

Tatu Makkonen

Kuorma-auton muunnoshybridijärjestelmän suunnittelun pääkohdat

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

30.10.2017

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Tatu Makkonen Kuorma-auton muunnoshybridijärjestelmän suunnittelun pääkohdat 29 sivua + 2 liitettä 30.10.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Autosähkötekniikka
Ohjaaja(t)	Lehtori Vesa Linja-aho
<p>Tiukentuvat päästörajoitukset sekä ilmastonmuutoksen herättämä yleinen kiinnostus ympäristönsuojeluun ovat lisänneet kysyntää vaihtoehtoisille polttoaineille ajoneuvomarkkinoilla. Hybriditeknologia on jo useita vuosia ollut saatavilla henkilöautoihin, mutta raskaaseen kalustoon sitä ei ole vielä juuri tarjolla. Eräänä ratkaisuna voisi toimia jälkiasenteinen muunnoshybridijärjestelmä nykyisiin kuorma-autoihin.</p> <p>Tämän insinööriyön tavoitteena oli selvittää, mitä kuorma-autoon asennettavan, sähkökäyttöisen liikkeellelähtö- ja kiihdytysavustimen suunnittelussa on otettava huomioon. Mitkä ovat järjestelmän pääkomponentit, ja mitkä asiat vaikuttavat niiden valintaan? Selvitettäviä kohteita tarkasteltiin lähtökohtaisesti oletuksella, että järjestelmä ei olisi mekaanisesti yhteyksissä ajoneuvon perinteiseen voimalinjaan, vaan se asennettaisiin omalle akselille. Se siis toimisi erillisenä yksikkönä avustaen auton omaa polttomoottoria, tavoitteena polttoainekulutuksen ja päästöjen pienentäminen.</p> <p>Työssä määritettiin vaatimukset järjestelmän ohjaukselle ja valvonnalle, jotta se toimisi mahdollisimman energiatehokkaasti ja siitä saisi parhaan hyödyn. Lisäksi vertailtiin perinteisten akkukennojen ja superkondensaattoreiden keskeisiä eroavaisuuksia sekä niiden toimivuutta järjestelmän energiavarastona.</p> <p>Työn tarkoituksena oli luoda pohja tarkemmalle suunnittelutyölle ja kustannusarvioiden laskennalle sekä selvittää, olisiko järjestelmää mahdollista valmistaa Suomen tieliikenteeseen ja millä rajoituksilla.</p> <p>Tuloksena saatiin hyvä ja laaja yleiskuva järjestelmän vaatimuksista sekä vahvistus sille, että järjestelmän olisi Suomessa tieliikennelain mukainen. Lisäksi saatiin hyvä käsitys superkondensaattoreiden käyttömahdollisuudesta tällaisessa järjestelmässä.</p>	
Avainsanat	Hybridi, sähköhybridi, superkondensaattori, kuorma-auto

Author(s) Title	Tatu Makkonen Main Points of Designing a Hybrid Conversion System for a Truck
Number of Pages Date	29 pages + 2 appendices 30 October 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Specialisation option	Automotive Electronics Engineering
Instructor(s)	Vesa Linja-aho, Senior Lecturer
<p>Tightening emission limits for vehicles and increased common interest in environmental protection, caused by the climate change, has boosted the demand for additional fuels in the automotive industry. Already for several years, the hybrid technology has been available for passenger cars but not much for the heavy-duty vehicles yet. An aftermarket electric-hybrid conversion system for today's trucks could work well as one solution.</p> <p>The objective of this thesis was to clarify what has to be taken into consideration when designing an electrical launch and acceleration assist system that could be installed into a truck, what the main components of the system are, and what the criteria for choosing them are. These questions were studied mainly with the assumption that the system would not be mechanically connected to the traditional powertrain of the vehicle, but it would be installed to an independent axle of the vehicle instead. In consequence, it would work as a separate unit assisting the truck's own engine aiming to lower the fuel consumption and emissions of the vehicle.</p> <p>The standards for the control and for the supervision of the system were determined in order to find out, if the system would work as energy efficiently as possible and that the gained benefit would also be as high as possible. The differences between conventional battery cells and supercapacitors, and their ability to act as an energy storage system of the vehicle, were additionally compared.</p> <p>The goal of this thesis was to create a basis for more precise designing of the system and for the calculations of the system costs together with finding out if it is possible to manufacture a road legal system, and to find out what restrictions there would be for the system regarding the Finnish law.</p> <p>A good and broad overview of the systems requirements, and a confirmation that the system would be road-legal in Finland was carried out as a result. In addition, a good understanding of the usability of supercapacitors in this kind of system was gained.</p>	
Keywords	Hybrid, electric-hybrid, supercapacitor, truck

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Olemassa olevat hybridijärjestelmät kuorma-autoihin	2
2.1	Volvo Concept Truck	2
2.2	Adgero UltraBoost	3
2.3	Sisu Auto & Visedo	5
3	Järjestelmän pääpiirteiden määrittäminen	6
4	Pääkomponentit	7
4.1	Sähkömoottori	7
4.2	Järjestelmän ohjaus	9
4.3	Energiavarasto	10
4.3.1	Akusto	10
4.3.2	Superkondensaattorit	15
4.4	Voimansiirto	19
5	Ohjelmointistrategiat	20
6	Rekisteröintivaatimukset Suomen tieliikenteeseen	23
7	Yhteenveto	25
	Lähteet	27

Liitteet

Liite 1. Sevcon Gen4 Size 8 -moottorinohjaimen datalehti

Liite 2. Maxwell 125V -superkondensaattorimoduulin datalehti

Lyhenteet ja käsitteet

AC	Alternating Current. Vaihtovirta.
BMS	Battery Management System. Akustonhallintajärjestelmä, joka valvoo akuston kennojen jännitetasoja, lämpötiloja sekä lataus- ja purkuvirtoja.
CAN	Controller Area Network. Tiedonsiirtoväylä, jonka välityksellä siirretään tietoa ohjainlaitteiden välillä.
DC	Direct Current. Tasavirta.
ETA	Euroopan talousalue.
Hybridi	Kahdella eri käyttövoimalla toimiva ajoneuvo. Yleisin versio sähköhybridi eli polttomoottorilla ja sähkömoottorilla varustettu ajoneuvo.
Invertteri	Taajuusmuuttaja, jolla muutetaan akuston DC-jännite moottorille sopivaksi AC-jännitteeksi. Taajuutta ja virtaa muuttamalla ohjataan sähkömoottoria.
Regenerointi	Jarrutusenergian talteenotto, jossa sähkömoottori toimii generaattorina muuttaen ajoneuvon kineettisen energian sähköenergiaksi.
SOC	State of Charge. Akuston varaustila.
Superkondensaattori	Kondensaattori, johon voidaan varastoida normaalia kondensaattoria selvästi suurempi määrä energiaa.

1 Johdanto

Tiukkenevat päästörajoitukset pakottavat autovalmistajat kehittämään olemassa olevaa polttomoottoritekniikkaa sekä valmistamaan uusia pakokaasujen puhdistusmenetelmiä, jotta päästöjä saadaan pienennettyä. Myös maapallon öljyvarojen hupeneminen, sekä kuluttajien vaatimukset polttoaineen kulutuksen pienentämisestä luo lisäpainetta ajoneuvovalmistajille jatkuvaan kehitystyöhön. Sähköajoneuvojen korkea hankintahinta sekä akkuteknologian vuoksi vielä varsin rajallinen toimintasäde ja latausajan pituus estävät toistaiseksi niitä korvaamasta perinteisiä polttomoottorikäyttöisiä ajoneuvoja. Kustannuksiltaan kohtuullisempi hybriditeknologia toimii hyvänä vaihtoehtona polttoainekulutuksen ja päästöjen pienentämiseksi, ennen kuin täyssähköajoneuvot tai mahdollisesti jokin muu teknologia kehitty kuluttajille saatavammiksi.

Kuorma-autoihin hybriditeknologiaa ei vielä ole juuri kaupallisesti tarjolla, mutta todennäköisesti lähivuosina tilanne on toinen. Järjestelmiä jatkuvasti kuitenkin suunnitellaan myös kyseiselle ajoneuvoryhmälle. Esimerkiksi Volvo on kehittänyt Euroopan ja Yhdysvaltojen markkinoille oman tutkielman hybridikuorma-autosta.

Raskaassa liikenteessä polttoaine on yksi merkittävä kustannuserä, ja olemassa olevien polttomoottoreiden kulutusta pienentäville ratkaisuille olisikin varmasti kysyntää myös maailmanlaajuisesti. Yhtenä vaihtoehtona voisi olla kuorma-autoon jälkikäteen asennettava, polttomoottoria liikkeellelähdoissä ja kiihdytyksissä avustava sähkökäyttöinen vetojärjestelmä.

Työn tavoitteena on selvittää, mitä kuorma-autoon jälkikäteen asennettavan sähköisen liikkeellelähtö- ja kiihdytysavustimen suunnittelussa on otettava huomioon ja onko järjestelmää mahdollista valmistaa Suomen tieliikenteeseen, sekä pohtia, millaisissa tapauksissa järjestelmästä olisi eniten hyötyä. Lisäksi vertaillaan perinteisten akkukennojen ja superkondensaattoreiden toimimista sähköenergiavarastoina kyseisessä järjestelmässä. Tämä työ tulee toimimaan pohjana tulevaisuudessa mahdollisen prototyypin suunnittelussa, joten tarkempia mitoituslaskuja, komponenttisuunnittelua tai kustannuslaskelmia ei vielä tehdä.

2 Olemassa olevat hybridijärjestelmät kuorma-autoihin

2.1 Volvo Concept Truck

Volvon kehittämä hybridikuorma-autotutkielma Euroopan markkinoille kantaa nimeä Volvo Concept Truck (kuva 1). Tällä valmistajan mukaan päästään jopa 30 % pienemmällä polttoaineenkulutuksella ja hiilidioksidipäästöillä. [1.]



Kuva 1. Volvo Concept Truck, joka on valmistajan tutkielma hybridikuorma-autosta pitkän matkan kuljetuksiin. Sähkömoottorin käytön optimisoinnin lisäksi auton suunnittelussa on panostettu aerodynamiikkaan, jolla on myös iso vaikutus polttoaineenkulutukseen. [1.]

Volvo on suunnitellut auton alusta alkaen hybridivoimajärjestelmälle pitkän matkan kuljetuksiin, tavoitteena pienentää polttoaineenkulutusta ja hiilidioksidipäästöjä mahdollisimman paljon. Autoon on kehitetty erityinen vakionopeudensäädin, joka ennakoii ajettavan reitin maastomuotoja ja ajonopeuksia GPS:n (Global Positioning System) ja Volvon oman tiekartastotietokannan avulla. Näin järjestelmä osaa optimoida poltto- ja sähkömoottorin käytön sekä pystyy pitämään keskinopeuden mahdollisimman korkealla. Jopa koko yhdistelmän aerodynamiikka on suunniteltu mahdollisimman pienen ilmanvastuksen aikaansaamiseksi. Yhdysvaltojen markkinoille suunnattu samanlainen tutkielma on nimeltään Volvo SuperTruck. [1.]

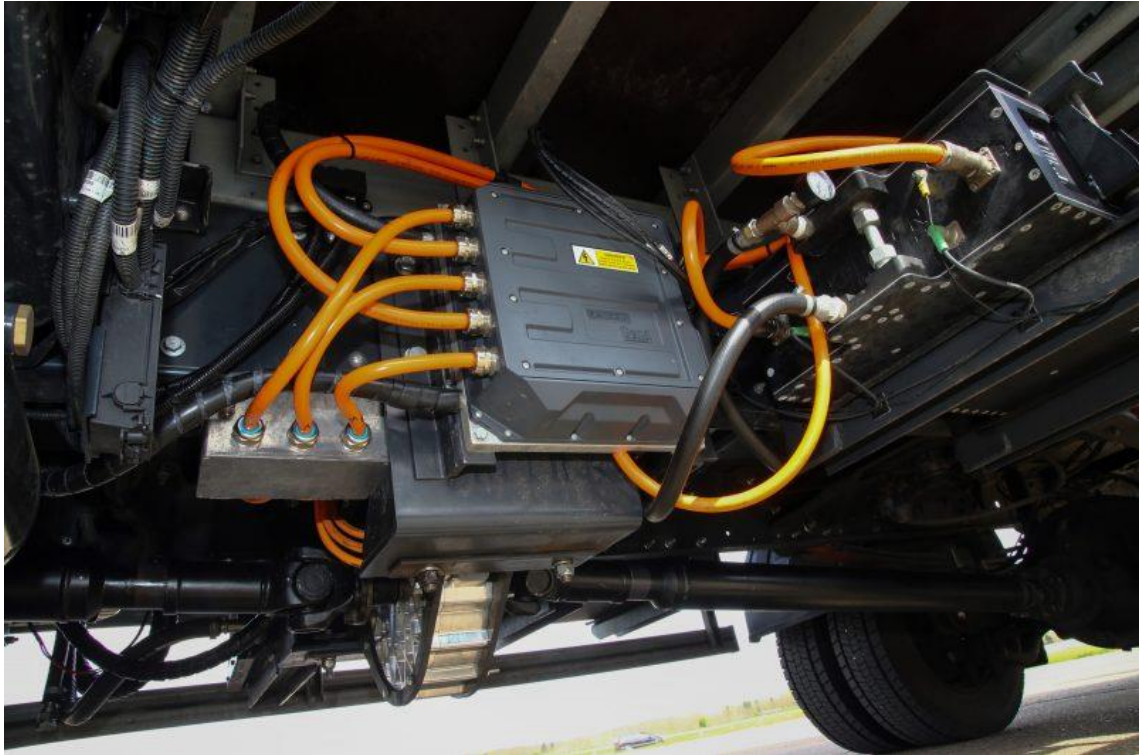
2.2 Adgero UltraBoost

Ranskalainen Adgero on tehnyt myös sähkömoottorilla toimivan jälkiasenteisen ajoavustimen kuorma-auton puoliperävaunun akselille (kuva 2), joka avustaa kuorma-auton omaa moottoria liikkeellelähdöissä ja kiihdytyksissä. Energiavarausta Adgero käyttää Skeleton Technologiesin superkondensaattorimoduuleja perinteisten akkukennojen sijasta, parantaen näin regeneroivalla jarrutuksella saatavan jarrutusenergian talteenottokykyä. [2.] YASA Limitedin valmistama sähkömoottori tuottaa vääntöä lyhyen kardaaniakselin välityksellä perävaunun keskimmäiselle akselille [3].



Kuva 2. Ranskalaisen Adgeron kuorma-auton puoliperävaunuun valmistama sähköinen voimalinja peilien kautta kuvattuna. Kuvan alareunassa näkyvät kaikki viisi superkondensaattorimoduulia, ja oik. ylhäällä sähkömoottori kytkettynä kardaaniakselin välityksellä perävaunun keskimmäiseen akseliin. [3.]

Järjestelmän ennustetaan pystyvän pienentämään polttoainekulutusta ja päästöjä jopa 25 %; järjestelmä on kuitenkin vasta testattavana englantilaisella kuljetusyhtiöllä, eikä tuloksia todellisesta hyödystä ole vielä julkaistu. [2; 4.] Arviot vaikuttavat mielestäni aika optimistisilta ottaen huomioon, että Volvo on suunnitellut oman konseptiautonsa jokaisen osa-alueen optimoidusti hybridijärjestelmälle. Tätä työtä kirjoitettaessa Adgero on poistanut nettisivuiltaan tarkempisisältöisen uutisensa tästä järjestelmästä.

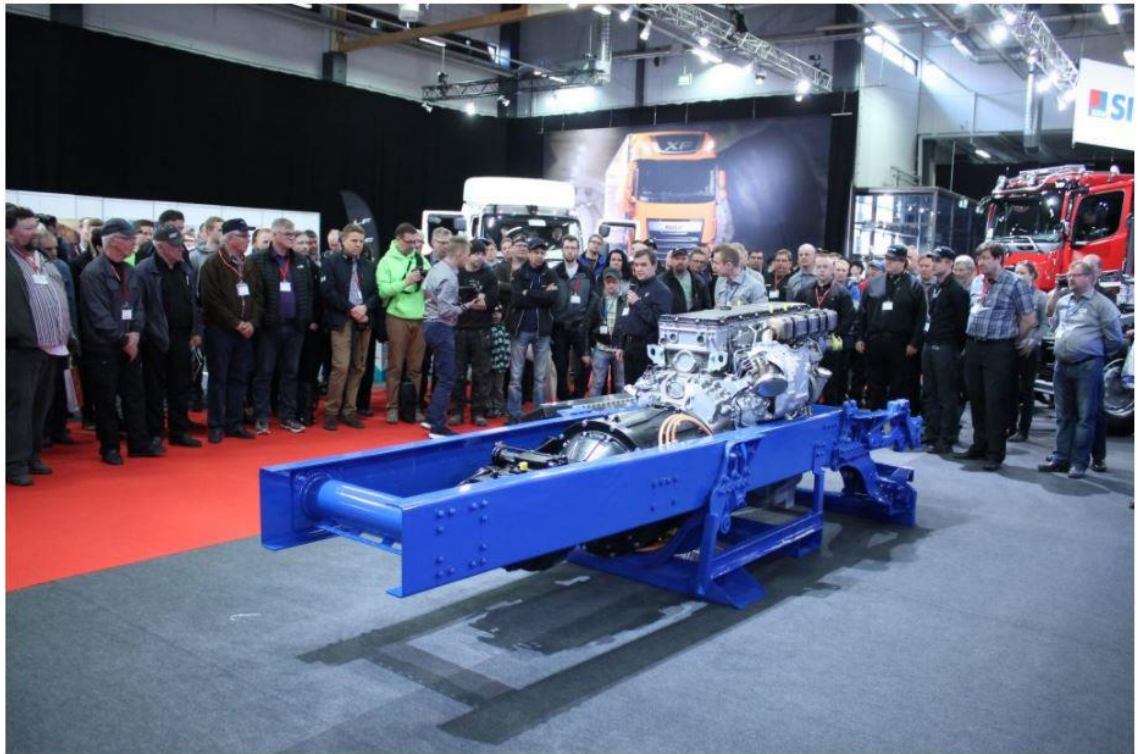


Kuva 3. Adgeron sähköisen voimalinjan toteutus kaksiakselisessa jakeluautossa. Sähkömoottori on asennettu kardaaaniakselin väliin. [5.]

Adgero on kehittänyt samanlaisen KERS (Kinetic Energy Recovery System) -järjestelmän, 12 000 kg painavaan, kaksiakseliseen jakeluautoon, joita käytetään kaupungeissa. Järjestelmässä käytetään samanlaisia superkondensaattorimoduuleja kuin heidän perävaunujärjestelmässäänkin. Kuvassa 3 on näkyvissä järjestelmän sähkömoottorin ja -ohjainten sijoittelu autoon. Auton kardaaaniakseli on jaettu kahteen osaan ja sähkömoottori asennettu näiden väliin. Kaupunkiajossa järjestelmästä on eniten hyötyä jatkuvien liikkeellelähtöjen ja pysähdysten takia. Adgero arvioi järjestelmän saavuttavan noin 15–30 %:n säästön polttoainekulutuksessa ja hiilidioksidipäästöissä. [6.]

2.3 Sisu Auto & Visedo

Suomessa on myös kehitetty hybridi kuorma-auto Oy Sisu Auto Ab:n ja Visedo Oy:n yhteistyönä. Kuvassa 4 on nähtävissä hyvin edellä mainittu hybridijärjestelmä Sisu-kuorma-auton rungon etuosan kanssa. Järjestelmässä polttomoottorin ja vaihteiston väliin asennettu sähkömoottori tuottaa lisävääntöä, kun polttomoottoria kuormitetaan reilusti, ja lataa energiavarausta kevyen kuormituksen ajossa ja jarrutuksissa. Moottorit tuottavat yhdessä järjestelmälle 850 kW:n huipputehon ja yli 5 000 Nm:n väännön. Sähköisessä voimalinjassa käytetään Visedo Oy:n kehittämää sähkömoottoria, ohjainlaitteita ja energiavarausta, jossa käytetään myös superkondensaattoreita. Tarkempia arvoja, kuinka paljon järjestelmä pienentää polttoaineenkulutusta ja päästöjä, ei ole ilmoitettu. [7.]



Kuva 4. Visedo Oy:n ja Oy Sisu Auto Ab:n yhteistyössä kehittämä hybridivoimalinja esillä kuorma-auton etuosan runkopalkkien kanssa. Sähkömoottori on asennettu moottorin ja vaihteiston väliin. Molempien moottoreiden tuottama vääntömomentti välittyy samaa akselia myöten vaihteistolle. [7.]

3 Järjestelmän pääpiirteiden määrittäminen

Sähköhybridiajoneuvossa perinteisen polttomoottorin lisäksi ajoneuvon liikuttamiseen tarvittavaa vääntöä tuotetaan yhdellä tai useammalla sähkömoottorilla. Tällöin polttomoottori voi olla tavanomaista pienempi, joka jo itsessään mahdollistaa pienemmän polttoaineenkulutuksen ja täten myös pienemmät hiilidioksidipäästöt. [8, s. 366.] Kun perinteiseen polttomoottoriajoneuvoon asennetaan jälkikäteen sähköinen voimansiirto, ei polttomoottoria ja sen ohjausta tai jarrujärjestelmää kannata kustannussyistä mitoitaa ja suunnitella uudelleen. Järjestelmästä saa kustannustehokkaamman, kun se suunnitellaan ja mitoitetaan tukemaan ajoneuvon omaa polttomoottoria, lähinnä polttoainekulutusta kasvattavissa ajotilanteissa, kuten liikkeellelähdoissä, kiihdytyksissä ja ylämäissä. [9, s. 56.]

Selvitystyön kohteeksi valittiin kolmiakselinen kuorma-auton alustaratkaisu, jossa keskimäinen akseli on vetävä. Kyseistä alustaratkaisua on saatavalla moneen eri tarkoitukseen valmistettuun kuorma-autoon, eri moottori-voimansiirtokokoonpanoilla ja varustelulla. Alustamalla hyödynnettiin yleisellä tasolla helpottamaan järjestelmän sijoittamisen ja suunnittelun hahmottamista. Koska varsinaista komponenttisuunnittelua ja -mitoituskaskuja ei ole tässä työssä tarkoitus tehdä, ei tarkempia valmistaja-, malli- ja varustelukohtaisia teknisiä tietoja voimansiirrosta ja massoista selvitetä.

Valitun alustaratkaisun taaimmaisen akselin arvioidaan olevan helpoin muuntaa myös vetäväksi ja asentaa sähkömoottori. Tällainen järjestelmä voitaisiin luokitella rinnakkaishybridiksi, jossa sähköinen ja mekaaninen voimansiirto eivät olisi yhteydessä toisiinsa. Lisäksi tarvittavalle energiavarastolle ja pääkomponenteille oletetaan löytyvän hyvin tilaa runkopalkkien välistä, jolloin sähköjohtimienkin pituudet voitaisiin pitää mahdollisimman lyhyinä, mikä auttaisi omalta osaltaan säästämään järjestelmän kustannuksissa.

Järjestelmän suunnittelussa tavoitteena on saada mahdollisimman energiatehokas sekä hankinta- ja ylläpitokustannuksiltaan mahdollisimman edullinen toteutus, jotta se olisi kannattava toteuttaa. Tärkeimmässä roolissa tavoitteen saavuttamiseksi voidaan pitää pääkomponenttien eli sähkömoottorin, ohjainlaitteiden, voimansiirron ja akuston valintaa ja mitoitusta. [10, s. 5–6.] Näistä jokaiselle määräytyy tarkemmat kriteerit, kun kohdeajoneuvo on tarkemmin selvillä.

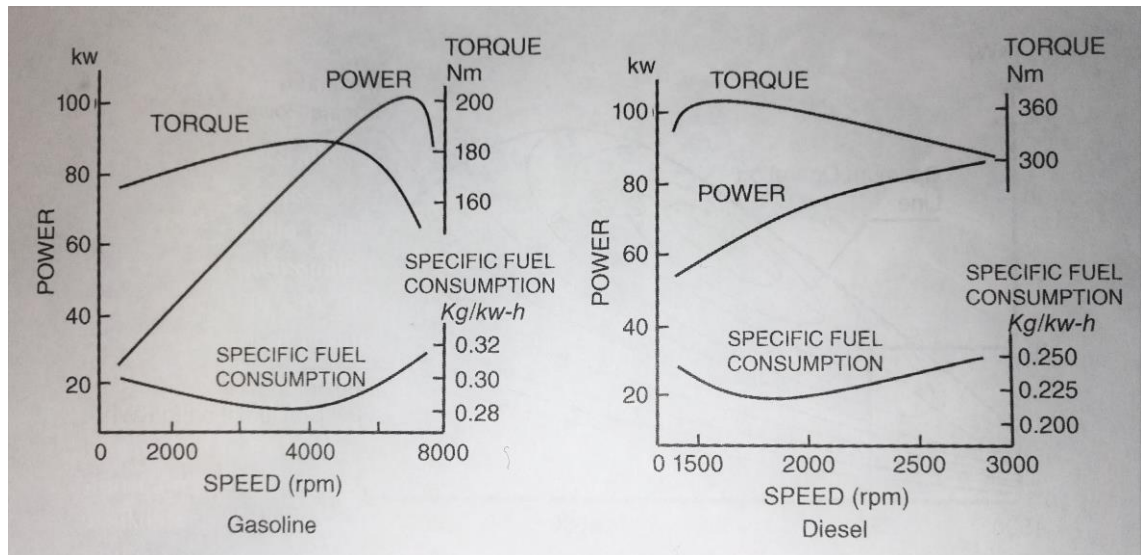
4 Pääkomponentit

4.1 Sähkömoottori

Sähkömoottorit voidaan jakaa kahteen pääryhmään niiden käyttövirran perusteella: DC- (direct current), eli tasavirtamoottoreihin sekä AC- (alternating current) eli vaihtovirtamoottoreihin. AC-moottorit ovat viime vuosina melko selkeästi syrjäyttäneet DC-moottorit sähkö- ja hybridiajoneuvokäytössä paremman teho-painohyötysuhteen, laajan vääntöalueen sekä ohjattavuksiensa johdosta.

AC-moottoreissa ja -ohjainlaitteissa on hyvä hyötysuhde, ja kestopagneettien vuoksi huoltovapaampia, kuin perinteiset hiiliharjalliset DC-moottorit. Suurin etu AC-moottoreiden käytölle ajoneuvojen voimansiirrossa on niiden monimuotoiset ohjausmahdollisuudet. Niitä voidaan ohjata esimerkiksi pelkästään vääntöpyynnöllä, mikä mahdollistaa moottorin tuottaman vääntömomentin nopean säädön äkillisten kuormamuutoksienkin aikana, joita ajoneuvokäytössä aiheutuu muun muassa tien kaltevuuden ja ajovastusten muutoksista. Lisäksi AC-moottorit toimivat loistavasti myös generaattoreina, mikä mahdollistaa tehokkaan energian talteenoton. [11, s. 213; 234.] Tämä ominaisuus on erittäin tärkeässä roolissa järjestelmän suunnittelun kannalta, jotta energia-varasto pystytään pitämään mahdollisimman pienenä, mikä taas säästää kustannuksia.

Perinteinen polttomoottori toimii parhaimmalla hyötysuhteella tietyllä kierrosalueella, tietyllä kuormalla. Tämän perusteella vaihteiston välitys mitoitetaan ajoneuvoihin siten, että ne toimisivat mahdollisimman pienellä kulutuksella ajettaessa tasaista nopeutta maantiellä ja kaupungissa. Dieselmototit toimivat parhaalla hyötysuhteella yleisesti hieman alle 2000 rpm (revolutions per minute, kierrosta minuutissa) pyörintänopeudella, täydellä kuormituksella (kuva 5). Mutta perinteisistä ottomoottoreista poiketen, ne toimivat vielä taloudellisemmin pienellä kuormalla. [12, s. 187.]



Kuva 5. Yleistetyt otto- ja dieselmootorin teho-, vääntö- ja polttoaineen kulutuskäyrät graafisena [12, s. 187].

Järjestelmässä ajoneuvon liikuttamiseen tarvittava vääntömomentti on siis järkevää tuottaa pääasiassa ajoneuvon omalla polttomootorilla, ja sähkömootori tuottaisi lisämomenttia pyörille erityisesti kiihdytyksissä ja ylämäissä. Tällöin ajoneuvo tai yhdistelmä saataisiin tavoitenopeuteen mahdollisimman nopeasti ja keskinopeus pysyisi korkeana myös ylämäissä, tämä tarkoittaisi pienempää polttoainekulutusta. Alamäissä ja jarrutuksissa moottori voisi toimia generaattorina ladataen energiavarausta hyödyntäen regeneroivaa jarrutusta eli muuttamalla kineettistä energiaa takaisin sähköenergiaksi. Tämä säästäisi myös hieman ajoneuvon jarrujen kulumista.

Mahdollisimman pienen polttoainekulutuksen saavuttamiseksi tulisi ajoneuvosta tehdä simulointimalli, jonka avulla pitäisi mitoittaa myös polttomootori ja koko voimansiirto uudelleen. Tässä tapauksessa sähkömootorin valintaan tukemaan voidaan kuitenkin tehdä ajotilapiirros, jonka avulla voidaan arvioida, minkä tehoinen sähkömootori olisi sopiva järjestelmään. Yksi hyödyllinen apukeino on tehdä lisäksi teoreettinen kiihtyvyytkuvaaja. Laskelmia varten tarvitsee tietää tarkemmat tiedot kohdeajoneuvosta.

Sähkömootorin valintaan vaikuttaa myös moottorin ulkomitat ja paino, jotta moottorin mahtuu asentamaan ajoneuvoon, ja että järjestelmän tuoma lisäpaino pysyisi kohtuullisena. Sähkömootorin on myös kyettävä ottamaan mahdollisimman hyvin talteen jarrutusenergia, oltava kestävä ja huoltovapaa. Toki energiavarausten kyky ottaa vastaan regeneroitua energiaa on yhtenä rajoittavana tekijänä, ettei kaikkea saatavilla olevaa energiaa välttämättä pystytä ottamaan talteen. Moottorin on myös oltava hankintahin-

naltaan kohtuullinen, jottei kokonaiskustannukset nouse liian korkeaksi. Lisäksi Suomen ajoneuvolaki antaa omat rajoitteensa moottorin maksimitehon suhteen.

4.2 Järjestelmän ohjaus

Ajoneuvoissa on nykypäivänä kymmenittäin, jopa sadoittain ohjainlaitteita, joista koostuu erinäisiä osa-alueita. Kaikille osa-alueille on olemassa omat pääohjainlaitteet, jotka valvovat ja ohjaavat niiden alaisuudessa toimivia alijärjestelmiä. [13, s. 6.]

Työssä käsiteltävän järjestelmän ohjaus koostuisi sähkömoottorin ohjainlaitteesta, jota kutsutaan myös taajuusmuuttajaksi eli invertteriksi, BMS:stä (Battery Management Systemistä eli akustonhallintajärjestelmästä) sekä pääohjainlaitteesta. Lisäksi tarvitaan anturitietoja muun muassa ajotilanteista sekä kuljettajan vääntöpyynnöstä. Tiedonsiirto ohjainlaitteiden ja antureiden kesken tapahtuisi CAN-väylän (Controller Area Network) kautta.

Invertteri muuttaa nimensä mukaan energiavarastolta saatavan DC-jännitteen AC-jännitteeksi moottorille. Invertteri valitaan moottorin perusteella. Sen käyttöjännitteen ja -virran tulee olla moottorille soveltuvat, jotta hyötysuhde pysyisi mahdollisimman hyvänä eikä moottori tai invertteri vaurioidu liian korkeiden jännite- tai virtapiikkien johdosta. Taajuusmuuttajalla ohjataan moottoria esimerkiksi vääntöpyynnöllä, ja se muuttaa moottorin ohjaustaajuutta ja -virtaa kuljettajan pyynnön mukaisesti. Negatiivisella vääntöpyynnöllä voidaan ohjata moottori regeneroimaan kineettistä energiaa takaisin sähköenergiaksi. Tällöin invertterin on myös kyettävä muuttamaan moottorilta saatava regeneroitu energia takaisin energiavarastolle sopivaksi tasasähköksi. [10, s. 6.]

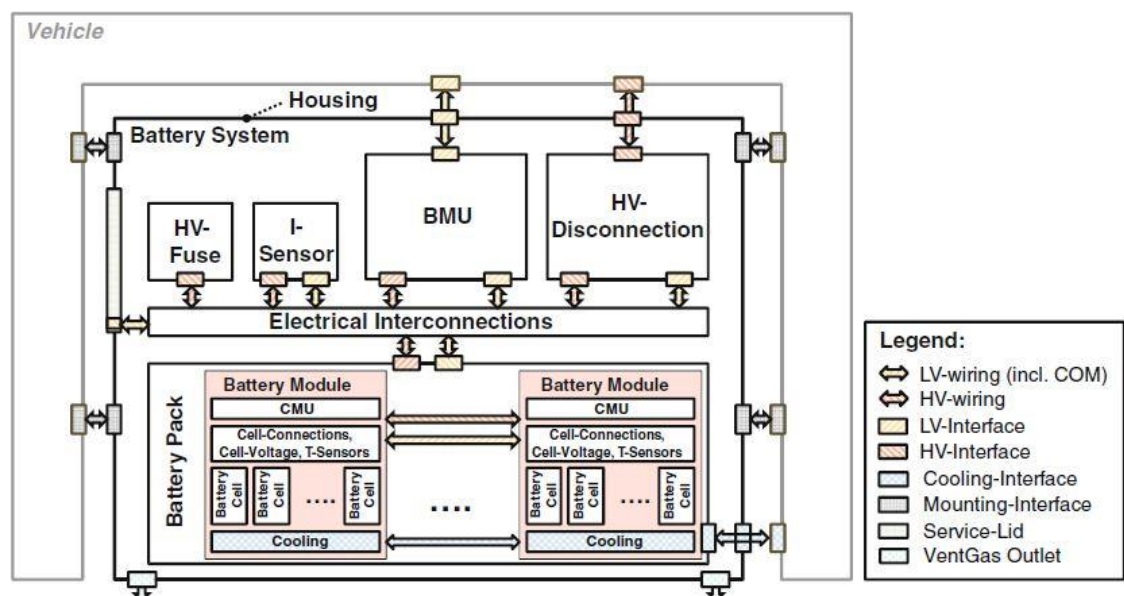
BMS:n tehtävä on valvoa ajoneuvon energiavarastoa, kennojen lämpötiloja ja varaus-tasoja. Se myös ohjaa purku- ja latausvirtoja ajotilanteen, kennolämpötilojen sekä -jännitteen mukaan. Sillä ohjataan myös sähköisiä erotuskytkimiä, joilla energiavarasto saadaan kytkettyä irti auton korkeaajännitejärjestelmästä, kun järjestelmästä katkaistaan virta käyttäjän toimesta tai vikatilanteessa. BMS voi sisältää myös tiedonkeruuta, jolloin energiavaraston kennojännitteitä ja -lämpötiloja voidaan helposti tarkastella ja analysoida jälkikäteen eri ajotilanteissa tai mahdollisissa vikatapauksissa.

4.3 Energiavarasto

4.3.1 Akusto

Sähköajoneuvojen energiavarastosta puhuttaessa käytetään usein termiä akusto, koska se useimmiten koostuu useasta sarjaan- ja rinnankytketyistä akkukennoista. Sen tehtävä on varastoida sähköenergia, minkä avulla tuotetaan tarvittava vääntömomentti renkaille sähköisen voimalinjan välityksellä.

Akkukennojen lisäksi akustokoteloinnin sisälle usein sijoitetaan BMS, erotuskytkimet, virtamittari, ohjainlevyt yksittäisten kennojännitteiden tasaukseen, eli balansointiin, ilma- tai nestejäähdytys, sekä lämpötila-anturit kennoille (kuva 6). Virtamittarilla BMS valvoo lataus- ja purkuvirtoja, sekä arvioidaan akuston SOC:n (State of Charge) eli kokonaisvarauksen tilaa. [14, s. 5–6.] Akkukennojen balansoinnilla pidennetään akuston elinikää ja parannetaan akuston kokonaiskapasiteetin käyttöä. Balansointia voidaan tehdä järjestelmästä riippuen aktiivisesti koko ajan purkamalla tai lataamalla yksittäistä kennoa tai passiivisesti latauksen yhteydessä.



Kuva 6. Ajoneuvon akuston pääkomponentit ja niiden väliset yhteydet [14, s. 5].

Akkukennojen valinnassa on otettava huomioon käyttöolosuhteet. Kennojen on pystyttävä toimimaan Suomen vaihtelevissa oloissa jokaisena vuodenaikana. Kovimmissa pakkasissa jokaisen kennotyyppin virrananto- ja -ottokyky heikkenevät huomattavasti,

joten vähintäänkin hyvä lämpöeristys on tehtävä akkukoteloon. Akkukennojen sisäisen vastuksen vuoksi niistä vapautuu lämpöä, kun kennoa puretaan tai ladataan. Erillistä lämmitystä ei siis välttämättä tarvita, jos esimerkiksi latauksen ajoittaa juuri ennen liikkeellelähtöä.

Koska järjestelmä toimisi ainoastaan pääpiirteissään kiihdytyksissä ja ylämäissä, on järjestelmän käyttöaste suhteellisen pieni. Akuston kokonaiskapasiteetin ei siis tarvitse olla niin suuri kuin jos sähkömoottori toimisi päätoimisena ajomoottorina. Tällöin siis sähkömoottoria käytetään suurimmaksi osaksi lähes nimellisteholla, eli akkukennoilla tulisi olla mahdollisimman hyvä tehotehiys. Tämä mahdollistaa suurempien purkuvirtojen käytön sekä myös tehokkaan energian talteenoton regeneroivasta jarrutuksesta.

Parhaimmat tehotehiydet nykyisistä akkutyypeistä löytyy nikkeli-metallihybridi- (NiMH) sekä litiumioniakuista (Li-Ion). Näistä ensimmäistä käytetään jo yleisesti kaupallisissa hybridiajoneuvoissa, koska sillä on pitkä käyttöikä ja se on myöskin kestävä. nikkeli-metallihybridi- ja litiumioniakkujen perusominaisuudet on esitetty kuvissa 7 ja 8. Heikkoutena tällä nikkeli-metallihybridikennotyypillä on heikko virranottokyky korkeammassa ja matalammassa lämpötiloissa. [13, s. 151–154.]

TABLE 2-3. Basic Technical Requirements for NiMH Cell in HEV/EV Applications

Specific energy	40–80 Wh/kg
Energy density	90–160 Wh/L
Specific power	900–1600 W/kg
Charge/discharge efficiency	80–95%
Self-discharge rate	8–15%/month
Cycle durability	800–1200 cycles
Nominal cell voltage	~1.2 V

Kuva 7. nikkeli-metallihybridiakkukennon perusominaisuudet lueteltuna [10, s. 21].

Litiumioniakuissa on nikkeli-metallihybridikennoja korkeampi käyttöjännite, ja vieläkin suurempi energiatehiys. Täten akkukennoja tarvitsisi vähemmän, mikä tarkoittaa säästöä tarvittavan tilan sekä painon suhteen. Litiumioniakut tosin vaativat erilliset turvajärjestelmät yli- sekä alijännitteen estämiseksi, koska kennotyyppi voi näistä helposti vaurioitua sekä pahimmassa tapauksessa syttyä palamaan. [13, s. 151–154.] Lopulliseen

kennotyyppin valintaan on tehtävä vertailutaulukot saatavilla oleviin kennoihin, joista valitaan ominaisuuksiltaan ja hankintahinnaltaan sopivin vaihtoehto järjestelmään.

TABLE 2-4. Basic Technical Requirements for Li-Ion Cell in HEV/EV Applications

Specific energy	130–200 Wh/kg
Energy density	180–320 Wh/L
Specific power	1200–4000 W/kg
Charge/discharge efficiency	85–96%
Self-discharge rate	<5%/month
Cycle durability	1500–2000 cycles
Nominal cell voltage	~3.75 V

Kuva 8. Litiumioniakkukennon perusominaisuudet luetteluna [10, s. 21].

Akuston suunnitteluun ja akkukennojen valintaan on määritettävissä tietyt kriteerit työssä käsiteltävälle järjestelmälle. Kokonaisjännite ja purku- ja latausvirrat määräytyvät lähinnä käytettävän sähkömoottorin mukaan. Käytön aikana etenkin kaupunkiajossa akusto on melkein jatkuvasti lataus- tai purkutilassa, joten akuston on kestävä tarvittavan huipputehon vaatimat purkuvirrat sekä kyettävä tehokkaasti vastaanottamaan regeneroitava energia moottorilta jarruttaessa lyhentämättä akkukennojen käyttöikä. SOC:n tulisi pysyä näissäkin ajotilanteissa tarpeeksi korkealla, jotta moottorin huipputeho saadaan tarvittaessa mahdollisimman tehokkaasti hyödynnettyä. Lataus-purkusykliden tiheyden ja mataluuden johdosta akkukennojen hyvä balansointi on tärkeää, jotta kokonaiskapasiteetti ja kennojen käyttöikä pysyisivät mahdollisimman korkeana. [15, s. 319.]

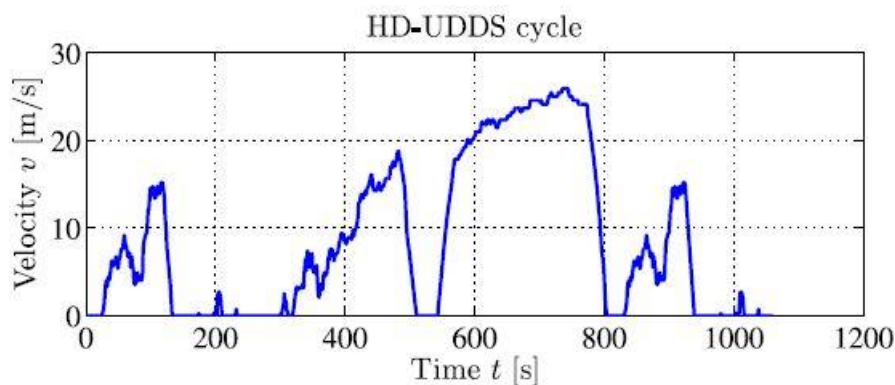
$$P = U * I \quad (1)$$

Ohmin lain (1) mukaan, moottorin teho P on käyttöjännitteen U ja virran I tulo. Täten korkeamman akuston kokonaisjännitteen käyttö pienentäisi saman huipputehon saavuttamiseksi vaadittavia purku- ja latausvirtoja, mikä mahdollistaisi ohuempien virtajohdinten käytön, sekä akkukennoista riippuen mahdollisesti pienemmän määrän rinnankytkettyjä kennoja. Tämä taas puolestaan parantaa yksittäisten akkukennojen balansointia, sillä BMS pystyy tulkitsemaan kaikki samassa rinnankytkennässä olevat kennot yhtenä kennona, sillä se mittaa kyseisen kytkennän jännitteen, mikä määräytyy aina kytkennässä olevan heikoimman kennon mukaan. [10, s. 181.] Korkeamman kokonais-

jännitteen käyttö taas toisaalta voi nostaa tarvittavien kennojen lukumäärää, sillä niitä on kytkettävä useampi sarjaan. Korkeamman käyttöjännitteen moottorit ja ohjainlaitteet ovat myös hankintahinnaltaan hieman kalliimpia tarvittavan tehoelektronikan johdosta.

Akuston riittävän kokonaiskapasiteetin laskemiseksi on tiedettävä moottorin tehovaatimukset tarvittavan kiihdytysenergian tuottamiseksi sekä käyttöaste, eli kuinka pitkän ajan moottori ottaa energiaa akustolta ja kuinka hyvin energia saadaan regeneroitua takaisin jarrutusenergiasta.

Työssä käsiteltävän järjestelmän oletetaan suunniteltavan siten, että se on moneen erilaiseen ajokäyttöön soveltuva. Näin tuloksena olisi yleismallinen järjestelmä, jota olisi helpompi markkinoida kaupallisessa mielessä. Yleistettävän mallin sähkömoottorin käyttöasteesta voi yrittää arvioida esimerkiksi hyödyntäen kuorma-autoille määritettyä, alustadynamometrillä suoritettavassa päästömittauksessa käytettävää ajosykliä. Virallisissa tyyppihyväksyntämittauksissa ei kuorma-autoille tehdä mittauksia alustadynamometrillä vaan pelkästään moottoridynamometrillä. Yhdysvaltojen viranomaiset ovat määrittäneet raskaille kuorma-autoille HD-UDDS (Heavy-Duty Urban Dynamometer Driving Schedule) -testausyökin (kuva 9), joka sisältää sekä kaupunki- että maantieajosta aiheutuvaa ajonopeuden muutosten simulointia. [16, s. 14; 17, s. 32–33.]



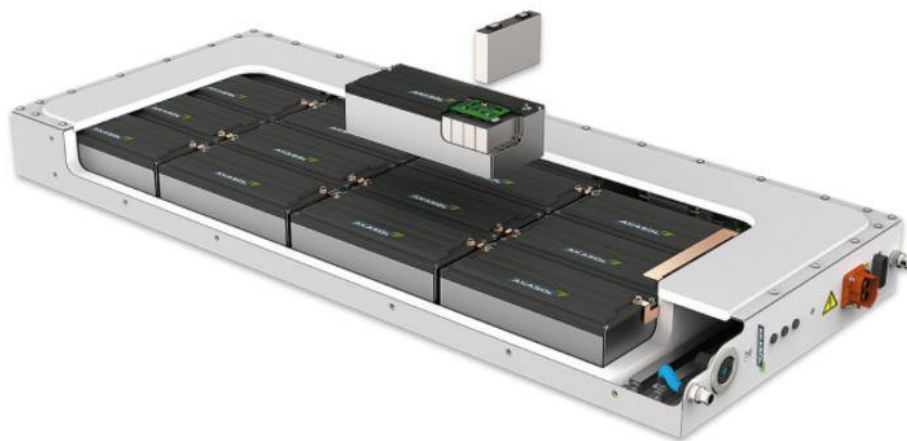
Kuva 9. HD-UDDS-testausyökin graafinen esitys nopeus-aikakoordinaatistossa [17, s.13].

Todelliset ajosykliä voivat kuitenkin erota todella paljon edellä mainitusta testisyölistä, joten tällä tavalla arvioitua sähkömoottorin käyttöastetta ei voi pitää kovin luotettavana akuston kapasiteetin laskentaa varten. Tällöin akuston kokonaiskapasiteetti voisi jäädä liian pieneksi eikä järjestelmästä saatava hyöty yltäisi välttämättä vaaditulle tasolle.

Varmemman käyttöasteen määrittämiseksi olisi syytä tehdä esitutkimus ajoneuvoyhdistelmien ajosykleistä työvuorojen ajalta. Tutkimukseen tulisi valita useampi erilaisia ajo-reettejä käyttävä ajoneuvoyhdistelmä, joihin asennettaisiin tiedonkeruujärjestelmä. Näistä saataisiin varsin käyttökelpoista tietoa erilaisten ajosykliden ajonopeuden muutoksista, moottorin kuormitusasteista, sekä kuljettajan vääntöpyynnöstä ja jarrutustapahtumista. Kerättyjen tietojen perusteella voitaisiin muodostaa yleismalli keskimääräisestä tehontarpeesta ja regenerointipotentiaalista latauskertojen välillä, mikä olisi varmasti riittävä itse järjestelmäkokonaisuuden suunnittelussa ja kustannuslaskelmissa.

Jos saaduissa tuloksissa olisi suuria eroja tarvittavan akkukapasiteetin suhteen, voitaisiin vaihtoehtoisesti määrittää muutamaan eri käyttötarkoitukseen omat akuston vaatimustaulukot, joiden perusteella suunnitella itse akustopakettit.

Kaupallisesti on saatavilla valmiita kennomoduuleita tai kokonaisia akustoja, jotka sisältävät tarvittavat ohjainlaitteet ja jäähdytyksen. Akustot koostuvat kennomoduuleista, jotka on yleensä kytketty sarjaan keskenään kokonaisjännitteen nostamiseksi (kuva 10). Näiden käyttäminen vähentäisi huomattavasti suunnitteluun, valmistukseen ja testaukseen kuluvaa aikaa, mutta todennäköisesti olisivat hankintahinnaltaan huomattavasti kalliimpia. Näitä vaihtoehtoja ei kuitenkaan kannata jättää pois, kun lasketaan kokonaiskustannusarviota järjestelmälle.



Kuva 10. Saksalaisen AKASOL GmbH:n valmistama akkupaketti, jossa käytetään litiumioniakkukkennoja. Kokonaisessa akustossa on BMS ja muut akustonvalvontaan tarvittavat ohjainlevyt valmiina. [18]

4.3.2 Superkondensaattorit

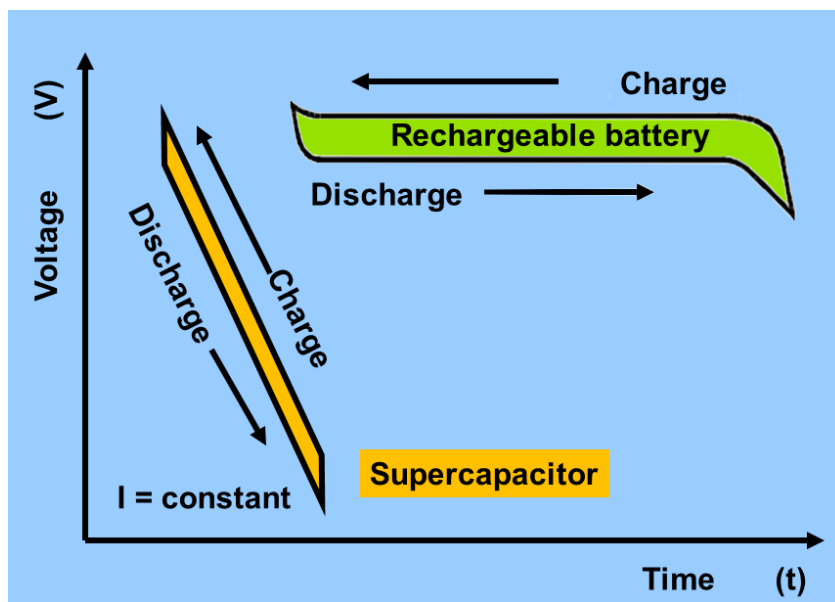
Akkukennot pystyvät vastaanottamaan rajallisen määrän latausvirtaa vastaan, joten regeneroivasta jarrutuksesta saatavaa energiaa ei pystytä täysin hyödyntämään. Kaikkea kineettistä energiaa ei voida ikinä muuttaa takaisin sähköenergiaksi, sillä osa siitä kuluu ajovastuksiin, kuten ilmanvastukseen ja vierintävastukseen [19, s. 15–16]. Akkukennoja suurempia lataus- ja purkuvirtoja kestävätkä superkondensaattorit, jotka voivat hyvinkin tulevaisuudessa syrjäyttää akkukennot sähkö- ja hybridiajoneuvokäytössä.

Kuvassa 11 on vertailtu superkondensaattoreiden ja litiumioniakkujen ominaisuuksia. Superkondensaattoreiden tehotiheys on huomattavasti parempi kuin olemassa olevilla akkukennoilla, minkä vuoksi niillä voidaan ottaa helposti talteen kaikki saatavilla oleva regeneroitava energia. Niiden käyttöikä on myös akkukennoja pidempi, jopa miljoonia lataus-purkusyklejä. Superkondensaattoreilla on pieni sisäinen resistanssi, joten niiden hyötysuhde on yli 97 %, joka on selvästi akkukennoja parempi. Syy, miksi superkondensaattorit eivät ole vielä syrjäyttäneet olemassa olevaa akkuteknologiaa sähköajoneuvoissa, on niiden huono energiatiheys, noin kymmenesosa akkukennojen energiatiheystä, sekä nopea itsestään purkautuminen. [10, s. 23–24.] Superkondensaattoreiden virrananto- ja -ottokyky on hyvä myös -40 °C :n pakkasessa, joten ne toimisivat hyvin myös talvella ilman erillistä eristystä tai lämmitystä.

Function	Supercapacitor	Lithium-ion (general)
Charge time	1–10 seconds	10–60 minutes
Cycle life	1 million or 30,000h	500 and higher
Cell voltage	2.3 to 2.75V	3.6V nominal
Specific energy (Wh/kg)	5 (typical)	120–240
Specific power (W/kg)	Up to 10,000	1,000–3,000
Cost per kWh	\$10,000 (typical)	\$250–\$1,000 (large system)
Service life (industrial)	10-15 years	5 to 10 years
Charge temperature	$-40\text{ to }65\text{ °C}$ ($-40\text{ to }149\text{ °F}$)	$0\text{ to }45\text{ °C}$ ($32\text{ to }113\text{ °F}$)
Discharge temperature	$-40\text{ to }65\text{ °C}$ ($-40\text{ to }149\text{ °F}$)	$-20\text{ to }60\text{ °C}$ ($-4\text{ to }140\text{ °F}$)

Kuva 11. Superkondensaattorin ja litiumioniakkujen ominaisuuksien vertailutaulukko yleisellä tasolla [20].

Huonona puolena on pidettävä superkondensaattorin jännitteen käyttäytymistä purettaessa varausta (kuva 12). Jännite laskee melkein lineaarisesti varauksen pienentyessä, tämä estää säilötyn energian yhtä tehokkaan hyödyntämisen kuin esimerkiksi litiumioniakkukennoissa. Näistä saadaan melko tasainen teho moottorille noin 80 % akuston SOC-tilasta ja voidaan hyödyntää jopa 90–95 % koko akuston kapasiteetista johtuen akkukennon jännitteen tasaisuudesta purettaessa akkua. Superkondensaattoreiden jännitteenlaskua voidaan hieman tasoittaa erillisellä DC-DC-muuntimella, nostan purkuvirtaa. Tämä toisaalta toisi ylimääräisiä kuluja sekä lisää painoa järjestelmään.



Kuva 12. Yksinkertaistettu malli superkondensaattorin ja uudelleen ladattavan akkukennon jännitteen käyttäytymisestä purettaessa ja ladattaessa tasaisella virralla [21].

Viime vuosina superkondensaattoreiden kehitys on ollut nopeaa, ja uusilla materiaali-ratkaisuilla niiden energiatiheys on saatu jo paremmaksi kuin huonoimpien perinteisten lyijyakkujen [22]. Myös superkondensaattoreiden hankintahinta on vielä huomattavasti korkeampi kuin akkukennojen johtuen nykyisten valmistusmateriaalien kalleudesta. Tosin niiden käyttöikä on huomattavasti pidempi, mikä tasoittaa kustannuksia pitkällä aikavälillä. Viime vuosien kehitys ei ole ainoastaan parantanut superkondensaattoreiden energiatheyttä vaan myös pienentänyt valmistuskustannuksia, sillä uudet paremmat materiaalit ovat edullisempia kuin nykyiset perinteisesti käytettävät. [23; 24.] Tulevaisuudessa superkondensaattorien hankintahinta tulee mahdollisesti laskemaan hieman kuluttajaystävällisemmäksi.

Kuten akkukennojakin, myös superkondensaattoreista on kaupallisesti saatavilla yksittäisten kennojen lisäksi valmiita moduuleja integroiduilla balansointi- ja valvontajärjestelmillä (kuva 13). Myös näitä valmiita kaupallisia moduuleja on hyvä ottaa vertailuun järjestelmän tarkemmassa suunnittelussa ja kustannuslaskelmissa.



Kuva 13. Maxwell Technologies Inc. -yhtiön 125 V:n superkondensaattorimoduuli [25].

Superkondensaattoreita voi kytkeä sarjaan tai rinnan samalla tavalla kuin perinteisiä akkukennojakin. Sarjaankytkentä on tarpeen, jotta kokonaisjännitettä saadaan nostettua halutulle tasolle. Kokonaisjännite kytkennästä saadaan laskemalla kondensaattorien jännitteet yhteen:

$$U_{kok} = U_1 + U_2 + \dots + U_n \quad (2)$$

U_{kok} on kokonaisjännite

U_1 on kennon numero 1 jännite

U_2 on kennon numero 2 jännite

U_n on kennon numero n jännite

Kondensaattoreiden sarjaankytkennässä vastaavasti kapasitanssi pienenee seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$\frac{1}{C_{kok}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (3)$$

C_{kok} on kytkennän kokonaiskapasitanssi

C_1 on kondensaattorin numero 1 kapasitanssi

C_2 on kondensaattorin numero 2 kapasitanssi

C_n on kondensaattorin numero n kapasitanssi

Kondensaattorin energia W taas saadaan laskettua seuraavasti:

$$W = \frac{1}{2}CU^2 \quad (4)$$

Yhtälöä 4 hyödyntämällä saamme laskettua suuripiirteisen ajan t , kuinka pitkään kondensaattoreista saatavalla energialla pystytään sähkömoottoria käyttämään kiihdytyksessä. Moottoreiden taajuusmuuttajilla on tietyt jännitealueet, joissa ne kykenevät tuottamaan täyden ulostulovirran ja ohjausjännitteen moottorille. Eri sähkömoottoreiden ominaisuudet ja tehon tarve vaihtelee suuresti, joten tarkat suoritusarvot ja tehohäviöt jätetään huomioimatta. Myös kiihdytyksessä vaihteiden vaihdoista johtuvat vääntöpyynnön muutokset jätetään huomioimatta ja oletetaan, että kondensaattoreita puretaan yhtäjaksoisesti tasaisella teholla P alkujännitteestä U_0 loppujännitteeseen U_L , saadaan seuraava yhtälö:

$$t = \frac{\frac{1}{2}C_{kok}(U_0^2 - U_L^2)}{P} \quad (5)$$

Esimerkiksi, jos käytössä on sähkömoottori, jonka enimmäisteho on 30 kW, ja sitä voitaisiin käyttää Sevcon Gen4 Size 8 -taajuusmuuttajalla (liite 1), tämän toimintajännitealueella, 128–400 V. Jos energiavarastona käytettäisiin kuvan 13, 125 V:n ja 63 F:n superkondensaattorimoduulia (liite 2), tulisi niitä asentaa kolme kappaletta sarjaan, jotta kokonaisjännite saataisiin korkeammaksi. Tällöin yhtälöistä 2, 3 ja 5 saadaan laskettua, että esimerkkimoottoria voitaisiin optimiolosuhteissa käyttää yhtäjaksoisesti täydellä teholla noin 43,5 sekuntia.

Vaikka tulosta ei voi pitää yleisesti pätevänä, koska se ei vastaa todellista ajotilannetta, voisi se mielestäni riittää yleisimmissä olosuhteissa tapahtuviin kuormituksiin, jopa täydellä kuormalla kiihdyttämiseen paikaltaan maantienopeuksiin.

Vaikkakin superkondensaattoreilla on huono energiatiheys ja niiden itsestään purkautuminen on melko runsasta, olisivat ne oletettavasti varsin hyvä vaihtoehto työssä käsiteltävään järjestelmään, jossa sähkömoottoria käytettäisiin suurella teholla, lyhyehkön ajan kerrallaan. Suuren virranottokykynsä ansiosta niillä saataisiin hyödynnettyä tehokkaasti käytettävissä oleva jarrutusenergia, jolla ne saataisiin varsin hyvin ladattua purkusyklien välillä. Todellinen kannattavuus selviäisi tarkemmasta kokonaiskustannusarviosta.

4.4 Voimansiirto

Sähkömoottorilta saatava vääntömomentti täytyy saada välitettyä renkaiden välityksellä tiehen. Sähköinen voimalinja halutaan alustavissa suunnitelmissa pitää erillään ajoneuvon perinteisestä mekaanisesta voimalinjasta, joten työhön valittuun alustaratkaisuun täytyisi muuttaa taaimmainen akseli myös vetäväksi. Järjestelmä oletetaan lähtökohtaisesti suunniteltavan yhdellä sähkömoottorilla, tuolloin todennäköisesti kustannustehokkain ratkaisu olisi vaihtaa ajoneuvon taaimmainen akseli tasauspyörästöllä varustettuun malliin.

Sähkömoottorin ominaisuuksista johtuen tarvitaan tietty välityssuhde moottorin ja vetoakselien välille, että moottorin paras tehoalue saadaan hyödynnettyä halutuissa ajoneuveysissa. Välityksillä saadaan tasattua etenkin pienempien sähkömoottoreiden korkeiden pyörimisnopeuksien ja renkaiden pyörimisnopeuksien välistä eroa ja samalla moottorilta saatava vääntömomentti saadaan suuremmaksi renkaille. Ideaalisessa voimansiirrossa, jossa ei olisi yhtään tehohäviöitä, moottorilta renkaille välittyvä vääntömomentti kasvaisi samassa suhteessa, kuin pyörintänopeus pienenee.

Tauspyörästöillä on omat välityssuhteensa, jotka määräytyvät tasauspyörästön sisällä olevien hammasrattaiden hammassuhteesta. Tämä välityssuhde ei todennäköisesti yksinään riitä pienentämään sähkömoottorin ulostuloakselin pyörimisnopeutta sopivaksi renkaiden vetoakseleille. Tarvitaan siis erillinen alennusvaihe sähkömoottorin ja tasauspyörästön välille, mikä yksinkertaisimmillaan voi olla yksiportainen hammasrat-
tailla toteutettu vaihe. Voimansiirron kokonaisvälityssuhde määräytyy pääpiirteissään renkaiden enimmäispyörimisnopeuden, eli suurimman ajonopeuden, sekä sähkömoottorin tavoitepyörimisnopeuden perusteella seuraan kaavan mukaisesti:

$$i_{kok} = 2\pi R_d \frac{n_m}{v} \quad (6)$$

missä i_{kok} on kokonaisvälityssuhde, R_d on renkaan dynaaminen säde, n_m on sähkömoottorin tavoitepyörimisnopeus ja v on ajonopeus. Ja koska kokonaisvälityssuhde määräytyy tasauspyörästön välityssuhteen i_0 ja alennusvaihteen välityssuhteen i_v perusteella seuraavasti

$$i_{kok} = i_0 i_v \quad (7)$$

saadaan alennusvaihteen välityssuhde laskettua suoraan yhdistämällä edellä mainitut yhtälöt:

$$i_v = 2\pi R_d \frac{n_m}{v_{i_0}} \quad (8)$$

Planeettavaihteiston käyttö alennusvaihteessa mahdollistaisi kompaktin ja kevyen rakenteen, mutta monimutkaisuutensa vuoksi nostaisi valmistuskustannuksia. Tarvittavasta välityssuhteesta riippuen yksinkertainen lieriöhammasrattailta toteutettu alennusvaihte on todennäköisesti käytännöllisin vaihtoehto, ja ajoneuvon rakenteen huomioiden tuskin olisi ongelmia vaihteiston tilantarpeen suhteen.

Itse voimansiirron suunnittelussa on otettava huomioon muun muassa komponenttien hitausmomentit ja kuhunkin osaan kohdistuvat voimat ja rasitukset. Tarkempaa suunnittelua ja lujuuslaskentoja ei tässä yhteydessä suoriteta.

5 Ohjelmointistrategiat

Ajoneuvojen energiankulutuksen ja lähipäästöjen eli päästöjen, joita syntyy ajoneuvon käytöstä, saaminen mahdollisimman pieneksi edellyttää paitsi mekaanisten häviöiden ja ajovastusten minimoimisen, myös voimanlähteiden energiatehokkuuden optimoimisen. Poltto- ja sähkömoottorin ihannetilanne on saada ne toimimaan parhaimmalla hyötysuhdealueella. Tähän päästään voimansiirron välityssuhteen oikealla mitoituksella, mutta myös moottoreiden toimintojen ohjauksen tarkalla suunnittelulla. [17, s. 4–5.]

Hybridiajoneuvoissa energiavaraston kapasiteetti on rajallinen, mikä rajoittaa sähkömoottorilla tuotetun tehon saatavuutta ajon aikana. Tämän takia sähkömoottorin käytön rajoitus on välttämätöntä, mutta se tulisi tehdä siten, että moottorin ja akuston tehokapasiteetin saisi hyödynnettyä tehokkaimmin pienentämään polttoainekulutusta ja päästöjä mahdollisimman paljon. Lähettämällä invertterille juuri oikeanlaisen ohjauspyynnön tarkasti määritettynä hetkenä tuottaa parhaan hyödyn. Ohjauspyyntöjen sisällön määrittäminen ja ajoittaminen vaativat tarkemman suunnittelun sekä reaaliaikaisen tiedon ajoneuvon ja sen komponenttien toiminnasta kussakin ajotilanteessa.

Dieselmootoreiden polttoainekulutus on etenkin osakuormalla vähäistä, mutta tällöin syntyy eniten myös typpioksidin (NO_x) -päästöjä. Jotta polttoainekulutusta saisi tehok-

kaasti pienennettyä, kuitenkin päästöjä lisäämättä, tulee sähkömoottorilta tuotettava vääntö hyödyntää, etenkin kun polttomoottoria kuormitetaan paljon. [8, s. 372.] Tämä tarkoittaa, että sähkömoottorin ohjauksessa tulee ottaa huomioon muun muassa kuljettajan vääntöpyyntö, polttomoottorin käyntinopeus ja ajoneuvon nopeus, jotta sähkömoottorin teho saadaan parhaiten hyödynnettyä. Etenkin polttomoottorin alakierroksille sähkömoottorilta saatava lisävääntö parantaa ajoneuvon kiihtyvyyttä ja täten suoraan vaikuttaa polttoainekulutukseen pienentävästi.

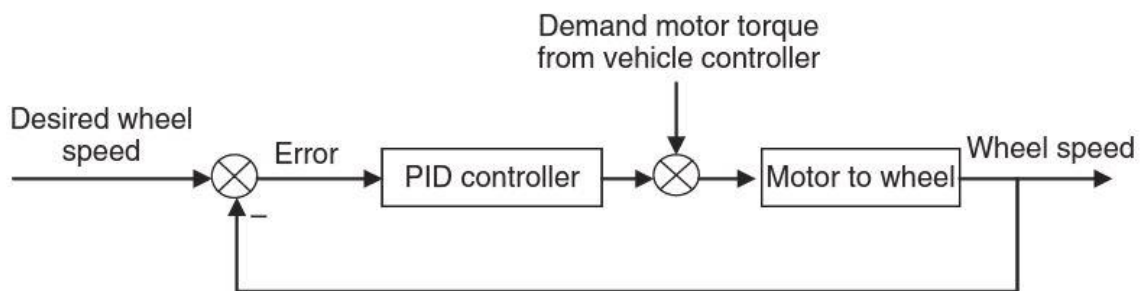
Jarrutusenergian talteenotolla voidaan energiavaraston kapasiteetti pitää pienempänä. Kiihdytyksessä käytettyä sähköenergiaa ei saa kokonaan takaisin regeneroimalla, koska jo osa energiasta menee ajovastusten voittamiseen, sekä voimansiirtohäviöihin. Myös käytettävä sähkömoottori ja akusto rajoittavat regeneroinnista talteen saatavan energian määrää. Jarrutusenergian talteenotto täytyy suunnitella siten, että sitä pystytään hyödyntämään mahdollisimman paljon ajossa. Alamäissä ja jarrutettaessa auton omilla jarruilla tulee sähkömoottoria ohjata regeneroimaan liike-energiaa.

Regeneroivan jarrutuksen ohjauksessa hyödynnetään kuljettajan vääntö- ja jarrutuspyynnön sekä ajonopeuden mukaan. Regeneroinnin voimakkuutta on säädettävä, jotta ajaminen olisi mahdollisimman sujuvaa. Kun ajoneuvo rullaa eteenpäin ja kuljettaja ei paina kaasua tai jarrupoljinta, voi sähkömoottorin määrätä regeneroimaan kevyesti. Regeneroinnin voimakkuutta voi säätää esimerkiksi ajonopeuden mukaan, jos kuljettaja ei vielä paina edellä mainittuja polkimia. Keskinopeuden pitää pysyä mahdollisimman suurena; näin polttoainekulutus ei nouse turhaan. Liian voimakas regenerointi voi aiheuttaa turhia uudelleenkihdytyksiä.

Sähkömoottorin tuottama vääntö renkaille voi aiheuttaa niiden luistamisen, kun moottorin tuottama vääntö ylittää renkaan ja tien välisen kitkan. Moottori voi myös regeneroitaessa lukita renkaat liukkaalla alustalla. Jotta vääntömomentti saadaan tehokkaasti hyödynnettyä sähkömoottorilta, täytyy sen ohjauksessa valvoa renkaiden pyörintänopeutta auton nopeuteen nähden. Yksinkertaistettuna auton ajonopeutta verrataan sähkömoottorin pyörittämiin renkaisiin. Jos ajonopeus on nopeampi kuin sähkömoottorilta saatu nopeus takapyörille, voidaan tarvittaessa pienentää regenerointimomenttia moottorilta, jotta renkaat eivät lukkiutuisi. Jos taas ajonopeus on pienempi kuin takapyörrien nopeus, pienennetään vääntöpyyntöä moottorilta.

Pieni eroavaisuus renkaiden ja ajonopeuden välillä on mahdollista, mutta se voi kuluttaa renkaita hieman normaalia enemmän. Järjestelmään valittava sähkömoottori tulee olemaan kuitenkin melko pienitehoinen, ettei tilannetta, jossa renkaiden vetopito tai regenerointipito ylittyisi, pääse juurikaan syntymään. Kuorma-auton suuren massan aiheuttama paine renkaiden ja tienpinnan välille kasvattaa kitkakerrointa, joten ainoastaan erittäin liukkaalla alustalla voisi olla mahdollista renkaiden sutia tai lukkiutua sähkömoottorilta tulevan väännön johdosta.

Sähkömoottorin vääntöpyyntöä voidaan yksinkertaisimmillaan ohjata PID-säätimellä (Proportional, integral, derivative) eli säätimellä, jonka ulostulo koostuu kolmesta eri termistä: suhde, integrointi ja derivointi. Yksinkertaistettu, takaisinkytkennällä varustettu ohjauspiiri on esitetty kuvassa 14. Siinä PID-säädin säätää renkaan tavoite pyörimisnopeuden ja todellisen pyörimisnopeuden erotusta. Yhdessä pääohjainlaitteelta tulevan vääntöpyyntöarvon kanssa PID-säätimeltä saatava vääntöpyyntö määrittää todellisen vääntöpyynnön, mikä sähkömoottorille täytyy välittää tavoitepyörimisnopeuden saavuttamiseksi.



Kuva 14. PID (Proportional, Integral, derivative) -säätimellä varustettu sähkömoottorin ohjaus havainnollistettuna ja yksinkertaistettuna [10, s. 266].

Joidenkin ohjainlaitteiden valmistajat sisällyttävät käyttöohjelmiston lisenssin ohjainlaitteen hintaan. Tällöin ohjainlaitteen mukana tulee ohjelma, jonka avulla jokaisen alijärjestelmän tiedot saadaan määritettyä tarkasti ohjainlaitteelle. Tällöin järjestelmien valvonta ja ohjaus toimivat optimoidusti. Myös moottorinohjaus on yleensä monimutkaisempi kuin pelkkä PID-säädin, mutta samalla todennäköisesti myös energiatehokkaampi.

6 Rekisteröintivaatimukset Suomen tieliikenteeseen

Suomessa lainsäädäntö määrittää tarkat kriteerit muun muassa ajoneuvojen rakenteelle, tarkastuksille ja turvalaitteille tieliikennekäytössä. Pääsääntöisesti ETA (Euroopan talousalue) -alueella käytetään yleisesti Euroopan unionin määrittämiä direktiivejä, mutta sen lisäksi jäsenvaltioilla on omat tarkentavat määräykset ja säännökset, joilla varmistetaan ajoneuvojen turvallisuus ja ympäristöystävällisyys. Eri mailla voi olla eroavaisuuksia ajoneuvojen hyväksymisperusteista maan tieliikennerekisteriin. Esimerkiksi Ruotsissa rekisterissä olevaa ajoneuvoa ei välttämättä ole mahdollista rekisteröidä Suomen tieliikenteeseen, koska ajoneuvo ei täytä Suomen omia määräyksiä. EY-direktiiveillä yritetään yhdenmukaistaa ETA-valtioiden rekisteröintivaatimuksia, jotta ajoneuvovalmistajat pystyvät kilpailemaan avoimesti Euroopan ajoneuvomarkkinoilla. [26, s. 2.]

Uudet ajoneuvot täytyy tyyppihyväksyä Euroopassa, ennen kuin ne voidaan rekisteröidä tieliikenteeseen. Tyyppihyväksytyä ajoneuvoa saa korjata ja muuttaa vain tietyin rajoituksin, että se on laillisesti tieliikennekelpoinen. Ajoneuvon muuttamisesta on Suomessa määritetty säädökset Liikenteen turvallisuusviraston eli Trafín toimesta. Tarvittaessa ajoneuvon muutokset on muutokatsastettava tai yksittäishyväksyttävä tämän turvallisuuden ja ympäristöystävällisyyden takaamiseksi. [27.]

Ajoneuvolaissa ei suoraan ole tarkkoja määriä ajoneuvojen rakenteen ja järjestelmien muuttamiselle, vaan se sisältää pelkästään yleisiä ohjeistuksia, joiden pohjalta Liikenteen turvallisuusvirasto määrittää ajoneuvoille tarkemmat tekniset säädökset.

Trafín nykyinen voimassa oleva säädäntö ajoneuvon ja sen perävaunun rakenteen muuttamisesta tuli voimaan 1.5.2016 [28, s. 1]. Siinä ei kuitenkaan suoraan löydy säädöksiä sähkömoottorin asennukselle jälkikäteen ajoneuvon tai perävaunun voimansiirron osaksi. EY-puitedirektiivi, jota sovelletaan Suomen ajoneuvolakiin, määrittää perävaunulla tarkoitettavan:

pyörillä varustettua ajoneuvoa, joka ei kulje omalla käyttövoimallaan ja joka on suunniteltu ja rakennettu moottoriajoneuvon vedettäväksi [26, s. 8].

Liikenteen turvallisuusviraston asiantuntijalta Ville Lyytiseltä sähköpostitse saadun tarkemman ohjeistuksen mukaan esimerkiksi kuorma-auton perävaunun jollekin akselille voi asentaa sähkömoottorin, mutta moottorin käyttövoima täytyy tulla vetävästä ajo-

neuvosta. Perävaunu ei myöskään saa missään tilanteessa työntää vetävää ajoneuvoa, vaan tämän vetoaisaan täytyy kohdistua ainoastaan vetoa. [29.] Käytännössä sähkömoottori ja sen ohjaus tulisi siis suunnitella ja mitoittaa siten, ettei se tuota niin paljoa vääntöä renkailla, minkä avulla perävaunu liikkuisi omin voimin täydellä kuormalta tai tyhjänä. Vaihtoehtoisesti sähkömoottorin ohjauksesta tulisi hyvin monimutkainen järjestelmä, joka säätelisi sähkömoottorin tuottamaa tehoa ja vääntöä ajotilanteesta riippuen eri anturitietojen perusteella. Liikenneturvallisuuden kannalta määräys, ettei perävaunu saa työntää vetoajoneuvoa missään tilanteessa, on täysin ymmärrettävä. Etenkin liukkaalla alustalla mutkassa ajettaessa olisi riski, että perävaunu aiheuttaisi vetävän ajoneuvon hallinnan menetyksen ja täten pahimmillaan vakavan onnettomuuden.

Ajoneuvon moottorin vaihdolle tai muutoksille on määrätty tarkemmat säädökset Trafín toimesta. Lyytiseltä saadusta sähköpostista selviää, että sähkömoottorin asennusta ajoneuvon polttomoottorin lisäksi ei rinnasteta moottorin vaihtoon, mutta siihen sovelletaan moottorin vaihtoon olevaa säännöstä tehonnousun osalta [29]. Moottoreiden yhteisteho saa siis olla enintään 20 % suurempi kuin ajoneuvon mallisarjan tehokkaimman mallin eli vertailumoottorin teho. Tällöin ajoneuvon jarrujen ja voimansiirron tulee myös vastata mallisarjan tehokkainta mallia. [28, s. 4–5.] Polttomoottorin ja sähkömoottorin tehokäyrät ovat varsin erilaiset, joten moottoreiden huipputehot ovat saatavilla eri kierrosluvuilla. Täten suurinta yhteistehoa ei saada laskemalla moottoreiden enimmäistehoja suoraan yhteen. Lisäksi jos sähköinen voimansiirto on täysin erillään mekaanisesta voimansiirrosta, on moottoreiden suurin yhteisteho hyvin hankala laskennallisesti todentaa. Liikenteen turvallisuusviraston ajoneuvotekniikan asiantuntijalta saadun täsmennyksen mukaan enintään 20 %:n tehonnousulla tarkoitetaan mitattua tehoa esimerkiksi jarrudynamometrissä [29].

Työn alussa sähkömoottori ajateltiin sijoitettavaksi telin taimmalle akselille, joka siis vaatisi akselin vaihdon tasauspyörästä varustettuun malliin. Trafín säädöksistä löytyvät seuraavanlaiset määräykset akselistomuutoksille:

Kuitenkin kokonaismassaltaan yli 6000 kg:n N2-luokan ajoneuvon sekä N3-, O3- ja O4-luokan ajoneuvon akselistomuutokset edellyttävät aina valmistajan tai valmistajan edustajan luvan ja ohjeet, jos ajoneuvo on käyttöön otettu 31.12.1979 jälkeen. Luvan ja ohjeiden perusteella muutoksen lopputulos voi poiketa myös ajoneuvon tyypistä. [28, s. 15.]

N2- ja N3-luokan ajoneuvojen, eli kuorma-autojen, sekä niiden perävaunujen (O3- ja O4-luokan ajoneuvo) valmistajiin tulisi siis olla ensin yhteyksissä akselistomuutoksesta. On vaikea sanoa, kuinka hyvin ajoneuvon valmistajalta tai valmistajan edustajalta saa tarvittavan luvan ja ohjeet työn esimerkkijärjestelmän asentamiseen vaadittavaan akselistomuutokseen.

Työssä käsiteltävä järjestelmä on siis mahdollista saada Suomessa kuorma-autoon laillisesti tietyin ehdoin. Jotta järjestelmän muutokset saadaan lisättyä tieliikennerekisteriin, on Lyytisen kirjoittaman sähköpostin mukaan toimittava seuraavasti:

Muutokset tulisi muutoskatsastaa, mikäli kyseessä on käytetty ajoneuvo, johon muutokset tehdään. Uuden ajoneuvon kohdalla kyseessä voisi olla toisen vaiheen valmistus. Tällöin ajoneuvo tai perävaunu tulisi esittää muutosten osalta yksittäishyväksyntään. [29.]

7 Yhteenveto

Insinööriyössä selvitettiin kuorma-autoon asennettavan, sähkökäyttöisen avustimen suunnittelun pääkohdat ja Suomen tieliikennelain asettamat vaatimukset järjestelmälle. Lisäksi vertailtiin perinteisten akkukennojen ja superkondensaattoreiden toimimista järjestelmän energiavarastona.

Todettiin, että järjestelmän saisi myös Suomessa laillisesti tieliikennekäyttöön tietyin rajoituksin tehon ja rakenteen suhteen. Järkevää olisi myös toteuttaa järjestelmä erillään auton mekaanisesta voimansiirrosta. Tällöin rakenteen saisi pidettyä mahdollisimman yksinkertaisena, mikä säästää kokonaiskustannuksissa. Lisäksi tällöin järjestelmä olisi helposti kytkettävissä pois käytöstä vikatilanteessa, mutta ajoneuvo pysyisi ajokuntoisena siitä huolimatta. Täten työvuoron voisi huoletta ajaa loppuun ilman viivästyksiä, ja järjestelmän saisi huollettua muuna aikana.

Paras hyöty järjestelmästä olisi etenkin kaupunkiajossa, sekä mäkisillä teillä ajettaessa. Tarkempia suunnittelu- tai mitoituslaskuja ei tehty, ja konkreettisen näytön saamiseksi järjestelmän kannattavuudesta vaatii tarkempien kustannusarvioiden laskemisen. Järjestelmästä saatava hyöty polttoainekulujen pienentämisessä on oltava tarpeeksi hyvä suhteessa kokonaiskustannuksiin, jotta sen, niin sanottu itsensä takaisinmaksuaika pysyy kohtuullisena.

Superkondensaattoreiden käyttö järjestelmän energiavarastona todettiin varsin käyttökelpoiseksi vaihtoehdoksi. Ainoastaan kokonaiskustannusarvion avulla voitaisiin nähdä, onko niiden käyttö akkukennoja kannattavampaa pitkällä aikavälillä.

Lähteet

- 1 Volvo Truck tests a hybrid vehicle for a long haul. 2017. Verkkoaineisto. Volvo Group. <<http://www.volvogroup.com/en-en/news/2017/feb/news-2476234.html>>. 28.2.2017. Luettu 23.8.2017.
- 2 Adgero unveils world's first operational road transport hybrid system at CVS. 2016. Verkkoaineisto. <<http://adgero.eu/adgero-unveils-worlds-first-operational-road-transport-hybrid-system-at-cvs/>>. 20.4.2016. Luettu 23.8.2017.
- 3 Tingham, Brian. 2016. Fraikin in world's first KERS truck trial. Verkkoaineisto. Transport Engineer. <<http://www.transportengineer.org.uk/transport-engineer-news/fraikin-in-world-first-adgero-kers-truck-trial/143452>>. 14.7.2016. Luettu 25.8.2017.
- 4 Pikkarainen, Jussi. 2016. Infographic: Huge Fuel Savings Possible with Skeleton Technologies' and Adgero's KERS Module. Verkkoaineisto. <<https://www.skeletontech.com/skeleton-blog/infographic-huge-fuel-savings-possible-with-skeleton-technologies-and-adgeros-kers-module>>. 21.4.2016. Luettu 23.8.2017.
- 5 Fraikin finds the formula to harness the power of KERS. 2017. Verkkoaineisto. Fraikin Limited. <<http://www.fraikin.co.uk/news/fraikin-finds-the-formula-to-harness-the-power-of-kers>>. 10.7.2017. Luettu 27.8.2017.
- 6 World first Adgero hybrid technology in new Fraikin truck fleet trial. 2016. Verkkoaineisto. <<http://adgero.eu/world-first-adgero-hybrid-technology-new-fraikin-truck-fleet-trial/>>. 14.7.2016. Luettu 23.8.2017.
- 7 Finland develops Europe's first hybrid power for heavy trucks – Fuel and emissions reduced with 1140HP Visedo system. 2017. Verkkoaineisto. Visedo. <<https://visedo.com/2017/05/18/finland-develops-europes-first-hybrid-power-heavy-trucks-fuel-emissions-reduced-1140hp-visedo-system/>>. 18.5.2017. Luettu 13.9.2017.
- 8 Robert Bosch GmbH. 2007. Bosch Automotive Electrics and Automotive Electronics – Systems and Components, Networking and Hybrid Drive. 5th edition. Plochingen: Robert Bosch GmbH.
- 9 Ikonen, Markku. 2013. Aja taloudellisesti – Ajoneuvon, kuljettajan ja olosuhteiden vaikutus polttoaineen kulutukseen. Turku: Turun ammattikorkeakoulu.
- 10 Liu, Wei. 2013. Introduction to Hybrid Vehicle System Modeling and Control. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.

- 11 Hughes, Austin & Drury, Bill. 2013. *Electric Motors and Drives, Fundamentals, Types and Applications*. 4th edition. Amsterdam: Elsevier Science.
- 12 Khajepour, Amir; Fallah, Saber & Goodarzi, Avesta. 2014. *Electric and Hybrid Vehicles – Technologies, Modeling and Control: A Mechatronic Approach*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- 13 Husain, Iqbal. 2011. *Electric and Hybrid Vehicles – Design Fundamentals*, Second Edition. Abingdon: Taylor & Francis Group.
- 14 Thaler, Alexander & Watzenig, Daniel. 2014. *Automotive Battery Technology*. Berliini: Springer.
- 15 Broussely, Michel. 2010. *Battery Requirements for HEVs, PHEVs and EVs: An Overview*. Teoksessa Pistoia, Gianfranco. *Electric and Hybrid Vehicles – Power Sources, Models, Sustainability, Infrastructure and the Market*. 2010. s. 305–345. Amsterdam: Elsevier Science.
- 16 Nylund, Nils-Olof; Erkkilä, Kimmo & Hartikka, Tuukka. 2007. *Kaupunkibussien polttoaineen kulutus ja pakokaasupäästöt – Uusimman dieseltekniiikan suorituskyky*. VTT tiedotteita. Helsinki: VTT.
- 17 de Jager, Bram; van Keulen, Thijs & Kessels, John. 2013. *Optimal Control of Hybrid Vehicles*. Berliini: Springer.
- 18 Akasol GmbH. Verkkoaineisto. <<https://www.akasol.com/en/akasystem-oem>>. Luettu 14.9.2017.
- 19 Onori, Simona; Serrao, Lorenzo & Rizzoni, Giorgio. 2016. *Hybrid Electric Vehicles – Energy Management Strategies*. Berliini: Springer.
- 20 BU – How does a Supercapacitor Work? – Discover how the supercapacitor can enhance the battery. 2017. Verkkoaineisto. <http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor>. Päivitetty 21.4.2017. Luettu 12.9.2017.
- 21 Supercapacitors. 2017. Verkkoaineisto. Wikipedia. <<https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>>. Päivitetty 16.8.2017. Luettu 12.9.2017.
- 22 Mason, Shaun. 2014. *New graphene framework bridges gap between traditional supercapacitors, batteries*. Verkkoaineisto. Phys.org. <<https://phys.org/news/2014-08-graphene-framework-bridges-gap-traditional.html>>. 11.8.2014. Luettu 12.9.2017.
- 23 Li, Jian; Cheng, Xiaoqian; Sun, Jianwei; Brand, Cameron; Shashurin, Alexey; Reeves, Mark & Keidar, Michael. 2014. *High-Performance, Low-Cost Ultraca-*

- pacitors Built with Graphene and Carbon Nanotubes. Verkkoaineisto. AIP Publishing. <<https://www.aip.org/publishing/journal-highlights/high-performance-low-cost-ultracapacitors-built-graphene-and-carbon>>. 22.4.2014. Luettu 12.9.2017.
- 24 Guerra, Maria. 2016. Can Supercapacitors Surpass Batteries for Energy Storage? Verkkoaineisto. <<http://www.electronicdesign.com/power/can-supercapacitors-surpass-batteries-energy-storage>>. 16.8.2016. Luettu 12.9.2017.
- 25 Maxwell Technologies Inc. Verkkoaineisto. <<http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/125v-tran-modules>>. Luettu 14.9.2017.
- 26 Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2007/46/EY. 2007.
- 27 Ajoneuvolaki. 2002. 1090/11.12.2002.
- 28 TRAFI/66404/03.04.03.00/2015 - Auton ja sen perävaunun rakenteen muuttaminen. 2016. Liikenteen turvallisuusviraston määräys.
- 29 Lyytinen, Ville. 2017. Asiantuntija, Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi, Helsinki. Sähköpostikeskustelu 5.10.2017.
- 30 Gen4 Size 8 AC Motor Controller datasheet. Pdf-dokumentti. Sevcon.
- 31 125V Heavy Transportation Module datasheet. Pdf-dokumentti. Maxwell.

Sevcon Gen4 Size 8 -moottorinhajaimen datalehti



Gen4 Size 8

AC Motor Controller

An AC motor controller designed to meet the high performance requirements of on-road and off-road Electric (EV) and Hybrid Electric Vehicles (HEV).

A compact, rugged and cost effective design, the Gen4 Size 8 is well suited for EV OEMs, EV conversions and EV drive train system integrators. Its high voltage range, up to 400V DC, is well matched to the needs of the automotive and commercial transport markets. The same hardware platform handles both AC Induction and Permanent Magnet AC motor technologies.

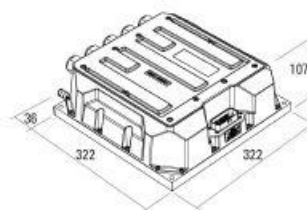
Features

- AC Permanent Magnet synchronous motor
- AC Induction motor
- Up to 400VDC supply voltage
- Up to 100kW peak power output
- Up to 60kW continuous power output
- Advanced flux vector control
- Integrated logic circuit
- Includes an additional dedicated safety supervisory processor
- 12V or 24V nominal supply
- Designed for ISO26262 ASIL D compliance
- Safety interlock pulsed enable signal



Key Parameters

- Operating voltage range 128V to 400VDC
- Output motor phase current:
 - 400 Arms (boost)
 - 360 Arms (30sec)
 - 300 Arms (2 min)
 - 200 Arms (continuous)
- Water/Glycol or forced air cooling. Oil cooling available - contact Sevcon
- Safety:
 - Electrical safety to ISO 6494, IEC 60664 and UL840
 - Functional safety to ISO26262
 - Pulsed safety enable input
 - Pulsed status output
- Environmental:
 - -40°C to +85°C operation
 - IP66 protection
 - ISO 16750



Multiple Motor Sensor Feedback Options

The Gen4 Size 8 supports various types of motor sensor via range of hardware inputs and software control, allowing a great deal of flexibility.

- Absolute UVW encoder input
- Absolute Sin/Cos encoder input
- Resolver input
- Incremental AB encoder input
- Programmable 5V to 10V encoder power supply

Integrated I/O

The Gen4 Size 8 includes a fully-integrated set of inputs and outputs (I/O) designed to handle a wide range of vehicle functions. This eliminates the need for additional external I/O modules or vehicle controllers and connectors.

- All I/O protected to 40V
- 4 analogue inputs 0-10V
- 4 digital inputs
- 3 power supplies 0-10V 100mA
- 3 digital outputs PWM max 2A

Other Features

- A CANopen bus allows easy interconnection of controllers and devices such as displays and driver controls
- The CAN bus allows the user to wire the vehicle to best suit vehicle layout since inputs and outputs can be connected to any of the controllers on the vehicle and the desired status is passed over the CAN network to the relevant motor controller
- The Gen4 Size 8 controller can dynamically change the allowed battery current by exchanging CAN messages with a compatible Battery Management System
- Configurable as vehicle control master or motor slave

Configuration Tools

Sevcon offers a range of configuration tools for the Gen4 Size 8 controller, with options for Windows based PC or calibrator handset unit. These tools provide a simple yet powerful means of accessing the CANopen bus for diagnostics or parameter adjustment. The handset unit features password protected access levels and a customized logo start-up screen.



All information is provisional and subject to change.
Datasheet V17.1

For more
information visit
sevcon.com

Maxwell 125V -superkondensaattorimoduulin datalehti

DATASHEET 125V HEAVY TRANSPORTATION MODULE

FEATURES AND BENEFITS*

- ▷ Up to 1,000,000 duty cycles or 10 year DC life
- ▷ 125V DC working voltage
- ▷ Active cell balancing
- ▷ Temperature and voltage monitoring
- ▷ CAN bus digital monitoring and communications
- ▷ High power density

TYPICAL APPLICATIONS

- ▷ Buses
- ▷ Electric trains and trolleys
- ▷ Heavy duty transportation
- ▷ Cranes, RTGS
- ▷ Utility vehicles
- ▷ Mining equipment



PRODUCT SPECIFICATIONS

ELECTRICAL	BMOD0063 P125 B08
Rated Capacitance ¹	63 F
Minimum Capacitance, initial ¹	63 F
Maximum Capacitance, initial ¹	76 F
Maximum ESR _{DC} , initial ¹	18 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR _{DC} ¹	100 A
Rated Voltage	125 V
Absolute Maximum Voltage ²	136 V
Absolute Maximum Current	1900 A
Leakage Current at 25°C, maximum ³	10 mA
Maximum Series Voltage	1500V
Capacitance of Individual Cells ¹¹	3000 F
Maximum Stored Energy, Individual Cell ¹¹	3.0 Wh
Number of Cells	48

TEMPERATURE	
Operating temperature range (Cell case temperature)	
Minimum	-40°C
Maximum	65°C
Storage temperature range (Stored uncharged)	
Minimum	-40°C
Maximum	70°C

*Results may vary. Additional terms and conditions, including the limited warranty, apply at the time of purchase. See the warranty details and enclosed information for applicable operating and use requirements.

Page 1 :: Document number: 1014696.7 :: maxwell.com



Maxwell
TECHNOLOGIES
Enabling Energy's Future™

DATASHEET 125V HEAVY TRANSPORTATION MODULE

PRODUCT SPECIFICATIONS (Cont'd)

PHYSICAL **BMOD0063 P125 B08**

Mass, typical ¹³	61 kg
Power Terminals	Radsok*
Recommended Torque - Terminal	N/A
Vibration Specification	ISO16750-3 Table 14
Shock Specification	SAE J2464
Environmental Protection	IP65
Cooling	Forced Air

MONITORING / CELL VOLTAGE MANAGEMENT

Temperature Interface	Serial Data (CAN)
Cell Voltage Monitoring	Group Voltage (CAN)
Connector	Deutsch DTM
Cell Voltage Management	VMS 2.0

POWER & ENERGY

Usable Specific Power, P_d^4	1,700 W/kg
Impedance Match Specific Power, P_{max}^5	3,600 W/kg
Specific Energy, E_{max}^6	2.3 Wh/kg
Stored Energy, E_{stored}^7	140 Wh

SAFETY

Short Circuit Current, typical (Current possible with short circuit from rated voltage. Do not use as an operating current.)	6,900 A
Certifications	RoHS, eMark
High-Pot Capability ¹²	4,000 VAC

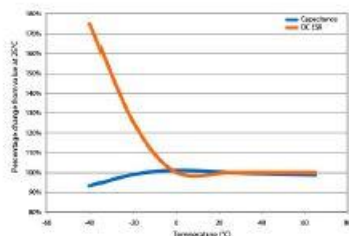
DATASHEET 125V HEAVY TRANSPORTATION MODULE

TYPICAL CHARACTERISTICS

THERMAL CHARACTERISTICS	BMOD0063 P125 B08
Thermal Resistance ($R_{\theta_{ca}}$ Case to Ambient), typical ⁸	0.04°C/W
Thermal Capacitance (C_{th}), typical	33,000 J/°C
Maximum Continuous Current ($\Delta T = 15^\circ\text{C}$) ⁸	140 A _{RMS}
Maximum Continuous Current ($\Delta T = 40^\circ\text{C}$) ⁸	240 A _{RMS}
LIFE	
DC Life at High Temperature ¹ (at Rated Voltage & Maximum Operating Temperature)	1,500 hours
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)	20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)	100%
Projected DC Life at 25°C ¹ (held continuously at Rated Voltage)	10 years
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)	20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)	100%
Projected Cycle Life at 25°C ^{1,9,10}	1,000,000 cycles
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)	20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)	100%
Test Current	100 A
Shelf Life (Stored uncharged at 25°C)	4 years

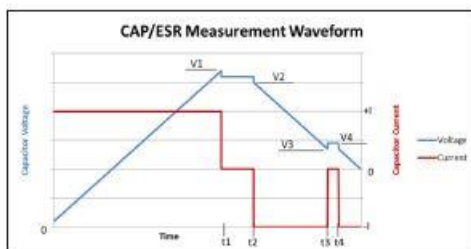
DATASHEET 125V HEAVY TRANSPORTATION MODULE

ESR AND CAPACITANCE VS TEMPERATURE

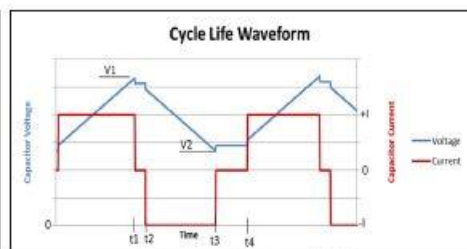


NOTES

1. Capacitance and ESR_{DC} measured at 25°C using specified test current per waveform below.
2. Absolute maximum voltage, non-repeated. Not to exceed 1 second.
3. After 72 hours at rated voltage. Initial leakage current can be higher.
4. Per IEC 62391-2, $P_d = \frac{0.12V^2}{ESR_{DC} \times mass}$
5. $P_{max} = \frac{V^2}{4 \times ESR_{DC} \times mass}$
6. $E_{max} = \frac{\frac{1}{2} CV^2}{3,600 \times mass}$
7. $E_{stored} = \frac{\frac{1}{2} CV^2}{3,600}$
8. $\Delta T = I_{RMS}^2 \times ESR \times R_{ca}$
9. Cycle using specified test current per waveform below.
10. Cycle life varies depending upon application-specific characteristics. Actual results will vary.
11. Per United Nations material classification UN3499, all Maxwell ultracapacitors have less than 10 Wh capacity to meet the requirements of Special Provisions 361. Both individual ultracapacitors and modules composed of those ultracapacitors shipped by Maxwell can be transported without being treated as dangerous goods (hazardous materials) under transportation regulations.
12. Duration = 60 seconds. Not intended as an operating parameter.
13. Without fan. With fan, mass is 63.4 kg.



$V1 = V_{rated}$ $t2 - t1 = 15$ seconds Capacitance = $I \times (t3 - t2) / (V2 - V3)$
 $V3 = 0.5 \times V_{rated}$ $t4 - t3 = 5$ seconds $ESR = (V4 - V3) / I$



$V1 = V_{rated}$ $t2 - t1 = 5$ seconds ($I=0$)
 $V2 = 0.5 \times V_{rated}$ $t4 - t3 = 15$ seconds ($I=0$)

DATASHEET 125V HEAVY TRANSPORTATION MODULE

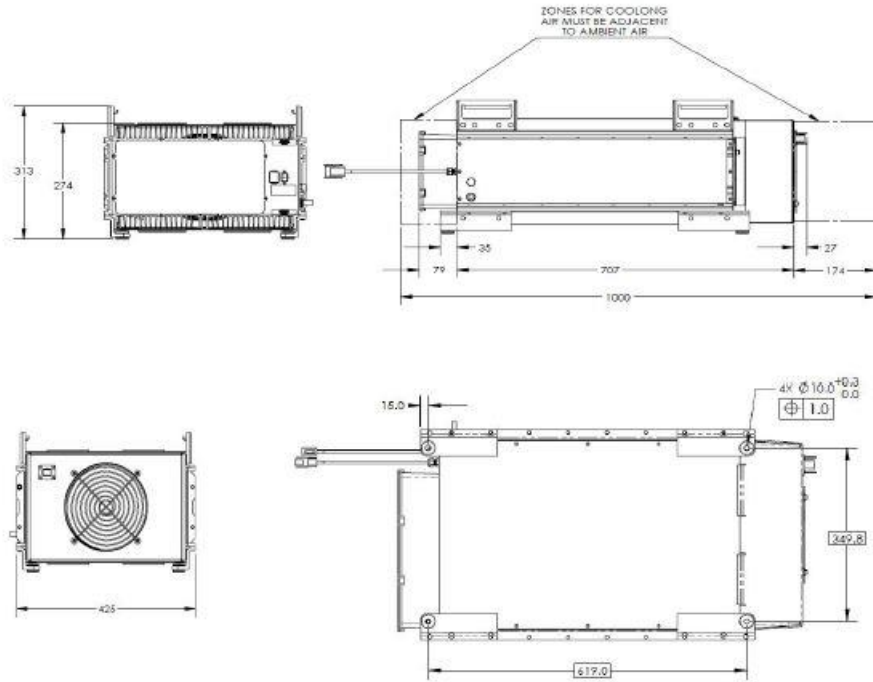
MOUNTING RECOMMENDATIONS

Please refer to the user manual for installation recommendations.

MARKINGS

Products are marked with the following information: Rated capacitance, rated voltage, product number, name of manufacturer, positive and negative terminal, warning marking, serial number.

BCAP0063 P125 B08



Part Description	Dimensions (mm)			Package Quantity
	L (± 0.5mm)	D (± 0.2mm)	H(±0.7mm)	
BCAP0063 P125 B08*	619	33.3	265	1

*Refer to user manual for product variant details

DATASHEET **125V HEAVY TRANSPORTATION MODULE**

ORDERING INFORMATION

Base Module

109024B BMOD0063 P125 B08 63F/125V eMark Module with CAN Communication

Power Connection Kit

109131 Power Connection Kit, 90 DEG
109132 Power Connection Kit, STRAIGHT

Communication Kit

109133 CAN SIGNAL, Deutsch

Fan Kit

129036 FAN KIT, 24V, eMark

Product dimensions are for reference only unless otherwise identified. Product dimensions and specifications may change without notice. Please contact Maxwell Technologies directly for any technical specifications critical to application. All products featured on this datasheet are covered by the following U.S. patents and their respective foreign counterparts: 6643119, 7295423, 7342770, 7352558, 7384433, 7440258, 7492571, 7508651, 7791860, 7791861, 7816891, 7859826, 7883553, 7935155, 8072734, 8098481, 8279580, and patents pending.



Maxwell Technologies, Inc.
Global Headquarters
3888 Calle Fortunada
San Diego, CA 92123
USA
Tel: +1 858 503 3300
Fax: +1 858 503 3301



Maxwell Technologies SA
Route de Montena 65
CH-1728 Rossens
Switzerland
Tel: +41 (0)26 411 85 00
Fax: +41 (0)26 411 85 05



Maxwell Technologies, GmbH
Leopoldstrasse 244
80807 München
Germany
Tel: +49 (0)89 / 4161403 0
Fax: +49 (0)89 / 4161403 99



**Maxwell Technologies
Shanghai Trading Co. Ltd.**
Unit A2,C 12th Floor
Huarun Times Square
500 Zhangyang Road,
Pudong New Area
Shanghai 200122,
P.R. China
Phone: +86 21 3852 4000
Fax: +86 21 3852 4099



Maxwell Technologies Korea Co., Ltd.
Room 1524, D-Cube City
Office Tower, 15F 8662
Gyeongin-Ro, Guro-Gu,
Seoul, 152-706
South Korea
Phone: +82 10 4518 9829

MAXWELL TECHNOLOGIES, MAXWELL, MAXWELL CERTIFIED INTEGRATOR, ENABLING ENERGY'S FUTURE, BOOSTCAR, C CELL, D CELL and their respective designs and/or logos are either trademarks or registered trademarks of Maxwell Technologies, Inc. and may not be copied, imitated or used, in whole or in part, without the prior written permission Maxwell Technologies, Inc. All contents copyright © 2013 Maxwell Technologies, Inc. All rights reserved. No portion of these materials may be reproduced in any form, or by any means, without prior written permission from Maxwell Technologies, Inc.

