



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

VOIMANSIIRRON EROAVAISUUDET HYBRIDI- JA TÄYSSÄHKÖAUTOJEN VÄLILLÄ

Janne-Matti Hämeenniemi

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Helmikuu 2024

TIIVISTELMÄ

Voimansiirron eroavaisuudet hybridi- ja täyssähköautojen välillä

Janne-Matti Hämeenniemi

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2024, 52 s. + 0 liitettä

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Emil Kurvinen

Sähköautojen voimansiirron toiminnassa ja tekniikassa on perustavanlaatuisia eroja ja työn tavoitteena on tuoda esiin ja vertailla näitä eroavaisuuksia. Työssä tullaan käymään yksitellen läpi rinnakkais- ja sarjahybridin, jaetun tehon hybridin sekä täyssähköauton voimansiirron toiminta. Lisäksi työssä tarkastellaan ajoakuston, vaihtosuuntaajan, ajomoottorin ja vaihteiston rakennetta sekä verrataan niiden toimintaa, teknologiaa sekä roolia toisiinsa eri voimansiirtoarkkitehtuureissa.

Sähköautoissa käytettävät ajoakustot koostuvat joko litiumionikennoista tai nikkelimetallihybridikennoista. Nikkelimetallihybridikennoja käytetään pääasiassa vain hybridiautoissa niiden halvemman hinnan ja matalan mutta hybridiautoihin kuitenkin riittävän energiasisällön takia. Täyssähköautoissa käytetään lähtökohtaisesti aina litiumioniakkuja toimintamatkan maksimoimiseksi. Nykyisin suurin osa sähköautoista käyttää jännitelähdevaihtosuuntaajia käytetystä ajomoottorista tai sähkövirran vaiheiden lukumäärästä riippumatta.

Sähköautojen ajomoottorit ovat tänä päivänä pääasiassa uppomagneettisia kestopomagneettitahtimoottoreita voimansiirtoarkkitehtuurista riippumatta. Joissakin hybridimalleissa käytetään vaihtoreluktanssimoottoreita, mutta niiden markkinaosuus ei ole merkittävä. Täyssähköautoissa ja sarjahybrideissä on mahdollista käyttää yksiportaista vaihteistoa, koska vaihteiston tarvitsee käsitellä vain ajomoottorin tuottamaa vääntöä. Rinnakkaishybridin vaihteistolle on useita eri vaihtoehtoja, mutta jaetun tehon hybridissä käytetään pääasiassa aina planeettavaihteistoon pohjautuvaa portaattomasti säätävää vaihteistoa.

Asiasanat: sähköautot, sähkökäytöt, voimansiirto

ABSTRACT

Comparison between battery electric vehicle and hybrid electric vehicle powertrains

Janne-Matti Hämeenniemi

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2024, 52 pp. + 0 Appendixes

Supervisor(s) at the university: Emil Kurvinen

There are inherent differences in operation and technology between different electric vehicle powertrain architectures and this work's purpose is to present and compare said differences. The work goes through the operation principle of series hybrid vehicles, parallel hybrid vehicles, power-split vehicles, and battery electric vehicles. The operation, technology and the role of traction battery, inverter, traction motor and transmission are reviewed and compared in different EV powertrain architectures.

Traction batteries used in EVs consist either of lithium-ion cells or nickel-metal hydride cells. NiMH-cells are commonly used only in hybrid vehicles because of their affordable price and low but still sufficient energy storage capabilities. BEVs almost exclusively use lithium-ion cells to maximize their operating range. Most modern EVs use voltage source inverters regardless of used traction motor or the number of number of phases in the electric current.

Traction motors in modern EVs are mainly interior permanent magnet synchronous motors regardless of used powertrain architecture. Some hybrid models use switched reluctance motors, but their market share isn't considerable. BEVs and S-HEVs don't need multispeed gearboxes because their gearboxes must only handle torque produced by the traction motor. As such, BEVs and S-HEVs are mostly operated with only step-up gear units. There are multiple choices for transmissions used in parallel hybrid vehicles, but power-split hybrids most commonly use continuously variable transmission based on planetary gear sets.

Keywords: electric drive, electric vehicles, powertrains,

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto	1-5
2 Sähkökäyttöisten henkilöautojen kehitys	2-6
2.1 Sähköautojen eri voimansiirtoratkaisut	2-7
2.1.1 Täyssähköauton voimansiirto	2-7
2.1.2 Hybridiautojen voimansiirto	2-10
3 Voimansiirron komponentit	3-14
3.1 Sähköautojen virtalähteet	3-14
3.1.1 Litiumioniakku	3-14
3.1.2 Nikkelimetallihydridiakku	3-15
3.2 Invertterit sähköautoissa	3-16
3.2.1 Jännitelähdevaihtosuuntaaja	3-17
3.2.2 Virtalähdevaihtosuuntaaja	3-19
3.2.3 Impedanssilähdevaihtosuuntaaja	3-20
3.2.4 Modulaatiotekniikat ja vaihtosuuntaajan ohjaus	3-22
3.3 Ajomoottorit	3-24
3.3.1 Epätahtimoottori	3-25
3.3.2 Kestomagneettitahtimoottori	3-27
3.3.3 Harjaton tasavirtamoottori	3-29
3.3.4 Vaihtoreluktanssimoottori	3-30
3.4 Vaihteistot sähköautoissa	3-32
3.4.1 Portaattomasti säätävät vaihteisto	3-35
3.4.2 Automaattinen manuaalivaihteisto	3-35
3.4.3 Kaksoiskytkinvaihteisto	3-36
3.4.4 Yksiportaiset vaihteistot	3-37
4 Vertailu	4-38
5 Yhteenvedo	5-45

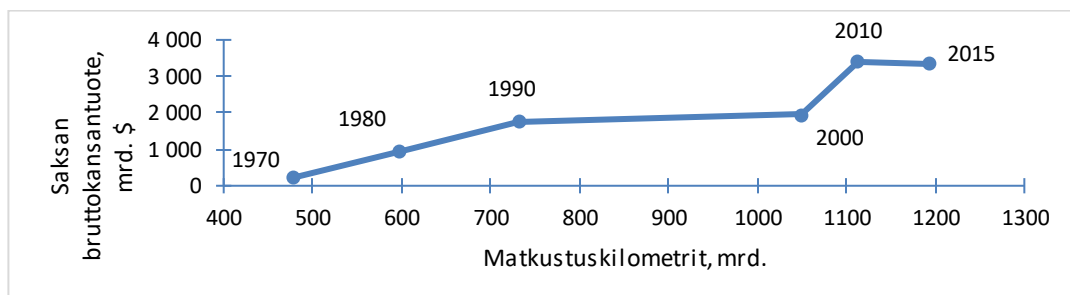
LÄHDELUETTELO

1 JOHDANTO

Tämän työn tarkoituksena on esitellä ja vertailla täyssähkö- ja hybridautojen voimansiirtotekniikkaa. Hybridautojen eri voimansiirroista käsitellään rinnakkais-, sarja- ja jaetun tehon hybridi. Hybridautoista ei tulla käsittelemään niin kutsuttuja lataushybridejä (Plug-In Hybrid Electric Vehicle, PHEV), vaan työssä käydään läpi vain perinteisempiä ei-ladattavia hybridejä. Lisäksi työn vertailu rajataan koskemaan vain voimansiirron osia, jotka löytyvät sekä täyssähköautoista että hybridautoista.

Työssä tullaan käymään yksitellen läpi rinnakkais- ja sarjahybridin, jaetun tehon hybridin sekä täyssähköauton voimansiirtoarkkitehtuurien osat, tarkastellaan niiden rakennetta ja verrataan niiden toimintaa, rakennetta sekä roolia toisiinsa voimansiirrossa. Työtä lukiessa on tärkeä huomata, että sähköautoista puhuttaessa tarkoitetaan sekä täyssähköautoja että hybridautoja. Tarvittaessa ajoneuvon voimansiirron tyyppi tullaan määrittelemään asiayhteydessä erikseen.

Liikkumisen tarve korreloi läheisesti taloudellisen kasvun kanssa, eikä kyse ole vain henkilöliikenteestä vaan myös kaupallisista kuljetuksista. Toisin kuin primäärienergian kulutuksen kanssa, taloudellisen kehityksen ja liikennemäärän kasvun yhteyttä ei ole voitu katkaista (Kuva 1). Vaikka polttoainekulutuksen pienentämisessä on edistytty merkittävästi viime vuosikymmeninä, liikenteen aiheuttamat hiilidioksidin kokonaispäästöt ovat edelleen kasvaneet. Maailmanlaajuisena ilmiönä valtiot sekä poliittiset järjestöt ovat kuitenkin yrittäneet rajoittaa hiilidioksidipäästöjen kasvua yhä tiukemmilla rajoituksilla. Rajoitukset ovat yksi tekijä, joilla autoteollisuutta yritetään ohjata kehittämään vaihtoehtoisia energiamuotoja käytettäväksi ajoneuvoissa. (Gutzmer P. 2014, s. 10)



Kuva 1. Bruttokansantuotteen ja matkustuskilometrien kehitys Saksassa 1970–2010 (Maailmanpankki ja VDA).

2 SÄHKÖKÄYTTÖISTEN HENKILÖAUTOJEN KEHITYS

Sähköautoissa käytetty tekniikka on pääasiassa peräisin 1800-luvun loppupuolelta, kun Nikola Tesla, George Westinghouse ja Thomas Edison kehittivät vaihtovirta- ja tasavirtajärjestelmiä. Lyijyakuilla toimineet sähköautot kilpailivatkin polttomoottoriautojen kanssa ostajista Yhdysvalloissa 1890- ja 1900-luvulla. Vuonna 1900 sähköautot johtivat markkinoita 28 %:n markkinaosuudella. (Hayes & Goodarzi 2018, s. 4; Denton 2016, s. 6)

Sähköautoilla oli lukuisia etuja polttomoottoriautoihin verrattuna, mutta niiden myynti kuitenkin romahti 1910-luvun aikana. Tähän oli syynä kaksi tärkeää edistysaskelta polttomoottoriautojen kehityksessä. Ensimmäinen oli Fordin käyttöönottama autojen sarjatuotantovalmistus, joka polki polttomoottoriautojen hinnat reilusti sähköautojen alapuolelle. Viimeinen niitti oli kuitenkin Cadillacin vuonna 1912 esittelemä sähköinen sytytys ja käynnistys, jolloin autoa ei tarvinnut enää käynnistää kampea vääntämällä. (Hayes & Goodarzi 2018, s. 4)

Seuraava merkittävä kehitysaskel kuluttajille suunnatuissa sähköautoissa tapahtui vasta melkein 70 vuoden jälkeen, kun General Motors julkisti kehittämänsä täyssähköauton EV1 vuonna 1996. EV1 oli mullistava sekä sähköautojen kannalta, mutta myös koko autoteollisuutta ajatellen. Ensimmäisen sukupolven EV1 käytti kuitenkin vielä lyijyakkuja, joiden kehityksessä ei ollut tapahtunut merkittävää edistymistä. Toisen sukupolven EV1 sen sijaan käytti nikkelimetallihydridiakkuja (NiMH), jotka melkein kaksinkertaistivat auton toimintaetäisyyden. Useiden syitten takia EV1:stä ei kuitenkaan tullut sellaista myyntimenestystä kuin siitä olisi haluttu ja vuonna 2003 General Motors lunasti kaikki valmistamansa autot takaisin. (Hayes & Goodarzi 2018, s. 6)

Ensimmäinen moderni hybridauto oli vuonna 1997 myyntiin tullut Toyota Prius. Priuksen polttomoottori pohjautui erittäin korkealla hyötysuhteella toimivaan Atkinson-sykliin, joka sellaisenaan ei kuitenkaan ollut sopiva perinteiseen henkilöautoon. Toyota paikkasi polttomoottorin heikkoudet sähköistämällä osan Priuksen voimansiirrosta ja tuloksena oli erittäin pienikulutuksinen henkilöauto. Toyota Prius käytti NiMH-akkuja ja kestopagneettitahtimoottoria. Priukseen kehitettiin lisäksi planeettavaihteistoon pohjautuva portaattomasti säätävä vaihteisto. Priuksesta tuli aikansa markkinajohtaja

vihreään teknologiaan pohjautuvissa ajoneuvoissa, mikä avasi kuluttajien silmät sähköisen voimansiirron mahdollisuuksille. (Hayes & Goodarzi 2018, s. 6)

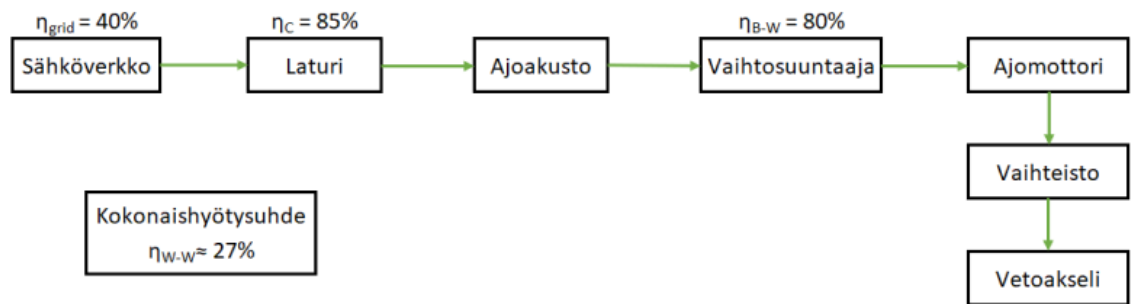
Suurin sähköautojen toimintaa rajoittanut tekijä aina ensimmäisistä sähköautoista asti on ollut autoissa käytetyt ajoakut. Useissa sähköautoissa tänä päivänä käytetty litiumioniakku kehitettiin jo 1970-luvulla, mutta sen käyttö alkoi yleistyä vasta 1990-luvulla. Litiumionikennon energiatiheys on jopa kolmesta viiteen kertaa enemmän kuin lyijyakuilla, mutta ne olivat merkittävästi lyijyakkuja kalliimpia ja siksi niiden käyttö oli varsin vähäistä. Ensimmäinen massavalmistettu litiumioniakuilla varustettu sähköauto oli vuonna 2007 esitelty Tesla Roadster, jossa käytettiin melkein 7000 Panasonic-kennoa. (Hayes & Goodarzi 2018, s. 7)

Litiumioniakkujen kehitys ja hinnanalasku polki sähköautojen hintaa alas, mikä sai kuluttajat harkitsemaan vakavasti sähköauton hankkimista. Vuonna 2011 markkinoille tulleesta Nissan Leafista tulikin kaikkien aikojen myydyin sähköauto verrattain matalan myyntihintansa ansiosta. Tänä päivänä erittäin laaja tarjonta ja ympäristöystävällisempien ajoneuvojen kysynnän kasvu on saanut tehnyt sähköautoista suurelle yleisölle houkuttelevan vaihtoehdon polttomoottoriautoihin verrattuna. (Hayes & Goodarzi 2018, s. 9)

2.1 Sähköautojen eri voimansiirtoratkaisut

2.1.1 Täyssähköauton voimansiirto

Täysin sähköisesti toteutetussa voimansiirrossa yksi tai useampi sähkömoottori muuttaa ajoakulta saadun sähköenergian liike-energiaksi renkailla. Yksinkertaisimmillaan täyssähköautojen voimansiirto koostuu ajoakusta, vaihtosuuntaajasta, sähkömoottorista, yksiportaisesta vaihteistosta ja tasauspyörästä (Kuva 2). Tällainen voimansiirtorakenne on myös selvästi yleisin täyssähköautojen voimansiirtorakenne. Nelivetoisissa täyssähköautoissa kummallakin akselilla käytetään yleensä omaa sähkömoottoria. (Korhonen ym. 2019, s. 11; Dietsche & Reif 2018, s. 820; Wu et al. 2014, s. 429)



Kuva 2. Täyssähköauton voimansiirto. Mukailten Hayes & Goodarzi 2018, s. 30.

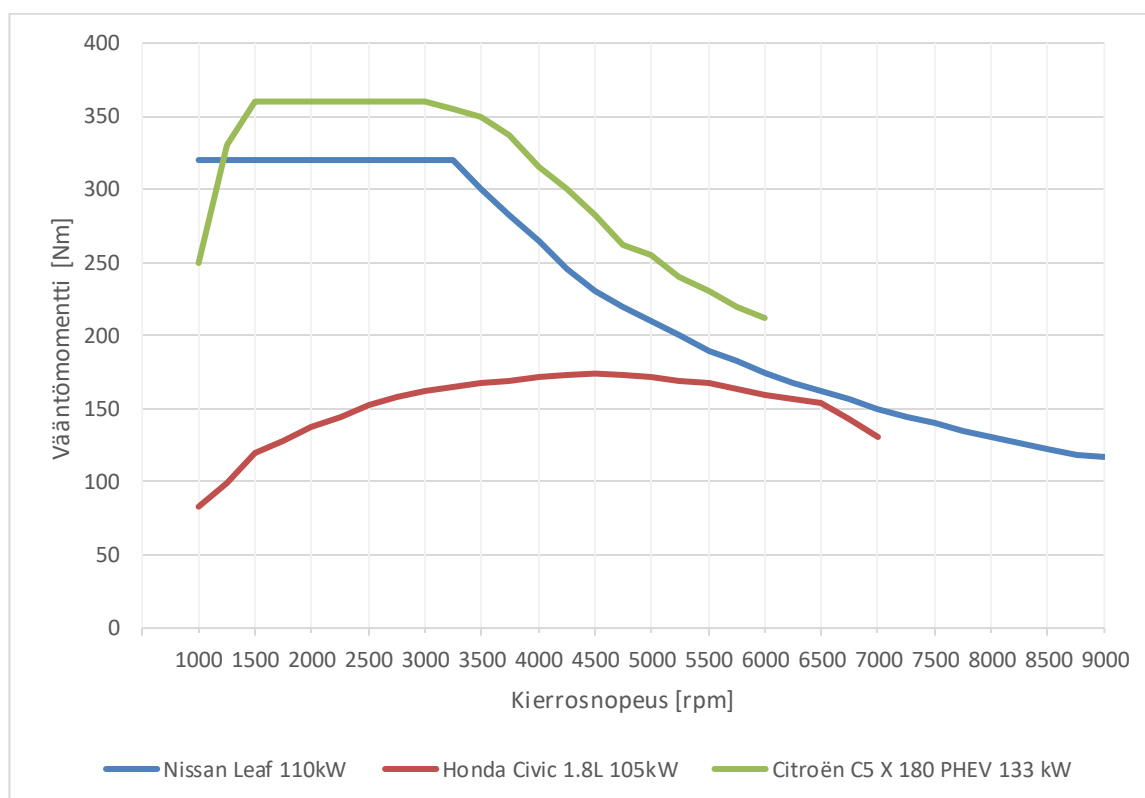
Sähköautojen akustot pohjautuvat tänä päivänä pitkälti litiumionikemioihin, joissa akun jännitteet vaihtelevat 300–800 V välillä. Vaihtoehtoisesti nikkelimetallihydridiakkuja käytetään vielä rajatuissa tapauksissa, mutta litiumpohjaisen tekniikan oletetaan korvaavan NiMH-akut lopullisesti lähitulevaisuudessa. Akkujen energiatiheys on yleisesti ottaen huomattavasti pienempi kuin polttoaineen, joten täyssähköautoissa akut painavat huomattavasti enemmän kuin täysi polttoainetankki polttoainetta. Sähköautoissa akut muodostavatkin jopa kaksi kolmasosaa auton voimansiirron painosta. (Dietsche & Reif 2018, s. 820)

Ajoakusto pystyy antamaan ulos vain tasavirtaa, joka täytyy muuttaa ajomootorin vaatimaksi symmetriseksi, kolmivaiheiseksi vaihtovirraksi. Normaalisti tämä toteutetaan vaihtosuuntaajalla eli toiselta nimeltään invertterillä. Sähkömootorin optimaalinen toiminta vaatii invertterin olevan kykenevä antamaan muuttuvaa jännitettä, virtaa ja taajuutta. Pääasiassa sähköautoissa käytetyt vaihtosuuntaajat käyttävät SVPWM-modulointitekniikkaa (Sinusoidal Pulse Width Modulation), jolla saadaan tuotettua sinimuotoista vaihtovirtaa muuttuvalla virralla ja jännitteellä. (Dietsche & Reif 2018, s. 844; Hayes & Goodarzi 2018, s. 392)

Sähkömootori on hiljaisempi, värisee vähemmän ja on hyötysuhteeltaan korkeampi verrattuna polttomootoriin. Täyssähköauton hyötysuhde ajoakustolta renkaille voi olla jopa 80 %, kun taas pelkän polttomootorin hyötysuhde on enimmillään vain 40 %. Tämän ansiosta saman maksimitehon saavuttaminen voidaan toteuttaa paljon pienemmällä sähkömootorilla kuin polttomootorilla. (Hayes & Goodarzi 2018, s.30; Dietsche & Reif 2018, s. 820; Korhonen 2019, s. 27)

Useimmissa täyssähköautoissa käytetään tänä päivänä kestmagneettitahtimoottoria eli niin kutsuttua PMSM-moottoria. PMSM-moottorin suurimmat edut vaihtoehtoisiin moottoreihin ovat sen koko, hyötysuhde, hallinnan helppous ja vääntöominaisuudet. Sähkömoottorina olisi myös mahdollista käyttää tasavirtamoottoria, mutta vaihtovirtamoottoreiden hallinta tarjoaa paljon etuja tasavirtamoottoreihin verrattuna. Kääntöpuolena vaihtovirtamoottorit vaativat vaihtosuuntaajan toimiakseen. (Denton 2016, s. 91; Korhonen ym. 2019, s. 25)

Sähkömoottori saavuttaa maksimivääntönsä välittömästi sen alkaessa pyörimään ja sähkömoottorin tehokas pyörimisnopeusalue on todella laaja (Kuva 3). Tämän ansiosta esimerkiksi sähköauton vaihteistossa voidaan yleensä käyttää kiinteää välitystä sähkömoottorin ja akselin välissä. Suurimmassa osassa täyssähköautoista ei ole monivaihteista vaihdelaatikkoa. (Dietsche & Reif 2018, s. 820; Wu et al. 2019, s. 429; Denton 2016, s. 56)



Kuva 3. Polttomoottoriauton, hybridauton ja täyssähköauton vääntö-kierrosnopeus käyrät.

2.1.2 Hybridiautojen voimansiirto

Hybridiautoksi kutsutaan ajoneuvoa, jossa polttomoottori ja vähintään yksi sähkömoottori tuottavat auton käyttövoiman. Polttomoottorin ja sähkömoottorin käyttövoimat voidaan yhdistää toisiinsa lukuisilla eri tavoilla, minkä ansiosta hybridivoimansiirto on todella joustava ja monikäyttöinen ratkaisu. Lisäksi hybridivoimansiirrolla saavutetaan pienempi polttoaineen kulutus ja pienemmät päästöt yhdistämällä polttomoottorin ja sähkömoottorin parhaat puolet verrattuna perinteiseen polttomoottoriin. (Dietsche & Reif 2018, s. 822; Denton 2016, s. 58)

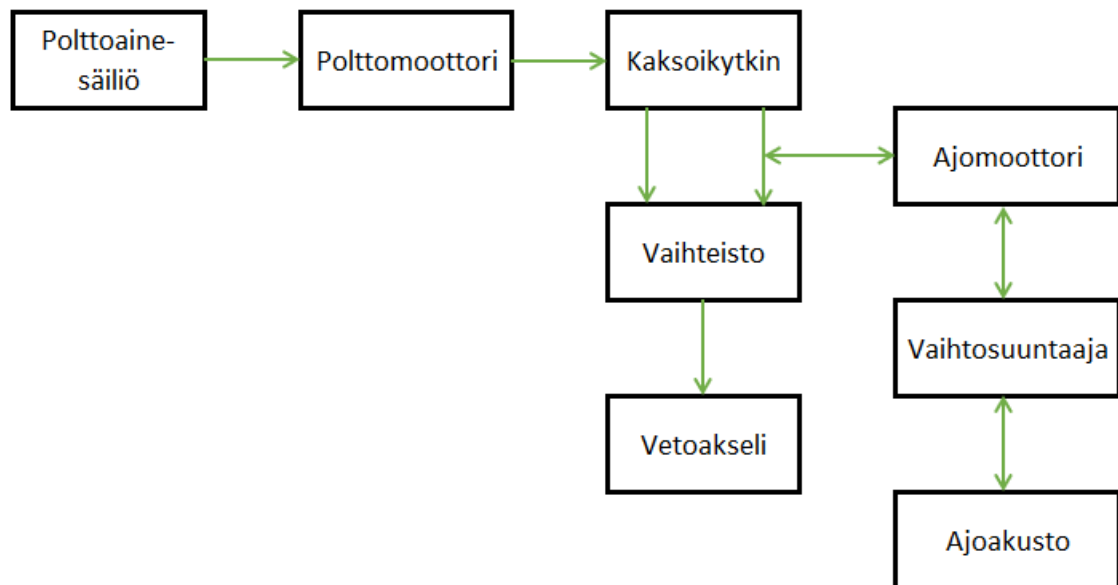
Työssä ei tulla käsittelemään niin kutsuttuja lataushybridejä, joiden ajoakustoa on mahdollista ladata suoraan pistorasiasta. Ei-ladattavissa hybrideissä sähkömoottorin tarkoitus on pääasiassa tukea polttomoottoria matalilla kierroksilla eikä niinkään toimia ainoana ajoneuvon voimanlähteenä. Ei-ladattavissa hybrideissä puhtaasti sähkömoottorilla tapahtuva ajo on todella lyhytaikaista. Hybridiautoissa polttomoottori on mahdollista suunnitella toimivan Atkinson-työkierron mukaan, koska sähkömoottori paikkaa Atkinson-työkierrolle ominaisia heikkouksia. Atkinson-työkierrossa imuventtiilit suljetaan verrattain myöhään, mikä vähentää polttomoottorin vääntöä matalilla kierroksilla, mutta nostaa polttomoottorin hyötysuhdetta. Korkeamman hyötysuhteen ansiosta auton polttoaineen kulutus laskee. (Korhonen ym. 2019, s. 12)

Hybridiautoissa sähköinen käyttövoima tuotetaan täyssähköauton tavoin sähkömoottorilla ja pulssinleveysmodulaatiolla. Sähkömoottori tuottaa maksimiväännön heti alhaisilla kierrosnopeuksilla, mistä johtuen se on ideaali paikkaamaan polttomoottorin puutteita (Kuva 3). Sähkömoottorin ja polttomoottorin yhteistoiminta tarjoaakin erittäin dynaamisen ajotuntuman. (Dietsche & Reif 2018, s. 822)

Hybridivoimansiirrosta on olemassa useita eri ratkaisuja, jotka pyrkivät optimoimaan voimansiirron eri ominaisuuksia ja joissa käytetään sähköenergiaa eri tavoin auton liikuttamiseen. Yleisesti hybridiarkkitehtuurit jaotellaan sähkömoottorin ja polttomoottorin välisen energiavirran mukaisesti rinnakkaishybrideihin, sarjahybrideihin tai jaetun tehon hybrideihin. (Wu et al. 2014, s. 433; Dietsche & Reif 2018, s. 822)

Rinnakkaishybridissä polttomoottori ja sähkömoottori tuottavat käyttövoiman auton liikuttamiseen toisistaan riippumatta ja mahdollisesti yhtä aikaa (Kuva 4). Polttomoottorista ja ajomoottorilta tulevat energiavirrat kulkevat toisten rinnalla ja

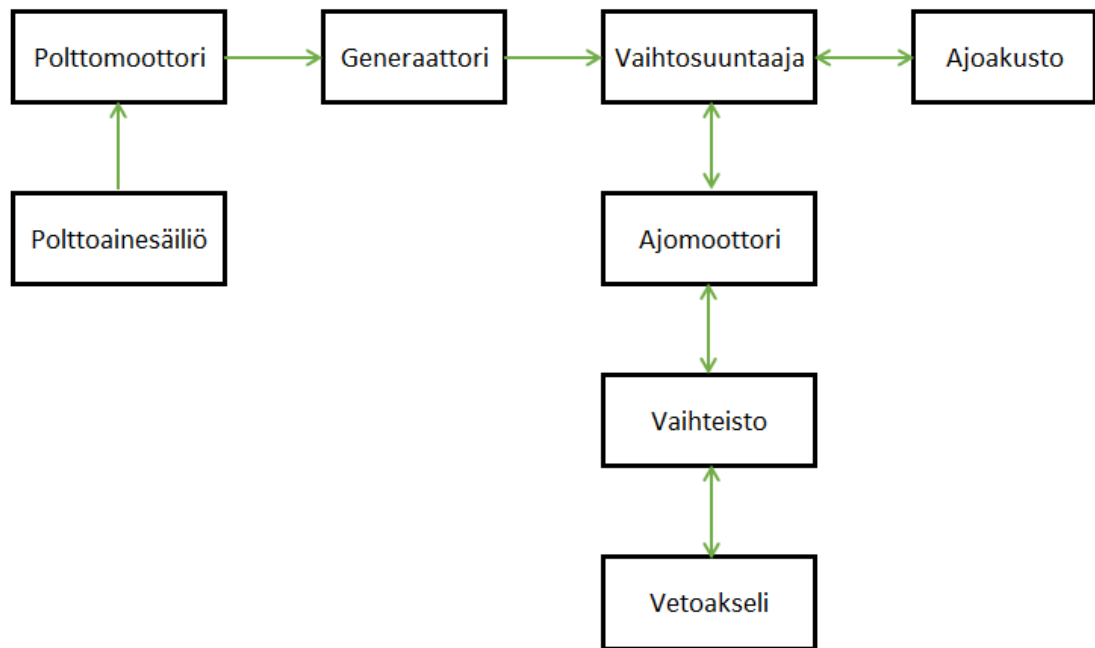
lisäävät itsenäisesti ajoneuvon tehoa. Energiavirrat kohtaavat kytkimellä, josta ne kulkeutuvat yhdessä vaihteistolle ja sitä kautta vetoakselille. (Dietsche & Reif 2018, s. 824; Hayes & Goodarzi 2018, s. 32)



Kuva 4. Rinnakkaishybridin voimansiirto kaksoiskytkimellä. Mukailen Dietsche & Reif 2018, s. 825.

Rinnakkaishybridistä on tullut tällä hetkellä suosituin vaihtoehto käytetyksi hybridiarkkitehtuuriksi. Merkittävä syy siihen on, että jo olemassa olevasta polttomoottoriautosta on mahdollista valmistaa rinnakkaishybridi varsin pienillä muutoksilla. Lisäksi itsenäisten energiavirtojen ansiosta rinnakkaishybridin voimansiirto voidaan toteuttaa lukuisilla eri tavoilla. Rinnakkaishybridissä on mahdollista esimerkiksi olla yksi kytkin, kaksi kytkintä, kaksoiskytkin tai planeettavaihteisto. (Posa & Ahtiainen 2020; Dietsche & Reif 2018, s. 823; Wu et al. 2014, s. 435)

Sarjahybridi yhdistää täyssähköauton ja polttomoottoriauton parhaat puolet. Siinä yhdistyvät täyssähköauton korkea hyötysuhteinen voimansiirto ja polttomoottorin todella energiatiheä polttoaine. Sarjahybridissä nimen mukaisesti sähkömoottorin ja polttomoottorin energiavirrat kulkevat yhteistä reittiä vetoakselille (Kuva 5). Voimansiirron alussa olevaa polttomoottoria käytetään pyörittämään sähkömoottoria, joka toimii generaattorina ja lataa tällöin ajoneuvon ajoakustoa. Ajoakulta tulevaa sähkövirtaa käytetään tämän jälkeen perinteiseen tapaan pyörittämään invertterin avulla sähkömoottoria. (Hayes & Goodarzi 2018, s. 32; Dietsche & Reif 2018, s. 826)



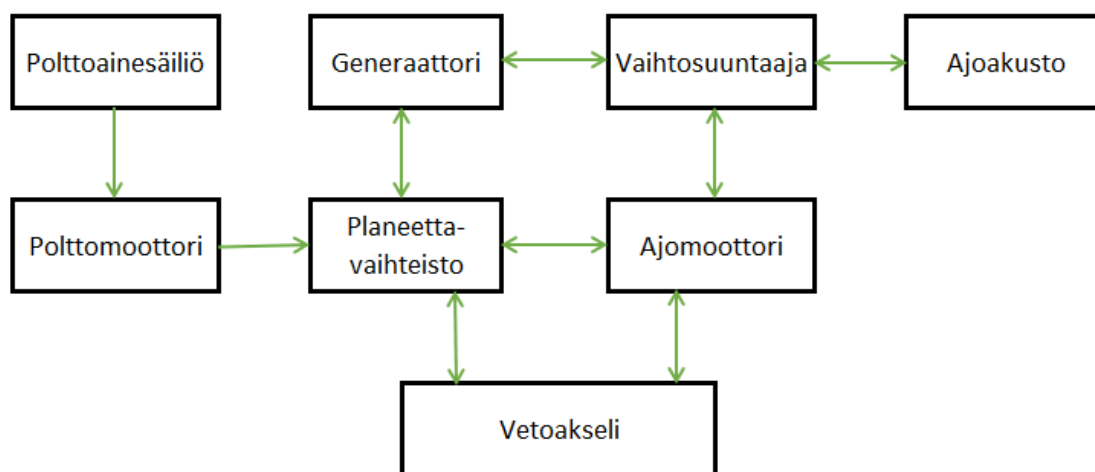
Kuva 5. Sarjahybridin voimansiirto Mukailten Dietsche & Reif 2018, s. 826.

Sarjahybridi toimii yleensä vain sähkömoottoria käyttämällä. Polttomoottorin tarkoituksen on ladata lisää virtaa ajoakkuun matkan jatkamiseksi, jos ajoakuston virtataso laskee liian matalalle. Tämän ansiosta sarjahybridissä ei tarvita kovin tehokasta polttomoottoria, vaan polttomoottorin tarvitsee vain ladata akkuja nopeammin, kuin ajomoottori kuluttaa niistä virtaa. (Posa & Ahtiainen 2020)

Sarjahybridi tarjoaa jotain suuria etuja muihin hybridiarkkitehtuureihin verrattuna. Sarjahybridissä ei ole esimerkiksi suoraan mekaanista kytkentää renkaille, minkä ansiosta sarjahybridin polttomoottori pystyy toimimaan maksimitehoalueella kauemmin. Lisäksi sarjahybridissä polttomoottori voidaan sijoittaa täysin vapaasti valittuun paikkaan, koska polttomoottori ei ole mekaanisesti kytketty ajomoottoriin. (Posa & Ahtiainen 2020; Dietsche & Reif 2018, s. 827)

Jaetun tehon hybridi on välimuoto sarjahybridin ja rinnakkaishybridin välillä, mistä syystä se on rakenteeltaan huomattavasti monimutkaisempi. Jaetun tehon hybridi on kompromissi rinnakkaishybridin ja sarjahybridin välillä, missä yhdistyvät rinnakkaishybridin ja sarjahybridin edut. Jaetun tehon hybridissä osa polttomoottorin käyttövoimasta käytetään auton liikuttamiseen ja loppu ajoakuston lataamiseen. (Hayes & Goodarzi 2018, s. 33; Wu et al. 2014, s. 439)

Jaetun tehon hybridissä käytetään yleensä planeettavaihteistoon pohjautuvaa portaatonta automaattivaihteistoa (Continuously Variable Transmission, CVT), jolloin polttomoottorin käyttövoima voidaan optimaalisesti ohjata vetoakselille ja ajoakuston lataukseen. Kuva 6 esittää, kuinka CVT:n aurinkopyörä on yhteydessä laturiin ajoakuston lataamiseksi, ja miten polttomoottorin käyttövoima viedään vetoakselille. CVT:n ansiosta polttomoottorin kierrosnopeutta on lisäksi mahdollista hieman säätää vaikuttamatta ajoneuvon ajonopeuteen. (Hayes & Goodarzi 2018, s. 33; Denton 2016, s. 65)



Kuva 6. Jaetun tehon hybridivoimansiirto. Mukailten Dietsche & Reif 2018, s. 828.

Jaetun tehon voimansiirrosta polttomoottorin on aina mahdollista toimia korkealla hyötysuhteella, minkä ansiosta jaetun tehon voimansiirto voi saavuttaa huomattavan pienen polttoainekulutuksen. Toisaalta jaetun tehon voimansiirto sisältää useita muunnoksia eri energiatyyppien välillä, mikä rajoittaa jaetun tehon voimansiirron kokonaishyötysuhdetta. (Wu et al. 2014, s. 439)

3 VOIMANSIIRRON KOMPONENTIT

3.1 Sähköautojen virtalähteet

Moderneissa täyssähköautoissa auton akut muodostavat jopa kaksi kolmasosaa auton voimansiirron painosta, koosta ja hinnasta. Tulevaisuudessa sähköautojen tärkein kehityskohde onkin ajoakku edellä mainittujen ominaisuuksien osalta. Sähköauton ajoakku muodostuu useista pienistä akkukennoista, joita ajoneuvossa voi olla tuhansia. Esimerkiksi vuonna 2007 myytiin tullessa Tesla Roadsterissa oli 6831 litiumionikennoa. (Dietsche & Reif 2018, s. 1322; Hayes & Goodarzi 2018, s. 7)

Kaksi tärkeintä suunnittelukriteeriä akkujen kehitystyölle ovat niiden turvallisuus ja suorituskyky. Ajoneuvon käyttäjien ja ympäristön turvallisuus täytyy pystyä takaamaan kaikissa tilanteissa ja tämä pätee esimerkiksi akkujen sähkökemiallisiin ominaisuuksiin. Yksi mahdollinen vaaratilanne on akkukennojen syttyminen tuleen esimerkiksi autokolarin seurauksena. Myös akun sähköturvallisuus täytyy ottaa huomioon varsinkin, kun akun jännite on suurempi kuin 60 V. (Dietsche & Reif 2018, s. 1322)

Ajoneuvoissa käytetyiltä akuilta vaaditaan pientä painoa, mutta korkeaa suorituskykyä eli toisin sanottua hyvää energiatiheyttä. Tehon ja energian suhde on kuitenkin eri ajoneuvotyypeillä erilainen. Hybridiajoneuvoissa painopiste keskittyy akkujen tehoon, kun taas täyssähköisissä ajoneuvoissa huomion keskipiste on enemmän akkujen energiasisällössä. (Dietsche & Reif 2018, s. 1322)

3.1.1 Litiumioniakku

Tänä päivänä sähköautoissa käytetään pääasiassa litiumioniakkuja. Litiumionikennon katodi koostuu metallioksidista, joka pystyy varastoimaan litiumioneja (LiMO_2). Yleisesti käytetyt metallioksidit ovat nikkelin, mangaanin ja koboltin yhdisteitä. Litiumionikennon anodi sen sijaan muodostuu grafitista. Akkua ladattaessa katodista vapautuu positiivisia litiumioneja, jotka kulkeutuvat elektrolyytin läpi anodiin, jossa litiumista ja hiilestä muodostuu litiumhiiltä. Vastaavasti akun purkautuessa anodiin varastoituneet litiumionit kulkeutuvat takaisin katodiin, jossa muodostuu litiummetallioksideja. Kennon elektrolyytti muodostuu erittäin johtavasta litiumsuolasta, joka helpottaa litiumkationin kulkua. (Dietsche & Reif 2018, s. 1323; Hayes & Goodarzi 2018, s. 76; Denton 2016, s. 83)

Katodille ja anodille yritetään kehittää uusia materiaaleja turvallisuusominaisuuksien ja energiatiheuden parantamiseksi. Kehitystyön alla olevia yhdisteitä ovat esimerkiksi litiumrauta-fosfaatti (Li_xFePO_4) katodille ja litiumtitaanaattioksidin ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) anodille. Grafiitin vaihtaminen litiumtitaanaattiin voisi jopa 20-kertaistaa akun kestävän lataussyklien määrän. Vaihtoehtoiseksi anodin materiaaliksi tutkitaan myös piipohjaisia yhdisteitä. (Dietsche & Reif 2018, s.1323; Hayes & Goodarzi 2018, s. 76; Denton 2016, s. 83)

Litiumionikennot ovat rakenteeltaan sylinterimäisiä, levyjäisiä ja koteloituja. Sylinterimäinen rakenne on erittäin kustannustehokas verrattuna kahteen muuhun rakenteeseen. Laminoitulla metallikalvolla päällystetyllä prismaattisella rakenteella sen sijaan on yhdenmukainen lämpötilajakauma ja niitä on helppo rakentaa eri kokoisina. Kovaan koteloon rakennettu kenno on sen sijaan erittäin vakaa ja kompakti rakenne. Näistä kolmesta rakenteesta yksi ei ole selvästi muita parempi, mutta autoteollisuudessa on nähtävissä selvä trendi, joka suosii levyjäisiä ja koteloituja rakenteita. (Dietsche & Reif 2018, s. 1325)

Koteloidun akkukennon aktiiviset materiaalit ovat päällysteinä elektrolyyttiin upotetuilla kalvoilla, jotka erotetaan toisistaan erottimen avulla suoran kontaktin välttämiseksi. Katodin ja anodin välillä kulkevat ionit voivat kuitenkin kulkea erottimen läpi. Katodin litiumpohjainen yhdiste päällystetään alumiinikalvolle, kun taas anodissa oleva grafiitti päällystetään kuparikalvolle. Kalvoista koostuva paketti kiedotaan lopuksi litteäksi käämiksi, missä katodin ja anodin suntit johtavat varautuneisuuden navoille. (Dietsche & Reif 2018, s. 1325)

3.1.2 Nikkelimetallihydridiakku

Nikkelimetallihydridikenno on hyvin samanlainen, kuin aikaisemmin paljon käytetty nikkelikadmiumkenno. Kadmiumkenno oli kuitenkin myrkyllinen, karsinogeeninen ja kallis, minkä takia metallihydridi korvasi kadmiumpohjaiset akkukennot. Metallihydridi on yhdiste, jossa vetyatomit ovat sitoutuneet johonkin metalliseokseen. Yleisimmät metalliseokset muodostuvat nikkelistä, koboltista ja pienestä määrästä muita materiaaleja, mutta tarkat seokset ovat yleensä patentoituja. (Hayes & Goodarzi 2018, s. 76)

NiMH-akkuja käytetään tänä päivänä pääasiassa perinteisissä ei-ladattavissa hybridiautoissa. Niiden käyttö on kuitenkin vähenemässä Li-ion-akkujen vallatessa lisää

markkinatilaa parempien ominaisuuksiensa ansiosta. NiMH-kennossa katodi muodostuu nikkelihydroksidista, anodi vetyä sitovista seoksista ja elektrolyytti kaliumhydroksidista. NiMH-kennon energiasisältö on selvästi pienempi kuin Li-ion-akun, mutta ei-ladattaviin hybrideihin kuitenkin tarpeeksi iso. NiMH-kennon halvempi hinta on lisäksi merkittävä syy, miksi hybrideissä käytetään vielä NiMH-akkuja. (Korhonen ym. 2019, s. 20; Denton 2016, s. 80)

NiMH-akkujen energiatiheys on yli kaksi kertaa suurempi kuin lyijyakuilla, mutta kuitenkin selvästi pienempi kuin Li-ion-akuilla. NiMH-akkujen energiatiheys on vain 65–80 Wh/kg, kun taas litiumioniakuilla energiatiheys on jopa 140–180 Wh/kg. Lisäksi NiMH-kennojen jännite on vain 1,25 V, kun litiumionikennoilta saatava jännite vaihtelee 2,8–4,2 V välillä. NiMH-akuilla itsepurkautuminen on myös korkeampi kuin litiumioniakuilla. (Dietsche & Reif 2018, s. 1323; Denton 2016, s. 89)

3.2 Invertterit sähköautoissa

Sähköautojen ajomoottoreina käytetään pääsääntöisesti aina vaihtovirtamoottoreita niiden lukuisten etujen ansiosta verrattuna tasavirtamoottoreihin. Ajoakustolta on kuitenkin mahdollista saada suoraan ulos vain tasavirtaa, joten ajoakuston ja ajomoottorin väliin tarvitaan vaihtosuuntaaja eli invertteri. Invertterin tehtävänä on muuttaa ajoakustolta saatava tasavirta ajomoottorin käyttämäksi vaihtovirraksi. Tärkeä huomio sähköautoissa käytettävistä inverttereistä on, että ne toimivat yhtä tehokkaasti myös hyötyjarrutuksessa tasasuuntaajina. Sähkömoottori myös toimii hyötyjarrutuksessa generaattorina, jonka tuottama vaihtovirta muutetaan tasavirraksi ajoakuston lataamista varten. (Reimers et al. 2019, s. 3337; Denton 2016, s. 70)

Sähkömoottorin ja invertterin optimaalisen yhteistoiminnan takaamiseksi invertterin täytyy pystyä säätelemään sähkönn jännitettä, virtaa ja taajuutta, sillä näillä parametreilla määritetään sähkömoottorin pyörimisnopeus ja sen tuottama vääntö. Kehittyneet tehokomponentit, uudet materiaalit, uudet kondensaattoriratkaisut ja vaihtosuuntaajakäyttöön suunnitellut lämpönielut mahdollistavat merkittävän invertterin tehokkuuden ja suorituskyvyn kasvun. (Hayes & Goodarzi 2018, s. 392; Husain et al. 2021, s. 1044; Taha et al. 2022, s. 4580)

Vaihtosuuntaajien tehon yhä kasvaessa, lämmönpoisto on noussut kriittiseksi huolenaiheeksi. Invertterin korkea lämpötila on tunnistettu merkittävimmäksi syyksi invertterin hajoamiselle. Ylikuumeneminen alentaa merkittävästi vaihtosuuntaajan luotettavuutta ja elinikää. Lämmönpoiston haasteitten takia lämmönhallintajärjestelmät ovat muuttuneet tärkeäksi osaksi vaihtosuuntaajan kokonaisuuden optimointia. Nestejäähdytys on yleisimmin suosittu jäähdytystapa korkea tehoisissa vaihtosuuntaajissa, koska nestejäähdytys pystyy poistamaan enemmän lämpöä rajatussa tilassa verrattuna ilmajäähdytykseen. Lisäksi käyttöympäristöllä on pienempi merkitys nestejäähdytyksen toimintaan verrattuna ilmajäähdytykseen. (Reimers et al. 2019, s. 3339–3340)

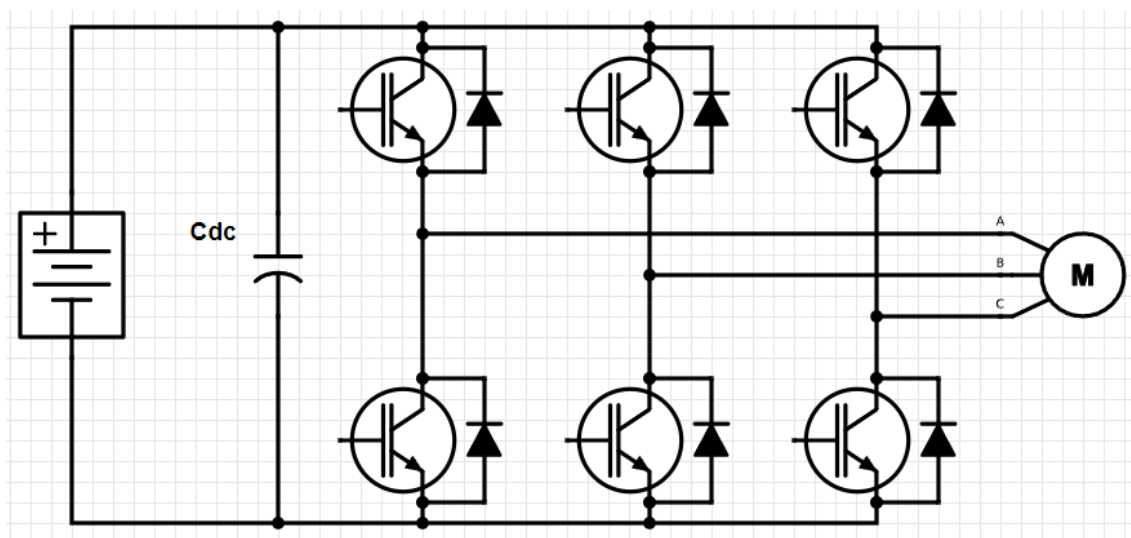
Invertterin ohjauksesta vastaa auton moottorinohjausyksikkö (Motor Control Unit, MCU). MCU vaihtaa invertterin sisältämien kytkimien positiota tietyssä järjestyksessä vaaditun jännitteen ja taajuuden saavuttamiseksi moottorin ohjausta varten. Moottorinohjausyksikkö reagoi esimerkiksi kiihdytykseen ja jarrutukseen muuttamalla invertterin ulostuloa saaden invertterin myös muuttamaan sähkömoottorin tuottaman vaihtovirran tasavirraksi ajoakuston latausta varten hyötyjarrutuksessa. (Denton 2016, s. 70–71, 99–100; Reimers et al. 2019, s. 3339)

Invertteri sisältää tyypillisesti oman ohjausyksikön, johon on sijoitettu mikrokontrolleri tai digitaalinen signaaliprosessori (Digital Signal Processor, DSP) ajamaan invertterin ohjainohjelmistoa. Invertterin ohjausalgoritmit muuttuvat koko ajan yhä monimutkaisemmiksi, koska invertterin vaihtonopeutta halutaan jatkuvasti parantaa. Vaihtosuuntaajan kehityksessä ilmenneiden haasteiden voittamiseksi onkin ehdotettu ohjelmoitavan porttimatriisin (Field-Programmable Gate Array, FPGA) käyttöönottoa vastaamaan invertterin modulaation toteutuksesta samalla, kun signaaliprosessori hoitaa moottorinohjauksen. Tällöin sähkömoottorin ajoitustarkkuus kasvaisi huomattavasti ja signaaliprosessorin vaatimukset laskisivat merkittävästi. (Denton 2016, s. 70–71, 99–100; Reimers et al. 2019, s. 3339)

3.2.1 Jännitelähdevaihtosuuntaaja

Sähköautoissa käytetään rakenteeltaan pääasiassa kolmea erityyppistä invertteriä: jännitelähdevaihtosuuntaajia (Voltage Source Inverter, VSI), virtalähdevaihtosuuntaajia (Current Source Inverter, CSI) tai impedanssilähdevaihtosuuntaajia (Z-Source Inverter, ZSI). Nykyisin suurin osa sähköautoista käyttää jännitelähdevaihtosuuntaajia käytetystä

ajomoottorista tai sähkövirran vaiheiden lukumäärästä riippumatta. VSI:n suosion suurimmat syyt ovat sen korkea hyötysuhde, matala hinta ja ohjauksen yksinkertaisuus. VSI on lisäksi rakenteeltaan vankka ja luotettava ratkaisu sen pitkäaikaisen kehitystyön ansiosta. Kuva 7 esittää kolmivaiheisen jännitelähddevaihtosuuntaajan rakenteen yksinkertaisimmillaan. Virtapiiri koostuu kondensaattorista, kuudesta eristyshilaisesta bipolaaritransistorista (Insulated-Gate Bipolar Transistor, IGBT) ja diodeista. (Reimers et al. 2019, s. 3337–3339; Husain et al. 2021, s. 1040; Taha et al. 2022, s. 4583)



Kuva 7. Jännitelähddevaihtosuuntaajan piirikaavio. Mukailten Reimers et al. 2019, s. 3338.

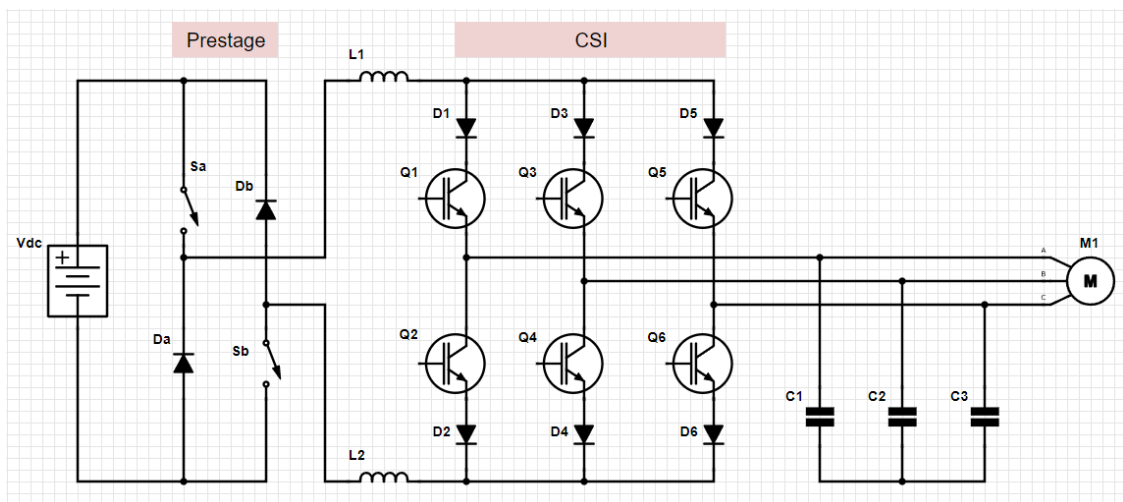
Vielä kymmenen vuotta sitten sähköautojen inverttereissä käytettiin metallioksidipuolijohdekanavatransistoreita eli eristehilatransistoreita (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET), mutta tänä päivänä lähes tulkoot kaikki sähköautovalmistajat ovat siirtyneet käyttämään piipohjaisia IGBT:itä. Kuitenkin eräs esimerkki poikkeuksellisesta invertterirakenteesta on Tesla Model 3, jossa käytetään vielä MOSFET:itä IGBT:n sijasta. IGBT on yksinkertainen puolijohdekomponentti, jota käytetään kytkimenä sähkövirran kululle. Sen suosio pohjautuu korkeaan tehokkuuteen, nopeaan position vaihtoon, pitkälle kehitettyyn teknologiaan ja halpaan hintaan. IGBT:n estojännite voi olla jopa 1200 V, mikä on reilusti enemmän kuin useimpien ajoakustojen tuottama 200–450 V. (Reimers et al. 2019, s. 3337, 3339; Umamaheswari et al. 2011, s. 67; Husain et al. 2021, s. 1041)

VSI:n tasavirtaliitännän kondensaattori C_{dc} on kriittinen komponentti vaihtosuuntaajan toiminnan kannalta, vaikka sen hinta onkin noin puolet vaihtosuuntaajan hinnasta. Kondensaattori tasoittaa invertterin läpi kulkevia suuria virta- ja jännitepiikkejä suojaten

näin sekä ajoakustoa että käyttölaiteita. Lisäksi kondensaattori mahdollistaa lähes jatkuvan sähkövirran kytkimille ja vähentää virrassa esiintyviä korkean taajuuden harmonisia yliaaltoja. Elektrolyyttikondensaattoreihin verrattuna kalvokondensaattoreissa on huomattu useita etuja vaihtosuuntaajakäytössä, missä korkeat virtasykähdykset ovat usein suurempia kuin kondensaattorin kapasitanssi. Käytettävien kondensaattoreiden mitoitus pohjautuu virtasykähdyksen asettamiin vaatimuksiin ja tarvittava kapasitanssi lasketaan sykähdyksen jännitteen pohjalta. (Reimers et al. 2019, s. 3337–3339; Dietsche & Reif 2018, s. 1305; Husain et al. 2021, s. 1040)

3.2.2 Virtalähdevaihtosuuntaaja

Perinteisen VSI:n perustavanlaatuisina puutteina ovat kuitenkin ulostulojännitteen pienempi suuruus verrattuna sisääntulojännitteeseen, sähkömagneettisesta häiriöstä johtuvat oikosulku ongelmat ja pulssileveysmodulaatiossa esiintyvistä ”kuolleesta ajasta” johtuva vääristymä ulostulovirrassa. VSI:lle onkin ollut aikojen saatossa useita vaihtoehtoja, mutta suurin osa vaihtoehdoista vaatii enemmän kytkimiä ja passiivielementtejä verrattuna VSI:hin, mikä lisää järjestelmän hintaa, kokoa ja hallinnan monimutkaisuutta. Potentiaalisimmat vaihtoehdot ovat virtalähdevaihtosuuntaaja ja impedanssilähdevaihtosuuntaaja. Kuva 8 esittää kolmivaiheisen virtalähdevaihtosuuntaajan rakenteen. (Reimers et al. 2019, s. 3338; Lee & Trinh 2012, s. 714)



Kuva 8. Kolmivaiheisen virtalähdevaihtosuuntaajan piirikaavio jännite-virta-muuntajalla. Mukailen Taha et al. 2022, s. 4592.

Virtalähdevaihtosuuntaaja tarjoaa rakenteensa ansiosta luontaisia etuja, joita VSI:llä ei ole mahdollista saavuttaa. CSI pystyy esimerkiksi tuottamaan sähkövirtaa korkeammalla jännitteellä kuin sisääntulojännite parantaen esimerkiksi sähköauton toimintamatkaa. Virtalähdevaihtosuuntaaja koostuu kuudesta transistori-diodi-parista mahdollistaen kaksisuuntaisen jännitteen eston ja yhdensuuntaisen virran kulun. Useimmiten transistoreina käytetään piipohjaisia IGBT:itä. Moottorikäyttösovelluksissa CSI:n ulostulo vaatii lisäksi kondensaattorisuodattimia poistamaan transistoreiden tuottamaa voimakasta säröä. (Reimers et al. 2019, s. 3338; Taha et al. 2022, s. 4592)

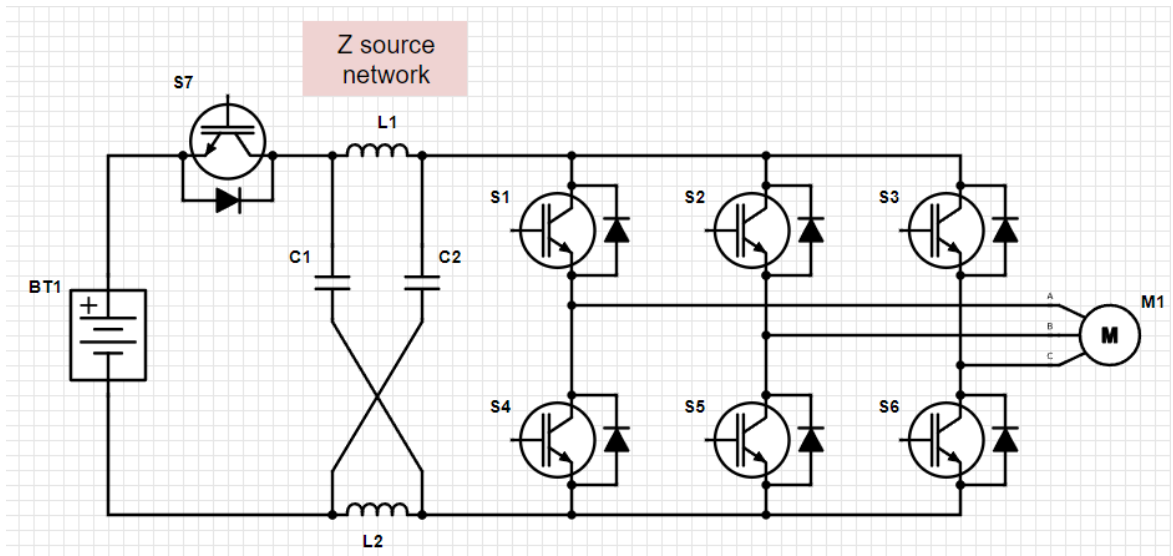
Virtalähdevaihtosuuntaaja vaatii esivaiheen ajoakuston ja CSI:n väliin, mutta haittapuolena juuri esivaihe on virtalähdevaihtosuuntaajan pullonkaula akkukäyttösovelluksissa. Esivaihe toimii tasasuuntaajana mahdollistaen tasaisen, hallitun sähkövirran syötön CSI:lle. Normaalisissa tiloissa esivaihe on asetettu johtamaan jatkuvasti sähköä, mutta kääntöpuolena jatkuva johtaminen aiheuttaa suuren johtavuushäviön piirissä. (Taha et al. 2022, s. 4592)

Virtalähdevaihtosuuntaajassa VSI:n tulo puolella esiintynyt iso ja epävakaa kondensaattori on mahdollista korvata tasoituskuristimella invertterin tehotehyyden parantamiseksi ja huoltokustannusten laskemiseksi. Kondensaattoriin verrattuna käämin toiminta ei ole lämpötilarajattu ja käämin kokoa on mahdollista pienentää kasvattamalla käyttötaajuutta laajentaen käyttöolosuhteita ja parantaen tehotehyyttä. Yleisesti otettuna virtalähdevaihtosuuntaajissa käytetty tasokuristin on kuitenkin vielä tilaa vievä ja painava varsinkin suurtehosovelluksissa. (Reimers et al. 2019, s. 3338; Taha et al. 2022, s. 4592)

3.2.3 Impedanssilähdevaihtosuuntaaja

CSI:n rajattu ulostulojännitteen kasvu, hetkellinen piirin avoimuus johtaen ulostulon katkeamiseen ja CSI:n matalampi tehokkuus sekä korkeampi hinta verrattuna VSI:in ovat yhdessä estäneet CSI:n korvaamasta jännitelähdevaihtosuuntaajia ajomoottorisovelluksissa. VSI:n suurimmat ongelmat ovat sen sijaan sähkömagneettisesta häiriöstä johtuva oikosulku sekä matala ulostulojännite. Impedanssilähdevaihtosuuntaajaa onkin suunniteltu korjaamaan sekä CSI:ssä että VSI:ssä esiintyvät ongelmat. Impedanssilähdevaihtosuuntaaja voi parantaa moottorikäytön vakautta ja turvallisuutta monimutkaisten vaatimusten alaisena. ZSI korjaa inverttereissä esiintyvät jännitteen laskut ilman erillisiä komponentteja, pienentää moottorin vaatimuksia halutun tehotarpeen tuottamiseksi, parantaa moottorin

tehokerrointa ja vähentää harmonista säröä. Kuva 9 esittää impedanssilähdevaihtosuuntaajan piirikaavion. (Reimers et al. 2019, s. 3338; Mande et al. 2020, s. 2–3)



Kuva 9. Kaksisuuntaisen ja kolmivaiheisen impedanssilähdevaihtosuuntaajan piirikaavio. Mukailten Mande et al. 2020, s. 3.

Impedanssilähdevaihtosuuntaaja yhdistää VSI:n ja CSI:n piirteitä mahdollistaen joko jännitteen tai virran kytkemisen suoraan tulokanavaan. ZSI:n piirikaavion ominaispiirteenä on käämeistä ja kondensaattoreista muodostuva X-kirjaimen muotoinen impedanssiverkko virtalähteen ja itse vaihtosuuntaajan välissä. Vaihtosuuntaajan kytkinten oikealla hallinnalla ZSI voi toimii niin kutsuttuna ”buck-boost”-invertterinä eli sen ulos antama jännite voi olla suurempi tai pienempi kuin sisääntulojännite. (Reimers et al. 2019, s. 3338; Mande et al. 2020, s. 2–3)

Impedanssiverkko mahdollistaa ylä- ja alatasen transistoreiden yhtäaikaisen sulkemisen samassa vaihtosuuntaajan haarassa kasvattaen tällöin kytkimille tulevaa jännitettä. Saman haaran kytkinten yhtäaikainen sulkeminen ei aiheuta mitään vikaa, koska virtasyötteisen ZSI:n käämi on suunniteltu kestävämmän korkeaa virtaa. (Reimers et al. 2019, s. 3338; Mande et al. 2020, s. 2–3)

Sähköautojen akustojen laajasti vaihtelevien jänniteskaalojen takia invertterin ulostulojännitteen hallinta olisi erittäin hyödyllistä invertterille. Lisäksi ZSI:n hyötysuhde on korkeampi tai vastaava kuin VSI:llä. Toisaalta ZSI ei sovellu matalille

syöttöjännitteille, koska se ei pysty vaimentamaan kytkentävirtasysäystä, ja ZSI:n kytkimille tuleva virta ei ole jatkuvaa. ZSI:n aktiivisten komponenttien määrä on pienempi kuin VSI:llä, mutta passiivisten komponenttien suuremman määrän takia ZSI:n hinta ja koko on suurempi kuin VSI:llä, mikä on estänyt sen käyttöönoton autoteollisuudessa. (Reimers et al. 2019, s. 3338; Mande et al. 2020, s. 3)

3.2.4 Modulaatiotekniikat ja vaihtosuuntaajan ohjaus

Vaihtosuuntaajan ulosantama vaihtovirta tuotetaan pulssileveysmodulaatioon (Pulse Width Modulation, PWM) pohjautuvilla tekniikoilla. Pulssileveysmodulaatio pohjautuu vaihtosuuntaajan sisältämien kytkimien positiota vaihtoon tietyssä järjestyksessä halutun taajuuden ja amplitudin tuottamiseksi ulostulovirtaan. Kyvykyys korkealle syöttöjännitteen ja vaihevirran ulostulon hyödyntämiselle voikin auttaa moottoria tuottamaan enemmän tehoa kentänheikennysalueella. (Reimers et al. 2019, s. 3339; Cai et al. 2021, s. 10)

Perinteisin PWM-tekniikka on niin kutsuttu sinimuotoinen pulssileveysmodulaatio (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM), joka tuottaa sinimuotoista signaalia perustaajuudella. Muita sähköautoissa käytettyjä modulaatiotekniikoita ovat avaruusvektoripulssileveysmodulaatio (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) ja kuusiporrasmodulaatio (Six-Step Modulation, SSV). Taulukko 1 esittää eri modulaatiotekniikoiden vertailun keskenään. (Reimers et al. 2019, s. 3339; Hayes & Goodarzi 2018, s. 392, 395)

Taulukko 1. Eri modulaatiotekniikoiden ominaisuudet. Mukailten Cai et al. 2021, s. 10.

Modulaatio- tekniikka	Rakenteellinen monimutkaisuus	Harmoninen särö	Väännön aaltoisuus	Rakenteellinen vankkuus
SVPWM	Monimutkainen	Matala	Matala	Korkea
SPWM	Yksinkertainen	Korkea	Korkea	Matala
SSV	Yksinkertainen	Korkea	Korkea	Matala

SPWM keskittyy ratkaisemaan moottorin teholähteen näkökulmasta kolmivaiheisen, symmetrisen jännitetaajuuden ja hallitun jännitteen tuoton. SPWM tuottaa kuitenkin

enemmän harmonista säröä kuin SVPWM, mikä vaikuttaa negatiivisesti SPWM:n tehokkuuteen. Suurempi ongelma SPWM:n kanssa kuitenkin on, että jännitteen perusvaiheen amplitudi voi olla vain puolet syöttöjännitteestä. Matalan tulojännitteen takia SPWM sopii käytettäväksi vain matalissa nopeuksissa esimerkiksi mutkassa ajaessa. (Cai et al. 2021, s. 10)

Laskennallisesti monimutkaisuudestaan huolimatta SVPWM on houkutteleva vaihtoehto pääsääntöisesti käytettäväksi modulaatiotekniikaksi. Avaruusvektoripulssileveysmodulaatiolla pystytään tuottamaan sähkömoottorille enemmän ympyrää muistuttava magneettikenttä kuin sinimuotoisella pulssileveysmodulaatiolla, mikä parantaa merkittävästi sähkömoottorin suorituskykyä. SVPWM:llä saavutettava tulojännite onkin jopa 15,5 % korkeampi kuin SPWM:llä, mikä mahdollistaa suuremman tehon tuoton korkeanopeuksisessa käytössä. (Cai et al. 2021, s. 8, 10)

SVPWM pystyy käyttämään erittäin hyvin hyödyksi invertterin syöttöjännitteen pienentäen modulaatiossa tapahtuvia häviöitä, minkä lisäksi SVPWM:llä tuotettu ulostulo on amplitudiltaan yhtenäisempi kuin SPWM:llä. SVPWM:llä esiintyy myös vähemmän harmonista kokonaissäröä SPWM:ään verrattuna, minkä ansiosta SVPWM parantaa sekä vaihtosuuntaajan että sähkömoottorin suorituskykyä ja hyötysuhdetta. Lisäksi SVPWM:llä on hyvä vikasetokyky samojen jännitevektorien redundanttien kytkentätilojen ansiosta. Kehittyneen vikasetotilan ansiosta SVPWM:n suunnittelu tarjoaa laajan vapauden optimoida invertterin suorituskyky haluttujen vaatimusten mukaiseksi. (Cai et al. 2021, s. 8, 10; Reimers et al. 2019, s. 3339)

Kolmas vaihtoehtoinen modulaatiotekniikka on kuusiporrasmoodulaatio. SSV:llä kyetään hallitsemaan sähkömoottoria säätämällä jänniteamplitudia, vuota ja vääntöä, mikä mahdollistaa korkeimman tulojännitteen hyötyasteen. Laajan säätömahdollisuuden ansiosta SSV on hyödyllisimmillään korkealla tehoalueella, kun sähkömoottorin tulojännite ei enää pysty voittamaan sähkömoottorin vastasähkömotorista voimaa. SSV pystyy hyödyntämään koko tulojännitteen, mikä nostaa sähkömoottorin vääntökykyä kentänheikkensalueella parantaen tällöin sähkömoottorin suorituskykyä huomattavasti. Haittapuolena SSV:n tuottaa korkea amplitudista harmonista säröä vaihtovirrassa ja magneettikentässä esiintyvissä ilmaraoissa. Väännönhallinnan vaikeudesta ja ulostulojännitteen amplitudihallinnan puuttumisesta johtuen SSV onkin pysynyt

täydentävänä toimintona jonkin toisen modulaatiotekniikan ohessa. (Cai et al. 2021, s. 11; Reimers et al. 2019, s. 3339)

3.3 Ajomoottorit

Ajomoottori on sähköauton määrittelevä tekijä. Ajomoottorissa voimansiirron sähköenergia muuttuu mekaaniseksi energiaksi, joka johdetaan vetoakselille ajoneuvon liikuttamiseksi. Sähköautoissa ajoneuvon liikkeen tuottamiseen käytetään yhtä tai useampaa ajomoottoria ja voimansiirron muut osat ovat mahdollistamassa ajomoottorin optimaalisen toiminnan. Tässä kappaleessa käsitellään sähköautoissa käytettävistä ajomoottoreista epätahtimottorit, kestromagneettitahtimoottorit, harjattomat tasavirtamoottorit ja vaihtoreluktanssimoottorit.

Ajomoottorilta vaaditaan korkeaa hyötysuhdetta, tehotiheyttä, mitoitus- sekä käynnistysmomenttia, ylikuormituskapasiteettia, vakiotehoaluetta sekä ominaisteho, laajaa nopeusaluetta ja hyviä vikasieto-ominaisuuksia. Lisäksi ajomoottorin pitää pystyä tuottamaan korkea teho matkanopeudella ja nopea dynaaminen vaste. Näitä ominaisuuksia vaaditaan ajomoottorilta moottorityypistä riippumatta, mutta moottorin rakenne ja toimintaperiaate määräävät suunnittelu- ja ohjaustavan, joilla vaatimukset saavutetaan. (Agamloh et al. 2020, s. 3)

Tasavirta- ja vaihtovirtamoottorien välillä on lukuisia argumentteja, kumpi olisi parempi vaihtoehto käytettäväksi sähköautoissa. Vaihtovirtamoottoria on helpompi hallita kuin tasavirtamoottoria, mutta vaihtovirtamoottori vaatii invertterin ajoakuston ja sähkömoottorin väliin. Aikanaan pienemmissä ajoneuvoissa sivuvirtakääminen tasavirtamoottori oli suosittu vaihtoehto, mutta nykyisin sähköautoissa suositaan pitkälti vaihtovirtamoottoreita. Toisaalta ero tasavirta- ja vaihtovirtamoottorin välillä on tänä päivänä hämärtänyt. Yleensä sähkömoottorit luokitellaan tasavirta- tai vaihtovirtamoottoreihin, mutta esimerkiksi vaihtovirtamoottorin ja harjattoman tasavirtamoottorin välinen ero on pieni. (Denton 2016, s. 91)

Sähkömoottori koostuu kahdesta pääkomponentista, joita ovat staattori ja roottori. Staattori on sähkömoottorin liikkumaton runko ja roottori on sähkömoottorin keskellä oleva pyörivä osa, jonka liike johdetaan renkaille ajoneuvon liikkeen tuottamiseksi. Lähestulkoon kaikki vaihtovirtamoottorit toimivat samalla periaatteella. Lamino id un

staattorin ympärille asennettu käämitys tuottaa sähkövirrasta pyörivän magneettivuon, jota roottori seuraa roottorin ja staattorin magneettikenttien vuorovaikutuksen ansiosta. (Denton 2016, s. 91; Hayes & Goodarzi 2018, s. 161)

Roottorin magneettikenttä voidaan tuottaa joko sähkömagneettisella induktiolla tai kestopagneeteilla. Lähtökohtana sähkömoottorin toiminnalle sähkömagneettiseen induktioon pohjautuvissa moottoreissa on, että staattorin tuotettu muuttava magneettikenttä indusoi jännityksen roottoriin, jonka magneettiset ominaisuudet saavat roottorin niin sanotusti jahtaamaan staattorin magneettikenttää. Vaihtoehtoisesti kestopagneeteilla toimivissa moottoreissa roottorin ei tarvitse välttämättä olla käämitty, vaan kestopagneetit riittävät tarvittavan magneettikentän synnyttämiseksi roottoriin. Kolmivaiheisen virran luonteen ansiosta muuttuvan magneettikentän tuottaminen staattoriin on yksinkertaista ja suoraviivaista. Sähkömoottorin ei kuitenkaan välttämättä tarvitse toimia kolmivaiheisella vaihtovirralla, vaan sähkömoottorissa voidaan käyttää niin monivaiheista sähkövirtaa kuin on tarve. (Hu et al. 2012., s. 177)

Sähkömoottorin ohjauksen kannalta tärkeä ilmiö sähkömoottorissa on niin kutsuttu vastasähkömotorinen voima (Back Electro-Motive Force, back EMF). Roottorin magneettikenttä indusoi vastasähkömotorisen voiman staattorin käämityksiin roottorin alkaessa pyörimään. Vastasähkömotorinen voima ei kuitenkaan ole mekaaninen voima nimestään huolimatta ja sen yksikkö onkin voltti. Vastasähkömotorinen voima kasvaa roottorin kierrosnopeuden mukana vastustaen tuotettua sähkömotorista voimaa, mikä saa staattoriin tuodun sähkövirran suuruuden laskemaan. (Hu et al. 2012., s. 179)

3.3.1 Epätahtimoottori

Epätahtimoottorin (Asynchronous Motor, AM; Induction Motor, IM) tekniikka on kohtuullisen vanha. Epätahtimoottori koostuu käämitetystä staattorista ja joko häkkikäämitystä painevaluroottorista tai harvemmin vaihekäämitystä roottorista. Epätahtimoottoreita on käytetty teollisuudessa menestyksekkäästi ja roottoreiden painevalaminen kuparista lisäsi huomattavasti epätahtimoottorin tehokkuutta verrattuna aikaisempiin alumiinista painevallettuihin roottoreihin. Kupari johtaa sähköä noin 60 % paremmin kuin alumiini ja kuparinen roottori laskikin moottorihäviöitä noin 15 % - 20 %. (Agamloh et al. 2020, s. 5; Hu et al. 2012., s. 184)

Epätahtimoottorin ominaispiirteitä ovat yksinkertainen ja kestävä rakenne, matala hinta, jopa 95 % hyötysuhde, korkea luotettavuus, matala väännön ailahtelu ja todella matalat huoltovaatimukset. Lisäksi epätahtimoottoreilla on korkea huipputeho ja nopea dynaaminen vasteaika. Epätahtimoottoreilla on mahdollista saavuttaa ongelmitta yli 15000 rpm kierrosnopeus laajalla vakioehtoalueella. Toisaalta epätahtimoottorin ohjauspiiri on monimutkainen ja ohjauspiirin hyötysuhde sekä tehotehiys ovat verrattain matalat, mistä johtuu niiden laskeva markkinaosuus. (Cai et al. 2021, s. 5; Agamloh et al. 2020, s. 4; Ehsani et al. 2021, s. 980)

Epätahtimoottorit jaotellaan kahteen ryhmään niiden roottorin käämityksen perusteella. Roottori voi olla joko häkkikäämitty tai vaihekäämitty, mutta matalampien valmistuskustannusten, kevyempien huoltovaatimusten ja jämerämmän rakenteen vuoksi häkkikäämitty roottori nähdään yleisesti houkuttelevampana vaihtoehtona. Häkkikäämityn epätahtimoottorin staattori rakentuu kolmesta rautaytimisestä käämistä, joista jokainen on määritetty yhdellä sähkövirran vaiheelle. Rautaytimen sen sijaan koostuu yksittäisistä teräslevyistä, jotka on eristetty toisistaan pitääkseen pyörrevirtahäviö minimissä. (Chau & Li 2014, s. 5; Dietsche & Reif 2018, s. 1338)

Staattorin käämityksiin syötetty vaihtovirta tuottaa roottorin ja staattorin väliseen ilmarakoon pyörivän magneettivuon. Magneettivuon tiheydellä on erittäin suuri merkitys roottorin tuotetun väännön kannalta. Pyörivä magneettivoima indusoi roottorin käämitykseen virran, joka tuottaa roottorille oman magneettikentän. Roottorin navat ovat oikosuljettuja keskenään, mistä tulee häkkikäämityn epätahtimoottorin yleinen kutsumanimi oikosulkumoottori. Roottorin käämityksiin indusoitunut magneettikenttä on vuorovaikutuksessa staattorin magneettikentän kanssa, jolloin roottoriin muodostunut vääntö saa roottoriin pyörimään magneettivuon suuntaisesti. Epätahtimoottorissa roottori ei kuitenkaan pyöri tahtinopeudella eli samalla nopeudella kuin pyörivä magneettikenttä, mistä tulee epätahtimoottorin nimi. Parhaimmillaan ero roottorin ja magneettikentän pyörimisnopeuden välillä on noin 5 %. (Dietsche & Reif 2018, s. 1338; Denton 2016, s. 92; Hu et al. 2012., s. 184; Agamloh et al. 2020, s. 5)

Ajomootorikäytössä epätahtimoottoreita käytetään yleensä vaihtosuuntaajan kanssa, mikä asettaa moottorikäytölle lisävaatimuksia, mutta vastaavasti taas lyhentää toisia vaatimuksia. Keskeinen hyöty teollisuuskäyttöön suunniteltuihin epätahtimoottoreihin verrattuna on, että ajomoottorikäytössä käynnistysvirta ei ole ongelma, huomattava

käynnistysmomentti on mahdollista ja järkevä vakiotehoalue on mahdollista saavuttaa oikealla käyttöjännitteen ja -taajuuden valinnalla. (Agamloh et al. 2020, s. 6)

3.3.2 Kestomagneettitahtimoottori

Suurin osa sähköautoissa tänä päivänä käytetyistä ajomoottoreista on kestopagneettimoottoreita. Kestomagneeteilla varusteltuja tahtimoottoreita voidaan käyttää joko tasavirralla tai vaihtovirralla, ja vaihtovirralla käytetyistä koneista käytetään yleisesti nimitystä kestopagneettitahtimoottori (Permanent-Magnet Synchronous Motor, PMSM). Kestomagneetoiduissa sähkömoottoreissa ei käytetä kenttäkäämitettyä roottoria, vaan niissä hyödynnetään nimensä mukaisesti kestopagneetteja tuottamaan roottorin magneettikenttä. Kestomagneettien magneettikenttä ”tarttuu” staattorin pyörivään magneettikenttään tuottaen tasaisen väännön. (Chau & Li 2014, s. 8; Denton 2016, s. 92; Dietsche & Reif 2018, s. 1340)

PMSM on ideaalinen vaihtoehto generaattorina toimimisen kannalta ja epätahtimoottoreihin verrattuna tahtimoottoreilla ei esiinny jättämää magneettikentän ja roottorin pyörimisnopeuden välillä, vaan roottori pyörii tahtinopeudella. Kestomagneettitahtimoottoreilla on lisäksi useita etuja muihin sähkömoottoreihin verrattuna. Magneettikentän syntyessä suuritehoisilla kestopagneeteilla, tahtimoottorin koko ja kokonaispaino on merkittävästi pienempi, jolloin sähkömoottorin energiatiheys kasvaa. Lisäksi PMSM:llä on korkea reluktanssivääntö, korkea hyötysuhde ja PMSM:n lämpö on helpompi siirtää ympäristöön, koska suurin osa lämmöstä syntyy staattorissa. Täysin suljetun rakenteen ansiosta uppomagneettiset PMSM:t ovat lähes huoltovapaita. (Cai et al. 2021, s. 5; Chau & Li 2014, s. 7; Denton 2016, s. 92)

Kasvanut hyötysuhde, ominaisteho ja tehoteho ovat aiheuttaneet muutoksen autoteollisuudessa, mikä on johtanut kestopagneettimoottoreiden kasvavaan käyttöön sähköautoissa oikosulkumoottoreiden sijasta. Toisaalta kestopagneettitahtimoottoreissa käytettävät kestopagneetit ovat verrattain kalliita, kestopagneettien magneettivuon hallinta on hyvin vaikeaa ja ne kärsivät ankkurin sekä käämityksen vuorovaikutuksesta syntyvästä magneettisuuden poistumisesta. Huomattavaa PMSM:stä myös on, että syöttötaajuuden laskiessa liian matalaksi moottorin tuottama vääntö alkaa heittelehtiä. (Chau & Li 2014, s. 7; Agamloh et al. 2020, s. 7; Denton 2016, s. 92; Ehsani et al. 2021, s. 980)

PMSM:ssä käytetään yleensä kahden tyypistä staattorin rakennetta, mutta staattorin toiminta-ajatus on samankaltainen epätahtimoottorin kanssa. Ensimmäinen vaihtoehto pohjautuu jaettuun käämitykseen, joka on lähes identtinen oikosulkumoottorin staattorin kanssa. Pienet yksityiskohdat ovat PMSM:ssä erilaiset, mutta perusrakenne ja pyörivän magneettikentän tuotto ovat identtiset. Vaihtoehtoinen rakenne pohjautuu keskitettyihin napakäämityksiin. (Hu et al. 2012., s. 188; Cai et al. 2021, s. 5; Agamloh et al. 2020, s. 8)

Perinteisistä tahtikoneista poiketen kestopagneettitahtikoneissa kestopagneetit korvaavat roottorin magnetointikäämityksen. Kestopagneettitahtikoneet jaotellaan pintamagneettisiin (Surface Permanent Magnet, SPM) ja uppomagneettisiin (Interior Permanent Magnet, IPM) sähkömoottoreihin kestopagneettien sijoitustavan mukaan. Pintamagneettisissa moottoreissa kestopagneetit ovat asennettu roottorin ulkokehälle, kun taas uppomagneettisissa moottoreissa kestopagneetit sijoitetaan roottorin sisään. Roottorin rakenne vaikuttaa olennaisesti useisiin tärkeisiin moottoriminaisuuksiin kuten esimerkiksi vakioehtoalueeseen. (Cai et al. 2021, s. 5; Agamloh et al. 2020, s. 7)

Pintamagneettinen roottori on rakenteellaan kohtalaisen yksinkertainen, mutta magneettien pinnalla olo jättää suuremman ilma-eräön roottorin ja staattorin väliin, mikä johtaa suorituskyvyn laskuun erityisesti vakioehtoalueella. Pintamagneettisiin moottoreihin voidaan asentaa keskitetty käämitys, jolla saavutetaan huomattavasti parempi vakioehtoalue. Pintamagneettisten moottoreiden käyttö sähköautoissa on kuitenkin melko rajattua, koska nykyinen muutos autoteollisuudessa pyrkii saavuttamaan korkeamman tehon ja tehotehden vähentämällä samalla käytettyjen kestopagneettien määrää. (Agamloh et al 2020, s. 7–8)

PMSM:n erikoisuus on, että se tarvitsee erityisjärjestelyjä sähkömoottorin käynnistämiseksi. PMSM tuottaa roottoria eteenpäin liikuttavaa vääntöä vain, kun roottorin ja magneettikentän kierrosnopeudet ovat samat. Muussa tapauksessa roottorin magneettinaavat hylkivät staattorin magneettikentän napaisuutta. Tällaisessa tapauksessa roottori alkaa värähdellä ja voimakkaasti lämmetä, jolloin käämityksen eristys voi pahimmillaan tuhoutua lämmöstä. (Denton 2016, s. 92; Dietsche & Reif 2018, s. 1345)

Roottorin ja magneettikentän kierrosnopeuden yhteen sovittamiseksi roottori on kiihdytettävä tahtinopeuteen ennen kuin PMSM:ää voidaan käyttää itsenäisesti. Yhteen sovittamisen saavuttamiseksi roottori voidaan kiihdyttää erillisellä tasavirtamoottorilla

tahtinopeuteen, roottorin napakenkiin voidaan asentaa erillinen vaimennuskäämitys etätahtisen väännön tuottamiseksi tai staattorin magneettikenttä sovitetaan erillisellä taajuusmuuttajalla roottorin nopeuteen. (Dietsche & Reif 2018, s. 1345)

3.3.3 Harjaton tasavirtamoottori

Harjaton tasavirtamoottori (Brushless DC motor, BLDC) eli elektronisesti kommutoitu sähkömoottori (Electronically Commutated Motor, ECM, EC-moottori) on käytännössä välimuoto tasavirtamoottorin ja vaihtovirtamoottorin välillä. Toimintaperiaatteeltaan BLDC on hyvin samantyyppinen tahtimoottoriin verrattuna. Teoreettisesti kestromagneetteja käyttävät BLDC:t ovat erityisiä kestromagneettitahtimoottoreita. Poikkeuksena kestromagneettitahtimoottorin verrattuna BLDC:tä ajetaan puolisuunnikkaalla vaihtovirralla siniaallon sijaan, BLDC:n syöttöjännite täytyy olla vaihteleva ja BLDC:n teho sekä vääntöominaisuudet muistuttavat harjallisia tasavirtamoottoreita. Lisäksi BLDC:n staattorin käämitys on keskitetty jaetun käämityksen sijaan. (Denton 2016, s. 94; Cai et al. 2021, s. 5–6)

BLDC:n etuja on korkea hyötysuhde sekä tehotiheys, BLDC voi tuottaa korkeaa vääntöä laajalla tehoalueella ja sillä voidaan ajaa erittäin korkealla kierrosnopeudelle harjojen puuttumisen ansiosta. Korkea tehotiheys on BLDC:n epäkkään muotoisen magneettikentän ja puolisuunnikkaan muotoisen virran ansiosta, koska ne tuottavat suuremman väännön kuin sinimuotoinen kenttä ja sinimuotoinen sähkövirta. BLDC:n käynti on myös sulavaa ja BLDC:n rakenne, vaadittu tehoelektroniikka sekä ohjaus ovat yksinkertaisia. Toisaalta sähköinen kommutointi tuottaa meteliä sekä merkittävää vääntöheittelyä, kun taas PMSM tuottaa käytännössä välittömän ja yhtä jaksoisen väännön. (Ehsani et al. 2021, s. 979; Cai et al. 2021, s. 5–6; Chau & Li 2014, s. 8)

BLDC:n roottorissa käytetään perinteisesti kestromagneetteja ja staattoriin polaarisuus määritetään käämissä kulkevalla virralla. Kun staattorin polaarisuuden muutos ajoitetaan oikein ja toteutetaan tietyssä järjestyksessä, roottorin liikemäärä pitää roottorin liikkeessä. Ajoituksen muutoksella roottori voidaan saada kulkemaan myös vastakkaiseen suuntaan. Huomiona BLDC:tä ajomoottorina käytettäessä on, että BLDC tarvitsee vaihdelaatikon varmistamaan moottorin riittävän pyörimisnopeuden BLDC:n poikkeuksellisten vääntöominaisuuksien takia. (Denton 2016, s. 94)

BLDC:n nimitys elektronisesti kommutoitu moottori tulee tavasta, jolla sähkömoottorissa tuotetaan muuttuva magneettikenttä. Ajomoottoreissa ei ole viime vuosina lähes tulkoon koskaan ollut niin kutsuttua virrankäännintä eli kommutaattoria, vaan magneettikentän suunta on muutettu oman sähköpiirin avulla. Harjattomissa sähkömoottoreissa magneettikentän suunta muutetaan elektronisesti. Kuitenkin viime vuosien trendistä poiketen BMW esitteli vuonna 2022 viidennen sukupolven sähkömoottorinsa, jossa palattiin takaisin käyttämään kommutaattoria magneettikentän suunnan muuttamiseksi. (Denton 2016, s. 94; Banner 2022)

BLDC:n ohjauksessa roottoria seurataan Hall-anturilla, jolla tuotetaan takaisinsyöttö ohjaus- ja tehoelektronikalle roottorin position ja nopeuden tunnistamiseksi. Takaisinsyötön avulla ohjausyksikkö tuottaa BLDC:n pyörivän magneettikentän, jonka taajuus määrittää moottorin nopeuden. Jos BLDC-moottorissa käytetään kolmea käämiä tai vaihdetta, moottorinohjauksen hienosäätö on mahdollista, mikä tarjoaa korkeamman käyntinopeuden, tasaisemman käynnin ja korkeamman väännön. Toisaalta moottorin vääntö laskee nopeuden kasvaessa vastasähkömotorisen voiman takia. Moottorin maksiminopeus rajoittuukin tilanteeseen, missä vastasähkömotorinen voima vastaa käyttöjännitettä. (Denton 2016, s. 94–95)

3.3.4 Vaihtoreluktanssimoottori

Vaihtoreluktanssimoottori (Switched Reluctance Motor, SRM) muistuttaa rakenteeltaan kestromagneettitahtimoottoria ja SRM:n ohjausjärjestelmä on hyvin saman kaltainen kuin tahtimoottoreilla. Kuitenkin merkittävä ero PMSM:ään verrattuna on, että vaihtoreluktanssimoottori ei käytä kestromagneetteja. Sen sijaan SRM:n roottori on valmistettu pehmeästä raudasta ja magnetisoitu staattori vetää sitä puoleensa. SRM:n keskeinen etu onkin, että sähkömoottorissa ei tarvita kalliita ja harvinaisia magneettisia maametalleja. Kestomagneettien puuttumisen ansiosta SRM:ää voidaan käyttää esimerkiksi korkea lämpötilan käyttökohteissa. Kaiken kaikkiaan SRM on rakenteeltaan todella yksinkertainen ja siten myös halpa. (Denton 2016, s. 96–97)

Reluktanssimoottoreihin verrattuna SRM:n roottorin sekä staattorin avonapaisuus on erittäin tehokas ratkaisu sähkömagneettisen energiamuunnoksen kannalta. Lisäksi SRM:n etuja ovat yksinkertainen ja kestävä rakenne, kyky korkeanopeuksiseen käyttöön ja laajin vakioehtoalue kaikista sähkömoottoreista. Vaihtoreluktanssimoottoreissa on kuitenkin perustavanlaatuisia ongelmia, jotka vaikeuttavat niiden käyttöä sähköautoissa.

Eritoten tällaisia ovat matala energiatiheys, huomattavan monimutkainen sekä kallis moottorinohjaus, korkea käyttöääni, korkea väännön heittäminen ja matala huippuvääntö. SRM ei myöskään toimi hyvin generaattorina muihin sähkömoottoreihin verrattuna, koska sen roottori ei ole magnetisoitu. (Chau & Li 2014, s. 6; Denton 2016, s. 96–97; Hu et al. 2012., s. 189; Ehsani et al. 2021, s. 978; Agamloh et al. 2020, s. 9)

Vaihtoreluktanssimoottorin erikoisuus on, että siinä käytetään perinteisistä reluktanssimoottoreista poiketen avonapoja staattorissa ja roottorissa. Toimintaperiaatteeltaan reluktanssimoottorit on väittämättä yksiä yksinkertaisimpia sähkömoottoreita. SRM:n staattorissa on keskitetty käämitys jokaisen navan ympärillä. SRM:n roottori ei ole käämitty eikä siinä ole kestopagneetteja, vaan sen navat koostuvat nipusta piiteräslamelleja, jotka ovat muotoiltu itsestään suuntautumaan staattorin magneettikentän mukaisesti. Roottorin ympäriltä on lisäksi poistettu epätahtimoottorissa esiintyvät osat. Staattorin magneettivuon voidaan tällöin pakottaa roottoriin alueille, joissa ilmarako staattorin ja roottorin välillä on pieni. SRM:llä on tapana linjata itsensä magneettikentän suuntaisesti, minkä ansiosta SRM:n roottori pyörii tahtinopeudella staattorin magneettikentän mukana. Toimintaperiaatteensa ansiosta SRM voi tuottaa pitoväännön pitkäksi aikaa. (Hu et al. 2012., s. 189; Dietsche & Reif 2018, s. 1345; Cai et al. 2021, s. 4–5; Agamloh et al. 2020, s. 9)

SRM:n toiminta-ajatus pohjautuu roottorin rajakerrokseen vaikuttavaan reluktanssivoimaan. SRM:n staattorissa ja roottorissa olevat navat eivät tarkoituksellisesti ole samalla jaolla, jolloin kaikki staattorin ja roottorin navat eivät koskaan voi olla linjassa toistensa kanssa. Staattorin napojen jaksollinen jännittäminen synnyttää pyörivän magneettikentän, joka tuottaa reluktanssivoiman roottorin napoihin. Reluktanssivoiman tangentin suuntaisella komponentilla on vääntöä tuottava vaikutus, mikä saa roottorin pyörimään magneettivuon mukana. Roottorin ja staattorin napojen kohdatessa toistensa reluktanssivoima muuttuu välittömästi nolaksi, joten SRM:n jatkuvan toiminnan kannalta onkin tärkeää, että seuraavan käämityksen jännittäminen alkaa viimeistään napojen kohdatessa toistensa. SRM on käytännössä tehokas askelmoottori. (Dietsche & Reif 2018, s. 1345; Denton 2016, s. 97)

SRM:n toiminnassa on kaksi huomattavaa ominaisuutta. Ensinnäkin vaihtovirran polarisuudella ei ole merkitystä väännön suunnalle. Toisekseen moottori pystyy tuottamaan vääntöä vain kasvavan induktanssin suuntaan. Muutoin SRM tuottaa

negatiivista vääntöä ja jarruttaa moottorin pyörimistä. Toisin sanottuna jokainen vaihe kykenee tuottamaan positiivista vääntöä vain puolikkaalla matkalla napojen välillä, mikä saa aikaan ailahtelua väännön tuotossa. Lisäksi napakärkien korkean saturaation sekä napojen ja rakojen reunavaikutuksen takia vaihtoreluktanssimoottoreissa esiintyy usein akustisia ongelmia (Chau & Li 2014, s. 6)

Vaihtoreluktanssimoottoreissa on nähty merkittävää potentiaalia käytettäväksi sähköautoissa sen yksinkertaisen rakenteen, alhaisten valmistuskustannusten, erinomaisten vääntö-nopeus-ominaisuuksien ja korkean hyötysuhteen ansiosta. SRM:stä on kehitetty useita uusia prototyyppejä, joiden testitulokset osoittavat, että ne voivat kilpailla kestopagneettitahtikoneiden kanssa suorituskyvyssä. Prototyypeillä on esimerkiksi saavutettu sama suorituskyky kuin uppomagneettisella PMSM:llä olevalla Toyota Priuksella. Akustinen meteli sekä vääntöheittely ovat kuitenkin suuret esteet sen käyttöönotolle. Ajomoottorikäytössä matala väännönheittely on tärkeää erityisesti täyssähköautoissa, koska täyssähköautoissa ajomoottori on ainoa liikettä tuottava komponentti. (Agamloh et al. 2020, s. 9; Chau & Li 2014, s. 5)

3.4 Vaihteistot sähköautoissa

Sähkömoottorin käyttö muuttaa oleellisesti auton vaihdelaatikoita käyttövaatimuksia. Sähkömoottori tuottaa ominaisuuksiensa ansiosta maksimiväännön jo matalilla kierroksella, sähkömoottoreilla on laajaa vakiotehoalueen ja korkea hyötysuhdealue. Näiden ominaisuuksien ansiosta sähkömoottorit eivät lähtökohtaisesti tarvitse yhtä moniportaista vaihteistoa verrattuna perinteisiin polttomoottoriautojen vaihteistoihin. Toisaalta voimansiirron korkean hyötysuhteen ja suorituskyvyn saavuttamiseksi vaihteisto täytyy suunnitella niin, että sähkömoottori pääsee toimimaan hyötysuhteeltaan korkeimmalla käyntialueella, ajettiin sähköautolla sitten kaupungissa, moottoritiellä tai mäkisessä ympäristössä. Voimansiirron kokonaishyötysuhde onkin hyvin riippuvainen ajomoottorin hyötysuhteesta. (Xu 2018, s. 188, 201–202; Karki et al. 2020, s. 16)

Hybridiautoissa vaihteistolla on suuri merkitys halutun voimansiirtotarkoituksessa. Hybridiautoissa yleisesti käytetyt voimansiirtokomponentit voidaan järjestellä hyvinkin erilaisissa järjestyksissä, jolloin vaihteiston täytyy pystyä käsittelemään eri voimanlähdetyppejä. Tästä syystä polttomoottoriautoihin verrattuna hybridiautojen vaihteisto on monimutkaisempi ja sillä on tärkeämpi rooli

voimansiirrossa. Täyssähköautoissa taas vaihteiston tarvitsee käsitellä vain sähkömoottorin tuottamaa vääntöä, joten täyssähköautoissa vaihteistoksi riittää jopa vain ylennysvaihte vaadittujen ajo-ominaisuuksien saavuttamiseksi. (Xu et al. 2018, s. 188; Mustafi 2022, s. 86)

Käytetystä voimansiirtoarkkitehtuurista riippuen sähköautoissa käytetään useimmiten kaksoiskytkinvaihteistoa (Dual Clutch Transmission, DCT), portaattomasti säätävää vaihteistoa (Continuously Variable Transmission, CVT), automaattista manuaalivaihteistoa (Automatic Manual Transmission, AMT) tai suoravälitteistä vaihteistoa. (Ahssan et al. 2018, s. 171–172)

Vaihtoehtoisesti hybridiautoissa voidaan käyttää myös omaa hybridivaihteistoa (Dedicated Hybrid Transmission, DHT), jolloin vaihteisto on yleensä mekaanisesti yksinkertaisempi kuin perinteisessä vaihdelaatikossa. Perinteisiin vaihteistöisiin pohjautuvista hybridivaihteistosta poiketen DHT purkaa vaihteiston rakenteelliset rajoitteet. (Xu et al. 2018, s. 188, 198)

Yhtenä ensimmäisistä DHT:sta Toyota Hybrid System (THS) näytti suunnan myöhempien DHT:n suunnittelulle. Vuonna 2016 esitelty neljännen sukupolven THS on tänä päivänä laajasti käytössä eri hybridiautoissa. THS:n toimintaperiaate pohjautuu rinnakkaisakseliseen hammaspyöräpariin ja planeettavaihteistoihin. General Motorsin suunnittelema DHT pohjautuu myös planeettavaihteistojen käyttöön toisin kuin Corun suunnittelema vaihteisto, jonka toimintaperiaatteessa käytetään hyväksi Ravigneaux vaihdesarjaa. (Xu et al. 2018, s. 188, 198)

Ajoneuvovalmistajat ovat käyttäneet täyssähköautoissa pääasiassa suoraikäyttöistä yksiportaisia vaihteistoja, missä ajomoottori on kytketty suoraan vaihteistoon. Täyssähköauton merkittävänä etuna on, että vaihteiston tarvitsee käsitellä vain sähkömoottorin tuottamaa vääntöä, jolloin vaihteiston käyttövaatimukset ovat huomattavasti löysemmät kuin hybridiautolla. Toisaalta yksi- ja moniportaisten vaihteistojen välillä ei kuitenkaan ole selvää tutkimustuloksiin pohjautuvaa konsensusa kumpi vaihtoehto olisi kokonaisuudeltaan parempi. (Xu et al. 2018, s. 203; Karki et al. 2020, s. 16; Ahssan et al. 2018, s. 170–171)

Kaksi- tai kolmiportaisella vaihdelaatikolla sähkömoottorilta vaaditaan pienempää huippuvääntöä, jolloin sähköautossa voidaan käyttää pienempää sähkömoottoria. Lisäksi

energiankulutusta voidaan vähentää optimoimalla sähkömoottorin käyttöä vaihteiden vaihdon avulla. Moniportaisten vaihteistojen käyttöä on tutkittu laajasti täyssähköauton dynaamisen suorituskyvyn ja taloudellisuuden parantamiseksi sekä käytettävän sähkömoottorin pienentämiseksi. Tutkimukset osoittavat, että jo kaksiportainen vaihteisto voi laskea energian kulutusta 5 % - 16 % ja parantaa dynaamista suorituskykyä jopa 20 %. (Xu et al. 2018, s. 188, 203; Ahssan et al. 2018, s. 171)

Moniportainen vaihteisto on oikeassa elämässä hyötysuhteeltaan parempi vaihtoehto, koska voimansiirron kokonaishyötysuhde riippuu merkittävästi siitä, kuinka korkealla hyötysuhteella ajomoottori pääsee toimimaan. Moniportaisella vaihdelaatikolla voidaan varmistaa, että ajomoottori toimii mahdollisimman suuren osan ajasta korkean hyötysuhteen nopeusalueella. Moniportaiset vaihteistot eivät kuitenkaan vielä ole käytössä kaupallisissa sähköautoissa. (Karki et al. 2020, s. 16; 171)

Moniportaisten vaihteistojen teknologia pohjautuu pitkälti perinteisiin polttomoottoriautojen vaihteistoihin. Pääasiassa vaihteistot mukailevat automaattista manuaalivaihteistoa, kaksoiskytkinvaihteistoa, automaattivaihteistoa ja sähköistä portaattomasti säätävää vaihteistoa. Kuva 10 esittää moniportaisten vaihdelaatikoiden vertailun keskenään, kun käyttökohteena on täyssähköauto. Vertailussa olevat vaihteistot ovat automaattinen manuaalivaihteisto, kaksoiskytkinvaihteisto ja sähköinen portaattomasti säätävä vaihteisto. (Xu et al. 2018, s. 203)



Kuva 10. Moniportaisten vaihteistojen vertailu täyssähköautossa. Mukailten Xu et al. 2018.

3.4.1 Portaattomasti säätävät vaihteisto

Portaattomasti säätävä vaihteisto (Continuously Variable Transmission, CVT) on moniportaisen vaihteiston tyyppi, joka pystyy nimensä mukaisesti portaattomasti säätämään vaihteiston välityssuhdetta. Portaattoman välityksen ansiosta sähkömoottori on helppo pitää korkean hyötysuhteen kierrosnopeusalueella, jolloin CVT:n voi parantaa voimansiirron kokonaishyötysuhdetta merkittävästi. CVT tukevat täysin sähköistä käyttötilaa, täysin mekaanista käyttötilaa sekä sähköisen- ja mekaanisen käyttötilan yhteistoimintaa, minkä ansiosta se sopii käytettäväksi sekä hybridi- että täyssähköautoissa. (Ahssan et al. 2018, s. 171; Mustafi 2022, s. 86)

CVT:n rakenne koostuu kahdesta hihnapyörästä, jotka ovat määrätyn etäisyyden päässä toisistaan, ja joiden välillä vääntö välitetään työntöhihnalla tai levylenkkiketjulla. Välityssuhteen portaaton säätö toteutetaan vetävän ja vapaan hihnapyörän puolikkaiden etäisyyden säädöllä. CVT:n käyttää lisäksi keskipakokytkintä ja jarruhiinaa toteuttaakseen sulavan liikkeelle lähdön. (Ahssan et al. 2018, s. 171; Dietsche & Reif 2018, s. 800; Karki et al. 2020, s. 16)

Välityssuhteen säätö toteutetaan hihnapyöriin asennetuilla toimilaitteilla, jotka liikuttavat hydraulisesti hihnapyörien toista puolikasta aksiaalisuunnassa. Tällöin hihna tai ketju joko kiikkuu suuremmalle halkaisijalle tai laskeutuu alaspäin pienemmälle halkaisijalle riippuen hihnapyörien puolikkaiden etäisyydestä. Aksiaalinen siirtymä kiilahihnapyörien puoliskojen välillä muuttaa halkaisijaa, jossa hihna pyörii, ja täten kiilahihnapyörien välistä välityssuhdetta. (Ahssan et al. 2018, s. 171)

Hihnapyörien puolikkaiden portaaton säätö mahdollistaa minkä tahansa välityssuhteen käytön CVT:llä. CVT:n tarjoama ajomukavuus onkin erittäin hyvä, koska vaihteiston välityssuhteen muuttamisessa ei ole hetkeä, jolloin renkaille ei välittyisi moottorin tuottama vääntö. CVT:llä on tarkasteltavista vaihteistoista tasaisimmat ajo-ominaisuudet, mutta ne ovat kalliita ja niiden hyötysuhde on matala. (Dietsche & Reif 2018, s. 800)

3.4.2 Automaattinen manuaalivaihteisto

Yksi vaihtoehto käytettäväksi vaihteistoksi on myös automaattinen manuaalivaihteisto (Automatic Manual Transmission, AMT). AMT muistuttaa mekaaniselta rakenteeltaan perinteistä manuaalista vaihteistoa, missä käytetään kytkintä irrottamaan kytkinlevyt

toisistaan sopivan vaihteen vaihtamiseksi. Poikkeuksena kuitenkin AMT:ssa on, että autossa ei ole kytkinpoljinta vaan vaihteiston ohjausyksikkö määrittää itsenäisesti vaihteen vaihdon tarpeen. (Ahssan et al. 2018, s. 171–172; Dietsche & Reif 2018, s. 797)

AMT käyttää hyväksi tasausmoottoria ja synkronoijaa vaihteiden vaihdon pehmentämiseksi, mutta AMT on kuitenkin renkaille tulevan väännön keskeyttävä rakenne samalla tavalla kuin manuaalivaihteisto. Vaihteiston ohjausyksikkö käyttää hyväksi nopeudensäätimeltä ja erinäisiltä toimilaitteilta saatua tietoa, jonka pohjalta ohjausyksikkö operoi AMT:n kytkintä ja vaihteiden synkronointia. (Dietsche & Reif 2018, s. 797; Xu et al. 2018, s. 203; Ahssan et al. 2018, s. 171–172)

Kytkimen irrottaessa kytkinlevyt toisistaan, renkaille tuleva vääntö katkeaa, jolloin vaihteiden vaihdon vaikutus ajomukavuuteen kärsii verrattuna DCT:en ja CVT:en. Toisaalta AMT:n tarjoama ajomukavuus on samalla tasolla täysautomaattisen vaihteiston kanssa. AMT on hyötysuhteeltaan ja vääntöominaisuuksiltaan paras sekä hinnaltaan halvin, mutta se kärsii epätasaisesta vaihteiden vaihdosta verrattuna muihin vaihtoehtoihin (Kuva 10). (Dietsche & Reif 2018, s. 797; Xu et al. 2018, s. 203)

3.4.3 Kaksoiskytkinvaihteisto

Kaksoiskytkinvaihteisto (Dual Clutch Transmission, DCT) pohjautuu toiminnaltaan samaan periaatteeseen kuin automaattinen manuaalivaihteisto. DCT ei sisällä erillistä kytkinpoljinta AMT:n tavoin vaan DCT:ssa käytetään sensoreita sekä nopeudensäädintä avustamaan vaihteiston ohjausjärjestelmää määrittämään vaihteiden vaihdon tarve samalla tavalla kuin AMT:ssa. Poikkeuksena kuitenkin DCT koostuu kahdesta toisistaan erillään olevasta lieriöhammaspyöristä rakentuvasta alivaihteistosta. (Ahssan et al. 2018, s. 172; Dietsche & Reif 2018, s. 798–799)

Jakamalla parilliset vaihteet toiselle alivaihteistolle ja parittomat vaihteet toiselle alivaihteistolle, DCT:llä saavutetaan vaihteiden pikavaihto. Vaihteen vaihtamiseen riittää tällöin toisen kytkimen avaaminen ja toisen sulkeminen, jolloin renkaille välittyvä vääntö ei keskeydy. DCT:n tarjoama ajomukavuus vastaakin automaattivaihteistoa. (Ahssan et al. 2018, s. 172; Dietsche & Reif 2018, s. 798–799)

DCT asettuu keskikastiin suurimmassa osassa tarkasteltavista ominaisuuksista, mutta se on massaltaan ja kooltaan suurin (Kuva 10). DCT:n huomattava etu kuitenkin on, että se

soveltuu automaattivaihteistoista poiketen yli 7000 rpm kierrosnopeuksille, mistä syystä DCT:tä suositaan varsinkin urheiluautoissa. Lisäksi DCT tukee täysin sähköistä käyttötilaa, täysin mekaanista käyttötilaa sekä sähköisen- ja mekaanisen käyttötilan yhteistoimintaa. (Dietsche & Reif 2018, s. 799; Mustafi 2022, s. 86)

3.4.4 Yksiportaiset vaihteistot

Sähkömoottorien laajan vakiotehoalueen ja korkean hyötysuhdealueen ansiosta sähköautoissa, joissa vaihteistolle välittyy vain sähkömoottorin tuottama vääntö, vaihteisto tarvitsee vähemmän vaihteistopyöriä saavuttaakseen tarvittavat ajo-ominaisuudet. Voimansiirron koon ja hinnan laskemiseksi sekä kehityskierron lyhentämiseksi suurin osa kyseisistä sähköautoista käyttävät suoravälitteisiä yksiportaisia vaihteistoja. (Xu et al. 2018, s. 201–202)

Yksiportaiset vaihteistot ovat sähköautoissa aina ylennysvaihteita riittävän ajonopeuden saavuttamiseksi. Vaikka ylennysvaihdetta käyttämällä renkaille välittyvä vääntö laskee, niin ajomoottori tuottaa kuitenkin niin suuren väännön, että ajo-ominaisuudet eivät kärsi. Yksiportaiset vaihteistot koostuvat yleensä kahdesta rinnakkaisakselisesta hammaspyöräparista rakenteen yksinkertaisuuden takia. Vaihtoehtoisesti vaihteistossa voidaan käyttää myös planeettavaihteistoja. Planeettavaihteiston hyödyntäminen tarjoaa joitain etuja käytettynä sähköautoissa esimerkiksi saavutettu kierrosnopeus voi olla jopa 21000 rpm. (Dietsche & Reif 2018, s. 791; Xu et al. 2018, s. 202–203)

Yksiportaisen vaihteiston etuja on, että sillä on helpompi laskea vaihteiston hintaa, kokoa, energiahäviöitä ja voimansiirron massaa. Lisäksi suoraan ajomoottoriin integroidulla vaihteistolla pystytään yhdellä pumpulla voitelemaan ja jäähdyttämään vaihteistoa yhtä aikaa ajomoottorin kanssa. Toisaalta yksiportaisella vaihteistolla voimansiirron suorituskyky riippuu merkittäväksi ajomoottorin suorituskyvystä, joka ei kykene toimimaan kaikilla tarvittavilla kierrosalueilla parhaalla mahdollisella hyötysuhteella. (Ahssan et al. 2018, s. 170; Xu et al. 2018, s. 188, 202; Karki et al. 2020, s. 16)

4 VERTAILU

Täyssähköautoissa käytetään lähtökohtaisesti aina litiumioniakkuja. Täyssähköautojen turvautuessa puhtaasti sähköenergiaan, vaaditaan täyssähköautojen ajoakulta mahdollisimman korkea energiasisältö ilman, että ajoakustosta muodostuu kohtuuttoman painava. Litiumioniakkujen suuremman energiatiheuden ansiosta täyssähköautolla saavutetaan saman massaisella ajoakustolla merkittävästi suurempi energiasisältö verrattuna NiMH-akkuihin. Nykyaikaisissa täyssähköautoissa ajoakun koko on 20–100 kWh. (Korhonen ym. 2019, s. 21)

Hybridiautoissa käytetään sen sijaan useimmiten nikkelimetallihydridiakkuja. Hybridiautojen vaatima sähköenergian määrä on huomattavasti pienempi kuin täyssähköautoilla ja hybridiautoissa ajoakkuja käytetäänkin pääasiassa jarrutusenergian talteen ottoa varten ja lyhyt aikaiseen ajamiseen ilman polttomoottoria. Tästä syystä johtuen hybridiautoissa on edullisempaa käyttää NiMH-akkuja, koska NiMH-akut ovat huomattavasti halvempia ja NiMH-akkujen matalampi maksimisähköenergian määrä ei ole rajoittava tekijä. Tänä päivänä hybrideissä on yleensä noin 1 kWh:n ajoakku. (Korhonen ym. 2019, s. 21)

Sähköautojen akkuja verrataan yleisesti sähkötehon ja sähköenergian suhteella. Akkujen eri käyttövaatimusten takia hybridi- ja täyssähköautot tarvitsevat optimaalisen toiminnan takaamiseksi eri painopisteisiin keskittyvät akut. Hybridiautoissa ajoakun tarkoitus on enemmän tukea polttomoottoria tai hetkittäisesti ajaa pelkällä ajoakulla. Tällöin hybridiautoissa ajoakku painottuu enemmän lyhyeen, mutta todella korkeatehoiseen sähköenergian ulosantiin. Täyssähköautoissa auton täytyy pystyä ajamaan pidempiä matkoja ilman latausta, joten ajoakun täytyy painottua suurempaan sähköenergiaan verrattuna sähkötehoon. (Dietsche & Reif 2018, s. 1322; Hayes & Goodarzi 2018, s. 72)

Täyssähköautojen ja työssä käsiteltävien ei-ladattavien hybridiautojen ajoakuston lataustapahtuma eroaa huomattavasti toisistaan. Täyssähköautoja on mahdollista ladata suoraan kodin pistorasiasta yksivaiheisena tai kolmivaiheisena sähkövirtana. Ajoakun latausaika riippuu merkittävästi käytetystä latausportista riippuen. Tyypillisesti ajoakun täyteen lataaminen kestää 6–8 tuntia, kun käytetään perinteistä yksivaiheista latausporttia. Toisaalta tasavirralla toimivalla pikalatauksella akku on mahdollista ladata täyteen jopa 10 minuutissa. Nykyaikaisilla täyssähköautoilla pääsee yhdellä latauksella autosta ja

olosuhteista riippuen 50–500 km. Perinteisen pistokelatauksen lisäksi täyssähköauto pystyy jarrutuksessa ottamaan talteen auton liike-energiaa ja muuttamaan sen sähköenergiaksi. (Denton 2016, s. 105; Korhonen ym. 2019, s. 15)

Ei-ladattavissa hybrideissä ajoakuston lataaminen tapahtuu joko polttomoottorin toimesta tai ottamalla osa jarrutusenergiasta talteen täyssähköauton tavoin. Perinteisissä ajoneuvoissa jarruttamiseen käytetty energia poistuu systeemistä ulos lämpönä. Sähköautossa auton sähkömoottori pystyy sen sijaan jarrutusilanteessa muuttamaan auton liike-energiaa sähköenergiaksi, joka syötetään sähköauton ajoakulle. Hyötyjarrutuksessa saadaan normaalisti hukkaan menevästä energiasta palautettua huomattava määrä takaisin ajoakulle. (Bayindir et al. 2010, s. 1307; Hayes & Goodarzi 2018, s. 54; Wu et al. 2014, s. 428)

Polttomoottorilla tapahtuvassa latauksessa polttomoottorin tuottamaa käyttövoimaa käytetään akun lataamiseen. Hybridiarkkitehtuurista riippuen polttomoottorin käyttövoimasta käytetään osa tai jopa kaikki ajoakun lataamiseen. Sarjahybridissä polttomoottoria käytetään pelkästään ajoakun lataamiseen. Polttomoottori pyörittää generaattoria, josta saatu sähköenergia syötetään muuntajan kautta ajoakulle sähkömoottorin käytettäväksi. Sarjahybridissä on mahdollista käyttää suhteellisen pienitehoista polttomoottoria, koska polttomoottorin tehtävä on vain ladata ajoakku. Renkaille tulevasta huipputehosta vastaa kokonaan sähkömoottori. (Hayes & Goodarzi 2018, s. 32; Posa & Ahtiainen 2020)

Rinnakkaishybridissä polttomoottori käy koko ajan optimaalisella tehoalueella. Jos kuitenkin vaihteiston vaatima voima on suurempi kuin polttomoottorin teho, sähkömoottori tukee polttomoottorin toimintaa. Jos polttomoottori antaa ulos suuremman tehon kuin vaihteisto tarvitsee, ylimääräinen teho käytetään ajoakuston lataamiseen. Jaetun tehon hybridissä osa polttomoottorin antamasta tehosta ohjataan vaihteiston kautta koko ajan ajoakuston lataamiseen. Planeettavaihteistolta on yhteys generaattorin, jota muuttaa mekaanisen energian sähköiseksi energiaksi ajoakun lataamista varten. Ajoakulta sähköenergia muutetaan takaisin mekaaniseksi energiaksi sähkömoottorin avulla ja ohjataan takaisin CVT:lle. (Bayindir et al. 2010, s. 1307; Dietsche & Reif 2018, s. 817; Wu et al. 2014, s. 439)

Ajoakuston paikkaa vertaillen täyssähkö- ja hybridiautojen välillä nähdään, että ajoakuston sijainti on kaikissa voimansiirtotyypeissä samassa paikassa. Huomattavin ero

nähdään kuvien 4 ja 5 mukaisesti jaetun tehon hybridissä ja sarjahybridissä, joissa ajoakkua ladataan jatkuvasti polttomoottorin avulla. Ajoakun toiminnallisuudessa ei kuitenkaan ole merkittävää eroa. Kaikkia voimansiirtotyyppejä tarkastellessa nähdään, että kaikissa arkkitehtuureissa ajoakun sähköenergia ohjataan invertterin kautta sähkömoottorilla ja sitä kautta renkaille.

Suurin osassa nykyaikaisista sähköautoista käyttää jännitelähdenvaihtosuuntaajia hybridiarkkitehtuurista, käytetystä ajomoottorista ja sähkövirran vaiheiden lukumäärästä riippumatta. Jännitelähdenvaihtosuuntaaja on virta- ja impedanssilähdenvaihtosuuntaajiin verrattuna halvempi, yksinkertaisemmin hallittava ja korkeamman hyötysuhteen omaava ratkaisu. Lisäksi VSI on pitkän kehitystyön ansiosta hyvin robusti ja luotettava rakenne. Toisaalta erityisesti kvasi-impedanssilähdenvaihtosuuntaaja olisi potentiaalinen vaihtoehto VSI:lle hybridautoissa hyötysuhteen ja polttoainetaloudellisuuden parantamiseksi. (Reimers et al. 2019, s. 3337–3339; Husain et al. 2021, s. 1040; Ehsani et al. 2021, s. 981)

Kussakin sähköautossa käytetyn modulaatiotekniikan varmentaminen on hyvin haastavaa, mutta yleisesti avaruusvektoripulssileveysmodulaation uskotaan olevan suosituin vaihtoehto sen laskennallisesta vaativuudesta huolimatta. SVPWM:n suorituskyky kuitenkin on huomattavasti korkeampi verrattuna SSV:en tai SPWM:ään. Esimerkiksi General Motorsin tiedetään käytettävän SVPWM:ää ja SSV:tä riippuen invertterin toiminta-alueesta. (Reimers et al. 2019, s. 3339; Cai et al. 2021, s. 10)

Kuvia 2–5 vertaillessa nähdään, että vaikka voimansiirtoarkkitehtuurit ovat hyvinkin erilaisia niin vaihtosuuntaajan sijoittelu ei juuri poikkea eri voimansiirtoarkkitehtuurien välillä. Vaihtosuuntaaja on aina sijoitettu ajoakuston ja yhden tai useamman sähkömoottorin väliin. Ottaen huomioon vaihtosuuntaajan roolin sähköautoissa, vaihtosuuntaajaa ei juuri ole mahdollista sijoittaa muuhun paikkaan voimansiirrossa, joten sen sijoittelussa ei ole nähtävissä variaatiota eri voimansiirtoarkkitehtuurien välillä.

Sähköautoissa käytettävät sähkömoottorit ovat tänä päivänä tehoelektronikan ohjaustapojen kehittymisen myötä pääasiassa uppomagneettisia kestomagneettitahtimoottoreita voimansiirtoarkkitehtuurista riippumatta. Kestomagneettitahtikoneet tarjoavat korkean käynnistysvääntömomentin, korkean

hyötysuhteen ja niiden hallinta on yksinkertaista verrattuna vaihtoehtoisiin sähkömoottoreihin. Lisäksi kestopagneettitahtimoottorit ovat toimintaperiaatteensa ansiosta ideaalisia generaattoreita hyötyjarrutuksen hyödyntämiseen. (Korhonen ym. 2019, s. 25; Denton 2016, s. 58, 91–92; Cai et al. 2021, s. 5)

Oikosulkumoottorit olivat vielä vuonna 2014 hallitseva moottorityyppi, mutta kestopagneettitahtimoottorit ovat korvanneet oikosulkumoottorit lähes kokonaan ja nykyisin oikosulkumoottoreita käytetään vain harvoissa automalleissa. Joissain hybridiautoissa käytetään vaihtoreluktanssimoottoreita kehittyneillä ohjausjärjestelmillä saavutetun matalan vääntöailahtelun ja korkean tehon ansiosta, mutta niiden markkinaosuus ei ole merkittävä. (Ehsani et al. 2021 s. 978–979; Chau & Li 2014, s. 5)

Voimansiirtoarkkitehtuureja verratessa huomataan, että niistä jokaisessa käytetään sähkömoottoreita hieman eri tavalla. Huomattavaa on, että kuvissa mainitut generaattorit ovat käytännössä sähkömoottoreita. Staattorin käämityksiin indusoituu sähkövirta roottorin magneettien tehdessä työtä staattorin magneettikenttää vastaan. Indusoitunut sähkövirta taas johdetaan invertterin kautta ajoakustolle ajoakuston latausta varten.

Täyssähköauton voimansiirrossa ajomoottori on niin sanotusti perinteisessä käytössä. Ajoakustolta saatava tasavirta muutetaan vaihtosuuntaajassa kolmivaiheiseksi vaihtovirraksi, joka syötetään ajomoottorille sähköenergian muuttamiseksi mekaaniseksi liikkeeksi. Lisäksi ajomoottori toimii hyötyjarrutuksessa generaattorina. Jarrutustilanteessa ajomoottori ottaa talteen osan ajoneuvon liike-energiasta muuttaen liike-energian sähköenergiaksi ajoakuston lataamiseen. (Dietsche & Reif 2018, s. 820)

Sarjahybridissä polttomoottorin ulostulo muutetaan kahden sähkökäytön avulla mekaaniseksi liikkeeksi vetoakselille (Kuva 5). Polttomoottorin liike ohjataan ensin generaattorille, jonka tuottama vaihtovirta muutetaan tasavirraksi ajoakuston jännitetason ylläpitämistä varten. Ajoakuston antama tasavirta taas muutetaan vaihtosuuntaajan avulla vaihtovirraksi ajomoottoria varten. Sarjahybridissä sähkömoottorien valinta pohjautuu käytettyyn polttomoottoriin. Sähkömoottorit täytyy olla käyttötehon puolesta samaa kokoluokkaa kuin polttomoottori, jotta polttomoottorin koko teho on mahdollista hyödyntää ja välittää ajomoottorille. (Hayes & Goodarzi 2018, s. 32; Dietsche & Reif 2018, s. 827)

Sarjahybridistä poiketen rinnakkaishybridissä polttomoottori ja ajomoottori ovat toisistaan riippumattomia kokonaisuuksia, jotka yhdistyvät kytkimessä (Kuva 4). Rinnakkaishybridisissä polttomoottori ja ajomoottori on mahdollista erikseen kytkeä suoraan vetoakselille, jolloin sekä polttomoottorin että ajomoottorin tuottama vääntö on mahdollista johtaa suoraan renkaille esimerkiksi kaksoiskytkintä käyttämällä toisin kuin sarjahybridissä. Toisaalta sarjahybridin tapaan rinnakkaishybridin polttomoottoria voidaan hyödyntää ajoakuston lataamiseen kytkemällä polttomoottori ajomoottoriin. Tällöin ajomoottori toteuttaa samaa perusajatusta kuin hyötyjarrutuksessa käytetään paitsi, että ajomoottorille tuleva liike johdetaan polttomoottorilta eikä ajoneuvon renkailta. (Hayes & Goodarzi 2018, s. 32; Dietsche & Reif 2018, s. 823, 825)

Kaksoiskytkintä käytettäessä ajomoottori yhdistyy kaksoiskytkimen alayksikköön, jolloin ajomoottori on mahdollista irrottaa polttomoottorista kytkinten avulla. Kaksoiskytkimen ansiosta rinnakkaishybridissä ajoneuvoa on mahdollista liikuttaa puhtaasti joko polttomoottorilla tai sähkömoottorilla kytkimiä hyväksi käyttämällä. Rinnakkaishybridissä ajomoottorin välityssuhteen muuttaminen polttomoottorin välityssuhteeseen vaikuttamatta on mahdollista tiettyjen rajojen sisällä alayksikössä käytettyjen hammaspyörien oikealla valinnalla. (Dietsche & Reif 2018, s. 825)

Jaetun tehon voimansiirto on yhdistelmä sarjahybridistä ja rinnakkaishybridistä, jolloin jaetun tehon hybridivoimansiirto voi toimia sekä samalla perusajatuksella kuin sarjahybridillä että samalla perusajatuksella kuin rinnakkaishybridillä (Kuva 6). Voimansiirroissa osa polttomoottorin tuottamasta tehosta johdetaan planeettavaihteiston kautta mekaanista linjaa pitkin vetoakselille. Loppu polttomoottorin tehosta välitetään sähköiseen linjaan, missä polttomoottorin teho muutetaan sähkövirraksi ja johdetaan vetoakselille kahdella energiamuunnoksella. Energiamuutoksissa ensimmäinen sähkömoottori muuttaa polttomoottorin tehon sähkövirraksi, joka johdetaan invertterin kautta joko toiselle ajomoottorille tai ajoakustolle. (Dietsche & Reif 2018, s. 828)

Sarjahybridin tavoin pelkkää ajomoottoria voidaan käyttää matalaan tehon tarpeeseen, mutta suuremmissa tehontarpeissa ajomoottori tukee voimansiirtoa. Sähköisen ja mekaanisen linjan välillä ei ole kuitenkaan mahdollista vaihdella mielivaltaisesti vaan käytetystä planeettavaihteistosta, sähkömoottorista ja polttomoottorista riippuen vain tietyt linjojen yhdistelmät ovat mahdollisia. Sarjahybridin tavoin jaetun tehon voimansiirto vaatii verrattain korkeatehoiset sähkömoottorit hyödyntämään kaikki

polttomoottorin tuottama teho. Vaihteistoon on kuitenkin mahdollista asentaa mekaaniselle linjalle toinen planeettavaihteisto, jolloin käytettyjen ajomoottoreiden nimellistehontarve laskee. (Dietsche & Reif 2018, s. 828)

Vaihteiston kannalta käytetty voimansiirtoarkkitehtuuri määrittää pitkälti sähköautossa käytettävän vaihteistotyypin. Merkittävin asia vaihteiston kannalta on, että tarvitseeko vaihteiston käsitellä sekä polttomoottorin että ajomoottorin tuottamaa vääntöä vai pelkästään ajomoottorin tuottamaa vääntöä. Ajomoottorin ja polttomoottorin vääntökierrosnopeus käyrät ovat hyvin erityyppiset (Kuva 3), joten käytetty voimansiirtoarkkitehtuuri sulkee suoraan pois tietyt vaihtoehdot vaihteiston valinnassa, jotta ajoneuvolla olisi edes teoriassa mahdollista saavuttaa vaaditut ajo-ominaisuudet ajoneuvon käyttämiseksi liikenteessä.

Sarjahybridin ja täyssähköauton voimansiirtoja verratessa huomataankin, että niiden voimansiirroissa käytetyt komponentit ovat täysin samat ajoakustolta vetoakselille (Kuva 2 ja Kuva 5). Näissä voimansiirtoarkkitehtureissa kaikki renkaille välittyvä mekaaninen liike syntyy sähkömoottorissa, joten niissä voidaan käyttää samantyyppistä vaihteistoa.

Täyssähköautoissa käytetään pääasiallisesti yksiportaisia ylennysvaihteita sillä ajomoottorit ovat kykeneviä täyttämään ajoneuvolta vaaditut ajo-ominaisuudet ilman moniportaista vaihteistoa. Esimerkiksi Tesla, Nissan, Hyundai ja BYD käyttävät yksiportaisia vaihteistoja laskeakseen vaihteiston hintaa, pienentääkseen vaihteiston kokoa, minimoidakseen energiahäviöt, laskeakseen voimansiirron painoa tai lyhentääkseen kehityskiertoa. Toisaalta täyssähköautoihin on viime vuosina kehitetty kaksi- tai kolmiportaisia vaihdelaatikoita, mutta moniportaiset vaihteistot eivät kuitenkaan vielä ole käytössä kaupallisissa sähköautoissa. (Dietsche & Reif 2018, s. 791; Karki et al. 2020, s. 16, 171; Xu et al. 2018, s. 201–202)

Hybridiautoissa sähkömoottori on mahdollista integroida suoraan perinteiseen automaatti-, kaksoiskytkin- tai portaattomasti säätyvää vaihteistoon erillistä hybridimoduulia hyödyntämällä. Etuna hybridimoduulin käytössä on, että suurin osa vaihteistossa käytetyistä komponenteista periytyy suoraan perinteisistä polttomoottorin vaihdelaatikoista. (Xu et al. 2018, s. 188)

Perinteisiin vaihdelaatikoihin pohjautuvissa vaihteistoissa useat ajoneuvokomponenttivalmistajat ovat suunnitelleet oman ratkaisunsa vaihteiston

toteuttamiseksi hybridautoissa. ZF:n, Mercedes-Benzin ja Hyundain suunnittelema vaihteisto pohjautuu perinteiseen automaattivaihteistoon. Sen sijaan Jatcon sekä Cheryn suunnittelema ratkaisu pohjautuu portaattomasti pohjautuvaan vaihteistoon, kun taas Volkswagenin sekä BYD:n ratkaisu pohjautuu kaksoiskytkinvaihteistoon. (Xu et al. 2018, s. 198)

Jaetun tehon hybridit ovat poikkeuksellinen ratkaisu verrattuna sarja- ja rinnakkaishybridiin. Jaetun tehon hybridit käyttävät pääasiallisesti planeettavaihteistoon pohjautuvaa portaattomasti säätyviä vaihteistoja. Jaetun tehon vaihteisto kytkeytyy kolme akselia käyttämällä polttomoottoriin ja kahteen sähkömoottoriin. Planeettavaihteiston ansiosta jaetun tehon hybridissä on mahdollista toteuttaa täysin mekaaninen energianvälitys sekä yhdistetty energianvälitys. Planeettavaihteiston avulla sekä generaattori että ajomoottori voivat olla yhtä aikaa kytkettynä vaihteistoon. Lisäksi planeettavaihteiston ansiosta polttomoottorin nopeutta on mahdollista muuttaa tietyissä rajoissa vaikuttamatta ajonopeuteen, jolloin polttomoottorin hyötysuhdetta on mahdollista optimoida kesken ajon. (Dietsche & Reif 2018, s. 828)

Jaetun tehon hybridin voimansiirtoa on mahdollista jatkaa toisella mekaanisella kiinteävälityksellisellä linjalla toista planeettavaihteistoa käyttäen. Vaihteiston mekaaninen monimutkaisuus luonnollisesti tällöin kasvaa, mutta sähköisen linjan monimutkaisuus laskee. Käytetyt sähkömoottorit voivat olla tällöin nimellistehoiltaan pienempiä. (Dietsche & Reif 2018, s. 828–829)

5 YHTEENVETO

Taloudellisen kasvun myötä liikenteen aiheuttamat kokonaispäästöt kasvavat yhä huomattavaa vauhtia ajoneuvojen polttoainetaloudellisuuden merkittävästä edistymisestä huolimatta. Maailmanlaajuisena ilmiönä erinäiset poliittiset tahot ovatkin yrittäneet rajoittaa liikenteen aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä asettamalla yhä tiukempia rajoituksia ajoneuvojen päästöille. Rajoitukset ovat yksi tapa, jolla autoteollisuutta yritetään ohjata kehittämään vaihtoehtoisia energiamuotoja käytettäväksi ajoneuvoissa.

Ensimmäinen moderni sähköauto oli General Motorsin vuonna 1996 esittelemä EV1, joka oli mullistava sekä sähköautojen mutta myös koko autoteollisuuden kannalta. Jo ensimmäisistä sähköautoista alkaen ajoneuvoja rajoittanut tekijä on ollut ajoakusto. Ensimmäisen sukupolven EV1 käytti vielä lyijyakkuja, mutta toisen sukupolven EV1:ssä siirryttiin käyttämään NiMH-akkuja, jotka melkein kaksinkertaistivat auton toimintasäteen.

Ensimmäinen moderni hybridauto oli vuonna 1997 myyntiin tullut Toyota Prius, jonka tekniikka pohjautui erittäin korkealla hyötysuhteella toimivaan Atkinson-sykliin, NiMH-ajoakustoon ja kestopagneettitahtimoottoreihin. Priuksesta tuli aikansa markkinajohtaja vihreään teknologiaan pohjautuvissa ajoneuvoissa. Myöhemmin litiumionikenoissa tapahtuneen kehityksen ja hinnanlaskun myötä sähköautoista on tullut yhä houkuttelevampi vaihtoehto kuluttajille ja vuonna 2011 markkinoille tulleesta Nissan Leafista tulikin kaikkien aikojen myydyin sähköauto verrattain matalan myyntihintansa ansiosta.

Täysin sähköisesti toteutetussa voimansiirrossa yksi tai useampi sähkömoottori muuttaa akulta saadun sähköenergian liike-energiaksi renkailla. Yksinkertaisin ja yleisin täyssähköauton voimansiirto koostuu ajoakustosta, jolta saatu tasavirta muutetaan vaihtosuuntaajalla ajomoottorin tarvitsemaksi kolmivaiheiseksi vaihtovirraksi. Ajomoottori muuttaa sähkövirran mekaaniseksi liikkeeksi, joka välitetään vaihteiston kautta renkailla ajoneuvon liikuttamiseksi.

Yleisimpiä ei-ladattavia hybridiarkkitehtuureja ovat sarjahybridi, rinnakkaishybridi ja jaetun tehon hybridi. Sarjahybridin voimansiirto muistuttaa rakenteeltaan hyvin pitkälti täyssähköauton voimansiirtoa. Merkittävimpänä poikkeuksena on, että sarjahybridissä

käytetään polttomoottoria ajoakuston lataamiseen, kun taas täyssähköauton ajoakusto ladataan ajoneuvon ulkopuolisesta lähteestä. Sarjahybridin polttomoottorilla pyöritetään generaattoria, jonka tuottama vaihtovirta muutetaan tasasuuntaajalla tasavirraksi ajoakuston lataamiseksi. Ajoakustolta vetoakseleille sarjahybridin ja täyssähköauton voimansiirrot ovat lähes identtiset.

Rinnakkaishybridissä mekaaninen ja sähköinen linja ovat toisistaan erillisiä kokonaisuuksia, jotka tuottavat ajoneuvon käyttövoiman toisistaan riippumatta ja joiden käyttövoima yhdistyy kytkimessä esimerkiksi kaksoiskytkimen avulla. Mekaaninen linja tuottaa vaihteistolle vääntöä perinteisesti polttomoottorin tavoin, kun taas sähköinen linja toimii samalla perusajatuksella kuin täyssähköauton voimansiirto. Polttomoottoria voidaan lisäksi käyttää ajoakuston lataamisen välittämällä polttomoottorin tuottama liike ajomoottorille.

Jaetun tehon hybridi on kompromissi rinnakkaishybridin ja sarjahybridin välillä, jossa yhdistyvät rinnakkais- ja sarjahybridin parhaat puolet. Jaetun tehon hybridissä osa polttomoottorin käyttövoimasta välitetään planeettavaihtoon pohjautuvan CVT:n avulla auton liikuttamiseen ja loppu ajoakuston lataamiseen generaattorin sekä invertterin avulla. CVT:n ansiosta voimansiirron energiavirtojen optimointi on todella tehokasta. Lisäksi jaetun tehon hybridissä polttomoottorin on mahdollista toimia aina korkean hyötysuhteen kierrosalueella.

Sähköautoissa käytettävät ajoakustot ovat nykyään joko litium-ioniakkuja tai nikkelimetallihydridiakkuja. Litiumionikenoissa katodi muodostuu litiumioneja varaavasta metallioksidista, joka yleisimmin on nikkelin, mangaanin ja koboltin yhdisteitä. Litiumionikennon anodi sen sijaan koostuu grafitista. Nikkelimetallihydridikeno on hyvin samanlainen kuin aikaisemmin paljon käytetty nikkelikadmiumkenno. Kadmiumin myrkyllisyyden ja karsinogeenisyyden takia kuitenkin metallihydridi korvasi kadmiumpohjaiset akkukennot. Metallihydridi on yhdiste, jossa vetyatomit ovat sitoutuneet nikkelistä, koboltista ja pienestä määrästä muita materiaaleja koostuvaan metalliseokseen.

Nikkelimetallihydridiakkuja käytetään tänä päivänä pääasiassa vain hybridautoissa, mutta niiden käyttö on kuitenkin yhä vähenemässä litiumioniakkujen vallatessa lisää markkinatilaa. NiMH-kennojen energiasisältö on selvästi pienempi kuin litiumionikenoissa, mutta kuitenkin riittävä hybridautossa käytettäväksi. Lisäksi

NiMH-kennojen halvemman hinnan ansiosta NiMH-akkuja käytetään vielä hybridautoissa. Litiumioniakkujen energitiheys on jopa kaksi kertaa suurempi kuin NiMH-akuilla, mistä syystä täyssähköautoissa käytetään lähtökohtaisesti aina litiumioniakkuja toimintamatkan maksimoimiseksi.

Sähköautojen ajomoottoreina käytetään pääsääntöisesti aina vaihtosähkömoottoreita. Ajoakustolta on kuitenkin mahdollista saada suoraan ulos vain tasavirtaa, joten ajoakuston ja ajomoottorin väliin tarvitaan vaihtosuuntaaja, joka kykenee tuottamaan kolmivaiheista vaihtovirtaa muuttuvalla jännitteellä, virralla ja taajuudella. Yleisimmät vaihtoehdot sähköautoissa käytettäviksi inverttereiksi ovat jännitelähde-, virtalähde ja impedanssilähdevaihtosuuntaajat. Eri vaihtosuuntaajat ovat komponenttien kannalta melko samanlaisia, mutta niiden ohjauksessa ja ominaisuuksissa on perustavanlaatuisia eroja. Vaihtosuuntaajissa käytetty modulointitekniikka on joko sinimuotoinen pulssileveysmodulaatio, avaruusvektoripulssileveysmodulaatio tai kuusiporrasmoodulaatio.

Nykyisin suurin osa sähköautoista käyttää jännitelähdevaihtosuuntaajia käytetystä ajomoottorista tai sähkövirran vaiheiden lukumäärästä riippumatta. VSI:n suosion suurimmat syyt ovat sen korkea hyötysuhde, matala hinta ja ohjauksen yksinkertaisuus. VSI on lisäksi rakenteeltaan vankka ja luotettava sen pitkäaikaisen kehitystyön ansiosta. Käytetyn modulointitekniikan kannalta avaruusvektoripulssileveysmodulaation uskotaan olevan suosituin vaihtoehto sen laskennallisesta vaativuudesta huolimatta. Kussakin sähköautossa käytetyn modulaatiotekniikan varmentaminen on kuitenkin hyvin haastavaa, mutta esimerkiksi General Motorsin tiedetään käyttävän SVPWM:ää ja SSV:tä riippuen invertterin toiminta-alueesta.

Ajomoottori on sähköauton määrittävä tekijä. Ajomoottorissa voimansiirron sähköenergia muuttuu mekaaniseksi energiaksi, joka ohjataan vetoakselille ajoneuvon liikuttamiseksi. Ajomoottorilta vaaditaan korkeaa hyötysuhdetta, tehotiheyttä, mitoitus- sekä käynnistysmomenttia, vakiotehoaluetta, laajaa nopeusaluetta ja hyviä vikasieto-ominaisuuksia. Potentiaalisimmat vaihtoehdot ajomoottoriksi ovat oikosulkumoottori, kestomagneettitahtimoottori, harjaton tasavirtamoottori ja vaihtoreluktanssimoottori.

Sähköautoissa käytettävät sähkömoottorit ovat tänä päivänä tehoelektronikan ohjaustapojen kehittymisen myötä pääasiassa uppomagneettisia kestomagneettitahtimoottoreita voimansiirtoarkkitehtuurista riippumatta niiden lukuisten

etujen ansiosta. Kestomagneettitahtikoneet tarjoavat korkean käynnistysvääntömomentin, korkean hyötysuhteen ja niiden hallinta on yksinkertaista verrattuna vaihtoehtoisiin sähkömoottoreihin. Oikosulkumoottorit olivat vielä vuonna 2014 hallitseva moottorityyppi, mutta kestomagneettitahtimoottorit ovat korvanneet oikosulkumoottorit lähes kokonaan ja nykyisin oikosulkumoottoreita käytetään vain harvoissa automalleissa. Joissain hybridiautomalleissa käytetään vaihtoreluktanssimoottoreita, mutta niiden markkinaosuus ei ole merkittävä.

Sähkömoottorin käyttö muuttaa oleellisesti auton vaihteiston käyttövaatimuksia. Sähkömoottori tuottaa ominaisuuksiensa ansiosta maksimiväännön jo matalilla kierroksella ja sähkömoottoreilla on laajaa vakioehtoalueen, mistä syystä sähkömoottorit eivät lähtökohtaisesti tarvitse yhtä moniportaista vaihteistoa verrattuna perinteisiin polttomoottoriautojen vaihteistoihin. Toisaalta voimansiirron korkean hyötysuhteen ja suorituskyvyn saavuttamiseksi vaihteisto täytyy suunnitella niin, että sähkömoottori pääsee toimimaan hyötysuhteeltaan korkeimmalla käyntialueella, ajettiin sähköautolla sitten kaupungissa, moottoritiellä tai mäkisessä ympäristössä. Yleisimmät vaihtoehdot sähköautoissa käytettäviksi vaihteistoiksi ovat portaattomasti säätyvä vaihteisto, automaattinen manuaalivaihteisto, kaksoiskytkinvaihteisto ja yksiportainen vaihteisto.

Vaihteiston kannalta käytetty voimansiirtoarkkitehtuuri määrittää pitkälti sähköautossa käytettävän vaihteistotyypin. Merkittävin asia vaihteiston kannalta on, että tarvitseeko vaihteiston käsitellä sekä polttomoottorin että ajomoottorin tuottamaa vääntöä vai pelkästään ajomoottorin tuottamaa vääntöä. Täyssähkö- ja sarjahybridiautoissa käytetään pääasiallisesti yksiportaisia ylennysvaihteita, koska niissä vaihteistolle välittyy vain ajomoottorin tuottama vääntö ja ajomoottorit ovat kykeneviä täyttämään ajoneuvolta vaaditut ajo-ominaisuudet ilman moniportaista vaihteistoa. Rinnakkaishybridiauton voimansiirto voidaan toteuttaa esimerkiksi automaattivaihteistolla, portaattomasti säätyvällä vaihteistolla tai kaksoiskytkinvaihteistolla. Jaetun tehon hybridit ovat poikkeuksellinen ratkaisu verrattuna sarja- ja rinnakkaishybridiin. Jaetun tehon hybridit käyttävät pääasiallisesti planeettavaihteistoon pohjautuvaa portaattomasti säätyviä vaihteistoja, jotta polttomoottorin vääntö voidaan välittää yhtä aikaa generaattorille ja vetoakselille. Lisäksi jaetun tehon hybrideissä käytetty ajomoottori yhdistyy suoraan vaihteistoon.

LÄHDELUETTELO

Agamloh E., von Jouanne A. & Yokochi A., 2020. An Overview of Electric Machine Trends in Modern Electric Vehicles. *Machines*, 8 (2).

Ahssan M. R., Ektesabi M. M. & Gorji S. A., 2018. Electric Vehicle with Multi-Speed Transmission: A Review on Performances and Complexities. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 7 (2), 169–181.

Banner J., 2022. No Magnets, Big Power: BMW's Fifth-Generation Electric Motor. [verkkolehti]. Saatavissa: <https://www.motortrend.com/news/bmw-ix-m60-brushed-electric-motor-tech-deep-dive/> [vittattu 13.11.2023].

Bayindir K. Ç., Gözükcüçük M. A. & Teke A., 2011. A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units. *Energy Conversion and Management*, 52 (2), S. 1305-1313.

Cai W., Wu X., Zhou M., Liang Y. & Wang Y., 2021. Review and Development of Electric Motor Systems and Electric Powertrains for New Energy Vehicles. *Automotive Innovation*, 4 (1), S. 3-22.

Chau K. T. & Li W., 2014. Overview of electric machines for electric and hybrid vehicles. *International Journal of Vehicle Design*, 64 (1), S. 46-71.

Denton T., 2016. *Electric and Hybrid Vehicles*. New York: Routledge, 197 s. ISBN 978-1-138-84237-3.

Dietsche K. & Reif K. (toim.), 2018. *Automotive Handbook*. 10 painos. Karlsruhe: Robert Bosch GmbH, 1778 s. ISBN 978-1-119-53081-7.

Ehsani M., Singh K. V., Bansal H. O. & Mehrjardi R. T., 2021. State of the Art and Trends in Electric and Hybrid Electric Vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 109 (6), S. 967–984.

Fischer R., Küçükay F., Jürgerns G., Najork R. & Pollak B., 2015. *The Automotive Transmission Book*. New York: Springer International Publishing, 355 s. ISBN 978-3-319-05263-2.

Gutzmer P., 2014. Individuality and Variety– Paradigms of future mobility. Teoksessa: Reik W. (toim.) Solving the Powertrain Puzzle – 10th Schaeffler Symposium April 3/4. Herzogenaurach: Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG, S. 9-23. ISBN 978-3-658-06194-4.

Hayes J. G., & Goodarzi G. A., 2018. Electric Powertrain – Energy Systems, Power Electronics and Drives for Hybrid, Electric and Fuel Cell Vehicles. Hoboken: John Wiley & Sons, 530 s. ISBN 978-1-119-06364-3.

Hu H., Smaling R. & Baseley S. J., 2012. Advanced Hybrid Powertrains for Commercial Vehicles. Warrendale: SAE International, 406 s. ISBN 978-0-7681-8154-1.

Husain I., Ozpineci B., Islam M. S., Gurpinar E., Su G., Yu W., Chowdhury S., Xue L., Rahman D. & Shau R., 2021. Electric Drive Technology Trends, Challenges, and Opportunities for Future Electric Vehicles. Proceedings of the IEEE, 109 (6), S. 1039–1059.

Karki A., Phuyal S., Tuladhar D., Basnet S. & Sharestha B. P., 2020. Status of Pure Electric Vehicle Power Train Technology and Future Prospects. Applied System Innovation, 3 (3).

Korhonen E., Linja-aho V., Mäkinen J. & Orrberg M., 2019. Sähköautot ja latausjärjestelmät. 2 painos. Espoo: Sähköinfo Oy, 114 s. ISBN 978-952-231-269-3.

Mande D., Trovão J. P. & Ta M. C., 2020. Comprehensive Review on Main Topologies of Impedance Source Inverter Used in Electric Vehicle Applications. World Electric Vehicle Journal, 11 (2).

Mustafi N. N., 2022. An Overview of Hybrid Electric Vehicle Technology. Teoksessa: Kalghatgi G., Agarwal A. K., Leach F. & Senecal K. (toim.), Engines and Fuels for Future Transport. Singapore: Springer Singapore, S. 73–102. ISBN 978-981-16-8717-4.

Posa H. & Ahtiainen L., 2020. Niin mikä oli: aivan kaikki, mitä sinun tulee tietää hybrideistä [verkkolehti]. Saatavissa: <https://moottori.fi/ajoneuvot/jutut/niin-mika-oli-aivan-kaikki-mita-sinun-tulee-tietaa-hybrideista/> [viitattu 13.4.2021].

Reimers J., Dorn-Gomba L. Mak C. & Emadi A., 2019. Automotive Traction Inverters: Current Status and Future Trends. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68 (4), S. 3337-3350.

Taha W., Azer P., Callegaro A. D. & Emadi A., 2022. Multiphase Traction Inverters: State-of-the-Art Review and Future Trends. *IEEE Access*, 10, S. 4580–4599.

Trinh Q. & Lee H., 2012. A New Z-Source Inverter Topology with High Voltage Boost Ability. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 7 (5), S. 714–723.

Umamaheswari S., Thakura P. R. & Keshri R. K., 2011. Hardware Development of Voltage Source Inverter for Hybrid Electric Vehicle. Teoksessa: 2011 1st International Conference on Electrical Energy Systems. Piscataway, Institute of Electrical and Electronics Engineers, S. 67–71. ISBN 978-1-61284-379-7.

Wu G., Zhang X. & Dong Z., 2014. Powertrain architectures of electrified vehicles: Review, classification, and comparison. *Journal of the Franklin Institute*, 352 (2), S. 425–448.

Xu X., Dong P., Liu Y. & Zhang H., 2018. Progress in Automotive Transmission Technology. *Automotive Innovation*, 1 (3), S. 187–210.