

Erkka Helminen

SÄHKÖAUTOIHIN SOVELTUVAT SÄHKÖMOOTTORITYYPIT

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Paavo Rasilo
1/2020

TIIVISTELMÄ

Erkka Helminen: Sähköautoihin soveltuvat sähkömoottorityyppit
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikka
1/2020

Sähköautojen suosio on kasvanut nopeasti ilmastonmuutoksen myötä. Sähköautossa akun sähköenergian liike-energiaksi muuttaa sähkömoottori. Työssä perehdytään siihen, mitä ominaisuuksia sähköauton moottorilta vaaditaan. Työssä käydään myös läpi eri sähkömoottorityyppisiä, jotka sopivat ominaisuuksiensa puolesta käytettäviksi sähköautoissa. Eri moottorityyppien hyviä ja huonoja puolia tutkitaan ja niiden toimintaperiaatteisiin perehdytään.

Tämän hetken sähköautoissa suosituimpia moottoreita ovat induktiomoottori sekä kestmagnetoitu tahtimoottori. Induktio-moottorin suosiota selittää sen valmistustekniikan kehittyneisyys ja luotettavuus, kun taas kestmagnetoidulla tahtimoottorilla saavutetaan suuri vääntömomenttitiheys. Muita vaihtoehtoja sähköauton moottoriksi ovat vaihto-, kestmagnetoitu- ja synkroninen reluktanssimoottori, joiden etuna ovat pienemmät materiaalikulut. Työssä tutkitaan lisäksi harjatonta DC-moottoria sekä myös aksiaalivuomoottoreita, joiden suuri teho- ja vääntömomenttitiheys tekee niistä mielenkiintoisen vaihtoehdon sähköauton moottoriksi. Moottoreita vertaillaan ominaisuuksiensa ja hyötysuhdekarttojen avulla.

Avainsanat: Sähköauto, sähkömoottori

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla

SISÄLLYSLUETTELO

1. Johdanto.....	1
2. Sähköauton moottorin vaatimukset.....	2
3. Induktiomoottori.....	5
4. Tahtimoottorit.....	8
4.1 Kestomagnetoitu tahtimoottori.....	8
4.2 Synkroninen reluktanssimoottori.....	11
4.3 Kestomagnetoitu reluktanssimoottori.....	12
4.4 Vaihtoreluktanssimoottori.....	13
4.5 Harjaton DC-moottori.....	15
4.6 Aksiaalivuomoottorit.....	17
5. Sähkömoottorit nykypäivän sähköautoissa.....	20
6. Tulevaisuudennäkymät.....	21
7. Johtopäätökset.....	22
Lähteet.....	23

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutos on saanut sähköautot yleistymään nopeasti. Vuonna 2018 sähköautoja oli maailmassa jo 5,1 miljoonaa. Sähköautojen määrä kasvoi vuoteen 2017 verrattuna kahdella miljoonalla, mikä kuvastaa sitä, kuinka nopeaa sähköautojen yleistyminen on. [1] Monet valtiot ovat myös asettaneet tavoitteekseen luopua polttomoottori- ja dieselautoista ja siirtyä täyssähkö- tai hybridautoihin [2]. Sähköauto ei tuota ajettaessa hiilidioksidipäästöjä, joten se on hyvä vaihtoehto tieliikenteen päästöjen vähentämiseen. Liikenteen sähköistymisellä voidaan myös parantaa kaupunkien ilmanlaatua [3]. Suomessa sähköautojen verohelpotukset ja hankintatuki ovat lisänneet niihin kohdistuvaa kiinnostusta. Myös litium-ioniakkujen kehitys on ollut merkittävä seikka sähköautojen kehityksessä.

Sähköautojen yksi keskeisimpiä osia on sähkömoottori, joka muuttaa akun sähköenergian auton liike-energiaksi. Sähköautoissa moottoreilla on tiukemmat vaatimukset kuin esimerkiksi teollisuudessa, jossa esimerkiksi moottorin koolla ei ole niin suurta merkitystä kuin sähköautoissa. Pienestä koosta huolimatta moottorin suorituskyvyn ja hyötysuhteen tulisi kuitenkin olla hyvä. Tässä työssä tutkitaan, mitkä moottorityypit soveltuvat sähköautoihin, ja mitä sähköautoissa käytettäviltä moottoreilta vaaditaan. Työssä käydään läpi myös sähkömoottorien teoriaa.

Toisessa luvussa perehdytään sähköauton moottorin vaatimuksiin. Kolmannessa luvussa käydään läpi induktimoottorin teoriaa ja tutkitaan sen hyviä ja huonoja puolia sähköautokäytössä. Neljännessä luvussa käydään läpi tahtimoottoreista kestopagnetoitu tahtimoottori sekä synkroninen-, kestopagnetoitu- ja vaihtoreluktanssimoottori, sekä perehdytään näiden soveltuvuuteen sähköautoissa. Samassa luvussa perehdytään myös harjattomaan DC-moottoriin ja aksiaalivuomootoreihin. Viidennessä luvussa selvitetään, minkälaisia moottoreita tämänhetkisissä sähköautoissa käytetään, ja kuudennessa luvussa pohditaan sähköautojen moottorien tulevaisuudennäkymiä. Lopuksi seitsemännessä luvussa esitetään työn johtopäätökset.

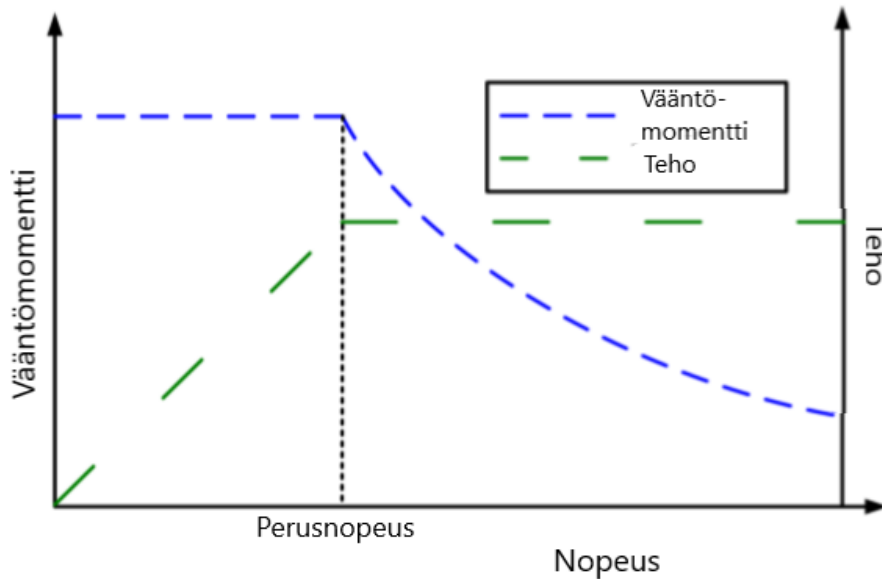
2. SÄHKÖAUTON MOOTTORIN VAATIMUKSET

Sähköauton moottorin pitää pystyä tuottamaan suuri teho suurilla nopeuksilla ajamista varten, sekä riittävän suuri vääntömomentti liikkeelle lähtöä, kiihdytyksiä ja mäkiajoa varten. Moottorin maksimivääntömomentti on tyypillisesti 4–5-kertainen nimellisvääntömomenttiin verrattuna. [4]

Painava moottori kasvattaa koko auton massaa ja huonontaa näin auton suorituskykyä. Tämän takia moottorin koon ja massan tulisi olla mahdollisimman pieni. [5] Moottorilta vaaditaan sen lisäksi myös suurta tehoa ja vääntömomenttia, eli moottorin teho- ja vääntömomenttiheyden tulee olla mahdollisimman hyvä [6]. Moottorissa käytettyjen magneettisten materiaalien tulisi kestää suuria magneettivuontiheyksiä, jotta moottorin tehotehiys voisi olla mahdollisimman hyvä. Käämityksissä käytettävien materiaalien sähköjohtavuuden tulisi olla mahdollisimman korkea ja tehohäviöiden mahdollisimman pienet. [7]

Teollisuuskäytössä sähkömoottoreille määritetään yleensä tietty optimaalisen hyötysuhteen piste, jolla moottorit toimivat. Sähköautokäytössä moottorin täytyy kuitenkin pystyä toimimaan hyvällä hyötysuhteella laajalla nopeus- ja vääntömomenttialueella. Sähkömoottoreita voidaan vertailla hyötysuhdekartan avulla. [8]

Sähköauton sähkömoottori toimii kahdella toiminta-alueella, jotka ovat vakiovääntömomentin alue ja vakiotehon alue. Vakiovääntömomentin alueella moottorin nopeus saadaan kasvamaan kasvattamalla syöttöjännitettä ja -taajuutta. Kun moottori saavuttaa perusnopeutensa, syöttöjännitettä ei voida enää nostaa. Tällöin siirrytään vakiotehon alueelle. Tällä alueella vääntömomentti laskee nopeuden kasvaessa, kuten kuvasta 1 näkyy. [9]

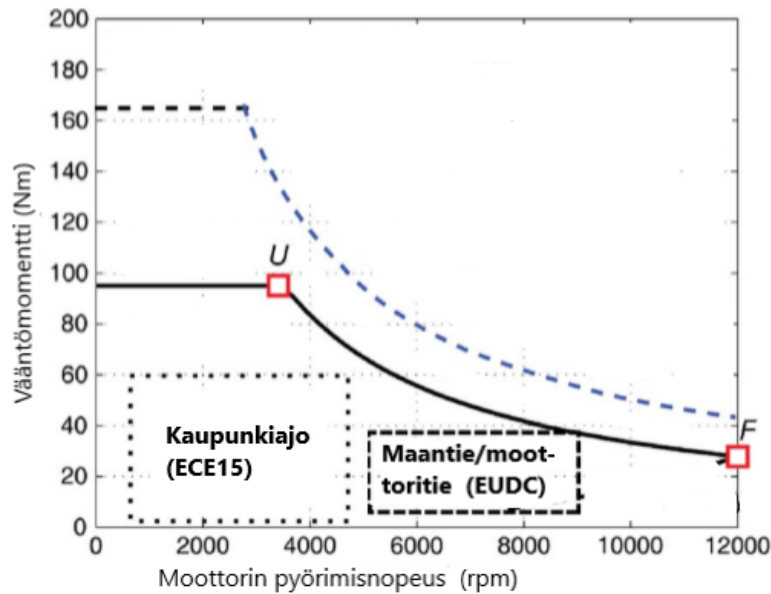


Kuva 1. Sähköauton vääntömomentti–teho-käyrä [9, muokattu].

Vakiotehon alueella moottorin vääntömomentti saadaan laskemaan ja nopeus kasvamaan heikentämällä magneettivuota [10]. Sähköautoissa moottorin vakiotehon alueen tulisi olla noin 3–4-kertainen perusnopeuteen verrattuna [11]. Vakiotehon alueen laajuutta voidaan kuvata moottorin maksiminopeuden ja perusnopeuden suhteella, jota kutsutaan nopeussuhteeksi. Jokaisella moottorityypillä on oma rajoitettu maksiminopeussuhteensa. Mitä suurempi nopeussuhde moottorilla on, sitä suuremman maksimivääntömomentin moottori pystyy tuottamaan. Suurempi vääntömomentti kasvattaa auton suorituskykyä kiihdytyksissä ja mäkiajossa, minkä vuoksi laaja vakiotehon alue on haluttu sähköauton moottorissa. [12]

Matalalla nopeudella ja korkealla vääntömomentilla ajettaessa moottorin hyötysuhde on yleensä matalimmillaan. Tehohäviöt ovat tällöin suuret, minkä vuoksi moottorin lämpötila nousee. [8] Moottorin käämityksillä ja kestopagneeteilla on tietyt lämpötilarajat, joiden ylittyessä niiden toimintakyky heikkenee. Moottorin kunnollinen jäähdytys on siis tärkeää, jotta moottori voi toimia kaikilla toiminta-alueillaan tarvittavan ajan. Sähköauton moottorin jäähdytyksessä voidaan käyttää esimerkiksi öljyä, nestemäistä typpeä tai vettä [13].

Kuvassa 2 on esitetty sähköauton moottorin vääntömomentti–nopeus-käyrä. Kuvaan on sijoitettu myös tyypilliset uuden eurooppalaisen ajosyklin mukaiset kaupunkiajon (ECE15) sekä maantie- ja moottoritieajon (EUDC) alueet.



Kuva 2. Sähköauton moottorin vääntömomentti–nopeus-käyrä [14, muokattu].

Kuvan 2 musta vääntömomenttikäyrä kuvaa vääntömomenttia, jonka auto pystyy tuottamaan jatkuvassa tilassa. Kuvassa on merkitty kirjaimella U vääntömomentti, joka määrittelee kuinka jyrkkää mäkeä autolla voi ajaa ylös jatkuvassa tilassa. F taas kuvaa auton moottorin maksiminopeutta tasaisella maalla. Katkoviivalla piirretty vääntömomenttikäyrä kuvaa maksimivääntömomenttia, jonka moottori pystyy hetkellisesti tuottamaan. Käytetyn invertterin maksimivirta rajoittaa maksimivääntömomenttia [14]. Moottori ei siis pysty tuottamaan maksimimomenttiaan jatkuvassa tilassa.

Sähköauton moottorin tulee olla myös luotettava, huoltoa kaipaamaton ja edullinen [11]. Moottorin pitää pystyä toimimaan myös generaattorina, jotta jarrutusenergiaa pystytään ottamaan talteen energiavarastoon regeneratiivisen jarruttamisen avulla. Regeneratiivisessa jarrutuksessa auton inertia saa moottorin toimimaan generaattorina, joka muuttaa auton liike-energiaa sähköenergiaksi akkuun [15]. Suurin osa sähkömoottoreista toimii myös generaattoreina [16].

3. INDUKTIOMOOTTORI

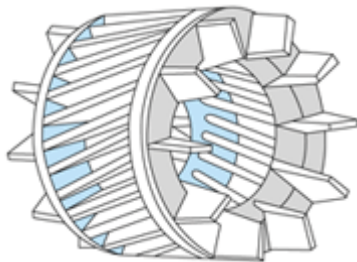
Vaihtosähkömoottorit jaetaan tahti- ja epätahtimoottoreihin. Epätahtimoottoreita kutsutaan myös induktiomoottoreiksi.

Yksivaiheisia induktiomoottoreita käytetään vain pienen tehon vaativissa systeemeissä, kun taas isomman teholuokan systeemeissä, kuten sähköautoissa, käytetään monivaiheisia induktiomoottoreita. Induktiomoottorit jaetaan oikosulkumoottoreihin ja vaihekäämiroottorisiin moottoreihin roottorin rakenteen perusteella. [17]

Kun induktiomoottorin staattorin käämitykseen syötetään kolmivaihevirtaa, syntyy pyöriävä voimakkuudeltaan vakiona pysyvä magneettikenttä. Magneettikentän mekaaninen nopeus on suoraan verrannollinen syötetyn jännitteen taajuuteen f ja kääntäen verrannollinen staattorin napaparien p määrään yhtälön

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

mukaisesti. Jos induktiomoottorin roottorissa on niin sanottu häkkikäämitys, sitä kutsutaan oikosulkumoottoriksi. Käämitys koostuu sauvoista, jotka on suljettu päädyissä olevilla renkailla. Tämän ansiosta virta pääsee kulkemaan roottorissa. Oikosulkumoottorin roottori on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Oikosulkumoottorin roottori [17].

Kun staattorin magneettivuoaalto kulkee roottorin sauvan ohi, se saa aikaan sähkökentän sauvaan yhtälön

$$\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B} \quad (2)$$

mukaisesti, jossa \vec{E} on syntynyt sähkökenttä, \vec{v} magneettivuoaaallon nopeus ja \vec{B} vuoaaallon vuontiheys. Sähkökentän myötä sauvoihin syntyy sähkövirta, ja näin ollen virralliseen sauvaan kohdistuu voima

$$F = BIl \sin \alpha , \quad (3)$$

joka saa roottorin pyörimään samaan suuntaan magneettivuon kanssa. Yhtälössä B on magneettivuon tiheys, I sähkövirran voimakkuus, l sauvan pituus ja α sauvan ja magneettikentän välinen kulma. Jos roottori pyörisi yhtä nopeasti kuin magneettikenttä, ei siihen kohdistuva magneettikenttä olisi muuttuva, eivätkä roottorin sauvat näin ollen koki niitä liikuttavaa voimaa. Roottori pyöriikin aina magneettivuoaaltoa pienemmällä nopeudella. Roottorin ja magneettivuoallon pyörimisnopeuksien eroa kuvataan jättämällä, joka saadaan kaavasta

$$s = \frac{N_s - N}{N_s}, \quad (4)$$

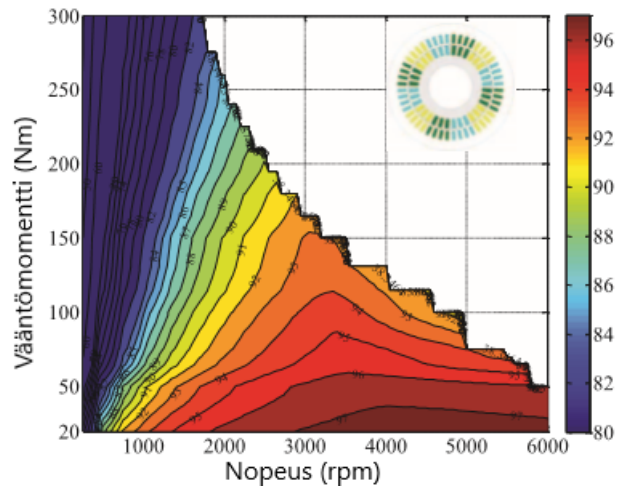
jossa s on jättämä ja N roottorin pyörimisnopeus.

Vaihekäämiroottorisessa moottorissa roottorissa on samanlainen käämitys kuin staattorissa. Jännitteet indusoituvat näihin käämityksiin samalla tavalla kuin häkkikäämityksen sauvoihin oikosulkumoottorissa. Vaihekäämiroottorin käämitys on yhdistetty liukurenkaiisiin, joiden avulla se voidaan kytkeä ulkoiseen impedanssiin moottoria käynnistettäessä. Näin moottorin käynnistysvaiheessa voidaan saavuttaa suurempi vääntömomentti. [16] Vaihekäämiroottorisen moottorin roottoriin voidaan myös syöttää halutun taajuinen jännite taajuusmuuttajalla.

Vaihekäämiroottorinen moottori on kuitenkin oikosulkumoottoria kalliimpi ja vaatii enemmän huoltoa. Tämän vuoksi sähköautoissa käytetään oikosulkumoottoria. [8]

Induktiomoottorit ovat käytetyin moottorityyppi teollisuudessa, ja niitä käytetään laajasti myös sähköautoissa [18]. Induktiomoottorien valmistustekniikka on kehittynyt ja niiden etuja ovat myös yksinkertainen rakenne ja kohtalaisen halpa hinta. Ne eivät vaadi huoltoa ja ne ovat luotettavia. [11] Induktiomoottorilla on myös mahdollista saavuttaa hyvä nopeussuhde, eli laaja vakiotehon alue [12].

Induktiomoottorit vaativat kuitenkin hyvän jäähdytysjärjestelmän, sillä lämpöhäviöitä syntyy sekä staattorissa että roottorissa [19]. Induktiomoottorin hyötysuhdekartta on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Induktiomoottorin hyötysuhdekartta [20, muokattu].

Kuvasta 4 nähdään, että induktiomoottorilla saavutetaan suurin hyötysuhde suurilla nopeuksilla. Matalilla nopeuksilla ja suurella vääntömomentilla hyötysuhde on kuitenkin huomattavasti heikompi.

4. TAHTIMOOTTORIT

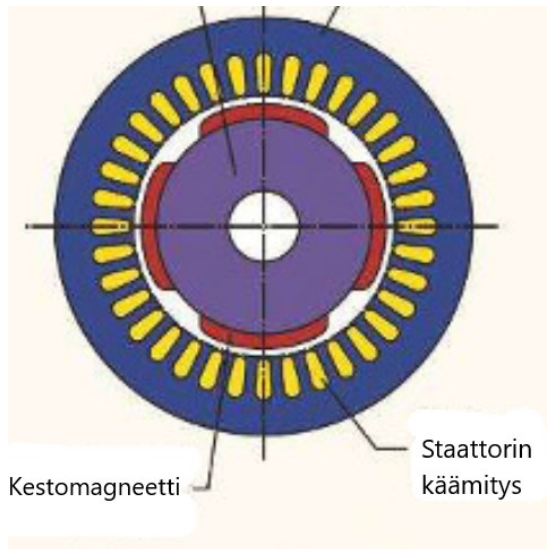
Perinteisessä tahtimoottorissa staattorin käämitykseen syötetään kolmivaihevirtaa, joka muodostaa pyörivän magneettikentän samalla tavalla kuin induktimoottorissakin. Tässä luvussa käsitellään tahtikoneista ne, joita sähköautoissa tyypillisesti käytetään ja ne, joilla on potentiaalia sähköauton moottoriksi.

4.1 Kestomagneetoitu tahtimoottori

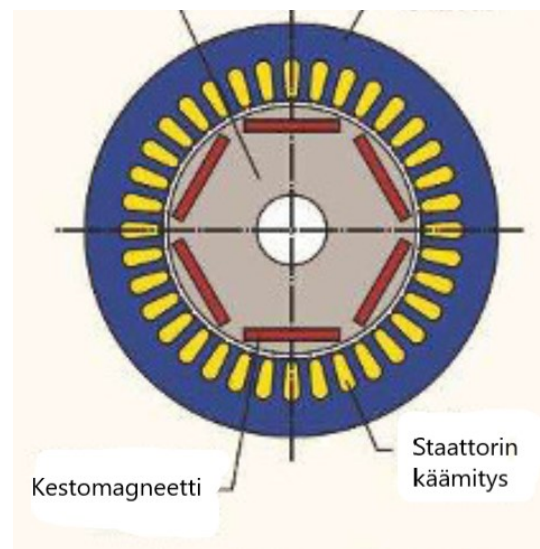
Sähköautoissa käytetään tahtikoneista yleensä kestopagneetoituja tahtimoottoreita, joiden roottori on kestopagneetoitu. Kun roottori pyörii samaan suuntaan kuin staattorin pyörivä magneettikenttä, magneettikentän ja roottorin kestopagneettien vastakkaiset navat alkavat vetää toisiaan puoleensa. Näin ollen roottori ikään kuin lukittautuu pyörimään samalla nopeudella kuin pyörivä magneettikenttä. [16]

Jos roottori on paikallaan, ei se kuitenkaan voi päästä magneettikentän vauhtiin. Roottorin kitkan vuoksi se ei pääse pyörimään paikaltaan lähtiessään kovin nopeasti, minkä vuoksi roottorin kestopagneetin napa ei pääse lukittautumaan pyörivän magneettikentän vastakkaiseen napaan ennen kuin sen kohdalle saapuu magneettikentän samanmerkinen napa, joka kohdistaa siihen vastustavan voiman. Tämän takia teollisuuskäytössä roottorissa saatetaan käyttää oikosulkukoneen häkkikäämitystä, jolloin moottori voidaan kytkeä suoraan verkkoon. Taajuudenmuuttajia käytettäessä tätä ongelmaa ei kuitenkaan ole, koska moottori voidaan käynnistää suoraan tahtiin. [16]

Kestomagneettikoneet voidaan jakaa pintamagneetti- ja uppomagneettikoneisiin riippuen siitä, miten kestopagneetit on kiinnitetty koneen roottoriin [16]. Pintamagneettikoneessa kestopagneetit on kiinnitetty roottorin pintaan kuvan 5(a) mukaisesti.



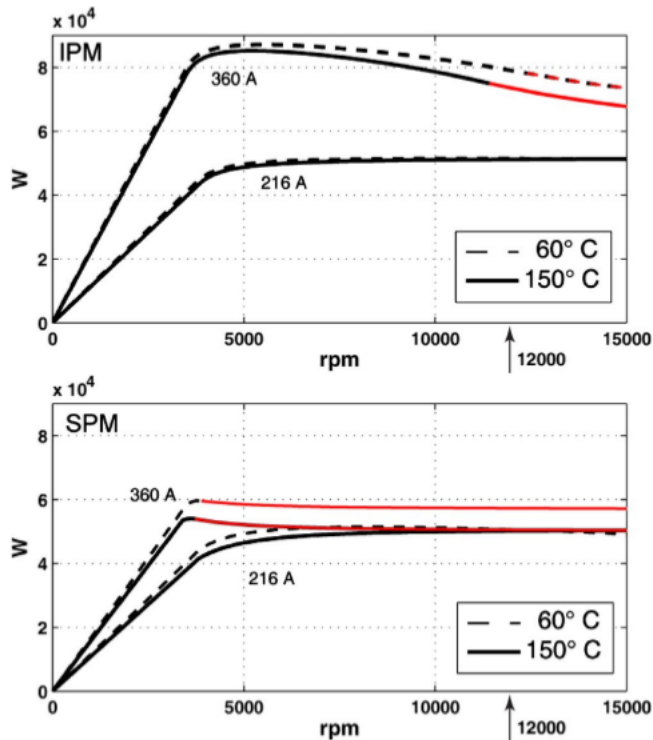
Kuva 5(a). Pintamagnetoitu tahtimoottori [21, muokattu].



Kuva 5(b). Uppomagnetoitu tahtimoottori [21, muokattu].

Pintamagneetikoneessa roottorin pitkittäis- ja poikittaisakselin induktanssit ovat suunnilleen yhtä suuret. Uppomagneetikoneessa magneetit taas on upotettu roottorin sisään kuvan 5(b) mukaisesti. Uppomagneetikoneessa pitkittäis- ja poikittaisinduktanssit ovat eri suuret, jolloin moottorin vääntömomenttiin vaikuttaa myös reluktanssin aiheuttama komponentti. Reluktanssimomenttia voidaan kasvattaa kasvattamalla koneen pitkittäis- ja poikittaisreaktanssien eroa. Moottorin tehokerroin kuitenkin pienenee reluktanssimomentin kasvaessa. [16]

Sekä pinta- että uppomagneetikoneita käytetään sähköisten kulkuneuvojen moottoreina, mutta uppomagneetikoneella saadaan suurempi vääntömomentti koko nopeusalueella. Kestomagneetit ovat myös vähemmän herkkiä suurille lämpötiloille uppomagnetoitussa tahtimoottorissa, kuten kuvasta 6 näkyy. [14]



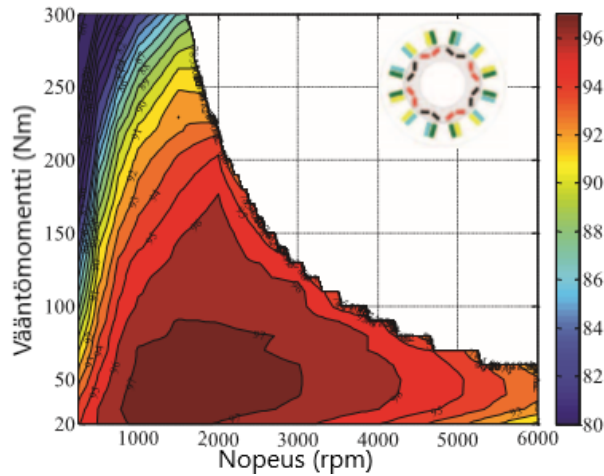
Kuva 6. Lämpötilan vaikutus kestopagnetoidun tahtimoottorin teho-nopeuskäyrään [14].

Ylempänä kuvassa 6 on uppomagnetoitu (IPM) ja alempana pintamagnetoitu (SPM) moottori. Kuvassa on vertailtu tehokäyrien käyttäytymistä nimellisvirralla (216 A) ja ylikuormitusvirralla (360 A) sekä erilaisilla kestopagneettien lämpötiloilla. Kuvassa käyrät muuttuvat punaisiksi, kun eri lämpötilojen tehokäyrät alkavat erota huomattavasti toisistaan [14]. Kuvasta 6 huomataan, että pintamagnetoidun moottorin eri lämpötilojen tehokäyrät alkavat erota toisistaan jo matalilla nopeuksilla. Uppomagnetoidun moottorin vastaavat tehokäyrät taas alkavat erota huomattavasti vasta korkeilla nopeuksilla.

Kestomagneettimoottori pystyy tuottamaan suuremman vääntömomentin kuin saman kokoinen induktimoottori tai reluktanssimoottori. Kestomagnetoidulla tahtimoottorilla on suuren vääntömomenttitiheyden lisäksi myös suuri tehotiheys, mikä tekee siitä varteenotettavan vaihtoehdon sähköautokäyttöön. [11, 8]

Kestomagneettien magneettiset ominaisuudet voivat kuitenkin heiketä korkeissa lämpötiloissa, minkä takia roottori vaatii hyvän jäähdytysjärjestelmän [16]. Toisaalta moottorin jäähdyttäminen on kuitenkin helppoa verrattuna induktimoottoriin, sillä roottorissa ei ole käämityksiä. Näin ollen lämpöhäviöitä tapahtuu suurimmaksi osaksi staattorissa, josta ne on helpompi hävittää tehokkaasti moottorista [8]. Roottorin kestopagneetit vaikeuttavat moottorin magneettivuon heikentämistä vakiotehon alueella, minkä takia moottorin nopeussuhde on pienempi kuin kestopagneettittomilla moottoreilla [12]. Moottorit ovat myös kalliita kestopagneettimateriaalien hinnan vuoksi [5]. Kestomagneettien osuus

koko moottoriin käytettyjen materiaalien hinnasta on noin 65% [22]. Kuvassa 7 on esitetty kestmagnetoidun tahtimoottorin hyötysuhdekartta.

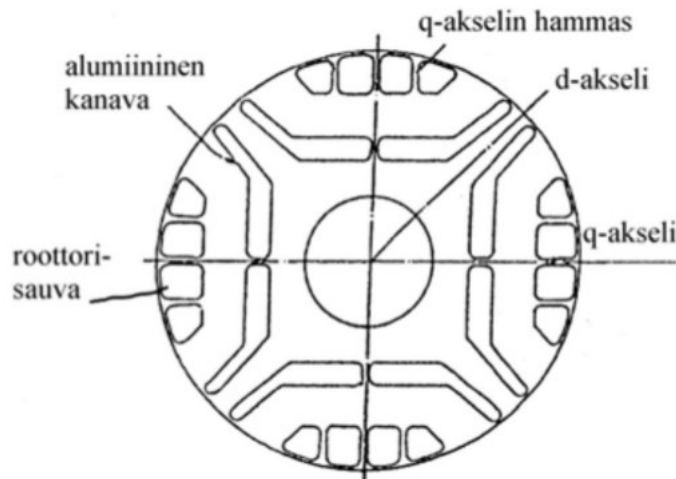


Kuva 7. Kestomagnetoidun tahtimoottorin hyötysuhdekartta [20, muokattu].

Kestomagnetoidun tahtimoottorin hyötysuhdekartasta nähdään hyötysuhteen olevan varsin hyvä varsinkin matalan nopeuden ja keskinopeuden alueella. Sähköautoilla ajo tapahtuu usein juuri näillä nopeusalueilla, joten moottorin voidaan todeta olevan hyötysuhteeltaan hyvä sähköautossa käytettäväksi [20].

4.2 Synkroninen reluktanssimoottori

Synkroninen reluktanssimoottori on ikään kuin tahtikone, jonka roottorista puuttuu magnetointi. Reluktanssimoottorissa staattorikämmitykseen syötetään kolmivaihevirtaa, joka muodostaa pyörivän magneettikentän. Roottorin liike perustuu siihen, että se pyrkii aina liikkumaan asentoon, jossa magneettipiirin reluktanssi on pienin. Jotta magneettinen vetovoima saisi aikaan riittävän vääntömomentin, pitää roottorin pitkittäis- ja poikittaisinduktanssien välisen erotuksen olla riittävän suuri. [16] Synkronisissa reluktanssimoottoreissa voi olla erilaisia roottoriratkaisuja. Kuvassa 8 on yhdenlainen synkronisen reluktanssimoottorin roottori.



Kuva 8. Synkronisen reluktanssimoottorin roottori [16].

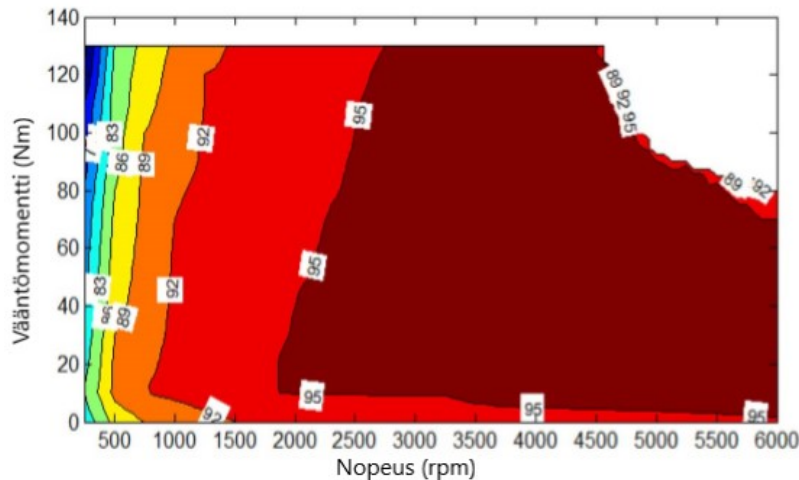
Roottorin pinnassa on alumiinisia sauvoja ja roottorin sisällä alumiinikanavia. Näiden permeabiliteetti on selvästi rautaa pienempi, joten ne kasvattavat poikittaisakselin suuntaista reluktanssia. Poikittaisakselin suuntainen induktanssi siis on pieni. Pitkittäisakselin suuntainen induktanssi on suuri, sillä ilmaväli on pieni. [16]

Synkronisen reluktanssimoottorin materiaalikustannukset ovat huomattavasti halvemmat verrattuna kestopagnetoiuihin moottoreihin, sillä siinä ei tarvita kestopagneetteja. Moottori voi myös toimia korkeissa lämpötiloissa ja suurilla sähkövirroilla, sillä vaaraa kestopagneettien vaurioitumisesta ei ole [8]. Sillä on kuitenkin muihin tahtimoottoreihin verrattuna alhainen vääntömomenttitiheys ja suuri vääntömomentin aaltoisuus [22].

4.3 Kestomagnetoitu reluktanssimoottori

Kestomagnetoidussa reluktanssimoottorissa roottorin ilmaväleihin on asennettu pieniä kestopagneetteja. Magneetteina voidaan käyttää ferriittiä, joka on halpaa verrattuna kestopagnetoiduissa tahtikoneissa käytettyihin materiaaleihin. [19] Ferriitti kestää myös huomattavasti kuumempia lämpötiloja kuin yleensä kestopagneettikoneissa käytetyt materiaalit [22].

Kestomagnetoinnin ansiosta moottorille saadaan parempi tehokerroin ja suurempi vääntömomenttitiheys synkroniseen reluktanssimoottoriin verrattuna [19]. Vaikka moottorin vääntömomenttikapasiteetti jää pienemmäksi kestopagnetoituun tahtimoottoriin verrattuna, moottorin materiaalikustannukset saattavat olla jopa 50 %:a pienemmät, mikä tekee siitä varteenotettavan vaihtoehdon sähköauton moottoriksi [22]. Kuvassa 9 on esitetty kestopagnetoidun reluktanssimoottorin hyötysuhdekartta.



Kuva 9. Kestomagnetoidun reluktanssimoottorin hyötysuhdekartta [22, muokattu].

Kuvasta 9 nähdään hyötysuhteen olevan hyvä jo matalilla nopeuksilla.

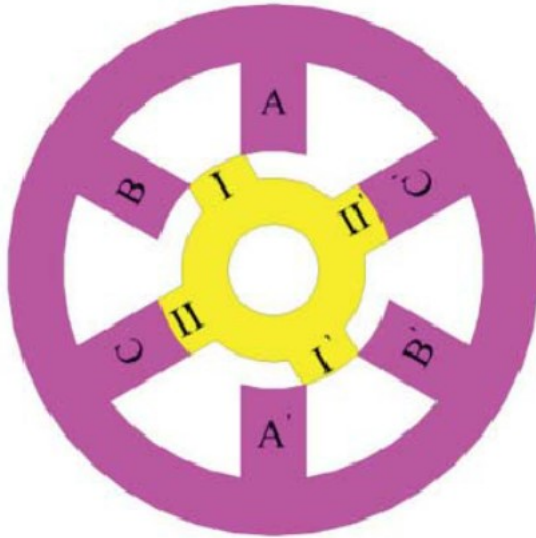
4.4 Vaihtoreluktanssimoottori

Vaihtoreluktanssimoottori on molemmin puolin avonapainen kone. Siinä on monivaiheinen käämitys staattorissa, mutta ei käämitystä tai kestopagnetointia roottorissa.

Vaihtoreluktanssimoottorissa käytetään yleensä kolmivaiheista 6/4 – napaista topologiaa tai 8/6 -napaista topologiaa. Näistä ensimmäisessä on kuusi napaa staattorissa ja neljä roottorissa, ja jälkimmäisessä kahdeksan napaa staattorissa ja kuusi roottorissa. 6/4 -napainen topologia on näistä halvempi, mutta tuottaa enemmän melua ja aaltoisuutta vääntömomenttiin. 8/6 -napaisella kone saavuttaa paremman alkuvääntömomentin ja vähemmän aaltoisuutta vääntömomenttiin, mutta vaatii enemmän suuntaajia ja tehoelektroniikkaa. [8]

Vaihtoreluktanssimoottorin staattori ja roottori ovat siis avonapaiset. Kun kuvan 9 staattorin käämiin kytketään magnetointivirta, staattorikäämitys aiheuttaa magnetomotorisen voiman ja vuon, joka lävistää roottorin ja ilmavälin [16]. Magneettivuon kulkualueen reluktanssi vaihtelee riippuen siitä missä asennossa roottori on. Vääntömomentin syntyminen perustuu siihen, että roottorin napa pyrkii liikkumaan staattorin magnetoidun navan kohdalle niin, että magneettisen vuon reluktanssi on pienin mahdollinen.

Kun kuvassa 10 esitetyn avonapaisen reluktanssimoottorin staattorin vaiheeseen A syötetään magnetointivirtaa, roottori alkaa liikkua myötäpäivään niin, että magneettipiirin reluktanssi on pienimmillään.

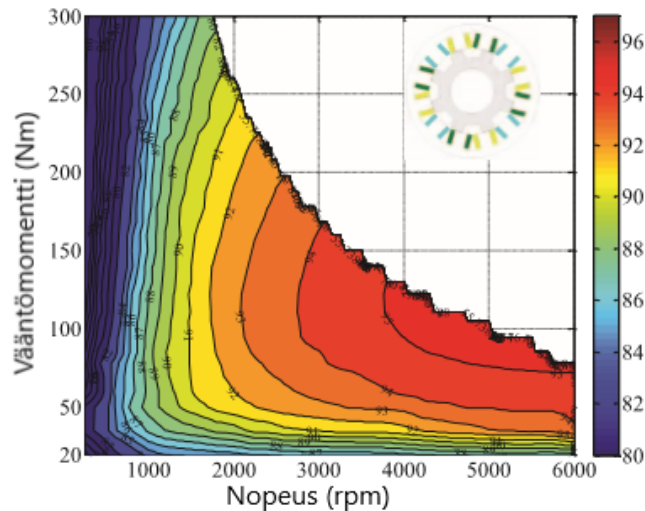


Kuva 10. Vaihtoreluktanssimoottori [8].

Roottorin I ja I' navat lukittautuvat siis staattorin A ja A' napojen kanssa. Tällöin virran syöttö vaiheeseen A lopetetaan ja syöttö siirretään tehokytkinsuuntajalla vaiheeseen B, jolloin roottorin vääntömomentti pyrkii siirtämään roottorin navat II ja II' kohdakkain staattorin napojen B ja B' kanssa, jossa magneettiipiirin reluktanssi on pienimmillään. Vaihtamalla virran syöttö vaiheeseen C, lukittuvat roottorin navat I ja I' staattorin napojen C ja C' kanssa. Johtamalla virtaa staattoriin tässä järjestyksessä roottori pyörii siis myötäpäivään. Yhteen roottorin pyörähdykseen vaaditaan siis 12 vaihtokytkemistä, mikä on vaiheiden määrä kerrottuna roottorin napojen määrällä. Jos napojen määrää siis kasvatetaan, tarvitaan korkeampi kytkentätaajuus. [8] Roottorin asentokulman tunnistamiseen käytetään yleensä anturia, mutta myös anturittomat ohjausmenetelmät ovat mahdollisia [23].

Vaihtoreluktanssimoottorin roottori ei sisällä magneetteja tai käämityksiä, ja sen rakenne on yksinkertainen ja vakaa. Tämän ansiosta se pystyy toimimaan korkeissa lämpötiloissa suurilla nopeuksilla. Vaihtoreluktanssimoottoreilla voidaan myös saavuttaa korkeampi nopeussuhde kuin muilla moottoreilla. [12] Roottorin käämitysten ja magneettien puuttuessa myös moottorin hinta on halvempi kuin esimerkiksi kestmagnetoidun tahtimoottorin [5]. Moottorin tehotehous on myös hyvä, mutta vääntömomenttitiheys on huonompi kuin kestmagnetoidulla tahtimoottorilla [22].

Vaihtoreluktanssimoottorissa vaaditaan pieni ilmaväli roottorin ja staattorin välissä, mikä tekee valmistuksesta hankalan. Äänihaitan ja vääntömomentin aaltoisuuden lisäksi haitaksi voidaan lukea myös se, että moottorin ohjaamiseen vaadittava suuri invertteri voi lisätä kustannuksia. [9] Kuvassa 11 on esitetty vaihtoreluktanssimoottorin hyötysuhdekartta.



Kuva 11. Vaihtoreluktanssimoottorin hyötysuhdekartta [20, muokattu].

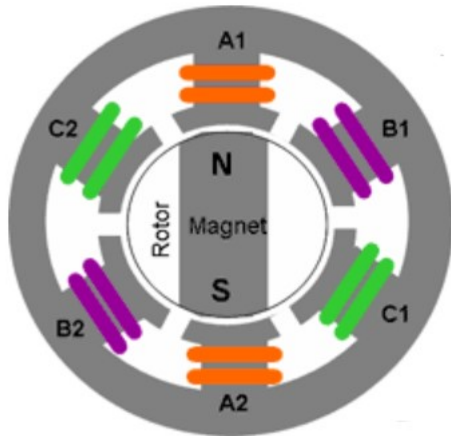
Vaihtoreluktanssimoottorin hyötysuhdekartasta nähdään, että paras hyötysuhde saavutetaan vasta nopeuden ollessa yli 4000 rpm ja vääntömomentin noin 100 Nm. Pienillä nopeuksilla ja matalalla vääntömomentilla moottorin hyötysuhde on huonoimmillaan. Toisin kuin kestmagnetoidussa tahtimoottorissa, hyvän hyötysuhteen alue kohdistuu vaihtoreluktanssimoottorissa siis suurille nopeuksille.

4.5 Harjaton DC-moottori

Perinteisiä DC- moottoreita ei juurikaan enää käytetä sähköautoissa niiden huonon hyötysuhteen ja tehotehden vuoksi. Näissä moottoreissa käytettävät hiiliharjat ja kommutaattorit vaativat myös säännöllistä huoltoa. Vaihtosähkömoottorit ovat pääasiassa syrjäyttäneet DC-moottorit sähköautoissa. [8]

Harjaton DC-moottori on rakenteeltaan samanlainen kuin kestmagnetoitu tahtimoottori. Harjattomassa DC-moottorissa staattorin käämitykseen syötetään suuntaajalla kantiaaltomuotoista jännitettä. [18]

Roottori on kestmagnetoitu ja staattorissa on käämitys, joka magnetoidaan syöttämällä siihen magnetointijännite. Kuvassa 12 näkyy harjattoman DC-moottorin rakenne.



Kuva 12. Harjaton DC-moottori [3].

Kuvan roottorin pyöriessä vastapäivään C-käämiin ja B-käämiin syötetään saman napainen jännite niin, että käämien päät C2 ja B2 ovat polariteetiltaan S, ja C1 ja B1 puolestaan polariteetiltaan N. Tällöin C2-pään S-napa vetää roottorin N-napaa puoleensa ja B1-pään N-napa taas muodostaa siihen hylkivän voiman. Kun roottorin navat lähestyvät C-käämiä, B-käämissä pidetään sama jännite, mutta aikaan C-käämin jännite nollataan. A-käämi magnetoidaan saman napaisella jännitteellä kuin B. Tällöin B2-pään S-napa vetää roottorin N-napaa puoleensa ja A1-pään N-napa muodostaa hylkivän voiman. Kun roottorin navat lähestyvät B-käämiä, sen jännite nollataan. Nyt C-käämi magnetoidaan niin, että sen jännite on polariteetiltaan vastakkainen siihen jännitteeseen verrattuna, jolla se viimeksi magnetoitiin. Näin C2-pään N-napa hylkii roottorin N-napaa ja päällä pidetty A-käämin A2-pään S-napa vetää sitä puoleensa. [18]

Käämien päitä voidaan kytkeä sarjaan niin, että syöttämällä yhteen käämiin virtaa, virta kulkee myös toisessa käämissä. Näin virtaa ei tarvitse syöttää erikseen molempiin käämeihin. [18] Harjattomissa DC-moottoreissa käytetään yleensä Hall-antureita roottorin asentokulman tunnistamiseen. [15]

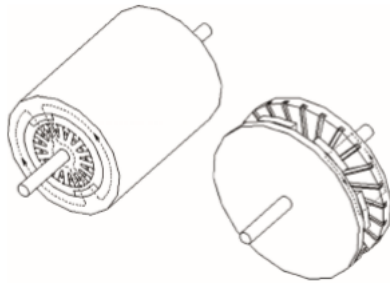
Koska roottorissa ei ole käämistä, sen kuparihäviöt puuttuvat ja näin ollen moottorin hyötysuhde kasvaa. Moottorin tehotehoisuus on myös kestopagneettien ansiosta korkea. Moottorin jäähdytys on helppoa, sillä lämpöhäviöitä esiintyy lähinnä vain staattorissa, josta ne on helppo johtaa tehokkaasti pois moottorista. [8] Harjattomien DC-moottorien ohjaus on myös helpompaa induktiomoottoriin ja kestopagneetoituun tahtimoottoriin verrattuna. [13, 24]

Johtuen kalliista kestopagneeteista kestopagneetoidut moottorit ovat kuitenkin kalliimpia kuin induktiomootorit sekä reluktanssimootorit [8]. Kestopagneetit huonontavat myös moottorin nopeussuhdetta [12]. Harjattomassa DC-moottorissa kestopagneetteja tarvi-

taan suuren teholuokan moottoreissa enemmän kuin kestmagnetoiduissa tahtimoottoreissa. Tämän takia niitä käytetäänkin usein hybridautoissa, joissa sähkömoottorilta ei vaadita yhtä suurta tehoa kuin täyssähköautossa. Harjattomia DC-moottoreita käytetään myös esimerkiksi auton ilmastointilaitteissa. [18]

4.6 Aksiaalivuomoottorit

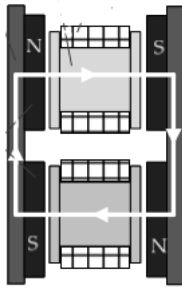
Aikaisemmin käsitellyt moottorit ovat olleet radiaalivuomoottoreita, eli niissä magneettivuon kulkusuunta on ollut moottorin akseliin nähden kohtisuorassa. Aksiaalivuomoottoreissa vuo kulkee akselin suuntaisesti. [16] Moottorien rakenteen erilaisuus näkyy kuvassa 13.



Kuva 13. Kuvassa vasemmalla radiaalivuomoottori ja oikealla aksiaalivuomoottori [25].

Radiaalivuomoottoreista periaatteessa jokaisella voisi olla vastaavan tyyppinen aksiaalivuomoottori. Käytännössä aksiaalivuomoottoreista sähköautoihin sopivia ovat kuitenkin kestmagnetoitu tahtimoottori ja harjaton DC-moottori. Esimerkiksi induktiomoottorin roottorin häkkikäämityksen valmistus on vaikeaa aksiaalivuomoottorille, minkä takia roottorille joudutaan keksimään muita ratkaisuja. Nämä kuitenkin laskevat moottorin suorituskykyä selkeästi, minkä vuoksi aksiaalivuotyypisiä induktiomoottoreita ei juurikaan toistaiseksi käytetä. [25]

Kuvassa 14 on havainnollistettu magneettivuon kulkua kestmagnetoidussa aksiaalivuomoottorissa, jossa on kaksi roottoria ja yksi staattori.

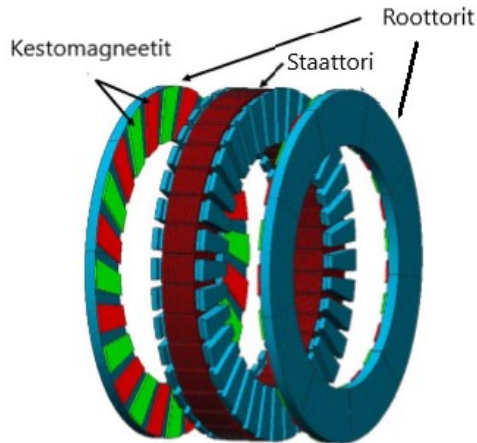


Kuva 14. Magneettivuon kulku aksiaalivuomoottorissa [26, muokattu].

Kuten kuvasta 14 nähdään, magneettivuo lähtee kulkemaan roottorin N-navasta moottorin akselin suuntaisesti, läpäisee ilmapälin ja staattorin, ja päättyy toisen roottorin S-napaan. Tämän jälkeen vuo kulkee saman roottorin N-napaan roottorin rungon kautta. Seuraavaksi magneettivuo kulkee jälleen ilmapälin ja staattorin läpi toisen roottorin S-navalle ja päättyy taas roottorin rungon kautta lähtöpisteeseen.

Kestomagnetoidussa aksiaalivuomoottorissa voi olla monenlaisia eri määriä staattoreita ja roottoreita; joko yksi staattori ja yksi roottori, tai esimerkiksi kaksi roottoria, joiden välissä on yksi staattori. Myös muunlaiset ratkaisut ovat mahdollisia, esimerkiksi kaksi staattoria, joiden välissä on yksi roottori. 1 staattori–1 roottori -tyyppisen aksiaalivuomoottorin valmistus on helpompaa 2 roottoria–1 staattori -tyyppiseen verrattuna, mutta se ei pysty tuottamaan yhtä suurta vääntömomenttia [25]. 2 roottoria–1 staattori -yhdistelmä onkin näistä paras vaihtoehto sähköauton moottorille [26]. Kestomagnetoiduilla aksiaalivuomoottoreilla on yleisesti suurempi tehotehiys, vääntömomenttitehiys sekä hyötysuhde verrattuna radiaalivuomoottoreihin [27]. Aksiaalivuomoottoreiden valmistaminen on kuitenkin vaikeaa, minkä takia niitä ei juurikaan ole käytössä vielä nykypäivän sähköautoissa [28].

YASA (Yokeless and segmented armature) -aksiaalivuomoottori kehitettiin juuri sähköisiä ajoneuvoja varten [26]. Kuvassa 15 on esitetty YASA-moottorin rakenne.



Kuva 15. YASA-akksiaalivuomoottorin rakenne [29, muokattu].

Moottorissa staattori on keskellä ja sen molemmin puolin ovat kestomagnetoidut roottorit. Staattori koostuu monista itsenäisistä segmenteistä, eikä staattorissa ole runkoa. Muihin aksiaalivuomoottoreihin verrattuna YASA-moottorilla on monia etuja. Keskitetty käämitys vähentää staattorin kuparihäviötä, ja staattorin rungon puuttuessa moottorin massa, koko ja häviöt ovat merkittävästi pienemmät kuin muissa aksiaalivuomoottoreissa. [29] YASA-moottorin hyötysuhde ja tehotiheys ovat perinteisiä aksiaalivuomoottoreita suuremmat [26]. YASA-akksiaalivuomoottori sopii siis ominaisuuksiensa puolesta hyvin sähköauton moottoriksi.

YASA-moottorin haasteena on kuitenkin sen vaikea valmistaminen. Tämä johtuu enimmäkseen moottorin monimutkaisesta rakenteesta, sekä suurista roottorien ja staattorin välillä vaikuttavista voimista, jotka voivat ei-toivotusti kasvattaa staattorin ja roottorien ilmaväliä. [29] Kestomagneetit roottorissa tekevät moottorista myös kalliin.

Aksiaalivuomoottorit voidaan sijoittaa auton akseleille tai suoraan auton renkasiin, jolloin niitä kutsutaan napamoottoreiksi. Tällöin sähkömoottorit kontrolloivat suoraan renkaan vääntömomenttia. Kun moottorit sijoitetaan suoraan renkasiin, tilaa jää autossa enemmän matkustajille ja tavaratilalle. Myös auton sisällä oleva sähköjärjestelmä yksinkertaistuu. Auton jousittamaton massa, eli auton jousituksen ja maan väliin jäävä massa, kuitenkin kasvaa. Jos auton jousittamaton massa on suuri, ajomukavuus kärsii ja jousituksen on vaikea pitää renkaat kontaktissa tiehen. Moottorien ollessa renkaissa on niiden myös kestettävä hyvin iskuja ja esimerkiksi vettä. [30]

5. SÄHKÖMOOTTORIT NYKYPÄIVÄN SÄHKÖ-AUTOISSA

Taulukkoon 1 on koottu nykyisissä autoissa käytettyjä sähkömoottoreita.

Taulukko 1: Sähköautojen moottorityyppejä

Auto	Moottori
BMW i3	Kestomagnetoitu reluktanssimoottori [7]
Tesla Model 3 Performance Dual Motor	Etuakselilla induktiomoottori, taka-akselilla kestopmagnetoitu tahtimoottori [31]
Mercedes-Benz EQC	Induktio-moottorit etu- ja taka-akselilla [32]
Audi e-Tron	Induktio-moottorit etu- ja taka-akselilla [7]
Jaguar I-Pace	Kestomagnetoitdut tahtimoottorit etu- ja taka-akselilla [7]
Kia Soul EV	Kestomagnetoitu tahtimoottori [7]
Fiat 500e	Kestomagnetoitu tahtimoottori [7]
Volkswagen e-Golf	Kestomagnetoitu tahtimoottori [7]
Tesla Model X	Induktio-moottorit etu- ja taka-akselilla [7]
Nissan Leaf	Kestomagnetoitu tahtimoottori [7]

Taulukosta 1 nähdään, että selkeästi suosituimmat moottorityypit tämän hetken sähköautoissa ovat induktio-moottori ja kestopmagnetoitu tahtimoottori. Pienemmissä autoissa moottoreita on usein vain yksi.

Suuremmissa autoissa taas moottoreita on yleensä kaksi, yksi etuakselilla ja toinen taka-akselilla. Taka-akselille sijoitettu moottori on yleensä tehokkaampi kuin etuakselin moottori. Esimerkiksi Mercedes-Benz EQC:ssa takamoottorin huipputeho on 162 kW ja etu-moottorin 148 kW [32]. Tesla Model 3 Performance Dual Motor:ssa moottorien tehoero on suurempi etumoottorin huipputehon ollessa 147 kW ja takamoottorin 211 kW [31].

6. TULEVAISUUDENNÄKYMÄT

Sähköautojen ongelmana vielä tällä hetkellä on niiden suuri hinta polttomoottoriautoihin verrattuna. Tällä perusteella myös niissä käytettävien moottorien kustannukset olisi tärkeää saada mahdollisimman pieniksi. Yleensä maametalleista tehtävien kestopagneettien käyttäminen moottoreissa nostaa niiden materiaalikuluja huomattavasti. Kestomagneettimateriaaleina käytetään yleensä sintrattua neodyymi-rauta-booria (NdFeB) [19].

Koko maailman maametalleista jopa 97% tuottaa Kiina [33]. Se vastaa siis yksin lähes koko maailman maametallien tuotannosta, minkä vuoksi se voi kontrolloida hintoja. Maametallien kasvava käyttö esimerkiksi elektroniikassa, sähköisissä ajoneuvoissa ja tuulivoimaloiden generaattoreissa voi mahdollisesti johtaa jopa maametallivarastojen ehtymiseen [19]. Tämä tukisi kestopagneettimien moottorien, eli induktiomoottorin ja reluktanssimoottorien yleistymistä sähköautoissa.

Prosessi, jossa maametallit louhitaan ja niistä valmistetaan kestopagneetteja, aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä eli kuormittaa ympäristöä. Maametallien kierrätys on myös vielä kehitysvaiheessa. [34] Reluktanssimoottorit ovat näin ollen ympäristöystävällisin vaihtoehto sähköauton moottoriksi. Sähköautoja tuetaan juuri siksi, että ne vähentäisivät hiilidioksidipäästöjä, joten oleellista olisi kiinnittää huomiota myös autossa käytettävän moottorin ympäristöystävällisyyteen. Myös tällä perusteella voisi odottaa reluktanssimoottorien yleistymistä sähköautoissa.

Myös aksiaalivuomoottoreiden osuus tulee luultavasti kasvamaan tulevaisuudessa niiden suuren vääntömomentti- ja tehosiheyden vuoksi, mikäli valmistusongelmat saadaan ratkaistua ja tuotanto kustannustehokkaaksi. Varsinkin YASA-aksiaalivuomoottori on hyvä vaihtoehto sähköautoihin, ja muutama valmistaja on jo tuonutkin omia YASA-moottoreitaan markkinoille [28]. YASA-moottori voidaan valmistaa myös korvaamalla kestopagneettien maametallit ferriitillä, mikä laskee moottorin suorituskykyä, mutta alentaa materiaalikuluja [27].

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä tutkittiin, mitä sähköautoissa käytettäviltä sähkömoottoreilta vaaditaan. Valittaessa moottoria sähköautoon, tulee huomioida myös mitä autolta vaaditaan. Esimerkiksi urheiluauton moottoria valittaessa tärkeää on suuri vääntömomentti- ja tehotehiys, mutta hinnalla ei välttämättä ole suurta merkitystä. Tällöin paras vaihtoehto vertailun perusteella on YASA-aksiaalivuomoottori. Edullista ja pienikokoista henkilöautoa suunniteltaessa hinta taas huomioidaan tarkasti, mutta moottorin suorituskyvyn ei tarvitse olla urheiluauton veroinen. Tällöin valinta voisi kohdistua johonkin reluktanssimoottoreista niiden edullisten materiaalikustannusten vuoksi.

Työssä tutkittiin eri moottorien toimintaperiaatteita ja ominaisuuksia. Moottoreita vertailtiin vääntömomentti- ja tehotehiyksensä, hyötysuhteidensa ja nopeussuhteidensa avulla. Mahdollisia sähköautoon sopivia moottorityyppejä on monta, ja niistä jokaisella on omat hyvät ja huonot puolensa. Teollisuudessa on totuttu käyttämään induktiomoottoreita, mikä voi osaltaan selittää niiden suosiota myös sähköautoissa. Kalliista hinnastaan huolimatta myös kestonagnetoidut tahtimoottorit ovat toistaiseksi suosittuja kaupallisissa sähköautoissa. Tästä voidaan päätellä, että suuret autovalmistajat kiinnittävät enemmän huomiota moottorin vääntömomentti- ja tehotehiyteen sen sijaan, että käyttäisivät autoissaan materiaalikustannuksiltaan edullisimpia moottoreita.

Kestomagnetoitu tahtimoottori todettiin suuren teholuokan moottoreita vertailtaessa edullisemmaksi kuin harjaton DC-moottori. Toisaalta harjaton DC-moottori on helpomman ohjauksensa vuoksi hyvä vaihtoehto ajoneuvoihin, joihin riittää teholtaan pienempi moottori kuin täyssähköautoihin. Hybridiautojen lisäksi sitä voidaan siis käyttää myös esimerkiksi sähkömopoissa ja kevyissä sähköajoneuvoissa.

Synkronista reluktanssimoottoria voidaan pitää alhaisen vääntömomenttitehiydensä vuoksi vertailun heikoimpana vaihtoehtona. Kuten työssä todettiin, kestonagneettien lisääminen reluktanssimoottorin roottoriin parantaa sen vääntömomenttitehiyttä. Kestomagnetoitu reluktanssimoottori onkin tämän takia hyvä vaihtoehto sähköautoon. Toistaiseksi se onkin reluktanssimoottoreista ainoa, joka on käytössä kaupallisissa sähköautoissa. Myös vaihtoreluktanssimoottorilla on kuitenkin suuren nopeussuhteensa ansiosta hyvät edellytykset sähköautoissa käytettäväksi.

LÄHTEET

- [1] IEA (2019), "Global EV Outlook 2019", IEA, Paris, www.iea.org/publications/reports/globalevoutlook2019/. (Viitattu: 23.10.2019)
- [2] Crabtree, G. 2019, "The coming electric vehicle transformation", *SCIENCE*, vol. 366, no. 6464, pp. 422–424.
- [3] Soret, A., Guevara, M. & Baldasano, J.M. 2014, "The potential impacts of electric vehicles on air quality in the urban areas of Barcelona and Madrid (Spain)", *Atmospheric Environment*, vol. 99, pp. 51–63.
- [4] Fallah, M.S., Goodarzi, A. & Khajepour, A. 2014, *Electric and hybrid vehicles: technologies, modeling and control : a mechatronic approach*
- [5] Kumar, K., Pindoriya, R. M., Rajpurohit, B. S., & Srivastava, K. N. , "Comparative analysis of permanent magnet motors and switched reluctance motors capabilities for electric and hybrid electric vehicles," *2018 IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNxT)*, New Delhi, 2018, pp. 1–5.
- [6] Xu, W., Zhu, J., Guo, Y., Wang, S., Wang, Y. & Shi, Z. 2009, "Survey on electrical machines in electrical vehicles", *IEEE*, , pp. 167–170.
- [7] Ramesh, P. & Lenin, N.C. 2019, "High Power Density Electrical Machines for Electric Vehicles--Comprehensive Review Based on Material Technology", *IEEE Transactions on Magnetics*, , pp. 1–21.
- [8] Chau, K.T. 2015, *Electric vehicle machines and drives: design, analysis and application*, 1st edn, IEEE, Singapore.
- [9] Alamoudi, Y.A., Ferrah, A., Panduranga, R., Althobaiti, A. & Mulolani, F. 2019, "State-of-the Art Electrical Machines for Modern Electric Vehicles", *IEEE*, pp. 1–8.
- [10] Hao, Q., Mascarella, D. & Joos, G. 2014, "Flux-weakening loop design for EV drive with permanent magnet synchronous motor", *IEEE*, pp. 1–5.

- [11] Z. Q. Zhu and D. Howe, "Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 746–765, April 2007.
- [12] Ehsani, M., Emadi, A. & Gao, Y. 2017, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design, Second Edition*, 2nd edn, CRC Press.
- [13] Lee, K., Cha, H. & Kim, Y. 2016, "Development of an interior permanent magnet motor through rotor cooling for electric vehicles", *Applied Thermal Engineering*, vol. 95, pp. 348–356.
- [14] Pellegrino, G., Vagati, A., Boazzo, B. & Guglielmi, P. 2012, "Comparison of Induction and PM Synchronous Motor Drives for EV Application Including Design Examples", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 6, pp. 2322–2332.
- [15] Nian, X., Peng, F. & Zhang, H. 2014, "Regenerative Braking System of Electric Vehicle Driven by Brushless DC Motor", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 10, pp. 5798–5808.
- [16] J. Bastman, Sähkökoneet-opintomoniste, Sähkökoneet-kurssi, Tampereen teknillinen yliopisto, 2018, 172 s.
- [17] Conrad, Albert G. "Induction Motor." *AccessScience*, McGraw-Hill Education, 2014.
- [18] J. Rekola, Luentodiat ja luentotalenne, Electrical energy storages and electric vehicles -kurssi, Tampereen teknillinen yliopisto, 2018
- [19] I. Boldea, L. N. Tutelea, L. Parsa and D. Dorrell, "Automotive Electric Propulsion Systems With Reduced or No Permanent Magnets: An Overview," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 10, pp. 5696–5711, Oct. 2014.
- [20] Z. Yang, F. Shang, I. P. Brown and M. Krishnamurthy, "Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, no. 3, pp. 245–254, Oct. 2015.
- [21] Control engineering, Understanding permanent magnet motors, Saatavissa: <https://www.controleng.com/articles/understanding-permanent-magnet-motors/> (Viitattu: 13.11.2019)

- [22] Cai, H., Guan, B. & Xu, L. 2014, "Low-Cost Ferrite PM-Assisted Synchronous Reluctance Machine for Electric Vehicles", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 10, pp. 5741–5748.
- [23] Ehsani, M. & Fahimi, B. 2002, "Elimination of position sensors in switched reluctance motor drives: state of the art and future trends", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 40–47
- [24] Sakunthala, S., Kiranmayi, R. & Mandadi, P.N. ;2018;; "A study on industrial motor drives: Comparison and applications of PMSM and BLDC motor drives", *IEEE*, , pp. 537–540 .
- [25] Gieras, J.F., Kamper, M.J. & Wang, R. 2008, *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*, 2nd; edn, Springer Netherlands, Dordrecht.
- [26] Wang, X., Xu, S., Li, C., Li, X., Chunpeng Li, Xiaoyuan Wang, Sijia Xu & Xiang Li 2017, "Field-weakening performance improvement of the yokeless and segmented armature axial flux motor for electric vehicles", *Energies*, vol. 10, no. 10, pp. 1492–1503.
- [27] Wang, Y., Lu, J., Liu, C., Lei, G., Guo, Y. & Zhu, J. 2019, "Development of a High-Performance Axial Flux PM Machine With SMC Cores for Electric Vehicle Application", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 55, no. 7, pp. 1–4.
- [28] Moreels, D. 2018, "Axial-Flux Motors and Generators Shrink Size, Weight", *Machine Design*, [Online]
- [29] Zhang, B., Seidler, T., Dierken, R. & Doppelbauer, M., 2015, "Development of a Yokeless and Segmented Armature Axial Flux Machine", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 4, pp. 2062–2071.
- [30] Xinbo, C., Cheng, G. & Jianfei, Z. 2016, "Integration development of electric wheel with unsprung mass reduction", Fisita (UK) Limited, Stansted.
- [31] Mehisto, R., "Koeajo: Tesla Model 3 Performance Dual Motor", *Tekniikan maailma*, no. 8, 2019, pp.32–39
- [32] Mehisto, R., "Koeajo: Mercedes-Benz EQC 400 4Matic Edition 1886", *Tekniikan maailma*, no. 16, 2019, pp.38– 45
- [33] P. Xue and J. Lin, "Discussion on the Rare earth resources and its development potential of Inner Mongolia of China," *2011 International Conference on Materials for Renewable Energy & Environment*, Shanghai, 2011, pp. 9–12

- [34] Haque, N., Hughes, A., Lim, S. & Vernon, C. 2014, "Rare earth elements: Overview of mining, mineralogy, uses, sustainability and environmental impact", *Resources*, vol. 3, no. 4, pp. 614-635.