



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

Sähkömönkijän voimansiirtojärjestelmän komponentit **Components of an electric ATV Drivetrain**

Toni Korjula

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
LUT Energia, sähkötekniikka

Toni Korjula
Sähkömönkijän voimansiirtojärjestelmän komponentit

2019

Kandidaatintyö.
44 s.

Tarkastaja: tutkijaopettaja Lasse Laurila

Tässä työssä tutkittiin mönkijän voimansiirron sähkökonversion toteutusta mahdollisesti myöhemmin toteutettavaa projektia varten. Työssä kartoitettiin lain asettamia vaatimuksia sähkökäyttöiselle mönkijälle, sekä simuloitiin kahta mahdollista käyttöskenaariota mönkijän voimansiirrolta vaaditun suorituskyvyn selvittämiseksi. Simulointia varten mönkijään vaikuttavista lineaarisista voimista laadittiin malli ja sitä simuloitiin Simulink-ohjelmistolla. Saatujen tuloksien ja tehdyn selvityksen pohjalta valittiin olennaisimmat komponentit voimansiirtoon ja arvioitiin komponenteista aiheutuvia kustannuksia.

Simulointia käytettiin apuvälineenä mönkijän moottoritehon ja väännön mitoittamiseen. Tämä mahdollisti vaikuttavan kokonaisvoiman komponenttien arvioimisen, jolloin moottorin suorituskyky on mitoitettavissa tarkemmin kuin perinteisesti arvioimalla tai vastaaviin kulkuneuvoihin vertailemalla. Tarkemmalla mitoituksella pyrittiin pienentämään lopputuotteen kustannuksia.

Akuston valinnassa tärkeimmäksi tekijäksi muodostui sovelluskohteen rajallinen tila. Tästä syystä akuston energiatiheys oli merkittävin tekijä. Tehdyn selvityksen pohjalta päädyttiin litiumakustoon, vaikka sen suorituskyvyn todettiin heikkenevän enemmän kylmissä olosuhteissa kuin esimerkiksi lyijyakuston.

Litiumakuston valinta aiheutti tarpeen akustohallinnalle, sillä monikennoiset litiumakustot voivat vikaantua ilman tasaavaa latausta. Akustohallinnan käyttäminen mahdollistaa myös käytettävissä olevan kapasiteetin tarkkailun reaaliajassa, sekä akuston kunnonvalvonnan.

Moottorinohjaimen valinta rajautui suoraan valitun moottorityypin perusteella. Moottorityypiksi tarkasteltiin pääosin kestopagnetoituja vaihtovirta- ja tasavirtamoottoreita. Vaikka kestopagnetoidulla tasavirtamoottorilla olisi mahdollista tuottaa matalilla kierrosluvuilla kestopagnetoitua vaihtovirtamoottoria korkeampi vääntömomentti, vaihtovirtamoottorin tasanaisempi ja laajempi vääntöalue, sekä suurempi huippukierrosluku johtivat sen valintaan.

Simulaatiotulosten ja tehdyn selvityksen pohjalta valittiin Electric Motorsportin G4845-konversiosarja, Sevcon G4 moottorinohjain, BMS16 akustonhallintajärjestelmä, sekä litiumakusto. Konversiosarjan kustannuksiksi arvioitiin 5830 USD ilman alennusvaihdetta, tai 6289 USD alennusvaihteen kanssa. Työssä esitetty konversiosarja pystyy kilpailemaan polttomoottorikäyttöisten verrokkiansa kanssa kaikilla muilla osa-alueilla, paitsi toimintamatkansa osalta.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Technology
LUT Institute of Technology, Electrical Engineering

Toni Korjula
Components of an Electric ATV Drivetrain

2019

Bachelor's Thesis.
44 p.

Examiner: associate professor Lasse Laurila

This paper examines the conversion of an All-Terrain Vehicle (ATV) to electric, for a possible project in the future. Research was conducted to find out what obligations the law presents to an electric ATV and a created model was simulated with two different scenarios to discover what kind of performance is demanded from the drivetrain. For simulation purposes a model was created that represents the linear forces acting on the ATV, and it was simulated with Simulink-software. Based on the results and the conducted research, components were chosen for the powertrain and an evaluation of the costs was made.

Simulation was used as a tool in evaluating the power and torque of the ATV. This allows evaluation of components of the total force, which in turn allows the performance of the motor to be specified more accurately than only by evaluating or comparing against similar vehicles. With more accurate analysis the cost of the end product could be lower.

The most important aspect in choosing the battery type was the limited space in the application. Because of this the deciding factor was the energy density of the battery type. Based on the research done lithium batteries were chosen, while acknowledging the worse performance in cold conditions compared to lead-acid batteries.

Lithium batteries require use of a battery management system, as multi-cell lithium batteries can be damaged without balanced charging. The use of battery management system also allows real time monitoring of the usable capacity and battery condition.

Selection of motor controller was limited by the chosen motor type. Motor type was mainly selected between permanent magnet alternating current and direct current motors. Even though permanent magnet direct current motors are able to produce greater torque on low

revolutions per minute than permanent magnet alternating current motors, the more even and wider torque range and greater top revolutions per minute were deciding factors for the alternating current motor.

Based on the simulation results and research Electric Motorsport's G4845 conversion kit, Sevcon G4 motor controller, BMS16 battery management system and lithium batteries were proposed. The cost of said conversion kit was estimated to be 5830 USD without reduction gearing, or 6289 USD with reduction gearing. The proposed conversion kit is able to compete with its combustion engine counterparts on all other areas, except the maximum driving range.

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

AC	Alternating Current, vaihtovirta
ATV	All-Terrain Vehicle
BMS	Battery Management System, akustonhallintajärjestelmä
DC	Driving Cycle, ajosykli
DC	Direct Current, tasavirta
DOD	Depth of Discharge, purkaustila
IFO	Indirect Field Control
LFP	Lithium iron phosphate
NEDC	New European Driving Cycle
PMAC	Permanent Magnet AC, kestopmagnetoitu vaihtovirtamoottori
PMDC	Permanent Magnet DC, kestopmagnetoitu tasavirtamoottori
SOC	State-of-Charge, lataustila
VCL	Vehicle Control Language
VDC	Volts DC
VRLA	Valve Regulated Lead Acid

<i>A</i>	pinta-ala
<i>a</i>	kiihtyvyys
<i>C_d</i>	ilmanvastuksen kerroin
<i>F</i>	voima
<i>g</i>	putoamiskiihtyvyys
<i>G</i>	voimansiirron välityssuhde
<i>I</i>	inertiamomentti
<i>m</i>	massa
<i>P</i>	teho
<i>r</i>	pyörän säde
<i>T</i>	vääntö
<i>v</i>	nopeus
<i>α</i>	vaakatasosta poikkeava kulma
<i>μ</i>	vierintävastuskerroin
<i>ρ</i>	tiheys

Alaindeksit

ad	aero-dynamic, ilmanvastusta kuvaava
ωa	angular acceleration, kulmakiihtyvyyttä kuvaava
d	drag, ilmanvastusta kuvaava
hc	hill-climb, maaston epätasaisuuksia kuvaava
la	linear acceleration, lineaarista kiihtyvyyttä kuvaava
rr	rolling resistance, vierintävastusta kuvaava
t	traction, mönkijän liikuttamiseen vaadittua tehoa / vääntö kuvaava

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet.....	6
1. Johdanto.....	8
2. Tutkimuskysymykset.....	8
3. Mönkijän toiminnasta.....	8
3.1 Sähkömönkijän vaatimukset.....	9
3.1.1 Sähkömönkijä maa- ja metsätalouskäytössä	9
3.1.2 Sähkömönkijä tieliikennekäytössä	10
4. Mönkijän moottoritehon mitoittaminen	11
4.1 Mönkijän matemaattinen malli.....	11
4.2 Mönkijän voimansiirron simuloiminen	14
5. Sähkömönkijän voimansiirron toteuttamiseen soveltuvat komponentit.....	18
5.1 Akkuteknologia	18
5.2 Battery Management System (BMS).....	21
5.2.1 Zero Emission Vehicles Australia BMS16.....	21
5.3 Moottoritekhnologia	22
5.4 Moottorinohjaus	25
5.4.1 Sevcon G48-sarja.....	25
5.4.2 Curtis Instruments 1236E ja 1238E sarja	27
6. Valmiit Sähkömönkijät ja konversiosarjat	29
6.1 Polaris Ranger EV ja Ranger EV Li-ion	29
6.2 Electric Motorsport PMAC-G4827 HS 36/48V 275A Motor Drive System	30
6.3 Electric Motorsport PMAC 12kW Cont. / 30kW Pk. Liquid Cooled Motor Drive System 48V 650A.....	32
6.4 Electric Motorsport PMAC-G4845 48V 450A ATV / Golf Car / NEV Motor Drive System33	
7. Sähköisen voimansiirron toteutus.....	34
8. Johtopäätökset	36

Liitteet

1. JOHDANTO

Tämän työn tarkoituksena on toimia pohjustuksena mahdollisesti myöhemmin toteutettavaa sähkömönkijäprojektia varten. Tutkimuksessa on tarkoitus selvittää mahdollisesti toteutettavan sähkömönkijän vaatimuksia, jo olemassa olevia ratkaisuja projektin toteuttamiseen, kertoa toteuttamiseen soveltuvista komponenteista ja antaa hinta-arvio mönkijän sähköisen voimansiirron toteuttamisesta.

2. TUTKIMUSKYSYMYKSET

Tämän työn tarkoituksena on vastata muun muassa seuraaviin kysymyksiin:

- Millaiset määräykset koskevat sähkömönkijän tieliikennekäyttöä ja onko sille asetettu muunlaisia vaatimuksia?
- Minkälaiset komponentit soveltuvat mönkijän sähköisen voimansiirron toteuttamiseen?
 - o Akkuteknologia
 - o Moottoritekhnologia
 - o Taajuusmuuttajat
- Minkälaisia valmiita ratkaisuja on olemassa, mukaan lukien valmiit konversiosarjat ja valmiit sähkömönkijät?
- Mitä sähköisen voimansiirron toteuttaminen maksaisi?

3. MÖNKIJÄN TOIMINNASTA

Tavallisen polttomoottorimönkijän voimanlähteenä toimii yleensä bensiinikäyttöinen polttomoottori. Käytettyjä moottorilavuuksia on yhtä paljon kuin käyttötarkoituksiakin, yleisimpien ollessa aina 50 cm³ lasten mönkijöistä 1000 cm³ urheilumönkijöihin.

Perinteisessä polttomoottorimönkijässä moottorin tuottama teho ohjataan pyörille vaihteiston, akseliston ja tasauspyörästä kautta. Joissakin mönkijöissä tasauspyörästä löytyy vain etu- tai taka-akselilta ja toinen akseleista on yhtenäinen. Vaihteistolla saadaan mönkijän tehoalueesta monikäyttöisempi, kun moottorin tuottamaa vääntöä voidaan hyödyntää pienemmillä nopeuksilla.

Polttomoottorimönkijän energiavarastona toimii polttoainetankki. Tankista moottorille syötettävää polttoaineen määrää säädellään tavallisesti kaasuttimella tai ruiskulla. Uudemmissa mönkijöissä käytetty ruiskuteknologia on energiatehokkaampaa ja taloudellisempaa kuin kaasutinkäyttöinen mönkijä.

Tässä työssä on tarkoitus esitellä vaihtoehtoja, joissa perinteisen mönkijän energiavarasto eli tankki, korvataan akuilla, ruisku- tai kaasutinjärjestelmä moottorinohjauksella ja polttomoottori sähkömoottorilla.

Moottorin sijoittelu mönkijässä ja moottoreiden määrä on myös mielenkiintoinen konsepti. Mönkijä olisi mahdollista toteuttaa esimerkiksi sijoittamalla kaikkiin pyöriin napoihin moottorit, eli jokaista pyörää pyörittäisi yksi moottori. Tällaisessa toteutuksessa moottoreiden ohjaus sekä synkronointi toisiinsa voi muodostua ongelmaksi ja mönkijän toteuttaminen tulee kalliimmaksi koska tarvittaisiin useampia moottorinohjaimia.

Markkinoilla on myynnissä moottorinohjaimia, joilla on mahdollista ohjata kahta moottoria samanaikaisesti, siis etu- ja takapyöriä voisi kumpaistakin pyörittää oma moottorinsa. Tämäkin ratkaisu tulisi todennäköisesti kalliimmaksi kuin yhdellä moottorilla toteutettu mönkijä, sekä ongelmaksi voi muodostua moottoreiden sijoittelu mönkijään.

Yllä mainituista syistä tässä työssä perehdytään konversioon, jossa yhdellä moottorilla toteutetaan mönkijän voimansiirto. Moottorin todennäköisin sijoituspaikka on bensiinimoottorin ja variaattorin paikalla. Tämä mahdollistaa myös sen, että olemassa olevaa vaihteistoa ja mahdollisia tasauspyörästä lukkoja voidaan hyödyntää helposti. Yleensä mönkijän voimansiirto on toteutettu siten, että bensiinimoottori pyörittää variaattoria, joka pyörittää vaihteistoa. Vaihteistoissa on usein hidas ja nopea vaihde eteenpäin, joita voidaan hyödyntää konversiossa: hitaalla vaihteella voidaan vetää suurempia kuormia ja nopealla vaihteella voidaan saavuttaa suurempi huippunopeus.

3.1 Sähkömönkijän vaatimukset

Mönkijän sähköisen voimansiirron toteuttaminen ei ole järkevää, jos sähkökäyttöisen mönkijän ominaisuudet eivät mahdollista riittävää suorituskykyä verrattuna polttomoottorimönkijään. Täten sähkökäyttöiseltä mönkijältä tulee vaatia samankaltaista suorituskykyä kuin polttomoottorimönkijältä.

Mönkijän fyysinen koko asettaa teholle rajoitukset tarvittavien komponenttien kiinnittämisen takia. Sähköisen mönkijän voimansiirtoon vaadittavat komponentit täytyy saada sijoitettua mönkijän rungon sisälle tai sen päälle siten, että ne eivät haittaa mönkijän käyttöä.

3.1.1 Sähkömönkijä maa- ja metsätalouskäytössä

Maastomönkijä eli maastoajoneuvo on maastossa käytettäväksi tarkoitettu mönkijä, jonka kuljettamiseen maastossa vaaditaan vähintään 15 vuoden ikä ja tieliikenteessä vähintään B-luokan ajokortti. Maastomönkijällä ei kuitenkaan saa ajaa tiellä kuin poikkeustapauksissa.

Suurin sallittu nopeus tiellä on 40 km/h, maastossa maa-alueella 60 km/h ja jääpeitteisellä vesialueella 80 km/h. Tätä ajoneuvotyyppiä ei tarvitse rekisteröidä eikä katsastaa, mutta se täytyy liikenne-vakuuttaa.

Nykyaikaisia maastomönkijöitä löytyy lähes jokaiselta valmistajalta. Moottoritulavuudeltaan 500 ja 550 cm³ mallit ovat maastomönkijöiden keskiluokkaa, samoin kuin suorituskyvyltään. Tämän luokan mönkijöiden teho vaihtelee esimerkiksi CanAm Outlander 500 XT 22 kW ja Polaris Sportman 550 20,9 kW alapuolella. Esimerkkeinä mainitut mönkijät lukeutuvat Tekniikan maailman suorittaman dynamometritestauksen voittajiin. (Tekniikan Maailma 2009)

3.1.2 Sähkömönkijä tieliikennekäytössä

Ajoneuvolainsäädäntö ei tunne mönkijä-nimistä ajoneuvolajia, vaan kyseinen laite sisältyy johonkin seuraavista ajoneuvoluokista: kolmipyörä(L5e), kevyt nelipyörä(L6e), nelipyörä (L7e) tai traktorimönkijä (T1 ja T3). Näiltä ajoneuvoilta vaaditaan tieliikennekäytössä EY-tyyppihyväksyntä ja ajoneuvoa koskee rekisteröintivelvollisuus, kun sitä käytetään yleisessä tieliikenteessä. (Trafi 2015)

Kolmipyörä on moottorikäyttöinen ajoneuvo, jossa on kolme symmetrisesti sijoitettua pyörää ja joka on varustettu sylinteritulavuudeltaan suuremmalla kuin 50 cm³ polttomoottorilla tai sen suurin rakenteellinen nopeus on yli 45 km/h. (Trafi 2015)

Kevyt nelipyörä on nelipyöräinen moottoriajoneuvo, jonka kuormittamaton massa on enintään 350 kg ilman sähköajoneuvon akkujen massaa ja sen suurin rakenteellinen nopeus on enintään 45 km/h. Tämän ajoneuvoluokan moottorin sylinteritulavuus on enintään 50 cm³, kun kyseessä on ottomoottori tai suurin teho enintään 4 kW, kun kyseessä on sähkömoottori tai muu polttomoottori. Kevyen nelipyörän ohjastamiseen tieliikenteessä vaaditaan vähintään M-luokan ajokortti. (Trafi 2015)

Nelipyörä on nelipyöräinen ajoneuvo, jonka suurin sallittu kuormittamaton massa on enintään 400 kg tai tavarankuljetusajoneuvon osalta enintään 550 kg. Kun kyseessä on sähköajoneuvo molemmat tapaukset ovat lukuun ottamatta akkujen massaa. Tämän ajoneuvoluokan suurin sallittu moottorin nettoteho on enintään 15 kW. Nelipyörän ohjastamiseen tieliikenteessä vaaditaan vähintään B-luokan ajokortti. (Trafi 2015)

Traktorimönkijä eli T1 tai T3-luokan traktori on pääasiassa työkäyttöön tarkoitettu ajoneuvo, jolla saa ajaa myös tieliikenteessä. T1 ja T3 luokat on jaettu edelleen a-, b-, ja c-luokkiin,

joita vastaavat suurimmat sallitut nopeudet ovat 40, 60 ja 80 kilometriä tunnissa. (Liikenne-
turva 2015) (Trafi 2015)

4. MÖNKIJÄN MOOTTORITEHON MITOITTAMINEN

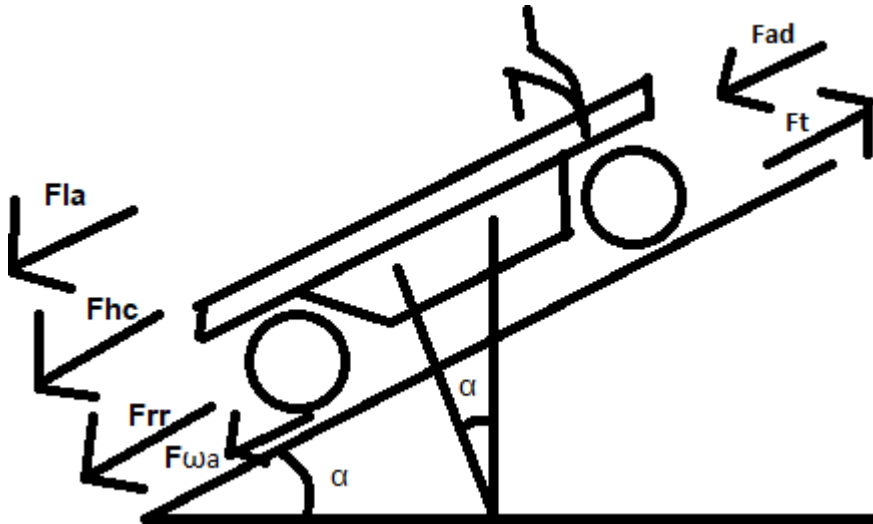
Tarkastellaan nyt mönkijän moottoritehon ja -väännön mitoittamista. Mönkijään vaikuttavat useat voimat ajon aikana, jotka moottorin tulee kumota mönkijän liikuttamiseksi. Moottorilta vaadittuun tehoon ja vääntöön vaikuttavat voimansiirtolinjan häviöt, sekä mahdollisesti käytettävä vaihteisto. Vaihteiston käytöllä voidaan pienentää moottorilta vaadittua vääntöä sekä mahdollistetaan suuremman huippunopeuden saavuttaminen. Toisaalta suoravetomoottorilla toteutetussa voimansiirrossa tehoa ei hukata vaihteiston häviöihin, vaan ainoastaan pyörien välityksiin ja laakerointiin. Yleensä moottorin valinnassa on keskitytty vain huipputehon mitoittamiseen, mutta tässä työssä yritetään ottaa huomioon esimerkiksi moottorilta vaadittu vääntö ja kiihdytysvoiman vaikutus, jolla on suuri vaikutus huipputehon vaatimukseen.

4.1 Mönkijän matemaattinen malli

Mallissa käytetyt yhtälöt pohjaavat Newtonin toiseen lakiin ja mallissa tarkastellaan mönkijään vaikuttavia voimia pitkäikäisyyssuunnassa. Vetovoima F_t on voima, joka on kaikkien mönkijän liikkumiseen vaikuttavien voimien summa. Mönkijän moottorin tulee siis pystyä kumoamaan tämä voima voidakseen liikkua. Voimalle F_t saadaan Newtonin toisen lain mukaan yhtälö:

$$F_t = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{la} + F_{\omega a}, \quad (1)$$

missä F_{rr} on mönkijään vaikuttava vierimisvastus, F_{ad} aerodynaamisen vastuksen aiheuttama voima, F_{hc} maaston epätasaisuuksista johtuva voima, F_{la} lineaarinen kiihtyvyyden voima, $F_{\omega a}$ kulmakiihtyvyyden voima. Nämä voimat on havainnollistettu kuvassa 1 alla. (Sreejit and Rajagopal 2016)



Kuva 1. Mönkijään vaikuttavat voimat.

Vierintävastus F_{rr} koostuu pääosin renkaiden, laakeroinnin ja vaihteiston aiheuttamista häviöistä. Vierintävastuksen yhtälöksi saadaan:

$$F_{rr} = \mu_{rr}mg, \quad (2)$$

missä μ_{rr} vierintävastuskerroin, m ajoneuvon massa ja g putoamiskiihtyvyys. Tämä voima pysyy niin pitkään vakiona, kunhan mönkijä pysyy samankaltaisella alustalla, eikä mönkijän massa muutu. (Sreejit and Rajagopal 2016)

Aerodynaamisen vastuksen aiheuttama voima F_{ad} kuvaa ilman aiheuttamaa voimaa, kun mönkijä pyrkii kulkemaan sen läpi. Tämä voima muodostuu käytännössä, kun mönkijän etupinnan muodostama ala kulkee ilmassa läpi syrjäyttäen ilmaa. Aerodynaamisen vastuksen yhtälöksi saadaan:

$$F_{ad} = \frac{1}{2}\rho AC_d v^2, \quad (3)$$

missä ρ on ilman tiheys, A mönkijän etuosan pinta-ala, C_d ilmanvastuksen kerroin ja v mönkijän nopeus. Tämä voima kasvaa nopeuden neliöön ja on sitä suurempi tekijä mitoituksessa mitä kovempaa mönkijä liikkuu. (Sreejit and Rajagopal 2016)

Maaston epätasaisuuksista johtuva voima F_{hc} kuvaa voiman komponenttia, joka aiheutuu, kun mönkijän massa kulkee ylämäkeen. Tämä voima on siis maapallon vetovoiman ja mönkijän massan aiheuttama ja se muuttuu ainoastaan, kun mönkijä kulkee ylä- tai alamäkeen tai kun mönkijän massa muuttuu. Voiman yhtälöksi saadaan:

$$F_{hc} = mg \sin(\alpha), \quad (4)$$

missä α on ylä- tai alamäen vaakatasosta poikkeava kulma, kuten esitetty kuvassa 1. Kun kulma ylittää riittävän raja-arvon tämä komponentti nousee suurimmaksi tekijäksi F_t arvossa. (Sreejit and Rajagopal 2016)

Kiihtyvyys muodostuu kahdesta komponentista, lineaarisesta kiihtyvyydestä F_{la} , sekä kulmakihtyvyydestä $F_{\omega a}$. Näiden voimien summa muodostaa suurimman tekijän moottoritehon mitoituksessa. Lineaarille kiihtyvyydelle saadaan:

$$F_{la} = ma, \quad (5)$$

missä a on mönkijän kiihtyvyys. Tämä on moottoritehon mitoituksessa suurin yksittäinen tekijä ja muodostuu suoraan Newtonin toisesta laista. Kulmakihtyvyydelle $F_{\omega a}$ saadaan vastaavasti:

$$F_{\omega a} = I \frac{G^2}{r^2} a, \quad (6)$$

missä G on moottorin pyörien akseliin kytkävän vaihteiston välitys, r pyörän säde ja I vetävien pyörien inertiamomentti. Tämä yhtälö mallintaa pyörien massan aiheuttamaa vastusta, kun moottori pyrkii pyörittämään niitä. (Sreejit and Rajagopal 2016)

Kun F_t yhtälö on saatu muodostettua, tarvitaan vielä muutama yhtälö tarvittavan tehon ja väännön mitoittamiseen. Nyt saadaan väännölle yhtälöksi:

$$T = \frac{F_t}{G/r}, \quad (7)$$

missä T on moottorilta vaadittu vääntö, G vaihteiston välitys ja r pyörän halkaisija. Moottorilta vaaditun teho voidaan ratkaista myös F_t :n avulla, jolle saadaan yhtälöksi:

$$P_t = F_t v, \quad (8)$$

missä P_t on moottorilta vaadittu teho ja v mönkijän nopeus. (Sreejit and Rajagopal 2016)

Näiden yhtälöiden pohjalta voidaan mallintaa mönkijän moottorilta vaadittavaa tehoa ja vääntöä, sekä tarkastella vaadittua tehoa muutenkin kuin huipputehon osalta. Tämä puolestaan auttaa moottorin valinnassa, kun tarkasteltavissa on muutakin suorituskykydataa kuin

huipputeho. Yllä esitetyn lisäksi lisätään malliin kerroin, kuvaamaan moottorin ja vaihteiston hyötysuhdetta, jolloin esimerkiksi tarvittavan akuston mitoittaminen helpottuu.

4.2 Mönkijän voimansiirron simuloiminen

Aiemmassa luvussa esitettyjen yhtälöiden pohjalta luotiin Simulink-malli kuvaamaan mönkijään vaikuttavia voimia. Kuva käytetystä mallista liitteessä 1. Malliin on mahdollista syöttää mönkijän nopeus, kiihtyvyys ja maaston korkeusvaihtelut, joiden pohjalta mallin avulla voidaan simuloida monenlaisia käyttötilanteita mönkijälle. Kuljetun matkan, nopeuden ja kiihtyvyyden osalta hyödynnetään valmiiksi luotua Driving Cycle-mallia (DC), joka on suunniteltu ajoneuvojen testaamiseen erilaisissa olosuhteissa, kuten New European Driving Cycle eli NEDC. Tämän lisäksi käytetään itse luotua DC-mallia, jolla simuloidaan mönkijää hyötykäytössä.

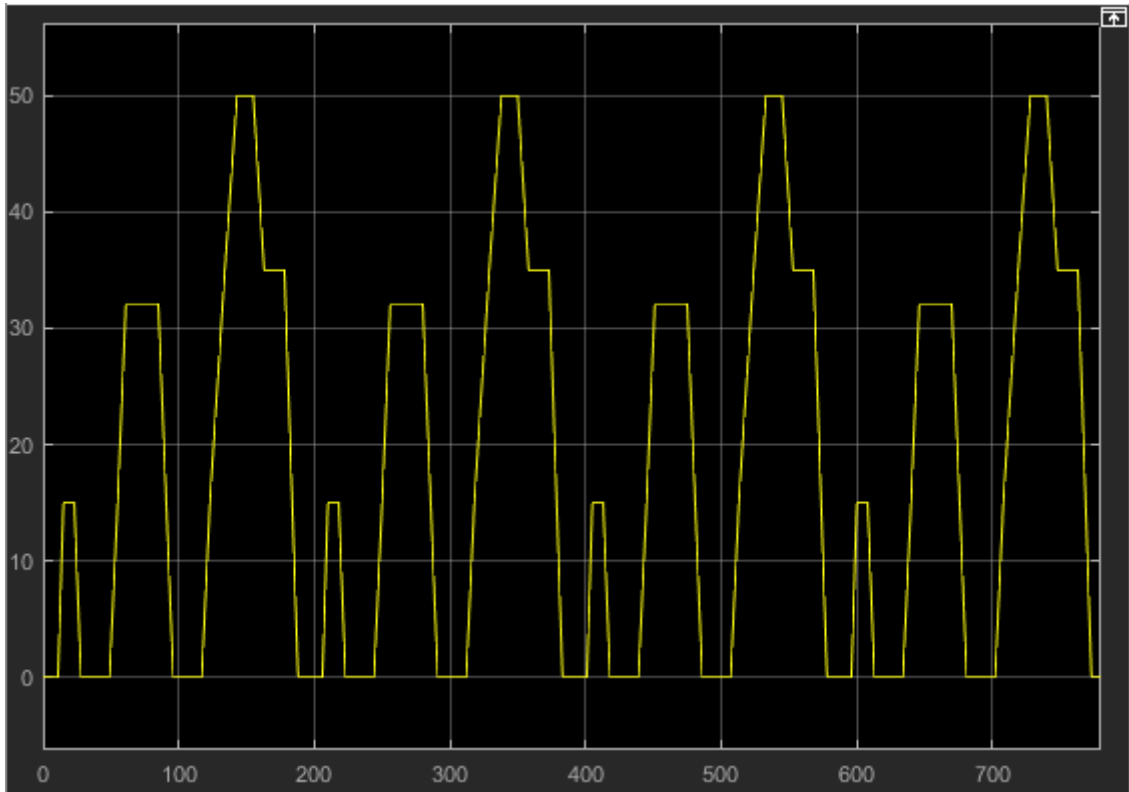
Käytetyn mallin avulla voidaan suoraan simuloida annetun testiprofiilin aikana tarvittu teho, vääntö ja akkujen kapasiteetti. Lisäksi on mahdollista tarkastella mallissa käytettyjen yhtälöiden mukaan mönkijään vaikuttavia voimia, jolloin voidaan simuloinnin aikana tarkastella, vaikuttavatko esimerkiksi ylämäet, kuinka suurelta osin moottorilta vaadittuun tehoon tai vääntöön.

Simulointi toteutettiin kahdella testiprofiililla, joiden avulla simuloitiin sekä tieliikenneajoa, että hyötykäyttöä. Ensimmäisessä profiilissa mönkijän massa on kevyempi, korkeuserot pienempiä, sekä nopeus suurempi. Nopeus ja kiihtyvyys noudattavat NEDC-standardin ensimmäisen 780 sekunnin osuutta. Tällä simulaatiolla tarkoituksena oli selvittää mönkijältä vaadittua tehoa ja vääntöä tieliikenteessä. Taulukossa 1. esitettynä simulaatiomallin lähtöarvot ja kuvassa 2 esitettynä käytetty nopeusprofiili.

Taulukko 1. Tieliikennekäyttöä simuloivan profiilin lähtötiedot.

Vierintävastuskerroin μ_{rr}	0.015
Ajoneuvon massa m	550 kg
Vetävien pyörien inertiamomentti I	0.295 kgm ²
Vaihteiston välityssuhde G	1
Renkaan säde r	0.1524 m
Ilman tiheys ρ	1.225 kg/m ³
Ajoneuvon etupinta-ala A	1 m ²
Ilmanvastuksen kerroin C_d	1.8
Vaihteiston hyötysuhde	0.75
Tien kallistuskulma	Välillä -5° ja 5° (vaihtuva satunnaisluku)
Ajoneuvon nopeus	NEDC-profiilin mukaan

Ajoneuvon kiihtyvyys	NEDC-profiilin mukaan
----------------------	-----------------------



Kuva 2. NEDC-testiprofiilissa käytetty nopeus (km/h) ja aika (s).

Tieliikenne-profiilissa käytettiin maltillista tien kallistuskulmaa, mutta haluttiin kuitenkin tuoda esille tiestön epätasaisuutta. Mittakaavaksi voidaan ajatella, että Suomessa 7 asteen noususta tai laskusta varoitetaan liikennemerkein. Profiilissa satunnaislukugeneraattori arpoo kymmenen sekunnin välein tielle uuden kallistuskulman taulukossa 1 esitetyn mukaisesti.

Simulaation tulokseksi saatiin mönkijältä vaadittu huipputeho ja vääntö, joiden kuvaajat esitettyinä liitteessä 2. Näiden kuvaajien pohjalta laskettiin myös tarvittun tehon ja vääntömomentin keskiarvo moottorin valinnan avuksi. Simulaatiotulokset esitettyinä taulukossa 2.

Taulukko 2. Tieliikenne-profiilin simulaatiotulokset.

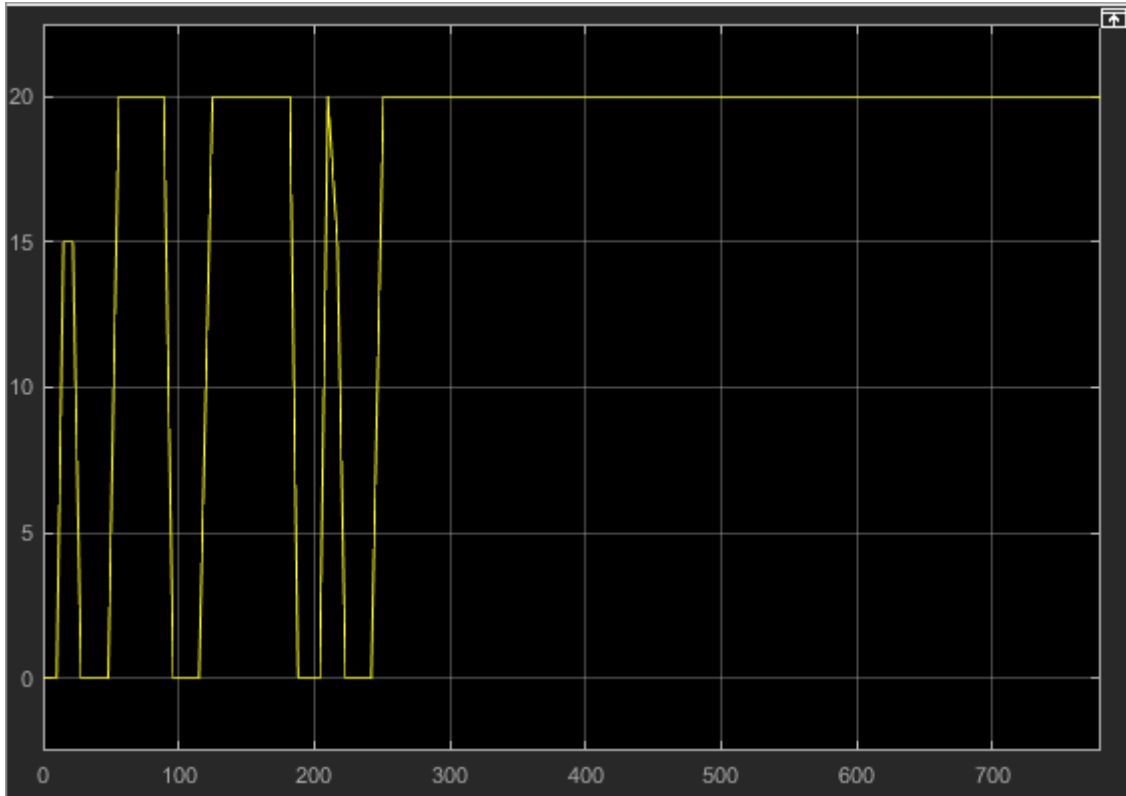
	Teho	Vääntömomentti
Huippuarvo	11.68 kW	205 Nm
Keskiarvo	1.67 kW	42 Nm

Toisessa testiprofiilissa keskitytään enemmän mönkijän hyötykäyttöön. Tässä profiilissa simuloidaan mönkijän lastaus/purkusykliä, jossa pysähdytään hetkeksi paikalleen, kiihdytetään 20 kilometrin tuntinopeuteen ja samaa toistetaan, kunnes ajetaan pois lastauspaikalta 20 kilometrin tuntinopeudella. Testiprofiilissa maaston kaltevuus on suurempi kuin ensimmäisessä profiilissa, sekä ajoneuvon massa on suurempi. Toisen simulaatioprofiilin lähtöarvot on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Hyötykäyttöä simuloivan profiilin lähtötiedot.

Vierintävastuskerroin μ_{rr}	0.015
Ajoneuvon massa m	1000 kg
Vetävien pyörien inertiamomentti I	0.295 kgm ²
Vaihteiston välityssuhde G	1
Renkaan säde r	0.1524 m
Ilman tiheys ρ	1.225 kg/m ³
Ajoneuvon etupinta-ala A	1 m ²
Ilmanvastuksen kerroin C_d	1.8
Vaihteiston hyötysuhde	0.75
Tien kallistuskulma	Välillä -10° ja 10° (vaihtuva satunnaisluku)
Ajoneuvon nopeus	Testiprofiilin mukaan
Ajoneuvon kiihtyvyys	Testiprofiilin mukaan

Alla esitettyinä kuvassa 3 käytetty nopeusprofiili. Mallissa tarvittava kiihtyvyys on laskettu suoraan derivoimalla nopeudesta. Tien kallistuskulma lasketaan satunnaislukugeneraattorilla, joka kymmenen sekunnin välein antaa uuden kallistuskulman. Tällä järjestelyllä haluttiin simuloida erittäin epätasaista ja haastavaa maastoa.



Kuva 3. Toisessa testiprofiilissa käytetty nopeus (km/h) ja aika (s).

Hyötykäyttö-profiilin simulaatiotulokset on esitetty liitteessä 3. Huomionarvoinen seikka on käytetty vaihteiston välityssuhde simulaatiossa. Tulosten vertailukelpoisuuden takia haluttiin käyttää samaa välityssuhdetta molempien profiilien simuloinnissa. Kuitenkin, jos hitaamman vaihteen välityssuhde on neljä tai enemmän (neljä kierrosta moottorin akselilla vastaa yhtä kierrosta vetävissä pyörissä), on tarvittu vääntö pienempi kuin tieliikenneprofiilissa tarvittu vääntö.

Simuloituista kuvaajista laskettiin myös keskiarvot moottorin mitoitusta varten. Tehon keskiarvoksi saatiin noin 2.8 kW ja vääntömomentin keskiarvoksi saatiin 93 Nm. Simulaatiotulokset esitettynä taulukossa 4.

Taulukko 4. Hyötykäyttö-profiilin simulaatiotulokset.

	Teho	Vääntömomentti
Huippuarvo	12.74 kW	465 Nm
Keskiarvo	2.8 kW	93 Nm

5. SÄHKÖMÖNKIJÄN VOIMANSIIRRON TOTEUTTAMISEEN SOVELTUVAT KOMPONENTIT

Mönkijässä käytetyiltä osilta vaaditaan paljon jo pelkästään ympäristön ja sään asettamien vaatimuksien perusteella. Suomessa vaihtelevat olosuhteet kuten lämpötilanmuutokset, ilmankosteuden muutokset ja lika aiheuttavat suurimmat haasteet osien kestävyydelle.

Mönkijän avoimen rungon takia osat altistuvat paljon ympäristön ja sään vaihtelulle, joten osien umpinainen rakenne on erittäin tärkeää normaalissa ulkokäytössä. Tieliikennekäytössä maantiepöly, kura ja talvella tiesuola voivat aiheuttaa ongelmia, jos mönkijän komponenttien toteutuksessa ei ole huomioitu näiden vaikutusta osien toimintaan. Ympäristössä erilainen lika voi joutua mönkijän moottoriin ja muihin komponentteihin ja lian joutuessa kosketuksiin liikkuvien osien kanssa, voi se aiheuttaa kulumia ja ennenaikaisia rikkoutumisia.

Tässä mielessä sähkömönkijä on etulyöntiasemassa sen vähäisempien liikkuvien osien takia. Polttomoottorikäyttöisessä mönkijässä on useita kymmeniä liikkuvia osia jo pelkästään moottorissa ja pelkkä moottorin käyttäminen kuluttaa näitä osia hitaasti. Sähkömoottoria käyttämällä voidaan saavuttaa pitemmät huoltovälit jo pelkästään liikkuvien osien vähemmällä määrällä.

Lämpötilan muutokset voivat Suomessa olla hyvin suuria jopa lyhyellä aikavälillä. Suomessa mitattujen ylimpien ja alimpien lämpötilojen pohjalta voidaan sanoa, että mönkijän osilta vaaditaan paljon. Jo Suomessa mitattujen huippulämpötilojen välinen erotus on yli 85 celsiusastetta, jota voidaan pitää suuntaa antavana arvona, kun mietitään mönkijän toimintakykyä Suomen talvessa ja kesässä. Lämpötilan vaihtelusta aiheutuu ongelmia esimerkiksi moottorien jäähtymisen kanssa kuumalla säällä ja akkujen sulana pitämisen kanssa kylmällä säällä.

5.1 Akkuteknologia

Eniten mönkijän käytettävyyttä rajoittava komponentti on akusto. Akkuteknologia ei ole vielä niin kehittynyttä, että se pystyisi kilpailemaan bensiinikäyttöisen moottorin energiavaran kanssa tasavertaisesti. Vaikka sähkömoottori on pienempi kuin polttomoottori, joudutaan huomioon ottamaan myös sähkömoottorin tarvitsemien akkujen vaatima tila. Tällä hetkellä saman käyttökantaman saavuttamiseksi mönkijään tulee sijoittaa akkuja enemmän kuin bensiinitankki vie mönkijästä tilaa. Tämän takia joudutaan tekemään valinta, joko pienentää mönkijän käyttökantamaa tai sijoittaa johonkin akkuja lisää siten, että samankaltainen kantama on mahdollista saavuttaa.

Sähköajoneuvojen tapauksessa yksi tärkeimmistä tekijöistä vertailtaessa polttoainetta ja akkuja on niiden energiatiheys kilowattia per litra (kW/l) tai ominaisenergia kilowattia per kilogramma (kW/kg). Yhden litran bensiiniä sisältäessä noin 8,6 kWh energiaa saadaan esimerkiksi 20 litran polttoainesäiliöllä 172 kWh energiaa. Perinteisillä lyijyakuilla vastaava lukema on noin 35 wattituntia kilogrammaa kohden, jolloin vastaavan energiamäärän varastointi vaatisi lähes viiden tonnin painosta akkuja. Käyttämällä litiumakkuja energiatiheys nelinkertaistuu lyijyakkuihin verrattuna, jolloin päästää noin 150 wattituntiin (Wh) kilogrammaa kohti. Tällöin saman energiamäärän varastointiin tarvittaisiin noin 1147 kilogrammaa akkuja. (Tiede 2008)

Sähkömoottorikäytön etuna on kuitenkin huomattavasti parempi hyötysuhde. Akustoon varastoidusta energiasta saadaan sähkömoottorin avulla hyödynnettyä vähintään 85 prosenttia, kun taas polttomoottoria käytettäessä hyötysuhde on vain noin 15 prosenttia. Tällöin saadaan vastaavat energiamäärät polttomoottorin tapauksessa 25,8 kWh, joka voidaan toteuttaa litiumakuilla noin 198 kg painavalla akustolla. (Tiede 2008)

Yllä mainitun tueksi tarkastellaan osittain (Karthigeyan 2017) työssä koostettua taulukkoa, jossa vertaillaan litiumioniakkujen ominaisuuksia tavallisten lyijyakkujen ominaisuuksiin.

Taulukko 5. Lyijyakun ja litiumioniakun ominaisuuksia. (Karthigeyan 2017)

Parametri	Lyijyakku (VRLA)	Litium-ioni (LFP)
Kapasiteetti (Ah)	300	300
Energiatiheys (Wh/kg)	50	120
Nimellisjännite (V)	48	48
Käyttösyklien määrä (80% DOD)	1500	6000
Hyötysuhde (%)	85	95
Käyttölämpötila	-20°C - 50°C	10°C - 65°C

Kuten taulukosta 2 voidaan havaita, on litiumioniakun suorituskyky huomattavasti parempi kaikilla muilla osa-alueilla paitsi kylmän siedossa. (Li et al. 2014) viittaa työssään litiumakkujen lataustilan (State-of-charge) SOC:in pienenevän noin yhteen neljäsosaan, kun lämpötila on -15° celsiusta, verrattuna 25° celsiusta SOC:iin. Jos mönkijää suunnitellaan käytettäväksi äärimmäisen kylmissä olosuhteissa, tulee akuston lämpötilaan kiinnittää erityistä huomiota.

Tässä työssä erityisen merkittävään rooliin nousee energiatiheys, sillä mönkijän rungossa akustolle on käytettävissä erittäin rajallinen tila ja haasteeksi muodostuu lyijyakkujen tapauksessa jo akuston asettelu mönkijään. Litiumioniakkujen paremmasta suorituskyvystä huolimatta on lyijyakkujen suurin valtti halvempi hinta. Erityisesti köyhemmissä maissa sähkö ajoneuvojen energialähteenä on käytetty lyijyakkuja niiden halvan hinnan takia. (Sreejit and Rajagopal 2016)

Tarkastellaan seuraavaksi muutamaa akkuvaihtoehtoa mönkijän energiavarastoksi, CALB CA100 kennoa, sekä perinteisempää lyijyakkua Euroglobe:n EG 100-12. Oletetaan että akustolta vaaditaan 48 voltin jännite ja vertaillaan akustoja keskenään.

Taulukko 6. VRLA ja Li-ion akkujen parametrit. (CALB 2012) (Euroglobe 2014)

Parametri	Euroglobe EG 100-12	CALB CA100
Purkuvirta (A)	330.8	100
Kapasiteetti (Ah)	104	100
Nimellisjännite (V)	12	3.2
Konfiguraatio	4P	16S
Akuston jännite (V)	59.2 – 47.2	51.2 – 40
Akuston fyysinen koko (cm ³)	50239	33337
Akuston kapasiteetti (Ah)	104	100
Akuston paino (kg)	121.6	54.4

Kuten taulukosta 3 voidaan huomata, tulee lyijyakkujen koko ja paino suurimmaksi ongelmaksi niiden käytössä. Lisäksi litiumakkujen hyvänä puolena on akuston muodon parempi muokattavuus, jos akusto valmistetaan yksittäisistä litiumkennoista. Jos käytettävissä on pistehitsaukseen tarvittava välineistö, on akusto mahdollista koota lähes täysin geometrialtaan haluttuun muotoon.

Yllä esitetyn vertailun pohjalta voidaan todeta, että prototyypimönkijän tapauksessa litiumakut ovat parempi valinta. Käytettäessä litiumioniakkuja on käytettävä akustonhallintaohjainta (BMS). BMS:n käyttö ei kuitenkaan ole ongelma, koska mönkijän käyttäjä haluaa todennäköisesti tietää akustosta muitakin tietoja kuin jännitteen, sekä useat moottorinohjaimet on suunniteltu toimimaan yhteistyössä BMS:n kanssa.

5.2 Battery Management System (BMS)

Litium-akkuja käytettäessä tulee käyttää ohjainta akuston hallintaan. Litium-akkujen tapauksessa niitä ei saa purkaa liian alhaiseen jännitteeseen, sekä akustojen kennojen jännitteiden tulee pysyä tasaisena. Liiallinen purkaminen johtaa akuston käyttöiän laskuun ja voi aiheuttaa vaaratilanteen, kun kennojen jännitteet ovat päässeet epätasapainoon keskenään.

Tähän ongelmaan käytetään ratkaisuksi BMS-järjestelmää, joka huolehtii akuston kennojen tasaisesta jännitteestä ja antaa lisäksi kuljettajalle informaatiota akuston tilasta. Tämän lisäksi BMS voi huolehtia akuston latauksessa oikeanlaisesta lataamisesta, jolloin voidaan käyttää yksinkertaista ja halvempaa laturia.

BMS:iä käytettäessä akusto tulee koota siten, että jokaisesta sarjaan kytketystä kennosta vietään johdin BMS sisääntuloon, jolloin ohjain pystyy valvomaan ja tarvittaessa tasaamaan erisuuruiset jännitteet akustossa. Rinnankytketyt kennot tasaavat toisensa itsenäisesti, mutta sarjaan kytkettyjen kennojen kanssa lataustilan epätasapaino voi johtaa akuston vikaantumiseen.

5.2.1 Zero Emission Vehicles Australia BMS16

ZEVA valmistaa akustonhallintajärjestelmää 12-16 kennon litiumakustoille ja 10 -1000 Ah kapasiteetille. BMS16 tukee myös CAN-protokolaa lisävarusteena saatavaa näyttöä varten ja integrointia kolmannen osapuolen järjestelmän kanssa. Järjestelmä kytketään siten että moduuli ohjaa releillä akuston ja kuorman välistä yhteyttä, sekä laturin ja akuston välistä yhteyttä. BMS16 voidaan varustaa myös shunttivastuksella, jolloin käytettävää virtaa voidaan seurata. Akuston lämpötilan tarkkailua varten mukana tulee lämpötila-anturi. Lisävarusteena on saatavilla myös erillinen BMS Monitor-näyttö, joka näyttää käyttäjälle jännitteen, virran, tehon, lämpötilan, sekä lataustilan. Kuva BMS16-ohjaimesta alla. (ZEVA 2016)



Kuva 4. BMS16 akustonhallintajärjestelmä, sekä BMS Monitor. (ZEVA 2016)

5.3 Moottoriteknologia

Työssä käytettävän moottorityypin valinta osoittautui merkittävimmäksi valinnaksi työn edetessä, sen ollessa tärkein yksittäinen tekijä sähkömönkijän voimansiirrossa. Valintaa varten perehdyttiin useisiin moottorityyppeihin ja tutustuttiin niiden hyviin ja huonoihin puoliin. Tutkimuksen edetessä huomattiin, että useissa lähteissä vastaavanlaisissa projekteissa päädyttiin taajuusmuuttajalla ajettuun kestopagneettitahtimoottoriin (PMAC).

PMAC-moottorin etuina ovat moottorin hiiliharjaton rakenne ja pienempi koko verrattuna AC-induktiomootoreihin. Koska moottorissa on vähemmän kuluvia osia kuin hiiliharjallisessa verrokissaan on se näin ollen myös luotettavampi. PMAC-moottori on mekaaniselta rakenteeltaan samankaltainen, kuin AC-induktiomoottori, mutta koska moottorin rakenteessa on käytetty kestopagneetteja, ei moottorin magnetointiin kulu energiaa ja näin ollen häviöt ovat pienemmät. Kestomagneettien käyttäminen moottorissa mahdollistaa myös moottorin pienemmän koon, sekä kevyemmän massan verrattuna AC-induktiomoottoriin, mikä on sähkömönkijän tapauksessa merkittävä tekijä.

PMAC-moottori on myös hyötysuhteeltaan AC-induktiomoottoria parempi. Moottori toimii paremmalla hyötysuhteellaan koko toiminta-alueellaan, johtuen roottorin jatkuvasta magneetikentästä, joka eliminoi AC-moottorin käämityksestä johtuvia kuparihäviöitä.

Valmistusmateriaaleiltaan induktiomoottori ja PMAC-moottori ovat hyvin samankaltaisia, poikkeuksena PMAC-moottorissa käytetyt kestmagneetit. Nämä ovat kalliimpia kuin induktiomoottorissa käytetty kupari, mikä vastaavasti nostaa moottorin hintaa verrattuna induktiomoottoriin. Tämän lisäksi aina kun induktiomoottoria joudutaan operoimaan muualla kuin sille suosiollisessa toimintapisteessä muodostuvat kuparihäviöt suuriksi verrattuna PMAC-moottoriin. Suuremmat häviöt nousevat nopeasti suureen rooliin sähkömönkijän tapauksessa, sillä rajallinen tila tarkoittaa rajallista akkukapasiteettia. (Schultz et al. 2013)

Kun verrataan kestmagneetoitua tasasähkömoottoria (PMDC) vaihtosähköiseen verrokkiinsa on PMDC-moottorilla joitakin etuja, kuten halvempi hinta ja moottorin suuri vääntömomentti pienillä kierroksilla. Kuitenkin kun harkitaan sähkömönkijän tapauksessa siltä halettuja ominaisuuksia, vaihtosähkömoottorin paremmuus tulee esille useissa seikoissa.

PMAC-moottorilla regeneratiivinen jarrutus onnistuu ilman lisäjärjestelyjä. Tämä ominaisuus on saatavilla myös DC-moottoreihin Curtis Instrumentsin SepEx-sarjan moottorinohjaimilla, mutta lisäominaisuuksista aiheutuu aina lisäkuluja sekä moottorinohjaimen rakenne tulee monimutkaisemmaksi.

Vaihtosähkömoottorin vääntö-kierrosluku-suhde tarjoaa jatkuvaa vääntöä laajalla kierroslualueella. Tämän lisäksi AC-moottorin roottorin huippukierrosluku on tyypillisesti noin kaksinkertainen verrattuna DC-moottorin vastaavaan.

Turvallisuuskulmasta katsottuna DC-moottorinohjaimen tehonsyötössä tapahtunut vikatila voi johtaa koko akuston jännitteen kytkeytymiseen moottorille, mikäli muut turvavarusteet eivät kykene tätä estämään. AC-moottorin tapauksessa vastaavan vian sattuessa moottori menettää tehoaan, mutta samanlaista vaaratilannetta ei pääse tapahtumaan.

Moottorin jäädyttäminen voi muodostua haasteeksi olosuhteiden takia. Lika, pöly ja vesi ovat usein elementtejä, joita mönkijän ympäristöstä löytyy runsaasti ja niiden päätyminen moottoriin voi muodostua ongelmaksi. Moottorin nestejäähdytys ratkaisee yllä mainitut ongelmat ja sellainen todennäköisesti löytyy jo mönkijästä konversiota ajatellen. AC-moottoreita on yleisesti saatavilla vesijäädytettynä malleina, mutta vesijäädytetyn DC-moottorin löytäminen voi olla haastavaa.

Peruutusvaihte on haluttu ominaisuus monissa kulkuneuvoissa ja vaihteistottoman sähkömoottorin tapauksessa sen toteuttaminen vaatii katkaisijan lisäämisen ajoneuvoon. Tässä tapauksessa moottorinohjain vaihtaa kahden vaiheen järjestystä ulostulossaan, jolloin moottori pyörii takaperin. DC-moottorin tapauksessa tarvitaan lisäkomponentteja, mikä tekee rakenteesta taas monimutkaisemman. (Metric Mind Corporation 2018)

Moottoreiden hintoja vertailemalla saadaan lisätietoa moottorin valintaan. Tarkastellaan nyt muutamaa esimerkkimoottoria, jotka edustavat aiemmin käsitellyjä tyyppisiä ja niiden hintoja. Moottorien tiedot ja hinnat esitettynä alla taulukossa 7.

Taulukko 7. Eri moottorityyppien tehot ja hinnat. (Electric Motorsport 2016 3)

Moottori	Tyyppi	Teho (jatkuva/ huipputeho (60 s))	Hinta	Hinta / Teho [USD/kW]
Motenergy ME1004	PMDC Brushed	8 kW / 15.7 kW	550 USD	68.75 / 35.03
Motenergy ME1117	PMAC Brushless	4.5 kW / 14.2 kW	615 USD	136.66 / 43.31
Motenergy ME1114	PMAC Brushless	10 kW / 24 kW	1050 USD	105 / 43.75
Motenergy ME1003	PMDC Brushed	11.5 kW / 23 kW	850 USD	73.91 / 36.96

Kuten taulukosta 7. voidaan havaita tulisi DC-moottorin hankinta halvemmaksi. Kuitenkin vertailussa on otettava huomioon, että molemmat DC-moottorit ovat hiiliharjallisia ja AC-moottorit ovat hiiliharjattomia. PMAC moottoreissa käytettävien kestopagneettien moninkertainen hinta verrattuna kuparin hintaan, sekä erilainen mekaaninen rakenne vaikuttavat moottorien hintaan. Ainoastaan hinnan ja tehon suhdetta vertaamalla voidaan todeta DC-moottorien olevan parempia, mutta haastavan käyttökohteen ja rajallisen tilan takia moottorilta vaaditaan suhteellisen pientä kokoa ja mahdollisimman hyvää suorituskykyä. Yleensä AC-moottorit ovat samassa teholuokassa pienempiä kooltaan, lisäksi luotettavuus on yksi mönkijän tärkeimpiä ominaisuuksia. Tällöin myös moottorin hiiliharjaton rakenne on yksi haluttavista ominaisuuksista.

Yllä esitettyjen seikkojen pohjalta valitaan jatkotarkasteluun kestopagneetoitu tahtikone (PMAC). Vaikka valinta nostaakin mönkijän hintaa, asiaa voidaan pohtia kuluttajan kannalta: suorituskyvyltään kilpailukykyinen, ekologisesti toteutettu voimansiirto kalliimmalla hinnalla on helpompi myydä kuin huonompi järjestelmä halvemmalla hinnalla.

5.4 Moottorinohjaus

Sähkömoottorin käyttö vaatii moottorinohjaimen käyttöä. Moottorinohjain on yleensä pulssileveysmodulaatiota hyödyntävä laite, jolla syötetään moottorille halutunlaista jännitettä. Tämä järjestely ja moottorinohjaimiin usein valmiina ohjelmoidut moottorimallit mahdollistavat paremman säädön moottorille. Moottorinohjain tulee valita käytettävän moottorin mukaisesti ja sen tulee kestää riittävä virta ja jännite, jotta haluttuun suorituskykyyn voidaan päästä.

Alla esitellyt ohjaimet käyttävät Advanced Flux Vector Control (FVC)- ja Indirect Field Oriented Control (IFOC)-menetelmiä moottorinohjauksessa. Toimintaperiaatteiltaan molemmat menetelmät ovat samankaltaisia, eli niissä moottorin tiedoista laaditun mallin pohjalta ohjataan moottorille syötettävää kolmea vaihetta. (Sharawane P. 2010)

Säätö perustuu kahteen vektorikomponenttiin, jotka ovat moottorin magneettivuo ja vääntö. Moottorinohjaimelle annetaan käyttäjän toimesta nopeuspyyntö, mikä muutetaan halutuksi väännöksi usein PI-säätimen avulla. PI-säädin taas ohjaa IFOC-säädintä ja näin ollen säätää moottorin nopeutta. Menetelmän etuna on mittauksen puute. Tällöin samaa säädintä voidaan käyttää samanlaisella moottorityypillä vaihtamalla järjestelmään syötettävää moottorimallia, sillä itse moottoria käytetään väännön muuntimena (torque-transducer). (Sharawane P. 2010)

5.4.1 Sevcon G48-sarja

Sevcon valmistaa erilaisia moottorinohjaimia maasto- ja tieliikennekäyttöön, joista tässä yhteydessä tarkastellaan G48-sarjan tuotteita. Valmistajan mukaan G48-sarjan tuotteet ovat luotettavia ja ne on tarkoitettu sekä maasto- ja tieliikennekäyttöön ja tarjoavat pienimmän koon suhteutettuna tehoon. Hyvän hyötysuhteensa ansiosta ohjaimet on mahdollista sijoittaa hyvin pieneen tilaan ilman että lopputuotteen suorituskyky kärsii. Tämän mahdollistaa ohjauksyksiköiden pieni koko, G4865: 305 x 170 x 86, G4845: 227 x 168 x 78 ja G4827: 187 x 151 x 69 (leveys x pituus x korkeus millimetriä). Moottorinohjaimet on suunniteltu siten, että mahdollisimman pienillä kustannuksilla saavutetaan kuitenkin paras luotettavuus vaativissakin käyttösovelluksissa. (Sevcon 2016)

G4-sarjan ohjaimilla voidaan ohjata sekä AC Asynchronous ja synkronoituja kestopagneettimoottoreita. Tämä mahdollistaa suuremman vapauden moottorin valinnassa. Alla kuvassa kolme G48-sarjan moottorinohjainta. (Sevcon 2016)



Kuva 5. Sevcon G48-sarjan ohjaimia vasemmalta oikealle: G4865, G4845 ja G4827.

G4-sarjan ohjaimet on suunniteltu 36 – 48 VDC nimellisjännitteelle ja ne tarjoavat sensorien takaisinkytkennän laitteiston kolmivaihevirrälle (UVW), pulssianturille (pulse encoder) ja sin / cos takaisinkytkennälle (sin / cos feedback). Ohjaimet ovat CANopen yhteensopivia, joka mahdollistaa hallintalaitteiden helpon kytkemisen, koska laitteet voidaan sijoitella halutusti ja toisiinsa kytkettynä ne välittävät tarvittun tiedon relevantille ohjaimelle. Lisätietoja tuetuista CANopen-profiileista taulukossa 8. (Sevcon 2016)

Moottorinohjaimet pystyvät CANopen-väylän kautta kommunikoimaan yhteensopivien akunhallintajärjestelmien (Battery Management System) kanssa ja rajoittamaan sallitun virran määrää, parantaen käyttökantamaa ja akun kestoaa. (Sevcon 2016)

Taulukko 8. Sevcon G4-sarjan ohjaimien ominaisuuksia (Sevcon 2016).

Model	G4827	G4845	G4865
Nominal battery voltage	36 – 48 VDC		
Max. operating voltage	69,6 VDC		
Min. operating voltage	19,3 VDC		
Peak current (2 min) 1)	275 A	450 A	650 A
Boost current (10 sec) 1)	330 A	540 A	780 A
Cont. current (60 min) 1)	110 A	180 A	260 A
Digital inputs	8		
Analog inputs (can be configured as digital)	2		
Motor temperature sensor input	Yes (thermistor)		
Contactors / solenoid outputs (2 A)	3 (1 – 16 kHz) 2)		
Motor UVW inputs	Yes		
Motor encoder (AB) inputs	Yes		
Sin / Cos feedback inputs	Yes		
Encoder supply output	5 V alt. 10 V (max. 100 mA)		
Supported CANopen profiles	DS301, DS401, DS402		
Ambient operating temperature	-40 °C to +85 °C		
Protection class	IP66		

1) Current values are based on nominal battery voltage. Stated currents and/or duration will be reduced at higher voltages

2) Current or voltage controlled

5.4.2 Curtis Instruments 1236E ja 1238E sarja

Curtis Instruments valmistaa moottorinohjaimia AC-induktiomoottoreille, sekä useita oheislaitteita moottorinohjaimiensa rinnalle. Moottorinohjaimien myyntivaltteina ovat muun muassa: Curtis VCL-Vehicle Control Language, Indirect Field Orientation (IFO) Vector Control, Curtis Auto-Tune, Dual-Drive Functionality, CANbus ja Integrated System Controller. Alla kuvassa 6. esitettynä Curtis Instruments 1238E moottorinohjain. (Curtis Instruments 2016)



Kuva 6. Curtis 1238E moottorinohjain.

VCL:n kerrotaan olevan helppokäyttöinen ja tehokas ohjelmointikieli, jonka avulla valmistaja voi tehdä logiikkafunktioita tai virtuaalisen ohjaimen. Curtis Instruments tarjoaa myös kehitystyökaluja ja opetusta VCL-ohjelmointiin. (Curtis Instruments 2016)

IFO-algoritmeilla saavutetaan valmistajan mukaan maksimivääntö ja paras hyötysuhde koko käyttöalueella. Algoritmi mahdollistaa myös parhaan ajotuntuman, sekä paremman nopeussäädön. (Curtis Instruments 2016)

Auto-Tune ominaisuudella valmistaja lupaa AC-moottorien karakterisoinnin onnistuvan suoraan ajoneuvoon kytkettynä. Moottorinohjain tarvitsee toimiakseen karakteristisen mallin siihen kytketystä moottorista, jolloin tällä ohjaimella ennalta ohjelmoidun mallin käyttäminen ei ole pakollista. (Curtis Instruments 2016)

Dual-Drive Functionality mahdollistaa kahden moottorin ohjaamisen samanaikaisesti. Tätä ominaisuutta voidaan hyödyntää, jos mönkijän voimansiirto haluttaisiin toteuttaa kahdella moottorilla. (Curtis Instruments 2016)

Ohjain tukee myös CANopen protokollaa, jolloin siihen on mahdollista liittää muita CANopen laitteita. Tämä mahdollistaa esimerkiksi akustonhallintajärjestelmän kytkemisen suoraan moottorin ohjaimen. (Curtis Instruments 2016)

6. VALMIIT SÄHKÖMÖNKIJÄT JA KONVERSIO SARJAT

Markkinoilla on jo valmiita sähkömönkijäpaketteja, joista kuitenkin vain muutamat ovat suurten mönkijävalmistajien. Esimerkiksi Polaris valmistaa omaa Ranger EV sarjaansa, johon kuuluu tällä hetkellä kaksi mallia, Ranger EV ja Ranger EV Li-ion. Pienempiä yhtiötä on pyrkinyt markkinoille omilla malleillaan, usein johtaen yhtiön lopettamiseen.

Yhteistä markkinoilla jo olevilla sähkömönkijöillä on suurimmalla osalla golfkärry mallinen runkonsa. Useimmat valmistajat ovat päätyneet tähän runkorakenteeseen tilanpuutteen takia. Golfkärryä muistuttavassa rungossa on enemmän tilaa tarvittaville komponenteille, kuin yhden istuttavassa runkotyyppissä, joka perinteisesti assosioidaan mönkijän rungoksi.

Hintansa puolesta esimerkiksi Ranger EV malli vastaa lähinnä 1000-kuutioista Scrambler XP EPS mallia. Scrambler XP 1000 EPS mönkijän suositushinta on kirjoitushetkellä 15990 € ja vastaavasti Ranger EV 15990 € ilman akustoa. Akustolle valmistaja mainitsee alkaen hinnan 3300 €. (Polaris 2018 1) (Polaris 2018 2)

6.1 Polaris Ranger EV ja Ranger EV Li-ion

Polaris valmistaa tämän tekstin kirjoitushetkellä Ranger EV mönkijää kahtena eri mallina, niiden suurimpana erona litiumioniakut nimensä mukaisessa mallissa. Voimanlähteenä Polaris käyttää molemmissa malleissa yhtä 48 voltin AC-induktiomoottoria. Molemmissa malleissa moottorilta luvataan 30:nen hevosvoiman huipputeho ja AC-induktiomoottorin valintaa perustellaan sen paremmalla hyötysuhteella verrattuna perinteisiin induktiomoottoreihin ja sen mahdollistamalla pidemmällä käyttösaiteella. Kuva Ranger EV Li-ion mallista alla.



Kuva 7. Polaris Ranger EV Li-ion.

Polaris toi Li-ion mallin Ranger EV mönkijästään markkinoille 2016. Sen tärkeimpänä uudistuksena ovat Brammo:n valmistamat litiumakut. Käyttämällä litiumkennoja mönkijän akustossa on saatu vähennettyä painoa noin 193 kilogrammaa verrattuna Ranger EV malliin, jossa käytetään perinteisiä lyijyakkuja. Samalla mönkijälle luvataan yli kaksinkertainen toimintamatka yhdellä latauksella aina 80:neen kilometriin saakka ja akkujen käyttöiän luvataan olevan yli kolminkertainen. Hintaa Ranger EV mallilla on kirjoitushetkellä 15990 € ilman akkuja ja akkupaketin hinta lisätään alkaen 3300 €. (Polaris Industries 20016) (ATV.com 2015) (Polaris 2018 2)

6.2 Electric Motorsport PMAC-G4827 HS 36/48V 275A Motor Drive System

Electric Motorsport myy verkkokaupassaan 4.5 kW jatkuvaa ja 11 kW hetkellistä tehoa tuottavaa konversiosarjaansa. Sarja sisältää moottorin, moottorinohjaimen, nopeussäätimen, peruutuskatkaisijan, käynnistysavaimen, kontaktorin, hätäseis-painikkeen, sulakkeet ja johdotuksen. Moottorin tiedot esitetty taulukossa 9 alla.

Taulukko 9. Konversiosarjassa käytetyn moottorin tiedot.

Moottoritopologia	PMAC
Teho	4.5 kW / 11 kW
Vääntö	0.13 Nm / Ampeeri
Jäähdytys	Ilma
Virankesto	80 A (AC)/ 220 A(AC) (1 min)
Hyötysuhde	90%
Paino	16 kg

Konversiosarja käyttää Motenergy ME1305 moottoria, joka on ilmajäähdytteinen. Lisävarusteena sarjaan on saatavilla Sevcon ClearView CANopen-näyttö, sekä vaihteenalentaja halutulla välityssuhteella. Hintaa konversiosarjalla on tämän työn kirjoitushetkellä 1650 USD. Konversiosarja esitettynä alla kuvassa 7. (Electric Motorsport 2016 1)



Kuva 8. Electric Motorsport konversiosarja. (Electric Motorsport 2016 1)

6.3 Electric Motorsport PMAC 12kW Cont. / 30kW Pk. Liquid Cooled Motor Drive System 48V 650A

Electric Motorsport myy verkkokaupassaan 12 kW jatkuvaa ja 30 kW hetkellistä tehoa tuottavaa konversiosarjaansa. Sarja sisältää moottorin, moottorinohjaimen, nopeussäätimen, peruutuskatkaisijan, käynnistysavaimen, kontaktorin, hätäseis-painikkeen, sulakkeet ja johdotuksen. Moottorina toimii DLC-20 moottori ja moottorin tiedot esitettynä taulukossa 10 alla.

Taulukko 10. Konversiosarjan moottorin tiedot.

Moottoritopologia	PMAC
Teho	12 kW / 30 kW
Vääntö	0.12 Nm / Ampeeri
Jäähdytys	Neste
Virankesto	165 A (AC)/ 450 A(AC) (1 min)
Hyötysuhde	92%
Paino	16 kg

Moottorinohjaimena sarjassa toimii Sevconin Gen4 ohjain, joka mahdollistaa nimellisjännitteen 36 tai 48 VDC akustolta. Lisävarusteena sarjaan on saatavilla nestejäähdytykseen pumppu, lämmönvaihdin, nestesäiliö, letkut ja liittimet, sekä moottori nestejäähdytyksen pumpulle. Lisäksi saatavilla on Sevcon ClearView CANopen-näyttö, sekä vaihteenalentaja. Hintaa sarjalla on tämän työn kirjoitushetkellä 3600 USD. Konversiosarja esitettynä alla kuvassa 9. (Electric Motorsport 2016 2)



Kuva 9. Electric Motorsport konversiosarja. (Electric Motorsport 2016 2)

6.4 Electric Motorsport PMAC-G4845 48V 450A ATV / Golf Car / NEV Motor Drive System

Viimeisenä vaihtoehtona esitellään G4845 konversiosarja, joka tuottaa valmistajan mukaan noin kahdenkymmenen hevosvoiman huipputehon. Tämä mahdollistaa mönkijän rekisteröimisen tieliikenteeseen L7e-luokkaan, jossa huipputehon raja on 15 kW (20,4 hv). Moottorina konversiosarjassa on Motenergy ME1202 moottori ja konversiosarjaa myydään Sevconin 4:nneen sukupolven ohjaimen kanssa. Konversiosarja sisältää samat tarvikkeet kuin yllä esitellyt muut sarjat. Hintaa sarjalla on työn kirjoitushetkellä 2495 USD. Konversiosarja esitettynä alla kuvassa 10. ja konversiosarjan moottorin tiedot taulukossa 11.

Taulukko 11. Konversiosarjan moottorin tiedot.

Moottoritopologia	PMAC
Teho	10 kW / 24 kW
Vääntö	0.12 Nm / Ampeeri
Jäähdytys	Ilma
Virankesto	125 A (AC)/ 420 A(AC) (1 min)
Hyötysuhde	84%
Paino	16 kg



Kuva 10. G4845-konversiosarja. (Electric Motorsport 2016 4)

Tämän konversiosarjan moottoria saatetaan joutua rajoittamaan sähköisesti, että se täyttää tieliikenteessä vaaditut ominaisuudet. Kuitenkin suhteellisen matalan tehorajan takia on todennäköistä, että mahdollinen kuluttaja haluaa tuotteen, jonka suorituskyky on mahdollisimman lähellä suurinta sallittua.

7. SÄHKÖISEN VOIMANSIIRRON TOTEUTUS

Valitaan jatkotarkasteluun viimeisenä esitetty konversiosarja G4845. Konversiosarjan akustolta vaatima nimellisjännite on 48 V, mikä on sama jännite kuin aiemmin esitetyssä akustovertailussa. Tällöin akustolle tulee minimissään painoa noin 55 kg ja minimikapasiteetti on 100 ampeerituntia.

Kun lisätään moottorin paino noin 16 kg, moottorinohjain noin 3 kg, BMS, johdotukset, kontaktorit ja muut ohjainlaitteet noin 5 kg saadaan konversiosarjaan tarvittavien osien minimipainoksi 79 kg ja mahdollinen alennusvaihe noin 13kg.

Moottorin huipputeho voidaan rajoittaa lain sallimaan 15 kW huipputehoon, jolloin suurin akustolta purettava virta on laskennallisesti noin 312 ampeeria. Tällä virralla maksimiväännöksi saadaan 37,44 Nm, mikä on hieman pienempi kuin simuloitu 42 Nm. Kuitenkin voidaan todeta, että yhdistämällä tämä konversiosarja ja sopiva alennusvaihde, on mahdollista päästä hyvin lähelle simulaatiossa vaadittua suorituskkyä.

Sähkömönkijän painon tulee alittaa 400 kg ilman akkuja, jotta se olisi mahdollista rekisteröidä luokkaan L7e. Laskennallisesti konversiosarjan paino on lähelle 80 kg, mikä tarkoittaa sitä, että mönkijän rungon suurimmaksi sallituksi painoksi jää 362 kg kun alennusvaihde sisältyy konversioon. Tämän uskotaan olevan toteutettavissa sillä polttomoottorimönkijöiden massat sijoittuvat noin kolmensadan kilogramman yläpuolelle. (Tekniikan Maailma 19/2010) Taulukossa 11 esitettynä kustannusarvio konversion komponenteista.

Taulukko 11. Sähkömönkijäkonversion kustannusarvio.

Komponentti	Hinta
Konversiosarja G4845 lisävarustein	2980 USD (Electric Motorsport 2016 4)
Akusto (48V/100Ah)	2480 USD (EV West 2018)
BMS16	370 USD (Zero Emission Vehicles Australia 2016)
Alennusvaihde 4:1	459 USD (Electric Motorsport 2016 5)

Yhteensä 5830 USD (ilman alennusvaihdetta) ja 6289 USD (alennusvaihteen kanssa). Kustannusarviossa esitetty akusto on kapasiteetiltaan kohtuullisen pieni ja akuston toteuttaminen suuremmalla kapasiteetilla riippuu mönkijän rungon rakenteesta. Jos mönkijän runko on enemmän golfauton tyyppinen, on mahdollista rakentaa yksinkertaisin muutoksin isompi akusto, kuin vastaavaan yhdenistuttavaan, perinteisempään mönkijän runkoon.

Alennusvaihteen käyttö riippuu täysin mönkijän käyttökohteesta. Mikäli mönkijällä halutaan vetää raskaita kuormia haastavissa olosuhteissa, on alennusvaihteen käyttö suositeltavaa. Kuitenkin jos mönkijän pääasiallinen käyttökohde on tieliikenteessä, ei alennusvaihteelle ole pakottavaa tarvetta.

Kun verrataan konversiosarjan hintaa ja suorituskkyä esimerkiksi (Hondapro 2017) esitettyihin lukuihin, voidaan todeta myös teholtaan rajoitetun konversiosarjan vastaavan laskennallisen väännön osalta hyvin lähelle Hondan 500 kuutioista polttomoottorimönkijää (Honda 37,96 Nm ja konversio 37,44 Nm). Huipputehonsa puolesta rajoitettu konversiosarja häviää rajoittamattomalle 500 kuutioiselle polttomoottorille, mutta ilman rajoitusta tarjoaa sähkökonversio enemmän huipputehoa (Honda 21,4 kW ja konversio 24kW).

Rajoittavin tekijä sähkömönkijän suorituskyvyssä on akusto. Sadan ampeeritunnin akkukapasiteetti ei pysty vastaamaan polttomoottorikäyttöisen mönkijän bensiinitankillista. Akuston kapasiteetin kasvattaminen on mahdollista mönkijän rungon rakenteesta riippuen, jos käytettävissä oleva budjetti sallii sen. Akuston kapasiteetin kasvattaminen vastaamaan polttomoottorikäyttöisen mönkijän bensatankillista voi kuitenkin osoittautua haastavaksi käytettävissä olevan rajallisen tilan takia.

Kokonaiskustannusten sähkömönkijäkonversion komponenteille arviottiin olevan 6289 USD. Kun esimerkiksi Hondan TRX500 mönkijä 500 kuutioisella polttomoottorilla kustantaa valmistajan sivujen mukaan 10490 € (Honda 2018), on sähkömönkijäkonversion toteuttaminen riippuvainen runkoaihion hinnasta ja hankinnan vaikeudesta. Tässä esitetyn arvion mukaan työlle ja rungolle jäisi budjettiin noin 4000 euroa. Koska valmistajat eivät suoraan ilmoita sopivalle aihiolle hintaa, on vaikea arvioida toteuttamisen kokonaiskustannuksia.

Tässä työssä esitetyn pohjalta voidaan sanoa, että esitetty konversiosarja pystyisi vastaamaan polttomoottorimönkijän suorituskykyä suurilta osin. Suurin vaje jäisi sähkömönkijän käytösteeseen. Akkuteknologian kehittyessä sähköiset kulkuneuvot alkavat kuitenkin kilpailemaan yhä enemmän polttomoottorikäyttöisten vastineidensa kanssa. Hintansa puolesta konversion kannattavuus riippuu suuresti runkoaihion hankintakustannuksista.

Sähkömönkijällä on kuitenkin muita kilpailuvaltteja polttomoottorimönkijään nähden. Huoltovapaus, ekologisuus ja käyttökustannukset ovat vastaavasti sähkömönkijän puolella. Huoltotarve konversion jälkeen pienenee, kun verrataan polttomoottorimönkijään. Normaaleissa polttomoottorimönkijöissä on valmiiksi akku, joten tältä osin akuston vaihdossa akkuja on ainoastaan määrällisesti enemmän. Kaikilta muilta osin konversiomönkijässä on yhtä paljon tai vähemmän huollettavaa kuin polttomoottorimönkijässä.

Käyttökustannukset sähkömönkijän päivittäisessä käytössä koostuvat lähinnä latauskustannuksista. Myös mönkijän saasteettomuus sekä meluhaittojen puute ovat kuluttajiin vetoavia seikkoja.

8. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän työn tavoitteeksi asetettiin mönkijän sähköisen konversion komponenttien, sekä kustannusten arviointi. Lisäksi pyrittiin esittämään sähkömönkijältä vaadittuja ominaisuuksia kuluttajan, sekä lain kannalta.

Esitettyjen ongelmien ratkaisemiseen laadittiin simulaatiomalli, millä saatiin tietoa mönkijältä vaaditusta suorituskyvystä. Simuloimalla saadut suorituskykyä kuvaavat arvot vaikuttavat suurilta, kun niitä verrataan olemassa oleviin polttomoottorimönkijöistä saatuihin lukuihin. Tämä selittyy osittain simulaatiomalliin asetetuilla alkuarvoilla, kuten ajoneuvon massa, kiihtyvyys ja käytetyt ajosykliit. Mallissa käytettiin lukuja, joiden tiedettiin olevan mahdollisia polttomoottori ajoneuvolle, mutta kuitenkin haasteellisesti saavutettavissa. Tällä haluttiin osaltaan varmistaa, että konversiomönkijä pystyy vastaamaan sille asetettuja oletuksia.

Lisäksi lukuarvojen suuruuteen vaikuttaa mallin lineaarisuus. Käytetty malli on hyvin lineaarinen, vaikka vastaava tilanne tosielämässä on dynaaminen. Mallin avulla saatiin kuitenkin arvokasta tietoa vaaditusta suorituskyvystä, sekä sen avulla saatiin sidottua suorituskykyä kuvaavia numeroita tosielämän tilanteisiin.

Kuluttajan ja lain vaatimuksien pohjalta saatiin rajat mönkijän toteutukselle ja polttomoottorimönkijöiden hinnoista hintahaarukka konversion budjetille. Kun suorituskykylukuja sekä hinta-arviota verrattiin polttomoottorimönkijän vastaaviin lukuihin, päädyttiin tulokseen, että konversio on mahdollista toteuttaa, tietyin reunaehdoin.

Työssä vastattiin sille asetettuihin tutkimuskysymyksiin työn laajuuden huomioon ottaen mahdollisimman kokonaisvaltaisesti, sekä siinä pyrittiin avaamaan käytännön asettamia haasteita konversion toteuttamisessa. Työn lopputuloksena laadittiin kustannusarvio, joka esittää tämänhetkistä näkemystä konversion kustannuksista, sekä toteuttamisen kannattavuudesta. Monilta osin työ jäi pintaraapaisuksi siinä esitettyihin aiheisiin, mutta niiden kokonaisuutena saatiin vastattua esitettyihin kysymyksiin sekä laadittua konkreettinen arvio konversion toteutuksesta.

Jatkotutkimus- ja kehityskohteita voidaan nimetä useita tässä työssä, sillä jokaisesta esitetystä aiheesta olisi ollut mahdollista laatia laajuudeltaan vastaava oma tutkimuksensa. Erityisesti esille halutaan kuitenkin nostaa erilaisten moottoritopologioiden vertailu tämän aiheen kontekstissa, sekä käytetyn simulaatiomallin jatkokehitys. Usein kulkuneuvojen suorituskyky mitoitetaan jonkinlaisen nyrkkisäännön mukaan, jolloin optimoinnille jää usein varaa. Simulaatiomallilla pyrittiin ratkaisemaan tätä ongelmaa, siihen kuitenkin työn rajoissa täysin pystymättä.

LÄHTEET

ATV.com 2015. 2016 Polaris Ranger EV Li-ion Polaris Pursuit Camo Preview. [verkko-dokumentti]. [viitattu 7.12.2016]. <http://www.atv.com/blog/2015/08/2016-polaris-ranger-ev-li-ion-polaris-pursuit-camo-preview.html>

CALB 2012. CA100. Akun datalehti [viitattu 4.4.2018] Saatavissa <http://evwest.com/support/CALB-CA100Ah.pdf>

Curtis Instruments 2016. AC Induction Motor Controllers E-series. Moottorinohjaimen datalehti. [viitattu 29.3.2018] Saatavissa http://assets.curtisinstruments.com/Uploads/Datasheets/50265_123638E_RevC3.pdf

Electric Motorsport 2016 1. PMAC-G4827 HS 36/48V 275A Motor Drive System. Verkkokaupan sivu. [viitattu 6.4.2018] Saatavissa <https://www.electricmotorsport.com/ev-parts/motor-drive-kits/brush-less-pmac-motor-kits/pmac-g4827hs-36-48v-275a-motor-drive-system.html>

Electric Motorsport 2016 2. PMAC 12kW Cont. / 30kW Pk. Liquid Cooled Motor Drive System 48V 650A. Verkkokaupan sivu. [viitattu 6.4.2018] Saatavissa <https://www.electricmotorsport.com/ev-parts/motor-drive-kits/brush-less-pmac-motor-kits/pmac-12kw-30kw-liquid-cooled-motor-drive-system-48v-650a.html>

Electric Motorsport 2016 3. *Motors*. Verkkokaupan sivu. [viitattu 16.4.2018] Saatavissa <https://www.electricmotorsport.com/ev-parts/motors>

Electric Motorsport 2016 4. PMAC-G4845 48V 450A ATV/Golf Car/NEV Motor Drive system. Verkkokaupan sivu [viitattu 30.7.2018] Saatavissa <https://www.electricmotorsport.com/ev-parts/motor-drive-kits/brush-less-pmac-motor-kits/pmac-g4845-48v-450a-atv-golf-car-nev-motor-drive-system.html>

Electric Motorsport 2016 5. Cast Iron Gear Reducer 4:1, C-Face. Verkkokaupan sivu [viitattu 30.7.2018] Saatavissa <https://www.electricmotorsport.com/ev-parts/power-transmission/cast-iron-gear-reducer-4-1-c-face.html>

Euroglobe 2014. EG 100-12. Akun datalehti. [viitattu 29.3.2018] Saatavissa <http://www.bema.no/admin/common/getImg2.asp?Fileid=7217>

EV West 2018. CALB 100 Ah CA Series Lithium Ion Phosphate Battery. Verkkokaupan sivu. [viitattu 30.7.2018] Saatavissa http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?cPath=4&products_id=208&osCsid=ggrk0runk1b7ua6dg5uvgtqu72

Honda 2018. TRX500FPE T3 Traktori. Valmistajan verkkosivu [viitattu 31.7.2018] Saatavissa <https://www.hondamonkijat.fi/mallisto/trx500fpe-t3-traktori>

Hondapro 2017. 2017 Honda ATV Horsepower / Torque / MPG Comparison Review | Power-to-Weight Ratio Performance Numbers. Internetsivusto. [viitattu 31.7.2018] Saatavissa <http://www.hondaprokevin.com/2017-honda-atv-horsepower-rating-chart-utility-4x4-race-sport-quad-2x4-four-wheeler>

Jay W. Schultz and Steve Huard 2013. Comparing AC Induction with Permanent Magnet motors in hybrid vehicles and the impact on the value proposition. Parker Hannifin 2013. [viitattu 1.4.2018] Saatavissa <http://www.parkermotion.com/whitepages/Comparing-AC-and-PM-motors.pdf>

Karthigeyan V, Aswin M, Priyanka L, Dileep Sailesh K N, Palanisamy K 2017. A Comparative Study of Lithium Ion (LFP) to Lead Acid (VRLA) Battery for Use in Telecom Power System. International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC) 2017. [viitattu 29.3.2018]. Saatavissa <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.cc.lut.fi/document/8290462/>

Li Yong, Wang Lifang, Liao Chenglin, Wu Lingfei, Li Junfeng, Guo Yanjie 2014. Effects of Temperature on Dynamic Characteristics of Li-ion Batteries in Electric Vehicle Applications. ITEC Asia-Pacific 2014. [viitattu 1.4.2018] Saatavissa <http://ieeexplore.ieee.org/document/6940648/>

Liikenneturva 2015. Mönkijätyypit. [verkkodokumentti]. [viitattu 7.4.2015]. <https://www.liikenneturva.fi/fi/liikenteessa/muut-liikkujat/monkijat>

Liikenteen turvallisuusvirasto 2015. Ajoneuvoluokat. [verkkodokumentti]. [viitattu 7.4.2015]. <https://www.trafi.fi/tieliikenne/ajoneuvoluokat>

Metric Mind Corporation 2018. Frequently Asked Questions. [verkkodokumentti] [viitattu 2.4.2018] Saatavissa <http://www.metricmind.com/education/>

Polaris Industries 2016. Ranger EV. [verkkodokumentti]. [viitattu 6.12.2016]. <http://www.polaris.com/en-us/ranger-utv/ranger-ev-avalanche-gray>

Polaris 2018 1. 2018 Scrambler XP 1000 EPS. [verkkodokumentti]. [viitattu 19.8.2018]. <https://www.polaris.fi/monkijat/monkijat-2018/scrambler-xp/2018-scrambler-xp-1000-eps-eut>

Polaris 2018 2. 2016 Ranger EV esittely. [verkkodokumentti]. [viitattu 19.8.2018]. <https://www.polaris.fi/ranger/ranger-2016/traktori-ja-tieliikennemallit/2016-ranger-ev-4x4-eut>

Sevcon 2016. G48 series. AC Controllers for PMAC and Induction Motors. [verkkodokumentti]. [viitattu 13.12.2016]. <http://www.sevcon.com/products/low-voltage-controllers/gen4/>

Sharawane P. 2010. Indirect Field – Oriented Control of Induction Motor. [verkkodokumentti]. [viitattu 19.11.2018]. Saatavissa <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.cc.lut.fi/document/5598838>

Sreejit R. and K.Rr Rajagopal 2016. An Insight into Motor and Battery Selections for Three-Wheeler Electric Vehicle. [verkkodokumentti]. [viitattu 28.3.2018]. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7853494/>

Tekniikan Maaailma 2009. Keskiluokan mönkijät. [verkkodokumentti]. [viitattu 8.4.2015]. Saatavissa <http://tekniikanmaailma.fi/kaksipyoraiset/vertailut/tm-vertailu-keskiluokan-monkijat>

Tekniikan Maailma 19/2010. Ruista ranteisiin. Vertailussa isot maastomönkijät. [aikakausilehti]. [viitattu 30.7.2018] Saatavissa <https://tekniikanmaailma.fi/digilehti/?numero=19/2010>

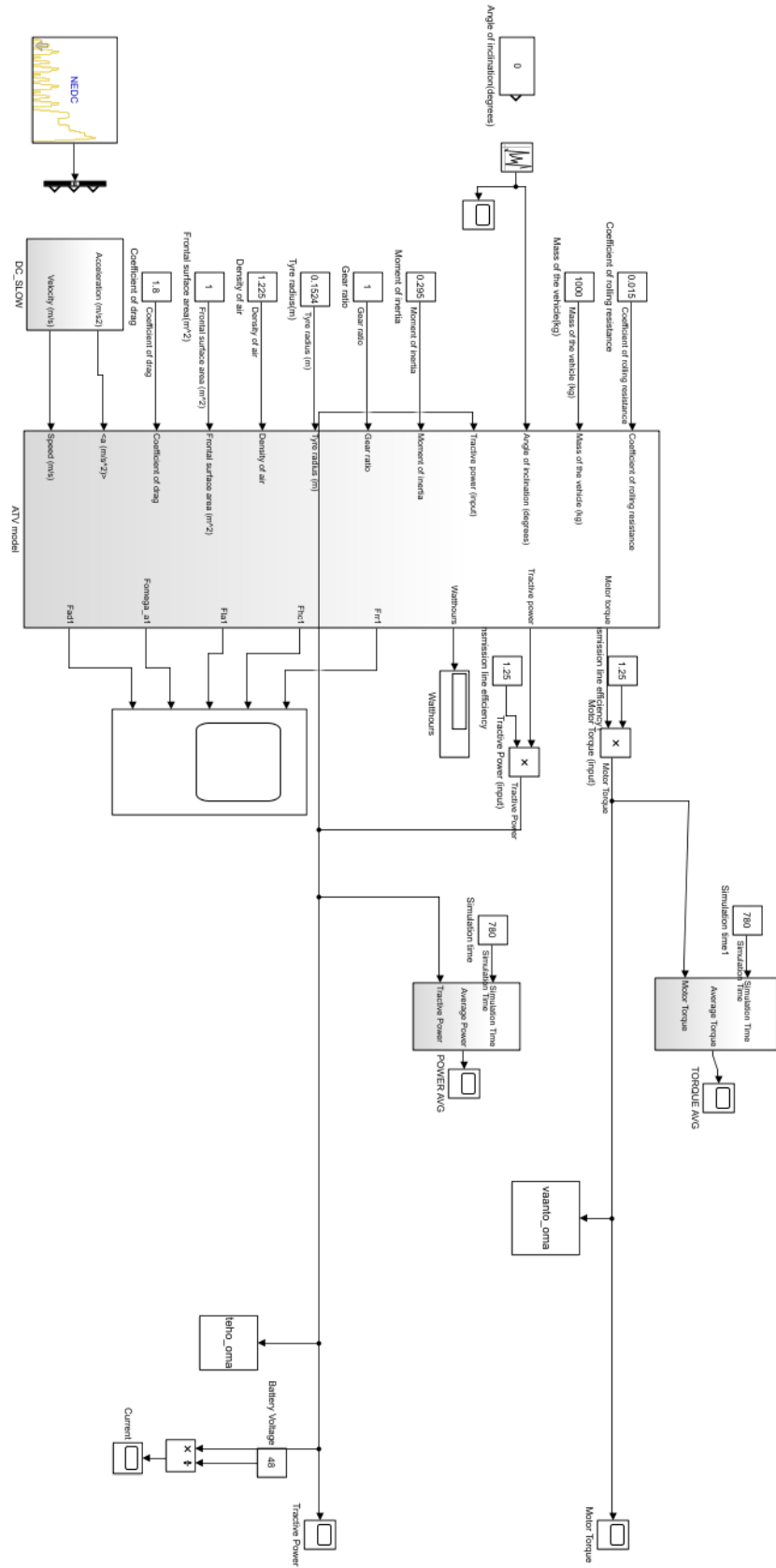
Tiede 2008. Sähköautossa kinkkisin on akku. [verkkodokumentti]. [viitattu 6.12.2016]. Saatavissa https://www.tiede.fi/artikkeli/jutut/artikkelit/sahkoautossa_kinkkisin_on_aku

Todd R. Bobak 2009. How Green is Your Gearbox. [verkkodokumentti]. [viitattu 29.3.2018] Saatavissa https://www.sumitomodrive.com/modules.php?name=Documents&op=viewlive&sp_id=45

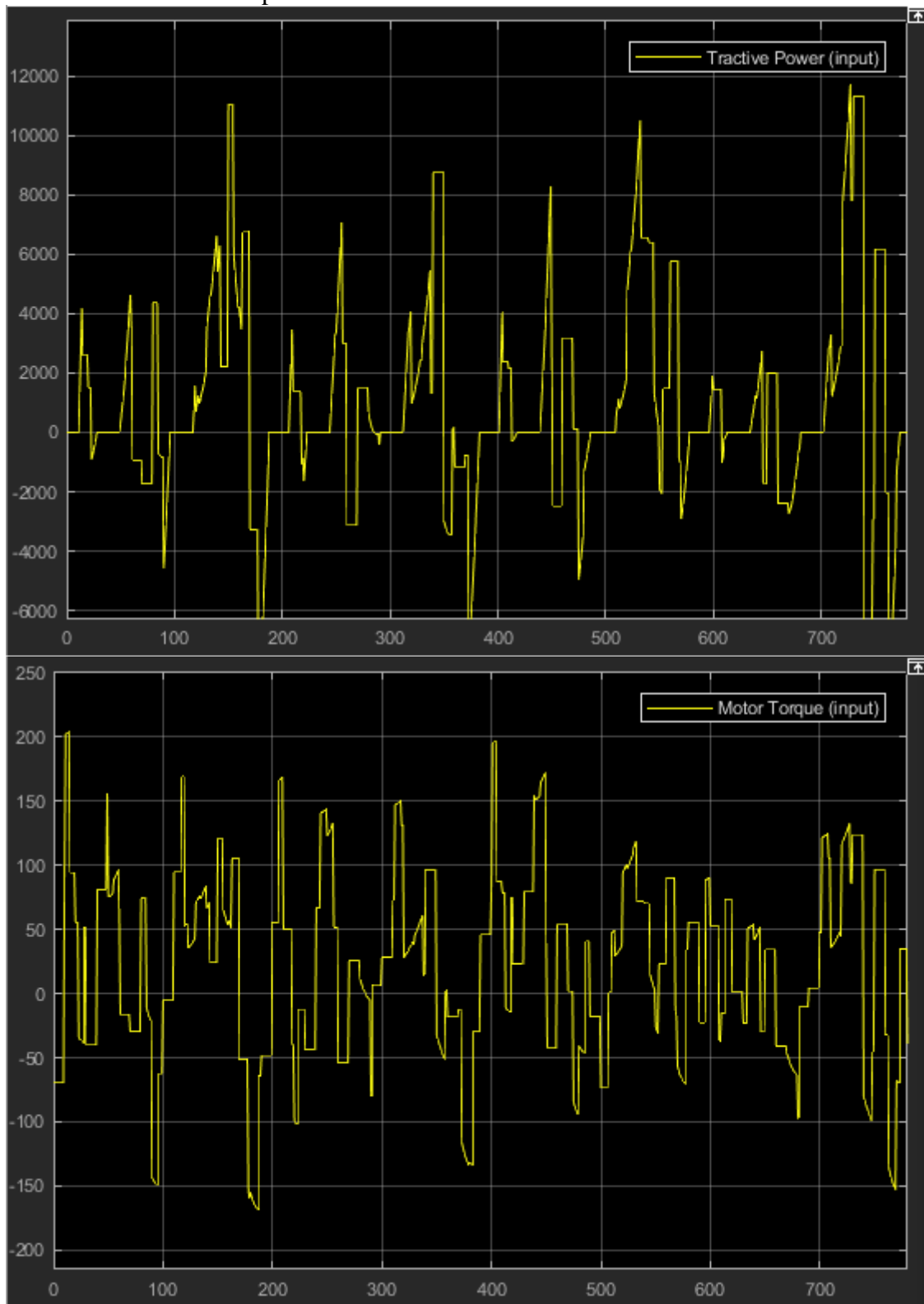
Zero Emission Vehicles Australia 2016. BMS16 Battery Management System For 12-16 cell lithium battery packs v1.2. Käyttöohje [viitattu 4.4.2018] Saatavissa <http://www.evworks.com.au/assets/brochures/BMS16v1-2.pdf>

LITTEET

Lite 1. Simulaatiomalli



Liite 2. Tieliikenne-testiprofilin simulaatiotulokset.



Liite 3. Hyötykäyttö-testiprofiilin tulokset

