



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **TÄYSSÄHKÖAUTO: RAKENNE JA TOIMINTA**

Aleksi Kokkonen

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Toukokuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Täyssähköauto: rakenne ja toiminta

Alexi Kokkonen

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2021, 35 s.

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Jussi Salakka

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on käydä läpi täyssähköautojen rakennetta ja toimintaa yleisellä tasolla. Työssä esitellään täyssähköautojen keskeisimpien komponenttien rakenteita ja toimintaperiaatteita. Ensimmäisessä kappaleessa lähdetään liikkeelle sähköautojen historiasta, minkä jälkeen lähdetään perehtymään tarkemmin täyssähköauton keskeisimpiin osiin. Työssä annetaan lukijalle yleiskuva siitä, millaisia eri komponentteja täyssähköauton rakenteessa voidaan käyttää. Voimalinjan osien rakenteiden esittelyn lisäksi käydään läpi osien toimintaperiaatteita. Lopuksi käydään läpi akkujen kierrätystä sekä täyssähköautojen valmistus- ja kunnossapitokustannuksia. Työn tekemisessä hyödynnettiin kirjallisuuslähteitä sekä tutkimusartikkeleita. Tuloksena saatiin laaja yleiskuva täyssähköauton rakenteesta ja toiminnasta.

*Asiasanat: Täyssähköauto, sähkömoottori, voimalinja*

# SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO .....	5
2 SÄHKÖAUTO .....	6
2.1 Historia .....	6
2.2 Sähköautotyyppejä .....	7
3 TÄYSSÄHKÖAUTO .....	8
4 TÄYSSÄHKÖAUTON VOIMALINJA .....	9
4.1 Etu- ja takaveto .....	9
4.2 Neliveto .....	10
4.3 Napamoottorilla toimiva voimansiirto .....	11
4.4 Sähköisen voimalinjan hyötysuhde .....	11
5 SÄHKÖMOOTTORI .....	13
5.1 Tasavirtamoottori .....	13
5.3 Induktiomoottori .....	15
5.4 Kestomagneettimoottori .....	15
5.5 Synkronireluktanssimoottori .....	16
6 REGENERATIIVINEN JARRUTUS .....	18
7 TÄYSSÄHKÖAUTON JÄÄHDYTYS .....	20
7.1 Akkujen jäädytys .....	20
8 AKUSTO .....	22
8.1 Litiumioniakku .....	22
8.2 Litiumpolymeeriakku .....	23
8.3 Nikkelimetallihydridiakku .....	24
8.4 Lyijyakku .....	25
9 AKKUJEN LATAAMINEN .....	26
9.1 Lataus vaihtovirralla .....	26
9.2 Lataus tasavirralla .....	26
9.3 Langaton virransiirto .....	27
10 LITIUMIONIAKKUJEN KIERRÄTYS .....	29
11 TÄYSSÄHKÖAUTON KUSTANNUKSET .....	32
12 YHTEENVETO .....	33
LÄHDELUETTELO .....	34

## **MERKINNÄT JA LYHENTEET**

AC	Alternating Current. Vaihtovirta
BEV	Battery Electric Vehicle. Täyssähköauto
DC	Direct Current. Tasavirta
EV	Electric Vehicle. Sähköauto
NiMH	Nikkelimetallihydridi
SRM	Synkronireluktanssimoottori
WPT	Wireless Power Transfer. Langaton virransiirto

## 1 JOHDANTO

Sähköautot ovat kehittyneet kovaa vauhtia ja uusia ratkaisuja kehitetään koko ajan lisää. Täyssähköautojen määrä automarkkinoilla on kasvanut merkittävästi viime vuosien aikana. Täyssähköautot ovat kasvattaneet suosiotaan niiden ympäristöystävällisyyden sekä halvemman käyttövoiman avulla. Sähköautojen suurin etu polttomoottoriautoihin nähden on niiden parempi hyötysuhde. Täyssähköautot eivät tuota hiilidioksidipäästöjä, joten ne ovat ympäristöystävällisempi vaihtoehto kuin polttomoottori- tai hybridautot. Työn tavoitteena on perehtyä täyssähköautojen rakenteeseen ja toimintaan. Työssä tarkastellaan erityisesti täyssähköauton voimalinjaa, akustoa ja lataamista. Työssä käydään läpi yleisesti täyssähköautojen voimalinjan osia ja autojen toimintaperiaatetta. Tärkeimpiä tarkasteltavia voimalinjan osia ovat sähkömoottori sekä akusto. Sähkömoottoreita tarkasteltaessa perehdytään eri sähkömoottorivaihtoehtoihin sekä yleisesti niiden toimintaperiaatteisiin. Täyssähköautoissa käytettäviä akkuja on useita erityyppisiä ja työssä käydäänkin läpi yleisimpien akkutyypin rakennetta sekä toimintaperiaatetta. Voimalinjan sekä voimalinjan osien tarkastelu jää yleiselle tasolle työn laajuuden vuoksi. Täyssähköautojen yleistyessä myös autoista tulevan jätteen määrä lisääntyy. Työssä käydään läpi yleisesti litiumakkujen kierrätystä ja siihen liittyviä haasteita. Työn lopussa tarkastellaan myös täyssähköauton valmistuksesta sekä kunnossapidosta aiheutuvia kustannuksia.

## 2 SÄHKÖAUTO

### 2.1 Historia

Sähköautojen historia ulottuu 1800-luvulle asti, jolloin Ranskalainen Gustave Trouvé rakensi maailman ensimmäisen sähköauton. Vuonna 1881 rakennetun auton virtalähteenä toimi lyijyakku ja voimanlähteenä 0,1 hevosvoiman tasavirtamoottori. Auton nopeus oli vain 15 km/h ja toimintasäde 16 km, minkä vuoksi auto ei herättänyt kiinnostusta mahdollisissa asiakkaisissa. Sähköautojen historian suurena käännekohtana voidaan pitää vuoden 1864 Paris-Rouen kilpailua, jossa ajettiin yhteensä 1135 km ajassa 48 h ja 53 min. Keskinopeus kilpailussa oli 23.3 km/h. Kilpailussa saavutettu nopeus sai suuren yleisön kiinnostumaan sähköautoista.

Ensimmäinen nelipyöräinen sähköauto rakennettiin vuonna 1888 saksalaisen Andreas Flocken toimesta. Vuonna 1900 sähköautot olivat eniten myyty ajoneuvo USA:n markkinoilla, mutta vuonna 1908 T-mallin Fordin julkaisun jälkeen sähköautojen kysyntä alkoi kuitenkin laskemaan. Polttomoottoriautojen kysyntää kasvatti sähköisen starttimoottorin keksiminen, koska starttimoottorin avulla polttomoottoriauton käyttö oli helppoa. Vuonna 1935 sähköautojen määrä putosi lähelle nollaa. Polttomoottoriautot olivat vieneet sähköautojen suosion edullisen polttoaineen avulla. (Ehsani ym. 2004, s.13; Denton 2016, s.6)

Modernien sähköautojen aikakauden voidaan sanoa alkaneen vuonna 1997, kun Toyota aloitti ensimmäisen hybridimallinsa Toyota Priuksen myymisen. Prius oli maailman ensimmäinen kaupallinen hybridiauto, jota myytiin ensimmäisenä myyntivuonna 18 000 kappaletta. Vuonna 2008 öljyn hinta nousi historian ennätyslukemiin ja vuonna 2010 julkaistiin täyssähköauto Nissan Leaf, joka voitti vuoden 2011 Euroopan vuoden auto - palkinnon. Tesla Motors julkaisi ensimmäisen litiumioniakulla varustetun sarjatuotantoauton Tesla Roadsterin vuonna 2008. Tesla Roadster oli myös ensimmäinen täyssähköauto, jonka toimintasäde ylitti 200 mailia. (Husain 2011, s. 18; Denton 2016, s.6)

## 2.2 Sähköautotyyppejä

Sähköautotyyppejä on useita erilaisia riippuen auton voimalinjan toteutuksesta. Sähköauto eli EV (Electric Vehicle) tarkoittaa yleisesti ajoneuvoa, jota voidaan ladata sähkövirralla ulkopuolisesta teholahteesta. Sähköauton käsite siis sisältää sekä täyssähköautot että ladattavat hybridautot. Hybridautoissa on voimanlähteenä sähkömoottorin lisäksi polttomoottori. Ladattavassa hybridautossa eli PHEV:ssä (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) voimanlähteenä on polttomoottorin lisäksi yksi tai useampi sähkömoottori ja autoa voidaan ladata ulkopuolisesta teholahteesta. Tässä työssä tarkastelun kohteena on täyssähköauto eli BEV (Battery Electric Vehicle), jossa voimanlähteenä on ainoastaan akusto ja sähkömoottori. (Korhonen 2019, s. 7-9; Husain 2011, s. 4)

### 3 TÄYSSÄHKÖAUTO

Täyssähköauto eli BEV on auto, jonka voimanlähteenä on polttomoottorin sijaan sähkömoottori ja virtalähteenä akusto. Täyssähköauton akkujen lataus tapahtuu ulkopuolisesta teholahteesta ja lataustapoja on useita. Täyssähköautojen voimanlähteenä käytettävät sähkömoottorit ovat joko tasa- tai vaihtovirralla toimivia. Täyssähköauton virtalähteenä käytettäviä ajoakustoja on monenlaisia, mutta moderneissa täyssähköautoissa akusto on yleensä litiumpohjainen. Akuston ja sähkömoottorin välillä on taajuusmuuttaja eli invertteri, joka muuttaa akustosta sähkömoottorille syötetyn sähkövirran taajuuden moottorille sopivaksi. Täyssähköautojen sähkömoottorista saatava vääntö on polttomoottoriautosta poiketen korkea moottorin koko kierrosalueella. Laajan vääntöalueen ansiosta täyssähköautot ovat yleensä automaattivaihteisia, eikä niissä tarvita polttomoottoriautossa käytettävää mekaanista kytkintä tai monivälityssuhteista vaihdelaatikkoa. Täyssähköautoissa on yleensä tasauspyörästä polttomoottoriauton tavoin joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta. Täyssähköautossa on polttomoottoriautosta eroavat jarrut, joiden avulla voidaan käyttää jarrutusenergiaa uudelleen. Jarrutusenergian talteen ottamista kutsutaan regeneratiiviseksi jarrutukseksi (Ehsani ym. 2005, s. 333). (Korhonen ym. 2019, s. 11, 21, 30)



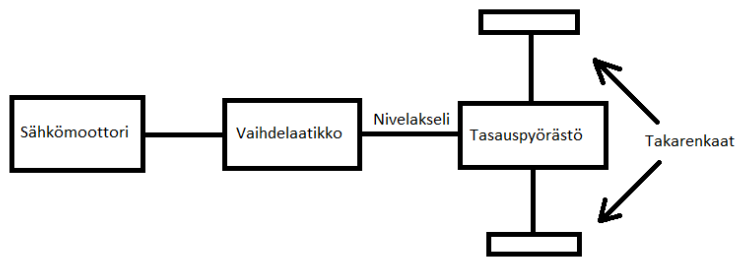
## 4 TÄYSSÄHKÖAUTON VOIMALINJA

Täyssähköauton voimalinja on mekaanisesti yksinkertaisempi kuin polttomoottoriauton voimalinja. Iqbal Husain kuvailee teoksessaan täyssähköauton voimalinjan koostuvan sähkömoottorista, tasauspyörästöstä, vaihdelaatikosta, pyöristä ja vetoakseleista. Voimansiirron komponentit voivat vaihdella riippuen auton vetotavasta. Etuvetoinen auto on yksinkertaisempi voimansiirrotaan kuin taka- tai nelivetoinen auto. Täyssähköautoissa voimalinjan rakennetta voidaan myös yksinkertaistaa erilaisten ratkaisujen avulla.

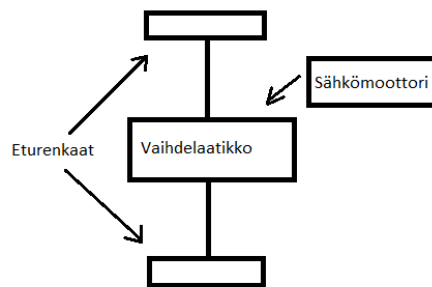
Polttomoottoriautosta poiketen täyssähköautossa ei tarvita kytkintä sähkömoottorin laajan nopeusalueen ansiosta. Sähköautojen vaihdelaatikon rakenne on yksinkertainen, koska niissä on yleensä vain yksi vaihde, joka riittää kaikilla moottorin kierrosnopeuksilla. Täyssähköautossa sähkövirta syötetään ajoakustosta sähkömoottorille invertterin kautta. Invertteri muuttaa ajoakustosta saatavan sähköön taajuuden sähkömoottorille sopivaksi. Sähkömoottorilta voima välitetään vaihdelaatikon kautta tasauspyörästölle tai nivelakselille, riippuen onko kyseessä taka- vai etuvetoinen auto. Vetoakseli siirtää voiman pyörännapoihin. (Husain 2011, s. 397-398; Korhonen ym. 2019, s. 11)

### 4.1 Etu- ja takaveto

Takavetoisen täyssähköauton perinteinen voimansiirtotapa muistuttaa takavetoisen polttomoottoriauton voimansiirtoa. Tässä voimansiirtotavassa sähkömoottori on sijoitettu auton etuosaan polttomoottoriauton moottorin tavoin. Nivelakseli välittää voiman tasauspyörästön kautta vetoakselille ja sitä kautta pyörännapoihin kuvassa 1 esitetyllä tavalla. (Husain 2011, s. 397-398; Korhonen ym. 2019, s. 11)



Kuva 1. Takaveto (mukaiillen Husain 2011)



Kuva 2. Etuveto (mukaiillen Husain 2011)

Täyssähköauton voimansiirto voidaan toteuttaa sijoittamalla moottori auton taka- tai etuakselille. Tässä voimansiirtotyypissä moottorin voima välitetään renkaille tasauspyörästön ja vetoakselin kautta. Moottorin ollessa etuakselilla puhutaan etuvedosta ja taka-akselilla takavedosta. Kuvassa 2 on esitetty etuvetoisen täyssähköauton voimansiirto, jossa sähkömoottori on suoraan yhteydessä etuakseliin vaihdelaatikon ja tasauspyörästön välityksellä. Sijoittamalla moottori taka- tai etuakselille ilman akseleita yhdistävää nivelakselia voidaan yksinkertaistaa auton rakennetta ja saada lisää tilaa auton muille rakenteille. (Jneid ym. 2020, s. 421)

## 4.2 Neliveto

Täyssähköauto voi olla myös nelivetoinen. Nelivetoinen voimansiirto voidaan toteuttaa joko taka- tai etuakselilla olevalla moottorilla tai niin, että molemmilla akseleilla on oma

moottorinsa. Jos neliveto toteutetaan yhdellä moottorilla, joka pyörittää molempia akseleita, joudutaan taka- ja etuakseli yhdistämään nivelakselilla. Sijoittamalla molemmille akseleille omat moottorit, saadaan auton rakenne pidettyä yksinkertaisempaan. Toteuttamalla täyssähköauton voimansiirto sijoittamalla moottori auton vetävien pyörien akseleille saadaan auton rakenteesta yksinkertaisempi, mutta tässä voimansiirtotavassa on myös huonoja puolia kuten tarve vaihteistolle ja tasauspyörästölle molemmilla akseleilla, mikä tekee auton rakenteesta monimutkaisemman sekä kasvattaa ajoneuvon painoa. (Jneid ym. 2020, s. 421)

### **4.3 Napamoottorilla toimiva voimansiirto**

Täyssähköauton voimansiirto voidaan toteuttaa myös sijoittamalla sähkömoottori suoraan pyörännapaan. Tämä voimansiirtotapa on yleisempää sähköisissä polkupyörissä, mutta se on kiinnittänyt tutkijoiden ja sähköautovalmistajien huomion. Etuvetoisessa autossa molempiin etupyöriin kiinnitetään omat sähkömoottorit ja takavetoisessa autossa takapyöriin. Neliveto on myös mahdollista toteuttaa niin, että jokaisella vetävällä pyörällä on oma moottorinsa. Sijoittamalla sähkömoottori suoraan pyörän napaan ilman tasauspyörästöä tai vaihteistoa, saadaan sähkömoottorin koko teho suoraan pyörään ilman mekaanisia häviöitä. Auton rakenne saadaan yksinkertaiseksi sijoittamalla sähkömoottorit kiinni suoraan pyörännapoihin, koska vetoakselia, tasauspyörästöä ja vaihteistoa ei tarvita. Tässä voimansiirtotavassa on myös huonoja puolia. Auton paino kasvaa, kun jokaisella renkaalla on oma moottorinsa ja voimansiirron hallinta on monimutkaisempaa, koska moottoreita on monta, eikä tasauspyörästöä ole. Auton rakenteen suunnittelu voi myös hankaloitua, koska auton rakenne täytyy suunnitella hyvin erilaiseksi, kuin perinteisen vetoakselilla varustetun auton. (Jneid ym. 2020, s. 422-423)

### **4.4 Sähköisen voimalinjan hyötysuhde**

Yksi tärkeimmistä täyssähköauton ominaisuuksista on sen hyötysuhde. Sähköisessä voimalinjassa tapahtuu huomattavasti vähemmän häviöitä kuin polttomoottoriauton voimalinjassa. Tyypillisesti polttomoottoriauton tankatun polttoaineen energiasta

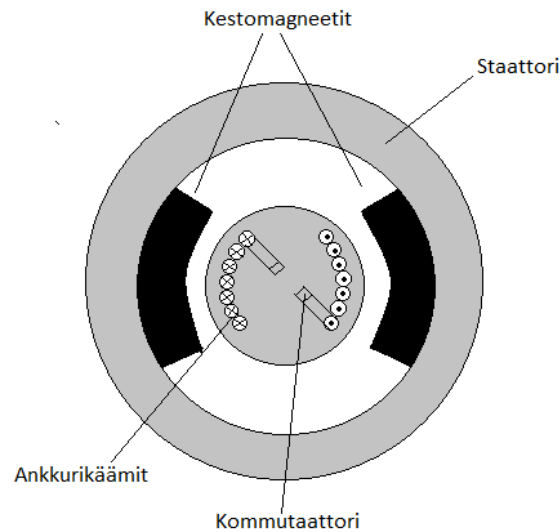
saadaan siirrettyä auton pyörille 20-25 %. Polttomoottoriautossa syntyy huomattavasti enemmän hukkalämpöä kuin täyssähköautossa, mikä heikentää polttomoottoriauton hyötysuhdetta merkittävästi. Täyssähköauton voimalinjan häviöt syntyvät ajoakussa, sähkömoottorissa, ohjaus- ja latauselektronikassa. Akustoa ladattaessa latauselektronikan hyötysuhde on 85-90 %. Täyssähköautoon ladatusta energiasta jopa 80 % saadaan siirrettyä voimansiirron välityksellä auton pyörille. Dieselmoottorin hyötysuhteen teoreettinen maksimiarvo on 45 %, kun taas kestopagneettimoottorin hyötysuhde voi olla jopa 95-97 %. Todellisuudessa polttomoottorien hyötysuhteet jäävät alle 25 prosentin. Täyssähköauton hyötysuhde latauspistokkeesta sähkömoottorin akselille on maksimissaan 77 % ja elinkaarensa lopussa olevalla ajoakulla noin 49 %. Sähköisen voimalinjan heikkoutena on sen heikentynyt hyötysuhde kylmissä olosuhteissa. Ajoakuston häviöt kasvavat kylmissä olosuhteissa eikä sähkömoottorin tuottama lämpö riitä polttomoottoriautosta poiketen auton matkustamon lämmittämiseen, joten lämpöenergia joudutaan ottamaan suoraan akustosta. Ohjaamon lämmittäminen siis lyhentää auton toimintasädetä lisääntyneen energiankulutuksen vuoksi ja auton energiatehokkuus kärsii. (Korhonen ym. 2019, s. 27-28)

## 5 SÄHKÖMOOTTORI

Täyssähköauton voimanlähteenä käytetään sähkömoottoria. Sähkömoottorin tehtävänä on muuttaa ajoakustolta saatu sähköenergia mekaaniseksi energiaksi, mikä pyörittää vetoakselia. Sähkömoottori voi toimia myös generaattorina, jolloin moottori muuttaa mekaanista energiaa sähköenergiaksi. Täyssähköautossa tätä ominaisuutta voidaan hyödyntää auton jarrutuksessa, jolloin jarrutuksessa syntyvällä mekaanisella energialla voidaan ladata auton akustoa. Sähkömoottori tuottaa polttomoottoriin verrattuna enemmän vääntöä laajemmalla kierrosalueella. Sähkömoottorissa syntyy myös vähemmän häviöitä kuin polttomoottorissa, minkä ansiosta auton hyötysuhde paranee. (Husain 2011)

### 5.1 Tasavirtamoottori

Tasavirtamoottorin eli DC-moottorin vääntömomentti saadaan aikaan muuttuvan sähkökentän avulla. Tasavirtamoottorin sisällä on roottori, jonka sähkökenttää muuttamalla saadaan aikaan vääntömomenttia tuottava roottorin pyörimisliike. Tasavirtamoottorin sisällä on kestopagneetit ja kommutaattori kuvan 4 esittämällä tavalla, joiden avulla roottorin muuttuva sähkökenttä saadaan aikaan. Kestomagneettien napaisuuden muutoksella roottorin sähkökenttä saadaan muuttumaan ja roottori pyörimään. Kommutaattorin avulla saadaan vaihdeltua sähkövirran kulkusuuntaa, mikä aiheuttaa magneettien napaisuuksien muuttumisen. Kommutaattori on tasavirtamoottorin sisällä oleva joko mekaanisesti tai sähköisesti toimiva laite, jonka tehtävänä on vaihtaa sähkövirran suuntaa. Mekaanisessa kommutaattorissa on sähkövirran suunnan kääntämiseen suunnitellut hiili- tai metalliharjat (Motiva 2020). Näistä kommutaattorien harjoista tulee nimitys harjallinen tasavirtamoottori. Harjattomassa tasavirtamoottorissa kommutaattorissa ei nimensä mukaisesti ole harjoja, vaan sähkövirran suuntaa vaihdetaan sähköisesti. Tasavirtamoottorin kotelon sisällä oleva staattori on sähkömoottorin paikallaan pysyvä osa, jonka sisällä on kestopagneetit tai sähkömagneetit sekä ferromagneettinen ydin. Tasavirtamoottorin sisällä on myös käämitykset, jotka ovat ankkuri- tai magneettityyppiset. Käämityksien tehtävänä on välittää sähkövirta tasavirtamoottorin roottorille. (Husain 2011, s. 207; Hayes & Goodarzi 2018, s. 178-179)



Kuva 3. Tasavirtamoottori (mukaillen Hayes & Goodarzi 2018)

Harjallisen tasavirtamoottorin hyvistä puolista kuten helposta kontrolloinnista tai vakiintuneesta valmistustekniikasta huolimatta se ei ole suosittu vaihtoehto moderneissa täyssähköautoissa. Harjallisen tasavirtamoottorin mekaanisen kommutaattorin harjojen kuluminen aiheuttaa lisääntyneitä kunnossapidon kustannuksia ja moottorin suuri koko heikentää sen teho-paino-suhdetta. Harjallinen tasavirtamoottori voi jopa tukkeutua kommutaattorin hiiliharjoista kitkan takia irtoavan pölyn seurauksena (Motiva 2020). (Husain 2011, s. 197, 208)

Harjattoman tasavirtamoottorin kommutaattorissa ei nimensä mukaisesti ole harjoja, vaan sähkövirran suuntaa vaihdetaan sähköisesti. Harjattomassa tasavirtamoottorissa on siis sähköinen kommutaattori. Harjaton tasavirtamoottori on käytännössä tasavirtamoottorin ja vaihtovirtamoottorin välimuoto, koska moottorin sähkövirran suunta vaihtelee. Koska moottorin virta on kuitenkin johdettava tasavirrasta ja moottorin nopeus- sekä vääntömomenttiominaisuudet ovat samanlaiset kuin harjallisessa tasavirtamoottorissa, moottoria kutsutaan tasavirtamoottoriksi. (Denton 2016, s. 94)

### 5.3 Induktiomoottori

Induktiomoottori on vaihtovirtamoottori eli AC-moottori. Induktiomoottori on yksi eniten käytetyistä sähkömoottorityypeistä moderneissa täyssähköautoissa. Nikola Teslan kehittämää induktiomoottoria käytetään esimerkiksi Tesla Model S:n voimanlähteenä. Vaihtovirralla toimivan induktiomoottorin toiminta perustuu nimensä mukaisesti sähkömagneettiseen induktioon. Induktiomoottorin sisällä on yleensä häkkikämmity roottori, jonka pyörimisliikkeen avulla vääntömomentti tuotetaan. Induktiomoottorin roottorissa on käämit, joihin syötetyn sähkövirran avulla roottori saadaan magnetoitumaan. Induktiomoottorin sisällä on staattori, jonka magneettikentän avulla roottori saadaan pyörimään. Tasavirtamoottorista poiketen induktiomoottorin staattorissa oleva magneettikenttä ei ole paikallaan vaan pyörii roottoriin nähden. Induktiomoottorin staattorissa on siis pyörivä magneettikenttä, jota magnetoitunut roottori lähtee seuraamaan ja alkaa näin ollen pyöriä. (Hayes & Goodarzi 2018, Hughes & Drury 2013, s. 141)

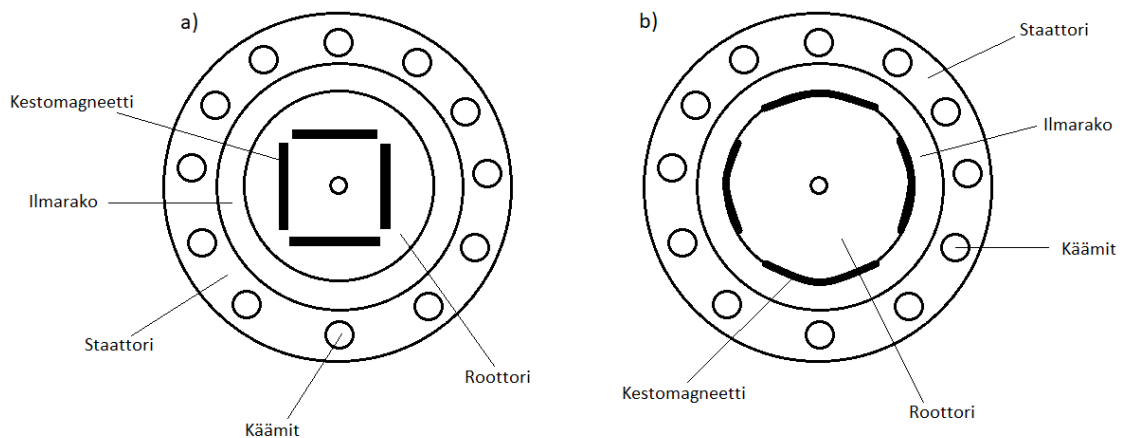
Induktiomoottorin kontrollointi on laskennallisesti haastavaa yksinkertaisempaan tasavirtamoottoriin verrattuna, mutta nykyaikaisten digitaalisten prosessoreiden avulla kontrollointi onnistuu helposti. Yli 50 vuoden kehityksen tuloksena matalahintainen ja kestävä induktiomoottori on suosittu vaihtoehto täyssähköauton moottoriksi. (Husain 2011, s. 197-198; Chan 2007, s. 713)

### 5.4 Kestomagneettimoottori

Kestomagneettimoottori on induktiomoottorin kilpailija, jonka rakenne on muuten sama kuin induktiomoottorin, mutta moottorin roottorissa on harvinaisista maametalleista valmistetut magneetit. Kestomagneettimoottorin toiminta perustuu staattorille syötettyyn vaihtovirtaan, joka saa kestopagneeteilla varustetun roottorin pyörimään ja synnyttämään vääntömomenttia moottorin akselille. Kestomagneettimoottoreita on kahta eri moottorityyppiä kuvassa neljä esitetyllä tavalla. Kuvan a-kohdassa on esitetty moottorityyppi, jossa kestopagneetit ovat kiinnitettyinä roottorin sisään. Tätä moottorityyppiä käytetään usein sähköautojen moottoreissa, koska tämä rakenne on

kestävämpi sähköautojen vaatimissa korkeissa moottorin pyörimisnopeuksissa. Kuvan b-kohdassa on esitetty toinen moottorityyppi, jossa kestmagneetit ovat kiinnitettyinä roottorin pintaan. Tätä moottorityyppiä kutsutaan pintamagneetikoneeksi. (Husain 2011, s. 198; Hayes & Goodarzi 2018, s. 166-167)

Kestomagneettimoottori on induktimoottorin suurin kilpailija, jonka rakenne eroaa vain hieman induktimoottorista. Moottoreiden staattorit ovat rakenteeltaan samantyyppiset ja molemmat moottorit toimivat vaihtovirralla. Kestomagneettimoottorin staattorin ja roottorin välissä on ilmarako. Täyssähköautossa sähkömoottorilta vaaditaan korkeaa suorituskykyä ja tehokkaan kestmagneettimoottorin ongelmaksi muodostuu moottorin rakenteen suuri koko. Suuren koon lisäksi roottorin sisään kiinnitettävät magneetit ovat kalliita ja nostavat moottorin valmistuskustannuksia. (Husain 2011, s. 198; Hayes & Goodarzi 2018, s. 166-167)



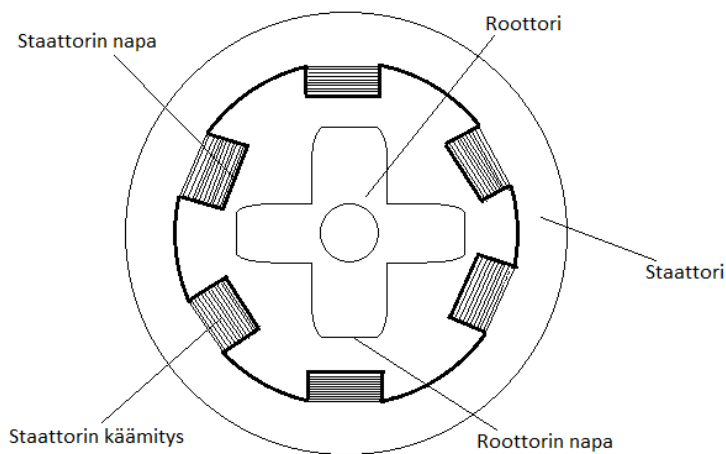
Kuva 4. Kestomagneettimoottori (mukaillen Husain 2011)

## 5.5 Synkronireluktanssimoottori

Synkronireluktanssimoottori eli SRM on sähkömoottorityyppi, jossa ei ole kestmagneetteja tai käämejä roottorissa. SRM on samantyyppinen moottori kuin harjaton tasavirtamoottori, mutta se on rakenteeltaan yksinkertaisempi ja halvempi valmistaa. Magneettien ja käämityksien puuttuminen mahdollistaa yksinkertaisen ja lujan rakenteen lisäksi moottorin parantuneet vääntömomenttiominaisuudet. SRM sopii



nopeus- ja vääntömomenttiominaisuuksiensa puolesta erittäin hyvin täyssähköauton voimanlähteeksi, sillä sen teho-nopeus-alue on laajin markkinoilla olevista tekniikoista. SRM:lla on myös korkea hyötysuhde laajalla nopeusalueella ja sitä on helppo kontrolloida. Vanhoissa synkronireluktanssimoottoreissa ongelmaksi muodostui sähkömoottorin akustinen melu. Uudemmissa sähkömoottoreissa kontrollointi on saatu tarkemmaksi ja sen avulla moottorin aiheuttamaa melua on onnistuttu vähentämään. (Husain 2011, s. 198; Denton 2016, s. 96)



Kuva 5. Synkronireluktanssimoottori (mukaiillen Ehsani ym. 2005)

## 6 REGENERATIIVINEN JARRUTUS

Yksi täyssähköauton merkittävimmistä ominaisuuksista on kyky kerätä jarrutusenergiaa ja käyttää se uudelleen. Regeneratiivisen jarrituksen avulla täyssähköauton hyötysuhdetta ja toimintasädetä saadaan parannettua. Toimintasäde on erittäin merkittävä tekijä täyssähköauton ominaisuuksissa, joten toimivalla energian uudelleenkäytöllä voidaan lisätä auton kiinnostavuutta kuluttajien silmissä. Regeneratiivinen jarrutus perustuu auton kiihdytyksessä syntyvän liike-energian uudelleen käyttöön. Auton kiihdyttäessä ajoneuvolle kertyy liike-energiaa, jonka määrä riippuu auton massasta sekä nopeudesta. Auton jarruttaessa liike-energia purkaantuu ja muuttuu jarrutusenergiaksi. (Husain 2011, s. 235-236; 338; Hayes & Goodarzi 2018, s. 54)

Täyssähköauton sähkömoottorissa on akseli, joka pyörittää auton renkaita. Auton kiihdyttäessä sähkömoottori luo positiivista vääntömomenttia akselille. Sähkömoottorilla on kyky synnyttää myös negatiivista vääntömomenttia. Negatiivista vääntömomenttia synnyttäessään sähkömoottori toimii generaattorin tavoin. Regeneratiivisessa jarrutuksessa sähkömoottori ohjataan siis toimimaan generaattorina ja synnyttämään negatiivista vääntömomenttia. Auton moottorilta kulkevan energiavirran suunta saadaan näin käännettyä toisinpäin, jolloin auton renkailta virtaa energiaa sähkömoottorille ja sähkömoottorilta akustoa lataavalle laitteelle uudelleen käytettäväksi. Moottoria pyörittävältä akselilta mekaaninen teho muutetaan sähkötehoksi, jonka avulla ajoakkuja saadaan ladattua. (Husain 2011, s. 235-236; 338; Hayes & Goodarzi 2018, s. 54)

Jarrutuksessa kerättävän energian suuruus riippuu auton voimanlähteenä olevan sähkömoottorin koosta. Suurempi sähkömoottori pystyy keräämään enemmän energiaa kuin pieni. Täyssähköautoon ei ole kuitenkaan käytännöllistä asentaa suurta moottoria, koska auton paino kasvaa ja näin ollen hyötysuhde voi heikentyä. Regeneratiivisesta jarrutuksesta huolimatta autossa on oltava lisäksi perinteiset mekaaniset jarrut. Autossa olevat järjestelmät säätelevät mekaanisille jarruille annettavaa jarrutusvoimaa riippuen ajoneuvon nopeudesta, saatavilla olevasta regeneratiivisesta jarrutusvoimasta sekä

kuljettajan jarrutusvoimasta. Jarrutusenergian uudelleenkäytöllä täyssähköauton toimintasädetä saadaan kasvatettua jopa 10-15 %. (Husain 2011, s. 235-236)

Regeneratiivisen jarrutuksen hallintaan on olemassa erilaisia strategioita. Yksi strategia on optimaalisen jarrutustuntuman strategia, jolla pyritään antamaan kuljettajalle mahdollisimman hyvä jarrutustuntuma sekä minimoimaan jarrutusmatka. Auton jarruissa on jarruohjain, joka säätelee jarrutuksessa käytettäviä jarrutusvoimia. Auton etujarrujen jarrutusvoima on jaettu kahteen eri voimaan, mekaaniseen kitkavoimaan ja regeneratiiviseen jarrutusvoimaan. Jarrujen toiminta riippuu vaaditusta jarrutusvoimasta. Jos vaadittu jarrutusvoima on pienempi kuin sähkömoottorin jarrutusvoiman maksimiarvo, jarrutukseen käytetään ainoastaan sähkömoottorin regeneratiivista jarrutusvoimaa. Vaaditun jarrutusvoiman ylittäessä sähkömoottorin regeneratiivisen jarrutusvoiman maksimiarvon, käytetään sähkömoottorin jarrutustehoa maksimaalisesti ja loppuosa tarvittavasta voimasta tuotetaan mekaanisella kitkavoimalla. Regeneratiivisen jarrutusvoiman teho on riippuvainen sähkömoottorin pyörimisnopeudesta, koska moottori tuottaa eri nopeuksilla eri määrän vääntömomenttia, minkä avulla moottori jarruttaa. (Ehsani ym. 2005, s. 338)

## 7 TÄYSSÄHKÖAUTON JÄÄHDYTYS

Täyssähköautossa on paljon sähköisiä komponentteja, joiden jäähdyttäminen on tärkeää auton toiminnan varmistamiseksi. Tehoelektroniikkakomponentit ovat herkempiä korkeille lämpötiloille mekaanisiin laitteisiin verrattuna. Tehoelektroniikan jäähdytyksen lisäksi myös sähkömoottori ja akusto vaativat jatkuvaa jäähdytystä, jotta ne voivat toimia vaaditulla tavalla. Ylimääräistä lämpöä poistetaan täyssähköauton kriittisistä komponenteista konvektion tai lämpösäteilyn avulla. Auton jäähdytettävät komponentit jaotellaan suunnitteluvaiheessa nestejäähdytteisiin ja ilmajäähdytteisiin komponentteihin jäähdytykseen vaikuttavien tekijöiden sekä komponentin sijainnin perusteella. (Husain 2011, s. 433-436)

Ajoakustojen jäähdytystavat vaihtelevat akustoissa käytettyjen akkuteknologioiden mukaan. NiMH-akut pärjäävät ilmajäähdytyksellä, mutta litiumioniakut vaativat nestejäähdytyksen. Sähkömoottorin ja akuston välissä oleva invertteri sekä muunnin vaativat myös nestejäähdytyksen. Lämpösäteilyn avulla energia saadaan kulkeutumaan sähkömagneettisilla aalloilla väliaineessa tai ilman. Konvektio tarkoittaa energian siirtymistä kahden pinnan välillä. Konvektiossa toinen pinta on kiinteää ainetta ja toinen nestettä tai kaasua. Pintojen lämpötilat ovat konvektiossa erisuuret. Konvektio voi olla luonnollista tai pakotettua konvektiota. (Husain 2011, s. 433-436)

### 7.1 Akkujen jäähdytys

Täyssähköauton akkujen jäähdytykseen on kehitelty useita erilaisia teknologioita. Akkuja voidaan jäähdyttää ilmajäähdytyksellä, dielektrisellä nestepohjaisella jäähdytyksellä, välillisellä nestejäähdytyksellä tai kylmäainepohjaisella jäähdytyksellä. Ilmajäähdytyksen avulla voidaan saada aikaan hinnaltaan ja kunnossapitokustannuksiltaan halpa jäähdytys, jonka rakenne on yksinkertainen. Ilmajäähdytyksessä jäähdyttämiseen käytetään joko matkustamon ilmaa tai ulkoilmaa. Ilmajäähdytyksen etuna on se, että akustoa ei tarvitse eristää jäähdytysaineelta, jonka ansiosta akuista voidaan tehdä myös helposti vaihdettavia ilman ongelmia nesteliittimien tai tiivisteiden kanssa. Ilmajäähdytyksen heikkoutena on jäähdytyksestä aiheutuva melu,

koska jäähdytykseen käytetään joko puhaltimia tai tuulettimia. Ilmajäähdytteisiä akkuja käytetään joissakin sarjatuotantoautoissa kuten Toyota Priuksessa ja Nissan Leafissa. (Huber & Kuhn 2015, s. 337-341)

Dielektrisessä nestepohjaisessa jäähdytyksessä akun solut tai koko akusto on varastoitu dielektriseen nesteeseen. Dielektrisen nesteen pakotettua tai luonnollista konvektiota käyttämällä akku saadaan jäähdytettyä turvallisesti. Tässä jäähdytystekniikassa kunnossapito on ilmajäähdytyksestä poiketen haastavaa ja nestejäähdytys lisää myös ajoneuvon painoa. (Huber & Kuhn 2015, s. 337-341)

Tesla Motorsin hyödyntämässä välillisessä nestejäähdytyksessä neste kiertää akuston ja jäähdytyselementin välillä niin, että neste ei joudu kosketukseen akun solujen kanssa. Akuston solut ovat epäsuorassa vuorovaikutuksessa lämpöä johtavan materiaalin kuten alumiinin kanssa. Jäähdytyksen tehokkuuden vaatimuksista ja ympäristön lämpötilasta riippuen jäähdytyselementti toimii höyrystimenä tai jäähdyttimenä. Jäähdytyselementti on välillisessä nestejäähdytyksessä integroitu kylmäainesykliin. Välillisen nestejäähdytyksen etuja ovat tehokkuus sekä mahdollisuus luoda jäähdytyslaitteistolle kompakti rakenne, mutta dielektrisen nestejäähdytyksen tavoin jäähdytysjärjestelmä on painava. Välillisessä jäähdytyksessä laitteiston rakenne on monimutkainen ja sen vuoksi herkkä vikaantumiselle. Järjestelmä vaatii myös enemmän kunnossapitoa ilmajäähdytykseen verrattuna. (Huber & Kuhn 2015, s. 337-341)

Kylmäainepohjaisella akuston jäähdytysjärjestelmällä pyritään välttämään välillisen nestejäähdytyksen heikkoudet. Jäähdytysjärjestelmä on saatu rakenteeltaan kevyemmäksi, integroimalla akusto olemassa olevaan kylmäainekierto. Suoraan höyrystinlevyyn kytketyn akuston yhteyteen ei enää tarvita erillistä jäähdytysnesteen kiertoa, lämmönvaihtimia tai jäähdyttämiä, joten rakenteesta saadaan yksinkertaisempi ja kevyempi. (Huber & Kuhn 2015, s. 337-341)

## 8 AKUSTO

Sähköautoissa käytetään monenlaisia akkuja, joissa käytetään erilaisia kemioita riippuen akun käyttötarkoituksesta. Täyssähköautojen akut pyritään optimoimaan niin, että auton toimintasäde olisi mahdollisimman laaja. Täyssähköautoissa käytettävät akkuteknologiat ovat vaihdelleet vuosien saatossa ja eri autovalmistajat ovat kehittäneet omia ratkaisujaan autojensa virtalähteiksi. Vuonna 1996 General Motors toi markkinoille EV1 täyssähköauton, jossa virtalähteenä toimi lyijyakku. Lyijyakut olivat yleisin akkutyyppejä täyssähköautoissa 1990-luvun alkupuolella, mutta 1990-luvun puolivälissä nikkelimetallihydridiakun eli NiMH-akun todettiin omaavan lyijyakkua paremmat ominaisuudet. Lyijyakku on painava ja lyhytikäinen vaihtoehto täyssähköauton akuksi ja General Motors julkaisikin vuonna 1999 NiMH-akulla varustetun EV1:n uuden sukupolven. NiMH-akulla on huomattavasti parempi kyky varastoida virtaa sekä pidempi elinkaari kuin lyijyakulla. (Hayes & Goodarzi 2018, s.70; Pistoia 2010, s. 22-23)

NiMH-akun ollessa suosituin vaihtoehto, oltiin litiumioniakkuja vasta kehittämässä. Litiumioniteknologia nähtiin kalliina ratkaisuna ja akkujen turvallisuustekijät syttymisen suhteen herättivät huolta. Vuonna 2008 Tesla Motors julkaisi Tesla Roadsterin, jonka virtalähteenä on litiumioniakusto. NiMH-akut olivat kuitenkin yleisin akkuteknologia vielä vuonna 2010. Matkapuhelimien ja kannettavien tietokoneiden virtalähteenä tutuksi tulleita litiumioniakkuja alettiin alun perin käyttämään elektronisten laitteiden virtalähteenä niiden pitkän eliniän ja suuren kapasiteetin vuoksi. Tesla Roadsterin julkaisun jälkeen litiumioniakut ovat yleistyneet täyssähköautojen virtalähteenä ja nykyään litiumpohjaiset akut ovat yleisin akkutyyppejä täyssähköautoissa. (Hayes & Goodarzi 2018, s.70; Pistoia 2010, s. 22-23)

### 8.1 Litiumioniakku

Litiumioniakku koostuu rakenteeltaan anodista, katodista ja elektrolyytistä. Negatiivinen elektrodi eli anodi on grafiittirakenteinen ja positiivinen elektrodi eli katodi kerrosrakenteinen metallioksidi. Anodi ja katodi täytyy pitää erillään, jotta ne eivät pääse koskemaan toisiinsa. Anodin ja katodin erillään pitämiseksi, litiumioniakun rakenne on

suunniteltu niin, että niiden välissä on elektrolyytti. Elektrolyytti estää anodin ja katodin kosketuksen toisiinsa, päästäen kuitenkin litiumionit kulkemaan elektrolyytin läpi. Litiumioniakun toiminta perustuu litiumionien liikkumiseen anodin ja katodin välillä. Latauksen aikana litiumionit liikkuvat positiiviselta elektrodilta negatiiviselle elektrodille elektrolyytin läpi ja akun purkauksen aikana päinvastoin. Litiumioniakut sopivat hyvin täyssähköautojen vaatimiin olosuhteisiin hyvän lämmönsietokyvyn, suuren ominaisenergian sekä -tehon ansiosta. Kylmissä olosuhteissa käytettävissä autoissa ongelmia voi kuitenkin tuottaa akkujen hidastunut latausnopeus, mikä johtuu litiumionien hidastuneesta liikkeestä alhaisissa lämpötiloissa. Litiumioniteknologiaa pidetään tällä hetkellä turvallisimpana akkuteknologiana ja akut voidaan myös kierrättää. Akkujen toimintakyky säilyy vähintään 10 vuotta, joten ne ovat pitkäikäinen vaihtoehto täyssähköauton akustoksi (Perner & Vetter 2015, s. 173). Litiumioniakkujen energiasisältö suhteessa massaansa on markkinoiden paras, minkä vuoksi ne soveltuvat erittäin hyvin täyssähköautojen energianlähteeksi (Korhonen 2019, s. 21). Ominaisuuksiensa ansiosta litiumioniakku on erittäin hyvä valinta täyssähköauton tai ladattavan hybridin energianlähteeksi. (Ehsani ym. 2005, s.314; Denton 2016, s. 82-83)

## 8.2 Litiumpolymeeriakku

Litiumpolymeeriakku koostuu litiumioniakun tavoin negatiivisesta ja positiivisesta elektrodista sekä elektrolyytistä. Akussa negatiivinen elektrodi on tehty litiumfoliosta ja positiivinen elektrodi vanadiinioksidista. Akussa oleva elektrolyytti on valmistettu polymeeristä. Litiumpolymeeriakun toiminta perustuu litiumioniakun tavoin litiumionien liikkumiseen anodin ja katodin välillä. Litiumpolymeeriakun negatiivisessa elektrodissa muodostuu litiumioneja, jotka mahdollistavat akun lataamisen ja purkamisen. (Ehsani ym. 2005, s. 313)

Litiumpolymeeriakun purkautuessa negatiivisessa elektrodissa syntyneet litiumionit kulkeutuvat elektrolyytin läpi positiivisen elektrodin kiderakenteeseen. Akun latautuessa elektrolyytit kulkevat vastakkaiseen suuntaan eli katodilta anodille. Litiumpolymeeriakun elektrodeissa käytetään kerrosrakenteista siirtymämetallien interlokaatio-oksidia sekä litiummetallia. Akun latauksen tai purkauksen aikana

litiumionit lisätään tai poistetaan interlokaatio-oksidista. Litiumioniakun tavoin litiumpolymeeriakun suorituskyky on heikentynyt kylmissä olosuhteissa. Akun etuna on sen turvallisuus sekä joustavat suunnittelumahdollisuudet polymeerielektrolyytin ansiosta. (Ehsani ym. 2005, s. 313)

### 8.3 Nikkelimetallihydridiakku

Nikkelimetallihydridiakut eli NiMH-akut eivät ole uusi keksintö, sillä ne ovat olleet markkinoilla jo vuodesta 1992 lähtien (Ehsani ym. 2005, s. 312). NiMH-akkujen toiminta perustuu alkaliakuille tyypilliseen tapaan kemialliseen reaktioon metallin ja hapen välillä. Sähköenergiaa saadaan tuotettua, kun metalli ja happi synnyttävät kemiallisen reaktion elektrolyyttiväliaineessa. NiMH-akussa on nikkelioksidista valmistettu positiivinen elektrodi ja metallihydridistä koostuva negatiivinen elektrodi. Negatiivisessa elektrodissa olevaan metallihydridiin on varastoituneena vetyatomeja. Metallihydridiyhdisteet syntyvät, kun metalliseosten hiukkaset reagoivat vedyn kanssa ja absorboivat suuria määriä kaasua, jonka seurauksena muodostuu metallihydridiyhdisteitä. Tämä reaktio vaatii sopivan paineen sekä lämpötilan. Metallihydrideillä on kyky absorboida ja vapauttaa vetyä useita kertoja ilman heikentymistä. (Husain 2011, s. 108-109)

NiMH-akut ovat litiumioniakkuja halvempia valmistaa ja ne ovat ominaisuuksiltaan tehokkaita. Erityisesti Toyota on hyödyntänyt NiMH-akkuja omissa automalleissaan kuten Rav4-EV:ssä. NiMH-akkujen energiatiheys ei ole yhtä hyvä kuin litiumioniakuissa, ja ne ovat myös painavampia kuin litiumioniakut, joten ne eivät ole yhtä hyvä vaihtoehto täyssähköauton akuksi ajoneuvon kasvaneen painon vuoksi. NiMH-akuissa ei ole suurta riskiä yllätauksen aiheuttamalle vauriolle, mikä lisää niiden luotettavuutta. NiMH-akut ovat yleisempiä akkuja ei-ladattavissa hybrideissä ja ne ovatkin sopiva vaihtoehto kohtuuhintaisten hybridien energianlähteeksi halvan hinnan, kestävyuden ja luotettavuutensa ansiosta. (Denton 2016, s. 80-81; Korhonen ym. 2019, s. 21)



## 8.4 Lyijyakku

Vuonna 1859 ranskalaisen fyysikko Gaston Plentén kehittämä lyijyakku on ollut markkinoilla menestyksekkäästi jo yli sadan vuoden ajan (Denton 2016, s. 78). Lyijyakut ovat suosittu akkutyyppejä autoteollisuudessa sekä niiden teknologia on hyvin kehittynyttä. Lyijyakussa on kaksi lyijylevyä elektrodeina ja levyjen välissä on rikkihappoa elektrolyyttinä. Lyijyakussa anodilevy on valmistettu kokonaan lyijystä ja katodilevy on päällystetty lyijydioksidilla (Hayes & Goodarzi 2018, s. 74). Lyijyakut ovat NiMH-akkujen tavoin valmistuskustannuksiltaan halpoja ja rakenteeltaan luotettavia. Lyijyakkujen luotettavuus sekä turvallisuusominaisuudet sopivat hyvin henkilöauton tarpeisiin, mutta lyijyakkujen lyhyt elinkaari ja heikko kyky sietää kylmää ovat esteenä niiden käytölle täyssähköautoissa. Lyijyakut sopivatkin ominaisuuksiltaan paremmin esimerkiksi hybridautojen energianlähteeksi akkujen korkean tehon ansiosta ja matalan hinnan ansiosta. (Husain 2011, s. 115; Ehsani ym. 2005, s. 310)

## 9 AKKUJEN LATAAMINEN

Täyssähköautojen akkujen lataus on tärkeä osa auton toimintaa. Akkuja voidaan ladata useilla tavoilla riippuen autosta ja latauspisteestä. Täyssähköauton omistajalle tärkeässä roolissa ovat latauksen nopeus sekä latauspisteiden saatavuus. Sähköautojen latauspisteitä löytyy sekä julkiselta että yksityiseltä sektorilta. Sähköauton akkuja voidaan ladata myös kotitalouksien pistokkeista. Täyssähköautoa voidaan ladata tasa- tai vaihtovirralla riippuen auton latauslaitteista. Lataamiseen on myös kehitetty langattomia vaihtoehtoja, mutta ne eivät ole vielä standardisoituja tai valmiita laajempaan tuotantoon niiden korkean hinnan ja monimutkaisuuden vuoksi. (Korhonen ym. 2019, s. 30; Denton 2016, s. 109-110)

### 9.1 Lataus vaihtovirralla

Vaihtovirralla lataaminen on yleisin täyssähköautojen lataustapa. Vaihtovirtalataus on standardisoitu ja sitä voidaan hyödyntää sekä kotitalouksissa että latausasemilla. AC-latausasema on yleensä latauspiste, jossa on muovista tai metallista valmistettu latausrasia, joka on kytketty ryhmäkeskukseen. Latausasemalla voi olla yksi tai useampi AC-latauslaite, joka on kiinnitetty seinään tai lataustolppaan. Latausrasioissa voi olla kiinteä spiraalin muotoinen tai suora latauskaapeli ja latauspistoliittimet. Kotitalouksien pistorasioista ladattaessa lataus on hidasta ja kestää useita tunteja. Latausasemilla voidaan kuitenkin ladata jopa 43,5 kW:n teholla, mikä on huomattavasti nopeampaa kuin tavallisesta pistorasiasta ladattaessa. Itse latauslaite on vaihtovirtalatauksessa asennettu sähköautoon eikä latausasemiin näin ollen tarvita omia latauslaitteita. Latausasemien hintaa saadaan vähennettyä huomattavasti eikä latausasemien rakentaminen vaadi suuria investointeja. (Denton 2016, s. 109-110; Korhonen ym. 2019, s. 44-45)

### 9.2 Lataus tasavirralla

Tasavirralla lataaminen on tehokas tapa ladata täyssähköautoa. DC-latausasemat voivat käyttää jopa 920 V jännitetasoa. Latausrasioiden pienestä tehosta huolimatta DC-latausrasioilla saavutettu latausaika voi olla jopa 30 minuuttia. DC-latausliitäntää ei ole

vaihtovirtalatauksesta poiketen standardisoitu. DC-latausasemat vaativat sopivan latausverkoston, jotta korkealla teholla lataaminen onnistuu. DC-latausasemat ovat kalliimpia investointeja kuin AC-latausasemat, koska tasavirralla ladattaessa latauslaite ei sijaitse vaihtovirtalatauksen tavoin sähköautossa vaan latausasemassa. Kun latausasemaan joudutaan lisäämään myös latauslaite, aseman hinta kasvaa ja investoinneista tulee kalliita. DC-latausta tukevissa autoissa on myös lisäliitäntä, mistä autoa voidaan ladata vaihtovirralla, jotta autoa on mahdollista ladata myös kotitalouksien pistokkeista sekä yleisemmillä AC-latausasemilla. Vuonna 2018 yleistynyt suurteholataus voi ladata täyssähköautoa hetkellisesti jopa 500 kW:n teholla. Suurteholatauksessa käytetään nestejäähdytteisiä latauspistoliittimiä ja latauskaapeleita, minkä ansiosta voidaan saavuttaa korkea latausteho. (Denton 2016, s. 109-110; Korhonen ym. 2019, s. 49)

### **9.3 Langaton virransiirto**

Langaton virransiirto eli WPT (Wireless Power Transfer) on täyssähköauton lataustapa, jossa ei tarvita latauskaapeleita. Langattoman virransiirron avulla ajoneuvon toimintasädettä pystytään kasvattamaan auton ollessa pysäköitynä tai jopa ajon aikana. Latauksessa hyödynnetään sähkömagneettista induktiota, jossa latausalustassa oleva primaarikäämi ja auton sisään rakennettu sekundaarikäämi ovat vuorovaikutuksessa. Kun latausalustan liitin on rinnakkain ajoneuvon tuloliittimen kanssa, voidaan sähkötehoa siirtää laturista autoon standardi muuntajaa vastaavalla sähkön eristyksellä. Täyssähköauton lataukseen käytettävät langattoman virransiirron tavat voidaan jakaa kolmeen osaan, staattiseen virransiirtoon, dynaamiseen virransiirtoon ja niiden välimuotoon. (Denton 2016, s. 116-117)

Staattisessa langattomassa virransiirrossa auto latautuu, kun se pysäköidään latauspaikalle lataavan induktiolevyn päälle. Auton pysähtyessä lataus käynnistyy automaattisesti eikä kuljettajaa tarvita lataustapahtuman aikana. Staattinen WPT toimii hankalissakin olosuhteissa, eikä vesi, jää tai korkea lämpötila haittaa lataustapahtumaa. Lataava induktiolevy on yleensä sijoitettu betonin sisään tai asfaltin alle. Lataus toimii

kaikille ajoneuvoille, joissa on induktiolatausta tukevat laitteet. (Denton 2016, s. 118-119; Hayes & Goodarzi 2018, s. 426-427)

Dynaamisessa langattomassa virransiirrossa autoa voidaan ladata ajon aikana, kuitenkin vain ajoneuvon rajoitetulla nopeudella. Lataamisen toimintaperiaate on sama kuin staattisessa langattomassa virransiirrossa, mutta latauksen kontrollointi on haasteellisempaa. Induktiolla toimivat latauslaitteet voivat olla sijoitettuna tien alle esimerkiksi niin, että yksi kaista on autojen lataamista varten. Ongelmaksi muodostuu auton kohdistaminen latauslaitteiston päälle sekä latauksen ajoitus ajoneuvon liikuessa latauslaitteiston päältä. Dynaamista langatonta virransiirtoa kehitetään ja latauksen kontrollointi voisi toimia auton mukautuvan vakionopeussäätimen sekä kaistavahdin avulla. Dynaamisen WPT:n laajempi käyttöönotto edellyttää kansainvälisiä standardeja ja niiden noudattamista ihmisten turvallisuuden takaamiseksi. (Denton 2016, s. 121-122)

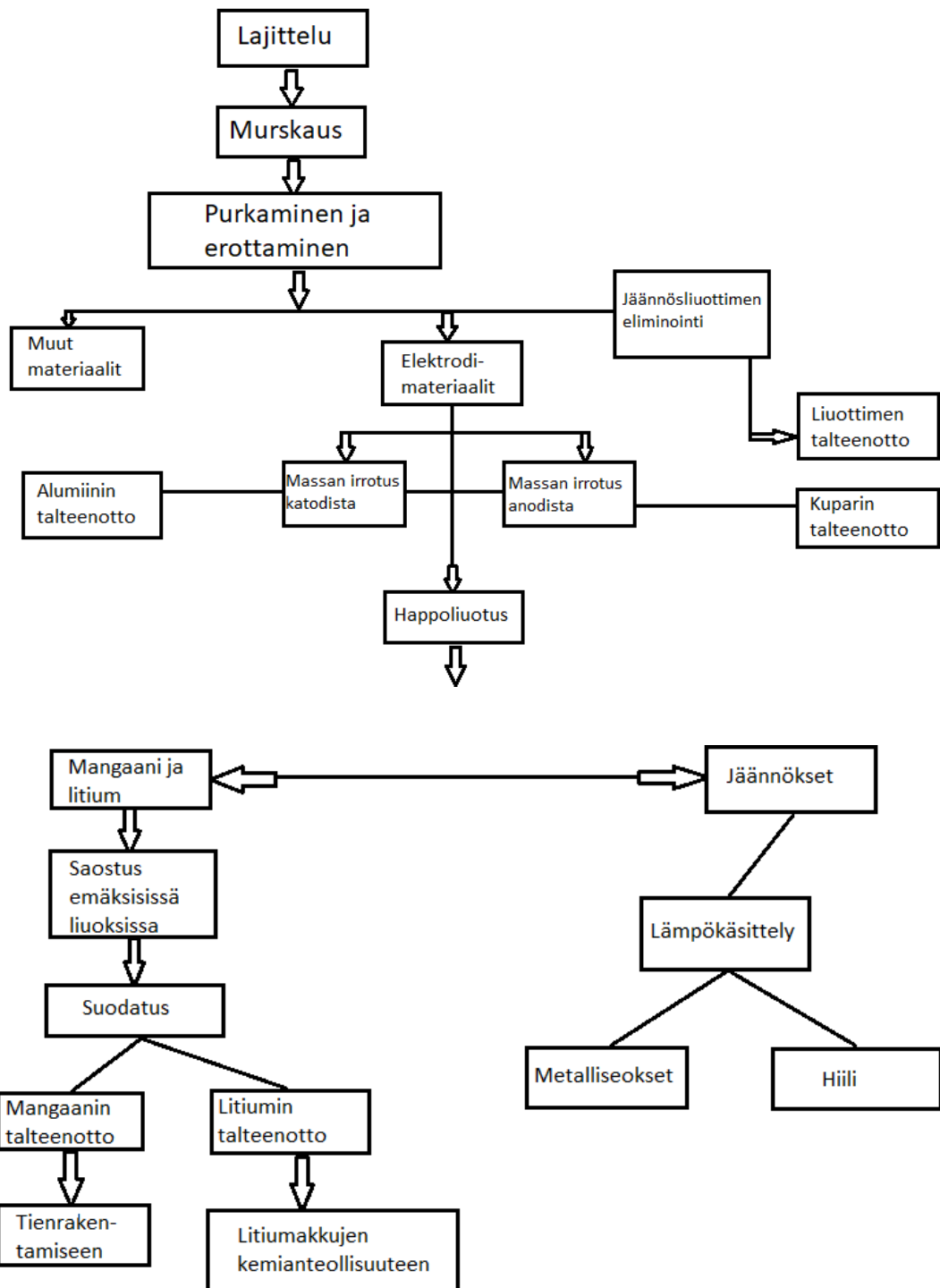
## 10 LITIUMIONIAKKUJEN KIERRÄTYS

Täyssähköautojen akuissa käytetään materiaaleja, joita voidaan käyttää uudelleen ja kierrätyksen avulla säästää luonnonvaroja. Monet akuissa käytettävät materiaalit ovat ympäristölle haitallisia. Täyssähköautojen virtalähteinä käytetään yhä enemmän litiumioniakkuja, joiden ominaisuudet ovat erittäin hyvät. Litiumia on maapallolla vain rajallisesti ja litiumioniakuissa käytettävät kemialliset aineet ovat haitallisia ihmisille sekä ympäristölle. Ympäristöhaittoja ja litiumvarojen vähenemistä voidaan ehkäistä akkujen kierrätyksellä. (Scrosati ym. 2015, s. 503-506; Perner & Vetter 2015, s. 182-183)

Litiumioniakkujen kierrätykseen liittyy ongelmia. Yksi ongelmista on akkujen syttymisherkkyys, mikä voi johtaa jopa räjähdykseen. Kierrätyslaitokselle saapuessaan akuissa voi olla vaurioita tai niissä voi olla jäljellä vielä virtaa, minkä seurauksena voi olla räjähdys tai tulipalo. Räjähdys voi olla riittävän suuri aiheuttamaan suurta vahinkoa ja akuissa käytetyt kemialliset aineet voivat olla vaaraksi sekä ihmisille että ympäristölle. Litiumakkujen kierrätys on jatkuvassa kehityksessä ja uusia akkukemioita kehitellään jatkuvasti. Vakiintuneen akkutekniikan puute vaikeuttaa akkujen kierrätystä, sillä kierrätysprosessi voi muuttua akkukemikaalien vaihtuessa. Täyssähköauton akkujen saavuttaessa elinkaarensa pään, eivät akut ole vielä käyttökelpottomia. Akuissa voi olla jäljellä jopa 80 % niiden alkuperäisestä energian varastointikyvystä, joten akkuja voitaisiin käyttää vielä uusissa sovellutuksissa ennen kierrätystä. (Scrosati ym. 2015, s. 503-506; Perner & Vetter 2015, s. 182-183)

Litiumioniakuissa on useita kierrätyskelpoisia materiaaleja kuten litiumia, kuparia, alumiinia, nikkeliä ja kobolttia. Litiumioniakuissa olevat kultaa ja piitä sisältävät piirilevyt voidaan myös kierrättää, jos akku aluksi puretaan. Litiumakkujen kierrätysprosessi etenee kuvassa 6 esitetyllä tavalla. Akkujen saapuessa kierrätyslaitokselle ne täytyy ensiksi lajitella, koska akkuja voi olla erityyppisiä. Akkujen lajittelu suoritetaan yleensä manuaalisesti, mutta automaattisia lajittelulinjastoja on kehitetty ja otettu käyttöön. Lajittelun jälkeen akut murskataan, puretaan ja erotellaan toisistaan. Akut puretaan polttamalla akuissa olevat eristeet ja muoviosat. Akut yleensä jäähdytetään nestemäisellä tyypellä ennen kuin niistä aletaan poistamaan litiumia tai muita

akun osia. Ylimääräiset paperijäämät, pöly ja raudan jäänteet pyritään poistamaan happoliuotuksen avulla. Kuvassa 6 esitetyssä kaaviossa lämpökäsittelyllä tarkoitetaan uunissa korkeassa lämpötilassa suoritettavaa hiilen ja orgaanisten yhdisteiden poistamista. (Scrosati ym. 2015, s. 509-511; Perner & Vetter 2015, s. 183)



Kuva 6. Litiumakkujen kierrätys (mukaillen Scrosati & Sun 2015)

## 11 TÄYSSÄHKÖAUTON KUSTANNUKSET

Täyssähköauton valmistuskustannukset eroavat polttomoottoriauton kustannuksista auton rakenteen vuoksi. Täyssähköautot rakennetaan usein samanlaiselle alustalle kuin polttomoottoriautot, mutta auton sisällä oleva tekniikka on hyvin erilaista. Täyssähköauton voimalinjassa on vähemmän mekaanisia osia, mutta enemmän elektroniikkaa kuin polttomoottoriauton voimalinjassa. Täyssähköauton kallein ja suurin osa on akusto, jonka kustannuksia on tutkittu laajasti jo 1990-luvulta lähtien. Akkujen latausjärjestelmät tuovat myös kustannuksia auton valmistamiseen. Latauslaitteistot ovat yleensä sisällytetty auton rakenteisiin tai jopa integroitu moottorin ohjausyksikköön. Moottorinohjauksen hintaa on saatu kehityksen tuloksena halvemmaksi, yksinkertaisempien ja paremmin integroitujen osien ansiosta. (Delucchi & Lipman 2010, s. 24-26)

Auton elinkaarikustannukset riippuvat myös kustannuksista, jotka syntyvät auton hankinnan jälkeen. Auton kunnossapito aiheuttaa kustannuksia auton ollessa käytössä. Täyssähköauto ei vaadi yhtä paljon kunnossapitoa kuin polttomoottoriauto, joten se on huoltokustannuksiltaan halvempi vaihtoehto. Sähkömoottori ei vaadi polttomoottorin määräaikaishuoltoihin liittyviä öljynvaihtoja, mutta täyssähköauton akustot vaativat säännöllisiä kunnan tarkistuksia. Akustot ovat täyssähköauton kallein ja suurin osa, joten akustojen kunnossapitokustannukset ovat hyvin kriittinen osa auton elinkaarikustannuksia. (Delucchi & Lipman 2010, s. 27)



## 12 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli perehtyä täyssähköauton rakenteeseen ja toimintaan. Laajan aiheen vuoksi työn sisältö rajautui täyssähköautojen tärkeimpien rakenteiden sekä toiminnallisten ominaisuuksien tarkasteluun. Työssä käydään aluksi läpi perustietoa sähköautojen historiasta sekä toimintaperiaatteesta. Perustietojen jälkeen käydään läpi sähköisen voimalinjan eri toteutustapoja ja hyötysuhdetta, jonka jälkeen perehdytään tarkemmin voimalinjan osiin. Voimalinjan osista ensimmäisenä tarkastellaan eri sähkömoottorityyppien rakenteita sekä toimintaperiaatteita. Sähkömoottorien jälkeen käydään läpi täyssähköauton energiaa talteen ottavaa jarrutusta, jäähdytystä, akustojen rakennetta, toimintaa sekä lataamista. Työn lopuksi käsitellään täyssähköauton elinkaarta, kustannuksia ja litiumioniakkujen kierrätystä.

Täyssähköautoilla on pitkä historia, joten myös autojen rakenteet ovat muuttuneet vuosien saatossa ja uusia innovaatioita kehitellään jatkuvasti lisää. Sähkömoottoreita on useita erilaisia ja niiden toimintaperiaatteissa ja rakenteissa on eroja. Työssä huomataan, että sähkömoottorin rakenne on mekaanisesti melko yksinkertainen. Sähkömoottoreiden tavoin myös täyssähköautojen akustot kehittyvät jatkuvasti ja akkukemioita on useita erilaisia. Akkujen latausta kehitetään koko ajan nopeammaksi ja myös uusia lataustapoja kehitetään perinteisen langallisen latauksen lisäksi. Akkujen kehittyminen on hyvä asia, koska paremmilla akuilla saavutetaan parempi suorituskyky sekä toimintamatka. Akkujen jatkuvan kehittymisen ongelmana on kuitenkin akkujen kierrätyksen haastavuus akkukemioiden vaihdellessa. Työn tuloksia voitaisiin laajentaa perehtymällä tarkemmin täyssähköauton tärkeimpien osien toimintaan sekä toiminnallisiin ominaisuuksiin liittyvään fysiikkaan.

## LÄHDELUETTELO

Chan, C C., 2007. The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.pc124152.oulu.fi:9443/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4168013> [viitattu 25.2.2021]

Delucchi, M A. & Lipman, T E., 2010. Lifetime cost of battery, fuel-cell, and plug-in hybrid electric vehicles. Teoksessa: Pistoia G. (toim.) Electric and hybrid vehicles: power sources, models, sustainability, infrastructure and the market. Oxford: Elsevier, S. 20-58. 978-0-444-53565-8

Denton T., 2016. Electric and hybrid vehicles. Abingdon, Oxon: Routledge, 197 s. 978-ISBN 1-138-84237-3

Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S E. & Emadi, A., 2005. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles : fundamentals, theory, and design. Boca Raton (FL): CRC Press, 395 s. ISBN 0-8493-3154-4

Hayes, J G. & Goodarzi, G A., 2018. Electric powertrain. Hoboken, N.J. : Wiley, 530 s. ISBN 978-1-119-06364-3

Huber, C. & Kuhn, R., 2015. Thermal management of batteries for electric vehicles. Teoksessa: Scrosati B. (toim.) Advances in battery technologies for electric vehicles. Amsterdam: Woodhead Publishing, S. 327-358. ISBN 9781782423775

Hughes, A. & Drury, B., 2013. Electric motors and drives: fundamentals, types and applications. 4 painos. Amsterdam: Newnes, 445 s. ISBN 978-0-0809-8332-5

Husain, I., 2011. Electric and hybrid vehicles: design fundamentals. 2 painos. Boca Raton (FL): CRC Press, 486 s. ISBN 978-1-4398-9497-2

Jneid, M S., Harth, P. & Ficzer, P., 2020. In-wheel-motor electric vehicles and their Associated drivetrains [verkkodokumentti] Saatavissa: <http://web.a.ebscohost.com.pc124152.oulu.fi:8080/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=1&sid=4c6a0112-2d8c-4d74-97f2-c72ddd9ee45b%40sessionmgr4007> [viitattu 25.2.2021]

Korhonen, E., Linja-aho, V., Mäkinen, J. & Orrberg, M., 2019. Sähköautot ja latausjärjestelmät. 2 painos. Espoo: Sähköinfo Oy, 110 s. ISBN 978-952-231-269-3

Motiva, 2020. Sähkömoottorityypit [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava\\_liikenne\\_ja\\_liikkuminen/nain\\_liikut\\_viisaasti/v alitse\\_auto\\_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/sahkoautot/sahkomoottorityypit](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/v alitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/sahkoautot/sahkomoottorityypit) [viitattu 25.2.2021]

Perner, A. & Vetter, J., 2015. Lithium-ion batteries for hybrid electric vehicles and battery electric vehicles. Teoksessa: Scrosati B. (toim.) Advances in battery technologies for electric vehicles. Amsterdam: Woodhead Publishing, S. 327-358. ISBN 9781782423775

Pistoia, G., 2010. Electric and hybrid vehicles: power sources, models, sustainability, infrastructure and the market. Oxford: Elsevier, 652 s. ISBN 978-0-444-53565-8

Scrosati, B., Garche, J. & Sun, Y K., 2015. Recycling lithium batteries. Teoksessa: Scrosati B. (toim.) Advances in battery technologies for electric vehicles. Amsterdam: Woodhead Publishing, S. 327-358. ISBN 9781782423775