



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
VASA YRKESHÖGSKOLA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Veli Juhani Koukkula

SÄHKÖMOPOAUTOPROJEKTIN SÄHKÖKÄYTÖN SUUNNITTELU JA TESTAUS

Tekniikka ja liikenne
2010

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty Vaasan ammattikorkeakoulun sähkötekniikan linjalle.

Haluan kiittää kaikkia projektissa mukana olleita osapuolia, joista yrityksistä ABB ja Vacon auttoivat mitoitukseen ja asennukseen liittyvissä ongelmissa sekä Technobothian työntekijöitä, jotka olivat mukana projektissa. Erityisesti haluan kiittää Kari Jokista, joka antoi mahdollisuuden tähän mielenkiintoiseen projektiin ja auttoi opinnäytetyön ohjauksessa.

Vaasa 9.6.2010

Veli Koukkula

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkötekniikan koulutusohjelma

TIIVISTELMÄ

| | |
|--------------------|---|
| Tekijä | Veli Koukkula |
| Opinnäytetyön nimi | Sähkömopoautoprojektin sähkökäytön suunnittelu ja testaus |
| Vuosi | 2010 |
| Kieli | suomi |
| Sivumäärä | 50 + 7 liitettä |
| Ohjaaja | Kari Jokinen |

Tässä työssä suunnitellaan Vaasan ammattikorkeakoululle rakennettavaan sähkömopopautoon sähkökäyttö. Sähkökäytön suunnitteluun sisältyy sähkömoottorin, moottorinohjaimen sekä akuston mitoitus ja testaus. Työssä on myös vertailtu eri valmistajien komponentteja sähköajoneuvokäytössä sekä vertailtu projektiin valittua sähkökäyttöä dieselmoottorikäyttöiseen mopopautoon.

Työn tarkoitus on saada toimiva sähkömopopauto opetus- ja tutkimuskäyttöön. Sähköautot ovat selvästi yleistyneet ja niillä on mahdollisuus jopa osaltaan korvata nykyinen polttomoottoriautokanta. Tämän projektin avulla saadaan Vaasan ammattikorkeakoululle mahdollisuus lisätä sähköajoneuvoihin liittyvää opetusta sekä olla mukana sähköajoneuvojen tutkimuksessa. Sähkömopopauton komponenteina on pyritty käyttämään mahdollisimman paljon jo opinnoista tutuiksi tulleita laitteita.

Mathcadin avulla on laskettu sähkömopopauton teoreettinen käyttäytyminen eri nopeuksilla sekä tehty momenttikäyrät moottorin momentista ja ajotilanteessa vaikuttavista vastamomenteista. Laskennallisilla arvoilla on pyritty simuloimaan sähkömopopauton käyttäytymistä ja selvittämään valitun sähkökäytön toiminnallisuus sekä oikean välityssuhteen valitsemista.

| | |
|-----------|--|
| Asiasanat | sähköajoneuvo, mopopauto, taajuusmuuttaja, oikosulkumoottori |
|-----------|--|

VAASA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Sähkötekniikan koulutusohjelma

ABSTRACT

| | |
|--------------------|--|
| Author | Veli Koukkula |
| Title | Electric Drive for an Electric Quadricycle |
| Year | 2010 |
| Language | Finnish |
| Pages | 50 + 7 Appendices |
| Name of Supervisor | Kari Jokinen |

The purpose of this thesis is to design an electric drive for an electric quadricycle, which is being built for Vaasa University of Applied Sciences. The design includes the testing and sizing of an electric motor, motor controller and battery pack. This thesis also includes a comparison of electric motor and motor controller packet in an electric vehicle usage and a comparison of the chosen electric drive for a diesel-driven light quadricycle.

The purpose of the thesis was to be able to use a functional electric quadricycle for a teaching and research purposes. Electric vehicles are clearly grown in number and they have possibility to even replace current combustion engine car. This project gives a possibility to increase teaching concerning electric vehicles and to be part of research of electric vehicles. The objective was to use as many devices as possible as components of electric quadricycle which have become familiar already during the studies.

The theoretical behaviour of electric quadricycle was calculated with MathCAD and torque curves were made to simulate electric motor and real drive situation. The calculated results are used to confirm the function of the chosen electric drive and to choose correct transmission ratio for an electric quadricycle.

| | |
|----------|---|
| Keywords | Electric Vehicle, Light Quadricycle, Frequency Converter, Squirrel Cage Motor |
|----------|---|

TEKSTISSÄ KÄYTETYT LYHENTEET

| | |
|---------------------|--|
| BMS | Battery Management System (Akunhallintajärjestelmä) |
| BMBU6 | FEVT:n valmistamaan akunhallintajärjestelmään kuuluva balansointiyksikkö |
| DoD | Depth of Discharge (Akun purkaussyvyys prosentteina) |
| FEVT | Finnish Electric Vehicle Technologies |
| LiCoO ₂ | Lithium Cobalt Oxide (Litiumkobolttioksidi) |
| LiFePO ₄ | Lithium Iron Phosphate (Litiumrautafosfaatti) |
| Li-ion | Litium-ioni-akku |

SISÄLLYS

| | |
|--|----|
| ALKUSANAT | 2 |
| TIIVISTELMÄ | 3 |
| ABSTRACT | 4 |
| TEKSTISSÄ KÄYTETYT LYHENTEET | 5 |
| 1 JOHDANTO | 8 |
| 2 SÄHKÖKÄYTTÖJEN VALINTAAN LIITTYVÄT OSAPUOLET..... | 10 |
| 2.1 ABB Oy..... | 10 |
| 2.2 Vacon Oyj | 10 |
| 2.3 European Batteries Oy | 11 |
| 3 PROJEKTIAIHIO | 12 |
| 3.1 Projektiaihion valinta | 12 |
| 3.2 Mopoautolle tehtävät muutokset..... | 12 |
| 3.2.1 Poistettavat osat..... | 12 |
| 3.2.2 Lisättävät osat | 13 |
| 3.2.3 Sähkömoottorin ja dieselmoottorin vertailu..... | 13 |
| 4 PROJEKTIN JAKO ERI OSIIN | 15 |
| 4.1 Sähkökäytön mitoitus, testaus ja suunnittelu | 15 |
| 4.2 Ohjaus- ja hallintajärjestelmä..... | 15 |
| 4.3 Mekaniikkasuunnittelu..... | 15 |
| 5 SÄHKÖKÄYTTÖJEN VALINTA MOPOAUTOON | 16 |
| 5.1 Sähkökäytöt yleisesti..... | 16 |
| 5.2 Moottorin valinta..... | 18 |
| 5.3 Moottoriohjaimen valinta..... | 21 |
| 5.4 Akuston valinta | 23 |
| 5.4.1 Yleisesti sähköajoneuvojen akuista | 23 |
| 5.4.2 Akkukkenno 26650EV..... | 26 |
| 5.4.3 Akunhallintajärjestelmä | 28 |
| 5.4.4 Litium-akun lataaminen | 29 |
| 6 SUORITUSKYKYLASKELMAT | 31 |
| 6.1 Vastustavien voimien laskeminen..... | 32 |

| | |
|--|----|
| 6.2 Kiihdytyslaskelmat..... | 35 |
| 7 MITTAUKSET | 38 |
| 7.1 Moottorin ja taajuusmuuttajan toiminta penkissä | 38 |
| 7.1.1 Hyötysuhdemittaukset..... | 38 |
| 7.1.2 Lämpötilamittaukset..... | 40 |
| 7.2 Tehokäyttömittaukset..... | 42 |
| 8 KOKOONPANO | 44 |
| 8.1 Sähkökäyttöjen asennus autoon | 44 |
| 8.2 Akkukotelon suunnittelu sähkökäytön kannalta | 45 |
| 8.3 Sähkökäytön suunnittelussa huomioonotetut standardit | 46 |
| 9 YHTEENVETO | 47 |
| LÄHDELUETTELO..... | 48 |
| LIITTEET | |

LIITELUETTELO

LIITE 1 Vacon FR5- layout

LIITE 2 Akkujen vertailua

LIITE 3 Mittauspöytäkirja

LIITE 4 Välityssuhdevertailu

LIITE 5 K2 Energy:n akkukenno LFP26650EV

LIITE 6 Balansointiyksiköiden layout

LIITE 7 Matchcad-laskut

1 JOHDANTO

Tarkoituksena on aloittaa sähkömopoautoprojekti hankkimalla ja testaamalla siihen tarvittavat sähkökäytön osat. Sähkömopoauto tulee Vaasan ammattikorkeakoululle pitkäaikaiseen opetuskäyttöön ja siihen on tarkoitus tehdä kehitystyötä useita vuosia. Sähkömopoauton suunnittelu tehdään alusta asti huomioiden, että sitä on mahdollista ajaa laillisesti liikenteessä.

Työ tehdään sähkötekniikan ja konetekniikan osastojen kanssa yhteistyönä, jolloin sähköpuoli vastaa sähkökäyttöjen mitoituksista, hankinnasta ja ohjauksesta. Konepuoli vastaa mopoauton purkamisesta, mallinnuksesta ja sähkökäyttöjen asennuksesta. Sähkömopoauton ohjausjärjestelmä perustuu alustavasti ohjelmoitavan logiikan käyttöön ohjauksen toteutuksessa, jotta siitä saadaan helposti muokattavissa oleva järjestelmä. Ohjelmoitavan logiikan käyttö ohjausjärjestelmänä antaa mahdollisuudet huomattavaan muokattavuuteen sekä helpottaa mittaustietojen talteenottamista. Myöhemmin on tarkoitus saada myös tietotekniikka mukaan ohjausjärjestelmän tekemiseen sekä ympäristötekniikka mukaan tekemään tutkimusta sähköisen kulkuneuvon ympäristövaikutuksista.

Tämän opinnäytetyön aiheena on sähkökäyttöjen mitoittaminen, testaaminen ja yleisen sähkösuunnitelman tekeminen kyseiseen sähkömopoautoon. Työtä varten saatiin ABB:ltä oikosulkumoottori ja Vaconilta taajuusmuuttaja. Akkuina käytetään European Batteries:n kokoamaa akustoa. Toinen sähköpuolen opinnäytetyö tehdään sähkömopoauton ohjausjärjestelmästä, jossa pääkohtana on Siemensin logiikan käyttö ohjausjärjestelmän älynä.

Suomessa on yritystasolla herätty sähköajoneuvojen lisääntymiseen. European Batteries aloittaa vuonna 2010 valmistamaan Varkaudessa sähköajoneuvo-käyttöön litiumakustoja /12/, sekä porvoolainen sähkökalusteita valmistava perheyritys Ensto on valmistanut yksinomaan sähköautojen lataukseen tarkoitettun lataustolpan /9/. Valmet Automotiven Uudenkaupungin autotehdas valmistaa Think-täyssähköautoja ja Fisker Karma-hybridiautoja /26/. Tässä oli vain muutamia mainintoja Suomen valmistautumisesta sähköautojen tulemiseen.

Nykyinen ajoneuvotekniikka perustuu polttomoottoritekniikkaan, jolle on viimeaikoina haettu korvaavia tekniikoita öljyvarastojen ehtymisen ja ilmastonmuutoksen takia. Kuluttajan kannalta ajoneuvotekniikan valitsemiseen vaikuttaa ajoneuvon, sekä sen liikuttamiseen tarvittavan energian hinta ja tietenkin myös ajoneuvotekniikan saatavuus. Polttomoottoriajoneuvojen hinta on muotoutunut massavalmistuksen myötä kuluttajalle edulliseksi ja polttoainetta on ollut helposti saatavilla. Sähköajoneuvot eivät ole vielä yleistyneet vaikka niillä on suurta potentiaalia haastamaan polttomoottorikäyttöiset ajoneuvot, varsinkin taajama-alueella jossa nopeudet ovat alhaisia ja ajomatkat lyhyitä. Sähkömoottorilla ja akuilla varustettu ajoneuvo on kuitenkin ehdottomasti yksi vaihtoehto tulevaisuuden ajoneuvotekniikaksi. Tässä työssä pyritään vertailemaan polttomoottoriajoneuvon ja sähköajoneuvon ominaisuuksia kevytjoneuvo-käytössä.

2 SÄHKÖKÄYTTÖJEN VALINTAAN LIITTYVÄT OSAPUOLET

2.1 ABB Oy

ABB valmisti projektikäyttöön oikosulkumoottorin ja oli apuna moottorin toiminnan rajojen selvittämisessä. ABB on ollut mukana myös muissa sähköajoneuvokonversioissa, joten innostus projektiin oli sieltä päin suurta /2/.

ABB on johtava sähkövoima- ja automaatiotuotteiden valmistaja ja se toimii yli 100:ssa eri maassa. Se on muodostettu vuonna 1988 sulauttamalla yhteen ruotsalainen Asea ja sveitsiläinen Brown Boveri. Suomessa ABB:n osaaminen on peräisin jo vuonna 1889 perustetun Strömberg yhtiön osaamisesta. Suomen suurimmat toimitilat sijaitsevat Helsingin pitäjänmaällä ja Vaasan Strömberg Parkissa, mutta pieniä toimitiloja sijaitsee ympäri Suomea. ABB:n ydinliiketoiminta on jakautunut viiteen eri divisioonaan, joihin kuuluu sähkövoimatuotteet, sähkövoimajärjestelmät, sähkökäytöt ja kappaletavara-automaatio, pienjännitetuotteet sekä prosessiautomaatio. Sähkökäytöt ja kappaletavara-automaatioidivisioonan alla oleva ABB Oy Motors valmistaa ja myy laadukkaita ja korkean hyötysuhteen omaavia pienjännitemoottoreita ja generaattoreita kaikenlaisiin sovelluksiin. Standardimoottoreiden ja generaattoreiden lisäksi ABB Motors valmistaa koneita erikoiskäyttöön, kuten tuulivoimasovelluksiin generaattoreita ja räjähdysvaarallisiin tiloihin moottoreita. /1/

2.2 Vacon Oyj

Vacon valmisti projektikäyttöön taajuusmuuttajan ja oli apuna neuvomassa sen kytkentätavasta sähkömopoautoon.

Vacon on vuonna 1993 perustettu yritys, joka valmistaa ja myy ainoastaan taajuusmuuttajia. Taajuusmuuttajia käytetään sähkömoottorin ohjauksessa ja uusiutuvan energian tuotannossa. Yhtenä suurena kasvualana voidaan pitää taajuusmuuttajien käyttöä tuulivoimaloissa. Vaconin yksi menestystekijä on sen vahva panostus tutkimukseen ja tuotekehitykseen. Tuotekehitys- ja

tuotantoyksiköitä on Suomessa, Yhdysvalloissa, Kiinassa ja Italiassa. Vacon toimittaa myös oman tuotemerkinsä lisäksi OEM- ja brand label -asiakkaiden tuotemerkeillä. Myyntitoimistoja Vaconilla on 27 eri maassa. /25/

2.3 European Batteries Oy

European Batteries kehittää ja valmistaa litium-ioni -akkuteknologiaan perustuvia ladattavia akkukennoja ja akkukokonaisuuksia. European Batteries on ollut mukana kehittämässä litium-ioni -akkutekniikan hallintajärjestelmiä jo vuodesta 2003, jolloin Finnish Electric Vehicle Technologies (FEVT) perustettiin. Vuodesta 2007 lähtien yritys on toiminut yhdessä Amerikkalaisen K2 Energy:n kanssa parantaakseen akkukennon tekniikkaa. Vuonna 2009 FEVT ja European Batteries yhdistyivät European Batteries brändin alle sekä rakennuttivat Varkauteen litiumakkutehtaan. Litium-ioni-akkujen valmistus Varkauden tehtaassa alkaa vähitellen 2010 vuodesta lähtien. Ennen omaa valmistusta European Batteries valmistaa akustokokonaisuuksia käyttäen K2 Energy:n akkukennoja ja FEVT:n hallintajärjestelmää. /10/, /11/

3 PROJEKTIAIHIO

3.1 Projektiaihion valinta

Sähköauton rungoksi valittiin mopoauto. Sähkökäyttöjen valinta helpottui, kun moottorin teholle oli olemassa lakisääteiset rajat. Mopoauto kuuluu luokkaan kevyt nelipyörä (L6e) ja sen moottorin suurin nettoteho saa olla enintään 4 kW /17/.

Mopoautoksi valittiin Microcar M.Go. Tekniikan Maailma-lehden testien mukaan Microcar M.Go osottautui teknisesti hyväksi ajoneuvoksi /18/. Valinnassa haettiin tukevaa mopoautoa, koska akkujen takia mopoauton paino nousee. Mopoauton mekaanisen voimansiirron tulisi myös olla kestävä, koska sähkömoottorilla saadaan moninkertainen momentti aikaan verrattuna dieselmoottoriin. Yksi valintaan vaikuttavista syistä oli myös se, että Vaasassa sijaitsee yksi Microcarin jälleenmyyjistä.

3.2 Mopoautolle tehtävät muutokset

3.2.1 Poistettavat osat

Mopoautosta otetaan pois osat, joita ei sähkökäyttöisessä mopoautossa tarvita ja asennetaan tilalle sähkökäytön tarvitsemat komponentit.

Dieselmoottorikäyttöinen mopoauto tarvitsee vaihteiston ajamiseen, joka tässä tapauksessa oli variaattori. Variaattori muuttaa automaattisesti välityssuhdetta siten, että moottorin kierrosnopeus pyrkii pysymään samana vaikka auton nopeus muuttuu. Täten saadaan polttomoottori toimimaan mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella ja polttomoottorin maksimimomentti käyttöön laajalla alueella. Variaattorin hyötysuhde on kuitenkin melko huono.

Muutoksessa otetaan dieselmoottori ja variaattori pois käytöstä ja käytetään hammashihnalla toteutettua kiinteää välityssuhdetta. Taajuusohjatulla oikosulkumoottorilla saadaan hyvä hyötysuhde melkein koko kierrosalueen läpi ja

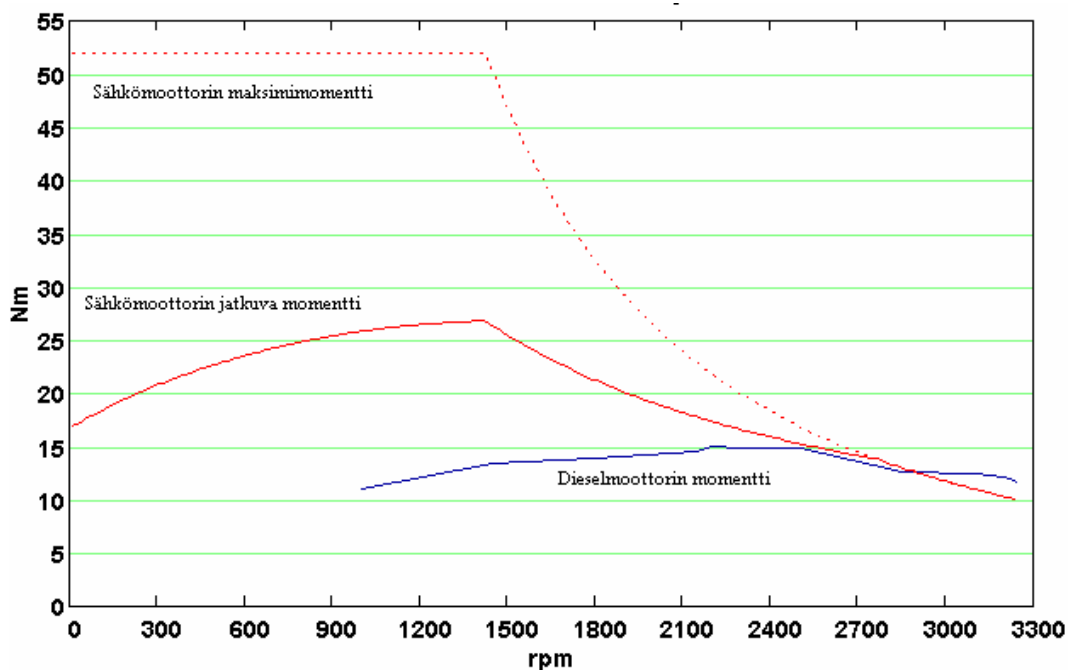
täysi momentti aina nimellinopeuteen asti. Projektikäytössä olevan sähkömoottorin hyötysuhde on mitattu kappaleessa 7.1.1 Hyötysuhdemittaukset.

3.2.2 Lisättävät osat

Mopoautoon lisätään sähkömoottori, taajuusmuuttaja, akusto sekä koko käyttöä ohjaamaan ohjelmoitava logiikka. Sisätiloihin asennetaan parametrien muuttamisen ja tilatietojen seuraamisen helpottamiseksi kosketuspaneeli.

3.2.3 Sähkömoottorin ja dieselmoottorin vertailu

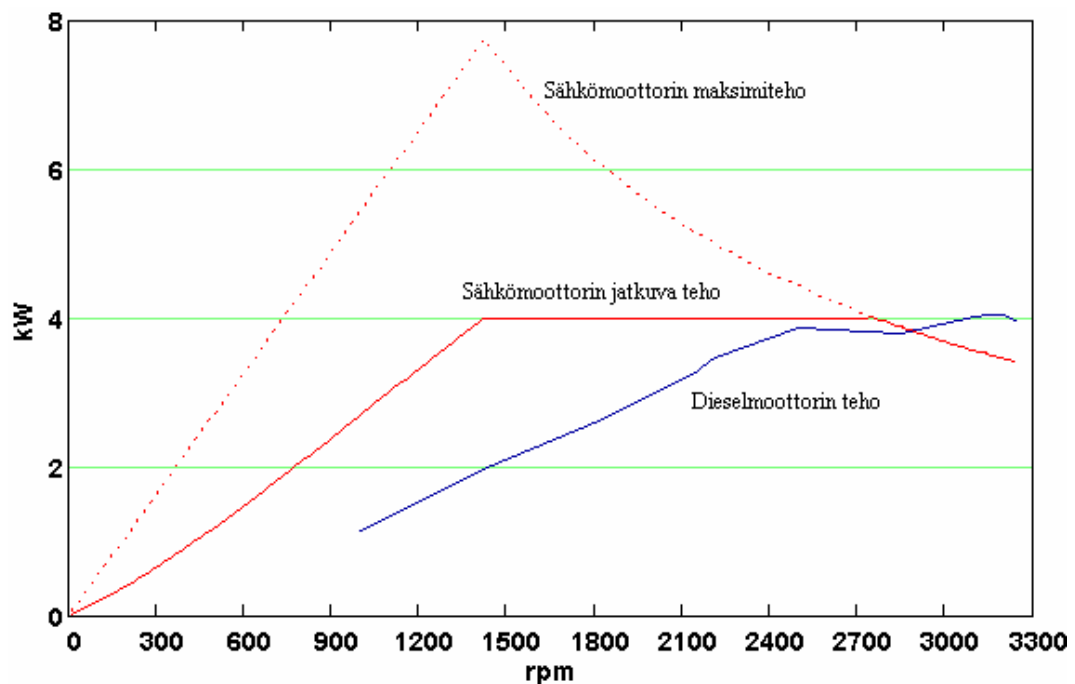
Sähkömoottorina vertailussa käytetään mopoautoon asennettavaa ABB:n 4 kW 1500 rpm oikosulkumoottoria taajuusohjattuna. Sähkömoottorin ominaisuuksia vertaillaan jatkuvan kuormituksen sekä maksimimomentin aiheuttamalla rajoituksella. Kyseisen sähkömoottorin valinta perustellaan tarkemmin kappaleessa 5.2 Moottorin valinta. Toinen vertailussa käytetyistä moottoreista on mopoautoista pois otettu YANMARin valmistama 523 kuutioinen dieselmoottori, jonka huipputeho on rajoitettu 4 kW:iin eli mopoautiluokkaan sopivaksi.



Kuva 1. Sähkömoottorin ja dieselmoottorin momenttien vertailu.

Kuvassa 1 verrataan sähkömoottorin ja dieselmoottorin momenttia toisiinsa. Dieselmoottorin momentti on pienillä kierroksilla niin mitätön, ettei sillä saa

mopoautoa liikkeelle ilman vaihteistoa. Polttomoottoreiden momenttikäyrissä ei edes esitetä momenttia pienillä kierroksilla, koska sitä ei kiihdyttämisessä käytetä. Variaattorivaihteiston vaikutusta ei ole huomioitu momenttikäyrässä, mutta sen avulla moottorin akselin pyörimisliike siirretään renkaille vasta kun moottorin kierrosnopeus on kasvanut tarpeeksi tarvittavan momentin saavuttaakseen. Oikosulkumoottorilla saadaan taajuusohjattuna liikkeelle lähtemiseen tarvittava momentti jo pienillä kierroksilla, joten erillistä vaihteistoa ei tarvita.



Kuva 2. Sähkömoottorin ja dieselmootorin tehojen vertailu.

Kuvassa 2 on esitetty sähkömoottorin ja dieselmootorin tehokäyrät. Tehokäyriin ei oteta sen tarkemmin kantaa vaan tärkeämpää on selvittää moottoreiden eri tapaa esittää teho, koska mopoauton moottorin koko määritellään tehon mukaan. Polttomoottoreissa teholla viitataan sen antamaan maksimitehoon. Sähkömoottoreissa teholla viitataan moottorin antamaan suurimpaan tehoon, minkä se pystyy antamaan lämpeämättä liikaa. Sähkömoottorin maksimitehon määrittelee moottorin kippimomentti, eli maksimimomentti. Tässä projektissa oletetaan, että laillisesti riittävä tehon määrittäminen tarkoittaa oikosulkumoottorin kilvessä esitettyä tehoa eli nimellistehoa, joka on 4 kW.

4 PROJEKTIN JAKO ERI OSIIN

4.1 Sähkökäytön mitoitus, testaus ja suunnittelu

Auton sähkökäyttöön sisältyy karkeasti ottaen moottori, moottorinohjain, akusto sekä akkuvaraaja. Tämän opinnäytetyön sisältöön kuuluu sähkökäytön suunnittelutyö.

4.2 Ohjaus- ja hallintajärjestelmä

Toinen sähköosaston opinnäytetyö tehdään sähkömopoauton ohjaus- ja hallintajärjestelmästä, joka perustuu siemensin S7-300 logiikkaan. Logiikka on teollisuuskäyttöön tarkoitettu CPU315-2PN/DP ja sillä ohjataan auton toimintoja sekä tarkkaillaan tilatietoja. Käyttöön saatu taajuusmuuttaja toimisi itsessäänkin pelkästään potentiometrin avulla momenttiohjeella ajettuna, mutta logiikalla saadaan tehtyä momenttiohjeelle helposti ajomukavuuteen vaikuttavia asioita, kuten muutettavissa oleva kaasupolkimen viive sekä nopeuden mukaan muuttuva momentin rajoitus. Suurin hyöty logiikan käytössä on kuitenkin sen helppo muokattavuus sekä ohjaaminen kosketuspaneelin kautta, jolloin paneelista saadaan helposti muutettua joko suoraan taajuusmuuttajan parametrejä tai logiikan ohjausarvoja. Käytettävissä oleva logiikka on sama kuin mitä on käytetty opiskelussa. Akuston älynä toimii erillinen akunhallintajärjestelmä, jota logiikalla tarkkaillaan.

4.3 Mekaniikkasuunnittelu

Konepuolen osuus sähkömopoauton rakentamiseen lähti liikkeelle mopoauton purkamisesta, jossa otettiin tarpeettomat osat pois, kuten dieselmoottori, variaattorivaihteisto ja polttoainetankki. Konepuolen projektiryhmä mallinsi mopoauton moottoritulasta ja siihen tulevasta sähkömoottorista 3d-kuvat. Konepuolen päättötyön tekijälle jäi tehtäväksi suunnitella moottorin kannatinteline. Konepuolen tarkoitus on myös tehdä sähkömopoauton rakenteelliset muutokset, kuten moottorin kannatinteline, akuston kotelot ja hammashihnavoimansiirto.

5 SÄHKÖKÄYTTÖJEN VALINTA MOPOAUTOON

5.1 Sähkökäytöt yleisesti

Tässä selvitetään karkeasti kevytsähköajoneuvokäyttöön soveltuvia sähkömoottoreita ja moottorinohjaimia. Kevytajoneuvokäyttöön sopivia moottoreita löytyy niin tasavirtamoottoreista kuin vaihtovirtamoottoreista.

Sähkömoottorit erotellaan pääsääntöisesti tasavirtamoottoreihin ja vaihtovirtamoottoreihin. Sähkömoottorin peruseriaate on lähes aina sama riippumatta onko se tasa- vai vaihtovirtamoottori. Aiheutetaan muuttuva magneettikenttä, joka pyörittää mekaanista akselia. Moottorit erotellaan ohjaustavan mukaan, eli syötetäänkö moottorille tasa- vai vaihtovirtaa.

Kestomagneettimoottori on yhä enemmän yleistynyt moottorikäytöissä. Kestomagneettimoottoria ei sinänsä voi jaotella omaan luokkaansa, koska se voidaan rakentaa joko tasavirta- tai vaihtovirtamoottoriksi. Kestomagneettimoottorilla tarkoitetaan moottoria, jossa osa magneettikentästä tuotetaan kestopagneeteilla. Tällä tekniikalla on mahdollista rakentaa pienempiä ja hyötysuhteeseen nähden parempia moottoreita. Moottori voidaan rakentaa esimerkiksi siten, että se on osana auton rengasta ja kestopagneetit sijaitsevat renkaan pyörivässä osassa. Haittana on kestopagneettien huono lämpötilan kesto, maksiminopeuden rajoitus ja kalliimpi valmistushinta.

Tasavirtamoottorit ovat melko kalliita niiden monimutkaisen rakenteen takia, mutta niiden ohjaus on helppo toteuttaa, joten tasavirtakäytön kokonaishinta on yleensä muita vaihtoehtoja halvempi. Tasavirtamoottorit voidaan jakaa harjallisiin ja harjattomiin moottoreihin. Harjallisten moottoreiden kommutaattorin toteutus rajoittaa pyörimisnopeutta ja kestoikää. Harjattomien moottoreiden periaate on sama kuin harjallisilla, mutta kommutaattori on korvattu elektroniikalla. Tasavirtakäyttö sähköautokonversioissa on melko yleistä sen hinnan ja yksinkertaisen ohjauksen takia.

Kuvan 3 harjallinen kestopagneettimoottori on suunniteltu 24 - 72 Voltin tasajännitteelle. 72 voltin jännitteellä nimellisteho on 7,2 kW ja nimellisa nopeus 3480 rpm. Hyötysuhteeksi kyseiselle moottorille annetaan 88,6 %.



Kuva 3. Kevyeen sähköajoneuvoon soveltuva tasavirtamoottori ja sen ohjain. /8/

Vaihtovirtamoottoreihin kuuluva oikosulkumoottori on yleisesti teollisuudessa käytössä oleva moottorityyppi. Se on kestävä, yksinkertainen ja suhteellisen halpa. Oikosulkumoottorin ohjaus voidaan parhaiten toteuttaa invertterillä, joka kuitenkin kasvattaa käytön hintaa. Oikosulkumoottoreilla saadaan aikaan suuri pyörimisa nopeus sekä 2 - 3 kertainen momentti nimellismomenttiin verrattuna jo pienillä kierroksilla.

Kuvan 4 oikosulkumoottorin ohjaus on suunniteltu 36 - 48 Voltin tasajännitteelle. Moottorinohjain muuttaa tasajännitteen 3-vaihe vaihtojännitteeksi. Moottorin nimellistehoksi annetaan 6,7 kW ja nimellisa nopeudeksi noin 1000 rpm. Maksimisa nopeudeksi saadaan jopa 6000 rpm. Hyötysuhteeksi kyseiselle moottorille annetaan 89 %. Näin pienelle jännitteelle harvoin tehdään vaihtovirtamoottoria, koska moottorin ohjaus on melko vaikea toteuttaa.



Kuva 4. Kevyeen sähköajoneuvokäyttöön soveltuva oikosulkumoottori ja sen ohjain. /7/

5.2 Moottorin valinta

Tähän projektiin valittiin moottoriksi ABB:n 4 kW 1500 rpm oikosulkumoottori. Moottorin valinnassa tuli ottaa huomioon nimellisjännite, joka vaikuttaisi koko sähköjärjestelmän jännitteeseen ja erityisesti akkujen määrään. Suuri jännite vaatii suurta määrää akkuja sarjassa ja vaativaa akkujenhallintajärjestelmää. Projektissa päädyttiin 230/400 oikosulkumoottoriin, joka kytketään kolmioon, jotta saataisiin pääjännitteeksi 230 voltia. Jännite ei ole ideaalinen näin pienelle tehelle sähköajoneuvossa, koska tarvittava tasajännite kasvaa suureksi. Akunhallintajärjestelmä helpompi ja halvempi toteuttaa pienelle jännitteelle. Kokonaiskäytön kannalta suuri jännite on kuitenkin ehdottomasti järkevämpi, koska silloin virrat ja niiden kautta häviöt pysyvät pieninä. Kyseisellä 230 V:n vaihtojännitteellä saatiin käytettäväksi jo opinnoista tutuiksi tulleet moottori ja moottorinohjain. Jotta saataisiin moottorille tarvittava vaihtojännite, niin akuilta saatava tasajännite tulee olla 1.35 kertaa suurempi /3/. Tämä johtuu invertterin kuusipulssisillan ominaisuudesta, kun tasajännite muutetaan 3-vaihe vaihtojännitteeksi.



Kuva 5. ABB:n 4 kW 1500 rpm oikosulkumoottori.

Toinen moottorin valintaan vaikuttava asia oli moottorin pyörimisnopeus. Moottorivaihtoehtoina olivat 4-napainen 1500 rpm moottori ja 2-napainen 3000 rpm moottori. Moottorit olivat mitoiltaan samanlaisia, mutta 3000 rpm oli pari kiloa kevyempi. Lopullinen valinta tehtiin kuitenkin sen mukaan, että moottoria ajettaisiin kentänheikennysalueella. Valitsemalla kuvassa 5 näkyvä 1500 rpm moottori saadaan enemmän vapautta pyörittää moottoria yli nimellisoikeuden ja alkukiihdytykseen jää käytettäväksi enemmän momenttia. Moottorin pyörimisnopeudella ei käytön kannalta ole suurtakaan merkitystä, koska hammashihnan sopivalla välityssuhteella muutetaan moottorinpyörimisnopeus halutuksi auton nopeudeksi. Kummassakin moottorissa maksiminopeus on 4500 rpm, joten pienempinopeuksista moottoria voidaan haluttaessa ajaa pidemmälle kentänheikennykseen. Kentänheikennyksellä tarkoitetaan moottorin ajamista yli nimellisoikeuden, silloin moottorin pyörimisnopeutta ohjataan vain taajuutta ohjaamalla ja jännite pysyy vakiona.

Sopiva välityssuhde valitaan laskettujen teoreettisten arvojen avulla kappaleessa 6 Suorituskykylaskelmat. Välityssuhteen laskemisessa on käytetty apuna moottorin maksiminopeutta, kiihdytykseen jäävää ylimääräistä momenttia sekä moottorin hyötysuhdetta.

Ulkomailta olisi ollut ostettavissa sähköajoneuvoihin hyvin soveltuvia moottoreita pienemmällä jännitteellä (kuten edellisessä kappaleessa käytiin läpi). Pienemmän jännitteen etu olisi tässä tapauksessa ollut yksinkertaisempi akunhallinta-järjestelmä ja sitä kautta akuston alhaisempi hinta ja parempi saatavuus. Moottorin tilaaminen ulkomailta ei kuitenkaan ollut mielekäästä, kun ABB valmistaa samassa kaupungissa laadukkaita sähkömoottoreita ja projektiin oli mahdollisuus saada sitä kautta moottori.

Ilmajäähdytyksen takia käytössä olevan sähkömoottorin jatkuvan momentin raja on hieman pienempi alhaisilla kierrosnopeuksilla (Kuva 1). Tuuletin on suoraan kiinni akselissa, joten pienemmällä kierrosnopeudella myös tuuletin pyörii hitaammin ja siten ei pysty siirtämään lämpöä niin hyvin pois moottorilta. Nimellisnopeuden jälkeen jatkuvan momentin raja laskee, koska jännitettä ei enää voida nostaa vaan pyörimisnopeutta kasvatetaan vain taajuutta kasvattamalla. Tämä aiheuttaa sen, että saman momentin saavuttamiseen vaaditaan enemmän virtaa.

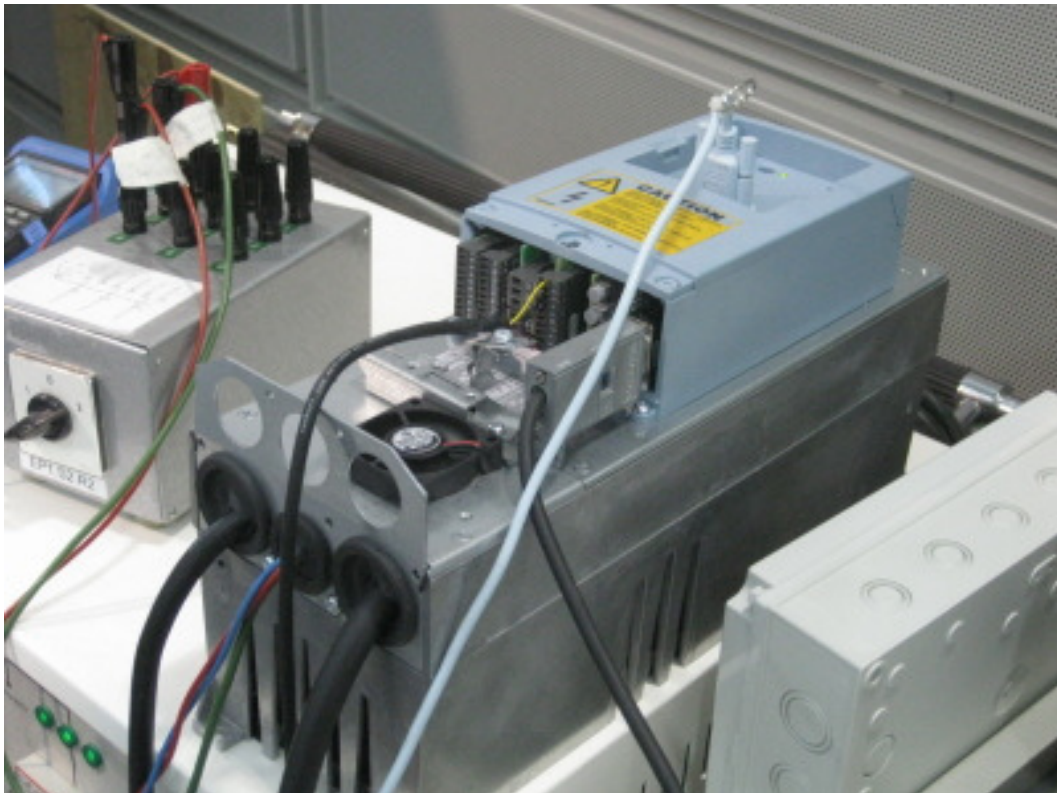
Moottorin maksimimomentti rajoitetaan 52 Nm:ään, joka on melkein kaksinkertainen nimelliseen momenttiin verrattuna. Maksimitehoksi saadaan silloin:

$$P_{\max} = M_{\max} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_N = 52 \text{ Nm} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{1425}{60} \approx 7,8 \text{ kW} \quad (1)$$

Tällä maksimimomentin rajoituksella taajuusmuuttajan virta ei kasva sen nimellisvirtaa suuremmaksi, eli valittu taajuusmuuttaja ei ole rajoittavana tekijänä vaan ainoa seurattava asia on moottorin lämpötila. Moottorin lämpötilaa on seurattava, koska korkea lämpötila lyhentää moottorin elinikää.

5.3 Moottorihjaimen valinta

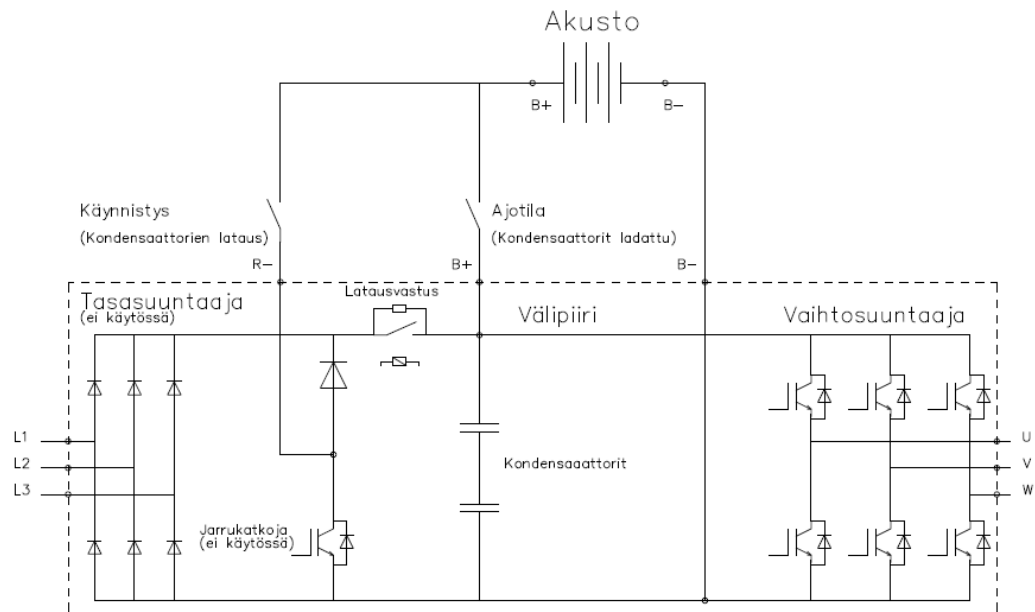
Koska projektiin valittiin perinteinen verkkovirralla toimiva moottori, valittiin moottorin ohjaimeksi välipiirillinen taajuusmuuttaja, josta käytettäisiin vain invertteri osaa. Taajuusmuuttaja on kuvassa 6 esitetty Vaconin NXP 0031 2A2H1SSS. Tämä taajuusmuuttaja on mitoitettu pyörittämään 7,5 kW:n moottoria jatkuvalla nimelliskuormalla, joten sen avulla voidaan pyörittää 4 kW:n moottoria ilman, että taajuusmuuttajan elektroniikan kesto on rajoittavana tekijänä. Taajuusmuuttaja kestäisi myös hetkellisiä ylivirtoja. 150 % nimellisvirrasta 1 minuutin ajan 10 minuutin välein tai 200 % nimellisestä 2 sekunnin ajan 15 sekunnin välein /27/.



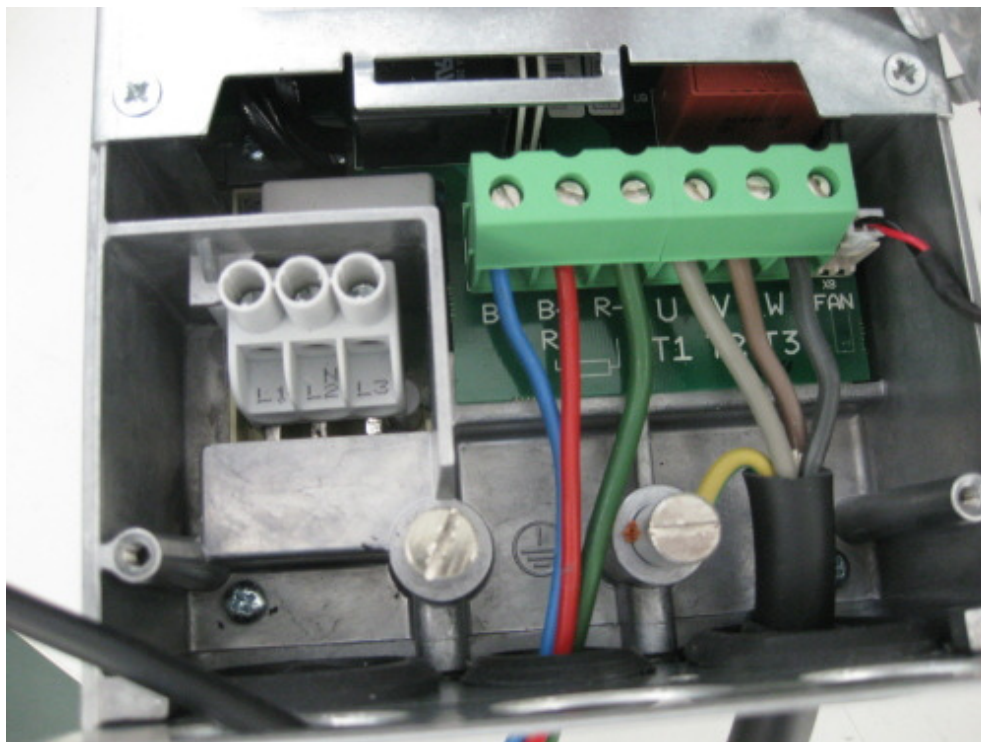
Kuva 6. Vaconin taajuusmuuttaja.

Projektissa olevaa taajuusmuuttajaa käytetään vektorisäädöllä pulssitakometrin kanssa. Tällä ohjaustavalla saadaan tarkka momenttisäätö myös pienillä pyörimisnopeuksilla. Takaisinkytkentä vaatii pulssitakometrin, eli nopeuden mittauksen moottorin akselilta. Takaisinkytketty vektorisäätö on erittäin tarkka oikosulkumoottorin säätötapa.

Kuvissa 7 ja 8 on esitetty tasajännitteen kytkentä taajuusmuuttajan liittimiin. Akusto kytketään aluksi jarruvastukselle varattuun R- liittimen ja B- liittimen väliin, jotta saataisiin kondensaattorit ladattua latausvastuksen kautta. Kun kondensaattorit on ladattu, kytkentä muutetaan suoraan välipiiriin B+:n ja B-:n väliin.



Kuva 7. Taajuusmuuttajan kytkentä (Liite 1).



Kuva 8. Taajuusmuuttajan liittimet.

Kyseinen kytkentä tehdään, koska kondensaattorien ja tehonlähteen kannalta on hyvä varmistaa, että kondensaattorit ovat ladattuja ennen kuin jännite kytketään suoraan välipiiriin. Kondensaattorit ottavat tehonlähteeltä suuren virran jos välissä ei ole vastusta rajoittamassa sitä. Suuri virtapiikki voi olla vahingollinen tehonlähteelle tai kondensaattoreille. Kondensaattori on hyvä olla välipiirissä tasoittamassa invertterin aiheuttamia äkillisiä jännitemuutoksia.

Taulukossa 1 on esitetty taajuusmuuttajaan hankitut ohjauskortit. Tärkein korteista on enkooderikortti, jolla saadaan nopeustieto moottorin takometrilta. Profibus-väylää käytetään logiikan ja taajuusmuuttajan välillä nopeaan tiedonsiirtoon ja ohjaukseen.

Taulukko 1. Taajuusmuuttajan ohjauskortit.

| Korttipaikka | Tunnus | | Ominaisuudet |
|--------------|------------|-------------------|------------------------|
| a | OPT A1: | Peruskortti | 6xDI, 1xDO, 2xAI, 1xAO |
| b | OPT A2: | Peruskortti | 2xrele |
| c | OPT A5: | Peruskortti | Enkooderi +15/+24 V |
| d | OPT D2: | Sovitinkortti | System Bus/CAN |
| e | OPT C5 dv: | Kenttäväyläkortti | Profibus |

5.4 Akuston valinta

5.4.1 Yleisesti sähköajoneuvojen akuista

Akut ovat energiavarastoja, joihin varastoidaan sähköä kemiallisessa muodossa. Ne ovat yksi parhaimmista tavoista varastoida sähköenergiaa hyötysuhteen kannalta. Akkujen ongelmana on kuitenkin niiden huono energiatiheys.

Sähköajoneuvokäyttöön ideaalinen akku olisi hyvän energiatiheyden omaava, turvallinen sekä toimiva eri lämpötiloissa.

Lyijyakku on pitkään käytössä ollut ja sitä myötä halpa hinnaltansa. Sen huonot puolet ovat sen erittäin huono teho-painosuhte ja suhteellisen huono tehon tilavuussuhde. Ajoneuvokäytössä lyijyakut ovat huono valinta varsinkin suuren painonsa takia.

Litiumakut ovat parhaiten sopivat sähköajoneuvokäyttöön. Litiumakut ovat paino- ja tilavuussuhteiltaan parempia kuin lyijyakut. Litiumakkujen käyttöä ajoneuvokäytössä on kuitenkin suurimmalta osalta rajoittanut niiden hinta sekä epästabiilisuus suurilla lämpötiloilla. Litiumakut vaativatkin akunhallintajärjestelmän turvallisuuden takia. Myös akkujen kemialla voidaan vaikuttaa turvallisuuteen.

Nykyisin useissa kännyköissä ja kannettavissa tietokoneissa on käytössä LiCoO_2 (litiumkربولttioksidi) akut, jotka ovat hyviä energiavarastoja, mutta ne muuttuvat epästabiileiksi tietyn lämpötilan jälkeen ja voivat aiheuttaa vaaratilanteita /23/. Erään lähteen mukaan litiumkربولttiakku muuttuu epästabiiliksi 150 C° :ssa ja sitä kautta hajotessaan päästää tulenarkoja kaasuja ympäristöön /22/. Tämän akun lämpeämistä pyritään estämään akunhallintajärjestelmällä, joka yksinkertaisimmillaan on pelkkä jännitteen mittauksella tehty yli-alijännite suojaus. Usein pienikapasiteettisia akkuja ei suojata lämpötilamittausten avulla, joten pieni räjähdysvaara on aina olemassa jos ympäristön lämpötila kasvaa liian suureksi.

Sähköajoneuvokäyttöön, johon tarvitaan suurikapasiteettisia akkuja, ei voi kuvitellakaan räjähdysalttiita akkuja ilman lämpötilan mittausta ja sen tarkkailua. Akkukemiaa muuttamalla voidaan vaikuttaa akun ominaisuuksiin ja esimerkiksi LiFePO_4 (litiumrautafosfaatti) akku on nykyisin suosittu juurikin turvallisuuden ja eliniän takia. Akkuvalmistajan K2 Energy:n mukaan sen valmistama akku kestää yli 200 C° :n lämpötilan ennen kuin elektrolyytti hajoaa, eli kun akku muuttuu epästabiiliksi /13/. LiFePO_4 -akkujen väitetään olevan turvallisia myös silloin kun ne muuttuvat epästabiiliksi. Lämpötilanmittaus on joka tapauksessa tärkeää tehdä liian suuren lämpötilan aiheuttaman palovaaran vuoksi sekä akkujen rikkoutumisen takia.

Taulukossa 2 vertaillaan karkeasti eri energiavarastojen käyttöä ajoneuvoissa. Taulukon arvoja voidaan pitää vain suuntaa-antavina, mutta siitä voidaan nähdä syy miksi sähköauto ei vielä ole yleistynyt. Sähköauton akkujen käyttö energiavarastona ei ole lähelläkään bensiniin tai dieselin energiatiheyksiä. Sähköautojen suurimpia hyötyjä onkin se, että autosta lähtee pois päästöjä

aiheuttava moottori ja päästöt keskittyvät sähkön tuotantoon, jossa päästöjä on helpompi vähentää. Energiankulutuksen kannalta sähköautot voivat olla jopa huono asia. Nykyiset autot saavat energiansa öljyyn sitoutuneesta energiasta ja sähköautojen yleistyessä tämä energia täytyy tuottaa jollain muulla keinolla.

Taulukko 2. Energiavarastojen vertailua ajoneuvokäytössä.

| Energiavarasto (Polttoaine/akku) | Energian tiheys Wh/kg | Energian tiheys Wh/l | Hyötysuhde ajoneuvokäytössä η |
|---|--------------------------------------|-------------------------------------|--|
| Bensiini | 12700 ⁽¹⁾ | 8760 ⁽¹⁾ | 15% ⁽³⁾ |
| Diesel | 11600 ⁽¹⁾ | 9700 ⁽¹⁾ | 18% ⁽³⁾ |
| Vety(kaasu) | 33000 ⁽¹⁾ | 750 ⁽¹⁾ | 41% ⁽⁴⁾ |
| Vety(neste) | 33000 ⁽¹⁾ | 2360 ⁽¹⁾ | 41% ⁽⁴⁾ |
| Lyijyakku | 36 ⁽²⁾ | 109 ⁽²⁾ | 81% ⁽³⁾ |
| Litium-ioni-akku | 119 ⁽²⁾ | 136 ⁽²⁾ | 81% ⁽³⁾ |

⁽¹⁾Polttoaineiden ja vetyjen energiantiheydet lähteestä The Physics Factbook /14/, /15/, /16/

⁽²⁾Akkujen tiheysarvot on laskettu tiettyjen valmistajien antamista koko, paino ja ampeerituntiarvoista /Liite 2/. Arvot vastaavat nykytekniikalla saatavia arvoja, jotka on mahdollista toteuttaa kaupallisesti. Eri akkutekniikoiden teoreettinen kyky varastoida energiaa on kuitenkin suurempi.

⁽³⁾ Hyötysuhteet Mitsubishin tekekemästä tutkimuksesta, jossa otettu huomioon hyötysuhde ajoneuvokäytössä energiavarastosta renkaille. /6/

⁽⁴⁾ Vetykäyttöisessä ajoneuvossa käytetään sähkömoottoria, jonka sähkö tuotetaan polttokennolla. Polttokennon hyötysuhteena voidaan käyttää 50 %. /20/.

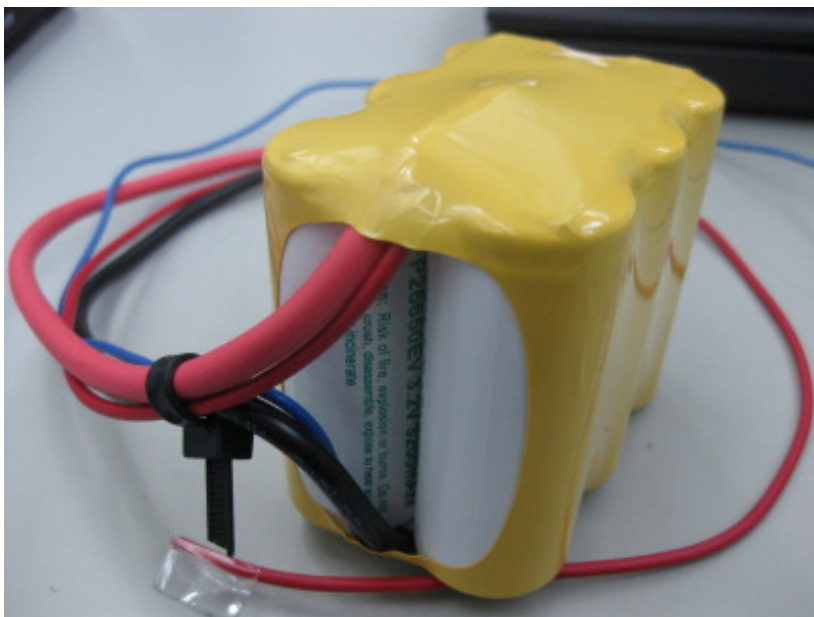
Taulukon perusteella on helppo ymmärtää miksi vetyä pidetään tulevaisuuden ajoneuvojen energianlähteenä. Sen energian tiheys on painon puolesta jopa parempi kuin bensiinillä. Vedyn tuottamiseen sekä sen muuttamiseen takaisin sähköenergiaksi kuluu kuitenkin tänäpäivänä niin paljon energiaa, ettei vety ole siinä mielessä järkevä vaihtoehto auton energialähteeksi /20/.

5.4.2 Akkukenno 26650EV

Sähkökäytön hankinnan kannalta vaikeinta oli selvittää mistä saisi akut mopoautoon. Alusta asti oli selvää, että autoon tulee nykyaikaiset LiFePO₄ litiumioni-akut. Suurimmat akkujen valmistajat sijaitsevat Kiinassa ja Amerikassa, mutta suoraan ulkomailta tilaaminen ei tässä tilanteessa ollut mielekäästä. Akkukennojen lisäksi tarvittiin akunhallintajärjestelmä ja akkuvaraaja. Suomalaisen European Batteriesin kautta saatiin tilattua akustojärjestelmä, joka koostuu amerikkalaisista K2:n kennoista (kuva 9) ja suomalaisen FEVT:n kehittämästä akunhallintajärjestelmästä.



Kuva 9. K2 Energyn yksittäinen kenno (26650EV).



Kuva 10. Kuusi rinnan kytkettyä akkukennoa.

Yksi 26650EV kenno on kapasiteetiltaan 3,2 Ah ja jänniteeltään 3,2 V (taulukko 3). Akusto kootaan siten, että 6 akkukennoa kytketään rinnakkain (kuva 10), jonka kapasiteetiksi saadaan:

$$3,2Ah \cdot 6 = 19,2Ah \quad (2)$$

Näitä 3,2 V:n ja 19,2 Ah:n akkupaketteja kytketään 100 kpl sarjaan, josta saadaan:

$$3,2V \cdot 100 = 320V \quad (3)$$

Lopullinen energiamäärä on:

$$320V \cdot 19,2Ah = 6144Wh \approx 6,1kWh \quad (4)$$

Litiumakkuja ei kuitenkaan kannata päästää aivan tyhjiksi ja niiden käyttöikä on sitä lyhyempi mitä enemmän niitä purkaa, joten projektissa pyritään siihen, että niitä puretaan maksimissaan 80% niiden kapasiteetista. Litium-akkujen ilmoitettu kapasiteetti on valmistajan mukaan suositeltu raja, jossa on otettu huomioon käytettävissä oleva kapasiteetti sekä akkujen kestoikä.

Käytettäväksi energiaksi saadaan:

$$6,144kWh \cdot 80\% \approx 4,9kWh \quad (5)$$

Tässä tapauksessa tämä riittää täydellä vauhdilla (45km/h) ajettuna:

$$\frac{4,9kWh}{3,2kW} \approx 1,5h \rightarrow 1,5h \cdot 45 \frac{km}{h} \approx 69km \quad (6)$$

3,2 kW on kappaleessa 7.2 *Kokonaiskäytön kulutus* laskettu kulutus täydellä vauhdilla.

Taulukko 3. 26650EV akkukennon ominaisuudet. (Liite 5)

| | Suosittelut rajat | Maksimi rajat |
|--------------------------------|-------------------|---------------|
| Jatkuva purkaminen (A) | 3,2 | 12 |
| Hetkellinen purkaminen 30s (A) | 13 | 28 |
| Latausvirta (A) | 1,6 | 3,2 |
| Alijänniteraja (V) | 2,5 | 2,0 |
| Ylijänniteraja (V) | 3,64 | 4,01 |
| Suurin lämpötila (C°) | + 60 | |
| Pienin lämpötila (C°) | - 20 | |

Projektiin tuleva akkujärjestelmä koostuu kuudesta rinnakkain kytketystä akkukennosta, joten akuston virtarajat voidaan kertoa kuudella, kuten taulukossa 4 on tehty.

Taulukko 4. Kuuden rinnankytketyn akun virtarajat.

| | Suosittelut rajat | Maksimi rajat |
|--------------------------------|-------------------|---------------|
| Jatkuva purkaminen (A) | 19,2 | 72 |
| Hetkellinen purkaminen 30s (A) | 72 | 168 |
| Latausvirta (A) | 9,6 | 19,2 |

5.4.3 Akunhallintajärjestelmä

Litiumakut vaativat hallintajärjestelmän joka huolehtii siitä, ettei akkua ladata tai pureta enemmän kuin on tarpeellista. Ylilataaminen voi olla litiumakulle kohtalokasta, koska se tuottaa lämpöä ja voi joillakin akkutyypeillä aiheuttaa jopa räjähtämisen. Akunhallintajärjestelmällä estetään myös akkujen purkaminen liian alhaiseksi, koska se pienentää litiumakun käyttöikä. Yksinkertainen hallintajärjestelmä mittaa jokaisen kennon yli jännitteen ja katkaisee virran liian suuren tai liian pienen jännitteen mukaan. Monimutkaisempi, mutta ehdottomasti parempi vaihtoehto on sellainen järjestelmä jossa jokaisen kennon jännitettä ja lämpötilaa mitataan ja järjestelmässä olevien kennojen kapasiteettia siirretään vahvimmissa heikkoihin. Näin saadaan akuille suurempi käyttöikä sekä enemmän kapasiteettia käyttöön.

Projektiin tuleva hallintajärjestelmä on FEVT:n (Finnish Electric Vehicle) tekemä. Kuvassa 11 on esitetty hallintajärjestelmään kuuluva yksi sadasta balansointiyksiköstä. Balansointiyksikön tehtävä on mitata jokaisen sarjaan kytketyn akkupaketin jännite, virta sekä lämpötila. Balansointiyksiköt kytketään rinnakkain toistensa kanssa 48 voltin jännitteellä tarkoituksena tasata akkukennojen varaustila.



Kuva 11. FEVT:n balansointiyksikkö BMBU6.

5.4.4 Litium-akun lataaminen

Akkuvaraaja tulee akuston mukana, joten sen toiminta akkujärjestelmän kanssa on jo valmiiksi yhteensovitettu. Litium-akut ovat tarkkoja latausjännitteestä, joten latausjärjestelmän täytyy olla juuri kyseiselle akulle tarkoitettu. Liian suuri tai liian pieni jännite voi tuhota akun.

Tähän projektiin tuleva akkuvaraaja on teholtaan 3,2 kW. Jos lasketaan akun latautuminen tyhjästä täyteen aina 6,1 kWh asti, latausaika on suurinpiirtein 2 tuntia. Latausaikaan on kuitenkin vaikeaa ottaa kantaa tuntematta tarkemmin akkuvaraajan toimintaa. Akkuvaraajan toimitus ei tähän opinnäytetyöhön ehtinyt tulla.

Projektissa käytettyjen LiFePO_4 akkujen kestoikä on suurinpiirtein 2000 latauspurkukertaa tyhjästä täyteen, kun taas yleisesti käytössä olevinen LiCoO_2 akkujen kestoikä on noin 500 latauskertaa. Akkujen kestoikä ilmoitetaan yleensä siten kuinka monta kertaa akku voidaan purkaa ja ladata tyhjästä täyteen normaalioloissa ennen kuin akun kapasiteetti on pienentynyt 80%:iin alkuperäisestä kapasiteetista. Akkujen käyttöikä on kuitenkin vaikea arvioida, koska ikääntymiseen vaikuttaa niin moni tekijä. Akkujen säilytyksen kannalta on parempi pitää akut viileässä, koska suuri lämpötila nopeuttaa akun ikääntymistä ja akkujen varaustila olisi paras pitää noin 40 %:ssa sen täydestä kapasiteetista /5/.

Näitä edellä mainittuja asioita on käytännön kannalta vaikea toteuttaa. Akun varaustila on käytännön kannalta järkevä pitää 100 %:ssa ja akuston lämpötila riippuu paljolti ajoneuvon säilytyspaikasta, johon ei aina voida vaikuttaa. Akkujen ikääntymiseen vaikuttaa myös lataus- ja purkuvirran suuruus. Mitä hitaammin akku puretaan ja ladataan sitä parempi se on akulle. Akkua kannattaa purkaa ja ladata valmistajan antamien suositusten mukaan, jotta elinikä ei kärsisi. Akun elinikään vaikuttaa myös purkaussyvyys, eli kuinka tyhjäksi akku puretaan /19/.

6 SUORITUSKYKYLASKELMAT

Alustavilla laskelmilla saadaan suurin piirtein kuva lopullisesta toiminnasta. Laskelmien avulla voidaan määritellä auton kiihtyvyys ja huippunopeus tietyllä välityssuhteella. Koska tarkoituksena on saada mopoauto tieliikennekelpoiseksi, on huippunopeus maksimissaan 45 km/h. Tämä helpottaa laskelmien tekoa ja kun ainoa muutettavissa oleva asia on välityssuhteen muuttaminen, voidaan vaikuttaa ainoastaan hieman kiihtyvyyteen ja siihen kuinka paljon ylimääräistä tehoa on maksiminopeudella. Taulukossa 5 esitetty laskelmien alkuarvot.

Kaikki laskut on tehty Mathcad 14-ohjelmalla. Moottorin momentin laskemisessa on käytetty vertailuna ABB:n DriveSize ohjelman arvoja.

Taulukko 5. Laskelmien alkuarvot.

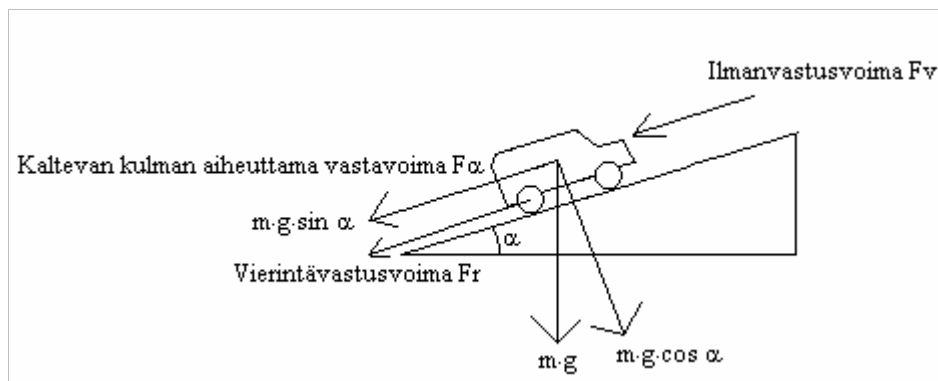
| Tunnus | Arvo | Yksikkö | Suure/Selitys |
|----------|--------|-------------------|---|
| m | 600 | kg | Auton massa |
| g | 9,1 | m/s ² | Vetovoimakiikkyvyys |
| μ_R | 0,015 | - | Vierintäkierä (auton rengas asfaltilla 0,01...0,02) |
| ρ | 1,225 | kg/m ³ | Ilman tiheys (15 C, normaalipaine) |
| A | 1,83 | m ² | Auton etupinta-ala |
| C_v | 0,5 | - | Muotokerroin (kulmikas auto 0,4-0,55) |
| α | 0 | deg | Nousukulma asteina |
| d_p | 0,54 | m | Renkaan halkaisija |
| μ_T | 1:11 | - | Tasauspyörästön suhde |
| μ_H | 2:1 | - | Hammashihnan suhde (tähän voidaan vaikuttaa) |
| η_T | 0,94 | - | Tasauspyörästön hyötysuhde |
| η_H | 0,96 | - | Hammashihnan hyötysuhde |
| P_N | 4 | kW | Moottorin nimellisteho |
| n_N | 1425 | min ⁻¹ | Moottorin nimellisyörimisnopeus |
| | | | |
| v | 0-12,5 | m/s | Tarkkaillaan ominaisuuksia nopeuksilla 0-12,5 m/s |

Tasauspyörästön välityssuhde on 1/11. Tasauspyörästö tulee jättää autoon, koska sillä saadaan väljyyttä renkaiden pyörimisnopeuteen.

Tasauspyörästön välityssuhteen ja sähkömoottorin pyörimisnopeuden takia hammashihnan välityssuhteeksi asetetaan alustavasti 2:1.

6.1 Vastustavien voimien laskeminen

Kuvassa 12 on esitetty mopoautoon vaikuttavat vastavoimat sekä niiden suunnat.



Kuva 12. Autoon vaikuttavat vastavoimat.

Vierintävastusvoima on se voima, joka aiheutuu painon aiheuttamasta kitkasta pyörien laakereille ja renkaiden kitkasta asfalttiin. Näissä laskuissa pidetään samaa arvoa millä tahansa nopeudella, vaikka renkaiden kitkakerroin hieman pienenee vauhdin kasvaessa. Renkaiden vastusvoiman pieneneminen nousukulman kasvaessa on otettu huomioon.

$$F_R = \mu_R \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad (7)$$

Ilmanvastusvoima vastustaa autoa sen liikkuessa. Vastusvoima kasvaa neliöön verrannollisena nopeuden kasvaessa.

$$F_v(v) = C_v \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (8)$$

Nousukulman aiheuttama vastavoima ei tasaisella tiellä vaikuta ollenkaan.

$$F_\alpha = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (9)$$

Nousukulman muutos prosentteina.

$$\% = \arctan(\alpha) \cdot 100\% \quad (10)$$

Vastavoimat yhteensä nopeuteen verrannollisena.

$$F_{kok}(v) = F_R + F_v(v) + F_\alpha \quad (11)$$

Lasketaan moottorin pyörimisnopeus (rpm) auton nopeudesta (m/s) halutulla välityssuhteella.

$$n(v) = \frac{v \cdot 60}{\pi \cdot d_p \cdot \mu_T \cdot \mu_H} \quad (12)$$

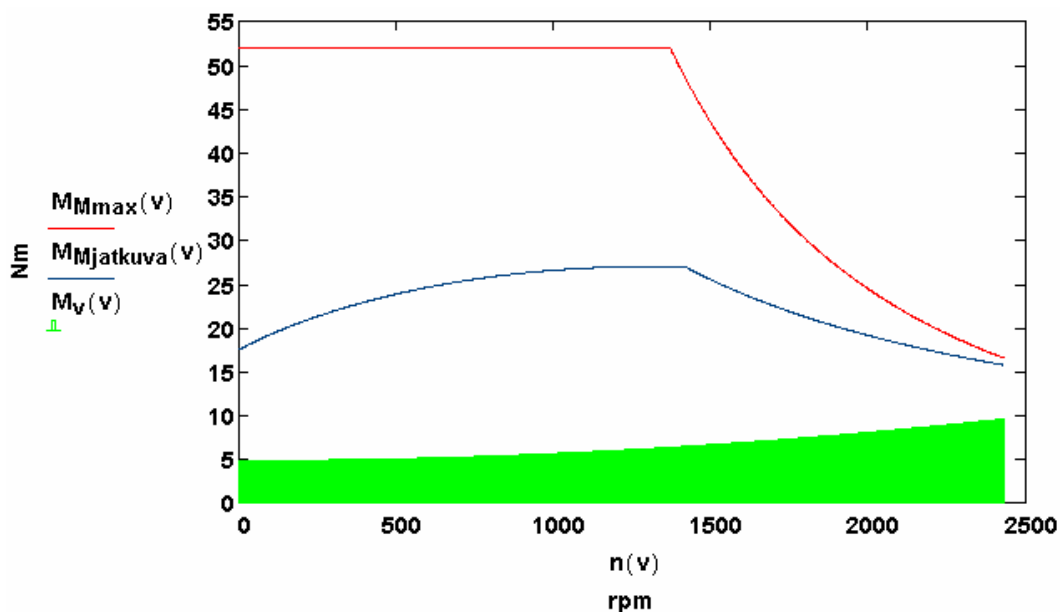
Moottorille aiheutuvan momentin määrää voimansiirron hyötysuhde, välityssuhde ja vastavoimat.

$$M_v(v) = \frac{1}{\eta_T \cdot \eta_H} \cdot \frac{\mu_T \cdot \mu_H}{1} \cdot F_{kok}(v) \cdot \frac{d_p}{2} \quad (13)$$

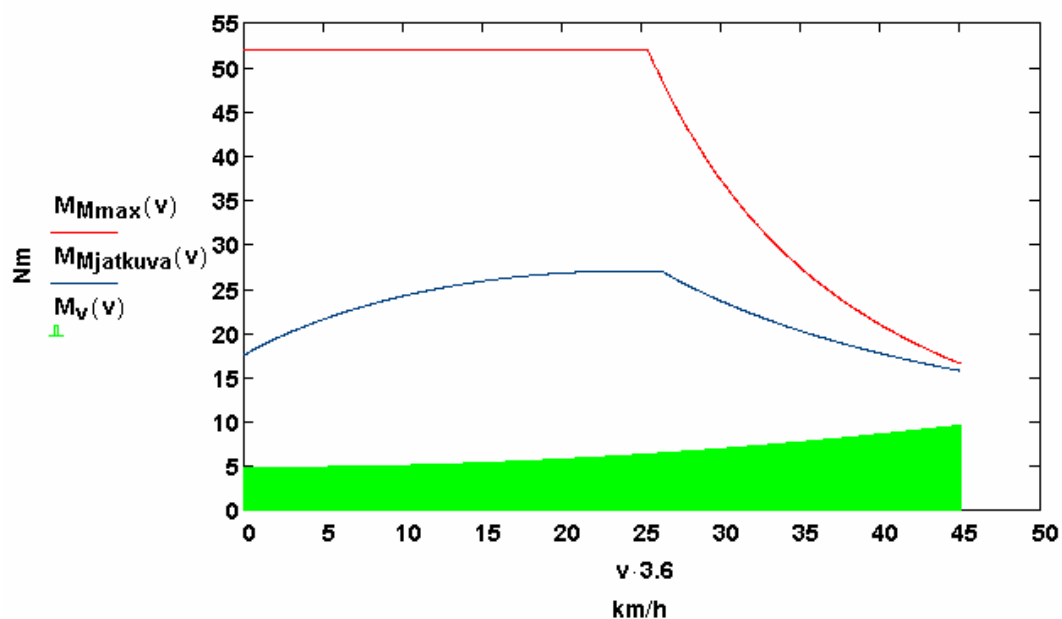
Nimellismomentilla määritellään moottorin teoreettinen momenttikäyrä.

$$M_N = \frac{P_N}{2 \cdot \pi \cdot n_N} = \frac{4kW}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1425}{60} s^{-1}} = 26.8 Nm \quad (14)$$

Maksimimomentin $M_{M \max}(v)$ ja jatkuvan momentin $M_{Mjatkuva}(v)$ käyrät on tehty yleisen oikosulkumoottorin käyttäytymismallin mukaan. Apuna on käytetty ABB:n DriveSize ohjelman mallinnusta kyseiselle moottorille ABB:n taajuusmuuttajalla ohjattuna. Maksimimomentin määrää kippausvaara ja jatkuvan momentin määrää lämpeäminen. Kuvassa 13 on esitetty vastamomentit ja moottorin momentit moottorin pyörimisnopeuden funktiona. Kuvassa 14 on esitetty vastamomentit ja moottorin momentit mopoauton nopeuden funktiona.

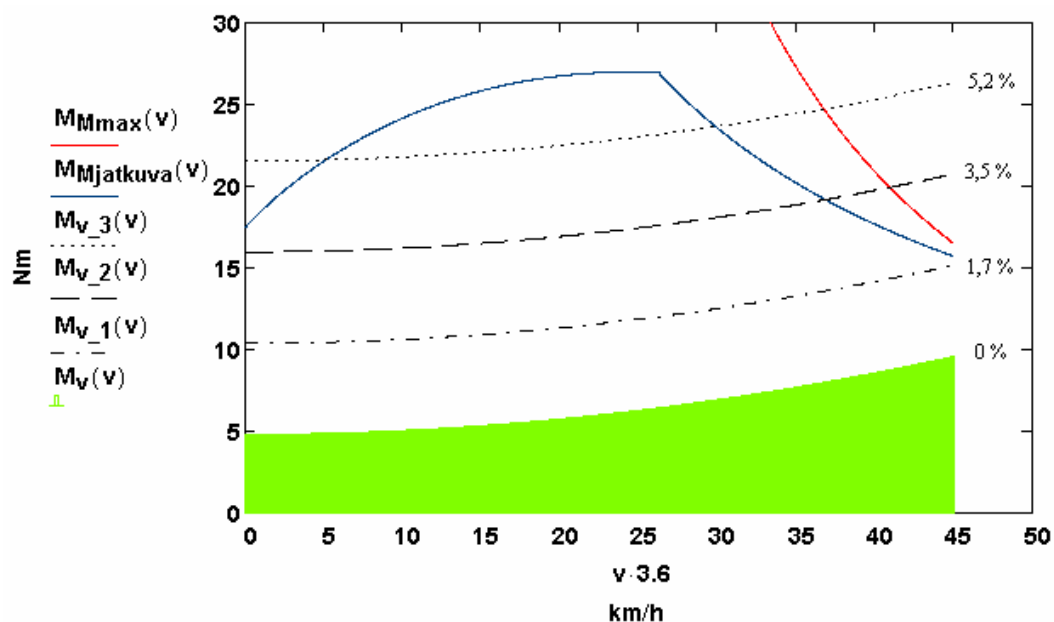


Kuva 13. Vastavoimien voittamiseen tarvittava momentti ja moottorin momentti moottorin kierrosnopeuteen verrattuna.



Kuva 14. Vastavoimien voittamiseen tarvittava momentti ja moottorin momentti auton nopeuteen verrattuna.

Kuvassa 15 on vertailtu nousukulman vaikutuksia vastamomenttiin kulmilla $\alpha = 0^\circ$ (0%), $\alpha = 1^\circ$ (1,7%), $\alpha = 2^\circ$ (3,5%) ja $\alpha = 3^\circ$ (5,2%).

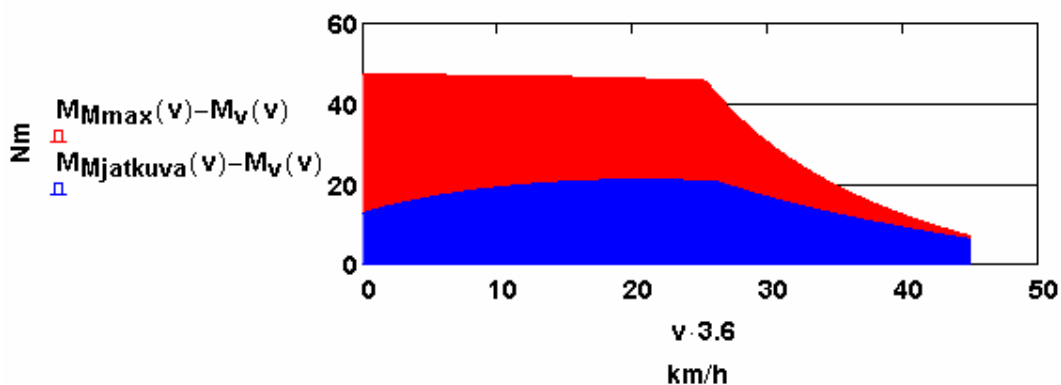


Kuva 15. Vastamomentin kasvu eri nousukulmilla.

Kulma tarkoittaa nousun astekulmaa. Kuvassa esitetyt prosentit ovat eri kulmille vastaavat nousut prosentteina, eli kuinka monta metriä on nousua sadalle metrille.

6.2 Kiihdytyslaskelmat

Kiihdytykseen käytössä oleva momentti jatkuvan momentin ja maksimimomentin rajoja vastaan.



Kuva 16. Kiihdytykseen käytössä oleva momentti eri kierrosnopeuksilla.

Momentti määrää auton kiihtymisen, joten laskemalla jokaiselle kierrosnopeudelle käytössä oleva momentti, saadaan laskettua kiihdyttämiseen kuluva aika. Taulukossa 6 on esitetty hitausmomentin laskemiseen tarvittavat alkuarvot.

Taulukko 6. Hitausmomentin laskemiseen tarvittavat alkuarvot.

| Tunnus | Arvo | Yksikkö | Selitys |
|---------------------|------|-------------------|---------------------------------|
| m | 600 | kg | Auton massa |
| d_p | 0,54 | m | Renkaan halkaisija |
| η_T | 0,94 | - | Tasauspyörästäön hyötysuhde |
| η_H | 0,96 | - | Hammashihnan hyötysuhde |
| m_{rengas} | 7 | kg | Renkaan paino |
| v_{max} | 12,5 | m/s | Auton maksiminopeus m/s |
| n_{max} | 2432 | min ⁻¹ | Moottorin maksimipyörimisnopeus |

Ajoneuvokäytössä hitausmomentti koostuu ajoneuvon massasta ja pyörievien kappaleiden massasta ja massan etäisyydestä keskiakseliin. Hitausmomentti vaikuttaa ajoneuvon liike-energian muutosnopeuteen, eli mitä suurempi hitausmomentti, sitä kauemmin kestää kiihdyttää tai jarruttaa haluttuun nopeuteen. Hitausmomentilla ei ole merkitystä ajoneuvon kulutukseen.

Hitausmomentin laskeminen on johdettu seuraavasta kaavasta:

$$\eta_T \cdot \eta_H \cdot \frac{1}{2} \cdot J_L \cdot \omega_L^2 = \frac{1}{2} \cdot J_R \cdot \omega_R^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (15)$$

Ratkaistaan mopoauton massan aiheuttama hitausmomentti moottorin akselille.

$$J_m = \frac{1}{\eta_T \cdot \eta_H} \cdot \frac{m \cdot v_{\text{max}}^2}{(2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{\text{max}}}{60})^2} = 1.602 \text{kgm}^2 \quad (16)$$

Renkaiden hitausmomentilla mitätön vaikutus kiihtyvyyteen.

$$J_R = \frac{1}{\eta_T \cdot \eta_H} \cdot \frac{4 \cdot \frac{1}{2} \cdot m_{\text{rengas}} \cdot (\frac{d_p}{2})^2}{(2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{\text{max}}}{60})^2} \approx 0.000012 \text{kgm}^2 \quad (17)$$

Oikosulkumoottorin roottorin hitausmomentti valmistajan taulukosta.

$$J_{\text{root}} = 0.01 \text{kgm}^2$$

Massan, renkaiden ja moottorin aiheuttama kokonaishitausmomentti.

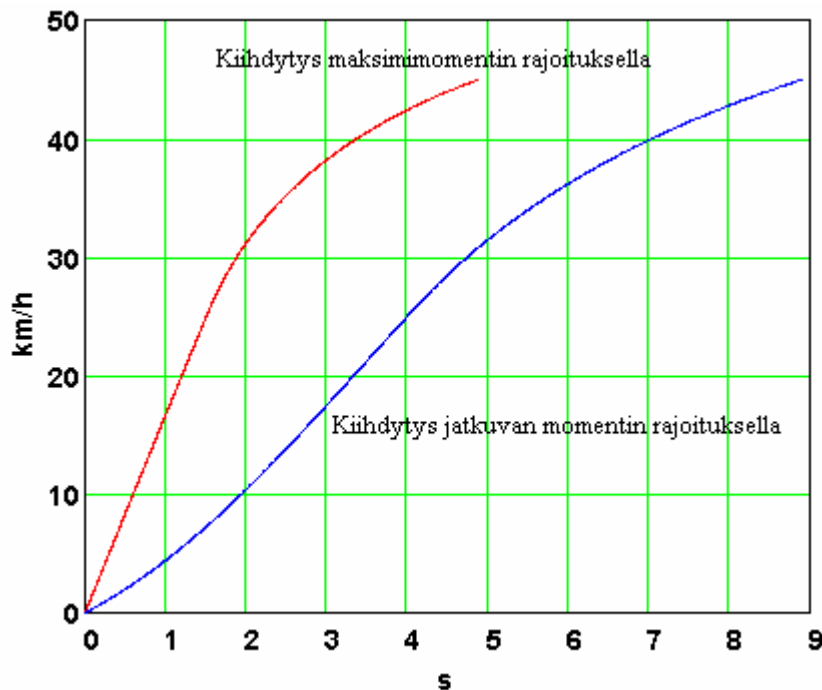
$$J = J_m + J_R + J_{\text{root}} = 1.612 \text{kgm}^2 \quad (18)$$

Aika mikä kestää kiihtyä 0-45 km/h, kun kiihdytetään maksimimomenttirajoja vastaan (kuva 17).

$$t_{\max}(v) = J \cdot 2 \cdot \pi \int_0^v (M_{M_{\max}}(v) - M_v(v))^{-1} dv \quad (19)$$

Aika mikä kestää kiihtyä 0-45 km/h, kun kiihdytetään jatkuvan momentin rajoja vastaan (kuva 17).

$$t_{\text{jatkuva}}(v) = J \cdot 2 \cdot \pi \int_0^v (M_{M_{\text{jatkuva}}}(v) - M_v(v))^{-1} dv \quad (20)$$



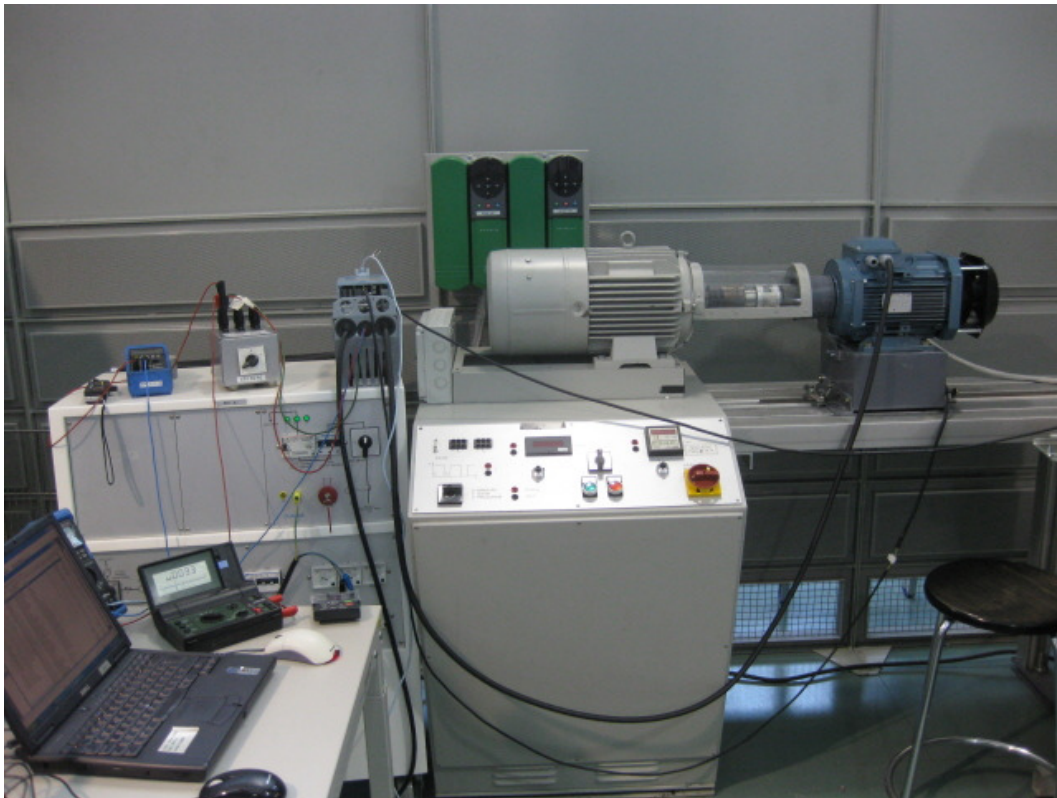
Kuva 17. Teoreettiset kiihdytysajat.

Alustavia testauksia varten sähkömopoauton momenttia rajoitetaan siten, että kiihtyvyys vastaa suurinpiirtein dieselmoottoritoimisen mopoauton kiihtyvyyttä. Täten varmistetaan ettei tasauspyörästellöille kohdistu liian suuria momenteja. Dieselmoottorikäyttöisenä saman auton kiihtyvyys on 9,3 s 40 km/h. /18/

7 MITTAUKSET

7.1 Moottorin ja taajuusmuuttajan toiminta penkissä

Moottorin ja taajuusmuuttajan hyötysuhdemittaukset sekä moottorin lämpötilamittaukset tehtiin muutoin samalla kokoonpanolla mitä autoon tulee, mutta tehollisena oli säädettävä tasajännitelähde. Alustavasti oli tarkoitus testata myös akusto, mutta projektiin tilattua akkutoimitusta ei näihin testeihin ehditty saada. Testeissä käytetyn jännitelähteen virranantokyky oli 16 A, joten kaikkia haluttuja mittauksia ei sillä saanut tehtyä. Jännitelähde asetettiin vastaamaan akuston jännitettä, joka on noin 320 V.



Kuva 18. Moottorin ja taajuusmuuttajan testipenkki.

7.1.1 Hyötysuhdemittaukset

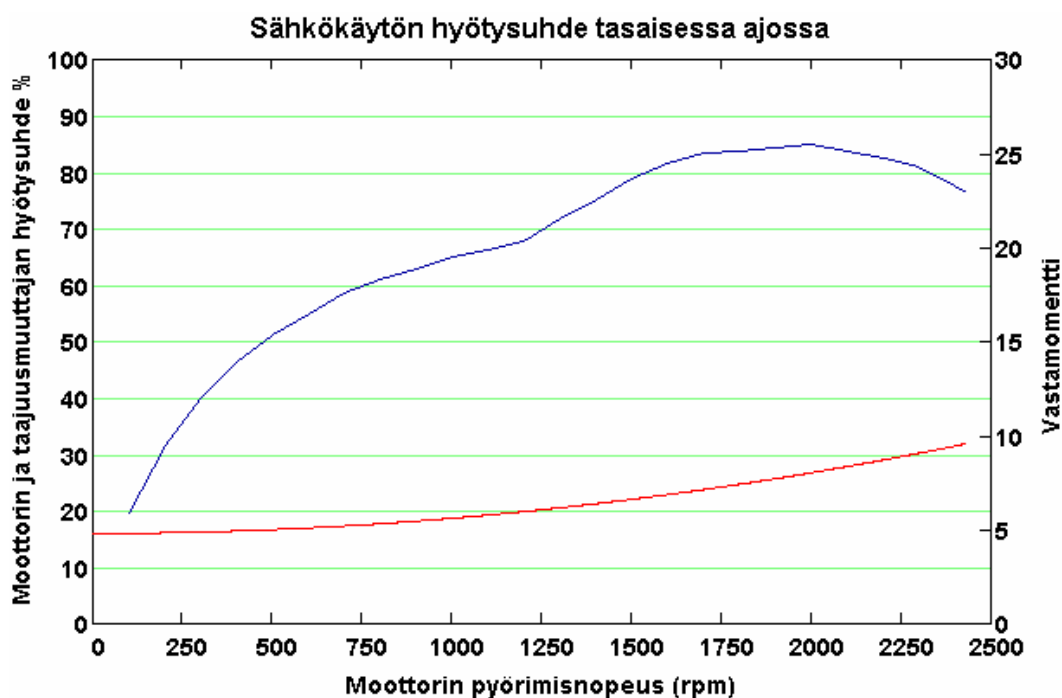
Hyötysuhdelaskelmissa selvitettiin sähkömopoauton kokonaishyötysuhde tasaisessa ajossa. Hyötysuhde laskettiin kappaleessa 6.1 laskettujen arvojen avulla, eli kullekin pyörimisnopeudelle laskettiin vastaava vastamomentti /Liite 3/.

Hyötysuhde lasketaan jakamalla moottorin antama akseliteho sähkökäytön kuluttamalla sähköisellä teholla.

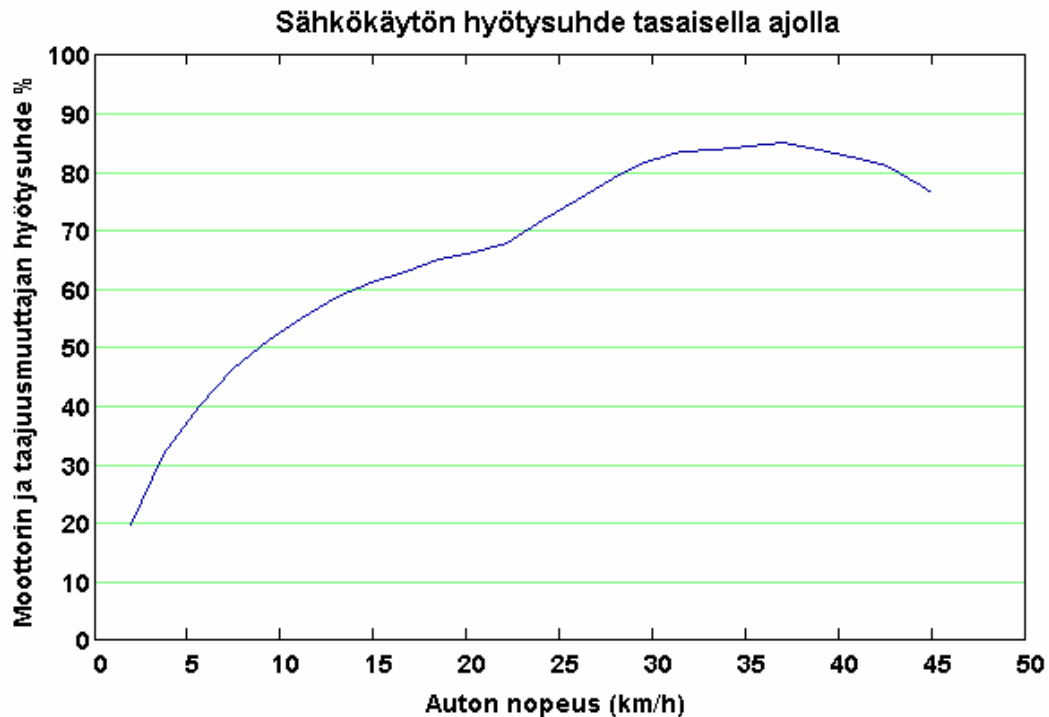
$$\eta = \frac{P_{Mek}}{P_{Sähkö}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot M}{U \cdot I} \quad (21)$$

Sähkökäytön hyötysuhde pyrittiin saamaan mahdollisimman hyväksi eniten käytetylle nopeudelle. Käytännössä tämä tarkoittaa, että moottorin nopeus pyritään saamaan lähelle nimellisnopeutta, kun mopoautolla ajetaan maksiminopeutta. Oikosulkumoottorin hyötysuhde on parhaimmillaan nimellisnopeudella ja lähellä nimellismomenttia. Sähkömoottorin hyötysuhde on kuitenkin hyvä läpi koko kierrosalueen lukuunottamatta aivan alhaisia kierrosnopeuksia (kuva 19).

Lopulliseksi välityssuhteeksi valitaan se missä hyötysuhde on mahdollisimman hyvä suurimmilla nopeuksilla. Tässä projektissa voidaan olettaa, että mopoautolla ajetaan aina kaasua pohjassa ja pienillä kierrosnopeuksilla ajetaan harvoin tasaista vauhtia pitkiä aikoja.



Kuva 19. Käytön hyötysuhde eri kierrosnopeuksilla ja siihen vastaavalla vastamomentilla.



Kuva 20. Hyötysuhde eri ajonopeuksilla.

Kuvasta 20 nähdään, että hyötysuhde lähtee selvästi laskemaan suuremmilla nopeuksilla. Oikean välityssuhteen avulla olisi mahdollista saada käytön paras hyötysuhde maksiminopeudelle, mutta täydellisen välityssuhteen valitseminen teoreettisilla laskelmilla on mahdotonta. Tärkeintä tässä projektin vaiheessa on valita sellainen välityssuhde, että sähkömopoauto saadaan liikkeelle ja että sillä voidaan ajaa halutulla nopeudella. Laskennallisesti hammashihnan välityssuhteella 2:1 saadaan maksiminopeuden hyötysuhteeksi 76,3 %.

Hyötysuhdemittaukset voidaan tehdä mopoautossa reaaliaikaisesti jos moottorin tai renkaiden akselille asennetaan momenttianturi ja sähkökäytön ottama virta ja jännite lasketaan tarkasti. Akseliteho saadaan siis mittaamalla moottorin akselin pyörimisnopeus ja momentti. Taajuusmuuttaja kyllä laskee moottorin teoreettisen momentin ja tehon, mutta niillä ei saada kovin tarkkoja arvoja.

7.1.2 Lämpötilamittaukset

Lämpötilamittauksilla selvitetään moottorin lämpeäminen eri nopeuksilla. Lämpötila-antureina moottorissa on kuusi pt100 vastusanturia. Niiden mittaukset otetaan logiikkaan ja sitä kautta paneelille esitettäväksi.

Taulukossa 7 on selvitetty moottorin eristeluokkien lämpötilarajat. Tässä projektissa käytetyn oikosulkumoottorin lämpenemäluokka on B, joten moottorin mitoituksessa on käytetty maksimilämpötilarajana 120 °C. Moottorissa on kuitenkin käytetty F-luokan eristettä, joten lämpenemisen suhteen tällä saadaan lisävarmuutta. Lämpötilarajoja on tärkeää noudattaa moottorin eliniän takia, koska eristyksen elinikä lyhenee puoleen aina 8-10 °C lämpötilan nousun takia /4/.

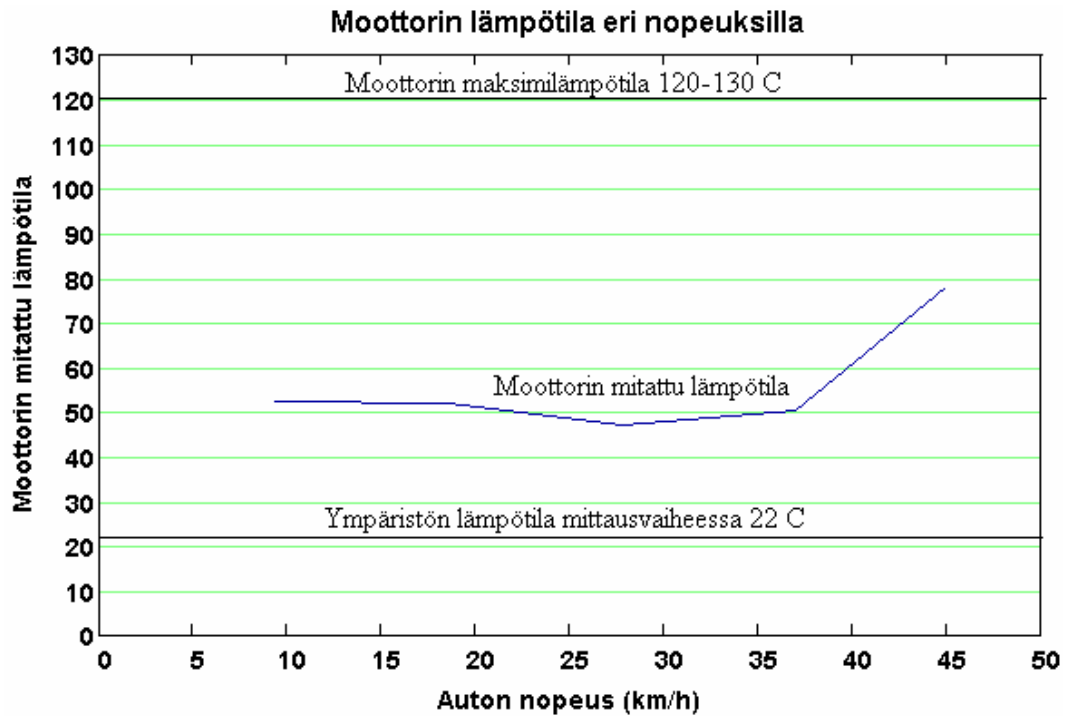
Teollisuuskäytössä, jossa moottorit pyörivät pitkiä aikoja on lämpötilojen seuranta tärkeää, mutta tässä projektissa lämpötilat ovat kuitenkin toissijainen asia juurikin lyhyen käytön takia. Valittujen akkujen takia mopoauton ajoaika on maksimissaan 2 tuntia, joka on moottorin rasituksen kannalta lyhyt aika.

Taulukko 7. Sähkökoneiden eristysluokat.

| Määritelmät | Eristysluokka | | |
|--|---------------|-----|-----|
| | B | F | H |
| Sallittu "kuumimman pisteen" lämpötila °C | 130 | 155 | 180 |
| Sallittu vastusmittauksen avulla määritetty käämityksen lämpötila °C | 120 | 145 | 165 |
| Sallittu käämityksen lämpenemä, kun ympäristön korkein lyhytaikainen lämpötila on + 40 °C °C | 80 | 105 | 125 |

Mopoauton rajoitukset pyritään toteuttamaan niin, että ainoa sähkökäyttöä rajoittava tekijä on moottorin lämpötila. Tämä tarkoittaa sitä, että mopoautolla voidaan ajaa maksiminopeutta, kiihdyttää ja ajaa ylämäkiä ainoastaan sillä rajoituksella, että moottori lämpenee liikaa.

Lämpötilamittauksissa tärkein selvitettävä asia on moottorin lämpeäminen pitkäaikaisimmalla kuormituksella. Tässä tapauksessa se on mopoauton maksiminopeus. Väliaikaiset ylikuormitukset kiihdytysten ja nousujen takia on niin lyhytaikaisia ja vaikeasti määriteltävissä, ettei niitä oteta mitoituksessa huomioon. Lämpötilan mukaan moottorin rajoitukset jätetään ajajan vastuulle, kuitenkin siten, että lämpötilat ovat aina hyvin näkyvillä ja liian suurista lämpötiloista ilmoitetaan valomerkein.

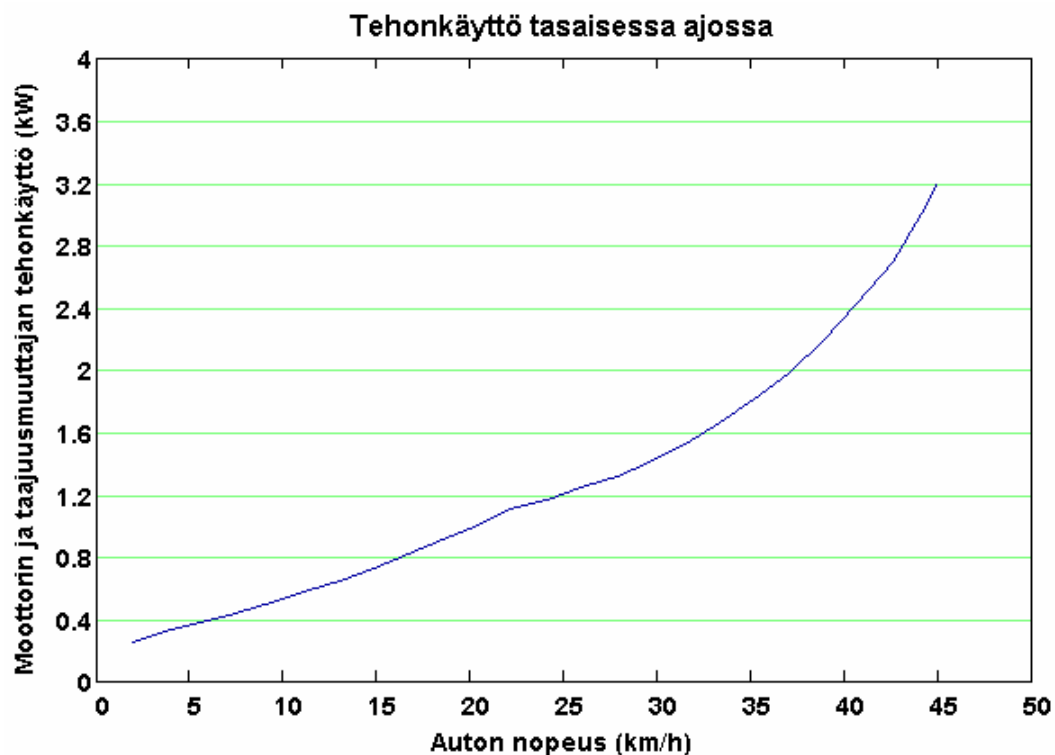


Kuva 21. Moottorin lämpötilamittaukset.

Lämpötilamittaukset on tehty oikeaan ajotilanteeseen verratuilla laskennallisilla vastamomenteilla, eli pienellä nopeudella vastamomentti on pieni ja vastaavasti suurella nopeudella vastamomentti on suuri. Kuvasta 21 voidaan nähdä moottorin akselille sijoitetun tuulettimen vaikutus pienillä nopeuksilla sekä moottorin kentänheikennysalueen vaikutus lämpötilan nousuun. Vaikka teho on pienempi, pienillä nopeuksilla moottori lämpenee silti enemmän kuin jos moottorin kierrosnopeus olisi lähellä nimellistä. Nimellisoikeuden jälkeen, joka tässä tapauksessa vastaa nopeutta 27 km/h, voi nähdä virran aiheuttaman lämpötilan sekä tehonkulutuksen kasvun.

7.2 Tehokäyttömittaukset

Sähkömopoauton käyttämä kokonaisteho täydessä vauhdissa on 3,2 kW. Kuvassa 22 näkyvä teho on laskettu taajuusmuuttajan ottamalla jännitteellä ja virralla eri kierrosnopeuksilla ja sitä vastaavalla momentilla.



Kuva 22. Sähkömopoauton tehon käyttö tasaisessa ajossa.

Projektiin saatu akusto sisältää DC/DC- muuntimen 12 V:n ja 48 V:n jännitteille. 48 V:n jännite on tarkoitettu balansointiyksiköiden kytkemiseen ja 12 V:n jännite auton alkuperäisille sähkölaitteille. Logiikka ja paneeli kuitenkin vaativat 24 V:n jännitteen, joten tätä varten tarvitaan ylimääräinen DC/DC-muunnin. Logiikan ja paneelin virran kulutus on melko pieni, joten siihen on helppo mitoittaa DC/DC-muunnin. Taulukossa 8 on laskettu pienoisjännitteiden tehonkulutus.

Taulukko 8. Auton pienoisjännittesähkölaitteet.

| 12 Vdc kuorma | |
|----------------|--|
| Etuvalot | 110 W |
| Takavalot | 30 W |
| Yht. | 140 W |
| 24 Vdc kuorma | |
| Paneeli | 0,5 A x 24 V = 13 W |
| PLC | 0,67 A x 24 V = 16 W |
| Digital Output | 16 x 500 mA = 8 A 8 A x 24 V = 192 W |
| yht: | 230 W |

8 KOKOONPANO

Taulukko 9. Sähkömopoauton tekniset tiedot.

| | Jatkuva | Maksimi |
|------------------------|---------|---------|
| Teho (kW) | 4 | 7,8 |
| Moottorin vääntö (Nm) | 26,8 | 52 |
| Moottorin nopeus (rpm) | 2432 | 4500 |
| Auton nopeus (km/h) | 45 | - |
| Ajomatka (km) | 69 | |
| Akuston koko (Wh) | 6100 | |
| Kulutus 45 km/h (W) | 3200 | |

8.1 Sähkökäyttöjen asennus autoon

Sähkömoottori asennetaan kuvan 23 mukaisesti konepellin alle dieselmoottorin tilalla ja taajuusmuuttaja asennetaan sähkömoottorin päälle. Sähkömoottorin asentamisessa käytetään hyväksi dieselmoottorin kiinnityspisteitä. Sähkömoottori painaa 26 kg, taajuusmuuttaja n. 8 kg ja pois otettu dieselmoottori n. 56 kg.



Kuva 23. Sähkömopoauton sähkökäyttö.

8.2 Akkukotelon suunnittelu sähkökäytön kannalta

Akusto sijoitellaan penkkien alle, joten akkujen tuoma n. 60 kg:n lisäpaino saadaan mahdollisimman alas ja mahdollisimman eteen. Edestä moottoritilasta lähtee painoa pois, koska sähkömoottori ja taajuusmuuttaja painavat vähemmän kuin dieselmoottori, joten painojakauman kannalta on hyvä saada akut mahdollisimman eteen. Moottoritilaan akkuja ei mitenkään saisi sijoiteltua ja akkujen eliniän kannalta on tärkeää, että akut sijaitsevat samassa lämpötilassa. Akkujen sijoittaminen mahdollisimman lähelle toisiaan vähentää myös turhaa johdottamista.



Kuva 24. Akuston sijoittelu penkkien alle.

Akkukotelon suunnittelussa täytyi ottaa huomioon akkukennojen sekä balansointiyksiköiden johdotus. Akkukennojen johdotus tapahtuu liittämällä akut päävirtakaapeleiden avulla sarjaan. Balansointiyksiköt kytketään akkujen kanssa rinnakkain akusta saatavien jännitemittausjohtojen avulla. European Batteries mitoittaa balansointiyksiköiden väliset kaapelit sen mukaan kuinka ne sijoitellaan

sähkömopoautoon. Kuvassa 24 on esitetty akuston sijoittelu penkkien alle ja liitteessä 7 on esitetty balansointiyksiköiden layout.

Akkukotelon suunnittelussa täytyy ottaa huomioon myös standardin vaatimat jännitesuojaukset. Akkukennot koteloidaan ja lukitaan, ettei pääse aiheutumaan vaaratilanteita. Akun päävirtakaapelit kytketään ja eristetään siten, ettei ne pääse aiheuttamaan oikosulkua. /21/

8.3 Sähkökäytön suunnittelussa huomioonotetut standardit

Yhdistyneiden Kansakuntien Euroopan talouskomission sääntö nro 100 sisältää akkukäyttöisten sähköajoneuvojen hyväksyntää koskevat yhdenmukaiset vaatimukset rakennetta ja toimintaturvallisuutta koskevien erityisvaatimusten osalta.

SFS-EN 50272-3

Akkujen ja akkuasennusten turvallisuusvaatimukset. Osa 3: Ajovoima-akut.

SFS-EN 1987-3

Sähkömoottorikäyttöiset moottoriajoneuvot. Erityiset turvallisuusvaatimukset. Osa 3: Käyttäjien suojaus sähköstä johtuvaa vaaratekijää vastaan.

SFS-EN 1175-1

Trukkien turvallisuus. Sähköiset vaatimukset. Osa 1: Akkukäyttöisten trukkien yleiset vaatimukset.

9 YHTEENVETO

Osa alkuperäisistä suunnitelmista jäi toteuttamatta toimitusten viivästysten takia. Akuston testaus jäi kokonaan pois tästä projektista, koska akkutoimitusta ei tähän projektiin saatu. Myös kokonaiskäytön asennus mopoautoon jäi puutteelliseksi. Projektissa on vielä paljon tekemistä ennen kuin sähkömopoauto saadaan liikkeelle. Pääpaino lopussa oli jättää projekti siihen vaiheeseen, että siitä on muiden opiskelijoiden helppo lähteä liikkeelle.

Yksi projektissa huomioonotettava asia on mopoautoon jätetyn tasauspyörästäön kesto. Alkuperäisen dieselmoottorin tuottama maksimimomentti oli 15 Nm, kun taas sähkömoottorin maksimimomentti on noin 52 Nm. Vaikka dieselmoottorin momentti siirrettiinkin variaattorivaihteiston kautta tasauspyörästäölle, jolla saadaan suurempi momentti pienillä pyörimisnopeuksilla, niin ei sillä kuitenkaan koskaan voida saavuttaa samaa momenttia kuin sähkömoottorilla.

Tuloksena tässä työssä saatiin valittua ja testattua oikeanlaiset komponentit sähkökäyttöön sekä alustaa sähkökäyttöjen asennusta niin pitkälle kuin oli mahdollista. Projektin osalta työ jäi siihen vaiheeseen, että siitä voidaan helposti jatkaa muille opiskelijoille suunnattuja erikoistöitä.

Projekti oli kiinnostava ja yhä enemmän tätä aihetta tutkiessa ihmetyttää miksi sähköautot eivät ole vieläkään saaneet suurempaa jalansijaa autokannassa. Sähköautot ovat tutkitusti ympäristöystävällisempiä kuin polttomootoriautot vaikka sähkö tuotettaisiin fossiililla polttoaineilla /24/. Sähköauto voidaan rakentaa nykyisellä tekniikalla suurelle osalle käyttäjälle sopivaksi ja melkein polttomoottorikäyttöistä autoa vastaavaksi.

LÄHDELUETTELO

- /1/ ABB lyhyesti. [online] [viitattu 15.4.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: <http://www.abb.fi/cawp/fiabb250/34d5930bfd44ace0412567a2003a70c5.aspx>>
- /2/ ABB, Tee-se-itse sähköauto ABB:n komponenteilla. [online] [viitattu 16.4.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: <http://www.abb.fi/cawp/seitp202/68cd717cb93c07c1c12575f3001cabfe.aspx>>
- /3/ ABB, Teknisiä tietoja ja taulukoita-käsikirja. 9 p. Vaasa. s. 420. Taulukko 16.1a. Täysinohjatut suuntaajakytkennät.
- /4/ ABB, Teknisiä tietoja ja taulukoita-käsikirja. 9 p. Vaasa. s. 457, taulukko 17.5b
- /5/ Battery University, How to prolong lithium-based batteries. [online] [viitattu 30.5.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: <http://www.batteryuniversity.com/parttwo-34.htm>>
- /6/ Develop of Next-Generation Electric Vehicle “i-MiEV” . [online] [viitattu 25.5.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: http://www.mitsubishi-motors.com/corporate/about_us/technology/review/e/pdf/2007/19e_12.pdf>
- /7/ Electric Motorsport, AC Induction Motor and Controller Kits. [online] [viitattu 24.5.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: http://www.electricmotorsport.com/store/ems_ev_parts_motors_ac-induction.php>
- /8/ Electric Motorsport, Perm PGM-132 Drive Kits. [online] [viitattu 24.5.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: http://www.electricmotorsport.com/store/ems_ev_parts_motors_pmg132_perm_motor_kits.php>
- /9/ Ensto, Vihreää valoa sähköautojen lataukseen [online] [viitattu 23.5.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: http://www.ensto.com/instancedata/prime_product_julkaisu/ensto/embeds/enstowwwstructure/16744_Sahkoauton_latauspylvas.pdf>

/10/ European Batteries, History. [online] [viitattu 16.4.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: <http://www.europeanbatteries.com/about-us/history>>

/11/ European Batteries Oy:n litiumioniakkuja valmistavan tehtaan peruskiven muuraus 9.2.2009 Varkaudessa. Lehdistötiedote 9.2.2009 [online] [viitattu 16.4.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: <http://www.fevt.fi/files/Lehdistotiedote%2009.02.2009.pdf>>

/12/ European Batteries, transportation [online] [viitattu 23.5.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: <http://www.europeanbatteries.com/customer-industries/transportation>>

/13/ Henkilökohtainen tiedonanto, James D. Hodge, K2 Energy Solutions, Inc 20.5.2010.

/14/ Hypertextbook, Energy Density of Diesel Fuel. [online] [viitattu 25.5.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: <http://hypertextbook.com/facts/2006/TatyanaNektalova.shtml>>

/15/ Hypertextbook, Energy Density of Gasoline. [online] [viitattu 25.5.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: <http://hypertextbook.com/facts/2003/ArthurGolnik.shtml>>

/16/ Hypertextbook, Energy Density of Hydrogen. [online] [viitattu 25.5.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: <http://hypertextbook.com/facts/2005/MichelleFung.shtml>>

/17/ Liikenteen turvallisuusvirasto, Ajoneuvoluokat. [online] [viitattu 8.6.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: http://www.ake.fi/AKE/Katsastus_ja_ajoneuvo_tekniikka/Ajoneuvoluokat/Kolmi-+ja+nelipyora+sekä+kevyt+nelipyora.htm>

/18/ ”Mopootot, Vaareilta pojille.”, Tekniikan Maailma 14/2009, s.12-24

/19/ Motorola Energy Systems Group Laboratories, Rechargeable Battery Cycle Life Issues. [online] [viitattu 30.5.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: <http://www.motorola.com/testservices/article1.htm>>

/20/ Physorg, Why a hydrogen economy doesn't make sense. [online] [viitattu 25.5.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: <http://www.physorg.com/news85074285.html>>

/21/ SFS-EN 50272-3 Akkujen ja akkuasennusten turvallisuusvaatimukset. Osa 3: Ajovoima-akut.

/22/ The Battery University, Lithium-ion safety concerns. [online] [viitattu 25.5.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: <http://www.batteryuniversity.com/partone-5B.htm>>

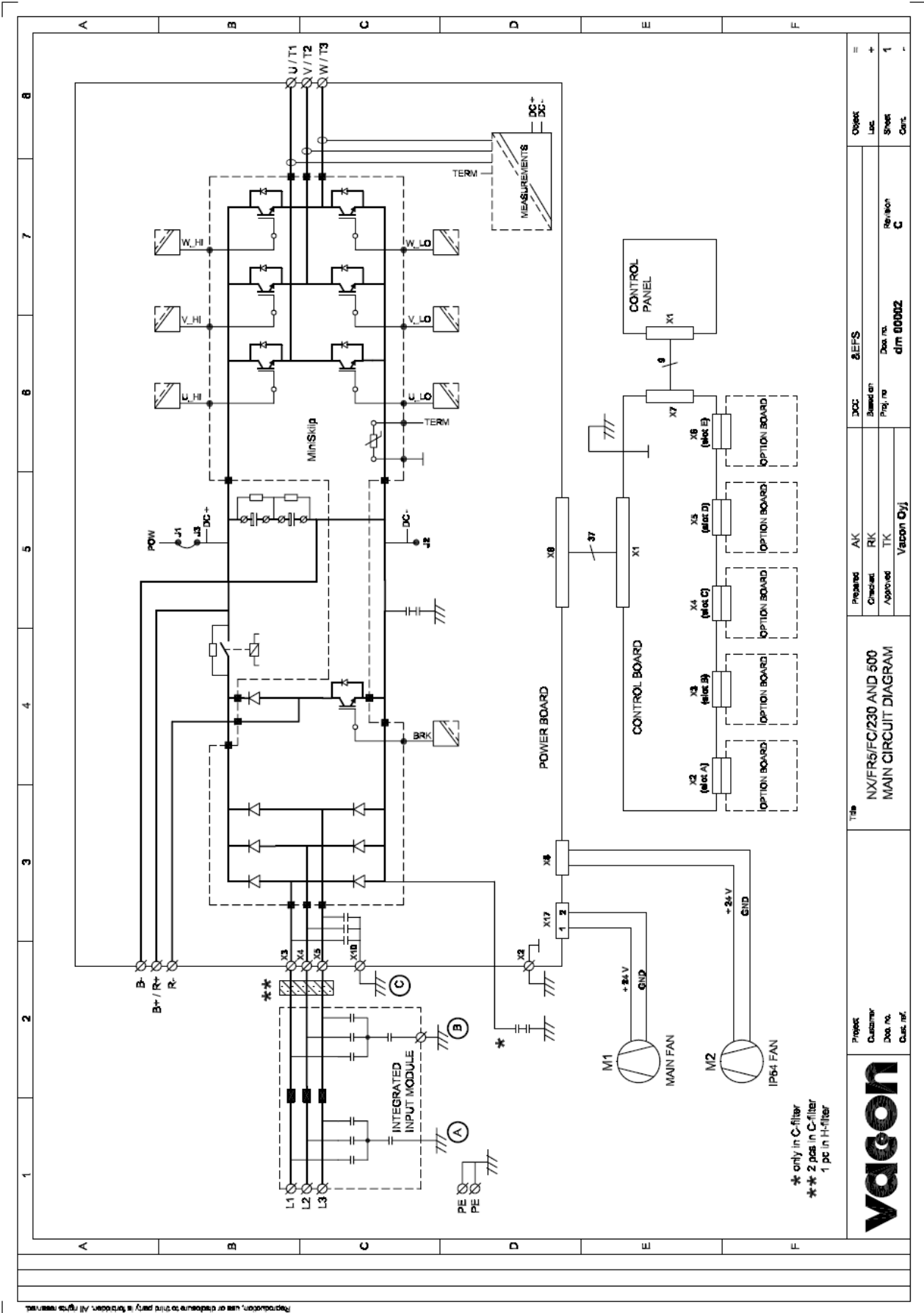
/23/ The Battery University, The High-power lithium-ion. [online] [viitattu 25.5.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: <http://www.batteryuniversity.com/partone-5A.htm>>

/24/ Työ- ja elinkeinoministeriö julkaisu, Sähköajoneuvot Suomessa-selvitys. [online] [viitattu 1.6.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: http://www.tem.fi/files/24099/Sahkoajoneuvot_Suomessa-selvitys.pdf>

/25/ Vacon lyhyesti. [online] [viitattu 16.4.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: <http://www.vacon.fi/Default.aspx?id=461919>>

/26/ Valmet Automotive sähköisen ajoneuvoteknologian eturivissä. Lehdistötiedote 2.5.2010 [online] [viitattu 23.5.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL: <http://www.valmet-automotive.com/automotive/bulletin.nsf/PFBD/F9C6CF123F916877C22576D6004558B6?opendocument>>

/27/ Valtanen, Esko 2009. Tekniikan taulukkokirja. s.954-955.



* only in C-filter
 ** 2 pcs in C-filter
 1 pc in H-filter

| | | | | | | | |
|-----------------------|--|----------|--|----------|--|-----------|--|
| Project | | Customer | | Doc. no. | | Cust. no. | |
| NX/FR5/FC/230 AND 600 | | TK | | Vacon Oy | | | |
| Title | | AK | | DOC | | 2.EFS | |
| MAIN CIRCUIT DIAGRAM | | RK | | Based on | | | |
| | | TK | | Prog. no | | Doc. no | |
| | | Vacon Oy | | dm 00002 | | Revision | |
| | | | | | | C | |
| | | | | | | Sheet | |
| | | | | | | 1 | |
| | | | | | | Loc. | |
| | | | | | | Object | |
| | | | | | | + | |
| | | | | | | - | |

| valmistaja/ myyjä | malli | akku- tyyppi | jännite V | Ah | paino kg | hinta kpl | tilavuus l | haluttu jännite V | energia kWh | paino kg | hinta € | tilavuus l yht | jännite V | Energiatehveys Wh/kg |
|--------------------------------------|--------------------|-----------------|--------------|------|-------------|--------------|---------------|-------------------------|----------------|-------------|------------|-------------------|-----------|-------------------------|
| | | | kpl | kpl | kpl | kpl | kpl | 320 | yht | yht | € | yht | | Wh/kg |
| Thunder Sky | TS-LFP40AHA | LFP | 3,2 | 40 | 1,5 | 30,36 | 1,01 | | 100 | 150 | 3 036,00 | 101 | 320 | 126,73 |
| K2 Energy | LFP200ES | LFP | 12,8 | 16 | 1,72 | 197,68 | 1,50 | | 25 | 43 | 4 942,00 | 38 | 320 | 136,53 |
| Sky Energy | SE40AHA | LFP | 3,2 | 40 | 1,5 | 31,74 | 0,99 | | 100 | 150 | 3 174,00 | 99 | 320 | 129,66 |
| batteryspace | 51,2 V .6,8Ah | LFP | 51,2 | 6,8 | 3,43 | 314,61 | 2,70 | | 6 | 21 | 1 887,63 | 16 | 307,2 | 129,09 |
| batteryspace | 51,2 V 13,6Ah | LFP | 51,2 | 13,6 | 6,62 | 473,31 | 4,17 | | 6 | 40 | 2 839,83 | 25 | 307,2 | 166,88 |
| optibit | 36 V 500 Wh | LFP | 39,6 | 14 | 6,2 | 1 050,00 | 5,37 | | 8 | 50 | 8 400,00 | 43 | 316,8 | 103,32 |
| optibit | 48 V 720 Wh | LFP | 52,8 | 14 | 8,2 | 1 400,00 | 6,86 | | 6 | 49 | 8 400,00 | 41 | 316,8 | 107,81 |
| optibit | 24 V 720 Wh | LFP | 26,4 | 28 | 8,2 | 1 310,00 | 6,86 | | 12 | 98 | 15 720,00 | 82 | 316,8 | 107,81 |
| optibit | 36 V 1000 Wh | LFP | 39,6 | 28 | 12,5 | 1 980,00 | 10,73 | | 8 | 100 | 15 840,00 | 86 | 316,8 | 103,32 |
| optibit | 48 V 1450 Wh | LFP | 52,8 | 28 | 16,8 | 2 640,00 | 13,71 | | 6 | 101 | 15 840,00 | 82 | 316,8 | 107,81 |
| FreeInternational... | Prismatic LIF 20AH | LFP | 3,2 | 20 | 0,69 | - | 0,51 | | 100 | 69 | - | 51 | 320 | 125,00 |
| batteryspace | Prismatic 20 Ah | LFP | 3,2 | 20 | 0,734 | 31,02 | 0,46 | | 100 | 73 | 3 102,24 | 46 | 320 | 139,49 |
| U-Charge | U1-12XP | LFMP | 12,8 | 40 | 6,5 | - | 4,72 | | 25 | 163 | - | 118 | 320 | 108,41 |
| DealExtreme | | LiPo | 11,1 | 2,4 | 0,169 | 15,21 | 0,07 | | 28 | 4,7 | 426,01 | 2,0 | 310,8 | 367,04 |
| electricMotorsport | BP10-12 | AGM | 12 | 10 | 3,3 | 24,15 | 1,10 | | 26 | 86 | 627,90 | 29 | 312 | 109,16 |
| electricMotorsport | BP12-12 | AGM | 12 | 12 | 4,03 | 31,05 | 1,39 | | 26 | 105 | 807,30 | 36 | 312 | 103,52 |

Liite 3

Mittauspöytäkirja Sähkömopoauton moottori ja taajuusmuuttaja

Välityssuhde

vakioarvot/lasketut

mittausarvot

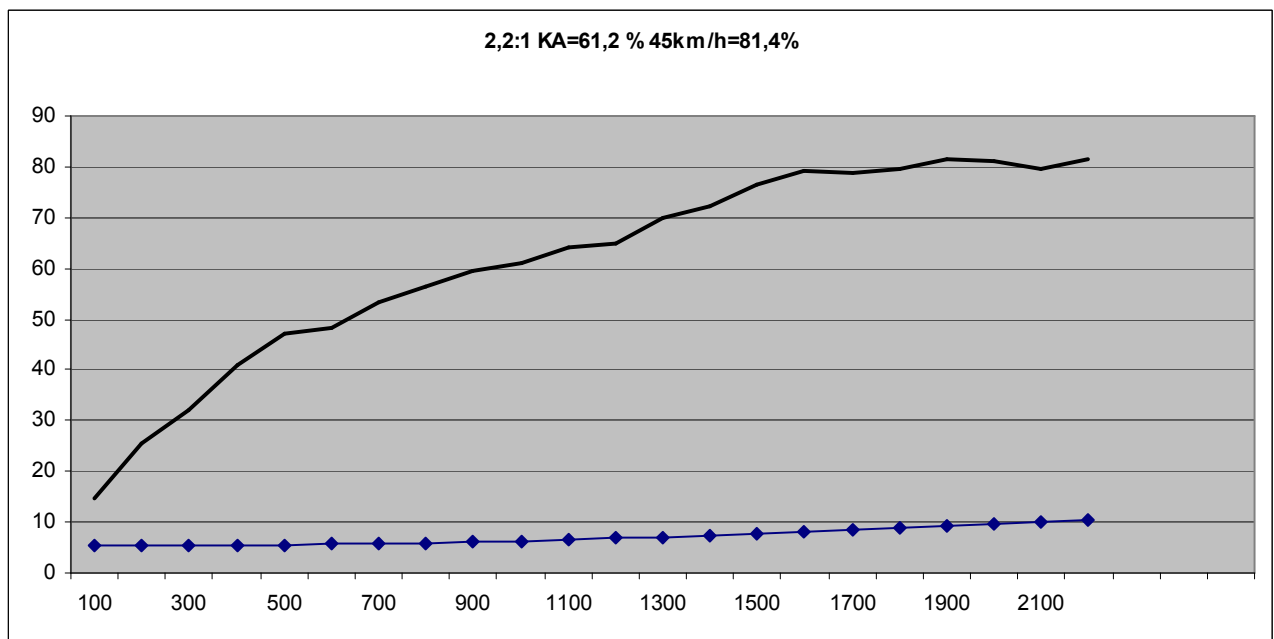
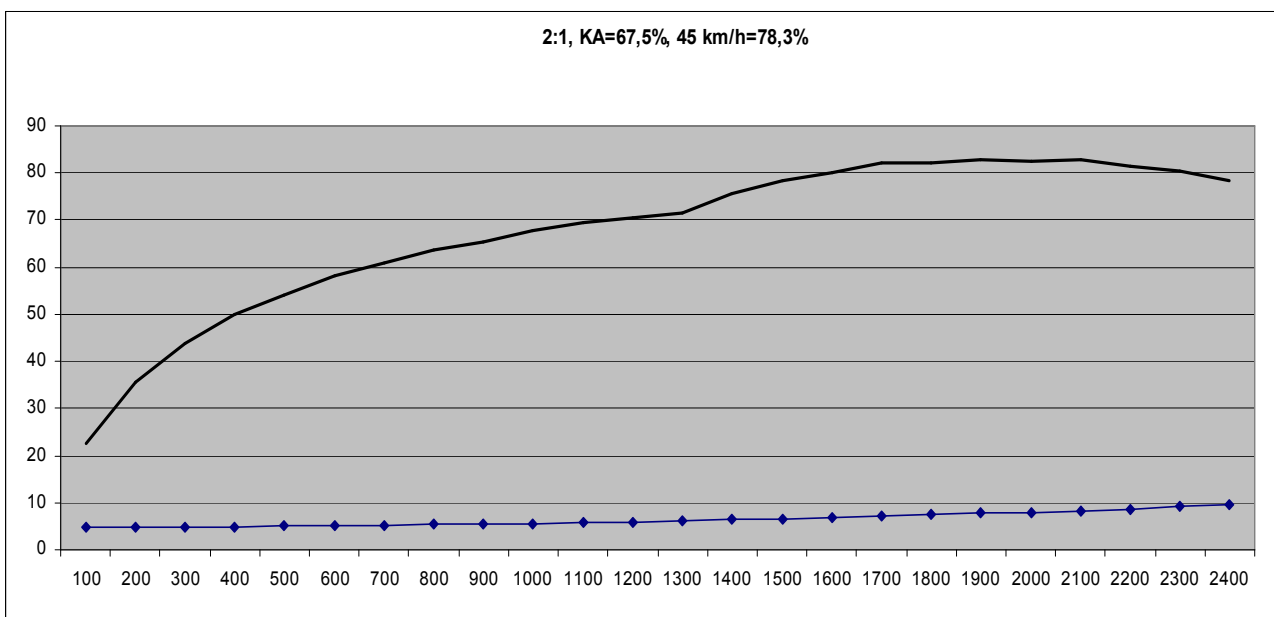
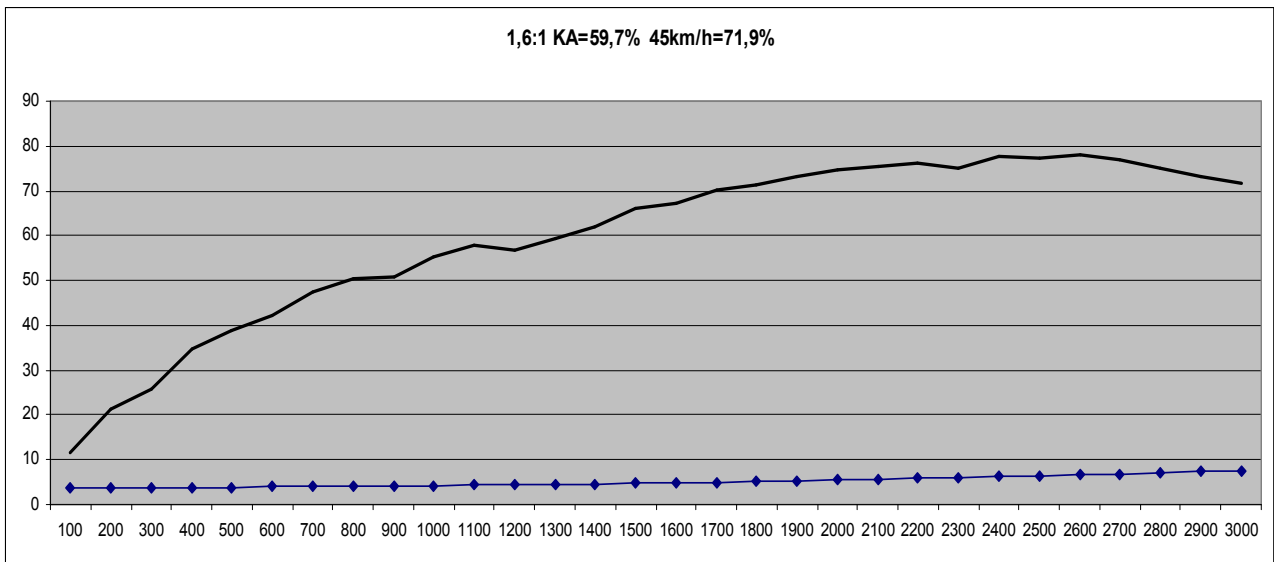
Lasketut arvot mitatuista

2 :1

paino
600 kg

| nopeus | | Vasta- momentti | Välipiiri | | | | pt100 (PD) | | Käytön! | Moottorin |
|--------|------|--------------------|-----------|---------|-----------|------|------------|------------|---------|-----------|
| rpm | km/h | | Virta | Jännite | Keskiarvo | Ylin | Hyötysuhde | akseliteho | | |
| 100 | 1,9 | 4,8 | 0,83 | 310,7 | | | | 19,55 | 0,05 | |
| 200 | 3,7 | 4,8 | 1,04 | 309,4 | | | | 31,49 | 0,10 | |
| 300 | 5,6 | 4,9 | 1,25 | 307,7 | | | | 39,84 | 0,15 | |
| 400 | 7,4 | 4,9 | 1,45 | 307,1 | | | | 46,41 | 0,21 | |
| 500 | 9,3 | 5,0 | 1,67 | 306,1 | 52,3 | 53,3 | | 51,28 | 0,26 | |
| 600 | 11,1 | 5,1 | 1,91 | 305,4 | | | | 54,89 | 0,32 | |
| 700 | 13,0 | 5,2 | 2,14 | 304,5 | | | | 58,50 | 0,38 | |
| 800 | 14,8 | 5,3 | 2,41 | 303,4 | | | | 60,97 | 0,45 | |
| 900 | 16,7 | 5,5 | 2,70 | 302,5 | | | | 62,99 | 0,51 | |
| 1000 | 18,5 | 5,6 | 2,94 | 307,9 | 51,8 | 52,7 | | 64,92 | 0,59 | |
| 1100 | 20,4 | 5,8 | 3,28 | 306,7 | | | | 66,20 | 0,67 | |
| 1200 | 22,2 | 6,0 | 3,62 | 305,5 | | | | 67,80 | 0,75 | |
| 1300 | 24,1 | 6,2 | 3,84 | 304,2 | | | | 71,88 | 0,84 | |
| 1400 | 25,9 | 6,4 | 4,11 | 303,3 | | | | 75,10 | 0,94 | |
| 1500 | 27,8 | 6,6 | 4,35 | 302,8 | 47,2 | 47,7 | | 78,94 | 1,04 | |
| 1600 | 29,6 | 6,9 | 4,70 | 300,2 | | | | 81,58 | 1,15 | |
| 1700 | 31,5 | 7,1 | 5,10 | 299,2 | | | | 83,25 | 1,27 | |
| 1800 | 33,3 | 7,4 | 5,60 | 298,1 | | | | 83,76 | 1,40 | |
| 1900 | 35,2 | 7,7 | 6,14 | 296,6 | | | | 84,31 | 1,54 | |
| 2000 | 37,0 | 8,0 | 6,70 | 295,1 | 50,5 | 51 | | 85,07 | 1,68 | |
| 2100 | 38,9 | 8,4 | 7,51 | 293,0 | | | | 83,57 | 1,84 | |
| 2200 | 40,7 | 8,7 | 8,38 | 290,5 | | | | 82,42 | 2,01 | |
| 2300 | 42,6 | 9,1 | 9,37 | 287,4 | | | | 81,14 | 2,18 | |
| 2400 | 44,4 | 9,5 | 10,79 | 283,6 | | | | 77,62 | 2,38 | |
| 2500 | 46,3 | 9,8 | 12,05 | 280,1 | | | | 76,37 | 2,58 | |
| | | | | | | | | | | |
| 2432 | 45,0 | 9,6 | 11,6 | 276,2 | 77,9 | 81,2 | | 76,31 | 2,44 | |

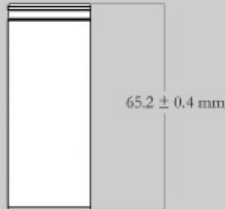
Liite 4



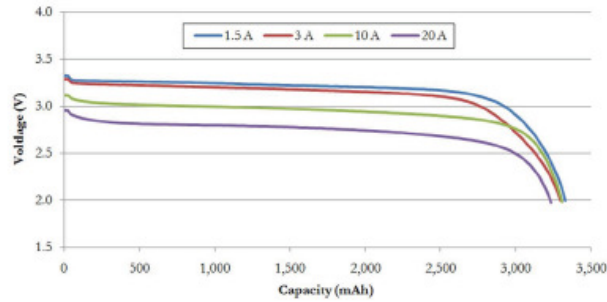


K2 Energy Solutions, Inc.

LFP26650EV Energy Cell Data Sheet



26650EV Voltage Curves at Different Discharge Rates



Specifications

| | |
|-------------------------------------|--------|
| Nominal Capacity@ C/5 (Ah) | 3.2 |
| Average Operating Voltage @ c/5 (V) | 3.2 |
| Internal Impedance @ 1kHz, AC (mΩ) | 19 |
| Weight (g) | 82 ± 2 |

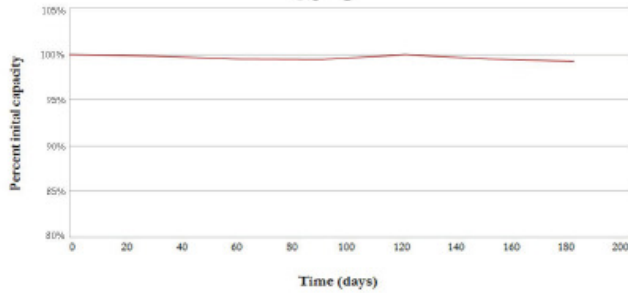
Recommended Operating Conditions

| | |
|--------------------------------|-------|
| Continuous Discharge (A) | ≤ 3.2 |
| Pulse Discharge (A) 30 Seconds | 13 |
| Charge Current (A) | ≤ 1.6 |
| Charge Voltage Cutoff (V) | 3.65 |
| Discharge Voltage Cutoff (V) | 2.50 |
| High Operating Temp (°C) | 60 |
| Low Operating Temp (°C) | -20 |

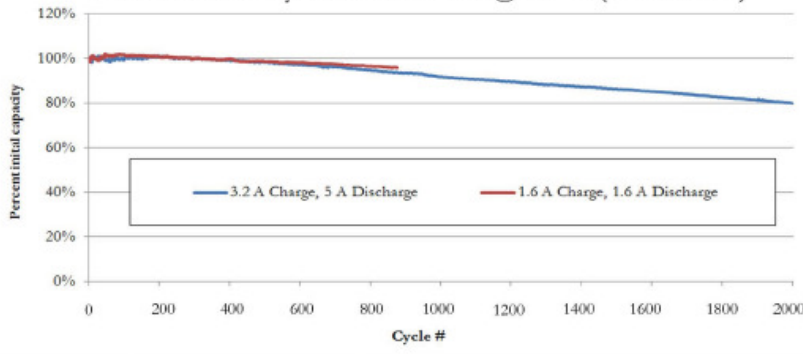
Maximum Operating Conditions

| | |
|--------------------------------|-----|
| Continuous Discharge (A) | 12 |
| Pulse Discharge (A) 30 Seconds | 28 |
| Charge Current (A) | 3.2 |
| Charge Voltage Cutoff (V) | 4.1 |
| Discharge Voltage Cutoff (V) | 2.0 |

26650EV on Float @3.65V
23°C

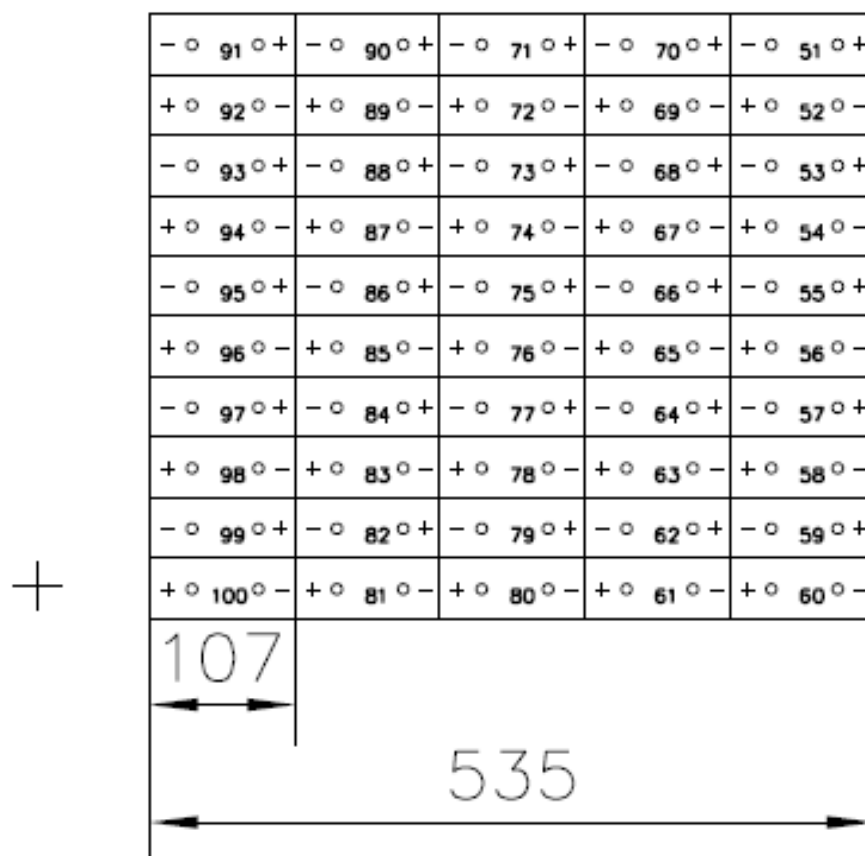
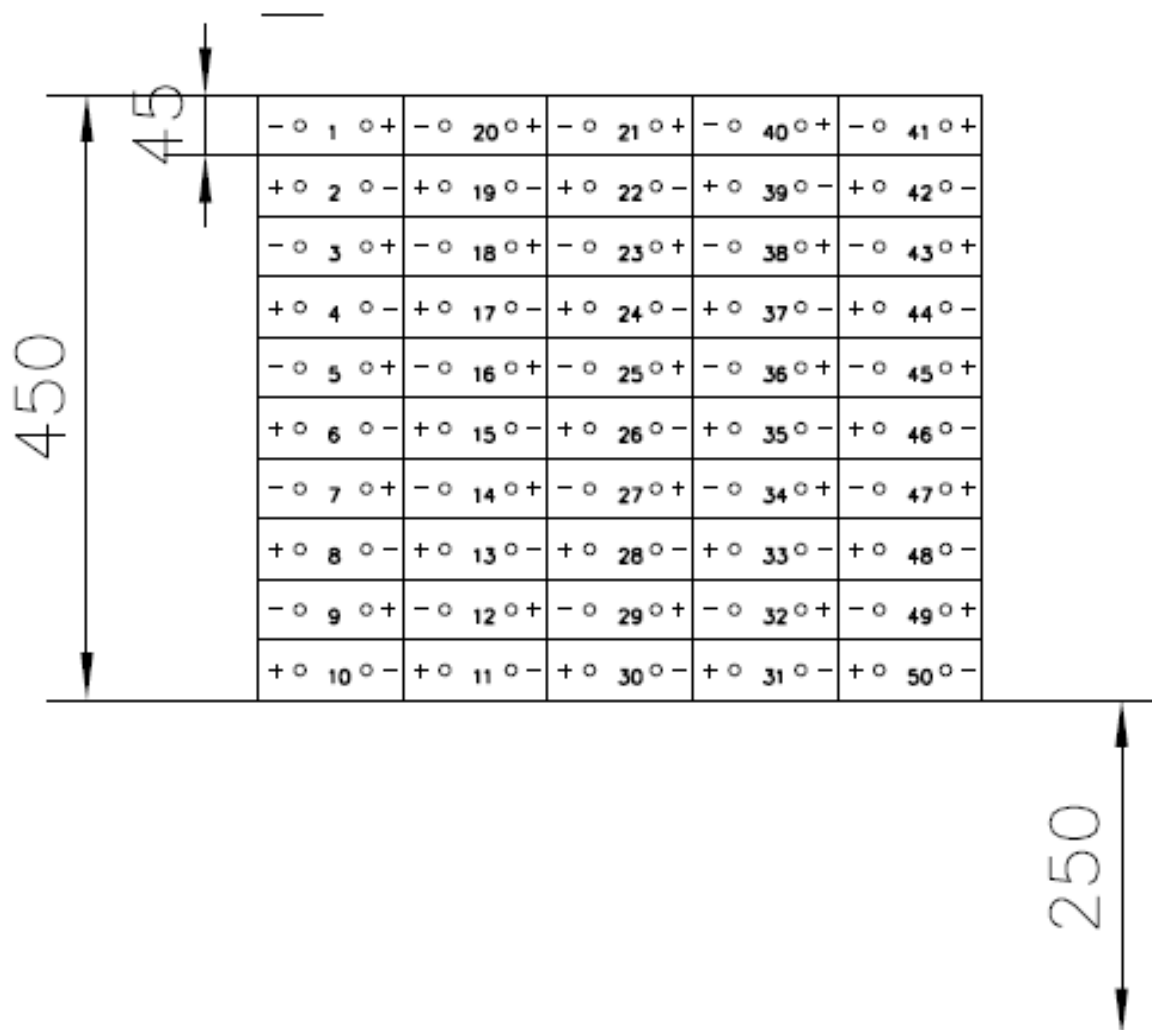


26650EV Life Cycle Performance @ 23° C (100% DoD)



K2 Energy Solutions, Inc.
 1125 American Pacific Drive, Suite C
 Henderson, NV 89074
 (702) 478-3590
 www.k2battery.com

*Performance may vary depending on application
 All specifications and operation conditions are subject to change without notice
 This data is for evaluation purposes only. No guarantee is intended or implied by this data
 Rev.1208*



VIERINTÄVASTUS

$$m := 600$$

Auton massa

$$g := 9.81$$

Painovoima

$$\mu_R := 0.015$$

Vierintäkitka (auton rengas asfaltilla 0,01...0,02)

$$F_N := m \cdot g$$

normaalivoima pintaa vastaan

$$F_R := \mu_R \cdot F_N$$

Vierintävastusvoima

$$F_R = 88.29$$

ILMANVASTUS

$$\rho := 1.225$$

 ρ =ilman tiheys (Lämpötilassa 15 C, normaalipaine)

$$A := 1.530 \cdot 1.330 \cdot 0.9$$

A=etupinta-ala

$$A = 1.831$$

$$v_{\max} := \frac{45}{3.6}$$

Km/h -> m/s

$$v_{\max} = 12.5 \quad v_{\max} = \text{nopeus (m/s)}$$

$$C_v := 0.50$$

 C_v =vastuskerroin (muotokerroin kulmikas auto 0,4...0,55)

$$F_v := C_v \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_{\max}^2$$

$$F_v = 87.636$$

ilmanvastus nopeudelle 45 km/h

VIERINTÄVASTUS + ILMANVASTUS

$$F_{\max} := F_R + F_v$$

$$F_{\max} = 175.926$$

kokonaisvastus nopeudelle 45 km/h

VASTAVOIMAT NOPEUDEN FUNKTIONA m/s

$$F(v) := F_R + C_v \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$$

$$v := 0, 0.01 \dots v_{\max} \quad \text{auton nopeus } 0 \dots 12.5 \text{ m/s}$$

Nousukulma asteina

$$\text{aste1} := 1 \cdot \text{deg}$$

$$\text{aste2} := 2 \cdot \text{deg}$$

$$\text{aste3} := 3 \cdot \text{deg}$$

nousukulma prosentteina

$$\text{atan}(\text{aste1}) = 1.745 \cdot \%$$

$$\text{atan}(\text{aste2}) = 3.489 \cdot \%$$

$$\text{atan}(\text{aste3}) = 5.231 \cdot \%$$

Vastavoimat + kaltevuuden aiheuttama painovoiman vaikutus

$$F_{\text{nousukulma1}}(v) := C_v \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 + m \cdot g \cdot \sin(\text{aste1}) + \mu_R \cdot m \cdot g \cdot \cos(\text{aste1})$$

$$F_{\text{nousukulma2}}(v) := C_v \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 + m \cdot g \cdot \sin(\text{aste2}) + \mu_R \cdot m \cdot g \cdot \cos(\text{aste2})$$

$$F_{\text{nousukulma3}}(v) := C_v \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 + m \cdot g \cdot \sin(\text{aste3}) + \mu_R \cdot m \cdot g \cdot \cos(\text{aste3})$$

Nopeus renkaalta moottorille

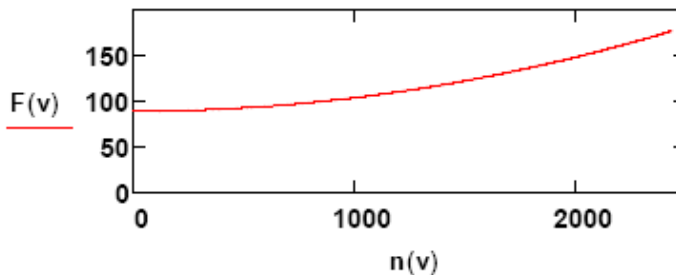
$$d_p := 0.54 \quad \text{renkaan halkaisija}$$

$$\mu_T := \frac{1}{11} \quad \text{tasauspyörästön suhde (vakio)}$$

$$\mu_H := 2 \quad \text{hammashihnan suhde (tähän valitaan sopiva suhde)}$$

$$n(v) := \frac{v \cdot 60}{\pi \cdot d_p \cdot \mu_T \cdot \mu_H} \quad \text{m/s} \rightarrow \text{rpm}$$

VASTAVOIMAT MOOTTORIN PYÖRIMISNOPEUDEN FUNKTIONA



$$n_{\text{max}} := \frac{v_{\text{max}} \cdot 60}{(\pi \cdot d_p \cdot \mu_T \cdot \mu_H)}$$

$$n_{\text{max}} = 2.432 \times 10^3 \quad \text{moottorin pyörimisnopeus auton nopeuden ollessa 45 km/h (tasaisessa maastossa)}$$

VASTAMOMENTTI

$$\eta_1 := 0.94 \quad \text{tasauspyörästön hyötysuhde}$$

$$\eta_2 := 0.96 \quad \text{hammashihnan hyötysuhde}$$

$$M_v(v) := \frac{\mu_T \cdot \mu_H}{\eta_1 \cdot \eta_2} \cdot F(v) \cdot \frac{d_p}{2}$$

$$M_{v_1}(v) := \frac{\mu_T \cdot \mu_H}{\eta_1 \cdot \eta_2} \cdot F_{\text{nousukulma1}}(v) \cdot \frac{d_p}{2}$$

$$M_{v_2}(v) := \frac{\mu_T \cdot \mu_H}{\eta_1 \cdot \eta_2} \cdot F_{\text{nousukulma2}}(v) \cdot \frac{d_p}{2}$$

$$M_{v_3}(v) := \frac{\mu_T \cdot \mu_H}{\eta_1 \cdot \eta_2} \cdot F_{\text{nousukulma3}}(v) \cdot \frac{d_p}{2}$$

$$P_N := 4000 \quad \text{moottorin teho}$$

$$n_N := 1425 \quad \text{Moottorin nimellisnopeus}$$

$$M_N := \frac{P_N}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_N}{60}} \quad \text{Moottorin nimellismomentti}$$

$$M_N = 26.805$$

$$M_{\max} := 52 \quad \text{Moottorin maksimimomentti}$$

$$v_N := \pi \cdot d_p \cdot \mu_T \cdot \mu_H \cdot \frac{n_N}{60} \quad \text{Moottorin nimellisnopeus rpm} \rightarrow \text{auton vauhti m/s}$$

$$v_{N\max} := \pi \cdot d_p \cdot \mu_T \cdot \mu_H \cdot \frac{1370}{60} \quad \text{Raja mistä maksimimomentti lähtee laskemaan kentänheikennysalueella (arvio... ei mitattul)}$$

Moottorin rajoittama maksimimomentti (vastaa ABB:n DriveSizen arvoja) maksimimomentin määrää kippausvaara

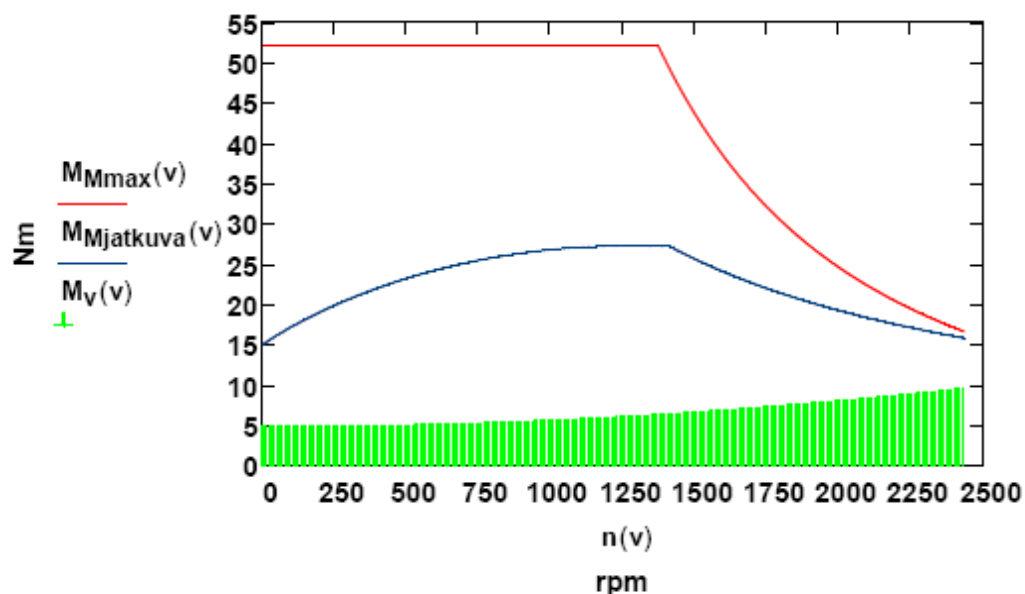
$$M_{M\max}(v) := M_{\max} \cdot (0 \leq v \leq v_{N\max}) + M_{\max} \cdot \left(\frac{v_{N\max}}{v}\right)^2 \cdot (v_{N\max} \leq v)$$

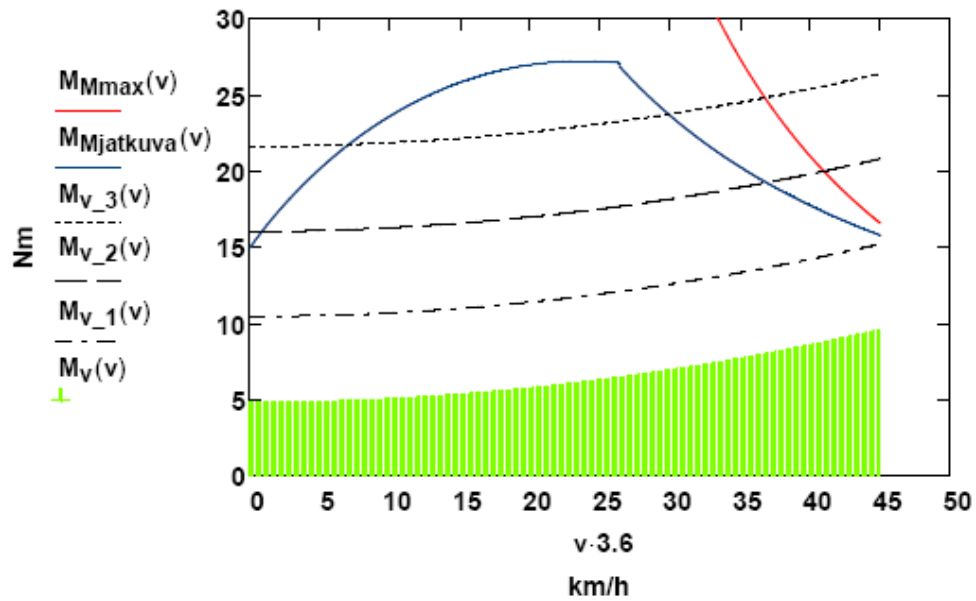
jatkuva kuormitus... lisättynä puhaltimen vaikutus pienillä nopeuksilla.

$$M_{M\text{jatkuva}}(v) := \left[M_N \cdot \left(\frac{v+3}{v_N+2.4} \cdot 1.8 \right) - (v)^{1.6} \right] \cdot (0 \leq v \leq v_N) + M_N \cdot \left(\frac{v_N}{v} \right) \cdot (v_N \leq v)$$

Jatkuva kuormitus, jonka mukaan sähkömopoauton momentti on rajoitettu

$$M_{M\text{jatkuva2}}(v) := M_N \cdot \left(\frac{v+13}{v_N+13} \right) \cdot (0 \leq v \leq v_N) + M_N \cdot \left(\frac{v_N}{v} \right) \cdot (v_N \leq v)$$



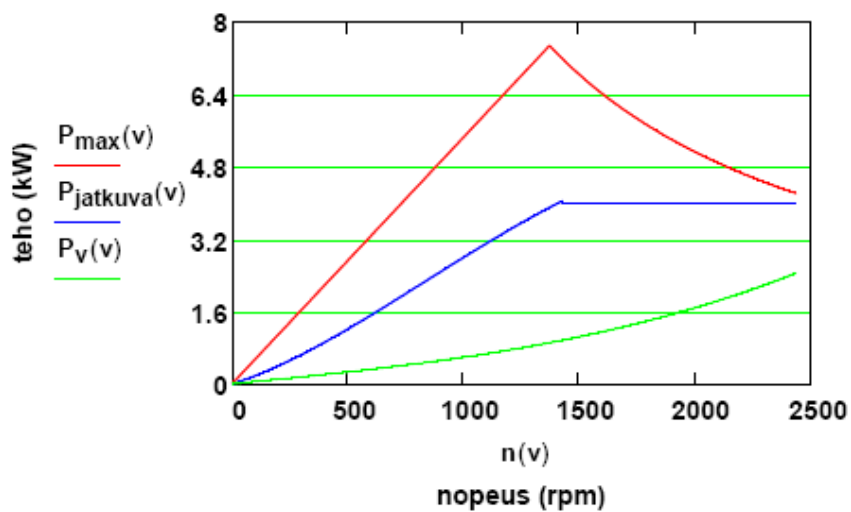


- Maksimiteho eri kierrosnopeuksilla (rajoittavana tekijänä maksimimomentti)
- Jatkuva teho (rajoittavana tekijänä lämpeneminen)
- Vastavoimien voittamiseen vaadittava teho

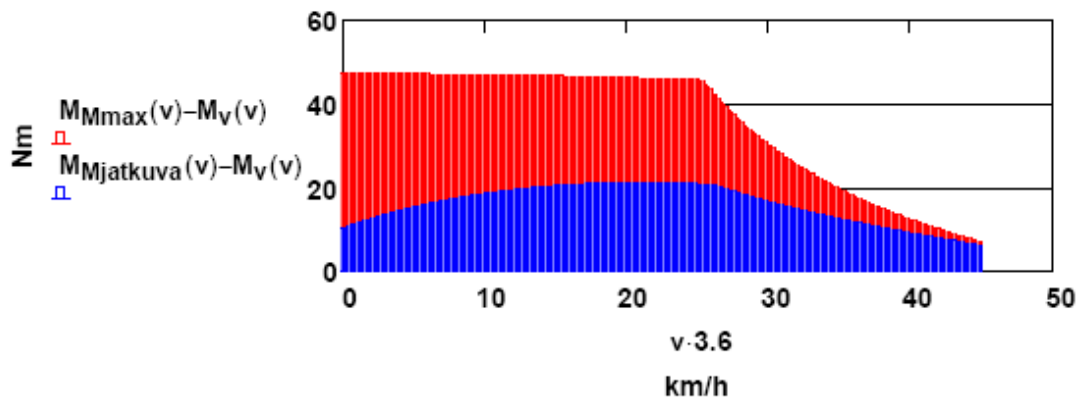
$$P_{max}(v) := \frac{M_{Mmax}(v) \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{n(v)}{60}}{1000}$$

$$P_{jatkuva}(v) := \frac{M_{Mjatkuva}(v) \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{n(v)}{60}}{1000}$$

$$P_V(v) := \frac{M_V(v) \cdot 2 \pi \cdot \frac{n(v)}{60}}{1000}$$



Kiihdytykseen käytössä oleva momentti eri nopeuksilla (tasaisessa maastossa)



Kiihdytysaika

Auton ja renkaiden hitausmomentti

Renkaan paino kg

$$m_{\text{rengas}} := 7$$

Mopoauton kokonais hitausmomentti=Liike-energia/Kulmanopeus + pyörien hitausmomentti ($J = EK/\omega^2 + J_t$)

$$J_1 := \frac{1}{\eta_1 \cdot \eta_2} \cdot \frac{600 \cdot v_{\text{max}}^2}{\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{\text{max}}}{60}\right)^2}$$

$$J_1 = 1.602 \quad \text{Moottorille redusoitu hitausmomentti}$$

$$J_2 := 0.01 \quad \text{Moottorin roottorin hitausmomentti}$$

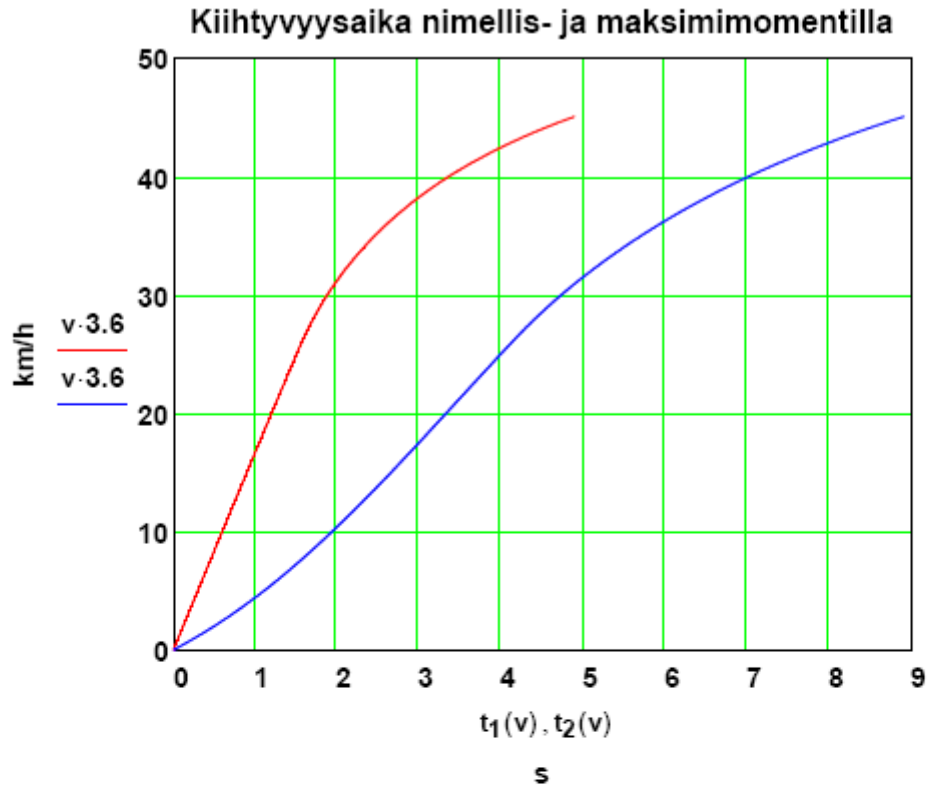
$$J_{\omega\omega} := J_1 + J_2 \quad \text{Kokonaishitausmomentti}$$

Aika mikä kestää kiihtyä moottorin momenttirajoja vastaan 0-45 km/h

$$t_1(v) := J \cdot 2 \cdot \pi \cdot \int_0^v (M_{M\text{max}}(v) - M_v(v))^{-1} dv$$

Aika mikä kestää kiihtyä asetettuja momenttirajoja vastaan 0-45 km/h

$$t_2(v) := J \cdot 2 \cdot \pi \cdot \int_0^v (M_{M\text{jatkuva}}(v) - M_v(v))^{-1} dv$$



Dieselmootorin teho- ja momenttikäyrä mopoauton maahantuojalta saatuna

| | | | | | |
|-----------------------------|---|----------|---|-----------------------------|---|
| $M_{\text{diesel}}(n_d) :=$ | <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px; display: inline-block;"> 11.1 13.4 13.9 14.6 15 14.9 14.8 12.7 12.4 12.3 12.1 11.6 </div> | $n_d :=$ | <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px; display: inline-block;"> 1000 1450 1800 2150 2200 2300 2500 2850 3100 3150 3200 3250 </div> | $P_{\text{diesel}}(n_d) :=$ | <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px; display: inline-block;"> 1.16 2.02 2.61 3.27 3.46 3.59 3.87 3.79 4.03 4.06 4.05 3.95 </div> |
|-----------------------------|---|----------|---|-----------------------------|---|

