

Opinnäytetyö (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Autotekniikka

Kevät 2011

Antti Juutila

# TOYOTA YARIS -PROJEKTI: SÄHKÖMOOTTORIEN VERTAILU JA OHJAUSTAPOJEN TEORIAM



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU  
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Auto- ja kuljetustekniikka | Autotekniikka

Toukokuu 2011 | Sivumäärä 39

Ohjaaja(t) Markku Ikonen

Antti Juutila

## TOYOTA YARIS -PROJEKTI: SÄHKÖMOOTTORIEN VERTAILU JA OHJAUSTAPOJEN TEORIAT

Tämä opinnäytetyö on osa Turun ammattikorkeakoulussa 2010 aloitettua Toyota Yaris-projektia, jonka tarkoituksena olisi toteuttaa opiskelijavoimin sähköauto koulun opetus- ja tutkimuskäyttöön. Projekti sai alkunsa opiskelijoiden omasta halusta oppia ja toimia sähkötekniikan parissa. Työssä oli tarkoituksena myös valoittaa eri ohjaustapoja, joilla sähkömoottoreita voidaan ohjata ja säätää.

Opinnäytetyössä hankittiin tietoa eri sähkömoottoreista, joita projektissa voitaisiin käyttää sekä vertailtiin näitä sekä tehtiin näiden tietojen perusteella ehdotus käytettävästä moottorista. Lähempään tarkasteluun valittiin viisi eri tyyppistä moottoria, joiden rakenne ja toiminta käytiin läpi sekä vertailtiin näiden hyviä ja huonoja puolia. Ohjaustavoista työhön valittiin tyypillisimmät säätötavat joita käytetään ja niistä kerrottiin perustiedot teoriasta.

Vertailujen perusteella päädyttiin sähkömoottorin osalta kestopagneettitahtimoottoriin, jonka tarvittavat ominaisuudet olivat vertailussa projekti käyttöön parhaimmat. Ohjauksen kohdalla ratkaisuksi esitettiin sen hankkimista sähkömoottoritoimittajalta tai joltain tämän yhteistyökumppanilta.

ASIASANAT:

(Sähkömoottori, sähkömoottorin säätö, sähköauto, hybridi)

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Degree programme in Automotive and Transportation Engineering | Automotive Engineering

May 2011 | Total number of pages 39

Instructor Markku Ikonen

Antti Juutila

## PROJECT TOYOTA YARIS: COMPARISON OF ELECTRIC MOTORS AND THEORIES OF DIFFERENT CONTROLLING SYSTEMS

The main goal of this thesis was to collect and search information about different types of electric motors that could be used in a small passenger car. Also, based on this information, another goal was to make a comparison between motors and make a suggestion which motor should be used in the project. The thesis also included a brief introduction about controlling methods of electric motors. Commonly used methods were chosen for research, and the theory was shortly explained.

This thesis is one part of an existing project, Toyota Yaris of Turku University of Applied Sciences, which started in Spring 2010. The main goal of this project is to make an electric vehicle as a student project for the school to use in research and teaching. The kick off for the project came from students who were interested in learning and working with electricity as a part of automotive engineering.

There were multiple options from where to choose but for the closer review five different types of motors were chosen. These motors' function and construction were studied and also a comparison between the cons and pros was made.

The conclusion of the electric motor comparison is that permanent magnet synchronous motor is the best option for the project because of its qualities. It can be concluded that the controlling system should be procured from the same supplier as the motor, or from a co-operation company of the motor manufacturing company.

KEYWORDS:

(Electric motor, electric motor control, electric vehicle, hybrid vehicle)

## SISÄLTÖ

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>9</b>
<b>2 PROJEKTIN TAUSTA</b>	<b>11</b>
2.1 Työn toteutus	12
2.2 Turku AMK	12
2.3 Yhteistyöyritykset	15
2.3.1 AXCO-Motors	15
2.3.2 Valmet Automotive	15
<b>3 SÄHKÖAUTOSOVELLUKSET</b>	<b>16</b>
3.1 Hybridin määritelmä	16
3.2 Sarjahybridi	16
3.3 Rinnakkaishybridi	18
3.4 Sekahybridi (Jaetun tehon hybridi)	19
3.5 Plug-in hybridi	20
3.6 Sähköauto	20
<b>4 YLEINEN ERI SÄHKÖMOOTTOREIDEN TEORIA</b>	<b>22</b>
4.1 Tasasähkömoottori	22
4.1.1 Tasasähkömoottorin rakenne	22
4.1.2 Tasasähkömoottorin toimintaperiaate	23
4.2 AC-vaihtosähkömoottori	24
4.2.1 Vaihtosähkömoottorin rakenne	24
4.2.2 Vaihtosähkömoottorin toimintaperiaate	26
<b>5 SÄHKÖMOOTTORIVERTAILU</b>	<b>27</b>
5.1 Moottorin kriteerit	28
5.2 Vaihtosähkömoottorit	29
5.2.1 Epätahtikone	29
5.2.2 Vierasmagnetoitu tahtikone	30
5.3 Tasasähkömoottorit	31
5.3.1 Harjallinen tasasähkömoottori	31
5.3.2 Harjaton kestopagneetti tasasähkömoottori	32
5.4 Kestomagneettitahtikoneet	34
5.5 Moottorityypin valinta	36
<b>6 SÄHKÖMOOTTORIN OHJAUKSEN/SÄÄDÖN TEORIA</b>	<b>38</b>
6.1 Skalaarisäätö	38
6.2 Vektorisäätö	38

6.3 Suora vääntömomentin säätö (DTC)	39
<b>7 YHTEENVETO</b>	<b>41</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>42</b>

## LIITTEET

Liite 1.Sähköpostiviesti AXCO-motorssilta

## KUVAT

Kuva 1. Turun AMK:n kampuksen sijainnit.

Kuva 2. Sarjahybridin periaate kaavio. evworld.com

<http://evworld.com/article.cfm?storyid=1206&first=5511&end=5510>

Kuva 3. Sähköauton eri voimalinjaratkaisuja. Hietalahti, L. 2010(a). Sähkökäyttö ja hybriditekniikka ajoneuvo ja työkonekäyttöön,

Kuva 4. Yksinkertaistettu malli tasasähkömoottorista, jossa näkyy kommutaattori, hiilet ja ankkurikäänitys.Tutornext.com

<http://www.tutornext.com/help/what-is-dc-motor>

Kuva 5. Magneetikenttien kulku. Valtion painatuskeskus,1989, Sähkömoottorikäytöt ja asennukset.

Kuva 6. Vaihtosähkömoottorin rakenne. Hietalahti, L. 2010(b). Muuntajat ja sähkökoneet

Kuva 7. Aksiaalivuomoottori. Axcomotors.fi 2011 (c).

Kuva 8. Skalaarisäädön säätöpiiri. Hakola, T. 2008. Insinööriyö taajuusmuuttajakäytön testausjärjestelmän käyttöönotto

Kuva 9. Vuovektorisäädön säätöpiiri. Hakola, T. 2008. Insinööriyö taajuusmuuttajakäytön testausjärjestelmän käyttöönotto

## TAULUKOT

Taulukko 1. Auton ajonopeus suhteutettuna sähkömoottorin pyörintänopeuteen.

# 1 JOHDANTO

Ympäristökysymykset ovat tulleet esille viime vuosina yhä voimakkaammin kaikissa ihmisten tekemisissä, ja se on näkynyt myös autoteollisuudessa. Työssä kerrotaan eri sähköautovaihtoehdoista, joilla ajoneuvoteollisuus pyrkii saavuttamaan kiristyviä vaatimuksia. Työssä käsitellään tarkemmin eri sähkömoottorivaihtoehtoja, joita näissä autoissa käytetään ja mitä voitaisiin käyttää Toyota Yaris -projektissa. Tämän lisäksi kerrotaan eri säätötavoista, joita on olemassa ja voitaisiin käyttää projektissa.

Melkein kaikkien autonvalmistajien painopiste on tällä hetkellä ympäristöystävällisemmän teknologian kehittämisessä. Tämä näkyy autojen koko elinkaari ajattelussa, aina valmistuksesta romutukseen. Nykyään autoissa käytetään mahdollisimman paljon osia joita pystytään kierrättämään, jotta materiaalin hyödyntäminen olisi helpompaa romutusvaiheessa.

Ajoneuvoteollisuus on pystynyt tähän asti vastaamaan säädöksiin ja päästörajoituksiin, joilla ajoneuvojen päästöjä pyritään rajoittamaan ja ohjaamaan valmistajia ympäristöystävällisempään tekniikkaan. Tulevaisuudessa rajoituksien kiristyessä entisestään on autovalmistajien vaikeampi päästä näihin tavoitteisiin nykyisellä polttomoottoritekniikalla.

Polttoainetaloudellisuus sekä siihen liittyvät CO<sub>2</sub>-päästöt ovat mediassa tällä hetkellä näkyvillä. Tämä on ymmärrettävää, sillä uutiset ilmastonmuutoksesta sekä öljyn hinnannousu on saanut osan ihmisistä ajattelemaan, millä he ajavat. Ajoneuvoteollisuus on tähän tilanteeseen yrittänyt löytää erilaisia keinoja, joilla polttoainetta voitaisiin säästää ja näin vaikuttaa erilaisiin päästöihin. Näitä keinoja on esimerkiksi erilaisilla vaihtoehtoisilla polttoaineilla toimivat moottorit, kuten biodiesel- ja etanolimoottorit. Tällä hetkellä vaihtoehto, joka voisi yleistyä, on sähköauto eri muodoissaan.

Sähköautojen nopeamman kehittämisen ja yleistymisen esteenä on ollut akkujen suhteellisen hidas kehittyminen. Akut eivät ole voineet vastata

polttoaineella saavutettavia toimintasäteitä, niiden pienemmän energiatihedden takia, eivätkä varmasti voi täysin sitä koskaan saavuttaakaan. Verrataan esimerkiksi Litium-ioni-akkuja, jotka ovat suosittuja tällä hetkellä ja joiden wattitunti määrä kilogrammaa kohden on noin 75 Wh/kg ja bensiiniä, jolla sama arvo on noin 11800 Wh/kg. Bensiinin energiatiheys on moninkertainen verrattuna akkuihin, mutta akkujen kehittyessä ero kavenee varmasti (Trafi 2011b; Lehtinen 2010).

Autonvalmistajat ovat tähänkin keksineet helpotuksen niille, jotka tarvitsevat pidemmän toimintasäteen ajoneuvolle. Moni pitää "Range extender" ja muita hybridisovelluksia, joissa on kaksi erilaista käyttövoimalähdettä välivaiheena ennen autojen täyssähköistymistä.

## 2 PROJEKTIN TAUSTA

Opinnäytetyö tehtiin Turun ammattikorkeakoululle osana Toyota Yaris Hybridi -projektia. Projekti aloitettiin alun perin opiskelijoiden mielenkiinnosta ja ideasta tutkia sarjahybridivaihtoehtoa henkilöautossa. Projektin valmistelu alkoi 2010 kevään aikana, jolloin kolmen opiskelijan ryhmä, joihin itse kuulun, ehdotti kyseistä projektia oman linjansa koulutuspäällikölle, joka halusi lisätietoa ja projektisuunnitelman. Lisätietojen ja projektisuunnitelman valmistuttua projekti sai koulun hyväksynnän ja sitä alettiin viedä eteenpäin.

Lähetimme sähköpostilla tiedusteluita eri laitevalmistajille, joiden tuotteita pystyisimme käyttämään projektimme edetessä. Yksi näistä valmistajista oli AXCO-motors, joka valmistaa sähkömoottoreita ja on erikoistunut aksiaalivuo-tekniikalla toimiviin sähkömoottoreihin. Sieltä saimmekin vastauksen ja arvon mitä oman moottorin teettäminen maksaisi. Liitteenä sähköpostiviesti AXCO-motorsin arviosta (Liite 1).

Saimme kuitenkin tietää, että Valmet Automotive käyttää kyseisen yrityksen moottoreita ja päätimme kysyä, voisimmeko mahdollisesti käyttää samoja moottoreita kuin he. Käytyämme sähköpostivaihtoa saimme kutsun Valmetin tehtaalle Uuteenkaupunkiin, jossa tapasimme Markus Hirvosen, joka toimii Th!nk city sähköautojen ja Eva-konseptin suunnittelussa ja kehityksessä Suomessa. Saimme kokouksen aikana luvan käyttää samoja sähkömoottoreita, kuin he käyttävät sillä ehdolla, että lähettäisimme heille tiettyjä mittaustuloksia ja kokemuksia, joita projektista saataisiin.

Projekti on tällä hetkellä vaiheessa, jossa tehdään tarkempia suunnitelmia eri osa-alueista, jotta projekti voitaisiin jossain vaiheessa saattaa käytännön toteutusvaiheeseen. Kaikilla kolmella projektiryhmän opiskelijalla on oma osuutensa suunnittelussa, joista he tekevät myös opinnäytetyönsä. Osa-alueet on jaettu seuraaviin osiin:

- Alkumittaukset sekä mallilaskelmat, lämmitys ja jäähdytysjärjestelmä



- Sähkömoottorien vertailu ja ohjaustapojen teorit
- Akuston ja latausjärjestelmän valinta

Tämän opinnäytetyön aiheena on keskimäinen, toisin sanoen sähkömoottorien vertailu ja ohjaustapojen teorit.

Eri suunnittelu osa-alueita on olemassa enemmänkin, mutta jotta työmäärä ei kasvaisi liian suureksi projektiryhmän jäsenille, päädyttiin tämän tyyppiseen jaotteluun.

## 2.1 Työn toteutus

Projektin työn kohteeksi valittiin Toyota Yaris -henkilöauto kokonsa vuoksi ja sen takia, että se oli jo koulun omaisuutta, eikä näin ollen lisäisi projektin budjettia. Projektin alkuvaiheessa oli tarkoituksena tehdä käytännön muutostyö, mutta aikataulullisista ja taloudellisista syistä päädyttiin tekemään suunnitelmat tarkempina ainoastaan teoriassa. Jatkossa olisi tarkoitus edetä projektissa pidemmälle ja toteuttaa myös käytännön muutostyö. Tämä kuitenkin jää seuraaville vuosikursseille tehtäväksi.

## 2.2 Turku AMK

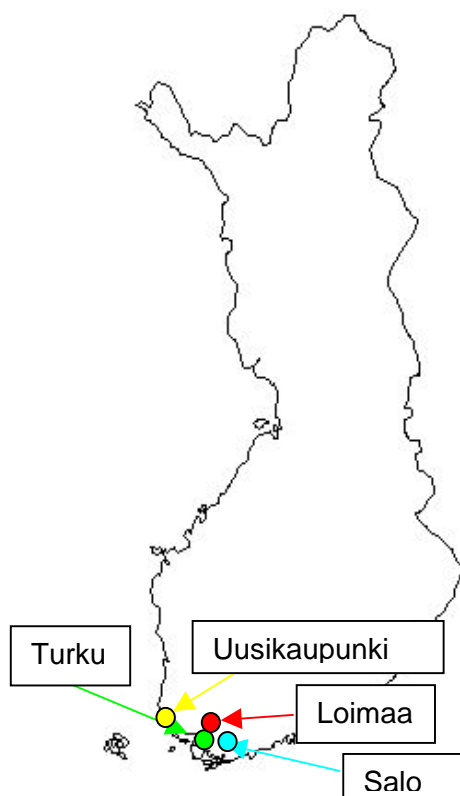
Vuonna 1992 Turun ammattikorkeakoulu aloitti toimintansa Turun väliaikaisena teknillisenä ammattikorkeakouluna ja 1997 sen toiminta vakinaistettiin. Sen perustana on seuraavat oppilaitokset Turun teknillinen oppilaitos, Turun ammatti-instituutti, Turun kauppaoppilaitos - Handelsläroverket i Åbo, Turun taiteen ja viestinnän oppilaitos ja Turun terveydenhuolto-oppilaitos. (Turun ammattikorkeakoulu 2011)

Nykyään Turun AMK on noin 9500 opiskelijan ja 750 asiantuntijan suuruinen oppilaitosyhteisö. Opiskelualoja on hyvin laaja valikoima esim. kulttuuri luonnontieteen-, luonnonvara ja ympäristö-, matkailu-, ravitsemis- ja talous-, sosiaali-, terveys- ja liikunta-, tekniikan ja liikenteen-, yhteiskuntatieteiden, liiketalouden ja hallinnon alat. Turun AMK onkin hakijoiden keskeisyydessä yksi vetovoimaisimmista ammattikorkeakouluista Suomessa. Vuosittainen

valmistuvien määrä on noin 1500 ammattilaista ja suurin osa valmistuneista työllistyy maakuntaan mikä varmasti osaltaan selittyy sillä, että koulu tekee melko paljon yhteistyötä paikallisten yritysten kanssa. (Turun ammatti-korkeakoulu 2011)

Turun AMK kehittää maakuntaa tukevaa monialaista innovaatiopedagogiikkaa, jossa korostuu tutkimus- ja kehitystoiminta, joustavat opetussuunnitelmat, yrittäjyys- ja palvelutoiminta sekä kansainvälisyys. Tämä tarjoaa opiskelijoille entistä paremmat valmiudet menestyä työmarkkinoilla. (Turun ammatti-korkeakoulu 2011)

Turun ammattikorkeakoululla on kampuksia Loimaalla, Salossa ja Uudessakaupungissa sekä Turussa Joukahaisenkadulla, Lemminkäisenkadulla, Linnankadulla, Ruiskadulla sekä Sepänkadulla. Kuvassa 1 on Turun ammattikorkeakoulun kampuksien sijainti. (Turun ammattikorkeakoulu 2011)



Kuva 1 Turun ammattikorkeakoulun kampuksien sijainnit.

## 2.3 Yhteistyöyritykset

### 2.3.1 AXCO-Motors

AXCO-Motors Oy on lappeenrantalainen yritys, jonka erityisosaamista ovat aksiaalivuosähkömoottorit ja generaattorit. Se on perustettu vuonna 2004 kaupallistamaan tutkimushankkeen aikana patentoituja innovaatioita. Toimitilat sijaitsevat Technopolis Skinnarilassa Lappeenrannassa. AXCO-Motors tekee erikoissähkömoottoreita ja -generaattoreita pääasissa tuulivoimaloihin sekä muuhun teollisuuden käyttöön. He tuottavat myös räätälöityjä malleja sekä pilot-sarjoja että prototyyppjä. AXCO-Motorsin asiakaskunta on maailmanlaajuista ja monialaista. (AXCO-motors 2011)

### 2.3.2 Valmet Automotive

Valmet Automotive on ollut autoteollisuudessa ja 40 vuotta, mistä yrityksen vahva kokemus kumpuaa. Tehdas perustettiin Uuteenkaupunkiin vuonna 1968, jolloin sen nimi oli Saab-Valmet. Tarkoituksena oli luoda autoteollisuuden osaamista ja työpaikkoja Suomeen. Vuonna 1992 yritys siirtyi kokonaan Valmetin omistukseen ja vuonna 1995 sen nimi muuttui Valmet Automotiveksi. Vuonna 2010 yrityksen omistajiksi tuli Metso Oyj:n lisäksi Suomen Teollisuussijoitus Oy ja Pontos Group. Tehtaassa on valmistettu Saabien lisäksi Porscheja, Opel Calibroita sekä Venäläistä Euro-Samara autoa. (Valmet Automotive 2011)

Yrityksen osaamiseen kuuluu tuotanto, suunnittelu, tuotekehitys, erilaisten tuotantoprosessien suunnittelu sekä kokonaiset autoprojektit aina suunnittelusta valmistukseen. Esimerkkinä tästä osaamisesta on Fisker Karma -hybridien sekä Think-sähköautojen valmistus. (Valmet Automotive 2011)

## 3 SÄHKÖAUTOSOVELLUKSET

### 3.1 Hybridin määritelmä

Hybridiauton virallisena määrittelynä voidaan pitää Trafian sivuilta löytyvää määrittelyä. Hybridiauto on auto, jonka voimalaitteena on useampi erilainen moottori (Trafia 2011a). Nykyään hybridiautokonseptiin mielletään sähkö- ja jokin polttomoottorin versio (benssiini, diesel), mutta hybridissä voi olla myös jokin muu voimalaite esim. polttokenno tai turbiini, sekä sähkömoottori.

### 3.2 Sarjahybridi

Sarjahybridi voimalinjan perusajatuksena on se, että poltto- ja sähkömoottori ovat rakennettu sarjaan, jolloin polttomoottorilla ei ole mekaanista yhteyttä voimansiirtoon vaan polttomoottorilla käytetään ainoastaan generaattoria, jolla tuotetaan virtaa suoraan sähkömoottorille tai varataan korkeajänniteakustoa. Tästä seuraa myös se etu, että polttomoottoria voidaan käyttää sen optimi käyttöalueella (maksimi hyötysuhteen alue). Tällöin moottorin hyötysuhde on parhaimmillaan, mikä taas tarkoittaa parempaa polttoainetaloudellisuutta. Polttomoottori voi olla pienempitehoinen, sillä ajoneuvossa on akusto, jota voidaan käyttää tehohuippujen kompensoimiseen. (Hietalahti 2010,13-14; Emadi 2005, 20-39)

Huonoa tässä järjestelmässä on polttomoottorin tuottaman energian muuttaminen muodosta toiseen, mikä huonontaa järjestelmän kokonaishyötysuhdetta. Ajettaessa tasaisella kuormituksella voi järjestelmän kokonaishyötysuhde olla huonompi kuin polttomoottori voimansiirron. Myöskin laitteiston monimutkaisuus lisää järjestelmän painoa ja hintaa, sillä siihen kuuluu polttomoottori, generaattori ja sähköinen ajomoottori. (Hietalahti 2010,13-14; Emadi 2005, 20-39)

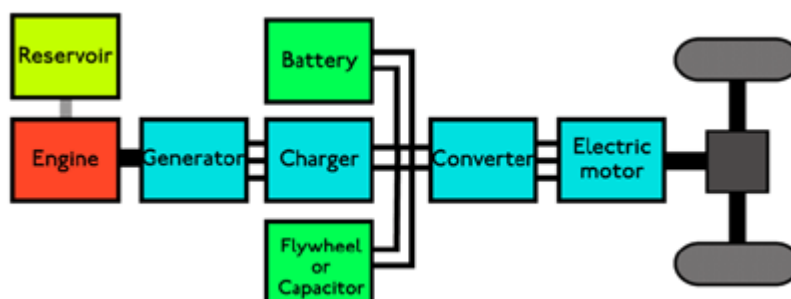
Sarjahybridin järjestelmä mahdollistaa erilaisten variaatioiden käytön, kuten esimerkiksi napamoottorit, jolloin kokoonpanon paino putoaa. Paino on ollut ongelmana tätä tekniikkaa käytettäessä ja on täten aikaisemmin estänyt sen

yleistymisen kevyessä kalustossa. Paino syntyy sarjahybridi kokoonpanon useasta komponentista, kuten aikaisemmin jo todettiin. (Hietalahti 2010,13-14; Emadi 2005, 20-39)

Nykyisellä tekniikalla voidaan toteuttaa kyseinen järjestelmä myös henkilöautoihin, esimerkkinä Fisker Karma, jossa on edessä polttomoottori ja generaattori sekä takana kaksi sähkömoottoria. (Fisker Automotive 2011)

Sarjahybridijärjestelmällä on mahdollista toteuttaa erilaisia toimintatiloja. Voidaan käyttää pelkästään energiavarausta, jolloin polttomoottori on sammutettuna ja kuormaa ajetaan ainoastaan akuilla, superkondensattoreilla tai jollain muulla energiavaraustolla. On myös mahdollista käyttää pelkästään polttomoottori-generaattori yhdistelmää, jolloin se tuottaa ajoneuvon tarvitseman tehon. Näitä pystytään käyttämään myös yhtä aikaa, niin sanotussa hybriditilassa, jolloin teho tuotetaan energiavaraustolla ja polttomoottori-generaattori yhdistelmällä. (Hietalahti 2010, 13-14; Emadi 2005, 20-39)

Jaetun energian tilassa polttomoottori-generaattori tuottaa tehoa sekä kuormalle että lataa energiavarausta. Paikallaan pysyessä voidaan ladata energiavarausta polttomoottori-generaattorilla. Viimeisenä on mahdollisuus toteuttaa niin sanottua regenerointia, jolloin ajomoottorin talteenottamaa jarrutusenergiaa otetaan talteen ja säilötään energiavaraustoon. Kuvassa 2 on esitetty sarjahybridin periaatekaavio. (Hietalahti 2010, 13-14; Emadi 2005, 20-52)



Kuva 2 Sarjahybridin periaatekaavio. (EV World 2011)

### 3.3 Rinnakkaishybridi

Rinnakkaishybridissä nimensä mukaisesti toimii kaksi tehonlähdettä rinnan, yleensä sähkö- ja polttomoottori, jolloin molemmat tuottavat mekaanista tehoa kuormalle. Sähkömoottorin kytkemiseen voimalinjaan on eri vaihtoehtoja. Se voidaan kytkeä välityssuhteella vaihteen, hihna- tai ketjuhammaspyörien avulla. Sähkömoottori voidaan myös sijoittaa polttomoottorin ja vaihteiston väliin, tällöin molemmat moottorit pyörivät samaan tahtiin. Tässä konseptissa sähkömoottorin tarkoituksena on avustaa polttomoottoria kiihdytyksissä, ottaa talteen jarrutuksessa syntyvä energia ja kevyessä kuormitustilanteessa nostaa polttomoottorin kuormitusta toimimalla generaattorina. (Hietalahti 2010, 15-18; Emadi 2005, 39-52)

Rinnakkaishybridi mallia käytetään myös niin sanotuissa ”mild” eli kevythybridimalleissa, joissa on suhteellisen pienet sähkömoottorit teholuokassa 6-15kW ja jännite on 42-160 V DC. Tämän tyyppisissä ratkaisuissa ei ole varsinaista sähköajoa, vaan sähkömoottorin tarkoitus on tarjota lisätehoa liikkeelle lähdössä ja kiihdytystilanteissa. Tällä tekniikalla varustetuissa ajoneuvoissa on yleensä jarrutusenergian talteenotto ja pysäytys-käynnistysautomaatiikka, sekä polttomoottorin leputus alhaisella tasaisella nopeudella ajettaessa. (Hietalahti 2010, 15-18; Emadi, 2005, 39-52; Lehtinen 2010)

Rinnakkaishybridillä on kuusi erilaista toimintatilaa. Ensimmäinen tila missä käytetään ainoastaan sähkömoottoria ja polttomoottori on sammutettu. Toinen tila missä käytetään pelkästään polttomoottoria. Kolmas on hybridi-tila, jossa molemmat sekä polttomoottori että sähkömoottori tuottavat tarvittavan tehon kuormalle. Neljäs on jaetun tehon tila, jossa polttomoottorilla ladataan energiavarastoa ja ajetaan kuormaa. Viides tila on polttomoottorilla energiavaraston laataaminen ajoneuvon ollessa paikallaan ja kuudes tila on regenerointi-tila, jossa otetaan jarrutusenergia talteen energiavarastoon. (Hietalahti 2010, 15-18)

Nämä toimintatilat mahdollistavat eri kytkentätavat, joilla sähkömoottori ja polttomoottori kytketään voimansiirtoon. Yleisessä käytössä on tapa, jossa polttomoottori ja sähkömoottori kytketään siten, että molemmilla on omat vaihdelaatikkonsa, joista ne kytketään vielä mekaanisella momentintasaajalla samaan voimalinjaan. (Hietalahti 2010, 15-18; Emadi 2005, 39-52)

Joissain sovelluksissa käytetään vain yhtä vaihdelaatikkoa. Yleensä nämä sovellukset ovat kevythybridejä, joissa sähkömoottorin tuottama teho on alhainen. Kytkentä voidaan tehdä myös siten, että vaihdelaatikko on ennen sähkömoottoria tai niin, että sähkömoottori on polttomoottorin ja vaihdelaatikon välissä, jolloin puhutaan etukytkenästä. On myös mahdollista toteuttaa rinnakkaishybridi siten, että sähköinen tehon siirto ja polttomoottori tuottavat momentin eri pyörästöön erillisakseleilla, jolloin ajoneuvosta saadaan nelivetoinen. Tätä ratkaisua käyttää Peugeot omassa 3008 Hybrid -mallissaan, jolle Peugeot ilmoittaa 3.8 l/100km kulutuksen ja 99 g/km CO<sub>2</sub> päästöt (Peugeot 2011; Hietalahti 2010, 15-18; Emadi 2005, 39-52)

#### 3.4 Sekahybridi (Jaetun tehon hybridi)

Sekahybridia ei voida lukea rinnakkais- eikä sarjahybridiksi, sillä se yhdistää näiden molempien ominaisuuksia. Se koostuu kahdesta sähkökoneesta, polttomoottorista ja planeettavaihteen muodostamasta yhdistelmästä. Tämän hybridimallin toiminnan edellytys on äsken mainittu planeettavaihte. Sen avulla saadaan ajoneuvo toimimaan ilman kytkintä tavallisen automaatin tapaan. Portaaton voimansiirto mahdollistaa vääntömomentin ja pyörimisnopeuden vapaamman säädettävyyden, kuin normaali vaihteisto. Huonona puolena tästä järjestelmästä voidaan mainita se, että generaattori pitää mitoittaa polttomoottorin huippuvääntömomentin mukaan. Järjestelmä on haavoittuvaisempi kuin rinnakkaishybridijärjestelmä, sillä jos tehoelektronikka vikaantuu, ei voimansiirto pysty toimimaan lainkaan. (Hietalahti 2010, 18-20)

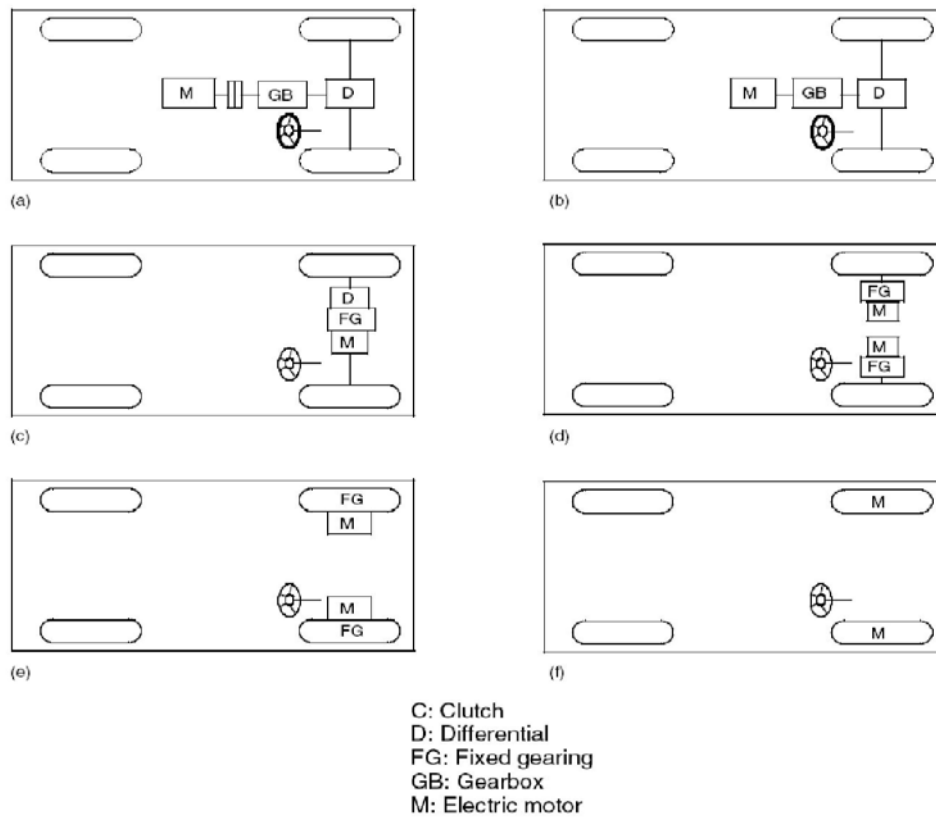


### 3.5 Plug-in hybridi

Plug-in hybridillä tarkoitetaan hybridiajoneuvoa, jota voidaan myös ladata ulkoisesta sähköverkosta ja näin saavuttaa pidempiä ajomatkoja käyttäen ainoastaan sähköä. Tätä varten täytyy joko autossa olla itsessään latausyksikkö tai sitten se täytyy olla sähköverkon ja auton välissä lisälaitteena. Tämän tyyppisissä hybrideissä akuston kokoa on yleensä kasvatettu, jotta latauksesta saataisiin konkreettista hyötyä. Latausvaiheen hyötysuhde on luokkaa noin 85 % riipuen latauslaitteesta ja akun virran luovuttamisen hyötysuhde noin 90 %. Loppuenergia näissä molemmissa vaiheissa kuluu häviöihin. (Lehtinen 2010; Chevrolet 2011)

### 3.6 Sähköauto

Täyssähköautossa ei polttomoottoria ole lainkaan vaan kuormaa ajetaan pelkästään sähkömoottoreilla, jotka saavat energiansa akuilta tai joltain muulta energiavarastolta. Komponentit ovat kuitenkin samalaisia kuin hybridiautoissa sähköisessä voimansiirrossa. Käytännössä järjestelmässä on energiavarasto ja sen hallintajärjestelmä, moottori ja invertteri, jotka löytyvät monesta hybridijärjestelmästä. Sähköauton valttina voidaan pitää voimansiirron muunneltavuutta, sillä sitä voidaan muuttaa kulloisenkin käyttökohteen tarpeen mukaan. Tämän muunneltavuuden mahdollistaa monin eri tavoin toteutettava mekaaninen voimansiirto sähkömoottorilta renkaille. Kuvassa 3 on sähköauton eri voimalinjavaihtoehtoja. (Hietalahti 2010, 20-21)



Kuva 3 Sähköauton eri voimalinjaratkaisuja. (Hietalahti 2010a).

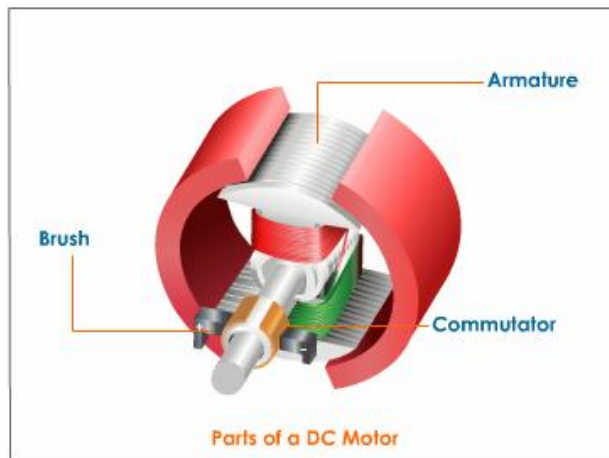
## 4 YLEINEN ERI SÄHKÖMOOTTOREIDEN TEORIA

### 4.1 Tasasähkömoottori

Tasasähkömoottori on rakenteeltaan periaatteessa samanlainen kuin tasasähkögeneraattori. Tässä teoriataustassa keskitytään enemmän sähkömoottoriin, koska se on opinnäytetyön ymmärtämisen kannalta tärkeämpää.

#### 4.1.1 Tasasähkömoottorin rakenne

Tasasähkömoottorin pääosat ovat staattori eli kenttä, roottori eli ankkuri, laakerikilvet, kommutaattori harjoineen ja runko. Kuvassa 4 on eri tasasähkömoottorin osat .



Kuva 4 Yksinkertaistettu malli tasasähkömoottorista, jossa näkyy kommutaattori, hiilet ja ankkurikäänitys. (Tutornext 2011)

Staattori on sähkömoottorin paikallaan pysyvä osa, joka on yleensä valmistettu raudasta ja muodoltaan rengasmaisen. Tämän osan sisäpintaan on kiinnitetty magneettinavat, joihin on liitetty kuparilangasta valmistettu käämitykset ympärille, joilla muodostetaan sähkömoottorin toiminnan edellyttämä magneettikenttä. Sekä navat että staattori ovat yleensä täysrautaisia, mutta

napakengät voidaan tehdä rautalevyistä, jotta magneettivuon vaihtelun aiheuttamat rautahäviöt olisivat näissä pienemmät. (Valtion painatuskeskus 1989, 123-129; Aura&Tonteri 1996, 267-269; Tutorext 2001.)

Roottori on sähkömoottorin pyörivä osa, jonka urissa on ankkurikäänitys, joka on valmistettu sähköä hyvin johtavasta kuparilangasta ja se on eristetty roottorin rungosta. Jotta vältettäisiin pyörrevirtahäviöitä roottorissa, se tehdään toisistaan eristetyistä metallilevyistä ja eristeenä käytetään levyjen väliin liimattuja paperiliuskoa tai ohutta lakkakerrosta. (Valtion painatuskeskus 1989, 123-129; Aura&Tonteri 1996, 272-278)

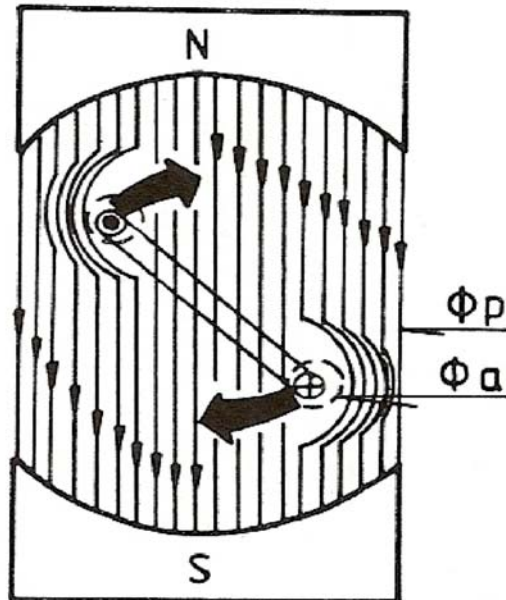
Kommutaattori on tehty toisistaan ja rungosta eristetyistä kupariliuskoista ja on muodoltaan lieriömäinen. Kommutaattorin tehtävä on kääntää virran suunta roottorin ankkurikäänityksessä tietyllä hetkellä, eli sen tehtävänä on tehdä mekaaninen vaihtosuuntaus, minkä johdosta ankkurikäänityksen napaisuus vaihtuu ja saadaan aikaan pyörivä magneettikenttä, jolloin roottori pyörii. (Valtion painatuskeskus 1989,123-129; Aura&Tonteri 1996,267-269)

Ankkurikäänitys tehdään roottorille yleensä siinä oleviin uriin vyyhtimäisesti. Näissä vyyhdeissä voi olla yksi tai useampia johdinkierroksia. Vyyhtien kaksi päätä kytketään kommutaattorille siten, että joka kommutaattorin liuskalle liitetään aina yhden vyyhdin alku ja toisen vyyhdin loppupää, näin liuskojen määrä vastaa vyyhtien määrää. (Valtion painatuskeskus 1989, 123-129; Aura&Tonteri 1996, 275-278)

#### 4.1.2 Tasasähkömoottorin toimintaperiaate

Sähkömoottorille syötetään tasavirtaa hiiliharjojen kautta kommutaattoriin ja roottorikäänitykseen, jolloin sen ympärille syntyy magneettikenttä. Tämän lisäksi tarvitaan staattorilla oleviin magneettinapojen käänityksiin tasavirtaa, jotta myös niiden ympärille saadaan magneettikenttä, pääkenttä. Näiden molempien magneettikenttien ollessa yhtä aikaa päällä, vahvistaa ankkurikenttä koneen pääkenttää toisella puolella ja kumoaa sitä toisella puolen. Kuvassa 5 näkyy selkeästi kuvattuna moottorin päästä katsottuna kenttien kulku. Tämä aiheuttaa kenttien välille vääntömomentin, jolloin roottori alkaa pyörimään siihen

suuntaan, jossa magneettikentät heikentävät toisiaan. (Valtion painatuskeskus 1989, 125-129; Aura&Tonteri 1996, 269-272)



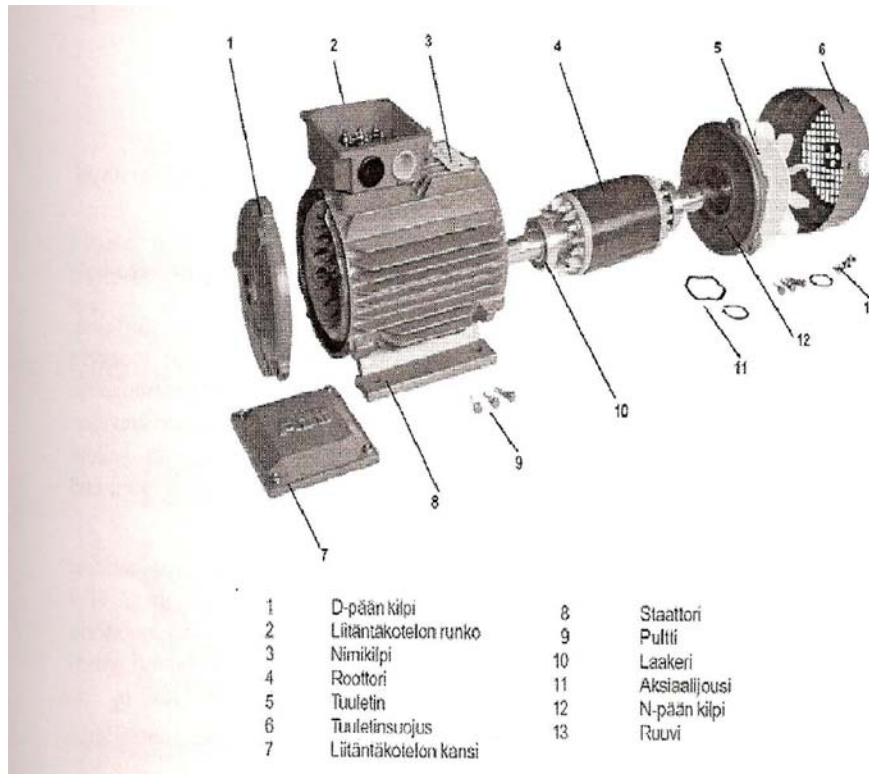
Kuva 5 Magneettikenttien kulku. (Valtion painatuskeskus 1989)

## 4.2 AC-vaihtosähkömoottori

Vaihtosähkökone (AC, Alternating current) on rakenteeltaan lähes identtinen tasasähkökoneen kanssa, joitain eroavaisuuksia lukuunottamatta. Perinteisimpiä sähkömoottoreita on oikosulkumoottori, joka yksinkertaisen rakenteensa puolesta on varmasti yleisin moottoriratkaisu ja on siksi otettu esimerkiksi seuraavaan osioon.

### 4.2.1 Vaihtosähkömoottorin rakenne

Kolmivaiheinen oikosulkumoottori eli epätahtimoottori koostuu staattorista, roottorista, näiden käämityksistä, laakereista, tuulettimesta sekä rungosta. Sen pääosat ovat staattori ja roottori käämityksineen. Kuvassa 6 on vaihtosähkömoottorin osat. (Hietalahti 2010, 47)



Kuva 6 Vaihtosähkömoottorin rakenne. (Hietalahti 2010b)

Roottori tässä moottorityypissä on rakenteeltaan samantyyppinen, kuin tasasähkömoottorin, sillä sekin valmistetaan ohuista toisistaan eristetyistä metalli levyistä (dynamolevyistä). Erona on kuitenkin se, että levyt yhdistetään kuparikiskoilla, jotka yhdistetään roottorin päistä oikosulkurenkaisiin, jolloin siihen syntyy oikosuljenta. Roottorin uramuoto ja sen suunta akselinsuuntaan nähden riippuu moottorin koosta ja halutuista moottorin ominaisuuksista esimerkiksi käynnistys- ja käyntiominaisuuksista. (Hietalahti 2010, 47; Aura&Tonteri 1996 ,120-126; Valtion painatuskeskus 1989, 19-24)

Staattori muodostetaan samanlaisesti kuin roottorikin, toisistaan eristetyistä uritetuista levyistä Näihin uriin tehdään staattorikäänitys emalieristeisestä kuparilangasta. Käämitykset voidaan tehdä eritavoin esim. limikäänitys tai tasokäämitys. Näistä limikäänitys on yleisemmin käytetty koska se vie pienemmän tilan, vyyhdeistä tulee kaikista samankokoisia ja vyyhtien sivut

tukevat toisiaan. (Hietalahti 2010, 47; Aura&Tonteri 1996, 120-126; Valtion painatuskeskus 1989, 19-24)

#### 4.2.2 Vaihtosähkömoottorin toimintaperiaate

Vaihtosähkömoottori eli epätahtimoottori on toiminnaltaan yksinkertainen ja halpa rakenteeltaan. Se tarvitsee nimensä mukaisesti vaihtosähköä toimiakseen ja muodostaakseen pyörivän magneettikentän. Tämä magneettikenttä muodostuu kolmivaiheisissa sähkömoottoreissa itsestään, symmetrisen staattorissa sijaisevan kolmivaihekkäämityksen ja symmetrisen vaihtovirran ansiosta. Sähköä johdetaan staattorin käämityksiin tietyssä järjestyksessä. Staattorin magneettikentän vuot leikkaavat roottorin käämityksen sauvoja, jolloin siihen indusoituu lähdejännite. Roottorin ollessa oikosuljettu, muodostuu ilmväliin toinen pyörivä magneettikenttä. Näiden kenttien voimavaikutukset saattavat roottorin pyörivään liikkeeseen. Roottori kiihtyy ja jää pyörimään hieman alhaisemmalla nopeudella, kuin staattorin magneettikenttä eli se pyörii, niin sanotusti epätahdissa staattorin kenttään nähden. Staattorin magneettikentän pyörintänopeuden eli tahtinopeuden pystyy laskemaan seuraavasta kaavasta.  $n_s = \frac{f}{p}$ , missä p=napapari ja f= virran taajuus. Moottorin jättämän pystyy laskemaan kun tiedetään  $n_s$  eli staattorikentän pyörintänopeus, n moottorin pyörintänopeus ja jättämää merkitään S, seuraavanlaisesta kaavasta:

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} * 100\%$$

(Hietalahti 2010, 47; Aura&Tonteri 1996, 120-126; Valtion painatuskeskus 1989, 19-24)

## 5 SÄHKÖMOOTTORIVERTAILU

Sähkömoottorin valinnassa kiinnitettiin erityistä huomiota seuraaviin asioihin hinta, saatavuus, ohjauksen toteuttamisen vaikeus, teholuokka 20-40 kW, hyötysuhde. Moottorin valintaa tehdessä mietin myös mahdollista jatkojalostusta hybridikäyttöön, sillä ei olisi järkevää hankkia suhteellisen kallista moottoria vain tiettyyn sovellukseen vaan oli mietittävä myös tulevaisuutta.

Valintaprosessi käynnistettiin miettimällä tarkemmin autolta vaadittavia suoritteita ja millaisilla muutoksilla konversio saataisiin toteutettua. Tarkennuksia projektiin mietittiin projektiryhmän kesken kokouksessa, missä päätettiin projektin tarkemmista yksityiskohdista.

Kokouksessa päätettiin säilyttää auton vetotapa etuvetoisena, jolloin pystyttäisiin säilyttämään auton mahdollinen maantiekelpoisuus lain näkökulmasta. Käyttövoimalähdettä mietittäessä päädyttiin pelkkään sähkökäyttöön hybridikäytön sijasta, sen yksinkertaisemman ja halvemman toteutuksen takia. Hybridikäyttöä ei kuitenkaan suljettu kokonaan pois projektista, mutta tässä vaiheessa tyydyttiin vain siihen, että saataisiin järkevästi toteutettua sähkökäyttö kyseiseen ajoneuvoon. Kokouksessa päädyttiin myös siihen, että tässä vaiheessa ajoneuvoon ajatellaan asennettavan yksi sähkömoottori ja voimansiirto tapahtuu tasauspyörästön kautta renkaillle. Jos ajallisesti on mahdollista niin tarkoituksena olisi tehdä selvitys myös kahden moottorin käytöstä, mikä olisi hybridikäyttöä ajatellen tärkeää.

Päätettiin myös, että auton teholuokka pidettäisiin mahdollisimman lähellä alkuperäistä, jolloin sähkömoottorin tulisi olla nimellisteholtaan noin 30 kW ja huipputeho 40-50kW. Kokouksessa otettiin myös huomioon mahdollisuus ettei tätä kokoluokkaa ole saatavilla, jolloin kuitenkin pyrittäisiin mahdollisimman lähelle em. teholuokkaa. Ylärajana pidettiin 40 kW, sillä saatavissa olevien moottoreiden painot nousivat liian isoiksi, jos mentiin yli tämän teholuokan. Käyttöjännitteelle ei asetettu sinänsä minkäänlaisia rajoituksia, kuitenkin



pidimme mielessä 120 voltia, jota pidetään vaarallisen ja vähemmän vaarallisen jännitteen rajana. Emme halunneet kuitenkaan suunnittelun tässä vaiheessa asettaa liian tiukkoja rajoja sen suhteen, jotta sen takia ei suljettaisi mitään eri toteutustapoja ja tekniikoita pois.

Kokouksessa päädyttiin n. 20 km käyttösäteeseen 120 km /h tuntinopeudella, mikä olisi ajoneuvon maksiminopeus. Näiden arvojen perusteella täytyy moottoria valitessa kiinnittää huomiota moottorin pyörintä nopeuteen ja vääntömomenttiin, jotta saataisiin hyvä teho vääntömomentsuhde nopeusalueelle 0-120 km/h.

Selvitetyämme tarkemmat lähtötiedot oli seuraavana vaiheena selvittää eri sähkömoottorivaihtoehtoja, joita voitaisiin käyttää sähköautossa ja joita mahdollisesti käytetään jo joissain valmiissa sähkö- tai hybridiautomalleissa. Näitä eri tavoin toteutettuja sähkömoottoreita on runsaasti, joten mahdollisia vaihtoehtoja karsittiin hieman ja päädyttiin viiteen eri vaihtoehtoon. Vaihtoehtoja sähkömoottoreille oli paljon, mutta saatavuus näiden harvinaisempien moottoreiden kohdalla oli minimaalista, jolloin varsinaisia vaihtoehtoja jäi vain muutamia. Näistä vaihtoehtoista lisää jäljempänä tekstissä.

## 5.1 Moottorin kriteerit

Moottorin tulisi olla robusti, jotta sitä voitaisiin käyttää ajoneuvossa, jossa värinä, kosteus, pöly ovat haittana. Sen vääntö-inertia suhde tulisi olla korkea, jotta saavutettaisiin suhteellinen kiihtyvyys ja mäenousukyky ja myöskin teho-paino suhde tulisi olla hyvä, jottei auton massa lisääntyisi suhteettomasti. Huippuvääntömomentin tulisi olla 2-3 kertainen jatkuvaan arvoon nähden. Moottorin ohjaamisen toteuttamisen tulisi olla helppoa, jotta säätämien voitaisiin toteuttaa opiskelijoiden avulla ja näin olen saataisiin mahdollisimman paljon hyötyä opiskeluun. Moottorin parhaimman hyötysuhdealueen tulisi sijaita pyörimisnopeusalueella, jolla autoa ajetaan kaupungissa ja sen lähetyvillä noin 40-60 km/h nopeudella.

Kyseiseen autoon laskennallinen moottorin pyörintänopeus tulisi olla luokkaa 500 1/min , jos auto olisi suoravetoinen ja ajonopeus 60 km/h lähetyvillä.

Konversion kohteena olevan Toyota Yariksen tapauksessa moottorin pyörintänopeus nykyisillä renkailla olisi laskettuna seuraavanlaisesti:

$$\frac{v * 60}{3,6 * 2 * \pi * r_{dyn}} = \omega_{lask}$$

Jossa  $v$  on auton nopeus,  $r_{dyn}$  renkaan dynaaminen säde ja  $\omega_{lask}$  moottorin pyörintänopeus. Renkaan koko on 175/65/14 ja dynaamisena säteenä on käytetty 0,283 m, joka on saatu STRO normistosta. Alla olevassa taulukossa 1. on laskettu tällä kaavalla sähkömoottorin pyörintä nopeus suhteutettuna auton nopeuteen.

Taulukko 1. Auton ajonopeus suhteutettuna sähkömoottorin pyörintänopeuteen.

Auton nop.(km/h)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Sähk.moot. pyör.nop (1/min)	94	187	281	375	469	562	656	750	844	937	1031	1125	1219

## 5.2 Vaihtosähkömoottorit

### 5.2.1 Epätahtikone

Edellä oleva esimerkki epätahti-induktiomoottorista kuvasi kyseisen moottorin rakenteen ja toiminnan pääpiirteissään, joten sitä ei tässä enää käydä läpi. Mietittäessä kyseisen moottorin käyttöä projektissa täytyy sen hyviä ja huonoja puolia verrata ja näiden pohjalta tehdä valinta. Kuten aikaisemmin kävi ilmi niin tällainen moottori on hyvin yksinkertainen rakenteeltaan ja halvimmasta päästä sähkömoottoreista.

Siinä ei ole mitään muita kuluvia osia, kuin moottorin akselilla olevat laakerit, mikä vähentää huollon tarpeen lähes olemattomiin, mikä sinänsä olisi hyvä asia pidemmällä tähtäimellä. Sillä on myös pieni sisäinen inertia ja suuri vääntömomentti, mikä sähköautokäytössä on erittäin tärkeä asia ajatellen esimerkiksi mäennousukykyä ja liikkeelle lähtöä. Moottorinohjauksella voidaan toteuttaa niin sanottu kentänheikennys, jolloin vähennetään magneettikentän vastamotorista voimaa. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että moottoria

voidaan ajaa nimellisyörintänopeutta korkeammalla kierrosluvulla. Tämän avulla voidaan ajoneuvon nopeutta nostaa tarvittaessa ylitse normaalin ajonopeuden. Normaalilla ajonopeudella tarkoitetaan nopeutta, jota ajetaan sähkömoottorin nimellisenopeuden alapuolella. moottorin nimellisen pyörintänopeuden mukaan. (Hietalahti 2010, 47; Aura&Tonteri 1996, 120-126; Valtion painatuskeskus 1989, 19-24)

Tämän tyyppisellä moottorilla on myös huonot puolensa, joista heikohko hyötysuhde on yksi. Moottorin hyötysuhde riippuu pyörintänopeusalueesta, mutta liikkuu noin 90-75 % tienoilla. Moottorin parhaat hyötysuhteet on yleensä suhteellisen korkeilla pyörintänopeuksilla, jolloin ajomoottorikäytössä se vaatisi jonkinlaisen vaihteen voimansiirtoon. (Hietalahti 2010, 47; Aura&Tonteri 1996, 120-126; Valtion painatuskeskus 1989, 19-24)

Ohjaus voidaan toteuttaa komella eri tavalla skalaarisäädöllä, vektorisäädöllä tai suoralla vääntömomentin säädöllä. Joissain teollisuuskäytöissä yksinkertainen taajuusmuuttajalla toteutettu skalaarisäätö on varsin halpa ja hyvä, mutta juurikin projektin kaltaisessa käytössä eli sellaisessa, missä tarvitaan tarkkaa momentin hallintaa jo aivan pienillä moottorin kierrosluvuilla, olisi vektorisäätö parempi tapa. Tosin tämän tyyppinen ohjaus on kalliimpi ja hankalampi toteuttaa ja kytkeä takaisinkytketäihin järjestelmiin, joilla voitaisiin toteuttaa myöskin jarrutusenergian talteenotto. Kallis ohjauselektronikka vähentää sen houkuttelevuutta projektikäytössä, jossa kustannukset tulisi pitää kohtuullisina. Suora vääntömomentin säätö on kaikista tarkin ohjaus, mutta samalla kustannukset nousevat vielä enemmän kuin vektorisäädössä. (Hietalahti 2010, 47; Aura&Tonteri 1996, 120-126; Biomeri 2009, 100-101; Valtion painatuskeskus 1989, 19-24)

### 5.2.2 Vierasmagnetoitu tahtikone

Vierasmagnetoitu tahtikone muistuttaa harjatonta tasasähkökonetta, sillä siinä vierasmagnetoitu roottori pyörii staattorikäätymisen aiheuttamassa magneettikentässä. Tätä konetyyppiä ei yleensä käytetä moottorina kuin vasta yli 1 MW mekaanista tehoa vaativissa kohteissa. Generaattorina sitä voidaan

käyttää pienemmissäkin järjestelmissä. Vierasmagnetoitua tahtikonetta voidaan käyttää esim. sarjahybridin generaattorina, jolla polttomoottorin tuottama mekaaninen energia muutetaan sähköenergiaksi ajomoottoreiden käyttöön. Tämän tyyppinen sähkökone saattaisi tulla kysymykseen, jos kyseisessä projektissa edetään jossain vaiheessa hybridi toteutukseen. Tämän avulla voitaisiin toteuttaa akkujen lataus melko hyvällä hyötysuhteella. (Hietalahti 2010, 44)

### 5.3 Tasasähkömoottorit

#### 5.3.1 Harjallinen tasasähkömoottori

Harjallisen tasasähkömoottorin perusidea esiteltiin jo aiemmin, joten tässä kohdassa keskitytään sen ominaisuuksiin moottorikäytössä ja sen soveltuvuutta projekti käyttöön.

Harjallista tasasähkömoottoria on käytetty jo melko kauan ajoneuvojen ajomoottoreina esimerkiksi junissa ja metroissa.

Harjallisessa tasasähkömoottorissa voidaan toteuttaa kolme eri vaihtoehtoa staattori- ja roottorikäämityksen muodostamiseksi, sarja- rinnan- ja kompondikäämitys, eli yhdistettykäämitys. Näillä eri käämityksillä voidaan vaikuttaa moottorin käyttäytymiseen tarkasteltaessa vääntömomenttia, pyörintänopeutta ja virta-arvoja. (Hietalahti 2010, 28-31; Aura&Tonteri 1996, 267-282; Valtion painatuskeskus 1989, 123-136)

Harjallisessa moottorissa haittana on mekaaninen kommutointi, jossa harjat kuluvat, aiheuttavat kipinöintiä sekä pölyä. Ajettavuudessa voi tulla myös ongelmia jos peruutusvaihe toteutetaan sähköisesti moottorin pyörintäsuuntaa vaihtamalla, sillä harjat eivät välttämättä toimi toiseen suuntaan yhtä hyvin kuin normaaliin käyttösuuntaan. Mekaaninen kommutointi on tämän koneen heikoin lenkki ja se on myös melko kallis rakenne, jolloin valmistuskustannukset nousevat. (Hietalahti 2010, 28-31; Aura&Tonteri 1996, 267-282; Biomeri 2009, 100; Valtion painatuskeskus 1989, 123-136)

Hyvänä puolena harjallisessa tasasähkömoottorissa on korkea vääntömomentti jo pienillä kierroksilla. Ohjaus tällaisessa moottorissa on helppo toteuttaa, sillä ohjaamiseen tarvitaan vain yksinkertainen hakkuriteholähde, jolla voidaan säätää vääntömomenttia. Harjallisilla moottoreilla voidaan toteuttaa myöskin kentänheikennys jolloin, kuten oikosulkumoottorissa, voidaan moottoria ajaa nimellisuopeutta korkeammalla pyörintänopeudella. Suhteellisen halpa hinta, verrattuna hieman erikoisempiin ja harvinaisempiin sähkömoottorityyppeihin, puoltaa myös tätä moottorityyppiä. Tasasähkömoottorin houkuttelevuutta lisää vielä se, että sillä on monia erilaisia kytkentätapoja joista tyypillisimpänä voidaan mainita sarjakäämitty sekä vierasmagnetoidut versiot. (Hietalahti 2010, 4; Aura&Tonteri 1996, 267-282; Valtion painatuskeskus 1989, 120-137)

Sarjakytkennässä moottorin magnetointipiiri on, nimensä mukaisesti, sarjaankytketty ankkuriin kanssa. Tällä tavoin saadaan hyvä vääntömomenttiominaisuus ajoneuvokäyttöön.

Vierasmagnetoidussa moottorissa magnetointikäymistä säädetään erillisestä teholähteestä, jolloin kentänheikennyksen ja ohjauksen toteuttaminen helpottuu entisestään. Tämä lisää käyttömukavuutta ja helpottaa soveltuvuutta ajoneuvokäyttöön. (Aura&Tonteri 1996, 267-282; Valtion painatuskeskus 1989, 120-137)

### 5.3.2 Harjaton kestopagneetti tasasähkömoottori

Harjaton tasavirtamoottori (Brushless direct current motor, BLDC-motor) eroaa vain hieman tavanomaisemmasta harjallisesta moottorista. Suurimpana erona on niin sanotun työvirran eli ankkurivirran syöttäminen moottorin sijasta staattorille. Roottori tehdään kestopagneeteista, mikä yksinkertaistaa moottorin rakennetta entisestään, mutta toisaalta monimutkaistaa sen ohjausta ja nostaa hintaa. Kestopagneetit poistavat harjojen tarpeen, jolloin moottori on huoltovapaampi ja mekaanista kommutaattoria ei tarvita lainkaan. Tässä moottorityypissä ohjainlaite syöttää virtaa tiettyihin staattorin käämeihin ja johtaa sen vastaavasti pois toisista käämeistä tietyssä järjestyksessä, jolloin moottori saadaan pyörimään. Moottorin ohjaukseen tarvitaan tarkka tieto

roottorin asennosta ja se tieto annetaan yleensä HALL- tyyppisillä antureilla. Tavallisimmissa tapauksissa moottorissa on kolme HALL-anturia 120 kulma-asteen välein ja niiden avulla saadaan tarkka roottorin asennontunnistus tehtyä. (Hietalahti 2010, 37-38; Hietalahti 2010, 31-32; Espinosa 2011)

Harjattomalla tasavirtamoottorilla on kuten muillakin moottoreilla hyvät ja huonot puolensa. Hyvinä puolina voidaan pitää parempaa hyötysuhdetta, alhaisempaa melutasoa, sekä monipuolisempia rakenne ratkaisuja, kuin harjallisessa moottorissa. Kommutaattorin puuttuessa ei myöskään harjoille ole käyttöä, joten harjaton moottori on myöskin huoltovapaampi kuin harjallinen. Harjattomuus estää myös kipinöinnin harjan ja kommutaattorin välillä, näin ollen moottorin turvallisuus käytössä paranee. Moottorin robustisuus kasvaa, koska ei ole harjoja jotka tärinästä tai jostain muusta syystä voisivat aiheuttaa moottorin toimintaan häiriötä. Lämpöongelmia voidaan hoitaa esim. niin että muutetaan staattorin ja roottorin paikkaa, jolloin kestopagneetit saadaan ulkokehälle, mistä lämpö johtuu paremmin pois. (Hietalahti 2010, 37-38; Hietalahti 2010, 31-32; Espinosa 2011)

Moottorin nopeus-momenttikäyrä on lineaarinen, jolloin moottorin ohjaaminen on suhtellisen helppoa. BLDC-moottoria ohjataan pulssisuhdesäätötavalla (Pulse width modulation, PWM). Kestomagneettimoottoriin ei välttämättä tarvita vaihteistoa väliin voimansiirrossa, sillä ne on yleensä suunniteltu hitaisiin pyörintänopeuksiin. Moottorityypistä riippuen on varmasti mahdollista päästä 1200-1500 1/min kierrosluvuille, mitä kierrosluvut olisivat projekti auton maksiminopeuden ollessa 120-140 km/h suoravetoisena. (Hietalahti 2010, 37-38; Hietalahti 2010, 31-32; Espinosa 2011)

Huonoksi puoleksi voidaan mainita kentänheikennys. Se on hankalampi toteuttaa kuin induktimoottorilla, mutta ei mahdotonta. Sen aikaansaamiseksi tarvitaan melko suuri demagnetointivirta, sillä sen täytyy heikentää kestopagneettien magneettikenttää. Myöskin moottorin jäähdyttämisen on oltava hyvä, sillä kestopagneetit ovat herkkiä liiallisen lämmön suhteen. Liian korkea lämpötila voi johtaa niiden pysyvään demagnetoitumiseen. (Hietalahti 2010, 37-38; Hietalahti 2010, 31-32; Espinosa 2011)

Moottorin rajallinen vakiotehoalue ja korkea hankintahinta kestopagneeteista johtuen ovat myös tämän moottorityypin huonoja puolia. Ohjauselektronikka on myös hintaa nostava tekijä muun lisäelektronikan kanssa, jota harjattoman kommutoinnin käyttäminen vaatii. (Hietalahti 2010, 37-38; Hietalahti 2010, 31-32; Espinosa 2011)

#### 5.4 Kestomagneettitahtikoneet

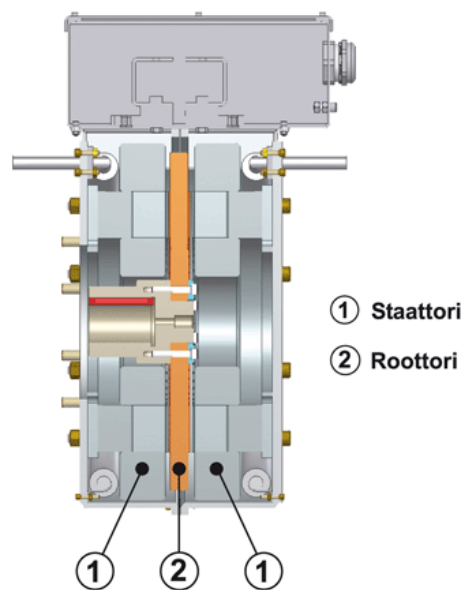
Kestomagneettitahtikoneet (Permanent magnet synchronous motor, PMSM) ovat herättäneet kiinnostusta ja olleet kovan kehityksen kohteena. Näiden koneiden tulevaisuus kulkee kestopagneettimateriaalien mukana, sillä kestopagneettien kehittyessä kehittyvät varmasti myös kestopagneettitahtikoneet. Kestomagneetti on tämän moottorityypin tärkein osa ja samalla sen heikoin osa. Kestomagneettimateriaalit ovat melko herkkiä kovalle lämpötiloille, jolloin jäähtymisen tulee toimia hyvin tällaisen moottorin yhteydessä. (Hietalahti 2010, 94-104)

PMSM-tyyppiset koneet ovat hyvin lähellä harjattomien tasasähkömoottoreiden rakennetta. Moottorissa on kestopagneettiroottori ja käämitty staattori. Roottori voidaan rakentaa, joko niin että kestopagneetit asennetaan sen pintaan liimaamalla tai ne voidaan asentaa upottamalla roottorin sisään. Ensimmäinen vaihtoehto on yksinkertaisin ja halvin. Pintaan asennettaessa magneetit täytyy liimata, joko palasista tai käyttää muotoiltuja magneetteja, mikä lisää valmistuskustannuksia. Liimaamisen huono puoli on se, että roottoria ei voida käyttää kovin korkeilla pyörintänopeuksilla, jotteivat magneetit irtoa. Jos tämän tyyppistä moottoria halutaan käyttää korkeilla kierroksilla täytyy magneetit sitoa esimerkiksi hiilikuitupannoilla, jotta ne pysyisivät luotettavasti kiinni. Näiden pantojen käyttäminen taas lisää hintaa sekä vähentävät magneettivuon tehokkuutta lisäämällä ilmaväliä. (Hietalahti 2010, 94-104)

Roottoriin upotettaessa magneetit voidaan asentaa moniin eri asentoihin ja ne voivat olla suorakaiteen muotoisia, jolloin niitä ei tarvitse muotoilla ja näin

säästetään valmistuskustannuksissa. Roottori on tässä tapauksessa hiukan suurempi, jolloin sen hitausmomentti kasvaa samalla.

Koneen ominaisuuksiin vaikuttaa suuuresti magneettien sijoittelu roottoriin. Roottorin rakenteiden luokittelu tapahtuu esimerkiksi sen mukaan, missä suunnassa magneettivuo vaikuttaa akseliinjaan nähden. Kahta yleisintä tyyppiä edustavat radiaali- ja aksiaalivuomootorit. Kuvassa 7 on esimerkki aksiaalivuomoottorista.



Kuva 7 Aksiaalivuomoottori kahdella staattorilla.(AXCO Motors 2011c)

Tässä kohtaa keskitytään näistä kahdesta tyypistä aksiaalivuomoottoriin, mikä soveltuu ajoneuvokäyttöön paremmin ominaisuuksiensa puolesta. (Hietalahti 2010, 94-104)

Tämän moottorin hyvinä puolina voidaan pitää korkeaa vääntömomenttitiheyttä, moottorin kokoa, mikä saadaan aksiaalivuotekniikan avulla kompaktiksi eritoten pituussuunnassa. Moottorissa voidaan käyttää joko yhtä tai kahta staattoria. Kahden staattorin käyttäminen nostaa vääntömomentin tuottoa, mutta toisaalta myös painoa sekä hintaa. Tässä moottorissa voidaan käyttää samaa invertterinä kuin induktiomootorissa, mutta yksinkertaisempaa ohjausta verrattuna induktiomoottoriin. Kentänheikennys on hankalampi toteuttaa tähän



moottorityyppiin kuin induktiomoottoriin, sillä moottori on ns. pakko magnetoitu kestopagneeteilla. (Hietalahti 2010, 94-104; AXCO Motors 2011a)

## 5.5 Moottorityypin valinta

Tutkimustyön edetessä ja sen aikana tuli selväksi, että mitään yksinkertaista totuutta ei tule löytymään yhdestä ja ainoasta oikeasta moottorivaihtoehdosta. Sähkömoottoreiden ominaisuudet riippuvat hyvin monesta eri asiasta, esimerkiksi moottorin rakenteellisista ratkaisuista ja käyttöolosuhteista. Melkein kaikilla moottorityypeillä oli jotkut osa-alueet parempia kuin toisella. Ennen kaikkea moottorin valitseminen sähköautokäyttöön on kompromissien tekemistä. Jos halutaan kevyt pieni moottori joudutaan silloin tinkimään vääntömomentista, sillä suurempi halkaisijainen moottori tuottaa enemmän vääntömomenttia, mutta toisaalta suurempi halkaisija lisää painoa. Nämä kaikki asiat vaikuttavat toisiinsa sekä lopulliseen tuotteeseen. Toki pystytään kompromissien tekemistä minimoimaan, jos lähdetään teettämään omaa moottoria halutuin ominaisuuksin.

Lähdin kuitenkin miettimään moottorivaihtoehtoja täysin aiemmin mietittyjen moottorikriteerien pohjalta, mikä hieman helpotti tilannetta. Toki nämä kriteerit eivät ole lopullisia totuuksia, mutta ovat kuitenkin suuntaviivoina kohti oikeaa ratkaisua.

Kirjoittaessani moottoreiden ominaisuuksista etsin tietoa monista eri lähteistä, jotta tulokset olisivat mahdollisimman luotettavia. Koska ei ollut mahdollisuutta tehdä minkäänlaisia konkreettisia mittauksia täytyi vertailu tehdä ainoastaan lukemieni tietojen perusteella.

Etsiessäni tietoa saattoi eri lähteistä löytää ristiriitaista tietoa samoista moottoreista esimerkiksi hyötysuhteista ja siitä kuinka kalliita eri moottorit olivat. Varsinkin moottorivalmistajien sivuilta löytyvään informaatioon täytyi suhtautua varauksella. Pysin näissä tapauksissa käyttämään opittua tekniikkaa ja etsimään ainakin kaksi kolme eri lähdettä samasta aiheesta, jotka kertoivat asian samalla tavalla. Näin saatoin varmistua, että tiedon voi esittää työssäni.

Yhdeksi mielenkiintoiseksi vaihtoehdoksi nousi kestromagneettitahtimoottori ja tarkemmin sen aksiaalivuotekniikkaan perustuva versio. Aksiaalivuomoottorin levymäinen rakenne antaa mielenkiintoisia mahdollisuuksia moottorin sijoittelulle. Myös sen suhteellisen suuri vääntömomenttitiheys ja hitaahko pyörintänopeus ovat hyviä ominaisuuksia mietittäessä suoravetoratkaisua ajoneuvolle. Moottorin korkea hankinta hinta voi toki hankaloittaa sen hankkimista, mutta uskon kuitenkin sen olevan hyvä hankinta projektin kannalta. Tällä moottorilla olisi myös kotimainen toimittaja, jonka kanssa erinäiset yhteistyökuviot olisivat varmasti hyödyllisiä projektin jatkoa ajatellen.

Helpoin vaihtoehto olisi varmasti valita moottoriksi kolmivaihepätahtimoottori ajomoottoriksi, sillä näitä on saatavana valmiina vaihteisto- moottori-ohjainlaite paketteina. Yksi valmistaja, Azure-dynamics valmistaa kyseisenlaisia paketteja ja tätä on käytetty Lahti-energian valmistuttamassa sähköautoprojektissa. (Lahti Energia 2011)

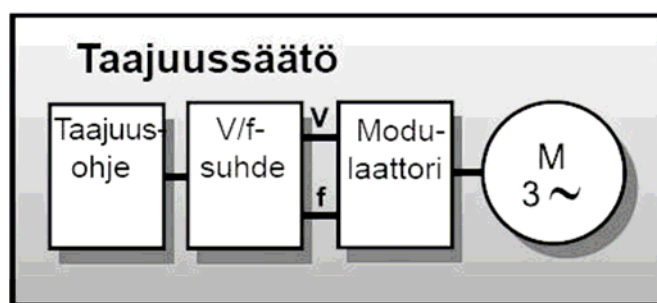
Omasta mielestäni kuitenkin aksiaalivuomoottorin käyttäminen olisi pitkässä juoksussa sekä mielenkiintoinen, että hyödyttävä hankinta oppilaita ja koko oppilaitosta ajatellen. Sen hyvät ominaisuudet, muotoilu ja vielä hieman harvinainen käyttö ajoneuvoissa antavat monia mahdollisuuksia tulevaisuutta ajatellen.

## 6 SÄHKÖMOOTTORIN OHJAUKSEN/SÄÄDÖN TEORIA

### 6.1 Skalaarisäätö

Skalaarisäädössä moottorin pyörintänopeutta ohjataan muuttamalla vaihtosuuntaajasta lähtevää jännitettä ja sen taajuutta. Säädössä ei käytetä takaisinkytkentää, mikä hankaloittaa momentin tarkkaa säätämistä. Kuten vektorisäädössäkin skalaarisäätö tarvitsee modulaattorin, mikä lisää järjestelmään osia sekä säätötapahtumia. Näin ollen vasteajat nousevat ja tarkkuus säädössä kärsii. (Hietalahti 2011; Hakola 2008,14-18)

Tämän tyyppinen säätö ei ota huomioon moottorin ominaisuuksia ja sitä käytetään yleisesti yksinkertaisten laitteiden kanssa esimerkiksi puhaltimet, kuljettimet. Skalaarisäätö on halpa ja yksinkertainen mutta en usko että ajoneuvo käytössä kovinkaan hyvä. Toki tämän tyyppisellä säädöllä voitaisiin tehdä ensimmäisiä koekäyttöjä, mutta ei varsinaisia ajoja. Kuva 8 (Hietalahti 2011; Hakola 2008, 14-18)



Kuva 8 Skalaarisäädön säätöpiiri. (Hakola 2008)

### 6.2 Vektorisäätö

Vektorisäädössä käämivuota ja vääntömomenttia säädetään erikseen, jolloin päästään hyvin tarkkaan ohjaukseen myös pienillä pyörintänopeuksilla. Hyvän

säädön edellytyksenä on piirikortille mallinnetut moottorin sähköiset ominaisuudet. Säädettävät suuret syötetään modulaattorille eli PWM modulaattorille, joka syöttää ne sähkömoottorille. Näin ollen momenttia säädetään epäsuorasti. Magneettivuota säädetään magnetointikäymyksellä ja vääntömomenttia ankkurivirralla. Jotta näitä pystyttäisiin säätämään tarvitaan staattorinvirta tieto ja roottorin pyörintänopeustieto. (Hietalahti 2011; Hakola 2008, 14-18)

Vektorisäädöllä on hyvä momenttivaste, tarkka nopeudensäätö, täysimomentti nolلانopeudella ja melkein yhtä hyvä suorituskyky kuin tasavirtakäytöllä. Nämä tuovat tietenkin lisää elektroniikkaa ja sen mukana lisää hankintakustannuksia, mutta tämäntyyppinen ohjaus olisi varmasti suhteessa kustannuksiin ja hyötyihin hyvä vaihtoehto käytettäväksi moottorin säädössä. Kuvassa 9 näkyy vuovektorisäädön periaatekaavio. (Hietalahti 2011; Hakola 2008, 14-18)



Kuva 9 Vuovektorisäädön säätöpiiri. (Hakola 2008)

### 6.3 Suora vääntömomentin säätö (DTC)

Suora momentin säätö on tällä hetkellä kehittynein käyttötekniikka vaihtovirtamoottoreille. Siinä moottorinhallinta perustuu tarkkaan laskettuun moottorin teoriaan, jolloin moottorin momentin säätö tapahtuu laskemalla. Tämä poistaa säätöketjusta modulaattorin, joka löytyy sekä skalaari- että vektorisäätöisistä järjestelmistä. DTC-käytössä ei suuren laskentanopeuden

takia tarvita moottorin asentotietoa eikä aiemmin mainittua modulaattoria, näin ollen säätöjärjestelmää saadaan kevennettyä ja toimintaa nopeutettua. DTC:n momentti vaste on nopeampi, kuin missään vaihtovirta tai tasavirtakäytössä. (Hietalahti 2011; Hakola 2008, 14-18)

DTC-säädössä säätösuureita ovat moottorin momentti ja magneettivuo. Nämä suureet vaikuttavat suoraan moottorin momenttiin, kuten tasavirtakäytössäkin, missä säädetään ankkurivirtaa sekä magnetointivirtaa. DTC onkin ainoa säätötapa, mikä yhdistää sekä vaihto- että tasavirtasäätöjen hyvät puolet esim. täysi momentti nollanopeudella ja tarkka säätö pysähdyksiin asti. Sen säätöpiiri eroaa vuovektori säätöpiiristä siten että se ei tarvitse takaisinkytkentää eikä modulaattoria, mitkä näkyvät kuvassa 9 (Hietalahti 2011; Hakola 2008, 14-18)

Kaikilla näillä hyvillä ominaisuuksilla on kuitenkin kääntöpuolensa, sillä DTC on kalliimpi, kuin perinteiset säätömenetelmät. Tässäkin asiassa täytyy miettiä onko saavutettu hyöty kalliimman hinnan arvoinen.

## 7 YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä esiteltiin eri moottorivaihtoehtoja, joita voitaisiin käyttää sähköautosovelluksissa osana Turun ammattikorkeakoulun Toyota Yaris -projektia. Näitä sähköautosovelluksia ovat eri hybridiversiot ja täyssähköauto. Työssä käytiin läpi moottorien toimintaperiaatteet sekä näiden rakenteet. Niitä myös verrattiin toisiinsa ja näiden huomioiden pohjalta annettiin oma ehdotus moottorista, jota voitaisiin käyttää projektissa käyttömoottorina.

Toinen osa opinnäytetyötä oli moottoreiden ohjaus ja säätö. Työssä käytiin läpi eri taajuusmuuttajan säätötavat ja kerrottiin lyhyesti näiden toimintaperiaatteet. Tämä antoi yleisen käsityksen eri vaihtoehdoista, joita on olemassa tähän tehtävään.

Moottorivaihtoehdoksi työssä päädyttiin kestromagneettitahtimoottoriin ja tarkemmin aksiaalivuomoottoriin. Ominaisuudet, jotka tähän ratkaisuun päättymiseen johtivat, olivat moottorin tekniset ominaisuudet, hyvä vääntömomentintuotto, paino muotoilu ja mahdollisuus suoravetokäyttöön ajoneuvossa.

Työn edetessä päädyin myös siihen, että ohjaus olisi parasta toteuttaa moottorin toimittajan kanssa yhteistyössä tai jonkun tämän yhteistyökumppanin kanssa. Näin siitä johtuen, että saataisiin paras mahdollinen ohjaus moottorille ja sen kaikki ominaisuudet saataisiin hyödynnettyä.

## LÄHTEET

Aura, L. & Tonteri, A. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. Porvoo: WSOY.

AXCO Motors 2011a. Aksiaalivuoteknologia. Viitattu 9.1.2011

<http://www.axcomotors.com/aksiaalivuomoottori/aksiaalivuotekniikka.html>

AXC Motors 2011b. Aksiaalivuoteknologia. Etusivu. Viitattu 13.1.2011

<http://www.axcomotors.com/aksiaalivuomoottori/index.html>

Biomeri 2009. Sähköajoneuvot Suomessa selvitys.

Chevrolet 2011. Viitattu 23.1.2011.

[http://www.chevrolet.fi/koe-chevrolet/tulevaisuuden-autot/volt-tuotantomalli.html#\\_SP1](http://www.chevrolet.fi/koe-chevrolet/tulevaisuuden-autot/volt-tuotantomalli.html#_SP1)

Emadi, A. 2005. Handbook of automotive power electronics and motor drives.

Espinosa, A. Garcia, 2011. Intesive Program -kurssin materiaali, Espanja, Terrassa.

Fisker Automotive 2011. Viitattu 6.5.2011. <http://www.fiskerautomotive.com/>

Hakola, T. 2008. Taajuusmuuttajakäytön testausjärjestelmän käyttöönotto, Insinööriyö

Hietalahti, L. 2010a. Sähkökäyttö ja hybriditekniikka ajoneuvo- ja työkonenäyttöön,

Hietalahti, L. 2010b. Muuntajat ja sähkökoneet

Hietalahti, L. 2011. Säädetty sähkömoottorikäytöt

Lahti Energia 2011. Viitattu 6.5.2011. <http://www.lahtienergia.fi>

Lehtinen, A. 2010. AEL Kurssimateriaali kurssilta; Ajoneuvojen voimalaitetekniikka muutosten edessä, 5.10.2010

Peugeot 2011. Viitattu 14.2.2011.

<http://www.peugeot.com/en/products/cars/3008hybrid4.aspx>

Trafi 2011a. Moottoritekniikka. Viitattu 23.1.2011.

[http://www.trafi.fi/ekoautoilu/polttoaineet\\_ja\\_ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka](http://www.trafi.fi/ekoautoilu/polttoaineet_ja_ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka)

Trafi 2011b. Polttoaineet. Viitattu 23.1.2011.

[http://www.trafi.fi/ekoautoilu/polttoaineet\\_ja\\_ajoneuvotekniikka/polttoaineet](http://www.trafi.fi/ekoautoilu/polttoaineet_ja_ajoneuvotekniikka/polttoaineet)

Turun ammattikorkeakoulu 2011. Viitattu 4.1.2011.

<http://www.turkuamk.fi/public/default.aspx?nodeid=7569&culture=fi-FI&contentlan=1>

Tutorext 2001. What is dc motor. Viitattu 22.5.2011 <http://www.tutornext.com/help/what-is-dc-motor>

Valmet Automotive 2011. Autoteollisuuden palveluiden tuottaja. Viitattu 13.1.2011.

<http://www.valmet-automotive.com/automotive%5Ccms.nsf/pages/indexfin>

Valtion painatuskeskus1989, Sähkömoottorikäytöt ja –asennukset,123-129



## LIITTEET

### Liite 1. Sähköpostiviesti AXCO-motorssilta

---

Lähettäjä: Asko Parviainen [asko.parviainen@axcomotors.com]

Lähetetty: 6. heinäkuuta 2010 12:37

Vastaanottaja: Sami T. Heikkinen

Aihe: Re: VS: TurunAMK moottoritiedustelua

Terve,

Lomahässäkkä painaa päälle jo etn en saa tamun hintaa selville ennekuin elokuun alkupuolella.

Moottoreiden osalta kappalehinta olisi määrälle 2 kpl (vai tarvitsetteko varakoneen?) 13 700 EUR/kpl määrälle 2 kpl, jos tehdään kolme niin 12 700/kpl. Alv 0%

Budjetointia varten tamut liikkunevat samassa hintatasossa

Hintaa on jonkunverran kun ei ole ns. sarjatuoantomalli.

Lähetän virallisen tarjouksen kun taajuusmuuttjien hinta on minulla tiedossa elokuun alkupuolella

t: Asko