössä, sillä ajoneuvossa on rajattu määrä tilaa ja ylimääräisen kuorman liikuttaminen vaatii turhaa energiaa. (Rilla 2012)

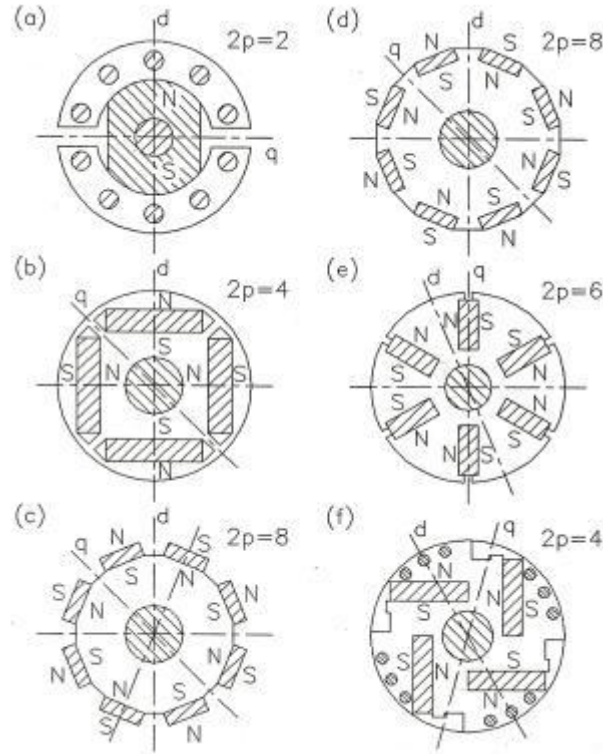
4.1 Kestomagneettikoneen rakenne ja toiminta

Kestomagneettitahtikoneen rakenne esitetään kuvassa 4.1. Kone koostuu paikallaan olevasta staattorista ja pyörivästä roottorista, joiden välillä on muutaman millimetrin pituinen ilmaväli. Roottori magnetoidaan siihen upotettujen tai sen pinnalle liitettyjen magneettien avulla. Staattorin uriin asetetaan yleensä kolmivaiheinen käämitys. Käämitykseen johdtaessa kolmivaiheista virtaa syntyy koneen ilmaväliin pyörivä magneettikenttä. Roottorin magneettien luoman kentän vuoksi roottori kääntyy ilmavälin pyörivän magneettikentän mukana ja pyörii samalla nopeudella suoraan verrannollisena staattoria syöttävän virran taajuuteen. Tahtikoneen nimi juontuu samasta ilmavälin magneettikentän ja roottorin pyörimisnopeudesta.



Kuva 4.1 Kestomagneettitahtikoneen poikkileikkauskuva. Kuvan kone esittää yhtä ERA-sähköurheiluauton ajomoottoria. Kone on piirretty Flux2D -ohjelmalla ajoneuvosta julkisesti saatavien teknisten tietojen pohjalta.

Modernit kestopagneettitahtikoneet voidaan jakaa kahteen luokkaan roottorirakenteen perusteella. Jos kestopagneetit liitetään roottorin pinnalle, kutsutaan konetta pintamagneettikoneeksi. Magneetit voidaan myös upottaa roottoriin täysin tai osittain. Upotetuilla magneeteilla varustettuun kestopagneettitahtikoneeseen viitataan englanninkielisellä lyhenteellä IPMSM (Internal Permanent Magnet Synchronous Machine). Tässä kirjoittelmasa upotetuilla magneeteilla varustettuun kestopagneettitahtikoneeseen (kuva 4.1) viitataan nimellä uppomagneettitahtikone. Kestomagneettitahtikoneen roottorirakenteita esitetään seuraavassa Chudivanin tekemässä kuvassa.



Kuva 4.2 Kestomagneettitahtikoneen roottorirakenteita (Chudivani). Roottorirakenne (a) esittää klassista häkkikäämyksen sisältävää ja oikosulkukoneeseen perustuvaa roottoria. Rakenteen (c) kuvaa pintamagneettikoneen roottoria ja rakenteet (b), (d), (e) ja (f) uppomagneettitahtikoneen roottorirakenteita.

Kestomagneettitahtikoneen vääntö T voidaan esittää roottoriin kiinnitetyn kaksiakselimallin mukaisten d- ja q-akselien induktanssien L_d ja L_q avulla Rillan esittämällä yhtälöllä

$$T = 3p \frac{U_s E_{PM}}{\omega_s^2 L_d} \sin \delta + 3p U_s^2 \frac{L_d - L_q}{2\omega_s^2 L_d L_q} \sin 2\delta \quad (\text{Rilla}). \quad (4.1)$$

Vääntöyhtälön termi p tarkoittaa napaparien lukumäärää, U_s vaihejännitettä, E_{PM} kestopmagneettien tuottamaa sähkömotorista voimaa, ω_s syöttöjännitteen kulmataajuutta ja δ kuormituskulmaa. Yhtälön ensimmäinen termi

$$T_{lor} = 3p \frac{U_s E_{PM}}{\omega_s^2 L_d} \sin \delta \quad (4.2)$$

kuvaa Lorentzin voiman tuottamaa vääntöä. Toinen

$$T_{rel} = 3p U_s^2 \frac{L_d - L_q}{2\omega_s^2 L_d L_q} \sin 2\delta = 3p U_s^2 \frac{1 - \frac{L_q}{L_d}}{2\omega_s^2 L_q} \sin 2\delta \quad (4.3)$$

kuvaa magneettisesta epäsymmetriasta aiheutuvaa reluktanssivääntömomenttia. Yhtälön 4.3 perusteella reluktanssivääntö on suurimmillaan, kun q-akselin induktanssi on mahdollisimman pieni ja induktanssisuhde

$$\varepsilon = \frac{L_q}{L_d} \quad (4.4)$$

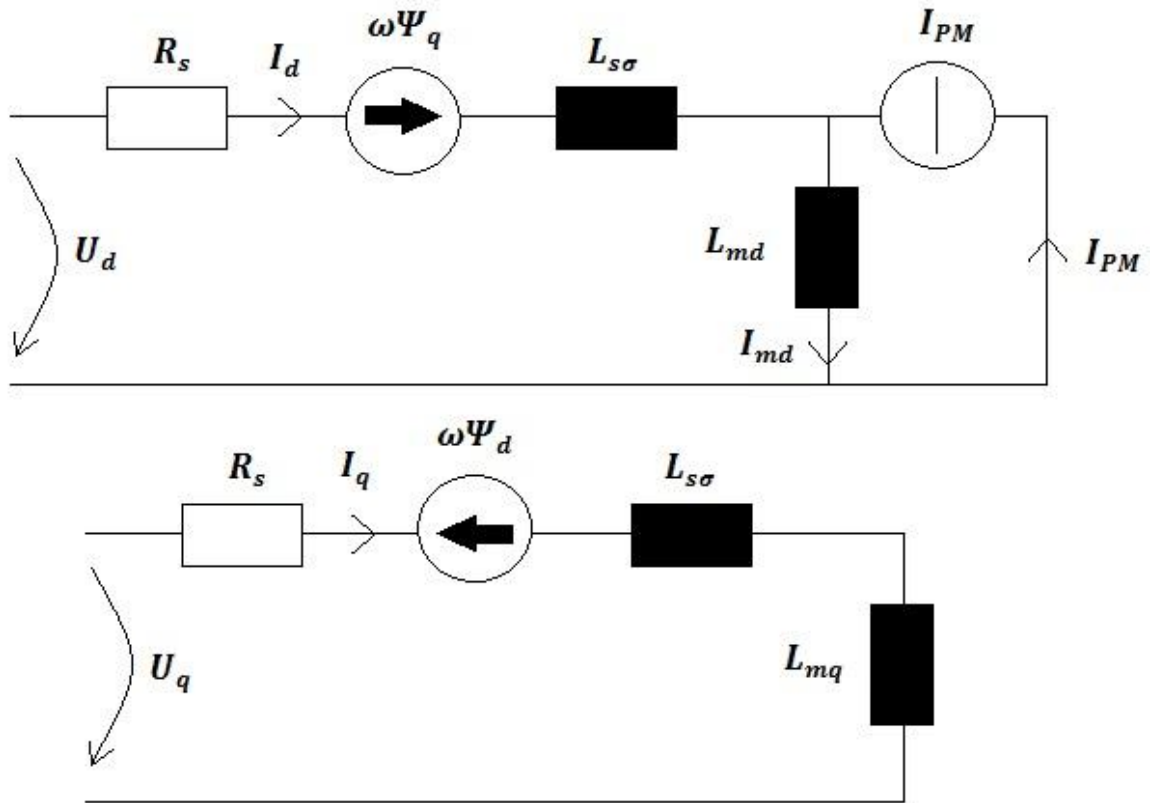
on mahdollisimman pieni. Induktanssisuhteen minimoimiseksi ja reluktanssiväännön maksimoimiseksi d-akselin induktanssin tulisi olla mahdollisimman suuri ja q-akselin induktanssin mahdollisimman pieni.

Kestomagneettitahtikone ei tuota reluktanssivääntömomenttia, kun d – ja q-akselin induktanssit ovat yhtä suuret. Pintamagneetikoneen (kuva 4.2 (c)) d- ja q –akselien induktanssit ovat likimain yhtä suuret, koska kestomagneettien reluktanssi on likimain yhtä suuri kuin ilman. Siksi pintamagneetikone ei yleensä tuota reluktanssivääntöä. (Pyrhönen)

Uppomagneettitahtikoneen reluktanssiväännön tuotantokykyä tarkastellessa roottorin rakenne on keskeinen, koska d- ja q-akselien välinen magneettinen epäsymmetria muuttaa induktanssisuhdetta arvosta yksi. Reluktanssivääntöavusteisen uppomagneettitahtikoneen väännön maksimoimiseksi koneen roottorirakenne, d- ja q-akselien induktanssit ja niiden suhde tulee optimoida. Induktanssisuunnittelun tueksi kehitetään matemaattinen malli, jota voidaan hyödyntää optimoinnissa.

5. KESTOMAGNEETTITAHTIKONEEN MATEMAATTINEN MALLINNUS

Luodaan analyyttinen työkalu, jolla voidaan varioida moottorin induktansseja ja tutkia induktanssien vaikutusta kestomagneettitahtimoottorin vääntömomentin tuotantokykyyn moottorin koko nopeusalueella. Työkalu pohjautuu kappaleessa esitettävään teoriaan ja sen pohjalta luotavaan vektoripiirokseen. Mallinnuksen lähtökohta on kuvassa 5.1 esitettävä kestomagneettitahtikoneen kaksiakselikytkentä.



Kuva 5.1 Kestomagneettitahtikoneen kaksiakselimallin mukainen sijaiskytkentä. Jännitevektorit U_d ja U_q kuvaavat d- ja q-akselien jännitteitä. Vastaavasti I_d ja I_q kuvaavat d- ja q-akselien virtoja, L_{md} ja L_{mq} akselien magnetoivia induktansseja ja Ψ_d ja Ψ_q akselien käämivoita. Kytkennässä R_s kuvaa staattorin vaiheresistanssia ja $L_{s\sigma}$ staattorin hajainduktanssia. Kestomagneettien synnyttämä virtuaalinen virta I_{PM} summautuu d-akselin virran kanssa magnetointivirraksi I_{md} , joka synnyttää ilmvälivuon.

Akselien suuntaiset induktanssit L_d ja L_q saadaan summaamalla akselien magnetoivat induktanssit staattorin hajainduktanssin kanssa

$$L_d = L_{md} + L_{s\sigma} \quad (5.1)$$

$$L_q = L_{mq} + L_{s\sigma} \text{ (Pyrhönen et al.)} \quad (5.2)$$

Staattorin käämivuon d- ja q-akselien suuntaiset vuokomponentit voidaan Pyrhösen mukaan lausua akselien induktanssien ja akselin suuntaisten virtakomponenttien avulla yhtälöillä

$$\Psi_d = \Psi_{PM} + L_d I_d \quad (5.3)$$

$$\Psi_q = L_q I_q \text{ (Pyrhönen)} \quad (5.4)$$

Kestomagneettitahtikoneen staattorin käämivuo saadaan vektorisummana d-akselin käämivuosta Ψ_d ja q-akselin käämivuosta Ψ_q

$$\Psi_s = \sqrt{\Psi_d^2 + \Psi_q^2}. \quad (5.5)$$

Kestomagneettitahtikoneen vääntömomentti voidaan ilmaista Pyrhösen mukaan staattorin käämivuon ja virran huippuarvoihin liitettyjen vektoreiden $\overline{\Psi_s}$ ja $\overline{I_s}$ avulla yhtälöllä

$$T = \frac{3}{2}p \left| \overline{\Psi_s} \times \overline{I_s} \right| = \frac{3}{2}p \widehat{\Psi_s} \widehat{I_s} \sin \beta \text{ (Pyrhönen)}. \quad (5.6)$$

Vääntömomentti voidaan ilmaista tehollisarvoja käyttäen suhteutettuna vaiheiden ja napaparien lukumäärään yhtälöllä

$$T_{pu} = \Psi_s I_s \sin \beta. \quad (5.7)$$

Yhtälöissä (5.6) ja (5.7) β kuvaa staattorin käämivuo- ja virtavektoreiden välistä kulmaa.

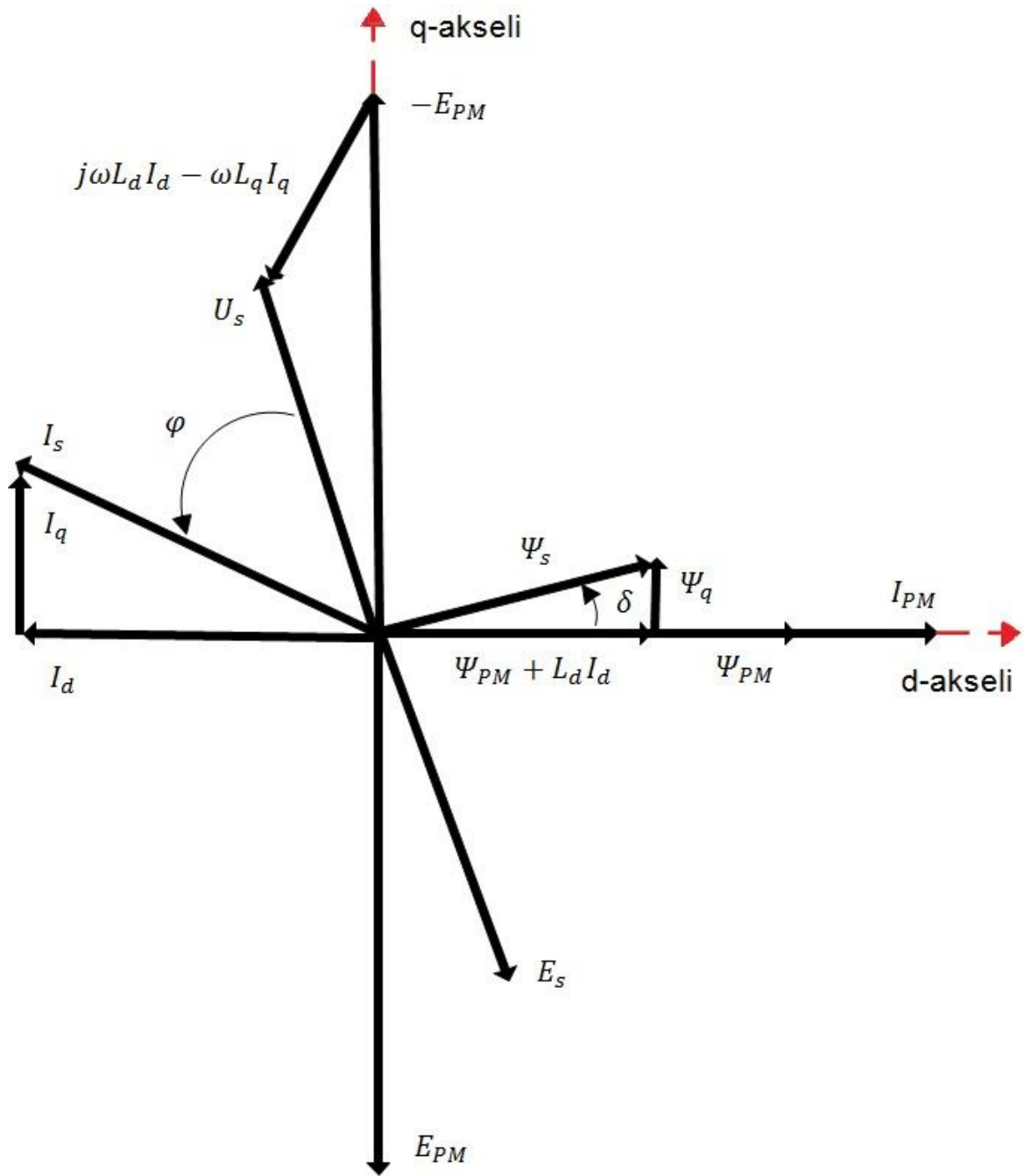
Kuvan 5.1 kytkentään perustuen voidaan piirtää koneen toimintaa kuvaava vektoripiirros soveltamalla yhtälöitä (5.1 – 5.5) ja sähkömagneettista teoriaa. Staattorin jännite U_s saadaan d- ja q-akselikomponenttiansa vektorisummana. Jos jätetään virran aiheuttama jännitehäviö huomioimatta, staattorin jännitteestä integroituu staattorin käämivuo Ψ_s . Kun staattorin käämivuosta vähennetään ankkurireaktio, saadaan kestomagneettien tuottama käämivuo Ψ_{PM} . Käämivoit indusoivat niitä vastaavat sähkömotoriset voimat E_s ja E_{PM} . Käämivuon ja indusoituvan sähkömotorisen voiman välillä vallitsee riippuvuus

$$E = \omega \Psi. \quad (5.8)$$

Kun staattorivirran aiheuttama jännitehäviö jätetään huomioimatta, staattoriin induoituva sähkömotorinen voima on staattorin jännitteen suuruinen. Staattorin jännite voidaan kirjoittaa yhtälöiden (5.3 – 5.5) ja (5.8) avulla muodossa

$$U_s \approx E_s = \omega_s \Psi_s = \omega_s \sqrt{\Psi_d^2 + \Psi_q^2} = \omega_s \sqrt{(\Psi_{PM} + L_d I_d)^2 + (L_q I_q)^2}. \quad (5.9)$$

Soveltamalla edellä kuvattua teoriaa voidaan piirtää kuvan 5.2 vektoripiirros.

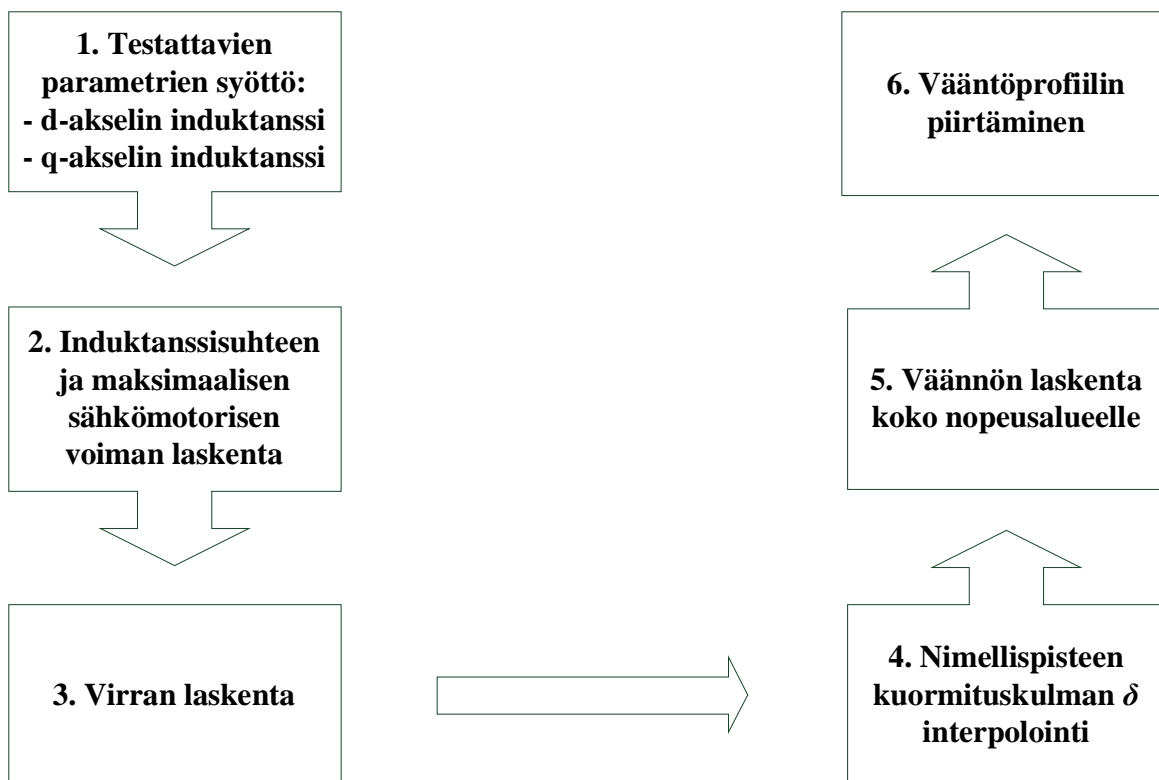


Kuva 5.2 Kestomagneettitahtikoneen vektoripiirros toiminnasta kentänheikennysalueella. Kulma δ on koneen kuormituskulma ja φ tehokulma. Kuvan (5.1) induktanssit on yhdistetty yhtälöillä (5.1) ja (5.2) d- ja q-akselien induktansseiksi.

Kestomagneettitahtikoneen matemaattinen malli toteutetaan The MathWorks, Inc. yrityksen MATLAB -ohjelmistolla soveltaen edellä kuvattua teoriaa ja kuvan 5.2 vektoripiirrosta. MATLAB -ohjelmistolla luodaan ohjelma, joka mallintaa induktanssien vaikutusta moottorin tuottamaan vääntöön. Tuloksena saadaan koneen vääntöprofiili. Vääntöprofiili-ohjelman rakennetta kuvataan kappaleessa 5.1.

5.1 Vääntöprofiiliohjelman rakenne

Vääntöprofiiliohjelman lohkokaavio esitetään kuvassa 5.3. Ohjelmalla varioidaan d- ja q- akselien induktanssien arvoja ja tarkastellaan niiden vaikutusta moottorin vääntömomentin tuottokykyyn. Ohjelman toteutuksessa käytetään kuvan 5.2 vektoripiirroksesta johdettavia yhtälöitä ja sovelletaan J. Tapian esittämiä yhtälöitä kestopagneettitahtikoneista. Laskennassa käytetään staattorin nimelliseen jännitteeseen, virtaan ja taajuuteen sidottuja pu (per unit) arvoja.



Kuva 5.3 Vääntömomentin profiilointiohjelman lohkokaavio. Lohkokaaviossa esitetään ohjelman toteutus vaiheittain.

Vääntöprofiiliohjelman rakenne noudattaa kuvan 5.3 lohkokaaviota. Ohjelman suoritus etenee järjestyksessä vaiheesta 1 vaiheeseen 6. Vaiheessa 1 ohjelmaan syötetään d- ja q- akselien induktanssit ja kestopagneettien indusoima sähkömotorinen voima. Vaiheiden 2-5 toteutus esitetään järjestyksessä kappaleissa 5.1.1 - 5.1.4. Vaiheessa 6 piirrettävä vääntöprofiili esitetään kappaleessa 6.

5.1.1 Induktanssisuhde ja maksimaalinen sähkömotorinen voima

Vääntömomentin profiilointiohjelman alustuksen yhteydessä syötetyistä d- ja q- akselien induktansseista lasketaan induktanssisuhde yhtälöllä (4.4). Kestomagneettien tuottama virtuaalinen magnetointivirta I_{PM} saadaan Tapian esittämällä yhtälöllä

$$I_{PM} = \frac{E_{PM}}{X_d} \quad (5.10)$$

kestomagneettien nimellisnopeudella indusoiman jännitteen E_{PM} ja d-akselin nimellisen reaktanssin X_d avulla (Tapia). Pu -arvoilla laskettaessa d- ja q-akselien nimelliset reaktanssit ovat yhtä suuret kuin vastaavat induktanssit. Indusoituva maksimijännite E_{PMmax} saadaan yhtälöstä

$$E_{PMmax} = n_{max} E_{PM}, \quad (5.11)$$

jossa n_{max} on moottorin suurin pyörimisnopeus (Tapia). Moottorin maksiminopeus on suuruusluokaltaan korkeintaan kolminkertainen nimellisnopeuteen verrattuna rinnakkaishybridiajoneuvoilla (Kamiev et al.).

5.1.2 Virran laskenta

Kuvan 5.2 vektoridiagrammin perusteella staattorin jännite saadaan kestomagneettien indusoiman sähkömotorisen voiman ja ankkurireaktion vektorisummana. Staattorin jännite on kulman δ verran edellä kestomagneettien indusoimaa sähkömotorista voimaa. Sähkömotorisen voiman, ankkurireaktion ja staattorijännitteen muodostamasta kolmiosta saadaan jänniteyhtälöiksi d- ja q-suunnissa

$$E_{PM} + \omega_s L_d I_d = U_s \cos \delta \quad (5.12)$$

$$\omega_s L_q I_q = U_s \sin \delta. \quad (5.13)$$

Yhtälöistä (5.12) ja (5.13) saadaan d- ja q-akselien virroiksi

$$I_d = \frac{U_s \cos \delta - E_{PM}}{\omega_s L_d} \quad (5.14)$$

$$I_q = \frac{U_s \sin \delta}{\omega_s L_q}. \quad (5.15)$$

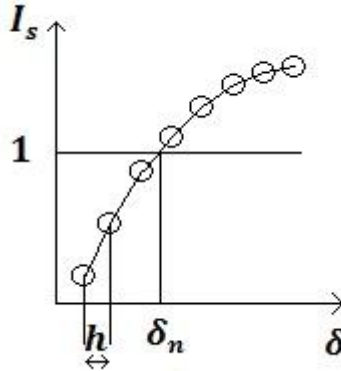
Staattorin virta saadaan d- ja q-akselien virroista yhtälöllä

$$I_s = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}. \quad (5.16)$$

5.1.3 Nimellispisteen kuormituskulman interpolointi

Nimellispisteen kuormituskulma interpoloidaan yhtälön (5.16) staattorivirrasta. Interpolointia havainnollistetaan kuvassa 5.4. Lasketaan staattorivirta kuormituskulman arvoilla välil-

tä 0 ja $\pi/2$ kasvattamalla kuormituskulmaa vakioaskelin. Etsitään datajoukosta lineaarisella interpoloinnilla nimellistä staattorivirtaa (1 pu) lähin virran arvo ja sitä vastaava kuormituskulma.



Kuva 5.4 Nimellisen kuormituskulman interpolointi. Kuvassa δ_n on nimellinen kuormituskulma ja h vakioaskeleen pituus. Datapisteet on yhdistetty toisiinsa suorilla.

Lineaarisella interpoloinnilla kuormituskulma ratkaistaan kuvan 5.4 mukaisesti yhdistämällä nimellistä kuormitusta edeltävä (δ_-, I_{s-}) ja sen jälkeinen piste (δ_+, I_{s+}) janalla. Nimellinen kuormituspiste voidaan ratkaista janan suuntaisen suoran yhtälöstä

$$\delta_n = \delta_- + \frac{1 - I_{s-}}{I_{s+} - I_{s-}} (\delta_+ - \delta_-). \quad (5.17)$$

5.1.4 Vääntömomentin laskenta

Koneen nimellisvääntö saadaan J. Tapian yhtälöstä

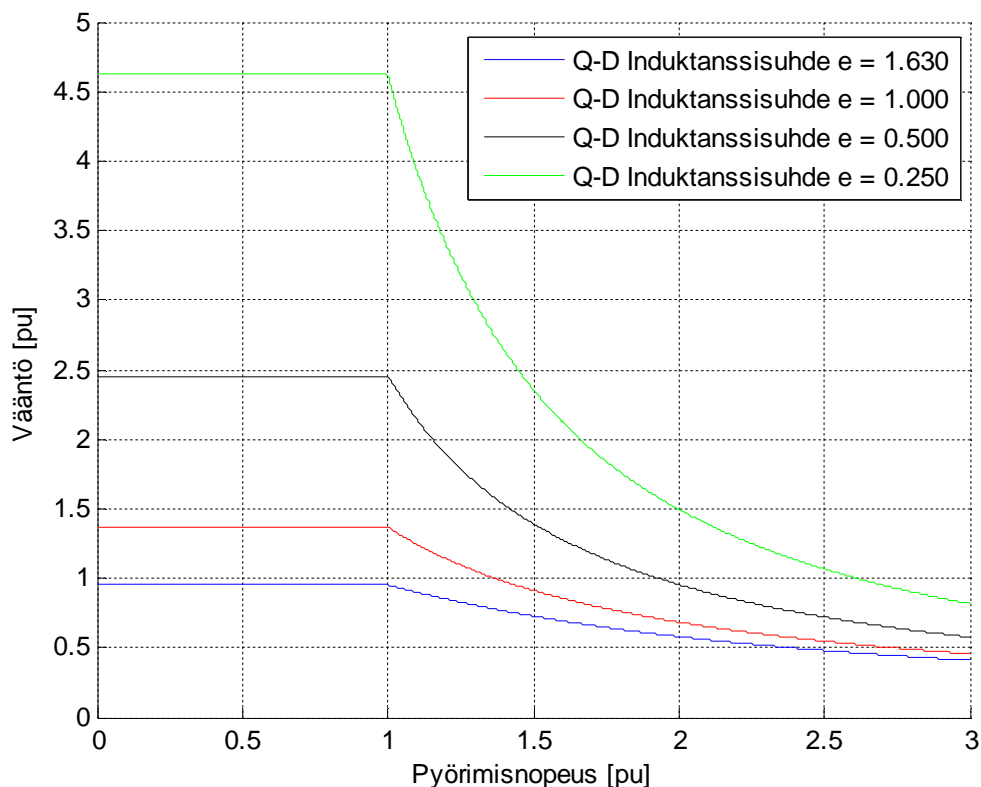
$$T = \frac{P}{n} = \frac{U_s I_{PM}}{n} \sin \delta + \frac{n_{\max}}{n^2} \frac{U_s^2}{2E_{PM\max}} I_{PM} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \sin 2\delta \quad (\text{Tapia}). \quad (5.18)$$

asettamalla jännitteeksi ja nopeudeksi yksi. Suurella nopeudella siirrytään kentänheikennysalueelle. Kentänheikennysalueella koneen nopeus vaihtelee nimellisnopeuden ja huippunopeuden välillä. Silloin vaihejännite on maksimiarvossaan 1 pu. Kentänheikennysalueella vääntömomentti voidaan laskea yksinkertaistetussa muodossa yhtälöllä

$$T = \frac{I_{PM}}{n} \sin \delta + \frac{n_{\max}}{n^2} \frac{I_{PM}}{2E_{PM\max}} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \sin 2\delta \quad (\text{Tapia}). \quad (5.19)$$

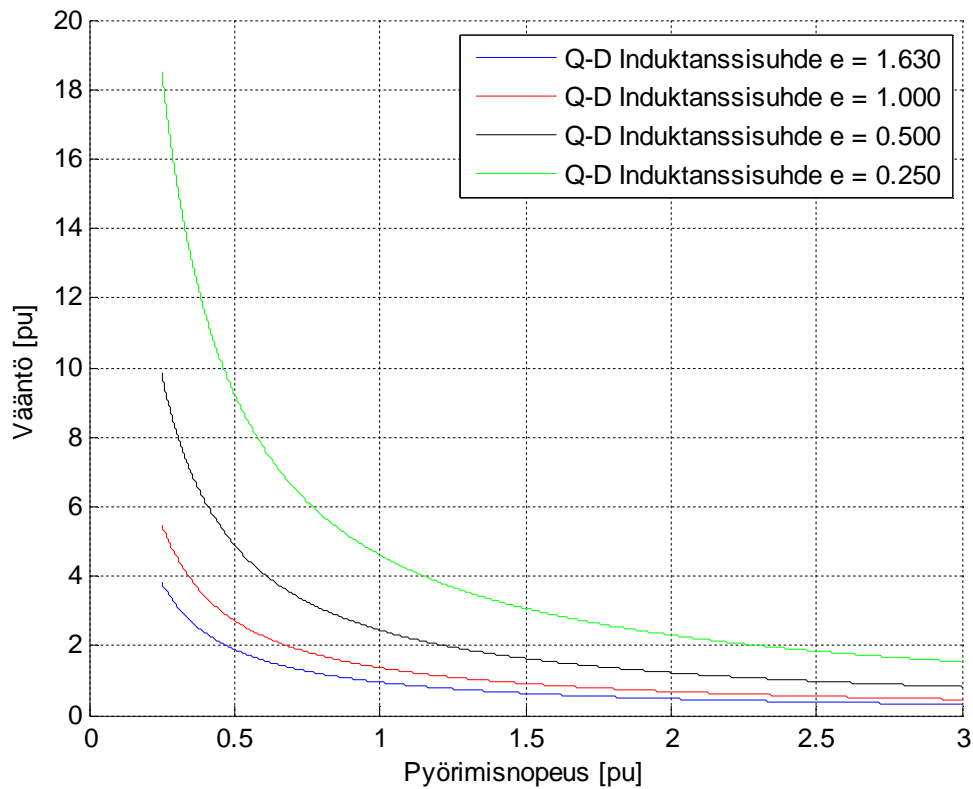
6. VÄÄNTÖPROFILI

Vääntöprofiiliohjelmalla voidaan tarkastella induktanssiarvojen ja induktanssisuhteen vaikutusta koneen vääntömomentin tuotantokykyyn. Koneen tuottama vääntömomentti nimelliskuormituksella esitetään kuvassa 6.1. Se saadaan yhtälöistä (5.18) ja (5.19) varioimalla pyörimisnopeutta.



Kuva 6.1 Vääntömomentti nimelliskuormituksella koko nopeusalueella. Kuvassa eriväriset käyrät kuvaavat eri induktanssisuhteilla laskettuja vääntömomenttikäyriä. Laskennassa on oletettu, että induktanssisuhteita muutettaessa d-akselin suuntainen induktanssi pysyy vakiona ja q-akselin suuntainen induktanssi muuttuu. Vääntökäyrät on laskettu sinistä käyrää vastaavan koneen nimellisvirralla. Laskennassa d-akselin induktanssin arvo on 0,46 pu. Kestomagneettien tuottama nimellinen sähkömotorinen voima on 0,93 pu.

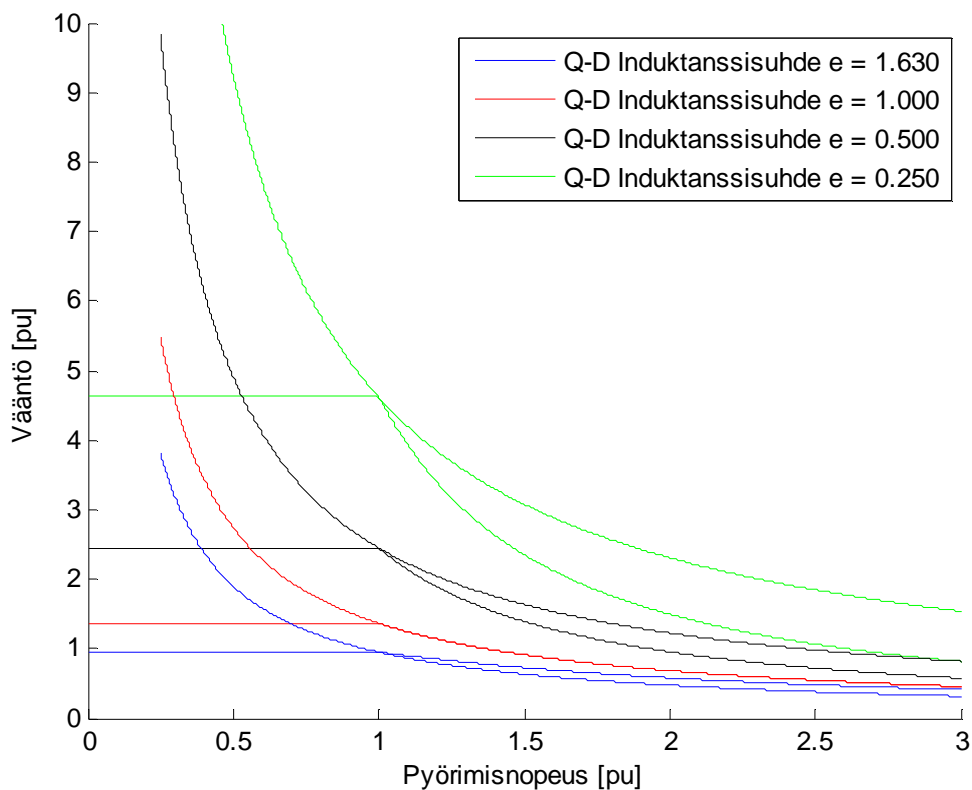
Kuvassa 6.1 koneen tuottamaa vääntömomenttia tarkastellaan, kun nopeutta kasvatetaan heikentämällä magneettikenttää. Kuvassa 6.2 esitetään moottorin tuottama vääntö vakio- teholla ja nimellisellä kuormituksella. Se kertoo moottorin vääntömomentin tuotantokyvyn, kun moottoria ajetaan taajuusmuuttajalla nimellispistettä siirtämällä muuttamalla syöttöjännitteen taajuutta.



Kuva 6.2 Vääntömomentti vakioteholla ja nimelliskuormalla. Kuvassa eriväriset käyrät kuvaavat eri induktanssisuhteilla laskettuja vääntömomenttikäyriä. Laskenta on toteutettu samoin oletuksien ja arvoin kuin kuvan 6.1 vääntömomenttikäyrien laskenta.

Kuvissa 6.1 ja 6.2 induktanssisuhteita muutetaan varioimalla q-akselin induktanssia. Kuvat indikoivat, että pienellä induktanssisuhteella ts. pienellä q-akselin induktanssilla voidaan tuottaa suuri kokonaisvääntö. Se johtuu yhtälön (4.3) mukaisesta reluktanssivääntömomentin kasvusta.

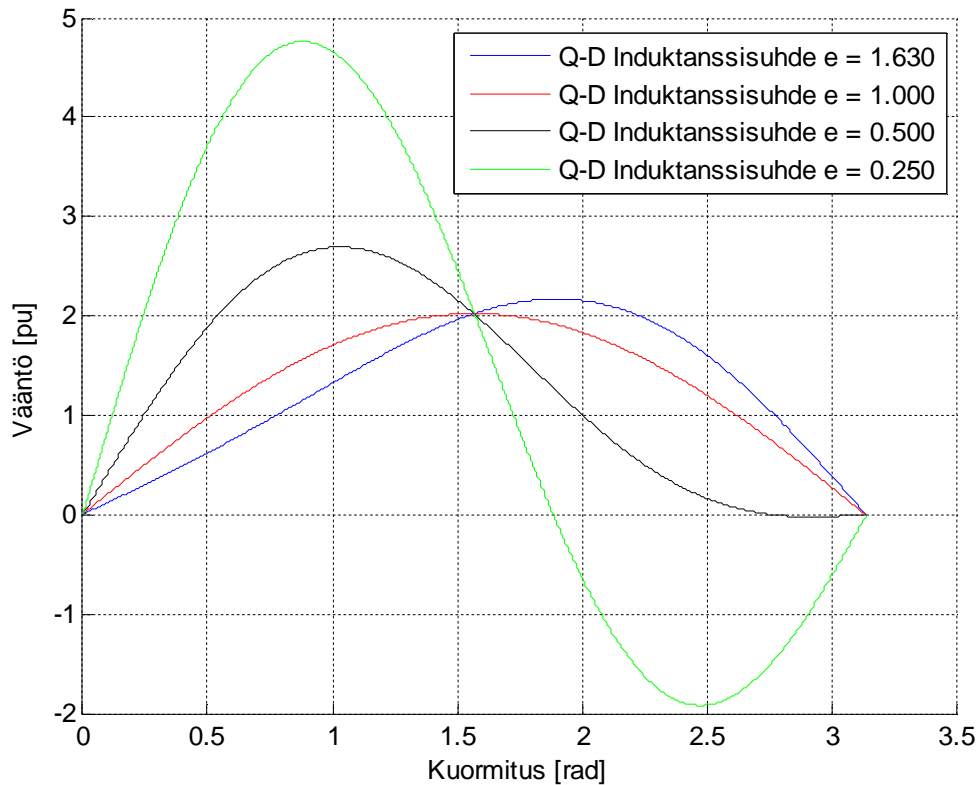
Yhdistämällä kuvien 6.1 ja 6.2 käyrät kuvaan 6.3 voidaan verrata koneen tuottamaa vääntöä, kun koneen nopeutta kasvatetaan heikentämällä magneettikenttää ja konetta ajetaan taajuusmuuttajalla vakioteholla nimelliskuormalla kasvattamalla syöttötaajuutta.



Kuva 6.3 Vääntömomentti koko nopeusalueella ja vääntömomentti vakioteholla nimelliskuormalla. Kuvassa eriväriset käyrät kuvaavat eri induktanssisuhteilla laskettuja vääntömomenttikäyriä. Laskenta on toteutettu samoin oletuksin ja arvoin kuin kuvien 6.1 ja 6.2 vääntömomenttikäyrien laskenta.

Kuvasta 6.3 huomataan, että induktanssisuhteella yksi kentänheikennyskäyrä ja vakiotehokäyrä kulkevat toistensa päällä. Yhtä suuremmalla induktanssisuhteella vääntömomentti on suurempi kentänheikennyksessä kuin ajettaessa konetta taajuusmuuttajalla vakioteholla nimelliskuormalla. Vastaavasti yhtä pienemmällä induktanssisuhteen arvoilla vääntömomentti on pienempi kentänheikennyksessä kuin ajettaessa konetta vakioteholla nimelliskuormalla.

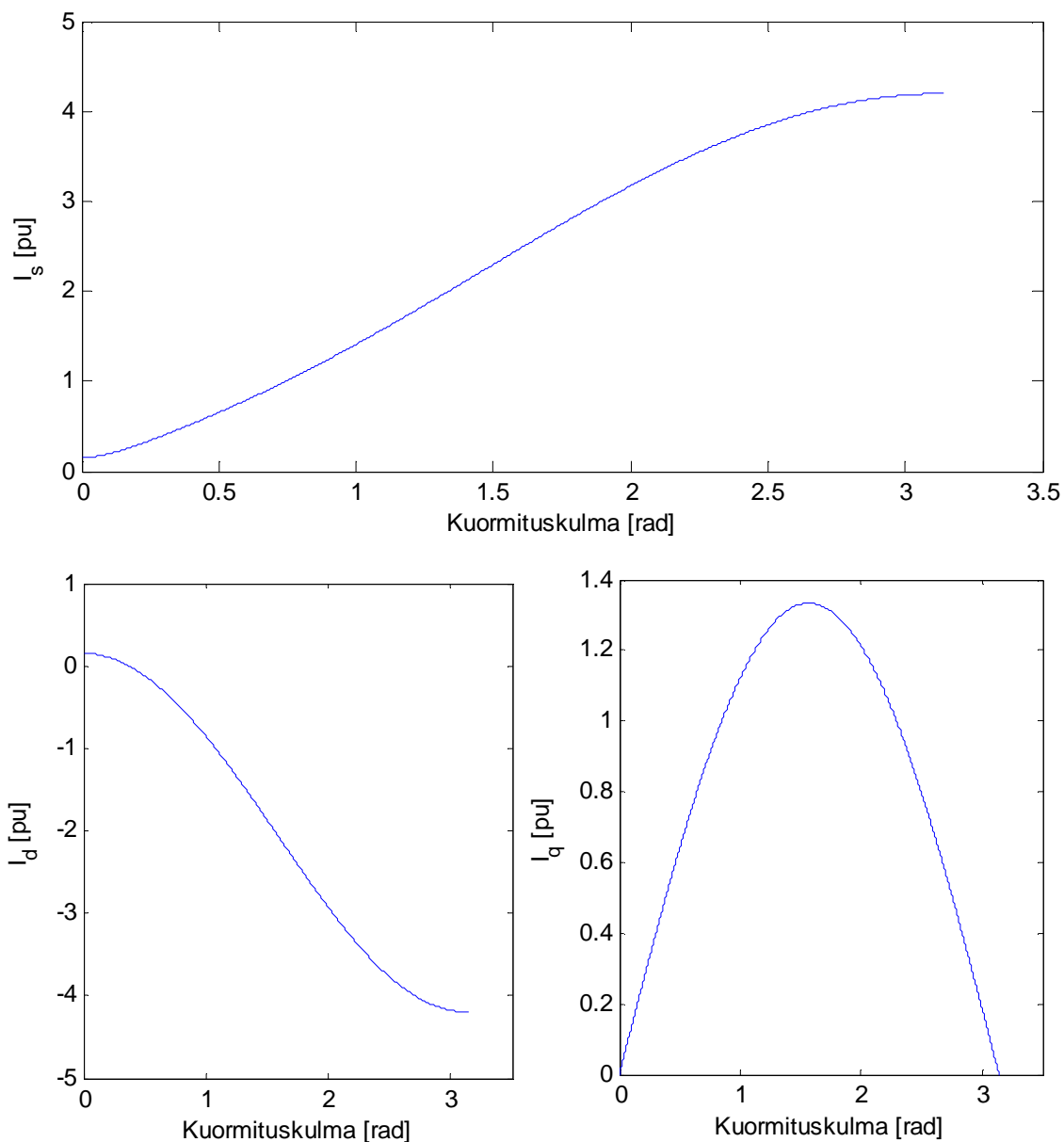
Kuvassa 6.4 esitetään moottorin vääntömomentti kuormituskulman funktiona. Kuvasta nähdään moottorin maksimaalinen vääntömomentti eri induktanssisuhteilla.



Kuva 6.4 Vääntömomentti kuormituksen funktiona. Kuvassa eriväriset käyrät kuvaavat eri induktanssisuhteilla laskettuja vääntömomenttikäyriä. Laskenta on toteutettu samoin oletuksin ja arvoin kuin kuvan 6.1 vääntömomenttikäyrien laskenta.

Kuvasta 6.4 huomataan, että kokonaisvääntömomentti kasvaa, kun induktanssisuhde poikkeaa arvosta yksi. Suuri vääntömomentti saadaan pienillä induktanssisuhteilla. Induktanssisuhteen kasvattaminen ei lisää koneen tuottamaa kokonaisvääntömomenttiä yhtä paljon kuin induktanssisuhteen pienentäminen.

Kuormituskulman yhteyttä staattorin virtaan tarkastellaan kuvassa 6.5. Kuvassa esitetään yhtälöllä (5.16) laskettu staattorin virta ja yhtälöillä (5.14) ja (5.15) lasketut d- ja q-akselien suuntaiset staattorivirran komponentit.

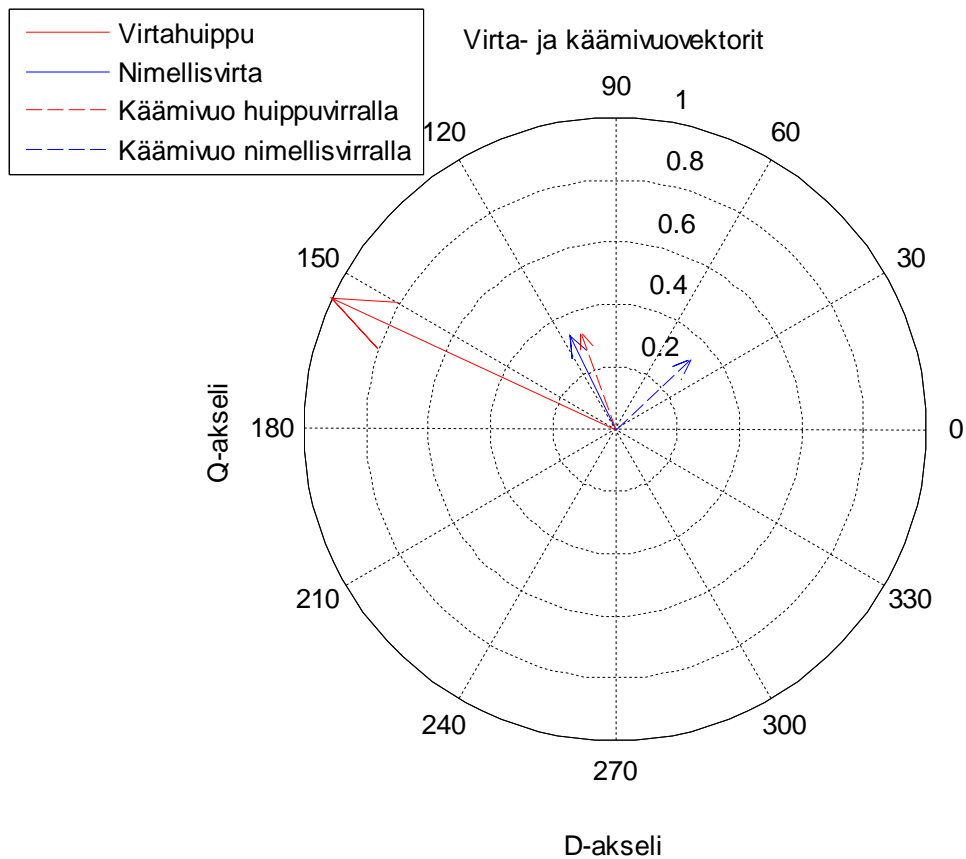


Kuva 6.5 Staattorin virta komponentteineen eri kuormituskulman arvoilla. Ylhäällä esitetään staattorin virta ja alhaalla vasemmalla d-akselin suuntainen virta. Q-akselin suuntainen virta esitetään alhaalla oikealla. Laskenta on tehty samoilla arvoilla kuin kuvien 6.1 - 6.4 sinisten vääntömomenttikäyrien laskenta. Laskennassa d-akselin induktanssin arvo on 0,46 ja q-akselin 0,75 pu. Kestomagneettien tuottama nimellinen sähkömotorinen voima on 0,93 pu.

Kuvan 6.5 mukaan staattorivirta kasvaa kuormituskulman kasvaessa. Kun moottoria ei kuormiteta vääntömometti ja q-akselin suuntainen virta ovat nollassa. Nimellinopeudella kestomagneettien synnyttämä d-akselin suuntainen käämienvuo on samansuuruinen kuin niiden tuottama elektromotorinen voima yhtälön (5.8) mukaisesti. Kun kestomagneettien tuottama elektromotorinen voima on pienempi kuin yksi, tarvitaan yhtälön (5.9) perusteella

positiivista d-akselin suuntaista magnetoivaa virtaa, jotta moottori voi pyöriä nimellisnopeudella.

Väännön ja q-akselin suuntaisen virtakomponentin kasvaessa d-akselin virta pienenee ja kääntyy negatiiviseksi. D-akselin virran kääntyessä negatiiviseksi se heikentää staattorin käämivuota d-suunnassa. Jotta moottorin käämivuo ja pyörimisnopeus pysyisivät vakioina, on yhtälön (5.9) mukaisesti q-akselin virran käämivuota vahvistavan vaikutuksen kompensoitava d-akselin virran käämivuota heikentävä vaikutus. Kuvassa 6.6 esitetään virta- ja käämivuovektorit nimellispisteessä ja huippuväännöllä.



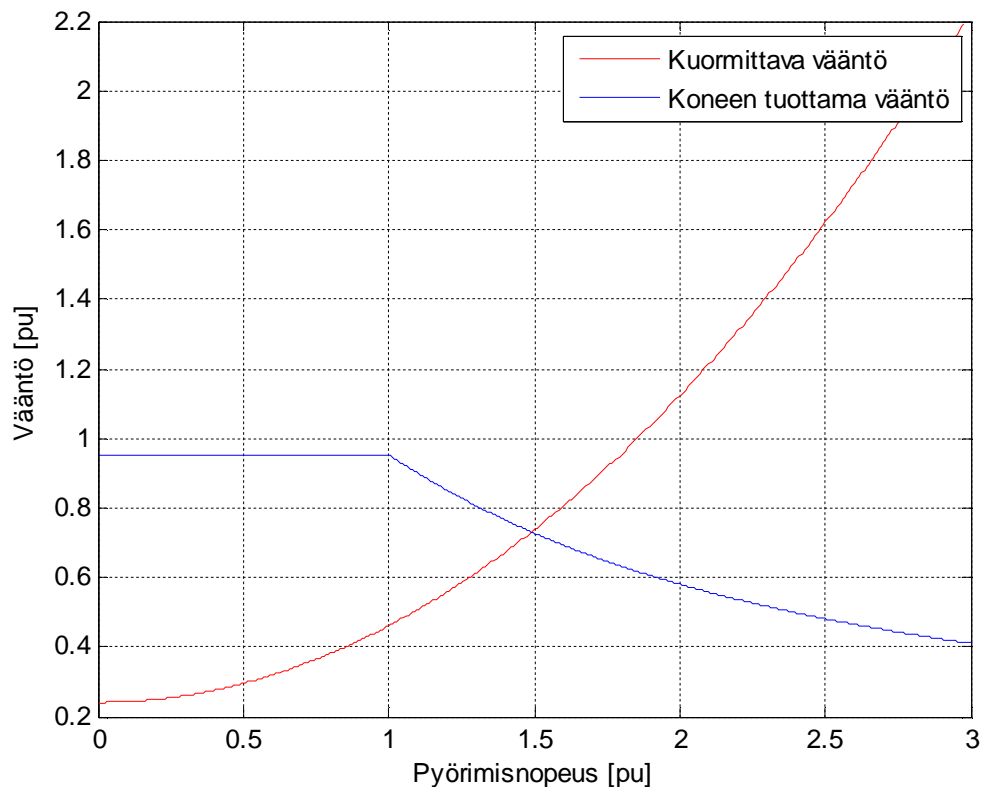
Kuva 6.6 Staattorivirta- ja käämivuovektorit nimellispisteessä ja huippuväännöllä. Kuvassa katkonaisilla nuolilla kuvataan käämivoita ja yhtenäisillä nuolilla virtoja. Laskenta on tehty samoilla induktanssien ja kestopagneettien indusoiman jännitteen arvoilla kuin sinisten virta- ja vääntömomenttikäyrien laskenta.

Kuvan 6.6 virtahuippuvektori on pituudeltaan likimain kolminkertainen nimellisvirtavektorin pituuteen nähden. Virtahuippuvektori ajautuu pidemmällä kentänheikennykseen koordinaatistoon vasempaan puolitasoon kuin nimellisvirtavektori, sillä q-akselin induktanssi on d-akselin induktanssia suurempi. Jotta käämivuo ja pyörimisnopeus pysyisivät vakioina, tulee d-akselin suuntaisen virtakomponentin olla pidempi kuin q-akselin suuntaisen,

koska q-akselin suuntainen virta vaikuttaa voimakkaammin staattorin käämivuohon kuin d-akselin suuntainen virta.

6.1 Kestomagneettitahtikoneen vääntömomentin mitoituslaskelma

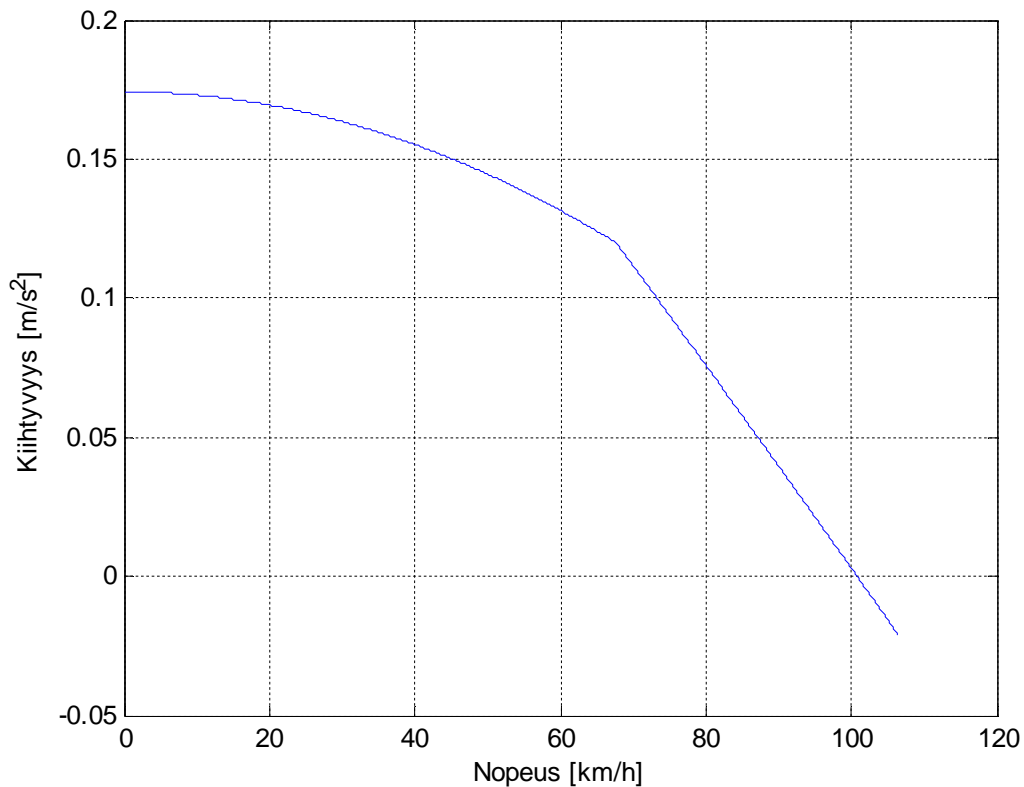
Sähkömoottori tulee mitoittaa siten, että sen tuottama vääntömomentti on riittävän suuri kuormittavaan vääntömomenttiin verrattuna. Kuormittava vääntömomentti voidaan laskea yhtälöllä (3.1). Mitoitetaan moottori siten, että se mahdollistaa bussin käytön moottoritiellä ja ajon 100 km/h huippunopeudella. Bussin moottoria kuormittavaksi väännöksi huippunopeudella saadaan yhtälöllä (3.1) n. 1350 Nm kappaleessa 3. käytetyillä fysikaalisilla vakioilla. Vastaavaksi tehoksi saadaan yhtälöllä (3.2) n. 78,7 kW. Valitaan bussin ajomoottoriksi kuvan 4.1 mukainen 16 napainen uppomagneettitahtikone ja mitoitetaan koneen nimellisteho ja vääntö sopivaksi Vääntöprofiili-ohjelmalla. Kuvassa 6.7 esitetään koneen tuottama vääntömomentti ja konetta kuormittava vääntömomentti suoravälityksellä koko pyörimisnopeusalueella.



Kuva 6.7 Koneen tuottama sähkömagneettinen vääntö ja konetta kuormittava vääntö ilman vaihteistoa. Punainen käyrä kuvaa konetta kuormittavaa vääntöä ja sininen koneen tuottama sähkömagneettista vääntömomenttia. Kuvassa koneen nimellinen vääntö on 0,953 pu ja leikkauspiste kuormituskäyrän kanssa 1,49 ja 0,732 pu.

Liitteessä esitetyllä yhtälöllä (L1) 16 napaisen uppomagneettimoottorin nimelliseksi pyörimisnopeudeksi 50 Hz taajuudella saadaan 375 rpm. Kuvan (6.9) nimellispisteen ja vääntökäyrien leikkauspisteen tehojen suhde on n. 0.874. Kertomalla tehosuhte huipputeholla nimellistehoksi saadaan n. 68,8 kW. Valitaan moottoriksi 70 kW moottori, jonka nimelliseksi vääntömomentiksi saadaan yhtälöllä (3.2) n. 1800 Nm.

Bussin kiihtyvyys mitoitetulla moottorilla lasketaan liitteessä mainitulla yhtälöllä (L3). Bussin kiihtyvyydeksi suoravedolla saadaan kuvassa 6.8 esitettävä kiihtyvyysskäyrä.

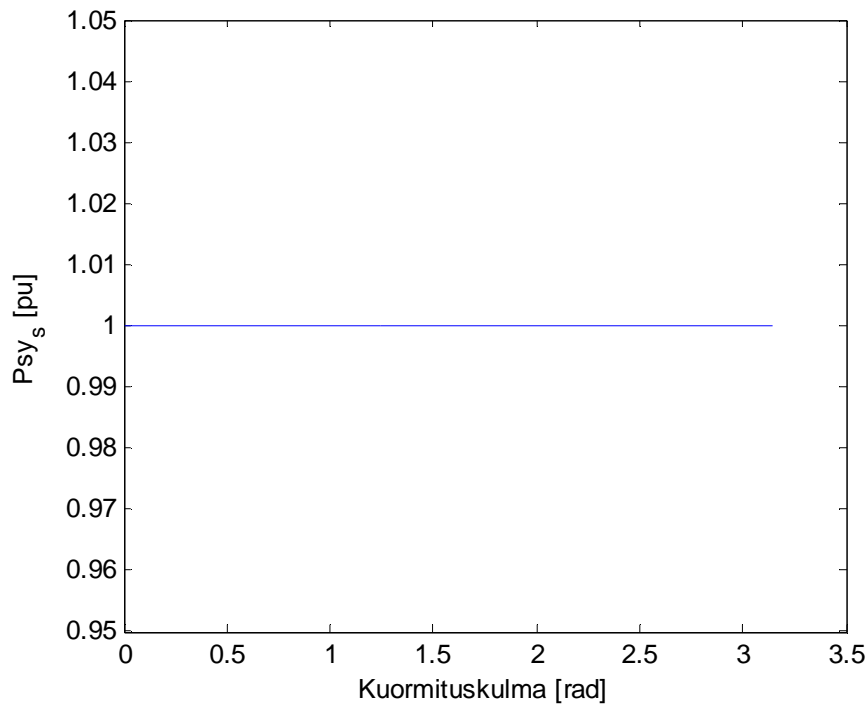


Kuva 6.8 Bussin kiihtyvyys suoravedolla. Bussin keskikihtyvyys välillä 0-60 km/h on n. 0,15 m/s².

Kuvasta 6.8 havaitaan, että suoravedolla massaltaan 16 tonnin bussi kiihtyy hitaasti. Kiihdytykseen levosta 60 km/h nopeuteen kestää n. 110s. Jotta bussi saataisiin kiihtymään riittävän nopeasti tavoitenopeuteen, tulee kiihdyttävän voiman olla suurempi. Kiihdyttävää voimaa matalilla nopeuksilla voidaan kasvattaa merkittävästi vaihteiston avulla. Kiihdyttävää voimaa ja moottorin vääntömomentin tuottokykyä voidaan parantaa optimoimalla koneen roottorin rakennetta ja induktansseja sekä mitoittamalla koneen teho suuremmaksi.

6.2 Ohjelman toimivuuden testaus

Ohjelman toimintaa testataan laskemalla staattorin käämivuo kuvan 6.5 virralla yhtälöillä (5.3 – 5.5) eri kuormituksen arvoilla. Tulokset esitetään kuvassa 6.9.



Kuva 6.9 Staattorin käämivuo nimellispisteessä kuormituksen muuttuessa. Laskennassa d-akselin induktanssin arvo on 0,46 ja q-akselin induktanssin 0,75 pu. Kestomagneettien tuottama nimellinen sähkömotorinen voima on 0.93 pu.

Kuvasta 6.9 huomataan, että käämivuo pysyy arvossa 1 pu kuormituksen muuttuessa. Yhtälön (5.9) mukaan nimellisjännitteellä kulmanopeus ja pyörimisnopeus ovat 1 pu. Koska kulmanopeus pysyy muuttumattomana arvossa 1 pu ja moottorin virtojen laskennan alkuehtona käytetään nimellistä pyörimisnopeutta, voidaan todeta, että virtojen laskennassa käytetty alkuehto toteutuu.

Testataan ohjelman toimintaa laskemalla kuvan 6.6 mukaisille vektoreille koneen tuottama vääntömomentti vaihetta ja napaparia kohti vektoriteorian mukaisella yhtälöllä (5.7) eri koneille. Verrataan laskettuja tuloksia vääntöprofiiliohjelman yhtälöillä (5.18) ja (5.19) laskeisiin nimellisvääntömomentteihin T_n ja huippuvääntömomentteihin T_r . Lasketut arvot esitetään taulukossa 6.1.

Taulukko 6.1 Ohjelman ja vektoriteorian mukaisten vääntömomenttien vertailu. Taulukon kolme ensimmäistä saraketta sisältävät laskennan alkuarvot. Taulukon toisella rivillä esitetyt arvot kuvaavat kuvan 4.1 urheiluauton moottoria. Kolmannella rivillä esitetyt Green Campus-bussin moottorin arvoja. Rivien 4-6 arvot ovat fiktiivisiä.

L_d	L_q	E_{PM}	T_n (5.7)	T_n (5.18 & 5.19)	T_h (5.7)	T_h (5.18 & 5.19)
0,46	0,75	0,93	0,9533	0,9534	2,1704	2,1704
0,47	0,52	0,87	0,8712	0,8714	1,8622	1,8622
0,50	0,50	0,80	0,7926	0,7927	1,6000	1,6000
1,20	0,50	0,90	0,8798	0,8795	1,1627	1,1627
0,32	0,80	1,30	0,3598	0,3598	4,4203	4,4203

Vertaamalla taulukon 6.1 vääntömomenttiarvoja toisiinsa voidaan todeta, että vektoriteoriassa ja vääntöprofiiliohjelmalla saadaan yhteneviä tuloksia. Siksi myös vektoriteorian mukaisen vääntömomentin laskennassa käytettyjen ohjelman laskemien virtavektoreiden on oltava yhteneviä sähkömagneettisen teorian kanssa.

Käämivuotestissa ja vääntömomenttitestissä käytettiin kestopagneettitahtikoneisiin liittyvästä kirjallisuudesta löytyviä yhtälöitä, joita ei käytetty ohjelman toteutuksessa. Testien tulokset antavat viitteitä siitä, että Vääntöprofiilin laskemat tulokset ovat yhteneviä kirjallisuudessa esitetyn teorian kanssa. Ohjelman laskemia tuloksia ei kuitenkaan ole verifiotu mittauksin. Todennäköisesti ohjelman laskemiin tuloksiin sisältyy virhettä ohjelman toteutuksessa tehtyjen yksinkertaistusten vuoksi. Ohjelman toteutuksessa staattorin käämityksen resistiivinen jännitehäviö ja moottorin raudan saturoituminen jätettiin huomioimatta ja moottorin induktanssit oletettiin vakioiksi. Yksinkertaistuksista aiheutuva virhe kasvaa kuormituksen kasvaessa. Siksi ohjelman laskemat tulokset ovat todennäköisesti epäluotettavia suurella kuormituksella.

7. YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on ollut tarkastella hybridi- ja sähköajoneuvojen voimankäyttöjärjestelmiä ja ajomoottorina toimivan kestopagneettitahtikoneen toimintaa, siltä vaadittavaa suorituskykyä ja sen soveltuvuutta ajoneuvokäyttöön. Työn päätavoite oli luoda kestopagneettitahtikonetta mallintava analyttinen työkalu kestopagneettitahtimoottorin suunnittelun tueksi. Työkalun avulla tutkittiin induktanssien vaikutusta koneen vääntömomentin tuottokykyyn ja työkalua hyödynnettiin mitoitettaessa kestopagneettitahtikonetta bussikäyttöön.

Johtopäätöksenä voidaan sanoa, että ajoneuvokäyttöön parhaiten soveltuvan voimankäyttöjärjestelmän valinta on vaativa suunnittelukysymys. Valinta perustuu suunniteltavan ajoneuvon toimintaa kuvaavaan ajosykliin, joka määrittää ajon keston ja voimankäyttöjärjestelmältä vaadittavat nopeudet ja väännöt. Se ratkaisee, mille nopeus- ja vääntöalueelle voimankäyttöjärjestelmän paras toimintapiste tulisi asettaa, jotta ajoneuvo energiatehokkuus maksimoituisi. Järjestelmän moottorin teho on mitoitettava vastaamaan ajoneuvon huippunopeudella voimankäyttöjärjestelmää kuormittavaa tehoa ja vääntömomentti on maksimoitava alinopeusalueella, jotta ajoneuvo voidaan kiihdyttää tavoitenopeuteen nopeasti.

Kestomagneettitahtimoottori kykenee hyvin toteuttamaan ajoneuvokäytön asettamat vaatimukset. Se on rakenteeltaan yksinkertainen ja kestävä ja sillä saavutetaan erittäin korkea hyötysuhde. Moottorista voidaan tehdä pieni ja kevyt, koska sillä on kokonsa verrattuna suuri vääntömomentin tuottokyky. Se on tärkeää ajoneuvokäytössä, sillä ajoneuvossa on rajattu määrä tilaa ja ylimääräisen kuorman liikuttaminen vaatii turhaa energiaa. Jotta moottorilla voidaan saavuttaa maksimaalinen vääntömomentti, on sen roottorin rakenne ja induktanssit optimoitava. Vaikka moottorilla voidaan saavuttaa korkea vääntömomentti matalalla pyörimisnopeudella, sen tuottamaa vääntömomenttia on tehostettava alinopeusalueella vaihteiston avulla, jotta raskas bussi saadaan kiihdytettyä nopeasti tavoitenopeuteen. (Rilla 2012)

Kestomagneettitahtimoottorin induktanssien ja vääntömomentin tuottokyvyn optimoinnin apuna voidaan käyttää suunniteltua työkalua. Analysoimalla ajoneuvokäyttöön tarkoitettua kestomagneettitahtimoottoria työkalun avulla havaitaan, että yhtä suuremmalla induktanssisuhteella vääntömomentti on suurempi kentänheikennyksessä kuin ajettaessa konetta taajuusmuuttajalla vakioteholla nimelliskuormalla. Vastaavasti yhtä pienemmillä induktanssisuhteilla vääntömomentti on pienempi kentänheikennyksessä. Todetaan, että vääntömomentti kasvaa induktanssisuhteen poiketessa yhdestä. Suuri vääntömomentti saadaan pienillä induktanssisuhteilla. Induktanssisuhteen kasvattaminen ei lisää moottorin tuottamaa vääntömomenttia yhtä paljon kuin induktanssisuhteen pienentäminen.

Työkalun toimintaa testattiin vertaamalla työkalun laskemia tuloksia kirjallisuudesta löytyvillä yhtälöillä laskettuihin tuloksiin. Työkalun laskemat tulokset vaikuttavat ristiriidattomilta ja yhteneväsiltä teorian kanssa. Työkalun toteutuksessa staattorin käämityksen resistiivinen jännitehäviö ja moottorin raudan saturoituminen jätettiin huomioimatta ja moottorin induktanssit oletettiin vakioiksi. Tehdyt teoreettiset yksinkertaistukset aiheuttavat epätarkkuutta tuloksissa erityisesti suurella kuormituksella. Työkalun tarkkuutta voidaan parantaa kehittämällä mallia siten, että resistiivinen jännitehäviö huomioidaan.

LÄHTEET

- Aura, L. ja Tonteri A. 1986. Sähkömiehen käsikirja 2. Sähkökoneet. Porvoo: WSOY.
- Chudivani, J. 2014. The magnetic fields of inset Permanent Magnet Synchronous Motor. Posterus. [verkkodokumentti]. [viitattu 8.4.2014]. Saatavissa <http://www.posterus.sk/?p=16780>
- Cutchet, M. 2013. Kansainvälisen kaupan valiokunnan lausunto teollisuus-, tutkimus-, ja energiavaliokunnalle. [verkkodokumentti]. [viitattu 8.4.2014]. Saatavissa <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+REPORT+A7-2013-0391+0+DOC+XML+V0//FI#title3>
- Electric-vehiclenews. 2013. Japan's Sekisui Chemical develop Silicon based 600 km range battery. [verkkouutinen]. [viitattu 8.4.2014]. Saatavissa <http://www.electric-vehiclenews.com/2013/12/japans-sekisui-chemical-develop-silicon.html>
- Gamburger, K. 2009. Electrical machine in a Hybrid Electrical Vehicle. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Immonen, P. et al. Report of Lappeenranta city bus cycle: Lappeenranta Route 1. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Kamiev, K. et al. 2013. Design Principles of Permanent Magnet Synchronous Machines for Parallel Hybrid or Traction Applications. IEEE.
- Kane, M. 2013. In Geneva, ABB Testing Electric Bus TOSA With 15 Second Flash Charge. Insideevs. [verkkouutinen]. [viitattu 8.4.2014]. Saatavissa <http://insideevs.com/in-geneva-abb-testing-electric-bus-tosa-with-15-second-flash-charge-wvideo/>
- Kauppila, J. 2010. Electric Propulsion System in a Modern Sports Car. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- LUT, CamBus. [verkkodokumentti]. [viitattu 8.4.2014]. Saatavissa <http://www.lut.fi/green-campus/sahkoiset-kulkuneuvot/cambus>
- Manninen, L. 2011. Hybridit yleistyvät nopeasti. [taloussanomien julkaisema verkkouutinen]. [viitattu 8.4.2014]. Saatavissa <http://www.taloussanommat.fi/autot/2011/04/15/hybridit-yleistyvat-nopeasti/20111871/304>
- Pyrhönen, J. 2010. Electrical Drives, Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto
- Pyrhönen, J. et al. 2009. Design of Rotating Electrical Machines. Wiley
- Rilla, M. 2012. Design of salient PM synchronous machines for a vehicle traction application – Analysis and Implementation. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Sekisui Chemical Co., Ltd. 2013. High-capacity Film-type Lithium-ion Battery Developed Using Coating Process. [lehdistötiedote]. [viitattu 8.4.2014]. Saatavissa http://www.sekisuichemical.com/about/whatsnew/2013/1239025_17313.html
- Tapia, J. Constant Voltage Torque Production on Interior PM machines. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Toyota. 2011. Toyota ympäristöesite. [verkkodokumentti]. [viitattu 8.4.2014]. Saatavissa http://www.toyota.fi/Images/TOYOTA_ymparistoosite_singlepage_tcm304-1103245.pdf
- Turtiainen, J. 2014. Nerokas ja halpa ratkaisu sähköauton lataukseen. Kauppalehti. [verkkouuti-

nen]. [viitattu 8.4.2014]. Saatavissa

<http://www.kauppalehti.fi/auto/uutiset/nerokas+ja+halpa+ratkaisu+sahkoauton+lataamiseen/201401610313>

Yuong, H. ja Freedman, R. 2004. Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics. 11th Edition. San Fransisco: Addison Wesley.

LIITTEET

Liite 1. Mitoituslaskelmassa käytettäviä yhtälöitä

Tahtikoneen pyörimisnopeus n saadaan Auran ja Tonterin mukaan yhtälöllä:

$$n = \frac{f}{p} \text{ (Aura ja Tonteri).} \quad (\text{L1})$$

Yhtälössä (L1) f on syöttöjännitteen taajuus ja p koneen napapariiluku.

Ajoneuvoa kiihdyttävä voima F_a suoravedolla:

$$F_a = \frac{(T - T_1)}{r_w} \quad (\text{L2})$$

Yhtälössä (L2) T on koneen tuottama vääntömomentti, T_1 konetta kuormittava vääntömomentti ja r_w pyörän säde.

Ajoneuvon kiihtyvyys a :

$$a = \frac{F_a}{m}. \quad (\text{L3})$$

Yhtälössä (L3) m on ajoneuvon massa.