



**Kestomagneettiavusteisen synkronireluktanssikoneen
soveltuvuus autokäyttöihin
(Suitability of permanent magnet assisted synchronous reluctance
machine for electrical vehicles)**

Marko Haapaniemi

TIIVISTELMÄ

Tekijä: Marko Haapaniemi
Työn nimi: Kestomagneettivusteisen synkronireluktanssikoneen soveltuvuus autokäyttöihin
Osasto: Sähkötekniikan osasto
Vuosi: 2014
Paikka: Lappeenranta, Suomi

Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 37 sivua, 12 kuvaa ja 2 taulukko.

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Lasse Laurila

Hakusanat: Kestomagneettivusteinen synkronireluktanssikone, PMA-SRM, sähköauto

Työn tavoitteena on tehdä kirjallisuuskatsaus kestopomagneettivusteisesta synkronireluktanssikoneesta ja tarkastella sen soveltuvuutta sähköauton voimantuottoon. Lisäksi työssä tehdään katsaus tämänhetkisiin sähköautoihin ja niissä esiintyviin koneratkaisuihin ja esitetään esimerkkilaskelma moottorin voimantarpeesta auton eri toimintalueilla.

Tarkasteluissa selvisi, että kestopomagneettivusteinen synkronireluktanssikone on varteenotettava moottoriratkaisu sähköautoissa. Tämänhetkisissä sähköautoissa pääosin esiintyviin epätahtikoneeseen ja kestopomagneettitahtikoneeseen verrattuna kestopomagneettivusteisella synkronireluktanssikoneella on muutamia ominaisuuksia, jotka autokäytössä ovat erityisesti sen vahvuuksia. Epätahtikoneeseen verrattuna kestopomagneettivusteisella synkronireluktanssikoneella on etuina huomattavasti pienempi paino ja synkronisuus ja kestopomagneettitahtikoneeseen verrattuna sillä on paremmat kentänheikkensominaisuudet ja näin laajempi nopeusalue käytettävissä.

ABSTRACT

Author: Marko Haapaniemi
Title: Permanent magnet assisted synchronous reluctance machine's suitability for electrical vehicles
Department: Electrical engineering
Year: 2014
Location: Lappeenranta, Finland

Bachelor's thesis. Lappeenranta University of Technology. 37 pages, 12 pictures and 2 tables.

Supervisor: Associate professor Lasse Laurila

Keywords: Permanent magnet assisted synchronous reluctance machine, PMa-SRM, electric car.

Main goal of this literature study is to take a look in permanent magnet assisted synchronous reluctance machine and consider how it would function as traction motor of electrical vehicles. Study also takes a look at present commercial electrical vehicles and their traction motor solutions.

In the analysis it was found out that permanent magnet assisted synchronous reluctance machine would work quite well in electrical vehicles. In the study it was also found that in present electrical vehicles main traction motor types are induction motor and permanent magnet motor. When comparing permanent magnet assisted synchronous motor to induction motor, analysis shows that permanent magnet assisted synchronous motor is lighter and synchronous. When comparing permanent magnet assisted synchronous motor to permanent magnet motor, analysis shows that permanent magnet assisted synchronous motor has better flux weakening qualities so it has wider speed range to operate with.

ALKUSANAT

Työ on tehty Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa liittyen autokäyttöjen tutkimukseen. Työssä tutustutaan tämän hetkisiin kaupallisiin sähköautoihin ja niiden moottoriratkaisuihin, jonka jälkeen tarkastellaan kestopagneettivusteisen synkronireluktanssikoneen soveltuvuutta sähköauton voimantuotantoon.

Kiitokset yliopiston henkilökunnalle ja ystäville projektiin liittyen.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	Kestomagneettivasteinen synkronireluktanssikone	7
1.1	Historia.....	7
1.2	Synkronireluktanssikone.....	9
1.3	Kestomagneettivasteinen synkronireluktanssikone	12
2.	Autokäytöt.....	14
2.1	Kaupallisissa autoissa käytetyt sähkömoottorit	15
2.2	Kestomagneettitahtikone.....	17
2.3	Epätahtikone	20
2.4	Autokäytön mukanaan tuomia erityisominaisuuksia sähkökäytölle.....	21
2.5	Sähkökoneen mitoitus autokäyttöön	25
	Yhteenveto	28
	Lähdeluettelo.....	29

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

a	Kiihtyvyys
C_x	Muotokerroin
d	Roottorikoordinaatisto d-akselin suunta
F	Voima
F_{ilma}	Ilmanvastuksen vastustava voima
$F_{\text{kiihdytys}}$	Kiihdytyksessä massanhitauden aiheuttama vastustava voima
$F_{\text{mäki}}$	Mäen kaltevuuden aikaansaama vastustava voima
$F_{\text{vierintä}}$	Vierintävastuksen vastustava voima
g	Putoamiskiihtyvyys
i_D	Vaimennuskäämin virta d-akselin suunnassa
i_s	Staattorivirta(-vektori)
i_{sd}	Vektoripiiroksessa d-akselin suuntainen staattorivirtakomponentti
i_{sq}	Vektoripiiroksessa q-akselin suuntainen staattorivirtakomponentti
i_Q	Vaimennuskäämin virta q-akselin suunnassa
L_d	d-akselin suuntainen induktanssi
L_{md}	d-akselinsuuntainen magnetoimisinduktanssi
L_{mq}	q-akselinsuuntainen magnetoimisinduktanssi
L_{sd}	d-akselin suuntainen induktanssi
L_{sq}	q-akselin suuntainen induktanssi
L_q	q-akselin suuntainen induktanssi
m	Massa
n_s	Staattorin tahtinopeus
n	Roottorin pyörimisnopeus
P	Teho
p	Napapariluku
q	Roottorikoordinaatiston q-akselin suunta
S	Liikesuuntaan kohtisuorassa oleva pinta-ala
s	Epätahtikoneen jättämä
T	Vääntömomentti
T_e	Sähköinen vääntömomentti
T_{PM}	Kestomagneettivääntömomentti
T_{REL}	Reluktanssivääntömomentti
u	Jännitevektori
u_s	Staattorin jännitevektori
v	Nopeus

α	Nousukulma
δ	Staattorivuon ja d-akselin välinen kulma
κ	Vektoripiiroksissa virtavektorin ja d-akselin välinen kulma
ξ	Vierintävastus
ρ	Ilmantiheys
ψ_m	Magnetointikäänivuo
ψ_{md}	d-akselin suuntainen magnetointikäänivuo
ψ_{mq}	q-akselin suuntainen magnetointikäänivuo
ψ_{pm}	Kestomagneettien tuottama käänivuo
ψ_s	Staattorivuo(-vektori)
ψ_{sd}	d-akselin suuntainen staattorivuokomponentti
ψ_{sq}	q-akselin suuntainen staattorivuokomponentti
ψ_{sqi}	q-akselin suuntainen staattorivuokomponentti invertoituna
$\psi_{s\sigma}$	Staattorin hajavuo
ψ_q	q-akselin suuntainen staattorivuokomponenttien summa
ω	Kulmanopeus

Lyhenteet

AC	Vaihtovirta
AWD	Neliveto
PM	Kestomagneetti
PMa	Kestomagneettiavusteinen
SynRM	Synkronireluktanssikone

1. KESTOMAGNEETTIIVUSTEINEN SYNKRONIRELUKTANSSIKONE

Kestomagneettiavusteista synkronireluktanssikonetta, englanniksi Permanent magnet assisted synchronous reluctance machine (PMA-SynRM) on kirjallisuudessa esitetty epätahtikoneen korvaajaksi, niin teollisuuden sähkökäyttöihin, kuin myös hybridi- ja sähköautoihin sähkökoneeksi. Kirjallisuudessa pienemmän kokoluokan prototyyppien tarkasteluja on esitelty lähteissä [1], [2], [3], [4] sekä [5] ja isomman kokoluokan prototyyppijä lähteissä [6], [7], [8], [9], [10] sekä [11]. Työssä keskitytään tarkastelemaan koneen ominaisuuksia ja sen soveltuvuutta autokäyttöihin. Kestomagneettiavusteisen synkronireluktanssikoneen kilpailijoita ovat nykyiset teollisuudessakin laajasti esiintyvät epätahtikone ja kestopagneettitahtikone. Kestomagneettiavusteisella synkronireluktanssikoneella on kestopagneettitahtikoneeseen verrattuna etuna paremmat kentänheikennysominaisuudet ja pienempi magneettien kokonaismäärä ja näin edullisemmat materiaalikustannukset. Kestomagneettiavusteisella synkronireluktanssikoneella etuna on synkronisuus ja paino verrattaessa epätahtikoneeseen.

1.1 Historia

Ensimmäiset reluktanssivääntömomenttia hyödyntävät sähkökoneet olivat askelmootoreita. Ensimmäinen maininta kirjallisuudesta kiertokentällisestä reluktanssimootorista on kuitenkin vuodelta 1926. 1960-luvun puoleenväliin mennessä esiintyneet synkronireluktanssikoneet olivat lähinnä tutkimusprojekteja, eikä niitä nähty käytännön sovelluksissa. 1960- ja 1970-luvuilla ensimmäiset sovelluskohteet olivat lähinnä yksi- tai kaksinopeuksisia käyttäjiä.

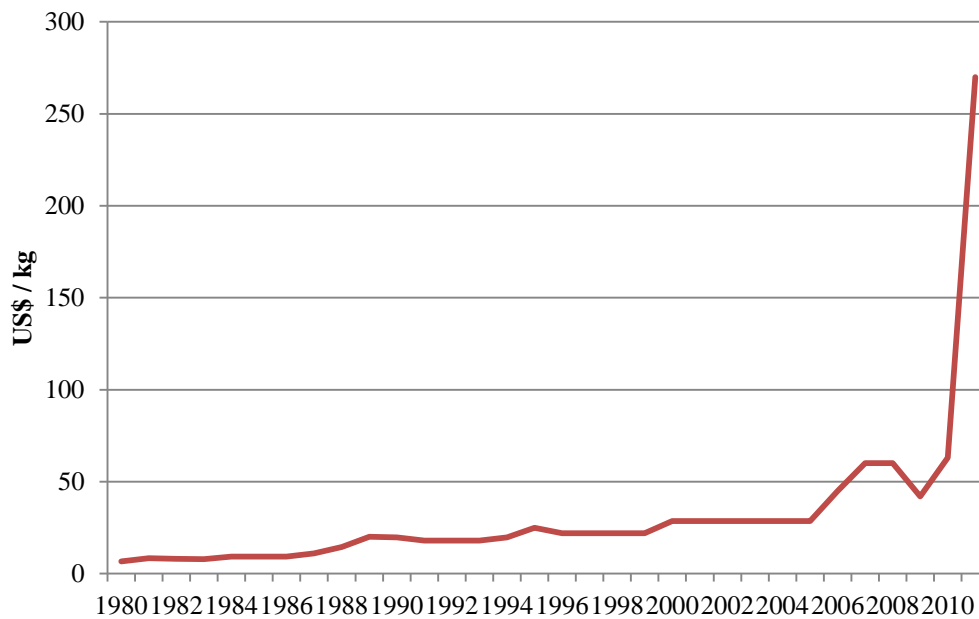
Ensimmäisten toteutuksien ongelmana olivat kuitenkin huonot materiaalit, huonosti optimoidut magneettipiirin geometriset rakenteet ja käynnistystarve oikosulkumootorin häkkikäämityksen tyylisellä käynnistyskäämityksellä. Nämä osaltaan johtivat siihen, että sähkökoneiden kehitys ei suuntautunut synkronireluktanssikoneisiin, vaan epätahti- ja vierasmagnetoituihin tahtikoneisiin.

1990-luvun puolivälin tienoilla kestopagneettimateriaalien kysynnän ja hinnan kasvu johtivat vaihtoehtoisten ratkaisujen etsimiseen, jolloin synkronireluktanssikoneet ovat jälleen nousseet varteenotettaviksi kehityssuunniksi. Lisäksi tehoelektroniikan ja vektorisäädön kehittyminen edesauttoivat vaihtoehtoisten sähkökoneiden kehityksessä,

jolloin synkronireluktanssikoneen ominaisuudet rupesivat olemaan kilpailukykyisiä teollisuudessa yleisessä käytössä olevien epätahti- ja kestopagneetikoneiden kanssa. Synkronireluktanssikoneen ominaisuuksia lähdettiin kehittämään lisäämällä niihin pieniä määriä magneetteja roottorin vuoesteisiin, jolloin koneen hyötysuhdetta ja ominaisuuksia saatiin edelleen parannettua. [1]

Riippuvuus kestopagneeteista ja niiden raaka-aineiden saatavuudesta tuo kuitenkin mukanaan moottorin kustannuksiin yllättäviä menoeriä, mikä on nähtävissä kuvassa 1. Kuvassa on esitetty neodyymioksidin hintakehitys vuosilta 1980 – 2011.

Neodyymioksidin hintakehitys



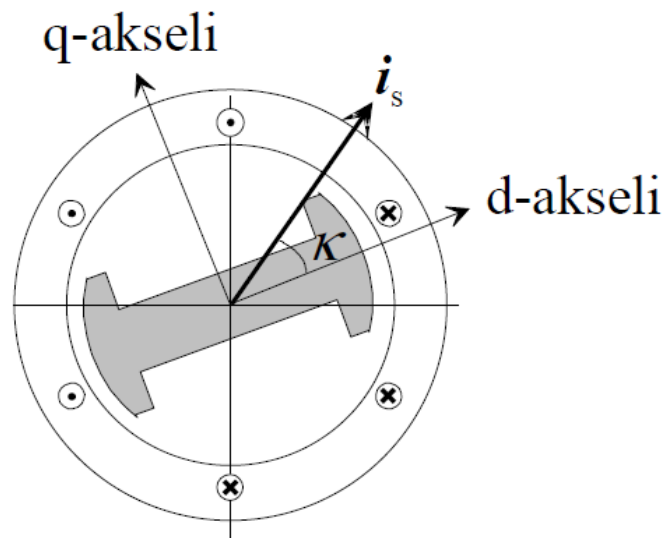
Kuva 1. Kooste neodyymin hintakehityksestä vuosilta 1980 – 2011 [12] - [43]

Vuoden 2011 hintapiikki, heinäkuussa 2011 lähes 270 US\$/kg [44], johtuu pitkälti Kiinan hallinnon asettamista harvinaisten maametallien vientirajoituksista, jotka ovat osittain purkautuneet myöhemmin. Kuitenkin on huomattava, että kestopagneettien kysyntä vaikuttaisi kasvavan hitaasti huonosta taloustilanteesta huolimatta pitkälti tuulivoimaloissa yleisesti käytettävien kestopagneettitahtikoneiden yleistymisen takia. Tällöin on odotettavaa, että myös kestopagneettien tärkeän materiaalin neodyymin hinta jatkaa nousuaan. Harvinaisten maametallien markkinakehitystä on tarkasteltu tarkemmin IAGS:n raportissa [45], jossa on kerrottu miksi Kiina on nykyisin niin tärkeä tekijä neodyymioksidin maailmanmarkkinoilla.

Tarkastellaan seuraavaksi synkronireluktanssikonetta ja miten siitä on edelleen kehitetty kestromagneettivusteinen synkronireluktanssikone lisäämällä pieniä määriä kestromagneetteja.

1.2 Synkronireluktanssikone

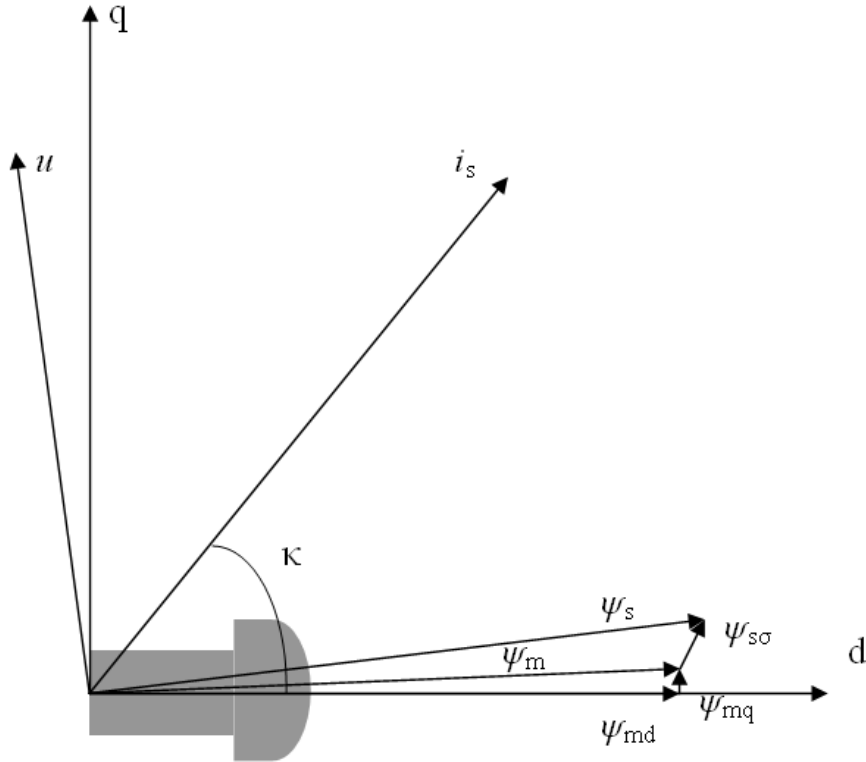
Synkronireluktanssikone on rakenteeltaan erittäin yksinkertainen kiertoakone. Sen staattori on samanlainen, kuin kaikkien kiertoakoneiden staattori. Roottori on puolestaan erittäin yksinkertainen verrattuna muihin AC-koneisiin, koska periaatteessa roottori on vain hieman muotoiltu rautasyylinteri ilman perinteisten tahtikoneiden roottoreiden käämityksiä ja kestromagneetteja. Synkronireluktanssikoneen magnetoinnissa on lisäksi erityisominaisuutena sen toteuttaminen suoraan staattorivirralla.



Kuva 2. Yksinkertainen kaksinapaisen synkronireluktanssikoneen roottorin halkileikkaus [46].

Kuvassa 2 synkronireluktanssikoneen halkileikkauksesta nähdään hyvin yksinkertaisen synkronireluktanssikoneen toimintaperiaatetta. Yksinkertaisuudessaan staattorivirran aikaansaama vuo pyrkii kääntämään roottorin energiaminimiä vastaavaan asentoon, jolloin suurin vääntömomentti on periaatteessa saavutettavissa virran kulman κ ollessa 45° . Synkronireluktanssikonetta suunniteltaessa onkin pyrittävä maksimoimaan d- ja q-akselien suuntaisten induktanssien suhde, jotta päästään mahdollisimman hyvään suorituskykyyn. Tämä voidaan myös havaita synkronireluktanssikoneen vääntömomentin matemaattisesta mallista, jota tarkastellaan myöhemmin.

Synkronireluktanssikoneen vektorioppiirros on esitetty seuraavassa kuvassa, josta on edelleen lähdetty johtamaan koneelle matemaattista mallia.



Kuva 3. Synkronireluktanssikoneen vektorioppiirros.

Vektorioppiirroksista, kuva 3, voidaan johtaa synkronireluktanssikoneen sähköiselle vääntömomentille, T_e , yhtälö ristikenttäperiaatteella

$$T_e = \frac{3}{2} p \bar{\psi}_s \times \bar{i}_s \quad (1.1)$$

jossa p on napaparien lukumäärä, ψ_s on staattorivuovektori ja i_s on staattorivirranvektori. Avaamalla ristitulo saadaan vääntömomentille kehitettyä funktioksi

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}), \quad (1.2)$$

jossa alaindeksit d ja q kuvaavat roottorikoordinaatiston d- ja q-akselien suuntia. Synkronireluktanssikoneen vektorioppiirroksista, kuva 3, nähdään, että staattorivuo koostuu kahdesta vuokomponentista ja että staattorivirta voidaan lausua virtavektorin

ja staattorin d-akselin välisen kulman avulla. Lisäksi, kun muistetaan mistä vuo ψ_s ja sen akseleiden suuntaiset komponentit muodostuvat

$$\begin{aligned}\psi_{sd} &= L_d i_{sd} \\ \psi_{sq} &= L_q i_{sq},\end{aligned}\tag{1.3}$$

voidaan tehdä sijoitus yhtälöön (1.2). Tällöin sijoituksen jälkeen vääntömomentinyhtälöksi saadaan

$$T_e = \frac{3}{2}p(L_d i_{sd} i_{sq} - L_q i_{sd} i_{sq}).\tag{1.4}$$

Lisäksi trigonometrian avulla voidaan lausua

$$\begin{aligned}i_{sd} &= |\bar{i}_s| \cos \kappa \\ i_{sq} &= |\bar{i}_s| \sin \kappa,\end{aligned}\tag{1.5}$$

jolloin vääntömomentinyhtälöksi saadaan

$$T_e = \frac{3}{2}p(L_d |\bar{i}_s| \sin \kappa |\bar{i}_s| \cos \kappa - L_q |\bar{i}_s| \sin \kappa |\bar{i}_s| \cos \kappa),\tag{1.6}$$

joka saadaan supistettua edelleen muotoon

$$T_e = \frac{3}{2}p(L_d - L_q)i_s^2 \sin \kappa \cos \kappa.\tag{1.7}$$

Vääntömomentin yhtälöä voidaan supistaa edelleen, kun muistetaan, että

$$\sin \kappa \cos \kappa = \frac{1}{2} \sin 2\kappa\tag{1.8}$$

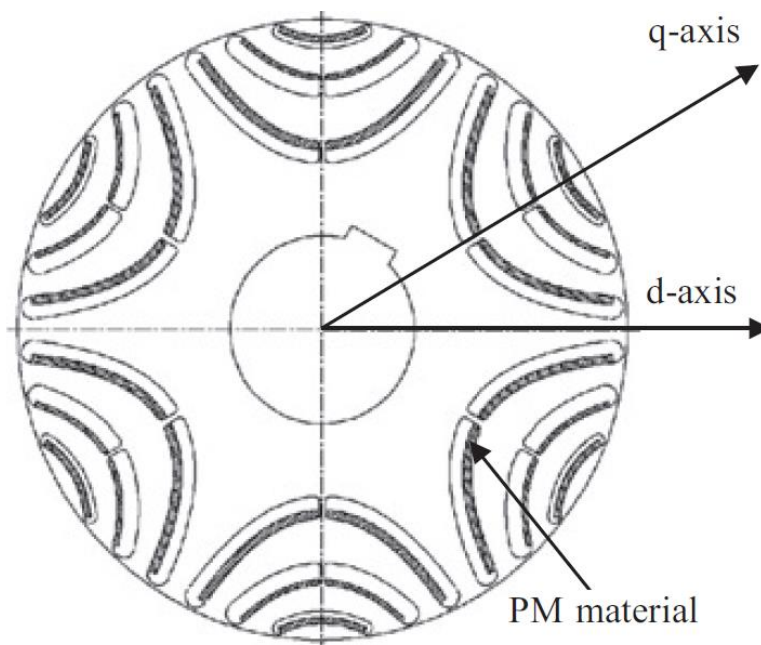
saadaan

$$T_e = \frac{3}{2}p(L_d - L_q)i_s^2 \sin 2\kappa.\tag{1.9}$$

Nyt vääntömomentin yhtälöstä havaitaan, että suunniteltaessa roottoria saadaan reluktanssivääntömomentti maksimoitua, kun induktanssien suhdeluku L_d/L_q , eli $(L_d - L_q)$, on mahdollisimman suuri. Synkronireluktanssikoneen säätöä ajateltaessa nähdään vääntömomentin yhtälöstä myös, että κ kulman arvolla 45° saadaan tuotettua suurin sähköinen vääntömomentti koneen ollessa kyllästymätön. Koneen kyllästymisen takia on konetta ajettava hieman suuremmalla virtakulmalla, jotta saavutetaan suurin mahdollinen vääntömomentti. [46]

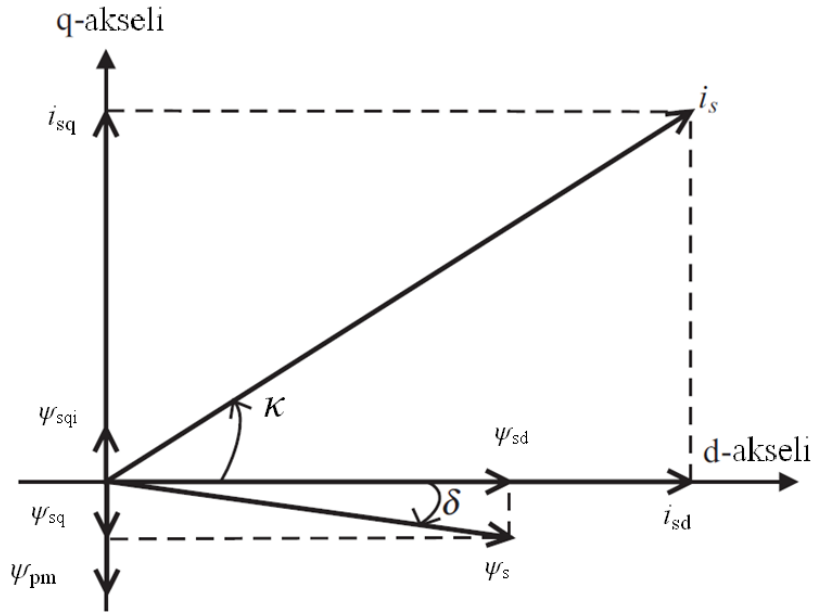
1.3 Kestomagneettiavusteinen synkronireluktanssikone

Synkronireluktanssikoneen ominaisuuksia on ryhdytty edelleen parantelemaan lisäämällä q-akselille vuoesteisiin, eli ilmarakoihin, kestomagneetteja. Kestomagneettien päätehtävänä ei niinkään ole vääntömomentin tuotto, vaan toimia eräänlaisina vuoohjaimina vähentämässä poikittaista ankkurireaktiota, jolloin kestomagneettiavusteista synkronireluktanssikonetta voikin kuvailla eräänlaisena synkronireluktanssikoneen ja kestomagneetikoneen yhdistelmänä. Kuvassa 4 on esitetty eräs tyypillinen kirjallisuudessa esiintyvistä roottorin topologioista.



Kuva 4. Kestomagneettiavusteisen synkronireluktanssikoneen roottorin halkileikkaus [7]

Kuvan 4 koneelle on esitetty seuraavanlainen vektoripiirros, josta voidaan edelleen lähteä tarkastelemaan sen sähköisen vääntömomentin tuottoa.



Kuva 5. Edellisen kuvan kestävästi avustetun synkronireluktanssikoneen vektoripiirros

Kestomagneettiavustetulle synkronireluktanssikoneelle on kirjallisuudessa [7] esitetty sähköisen vääntömomentin, T_e , matemaattiseksi malliksi

$$T_e = \frac{3}{2}p(\Psi_{sd}i_q - (\Psi_{sqi} + \Psi_{pm})i_d), \quad (1.10)$$

jossa p on napapariluku, ψ_d ja ψ_{qi} ovat staattorivuon d- ja q-akselin suuntaiset komponentit roottorikoordinaatistossa, ψ_{pm} on kestävästi avustetun aikaansaama vuokomponentti sekä i_d ja i_q ovat staattorivirran d- ja q-akselin suuntaiset komponentit roottorikoordinaatistossa. Kuten koneen vektoripiirroksesta, kuva 5, voidaan havaita, q-akselin suuntaiset komponentit ovat vastakkaismerkkiset ja niiden yhdessä kehittämä vääntömomentti on positiivista, kun ψ_{sqi} :n ja ψ_{pm} :n vektoreiden summa on negatiivisella q-akselilla. Yhtälöä voidaan kehittää edelleen yhdistämällä q-akselin suuntaiset vuokomponentit yhdeksi muuttujaksi ψ_q

$$\Psi_q = \Psi_{sqi} + \Psi_{pm}, \quad (1.11)$$

jolloin sähköisen vääntömomentin lausekkeeksi voidaan lausua

$$T_e = \frac{3}{2}p(\Psi_{sd}i_q - \Psi_q i_d). \quad (1.12)$$

Nyt voidaan edelleen yhdistää virtavektorin komponentit staattorivirtavektoriksi i_s , jolloin sähköinen vääntömomentti

$$T_e = \frac{3}{2}p(\Psi_d \sin \kappa - \Psi_q \cos \kappa)i_s, \quad (1.13)$$

jossa κ on virtavektorin i_s kulma roottorikoordinaatiston d-akseliin. On kuitenkin muistettava, että kestopagneettiavusteisen synkronireluktanssikoneen toiminta ei ole lineaarista, joten etenkin tarkempaa säätöä suunniteltaessa on otettava huomioon koneen molempien akselien suuntaisten induktanssien epälineaarisuus.

Kestomagneettiavusteisen synkronireluktanssikoneen suunnittelua on tarkasteltu tarkemmin pienemmän mittakaavan prototyyppi koneiden yhteydessä lähteissä [1], [2], [3], [4], [5] ja isomman kokoluokan prototyyppien yhteydessä lähteissä [6], [7], [8], [9], [10]. Koneen säätöä on tarkasteltu tarkemmin mm. lähteissä [7] ja [47]. Artikkelin [7] mukaan tarkastelussa olleelle 110 kW prototyyppikoneelle voidaan saada hyvät dynaamiset ominaisuudet, kun käytetään jatkuvaa virtavektorisäätöä, P-säädintä virran säätämässä ja kuormavääntömomentin estimointia.

Suurimpana kestopagneettiavusteisen synkronireluktanssikoneen yleistymisen ongelmana on kuitenkin tällä hetkellä se, että niitä ei ole saatavissa hyllytuotteena. Moottoreiden valmistajille tehdyn kyselyn perusteella Leeson on kiinnostunut uudeltaisesta moottorimallista ja Metropolian Era sähköautohankkeen pohjalta Brusalla on jonkin verran aikaisempaa kokemusta kestopagneettiavusteisesta synkronireluktanssikoneesta. Se ei kuitenkaan tarkoita välttämättä ettei konetta olisi markkinoilla, sillä ainakin BMW:llä on Yhdysvalloissa patenttihakemus [48] kestopagneettiavusteisen synkronireluktanssikoneen käyttämisestä sähköautoissa.

2. AUTOKÄYTÖT

Sähkökoneen suunnittelulle autokäytöt ovat haastava ympäristö. On tarkasteltava koneen fyysisiä, sähköisiä ja suorituskyvyllisiä ominaisuuksia. Itse koneen rakenteessa on otettava huomioon, että suunnittelukohteena on mobiilikäyttö, jolloin koneeseen kohdistuu tehdasympäristöstä poikkeavia rasituksia, kuten tärinä. Sähköisiltä ominaisuuksiltaan koneen on oltava etenkin hyötysuhteen osalta erinomainen, sillä tämänhetkiset akustot pystyvät varaamaan vielä suhteellisen vähän energiaa verrattuna fossiiliseen polttoaineeseen ja akkujen lataus on aikaa vievä prosessi verrattuna auton

tankaamiseen. Tämän takia koneen onkin oltava mahdollisimman energiatehokas, jotta mahdollisimman vähän mukana kuljetetusta energiasta menisi hukkaan. Auto-käytön suorituskyvylle tuomat vaateet ovat, riippuen käytetyistä ratkaisuista, korkea vääntömomentin tuotto ja kyky toimia laajalla nopeusalueella. Kaiken lisäksi autokäytössä olisi löydettävä mahdollisimman kevyt ratkaisu, sillä jokainen lisäkilo tuo lisää mukanaan ylimääräistä energian kulutusta.

2.1 Kaupallisissa autoissa käytetyt sähkömoottorit

Tarkastellaan aluksi nykyisissä kaupallisissa sähköautoissa esiintyviä ratkaisuja, joita on esitetty taulukossa 1. Näistä osa on suunnattu kohdennetuille markkinoille, esim. Aasiaan tai Yhdysvaltoihin, eikä ole saatavilla Euroopassa. Kuitenkin ne on otettu tarkasteluun mukaan, jotta saataisiin mahdollisimman kattava käsitys minkälaisia lähestymistapoja valmistajat ovat ottaneet sähköauton voimantuottoon.

Seuraavaan taulukkoon on koottu sähköautoja, niiden moottoreita sekä teknisiä erityispiirteitä.

Taulukko 1. 2014 markkinoilla olevia sähköautoja.

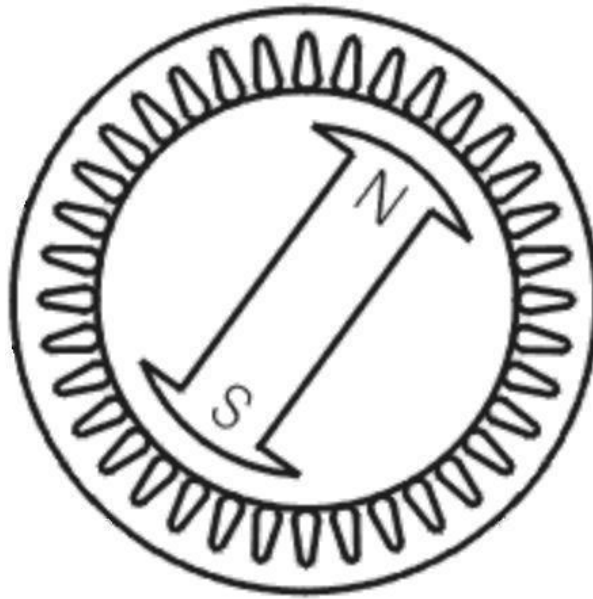
Malli	Valmistaja	Moottori	Erityistä
Mitsubishi i MiEV [49][50]	Mitsubishi	PM	Välitysuhde 7.065:1
Chery QQ3 EV [51][52]	Chery	PM	Max 60 km/h
JAC J3 EV [53]	Jianghuai Automobile Co Ltd	AC synkroni	
Nissan Leaf [54][55][55]	Nissan	AC synkroni	Välitysuhde 7.937:1
Smart ED [57]	Daimler AG	PM	Vaihteisto: 1-nopeuksinen suoraveto
Wheego Whip LiFe [58]	Shuanghuan Automobile ja Wheego Electric Cars Inc.	Epätahtikone	Max rpm 8500 @ 104 km/h
BYD e6 [59][59]	BYD Auto	PM	AWD
Renault Fluence Z.E. [61]	Renault	Vierasmagnetoitu tahtikone	Vaihdeettava akusto
Ford Focus Electric [62]	Ford Motor Company	PM	
BMW ActiveE [63][64]	BMW	AC synkroni	
Tesla Model S [65][66]	Tesla Motors	Epätahtikone (270 kW 440 Nm)	Välitysuhde 9.73:1
Honda Fit EV	Honda	PM	
RAV4 EV second generation [67]	Toyota	Teslan Epätahtikone	
Renault Zoe [68]	Renault	Vierasmagnetoitu tahtikone	
Roewe E50 [69]	Roewe	PM	
Mahindra e2o [70]	Mahindra Reva Electric Vehicles	Epätahtikone	
Chevrolet Spark EV [71]	Chevrolet (General motors)	Öljyjäähdytteinen PM	
Fiat 500e [72]	Fiat	PM	
Volkswagen e-Up! [73]	Volkswagen	PM	
BMW i3 [74][75]	BMW	Synkronireluktanssikone	

Taulukosta nähdään, että suurimmassa osassa kaupallisia sähköautoja on moottoriksi valittu teollisuudesta tutut induktio- ja kestopagneettikone. Lisäksi voidaan havaita, että länsimaalaisten autonvalmistajien sähköautot ja länsimaalaisille automarkkinoille suunnatut sähköautot on suunniteltu myös korkeampinopeuksista maantieajoa silmälläpitäen ja että kokonaisratkaisuisissa on otettu käyttöön lähes poikkeuksetta kiinteä alennusvaihte suhteella 1:7 -> 1:10. Aasialaisista autoista näkee, että ne on suunniteltu silmälläpitäen paikallisia olosuhteita ja tulotasoa. Aasialaisten autonvalmistajien sähköautot ovat pääosin pieniä ja keveitä, ahtaisiin olosuhteisiin tehtyjä autoja, joissa riittää pienempikin ajonopeus. Vain Teslan Model S:n ja BMW:n i3:n suunnittelussa on lähdetty puhtaalta pöydältä, mikä näkyy akkujen sijoittamisena pohjaan koko rungon matkalle. Muissa taas on käytetty perinteisempää polttomoottoriautoista tuttua suunnittelutyyliä, jossa sähkömoottori on edessä polttomoottorin tilalla ja akusto on sijoitettu polttoainetankin tilalle.

Tarkastellaan seuraavaksi kestopagneetti- ja epätahtikonetta, sekä niiden ominaisuuksia autokäytöissä.

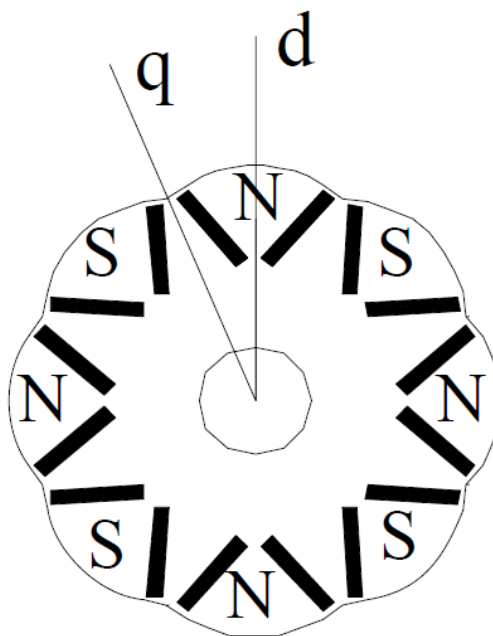
2.2 Kestomagneettitahtikone

Kestomagneettitahtikoneessa lähtökohta on erilainen, kuin synkronireluktanssikonessa, sillä kestopagneettitahtikoneessa roottorin magnetointi tapahtuu kestopagneeteilla. Kestomagneettitahtikoneessa roottorin magneetit pyrkivät kääntämään roottorin staattorivuon suuntaiseksi samaan tapaan, kuin kompassin neula maan magneetikentässä. Kuvassa 6 on esitetty yksinkertaistettu avo- ja kaksinapaisen kestopagneettitahtikoneen halkileikkaus. Siitä on helppo havaita, että kestopagneettikoneen roottorissa olevat magneetit ja niiden aikaansaama magneettivuoto pyrkii kääntymään staattorikäämityksien virran aikaansaaman vuon kanssa yhdensuuntaiseksi.

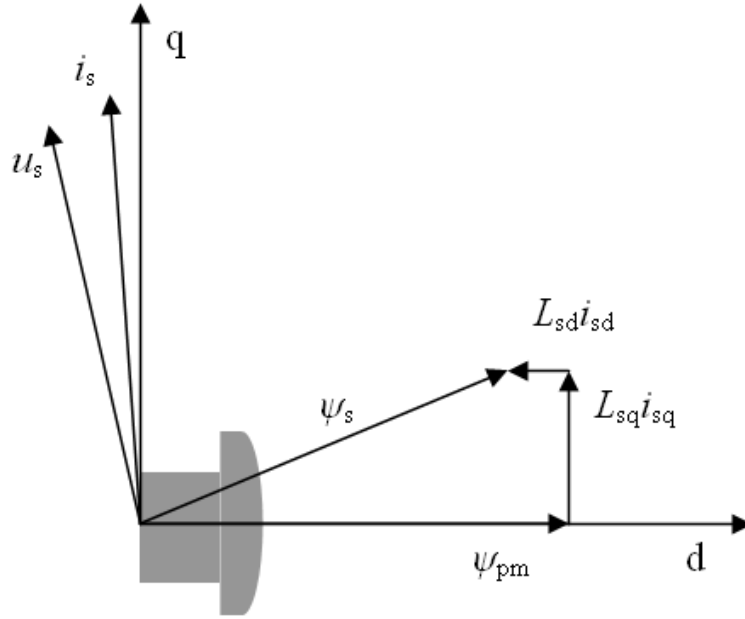


Kuva 6. Yksinkertaistettu avo- ja kaksinapaisen kestmagneettitahtikoneen halkileikkaus.

Käytännön sovelluksissa ei kuitenkaan käytetä yleensä avonapaista ratkaisua vaan umpinapaista. Näiden tyyppien suurimpana visuaalisena erona on, että umpinapaisessa koneessa roottorin halkileikkaus on lähempänä ympyrän mallista.



Kuva 7. Erään umpinapaisen kestmagneettikoneen roottorin halkileikkaus. [76]



Kuva 8. Umpinapaisen kestopagneettitahtikoneen vektoripiirros roottorikoordinaatistossa.

Kuva 8 on umpinapaisesta kestopagneettitahtikoneen vektoripiirroksesta, josta nähdään, että vääntömomenttia tuottaa kestopagneettien käämivuo ja sitä vasten koh-tisuoraan oleva staattorivirtakomponentti. Kestopagneettikoneilla usein käytetään $i_{sd} = 0$ säätöä, koska tällöin saadaan minimoitua reluktanssivääntömomentin aiheuttamat väännön värinät.

Umpinapaiselle kestopagneettitahtikoneelle on esitetty [46] yleinen sähköisen vään-tömomentin yhtälö

$$T_e = \frac{3}{2}p(\psi_{pm}i_{sq} - (L_{mq} - L_{md})i_{sd}i_{sq} + L_{md}i_Di_{sq} + L_{mq}i_Qi_{sd}), \quad (2.1)$$

jossa ψ_{pm} on kestopagneettien tuottama käämivuo, L_{md} ja L_{mq} ovat koneen magne-toimisinduktanssit d- ja q-akselin suunnissa, i_{sd} on staattorivirran d-akselin suuntainen komponentti, i_{sq} on staattorivirran q-akselin suuntainen komponentti ja i_D ja i_Q ovat kyseisten akselien suuntaiset vaimennuskäämien virrat. Tyypillisesti kuitenkin kes-topagneettitahtikoneissa ei ole vaimennuskäämityksiä ja niiden rakenteellisissa omi-naisuuksissa ei ole suuria vaimentavia ominaisuuksia, jolloin myös yhtälöön merkityt vaimennuskäämien virrat i_D ja i_Q ovat nollia. Lisäksi tyypillisesti koneen magnetointi-

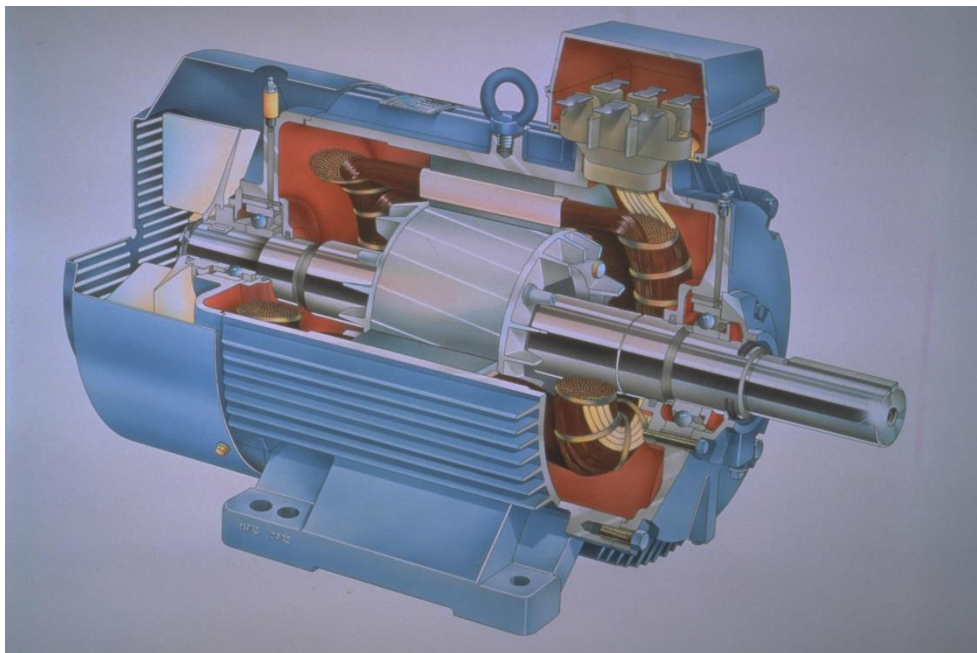
induktanssit ovat lähes yhtä suuret, jolloin myös yhtälön toinen vääntömomenttia tuottava termi supistuu pois. Edellisillä oletuksilla sähköisen vääntömomentin yhtälö supistuu muotoon

$$T_e = \frac{3}{2}p(T_{pm}i_{sq}). \quad (2.2)$$

Kestomagneettitahtikoneen vääntömomentin tuottokyky ja hyötysuhde ovat erinomaisia, mutta on kuitenkin muistettava, ettei se toimi erityisen hyvin kentänheikennystilassa, koska kentänheikennyksessä ruvetaan kääntämään staattorivirran kulmaa eteenpäin. Staattorivirran kulman kasvattaminen alkaa tuottaa kestomagneettien suhteen vastakkaissuuntaista vuokomponenttia, mikä lopulta nolaa kestomagneettien vuon, kun ollaan pitkällä kentänheikennystilassa.

2.3 Epätahtikone

Epätahtikoneen rakenteelle on tyypillistä, että roottorin rakenteeseen on upotettu sähköä johtavia elementtejä, jotka muodostavat hamsterin juoksupyörän tapaisen rakenteen. Tyypillisesti käämitystä kutsutaan häkkikäämitykseksi ja se on valmistettu usein alumiinista tai kuparista.



Kuva 9. Epätahtikoneen leikkaus [77]

Kuten kuvasta nähdään, käämitykset on yhdistetty päistään oikosulkurenkaalla. Tällöin staattorin magneettikentän liikkua muuttuva magneettikenttä indusoi roottorin oikosulkukäämityksiin virtoja, jotka Lorentzin voiman periaatteella muodostavat roottoria pyörittävän voiman. Roottori ei kuitenkaan pyöri samassa tahdissa staattorin magneettikentän kanssa, koska nimenomaan roottorin kokema muuttuva magneettikenttä indusoi käämityksiin virran. Jos roottori pyörisi staattorin magneettikentän kanssa samaa tahtia, roottori ei kokisi magneettikentässä muutosta ja tällöin ei myöskään indusoituisi käämityksiin virtaa, eikä roottorissa ei olisi pyörittävää voimaa.

Epätahtikone ei siis pyöri staattorin kentän nopeudella ja roottorin pyörimisnopeuteen vaikuttaakin koneen kuorma, joka saa aikaan roottorin pyörimisnopeuteen jättämän. Jättämä s määritellään seuraavan yhtälön avulla

$$s = \frac{(n_s - n)}{n_s} \cdot 100\%. \quad (2.3)$$

jossa n_s on staattorin tahtinopeus ja n on roottorin todellinen nopeus.

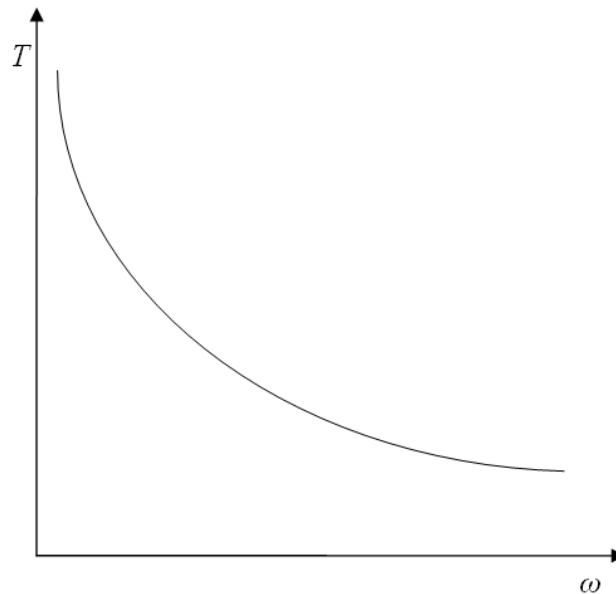
Tarkasteltaessa epätahtikonetta autokäytössä on huomattava, että hitaassa kaupunkiajossa, jossa moottorin kierrokset ovat lähellä nollanopeutta, epätahtikoneen nopeussäätö on hankalaa juuri koneen staattorin sähkökentän ja roottorin epätahtisuuden takia. Siirryttäessä maantienopeuksiin epätahtisuus ei ole enää niinkään ongelma, mutta tarkan nopeuden määrittämiseksi on se kuitenkin mitattava erikseen, kun kehittyneissä tahtikäytöissä nopeus saadaan suoraan sähkökentän pyörimisnopeudesta.

Tarkasteltaessa epätahtikoneen kentänheikennysominaisuuksia voidaan todeta, että hyvin suunnitellulla epätahtikoneella on mahdollista edetä pitkällekin kentänheikennykseen. Kuitenkin on muistettava ottaa huomioon epätahtikoneen pienenevä kippivääntömomentti etenkin pitkällä kentänheikennyksessä.

2.4 Autokäytön mukanaan tuomia erityisominaisuuksia sähkökäytölle

Kestomagneettiavusteisen synkronireluktanssikoneen soveltuvuutta autokäyttöihin on tarkasteltu lähteissä [6], [7], [8], [9], [10] sekä [11] ja näissä on tultu siihen tulokseen, että vaikka autoteollisuus on pitkälti ottanut käyttöön induktio ja kestopagneettitahtikoneet hybridi-autojen sähkökoneina, on myös kestopagneettiavusteinen synkronireluktanssikone varteenotettava vaihtoehto.

Valittaessa autokäyttöön sopivaa sähkökonetta on tarkasteltava koneen ominaisuuksia melko laajalla nopeusalueella, varsinkin lähettäessä suunnittelemaan puhdasta sähköautoa. Koneen on kyettävä tuottamaan mäessä riittävän suuri vääntömomentti, sekä riittävä vääntömomentti vielä lähellä määriteltyä maksiminopeutta. AC-koneille on tyypillistä, että niitä voidaan hetkellisesti käyttää nimellistä suuremmilla tehoilla, olettaen, että konetta ohjaavassa lähteessä on tehoreserviä. Lisäksi ylikuormitustilanteissa on muistettava ottaa huomioon koneen ja etenkin käämitysten lämpeneminen, joten siitä on huolehdittava, jos aiotaan käyttää nimellistä suurempia tehoja. Kuvassa 10 on esitetty karkea hahmotelma, kuinka perinteisesti polttomoottorin tuottama vääntömomentti käyttäytyy vaihdelaatikon välityksellä.

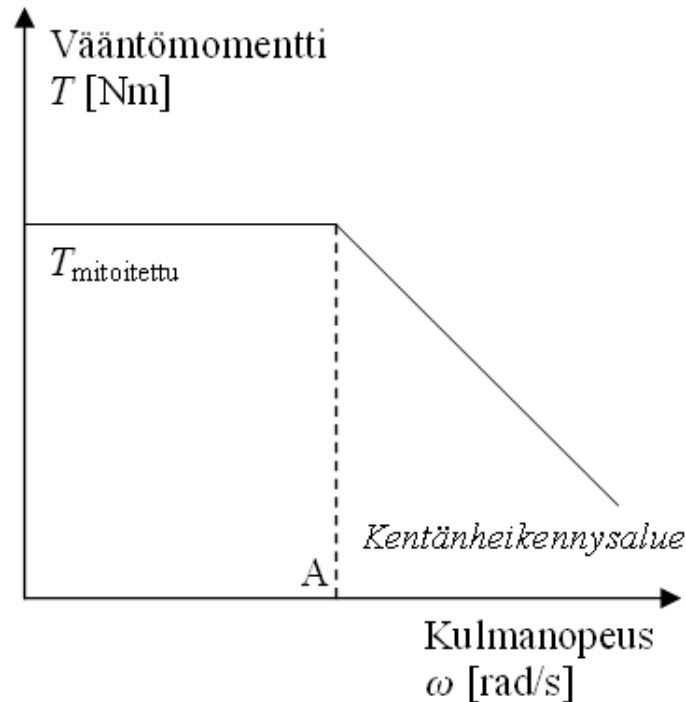


Kuva 10. Hahmotelma perinteisen polttomoottorin ja vaihdelaatikon yhdistelmän vääntömomentin tuotosta renkaista mitattuna.

Suoravetoisella sähkökoneella ei päästä suoraan samanlaisiin tuloksiin, mutta kun muistetaan että sähkökonetta voi hetkellisesti ylikuormittaa, päästään samantyyppisiin tuloksiin, jos vain taajuusmuuntajassa riittää virtareserviä.

Nykyisissä autokäytöissä käytetään auton voimanlähteenä pääosin epätahtikonetta tai kestomagneettikonetta. Kestomagneettikoneen vääntömomentin tuotto ei kuitenkaan sovellu aivan ideaalisesti autokäytön tarpeisiin, sillä kestomagneettikoneen erinomainen vääntömomentin tuottokyky vähenee nimellinopeusalueen jälkeen siirryttäessä kentänheikennyksen alueelle melko nopeasti. Tämä voidaan havaita kuvasta 11, jossa

on kuvattu perinteisen kestopagneettikoneen vääntömomentin käyttäytyminen nopeuden funktiona. Tietenkin kestopagneettikone voidaan suunnitella erikseen silmäläpittäen kentänheikennysaluetta, mutta tällöin tehdään aina kompromisseja muiden ominaisuuksien kanssa. Lisäksi siirryttäessä kentänheikennysalueelle aiheutetaan helposti vikatilanteessa suuria virtoja, jotka häiriötilanteessa on ohjausjärjestelmän kyettävä sietämään.



Kuva 11. Kestomagneettikoneen vääntömomentin käyttäytyminen nopeuden funktiona. Piste A on mitoitettu nimellisnopeus.

Vääntömomentin käyttäytyminen johtuu siitä, että kestopagneettikoneen suunnittelemisessa pyritään maksimoimaan roottorin magnetoinnissa käytettyjen kestopagneettien vuo ja näin vääntömomentin tuotto perustuu kokonaan kestopagneetteihin, eli

$$T_{\text{PM}} \gg T_{\text{REL}}, \quad (2.4)$$

jolloin kestopagneettikoneessa kentänheikennyksen mukanaan tuoma suuri demagnetisoiva staattorivirta käyttää virtareserviä ja näin vääntömomenttia tuottavaa virtakomponentti joudutaan pienentämään edettäessä entistä pidemmälle kentänheikennykseen.

Erona kestopagneettikoneeseen kestopagneettiavusteisessa synkronireluktanssikoneessa on kestopagneettien määrä ja sijainti roottorirakenteessa. Lisäksi suunnittelu- lähtökohtana on parantaa magneeteilla synkronireluktanssikoneen toimintaa, muttei kuitenkaan tuottaa niillä varsinaisesti koneen tuottamaa vääntömomenttia, eli

$$T_{REL} > T_{PM}. \quad (2.5)$$

Tällöin siirryttäessä nopeusalueella kentänheikennykseen reluktanssivääntömomentti kasvattaa suhteellista osuuttaan. Toisin kuin kestopagneettikoneessa, kestopagneettiavusteisessa synkronireluktanssikoneella siirryttäessä kentänheikennysnopeusalueelle staattorivirran kulma kasvaa, jolloin d-akselin suuntainen komponentti pienenee ja vastaavasti q-akselin suuntainen komponentti kasvaa. Tällöin kestopagneettien tuottama vääntömomentti pienenee suhteessa reluktanssivääntömomenttiin. Lisäksi vikatilanteessa ei pääse syntymään haitallisen suuria virtakomponentteja pienempien magneettien takia, jolloin myös häiriötilojen hallinnointi on helpompaa, kuin kestopagneettikoneilla.

Kun voidaan hyväksikäyttää paremmin autokäytössä kentänheikennystilaa, voidaan työtätekevä kone suunnitella nopeusalueeltaan niin, että koneen nimellisarvo sijoittuu pienemmille kierroksille, missä tarvitaan hetkellisesti enemmän vääntömomenttia ja suurissa maantienopeuksissa ollaan kentänheikennysalueella. Tällöin saadaan venytettyä vääntömomentin tuottoa laajalle nopeusalueelle ilman, että konetta on suunniteltava erikseen silmälläpitäen korkeiden nopeuksien ominaisuuksia, eikä kuitenkaan konetta tarvitse ylimitoitaa, jotta saadaan tuotettua myös riittävä liikkeellelähtövääntömomentti. Lisäksi verrattuna kestopagneettikoneeseen kestopagneettiavusteisessa synkronireluktanssikoneessa on kestopagneettien määrä pienempi, jolloin kalliiden maametallien käyttö on vähäisempää ja koneen valmistus täten edullisempää.

Tarkasteltaessa vielä epätahtikoneen ja synkronireluktanssikoneen painoja ABB:n katalogeista [78] ja [78] havaitaan, että 33 kW koneilla painojen ero on yli 50 kg ja isommissa teholuokissa painoero vain kasvaa synkronireluktanssikoneen eduksi. Tämä on varteenotettava suunnittelunäkökohta autokäytöissä, sillä kaikki ylimääräinen paino autossa lisää tehonkulutusta.

2.5 Sähkökoneen mitoitus autokäyttöön

Koneen mitoittamista on tarkasteltu lähteessä [80], jossa nimelliselle tehon tarpeelle on esitetty koneen mitoitusta helpottava yhtälö

$$P = Fv, \quad (2.6)$$

jossa P on renkasiin vaikuttava teho, F on vastustavien voimien summa ja v on ajoneuvon nopeus. Vastustavia voimia on tarkasteltu tasaisella: kitkavoimat ja tuulenvastus, mäessä: maanvetovoima ja kiihdytystilanteessa: hitausmassa. Vierintävastuksen aiheuttamaa vastavoimaa voidaan arvioida yhtälöllä

$$F = \xi mg, \quad (2.7)$$

jossa ξ on vierintävastus, m on auton massa ja g on maanvetovoiman aiheuttama puotamiskiihtyvyys. Ilmanvastus on

$$F = \frac{1}{2} \rho C_x S v^2, \quad (2.8)$$

jossa ρ on ilmantiheys, C_x on muotokerroin ja S on liikesuuntaan kohtisuorassa oleva pinta-ala. Mäen aiheuttama vastustava voima on

$$F = mg \sin \alpha, \quad (2.9)$$

jossa kulma α on tien nousukulma. Kiihdytyksessä tarvittava voima on

$$F = ma, \quad (2.10)$$

jossa a on kiihtyvyys. Yhdistelemällä yhtälöitä voidaan laskea estimaatit eri skenaarioissa, jolloin saadaan sähkökoneelle mitoitukseen tarvittava lukuarvo. Tehdään seuraavaksi esimerkkilaskelma normaalikokoiselle henkilöautolle. Seuraavassa taulukossa on esitetty laskennassa käytetyt arvot.

Taulukko 2. Esimerkkilaskennassa käytetyt arvot

a	$2,78 \text{ m/s}^2$	S	$2,24 \text{ m}^2$
C_x	$0,30$	α	$15^\circ = 0,2618 \text{ rad}$
g	$9,81 \text{ m/s}^2$	ζ	$0,015$
m	1500 kg	ρ	$1,293 \text{ kg/m}^3$

Tarkastellaan seuraavaksi erilaisia tilanteita joita auto kohtaa ja niiden tehontarpeita. Tasaisella ajettaessa vakionopeutta vaikuttavia voimia ovat tuuli ja vierintävastus. Tällöin 120 km/h nopeudessa tarvittavaksi tehoksi saadaan

$$\begin{aligned}
 P_{120} &= (F_{\text{ilma}} + F_{\text{vierintä}})v_{120} \\
 &= (480\text{N} + 220\text{N}) \cdot 33 \text{ m/s} \\
 &= 23\text{kW}.
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Vierintävastuksesta on huomattava, että esitetty lukuarvo kuvaa kuivan asfaltin olosuhteita, jolloin etenkin pohjoisia talvisia olosuhteita tai kesäisiä pehmeitä hiekkateitä silmälläpitäen vierintävastuksen arvo on esimerkkitulosta suurempi.

Tarkastellaan seuraavaksi mäen nousua. Noustaessa 15° mäkeä ylös 80 km/h vauhdilla saadaan vaadittavaksi tehoksi

$$\begin{aligned}
 P_{\text{mäki}} &= (F_{\text{ilma}} + F_{\text{vierintä}} + F_{\text{mäki}})v_{80} \\
 &= (210\text{N} + 220\text{N} + 3800\text{N}) \cdot 22 \text{ m/s} \\
 &= 94\text{kW}.
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

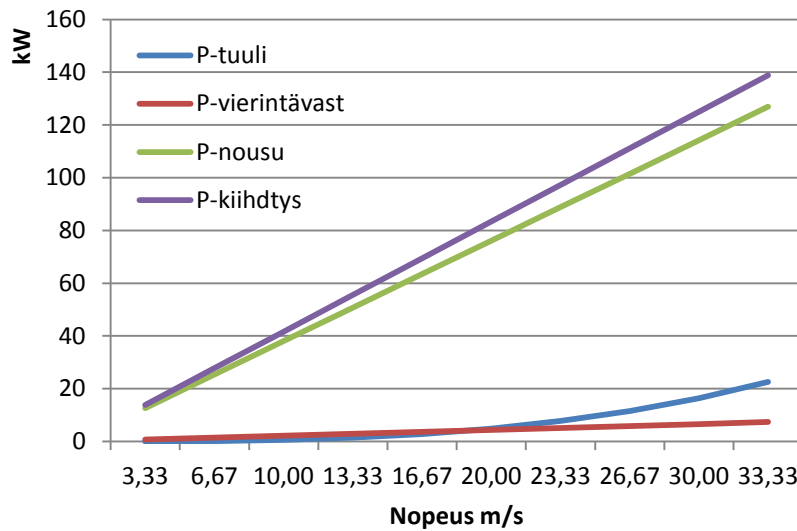
Kiihdytys tai ohitus skenaariossa voidaan laskea seuraavanlaisia tuloksia, kun kiihtyvyydeksi on valittu 0 – 100 km/h 10 s, mikä vastaa $2,78\text{m/s}^2$ keskikihtyvyyttä. Tällöin lähtönopeuden ollessa 80 km/h vaadittavan tehon määräksi saadaan

$$\begin{aligned}
 P_{\text{kiihdytys}_{80}} &= (F_{\text{ilma}} + F_{\text{vierintä}} + F_{\text{kiihdytys}})v_{80} \\
 &= (210\text{N} + 220\text{N} + 4200\text{N}) \cdot 22 \text{ m/s} \\
 &= 100\text{kW}.
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

Vastaavasti, jos 120 km/h nopeudesta halutaan vielä lähteä kiihdyttämään samalla kiihtyvyydellä, saadaan vaaditun tehon määräksi

$$\begin{aligned}
 P_{\text{kiihdytys}_{120}} &= (F_{\text{ilma}} + F_{\text{vierintä}} + F_{\text{kiihdytys}})v_{120} \\
 &= (480\text{N} + 220\text{N} + 4200\text{N}) \cdot 33 \text{ m/s} \\
 &= 160\text{kW}.
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

Laskelmista voidaankin havaita, että mäen nouseminen ja kiihdyttäminen vaativat paljon tehoa. Tällöin koneen mitoituksessa huippunopeuden ja maksimi kiihtyvyyden sopiva valinta vaikuttaa huomattavasti maksimi tehontarpeeseen. Kuvassa 12 on havainnollistettu autoon kohdistuvia jarruttavia tehoja.



Kuva 12. Autoon kohdistuva tehontarve

Lisäksi on otettava huomioon, että saadut lukuarvot ovat vasta renkaisiin vaikuttava teho, jolloin rengaskoon valinnalla ja mahdollisella alennusvaihteella voidaan vielä vaikuttaa vaadittavaan sähkökäytön pyörimisnopeuteen ja vääntömomenttiin.

Kun verrataan laskelmien tuloksia kaupallisten sähköautojen ilmoitettuihin tehoihin, havaitaan tulosten olevan samansuuntaiset. Kuitenkin on muistettava, että suurimmassa osassa eurooppalaisiin oloihin suunnitelluista sähköautoissa on alennusvaihte, jolloin moottorilta vaadittu vääntömomentti laskee ja pyörimisnopeus kasvaa.

YHTEENVETO

Teollisuuden näkökulmasta kestopagneettiavusteinen synkronireluktanssikone ei ole erityisen trendikäs tällä hetkellä, mutta sähkökäyttöjen tutkimus pitää kuitenkin sitä yhtenä varteenotettavana vaihtoehtona tulevaisuuden teollisuuden ja etenkin autokäyttöjen sovelluksissa. Tutkimuksissa sitä onkin esitetty epätahtikoneen mahdolliseksi korvaajaksi. Koneen hyviin ominaisuuksiin kuuluu mm. hyvä hyötysuhde (epätahtikoneen luokkaa autokäyttöjen kokoluokan sovelluksissa), synkronisuus, yksinkertainen ja pienempi rakenne sekä pienempi kestopagneettien menekki kestopagneettikoneeseen verrattuna. Kuitenkin kestopagneettiavusteinen synkronireluktanssikone tarvitsee vielä itse koneen ja säädön lisäoptimointia, jotta sillä päästään entistä parempiin tuloksiin.

Tällä hetkellä ei kestopagneettiavusteista synkronireluktanssikonetta ole suoraan kaupallisesti saatavilla, mutta se ei tarkoita, ettei konetta olisi osana jotain kokonaisuutta. Koneen kehitykseen ja markkinoille tuloon vaikuttaa lähiaikoina todennäköisesti eniten magneettien hinnan kehitys. Magneettien hinnan nousu ja raaka-aineiden saatavuuden epävarmuus oletettavasti vauhdittaa markkinoille tuloa ja taas uusien edullisempien magneettien kehitys taas hidastaa kestopagneettiavusteisen synkronireluktanssikoneen markkinoille tuloa.

LÄHDELUETTELO

- [1] Peyman Niazi, “Permanent magnet assisted synchronous reluctance motor design and performance improvement”, Texas A&M University, 2005
- [2] Talebi, S., Niazi, P., Toliyat, H.A. “Design of Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motors Made Easy”, Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE, s. 2242 – 2248, 2007
- [3] Bianchi, N., Bolognani, S. ; Bon, D., “Rotor Flux-Barrier Design for Torque Ripple Reduction in Synchronous Reluctance and PM-Assisted Synchronous Reluctance Motors”, Industry Applications, IEEE Transactions on (Volume:45 , Issue: 3), Sivut 921 – 928, 2009
- [4] Karimagako, R., Nagrial, M.H., Rizk, J. “Analysis and design of permanent magnet assisted synchronous reluctance machines”, Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010), 5th IET International Conference on 19-21 April 2010, Sivut 1 – 6, 2010
- [5] Barcaro, M., Bianchi, N., Magnussen, F., “Permanent-Magnet Optimization in Permanent-Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor for a Wide Constant-Power Speed Range”, Industrial Electronics, IEEE Transactions on (Volume:59 , Issue: 6), Sivut 2495 – 2502, 2012
- [6] R. Karimagako, M. H. Nagrial, J. Rizk, “Analysis and design of permanent magnet assisted synchronous reluctance machines” , Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010), 5th IET International Conference on Brighton, UK, 2010
- [7] H.W. de Kock, M.J. Kamper, “Dynamic control of the permanent magnet-assisted reluctance synchronous machine”, Electric Power Applications, IET (Volume:1 , Issue: 2), Sivut 153 - 160, 2007
- [8] Chen, L., Wang, J., Lombard, P., Lazari, P., Leconte, V. “Design optimisation of permanent magnet assisted synchronous reluctance machines for electric vehicle applications”, Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on 2-5 Sept. 2012, Sivut 2647 – 2653, 2012
- [9] Obata, M, Morimoto, S., Sanada, M., Inoue, Y. “Characteristic of PMASynRM with ferrite magnets for EV/HEV applications” Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2012 15th International Conference on 21-24 Oct. 2012 Sapporo, Sivut 1 – 6, 2012

- [10] Kashif Saeed Khan, "Design of a Permanent-Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine for a Plug-In Hybrid Electric Vehicle", Lisensiaatintyö Electrical Machines and Power Electronics School of Electrical Engineering, KTH, 2011, Saatavissa [14.10.2014]:
<http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:462259/FULLTEXT01.pdf>
- [11] Ion Boldea, Lucian Tutelea, Cristian Ilie Pitic, "PM-Assisted Reluctance Synchronous Motor/Generator (PM-RSM) for Mild Hybrid Vehicles: Electromagnetic Design", Industry Applications, IEEE Transactions on (Volume:40 , Issue: 2), Sivut 492 - 498, 2004
- [12] U.S. Bureau of Mines; Hedrick, James B., "Rare-Earth Minerals and Metals", Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 1980, p. 669-678, Washington, 1981, Saatavissa [14.10.2014]:
<http://digital.library.wisc.edu/1711.dl/EcoNatRes.MinYB1980v1>
- [13] U.S. Bureau of Mines; Hedrick, James B, "Rare-earth minerals and metals", Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 1981, p. 697-707, Washington, 1982, Saatavissa [14.10.2014]:
<http://digital.library.wisc.edu/1711.dl/EcoNatRes.MinYB1981v1>
- [14] U.S. Bureau of Mines; Hedrick, James B, "Rare-earth minerals and metals", Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 1982, p. 705-714, Washington, 1983, Saatavissa [14.10.2014]:
<http://digital.library.wisc.edu/1711.dl/EcoNatRes.MinYB1982v1>
- [15] U.S. Bureau of Mines; Hedrick, James B, "Rare-earth minerals and metals", Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 1983, p. 713-723, Washington, 1984, Saatavissa [14.10.2014]:
<http://digital.library.wisc.edu/1711.dl/EcoNatRes.MinYB1983v1>
- [16] U.S. Bureau of Mines; Hedrick, James B, "Rare-earth minerals and metals", Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 1984, p. 751-762, Washington, 1985, Saatavissa [14.10.2014]:
<http://digital.library.wisc.edu/1711.dl/EcoNatRes.MinYB1984v1>
- [17] U.S. Bureau of Mines; Hedrick, James B, "Rare-earth minerals and metals", Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 1985, p. 791-803, Washington, 1987, Saatavissa [14.10.2014]:
<http://digital.library.wisc.edu/1711.dl/EcoNatRes.MinYB1985v1>
- [18] U.S. Bureau of Mines; Hedrick, James B, "Rare-earth minerals and metals", Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 1986, p. 771-782,

- Washington, 1988, Saatavissa [14.10.2014]:
<http://digital.library.wisc.edu/1711.dl/EcoNatRes.MinYB1986v1>
- [19] U.S. Bureau of Mines; Hedrick, James B, “Rare-earth minerals and metals”, Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 1987, p. 717-728, Washington, 1989, Saatavissa [14.10.2014]:
<http://digital.library.wisc.edu/1711.dl/EcoNatRes.MinYB1987v1>
- [20] U.S. Bureau of Mines; Hedrick, James B, Templeton, David A, “Rare-earth minerals and metals”, Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 1988, p. 779-789, Washington, 1990, Saatavissa [14.10.2014]:
<http://digital.library.wisc.edu/1711.dl/EcoNatRes.MinYB1988v1>
- [21] U.S. Bureau of Mines; Hedrick, James B, Templeton, David A, “Rare-earth minerals and metals”, Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 1989, p. 825-844, Washington, 1991, Saatavissa [14.10.2014]:
<http://digital.library.wisc.edu/1711.dl/EcoNatRes.MinYB1989v1>
- [22] U.S. Bureau of Mines; Hedrick, James B, “Rare earths: the lanthanides, yttrium, and scandium”, Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 1990, p. 903-922, Washington, 1993, Saatavissa [14.10.2014]:
<http://digital.library.wisc.edu/1711.dl/EcoNatRes.MinYB1990v1>
- [23] U.S. Bureau of Mines, Hedrick, James B, “Rare earths: the lanthanides, yttrium, and scandium”, Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 1991, p. 1211-1237, ISBN 0-16-041842-9, Saatavissa [14.10.2014]:
<http://digital.library.wisc.edu/1711.dl/EcoNatRes.MinYB1991v1>
- [24] U.S. Bureau of Mines; Hedrick, James B, “Rare earths: the lanthanides, yttrium, and scandium”, Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 1992, p. 1035-1061, ISBN 0-16-043154-9, Saatavissa [14.10.2014]:
<http://digital.library.wisc.edu/1711.dl/EcoNatRes.MinYB1992v1>
- [25] U.S. Bureau of Mines; Hedrick, James B, “Rare earths: the lanthanides, yttrium, and scandium”, Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 1993, p. 857-883, ISBN 0-16-048153-8, Saatavissa [14.10.2014]:
<http://digital.library.wisc.edu/1711.dl/EcoNatRes.MinYB1993v1>
- [26] Hedrick, James B, “Rare earths”, Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 1994 – Rare Earths, PDF-tiedosto, Saatavissa [14.10.2014]:
http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/740494.pdf
- [27] Hedrick, James B, “Rare earths”, Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 1995 – Rare Earths, PDF-tiedosto, Saatavissa [14.10.2014]:
http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/740495.pdf

- [28] Hedrick, James B, "Rare earths", Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 1996 – Rare Earths, PDF-tiedosto, Saatavissa [14.10.2014]: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/740496.pdf
- [29] Hedrick, James B, "Rare earths", Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 1997 – Rare Earths, PDF-tiedosto, Saatavissa [14.10.2014]: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/740497.pdf
- [30] Hedrick, James B, "Rare earths", Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 1998 – Rare Earths, PDF-tiedosto, Saatavissa [14.10.2014]: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/740498.pdf
- [31] Hedrick, James B, "Rare earths", Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 1999 – Rare Earths, PDF-tiedosto, Saatavissa [14.10.2014]: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/740499.pdf
- [32] Hedrick, James B, "Rare earths", Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 2000 – Rare Earths, PDF-tiedosto, Saatavissa [14.10.2014]: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/740400.pdf
- [33] Hedrick, James B, "Rare earths", Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 2001 – Rare Earths, PDF-tiedosto, Saatavissa [14.10.2014]: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/raremyb01.pdf
- [34] Hedrick, James B, "Rare earths", Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 2002 – Rare Earths, PDF-tiedosto, Saatavissa [14.10.2014]: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/raremyb02.pdf
- [35] Hedrick, James B, "Rare earths", Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 2003 – Rare Earths, PDF-tiedosto, Saatavissa [14.10.2014]: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/raremyb03.pdf
- [36] Hedrick, James B, "Rare earths", Bureau of Mines - Minerals yearbook metals and minerals 2004 – Rare Earths, PDF-tiedosto, Saatavissa [14.10.2014]: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/raremyb04.pdf
- [37] Hedrick, James B, "2005 Minerals Yearbook - Rare Earths", U.S. Geological Survey, PDF-tiedosto, 2006, Saatavissa [14.10.2014]: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/raremyb05.pdf
- [38] Hedrick, James B, "2006 Minerals Yearbook - Rare Earths", U.S. Geological Survey, PDF-tiedosto, 2008, Saatavissa [14.10.2014]: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/myb1-2006-rare.pdf
- [39] Hedrick, James B, "2007 Minerals Yearbook - Rare Earths", U.S. Geological Survey, PDF-tiedosto, 2010, Saatavissa [14.10.2014]:

http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/myb1-2007-raree.pdf

- [40] Cordier, Daniel J; Hedrick, James B, "2008 Minerals Yearbook - Rare Earths", U.S. Geological Survey, PDF-tiedosto, 2010, Saatavissa [14.10.2014]: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/myb1-2008-raree.pdf
- [41] Cordier, Daniel J, "2009 Minerals Yearbook - Rare Earths", U.S. Geological Survey, PDF-tiedosto, 2011, Saatavissa [14.10.2014]: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/myb1-2009-raree.pdf
- [42] Gambogi, Joseph; Cordier, Daniel J, "2010 Minerals Yearbook - Rare Earths", U.S. Geological Survey, PDF-tiedosto, 2012, Saatavissa [14.10.2014]: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/myb1-2010-raree.pdf
- [43] Gambogi, Joseph, "2011 Minerals Yearbook – Rare Earths", U.S. Geological Survey, PDF-tiedosto, 2013, Saatavissa [14.10.2014]: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/myb1-2011-raree.pdf
- [44] Supermagnete, "Price development of neodymium magnets rare earth metals – supermagnete" verkkosivu, Viitattu 28.4.2014. Saatavissa: [14.10.2014] <http://web.archive.org/web/20131122074115/http://www.supermagnete.de/eng/faq/What-is-the-development-of-neodymium-magnet-prices>
- [45] Hurst, Cindy, "China's Rare Earth Elements Industry: What Can the West Learn?", IAGS, PDF-tiedosto, 2010, Saatavissa [8.9.2014]: <http://www.iags.org/rareearth0310hurst.pdf>
- [46] Juha Pyrhönen, "Sähkökäytöt", Sähkötekniikan osasto, LTY, 2009
- [47] Guglielmi, P., Pastorelli, M., Pellegrino, G., Vagati, A. "Position-Sensorless Control of Permanent-Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor", Industry Applications, IEEE Transactions on (Volume:40 , Issue: 2), Sivut 615 – 622, 2004
- [48] Merwerth Joerg, Halbedel Jens, Schlangen Guenter, "Electrical Drive Motor for a Vehicle", Yhdysvaltojen patenttihakemus N° 2012/0267977, 2012
- [49] Mitsubishi Motors, "2012 Mitsubishi i Features & Options", verkkosivu, Viitattu 14.10.2014. Saatavissa: [14.10.2014] <http://media.mitsubishicars.com/releases/b808200b-d9a6-486f-be19-26dd4ee9e3ba>

- [50] Mitsubishi Motors, ”2012 Mitsubishi i Technical Specifications”, verkkosivu, Viitattu 14.10.2014. Saatavissa: [14.10.2014] <http://media.mitsubishicars.com/releases/a9431c6d-6ba6-453c-9eb5-03362ef959ae>
- [51] Chery, ”The first QQ EV was delivered to customer”, verkkosivu, Viitattu 6.3.2014. Saatavissa: [14.10.2014] <http://cheryinternational.com.s11770.gridserver.com/en/node/983>
- [52] Wikipedia, ”Chery QQ”, verkkosivu, Viitattu 8.9.2014. Saatavissa: [20.10.2014] http://en.wikipedia.org/wiki/Chery_QQ
- [53] ChinaAutoWeb, ”JAC Delivers 500 J3 EVs (”ievs”)", verkkosivu, Viitattu 8.9.2014. Saatavissa: [20.10.2014] <http://chinaautoweb.com/2012/09/jac-delivers-500-j3-evs-ievs/>
- [54] Nissan USA, ”Nissan Leaf Specs”, Verkkosivu, Viitattu 8.9.2014. Saatavissa: [20.10.2014] <http://www.nissanusa.com/electric-cars/leaf/versions-specs/>
- [55] Nissan Motor Corporation, ”Nissan Leaf Spec”, Verkkosivu, Viitattu 6.3.2014. Saatavissa: [20.10.2014] <http://web.archive.org/web/20140414051459/http://www.nissan-zeroemission.com/EN/LEAF/specs.html>
- [56] Tekniikka & Talous, ”Nissan Leaf-sähköauto sai sata parannusta - mutta mitä sillä tekee?”, Verkkosivu, Viitattu 13.4.2014. Saatavissa: [20.10.2014] <http://www.tekniikkatalous.fi/autot/nissan+leafsahkoauto+sai+sata+parannusta++mutta+mita+silla+tekee/a893590>
- [57] TopSpeed, ”2013 Smart Fortwo electric drive”, Verkkosivu, Viitattu 6.3.2014. Saatavissa: [20.10.2014] <http://www.topspeed.com/cars/smart/2013-smart-fortwo-electric-drive-ar131228.html>
- [58] Wheego electric cars, ”Wheego Life Technical specifications”, Verkkosivu, Viitattu 6.3.2014. Saatavissa: [20.10.2014] <http://wheego.net/more/vehicles/specs/>
- [59] BYD, ”e6 Guide”, Verkkosivu, Viitattu 6.3.2014. Saatavissa: [20.10.2014] <http://web.archive.org/web/20140228151214/http://www.byd.com/na/auto/e6.html>
- [60] BYD, ”BYD e6 Specs”, Verkkosivu, Viitattu 6.3.2014. Saatavissa: [20.10.2014] <http://www.byd.com/la/auto/e6.html>
- [61] Renault, ”RENAULT FLUENCE Z.E.”, PDF-tiedosto, Viitattu 6.3.2014. Saatavissa: [20.10.2014] <http://www.renault.ie/media/e-brochures/att00426864/e-brochureFluenceZ.E..pdf>
- [62] Ford, ”Model: Focus Electric”, Verkkosivu, Viitattu 6.3.2014. Saatavissa: [20.10.2014] <http://www.ford.com/cars/focus/trim/electric/>

- [63] BMW, "BMW ActiveE Technical Data", PDF-tiedosto, Viitattu 6.3.2014. Saatavissa: [20.10.2014] http://content.bmwusa.com/bmw_xp2/content/pdf/TechSpecs.pdf
- [64] Car and Driver, "2012 BMW ActiveE", Verkkosivu, Viitattu 6.3.2014. Saatavissa: [20.10.2014] <http://www.caranddriver.com/reviews/2012-bmw-activee-first-drive-review>
- [65] Tesla, "Model S Specs", Verkkosivu, Viitattu 6.3.2014. Saatavissa: [20.10.2014] <http://www.teslamotors.com/models/specs>
- [66] Motor Trend, "2013 Motor Trend Car of the Year: Tesla Model S", Verkkosivu, Viitattu 6.3.2014. Saatavissa: [20.10.2014] http://www.motortrend.com/oftheyear/car/1301_2013_motor_trend_car_of_the_year_tesla_model_s/
- [67] Toyota, "RAV4 EV Features & Specs", Verkkosivu, Viitattu 6.3.2014. Saatavissa: [20.10.2014] http://www.toyota.com/rav4ev/features.html#!/mechanical_performance/4480
- [68] Renault, "Renault ZOE", Verkkosivu, Viitattu 6.3.2014. Saatavissa: [20.10.2014] <http://web.archive.org/web/20140401031347/http://www.renault.com/en/vehicules/aujourd-hui/renault-vehicules-electriques/pages/zoe.aspx>
- [69] ChinaAutoWeb, "All-Electric SAIC Roewe E50 Hits the Market at US\$37,589", Verkkosivu, Viitattu 6.3.2014. Saatavissa: [20.10.2014] <http://chinaautoweb.com/2012/11/all-electric-saic-roewe-e50-hits-the-market-at-us37589/>
- [70] MahindraREVA, "Mahindra e2o - Specifications", Verkkosivu, Viitattu 6.3.2014. Saatavissa: [20.10.2014] <http://mahindrareva.com/product/specifications.aspx>
- [71] Car and Driver, "2014 Chevrolet Spark EV", Verkkosivu, Viitattu 6.3.2014. Saatavissa: [20.10.2014] <http://www.caranddriver.com/reviews/2014-chevrolet-spark-ev-first-drive-review>
- [72] Green Car Congress, "Fiat introduces 2013 Fiat 500e EV at LA Auto Show; forget the Eco button", Verkkosivu, Viitattu 8.9.2014. Saatavissa: [20.10.2014] <http://www.greencarcongress.com/2012/11/500e-20121128.html>
- [73] Motor Trend, "2014 Volkswagen e-Up! First Drive", Verkkosivu, Viitattu 6.3.2014. Saatavissa: [20.10.2014] http://www.motortrend.com/roadtests/alternative/1309_2014_volkswagen_e_up_first_drive/

- [74] Tuulilasi, ”Vertailussa sähköautot: BMW i3, Renault Zoe ja VW E-Up”, Verkkosivu, Viitattu 6.3.2014. Saatavissa: [20.10.2014]
<http://www.tuulilasi.fi/uutiset/vertailussa-sahkoautot-bmw-i3-renault-zoe-ja-vw-e>
- [75] BMW, ”BMW i3 – Technical data”, Verkkosivu, Viitattu 6.3.2014. Saatavissa: [20.10.2014]
http://www.bmw.com/com/en/newvehicles/i/i3/2013/showroom/technical_data.html
- [76] Juha Pyrhönen, ” Design of an Electrical Machine”, Sähkötekniikan osasto, LTY, 2010
- [77] Mauri Peltola, ABB Drives, ”Slip of AC Induction Motors and How To Minimize it”, verkkosivu, Viitattu 8.9.2014. Saatavissa: [20.10.2014]
<http://www.mindconnection.com/library/electrical/motorslip.htm>
- [78] ABB, “Low voltage Process performance motors according to EU MEPS”, Tuotekatalogi, 2013, Saatavissa [20.10.2014]:
[http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/4926be1f5d4df488c1257bf7003aa496/\\$file/Catalog_Process_performance_acc_to_EU_MEPS_9AKK105944_EN%2010_2013_LOW.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/4926be1f5d4df488c1257bf7003aa496/$file/Catalog_Process_performance_acc_to_EU_MEPS_9AKK105944_EN%2010_2013_LOW.pdf)
- [79] ABB, “Synchronous reluctance motor-drive package for machine builders High performance for ultimate machine design”, Tuotekatalogi, 2014, Saatavissa [20.10.2014]:
[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/6221f62b43e3b136c1257c2a0022a479/\\$file/EN_SynRM_drive_package_for_machine%20builders_RevD.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/6221f62b43e3b136c1257c2a0022a479/$file/EN_SynRM_drive_package_for_machine%20builders_RevD.pdf)
- [80] P. Prochazka, I. Pazdera, P. Vorel, D. Cervinka, “Design of Small Electric Car”, Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2012 International Symposium on Sorrento, Sivut 359 - 364, 2012