

Joonas Lång

SÄHKÖAUTON TEKNIikka – MOOTTORIT JA SÄHKÖJÄRJESTELMÄT

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Tomi Roinila
Elokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Joonas Lång: Sähköauton tekniikka – moottorit ja sähköjärjestelmät
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma
Elokuu 2021

Sähköauto on vanha keksintö, jota on käytetty vuosia, mutta auto menetti asemansa polttomoottorillisille autoille kalliin hintansa seurauksena. Mielenkiinto on palannut autoon sen potentiaalisesti päästöttömän toiminnan seurauksena.

Sähköauton moottorina voi toimia tasavirtamoottori, kestmagnetoitu vaihtovirtamoottori, oikosulkumoottori ja avonapainen reluktanssimoottori. Tasavirtamoottori on halpa ja helposti säädettävä, mutta vaatii enemmän huoltoa ja ei ole yhtä energiatehokas kuin muut moottorit. Kestomagnetoitu vaihtovirtamoottori tarjoaa korkean tehon toiminnan, mutta korkeamman hinnan sen kestmagneettien seurauksena. Kestomagneettimateriaali pitää myös huolella valita käytön mukaisesti. Oikosulkumoottori on teknologisesti kypsä ja hyvin ymmärretty sähkömoottori. Avonapainen reluktanssimoottori on halpa ja jyrkevä sähkömoottori. Uudet tarkemmat säätötekniikat mahdollistavat moottorin tehokkaan toiminnan. Moottorin ongelmana on tuotettu epätasainen vääntömomentti ja akustinen melu.

Sähköauton energianlähteenä toimii yleisesti akku, mutta muita vaihtoehtoja tutkitaan myös, kuten vauhtipyöriä ja polttokennoja. Energianvarastointia hallitsee oma järjestelmänsä. Sähkömoottoria hallitaan omalla järjestelmällänsä, joka hyödyntää eri hallintamenetelmiä. Käytettävät hallintamenetelmät riippuvat sähkömoottorista ja moottorin käyttämästä toiminta-alueesta. Vaihtovirtamoottorit tarvitsevat myös vaihtosuuntaimen ja pulssinleveyden moduloijan.

Työssä käydään läpi lyhyesti sähköautojen historiaa ja yleistä rakennetta. Neljää yleisintä sähköautojen käyttämää sähkömoottoria myös esitellään ja niiden toimintaa selitetään. Sähköautojen käyttämää energianvarastointijärjestelmää ja mahdollisia energianlähteitä esitellään myös. Työssä käydään läpi myös lyhyesti eri säätömenetelmiä sähköautojen moottoreille.

Avainsanat: sähköauto, sähkömoottori, tasavirtamoottori, kestmagnetoitu vaihtovirtamoottori, oikosulkumoottori, avonapainen reluktanssimoottori, energianvarastointi, sähkömoottorin säätö

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
2. SÄHKÖAUTO YLEISESTI.....	2
2.1 Historia.....	2
2.2 Tekniikka.....	4
3. SÄHKÖAUTON MOOTTORIT.....	5
3.1 Tasavirtamoottori.....	6
3.2 Kestomagnetoitu vaihtovirtamoottori.....	8
3.2.1 Kestomagneetit.....	10
3.2.2 Rakenne.....	11
3.3 Oikosulkumoottori.....	12
3.4 Avonapainen reluktanssimoottori.....	15
4. SÄHKÖJÄRJESTELMÄT.....	18
4.1 Energianvarastointi.....	18
4.2 Moottorin säätö.....	21
5. YHTEENVETO.....	26
LÄHTEET.....	28

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	alternating current, vaihtovirta
DC	direct current, tasavirta
RPM	revolutions per minute, kierroksia minuutissa
ω_s	pyörivän magneettikentän kulmanopeus
ω_r	roottorin kulmanopeus
s	oikosulkumoottorin roottorin jättämä
f_r	roottoriin indusoituneen virran taajuus
f_s	tahtitaajuus

1. JOHDANTO

Luonnollisten öljyvarantojen lähestyessä loppuaan ja liikenteen päästöjen vähentämisen tärkeyden noustessa, sähköautot tarjoavat ratkaisun vähentämään hiilidioksidipäästöjä ja riippuvuutta öljystä. Sähköautojen tekniikka on kehittynyt merkittävästi niiden alkuaikojen suosion jälkeen 1900-luvun alusta. Nykytehoelektroniikka ja -akkutekniikka tarjoavat monia ratkaisuja, joilla sähköauto osoittautuu yhä käytännöllisemmäksi. Sähkömoottori on oleellinen osa sähköautoa, joten on tärkeää perehtyä sen toimintaan ja eri malleihin. Sähkömoottori on mahdollista rakentaa monella eri tavalla, hyödyntämällä sähkömagneettisia ilmiöitä eri tavoin, jonka seurauksena useita moottorityyppejä käytetään teollisuudessa. Näistä oikosulkumoottori on hallinnut teollisuutta pitkään sen yksinkertaisuuden ja jyrkeyden ansiosta. Vaikka oikosulkumoottori on kaikkein suosituin, on tärkeää tarkastella muitakin vaihtoehtoja, jotta sopivin moottori löydetään haluttuun käyttöön ja rakennetaan kattava kuva eri sähkömoottorien vahvuuksista ja heikkouksista. Tässä kandidaatintyössä käydään läpi sähköautojen historiaa ja yleistä toimintaa, jonka jälkeen perehdytään sähköautoissa käytettyihin sähkömoottoreihin ja järjestelmiin.

Työn alussa perehdytään sähköautojen historiaan ja yleiseen toimintaan. Sähköautoja on valmistettu jo monia vuosia, mutta polttomoottoriautot ovat olleet käytännöllisempiä ja hallinneet autoteollisuutta. Sähköautot ovat palaamassa yleiseen käyttöön hybridiautojen avulla. Luvussa 3 käydään läpi muutamia käytössä olevia sähköautojen moottoreita ja selostetaan niiden toimintaa. Moottoreiden rakennetta ja ominaisuuksia esitellään, ja tuodaan niiden hyvät ja huonot puolet esille. Sähköauto on monien eri järjestelmien muodostama suuri kokonaisuus, jonka jokaisesta osasta voisi kirjoittaa oman tutkielmansa, ja tämän seurauksena tässä työssä keskitytään vain yleisellä tasolla näihin järjestelmiin. Näistä järjestelmistä muutamaa tarkastellaan lähemmin niiden tärkeyden takia. Auto tarvitsee energianlähteen liikkuaakseen. Potentiaalisia energianlähteitä on monia, ja energianhallinta vaatii oman järjestelmänsä, jotta yleinen toiminta ja energiatehokkuus olisivat mahdollisia. Sähkömoottorit tarvitsevat myös oman säädinjärjestelmänsä, jotta moottorin tuottamaa vääntömomenttia voitaisiin hallita, ja mahdollistaa auton hallitun ajamisen. Näistä järjestelmistä kerrotaan tarkemmin luvussa 4. Työn lopussa luvussa 5 tärkeimmät yksityiskohdat tuodaan esille ja tiivistetään.

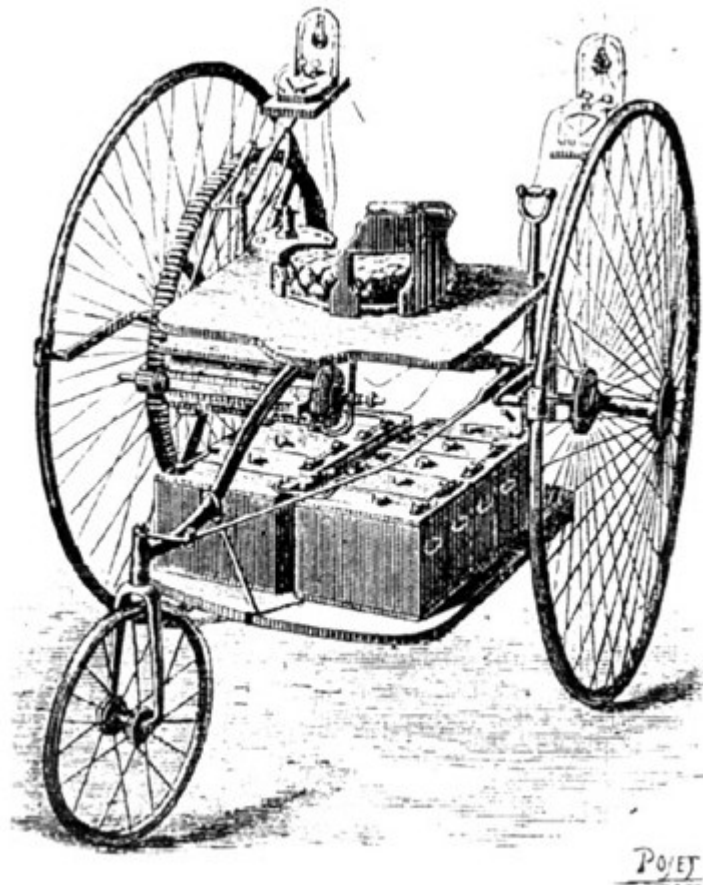
2. SÄHKÖAUTO YLEISESTI

Sähkö- ja hybridautot ovat herättäneet huomiota ilmaston lämpenemisen ja liikenteen saasteiden vähentämisen tärkeyden kasvaessa. Sähköautot eivät tuota ajaessa hiilidioksidipäästöjä, jos niiden käyttämää sähköä ei ole tuotettu fossiilisilla polttoaineilla, ja ne ovat hiljaisia, joten ne sopivat hyvin kaupunkiajoon. Ongelmana on autojen lyhyt toimintamatka verrattuna polttomoottorillisiin autoihin. Tätä ongelmaa on ratkottu uusilla energianvarastointimethodella, kuten polttokennoilla ja paremmilla akuilla. Hybridautoissa on sähkö- ja polttomoottori, jotka tuottavat ajamiseen tarvittavan vääntömomentin, ja auto toimii käyttämällä molempia moottoreita yhtä aikaa tai vain toista, riippuen kytkennästä.

2.1 Historia

Sähköauton historian sanotaan alkaneen Alessandro Voltan (1745–1827) ensimmäisen onnistuneen sähköpariston myötä vuonna 1800 [2]. Tätä paristoa kutsutaan Voltan pylvääksi. Seuraava tärkeä tapahtuma on Michael Faradayn (1791–1867) työ sähkömagnetismin parissa vuonna 1821, jolloin Faraday selitti sähkömoottorin toiminnan periaatteet, ja vuonna 1831 hän löysi sähkömagneettisen induktion. Seuraavana vuonna brittiläinen tiedemies William Sturgeon (1783–1850) keksi ensimmäisen kommutaattorillisen tasavirtamoottorin .[1] Ideoita syntyi yhdistää Voltan sähköparisto ja tasavirtamoottori, ja käyttää niitä ajoneuvon liikuttamiseen. Amerikkalaista Thomas Davenportia (1802–1851) pidetään ensimmäisen sähköajoneuvoksi kutsuttavan ajoneuvon kehittäjänä ja ajoneuvo valmistui vuonna 1834. 1850-luvulla sähkömoottoreita kokeiltiin julkisiin ajoneuvoihin, kuten juniin, ja ensimmäinen autoksi kutsuttava kärry syntyi vuonna 1851. [3]

Seuraavina vuosina akkutekniikka kehittyi, kun belgialainen Gaston Planté (1834–1889) tutki Voltan pylvästä. Vuonna 1859 hän kehitti ensimmäisen tehokkaan akkukennon, joka kykeni latautumaan ja purkautumaan monta kertaa. Sähkömoottoritekniikka kehittyi Antonio Pacinottin (1841–1912) tasavirtamoottorin myötä vuonna 1861. Moottorin tärkeä ominaisuus oli, että sitä voitiin käyttää generaattorina, kun sitä pyöritettiin vastakkaiseen suuntaan kuin normaalisti. [2]



Kuva 1. Ayrtonin ja Perryn kolmipyörä [2].

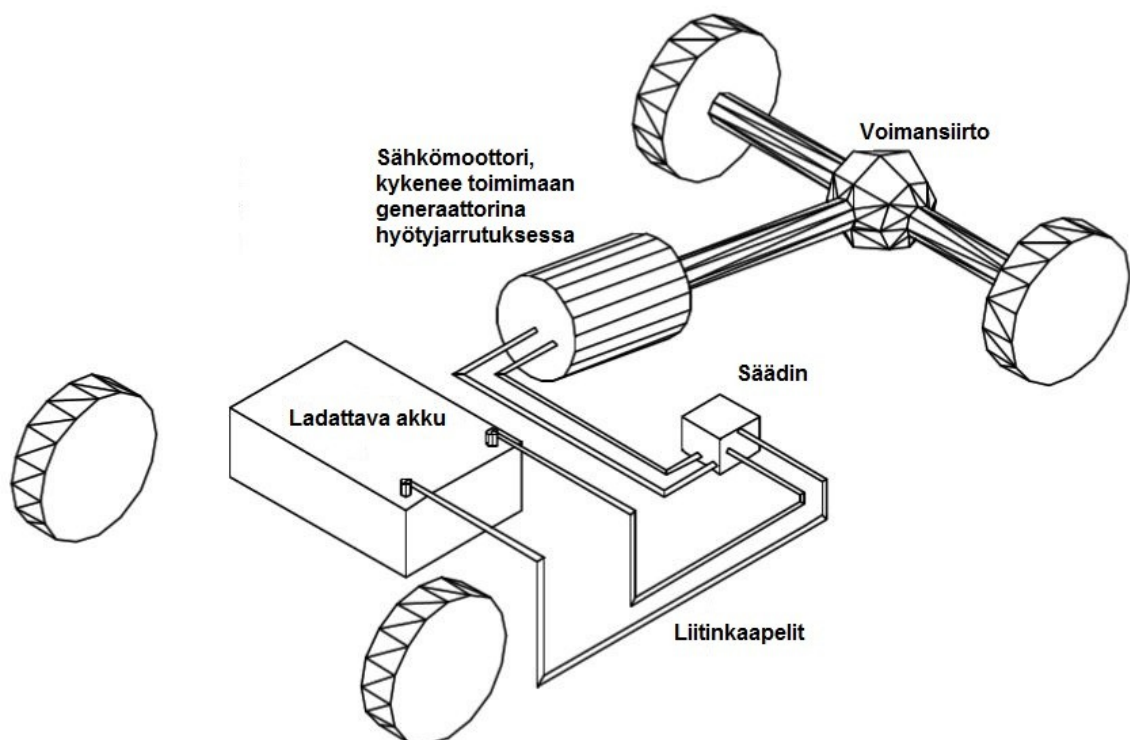
Näitä hyödyntäen vuonna 1881 ranskalainen Gustave Trouvé (1839 – 1902) kehitti ensimmäisen sähköauton, joka hyödynsi Plantén akkua. Tämä kolmipyörä painoi 160 kg ja sen huippunopeus oli 12 km/h. Englannissa professori William Ayrton ja John Perry kehittivät oman mallinsa vuonna 1882, joka hyödynsi myös Plantén akkua. Kuva 1 esittää tätä ajoneuvoa. Auto oli hieman nopeampi, mutta sen huomattavin ominaisuus oli sähkövalaistus.[2] Myöhemmin vuonna 1901 Thomas Edison (1847 – 1931) työskenteli sähköautojen akkutekniikan parissa ja kehitti nikkeli-rauta akun. Akku kykeni varastoimaan 40 % enemmän energiaa painoyksikköä kohti verrattuna aikaisemmin käytettyyn lyijyakkuun, mutta se oli paljon kalliimpi, minkä seurauksena akku ei saavuttanut laajaa käyttöä .[7]

Sähköautoja valmistettiin kaikkein eniten 1900-luvun alussa ja niitä oli paljon enemmän käytössä kuin polttomoottorillisia malleja, mutta sähköautojen asema heikkeni, kun Fordin K-malli ilmestyi vuonna 1906. Polttomoottorillisten autojen kehitys oli nopeaa, ja monia niiden ongelmia ratkottiin. Ongelmia olivat esimerkiksi kammella käynnistettävät moottorit ja moottorin meluisuus, mutta nämä ongelmat ratkaistiin keksimällä käynnistinmoottori ja äänenvaimennin.[2] Sähköautot olivat hiljaisia, mutta niiden paino, pitkät latausajat, kallis hinta ja huono kestävyys johtivat lopulta siihen, että sähköautot

olivat käytännössä kadonneet vuonna 1920 [4]. Sähköauto saattoi maksaa jopa 1000 dollaria enemmän kuin polttomoottorillinen auto [2].

2.2 Tekniikka

Perinteinen sähköauto koostuu sähkömoottorista, energialähteestä, säätimestä ja muista järjestelmistä, joilla hallitaan esimerkiksi hyötyjarrutusta tai valaistusta. Hybridiautoissa on myös polttomoottori apuna tuottamaan tarvittavaa vääntömomenttia. Sähkö- ja hybridiautojen yksi tärkeimmistä tekniikoista on hyötyjarrutus. Hyötyjarrutuksella korvataan autojen perinteinen kitkaa hyödyntävä jarrutustapa käyttämällä moottoria generaattorina, kytkentää muuttamalla. Tämän seurauksena moottori tuottaa virtaa, joka voidaan johtaa akkuun. Virta pitää muuntaa ensin DC/DC -muuntimella akulle, että jarrutus tapahtuu loppuun asti.[3] Riippuen käytetystä järjestelmästä, sähköauton toimintamatka voi kasvaa 10 - 15 %[4].



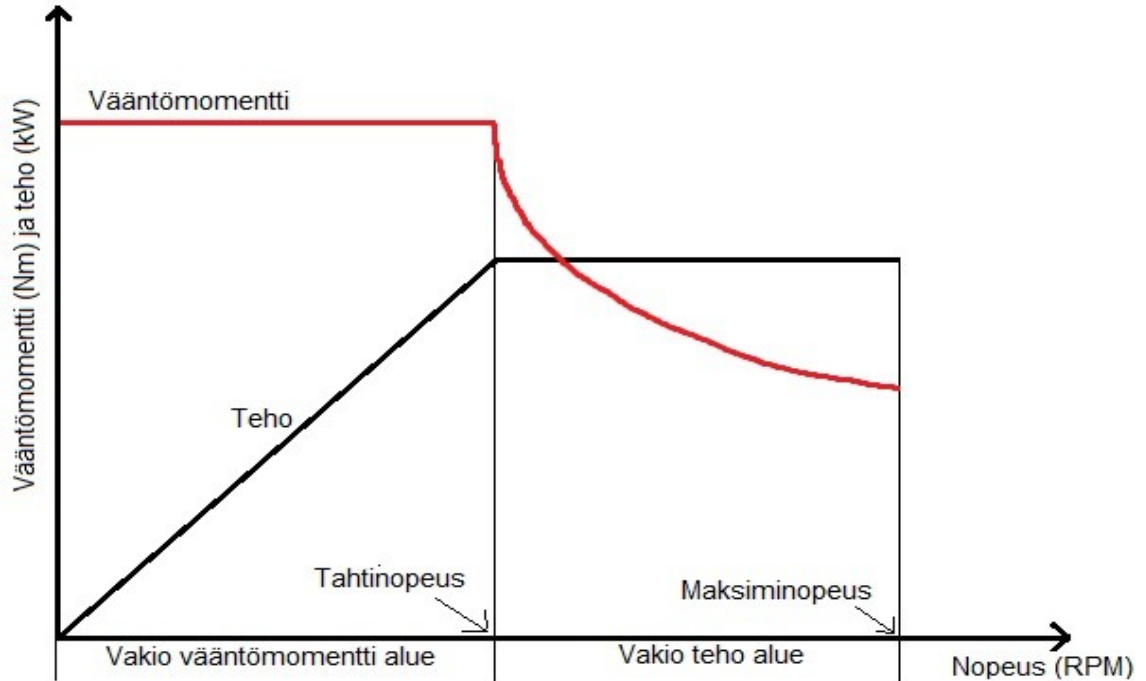
Kuva 2. Yksinkertaistettu sähköauto, muokattu lähteestä [1].

Kuva 2 esittää sähköauton yksinkertaistetun mallin. Käytännössä autoon lisätään monia muita järjestelmiä matkustusmukavuuden parantamiseksi ja auton toiminnan parantamiseksi. Myös sähkömoottoreiden eroavaisuuksista johtuen, sähköauton järjestelmissä tapahtuu muutoksia.

3. SÄHKÖAUTON MOOTTORIT

Sähkömoottoreita on monia ja jokaisella näistä on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Sähköauton moottoreita vertailevia tutkimuksia[5, 6] on tehty ja niiden vaatimuksia yhdistämällä tuotetaan seuraava lista tarpeellisista ominaisuuksista moottoreille:

1. suuri välitönvoima ja suuri tehotiheys
2. suuri vääntömomentti matalilla nopeuksilla ja korkea teho nopeaan ajoon
3. erittäin laaja nopeusalue vakioehtoalueella
4. nopea momenttivaste
5. korkea tehokkuus vakiovääntömomenttialueella ja vakioehtoalueella
6. tehokas hyötyjarrutus
7. luotettava ja kestävä
8. kohtuullinen hinta
9. vikojasietävä
10. moottorin säädin tukahduttaa sähkömagneettisia häiriöitä.

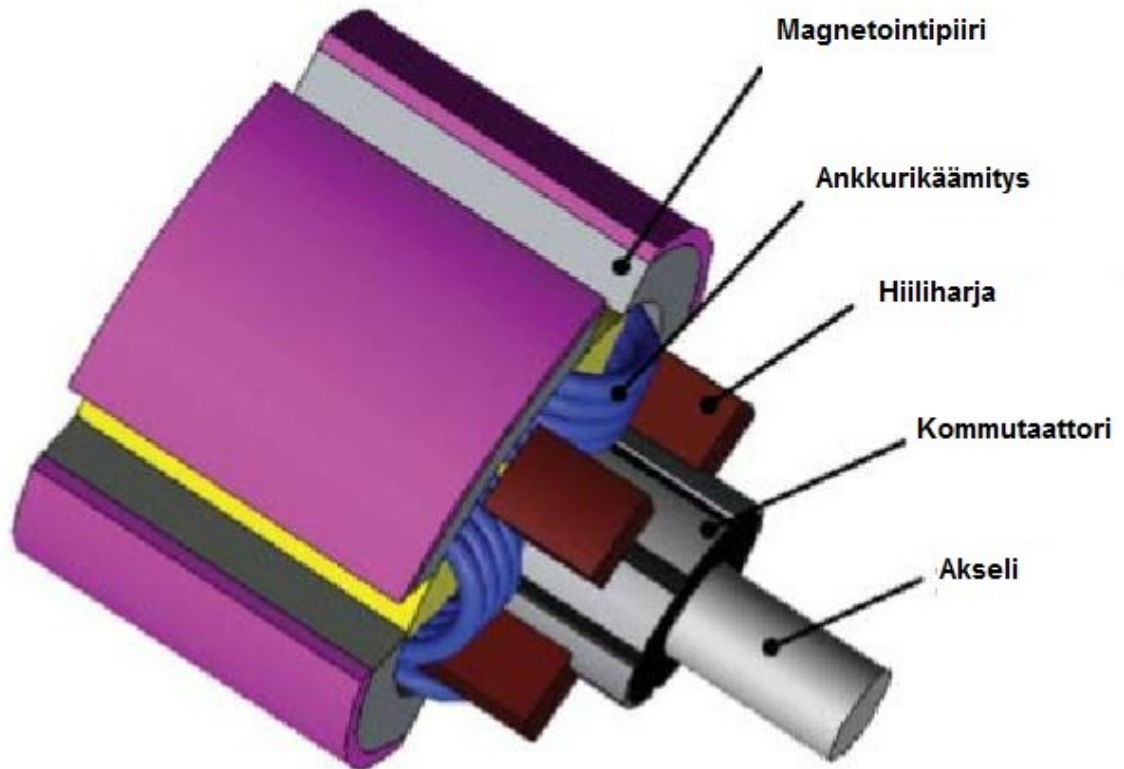


Kuva 3. Sähkömoottorin yleiset toimintaominaisuudet, tuotettu lähteen [5] pohjalta.

Kuva 3 esittää sähkömoottorin yleiset toiminta-alueet. Tämä kuvaaja muuttuu hieman eri moottorityypeillä niiden toiminnan erilaisuuksien takia, ja niiden ominaisten vahvuuksien ja heikkouksien tullessa esille. Perinteinen sähkömoottori koostuu paikallaan pysyvistä staattorista ja pyörivästä roottorista. Staattori on rakennettu roottorin ympärille. Yleisesti roottorin pyöriminen staattorin luomassa magneetikentässä tuottaa ajamiseen tarvittua vääntömomenttiä. Työssä keskitytään neljään yleiseen sähkömoottoriin. Muitakin sähkömoottoreita on käytössä, mutta niihin ei perehdytä tässä työssä.

3.1 Tasavirtamoottori

Tasavirtamoottorin ominainen piirre on sen harjallinen kommutaattori, jonka kautta virta johdetaan roottorin käämitykseen. Nimensä mukaisesti moottori toimii tasavirralla. Moottori on melko yksinkertainen ja sitä käytetään monissa kohteissa kuten leluissa tai hiustenkuivaimissa. Moottori toimii kun sen roottoriin johdetaan virtaa ja roottorin viralliset käämitykset tuodaan staattorin muodostamaan magneettikenttään, jolloin näiden komponenttien vuorovaikutus saa roottorin pyörimään. Roottorin käämistä kutsutaan ankkurikämmitykseksi.[1] Kuva 4 esittää tasavirtamoottorin rakenteen.



Kuva 4. Tasavirtamoottorin rakenne, muokattu lähteestä[8].

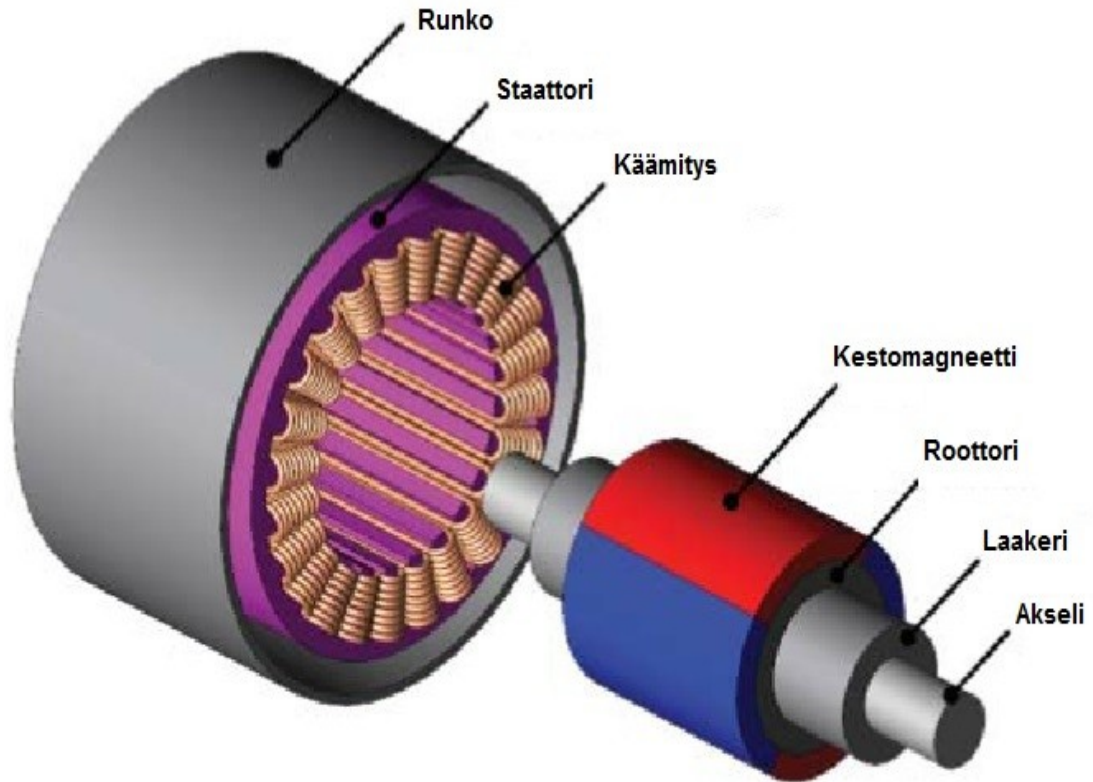
Staattorin magneettikenttä voidaan tuottaa kesto- tai sähkömagneeteilla, ja muodostettua piiriä kutsutaan magnetointipiiriksi. Näistä jälkimmäistä tarkastellaan enemmän, koska se tarjoaa mahdollisuuden hallita moottorin magneettivuota ja täten vääntömomenttia. Kestomagneeteilla on myös kalliimpaa tuottaa vahva magneettikenttä. Käämitykseen läpi kulkeva virta tuottaa moottorin tarvitseman magneettikentän. Moottoria hallitaan perinteisesti syöttöjännitettä muuttamalla, ja kun käytetään sähkömagneetteja, saadaan toinen keino muuttaa vääntömomenttia. Tarkemmalla hallinnalla toiminnan tehokkuus kasvaa. Käämityksillä toteutettujen sähkömagneettien huonona puolena on käämien lämpeneminen, jonka seurauksen toiminnan hyötysuhde laskee. Moottori on myös tunnettu sen kyvystä tuottaa suurta vääntömomenttia matalilla nopeuksilla. [1]

Ongelmana on kuitenkin moottorin harja, jonka kitka aiheuttaa häviöitä ja se kuluu käytössä vaatien huoltoa. Harja rajoittaa myös moottorin maksiminopeuden noin 6000 rpm:ään. Myös suurin osa häviöistä tapahtuu roottorissa, joka on vaikea poistaa, ja moottori voi ylikuumentua. Ylikuumeneminen on moottorin suurin ongelma, koska on olemassa raja, jonka jälkeen moottorin häviöistä syntyneitä lämpöä ei voida enään johtaa muualle kokonaan. Harjan ja kommutaattorin takia moottoria on myös vaikea pienentää ja sen seurauksena se on aina kookas. Moottoria on helppo hallita, mutta aiemmin mainittujen ongelmien ja tehoelektronikan kehityksen takia, harjallista tasavirtamoottoria käytetään yhä vähemmän ja kolmea myöhemmin mainittavaa

moottoria käytetään enemmän sähköautoissa. Moottori on vielä käyttökelpoinen, mutta tulevaisuudessa se tulee mitä todennäköisemmin olemaan käytössä vain matalemmän hintaluokan kohteissa moottorin halpuuden ja hyvän säädettävyyden takia. [1]

3.2 Kestomagnetoitu vaihtovirtamoottori

Moottorin ominainen piirre on sen kestopagnetoitu roottori, mikä korvaa perinteisen roottorikämmityksen. Tämän seurauksena roottorin kuparihäviöt poistuvat ja moottorin hyötysuhde kasvaa ja tuottaa suuremman ominaistehon. Kestomagneettien ansiosta moottorin painoa ja kokoa voidaan pienentää ja silti saavuttaa haluttu teho. Moottorin jäähtytys myös helpottuu, koska suurinosa toiminnan aiheuttamasta lämmöstä syntyy staattorissa. Moottorin haittoina pidetään sen kallista kestopagneettia ja rajoitettua vakiotehoaluetta. Kestomagneetti voi myös demagnetoitua korkeassa lämpötilassa tai altistuessa vahvalle magneettikentälle. Nämä ominaisuudet riippuvat käytetystä kestopagneetista.[3, 8] Myös, koska kestopagneetit sijaitsevat roottorissa, moottorin toiminta nopeutta joudutaan rajoittamaan, että kestopagneetit eivät irtoa suurilla nopeuksilla. Tämä riippuu kestopagneettien kiinnitys tavasta, ja varsinkin pintamagneettimoottoreille tämä on merkittävä ongelma.[8] Kuvasta 5 nähdään moottorin räjäytyskaavio ja moottorin osat tarkemmin.



Kuva 5. Kestomagneetoidun vaihtovirtamoottorin räjäytyskaavio, muokattu lähteestä [8].

Tämä moottorityyppi voidaan jakaa kahteen ryhmään, riippuen miten moottorin ilmävälin magneettivuo on tuotettu. Jos magneettivuo on sinimuotoisesti jakautunut ilmäväliin ja staattorin käämitys on rakennettu hajautetusti, kyseessä on kestopagneetoitu tahtimoottori. Toinen moottorityyppi tuottaa puolisuunnikkaan muotoista magneettivuon jakaumaa ilmäväliin, ja sen staattori käyttää keskitettyä käämitystä. Tätä moottoria kutsutaan harjattomaksi kestopagneetoiduksi tasavirtamoottoriksi, vaikka moottori kuuluu toiminnaltaan vaihtovirtamoottoreihin. [8] Syynä tähän on, koska moottorin nopeus/vääntömomenti ominaisuudet muistuttavat tasavirtamoottoria, ja moottori tarvitsee vaihtuvataajuista vaihtovirtaa, joka on muunnettu tasavirtalähteestä [1]. Kirjallisuudessa moottorin harjattomuutta tuodaan vahvasti esille, ja korostetaan kuinka tasavirtamoottoreille ominainen mekaaninenkommutointi on korvattu nyt sähköisellä kommutoinnilla. Tämän seurauksena harjallinen kommutaattori ei ole tarpeellinen ja moottori ei kärsi sen aiheuttamista ongelmista. [1, 8]

3.2.1 Kestomagneetit

Roottorin kestopagneetit voidaan valmistaa monista eri materiaaleista ja seuraavat neljä ovat suosituimmat: ferriitti, alumiini-nikkeli-kobaltti (AlNiCo), samarium-kobaltti (SmCo) ja neodyymi-rauta-boori (NdFeB)[3, 8]. Materiaalit eivät ole luonnollisesti valmiita toimimaan kestopagneetteina sähkömoottorissa, ja vaativat erillisen magnetointitoimenpiteen. Magnetointi toteutetaan kohdistamalla materiaaliin vahva ulkoinen magneettikenttä, kunnes kohteen magneettiset dipolit ovat kohdistettu, ja täten saavuttaen saturaation. Valmiin kestopagneetin magneetivuon tiheys on mahdollista mitata kytkemällä magneetti magneettisesti suljettuun piiriin ja oikosulkemalla sen navat. Mitattua arvoa kutsutaan remanenssivuontiheydeksi. [3]

Aivan kuten materiaali on mahdollista magnetisoida ulkoisen kentän avulla, materiaali voidaan myös demagnetisoida tarpeeksi vahvalla vastakkaisella ulkoisella magneettikentällä. Tämä tulee huomioida sähkömoottoria suunnitellessa, ja kestopagneetin kyky vastustaa demagnetisaatiota on haluttu ominaisuus. Tätä ominaisuutta kutsutaan koersitiivikentänvoimakkuudeksi ja sen arvo riippuu käytetystä kestopagneetista. Energiatiheys on myös tärkeä ominaisuus kestopagneetille, koska sen korkea arvo mahdollistaa suuremman tehon sähkömoottorille. Lämpötila vaikuttaa myös kestopagneetin toimintaan, muuttaen magneetin remanenssivuon- ja koersiivisuuden arvoa. Lämpötila vaikuttaa kestopagneetteihin eri vahvuudella, ja tätä kuvataan lämpötilakertoimilla.[3] Tarpeeksi korkeassa lämpötilassa kestopagneetti menettää magneettisuutensa ja tätä pistettä kutsutaan Curie-lämpötilaksi[8]. Taulukko 1 esittää eri kestopagneettien ominaisuuksia.

Taulukko 1. Kestomagneettien ominaisuuksia [8].

Materiaali	Remanenssi- vuontiheys, B_r (T)	Koersitiivi- kentän- voimakkuus, H_c (kA/m)	Energia- tiheys, $(BH)_{max}$ (kJ/m ³)	Remanenssin lämpötilakerroin (%/°C)	Koersitiivin lämpötila- kerroin (%/°C)	Curie- lämpötila, T_c (°C)
Ferriitti	0,43	330	35	-0,18	0,2	450
AlNiCo	1,25	51	44	-0,02	0,01	860
SmCo	1,21	796	271	-0,03	-0,22	825
NdFeB	1,47	820	422	-0,11	-0,65	345

Taulukosta 1 voidaan havainnoida kestopagneettien vahvuuksia ja heikkouksia. Näistä ferriitti on vanhin, ja se keksittiin 1930-luvulla. Ferriitin vahvuuksia ovat halpuus ja korkea resistiivisyys, mikä vähentää pyörrevirtojen aiheuttamia häviöitä.[8] Yleisesti korkea lämpötila laskee kestopagneetin koersiiviutta, altistaen helpommin demagnetoitumiselle, mutta ferriittin tapauksessa se kasvaa. Koersitiivin positiivinen

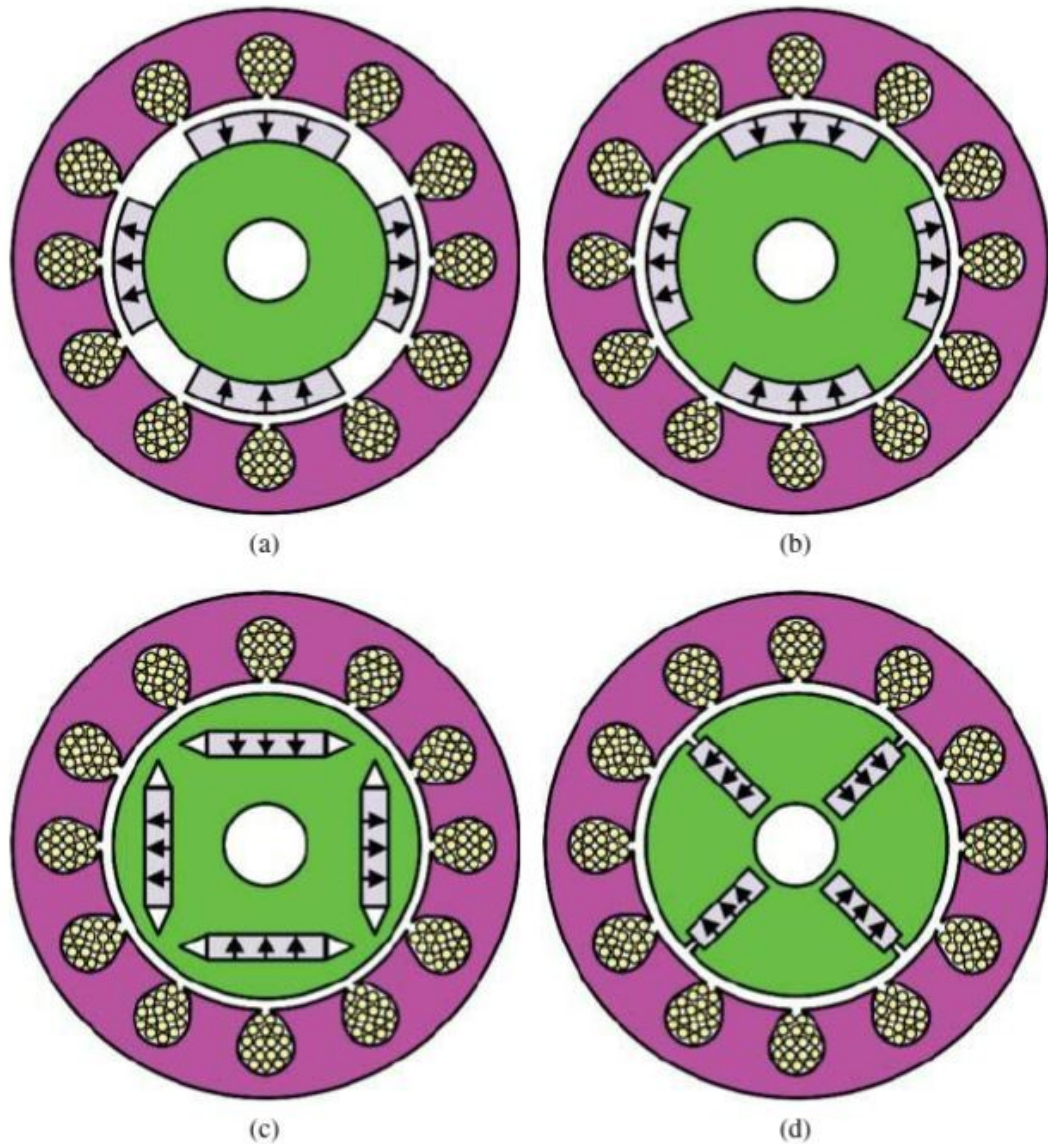
lämpötilakerroin tarkoittaa myös, että lämpötilan laskiessa kestopagneetin koersitiivisuus laskee.[3] Matala energiatiheys kasvattaa kestopagneetin kokoa, jos niitä halutaan moottorikäyttöön [8].

AlNiCo keksittiin 1940-luvulla. Sen merkittäviä puolia ovat korkea Curie-lämpötila ja matalat lämpötilakertoimet, mahdollistaen toiminnan korkeissa lämpötiloissa. Matalan koersitiivisuuden seurauksena kestopagneetti demagnetoituu helposti. SmCo keksittiin seuraavaksi 1960-luvulla, ja se tarjoaa korkean koersitiivikentänvoimakkuuden, energiantiheyden ja Curie-lämpötilan. Kestopagneetin samarium on kallis raaka-aine, ja se tekee kestopagneetista kalliin. Vuonna 1984 tuotettiin ensimmäiset NdFeB kestopagneetit. Tarkastelluista kestopagneeteista se tarjoaa parhaimmat magneettiset ominaisuudet ja on hinnaltaan kohtuullisesti halvempi kuin SmCo. Korkeiden lämpötilakertoimien ja matalan Curie-lämpötilan seurauksena kestopagneetti ei sovellu korkean lämpötilan toimintaan.[8]

3.2.2 Rakenne

Moottori voidaan jakaa kolmeen ryhmään sen perusteella miten roottorin kestopagneetit ovat asennettu. Nämä ryhmät ovat pintamagneettimoottori, pinta-uppo magneettimoottori ja uppomagneettimoottori. Uppomagneettimoottori voidaan jakaa vielä kahteen ryhmään riippuen mite magneetit ovat asetettu ja mihin suuntaan magnetointi on toteutettu.[3, 8] Kuva 6 esittää nämä vaihtoehdot.

Pintamagneettimoottorissa kestopagneetit ovat liimattu suoraan roottorin pinnan päälle. Tämän seurauksena tuotanto helpottuu, mutta menetelmää rajoittaa moottorin huippunopeutta, koska kestopagneetti voi irrota korkeilla nopeuksilla. Kestopagneetti voidaan upottaa roottorin pinnan lähelle sisälle, jolloin kyseessä on pinta-uppo magneettimoottori. Tämä parantaa moottorin mekaanista eheyttä ja mahdollistaa korkeamman toimintanopeuden. Jos eheyttä halutaan vielä lisätä niin kestopagneetit voidaan upottaa syvälle roottoriin ja tuottaa uppomagneettimoottori. [3, 8]



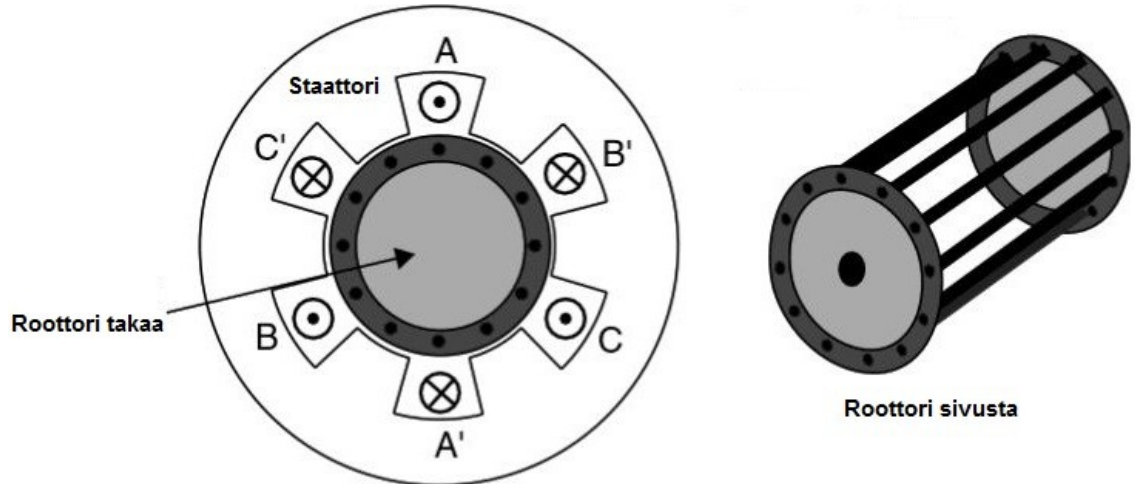
Kuva 6. Kestomagnetoidun vaihtovirtamoottorin eri kestmagneetti asetukset. (a) pinta, (b) pinta-uppo ja (c)(d) uppo.[8]

Luvun alussa esiteltiin kaksi vaihtoehtoa kestmagnetoidulle vaihtovirtamoottorille, kestmagnetoitu tahtimoottori ja harjaton kestmagnetoitu tasavirtamoottori, jotka molemmat käyttävät edellä mainittuja kestmagneetin asennustapoja. Yleisesti harjaton tasavirtamoottori suosii pintamagneetteja ja tahtimoottori käyttää pinta-uppo- tai uppomagneetteja.[3, 8]

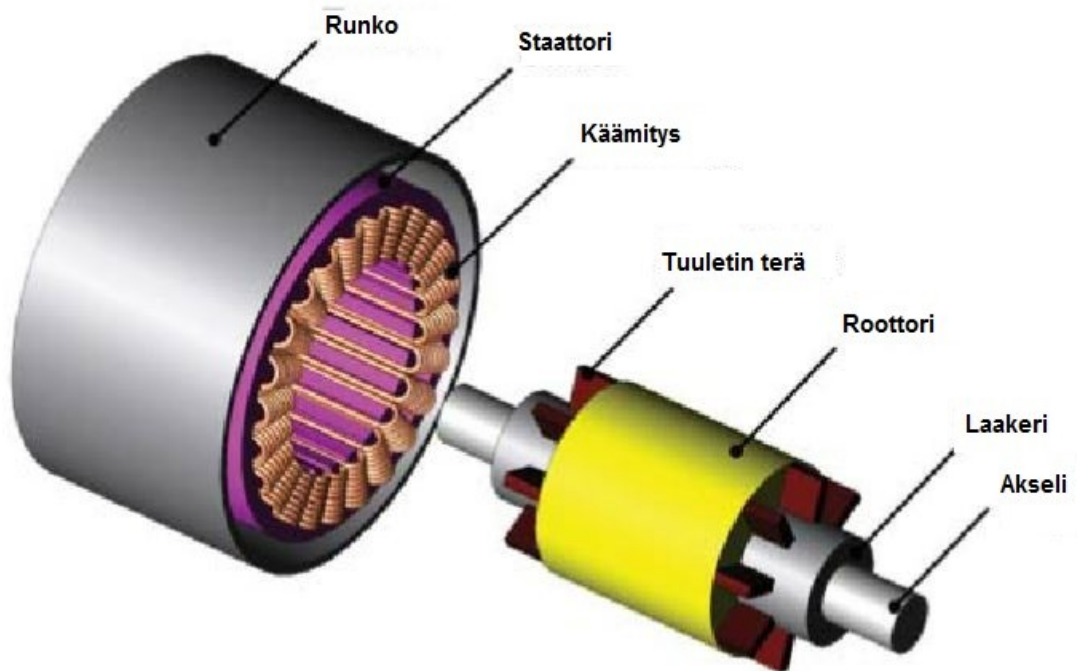
3.3 Oikosulkumoottori

Oikosulkumoottori kuuluu epätahtikoneiden joukkoon, joiden ominainen piirre on eri tahtiin kuin staattorin tuottaman magneettikentän tahtiin pyörivä roottori. Moottori käytössä roottori pyörii hieman jäljessä kuin staattorin tuottama magneettikenttä.

Oikosulkumoottorin lisäksi on olemassa myös liukurengasmoottori, mutta tätä moottoria ei tarkastella, koska sähköautoissa käytetään pääsääntöisesti oikosulkumoottoria. Liukurengasmoottori vaatii myös enemmän huoltoa, on kalliimpi ja rakenteeltaan vähemmän jyrkempi kuin oikosulkumoottori.[8]



Kuva 7. Oikosulkumoottorin staattori ja roottori, muokattu lähteestä [1].

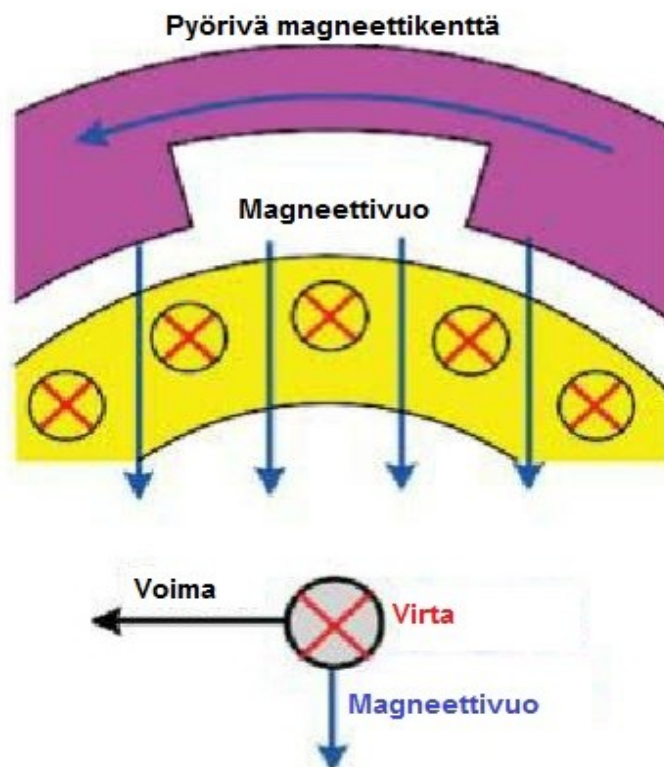


Kuvat 8. Oikosulkumoottorin räjäytyskaavio, muokattu lähteestä [8].

Kuvasta 7 nähdään moottorille ominainen roottorin häkkikäämitys. Häkin sauvat ovat yleensä tehty kuparista tai alumiinista, ja ne ovat oikosuljettu sauvojen päistä renkailla. Jotta tämä piirre voidaan tuoda selvästi esille, roottori on esitetty onttona, vaikka häkin sisältö on yleensä kerrostettua rautaa.[1] Kuva 8 esittää oikosulkumoottorin

räjätyskaavion, jossa roottori on tuotu ulos, näyttäen moottorin perusrakenteen. Tässä tapauksessa roottoriin on myös lisätty tuuletinterät auttamaan jäähdytyksessä.[8]

Oikosulkumoottori on ollut pitkään teollisuudessa käytössä ja sitä pidetään kaikkein teknologisesti kypsimpänä vaihtovirtamoottoreista. Moottori on rakenteeltaan yksinkertainen ja jyrävä, jonka seurauksena sen tuottaminen on halpaa.[3, 8] Moottori tuottaa vääntömomentin roottorin ja staattorin magneettikenttien vaikutuksesta. Yleensä staattori käyttää hajautettua kolmivaihekkäämitystä. Staattorin käämitykseen johdetaan kolmivaiheinen virta, mikä tuottaa tahtinopeudella pyörivän magneettikentän illmarakoon, ja indusoi virtaa roottoriin. Moottori hyödyntää ilmiötä nimeltään Lorentzin voimalaki, jonka mukaan liikkuvien varausten magneettikentät tuottavat voiman. Koska roottorin johtimet ovat oikosuljettu, indusoitu virta tuottaa liikuttavan voiman Lorentzin voimain mukaan, jonka seurauksena roottori pyörii ja moottori tuottaa vääntömomentin. [3] Kuva 9 esittää toiminnan magneettivuon-, virran- ja voiman suunnat. Kuvassa virta kulkee roottorin sauvoissa suoraan alas kohti paperia.



Kuva 9. Vääntömomentin tuotto, muokattu lähteestä [8].

Oikosulkumoottorin roottori pyörii yleensä hieman jäljessä tahtinopeudesta, ja tätä kutsutaan jättämäksi. Jättämä on moottorin toiminnan kannalta pakollista, koska virtaa ei induoidu roottoriin jos se pyörii tahtinopeudella. Ilman induoitua virtaa vääntömomenttia ei synny. Jättämä voidaan esittää kaavalla

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (1)$$

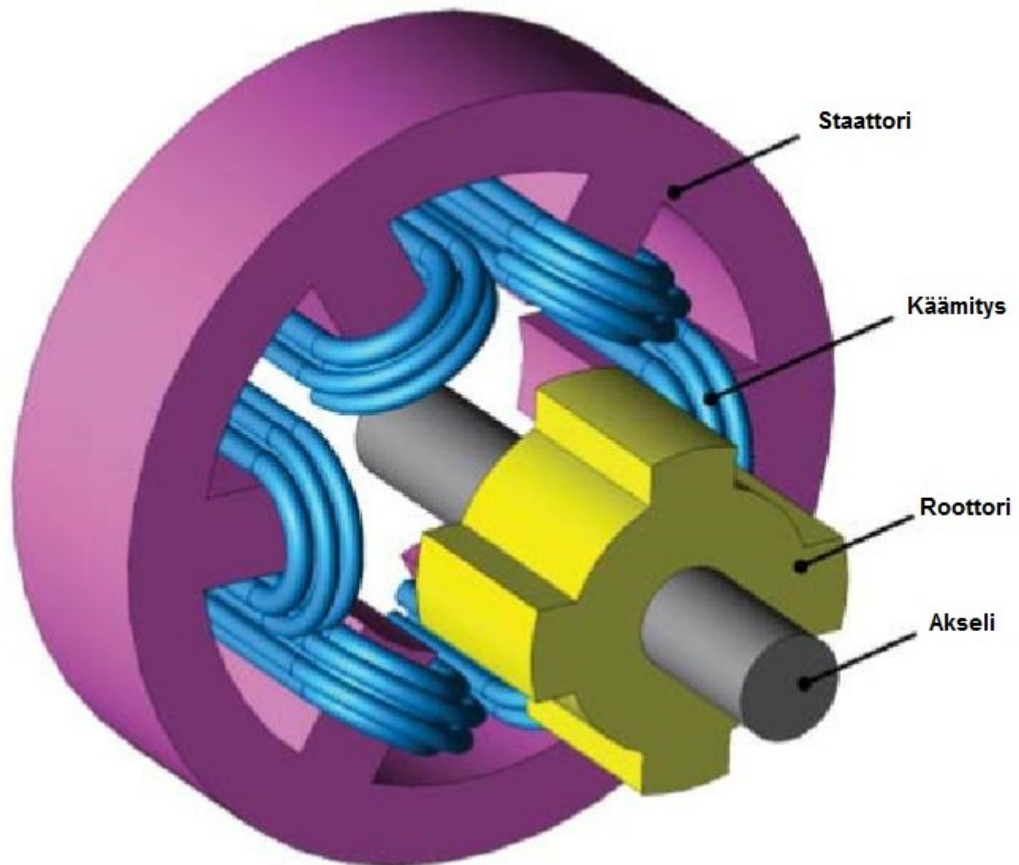
jossa ω_s on pyörivän magneettikentän kulmanopeus ja ω_r on roottorin kulmanopeus. Jättämä vaikuttaa roottoriin indusoituneiden virtojen taajuuteen, ja se voidaan esittää kaavalla

$$f_r = sf_s \quad (2)$$

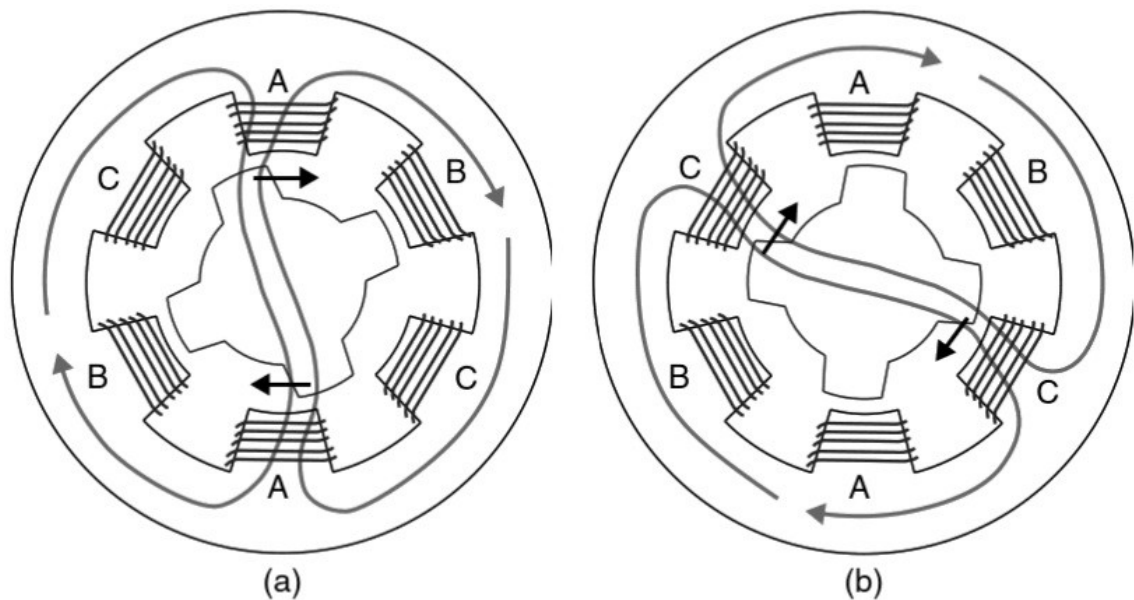
jossa f_r on roottoriin indusoituneen virran taajuus, s on jättämä ja f_s on tahtitaajuus. Käytössä moottorin jättämä vaihtelee nollan ja yhden välillä. Korkea roottorivirran taajuus nostaa roottorissa tapahtuvia häviöitä, joten käytännössä jättämä pyritään suunnittelemaan matalaksi.[3]

3.4 Avonapainen reluktanssimoottori

Rakenteeltaan avonapainen reluktanssimoottori eroaa huomattavasti aiemmin esitetyistä moottoreista. Kuvasta 10 ja kuvasta 11 voidaan havainnoida, kuinka roottorissa ja staattorissa on nyt ulokkeita. Nämä ulokkeet ovat avonapoja, ja moottorin toiminta nojaan roottorin vastakkaisten avonapaparien ja staattorin vastakkaisten avonapaparien vastakkain kohdistamiseen. Roottorin merkittävä eroavaisuus on myös se, miten siinä ei ole käämityksiä tai kestopagneetteja. Rakenteeltaan roottori on yksinkertaista kerrostettua rautaa, jonka seurauksena se soveltuu korkean lämpötilan ja -nopeuden käyttöihin. Staattorissa käytetään käämejä, jotka ovat keskitetysti asennettu staattorin avonapojen ympärille.[3,8]



Kuva 10. Avonapaisen reluktanssimoottorin rakenne, muokattu lähteestä[8].



Kuva 11. Avonapaisen reluktanssimoottorin toimintaperiaate, muokattu lähteestä[1].

Avonapaisen reluktanssimoottorin roottorin ja staattorin rakennetta voidaan muuttaa vaihtamalla avonapojen lukumäärää. Yleisesti moottorin avonapa luvut ilmoitetaan

muodossa x/y napainen avonapainen reluktanssimoottori, missä x kuvaa staattorin avonapojen lukumäärää ja y roottorin avonapojen lukumäärää.[3,8] Esimerkiksi kuvissa 9 ja 10 käytössä on $6/4$ napainen avonapainen reluktanssimoottori. Yleensä Staattorilla on kaksi avonapaa enemmän kuin roottorilla[1]. Avonapoja poistamalla moottorin hintaa voidaan vähentää, mutta seurauksena on epävakampaa toiminta, josta seuraa tuotetun vääntömomentin aaltoilua ja akustista melua. Roottori liikkuu kytkemällä virtaa staattorin tietylle vastakkaiselle napaparille, jolloin napapari tuottaa magneettikentän ympärilleen ja kytketyn napaparin lähellä oleva roottorin napapari vetäytyy kohti kyseisen staattorin napoja, pyrkien vähentämään reluktanssia ja maksimoimaan magneettivuota. Kun roottori on siirtynyt sen vetäneen staattori napaparin kohdalle, staattorinavan magneettikenttä kytketään pois päältä. Roottori jatkaa pyörimistä staattorin napaparin ohi ja nyt kytketään seuraavaan staattorin napapariin virta, jolloin roottorin nopeus kasvaa, kun se pyrkii asettumaan staattorin kytketyn napaparin kohdalle. Kuva 11 esittää tätä toimintaa. Staattori napapariin A on kytketty virta kuvan osiossa (a) ja roottori pyörii tämän seurauksena, pyrkien vähentämään reluktanssia ja kasvattamaan induktanssia. Osiossa (b) napapari A:n virta on kytketty pois ja virta kytketään nyt napaparille C, jolloin roottorin nopeus kiihtyy sen pyrkiessä asettumaan parempaan magneettiseen asemaan. Tämän seurauksena liike ja tuotettu vääntömomentti voi olla hieman nykivää, ja tuottaa melua. Tätä ongelmaa voidaan tasoittaa lisäämällä avonapoja roottoriin ja staattoriin. [3, 8] Roottorin sijaintia pitää tarkkailla sensoreilla, jotta napapareja kytketään oikealla hetkellä. Sensoriton toiminta on myös mahdollista päättelemällä roottorin sijainti staattorin käämitysten jännitteiden ja virtojen avulla, mutta tämä vaatii korkeaa laskentatehoa moottorin säädinjärjestelmältä.[1]

4. SÄHKÖJÄRJESTELMÄT

Kuten perinteisissä polttomoottorillisissa autoissa, sähköautot voivat käyttää samoja järjestelmiä matkustusmukavuuden parantamiseksi, kuten ilmanvahtojärjestelmiä ja radioita. Koska sähköauton toimintaa nojaa sähkömoottoriin, tästä seuraa joitain muutoksia verrattuna polttomoottorilliseen autoon. Sähköauto ei tarvitse bensatankkia ja se korvataan toisella energianvarastointi menetelmällä, esimerkiksi akuilla. Myös sähkömoottorin hallinta vaatii oman erillisen järjestelmänsä. Moottorin tuottama vääntömomentti voidaan suoraan johtaa renkaille tai vaihteiston kautta, kuten polttomoottorillisen auton tapauksessa. Tässä luvussa keskitytään ensin sähköauton akkujärjestelmään ja muihin energianvarastointi menetelmiin. Tämän jälkeen esitetään lyhyesti aiemmin esille tuoduille sähkömoottoreille hallintajärjestelmiä ja -menetelmiä.

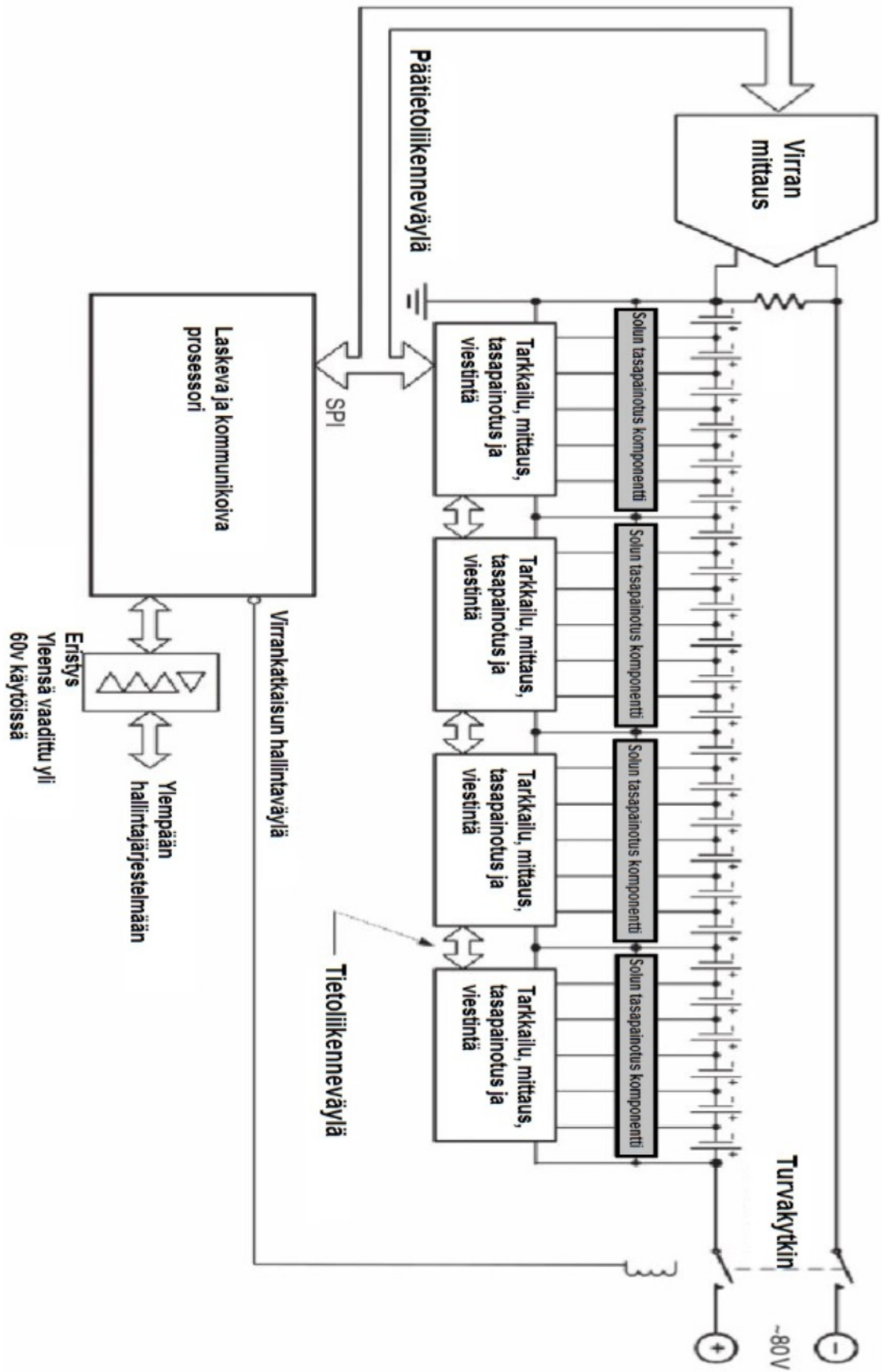
4.1 Energianvarastointi

Akkukäyttöinen sähköauto on kaikkein vanhin ja yksinkertaisin energianvarastointi menetelmä. Akut ovat kehittyneet vuosienvarrella, ja uusia materiaaleja on käytetty tehokkaampien akkujen valmistamiseksi. Tästä huolimatta sähköauton eniten kehitystä vaativa järjestelmä on edelleen sen akut. Jotta autolla voidaan ajaa pitkiä matkoja, kuten polttomoottorillisilla autoilla, sen akun koko kasvaa, koska akkujen energiatiheys ei ole tarpeeksi suuri verrattuna polttomoottorien käyttämään bensaan. Tästä seuraa, että akku on sähköauton kaikkein suurin ja kallein komponentti. Eräs tapa korjata tätä ongelmaa on suunnitella autojen akkujen olevan helposti vaihdettavia. Tämän seurauksena auton kyydissä olevan akun ei tarvitse olla kohtuuttoman suuri, mutta auton pitää vaihtaa akkua tietyin väliajoin erillisillä akunvaihtoasemilla. Etuna on myös se, että kulutettu akku on nopeampaa vaihtaa ladattuun akkuun, kuin ladata kulutettu akku täyteen.[9]

Akku koostuu monista yhteenliitetyistä soluista ja energianvarastointijärjestelmän tehtävänä on huolehtia, että akun solut toimivat kuten on suunniteltu. Nämä solut voidaan liittää toisiinsa monella eri tavalla, tehden akusta modulaarisen ja helposti laajennettavan. Energianvarastointijärjestelmä tarkkailee ja vahtii akkua, pyrkien paikantamaan mahdolliset virhetilanteet ja korjaamaan niitä jos mahdollista. Akkuun voidaan liittää erillisiä lämmitys- tai viilennysjärjestelmiä, auttamaan vakaan toiminnan ylläpitämisessä. Järjestelmä mittaa solujen jännitteitä, virtoja ja lämpötiloja. Solujen

varauksen tilaa ja toiminallista terveyttä on myös tärkeä tarkkailla. Energianvarastointijärjestelmän tehtävänä on myös akun solujen varausten tasapainottaminen. Akkua käytettäessä solujen varaukset vaihtelevat ja voivat erota toisistaan, jonka seurauksena akun soluja voidaan yliladata tai -purkaa. Eräitä syitä solujen varausten eroavaisuuksiin ovat solujen eriävät itsepurkautumisnopeudet ja solujen epätasainen käyttö. Tasoittamalla solujen varauksia tämä ongelma voidaan välttää ja pitkittää akun elinikää. Energianvarastointijärjestelmään yleisesti kuuluu kyky kommunikoida muiden järjestelmien tai käyttäjän kanssa. Järjestelmä voi esimerkiksi keskustella auton keskusjärjestelmän kanssa, ilmoittaen mahdollisista vika tilanteista tai vain tiedottaen, että järjestelmä toimii normaalisti. Jopa yksinkertainen palava LED-lamppu voi toimia riittävänä kommunikoinnin menetelmänä kertomaan käyttäjälle järjestelmän vikatilasta. [3, 9]

Energianvarastointijärjestelmän tehtävänä on ylläpitää ja vahtia akun toimintaa, hyödyntäen monia menetelmillä, mutta nämä kaikki eivät ole pakollisia. Riippuen käyttökohteesta ja akkutyypistä, joitain ominaisuuksia ei välttämättä tarvita. Myös tiettyjä arvoja ei välttämättä tarvitse tarkkailla erityisen tarkkaan, jonka seurauksena yksinkertaisempia ja halvempia menetelmiä voidaan hyödyntää. Esimerkiksi akun lämpötilan tarkkailussa voi olla tärkeintä vain pitää huoli, että lämpötila ei kasvaa liian korkeaksi tai laske liian matalaksi, jonka seurauksena ilmoitetaan muille järjestelmille tai käyttäjälle vain lämpötilaongelmasta, ja tarkalla lämpötilan arvolla ei ole väliä. [9] Kuvassa 12 esitetään esimerkki, miltä energianhallintajärjestelmän lohkokaavio voi näyttää.

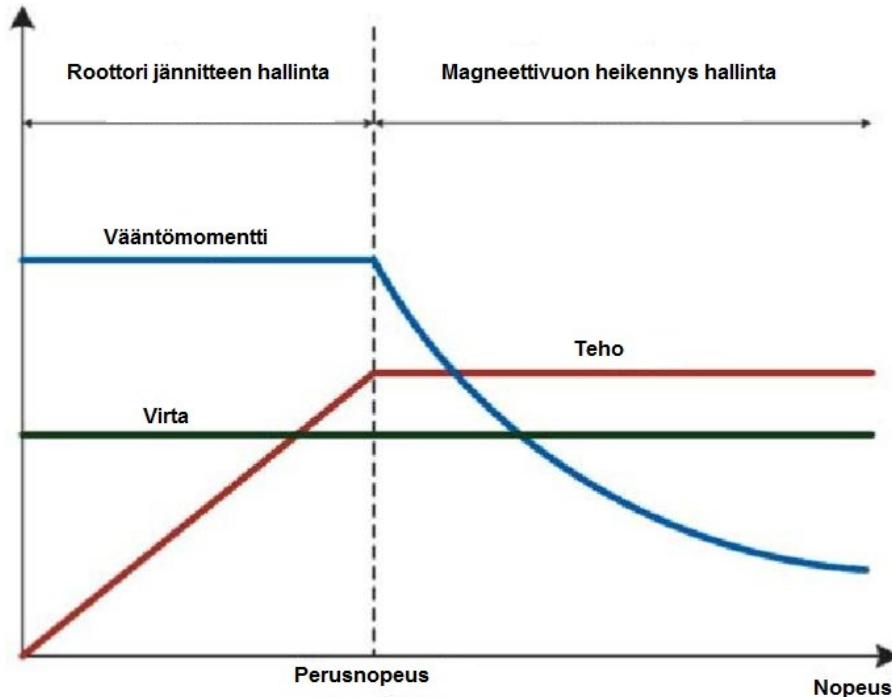


Kuva 12. Esimerkki lohkoakaavioesitys energianhallintajärjestelmästä, muokattu lähteestä [9].

Akun sijasta moottorin energialähteenä voidaan käyttää myös vauhtipyöriä tai superkondensaattoreita. Nämä vaihtoehdot tajoavat korkean tehoteheyden, mutta matalan energiateheyden. Polttokennoja on myös ehdotettu toimimaan sähköauton energialähteenä, hyödyntäen vedyn suurta energiateheyttä painoon nähden ja polttokennojen toiminnan päästöttömyyttä. Ongelmana on kuitenkin polttokennojen kallis hinta ja vedyn varastoinnin vaikeudet. Sähköautojen toimintamatkaa on mahdollista kasvattaa myös asentamalla aurinkokennoja esimerkiksi auton katolle tai suunnittelemalla autoon järjestelmä, joka vastaanottaa langattomasti virtaa hyödyntäen induktiota. Langattoman latausjärjestelmän avulla autoa voidaan ladata ajonaikana ja se ei vaadi fyysistä kytkentää. Tämä ratkaisu vaatii kuitenkin erillisten latausalustojen rakentamista ja ylläpitämistä halutuille ajoväylille. [1]

4.2 Moottorin säätö

Sähkömoottoreista tasavirtamoottoria on helpoin käsitellä. Moottori toimii tasavirralla, joka voidaan johtaa suoraan akusta ja muuntaa vastaamaan haluttua jännitettä. Kolme myöhemmin esiteltyä sähkömoottoria ovat vaihtovirtamoottoreita ja toimivat vaihtovirralla. Koska akut tuottavat vain tasavirtaa, moottorit tarvitsevat erillisen vaihtosuuntaimen muun hallintajärjestelmän lisäksi. Pulssinleveyden modulointi (englanniksi pulse width modulation) on myös tarpeellista, jonka avulla vaihtosuuntaimen kytkentätaajuutta hallitaan ja tuotetaan virtaa, joka on lähempänä haluttua vaihtovirtaa.[1]

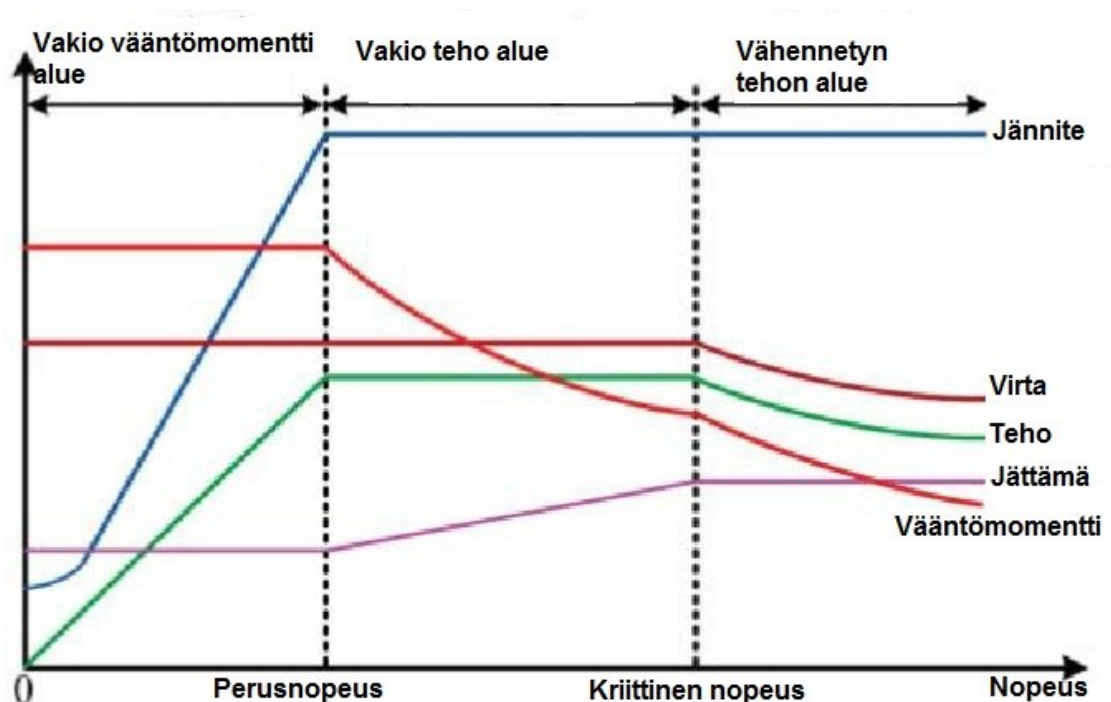


Kuva 13. Erillismagnetoidun tasavirtamoottorin toimintaominaisuudet, muokattu lähteestä [8].

Tasavirtamoottoria on helppo hallita nostamalla roottorin jännitettä tai heikentämällä staattorin magneettikenttää. Nopeus kasvaa tämän seurauksena. Kun moottoria käytetään alle sen perusnopeudella, moottoria hallitaan roottorin jännitettä muuttamalla. Jos moottoria käytetään yli sen perusnopeuden, jännitettä ei voida kasvattaa enään, ja nostaa sen arvoa yli mitoitettun jännitteen. Kasvava nopeus nostaa staattorin magneettikentän aiheuttamaa sähkömotoristavoimaa roottoriin, joka heikentää moottorin vääntömomenttia. Moottorin nopeutta voidaan nostaa nyt heikentämällä staattorin magneettikenttää ja pitämällä roottorin jännite vakiona.[8] Kuva 13 esittää moottorin toimintaominaisuudet.

Kestomagnetitua tahtimoottoria voidaan hallita vuon heikennys hallintamenetelmällä (englanniksi flux-weakening control), jossa ilmavälin magneettivuota heikennetään, ja kenttäkeskeisellä hallinnalla (englanniksi field-oriented control). Kestomagnetoitu harjaton tasavirtamoottori hyödyntää vaiheen etenemiskulman hallintamenetelmää (englanniksi phase-advance angle control). Kenttäkeskeisessä hallintamenetelmässä muodostetaan dynaaminen matemaattinen malli, jossa moottorin paikallaan pysyvät a-b-c -asteikon arvot muutetaan tahtinopeudella pyörivään d-q asteikon arvoiksi. Muodostetusta mallista voidaan eritellä d- ja q- akselin virrat, joita hallitaan niiden omilla PI-säätimillä, ja täten moottorin magneettivuota ja vääntömomenttia voidaan hallita. Virtojen avulla voidaan muodostaa yhtälö d- ja q- akselin jännitteille, jotka syötetään hallintajärjestelmän pulssinleveys modulaattorille, jotta vaihtosuuntaimen

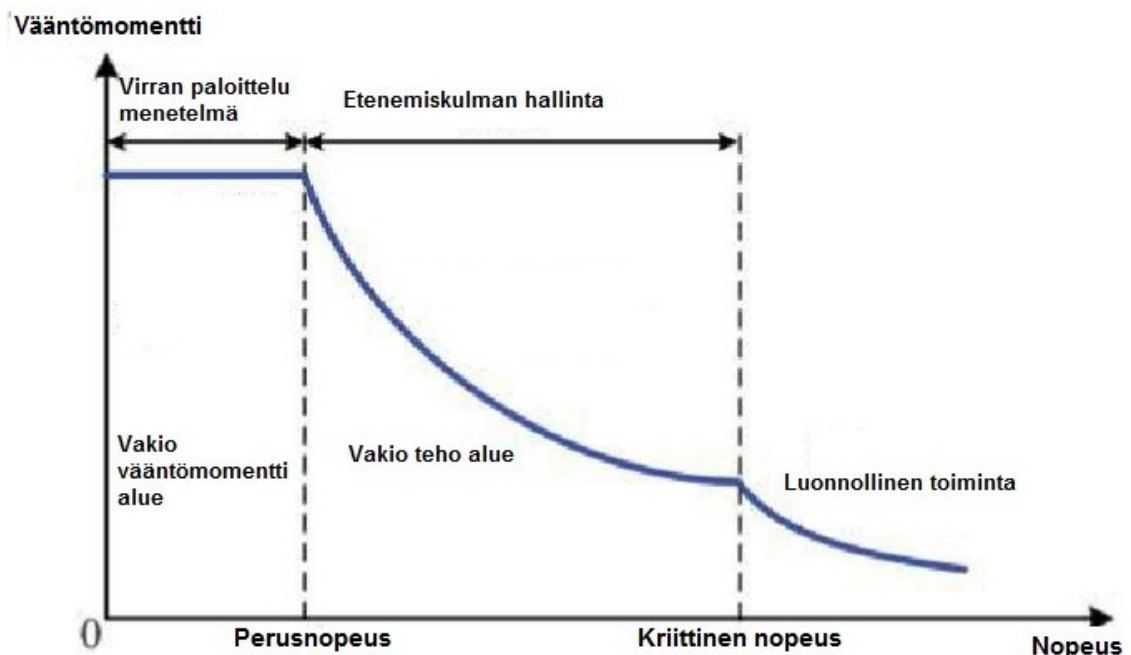
tarvitsemat kytkentäsignaalit voidaan määrittää. Menetelmä tarvitsee sensoreita määrittämään roottorin sijainnin. Vuon heikennys menetelmässä käytetään edellisen hallintamenetelmän muodostamaa matemaattista mallia ja hallitaan d- ja q-akselin virtoja. Koska kasvava nopeus nostaa takaisin muodostuvaa sähkömotoristavoimaa, nopeutta voidaan kasvattaa laskemalla ilmavälin magneettivuontiheyttä. Tämä tapahtuu säätämällä d-akselin virta negatiiviseksi ja q-akselin virta positiiviseksi. Kestomagnetoitu harjaton tasavirtamoottori hyödyntää vaiheen etenemiskulman hallintamenetelmää, kun moottori toimii nopeammin kuin sen perusnopeus. Tällä nopeusalueella perinteinen säätö ei kerkiä asettamaan vaihevirtojen arvoja halutuille tasoille. Tämä johtuu syötetyn virran ja takaisin muodostuneen sähkömotorisen voiman pienistä eroavaisuuksista. Kasvattamalla vaihevirran kytkentäkulmaa, virran arvot kerkiävät kasvamaan haluttuihin arvoihin. Tätä niin kutsuttua vaiheen etenemiskulman arvoa kasvattamalla tasaisesti, moottorin vakio tehoalueen kokoa voidaan nostaa.[8]



Kuva 14. VVVF-hallintamenetelmän toiminnalliset ominaisuudet, muokattu lähteestä [8].

Oikosulkumoottoria voidaan hallita vaihtamalla jännitteen ja taajuuden arvoja (englanniksi variable-voltage variable-frequency control tai lyhennettynä VVVF), kenttäkeskeisellä hallinnalla (englanniksi field-oriented control) tai vääntömomentin suoralla hallinnalla (englanniksi direct torque control). VVVF-hallintamenetelmässä vääntömomentti ja ilmaraon magneettivuon tiheys ovat riippuvaisia syötetystä jännitteestä ja taajuudesta. Jännitteen ja taajuuden arvoja muuttamalla moottorin toimintaa voidaan säätää halutulle nopeudelle. Kuva 14 esittää hallinta menetelmän

toiminnalliset ominaisuudet. Kuten kestopagnetoidun tahtimoottorin tapauksessa, oikosulkumoottori voi käyttää samaan tapaan kenttäkeskeistä hallintaa. Dynaaminen matemaattinen malli rakennetaan ja moottorin parametrit muunnetaan tahtinopeudella pyörivään d-q -asteikkoon, ja virran komponentteja hallitaan. Vääntömomentin suoralla hallintamenetelmällä moottorin vääntömomenttia ja staattorin magneettivuon linkitystä hallitaan suoraan valitsemalla vaihtosuuntaimen pulssinleveys modulaattorille sopivat kytkentätilat. Valmiit jännite vektorit määritetään muuttamaan vuon linkityksen ja vääntömomentin arvoa, ja pulssinleveys modulaattorille syötetään aina sopiva jännite vektori sen mukaan, kuinka vuon linkityksen tai vääntömomentin arvoa halutaan muuttaa.[8]



Kuva 15. Avonapaisen reluktanssimoottorin hallinta, muokattu lähteestä [8].

Avonapaisen reluktanssimoottorin nopeutta hallitaan virran paloittelu menetelmällä (englanniksi current chopping control) ja etenemiskulman hallinnalla (englanniksi advance angle control). Kun moottori toimii alle sen perusnopeudella, virran paloittelu hallintamenetelmää käytetään. Hystereesivirtasäädintä käyttämällä haluttujen vaiheiden virrat kytketään päälle ja pois, jotta roottori pyörii kuten luvussa 3.4 esitettiin. Virtoja kytketään yleensä hieman etuajassa, jotta haluttu toiminta on mahdollista. Tämä aika riippuu vaihe virrasta ja roottorin nopeudesta. Etenemiskulman hallintaa käytetään kun toimintanopeus on yli perusnopeuden. Hallintajärjestelmässä virtoja kytketään päälle ja pois vielä aikaisemmin kuin virran paloittelu menetelmässä. Tämä on tarpeellista, koska korkealla roottorin pyörimisnopeudella takaisin muodostuva sähkömotorinen voima kasvaa ja laskee vaihevirtoja. Mitä nopeammin

roottori pyörii, sitä aikaisemmin vaihevirratt tulee kytkeä halutuille kytkimille. Kuva 15 esittää moottorin vääntömomentin eri moottorin hallintamenetelmillä.[8]

5. YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli esitellä sähköauton toimintaa lyhyesti esittelemällä sähköautojen käyttämiä sähkömoottoreita ja sähköjärjestelmiä. Työssä myös esitettiin sähköautojen historiaa, näyttäen kuinka sähköautot kehittyivät ja lopulta poistuivat yleisestä käytöstä.

Sähkömoottoreista tasavirtamoottori on vanhin, halvin ja helppo käyttöisin, mutta sen harjallisen kommutaattorin vaatiman huollon ja yleisen matalan hyötysuhteen seurauksena, moottoria ei käytetä yleensä nyky sähköautoissa. Tehoelektroniikan kehityksen ansiosta vaihtovirtamoottorit tarjoavat suuremman hyötysuhteen ja tehokkaamman toiminnan sähköautoille. Vaikka moottoreiden hallinta on vaikeampaa, nyky tehoelektroniikka kykenee ratkaisemaan nämä ongelmat. Kestomagnetitujen tasavirtamoottoreiden kestopagneetit pitää valita tarkasti halutun käyttökohteen mukaisesti. Työssä esitetty NdFeB-kestopagneetti tarjoaa parhaimmat magneettiset ominaisuudet, mutta toimintalämpötilaan pitää kiinnittää enemmän huomiota. Tämän seurauksena moottorin jäähdytys vaatii tarkempaa suunnittelua. Kestomagnetointi tarjoaa korkean tehon, mutta nostaa moottorin hintaa. Oikosulkumoottori tarjoaa jyvän ja teknologisesti kypsän vaihtoehdon sähköauton moottoriksi. Vaikka kestopagneetitu vaihtovirtamoottori kykenee tarjoamaan korkeamman tehon, oikosulkumoottorin halvemman, ja hyvin ymmärretyn ja kehittyneen toiminnan ansiosta, moottori on varteenotettava vaihtoehto sähköautonmoottoriksi. Avonapainen reluktanssimoottori on uusi lupaava vaihtoehto. Tarkempien modernien hallintajärjestelmien kehityksen seurauksena moottori kykenee tarjoamaan tehokkaan, halvan ja jyvän toiminnan. Moottorin säädössä on vielä kehittämistä tuotetun vääntömomentin tasoittamiseksi, mutta moottori osoittautuu hyväksi vaihtoehdoksi sähköautoille.

Perinteinen akkujärjestelmä toimii yleisesti sähköauton energianlähteenä. Erillinen hallintajärjestelmä pitää huolen akun toiminnasta ja ilmoittaa mahdollisista vika tilanteista käyttäjälle. Sähköautojen suurin ongelma on niiden matala toimintamatka verrattuna polttomoottorillisiin autoihin, jonka seurauksena akut vaativat vielä enemmän kehitystä. Ongelmaa on yritetty ratkaista myös hyödyntämällä eri energianlähteitä kuten polttokennoja tai vauhtipyöriä. Myös autoon asennetuilla aurinkokennoilla ja langattomilla latausjärjestelmillä ongelmaa on yritetty ratkaista.

Ongelmaa ratkaistaessa on syytä muistaa, että auton pitää myös olla hinnaltaan tarpeeksi matala.

Työssä esitettiin lyhyesti eri hallintamenetelmiä mainituille sähkömoottoreille. Näihin menetelmiin ei keskitytty syvällisesti, jotta menetelmistä voitaisiin antaa yleiskuva paremmin. Lukijaa kehoitetaan perehtymään työssä käytettyihin lähteisiin, jos näihin hallintamenetelmiin halutaan perehtyä syvällisemmin.

LÄHTEET

- 1 James Larminie, John Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*, Second Edition, New York: John Wiley & Sons, Incorporated 2012.
- 2 Michael H. Westbrook, *The Electric Car: Development and Future of Battery, Hybrid and Fuel-Cell Cars*. London: The institution of electrical engineers; 2001.
- 3 Emadi A, Berthold F, *Advanced Electric Drive Vehicles*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2014.
- 4 Dhameja S, *Electric Vehicle Battery Systems*, Boston: Newnes; 2002.
- 5 X.D. Xue, K. W. E. Cheng, N. C. Cheung, *Selection of Electric Motor Drives for Electric Vehicles*, Power Engineering Conference, 2008. AUPEC '08. Australasian Universities, December 14-17, 2008, Paper P-170.
- 6 Mounir Zeraoulia, Mohammed El Hachemi Benbouzid, Demba Diallo, *Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study*, IEEE Transaction on vehicular technology, vol 55, NO 6, November 2006, s. 1756–1764.
- 7 Karl Georg Høyer *The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars*, Utilities Policy, Volume 16, issue 2, June 2008, Pages 63–71.
- 8 Chau KT. *Electric Vehicle Machines and Drives : Design, Analysis and Application*. New York: John Wiley & Sons, Incorporated; 2015.
- 9 Pistoia G, editor. *Electric and Hybrid Vehicles : Power Sources, Models, Sustainability, Infrastructure and the Market*. Saint Louis: Elsevier; 2010.