Täyssähköisen henkilöauton moottorityypit
Electric motors in electric vehicles

Veera Vertanen

Kandidaatintyö
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikka

17.12.2020

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Veera Vertanen
Täyssähköisen henkilöauton moottorityypit

2020

Kandidaatintyö.
24 s.
Tarkastaja: TkT Pia Lindh

Avainsanat: Täyssähköinen henkilöauto, sähkömoottori, sähköauton kantama

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on selvittää täyssähköiseen henkilöautoon soveltuvat moottorityypit. Työssä vertaillaan suosituimpien moottorityyppien ominaisuuksia ja soveltuvuutta sähköajoneuvoihin. Lisäksi pohditaan, mitkä ovat sähköauton moottorivaatimukset, ja mitkä asiat vaikuttavat ajoneuvon ajokantamaan.

Työ tehdään kirjallisuustutkimuksena käyttäen lähteinä vertaisarvioituja tiedejulkaisuja viime vuosilta. Aihe on rajattu täyssähköisiin henkilöautoihin, koska ne ovat täysin riippuvaisia omasta akustostaan ja sähkömoottorista, minkä takia moottorin valintaan ja suunnitteluun tulee kiinnittää erityisen paljon huomiota. Työssä todetaan, että moottorisuunnittelulla voidaan vaikuttaa ajoneuvon hyötysuhteeseen ja siten lisätä ajokantamaa. Keskeisimpiä asioita moottorisuunnittelussa ovat moottorin koko, materiaalivalinnat ja ajoneuvon vaatima suorituskyky.

Nykypäivänä täyssähköisissä henkilöautoissa suosituimpia moottorityyppejä ovat induktiomoottori ja kestomagnetoitu tahtimoottori. Kestomagnetoiduilla moottoreilla on erinomainen suorituskyky, mutta kestomagneettien huonon saatavuuden ja korkean hinnan takia on syytä tutkia ja kehittää uusia moottoriratkaisuja. Synkronisella reluktanssikoneella on hyvä potentiaali tulevaisuuden täyssähköisiin henkilöautoihin. Säätöjärjestelmien kehittyessä myös kytkijäkäyttöinen reluktanssikone pystyy vastaamaan sähköauton moottorivaatimuksiin.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT
School of Energy Systems
Electrical Engineering

Veera Vertanen
Electric motors in electric vehicles

2020

Bachelor's Thesis.
24 p.
Examiner: Dr. Pia Lindh

Key words: Electric vehicle, electric motor, driving range

The purpose of this bachelor's thesis is to determine suitable electric motor types for an electric passenger car. This is done by comparing the features of the most common electric motors and their suitability for an electric vehicle. In addition, it is considered what are the requirements for an electric vehicle's motor and what affects to the driving range.

The work is done by literature research by using recent, reviewed scientific publication as a reference. The topic of this thesis is limited to fully electric vehicles as they are completely dependent of the source of energy and electric motor of their own which is why the motor selection and design is more critical. The thesis states motor design can affect the efficiency of a vehicle and therefore increase the driving range. The most essential things in electric motor design are the size of the motor, material choices and the required performance of the electric vehicle.

Currently the most popular electric motors in electric vehicles are induction motor and permanent magnet synchronous motor. Permanent magnet synchronous motor has excellent performance but because of the rare materials and relatively high price it should be considered to find and develop new solutions. Synchronous reluctance motor has a great potential in future electric cars. Switched reluctance motor can also meet the requirements of electric vehicle when control systems are improved.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1. Johdanto ... 6
   1.1 Moottorivaatimukset ... 7
2. AC Moottorit ... 9
   2.1 Induktiomoottori (IM) ... 9
   2.2 Kestomagnetoitu tahtikone (PMSM) ... 10
   2.3 Harjaton DC (BLDC) ... 11
   2.4 Synkroninen reluktanssikone ... 12
3. DC moottorit ... 13
   3.1 Tasavirtakone ... 13
   3.2 Reluktanssikone ... 13
4. Akku ... 15
   4.1 Regeneratiivinen jarrutus ... 16
5. Moottorien hinta ... 17
6. Sähkömoottorit nykypäivän täyssähköautoissa ... 18
7. Yhteenveto ... 20
   7.1 Sähköautojen tulevaisuus ... 21

Lähteet ... 22

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

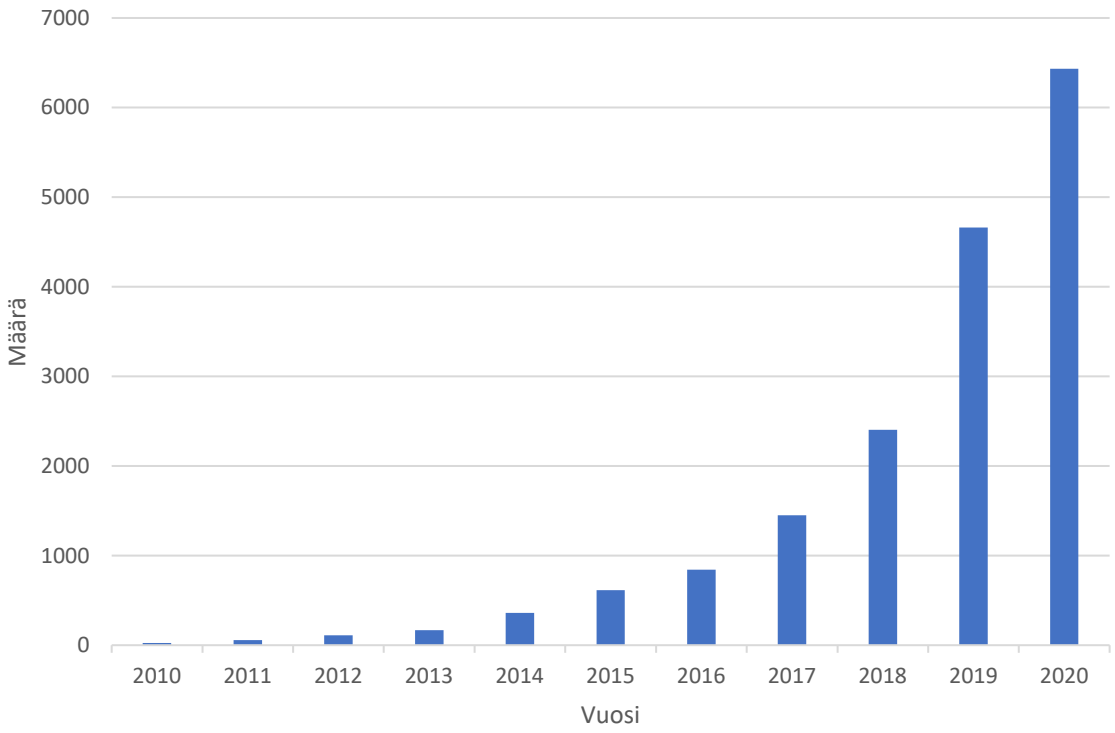
AC	Alternating current, vaihtovirta
BLAC	Brushless AC motor, harjaton vaihtovirtakone
BLDC	Brushless DC motor, harjaton tasavirtakone
DC	Direct current, tasavirta
DTC	Direct torque control, suora vääntömomenttisäätö
EV	Electric vehicle, sähköajoneuvo
IM	Induction machine, induktiomoottori
IPM	Interior permanent magnet, uppoasennettu kestomagnetoitu tahtikone
IMCCR	Induction motor with compound cage rotor
PMSM	Permanent magnet synchronous motor, kestomagnetoitu tahtikone
SPM	Surface permanent magnet, pinta-asennettu kestomagnetoitu tahtikone

P	teho
T	vääntömomentti

1. JOHDANTO

Suomessa noin viidenneksen kasvihuonekaasupäästöistä tuottaa liikenne. Tavoitteena on puolittaa liikenteen kasvihuonekaasupäästöt vuoteen 2030 mennessä. (Valtioneuvosto, 2020) Viime vuosikymmeninä liikennettä ovat dominoineet polttomoottorikäyttöiset ajoneuvot. Sähköautot (EV) voivat olla täysin päästöttömiä riippuen sähköenergialähteestään, joten niiden avulla voidaan saavuttaa päästötavoitteet. (Khajepour et al. 2014) Akku- ja moottoriteknologian kehityksen myötä sähköajoneuvot ovatkin paras vaihtoehto perinteisille polttomoottorikäyttöisille ajoneuvoille (Nian et al. 2014).

Ennusteen mukaan Suomessa on vuonna 2030 noin 350 000 sähkökäyttöistä autoa. (Valtioneuvosto, 2020) Tähän mennessä Suomessa on liikennekäytössä noin 6500 täyssähköistä henkilöautoa (Kuva 1). Sähköautokannan kasvattaminen vaatii vielä teknologian kehitystä. Toistaiseksi akut ja latausverkosto rajoittavat sähköautojen yleistymistä, koska ne vaikuttavat sähköauton ajokantamaan (Khajepour et al. 2014). On siis syytä tutkia sähköautojen moottoriratkaisuja, koska niiden hyötysuhteen maksimoinnilla voidaan vaikuttaa ajokantamaan (Yang et al. 2020).



Kuva 1. Liikennekäytössä olevien täyssähköautojen määrä Suomessa vuosina 2010–2020. (Autoalan tiedoituskeskus, 2020)

Sähköajoneuvojen etuja ovat parempi hyötysuhde verrattuna polttomoottoriajoneuvoihin ja mahdollisuus vähentää kasvihuonekaasupäästöjä merkittävästi. Tämä edistää maiden poliittista tukea sähköisten voimansiirtojen kehittämisessä ja käyttöönotossa. Vuoden 2020 kesäkuuhun mennessä Suomen lisäksi 16 muuta maata on ilmoittanut tavoitteekseen siirtyä 100 % päästöttömiin ajoneuvoihin vuoteen 2050 mennessä. (Global EV Outlook, 2020)

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää, minkälaisia sähkömoottorityyppejä käytetään nykyään täyssähköisissä henkilöautoissa. Aihe on rajattu täyssähköisiin henkilöautoihin sen takia, koska ne ovat täysin riippuvaisia akustostaan ja sähkömoottorista. Työssä vertaillaan eri sähkömoottorivalintojen hyviä ja huonoja puolia. Lisäksi otetaan kantaa siihen, mitkä asiat vaikuttavat moottorin tehokkuuteen ja sähköauton ajokantamaan.

Tutkimus on tehty kirjallisuustyönä selvittäen aiemmin tehtyjen tutkimusten perusteella eri moottorien keskeisiä ominaisuuksia. Lähteiksi on valittu vertaisarvioituja julkaisuja ja kirjallisuutta lähivuosilta mahdollisimman tuoreen tiedon tuottamiseksi.

Ensimmäisenä työssä käydään läpi sähköauton moottorivaatimukset, jonka jälkeen käsitellään kuusi yleisintä sähkömoottorityyppiä. Tämän jälkeen tutustutaan lyhyesti sähköauton akkuihin ja ajokantamaan vaikuttaviin tekijöihin sekä pohditaan moottorin hinnan muodostumista. Lisäksi esitellään kuusi täyssähköistä henkilöautoa. Lopuksi yhteenvedossa kootaan eri sähkömoottorien vahvuudet ja heikkoudet ja pohditaan sähköautojen tulevaisuutta.

1.1 Moottorivaatimukset

Moottorivalinnalla on keskeinen merkitys sähköauton tehokkuuden ja suorituskyvyn kannalta. Perusominaisuuksia koskevat vaatimukset sähkömoottorille ovat suuri teho- ja vääntömomenttitiheys. Moottorilta vaaditaan korkeaa hyötysuhdetta laajoilla nopeus- ja vääntöalueilla. Lisäksi moottorin tulee olla luotettava. Se ei saa olla liian äänekäs tai kallis. Jännitteensäädön tulee olla hyvä suurella nopeudella (Xu et al. 2009) Tehokkaiden säätöjärjestelmien avulla voidaan parantaa myös sähköautojen suorituskykyä ja kantamaa (Emadi et al. 2008).

Sähkömoottorin materiaalivalinnoilla on myös merkitystä, jotta saadaan hyvä suorituskyky nähden kompaktiin kokoon. Tehotiheys riippuu sekä sähköisestä että magneettisesta kuormasta. Magneettisen materiaalin tulee kestää korkeita vuotiheyksiä. Lisäksi moottorin siivekkeissä käytettävällä johtavalla materiaalilla pitäisi olla korkea sähkön- ja lämmönjohtokyky pienillä häviöillä. (Ramesh et al. 2019)

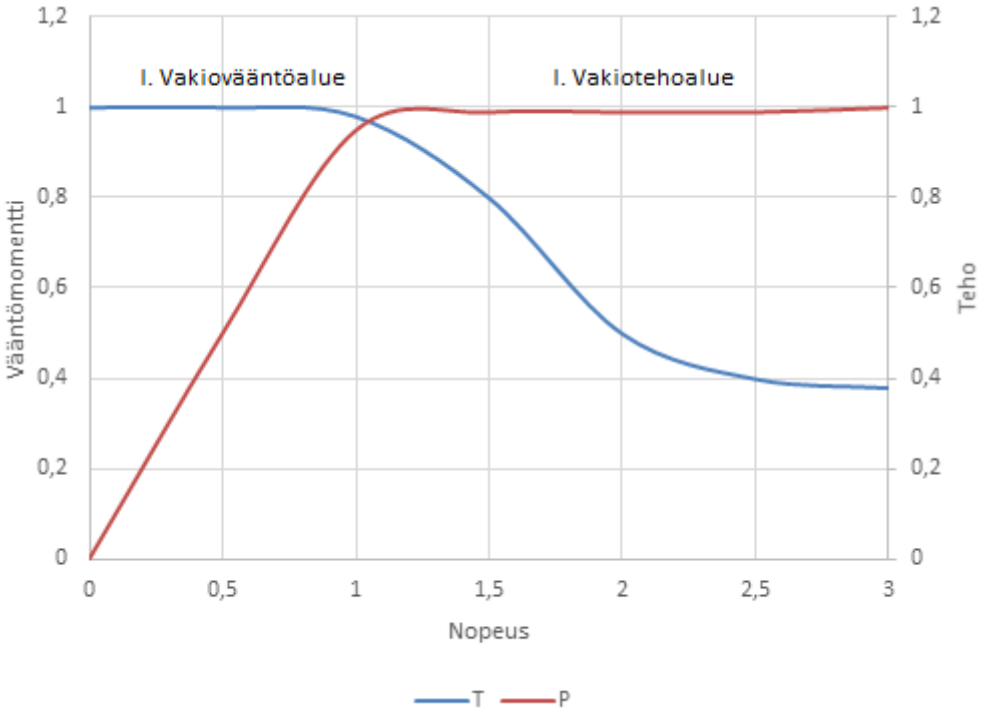
Tyypilliset vääntömomentti- ja teho-ominaisuudet ovat esitetty kuvassa 2. Induktiomoottorit, kytketyt reluktanssikoneet ja harjattomat kestomagneettikoneet voidaan suunnitella tuottamaan kuvan 2 mukainen kuvaaja (Zhu et al. 2007).

Hitailla nopeuksilla sähkömoottori on vakiovääntömomentti alueella I. Perusnopeuden saavuttamiseen asti moottori toimii nimellisvääntömomentillaan. Vääntömomentin huippuarvo määräytyy invertterin virta-arvon perusteella. Vääntömomentin maksimiarvo perusnopeudella määrittää ajoneuvon suorituskyvyn lähtöhetkellä sekä noustessa mäkeä ylös. Riittävän suuri maksivääntömomentti on tyypillisesti 4–5 kertainen nimellisvääntömomenttiin verrattuna. (Zhu et al. 2007)

Kun perusnopeus ylitetään, siirrytään vakiotehon alueelle II ja vääntömomentti alkaa laskea. Vakiotehon tulee olla noin 3–4 kertainen perusnopeuteen verrattuna. (Zhu et al. 2007) Vakiotehoalueella invertterin jännite- ja virtarajoitusten takia heikennetään magneettivuota. In-

vertteri rajoittaa myös moottorin ohimenevää ylikuormituskapasiteettia. Ajoittaisen ylikuormituskyvyn tulee tyypillisesti olla kaksi kertaa nimellisvääntömomentin verran lyhyillä kestoilla. (Yang et al. 2015)

Suhde maksiminopeuden ja perusnopeuden välillä esittää moottorin tehokkuutta sähköisessä voimansiirrossa. Moottori, jolla on suurempi nopeussuhde, tarjoaa suuremman maksimivääntömomentin, joka johtaa korkeampaan alkukiihdytykseen ja suorituskykyyn. Jokaisella sähkömoottorilla on oma rajallinen nopeussuhde. Maksiminopeudella saatavissa oleva vääntö rajoittaa ajoneuvon nopeutta tasaisella. (Khajepour et al. 2014)



Kuva 2. Vakiovääntö- ja tehokuvaaja. Perusnopeus on vääntömomentin *T* ja tehon *P* leikkauskohdassa. (Yang et al. 2015)

Moottorisysteemin hyötysuhteen maksimointi on tärkeää ajokantaman pidentämiseksi (Yang et al. 2020). Korkea hyötysuhde eri nopeuksilla ja vääntömomenttialueilla vaatii ajoneuvon kokonaismassan pienentämistä. Pienempi koko lisää myös ajokantamaa. (Khajepour et al. 2014)

2. AC MOOTTORIT

Vaihtovirralla toimivissa AC-moottoreissa on keloja ja roottori. Vaihtovirran jaksoisuuden takia nämä moottorit eivät vaadi kommutaattoria ja harjoja. (Khajepour et al. 2014)

Vaihtovirtamoottoreilla on monia etuja verrattuna tasavirtakoneisiin, kuten korkeampi hyötysuhde, korkeampi tehotiheys, tehokas regeneratiivinen jarrutus, kestävyys, luotettavuus ja vähäisempi huollontarve. (Hashemnia et al. 2008) Ne vaativat kuitenkin tehoelektroniikkaa muuntaakseen akusta saatavan DC-virran vaihtovirraksi (Khajepour et al. 2014).

Tässä luvussa käsitellään induktiomoottoria, kestomagnetoitua tahtimoottoria, harjatonta DC-moottoria ja synkronista reluktanssimoottoria.

2.1 Induktiomoottori (IM)

Induktiomoottorin toimintaperiaate perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Kun vaihtojännite tuodaan staattorin käämitykseen, syntyy pyörivä magneettikenttä. Staattorin magneettikenttä aiheuttaa roottorin akselin pyörimisen. Pyörivä magneettikenttä synnyttää roottorin käämitykseen induktiovirran. Kun induktiokone toimii moottorina, roottorin nopeus on aina pienempi staattorin magneettikentän kanssa. Tämä luo jättämän. (Khajepour et al. 2014)

Staattorin ja roottorin käämitykset on sijoitettu runkoon leikattuihin aukkoihin (Khajepour et al. 2014). Staattorissa ja roottorissa olevien aukkojen määrää muuttamalla voidaan vaikuttaa tehokertoimeen, vääntömomentin huippuarvoon sekä jättämään (Zhu et al. 2007).

Induktiomoottorit voidaan jakaa liukurengaskoneisiin ja oikosulkukoneisiin. Oikosulkukoneet ovat yleisempiä. Oikosulkukoneissa alumiinisauvat valetaan uriin roottorin ulkokehälle. Liukurengaskoneet vaativat enemmän huoltoa, ovat kalliimpia ja eivät yhtä jykeviä kuin oikosulkukoneet. (Xu et al. 2009)

Induktiomoottorin hyviä puolia ovat niiden suhteellisen halpa hinta sekä keveys (Xu et al. 2009). Induktiomoottorit ovat halvempia kuin DC-moottorit. Induktiomoottori on myös kestävämpi kuin DC-moottori ja toimii paremmin epätyypillisissä ympäristöolosuhteissa. Induktiomoottorissa ei ole kerääjää eikä harjoja, joten se tarvitsee vähemmän huoltoa kuin DC-moottori. (Bitar et al. 2014) Induktiomoottoreilla on myös hyvä ylikuormituskapasiteetti. Niillä on myös hyvä saatavuus, joten ne ovat yleisiä sähköautoissa. (Pellegrino et al. 2012)

Sähköajoneuvon moottorin vakiotehoalueen tulee olla 4–5 kertainen perusnopeuteen verrattuna (Zhu et al. 2007), mutta induktiomoottoreilla se on vain 2–3 kertainen. Tämän takia moottorin rakenne on monimutkainen, jotta pystytään vastaamaan vaatimuksiin. Nopeussuhde voi olla jopa 4, mikä johtaa hyvään suorituskykyyn. (Xu et al. 2009)

Induktiomoottorin hyvä dynaaminen suorituskyky voidaan saavuttaa esimerkiksi vektori- ja suoran vääntömomenttisäädön DTC avulla (Hashemnia et al. 2008). Induktiomoottoreiden ohjauspuolen kenttäorientoitua vektorisäätöä pidetään teollisesti standardina (Pellegrino et al. 2012). Vektorisäätö hitailla nopeuksilla voi olla vaikeaa, mutta säädettävyyttä on kuitenkin parannettu paljon (Boldea et al. 2014). Nopeusaluetta voidaan laajentaa käyttämällä kentänheikennystä vakiotehon alueella. Verrattuna kestomagneettimoottoreihin induktiomoottorin tehokkuus vähenee korkeilla nopeuksilla ja hyötysuhde on luonnostaan alhaisempi

roottorin käämityksen vuoksi. Lisäksi tehokerroin on pieni. Vakiotehoaluetta voidaan pidentää käyttämällä kaksoisinvertterejä. Kaksoissyötetyillä induktiomoottoreilla on erinomainen suorituskyky pienillä nopeuksilla. (Hashemnia et al. 2008)

Induktiomoottoria voidaan syöttää sekä taajuusmuuttajalla että vakiojännitteellä. Taajuusmuuttajasyötöllä voidaan saavuttaa iso käynnistysvääntömomentti ja matala käynnistysvirta. Jatkuvaan syöttötaajuuteen suunnitelluilla koneilla lähtövääntömomentti voidaan saavuttaa lähes yhtä korkeaksi kuin maksimivääntömomentti, kun valitaan sopiva syöttöjännite- ja taajuus. Korkea hyötysuhde voidaan saavuttaa pienellä jättämän säädöllä. (Zhu et al. 2007)

Induktiomoottorit eivät ole yhtä tehokkaita tai vääntömomenttitiheitä kuin kestomagneettikoneet korkeiden roottorihäviöiden takia (Boldea et al. 2014). Induktiomoottorissa lämpöä tuotetaan roottorissa ja staattorissa, mikä aiheuttaa häviöitä (Yang et al. 2015). Roottorin käämityshäviöitä voidaan vähentää suunnitteluvaiheessa (Hashemnia et al. 2008). Induktiokoneen magnetointivirrat aiheuttavat kuparihäviöitä staattorissa (Boldea et al. 2014). Lisäksi häkkikäämityksessä tapahtuu häviöitä sekä pienillä että suurilla nopeuksilla (Pellegrino et al. 2012). Terminen suunnittelu tuleekin ottaa huomioon suunnittelussa. Jäähdytyksessä voidaan käyttää vettä tai vesi/glykoliseosta. (Boldea et al. 2014) Moottorisuunnittelussa kupari- ja rautahäviöiden huomioonottaminen eri nopeuksilla vaikuttaa hyötysuhteeseen (Zhu et al. 2007). Häviöitä voidaan vähentää myös suprajohteilla (Boldea et al. 2014).

Induktiomoottoreiden kehityksessä on tärkeää panostaa säätöjärjestelmien toimivuuteen. On myös syytä tutkia uusia materiaaleja, jotta induktiomoottoreiden suorituskykyä voidaan edistää. Kuparihäkkikoneet ovat vielä suhteellisen uutta teknologiaa, mutta silti askel eteenpäin moottorisuunnittelussa (Boldea et al. 2014). IMCCR eli induction motor with compound cage rotor on uudenlainen induktiomoottori, jossa roottori on kaksiosainen. Roottoripalkin yläosa koostuu metalliseoksesta, jossa on johdin, ja alaosa on valettua alumiinia. Kaksiosaisuus parantaa suorituskykyä ja sähköautoissa käytettynä se voi parantaa energiankulutusta ja hyötysuhdetta. (Li et al. 2010)

2.2 Kestomagnetoitu tahtikone (PMSM)

Kestomagnetoiduissa tahtikoneissa kestomagneettien pyöriminen aiheuttaa vääntömomentin, jolla moottori pyörii (Aliasand et al. 2020). Kestomagnetoituja tahtikoneita kutsutaan myös nimellä brushless AC-motor eli harjaton AC-moottori (BLAC), koska niiden rakenteessa ei ole harjoja ja virta on sinimuotoista (Ehsani et al. 2010).

Kestomagneetit voidaan asentaa joko roottorin pinnalle, jolloin moottori on tyyppiä SPM eli surface permanent magnet, tai sisäpuolelle, interior permanent magnet motor (IPM). (Aliasand et al. 2020) Näistä IPM on suositumpi (Ramesh et al. 2019). Pinta-asennetulla kestomagnetoiduilla tahtikoneilla on yksinkertaisempi rakenne, mutta suurilla nopeuksilla niihin voi syntyä pyörrevirtoja. Niillä on myös rajallinen ohimenevä ylikuormitusteho. Kun magneetit on upotettu roottoriin, suorituskyky on parempi, mutta valmistus on vaikeampaa. Lisäksi se ei ole yhtä herkkä lämpötilan vaihteluille kuin SPM. (Pellegrino et al. 2012)

Kestomagnetoidut tahtikoneet dominoivat moottorimarkkinoilla EV applikaatioissa. Ne voidaan suunnitella toimivaksi laajoilla vääntömomenttialueilla ja ylivoimaisella vääntömomentti- ja tehotiheydellä. (Yang et al. 2015) Ne ovat pienikokoisia ja niillä on korkea hyötysuhde (Ramesh et al. 2019).

Harvinaisten materiaalien käyttäminen kestomagneetteina kyseenalaistaa jonkin verran kestomagneettikoneiden käyttöönottoa moottorikäytöissä. Uppoasennetut IPM koneet soveltuvat ainakin joissain tapauksissa paremmin korvaamaan kalliita kestomagneetteja halvemmilla ferriittimagneeteilla. (Pellegrino et al. 2012) Kestomagneettien huonon saatavuuden lisäksi ne ovat myös kalliita (Yang et al. 2015).

Rautahäviöt ovat yksi merkittävistä häviöistä PMSM-moottoreilla. Häviöitä voidaan vähentää jäähdytysjärjestelmällä. Magneettiset ominaisuudet rajoittavat myös ylikuormituskapasiteettia. (Pindoriya et al. 2018) Pinta-asennetuilla kestomagnetoiduilla tahtikoneilla voi syntyä pyörrevirtoja (Pellegrino et al. 2012), jotka voivat aiheuttaa merkittävää lämpötilan nousua magneeteissa (Zhu et al. 2007). Lämpötilannousu altistaa demagnetoitumiselle, joka on mahdollista kestomagnetoiduissa tahtikoneissa (Hashemnia et al 2008).

Laajoilla nopeusalueilla kestomagneettiset tahtikoneet vaativat kustomoidun ohjausalgoritmin vuon heikentämiseksi. Moottorin magneettinen malli on täysin tiedettävä, jotta säädöstä saadaan tarkka. Tätä pidetään hankalana verrattuna induktiomoottoreihin. (Pellegrino et al. 2012) Kentänheikennys tehdään virtakomponentin avulla, mikä lisää staattorin häviöitä ja pienentää hyötysuhdetta suurilla nopeuksilla (Pindoriya et al. 2018). Kentänheikennys on vaikeaa magneettien takia ja sen takia kestomagnetoitujen tahtikoneiden nopeussuhde on melko pieni, alle kahden (Ehsani et al. 2010)

2.3 Harjaton DC (BLDC)

Harjaton tasavirtakone (BLDC, brushless DC) kuuluu vaihtovirtamoottorien ryhmään. Harjattomassa tasavirtakoneessa vaihtojännite syötetään staattorin käämitykseen. (Khajepour et al. 2014) Syötettävä vaihtovirta on suorakulmion muotoista (Ehsani et al. 2010). Staattorin ankkurikäämit on kiinnitetty laminoidulla teräsytimellä ja kestomagneetit on asennettu roottoriin (Nian et al. 2014). Toimintaperiaate on sama kuin perinteisessä tasavirtakoneessa (Aliasand et al. 2020). Erona on se, että kommutaattori ja harjat on korvattu tehoelektroniikalla tai sähköisellä kommutaattorilla (Khajepour et al. 2014). Käytännössä kestomagnetoidun tahtikoneen staattori ja roottori lisätään DC-koneeseen (Ehsani et al. 2010). Staattorin magneettikenttä ja roottorin pyörimisestä aiheutuva magneettikenttä ovat samassa tahdissa eli harjaton tasavirtakone on tyypiltään tahtikone (Nian et al. 2014).

Harjattomissa tasavirtakoneissa riittää, että moottorille tuleva vaihevirta sammutetaan jaksoittain toisin kuin kestomagnetoiduissa tahtikoneissa. Tämän ansiosta harjaton DC-moottori ei tarvitse kallista elektroniikkaa. (Zhu et al. 2007) Käämityksen liikkeen säilyttämiseksi roottorin asento on tiedettävä, sillä roottorin asento määrittää kommutoinnin eli roottorivirran suunnan vaihtamisen (Nian et al. 2014). Vakiotehosäädön toteutus on monimutkaisempaa kuin PMSM-koneissa (Zhu et al. 2007).

Harjattomissa tasavirtakoneissa on pääasiassa pinta-asennetut roottorin magneetit ja lyhyet päätekäämit (Zhu et al. 2007). Kuparihäviöt ovat tällöin pieniä (Xu et al. 2009). Rakenteen

takia harjattomilla tasavirtakoneilla on potentiaali korkeaan vääntömomenttitiheyteen (Zhu et al. 2007). Roottorin pinnalle asennetut kestomagneetit altistavat kuitenkin pyörrevirroille samalla tavalla kuin PMSM-koneissa. Tämän takia kestomagneetit olisi parempi asentaa roottorin sisäpuolelle. Pyörrevirtoja voi indusoitua ajan kuluessa suotuisissa olosuhteissa kestomagneeteissa, roottorin rautaosissa ja muissa johtavissa osissa. Pyörrevirrat voivat aiheuttaa merkittävän lämpötilan nousun magneeteissa, mikä voi aiheuttaa demagnetoinnin. (Zhu et al. 2007) Rautahäviöitä voidaan vähentää viilennysjärjestelmällä (Pindoriya et al. 2018). Roottorin pyörrevirtojen aiheuttamat häviöt ovat kuitenkin suhteellisen pieniä verrattuna staattorin kupari- ja rautahäviöihin (Zhu et al. 2007). Staattorin häviöitä kasvattaa ja siten hyötysuhdetta pienentää kentänheikennys, jossa käytetään virtakomponenttia.

Korkeiden staattorihäviöiden lisäksi magneettiset ominaisuudet rajoittavat moottorin ylikuormituskapasiteettia. Muita moottorityypin haittapuolia ovat korkea hinta, joka aiheutuu pääosin kestomagneeteista sekä vikasietoisuus. (Pindoriya et al. 2018)

Harjattomat tasavirtakoneet soveltuvat kuitenkin ihanteellisesti sähköajoneuvoihin, koska koneilla on hyvät nopeus- ja vääntömomenttiominaisuudet, laajat nopeusalueet ja ne tarvitsevat vähän huoltoa harjattomuuden ansiosta (Nian et al. 2014). Mekaanisen kommutaattorin ja harjojen puuttuminen johtaa alhaisiin kitkahäviöihin, mikä tarkoittaa korkeampaa hyötysuhdetta kuin DC-koneella (Ehsani et al. 2010). Niillä on myös korkea tehotiheys kestomagneettien ansiosta ja ne ovat kevyitä (Xu et al. 2009). Harjattomat tasavirtamoottorit tuottavat erittäin tehokkaasti vääntömomenttia laajalla nopeusalueella ja ovat myös siten parempia kuin DC-moottorit (Aliasand et al. 2020).

2.4 Synkroninen reluktanssikone

Synkroninen reluktanssikone toimii AC-virralla. Muiden vaihtovirtakoneiden tapaan staattorissa on kolmivaiheinen käämitys. Roottori on avonapainen ja tehty rautalaminaateista. Roottorissa ei ole lainkaan käämityksiä. (Herrera et al. 2019) Synkroninen reluktanssikone on mahdollista valmistaa täysin ilman kestomagneetteja, mikä tekee moottorista luotettavan ja alentaa moottorin hintaa verrattuna PMSM ja BLDC-moottoreihin (Kumar et al. 2020).

Synkronisella reluktanssikoneella on luonnostaan alhainen vääntömomenttitiheys, jota voidaan parantaa lisäämällä roottoriin kestomagneetteja (Cai et al. 2014). Kestomagnetoitu synkroninen reluktanssikone käyttää kestomagneetteja kuitenkin vähemmän kuin kestomagnetoitu tahtikone, minkä ansiosta moottori on kevyempi (Ramesh et al. 2019). Verrattuna kestomagnetoituihin tahtikoneisiin synkroninen reluktanssikone pärjää hyvin. Hyötysuhde ja tehotiheys ovat lähes yhtä hyviä. Synkronisella reluktanssikoneella ei tapahdu roottorissa kuparihäviöitä ollenkaan. (Ramesh et al. 2019) Muita hyviä puolia ovat yksinkertainen ja kestävä rakenne (Kumar et al. 2020). Ne ovat myös suhteellisen helppo valmistaa (Cai et al. 2014).

Synkroniselle reluktanssikoneella on hyvä potentiaali sähköajoneuvokäyttöön (Kumar et al. 2020). Vähäisiä huonoja puolia ovat alhainen tehokerroin ja vääntöväre (Kumar et al. 2020). Synkronisen reluktanssikoneen säätö voi olla vaikeaa. Lisäksi moottori voi toimia generaattorina vain tehoelektroniikan avulla (Herrera et al. 2019), mikä hankaloittaa regeneratiivista jarrutusta (Nian et al. 2014).

3. DC MOOTTORIT

Tyypillisesti DC moottoreissa on kelat, joiden keskellä on pyörivä roottori yhdistettynä kommutaattoriin ja mahdollisesti harjoja. Roottori pyörii magneettikentän sisällä. Kommutaattori syöttää jännitettä pyörivään ankkuriin ja paikallaan oleva harjakokoonpano saa roottorin kääntymään. Roottorin pyöriminen saa aikaan mekaanisen tehon. Harjat ovat yhteydessä kommutaattoriin kytkentöjen tekemiseksi. (Khajepour et al. 2014)

Tässä luvussa käsitellään kaksi tasavirralla toimivaa moottoria, perinteinen tasavirtakone ja reluktanssikone.

3.1 Tasavirtakone

DC moottoreissa sähkövirta kulkee käämin läpi magneettikentässä, magneettinen voima luo vääntömomentin, joka pyörittää DC konetta. Roottori pyörii magneettikentän sisällä. Harjat ovat kontaktissa kommutaattorin kanssa. (Khajepour et al. 2014) Tasavirtakoneet vaativat kommutaattorin ja harjoja syöttääkseen virran ankkuriin (Xu et al. 2009). Ne lisäävät moottorin epäluotettavuutta (Ramesh et al. 2019), sillä harjat kuluvat ja vaativat säännöllistä uusimista (Khajepour et al. 2014). Kommutaattori toimii samalla invertterinä, minkä takia tehoelektroniikka voi olla yksinkertaista ja verrattain halpaa (Hashemnia et al. 2008).

DC-moottoreita on tutkittu ja kehitetty pitkään (Aliasand et al. 2020). DC moottoreita pidetään parhaimpina sen nopeussäädön tarkkuuden kannalta (Bitar et al. 2014). Niitä suositaankin yksinkertaisen säädön takia (Ramesh et al. 2019). Vaihtovirtamoottoreiden säädön ja ohjauksen kehityksen takia tasavirtakoneiden kiinnostavuus on kuitenkin laskenut. DC-koneet ovat hyviä sovelluksille, jotka tarvitsevat vähän tehoa. (Hashemnia et al. 2008) Käämiviritetyillä DC-moottoreilla on alhainen tehotiheys ja ne ovat epäsopivia korkeisiin nopeuksiin (Xu et al. 2009).

DC-moottoreiden haittapuolia ovat niiden suuruus (Ramesh et al. 2019). Ne ovat painavempia sekä kalliimpia kuin induktiomoottorit ja niillä on monimutkaisempi rakenne (Bitar et al. 2015).

3.2 Reluktanssikone

Reluktanssimoottoria käytetään epäjatkuvassa virtatilassa. Vakiovääntömomenttialueella vaihejännitteitä säädetään pulssinleveysmodulaation avulla, jotta saadaan haluttu vääntömomentti. Vakiotehoalue on laaja ja vakioteho on 2–7 kertainen perusnopeuteen verrattuna. (Pindoriya et al. 2018) Vääntömomentti- ja teho-ominaisuudet ovat erinomaisia sähköajoneuvokäyttöön (Ehsani et al. 2010). Verrattuna harjattomiin tasavirtakoneisiin ja kestomagneettimoottoreihin reluktanssikoneilla on hyvä tehotiheys ja hyötysuhde (Pindoriya et al.2018). Nopeussuhde on yli 6 (Xu et al. 2009).

Muita reluktanssimoottorin etuja ovat sen yksinkertainen ja kestävä rakenne (Xu et al. 2009). Roottorissa ei ole magneetteja eikä roottorikäämityksiä, minkä takia se on ihanteellinen kor-

keisiin lämpötilaolosuhteisiin ja suuriin nopeuksiin (Zhu et al. 2007). Roottori on avonapainen ja se on tehty magneettisesti pehmeistä materiaaleista (Aliasand et al. 2020). Roottorin rautahäviöt voivat kuitenkin olla merkittäviä. Magneettipiiri on yleensä korkeasti kyllästetty, joten huippumomenttikyky on vaatimaton ja lyhytaikainen. Lisäksi moottorin valmistaminen on suhteellisen vaikeaa, koska moottori vaatii pienen ilmaraon staattorin ja roottorin väliin. (Zhu et al. 2007) Valmistuskustannukset ovat kuitenkin matalia (Ehsani et al. 2010).

Reluktanssimoottorin tasainen käynti pienillä pyörimisnopeuksilla vaatii monitahoista vaihevirtojen profilointia ja tarkkaa roottorisijainnin tuntemusta (Xu et al. 2009). Staattorin ja roottorin kohdistamisella voidaan vaikuttaa vääntömomentti- ja tehokapasiteettiin (Zhu et al. 2007). Moottorin toiminta perustuu vastakkaisten staattorikelojen peräkkäiseen magnetointiin, mikä lisää melua ja tärinää. Vääntömomentin aaltoilu on myös melko suurta. (Xu et al. 2009)

Reluktanssikoneen suorituskyky on riippuvainen staattorin ja roottorin napojen määrästä. Valitettavasti käyttökelpoisia staattori- ja roottorinapayhdistelmiä on vielä suhteellisen vähän. (Zhu et al. 2007)

4. AKKU

Sähköauton suorituskyky on voimakkaasti riippuvainen energianlähteen hinnasta, kestävyydestä ja suorituskyvystä. Akut ovat tällä hetkellä yksi rajoittava tekijä sähköautojen yleistymisessä. (Khajepour et al. 2014) Akkutekniikan onnistunut käyttö edellyttää perusteellista tuntemusta ajoneuvojen käyttövoimasta ja ominaisuuksista (Pistoia et al. 2018).

Autoteollisuudella on paljon vaatimuksia energianlähteille. Vaatimukset kohdistuvat ominaisenergiaan ja -tehoon, hyötysuhteeseen, huoltoon, hintaan, ympäristöystävällisyyteen ja turvallisuuteen. (Ehsani et al. 2010)

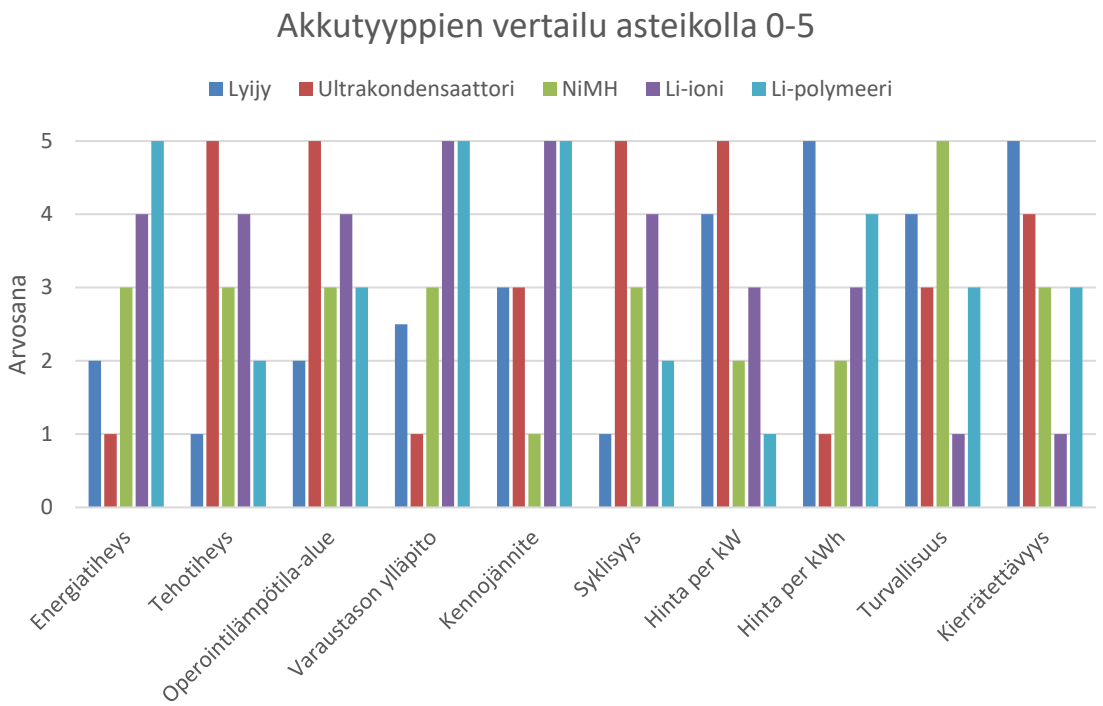
Täyssähköisissä autoissa akkujen ominaisenergia on tärkein kriteeri, koska se rajoittaa auton kantamaa (Ehsani et al. 2010). Etenkin kaupunkiajossa ajoneuvon jatkuvat pysähdykset ja kiihdytykset vaikuttavat akkujen käyttöikään. Sähköautojen akuilla on tyypillisesti korkea ominaisenergia, joka soveltuu kohtuulliselle ajoalueelle ja nopeuden vaihteluihin. Ominaisenergia kertoo käytettävissä olevan energiamäärän massaa kohden (Wh/kg). (Khajepour et al. 2014)

Ominaisteho (W/kg) kuvaa akusta saatavissa olevaa tehoa massaa kohden. Teholla on tärkeä rooli arvioitaessa sähköauton virtalähdettä halutun kiihtyvyyden saavuttamiseksi. Energiahyötysuhde on purku- ja latausenergian suhde. (Khajepour et al. 2014) Sen avulla voidaan arvioida latauksessa ja purkauksessa tapahtuvia energiahäviöitä. Lämpötilan nousu lisää häviöitä ja voi aiheuttaa vahinkoa akulle. (Ehsani et al. 2010) Lämpötilan laskiessa akun energiakapasiteetti laskee, joka johtaa ajokantaman ja suorituskyvyn laskuun (Liu et al. 2013).

Sähköautoissa käytetään nykyään pääosin litiumakkuja. Muita käytettäviä akkutyyppejä ovat nikkelin eri yhdistelmistä valmistetut akut ja lyijyakut. Litiumakkuja pidetään lupaavimpana akkutyyppinä sähköautoissa niiden nopean latauksen, korkean energiatiheyden, lämpötilasietoisuuden ja pitkän eliniän takia (Khajepour et al. 2014). Ne tarjoavat pitkän kantaman ja korkean tehotiheyden. Tyypillisesti litiumakkujen energiatiheys on 70–200 Wh/kg ja tehotiheys 400–600 W/kg. (Boldea et al. 2014)

Litiumioniakuissa käytetään kalliita materiaaleita ja joillakin materiaaleilla on myös merkittäviä ympäristövaikutuksia. Sähköautoissa käytetyissä litiumakuissa on korkea jännite ja ne ovat myrkyllisiä. Tämä hankaloittaa käytettyjen akkujen kierrätystä ja uusiokäyttöä. Akkuja voidaan käyttää uudestaan niin sähköajoneuvoissa kuin muussa energianvarastointisovelluksissa kuten aurinko- ja tuulivoimalla tuotetun energian varastoinnissa, joskin sähköautojen valmistajat haluavat rajoittaa akkujen uusiokäyttöä muussa kuin ajoneuvoissa mahdollisten riskien takia. Yleensä vastuu autojen akkuvioista ja vaurioista on ajoneuvonvalmistajalla, koska ne ovat varmistaneet akun käytön turvallisesti ajoneuvokäytössä. (Derousseau et al. 2017)

Kuvassa 4 vertaillaan eri akkutyyppien ominaisuuksia sähköajoneuvokäytössä. Kuvasta nähdään, että litiumpohjaisilla akuilla on hyvät pisteet verrattuna muihin vertailussa olleisiin akkutyyppeihin.



Kuva 4. Akkutyyppien ominaisuudet pisteytettynä asteikolla 0–5, kun niitä käytetään sähköajoneuvoissa. (Boldea et al. 2014)

4.1 Regeneratiivinen jarrutus

Sähköautojen yleistymistä rajoittaa niiden lyhyt ajokantama sekä tarve tiheälle latausverkostolle. (Aharon et al. 2011) Regeneratiivinen jarrutus voi nostaa sähköajoneuvon kantamaa jopa 15 % verrattuna niihin sähköautoihin, joissa ei ole jarrutusenergian talteenottoa (Nian et al. 2014).

Perinteiset autot muuntavat kineettisen energian kitkaan ja lämpöön jarrutuksissa. Kun lisätään sähköjärjestelmä autoon, voidaan hyödyntää hukkaan menevä jarrutusenergia. (Pistoia et al. 2018) Regeneratiivisessa jarrutuksessa energiaa syötetään moottorista takaisin akkuun, kun ajoneuvon inertia pakottaa moottorin toimimaan generaattorina. Tällöin akku toimii kuormana ja se aiheuttaa jarrutusvoiman. (Nian et al. 2014) Saatua energiaa voidaan hyödyntää merkittävissä määrin ajoneuvon kiihdytyksessä. (Pistoia et al. 2018)

Akkujen suhteellisen alhaisen ominaistehotiheyden vuoksi niillä on vaikeuksia tarjota äkillisiä tehopurkauksia kiihdytyksiä varten. Alhainen ominaistehotiheys vaikuttaa myös siihen, miten hyvin akku absorboi energiaa regeneratiivisissa jarrutuksissa. (Khajepour et al. 2014) Tyypillisesti akkusysteemi hyödyntää 80–90 % saamastaan jarrutustehosta (Pistoia et al. 2018). Jarrutusenergian talteenotossa voidaan hyödyntää esimerkiksi ultrakondensaattoreita. (Khajepour et al. 2014) Ultrakondensaattoreilla tehotiheys on 5000 W/kg ja energiatiheys 5Wh/kg (Aharon et al. 2011). Ne pystyvät tarjoamaan korkean tehon lyhyessä ajassa korkean tehotiheyden vuoksi. Ultrakondensaattorien käyttäminen yhdessä akkujen kanssa pidentää akkujen elinikää, parantaa suorituskykyä ja pienentää akun kokoa. Yhteiskäyttö kuitenkin vaatii tehoelektroniikkaa, mikä voi nostaa ajoneuvon lopullista hintaa. (Khajepour et al. 2014)

5. MOOTTORIEN HINTA

Sähköautojen moottorien hintatietoja ei ole yleisesti saatavilla, minkä takia moottorien hintojen tarkempi vertailu on mahdotonta. Voidaan kuitenkin yleisesti todeta, että sähkömoottorien materiaalivalinnat vaikuttavat hintaan (Chau K.T. et al. 2008). Kestomagneetit ovat harvinaisia ja samalla myös kalliita (Yang et al. 2015). Teknologisen kehityksen ansiosta sähkömoottorien vaatimien sähköjärjestelmien hinta on madaltunut (Emaldi et al. 2008). Moottorin säätöjärjestelmät ja tehoelektroniikka vaikuttavat myös moottorin kokonaishinnan muodostumisessa.

6. SÄHKÖMOOTTORIT NYKYPÄIVÄN TÄYSSÄHKÖAUTOISSA

Tässä kappaleessa tarkastellaan muutamien eri autovalmistajien täyssähköisiä henkilöautoja. Sähköautojen moottoreista on vain vähän tietoa valmistajien kotisivuilla ja varsinkin moottorityyppien selvittäminen on vaikeaa. Vain muutama valmistaja oli ilmoittanut autonsa teknisissä tiedoissa moottorityypin.

Nykypäivän eli 2020-luvun täyssähköisissä henkilöautoissa käytetään pääasiassa induktio- ja kestomagnetoitua tahtikonetta. Näitä moottoreita käyttäviä täyssähköisiä henkilöautoja on vertailtu taulukossa 1. Kaikissa taulukon 1 autoissa on litiumioniakku.

Kestomagnetoitu tahtikone on yleisin sähkömoottorityyppi nykypäivän sähköautoissa. Se sopii hyvin myös pienikokoisille sähköautoille. Kia Nirossa on ilmoitettu erikseen, että moottori on tyyppiä IPMSM eli kestomagneetit on uppoasennettu. Tämän pitäisi kasvattaa moottorin hyötysuhdetta ja siten vaikuttaa auton kantamaan. Taulukosta 1 nähdään, että kestomagnetoidulla tahtikoneella (PMSM) varusteltujen autojen tehot ja vääntömomentit ovat merkittävästi pienempiä kuin induktiomoottoreilla (IM) varusteltujen sähköautojen. Induktiomoottorit ovat yleisempiä suuritehoisimmissa ja kalliimman hintaluokan sähköautoissa.

Mercedes-Benzin ja Teslan autoissa on kaksi sähkömoottoria. Teslan sähköautossa etuakselilla on synkroninen AC-moottori eli luultavimmin kestomagnetoitu tahtikone ja taka-akselilla induktiomoottori. Käyttämällä useampaa kuin yhtä moottoria voidaan maksimoida auton suorituskyky. Mercedes-Benzin ja Teslan kokonaisvääntömomentit ovat yli 700 Nm (Taulukko 1). Mercedes-Benz ilmoittaa tuotesivuillaan, että kahta moottoria käyttäen voidaan optimoida moottorit toimimaan eri kuormitusalueilla. Etuakselin sähkömoottori on optimoitu matalalla ja keskisellä kuormitusalueella, kun taas taka-akselin sähkömoottori korkealla kuormitusalueella. (Mercedes-Benz, 2020)

Taulukko 1. Täyssähköisten henkilöautojen vertailu. PMSM on kestomagnetoitu tahtikone ja IM induktiomoottori. Mercedes Benz käyttää autossaan kahta induktiomoottoria. Tesla käyttää etuakselilla kestomagnetoitua tahtikonetta ja taka-akselilla induktiomoottoria. Tesla Model X henkilöauton teho ja vääntö ovat ilmoitettu erikseen etu- ja taka-akselin moottoreille. [1]

	Hyundai Ioniq electric	**Peugeot e-208**	**Kia Niro electric**	**Audi e-tron quattro**	**Mercedes-Benz EQC 400**	**Tesla Model X**
Vuosimalli	2020	2020	2020	2019	2020	2020
Moottorityyppi	PMSM	PMSM	IPMSM	IM	2x IM	PMSM ja IM
Teho [kW]	100	100	150	230	300	205 / 210
Vääntö [Nm]	295	260	395	540	760	420 / 335
Kapasiteetti [kWh]	38,3	50	64	64	80	100
Yhdistetty kulutus [kWh/km]	13,8	16,4–16,5	18,3	24,9	22,3–25	20,8
Auton kokonaismassa [kg]	1970	1910	2230	3040	2930	2572
Kantama [km]	311–412	336–339	385	292	450	548

[1] (Audi, 2020; Auto-data.net, 2020; Fuel economy, 2020; Hyundai, 2020; Kia, 2020; Mercedes-Benz, 2020; Peugeot, 2020; Tesla, 2020; Traficom Liikenne- ja viestintävirasto, 2020)

7. YHTEENVETO

Kaikilla sähkömoottorityypeillä on hyviä ja huonoja puolia. Moottorin valinta täyssähköiseen henkilöautoon ei ole yksinkertainen päätös. Täyssähköinen henkilöauto on täysin riippuvainen akustostaan, minkä takia akuston ja moottorin suunnittelu on vaativampaa ja tärkeämpää verrattuna sekä poltto- että sähkömoottorin omaaviin hybridiautoihin.

Tavallisen kuluttajan näkökannalta ajokantama on yksi merkittävin kriteeri autoa valittaessa. Tällä hetkellä akkuteknologian ollessa vielä kehittymätöntä sähköauton vaatimuksiin, on sähköauton moottorikokonaisuuden hyötysuhteen maksimointi tärkeää kantaman lisäämiseksi.

Moottorin lisäksi niihin liittyvillä ohjausjärjestelmillä ja komponenteilla on keskeinen rooli sähköautojen yleistymisessä. Tehokkaiden sähköjärjestelmien avulla voidaan myös parantaa sähköautojen suorituskykyä ja kantamaa. (Emadi et al. 2008) Tämän lisäksi tulee kiinnittää huomiota auton kokonaismassaan, koska suurempi massa pienentää kantamaa.

Tässä kandidaatintyössä vertailuun valittiin induktiomoottori, kestomagnetoitu tahtimoottori, vaihtovirralla toimiva harjaton DC-moottori, synkroninen reluktanssimoottori, DC-moottori ja reluktanssimoottori.

Suorituskyvyn puolesta induktiomoottori on vertailtavista moottoreista paras. Sillä on hyvä ylikuormituskapasiteetti ja muihin moottoreihin verrattuna erinomainen suorituskyky myös pienillä nopeuksilla. Kestomagnetoidun tahtikoneen ylikuormituskapasiteettia rajoittaa sen magneettiset ominaisuudet, mutta sillä on ylivoimainen teho- ja vääntömomenttitiheys. Reluktanssimoottori pärjää lähes yhtä hyvin kuin kestomagnetoitu tahtikone, mutta sen suorituskyky on riippuvainen staattori- ja roottorinapojen lukumäärästä. Toistaiseksi suotuisia napamääriä on löydetty vähän.

Hyötysuhteen kannalta kestomagnetoitu tahtikone, synkroninen reluktanssikone ja reluktanssikone ovat parhaita. Synkronisella reluktanssikoneella ei tapahdu kuparihäviöitä roottorissa ollenkaan. Muissa vaihtovirtamoottoreissa häviöitä tapahtuu paljon. Sen takia terminen laitesuunnittelu on tärkeää häviöiden pienentämiseksi. Lisäksi kestomagneettikoneilla on tärkeää huomioida magneettien asennustapa, sillä pinta-asennetut kestomagneetit altistavat pyörrevirroille, jotka nostavat lämpötilaa ja voivat altistaa moottorin demagnetoitumiselle.

Toistaiseksi induktiomoottorit ja kestomagnetoidut tahtikoneet dominoivat EV-markkinoilla. Induktiomoottorilla on vain vähän heikkouksia, minkä takia sen suosio on helposti perusteltavissa. Säätöjärjestelmät kehittyvät jatkuvasti, mikä lisää induktiomoottorin suorituskykyä ja kasvattaa sen huonoa vakiotehoaluetta. Induktiomoottoreiden suorituskykyä voidaan parantaa myös tutkimalla uusia materiaaleja. Kestomagnetoidut tahtikoneet ovat ylivoimaisia, joskin kestomagneettien käyttäminen lisää niiden hintaa ja pienentää luotettavuutta. Kestomagneetit ovat myös harvinaisia, minkä takia tulee tutkia uusia moottorivaihtoehtoja tulevaisuudessa lisää. Synkroninen reluktanssikone on hyvä esimerkki tästä, sillä sen hyvä suorituskyky ja hyötysuhde voidaan saavuttaa myös täysin ilman kestomagneetteja.

Tasavirtamoottoreista perinteinen DC-moottori on hyvä valinta pienitehoisiin sovelluksiin, mutta huoltoa vaativa ja painava rakenne tekee siitä epäsopivan tulevaisuuden sähköautoihin. Reluktanssimoottorilla on erinomainen potentiaali täyssähköautoihin hyötysuhteen ja tehokkuuden puolesta. Reluktanssimoottoreiden käyttäminen sähköautoissa kasvaa todennäköisesti säätöjärjestelmien kehittyessä.

7.1 Sähköautojen tulevaisuus

Sähköautojen tulevaisuus on riippuvainen teknologian kehityksestä. Toistaiseksi yksi sähköautokannan kasvamista rajoittava tekijä on sähköautojen kantama. Sähköautokannan lisäämiseksi kuluttaja voi pohtia omia ajotottumuksiaan. Suomalainen autoilija ajaa keskimäärin noin 50 km vuorokaudessa (Tekniikan Maailma, 2018), joten on syytä pohtia miksi kuluttajat vaativat sähköautolta useiden satojen kilometrien kantamaa.

Sähköautojen kehityksen kannalta on tärkeää paneutua tulevaisuudessa moottorin koon ja painon vähentämiseen. Hyvä suorituskyky vaatii moottorilta kompaktia kokoa. Myös materiaaliratkaisuihin tulee kiinnittää huomiota, koska niillä on iso merkitys moottorin hyötysuhteeseen. (Ramesh et al. 2019)

LÄHTEET

Aharon, I., Kuperman, A. 2011. *Topological Overview of Powertrains for Battery-Powered Vehichles With Range Extenders.* IEEE. Vol. 26, No. 3. S. 868-876.

Aliasand, A. E., Josh, F. T. 2020. *Selection of Motor for an Electric Vehicle: A Review.* Materials Today: Proceedings 24. S. 1804-1815.

Audi e-tron tekniset tiedot. 2020. Audi. Verkkoaineisto. [Saatavissa]: https://www.audi.fi/fi/web/fi/models/tron/audi-e-tron.html#layer=/fi/web/fi/models/tron/audi-e-tron.engine_compare.genbbe_1_mksuka2_msibn7u_mlcpqq1_mvosq1d_gwffwff_gwknwkn_gwnywny_gyeyyey_mahv1d8_msih4a3_mlor7p1.techdata.html

Autovertaamo. Traficom Liikenne- ja viestintävirasto. Verkkoaineisto. [Saatavissa 13.12.2020]: https://autovertaamo.traficom.fi/

Bitar, Z., Jabi, S. A., Khamis, I. 2014. *Modeling and Simulation of Series DC Motors in Electric Car.* Energy Procedia 50. S. 460-470.

Bitar, Z., Jabi, S. A. 2014. *Studying the Performances of Induction Motor Used in Electric Car.* Energy Procedia 50. S.342-351.

Bitar, Z., Sandouk, A., Jabi, A. S. 2015. *Testing the Performances of DC Series Motor Used in Electric Car.* Energy Procedia 74. S. 148-159.

Boldea, I., Tutelea, L. N., Parsa, L., Dorrel, D. 2014. *Automotive Electric Propulsion Systems with Reduced or No Permanent Magnets: An Overview.* IEEE Vol. 61, No. 10. S.5696-5711.

Cai, H., Guan, B., Xu, L. 2014. *Low-Cost Ferrite PM-Assisted Synchronous Reluctance Machine for Electric Vehicles.* IEEE. Vol. 61, No. 10. S. 5741-5748.

Chau, K. T., Liu, C., Jiang, J. Z. 2008. *Comparison of Outer-Rotor Stator-Permanent-Magnet Brushless Motor Drives for Electric Vehicles.* IEEE. S. 2842-2847.

Compare Electric Cars Side-by-Side. Fuel economy. Verkkoaineisto. [Saatavissa]: https://www.fueleconomy.gov/feg/evsbs.shtml

Derousseau, M., Gully, B., Taylor, C., Apelian, D., Wang, Y. 2017. *Repurposing Used Electric Car Batteries: A Review of Options.* The Minerals, Metals & Materials Society. 8 s.

Ehsani, M., Gao, Y., Emadi, A. 2010. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design Second Edition*. 534 s.

Emadi, A., Lee, Y. L., Rajashekara, K. 2008. *Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric and Plug-In Hybrid Electric Vehicles.* IEEE. Vol. 55, No. 6. S. 2237-2245.

Global EV Outlook 2020 Technology report. Verkkoaineisto. [Saatavissa 24.11.2020]: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020

Hashemnia, N., Asaei, B. 2008. *Comparative Study of Using Different Electric Motors in the Electric Vehicles.* IEEE. 5 s.

Herrera, D., Villegas, J., Galván, E., Carrasco, J. M. 2019. *Powertrain EV synchronous reluctance motor design with redundant topology with novel control.* IET Electronic Power Applications, Vol. 13. No. 11, s. 1647-1659.

Hyundai käyttöohjekirjat. Hyundai. Verkkoaineisto. [Saatavissa]: https://www.hyundai.fi/hyundai-kasikirjat/

Khajepour, A., Fallah, S., Goodarzi, A. 2014. *Electric and hybrid vehicles: technologies, modeling, and control: a mechatronic approach.* 415 s.

Kia käyttöohjekirjat. Kia. Verkkoaineisto. [Saatavissa]: https://www.kia.com/fi/palvelut/huolto/ohjekirjat/

Kumar, G. V., Chuang, C. H., Lu, M. Z., Liaw, C. M. 2010. *Development of an Electric Vehicle Synchronous Reluctance Motor Drive.* IEEE. Vol. 69, No. 5. S. 5012-5024.

Li, W., Cao, J., Zhang, X. 2010. *Electrothermal Analysis of Induction Motor with Compound Cage Rotor Used for PHEV.* IEEE Vol. 57, No. 2. S. 660–668.

Liikennekäytössä olevat sähköautot. Autoalan tiedotuskeskus. Verkkoaineisto. [Saatavissa 24.11.2020]: https://www.aut.fi/tilastot/autokannan_kehitys/sahkoautojen_maaran_kehitys

Liu, G., Lu, L., Li, J., Ouyang, M. *Thermal Modeling of a LifePO$_4$/Graphite Battery and Research on the Influence of Battery Temperature Rise on EV Driving Range Estimation.* IEEE. 5 s.

Mercedes-Benz EQC. Mercedes-Benz. Verkkoaineisto. [Saatavissa]: https://www.mercedes-benz.fi/passengercars/mercedes-benz-cars/models/eqc/offers/footnote.module.html

Nian, X., Peng, F., Zhang, H. 2014. *Regenerative Braking System of Electric Vehicle Driven by Brushless DC Motor.* IEEE Vol. 61, No. 10. S. 5789-5808.

Pellegrino, G., Vagati, A., Boazzo, B., Gugliclmi, P. 2012. *Comparison of Induction and PM Synchronous Motor Drives for EV Application Including Design Examples.* IEEE Vol. 48, No. 6. S. 2322–2332.

Peugeot 208 Hinnat, tekniset tiedot ja varusteet. Peugeot. Verkkoaineisto. [Saatavissa]: https://media.peugeot.fi/file/48/0/20201106-peugeot-208-hinnat-tekniset-tiedot-ja-varusteet-06.11.744480.pdf?lcdv16=1PP2A5HMZJC0A0C0

Pindoriya, R. M., Rajpurohit, B. S., Kumar, R., Srivastava, K. N. 2018. *Comparative Analysis of Permanent Magnet Motors and Switched Reluctance Motors Capabilities for Electric and Hybrid Electric Vehicles.* IEEE. 5 s.

Pistoia, G., Liaw, B. 2018. *Behavior of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles.* Springer. S. 344.

Ramesh, P., Lenin, N. C. 2019. *High Power Density Electrical Machines for Electric Vehicles – Comprehensive Review Based on Material Technology.* IEEE. S. 1–21.

Suomalainen autoilija ajaa keskimäärin 52 km vuorokaudessa – Näin paljon aikaa suomalaiset käyttävät liikenteessä. Tekniikan Maailma. Verkkoaineisto. [Saatavissa 29.11.2020]: https://tekniikanmaailma.fi/suomalainen-autoilija-ajaa-keskimaarin-52-km-vuorokaudessa-nain-paljon-aikaa-suomalaiset-kayttavat-liikenteessa/

Sähköautot. Motiva. Verkkoaineisto. [Saatavissa 29.11.2020]: https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/sahkoautot

Tekniset tiedot Mercedes-Benz EQC. Auto-data.net. Verkkoaineisto [Saatavissa 13.12.2020]: https://www.auto-data.net/fi/mercedes-benz-eqc-80-kwh-408hp-4matic-34406

Tesla Model X omistajan käsikirja. Tesla. Verkkoaineisto. [Saatavissa 13.12.2020]: https://www.tesla.com/sites/default/files/model_x_owners_manual_europe_fi_fi.pdf

Tieliikenteen päästöt laskussa 2020-luvulla – uusia toimia tarvitaan yhä. Valtioneuvosto. Verkkoaineisto. [Saatavissa 28.11.2020]: https://valtioneuvosto.fi/-/tieliikenteen-paastot-laskussa-2020-luvulla-uusia-toimia-tarvitaan-yha

Xu, W., Zhu, J., Guo, Y., Wang, S., Wang, Y. 2009. *Survey on Electrical machines in electrical vehicles*, IEEE. S. 167-170.

Yang, Y., He, Q., Fu, C., Liao, S., Tan, P. 2020. *Efficiency Improvement of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicles.* Energy 213. S. 11.

Yang, Z., Shang, F., Brown, I. P., Krishnamurthy, M. 2015. *Comparative Study of Interior Permanent magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications.* IEEE Vol. 1, No. 3. S. 245-254.

Zhu, Z., Q., Howe, D. 2007. *Electrical Machines and Drives for electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles.* IEEE Vol. 95, No. 4. S.746–765.

Sähkömoottorityypit. Motiva. Verkkoaineisto. [Saatavissa 10.11.2020]: https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/sahkoautot/sahkomoottorityypit