

Mikko Lindgren

Hybridi- ja sähköautojen moottorit

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

3.6.2020

Tekijä Otsikko	Mikko Lindgren Hybridi- ja sähköautojen moottorit
Sivumäärä Aika	66 sivua 3.6.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine	Ajoneuvosähkötekniikka
Ohjaaja	Lehtori Vesa Linja-aho
<p>Tämän insinööriyön tavoitteena oli selvittää, minkä tyyppisiä, kokoisia ja tehoisia sähkömoottoreita käytetään nykyaikaisissa sähkö- ja hybridautoissa. Lisäksi haluttiin selvittää, miksi auton valmistajat ovat päätyneet juuri tiettyntyyppisiin moottoreihin ja mitä eroja niillä on toisiinsa nähden. Tavoitteena oli myös tehdä selostus siitä, kuinka sähkömoottori valmistetaan. Insinööriyö tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoululle.</p> <p>Opinnäytetyö tehtiin kirjallisuustutkimuksena pääosin internetlähteistä, mutta niitä tukemaan käytettiin vuoden 2015 jälkeen julkaistua kirjallisuutta sekä alan yritysten julkaisemia lehdistötiedotteita.</p> <p>Työssä on pyritty esittelemään lyhyesti yleisimpiä henkilöautoissa olevia sähkömoottorityyppejä. Pää tavoitteena oli kuitenkin löytää mahdollisimman monta erilaista autonvalmistajien käyttämää sähkömoottoria, joita käytetään hybridi- ja sähköautoissa. Sähkökäyttöisten kulkuneuvojen moottoreista kerrottiin ainakin niiden toimintaperiaatteet ja yleisimmin käytössä olevat mallit.</p> <p>Työn lopputuloksena syntyi kuvaus 15 erityyppisen hybridi- ja sähköauton sähkömoottorista, akusta ja muusta tekniikasta. Projektissa pohdittiin myös sähköä käyttävien kulkuneuvojen valmistamisesta aiheutuvia ympäristöhaittoja, sekä käsiteltiin miksi alan yritykset ovat päätyneet tietyn tyyppisiin hybridi- ja sähköautoihin sekä niiden sähkömoottoreihin.</p>	
Avainsanat	Hybridautot, sähköautot, sähkömoottorit, induktiomootorit, akut

Author Title	Mikko Lindgren Hybrid and Electric Vehicle Motors
Number of Pages Date	66 pages 3 June 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Professional Major	Automotive Electronics Engineering
Instructor	Vesa Linja-aho, Senior Lecturer
<p>This Bachelor's thesis focuses on discovering what kind of electric motors are currently in use in modern electric and hybrid vehicles, in terms of their type, size, power, and manufacturing process. The aim was to discover what had led various car manufacturers to choose certain types of motors and how these motors differ from each other. As well as how electric motors are manufactured. This thesis was assigned by Metropolia University of Applied Sciences.</p> <p>The main methods were literature based, using books published in or after 2015 as well as online internet sources. The main sources on information were online articles written by professionals in the automotive sector, research articles and press releases.</p> <p>An effort was made to introduce various kinds of motors currently in use in motor vehicles. However, the main aims of this thesis was to discover and report on different kinds of electric motors, which are currently used in hybrid or electric cars, and to introduce different kinds of motors. Only literature sources since the year 2010 were included.</p> <p>The scope of the thesis turned out to be too extensive and it had to be narrowed down. Therefore, it was not possible to include information on the manufacturing process of electric motors.</p> <p>Information on as many car models as possible, was collected and the types of motors, batteries and technology are discussed in this thesis, which resulted in a collection of information on the motors, batteries, and other technology in 15 various hybrid and electric cars.</p>	
Keywords	Hybrid vehicles, electric cars, electric motors, car battery

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Polttomoottorit	1
2.1	Bensiinimoottorit	2
2.2	Dieselmoottori	4
3	Sähkömoottorit	5
3.1	Vaihtosähkömoottorit ajoneuvoissa (AC)	6
3.1.1	Kolmivaiheinen induktiomoottori (ACIM)	6
3.1.2	Synkronireluktanssimoottori (SynRM)	9
3.1.3	Kestomagneettitahtimoottori (PMSM)	10
3.2	Tasasähkömoottorit ajoneuvoissa (DC)	13
3.2.1	Harjaton kestopagneettitasasähkömoottori (BLDC)	13
3.2.2	Harjallinen tasasähkömoottori (BDC)	14
4	Hybridiauton määritelmä	15
4.1	Hybridisointiaste	16
4.2	Hybridiautojen kokoonpanot	17
4.2.1	Sarjahybridit	17
4.2.2	Rinnakkaishybridit	19
4.2.3	Yhdistelmähybridit	21
5	Hybridiautojen tulevaisuuden näkymät	22
6	Sähkökäyttöiset hybridiautot (HEV)	23
6.1	Chevrolet	25
6.2	BMW	27
6.3	Volvo	28
6.4	Toyota	29
6.5	Honda	31
7	Sähkökäyttöiset dieselhybridit (HEV)	32
7.1	Dieselmoottorin hyödyt sähköajoneuvoissa	32
7.2	Audi	33

7.3	Mercedes-Benz	35
8	Sähköauton määritelmä (EV)	36
9	Sähköautot (BEV)	38
9.1	Nissan	38
9.2	Porsche	41
9.3	Mercedes-Benz	43
9.4	Renault	44
9.5	Audi	45
9.6	Tesla	46
10	Hybridi- ja sähköautojen akut	50
10.1	Lyijyakut	51
10.2	Nikkeli-metallihydridiakut (NiMH)	51
10.3	Litiumioniakut (Li-ion)	51
10.4	Litium-rautafosfaattiakku (LFP)	52
10.5	Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidiaakku (NCA)	52
10.6	Litiumioni-nikkeli-mangaanikobolttioksidi (NMC)	52
10.7	Litium-titanaattiakut (LTO)	53
10.8	Litium-metallipolymeeriakut (LMP)	53
11	Johtopäätökset	54
12	Yhteenveto	55
	Lähteet	58

Lyhenteet ja symbolit

Lyhenteet

4WD	Four-Wheel-Drive; nelivetoinen auto.
ABS	Antilock-Brake-System; auton ajonvakauden valvontajärjestelmä, joka muun muassa estää jarruja lukkiutumasta äkkijarrutuksessa.
AC	Alternating Current; vaihtosähkövirta.
ACIM	Alternating Current Induction Motor; yksi yleisimmin sähköautoissa käytetyistä vaihtosähkömoottoreista. Toimintaperiaate perustuu oikosulkuun, jossa häkkikäämiroottori seuraa staattorin pyörivää magneettikenttää.
BDC	Brushed Direct Current Motor; autoissa käytetty harjallinen tasasähkömoottori.
BEV	Battery Electric Vehicle; sähköauto, joka käyttää ladattaviin akkuihin varastoitua sähköenergiaa. Autossa ei ole ollenkaan polttomoottoria.
BHP	Mechanical Brake Horsepower; jarrudynamometrillä mitattu hevosvoima.
BLDCM	Permanent Magnet Brushless Direct Current Motor; autoissa käytettävä tasasähkömoottori. Kestomagneetit ovat roottorissa.
CVT	Continuously Variable Transmission; vaihteisto, jossa on loputon määrä vaihteita. Teho välitetään mm. kiilahihnavariaattorilla.
DC	Direct Current; tasasähkövirta, joka kulkee suoraan yhteen suuntaan.
DCT	Dual - Clutch Transmission; tietokoneella ohjattu automaattinen manuaali vaihteisto, jossa on kaksi kytkintä, jotka takaavat tasaisen kiihdyttämisen. Vaihteita voi vaihtaa sekä tietokone että kuljettaja.

EPA	Environmental Protection Agency; amerikkalainen muista riippumaton virasto, joka toimii päättäjänä ympäristöasioissa.
EV	Electric Vehicle; ajoneuvo, joka toimii pelkällä sähköllä.
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle; polttokennoja käyttävä sähköajoneuvo.
HEV	Full Hybrid Electric Vehicle; ajoneuvo, jossa on sähkömoottorin lisäksi isommat akut, jotka mahdollistavat lyhyiden matkojen ajamisen ilman polttomoottoria. Ei pistorasialatausmahdollisuutta.
HP	Horsepower; hevosvoima eli autojen tehon vertailuarvo.
ICE	Internal Combustion Engine; eniten käytetty auton moottorityyppi. Yleisimmässä käytössä näistä ovat bensiini- ja dieselmootorit.
IPM	Interior Permanent Magnet Motor; moottori, jossa kestopagneetit ovat sijoitettuna roottorin sisään. Sopii hyvin suurilla nopeuksilla tarvitseviin sovelluksiin.
MHEV	Mild Hybrid Electric Vehicle; ajoneuvo, jossa voi olla polttomoottorin lisäksi sähkömoottori, jonka tehtävänä on lähinnä lisätä tehoa ja laskea jonkin verran polttoaineen kulutusta. Ei pistorasialatausmahdollisuutta.
PEV	Plug-In Electric Vehicle; sähköauto, jota voi ladata pistorasian kautta. Autossa on polttomoottori ja sähkömoottori.
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle; ajoneuvo, jota voi ladata pistorasian kautta ja jolla voi ajaa kymmenien kilometrien pituisia matkoja pelkällä sähköllä.
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor; sähkömoottori, jota käytetään nykyään yleisesti sähköautoissa. Toimintaperiaatteena on kestopagneettinen roottori, ja moottorin käyttöön tarvitaan taajuusmuuntaja.

PMSRM	Permanent Magnet Switched Reluctance Motor; synkronireluktanssimoottorin alalajin moottori.
RM	Reluctance Motor; moottori, joka hyödyntää reluktanssia ja jolla on häkikäänimoottori, josta on poistettu osa hammastuksesta.
SPM	Surface Mounted Permanent Magnet Motor; moottori, jossa kestopagneetit on sijoitettu roottorin pinnalle. Mekaanisesti heikko moottori.
SynRM	Synchronous Reluctance Motor; sama kuin Switched Reluctance Motor, SRM; moottori, jonka roottorissa ei ole magneetteja eikä käämityksiä. Korkean hyötysuhteen moottori.
VFD	Variable-Frequency-Drive; taajuusmuuttaja eli moottorinohjain, joka ohjaa vaihtosähkömoottorin nopeutta ja vääntömomenttia.
VSD	Adjustable-speed Drive; ohjainlaite, jolla ohjataan laitteen tai moottorin nopeutta. Esimerkiksi SynRM-moottori tarvitsee tämän toimiakseen.

1 Johdanto

Sähköautoissa käytettäviä sähkömoottoreita ovat vaihtosähköllä toimivat moottorit, kuten induktiomootorit ja kestmagneettitahtimoottorit. Polttomoottorit ovat olleet pitkään kulkuneuvojen tärkein mekaanisen energiantuottomenetelmä. Sähkömoottoreiden sekä akkutekniikoiden kehittyessä kiihtyvällä tahdilla ollaan kuitenkin todennäköisesti siirtymässä aikaan, jossa polttomoottorit ovat pienemmässä roolissa.

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää hybridi- ja sähköautoissa käytettävien moottoreiden tyyppi, koko, ja teho. Haluttiin myös selvittää, miksi nykyiset autonvalmistajat valitsevat juuri tiettytyyppisiä sähkömoottoreita. Tarkasteltavista autoista osa on tavallisia henkilöautoja, mutta mukana on myös monta urheiluautoa ja niiden huipputasoista sähkömoottoritekniikkaa.

Nykyaikana sähköä käyttäviä kulkuneuvoja on niin paljon, ettei automerkkiä kohden ole mainittu työssä muuta kuin korkeintaan muutama malli. Tähän on poikkeuksena Tesla, joka on tämän hetken edelläkävijä sähköautotekniikassa. Kukin autotyyppi on jaettu omiin kokonaisuuksiinsa: sähkökäyttöiset hybridautot, sähkökäyttöiset dieselhybridit ja sähköautot.

Työ tehtiin, koska nykyiset sähkömoottorit kehittyvät kovalla vauhdilla, niin että informaatio vanhenee hyvin nopeasti ja oli tarvetta tarkastella kokonaiskuvaa sähkömoottorien nykytilanteesta. Opinnäytetyö perustuu pääosin internetlähteisiin, mutta niitä tukemaan käytettiin vuoden 2015 jälkeen julkaistua kirjallisuutta sekä alan yritysten julkaisemia lehdistötiedotteita.

2 Polttomoottorit

Polttomoottorilla tarkoitetaan yleensä bensiini- tai dieselmoottoria. Nelitahtisen polttomoottorin keksi Nikolaus Otto vuonna 1867. Tämän keksinnön jälkeen nelitahtinen moottorimalli on inspiroinut insinöörejä ja keksijöitä ympäri maailman tähän päivään asti. (1.) Moottorin kokoonpanoja on kolmenlaisia: rivimoottori, V-moottori ja vastaiskumoottori. Jokaisella kokoonpanolla on omat hyötynsä ja haittansa. Nelitahtinen rivimoottori käy

yleensä suurimmalle osalle ihmisistä, mutta esimerkiksi V6-moottorilla pystyy vetämään tehokkaammin raskaita kuormia kuin tavallisella nelitahtisella moottorilla (2).

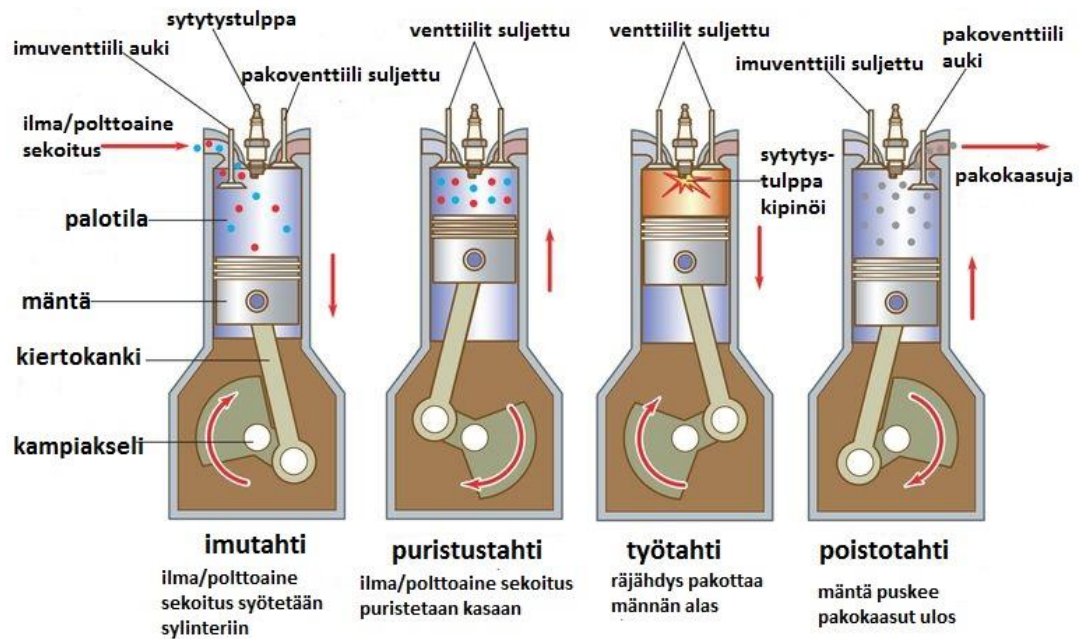
Polttomoottoreissa on yleensä neljästä kahdeksaan sylinteriä, mutta niitä voi myös olla enemmän. Lisäksi bensiinimoottorissa on muun muassa neljä sytytystulppaa, neljä mäntää, männänrenkaat, kiertokanget, kampiakseli, imuventtiilit, poistoventtiilit ja öljypohja. Moottoreissa sylinterejä voi olla myös vähemmän kuin neljä, sillä esimerkiksi ruohonleikkureissa on vain yksi sylinteri. (3.) Dieselmoottori muistuttaa paljon bensiinimoottoria, mutta sytytystulppien tilalla on hehkutulpat.

2.1 Bensiinimoottorit

Bensiinimoottorit ovat polttomoottoreita, joista yleisimmin käytössä ovat nelitahtiset moottorit, joissa on myös neljä palamisjaksoa. Hybridiautoissa käytetään usein bensiinimoottoria sähkömoottorin kanssa yhteistyössä.

Suurin osa bensiinimoottoreista ei ole kovin hyviä energiatehokkuudessa. Tavallisen bensiinimoottorin energiatehokkuus on tyypillisesti noin 20 %. Tämä tarkoittaa, että noin 80 % energiasta menee hukkaan. Parhaimmillaan nykyaikaisen bensiinimoottorin tehokkuus on 30–36 %:n luokkaa. (4.) Bensiinimoottorien tehokkuus on kasvanut viime vuosina.

Nelitahtinen bensiinimoottori on yleisin henkilöautoissa. Tämä tarkoittaa siis neljää sylinteriä, joissa jokaisessa on mäntä sisällä. Kuvassa 1 on esitettyä nelitahtimoottorin palamisjakson neljä vaihetta.



Kuva 1. Työkierron neljä tahtia bensiinimoottorissa (5).

Nelitahtisen bensiinimoottorin työvaiheet ovat seuraavat:

1. Imutahti: Mäntä liikkuu alas sylinteriä pitkin kampaiksielin voimasta. Vasemmanpuoleinen imuventtiili aukeaa ja päästää polttoaine-ilmaseoksen sylinteriin.
2. Puristustahti: Imuventtiili sulkeutuu, ja mäntä nousee takaisin ylös sylinteriä pitkin puristaen polttoaine-ilmaseoksen kasaan, josta tulee paljon helpommin syttyvää. Hieman ennen kuin mäntä saavuttaa korkeimman kohtansa eli yläkuolokohdan, sytytystulppa antaa kipinän.
3. Työtahti: Kipinä sytyttää polttoaine-ilmaseoksen aiheuttaen pienen räjähdyskuuden. Bensiini palaa välittömästi, mistä syntyy kuumaa kaasua, joka työntää männän takaisin alas. Näin syntyy voima, joka liikuttaa kampaiksieliä.
4. Pakotahti: Poistoventtiili avautuu oikealle. Kampaiksieli jatkaa pyörimistään, ja tämä saa männän taas nousemaan sylinteriä pitkin toisen kerran ylös. Tämä pakottaa syntyneet pakokaasut ulos sylinteristä poistoventtiilin kautta. Sitten koko kierros alkaa alusta. (5.)

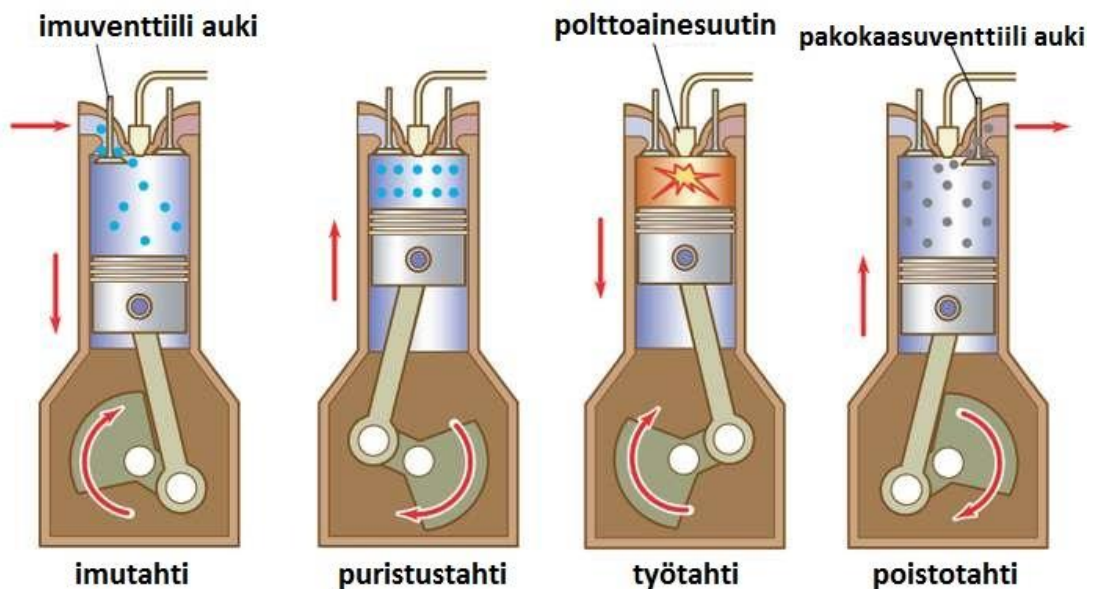
2.2 Dieselmoottori

Tavallisia dieselmoottoreita löytyy kaksi- ja nelitahtisella työkierrolla. Näistä kahdesta nelitahtista käytetään autoissa. Kaksitahtista työnkiertoa käytetään lähinnä isoissa laivoissa ja junissa.

Dieselmoottorit ovat jopa lähes kaksi kertaa energiatehokkaampia moottoreita kuin bensiinimoottorit. Ne voivat olla hyötysuhteeltaan noin 40 %. Tämä tarkoittaa, että samalla määrällä polttoainetta pääsee dieselautolla pidemmän matkan. Yhdysvaltalainen energiaministeriö ennusti vuonna 2011, että dieselmoottoreiden tehokkuus voisi nousta tulevaisuudessa jopa 60 %:n tasolle tai korkeammaksi. (6.) Vuonna 2018 dieselmoottoreiden hyötysuhde oli parhaimmillaan 40–47 % (4).

Tavallisesti dieselmoottori toimii tavalla, jossa se toistaa kierrossa neljä eri vaihetta. Yhden kierron aikana mäntä ja kampiakseli liikkuvat ylös ja alas kaksi kertaa. (6.)

Kuvassa 2 on nelitahtidieselmoottorin työkierron neljä vaihetta.



Kuva 2. Dieselmoottorin nelitahtinen työkierto (7).

Nelitahtisen dieselmoottorin työkierron vaiheet ovat seuraavat:

1. Imutahti: Ilma (kuvassa 2 vaalean sinisellä merkittynä) imetään sylinteriin vasemmanpuoleisesta ilman sisäänottoaukosta, samalla kun mäntä liikkuu alaspäin.
2. Puristustahti: Sisäänottoaukko sulkeutuu, mäntä liikkuu ylös ja puristaa ilmasekoituksen kuumentaen sen samalla. Polttoaine sekoitetaan kuuman ilman joukkoon keskimmäisestä polttoaineen ruiskutusventtiilistä, jolloin sekoitus syttyy spontaanisti palamaan.
3. Työtahti: Kun ilma-polttoaine seos syttyy ja palaa, se työntää männän alas, joka taas liikuttaa kampiakselia. Tämä kampiakselin liike aiheuttaa pyörien liikkeen.
4. Pakotahti: Poistoventtiili avautuu oikealle puolelle ja päästää ulos syntyneet pakokaasut, männän palatessa ylös. (7.)

3 Sähkömoottorit

Serbialais-amerikkalaista insinööriä Nikola Teslaa voidaan pitää induktiomootorin kantaisänä, sillä hän keksi ensimmäisenä vaihtosähköllä toimivan induktiomootorin vuonna 1887 (8). Tesla kehitti myös muun muassa vaihtovirta- ja vaihteistotekniikkaa (9).

Ajoneuvoissa sähkömoottorin tehtävänä on muuttaa sähköenergiaa mekaaniseksi energiaksi, joka liikuttaa autoa. Yleensä moottoreissa on tärkeimpinä voimaa tuottavina osina staattori ja roottori. Suurin osa moottoreista toimii johtamalla staattorin käämityksen väliseen magnetoituvaan metalliin sähkövirran, jonka napaisuutta muuttamalla saadaan roottori pyörimään. Napaisuutta vaihdetaan sähkövirran taajuutta muuttamalla. (10.) Käämitys tarkoittaa kelalle käärittyä sähköjohdinta.

Sähkömoottoreita on useita erityyppisiä, joista ajoneuvoissa käytetään eniten kolmivaiheista induktiomoottoria, harjatonta kestopagneettitasasähkömoottoria, synkronireluktanssimoottoria ja kestopagneetti- tahtimoottoria. Lisäksi ajoneuvoissa käytetään myös vähemmän yleisiä moottoreita, kuten harjallista tasasähkömoottoria, mutta muut kulkuneuvoissa käytetyt moottorit on jätetty tämän opinnäytetyön ulkopuolelle.

3.1 Vaihtosähkömoottorit ajoneuvoissa (AC)

Vaihtosähkömoottori on sähköautojen yleisin käytössä oleva moottorityyppi ja sen hyötysuhde on korkea. Vaihtosähkömoottori toimii Lorentzin voimayhtälön periaatteella: kun johdin, johon johdetaan sähköä, laitetaan magneettikenttään, siihen muodostuu voima. Vaihtosähkömoottori muuttaa vaihtosähkön mekaaniseksi energiaksi. Moottorille syötettävä jännite määrittelee sen, onko kone tasavirta- vai vaihtovirtalaite. (11.) Kaksi yleisimmän autoissa käytettävää vaihtosähkömoottoria ovat induktiomoottori ja kestopagneetti- tahtimoottori.

Induktio- moottorissa tärkeimmät osat ovat staattori ja roottori. Näistä staattori on ulkoinen metallikehä, ja roottori on sen sisäpuolella keskellä moottoria. Roottori pyörii ja liikuttaa moottorin vartta. Staattori ja roottori kumpikin muodostavat magneettikentät. Staattorin käämeissä magneettikenttä syntyy siihen syötetystä sinimuotoisesta vaihtosähkövirrasta. Roottorissa magneettikenttä syntyy taas kestopagneeteista, reluktanssista (magneettinen vastus) tai sähköisistä käämeistä.

Kestopagneettimoottorilla ja induktio- moottorilla on monta etua ajoneuvokäytössä, mutta molemmat omaavat silti rajansa. Kestopagneetit voivat demagnetoitua kovissa lämpötiloissa, niissä on rajallinen nopeusalue ja voimansiirtoa on hankala suojata vikatilanteissa (12, s. 310.)

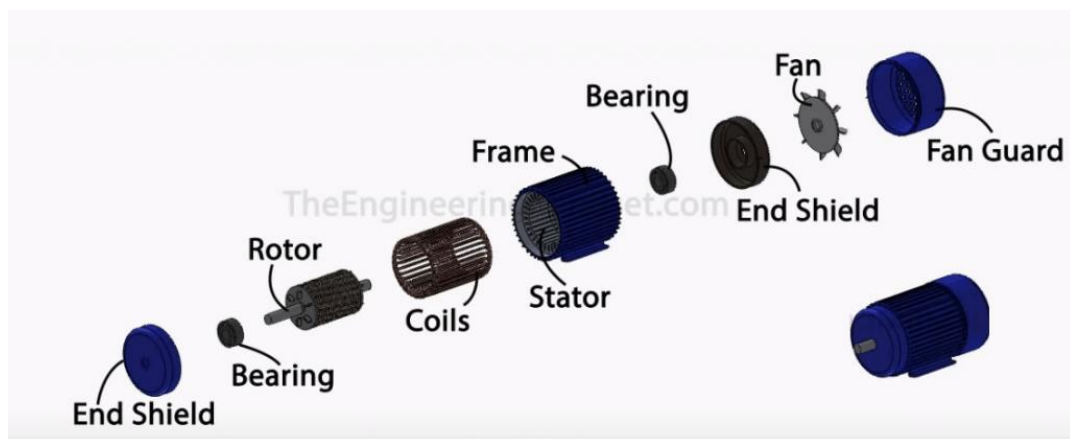
3.1.1 Kolmivaiheinen induktiomoottori (ACIM)

Kolmivaiheinen induktiomoottori, toiselta nimeltään oikosulkumoottori, oli 60-luvulle asti käytössä vain paikallaan olevana virtalähteenä, kunnes Piilaaksossa keksittiin digitaalinen elektroniikka. Vasta 90-luvulla insinööri Alan Cocconi kehitti yhden aikaisimmista liikutettavista inverttereistä eli taajuusmuuttajista.

Laite mahdollisesti tasasähkön muuntamisen sähköauton akuista induktiomootorin tarvitsemaksi vaihtosähköksi. Inverteri-moottoriyhdistelmää käytettiin ensimmäisenä sähköautossa, josta tuli lopulta malli GM EV1. (13.)

Induktiomootorissa roottorin käämien magneettikenttä indusoituu staattorin magneettikentästä. Induktio tuottaa vääntömomenttia, koska roottorin magneettikenttä yrittää ottaa staattorin magneettikentän kiinni. Tätä nopeuseroa kutsutaan jättämäksi, ja tästä johtuu induktiomootoreiden ilmoitettu kierrosluku, joka on noin 5 % pienempi kuin moottorin tahtinopeus. Tämä tarkoittaa, että roottori pyörii staattorin magneettikentän perässä ja kulkee siis aina vähän hitaammin kuin staattorin magneettikenttä. (14.)

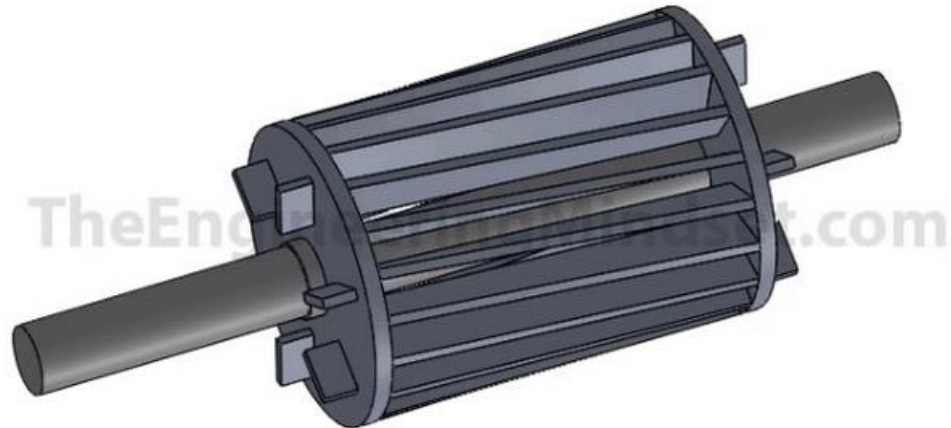
Induktiomootorin tärkeimmät osat ovat staattori ja häkkikäämiroottori. Nämä moottorit ovat suosittuja tehoa vaativissa applikaatioissa. Siksi se onkin yleinen valinta hybridi- ja sähköautoissa, jotka tarvitsevat moottoriltaan paljon tehoa. Induktiomootorit ovat vankkarakenteisia ja luotettavia, ne ovat sähkömoottoreiden joukossa hinta-laatusuhteeltaan hyviä, ja niissä on myös laaja käyttöalue, jonka ulkopuolelle mentäessä niiden teho alkaa heikentyä. (12, s. 262.) Kuvassa 3 näkyy induktiomootorin osat.



Kuva 3. Induktiomootorin osat eroteltuna (15).

Induktiomoottori koostuu kiinteästä staattorikotelosta, kelalle kääntyistä staattorikämeistä, häkkikäämiroottorista, laakereista, päätykilvistä, tuulettimesta ja tuulettimen suojasta (15). Rakenne on siis paljon yksinkertaisempi kuin polttomoottorissa.

Induktiomoottorin erikoisuutena on häkkikäämiroottori. Kuvassa 4 nähdään roottorin rakenne tarkemmin. Johdinpalkit ovat vinossa, koska se lisää moottorin vääntömomenttia. Päätyrenkaiden välissä olevat rautalevyt vahvistavat roottorin magneettikenttää ja pienentävät sähkövirran pyörteilyä (15.)



Kuva 4. Induktiomoottorin häkkikäämiroottori (15).

Häkkikäämiroottori koostuu akselista, laminoituista noin 0,5 mm:n ohuista rautalevyistä, johdinpalkkeista ja päätyrenkaista. Johdinpalkit ovat yleensä tehty kuparista tai alumiinista. Päätyrenkaat muodostavat kokonaisuudesta piirin, joka aiheuttaa oikosulun, kun johdinpalkkeihin johdetaan sähkövirtaa. Ilmiö aiheuttaa sen, että indusoitu sähkövirta kulkee piirin lävitse.

Piiriin indusoitu sähkövirta luo oman magneettikenttensä indusoituviin johdinpalkkeihin, joka aiheuttaa hylkimisreaktion staattorin oman magneettikentän toimesta. Kaksi vastakkaista voimaa saa häkkikäämiroottorin pyörimään, joka yrittää päästä hylkimisvoiman ulkopuolelle. Staattorin magneettikenttää pyörittämällä roottorin liike saadaan jatkuvaksi liikkeeksi. (15).

Induktiomoottorin hyvinä puolina hybridi- ja sähköautoille voidaan pitää sen yksinkertaista rakennetta. Se on lujarakenteinen ja mekaanisesti vahva, käynnistyksessä on heti

korkea vääntömomentti, nopeuden säätäminen on helppoa, ja moottoria pystyy kohtuullisesti ylikuormittamaan. Myös induktiomoottorin hyötysuhde on korkea, 85-97 %.

Oikosulkumoottorissa ei ole myöskään harjoja, liukurenkaita eikä virrankäntäjää, mikä laskee sen hintaa. Harjojen puuttumisen takia koneesta ei tule myöskään kipinöitä, joten sitä voidaan käyttää räjähdysvaarallisissakin ympäristöissä. (16.) Vaarallinen ympäristö voisi olla esimerkiksi bensiiniasema, jossa ei saa tulla kipinöitä.

Huonoina puolina voidaan pitää ainakin nopeudensäädön hallitsemisen vaikeutta, koska moottorin nopeus riippuu sille syötetyn vaihtosähkön taajuudesta. Moottori pyörii siis samalla nopeudella niin kauan, kunnes käytetään taajuusmuuttajaa, jonka avulla saadaan aikaiseksi haluttu nopeus. Induktio-moottori voi olla aika painavakin, sillä kelojen käämitykset tuovat siihen paljon lisää painoa. (17.)

3.1.2 Synkronireluktanssimoottori (SynRM)

Synkronireluktanssimoottorit ovat yksinkertaisia rakenteeltaan. Moottorin roottorissa ei ole häkkikäimitystä tai kestopagneetteja ollenkaan. Roottorista tulee myös pienet häviöt ja sitä on helppo hallita. (12 s. 310.) Kuvassa 5 nähdään synkronireluktanssimoottorin rakenne.



Kuva 5. Kolmivaiheisen synkronireluktanssimoottorin poikkileikkaus (18).

Tehokkaasti toimiakseen reluktanssimoottori tarvitsee VSD-kontrollerin. Kyseessä on ohjainlaite, jolla ohjataan laitteen tai moottorin nopeutta. Moottorissa roottori on suunniteltu muodostamaan mahdollisimman pieni magneettinen reluktanssi toiselle puolelle ja päinvastaiselle puolelle mahdollisimman suuri. Roottori pyörii samaan tahtiin kuin staattorin magneettikenttä. Siitä tulee nimitys synkroninen. (19.)

Synkronireluktanssimoottoria on monta eri tyyppiä, joista kolmivaiheinen on yleisin 8:12- tai 12:18-konfiguraatiolla. Näillä kahdella kokoonpanolla käytetään kolmivaiheista moottoria applikaatioissa, joissa vaaditaan suurta nopeutta ja korkeaa vääntömomenttia. (18.)

Synkronireluktanssimoottorin hyviä puolia on sen parempi sietokyky kestää enemmän vikatiloja kuin muut vaihtosähkömoottorit, jotka toimivat vaihevuorovaikutuksen kautta (18). Koneen asetuksia pystytään muuttamaan paljon enemmän tarvittavia tehtäviä varten kuin esimerkiksi induktiomootoria. Ne tarvitsevat vähemmän ylläpitoa sekä ovat todella luotettavia ja ovat rakenteeltaan yksinkertaisempia kuin induktiomootorit tai kesto-magneettitahtimoottorit.

Moottorin pienemmällä lämpötilalla on monta etua. Eristys kestää pidempään, sekä se vähentää laakereiden voiteluvälejä ja käyttöikä. Se on hyvä, sillä laakerien hajoaminen on usein syynä moottorin käyttökatkoon. Tämän lisäksi synkronireluktanssimoottori voidaan suunnitella suuremmalle hyötysuhteelle tai vaihtoehtoisesti muuntaa se tuottamaan enemmän tehoa. (19.)

3.1.3 Kestomagneettitahtimoottori (PMSM)

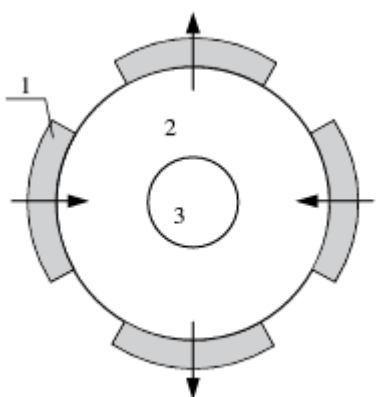
Kestomagneettitahtikone eli kesto-magneettitahtimoottori on vaihtosähkömoottori, joka käyttää kesto-magneetteja vääntömomentin luomiseen. Sen ominaisuuksia ovat muun muassa, että se pystyy luomaan myös paikallaan ollessaan hyvän vääntömomentin. Tehontuotto on suurempi kuin induktiomootoreissa, joten kesto-magneettitahtimoottori voi olla pienempi samalla teholla. Nämä moottorit ovat siis myös kevyempiä kuin induktiomootorit, ja niissä on suuri tehoalue, mutta ne tarvitsevat erillisen ohjainlaitteen.

Synkronoidussa kesto-magneettitahtimoottorissa roottori pyörii samalla nopeudella kuin pyörivä magneettikenttä. Kestomagneettimoottoreissa yleisin käytetty materiaali on

neodyymi-ferriitti-boori, jolla on hyvin matala Curien lämpötila ja korkea herkkyys lämpötilan vaihteluille. Tästä syystä magneetin kokoa on usein syytä suurentaa, ettei tapahdu demagnetoitumista suurissa lämpötiloissa ja sähkövirroissa. Toisaalta on myös käytännöllistä tehdä mahdollisimman pienet magneetit, jotta säästetään materiaalikustannuksissa. (12, s. 287.)

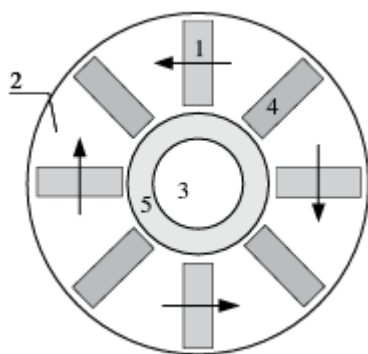
Kun kestopagneetteja käytetään magneettikentän luomiseen sähkölaitteessa, siitä tulee tällöin kestopagneettimoottori. Vaihtosähkömoottori ja tasavirtamoottori voidaan molemmat valmistaa kestopagneeteilla. Vain kestopagneetti synkronoituja vaihtosähkömoottoreita ja harjattomia tasavirtamoottoreita käytetään nykyaikaisten sähköautojen taajuusmuuttajien kanssa. (12, s. 289.)

Kestopagneettimoottorissa staattori on samantapainen kuin induktimoottorissa ja roottori sisältää kestopagneetit. Jotta saadaan jatkuva keskimääräinen vääntömomentti, niin roottorin täytyy pyöriä staattorin magneettikentän mukaisella synkronisella nopeudella. Tästä tulee nimitys synkroninen kestopagneettimoottori. (12, s. 289.) Kuvassa 6 nähdään eräänlainen versio kestopagneettitahtimoottorista.



Kuva 6. SPM-moottorin poikkileikkaus (12, s. 290).

Magneettien ollessa liimattuna roottorin pinnalle sitä kutsutaan pinta-asennetuksi kestopagneettimoottoriksi (SPM). SPM moottorissa roottori voi olla täyttä terästä, koska roottorin rautaydin ei ole itse lähellä ilmarakoa. Näin ollen pyörrevirran sähköhäviöt ja hystereesi häviöt hampaiden urissa voidaan välttää. (12, s. 290.) Kuvassa 7 kestopagneetit ovat asennettuna roottorin sisään, jolloin kyseessä on IPM-moottori.



Kuva 7. IPM-moottorin poikkileikkaus (12, s. 290).

Jos magneetit ovat sijoitettuna roottorin sisään ennalta leikattuihin uriin, niin silloin se on nimeltään avonapainen kestopagneettitahtikone (IPM). Avonapaisen moottorin roottori täytyy tehdä laminoidusta silikoniteräksestä, koska hammasurien harmoniikka muodostaa pyörrevirtoja ja hystereesi häviöitä. (12, s. 290.)

Kestomagneeteissa käytettäviä materiaaleja ovat seuraavat:

- Neodyymi-rauta-boori (Nd-Fe-B): Hyvät ominaisuudet kestopagneettimoottorin magneeteille. Huonona puolena Curie-piste on vain 150 °C. Hyvin saatavilla.
- Samarium-koboltti (Sm-Co): Hyvä materiaali, mutta kallis. Curie-piste on 550 °C.
- Alumiini-nikkeli-koboltti (Al-Ni-Co): Halpa ja hyvät ominaisuudet, mutta pysyvä demagnetointi tapahtuu liian helposti.
- Ferriitit: barium ja strontium (Ba ja Sr): Halpa ja demagnetointi ei tapahdu liian helposti. Curie-piste on 400 °C, mutta moottorin koon pitäisi olla suurempi. (20.)

Kestomagneettitahtimoottoreiden hyviä ominaisuuksia hybridi- ja sähköautoihin ovat seuraavat: Ne ovat tehokkaampia kuin induktimoottorit, joten PMSM ei kuumene niin paljon samassa rasituksessa. Harvinaisia magneetteja käyttävät kestopagneettimoottorit tuottavat suuremman vääntömomentin kuin induktimoottorit. Ne tuottavat korkeam-

man hyötysuhteen, joten ne käyttävät vähemmän energiaa. Pienemmät operointilämpötilat vähentävät osien kulumista ja tarvittavaa kunnossapitoa sekä laakerit pysyvät paremmassa kunnossa ja eristys pysyy paremmin. Kestomagneettimoottori on myös vankarakenteinen, mikä tekee siitä kestävä. (21.)

Huonot puolet sähköä käyttäviin ajoneuvoihin ovat seuraavat: Kestomagneetit eivät kestä ikuisesti, vaan ne menettävät ajan kuluessa magneettista voimaansa. Kuluttavat voimat voivat myös vaikuttaa niihin, mikä aiheuttaa myös magneettisen voiman menettämistä, kun kestopagneetit ovat liian suurella raskuudessa, ja jos niiden annetaan päästä liian suureen lämpötilaan tai niihin iskee suurempi sähköhäiriö. (20.) Moottori tarvitsee VFD-taajuusmuuttajan ohjaamaan nopeutta ja vääntömomentin määrää (21).

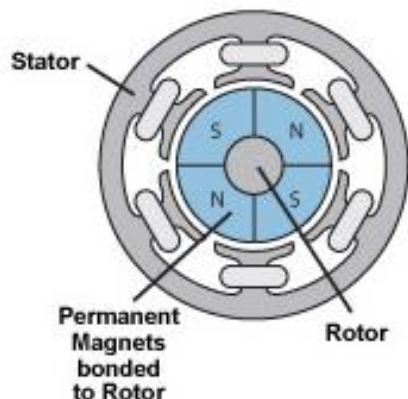
3.2 Tasasähkömoottorit ajoneuvoissa (DC)

Tavallisessa tasasähkömoottorissa on kaksi sähköelementtiä: kenttäkäämit ja ankkuri. Käämitykset ankkurissa on tehty sähköä johtavista johtimista, jotka päättyvät kommutaattoriin. Kommutaattori vaihtaa virran suuntaa aina kun roottori on pyörähtänyt puoli kierrosta. Tasasähköä johdetaan ankkurin käämitykseen hiili harjojen kautta, jotka ovat kommutaattorissa. Pienessä tasasähkömoottorissa kestopagneetit voidaan asentaa staattoriin. Isoissa moottoreissa teollisuuskäytössä staattori toimii sähkömagneettina. (22.)

3.2.1 Harjaton kestopagneettitasasähkömoottori (BLDC)

BLDC-moottori ei käytä harjoja, mutta käyttää sen sijaan virrankääntäjää, joka parantaa sen tehokkuutta ja luotettavuutta. Harjattomassa moottorissa on monta etua induktiomoottoriin ja harjalliseen DC-moottoriin nähden. Moottori pystyy mm. suurempaan nopeuteen, se käy hiljaisesti, ja sillä on nopeampi vasteaika ja suurempi nopeus vääntömomenttiin nähden. BLDC-moottori sopii hyvin sähköautoihin, joissa tarvitaan suurta tehoa mutta keveys ja tilansäästäminen ovat tärkeitä. Moottori on mekaanisesti aika helpporakenteinen, mutta se vaatii toimiakseen optimaalisesti säännöste-

levän virtalähteen, joka muuntaa AC-virran DC-virraksi ja hienostuneen ohjausjärjestelmän. (23.) Kuvassa 8 nähdään BLDC-moottorin rakenne, jossa kestopagneetit ovat yhdistettynä roottoriin.



Kuva 8. Harjattoman BLDC-moottorin poikkileikkaus (24).

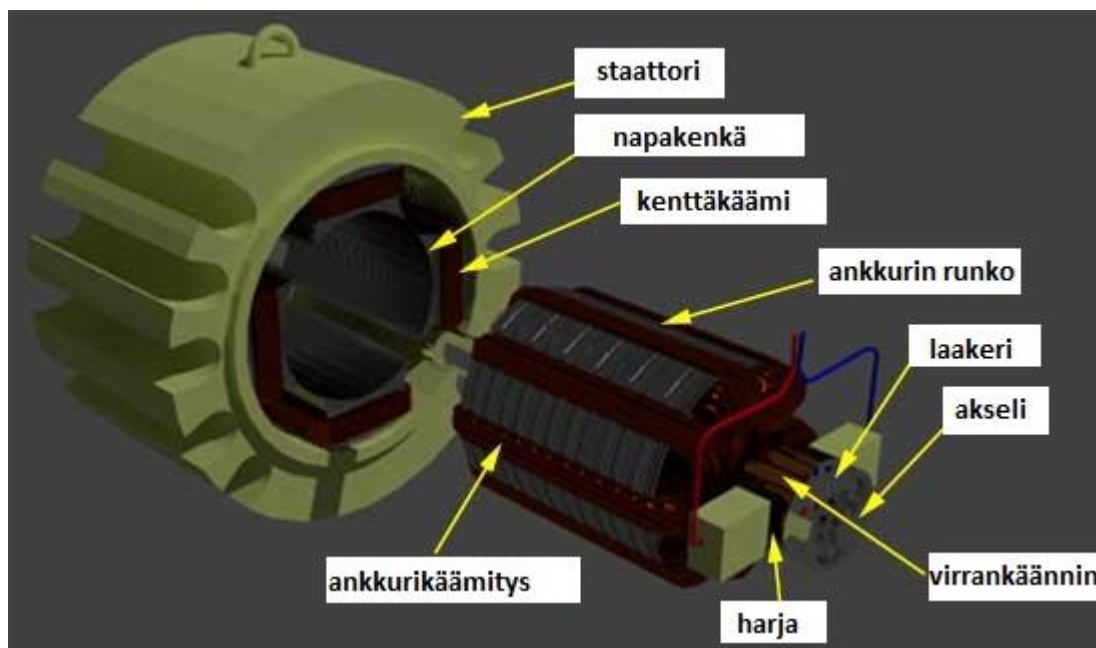
Harjattomia tasasähkömoottoreita pidetään energiatehokkaampina kuin harjallisia moottoreita. Ilmiö johtuu paljolti siitä, ettei siinä ole harjoja, jotka aiheuttaisivat kitkaa. Tämä näkyy siinä, että harjaton moottori voi olla pienempi, mutta siinä on silti sama teho. (24.) Harjattoman kestopagneetti tasasähkömoottorin hyötysuhde on noin 95-98 % ja se on yksi käytetyimmistä moottoreista ajoneuvokäytössä (23).

3.2.2 Harjallinen tasasähkömoottori (BDC)

Harjallinen tasasähkömoottori saa paljon vääntömomenttia tasaisella tiellä, mutta sen heikkous on, ettei se pysty tuottamaan tarpeeksi suurta tehoa ylämäessä. Harjallisia moottoreita käytetään autoissa lähinnä palautusmekanismeihin, paikallaan liikuttamiseen ja sähkökäyttöisten sivuikkunoiden avaamiseen. Harjat kuluvat näissä moottoreissa kuitenkin nopeasti, ja tämä johtaa niiden vaihtamiseen usein.

BDC-moottorista on monenlaisia muunnoksia, kuten rinnan-, sarja- ja yhdistekäämitys, jotka vaikuttavat moottorin tehoon ja mahdolliseen käyttötarkoitukseen. (25.)

Kuvassa 9 näkyy harjattoman kestopagneettitasasähkömoottorin rakenne.



Kuva 9. BDC-moottorin rakenne (26).

Harjallisen tasasähkömoottorin runko on valurautaa tai terästä ja muodostaa suuren osan staattorista. Se sisältää myös kenttäkäämityksen ja magneettiset napakengät. Ankkurikäämitys on kiinnitetty roottoriin ja moottorin pyörivään osaan. Harjat ovat liukuvassa kontaktissa virrankääntäjän kanssa. Tämä tarkoittaa, että virrankääntäjä ja harjat välittävät sähkövirran paikallaan olevasta osasta liikkuvalle roottorille. (26.)

4 Hybridiauton määritelmä

Hybridiajoneuvossa on pääsääntöisesti kokoonpanona polttomoottori ja sähkömoottori. Nämä kaksi moottoria antavat autolle yhdessä parhaimmillaan suuren maksimivoiman ja alhaisen polttoaineen kulutuksen. Useimmiten hybridiauton idea on käyttää ensisijaisesti sähköenergiaa, joka on varastoitu sen akkuihin. Automallien välillä on suuria eroja, miten hybridiautojen komponentit toimivat yhteistyössä ja mitä ominaisuuksia niissä on. Hybridiauto voikin olla myös muuta kuin puoliksi sähkökäyttöinen, ja siinä voi olla esimerkiksi kolme erilaista moottorityyppiä.

Hybridiautot käyttävät myös hyväksi regeneroivaa jarrutusta, joka ottaa talteen jarrutusenergian. Osa hybrideistä lataa itseään vain regeneroimalla, mutta joitain niistä voi

ladata pistorasian kautta. (27.) Hybridin tarkemmat määrittelyt ovat seuraavassa luvussa ja lisäksi tutustutaan hybridisointiasteeseen.

4.1 Hybridisointiaste

Viime vuosina on tullut markkinoille uudenlaisia hybridityyppejä, kuten täyshybridi, kevythybridi, mikrohybridi, voimahybridi ja ladattava hybridi. Nämä käsitteet liittyvät hybridiautossa pääsähkömoottorin teholuokkaan. Jos autossa on kohtuullisen suuri sähkömoottori ja siihen kuuluvat akut, sitä voidaan pitää täyshybridinä, mutta jos sähkömoottori on pieni, auto on silloin mikrohybridi. Tavallisesti täyshybridissä sähkömoottorilla pystyy ajamaan vain tiettyyn nopeusrajaan saakka pelkässä sähkötilassa ja ainoastaan lyhyen ajan. (12, s. 16.)

Nopeusrajana sähkömoottorissa on tavallisesti taajamanopeusrajoitus. Tavanomainen täyshybridihenkilöauton moottorin teho on 50–75 kW. Mikrohybridi sen sijaan ei pysty ajamaan autoa yksinään, vaan sähkömoottori on ainoastaan moottorin käynnistämiseen ja sammuttamiseen. Mikrohybridin tehot jäävät yleensä alle 10 kW:n. Kevythybridi on näiden kahden teholuokan välistä. (12, s. 16.)

Rinnakkaishybridissä hybridisointiaste määritellään sähkövoiman määränä, joka johdetaan auton kokonaisvoimansiirtoon. Esimerkiksi HEV, jossa on 50 kW:n sähkömoottori ja 75 kW:n mekaaninen moottori, omaa hybridisaatioluvun $50 \text{ kW} / 125 \text{ kW} = 40 \%$. Tavallisella polttomoottoriautolla luku on 0 %. Akkukäyttöisellä sähköautolla luku on 100 %. Sarjahybridissä luku on myös 100 %, koska autoa pystyy ajamaan sähköautomoodissa. (12, s. 16–17.)

Täyshybridi vastaa ladattavaa hybridiä, mutta sitä ei voi erikseen ladata pistorasiasta. Tällainen hybridi voi myös automaattisesti valita tilanteeseen sopivan hybriditilan. Käytännössä myös niin sanottu voimahybridi (muscle hybrid) on hybridiautojen alalaji, joka keskittyy parantamaan auton suorituskykyä avustamalla polttomoottoria. Näissä hybridisointiaste on suuri. Voimahybridissä polttoainetta ei kulu lisätehosta huolimatta enempiä ja sähkömoottori on isompi kuin avustavassa moottorissa yleensä. (28.)

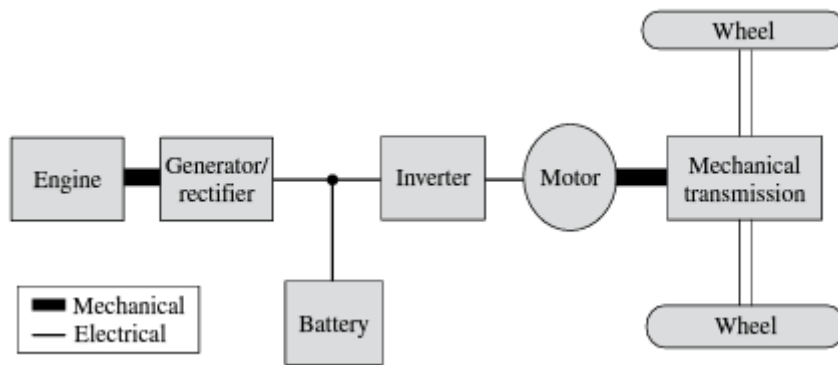
4.2 Hybridiautojen kokoonpanot

Hybridiautoja voi olla monenlaisia. Näistä kolme tyyppiä ovat sarjahybridi, rinnakkaishybridi ja yhdistelmähybridi. Polttomoottoria ja sähkömoottoria käyttävistä autoista ei yleensä kuitenkaan puhuta näillä nimityksillä vaan käytetään edellisestä luvusta tuttuja asiakkaille helpompia nimityksiä, kuten ladattava hybridi tai mikrohybridi. Käytäntö on kätevä, sillä esimerkiksi mikrohybridi kertoo paljon helpommin, mitkä ovat hybridauton tärkeimmät sähköön liittyvät ominaisuudet.

Seuraavissa luvuissa tarkastellaan sarja-, rinnakkais- ja yhdistelmähybridien rakennetta tarkemmin. Näemme myös miksi asiakkaille ei välttämättä kannata autoliikkeessä alkaa puhumaan näillä nimityksillä.

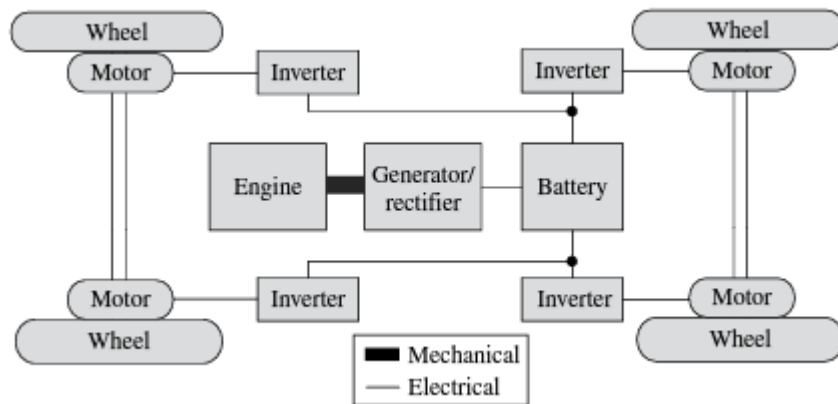
4.2.1 Sarjahybridit

Tässä hybridityypissä polttomoottori syöttää sähkömoottorille energiaa. Yleensä tällaisessa hybridissä on myös kolmivaiheinen vaihtovirtageneraattori ja tasasuuntaaja, joka muuttaa vaihtovirran tasavirraksi. Sähkömoottori on tässä tapauksessa ainut voimallähde, joka syöttää vääntömomenttia auton pyörille. Vaihtovirtageneraattori lataa auton akkuja ja antaa virtaa sähkömoottorille. Tilanteen vaatiessa sähkömoottori voi ottaa energiaa sekä akuista että generaattorilta samaan aikaan. Kuvassa 10 nähdään selkeästi, kuinka tavanomaisessa sarjahybridissä sähkömoottori on kiinni vaihteistossa ja polttomoottori on asetettu niin ettei se pysty muuta kuin tuottamaan lisäenergiaa sähkömoottorille. (29, s. 67.) Kuvassa 10 nähdään sarjahybridin arkkitehtuuri.



Kuva 10. Sarjahybridin arkkitehtuuri (12, s. 12).

Sarjahybrideitä on myös toisenlaisia, sillä joissakin malleissa on jokaisella pyörällä oma moottorinsa. Tämä yhdistelmä lisää kuitenkin jousittamatonta massaa, joka laskee auton suorituskykyä. Hyötyjä tällä kokoonpanolla on yksinkertaisemmin toteutettava luistonesto, auton pohjatasoa voidaan laskea ja autoon saadaan neliveto. (29, s. 68.) Kuvassa 11 nähdään sarjahybridi, jonka kaikki pyörät on varustettu napamoottoreilla.



Kuva 11. Sarjahybridi neljällä napamoottorilla arkkitehtuuri (12, s. 13).

Napamoottoreiden hyvänä puolena voidaan pitää myös sitä, ettei polttomoottorin ja sähkömoottoreiden välillä ole mekaanista linkkiä, joten polttomoottorin generaattorin osat voidaan sijoittaa melkein mihin vain. Erilliset napamoottorit on helppo ottaa käyttöön.

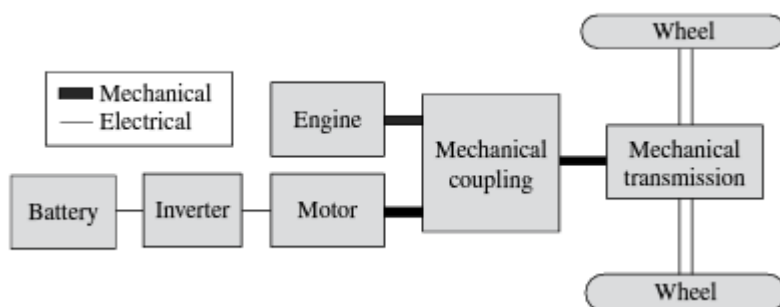
Sarjahybridit ovat parhaimmillaan start-stop-järjestelmällään kaupunkiajossa. Vaihteistoa ja sen liitännäisosia ei tarvita napamoottoreiden kanssa, mikä säästää paljon tilaa muille osille. (29, s. 69.)

Huonot puolet tavanomaisissa sarjahybrideissä ovat seuraavat: Tarvittavia osia on paljon, ja ne on kaikki mitoitettu käsittelemään auton maksimitehoa, mikä lisää auton painoa, hintaa ja voimansiirron koko voi olla tavallista suurempi. Lisäksi polttomoottorin tuottaman voiman täytyy mennä generaattorin sekä sähkömoottorin läpi, ja tämä vaikuttaa auton tehokkuuteen pitkillä maantieajeluilla. Tehokkuus on tällöin heikompi, kuin käyttämällä tavanomaista vaihteistoa, johtuen siitä, että energiaa on muunnettu moneen kertaan. (29, s. 69.)

4.2.2 Rinnakkaishybridit

Polttomoottori ja sähkömoottori ovat rinnakkaishybridissä rinnakkain, ja ne ovat yhdistettynä mekaaniseen voimansiirtoon. Useimmissa kokoonpanoissa on yhdistettynä iso sähkögeneraattori ja sähkömoottori yhdeksi yksiköksi. Tämä yksikkö on yleensä vaihteiston ja polttomoottorin välissä. Starttimoottoria ja vaihtovirtageneraattoria ei tarvita tässä kokonaisuudessa. Akkuja pystytään lataamaan regeneroivassa jarrutuksessa ja kun ajetaan autoa mutta kaikkea polttomoottorin tuottamaa tehoa ei tarvita, joten se voidaan ottaa talteen sähköenergiana. Mekaanisen liitoksen ansiosta pyörien ja moottorin välillä, koska vaihteisto puuttuu, akkuja ei pysty lataamaan, kun auto on paikoillaan. Kun auto käyttää vain sähkökitkaa tai jarrutusregenerointienergiaa, polttomoottorissa ei ole tehoa vaan erillinen kytkin kytkee sen irti, jolloin se pyörii tyhjä. (29, s. 72.)

Rinnakkaishybridi tukee neljää erilaista toimintatilaa: vain sähkömoottoria käyttävä sähkötila, hybriditila, jossa sähkömoottori avustaa polttomoottoria, akun lataustila ja regenerointitila. Kuvassa 12 on rinnakkaishybridin kokoonpano, jossa polttomoottori ja sähkömoottori ovat rinnakkain ja yhdistettynä mekaanisella kytkennällä.



Kuva 12. Rinnakkaishybridin arkkitehtuuri (12, s. 13).

Tavanomaisessa kaupunkiajossa hybridin sähkötila on toiminnassa niin kauan, kun ajetaan nopeudella noin $40 \frac{km}{h}$ tai sen alle ja auto käyttää vain akkujen sähkövirtaa. Akut eivät lataudu tässä tilassa. Polttomoottoritilassa nopeuksilla yli $40 \frac{km}{h}$ vain polttomoottori on toiminnassa. Hybriditilassa polttomoottori ja sähkömoottori tekevät yhteistyötä, niin että sähkömoottori antaa lisätehoa, kun sitä tarvitaan. Akutilan ollessa päällä ottomoottori käy korkeammilla kierroksilla ja käy paremmalla hyötysuhteella; tästä syntyvästä ylimääräisestä energiasta auto lataa akkua. Regeneroivassa tilassa auto lataa akkuja jarrutuksissa kineettisen energian kautta. (29, s. 71–72.)

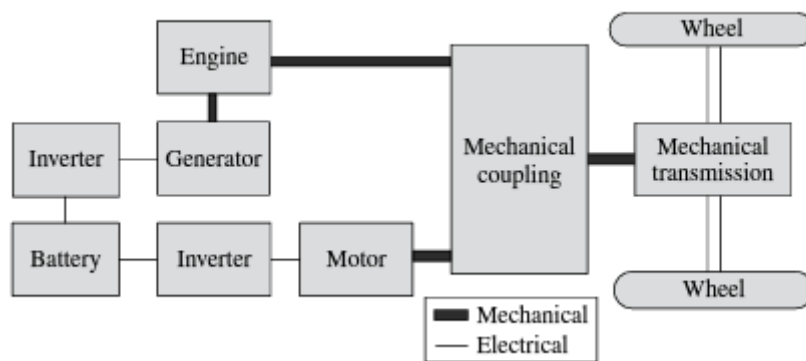
On mahdollista käyttää myös ylimääräistä generaattoria, joka mahdollistaa akkujen lataamisen myös silloin, kun auto on paikoillaan ja vaihde on vapaalla. Ylimääräinen generaattori tosin nostaa auton hintaa ja painoa. Hybridiautoja, jotka käyttävät rinnakkaista kokoonpanoa, ovat muun muassa Honda Civic, joka käyttää tavanomaista polttomoottoria, jossa on CVT-vaihteisto. Civic-autossa vauhtipyörä on korvattu sähkömoottorilla.

Vahvuuksia rinnakkaisuudessa on parempi hyötysuhde ajettaessa kaupungissa ja pitkän matkan ajoissa. Hybridissä on monta käyttötilaa. Sähkömoottori voi olla pienempi, koska sen tehtävä on suurimmaksi osaksi vain avustaa.

Huonot puolet ovat monimutkainen kokoonpano, polttomoottori ei toimi pelkästään parhaalla kierrosalueellaan, joten kierrosten laskiessa myös hyötysuhde laskee, ja kun on vain yksi sähkömoottori, akkua ei voi ladata auton ollessa paikoillaan. (29, s. 72.) Kaikista lisäosista voi tulla autoon huomattavasti painoa lisää.

4.2.3 Yhdistelmähybridit

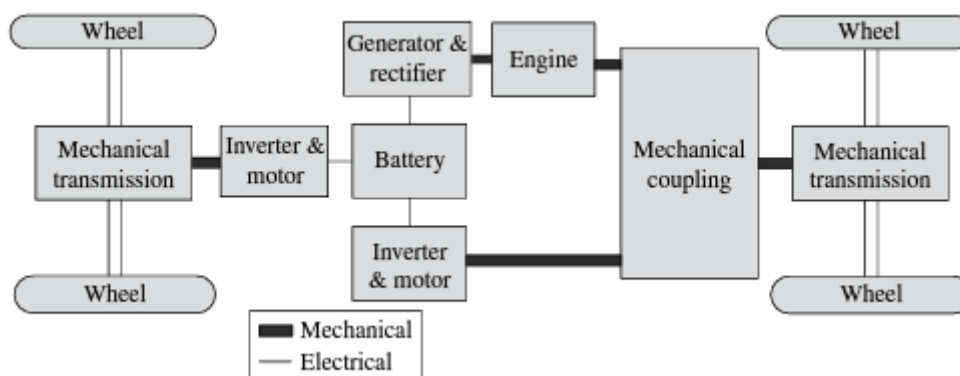
Edellisten lisäksi on olemassa myös sarja- ja rinnakkaishybridin yhdistelmä; tällaista autoa kutsutaan yhdistelmähybridiksi. Verrattuna sarja- tai rinnakkaishybrideihin, näiden yhdistelmä lisää mekaanisen kytkennän moottorin ja loppuosion välille, joten moottori voi ajaa pyöriä suoraan itse. Rinnakkaishybridiin verrattuna yhdistelmähybridissä on lisäksi vielä toinen sähkömoottori joka toimii generaattorina. (12, s. 14.) Kuvassa 13 nähdään yhdistelmähybridin komponentit.



Kuva 13. Yhdistelmähybridin arkkitehtuuri (12, s. 14).

Yhdistelmähybridin etuna on, että sitä voi käyttää monella erilaisella asetuksella tilanteen tarvittavien olosuhteiden mukaan. Auton voi laittaa sarjatilaan tai rinnakkaistilaan, ja siksi sen pystyy hyvin optimoimaan parhaan kulutuksen ja ajettavuuden mukaan. Haittapuolena yhdistelmässä on suurempi määrä tarvittavia osia ja korkeampi hinta kuin sarja- ja rinnakkaishybridissä. (12, s. 15.)

Vielä edellistäkin monimutkaisemmassa hybridissä, nimittäin monimutkaisessa yhdistelmähybridissä kuvassa 14 saadaan aikaiseksi neliveto käyttämällä polttomoottorin lisäksi kahta sähkömoottoria. Kokoonpanossa käytetään erillisiä ajoakseleita. Lisäksi tämä kokoonpano parantaa regeneroivaa jarrutusta. (12, s. 15.)



Kuva 14. Monimutkainen yhdistelmähybridi, jossa on erilliset ajoakselit (12, s. 15).

Monimutkaisissa yhdistelmähybrideissä käytetään yleensä planeetta vaihteistoa ja useampaa sähkömoottoria, kuten esimerkiksi neljävetoisessa sähköautossa (four-wheel drive, 4WD). Generaattoria käytetään tässä yhteydessä sarjatilan osien toimintaan ja moottorin käyttöolosuhteiden hallitsemiseen, jotta saavutetaan maksimaalinen hyötysuhde. Neljän pyörän ajon ansiosta myös auton ajovakauden valvonta- ja ABS-järjestelmä ovat parempia. (12, s. 15.)

5 Hybridiautojen tulevaisuuden näkymät

Suurin osa pohjoisamerikkalaisista eli noin 90 % matkustaa autolla päivän aikana alle 60 kilometriä. Tähän sisältyy työ- ja perhematkat. Tästä syystä suuri osa ihmisistä ei välttämättä tarvitsisi autoa. (30 s. 24–25.) Ei ole varmasti kaukaa haettava, etteikö näin olisi myös suurimmassa osassa Eurooppaa ja myös Suomessa. Tämä tarkoittaa sitä, että jos ei kuitenkaan halua olla ilman autoa, niin hybridiautot ovat yllättävän hyvä ratkaisu tulevaisuutta ajatellen. Lataushybridien hyöty on nimittäin parhaimmillaan juuri kaupunkiajossa. Niillä voi myös ajaa tarvittaessa pidempiä matkoja ilman ongelmia.

Hybridiautot ovat nykyään hyötysuhteeltaan ja monelta ominaisuudeltaan sen verran hyviä, että ne saattavat olla lähitulevaisuudessa paras vaihtoehto kaikkiin muihin ajoneuvoihin nähden. Lyhyitä matkoja ajaessa ne täyttäisivät pienen kulutuksen kriteerit ollen näin luontoa säästäviä, ne eivät kuluttaisi ollenkaan polttoainetta vaan ainoastaan säh-

köä. Edes sähköautot eivät ole käytännön kannalta niin hyvä vaihtoehto, sillä niiden valmistaminen koko maailman tarpeisiin saattaa kuluttaa liikaa luonnonvaroja ja lisätä kasvihuonepäästöjä. Panostamalla rahallisesti hybridautoihin ja edelleen niiden kehittämiseen voidaan saada suuria ympäristö- ja taloudellisuus hyötyjä yhteiskunnalle. (12, s. 113.)

Todellinen kilpailija hybridautoille voisi olla polttokennoautot, sillä ne tuottavat paikallis-
päästöinä ainoastaan puhdasta vesihöyryä.

6 Sähkökäyttöiset hybridautot (HEV)

Autonvalmistajilla on monenlaisia tapoja valmistaa hybridautoja, mutta on kuitenkin selkeästi nähtävissä tietty trendi sähkömoottoreiden suhteen. Suurin osa autonvalmistajista suosii nykyisin vaihtosähkökeestomagneettitahtimoottoria, joka ei ole nähtävissä niin selkeästi tämän työn tuloksista, sillä päämääränä oli löytää mahdollisimman paljon erilaisia sähkömoottoriratkaisuja, eikä samanlaisia moottoreita.

Sähköautomalleja on niin paljon saatavilla Suomen ulkopuolelta, että useamman auton tekniset tiedot oli muunnettava englantilaisista tai amerikkalaisista yksiköistä Suomessa käytettäviin yksiköihin. Nämä arvot ovat muunnettu seuraavasti:

$1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}}$ -arvot on muunnettu newtonmetreiksi

$$1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}} = 0,73756214836955 \text{ Nm}$$

Amerikkalaiset MPG-arvot on muunnettu $\frac{1}{100\text{km}}$

MPG_{US} saadaan kaavasta

$$\text{MPG}_{US} = \frac{100 * 3,785411784}{1,609344 * l_{100\text{km}}}$$

U.S gallona = 3,785411784 litraa

maili = 1,609344 km

Englantilaiset MPG-arvot muunnettu arvoiksi $\frac{1}{100\text{km}}$

$\frac{1}{100\text{km}}$ saadaan kaavasta

$$l_{100\text{km}} = \frac{100 * 4,54609}{1,609344 * \text{MPG}_{\text{UK}}}$$

Englantilainen gallona = 4,54609 litraa

Hevosvoimat muunnettu kW-arvoiksi kaavalla

$$P_{\text{kW}} = 0,745699872 * P_{\text{hv}}$$

jossa P_{kW} = teho kilowatteina ja P_{hv} = teho hevosvoimina

1 BHP = 1 HP = 0,745699872 kW

Mailit muutettu kilometreiksi kaavalla 1 maili = 1,6 kilometriä,

joten 62 mph $\approx 100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$

Paunat on muunnettu kilogrammoiksi kaavalla

$$1 \text{ kg} = \frac{\text{lb}}{2,2046}$$

Tulevissa luvuissa autojen tiedoissa muunnetut arvot on merkitty tähtimerkillä *.

6.1 Chevrolet

Chevrolet teki suunnittelussa päätöksen, että Volt käyttää vähemmän tehokkaita kesto-
magneettisähkömoottoreita kuin Malibu (31). Auto on käytännössä sama kuin Opel Am-
pera, mutta näistä Chevrolet on ollut keskitetty Pohjois-Amerikan markkinoille ja Ampera
Euroopan (32).

Volt PHEV 2017

Auto oli 2016 hybridautoista yksi pidemmän kantaman ajoneuvoista. Ainut automalli,
joka silloin pystyi kilpailemaan toimintasäteen suhteen, oli Toyota Prius. Suurella osalla
ihmisistä, jotka ostivat Voltin, heidän ajoneuvonsa päästöt olivat noin 60–90 % pienem-
mät kuin edellisessä autossa. (30, s. 22.)

Voltin sähkömoottorissa on kestromagneetit, jotka on tehty rautaferriitistä. Auton suunnit-
telussa otettiin huomioon Kiinan harvinaisten metallien varannot. Voltin hintaa laskee,
ettei olla niin riippuvaisia Kiinasta saatavista harvinaisista metalleista, joiden hinta on
epävakaa ja toimituksissa voi tulla ongelmia. Chevroletin kestromagneettimoottorit ovat
halvempia ja hyviä auton sähkötilassa, mutta hybriditilassa se ei ole ideaalinen.

Volt on suunniteltu niin, että sen sähkömoottori on ensisijaisessa asemassa ja poltto-
moottori tukemassa (31). Taulukossa 1 nähdään Voltin tiedot.

Taulukko 1. Volt ladattavan hybridin ominaisuudet (30, s. 106–109; 31).

Sähkömoottori:	Ferriitti, AC, kestromagneettitahtimoottori
Hybridi vääntömomentti:	398 Nm
Hybridi teho:	149 hp ja 171 kW
Akkutyyppe:	Litiumioni
Akun kapasiteetti:	18,4 kWh
Toimintasäde:	85 km
Polttomoottori:	1,5 l
CO ₂ -päästöt:	32 $\frac{g}{km}$

Malibu HEV 2016

Malibu HEV-hybridissä on 1,8 litran moottori ja 182 hevosvoimaa. Moottori pystyy tuottamaan noin 376 Nm:n väännön. Auton etuna on hyvä polttoainetalous, sillä se kuluttaa vain $5 \frac{l}{100km}$ kaupunkiajossa ja $5,1 \frac{l}{100km}$ maantiellä. Autossa ei ole vaihteistoa eli sähkömoottori antaa autolle vääntömomentin. Akusto on litiumioni, ja kapasiteetti on 1,5 kWh. (30, s. 218.)

Erään artikkelin mukaan Chevrolet Sparkissa käytettiin vaihtosähköistä kestopagneetti-tahtimoottoria 2011 (33). Voidaan siis olettaa, että nykyiset Chevroletin autojen kestopagneettimoottorit ovat myös vaihtosähköversioita, mutta sitä ei voi sanoa varmaksi. Kuvassa 15 nähdään Malibu kestopagneettimoottorin rakenne.



Kuva 15. Chevrolet Malibu -kestopagneettimoottorin rakenne (31).

Malibun sähkömoottorit ovat paremmin suunniteltuja vääntömomentin tuottamiseen, ja niissä on parempi hyötysuhde hybridiautokäyttöön. Sen moottorissa onkin käytetty harvinaisia raaka-aineita kestopagneetteihin. Malibussa ensisijaisena moottorina on polttomoottori ja sähkömoottori avustaa tarvittaessa. Auto on myös ensimmäinen Chevrolet, joka käytti EGHR-teknologiaa (Exhaust Gas Heat Recovery). (31.) Taulukossa 2 nähdään Malibu-hybridin tekniset tiedot.

Taulukko 2. Malibu hybridin ominaisuudet (30, s. 218; 31).

Sähkömoottori:	Kaksi AC kestopagneettimoottoria
Hybridi vääntömomentti:	376* Nm
Hybridi teho:	182 hv ja 136* kW
Akkutyyppe:	Litiumioni
Akun kapasiteetti:	1,5 kWh
Polttomoottori:	1,8 l

6.2 BMW

BMW on pyrkinyt löytämään keinoja pitää autojensa suorituskyvyn korkealla mutta silti käyttää vähemmän harvinaisia metalleja autojensa kestopagneetteihin (34). BMW on myös suunnitellut käyttävänsä i3- ja i8-automalleihinsa jotain näistä moottoreista: PSM, IPM, HSM, El.Ex.Sm (Electrically excited synchronous machine) ja ASM (35).

Esimerkiksi BMW:n i3-autossa sähkömoottori painaa 50 kg, ja sen teho on 125 kW eli $2,5 \frac{\text{kW}}{\text{kg}}$. Moottori kykenee korkeaan kierroslukuun 11 400 rpm. Vertailuna Nissanin Leaf 2011 vuosimallin auton moottori pystyi 80 kW:n teholla ja 58 kg:n painolla arvoon $1,38 \frac{\text{kW}}{\text{kg}}$. (34.) Voidaan siis päätellä, että BMW on saanut valmistettua kokoonsa nähden tehokkaan moottorin.

i8 Coupe PHEV 2020

Auton 2016 versio oli kolmesylinterinen 1,5-litrainen tuplaturbomoottori, jossa on 231 hevosvoimaa. Sähkömoottorissa on 131 hevosvoimaa eli yhteensä 362 hevosvoimaa. Kiihtyvyys 0-100 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ tapahtuu neljässä sekunnissa. Autossa on myös automaattivaihteisto kuudella vaihteella. (30, s. 217.) Tehoja ei ole malliin paljoa lisätty tämän jälkeen. Taulukossa 3 on auton 2020 version ominaisuudet.

Taulukko 3. i8 Coupe ladattavan hybridin ominaisuudet (36; 34; 37).

Sähkömoottori:	AC kestopagneettitahtimoottori
Sähkömoottori teho:	105 kW
Sähkömoottorin vääntömomentti:	250 kW

Hybridi teho yhteensä:	374 hv ja 275 kW
Huippunopeus sähköllä:	120 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$
Kiihtyvyys sähköllä 0-60 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$:	4,5 s
Hybridi keskimääräinen kulutus:	2,1-2,2 $\frac{\text{l}}{100\text{km}}$
Akkutyyppe:	Litiumioni
Akun kapasiteetti:	11,6 kWh
Auton massa:	1 610 kg
Toimintasäde sähköllä:	52-53 km
Polttomoottori:	1,5 l
Sylinterien määrä:	4 kpl
Huippunopeus:	250 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$
Kiihtyvyys 0-100 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$:	4,4 s
Polttomoottorin teho (kierrosnopeudella):	231 hv / 170 kW, 5800-6000 rpm;
Vääntömomentti (kierrosnopeudella):	320 Nm ja 3700 rpm
CO ₂ -päästöt:	48-49 $\frac{\text{g}}{\text{km}}$

6.3 Volvo

Volvo uskoo sähköautojen olevan tulevaisuus. Yritys onkin pyrkinyt liittämään jokaiseen uuteen autoon 2019 vuoden jälkeen sähkömoottorin. Volvolla oli jo 2017 monta hybridi-autoa myynnissä. (38.)

S90 Twin Engine T8 HEV 2018

Volvon S90 luksusautossa on kaksi sähkömoottoria, joista toinen on sijoitettu taka-akselille ja toinen on integroitu vaihteistoon. Vaihteiston sähkömoottori toimii myös auton polttomoottorin käynnistyksessä. Taulukossa 4 on S90-hybridin ominaisuudet.

Taulukko 4. S90 Twin Engine T8 ladattavan hybridin ominaisuudet (38; 39).

Sähkömoottori:	kaksi AC kestopagneettitahtimoottoria
Sähkömoottori teho:	Edessä, 46 hv
Hybridi teho yhteensä:	400 hv
Hybridi vääntömomentti:	640 Nm
Akkutyyppe:	Litiumioni

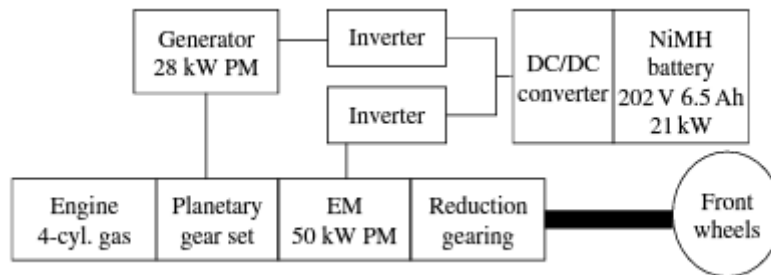
Akun kapasiteetti:	10,4 kWh, josta 8,0 kWh käytettävissä
Hybridi toimintasäde yhteensä:	1 090 km
Toimintasäde sähköllä:	31 km
Hybridi keskimääräinen kulutus:	$2,0 \frac{l}{100km}$
Polttomoottori:	2 l, turboahdettu ja tehostettu moottori
Vaihteisto:	Automaatti, 8-vaihdetta
Sylinterien määrä:	4
Huippunopeus:	$249 \frac{km}{h}$
Kiihtyvyys 0-100 $\frac{km}{h}$:	5,1 s
Polttoainesäiliön tilavuus:	60 l
Vetotapa:	Neliveto

6.4 Toyota

Toyota teki ensimmäisen massatuotannossa olleen nykyaikaisen hybridin Priusin vuonna 1997. Toyota Prius käyttää planeettavaihteistoa CVT:llä. Bensiinimoottori on kiinnitetty planeettavaihteiston kannattimeen, kun taas generaattori on yhdistettynä aurinko vaihteeseen. Rengasvaihte on kytketty sivuvälitykseen niin kuin myös sähkömoottori. Planeettavaihteisto toimii myös voiman/väännön jakajana. Normaalisissa toiminnassa rengasvaihteen nopeus on kulkuneuvon nopeuden määrittelemä, kun taas generaattorin nopeutta voidaan kontrolloida, niin että polttomoottori on optimaalisella toiminta alueellaan.

Prius Prime PHEV 2020

Ennen vuotta 2018 vanhan Prius Primen 2,1 kW:n nikkelimetallihydridiakusto latautui generaattorin toimesta auton rullatessa eteenpäin hidastuvassa liikkeessä. Akusto latautuu myös polttomoottorin toimesta. Polttomoottori meni myös pois päältä, kun ajetaan hitaalla nopeudella. (12, s. 21.) Kuvassa 16 nähdään Priusin voimansiirto, jossa on polttomoottori ja sähkömoottori.



Kuva 16. Toyota Prius voimansiirto (12, s. 23).

Komponentit kuvassa 16 toimivat niin, että alennusvaihte on kiinni mekaanisesti pyö-
rissä ja sähkömoottorissa ja se pystyy kytkemään moottorin päälle tai pois tilanteen mu-
kaan. Sähkömoottori on kiinni planeettavaihteistossa ja invertterissä. Planeettavaihteisto
on kiinni sähkömoottorin lisäksi polttomoottorissa ja generaattorissa. Näin kokoonpano
pystyy hyvin säätämään energian kulutusta ja tehon käyttöä sopivaksi. Auto tunnetaan
nykyään nimellä Prius Prime. Taulukossa 5 on Prime ladattavan hybridin ominaisuudet.

Taulukko 5. Prius Prime ladattavan hybridin ominaisuudet (12, s. 23; 40; 41).

Sähkömoottori:	AC kestopagneettitahtimoottori
Sähkömoottori teho:	53 kW
Sähkömoottori vääntömomentti:	163 Nm
Sähkömoottorin suurin jännite:	600 V
Akkutyypä:	Nikkelimetallihydridiakku (NiMH)
Akun kapasiteetti:	6,5 kWh
Sähköjärjestelmän jännite:	201,6 V
Auton massa:	1 845 kg
Polttomoottori:	1,8 l
Sylinterien määrä:	4 kpl
Polttomoottori teho:	122 hv ja 90 kW
Polttomoottori vääntömomentti:	142 Nm
Vaihteisto:	e-CVT
Huippunopeus:	180 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$
Kiihtyvyys 0-100 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$:	10,9 s

6.5 Honda

Yrityksen sivuston perusteella on nähtävissä, että Honda on siirtymävaiheessa uudentyyppisiin autoihin. Sen lähestymistapa on ollut siirtyä pikkuhiljaa hybridautoihin, ja se on myös kehittänyt polttokennoteknologiaa (42). Yrityksellä on jo sähkökäyttöisiä sähköautoja ja myös oma sähköllä toimiva urheiluauto. Seuraavaksi Honda aikoo tuoda kaksi sähköautoa lisää markkinoille, ja se onkin tehnyt General Motorsin kanssa yhteistyösopimuksen asiasta. Kulkuneuvot tulisivat markkinoille ainakin Kanadassa ja Amerikassa vuonna 2024. (43.)

Acura NSX HEV 2020

Acurassa on 3,5 litran V6 turbo polttomoottori 573 hevosvoimalla, minkä lisäksi siinä on kolme sähkömoottoria avustamassa. Kaksi sähkömoottoria on etuakselilla ja yksi polttomoottorin ja yhdeksän vaihteisen vaihteiston välissä. Auton vaihteistossa on kaksi kytkintä. NSX kiihtyy nopeuteen 0-100 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ nopeuteen alle neljässä sekunnissa tai nopeuteen 70 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ hiljaisesti pelkällä sähköllä. (30, s. 214.)

Auto ei ole ladattava hybridi vaan sen kolme sähkömoottoria on tehty avustamaan polttomoottoria tarvittaessa. Niiden ansiosta auto ei myöskään kuluta kaupunkiajossa paljoa polttoainetta, koska siinä on regeneroiva jarrutus. Eturenkaissa olevat sähkömoottorit voivat tehdä auton kääntyessä negatiivista tai positiivista vääntömomenttia. Acuran kiihdyttäessä sähkömoottorit tekevät alussa suurimman osan työstä. (44.) Taulukossa 6 näkyy Acura NSX -hybridin ominaisuudet.

Taulukko 6. Acura NSX -hybridin ominaisuudet (44; 45).

Sähkömoottori (etupyörä) 1:	Kestomagneettitahtimoottori
Sähkömoottori (etupyörä) 2:	Kestomagneettitahtimoottori
Sähkömoottori (V6:n ja vaihteiston välissä) 3:	Kestomagneettitahtimoottori
Sähkömoottori teho (etupyörä) 1:	27 kW ja 36 hv
Sähkömoottori teho (etupyörä) 2:	27 kW ja 36 hv
Sähkömoottori teho 3:	35 kW ja 47 hv

Auton paino:	1 725 kg
Akkutyyppe:	Litiumioni
Akun kapasiteetti:	1,3 kWh
Sähkömoottorien sijainnit:	2 edessä ja 1 keskiakselilla
Polttomoottori:	3.5 l, V6, bensiini
Polttomoottori teho:	373 kW ja 573 hv
Polttomoottori vääntömomentti:	476 Nm
Maksimikierronäärä:	6500 rpm
Toimintasäde:	524-549 km
Vaihteisto:	Automaattinen manuaali, 9 vaihdetta
Kiihtyvyys 0–100 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$:	Alle 4 s
Vetotapa:	Neliveto

7 Sähkökäyttöiset dieselhybridit (HEV)

Dieselhybridi on käytännössä tavallinen hybridauto, joka eroaa vain dieselmoottorillaan muista hybrideistä (12, s. 163). Dieselhybridi voi olla mikä tahansa hybridityypeistä eli se voi olla esimerkiksi hydraulinen tai se voi käyttää polttokennoja (12, s. 15). On hyvin tunnettua, että dieselmoottori on tehokkaampi kuin bensiinimoottori. Vaikuttaisi päällisin puolin siltä, että kun yhdistetään dieselmoottori ja sähkömoottori, saamme molemmista parhaat puolet käyttöön.

7.1 Dieselmoottorin hyödyt sähköajoneuvoissa

Dieselmoottorin puristussuhde voi olla 15-20 verrattuna bensiinimoottorin puristussuhteeseen 9-12. Suurempi puristussuhde tarkoittaa kuitenkin, että auton täytyy olla painavampi kestääkseen suuremmat moottorin paineet (12, s. 163). Pienemmällä nopeuksilla dieselmoottori on parempi polttoainetalouden suhteen, koska ei ole kaasuventtiilejä vältytään siihen liittyviltä tehohäviöiltä. Lisäksi kasviuonekaasu- eli hiilidioksidipäästöt ovat pienemmät. Pienillä nopeuksilla ajettaessa myös liikkeelle lähdeäessä dieselautot vievät voiton, sillä niiden moottorin lähdössä oleva vääntömomentti on suurempi. Dieselmoottorit sisältävät vähemmän osia, joten ne ovat myös kokonaisuudessaan luotettavampia, sillä niissä ei ole myöskään polttoaineensytytysjärjestelmää. (12, s. 163.)

Dieselmoottorin ollessa tehokkaampi kuin bensiinimoottori johtaa tämä pienempään moottorin kokoon ainakin ajettaessa pienemmillä nopeuksilla (12, s. 163). Kävisi siis järkeen käyttää dieselmoottoria hybridautossa kokonsa ja hyötysuhteensa puolesta. Dieselhybridi sopisi erityisesti rinnakkaishybridikokoonpanoon, jossa sekä sähkö- että dieselmoottori olisivat molemmat nostamassa suorituskykyä tehossa ja kiihtyvyydessä (12, s. 163).

Sarjahybridiratkaisussa taas tehokkuus ei olisi ongelma, koska työntövoima tehdään vain sähkömoottorilla. Erityisesti dieselbussit hyötyisivät hybriditeknologiasta, sillä niillä jatkuva pysähtyminen ja lähdöstä kiihdyttäminen ovat yleisiä. Busseilla on erityinen tarve hyvälle kiihtyvyydelle pienissä nopeuksissa. Voimme todeta dieselhybridien olevan ideaalisia mm. busseihin ja kuljetusautoihin. Yhtä lailla niitä voi käyttää erittäin raskaisiin ajoneuvoihin, kuten kaivosajoneuvoihin, juniin ja niin edelleen sarjahybridiratkaisulla. Tämä poistaa tarpeen raskaalle vaihteistolle, jossa olisi vaihdelaatikko ja vääntömomentin muunninjärjestelmä.

Dieselmoottorissa on vähemmän osia, joten se tarvitsee vähemmän huoltoa. Mitä enemmän halutaan tehoa, sitä suurempi merkitys on moottorin koolla ja hinnalla, joten dieselhybridillä on etu verrattuna kilpailijaansa. Voidaan päätellä, että moottorilta tehoa vaadittaessa on määriteltävissä oleva raja, jonka yli mentäessä dieselhybridit ovat suhteessa parempi valinta kuin bensiinihybridimoottori. Näitä hyötyjä ovat hinta ja polttoainetalous sekä laitteiston elinikä.

Dieselhybridautojen laskutoimituksissa tarvittavat kaavat yksiköiden muunnoksiin löytyvät kappaleesta 5: Sähkökäyttöiset hybridautot. Seuraavassa luvussa esitellään Audin ja Mercedes-Benzin dieselhybrideitä.

7.2 Audi

Audi on tehnyt useamman dieselhybridin, joista tässä esitellään Q7. Audi on ainakin pyrkinyt diesel hybrideillä saamaan polttoaineenkulutuksen alas. Audi käyttää hybridi- ja sähköautoissaan ainakin kestopagneettitahtimoottoreita.

Q7 e-tron PHEV 2020

Luksusauto Q7 e-tron kilpailee Volvon, Porsche ja BMW:n vastaavien mallien kanssa. Sähkömoottori on integroitu vaihteistoon. Q7:lle lupailtiin alhaista polttoaineenkulutusta. (46.) Auto on siitä poikkeava, että se on sähkökäyttöinen dieselhybridi.

Audi on selkeästi yrittänyt saada kulutuksen pieneksi ja onkin ilmoittamansa lukeman perusteella onnistunut siinä. Auton lämpöpumppu kierrättää moottorin kuumaa ilmaa, joten sisäilman tuuletin ei kuluta sähköä. Taulukossa 7 on lueteltu Q7-hybridin ominaisuudet.

Taulukko 7. Audi Q7 e-tron 2020 ladattavan hybridin ominaisuudet (46; 47; 48).

Sähkömoottori:	AC kestmagneettitahtimoottori (PSM)
Hybridi teho (kierrosnopeudella):	231 hv ja 170 kW, 3250–4500 rpm
Hybridi vääntömomentti (kierrosnopeudella):	500 Nm, 1750–3250 rpm
Toimintasäde sähköllä:	Noin 43 km (bensiiniversio)
Sähköjärjestelmä:	48 V
Akkutyypä:	Litiumioni
Akun kapasiteetti:	17,3 kWh ja 308 V
Akun paino:	202 kg
Polttomoottori:	3,0 l, V6, turboahdettu dieselmoottori
Dieselmoottorin sylinterien määrä:	6 kpl
Vaihteisto:	Automaatti, 8 vaihdetta
CO ₂ -päästöt:	235–214 $\frac{g}{km}$
Yhdistetty kulutus:	9,0–8,2 $\frac{l}{100km}$
Auton massa:	2 240 kg
Maksimihuippunopeus:	229 $\frac{km}{h}$
Kiihtyvyys 0–100 $\frac{km}{h}$:	7,1 s
Vetotapa:	Neliveto

7.3 Mercedes-Benz

Mercedes-Benzin C- ja E-luokan hybrideissä on neljä erilaista asetusta: Hybrid, jossa on kaikki ominaisuudet käytössä, E-Mode, jokakäyttää ensisijaisesti sähkömoottoria ja vasta enemmän tehoa tarvittaessa auttaa sähkömoottorilla, E-Save, jossa asetuksella akku ei kulu, Charge-asetuksella, auton akkua ladataan ajamisen aikana (49).

E 300 de EQ Power PHEV 2018

E 300 de EQ Power on käytännössä luksusta ja se on suunniteltu täyttämään varsinkin johtoasemissa olevien henkilöiden tarpeet. Lisäksi autossa on tarvittaessa vetokykyä 2 100 kg:n kuormalle. Auton akussa käytettiin litium-rauta-fosfaatti (LiFePo) yhdistelmää, mutta se korvattiin litium-mangaani-koboltilla (Li-NMC), joka lisäsi akkukapasiteettia 22 Ah:sta 37 Ah:iin. (50.) Taulukossa 8 on lueteltu E 300 de -auton ominaisuudet.

Taulukko 8. E 300 de EQ Power ladattavan hybridin ominaisuudet (50).

Sähkömoottori:	Kestomagneettitahtimoottori
Teho (kierrosnopeudella):	194 hv ja 143 kW, 3800 rpm
Vääntömomentti moottori:	700 Nm
Akkutyyppe:	Litiumioni
Akun kapasiteetti:	13,5 kWh
Sähkömoottori teho:	90 kW
Hybridi teho yhteensä:	225 hv ja 306 kW
Huippunopeus sähköllä:	130 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$
Toimintasäde sähköllä:	54 km
Yhdistetty sähkönkulutus:	19,7–18,7 $\frac{\text{kWh}}{100\text{km}}$
Polttomoottori:	2 l, dieselmoottori
Dieselmoottorin sylinterien määrä:	4
Vaihteisto:	9G-TRONIC, 9 vaihdetta
Yhdistetty polttoaineen kulutus:	1,6 $\frac{\text{l}}{100\text{km}}$
CO ₂ -päästöt:	44–41 $\frac{\text{g}}{\text{km}}$

Huippunopeus:	$250 \frac{km}{h}$
Kiihtyvyys 0–100 $\frac{km}{h}$:	5,9 s

8 Sähköauton määritelmä (EV)

Autossa, joka on sataprosenttinen sähköauto, on vain yksi energianlähde, akusto tai polttokenno. Tällä hetkellä täyssähköauto, jossa on polttokenno, ei ole kovin taloudellinen hinta-laatusuhteeltaan, eikä myöskään kokonsa ja painonsa osalta. Täyssähköautoissa, joissa työntövoiman tuottaa sähkömoottori, ei ole tarvetta polttomoottorille, polttoaine ruiskuille, moottorin ohjaimille tai muille osille, jotka liittyvät vaihteistoon ja moottoriin. Osien määrän ollessa vähäinen, moottorista tulee myös luotettavampi. (12, s. 36.)

Sähköauto on päällisin puolin päästötön, mutta todellisuudessa ei kokonaan, sillä maapallon laajuudessa mittakaavassa mikään ei ole täysin päästötöntä. Käytännössä saastuttaminen on siirretty tässä tapauksessa autosta muualle. Muun muassa sähköautojen valmistaminen ja resurssien louhiminen saastuttavat.

Sähköautot ovat erittäin hiljaisia, jopa siinä määrin, että autoihin on laitettu keinotekoinen ääni, jotta ihmiset huomaavat ne helpommin. Sähköautoon ei myöskään tarvitse vauhtipyörää. Mikäli akkutekniikka ja polttokennoteknologia olisivat täysin kehittyneet ominaisuuksiltaan, kuten energiakapasiteetin ollessa parempi, vaikka akut olisivat pienemässä koossa, teho olisi suurempi, tekniikka olisi kevyempää ja hinta olisi edullisempi. Siinä tapauksessa hybridautot olisivat huono valinta ja käytännössä tarpeettomia. Sähköauton moottorin tehokkuus on noin 90 %. Tehon tullessa auton pyöriin jäljellä on vielä noin 70 %, kun vastaava luku on polttomoottori autossa 5–10 %. (12, s. 36.)

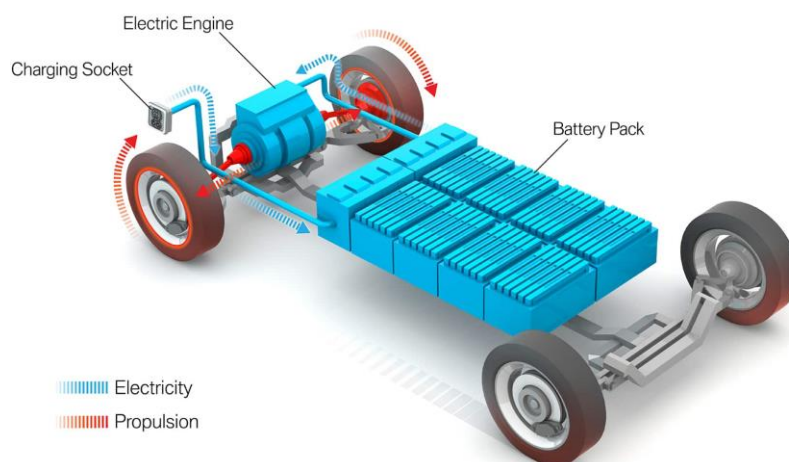
Miksi valita sähköauto? Tänä päivänä puhutaan enemmän hybrideistä, joista onkin tullut erityisen suosittuja. Tosin niiden kokoonpano on monimutkainen, sillä niissä on kahdenlaiset työntövoiman lähteet. Täyssähköauto on verrattaessa yksinkertainen, koska siinä on vain yksi voimanlähde, joko akusto tai polttokenno. On mahdollista valmistaa täyssähköauto, jossa on sekä akusto että polttokennot, mutta se ei kuitenkaan ole nykytekniikalla taloudellisesti kannattava vaihtoehto, eikä myöskään koon tai painon suhteen.

Koska sähköauto ei tarvitse polttomoottoria, siinä ei tarvita polttoainesuuttimia, moottorin monimutkaisia ohjauslaitteita eikä kaikkia muita vaihteistoon tai moottoriin liittyviä osia.

Sähköauto on luotettavampi, koska siinä on niin paljon vähemmän osia. Sähköauto on päästötön, mutta ei tietenkään suuremmassa mittakaavassa, sillä kaikki kulkuneuvot saastuttavat, jossakin määrin, kun otetaan kaikki tekijät huomioon. (12, s. 36.)

Polttomoottorit ovat mäntäkoneita, joissa voiman tuottaminen tapahtuu sykkivästi ja tämän voiman epätasaisuutta pehmittää vauhtipyörä. Vauhtipyörä poistaa vääntömomentista tärinän. Sähkömoottori pystyy sen sijaan tuottamaan tasaista vääntömomenttia suoraan, joten sitä ei tarvitse tasoittaa vauhtipyörällä. Tämä laskee auton valmistuskustannuksia ja painoa.

Polttomoottorin hyötysuhde on suunnilleen 30–37 % bensiinille ja noin 40 % dieselille. Sähköautoissa akkujen energian saapuessa pyörille kokonaishyötysuhde on jopa 70 %. (12, s. 36.) Sähkömoottorista saadaan siis huomattavasti enemmän tehoa irti. Kuvassa 17 nähdään sähköauton tavanomainen toimintaperiaate.



Kuva 17. Sähköauton perustoimintaperiaate (51).

Kuvan 17 autossa akut syöttävät sähkömoottorille sähkövirtaa. Akkujen sähköenergia tulee tasavirtana, joten sähkö muunnetaan yleensä vaihtosähköksi ennen sähkömoottorille syöttämistä. Sähkömoottori muuttaa sitten sille tulevan energian mekaaniseksi, joka liikuttaa auton pyöriä.

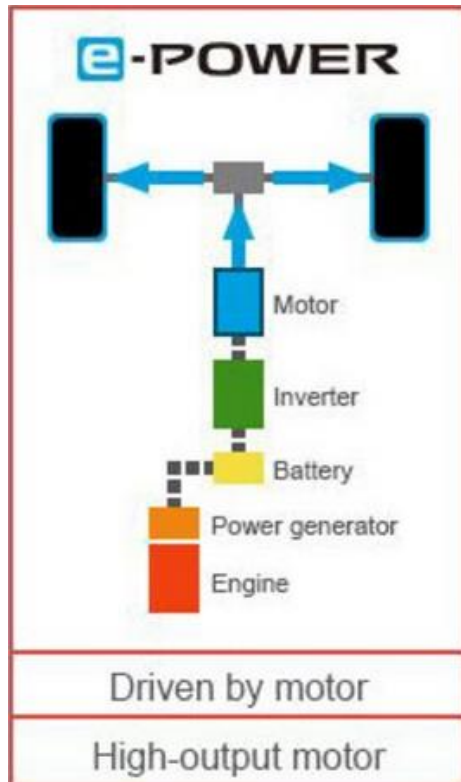
9 Sähköautot (BEV)

Täyssähköauto eli pelkästään akkuja käyttävä kulkuneuvo on autotyyppi, joka tulee todennäköisesti tulevaisuudessa yleistymään. Sähköautoja on nykyään lähes kaikilla autonvalmistajilla. Parhaimmat sähköautot ovat jo päässeet ja jäljessä tulevat alkavat myös vähitellen pääsemään yli 500 km matkoihin yhdellä latauksella.

Seuraavassa kappaleessa käsitellään Nissanin sähköautoja. Yksiköiden muunnoksien kaavat löytyvät kappaleesta 5: Sähkökäyttöiset hybridautot. Seuraavissa luvuissa käsitellään sähköautojen moottoreita ja tietoja.

9.1 Nissan

Nissanilla on suunnitelmia tuoda markkinoille 12 uutta hybridi- ja sähköautoa vuoteen 2022 mennessä. Yrityksen tahtona on käyttää e-power-teknologiaa, jolla ihmiset saavat sähköautokokemuksen mutta ilman pelkoa auton jäämisestä tielle. (52.) Kuvassa 18 nähdään Nissanin tulevaisuuden suunnitelma käytettäväksi sähköautoissa.



Kuva 18. Nissanin e-Power-konseptin sähköauto, johon liitetään polttomoottori (52).

Autoissa tulisi olemaan pieni polttomoottori, joka lisäisi sähköauton kantamaa, ainoastaan lataamalla akkuja. Gareth Dunsmore, Nissan-sähköautojen Euroopan-johtaja sanoi Note-autoa Japanin ilmiömäisen myyntiin perusteella ”dieselautojen tappajaksi”. (52.)

Leaf EV 2012-2016

Leafin toimintasäteenä on kesäoloissa maksimissaan 250 km, jossa on tehoa SV- ja SL-versioissa 30 kWh ja keskiverto toimintasäde 200 km. Automalli on ollut markkinoilla vuodesta 2010 lähtien. (30 s. 162–165.) Auton toimintasädettä pystyy kaupunkiajossa pidentämään paljon, sillä regeneroiva ajo pääsee silloin kunnolla vauhtiin. Nissanin Leafissä on panostettu hyvään ja tasaiseen ajotuntumaan. Auto on myös erittäin hiljainen. (30 s. 163-165.)

Nissan Leaf -henkilöauton upotetuin kestmagneetein varustetun synkronimoottorin magneetit koostuvat neodyymi-rauta-booriyhdisteestä (NdFeB). Neodyymi kuuluu materiaaliin kevyt harvinainen maan elementti (LREE). Sähkömoottorissa on tehoa 80 kW. (53.) Kuvassa 19 on Nissanin IPM-moottori osissa.



Kuva 19. Nissan Leaf IPM-moottori purettuna (54).

Nissanin moottorin etusuoja, staattori, roottori ja takasuoja ovat kuvassa 19. Upotettu kestmagneetti synkronimoottorin (IPM) jännite on lähellä nykyaikaisien sähköautojen tavanomaista lukemalla 345 V. (54.) Taulukossa 9 nähdään Leafin tekniset tiedot.

Taulukko 9. Leaf -sähköauton ominaisuudet (53; 54).

Sähkömoottori:	EM61 -tyyppinen, AC upotettu kestmagneetti synkronimoottori (IPM)
Teho:	80 kW
Vääntömomentti:	280 Nm
Maksimikierto määrä:	10 390 rpm
Akkutyyppe:	Litiumioni
Akun kapasiteetti:	24 kWh
Akun nimellisjännite:	345 V
Toimintasäde:	135 km
Moottorin paino:	58 kg

9.2 Porsche

Porsche päätti tehdä sähköauton, joka pystyy kilpailemaan Teslan autojen kanssa. Alun perin tätä Porschea kutsuttiin Mission E -malliksi, mutta nykyään se tunnetaan nimellä Porsche Taycan Turbo S. Nimi Taycan tarkoittaa vilkasta nuorta hevosta, jolla viitataan Porschen logoon, jossa poni hypähtelee. Taycanista on myös olemassa vähemmän tehokas malli. Moni arvaili, että autosta tulisi Porschen yksi kalleimmista, mutta yritys päätti, että koska se kilpailee Teslan lippulaiva-auton kanssa, sen pitää olla sopivamman hintainen, joten hinta on korkeintaan 104 000 dollaria. (55.)

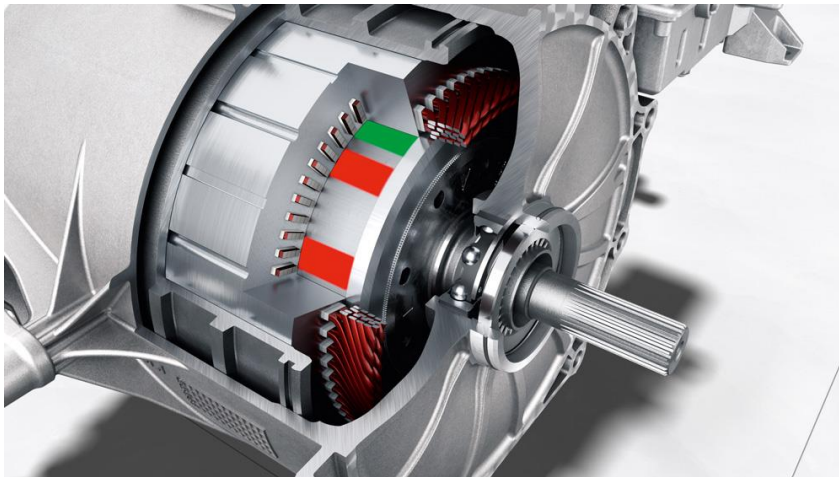
Taycan Turbo S EV 2020

Porsche ei halunnut päätyä kauaksi urheilullisilta juuriltaan suunnitellessaan sähköä käyttäviä Taycan-mallejaan. Yritys teki huiman harppauksen kaksinkertaistamalla 400 V:n sähköautonsa sähköjärjestelmän 800 V:n järjestelmään. Muut autonvalmistajat käyttävät korkeintaan 400 V:n järjestelmää. (56.) Taulukossa 10 on ladattavan Taycan-hybridin ominaisuudet.

Taulukko 10. Taycan Turbo S -sähköauton ominaisuudet (56; 57).

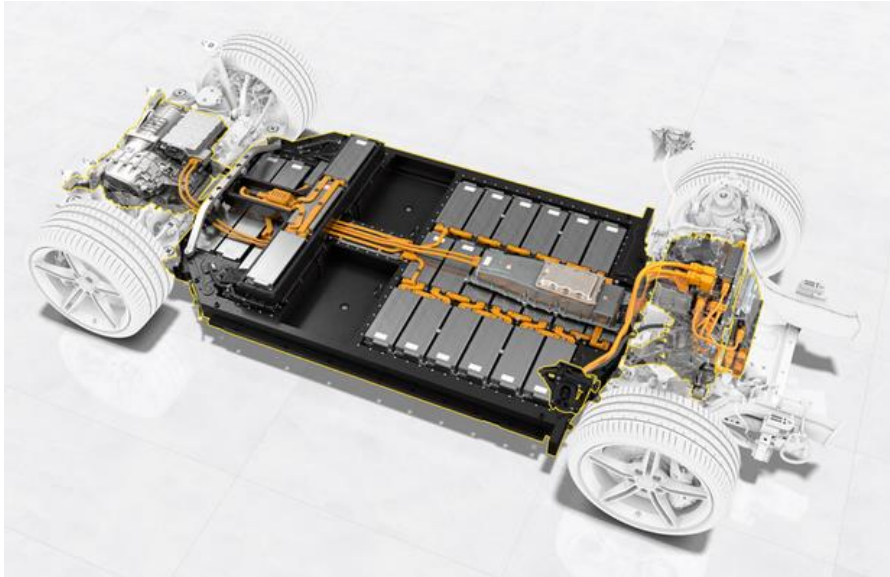
Sähkömootorit:	Kaksi kestopagneettitahtimoottoria
Teho:	616 hv / lisäteholla 751 hv
Vääntömomentti:	1049* Nm
Huippunopeus:	258* $\frac{\text{km}}{\text{h}}$
Akkutyyppe:	Litiumioni
Akun kapasiteetti:	93,4 kWh
Sähköjärjestelmän jännite:	800 V
Sähkömootorien sijainnit:	Edessä ja takana
Toimintasäde:	386-410 km
Vaihteisto 1, edessä:	1 vaihde
Vaihteisto 2, takana:	2 vaihdetta
Moottorin paino (edessä):	76 kg
Moottorin paino (takana):	170 kg
Kiihtyvyys 0-100 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$:	Noin 2.6* s
Vetotapa:	Neliveto

Taycanin 800 V:n korkea jännitearvo lisää auton tehokkuutta ja helpottaa laskemaan akkujen latausaikoja, sillä järjestelmä pystyy ottamaan vastaan enemmän sähköenergiaa kerralla. Taycan S:ää -pystyy lataamaan 270 kW:n energiavirralla. Tämä tarkoittaa, että akun lataus 5 %:n tasosta 80 %:iin tapahtuu noin 23 minuutissa tehokkaalla tasasähkökalaturilla. (56.) Kuvassa 20 Taycanin toinen kestmagneettitahtimoottoreista.



Kuva 20. Taycan Turbo S sähköauton kestmagneettitahtimoottorin läpileikkaus (56).

Taycanissa käytetään kestmagneettimoottoria sekä etu- että taka-akselilla. Käytetyn moottorin ansiosta autosta on saatu pienempi, kevyempi ja tehokkaampi. Edessä oleva sähkömoottori painaa noin 76 kg ja iso sähkömoottori taka-akselilla 170 kg. Isossa moottorissa on 449 hv ja vääntöä on 550 Nm, mutta nappia painamalla lukema nousee 610 Nm:iin. (57.) Kuvassa 21 on urheiluauton tehontuoton kokoonpano.



Kuva 21. Taycan S Turbo S:n tehontuotto kokoonpano, jossa on 800 V (56).

Kuvassa 21 nähdään edessä pieni sähkömoottori, jonka mukana on yhden vaihteen vaihteisto ja takana iso sähkömoottori, jonka vaihteistossa kaksi vaihdetta. Ison moottorin toinen vaihde menee päälle, kun kaasupoljinta painetaan enemmän, jolloin auto kiihtyy huomattavasti nopeammin. Taycanissa on myös viisi ajomoodia (57).

9.3 Mercedes-Benz

Iso-Britannian Autocar-lehden mukaan Mercedes-Benz aikoo tuoda neljä uutta sähköautoa markkinoille vuoteen 2021 mennessä. Kaksi autoista on sedanmalleja, ja kaksi on kaupunkimaastureita. Päätökseen valmistaa paljon erilaisia sähköautoja vaikutti varmasti Teslan S-malli, joka oli vienyt vuonna 2016 paljon sähköautomarkkinoita muilta autonvalmistajilta. Ennen näitä Mercedes-Benz oli tuomassa markkinoille omaa vedyllä toimivaa polttokennoautoa. (58.)

Vision Mercedes-Maybach Ultimate Luxury EV 2018

Vision Mercedes-Maybach Ultimate Luxury autoa pystyy lataamaan tasasähkölaturilla 350 kW:n teholla, mikä tarkoittaa sitä että 5 minuutin lataaminen lisää toimintasädettä

noin 100 km. Autossa on neljä pientä kestopagneettimoottoria, joista tulee kuitenkin yhteensä suuri teho 750 hv. Vision on tarkoitettu vain näytösautoksi, mutta se havainnollistaa sähkömoottoriensa osalta, millaisia ratkaisuja autoissa voi tehdä. (59.) Taulukossa 11 on Vision Mercedes-Maybachin ominaisuudet.

Taulukko 11. Vision Mercedes-Maybach -sähköauton ominaisuudet (59; 60).

Sähkömoottori:	4 pientä kestopagneettimoottoria
Teho:	550 kW ja 750 hv
Huippunopeus:	250 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ (rajoitettu)
Akun kapasiteetti:	80 kWh (kokonaan käytettävissä)
Toimintasäde:	500* km
Moottorin paino:	kg
Kiihtyvyys 0–100 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$:	4 s
Vetotapa:	Neliveto

9.4 Renault

Renault on menestynein sähköautojen valmistaja Euroopassa. Lähes joka neljäs myyty henkilöauto Euroopassa on Renault. Yrityksellä on suunnitelmia, että sillä olisi 8 sähköautoa ja 12 hybridiä vuoteen 2022 mennessä. Renault yrittää lisäksi parantaa asiakkaiden onneksi eniten myytyjen mallien toimintasädettä, joihin kuuluu myös sähköauto ZOE. (61.)

ZOE R135 EV 2020

Renault ZOE:ssa sähkömoottori on auton etuosassa, joten se on tavallinen sähkökäyttöinen henkilöauto (62). Siitä huolimatta auto kiihtyy moottoritiellä hyvin vauhdista 80 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ nopeuteen 121 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ noin 7,7 sekunnissa. Lukema on parempi kuin auton edellisellä sähkömoottorilla, sillä auto oli uudella moottorilla 2,2 sekuntia nopeampi kuin ennen. (63.) Taulukossa 12 on ZOE R135:n ominaisuudet.

Taulukko 12. ZOE R135 -sähköauton ominaisuudet (62; 64; 65; 66).

Sähkömoottori:	Harjallinen vierasmagnetoitu tahtimoottori, R135
Teho:	100 kW ja 135 hv
Vääntömomentti:	245 Nm
Maksimi kierrosluku:	11 163 rpm
Akkutyyppe:	Litiumioni
Akun kapasiteetti:	54,66 kWh, josta käytettävissä 52 kWh
Akun paino:	326 kg
Sähköjärjestelmän kapasiteetti:	400 V
Sähkömoottorien sijainnit:	Edessä
Toimintasäde:	395 km
Vaihteisto:	Automaatti, yksi vaihde
Huippunopeus:	140 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$
Kiihtyvyys 0–100 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$:	9,9 s
Vetotapa:	Etuveto

9.5 Audi

Audilla on seuraavana suunnitelmassa haastaa Porschen Taycan-sähköauto uudella e-tron GT -urheiluautolla (56). Uuden e-tronin lisäksi Audi suunnitteli vuonna 2017 tuoda markkinoille vuodelle 2020 kaksi muutakin automallia, joista vain toinen on sähköllä toimiva hybridi Q8, joka on myös kaupunkimaastoauto (67).

Audi e-tron 55 quattro EV 2020

Audi e-tronissa on pieni induktiomoottori edessä ja iso auton taka-akselilla. Kulkuneuvossa on myös sähköinen turboahdin. Induktio-moottorit valittiin, koska silloin on edullista kytkeä akseli irti, mikä poistaa vastusta, kun toinen moottori on vapaalla. Järjestelmä on myös niin hienostunut, ettei kuljettaja huomaa, milloin moottorit jarruttavat ja milloin itse jarrut. Autossa on myös pikalataus, joka lataa akut 0–80 % noin 27 minuutissa 150 kW:n tasasähkö pikalaturilla. (56.) Taulukossa 13 on e-tronin ominaisuudet.

Taulukko 13. e-tron 55 quattro -sähköauton ominaisuudet (56; 68).

Sähkömoottori 1 (takana):	Induktio-moottori, koaksiaalinen
---------------------------	----------------------------------

Sähkömoottori 2 (edessä):	Induktiomoottori, akselin kanssa yhden-suuntainen
Teho 1:	140 kW ja 188* hv
Teho 2:	125 kW ja 168* hv
Vääntömomentti 1:	314 Nm
Vääntömomentti 2:	247 Nm
Maksimitehot ja -vääntömomentit yhteensä:	300 kW ja 664 Nm
Huippunopeus:	200 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$
Akkutyyppe:	Litiumioni, vesijäähdytys
Akun kapasiteetti:	95 kWh, käytettävissä siitä 86,5 kWh
Akun paino:	700 kg
Sähköjärjestelmän jännite:	396 V
Sähkömoottorien sijainnit:	Edessä ja takana
Toimintasäde:	436 km
Kiihtyvyys 0–100 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$, (kiihdytys moodissa):	5,7 s
Vetotapa:	Neliveto

9.6 Tesla

Tesla oli alkuperäiseltä nimeltään Tesla Motors, ja se on yritys, joka nousi perustamisensa jälkeen huipulle alle 20 vuodessa. Autojen erikoisuutena on suuri teho ja hiljaisuus. Usein suuren tehon autot pitävät kovaa ääntä, mutta Teslan autot ovat sitäkin hiljaisempia. Pienitehoisemmissa autoissa kuten S 70 ja S 70D on paljon tavaratilaa, jopa 1645 litraa. (30, s. 180–181.)

Teslan tulevista autoista Roadster edustaa sähköautojen uusinta teknologiaa. Se on auto, jonka Elon Musk lupaa lentävän joku päivä. Lisäksi hän lupaa liittää siihen raketit. Kaikesta innostuneisuudesta huolimatta autossa voi mennä vielä ainakin vuoteen 2021, ellei pidempään. Lisäksi autoa tuskin tullaan valmistamaan muuta kuin vain 10 000 kpl vuodessa. (69.)

Teslan sähköautot tukevat myös pikalatausta, minkä lisäksi superlatureita on maailmalla jo yli 16 000 kpl, joten nopeaa latauspaikkaa ei tarvitse enää paljoa etsiä (70). Myös

Suomesta löytyy Teslan latauspaikkoja ympäri maata. Sähköautot ottavat polttomoottoreita kiinni monelta taholta.

Vuonna 2018 Tesla vaihtoi sähköautojensa strategiaa tuomalla markkinoille kestopagneettimoottorilla varustetun Model 3:n ja vaihtamalla ainakin Model X:ään vaihtosähköllä toimivan induktimoottorin kestopagneettimoottoriin (71). Teslan päämoottori suunnittelija Konstantinos Laskaris sanoi, että kestopagneettimoottori täytti paremmin suorituskyky ja tehokkuus vaatimukset. Tulevaisuudessa kompromissi moottorikustannusten, vaihteluvälin ja akkujen välillä määrää, mitä teknologiaa käytetään. (72.)

Induktimoottoriin ei tarvita kalliita kestopagneetteja, koska se luo oman sähkömagneettikenttensä induktion avulla. Näin ollen Tesla säästi aikaisemmin induktimoottorin valinnalla, jonkin verran kustannuksissa. Moottorin ytimessä on kolme käämiä metalliytimen ympärillä. Luotu magneettikenttä voidaan laittaa päälle tai pois sekä sen suuntaa pystytään muuttamaan monta kertaa sekunnissa transistorien avulla. Näitä transistoreja ovat muun muassa Complementary Metal Oxide Field Effect Transistor (MOS-FET) ja Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT).

Tesla Model S oli ensimmäinen Teslan auto, joka valittiin maailman parhaaksi autoksi kunnioitettavan amerikkalaisen Consumer report organisaation toimesta. Tämän jälkeen vuonna 2018 saapui Model 3, joka paransi entisestään laadukasta autoa. (30 s. 211.)

Tesla Model S EV 2020

Model S:n moottorina on vaihtosähköllä toimiva induktimoottori. Virran moottori saa auton akustosta, joka on tasasähköä. Tasasähköä varten tarvitaan siis erillinen muuntaja, joka muuntaa tasasähkön vaihtovirraksi. (13.) Lisäksi Model S käyttää myös toista sähkömoottoria, joka on PMSRM-moottori (73).

Model S on auto, jossa on tehoa ja kiihtyvyyttä, joka ylittää ominaisuuksissaan suurimman osan muista maailman urheiluautoista, ja se on silti myös niitä halvempi (30, s. 29). Taulukossa 14 nähdään Teslan Model S -auton ominaisuudet.

Taulukko 14. Tesla Model S Performance sähköauton ominaisuudet (13; 73; 74).

Sähkömoottori 1, takana:	AC switched reluctance permanent magnet -moottori (PMSRM)
Teho moottori 1:	193 kW, 259 Hv
Vääntömomentti moottori 1:	330 Nm
Maksimikierto määrä 1:	6 100 rpm
Sähkömoottori 2, edessä:	AC induktiomoottori, roottori kuparia, 4 napaa
Teho moottori 2:	375 kW, 503 Hv
Vääntömomentti moottori 2:	-650 Nm
Maksimikierto määrä 2:	-5 900 rpm
Auton paino:	2 241 kg
Huippunopeus:	250 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$
Akkutyypä:	Litiumioni
Akun kapasiteetti:	100 kWh
Sähköjärjestelmän jännite:	320 V
Sähkömoottorien sijainnit:	Edessä ja takana
Toimintasäde:	671 km
Vaihteisto:	Yksi vaihde
Kiihtyvyys 0–100 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$:	Noin 2,6 s
Vetotapa:	Neliveto

Transistorin keksiminen mahdollisti ajoneuvoissa induktiomoottorin käytön ilman kestopagneetteja. Tesla käyttikin sitten tilaisuutta hyväkseen ja valmisti yhden kaikkien aikojen nopeimmin kiihtyvistä autoista käyttäen induktiomoottoria. Model S:n induktiomoottorin roottori on puhdasta kuparia. Roottori voi Teslan autoissa jopa ylikuumentua. Induktiomoottori ei ole yhtä tehokas alhaisilla nopeuksilla kuin toisenlaiset vaihtosähkömoottorit. Tesla onkin käytännössä odottanut, että uusia sähkömoottorivaihtoehtoja ilmaantuisi. (13.)

Uusi Roadster EV

Teslan Roadsterissa on sähköautoksi nopein kiihtyvyys, pisin toimintasäde, suurin suorituskyky ja kehittynein akkutekniikka. Matkustajia mahtuu kyytiin myös neljä henkilöä (75). Auto edustaa sähköautotekniikassa alansa huippua. Ajoneuvo on kuitenkin vielä

tulossa, joten sen kokoonpano voi vielä muuttua. Taulukossa 15 nähdään Roadsterin tämän hetken ominaisuudet.

Taulukko 15. Roadster 2020- sähköauton tiedot (75; 76).

Sähkömoottori:	AC-induktiomoottori, neljä napaa
Kiihtyvyys 0–100 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$:	2,1 s
Kiihtyvyys 0 –160* $\frac{\text{km}}{\text{h}}$:	4,2 s
Vääntö renkaissa:	10 000 Nm
Huippunopeus:	Yli 400 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$
Akun kapasiteetti:	200 kWh
Toimintasäde:	1 000 km
Vetotapa:	Neliveto

Teslan Roadster on ollut suunnitteilla kauan, ja sitä on vuosien mittaan kehitetty lisää, eikä se ole ollut koskaan kunnolla massatuotannossa. Taulukossa 16 nähdään millainen Roadster oli ominaisuuksiltaan vuonna 2006. Näemme lähinnä, kuinka paljon kehitystä on tapahtunut vuosien aikana.

Taulukko 16. Roadster 2006 -sähköauton tiedot (77).

Sähkömoottori:	AC-induktiomoottori, neljä napaa
Akkutyypä:	Litiumioni
Toimintasäde:	400 km (arvio)
Vaihteisto:	Kolme vaihdetta, kaksi eteenpäin ja peruutusvaihte
Moottorin paino:	32 kg
Kiihtyvyys 0-100 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$:	4 s
Maksimi nopeus:	Yli 208 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$
Maksimi kierrosnopeus:	13 000 rpm
Auton paino:	1 134 kg (arvio)
Akkujen paino:	454 kg

10 Hybridi- ja sähköautojen akut

Sähkö- ja hybridautoissa voidaan käyttää monenlaisia erilaisia akkuja, mutta yleisimmin niissä käytetään litiumioniakkuja. Hybridautoissa akkujen koko on huomattavasti pienempi kuin sähköautoissa, sillä niissä on myös polttomoottori ja bensiinitankki, jotka vievät tilaa.

Auton akuilta vaaditaan hyvää paino-tilavuussuhdetta, turvallisuutta, pieniä valmistus kustannuksia, kestävyyttä suurille lämpötilojen vaihteluille, lataus kestävyyttä, joka ylittää 1500 latauskertaa ja nopeaa latausmahdollisuutta. Vuonna 2016 litium-ioniakkuja tarvittiin 700 kg, jotta pystyttiin ajamaan 500 km:n matka. (30, s. 52.) Tämä on huomattava painonlisäys, joka varmasti vaikuttaa myös auton kiihtyvyyteen.

Sähköautojen toimintasäde laskee noin 50 % kylmässä lämpötilassa -20:n ja -40 °C:n välillä. Vähän lämpöisemmässä lämpötilassa -5:n ja -10 välillä toimintasäde laskee vielä 20–30 %. Jotta auton toimintasäde pysyy mahdollisimman korkeana ja akut pysyisivät hyvässä kunnossa, niin latausta suositellaan talvella mahdollisimman usein. Akkujen ei saa antaa jäätyä. (30, s. 35.)

Sähköautojen hyvänä puolena voidaan pitää muun muassa sitä, että ne käynnistyvät aina, sillä niiden moottoreissa ei ole nesteitä. Aina kun sähköauton laittaa latautumaan, ne voivat samalla lämmitellä auton valmiiksi seuraavaa kertaa varten, eikä tämä kuluta akkuja ollenkaan. Lisäksi matalalla olevat akut laskevat auton painopistettä, mikä osaltaan lisää renkaiden pitoa. (30, s. 36.)

Akkujen elinkaareissa on otettava huomioon syvätyhjentyminen negatiiviset vaikutukset. Akkujen syvätyhjentyä puhutaan, kun lataus on laskenut alle 80 %:iin maksimista. Tämä tarkoittaa auton niin sanotussa käynnistysakussa jäljellä olevaa 10,5 V:n jännitettä. Kun mennään alle 10,5 V:n kärsii akku peruuttamattomasti, sillä lyijysulfaatti alkaa kiteytyä. Tämän jälkeen on vielä mahdollista ladata akkua, mutta akun kapasiteetti ei ole enää entisensä, koska kiteytynyt lyijysulfaatti ei palaudu latauksessa. (78.)

10.1 Lyijyakut

Lyijyakut tulivat markkinoille 1800-luvulla, mutta niitä vieläkin käytetään nykyaikaisten autojen käynnistämiseen. Akkuihin mahtuu sähköenergiaa $30\text{--}50 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$. Lyijyaku kestää noin 300 varaus-purkausjaksoa. Tämä määrä kasvaa, jos vain 30–40 % akun sähköenergiasta käytetään ennen uutta latausta. (30, s. 46.)

10.2 Nikkeli-metallihydridiakut (NiMH)

Akku tuotiin markkinoille 1990-luvulla ja sitä käytetään nykyään kaikissa Toyotan hybridi ajoneuvoissa. Akkujen kapasiteetti on $60\text{--}120 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$ ja ne kestävät 500 varauspurkausjaksoa alle 80 %:n energiatasoon. Jos kokoa lisätään ja akusta käytetään jatkuvasti vain 10 % kapasiteetista, niin se lisää akun elinikää huomattavasti. Tämän ansiosta Toyota Prius NiMH-akut kestävät lähes yhtä kauan kuin itse ajoneuvo. Prius kestää ainakin 400 000 km alkuperäisellä akullaan. (30 s. 46–47.) Akkujen heikkoutena on, jos ne ovat käyttämättömänä, sillä silloin ne menettävät 20 % varausta kuukaudessa (79).

10.3 Litiumioniakut (Li-ion)

Toimintaperiaatteena on, että litiumionit liikkuvat positiivisen ja negatiivisen navan välillä. Väliaineena on elektrolyytti, joka on yleensä nestettä mutta joskus kiinteää polymeeriä. Geeliä usein lisätään, jotta polymeeri johtaa paremmin sähköä. Yleensä negatiivinen osio akusta on tehty grafiitista ja positiivinen yhdestä tai useammasta metallioksidista. Ensimmäinen käyttökelpoinen litium-ioniakku keksittiin 1980-luvulla. (30, s. 47.)

Litiumioniakut ovat yksi suosituimmista akuista, koska niiden ominaisuudet ovat hyvin kilpailukykyiset muihin akkuihin verrattuna. Lisäksi akku menettää käyttämättömänä varausta vain 5 % kuukaudessa. Varausta ei myöskään tarvitse käyttää kokonaan ennen uutta latausta, sillä niissä ei ole ”akkumuistia”, joten ne sopivat erityisen hyvin auton akuiksi. Li-ion akku pystyy varastoimaan $150 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$ energiaa.

Litiumioniakun heikkouksia ovat huonompi kuumuudensietokyky, tietokoneen pitää ohjata niitä ja ne kuluvat, vaikka niitä ei käyttäisi. (79.)

10.4 Litium-rautafosfaattiakku (LFP)

Yksinkertaistettuna, kun rautafosfaattia lisätään Li-ioniakun katodeihin, saadaan aikaiseksi LFP-akku. LFP-akku on hyvin stabiili, eikä sen käytöstä voi tulla tulipaloa oikosulun kautta. Akku pystyy varastoimaan $90\text{--}120 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$ sähköenergiaa ja kestää 1000-4000 varauspurkausjaksoa. (30, s. 48.)

10.5 Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidiakku (NCA)

Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidiakut ovat käytössä mm. Teslan ajoneuvoissa, joita Panasonic toimittaa yritykselle. Suurin valtti NCA-akuissa on niiden energiakapasiteetti $200\text{--}260 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$. Akkujen varauspurkausjaksoja voi olla vain 500 kertaa. Tätä kompensoidaan akkujen suurella koolla. Isompi akku tarvitsee vähemmän jatkuvaa latausta kuin pienempi. Lataus voidaan suorittaa myös osissa, niin että päivän aikana käytetty energia palautetaan. Osittaiset lataukset lisäävät paljon akkujen elinikää. Teslan yksi syy akkujen käyttämiselle oli alhaisempi hinta. (30, s. 48–49.)

10.6 Litiumioni-nikkeli-mangaanikobolttioksidi (NMC)

Yksi eniten potentiaalia omaavista energialähteistä ajoneuvoille on NMC-akut. Energiakapasiteetti niissä on välillä $130\text{--}220 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$. Elinkaari on myös 1000–2000 varauspurkausjaksoa. BMW käyttää sähköautoissaan Samsung SDI:n NMC-akkuja. Lisäksi Samsung toimittaa akkujaan JAC Motorsille sähköautoon SUV iEV6S.

Vuonna 2016 LG Chem toimitti akkuja sähköautoihin ja hybrideihin seuraaville yrityksille: GM, Ford, Chrysler, Renault, Mercedes-Benz Smart ja Volvo. Samana vuonna myös Tesla neuvotteli NMC-akkujen toimittajien LG Chemin ja Samsung SDI:n kanssa. (30, s. 49.) Siis myös Tesla käyttää nykyään mahdollisesti NMC-akkuja ainakin osassa ajoneuvoistaan.

10.7 Litium-titanaattiakut (LTO)

Litium-titaaniakut voidaan ladata lukemattoman monta kertaa, ja IREQ-laboratorion tutkijoiden mukaan lataus 0–100 % tapahtuu vain kuudessa minuutissa. Lataus voidaan tehdä myös 30 000 kertaa ilman, että menetetään kapasiteettia. LTO-akku kestää myös kuumuutta hyvin. Lisäksi akku kestää kylmää -30 °C:seen hyvin. Huono puoli näissä akuissa on suuri paino, ja akkukapasiteetti on vain $57 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$, joten ne eivät sovellu kovin hyvin sähköautoihin. Näistä akuista voidaan kuitenkin kehittää autoihin sopivampia energianlähteitä. (30, s. 49.)

10.8 Litium-metallipolymeeriakut (LMP)

Litium-metallipolymeeriakut kehitettiin 1990-luvulla IREQ:n ja Montreal yliopiston yhteistyönä. Akun anodi on tehty ohuesta litiummetalliarkista ja elektrolyytti on tehty ohuesta polymeeriarkista, jossa ei ole geeliä eikä tahnaa. Se on siis täysin kiinteä.

Akkua Käytetään mm. Bluecarissa. Koko akussa on energiakapasiteetti noin $100 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$. Yksittäisissä akuissa kapasiteetti on noin $120\text{--}140 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$. Akkua käytetään mm. Bluecarissa. Koko akussa on energiakapasiteetti noin $100 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$. Varaus-purkausjaksoja akussa voi olla noin 2 000–3 000. LMP-akulla on kaksi heikkoutta. Akun pitää olla jatkuvasti 80 °C:n lämpötilassa oli se sitten parkkipaikalla pysähtyneenä tai käytössä, jotta se saadaan käynnistymään nopeasti. Jos autoa ei pidetä jatkuvasti latauksessa, kun sitä ei käytetä, niin akku tyhjenee noin kolmessa päivässä Keski-Euroopan säässä kuten Ranskassa ja Pohjoisemmassa kovalla pakkasella vieläkin nopeammin. Jos autoa ajetaan kaksi tuntia päivässä, niin energiaa kuluu yhtä paljon autolla ajamiseen kuin akkujen lämpöisenä pitämiseen. LMP-akku ei myöskään pysty tuottamaan kovin suurta määrää energiaa kerralla. Täten autolla kiihdyttäminen on hidasta ja auton lataaminen onnistuu hitaasti. (30, s. 50–51.) Voidaan siis tehdä johtopäätös, ettei LMP-akuista ole yleisessä käytössä oleville sähköautoille paljoakaan hyötyä.

11 Johtopäätökset

Sähköautotekniikassa on nähtävissä, ettei tarvita parasta tekniikkaa, jotta todella pystyisi kilpailemaan suurimmasta suosiosta hybridi- ja sähköautojen kategoriassa. Sähkömoottoritekniikassa pitkälle edenneitä ovat Teslan lisäksi muun muassa, BMW, Ferrari, Jaguar, Porsche, Mercedes-Benz, Honda, Audi ja Ford.

Sähköautojen parissa menestyy myös Nissan vähän erilaiseen tapaan e-power-sähköautotaktiikallaan. Käytännössä siis kohtuullisen hintaiseen ja tehoiseen sähköautoon lisätään pieni polttomoottori, joka mahdollistaa autolle halvemman hinnan ja pidentää sen toimintasädettä. Yritys on käyttänyt myyntitaktiikkaansa ainakin Japanissa. Nissan käyttää kohtuullisen hintaisia, pieniä ja kevyitä sähkömoottoreita.

Autoyrityksistä ainakin: BMW, Ferrari, Jaguar, Porsche ja Mercedes-Benz pyrkivät tekemään enimmäkseen tehokkaita sähkömoottoreita, jotka ovat samalla energiatehokkaita ja joiden kantama on kohtuullisen pitkä. Tämä ei ole mitenkään yllättävä taktiikka näiltä yrityksiltä, jotka ovat muutenkin tunnettuja luksus- ja urheiluautoistaan. Sähkömoottoreita voi olla luksusautoissa ainakin neljä ehkä jopa enemmänkin. Iso sähkömoottori voi painaa yli 150 kg, mikä on huomattavasti enemmän kuin halvimmissa henkilöautoissa.

Tesla voittaa käytännössä kaikissa kategorioissa, vaikkakin esimerkiksi Porschen Taycan pääsee aika lähelle kiihtyvyydessä. Mikäli Tesla Roadster tulee pian markkinoille, yrityksellä on myös käytännössä nopeimmin kiihtyvä auto, paras suorituskyky, pisin toimintasäde ja nopein lataustekniikka. Lisäksi autoon mahtuu neljä henkilöä, mikä on käytännössä ihme tämän teholuokan autoissa. Auto on ehkä enemmänkin taidonnäyte kuin oikeasti kulkuneuvo, jota ihmiset tarvitsevat. Se näyttää, mihin sähköautot pystyvät eikä se varmasti ole vielä loppuhuipentuma. Sähköautoilla ja niiden sähkömoottoreilla sekä niiden akuilla on varmasti vielä kehityttävää.

Lisäksi on lukuisia muita autoyrityksiä, jotka eivät tarvitse parasta sähkötekniikkaa pärjätäkseen. Nämä yritykset myyvät autoja, joihin tavallisilla ihmisillä on oikeasti varaa, ja niihin riittää pieni sähkömoottori kuten Nissan Leafissä, jonka moottorilla on painoa 58

kg. Tähän kun vielä lisätään ajomukavuus, hyvät varustelut ja paljon tavaratilaa, niin uskon, että se riittää suurimmalle osalle kuluttajista.

Kasvihuoneilmiön voimistuessa on myös ajankohtaista miettiä sähköllä toimivien autojen ympäristöystävällisyyttä. Voidaan nimittäin päätellä, että sähkö- ja hybridautojen kokonaisyödyt ja haitat ovat vaikeasti määriteltävissä. Vaikka sähköllä tuotetut autot vaikuttavat päällisin puolin parhaalta ratkaisulta, tehokkuutensa ja ympäristöystävällisyytensä ansiosta, ne eivät kuitenkaan sitä välttämättä ole. Kaikki eivät välttämättä ajattele asiaa tarpeeksi laajasti, sillä sähköauton latausenergia voidaan tuottaa aina myös jollakin saastuttavalla menetelmällä ja sitä vaihtoehtoa on vaikea sulkea kokonaan pois. (12, s. 548.) Aina löytyy ihmisiä, jotka eivät välitä ympäristöstä ja tuottavat energian saastuttavalla tavalla.

Vastaavia on varmasti enemmänkin, mutta muun muassa norjalainen tutkimus viittaa siihen, että sähköautojen valmistus on kaikista saastuttavin vaihe. Jos siirrytään kokonaan pelkkien sähköautojen valmistamiseen, tulisi se kaksinkertaistamaan kasvihuonepäästöt verrattuna polttomoottori ajoneuvojen valmistuksesta tuleviin päästöihin. (12, s. 550.)

Nykytilanteessa todennäköisesti paras ratkaisu ei ole siirtyä pelkkiin sähköautoihin, vaan ehkäpä hybrideihin siirtyminen olisikin toistaiseksi parempi ratkaisu. Katsottaessa kokonaiskuvaa hybridautot ovat hyvä kompromissi, koska vielä ei ehkä osata sanoa tarpeeksi hyvin, minkä energiamuodon käyttö ajoneuvoissa on oikeasti paras ratkaisu. Ehkäpä hybridauto olisi paras ratkaisu ongelmaan, sillä se yhdistää polttomoottorin ja sähkömoottorin, mutta ei ole välttämättä kummastakaan energianlähteestä riippuvainen. Jos toinen energianmuoto aiheuttaa katastrofin, toista voi vielä käyttää ja kukin voi vaikuttaa siihen hybridiä ajaessaan kumpaa energianlähdettä käyttää enemmän.

12 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä selvitettiin ajoneuvojen sähkömoottorien nykytilannetta. Haluttiin selvittää, millaisia sähkömoottoreita käytetään nykyaikaisissa hybridi- ja sähköautoissa. Ensisijaisesti tiedonhakuun käytettiin internetlähteitä, jotka olivat vuodelta 2010 tai sitä

uudempia. Lisäksi apuna käytettiin autoteknisiä kirjoja, joiden piti olla vuodelta 2015 tai uudempia. Kirjojen tietoja oli tarkoitus käyttää tukemaan autojen teknisten tietojen käsittelyssä. Työn vaatimat tavoitteet tuli saavutettua ja sitä voidaan pitää onnistuneena, vaikka työtä oli supistettava, ettei se paisuisi liian suureksi. Tämä insinööriä on ollut myös hyvin opettavainen autoalan laajuudesta.

Tietojen kerääminen oli hidasta, sillä jokaisella auton valmistajalla on nykyään lukemattoman monta hybridi- ja sähköautoa valikoimassaan. Jos kaikki hybridi- ja sähköautomallit lasketaan yhteensä, on siinä varmasti satoja autoja. Niistä oli selvitettävä, mitkä autot ovat tärkeimpiä työn kannalta, eikä kaikkia autoja tietenkään ehtinyt edes vilkaista.

Autoyritykset tuntuvat harrastavan hybridi- ja sähköautojen moottorien teknisten hienouksien piilottelua. Monesta automerkistä oli haasteellista löytää, mitä sähkömoottoria ne käyttivät. Lisäksi yritykset kehittävät autojaan jatkuvasti ja voivat jopa yllättäen vaihtaa sähkömoottorin toisentyypiseen. Yhtenä esimerkkinä voidaan pitää Teslan päätöstä vaihtaa induktimoottori autossaan kestromagneettitahtimoottoriksi. Joidenkin automerkkien moottorista ei vain löytynyt tietoa, vaikka kuinka yritti etsiä. Nämä autot oli siis jätettävä pois tutkimuksesta.

Työn edetessä oli nähtävissä, että autoissa voidaan käyttää lukemattoman monta erilaista sähkömoottoria. Kyse on vain siitä, mitkä ovat auton käytännön vaatimukset. Sähkömoottoreita voidaan laittaa ainakin auton pyöriin, etu tai taka-akselille, vaihteistoon tai keskiakselille. Autoissa käytettäviä sähkömoottoreitakin on niin paljon erilaisia, että niidenkin kaikkien luetteleminen olisi laajentanut raporttia liikaa. Päämoottorien lisäksi on paljon moottorien alaluokkia, joiden erot voivat olla hyvinkin pieniä.

Tietojen keruuvaiheessa eivät aina myöskään moottorien nimitykset olleet selviä, sillä niiden englanninkielisiä nimiä ei useimmiten pysty suoraan kääntämään suomeksi. Sähkömoottoreita löytyykin todennäköisesti kymmeniä erilaisia. Samasta moottorista saataan myös puhua monella eri nimityksellä. Esimerkkinä induktimoottori, jota voidaan kutsua myös oikosulkumoottoriksi tai epätahtikoneeksi.

Tärkeimmät työn tulokset olivat nykyään eniten autoissa käytettävien sähkömoottorityyppien, sekä niiden kokoluokan ja tehon selvittäminen. Sähkömoottorien toimintaperiaatteet selitettiin ja niiden hyviä ja huonoja puolia tuotiin esiin ajoneuvokäytössä. Tutkimustulokset ovat suurimmaksi osaksi luotettavia. Autojen teknisissä tiedoissa oli välillä eroavaisuuksia, vaikka vuosiluku ja automalli täsmäsivät. Ei siis pysty täysin varmasti kuvaamaan auton kaikkia yksityiskohtia, mutta tuloksia voi pitää suuntaa antavina.

Ajoneuvojen sähkömoottorien tietoja voidaan pitää luotettavampina, sillä niiden lähteissä on käytetty auton valmistajan omia sivustoja tai teknisen artikkelin tietoja.

Haasteita työssä oli ylivoimaisesti eniten informaation paljouden takia. Työssä on mainittu yhteensä vain 15 hybridi- ja sähköautoa, mutta siihen olisi voinut lisätä näiden autojen monta eri kategoriaa lisää. Ajan puutteen takia työssä jäi mainitsematta muun muassa polttokennoautot ja niiden käyttämät sähkömoottorit, ja myös hydrauliset hybridit oli jätettävä pois puhumattakaan aurinkopaneelisähköautoista. Hybridiauto voi käyttää myös kolmea eri tekniikkaa. Siinä voisi käyttää esimerkiksi sähkömoottoria akuilla, polttokennoja ja polttomoottoria.

Voidaan todeta, että ajoneuvojen sähkömoottorit ovat aihealueena niin laaja, että siitä voisi tehdä ainakin muutaman tutkimuksen lisää. Ainakin noin 70 hybridi- ja sähköautoon löytyi sähkömoottorin tietoja internetistä. Jos kaikista näistä olisi mainittu tutkimustulokset, olisi työ paisunut mahdollisesti kirjan kokoiseksi teokseksi. Lähes kaikki informaatio oli englanniksi, joten vei myös paljon aikaa kääntää kaikki suomeksi.

Lähteet

- 1 Woodford, Chris. 2019. Car engines. Verkkoaineisto. <<https://www.explain-thatstuff.com/carengines.html>>. Luettu 23.5.2020.
- 2 Hall-Geisler, Kristen & Brain, Marshall. 2018. How Are 4-cylinder and V6 Engines Different? Verkkoaineisto. <<https://auto.howstuffworks.com/engine9.htm>>. Luettu 24.5.2020.
- 3 Hall-Geisler, Kristen & Brain, Marshall. 2018. How Car Engines Work. Verkkoaineisto. <<https://auto.howstuffworks.com/engine2.htm>>. Luettu 23.5.2020.
- 4 Haifeng Liu, Junsheng Ma, Laihui Tong, Guixiang Ma, Zunging Zheng, & Mingfa Yao. 2018. Investigation on the potential of high efficiency for internal combustion engines. *Energies*, 11(3), 513. Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.3390/en11030513>>. Luettu 24.5.2020.
- 5 Colwell, K.C. 2019. This is how your car engine works. Verkkoaineisto. <<https://www.caranddriver.com/features/a26962316/how-a-car-works/>>. Luettu 13.2.2020.
- 6 Woodford, Chris. 2020. Diesel engines. Verkkoaineisto. <<https://www.explain-thatstuff.com/diesel-engines.html>>. Luettu 23.5.2020.
- 7 Armstrong, Lloyd Van Horn & Proctor, Charles Lafayette. 2019. Diesel engine. Verkkoaineisto. <<https://www.britannica.com/technology/diesel-engine>>. Luettu 13.2.2020.
- 8 Puiu, Tibi. 2019. The history of the induction motor. Verkkoaineisto. <<https://www.zmescience.com/science/history-science/history-induction-motor/>>. Luettu 17.2.2020.

- 9 Nikola Tesla. 2019. Verkkoaineisto. History.com. <<https://www.history.com/topics/inventions/nikola-tesla>>. Luettu 17.2.2020.
- 10 Electric Motor Working and Its Applications. Verkkoaineisto. Elprocus.com. <<https://www.elprocus.com/electric-motor-working-applications/>>. Luettu 24.5.2020.
- 11 Electrical, Wat. 2019. What is AC Motor – Definition, Operation and Applications. Verkkoaineisto. <<https://www.watelectrical.com/ac-motor-construction-working-types-applications/>>. Luettu 29.5.2020.
- 12 Masrur, M. Abul & Mi, Chris. 2018. Hybrid Electric Vehicles. John Wiley & Sons Ltd.
- 13 Bakker, Steve. 2018. Tesla Model 3 Motor — Everything I’ve Been Able To Learn About It. Verkkoaineisto. <<https://cleantechnica.com/2018/03/11/tesla-model-3-motor-in-depth/>>. Luettu 17.2.2020.
- 14 Woodford, Chris. 2020. Induction motors, How does an AC motor work? Verkkoaineisto. <<https://www.explainthatstuff.com/induction-motors.html>>. Luettu 30.5.2020.
- 15 Evans, Paul. 2019. Induction Motor Basics. Verkkoaineisto. <<https://theengineeringmindset.com/induction-motor-basics/>>. Luettu 25.5.2020.
- 16 Advantages and Disadvantages of Induction Motor. 2020. Verkkoaineisto. Electrical4u.com. <<https://www.electrical4u.com/induction-motor-advantages-and-disadvantages/>>. Luettu 25.5.2020.
- 17 Woodford, Chris. 2020. Induction motors. Verkkoaineisto. <<https://www.explainthatstuff.com/induction-motors.html>>. Luettu 25.5.2020.
- 18 Aliabad, Aliakbar Damaki; Bouiabady, Mohammad Mahdi & Amiri, Ebrahim. 2017. Switched Reluctance Motor Topologies: A Comprehensive Review. Verkkoaineisto. <<https://www.intechopen.com/books/switched-reluctance-motor-concept-control-and-applications/switched-reluctance-motor-topologies-a-comprehensive-review>>. Luettu 25.5.2020.

- 19 Gyllensten, Freddie; Isberg, Peter; Castagnini, Alessandro; Secondo, Giulio; Ikaheimo, Jouni & Tammi, Ari. 2016. The advantages of the synchronous reluctance motor. Verkkoaineisto. <<https://www.ee.co.za/article/advantages-synchronous-reluctance-motor.html>>. Luettu 25.5.2020.
- 20 Jaszczolt, Christopher. 2017. Understanding permanent magnet motors. Verkkoaineisto. <<https://www.controleng.com/articles/understanding-permanent-magnet-motors/>>. Luettu 25.5.2020.
- 21 Murphy, Jim. 2012. What's the Difference Between AC Induction, Permanent Magnet, and Servomotor Technologies? Verkkoaineisto. <<https://www.machinedesign.com/motors-drives/article/21831709/whats-the-difference-between-ac-induction-permanent-magnet-and-servomotor-technologies>>. Luettu 25.5.2020.
- 22 Edvard. 2015. 4 Types of DC Motors and Their Characteristics. Verkkoaineisto. <<https://electrical-engineering-portal.com/4-types-of-dc-motors-and-their-characteristics>>. Luettu 26.5.2020.
- 23 Karthik, Sri Hari. 2019. Types of Motors used in Electric Vehicles. Verkkoaineisto. <<https://circuitdigest.com/article/different-types-of-motors-used-in-electric-vehicles-ev>>. Luettu 22.5.20.
- 24 Brushless DC Motor vs. AC Motor vs. Brushed Motor? Verkkoaineisto. Orientalmotor.com. <<https://www.orientalmotor.com/brushless-dc-motors-gear-motors/technology/AC-brushless-brushed-motors.html>>. Luettu 24.5.2020.
- 25 Schweber, Bill. Don't Ignore the Humble Brushed DC Motor. Verkkoaineisto. <<https://eu.mouser.com/applications/dont-ignore-the-brushed-dc-motor/>>. Luettu 24.5.2020.

- 26 DC Shunt Motor: Speed Control, Characteristics & Theory. 2019. Verkkoaineisto. Electrical4u.com. <<https://www.electrical4u.com/shunt-wound-dc-motor-dc-shunt-motor/>>. Luettu 22.5.20.
- 27 Riswick, James. 2019. What Is a Hybrid Car? Verkkoaineisto. <<https://www.caranddriver.com/features/a26390899/what-is-hybrid-car/>>. Luettu 20.5.2020.
- 28 Cobb, Jeff. 2014. The Three Main Types Of Hybrids Explained. Verkkoaineisto. <<https://www.hybridcars.com/the-three-main-types-of-hybrids-explained/>>. Luettu 26.5.2020.
- 29 Murphy, Mary. 2019. Electric and Hybrid Vehicles, Principles, Design and Technology. Larsen and Keller Education.
- 30 Breton, Daniel & Duval, Jacques. 2016. The Guide To Electric Hybrid & Fuel-Efficient Cars. Juniper Publishing.
- 31 Cobb, Jeff. 2015. Why the 2016 Chevy Malibu Hybrid Gets Better MPG Than The 2016 Chevy Volt. Verkkoaineisto. <<https://www.hybridcars.com/why-the-2016-chevy-malibu-hybrid-gets-better-mpg-than-the-2016-chevy-volt/>>. Luettu 27.5.2020.
- 32 Nikowitz, Michael. 2016. Advanced Hybrid and Electric Vehicles. Springer.
- 33 Sherman, Don. 2011. We Build the Chevy Spark EV's AC Permanent-Magnet Motor. Verkkoaineisto. <<https://www.caranddriver.com/news/a18744950/we-build-the-chevy-spark-evs-ac-permanent-magnet-motor/>>. Luettu 28.5.2020.
- 34 BMW's hybrid motor design seeks to deliver high efficiency and power density with lower rare earth use. 2013. Verkkoaineisto. Greencarcongress.com. <<https://www.greencarcongress.com/2013/08/bmw-20130812.html>>. Luettu 27.5.2020.

- 35 Merwerth, J. 2014. 01.04.20141THE HYBRID-SYNCHRONOUS MACHINE OF THE NEW BMW i3 & i8. Verkkoaineisto. <http://hybridfordonscentrum.se/wp-content/uploads/2014/05/20140404_BMW.pdf>. Luettu 27.5.2020.
- 36 BMW i8 Coupé. 2020. Verkkoaineisto. Bmw.fi. <<https://www.bmw.fi/fi/mallisto/i-yhteenveto/i8-coupe/2017/tekniset-tiedot.html#tab-0>>. Luettu 27.5.2020.
- 37 Colwell, K. C. 2016. 2016 BMW i8. Verkkoaineisto. <<https://www.caranddriver.com/reviews/a15100977/2016-bmw-i8-test-review/>>. Luettu 27.5.2020.
- 38 Capparella, Joseph. 2017. 2018 Volvo S90 T8 Plug-In Hybrid. Verkkoaineisto. <<https://www.caranddriver.com/reviews/a15077910/2018-volvo-s90-t8-awd-plug-in-hybrid-test-review/>>. Luettu 27.5.2020.
- 39 2018 Volvo S90 T8 Twin-Engine Specs, Range, Performance. 2018. Verkkoaineisto. Ecarsrange.com. <<https://ecarsrange.com/volvo-s90-t8-twin-engine/#specs>>. Luettu 27.5.2020.
- 40 2020 Prius Prime. 2020. Verkkoaineisto. Toyota.com. <<https://www.toyota.com/prius-prime/features/mpg/1235/1237/1239>>. Luettu 23.5.2020.
- 41 Varusteet & tekniset tiedot. 2020. Verkkoaineisto. Toyota.fi. <<https://www.toyota.fi/autot/prius/varusteet.json>>. Luettu 29.5.2020.
- 42 Cars sedan. 2020. Verkkoaineisto. Automobiles.honda.com. <<https://automobiles.honda.com/future-cars>>. Luettu 29.5.2020.
- 43 LaReau, Jamie L. 2020. GM partners with Honda to make two new electric vehicles at GM plants. Verkkoaineisto. <<https://eu.freep.com/story/money/cars/general-motors/2020/04/02/gm-partners-honda-electric-vehicle/5116405002/>>. Luettu 20.5.2020.

- 44 Gitlin, Jonathan M. 2020. 1,200 uncomfortable miles in a gorgeous Acura NSX hybrid supercar. Verkkoaineisto. <<https://arstechnica.com/cars/2020/03/1200-uncomfortable-miles-in-a-gorgeous-acura-nsx-hybrid-supercar/>>. Luettu 24.5.2020.
- 45 Acura NSX Features and Specs. 2020. Verkkoaineisto. Caranddriver.com. <<https://www.caranddriver.com/acura/nsx/specs>>. Luettu 29.5.2020.
- 46 Audi Q7 e-tron 2017 UK review. 2017. Verkkoaineisto. Autocar. <<https://www.autocar.co.uk/car-review/audi/q7/first-drives/audi-q7-e-tron-2017-uk-review>>. Luettu 26.5.2020.
- 47 Luxury, space and efficiency:. 2019. Verkkoaineisto. Audi-mediacenter.com. <<https://www.audi-mediacenter.com/en/press-releases/luxury-space-and-efficiencythe-audi-q7-tfsi-e-quattro-12414>>. Luettu 30.5.2020.
- 48 Monipuolinen ja ylellinen SUV. 2020. Verkkoaineisto. Audi.fi/fi. <<https://www.audi.fi/fi/web/fi/models/q7/q7.html#>>. Luettu 30.5.2020.
- 49 Mercedes-Benz unveiling diesel plug-in hybrid preproduction models at Geneva show. 2018. Verkkoaineisto. Greencarcongress.com. <<https://www.greencarcongress.com/2018/03/20180305-mercedes.html>>. Luettu 26.5.2020.
- 50 Mercedes-Benz bringing series of 3rd-generation plug-in hybrids to market; EQ Power, gasoline or diesel; C-, E- and S-Class. 2018. Verkkoaineisto. Greencarcongress.com. <<https://www.greencarcongress.com/2018/10/20181013-mbenzeqpower.html>>. Luettu 26.5.2020.
- 51 Electric cars and plug-in hybrids explained. 2020. Verkkoaineisto. Bmw.com. <<https://www.bmw.com/en/innovation/Plug-in-hybrid-and-other-kinds-of-electric-cars.html>>. Luettu 21.4.2020.
- 52 Rehtin, Mark. 2020. Nissan Plans EV Surge by 2022. Verkkoaineisto. <<https://www.motortrend.com/news/nissan-plans-ev-surge-2022/>>. Luettu 27.5.2020.

- 53 Kimiabeigi, Mohammed; Martin, Richard & D.Widmer, James. 2015. Verkkoaineisto. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993715000032>>. Luettu 22.5.2020.
- 54 Nissan Leaf teardown (Part 2): main components disassembled. 2012. Verkkoaineisto. Marklines.com. <https://www.marklines.com/en/report_all/rep1104_201209>. Luettu 18.5.2020.
- 55 Moseman, Andrew. 2019. Everything We Know About the Porsche Taycan. Verkkoaineisto. <<https://www.popularmechanics.com/cars/hybrid-electric/a21239621/porsche-taycan-mission-e-electric/>>. Luettu 18.5.2020.
- 56 Evans, Sean. 2019. Electric Cars, Explained: How Porsche, Mercedes-Benz and Audi Build EVs. Verkkoaineisto. <<https://robbreport.com/motors/cars/how-do-electric-cars-work-heres-how-porsche-mercedes-benz-and-audi-build-evs-2879081/>>. Luettu 27.5.2020.
- 57 Turkus, Brandon. 2019. 2020 Porsche Taycan Debuts As An All-Electric Super Sedan. Verkkoaineisto. <<https://www.motor1.com/news/368730/2020-porsche-taycan-debut-official/>>. Luettu 27.5.2020.
- 58 Voelcker, John. 2016. Mercedes-Benz electric cars: more details of 4 models for 2020 emerge. Verkkoaineisto. <https://www.greencarreports.com/news/1104105_mercedes-benz-electric-cars-more-details-of-4-models-for-2020-emerge>. Luettu 28.5.2020.
- 59 World premiere of Vision Mercedes-Maybach Ultimate Luxury. 2018. Verkkoaineisto. Media.mbusa.com. <<https://media.mbusa.com/releases/world-premiere-of-vision-mercedes-maybach-ultimate-luxury>>. Luettu 28.5.2020.
- 60 Florea, Ciprian. 2018. 2018 Mercedes-Maybach Vision Ultimate Luxury. Verkkoaineisto. <<https://www.topspeed.com/cars/mercedes/2018-mercedes-maybach-vision-ultimate-luxury-ar180953.html>>. Luettu 28.5.2020.

- 61 Electric vehicle. 2020. Verkkoaineisto. Group.renault.com. <<https://group.renault.com/en/innovation-2/electric-vehicle/>>. Luettu 29.5.2020.
- 62 2020 Renault ZOE R135 - Specifications. 2020. Verkkoaineisto. Evspecifications.com. <<https://www.evspecifications.com/en/model/d323ad>>. Luettu 20.5.2020.
- 63 Padeanu, Adrian. 2019. 2020 Renault Zoe Unveiled With Bigger Battery, More Tech. Verkkoaineisto. <<https://www.motor1.com/news/355124/2020-renault-zoe-revealed/>>. Luettu 19.5.2020.
- 64 Discover the dimensions of New ZOE. 2020. Verkkoaineisto. Renault.co.uk. <<https://www.renault.co.uk/electric-vehicles/zoe/specifications.html>>. Luettu 29.5.2020.
- 65 Laurent, Alexandre. 2019. "New ZOE: the manufacturing secrets of a 100% Renault motor". Verkkoaineisto. <<https://easyelectriclife.groupe.renault.com/en/expert-view/new-zoe-manufacturing-secrets-of-a-renault-motor/>>. Luettu 29.5.2020.
- 66 Crosse, Jesse. 2019. Under the skin: the hierarchy of EV motor technology. Verkkoaineisto. <<https://www.autocar.co.uk/car-news/technology/under-skin-hierarchy-ev-motor-technology>>. Luettu 29.5.2020.
- 67 Perez, Jeff. 2017. Audi Plans To Electrify Lineup With 3 New E-Tron Models By 2020. Verkkoaineisto. <<https://www.motor1.com/news/147250/audi-planning-electric-lineup-2020/>>. Luettu 28.5.2020.
- 68 2020 Audi e-tron 55 quattro. 2020. Verkkoaineisto. Evspecifications.com. <<https://www.evspecifications.com/en/model/bad6f3>>. Luettu 21.5.2020.
- 69 Brown, Mike. 2020. Tesla Roadster release date: Elon Musk talks rocket add-ons and launch plan. Verkkoaineisto. <<https://www.inverse.com/innovation/tesla-roadster-release-date>>. Luettu 28.5.2020.

- 70 Tesla Model S. 2020. Verkkoaineisto. Tesla.com. <https://www.tesla.com/en_ca/models?redirect=no>. Luettu 20.5.2020.
- 71 Lambert, Fred. 2019. Tesla is upgrading Model S/X with new, more efficient electric motors. Verkkoaineisto. <<https://electrek.co/2019/04/05/tesla-model-s-new-electric-motors/>>. Luettu 28.5.2020.
- 72 Lambert, Fred. 2020. Tesla motor designer explains Model 3's transition to permanent magnet motor. Verkkoaineisto. <<https://electrek.co/2018/02/27/tesla-model-3-motor-designer-permanent-magnet-motor/>>. Luettu 21.5.2020.
- 73 2020 Tesla Model S Performance (SR) - Specifications and price. 2020. Verkkoaineisto. EvsSpecifications.com. <<https://www.evspecifications.com/en/model/7700e2>>. Luettu 28.5.2020.
- 74 Tesla Model S. 2020. Verkkoaineisto. Tesla.com. <<https://www.tesla.com/models>>. Luettu 28.5.2020.
- 75 Roadster. 2020. Verkkoaineisto. Tesla.com. <<https://www.tesla.com/roadster>>. Luettu 15.5.2020.
- 76 Roadster. 2020. Verkkoaineisto. Tesla.com/fi_FI. <https://www.tesla.com/fi_FI/roadster>. Luettu 26.5.2020.
- 77 Grabianowski, Ed. 2006. Tesla Roadster Motor and Other Features. Verkkoaineisto. <<https://auto.howstuffworks.com/tesla-roadster1.htm>>. Luettu 15.5.2020.
- 78 Laukkonen, Jeremy. 2019. Car Batteries Are Made to Die. Verkkoaineisto. <<https://www.lifewire.com/car-batteries-are-made-to-die-534765>>. Luettu 14.4.2020.
- 79 Brain, Marshall. How Lithium-ion Batteries Work. Verkkoaineisto. <<https://electronics.howstuffworks.com/everyday-tech/lithium-ion-battery.htm>>. Luettu 13.2.2020.