

Ville Multisilta

VW KLEINBUS KONVERSION  
MOOTTORIVERTAILU

Sähkötekniikan koulutusohjelma  
2012

## VW KLEINBUS KONVERSION MOOTTORIVERTAILU

Multisilta, Ville  
Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Toukokuu 2012  
Ohjaaja: Pulkkinen, Petteri  
Sivumäärä: 27  
Liitteitä: 0

Asiasanat: sähkömoottori, oikosulkumoottori, taajuusmuuttaja

---

Opinnäytetyön aiheena on VW Kleinbus –pakettiauton alkuperäisen polttomoottorin korvaaminen sähkömoottorilla. Moottorin valinnassa on tärkeää ottaa huomioon auton tarpeet. Vanhan polttomoottorin suoritusarvot pitää sisältyä laskelmiin, jotta valitaan oikean kokoinen sähkömoottori. Sähkömoottorin valinnan lisäksi valitaan moottorin ohjain, joka osaltaan on tärkeässä asemassa moottorin suorituskyvyn maksimaalisessa hyödyntämisessä.

Sähköautojen tarve kasvaa kokoajan. Nykypäivän energiapolitiikka ajaa yhteiskuntaa väkisin siihen, että päästöjä on leikattava mahdollisimman paljon. Tässä tilanteessa kuvaan astuu sähköauto, joka syrjäyttäessään polttomoottoriauton edes osittain kaupunkiliikenteessä, vähentäisi suoria autojen aiheuttamia päästöjä todella paljon.

Toistaiseksi sähköautojen tuleamista on hidastanut akkujen hidas kehitys, joka on aiheuttanut sen, että autojen kantama on ollut liian pieni. Tähän on pikkuhiljaa tulossa muutos akkutekniikan kehittyessä. Autoista saadaan nykyään suorituskykyä riittävästi, joten enää ongelmana on miten ihmiset saadaan uskomaan sähköautotekniikan toimivuuteen.

# VW KLEINBUS CONVERSION ENGINE COMPARISON

Multisilta, Ville

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Electrical Engineering

May 2012

Supervisor: Pulkkinen, Petteri

Number of pages: 27

Appendices: 0

Keywords: electrical motor, induction motor, variable-frequency drive

---

The purpose of this thesis was to examine motor conversion to VW van. Idea was to replace old internal combustion engine by an electric motor. When selecting a motor to car it is important to take into account the need of the car. The old internal combustion engine performance characteristics should be included in the calculations. I also selected the motor controller to car. Motor controller has an important role when using motor with maximum values.

The need for electric cars is growing all the time. Nowadays emissions must be cut off as much as possible. In this situation electric car is what we need. When electric car replaces the car with internal combustion engine it reduce direct emissions caused by cars.

So far, the coming of electric vehicles has been slowed down by slow progress in the battery technology. Electric cars are now in the performance of sufficient, so the biggest problem is how to get people to believe in electric cars.

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	KLEINBUS-PROJEKTI .....	5
2.1	Tavoite .....	5
2.2	Tutkimusnäkökulmat .....	6
2.3	Aihio .....	6
3	PERUSTIETOA SÄHKÖAUTOISTA .....	7
3.1	Historia.....	7
3.2	Tulevaisuus .....	8
3.3	Tekniikka .....	9
3.4	Hybridi .....	9
4	SÄHKÖMOOTTORIT.....	10
4.1	Oikosulkumoottori .....	10
4.1.1	Oikosulkumoottorin rakennekuva .....	11
4.2	Tahtimoottori .....	11
4.3	Tasasähkömoottori.....	12
4.3.1	Tasasähkömoottorin rakennekuva.....	13
5	ERILAISET MOOTTORIT SÄHKÖAUTOKÄYTÖSSÄ.....	14
5.1	Moottorit .....	14
5.2	Vertailu .....	15
6	SÄHKÖMOOTTORIN OHJAUS.....	15
6.1	AC-Moottorin ohjaus .....	16
6.2	DC-Moottorin ohjaus .....	16
7	SOPIVAN MOOTTORIN JA KÄYTÖN VALINTA.....	17
7.1	Laskut.....	17
7.1.1	Painovoima .....	17
7.1.2	Vierintävastus .....	18
7.1.3	Ilmanvastus .....	18
7.2	Moottorin valinta .....	21
7.2.1	Azure Dynamics AC24LS .....	21
7.3	Ohjauksen valinta.....	23
7.3.1	Azure Dynamics DMOC445 .....	23
8	SÄHKÖAUTOMUUNNOKSEN VIRANOMAISVAATIMUKSET .....	25
9	YHTEENVETO .....	25
	LÄHTEET.....	26

## 1 JOHDANTO

Nykypäivänä energian säästäminen ja uusiutuvien energioiden käyttö on yhä tärkeämpää. Suomessa välimatkat ovat pitkiä, joten auton käyttö on useimmissa tapauksissa perusteltua. Siksi olisikin tärkeää saada autoista energiatehokkaampia ja vähäpäästöisempiä. Fossiilisten polttoaineiden käyttöä on alettu maailmanlaajuisesti vähentämään erilaisilla rajoituksilla, jotta päästöt pienenisivät. Jossain vaiheessa tulee tilanne, että ajoneuvojen suorat päästöt pitää saada minimiin, joten sähköauto on silloin erittäin varteenotettava vaihtoehto. Tulevaisuudessa sähköauto saattaakin syrjäyttää polttomoottoriauton päästöttömyytensä ansiosta, kunhan tekniikka saadaan tarvittavalle tasolle. Sähköauton etu polttomoottoriautoon verrattuna on myös pienempi melu, mikä syntyy sähköautoissa lähes ainoastaan renkaista.

Sähköautojen ongelma on jo pitkään ollut akkuteknologian hidaskas kehitys. Sähkömoottoreiden teho on saatu jo riittävälle tasolle, mutta akkuteknologian heikkouden vuoksi sähköautojen kantama on ollut lyhyt. Kehitys kulkee silti oikeaan suuntaan ja nykyään on jo lähes mahdollista rakentaa sähköauto, joka korvaa perinteisen polttomoottoriauton.

Sähköautojen tuotanto on vielä toistaiseksi vähäistä. Tällä hetkellä hybridiautot, eli autot joissa on sekä sähkö- että polttomoottori, ovat markkinoilla sähköautoa huomattavasti suosituimpia. Tavalliselle autonkäyttäjälle markkinoilla ei vielä ole varteenotettavaa vaihtoehtoa sähköautoksi.

## 2 KLEINBUS-PROJEKTI

### 2.1 Tavoite

Projektissa on tavoitteena rakentaa sähköauto, joka herättää huomiota. Sähköautoa tullaan käyttämään Satakunnan ammattikorkeakoulun markkinoinnissa ja opiskelijajyhdistys SAMMAKON toiminnassa esimerkiksi messuilla ja opiskelijatapahtumis-

sa. Sähköauton avulla Satakunnan ammattikorkeakoulu saa positiivista julkisuutta eri medioissa. Projektiin liittyvä tutkimustoiminta kasvattaa Satakunnan ammattikorkeakoulun osaamista tehoelektroniikan, sähkömoottoreiden ja akkuteknologian sarjoilla. Projektissa tuodaan näyttävästi esille kestävä kehitys ja uusiutuva energia.

## 2.2 Tutkimusnäkökulmat

Sähköauton lataustavat:

- Sähköverkko
- Aurinkoenergia
- Tuulienergia

Sähköauton tehoelektroniikka

Sähkömoottorit

Akkujen vaihtaminen lennossa – Akkukasetti

Talvikäyttö

Kestävä kehitys ja kierrätys – vanhan ja uuden teknologian fuusio

## 2.3 Aihio

Aihiona projektissa toimii vuosimallia -74 oleva VW Kleinbus. Kleinbussin vanha polttomoottori on siis tarkoitus korvata sähkömoottorilla.



Kuva 1. Projektin aihiona toimiva Kleinbus.

### 3 PERUSTIETOA SÄHKÖAUTOISTA

#### 3.1 Historia

Sähköautojen historia ulottuu aina autoteollisuuden ja 1800-luvun alkuun, jolloin Faraday oli keksinyt sähkömoottorin periaatteen. 1830-luvulla erilaisia sähköllä toimivia autoja ja vaunuja kehiteltiin eri ihmisten toimesta useampiakin. Sähköautojen tulevaisuus alkoi näyttää lupaavalta, kun ranskalaiset Gaston Plante ja Camille Faure kehittivät akkuteknologiaa eteenpäin. 1800-luvun lopulla Iso-Britannia ja Ranska alkoivat tukea sähköautojen kehitystä laajemmin. Amerikassa sähköautojen historia alkaa vasta aivan 1800-luvun lopussa, kun A. L. Ryker rakensi sähköisen kolmipyörän ja William Morrison kehitti sähköisen vaunun, jossa oli paikka kuudelle matkustajalle. Morrisonin vaunua pidetäänkin yleensä ensimmäisenä käytännöllisenä sähköautona. /1/

1900-luvun alussa sähköautoissa oli paljon etuja verrattuna polttomoottorilla tai höyrykoneella varustettuihin autoihin. Sähköautoissa ei ollut tärinä, melu tai hajuhaittoja verrattuna bensiiniautoihin. Myös vaihteiden puuttuminen oli suuri etu verrattuna polttomoottoriautoihin. /1/

Sähköauton suosio lähti laskemaan 1920-luvun aikana. Kaupunkien väliset hyvät tiet vaativat autoilta pidempää kantamaa. Myös öljylöyö Texasissa laski bensiinin hintaa, jolloin se oli paremmin saatavilla tavalliselle kuluttajalle. /2/

Henry Ford aloitti polttomoottoriautojen massatuotannon, jolloin niiden hinta laski reilusti verrattuna sähköauton hintaan. Vuoteen 1935 mennessä sähköautot olivat kadonneet lähes kokonaan. /2/



Kuva 2. Baker Electric –sähköauto vuodelta 1909 /13/

### 3.2 Tulevaisuus

Sähköautojen uusi tuleminen alkoi 1960-luvulla, jolloin tuli tarve vähentää polttomoottoriautojen pakokaasupäästöjä sekä yritys vähentää tarvetta ulkomaiselle raakaöljylle. 1960-luvun alussa aloitettiin kehittämään Battronic -nimellä olevia sähköisiä autoja. Ensimmäinen Battronicin sähköinen kuorma-auto toimitettiin Potomac Edison Companylle vuonna 1964. Battronicin keskittyessä kuorma-autoihin ja pakettiautoihin, tänä aikana syntyi kaksi yritystä, jotka olivat johtavia sähköautojen tuotannossa. /2/

1990-luvulla lainsäädännöt USA:ssa vaikuttivat sähköauton kehitykseen positiivisesti. Tavoitteena oli vähentää bensiinistä muodostuvia päästöjä mahdollisimman paljon, jolloin sähköauto muuttui taas kiinnostavaksi vaihtoehdoksi. /3/

90-luvulla sähköautoja kehitettiin lisää. Muun muassa General Motors kehitti 2-paikkaisen urheiluauton mallinimeltään EV1. EV1:ssä oli nestejäähdytetty vaihtovirtamoottori ja lyijyakku. Huippunopeus autolla oli n. 130km/h ja sillä pystyi ajamaan n. 130km yhdellä latauksella. Myös Honda ja Toyota aloittivat sähköautojen valmistuksen Kalifornian markkinoille 1990-luvun lopussa. /3/



Tulevaisuudessa sähköautot tulevat todennäköisesti lisääntymään akkuteknologian kehityksestä ja ympäristön suojelemisesta johtuen. On arvioitu että vuonna 2020 sähköautojen myynti on suuruusluokaltaan noin 10% autojen kokonaisymyynnistä. Sähköautojen osuuden ajoneuvokannasta on arvioitu kasvavan merkittäväksi vasta 2030-luvulla. /4/

### 3.3 Tekniikka

Sähköautojen tekniikka eroaa polttomoottoriautoista siten, että ne toimivat sähkömoottorin avulla. Tekniikka koostuu yleensä moottorista, akkujärjestelmästä, moottorinohjaimesta sekä laturista. Joissakin tapauksissa käytetään myös erityyppisiä vaihteistoratkaisuja. Sähkömoottori saa virtansa akustosta, joka ladataan laturilla verkkovirralla. Riippuen käytettävästä moottorista, akusta saatava virta pitää tarpeen vaatiessa muuntaa tasavirrasta vaihtovirraksi. Sähköauton moottorin tekniikka on huomattavasti yksinkertaisempaa, kuin polttomoottoriauton, joten huollon tarve on vähäisempää. Sähköautoissa myös hiljainen käyntiääni on etu verrattuna polttomoottorilla varustettuihin autoihin.

Nykyajan autoissa lähes kaikki toimii sähköllä, joten konvertointi polttomoottoriautosta sähköautoon ei vaadi suuria toimenpiteitä.

### 3.4 Hybridi

Autoissa hybridi tarkoittaa kahden eri voimanlähteen yhdistelmää. Polttomoottoria täydentää sähkömoottori akkuineen. Tällaisella eri voimanlähdetekniikkojen yhdistelmällä haetaan polttoaineen säästöjä. Sähkömoottorin tukema polttomoottori pystyy näin toimimaan tehokkaammin. Sähkömoottorin energiavarasto eli akut ladataan sekä liike-energialla että polttomoottorilla. Markkinoille on tulossa pistokehybridi, joka mahdollistaa akkujen lataamisen tavallisesta pistorasiasta.

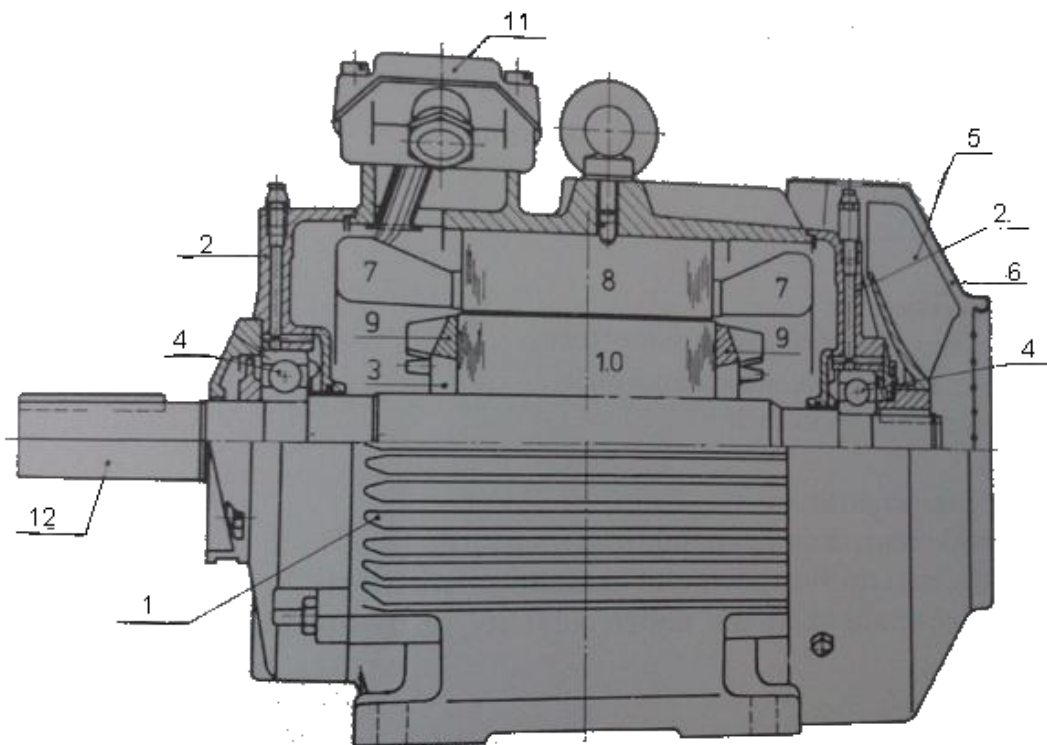
Täyshybridiautot voivat kulkea lyhyitä matkoja pelkällä sähköllä. Tällaisessa tapauksessa ei synny pakokaasuja ja melu on huomattavasti pienempi. /12/

## 4 SÄHKÖMOOTTORIT

### 4.1 Oikosulkumoottori

Oikosulkumoottorit ovat yksinkertaisen rakenteensa ansiosta hyvin suosittuja voimakoneita. Oikosulkumoottori on vaihtosähkökone, jonka roottori pyörii eri nopeudella eli epätahdissa staattorikäämityksen kehittämän pyörivän magneetikentän kanssa. Kolmivaiheisten vaihtosähkökoneiden toiminnan edellytyksenä oleva pyörivä magneetikenttä kehittyy näissä koneissa itsestään ilman lisälaitteita symmetrisen kolmivaihekäämityksen ja siinä kulkevan symmetrisen vaihtovirran avulla. Oikosulkukoneen tärkeimmät osat ovat roottori ja staattori, jotka ovat sähköisen toiminnan aktiiviset osat. Muut osat ovat passiivisia osia, jotka pitävät aktiiviset osat paikoillaan, johtavat sähköä koneeseen tai pois koneesta ja välittävät pyörivän liikkeen moottorista työkoneeseen tai voimakoneesta generaattoriin. Oikosulkumoottorin staattorin käämeihin syötetään sinimuotoisesti vaihtelevaa jännitettä, joka on tavallisimmin kolmivaiheista. Käämeissä kulkeva virta synnyttää käämien ympärille vaihtojännitteen taajuudella pyörivän magneetikentän. Roottorin pyörivä liike johtuu siitä, että sekä staattorin käämeissä että roottorin häkkikäämityksessä syntyy magnetomotorinen voima. Pyörivän magneetikentän takia staattoriin ja roottoriin syntyvät magnetomotoriset voimat vaikuttavat toisiinsa vastakkaisesti, jolloin roottori pyörii. Moottorin vääntömomentti johtuu tästä magnetomotoristen voimien interaktiosta. Oikosulkumoottori on asynkroni eli epätahtimoottori. /5;6/

#### 4.1.1 Oikosulkumoottorin rakennekuva



Kuva 3. Erään täysin suljetun oikosulkumoottorin kokoonpanopiirustus./7/

1. Staattorin runko, 2. Laakerikilvet, 3. Roottori, 4. Laakerit, 5. Tuuletin, 6. Tuulet-  
timen suojus, 7. Staattorin käämitys, 8. Staattorin levypaketti, 9. Roottorin käämitys,  
10. Roottorin levypaketti, 11. Liitäntäkotelo ja 12. Akseli

#### 4.2 Tahtimoottori

Tahtikone on vaihtosähkökone, jonka roottori, jota myös napapyöräksi nimitetään, pyörii staattorin synnyttämän pyörivän magneettikentän kanssa tarkalleen samalla nopeudella. Tahtikoneen roottori eli napapyörä on joko umpi- tai avo- eli varsinapa- rakenteinen. Umpinapapyörää käytetään nopeakäyntisissä ja avopyörää hitaissa tahtikoneissa. Staattori ja roottori on rakennettava samalle napaluvulle kuten epätahtikoneissakin. Mikäli syöttöverkon taajuus on vakio, kuten yleisessä jakeluverkossa on, myös tahtimoottorin pyörimisnopeus on vakio. Kun tahtimoottoria syötetään taa- juusmuuttajalla, voidaan sen pyörimisnopeutta muuttaa taajuutta muuttamalla. Tah-

timoottorin ominaisuuksista johtuu, että tällaiset moottoriratkaisut eivät ole kovin-kaan yleisiä. /6;8/

Koska tahtimoottori käyttäytyy magnetoinnin suhteen samoin kuin generaattori, voidaan syöttöverkkoon kytketyn tahtimoottorin verkosta ottaman loisvirran laatua ja suuruutta muuttaa magnetointia muuttamalla. Tahtimoottori voi siis toimia loistehon kompensoijana. Ylimagnetoimalla saadaan tahtimoottori toimimaan loisvirran suhteen kondensaattorin tavoin. Tällä tavoin saadaan loistehon kompensointi helposti säädettäväksi ja usein kondensaattoreihin verrattuna taloudelliseksi. /6;8/

Tahtimoottorin käytössä lisähankaluutena on sen käynnistäminen. Tahtimoottori on periaatteessa tahdistettava syöttöverkkoon samoin kuin generaattori. /6;8/

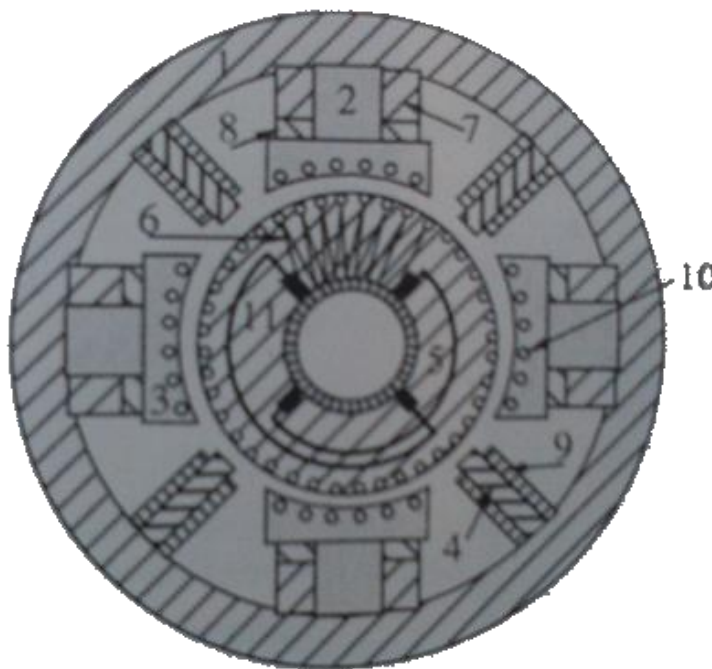
### 4.3 Tasasähkömoottori

Tasasähkökoneen rautaosat muodostavat koneen magneettikentille tietyt magneetti-piirit. Koska magneettivuot näissä koneissa muodostavat tasamagneettikenttiä, koneiden kehät ja napojen rautaosat ovat täysrautaa. Napakengät tehdään joskus sähkölevyistä siksi, että urituksesta johtuva magneettivuon vaihtelu aiheuttaisi niissä pienemmät rautahäviöt. Ankkurin rautasydän on tehty sähkölevystä, koska se joutuu pyörimään tasamagneettikentässä. Pyörimisliike aiheuttaa siinä vuon vaihtelun ja rautahäviöitä. /6;8/

Sivuvirta- ja sarjakäämitysten tehtävänä tasasähkökoneissa on synnyttää koneeseen varsinainen magneettikenttä, niin sanottu pääkenttä. Siksi näitä käämityksiä nimitetään yhteisesti magnetointikäämityksiksi. Sivuvirtakäämitys kytketään ankkurin kanssa rinnakkain tai liitetään vieraaseen sähkölähteeseen, joten sen resistanssi tehdään suhteellisen suureksi. Tämän takia se on tehty verrattain ohuesta johtimesta ja siinä on suhteellisen paljon johdinkierroksia. Sarjakäämitys kytketään sarjaan ankkurin kanssa joten se magnetoi konetta ankkuri- eli kuormitusvirran avulla. Siinä on suhteellisen vähän johdinkierroksia ja johtimen poikkipinta-ala on suuri ja resistanssi pieni. /6;8/

Pyörijä- eli ankkurikäimitykseen indusoituu vaihtosähkömotorinen jännite sen pyöriessä magnetoimiskäämitysten muodostamassa magneettikentässä. Koska indusoitunut jännite on vaihtojännite, on syöttävä tasajännite vaihtosuunnattava. Tätä toimenpidettä nimitetään kommutoinniksi eli virran kääntämiseksi ja sen suorittaa kommutaattori harjojen kanssa yhdessä. Kommutaattori harjoineen muodostaa periaatteessa mekaanisen tasa-vaihtosuuntaajan. Ankkurikäimityksen resistanssi on pieni, kuten yleensä sähkölähteiden resistanssi on. Moottorin käyttötekniisiä ominaisuuksia tarkasteltaessa on tärkeää tuntea moottorin vääntömomentin ja pyörimisnopeuden välinen riippuvuus. Vääntömomentti saa suurimman arvonsa käynnistyshetkellä ja pienenee nopeuden kasvaessa. Pyörimisnopeuden pienentyessä vääntömomentti kasvaa. /6;8/

#### 4.3.1 Tasasähkömoottorin rakennekuva



Kuva 4. Tasavirtamoottorin aktiiviset rakenneosat /9/

1. Kehä, 2. Päänavan rautasydän, 3. Napakenkä, 4. Kääntönavan rautasydän, 5. Ankkurin rautasydän, 6. Ankkurikäimitys, 7. Sivuvirtakäämitys, 8. Sarjakäämitys, 9. Kääntönapakäämitys, 10. Kompensointikäimitys ja 11. Kommutaattori harjoineen.

## 5 ERILAISET MOOTTORIT SÄHKÖAUTOKÄYTÖSSÄ

### 5.1 Moottorit

Sähköautoissa on käytössä kahta eri moottorityyppiä, tasavirtamoottoreita ja vaihtovirtamoottoreita. Vaihtovirtamoottori ei tarvitse vaihteistoa moottorin suuren vääntömomentin ja laajan tehollisen kierroslukualueen takia, mikä tekee ajettavuuden helpoksi ja vähentää huollon tarvetta. /10;11/

Vaihtovirtamoottoreita on kestopagneettimoottoreita ja oikosulkumoottoreita. Kestomagneetikoneet ovat oikosulkumoottoreita jonkin verran kalliimpia ja niiden kentanheikkensominaisuudet ovat rajoitetummat. Jotta moottorilla päästään nimellisko- peutta suurempiin nopeuksiin, on roottorivuota pienennettävä. Kestomagneetikoneil- la raja tulee vastaan siinä, kuinka paljon roottorissa sijaitsevat kestopagneetit kestä- vät vastamagnetointia, jotta ne pystyvät vielä palautumaan. /10;11/

Ohjauksen kannalta oikosulkumoottori ja kestopagneetikone ovat jotakuinkin yhtä helppoja nykyaikaisilla vaihtosuuntaajilla. Jälkimmäisen konetyypin ohjauksessa on kuitenkin tiedettävä roottorin asento, kun taas oikosulkumoottorilla pelkkä pyörimis- nopeus riittää vektorisäätöön perustuvalla ohjauksella. Vaihtosähkömoottori on han- kintahinnaltaan kalliimpi, mutta hyötysuhteeltaan tasasähkömoottoria parempi. Vaihtovirtamoottoria ohjataan verkkosyötöllä taajuusmuuttajalla ja akkusyötöllä invertte- rillä, joka ottaa tasajännitettä sisäänsä ja antaa vaihtelevaa 3-vaihejännitettä ulos. Vaihtovirtamoottorin teho-paino-suhde on parempi eikä sen kanssa tarvita erillistä vaihteistoa. Käytännössä vaihtovirtamoottori on syrjäyttänyt tasavirtamoottorin ajo- neuvokäytössä uusissa projekteissa. /10;11/

## 5.2 Vertailu

	Vaihtovirtamoottori	Tasavirtamoottori
Rakenne	Yksinkertainen	Monimutkainen
Virta	Suuri käynnistysvirta	Tavallisesti suuret virrat
Hinta	Vaihtelee, pääsääntöisesti halpa.	Melko edullinen
Paino	Tavallisesti raskaita, mutta saata- villa on myös kevyempiä malleja.	Melko kevyitä
Vääntömomentti	Korkea laajalla kierroslukualueella	Yleensä pieni
Kierroslukualue	Laaja, mahdollisuus kentänheiken- nykseen	Yleensä laaja
Saatavuus	Hyvä	Melko hyvä
Huolto	Ei vaadi juurikaan huoltoa	Vaatii huoltoa tasaisin vä- liajoin.

Taulukko 1. Vaihtovirtamoottorin ja tasavirtamoottorin vertailu /5;11/

## 6 SÄHKÖMOOTTORIN OHJAUS

Teollisuudessa moottoreita ohjaa yleensä vain syöttävä verkko, jolloin moottori pyörii käytännössä aina vakionopeudella eikä sitä pystytä jälkikäteen säätämään. Mikäli ohjaamatonta moottoria, esimerkiksi normaalia oikosulkukonetta, haluttaisiin käyttää nimellisarvoista poikkeavalla tavalla, olisi syöttävän verkon jännitettä ja/tai taajuutta muutettava, joka on käytännössä mahdotonta. Moottoriohjaimella pystytäänkin sähkömoottorikäyttö spesifioimaan paremmin sille tarkoitettuun prosessiin sopivaksi. Koska ajoneuvokäyttö sisältää hyvin erilaisia kuormitustilanteita, on moottorin ohjaaminen välttämätöntä. /14/

## 6.1 AC-Moottorin ohjaus

Vaihtosähkökoneiden ohjaustekniikka on kehittynyt nopeasti viime vuosikymmeninä. 1970-luvulta alkaen suomalaiset ovat olleet tiiviisti mukana kehittämässä oikosulkumoottorin pyörimisnopeuden säätöä. Oy Strömberg AB:n Martti Harmoisen tavoitteena oli kehittää oikosulkumoottorille yhtä helppo säätömahdollisuus kuin tasavirtamoottorille. Harmoisen kehittämän tekniikan ensisovellukset ovat mahdollista nähdä vieläkin, sillä Helsingin metrojunien sähkömoottorikäytöt ovat Harmoisen suunnittelema. Helsingin metro oli maailman ensimmäinen vaihtosähkötekniikalla toteutettu metro. /15/

Sähkömoottorin nopeudensäätö tapahtuu eritavalla, oli kyseessä tasavirtamoottori tai oikosulkumoottori. Tasavirtamoottorin nopeudensäätö tapahtuu ainoastaan jännitettä muuttamalla, kun taas oikosulkumoottorin nopeutta säädetään jännitettä sekä taajuutta muuttamalla. /15/

Oikosulkumoottorin virta sisältää sekä moottorin magnetoinnin että vääntömomentin tuottavat komponentit, minkä vuoksi vääntömomentin säätöä varten tarvitaan ns. vektorisäätöä. Tämä tarkoittaa sitä, että taajuusmuuttajan sulautettuun prosessorijärjestelmään on luotu moottorista matemaattinen malli. Malli ratkaisee riittävän reaaliaikaisesti, mikä osuus oikosulkumoottorin virrasta on magnetointivirtaa ja mikä vastaavasti vääntömomenttia tuottavaa virtaa. /15/

## 6.2 DC-Moottorin ohjaus

DC eli tasavirtamoottorin ohjain toimii periaatteessa kuin himmennin eli säädin säätää jännitettä moottorille haluttuun kierroslukuun. Moottoria ohjataan pulssisuhteella. Jos moottorihajaimessa on kaksi kytkevää komponenttia, moottoria pystytään kiihdyttämään ja vähän jarruttamaan. Jos ohjaimessa on neljä kytkevää komponenttia, moottoria pystytään kiihdyttämään ja jarruttamaan hyvin kumpaankin suuntaan. /11/



## 7 SOPIVAN MOOTTORIN JA KÄYTÖN VALINTA

Moottorin valinnassa on tärkeää kartoittaa millaiseen tarpeeseen moottori tulee. Halutaanko, että sähkömoottori korvaa polttomoottorin lähes samoilla suoritusarvoilla, vai onko mahdollista, että tehoja vähennetään, jotta saavutettu hyöty ympäristön suojelemisen kannalta olisi suurempi. Aihiona olevan Volkswagenin tapauksessa ei ole tarkoituksenmukaista suunnitella moottorivalintaa esimerkiksi moottoritienopeuksiin, koska alkuperäisenkin Kleinbussin ajo-ominaisuudet ovat parhaimmillaan lähempänä 60km/h kuin 120km/h. Auto tulee myös esittelyautoksi ja markkinointiin, joten pääasiana ei ole suorituskyky vaan toimintavarmuus.

### 7.1 Laskut

Aluksi on tärkeää suunnitella auton tehontarpeet eri tilanteissa. Auton painon olen arvioinut kokonaisuudessaan olevan 1600kg kaikkine massoineen. Laskut ovat kuitenkin suuntaa antavia arvioita, sillä täydellisten ja tarkkojen tietojen saaminen vuoden -74 autosta on hankalaa.

#### 7.1.1 Painovoima

Painovoima tulee ongelmaksi ylämäessä, jolloin autoa pitää liikuttaa vaakasuoran lisäksi myös pystysuorassa ylöspäin. Tällöin tarvitaan enemmän tehoa. Tasaisella liikuttaessa painovoiman arvo on 0 ja alamäessä se vähentää tarvittavaa tehoa.

$$F_g = m * g * \sin \alpha \quad (1)$$

Jossa m on auton kokonaismassa, g on putoamiskiihtyvyys ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) ja  $\alpha$  nousukulma vaakatasoon nähden.

### 7.1.2 Vierintävastus

Vierintävastus syntyy auton kumipyörien ja tienpinnan välissä. Vierintävastusvoima on likimain 1,5 % auton kokonaismassasta ja lähes nopeudesta riippumaton. /16/

$$F_R = \frac{1,5}{100} * m_v * g \quad (2)$$

Jossa m on auton kokonaismassa ja g on putoamiskiihtyvyys ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ).

Vierintävastusvoimaksi saadaan siis:  $\frac{1,5}{100} * 1600 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \mathbf{235,4 \text{ Nm}}$

### 7.1.3 Ilmanvastus

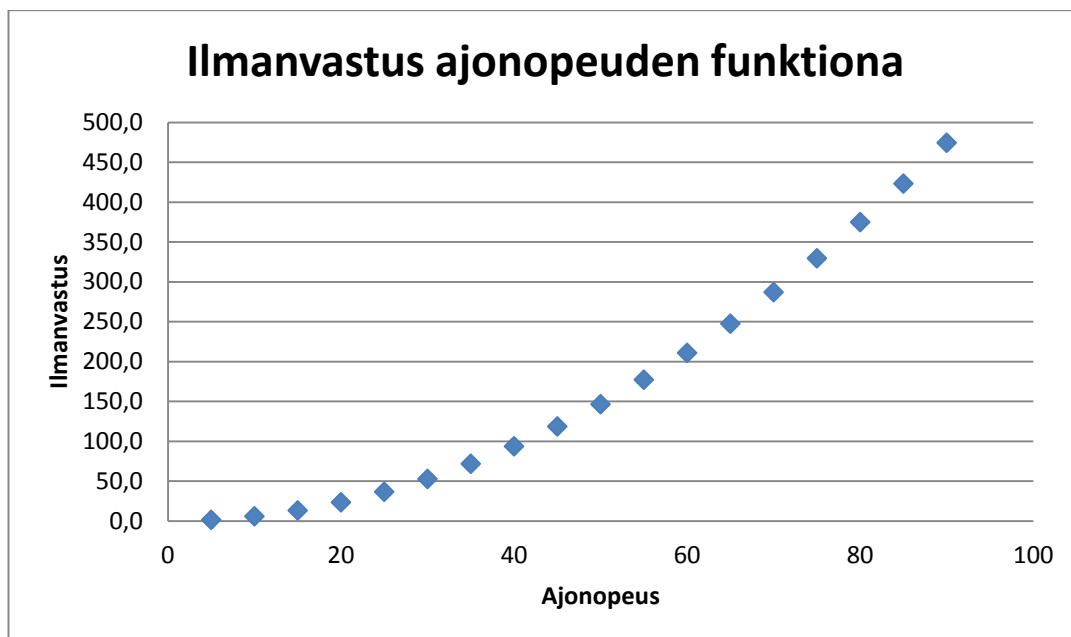
Ilmanvastuksen arvo riippuu ajoneuvon muotoilusta, vastatuulesta sekä nopeudesta. Kleinbussin ilmanvastuskerroin on 0,42. Ja otsapinta-ala n  $3 \text{ m}^2$ . Arvot on arvioitu hieman yläkanttiin, jolloin tulokset eivät ainakaan jää liian alhaisiksi.

$$F_D = \frac{1}{2} * \rho * (v + v_\omega)^2 * A_o * C_k \quad (3)$$

Jossa  $\rho$  on ilman tiheys, v on ajoneuvon nopeus,  $v_\omega$  on tuulen nopeus,  $A_o$  on otsapinta-ala ja  $C_k$  ilmanvastuskerroin. Alla olevassa taulukossa esitetään ilmanvastuksia eri ajonopeuksilla.

Ilmanvastus N	Nopeus km/h
5,9	10
23,4	20
52,7	30
93,7	40
146,4	50
210,9	60
287,0	70
374,9	80
474,5	90

Taulukko 2. Ilmanvastus eri ajonopeuksilla.

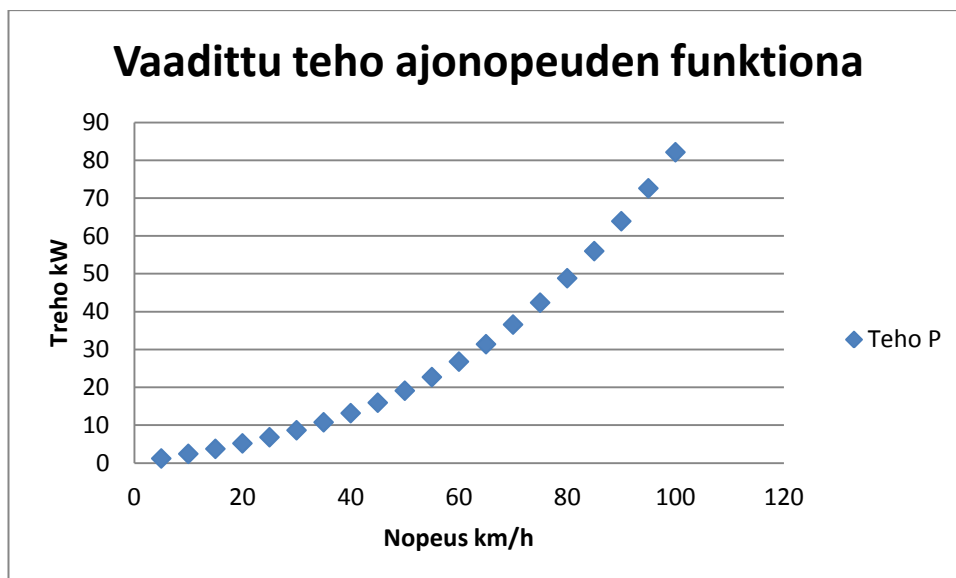


Kuva 5. Ilmanvastus ajonopeuden funktiona.

Teho  $P = v * F$ , jossa  $v$  on nopeus ja  $F$  on vastustavien voimien summa.

Nopeus(v) km/h	Gravitaatio	Vierintävastus N	Ilmanvastus N	Yhteensä (F) N	<b>P</b> kW	Vastatuuli m/s
5	0	235	1	237	<b>1</b>	0
10	0	235	6	241	<b>2</b>	0
15	0	235	13	249	<b>4</b>	0
20	0	235	23	259	<b>5</b>	0
25	0	235	37	272	<b>7</b>	0
30	0	235	53	288	<b>9</b>	0
35	0	235	72	307	<b>11</b>	0
40	0	235	94	329	<b>13</b>	0
45	0	235	119	354	<b>16</b>	0
50	0	235	146	382	<b>19</b>	0
55	0	235	177	413	<b>23</b>	0
60	0	235	211	446	<b>27</b>	0
65	0	235	247	483	<b>31</b>	0
70	0	235	287	522	<b>37</b>	0
75	0	235	329	565	<b>42</b>	0
80	0	235	375	610	<b>49</b>	0
85	0	235	423	659	<b>56</b>	0
90	0	235	474	710	<b>64</b>	0
95	0	235	529	764	<b>73</b>	0
100	0	235	586	821	<b>82</b>	0

Taulukko 3. Tehontarve tasaisella ajonopeudella ja tasaisella pinnalla nollatuudessa.



Kuva 6. Vaadittu teho ajonopeuden funktiona tasaisella maalla ja nolllatuudessa.

Nopeus km/h	Gravitaatio	Vierintävastus N	Ilmanvastus N	Yhteensä N	<b>P</b> <b>kW</b>	Vastatuuli m/s
5	0	235	31	266	<b>1</b>	5
10	0	235	46	281	<b>3</b>	5
15	0	235	64	299	<b>4</b>	5
20	0	235	85	320	<b>6</b>	5
25	0	235	108	344	<b>9</b>	5
30	0	235	135	370	<b>11</b>	5
35	0	235	165	400	<b>14</b>	5
40	0	235	197	432	<b>17</b>	5
45	0	235	232	468	<b>21</b>	5
50	0	235	271	506	<b>25</b>	5
55	0	235	312	548	<b>30</b>	5
60	0	235	356	592	<b>36</b>	5
65	0	235	404	639	<b>42</b>	5
70	0	235	454	689	<b>48</b>	5
75	0	235	507	742	<b>56</b>	5
80	0	235	563	798	<b>64</b>	5
85	0	235	621	857	<b>73</b>	5
90	0	235	683	919	<b>83</b>	5
95	0	235	748	983	<b>93</b>	5
100	0	235	816	1051	<b>105</b>	5

Taulukko 4. Tehontarve kohtalaiseen (5 m/s) vastatuuleen.

Ylämäessä tehontarve kasvaa todella suureksi yli 60km/h nopeudessa.

Nopeus km/h	Gravitaatio	Vierintävastus N	Ilmanvastus N	Yhteensä N	P kW	Vastatuuli m/s
5	1368	235	1	1605	8	0
10	1368	235	6	1609	16	0
15	1368	235	13	1617	24	0
20	1368	235	23	1627	33	0
25	1368	235	37	1640	41	0
30	1368	235	53	1656	50	0
35	1368	235	72	1675	59	0
40	1368	235	94	1697	68	0
45	1368	235	119	1722	77	0
50	1368	235	146	1750	87	0
55	1368	235	177	1781	98	0
60	1368	235	211	1814	109	0
65	1368	235	247	1851	120	0
70	1368	235	287	1890	132	0
75	1368	235	329	1933	145	0
80	1368	235	375	1978	158	0
85	1368	235	423	2027	172	0
90	1368	235	474	2078	187	0
95	1368	235	529	2132	203	0
100	1368	235	586	2189	219	0

Taulukko 5. Tehontarve 5° ylämäkeen.

## 7.2 Moottorin valinta

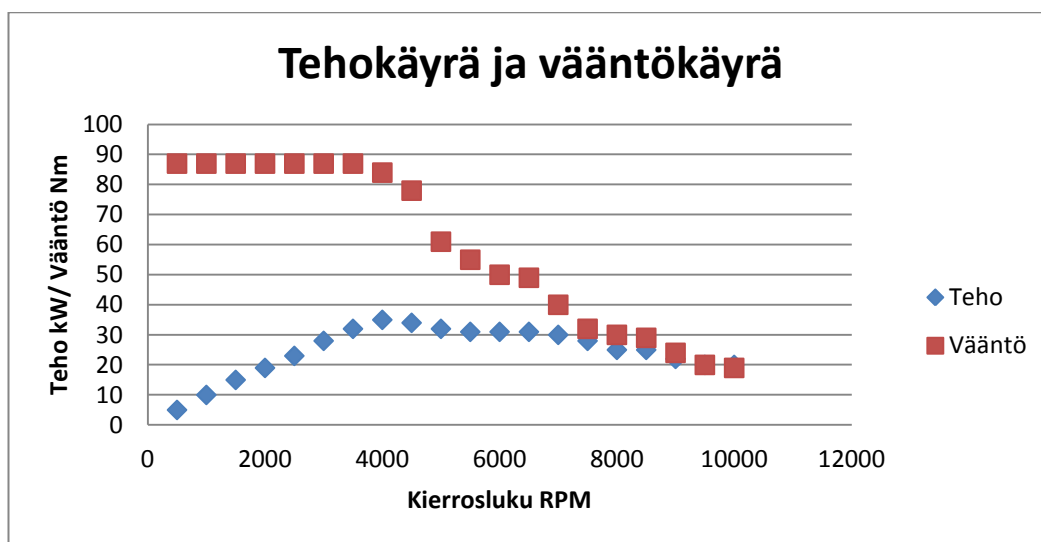
### 7.2.1 Azure Dynamics AC24LS

Moottorin valinnassa pitää ottaa huomioon edellä laskettujen tietojen lisäksi myös Kleinbussin alkuperäisen vaihteiston hyödyntäminen. Autoon sopivaksi moottoriksi valikoitui Azure Dynamicsin AC24LS Moottori, joka on arvoiltaan sopiva sähköautokäyttöön. AC24LS –moottoria on käytetty myös useissa muissa sähköautoprojekteissa, joka vahvistaa moottorin hyvän soveltuvuuden auton muunnosprojekteihin. Tässä projektissa auton huippunopeus ja suorituskyky eivät ole pääosassa moottorin valintaa, joten siitäkin syystä AC24LS sopii hyvin valittavaksi moottoriksi.

Moottorin tiedot:

AC24LS	156V
Käämitys	Kolmio
Max Vääntö	87 Nm
Jatkuva vääntö	36 Nm at 4000 RPM
Nimellisa nopeus	3750 RPM
Max nopeus	12000 RPM
Mx virta	268 A
Jatkuva teho	15kW at 4000 RPM
Max hyötysuhde	85 %
Max teho	35 kW

Taulukko 6. Valitun moottorin tiedot



Kuva 7. Moottorin tehokäyrä ja vääntömomenttikäyrä. /17/

Kuvasta katsottuna moottorin vääntöalue sijoittuu n. 1500 RPM ja 5000 RPM väliin. Tällöin olisi hyvä, että välityksillä saataisiin haluttu nopeus sijoitettua 1500 ja 5000 RPM välille.

Alla olevasta taulukosta nähdään, että koska nimelliskierrosnopeus on 3750 RPM niin 3. vaihteella nopeus on silloin n. 80km/h. 2. vaihteella nopeus jää hieman liian alhaiseksi nimelliskierrosluvulla, mutta moottorin tehokäyrää katsomalla myös 2. vaihte saattaisi sopia, jos auton nopeustarve ei ole suuri. 4. vaihteella nopeus kasvaisi jo liian suureksi tarvittavaan nopeuteen nähden.

Kierrosluku	Teho	Vääntö	Vaihde1	Vaihde2	Vaihde3	Vaihde4
RPM	kW	Nm	km/h	km/h	km/h	km/h
500	5	87	2,56	5,6	9,44	14,24
1000	10	87	4,96	11,2	19,04	28,64
<b>1500</b>	<b>15</b>	<b>87</b>	<b>7,36</b>	<b>16,8</b>	<b>28,64</b>	<b>43,04</b>
<b>2000</b>	<b>19</b>	<b>87</b>	<b>9,76</b>	<b>22,4</b>	<b>38,24</b>	<b>57,44</b>
<b>2500</b>	<b>23</b>	<b>87</b>	<b>12,16</b>	<b>28</b>	<b>47,84</b>	<b>71,84</b>
<b>3000</b>	<b>28</b>	<b>87</b>	<b>14,56</b>	<b>33,6</b>	<b>57,44</b>	<b>86,24</b>
<b>3500</b>	<b>32</b>	<b>87</b>	<b>16,96</b>	<b>39,2</b>	<b>67,04</b>	<b>100,64</b>
<b>4000</b>	<b>35</b>	<b>84</b>	<b>19,36</b>	<b>44,8</b>	<b>76,64</b>	<b>115,04</b>
<b>4500</b>	<b>34</b>	<b>78</b>	<b>21,76</b>	<b>50,4</b>	<b>86,24</b>	<b>129,44</b>
<b>5000</b>	<b>32</b>	<b>61</b>	<b>24,16</b>	<b>56</b>	<b>95,84</b>	<b>143,84</b>
<b>5500</b>	<b>31</b>	<b>55</b>	<b>26,56</b>	<b>61,6</b>	<b>105,44</b>	<b>158,24</b>
6000	31	50	28,96	67,2	115,04	172,64
6500	31	49	31,36	72,8	124,64	187,04
7000	30	40	33,76	78,4	134,24	201,44
7500	28	32	36,16	84	143,84	215,84
8000	25	30	38,56	89,6	153,44	230,24
8500	25	29	40,96	95,2	163,04	244,64
9000	22	24	43,36	100,8	172,64	259,04
9500	20	20	45,76	106,4	182,24	273,44
10000	20	19	48,16	112	191,84	287,84

Taulukko 7. Auton nopeus eri vaihteilla.

### 7.3 Ohjauksen valinta

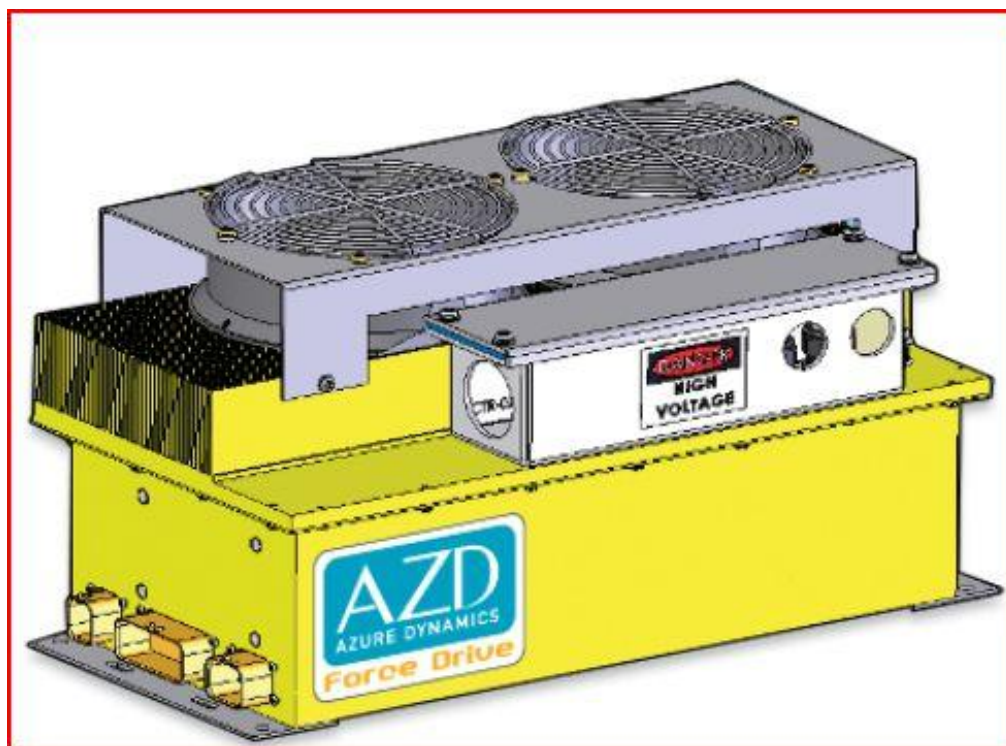
Moottorin ohjauksen valinta tarkoittaa oikosulkumoottorin tapauksessa nykyään lähes poikkeuksetta taajuusmuuttajan valintaa. AC24LS moottorille on olemassa juuri kyseiselle moottorille tarkoitettu ohjain, joten valinta on helppo. Moottorista saadaan paras hyöty irti omalla ohjaimella, jolloin moottorin ja ohjaimen yhteensopivuus on täydellinen niin suoritusarvojen, kuin hyötysuhteidenkin puolesta.

#### 7.3.1 Azure Dynamics DMOC445

Valinta kohdistui siis Azure Dynamicsin omaan ohjaimeen, joka sisältyy moottoripakettiin. Ohjain on saatavilla myös nestejäähdytettynä.

Ohjaimen ominaisuudet:

- DSP -pohjainen ohjaus, eli digitaalinen signaaliprosessori, joka on erityisesti digitaalisia signaaleja varten kehitetty suoritin.
- Vektorisäätö, eli väännön hallinta virransyötön avulla sekä pulssinleveysmodulaatio, jossa jännitettä säädetään muuttamalla pulssisuhdetta.
- Mahdollisuus kytkeä moottorin tiedot näyttöpaneeliin.
- Kevyt alumiinirungon vuoksi
- Vesitiivis ja kestävä rakenne, mikä on todella tärkeää sähköautokäytössä.
- Yli- ja alijännitesuojaus
- Kolmitasoinen ylivirtasuojaus
- Moottorin ja invertterin ylikuumenemissuojaus
- Virheellisen poljinsignaalin havaitseminen, joka on tärkeää auton turvallisuuden kannalta.
- CAN -väylä, jolla saadaan yhteys muihin auton komponentteihin.



Kuva 8. Azure Dynamics DMOC445 ilmajäähdytetty malli. /18/



## 8 SÄHKÖAUTOMUUNNOKSEN VIRANOMAISVAATIMUKSET

Moottorinvalintaprosessi ei sinänsä ole kovinkaan vaativa, sillä sähköautojen konversioiden yleistymisestä johtuen mahdollisia esimerkkiprojekteja löytyy maailmalta jo todella paljon. Sähköauton muunnosprojekteissa yksi tärkeimmistä asioista on saada autosta katsastuskelpoinen. Sähköautoksi muunnettu auto on ennen tieliikenteessä käyttämistä hyväksyttävä joko rekisteröinti- tai muutokatsastuksessa. Muutokatsastusmenettelyä käytetään, jos lähtökohtana on tieliikenteeseen rekisteröity auto ja kanta-auton osien osuus auton kaikista osista pysyy yli 50 prosentin. Yleensä näin on, koska moottorin ja apulaitteiden osuudeksi auton osista katsotaan olevan 26%. Jos vähintään 50% auton osista vaihdetaan, auto rekisteröidään uutena ajoneuvona. Tällöin sille on saatava yksittäishyväksyntä. Vanhan auton tapauksessa yksittäishyväksyntä saattaa olla vaativaa, sillä yksittäishyväksyttävän auton on täytettävä pääsääntöisesti kaikki nykyisin voimassaolevat viranomaisvaatimukset, myös niiltä osin kuin rakennetta ei ole muutettu. /11/

## 9 YHTEENVETO

Kun aloin tekemään työtä, minulla ei ollut sähköautoista varsinaisesti juuri minkäänlaista kuvaa. Sähkömoottoreista löytyi osaamista, koska koulussa on paljon tutustuttu moottoreihin ja niiden tekniikkaan. Vaikkakin moottoreita on mitoitettu ja käytetty täysin erilaisissa käyttötarkoituksissa. Aihiona toimii VW Kleinbus vuodelta 1974, mikä hieman muutti työn tekemistä vaativammaksi, sillä vanhan auton tietoja olikin hieman vaikeampi saada täysin luotettavasti.

Sähkömoottorin valinta konversioon ei oikeastaan ole kovinkaan hankala prosessi, kun määrittelyt ovat kunnossa. Teknisten tarpeiden määrittely on kokonaisuudessaan valinnan hankalin osa, sillä moottoreita löytyy joka lähtöön, mutta sopivan valinta tuottaa vaikeuksia, jos ei ole varma mitä oikeastaan on etsimässä.

Työssä keskityin selvästi enemmän moottoreihin, kuin moottorin ohjaimiin, koska moottorin ohjaus onnistuu nykyajan taajuusmuuttajilla helposti. Tämä työ antoi hyvän mahdollisuuden soveltaa koulussa opittuja tietoja sähkökäytöistä ja sähkömoottoreista.

## LÄHTEET

1. Mary Bellis About.com Guide [Viitattu 6.5.2012]. Saatavissa <http://inventors.about.com/od/estartinventions/a/History-Of-Electric-Vehicles.htm>
2. Mary Bellis About.com Guide [Viitattu 6.5.2012]. Saatavissa <http://inventors.about.com/od/estartinventions/a/Electric-Vehicles.htm>
3. Mary Bellis About.com Guide [Viitattu 6.5.2012]. Saatavissa <http://inventors.about.com/od/cstartinventions/a/History-Of-Electric-Vehicles.htm>
4. Nils-Olof Nylund 2011. Sähköautojen tulevaisuus Suomessa. Sähköautot liikenne- ja ilmastopolitiikan näkökulmasta. [Viitattu 6.5.2012]. Saatavissa: [http://www.lvm.fi/c/document\\_library/get\\_file?folderId=1551284&name=DLFE-11701.pdf&title=Julkaisuja%2012-2011](http://www.lvm.fi/c/document_library/get_file?folderId=1551284&name=DLFE-11701.pdf&title=Julkaisuja%2012-2011)
5. Pihl, T. 2011. Formula Student Electric–auton moottorin valinta. AMK-opinnäytetyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. [Viitattu 18.5.2012]. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2011101813865>
6. Aura, L. & Tonteri, A. J.. 2003. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan peusteet. Helsinki: WSOY.
7. Kuva 3. Aura, L. & Tonteri, A. J.. 2003. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan peusteet s.119. Helsinki: WSOY.
8. Aura, L. & Tonteri, A. J.. 1986. Tehoelektroniikka ja sähkökoneiden käyttö. Helsinki: WSOY
9. Kuva 4. Aura, L. & Tonteri, A. J.. 2003. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan peusteet s.267. Helsinki: WSOY.
10. Idaho National Laboratory. EV Power Systems (Motors and controllers) [Viitattu 18.5.2012]. Saatavissa: <http://avt.inel.gov/pdf/fsev/power.pdf>
11. Sähköautot – Nyt! www-sivut [Viitattu 18.5.2012] Saatavissa: <http://www.sahkoautot.fi/>
12. Matti Sinervä 2011 Mikä on hybridi-auto? [Viitattu 19.5.2012] Saatavissa: <http://olotila.yle.fi/koti/kulutus/mika-hybridiauto>
13. Kuva 2 Baker Electric -sähköautosta www-sivu. [Viitattu 19.5.2012]. Saatavissa: [Http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7e/Baker\\_Electric\\_Coupe\\_1908.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7e/Baker_Electric_Coupe_1908.jpg)
14. Pirhonen, J-P. 2011. ePorsche – moottorin ja invertterin valinta sähkömuunnosautoon. AMK-opinnäytetyö. Tampereen Ammattikorkeakoulu. [Viitattu 19.5.2012]. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2011060711325>

15. Taajuusmuuttaja. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2010. [Viitattu 19.5.2012] Saatavissa: [http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical\\_engineering/articles/inverter/Sivut/Default.aspx](http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical_engineering/articles/inverter/Sivut/Default.aspx)
16. Inkinen, P. & Tuohi, J.. 1999. Momentti 1 – Insinöörifysiikka. Helsinki: Ota-va
17. AC-24LS-\_DMOC445 – Product sheet Azure Dynamics. [Viitattu 26.5.2012] Saatavissa: [http://www.azuredynamics.com/products/force-drive/documents/AC24LS\\_DMOC445ProductSheet.pdf](http://www.azuredynamics.com/products/force-drive/documents/AC24LS_DMOC445ProductSheet.pdf)
18. MAN-080001-001\_DMOC445\_and\_DMOC645 User manual. Azure Dynamics [Viitattu 24.5.2012] Saatavissa: [http://www.azuredynamics.com/products/force-drive/documents/MAN-080001-001\\_DMOC445\\_and\\_DMOC645\\_User\\_Manual.pdf](http://www.azuredynamics.com/products/force-drive/documents/MAN-080001-001_DMOC445_and_DMOC645_User_Manual.pdf)