

Jani Turunen

Muunnossähköauto eCelica
Moottori ja invertteri
Sähköautoprojekti

Opinnäytetyö
Sähkötekniikka


Tammikuu 2014




MAMK

University of Applied Sciences

KUVAILULEHTI

	Opinnäytetyön päivämäärä 30.1.2014	
Tekijä(t) Jani Turunen	Koulutusohjelma ja suuntautuminen Sähkövoimatekniikka	
Nimeke Muunnossähköauto eCelica – Moottori ja invertteri		
Tiivistelmä Tämä opinnäytetyö on osa isompaa muunnossähköautoprojektia . Projekti sisältää kokonaisuudessaan vuosimallia 2000 olevan Toyota Celican muunnoksen polttomoottorikäyttöisestä sähköiseksi. Projekti kesti aloituspalaverista ajokuntoiseksi noin 16 kuukautta. Käytännössä auto jää tutkimus- ja kehityskäyttöön, joten virallista valmistumispäivää ei voida määrittää. Projekti tehtiin kolmen sähköpuolen opiskelijan ja projektipäällikön voimin. Kokonaisuudessaan projekti on sisältänyt laajasti sekä normaalin että sähköautotekniikan opiskelua. Projekti toteutettiin ilman yhteistyökumppaneita Mikkelin ammattikorkeakoulun rahoittama ja valmis auto jää PR- ja postikäyttöön, kunhan katsastukset on suoritettu. Sähköautomuunnos jaettiin opinnäytetyökokonaisuuksiin, jotka ovat, moottori ja invertteri, joka keskittyy moottoriteknologioihin ja niiden ohjaukseen sekä itse projektiauton parametrien määrittämiseen. Toinen osa keskittyy BMS:ssään eli akustonhallintaan ja akkuteknologioihin ja kolman manuaalisen vaihteiston rakentamiseen robotiikalla toimivaksi, että vaihteet vaihtuisivat kuin automaattiautossa. Oman osani tavoite oli tutustua sähköautoissa käytettyihin moottoriteknologioihin ja niiden ohjaamiseen. Tavoite oli saada sähkömoottori asennettua hyvää asennustapaa noudattaen ja pidettyä ohjaimen ja moottorin väli lyhyenä häiriöiden minimoimista varten. Kokonaisuuteen kuului myös edellä mainitun yhdistäminen sulavasti osaksi auton omia järjestelmiä.		
Asiasanat (avainsanat) Muunnossähköauto, eCelica, moottori, invertteri.		
Sivumäärä 47 + 3	Kieli Suomi	URN http://www.urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201403243464
Huomautus (huomautukset liitteistä)		
Ohjaavan opettajan nimi Teemu Manninen	Opinnäytetyön toimeksiantaja Mikkelin ammattikorkeakoulu	

DESCRIPTION

		Date of the bachelor's thesis 30.1.2014
Author(s) Jani Turunen	Degree programme and option Electrical engineering	
Name of the bachelor's thesis Electric car conversation eCelica - Motor and inverter		
Abstract <p>The objective of the thesis was to build electric conversion car. Project consists of converting a model 2000 Toyota Celica to an electric car. Project took 16 months to execute and developing will keep on going even though the car is fully functional. Project is sponsored by Mikkeli University of Applied Sciences and when finished, the car will be used to promote school and to deliver mail in campus area.</p> <p>Project demanded lots of manual labour and this thesis portrays how the car was modified. Conversion required learning about automotive engineering which was done by taking some of the same courses as automotive engineer students.</p> <p>Conversion was made by three electrical engineer students and project manager. Project was divided into three parts, my part consisted of motor and inverter. Other parts were battery & BMS (battery management system) and robotic gear changing for manual gearbox.</p>		
Subject headings, (keywords) EV, Electrical conversation, motor, inverter		
Pages 47 + 3	Language Finnish	URN http://www.urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201403243464
Remarks, notes on appendices		
Tutor Teemu Manninen	Bachelor's thesis assigned by Mikkeli University of Applied Sciences	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	1
2	KAUPALLISET SÄHKÖAUTOT – HISTORIA.....	2
3	MUUNNOSSÄHKÖAUTO.....	4
4	SÄHKÖMOOTTORIT	5
4.1	DC-Moottorit	5
4.1.1	Hiiliharjalliset DC-moottorit.....	6
4.1.2	Hiiliharjattomat DC-moottorit	10
4.2	AC-moottorit.....	11
4.2.1	Oikosulkumoottori	12
4.2.2	Liukurengasmoottori.....	14
4.2.3	Hybridiaskelmoottori	15
4.2.4	Kestomagneettitahtimoottori.....	16
5	SÄHKÖMOOTTORIN OHJAUS.....	18
5.1	DC-moottorin ohjaus	19
5.2	AC-moottorin ohjaus	19
5.3	Skalaarisohjaus ja -säätö.....	20
5.4	Vektorisäätö	21
5.5	DTC-säätö.....	22
5.6	Pulssinleveysmodulaatio.....	23
6	REGENEROINTI	25
6.1	DC-moottorin regenerointi	25
6.2	AC-moottorin regenerointi	25
7	ECELICA MUUNNOSSÄHKÖAUTO.....	26
7.1	Suunnittelu.....	26
7.1.1	Moottori - HPEVS AC 50.....	29
7.2	Invertteri - Curtis 1238R-7601	32
7.2.1	1314 PC Programming station.....	35
7.3	Projektin mekaaniset muutokset	38
8	YHTEENVETO	46

LIITTEET

- 1 HPEVS AC-50, Momentti ja tehokäyrä**
- 2 HPEVS AC-50, Vääntö ja teho pyörimisnopeuden funktiona**
- 3 Curtis 1238R kytkentäkaavio**

1 JOHDANTO

Sähköautot tekevät taas tuloaan markkinoille, kun akkuteknologiat ottavat harppauksia eteenpäin tuoden markkinoilla paremman tehoteheyden omaavia ratkaisuja edullisemmin kuin koskaan ennen. Tämä on mahdollistanut kaupallisten sähköautojen saavuttavan yli 500 km kantaman yhdellä latauksella. Sähköautojen leviämistä edesauttaa myös huolet ilmastosta sekä kamppanjat energian säästäminen puolesta.

Viime vuosina noussut bensiinin hinta sekä verotuksen suhteuttaminen hiilidioksidipäästöihin on pakottanut kuluttajat ja autoteollisuuden harkitsemaan ja kehittämään kulutukseltaan pienempiä vaihtoehtoja. Tämä yleistynyt trendi näkyy jo selvästi markkinoilla. Norjan myydyin auto syyskuussa vuonna 2013 oli Nissan Leaf -täyssähköauto.

Sähköautojen tuomat mahdollisuudet energiantuotannon energiavarastoina vuoden kylmimpinä aikoina on vain yksi tulevaisuuden sovelluksista, jotka ajavat sähköautoja kohti isompaa markkinaosuutta automarkkinoista. Tämä on innostanut ihmisiä muuntamaan polttomoottorikäyttöisiä ajoneuvoja sähkötoimisiksi.

Suomessa on muutosprojekteja tehty pidemmän aikaa ja niiden lisääntyminen on vain innostanut uusia rakentajia. Tämä projekti on Mikkelin ammattikorkeakoulun sponsoroima tutkimusprojekti sähköautojen tekniikkaan ja sen on toteuttanut ja suunnitellut sähköosasta.

Projektin tavoite oli oppia sähköautojen tekniikasta rakentamalla itse muunnossähköauto. Samalla haluttiin selvittää, onko muunnossähköauton rakentaminen itse kustannustehokasta ja millaisia vaatimuksia se rakentajalle asettaa. Projektia vietiin eteenpäin tekemällä taustatyötä muunnosprojekteista ja niiden vaatimuksista sekä mahdollisista aihio-, moottori-, invertteri- sekä akustovaihtoehtoista.

2 KAUPALLISET SÄHKÖAUTOT – HISTORIA

Sähköautoilu tekee tuloaan nyt kolmatta kertaa historissa. Ensimmäisen kerran autot kulkivat sähköllä 1900-luvun alussa. Tuolloin New Yorkin taksit liikkivat sähkövoimalla. Tuohon aikaan oli käytössä vaihtoakkujärjestelmä, jossa tyhjentyneet akut vaihdettiin vaihtoasemilla täysiin. Sähköautoilun hyvän alun kuitenkin tuhosi ensimmäinen maailmansota, jonka vuoksi räjähtänyt polttomoottoreiden kysyntä sai sähkömoottorit unohtumaan lähes täysin pitkäksi aikaa.

Toisen kerran sähköautot tekivät tuloaan 1990-luvulla, kun ilmanlaadun heikentymisestä pelästyneet viranomaiset säätivät Kaliforniassa lain, jonka mukaan auton valmistajilla on oltava myös ympäristöystävällinen vaihtoehto. Suurimmat autovalmistajat ehtivätkin tuoda markkinoille ensimmäiset mallinsa, ennen kuin ne vedettiin pois lähes olemattoman kysynnän vuoksi.

Tästä päästäänkin 2010-luvulle, jossa suurien autovalmistajien sähköautojen prototyyppejä, joita on nähty prototyyppiasteella jo vuosia, on alkanut päästä myyntiin asti. Tilannetta edesauttaa muun muassa kehittynyt akkuteknologia ja regenerointi, joka mahdollistaa jarruenergian talteenoton ja sen uusiokäytön. Sähköautoilun etua kannattaa myös nousseen bensan ja dieselin hinnat, jotka tekevät edullisesta autoilusta polttomoottoreilla lähes mahdotonta. Myös autojen verottaminen kulutuksen mukaan kallistaa vaakaa sähköautojen puoleen.

Sähköautoilun ja vaihtoehtoisten energiamuotojen edistämiseksi teki EU:n komissio direktiiviesityksen 24.1.2013, että sen alueella jokaisella pitäisi olla vähintään 7 000 avointa latauspistettä vuoteen 2020 mennessä. Tämä tarkoittaa, että Suomessa pitäisi näin ollen olla 71 000 avointa latauspistettä. Määrä kuulostaa vielä suuremmalta, kun ottaa huomioon, että vuonna 2012 Suomessa myytiin 179 sähköautoa. [1.]

Lataustolppien yleistyminen helpottaa sähköautoilun yleistymistä, sillä vanhojen lämmitystolppien johdotusta ei ole tehty sähköautojen lataamiseen. Varsinkin isoissa taloyhtiöissä useamman sähköauton lataaminen samaan aikaan aiheuttaisi sulakkeiden paukkumista, joten uusia pisteitä tarvitaan. Isot valmistajat ovatkin tuoneet

markkinoille versionsa isoistakin latausjärjestelmistä, joita voidaan asentaa muun muassa vaikka kauppakeskuksiin tai hotelleihin. Tämä taas mahdollistaa uusien lisäpalvelujen kehittämisen, kuten asiakkaiden houkuttelun esimerkiksi ilmaisella tai tunnin latausajalla sillä aikaa, kun käyt S- tai K-marketissäsi. Hotelleissa lataustolppien käyttö puolestaan voitaisiin lisätä suoraan huoneen laskuun älykkäiden latausjärjestelmien ansiosta. [3.]



KUVA 1. Myydyin sähköauto vuonna 2013, Nissan Leaf (Nissan 2013)

Sähköautojen lataamisesta puhuttaessa yleensä tarkoitetaan normaalia ”hidasta” latausta, johon käytetään normaalia 230V, 16A syöttöä. Lataus tätä lataustapaa käyttäen riippuu akuston koosta ja varauksesta latauksen alkaessa. Käytännössä kuitenkin puhutaan maksimissaan seitsemästä yhdeksään tunnin latausajoista. Tämä tulee olemaan pääasiallinen lataustapa, sillä usein sivulauseissa mainitut, muutaman minuutin kestävät pikalataukset vaativat aivan omat järjestelmät ja johdotukset, myös autonpuolelta. Niitä käytettäessä myös akuston käyttöikä kärsisi, koska akuston latauskertojen lukumäärä tippuisi murto-osaan. [2.]

3 MUUNNOSSÄHKÖAUTO

Muunnossähköauto tarkoittaa polttomoottorikäyttöisen auton käyttövoiman muuntamista sähköksi. Muunnossähköauton aihion valinta aiheuttaa paljon rajoitteita ja vaatimuksia projektille. Yleisimpiä muunnosautojen aiheuttamia murheita on painonlisäys suhteessa maksimi akselimassoihin. Muunnettava auto kannattaa aina punnita itse eikä luottaa valmistajan ilmoittamaan, koska paino voi olla yli 100 kg ilmoitettua suurempi. Muunnosta helpottaa aina, jos auton omanmassan ja maksimiakselimassan väliin saa jo lähtötilanteessa jätettyä tarpeeksi suuren reservin.

Aihiossa on myös huomioita voimansiirron toteutus eli onko auto etu- vai takaveto ja käytetäänkö vaihdelaatikko- vai alennusvaihdetta. Auton vetotapa vaikuttaa myös uusien osien sijoitteluun painojakauman kannalta. Etuvetoisen auton keula voi keventyä muun muassa liikaa, jos akuston tuoma lisämassa asennetaan taka-akselin taakse. Mikäli muunnos on tarkoitus saada, on aihion valinnassa huomioitava sen vuosimalli. Vuosimalli vaikuttaa, mitkä direktiivit on otettava huomioon muutokatsastuksessa. Mitä uudempi aihio, sitä enemmän täytettäviä pykälää ja päinvastoin. Varsinkin EMC- vaatimukseen on hyvä kiinnittää huomiota, jos aihio on vuosimallia 2002 uudempi.

Aihion valinta käytännössä määrää hyvin vahvasti, mihin suuntaan muunnos lähtee etenemään. Aihion vuosimalli myös määrää, onko ohjaustehostin tarpeellinen tai tarvitseeko sitä muuttaa sähköiseksi, samoin kuin jarrun alipainepumppu.

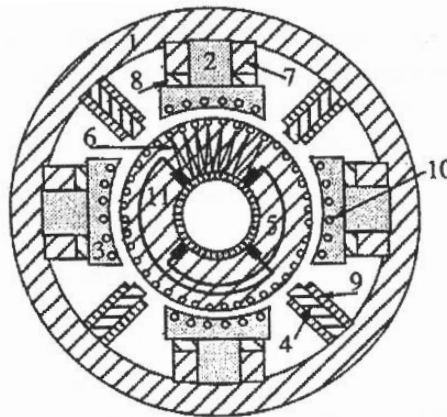
Viranomaisvaatimukset ovat asioita, joihin jokainen muunnossähköautoaan katsastava joutuu törmäämään. Tärkeimpinä täytettävänä pykälää ovat UNECE:n E-säännöt E-100, E-85, E-51, E-13, E-12 ja uudemmissa aihioissa E-10 (EMC). Autossa on myös oltava huurteenpoisto, joka monesti joudutaan rakentamaan erikseen, kun polttomoottorin tuottamaa lämpöä ei enää voida käyttää lämmitykseen. Kaikki päävirtakaapelit on myös oltava näkyviltä osuuksilta oransseja. Kaiken muun lisäksi on pidettävä huolta, että sähköasennukset on yleisesti toteutettu käyttäen hyvää asennustapaa ja että ne ovat turvalliset. Tarkistuksen tähän voi tehdä esimerkiksi paikallinen sähköliike.

Mikäli on aloittamassa muunnossähköauto projektia ja aikataulu ei ole liian tiukka, kannattaa ottaa huomioon, että tuontiautot saa tuoda verovapaana, mikäli se tulee tutkimus- ja kehityskäyttöön. Tämä saattaa avata uusia mahdollisuuksia aihion valinnassa. Käytännössä tämä tarkoittaa esimerkiksi oppilaitoksia.

4 SÄHKÖMOOTTORIT

4.1 DC-Moottorit

Tasavirtamoottorit poikkeavat rakenteeltaan yleisemmistä, tahti- ja epätahtikoneiden rakenteista. Suurin ero on se ettei se tarvitse pyörivää magneettikenttää (eli kiertokenttää) toimiakseen (kuva 2).



Kuva 5.1 Tasasähkökoneen aktiiviset rakenneosat. 1. Kehä, 2. Päänavan rautasydän. 3. Napakenkä. 4. Kääntönavan rautasydän. 5. Ankkurin rautasydän. 6. Ankkurikäänitys. 7. Sivuvirtakäänitys. 8. Sarjakäänitys. 9. Kääntönapa käänitys. 10. Kompensointikäänitys. 11. Kommutaattori harjoineen.

KUVA 2. Tasavirtamoottorin rakenne. (11, s.267)

Tasavirtamoottorissa sen rautaosat muodostavat magneettikentille tietyt magneettipiirit. Koska magneettikentät ovat tasakenttiä, mahdollistaa se kehän ja napojen rautaosien valmistuksen täysraudasta. Napakengissä voidaan taas käyttää myös sähkölevyä rautahäviöiden pienenemistä varten. Moottorin rautaosat on tehty

aina sähkölevystä, koska se joutuu pyörimään tasamagneettikentässä, joka aiheuttaa siinä vuon vaihtelua sekä rautahäviöitä.

Kuvan 2 esittämässä tasavirtamoottorin rakennekuvassa selviää sarja- ja sivuvirtakäämityksen sijainnin moottorissa. Näillä käämityksiä kutsutaan myös yhteisnimityksellä magnetoimiskäämitys, jolla muodostetaan varsinainen magneettikenttä.

Ankkurikkäämitykseen indusoituu vaihtosähkömotorinen jännite kun se alkaa pyörimään magnetoimiskäämityksen luomassa magneettikentässä. Koska Indusoitunut jännite on vaihtojännitettä, onse vaihtosuunnattava, minkä hoitaa kommutaattori harjojen kanssa. Näin ollen kommutaattori on harjojen kanssa mekaaninen vaihtosuuntaaja.

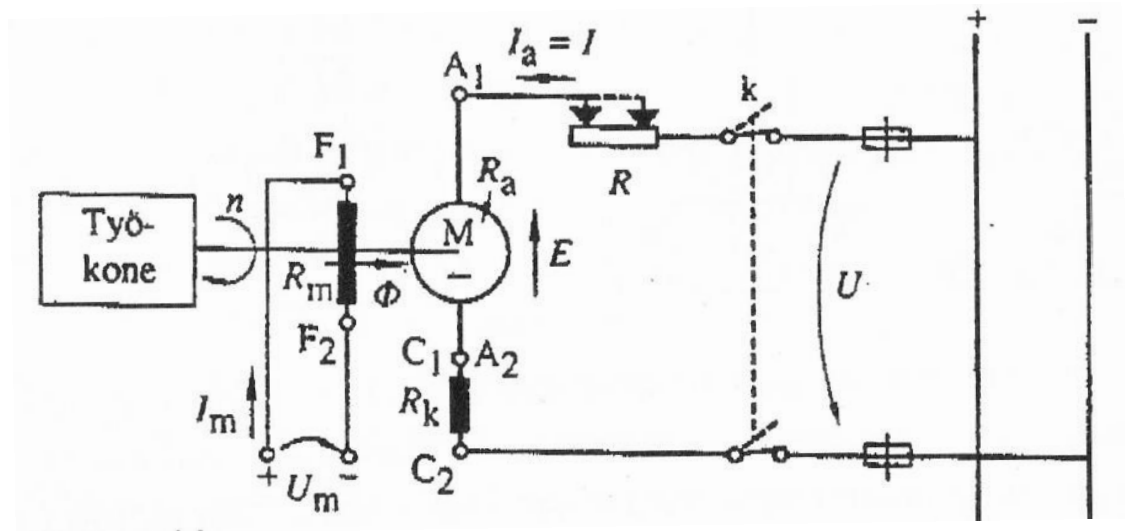
Tasavirtamoottorin kääntönapakäämityksen tehtävä on saada kommutaattori harjoineen toimimaan kipinättömäksi pidentääkseen moottorin käyttöikä. Se myös samalla kompensoi ankkurivirran muodostamaa magneettikenttää kompensointikäämityksen kanssa. [11, 267 – 269.]

4.1.1 Hiiliharjalliset DC-moottorit

Hiiliharjalliset tasasähkömoottorit voidaan jaotella vielä neljään kategoriaan magnetoinnin perusteella. Moottorit jaotellaan silloin sivuvirta-, sarja-, kompaundi- tai vierasmagnetoituihin koneisiin. Magnetointi käytännössä toteutetaan päänapojen magnetoitikkäämitykselle.

Vierasmagnetoiduissa koneissa magnetointivirta otetaan työvirtapiiristä erotetusta tasavirtalähteestä. Se muistuttaa ominaisuuksiltaan monessa suhteessa oikosulkumoottoria. Vierasmagnetoidunkoneen pyörimisnopeus ei radikaalisti muutu kuormituksen noustessa, lasku on ainoastaan muutamia prosentteja.

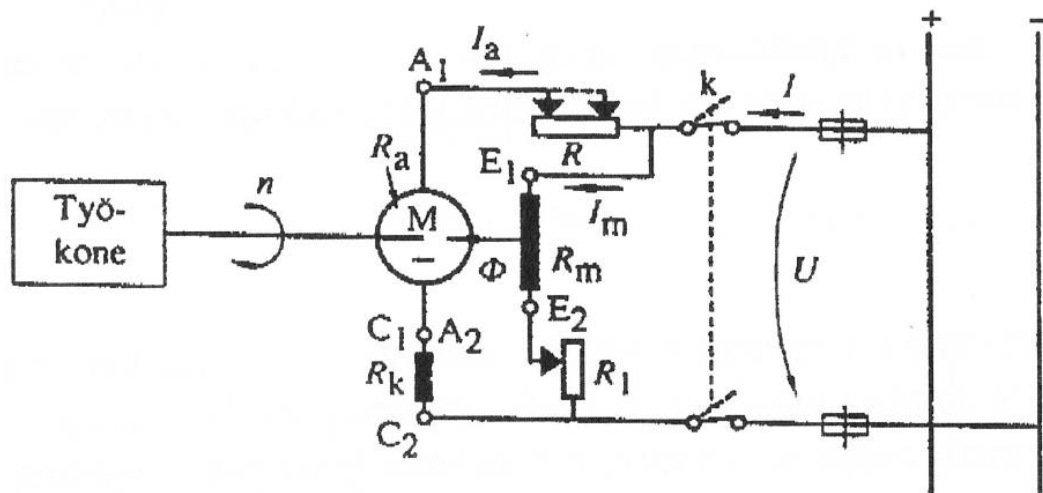
Pyörimisnopeutta voidaan säätää kolmella tavalla roottoriin vaikuttavaa roottorijännitettä muuttamalla. Jännitteen pienentäminen laskee pyörimisnopeutta ja päinvastoin Säättämällä magneetointivirtaa, jolla voidaan heikentää magneettikenttää tai muuttamalla roottoriin resistiivistä jännitettä piiriin asennetusta säätövastuksesta. [11 s.291]



KUVA 3. Vierasmagnetoidun tasasähkömoottorin virtapiiripiirros (11, s.291)

Sivuvirtakoneessa magneetointikäämitys muodostuu ainoastaan sivuvirtakäämityksestä. Tämä käämitys on kytketty roottorikäämin kanssa rinnan. Magneetointivirta otetaan suoraan moottorin liittimistä. Sivuvirtamoottorin ainut ero vierasmagnetoituun koneeseen on se, että magneetointi- ja ankkurivirta otetaan samasta paikasta.

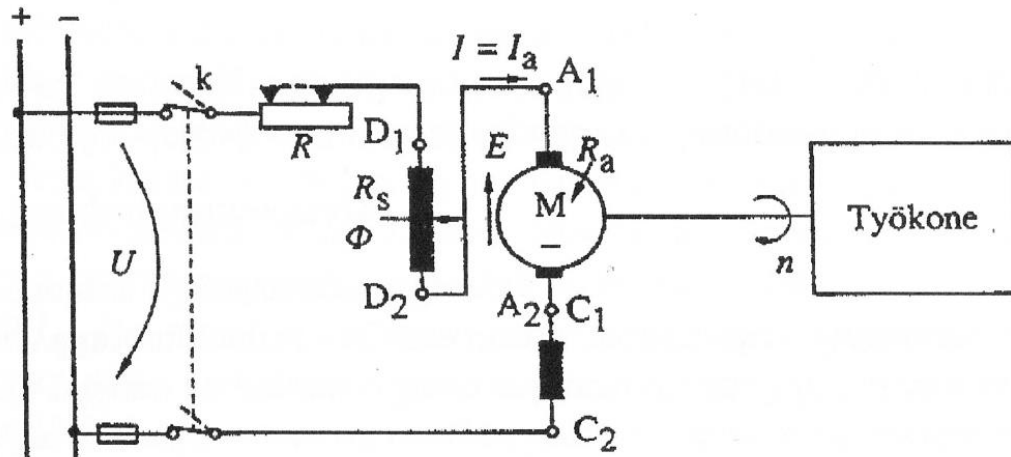
Tästä johtuen sivuvirta- ja vierasmagnetoidun koneen ominaisuudetkin ovat hyvin samanlaiset. Koska sivuvirtakoneen pyörimisnopeutta ei voida säätää pääjännitettä muuttamalla, on se tehtävä joko magneettikenttää heikentämällä magneetointipiiriin säätövastuksesta tai säätämällä ankkuripiiriin resistiivistä jännitehäviötä. [11, s.295.]



KUVA 4. Sivuvirtamoottorin virtapiiripiirros (11, s.295)

Sarjamoottorin magnetointikäänitys muodostuu ainoastaan sarjakäämityksestä. Tämä käänitys on kytketty roottorikäänityksen kanssa sarjaan. Tämä tarkoittaa sitä, että roottorivirta on myös samalla magnetoimisvirta. Sarjamoottorin vääntömomentti kasvaa käytännössä verrannollisena kuormitusvirran neliöön. Sen käytössä on myös huolehdittava siitä, ettei kone joudu koskaan tyhjäkäyntiin, koska se aiheuttaa ryntäämisen, eli pyörimisnopeus nousee vaarallisen suureksi. Sarjamoottorin pyörimisnopeutta säädetään roottoriin kytketyllä säätövastuksella.

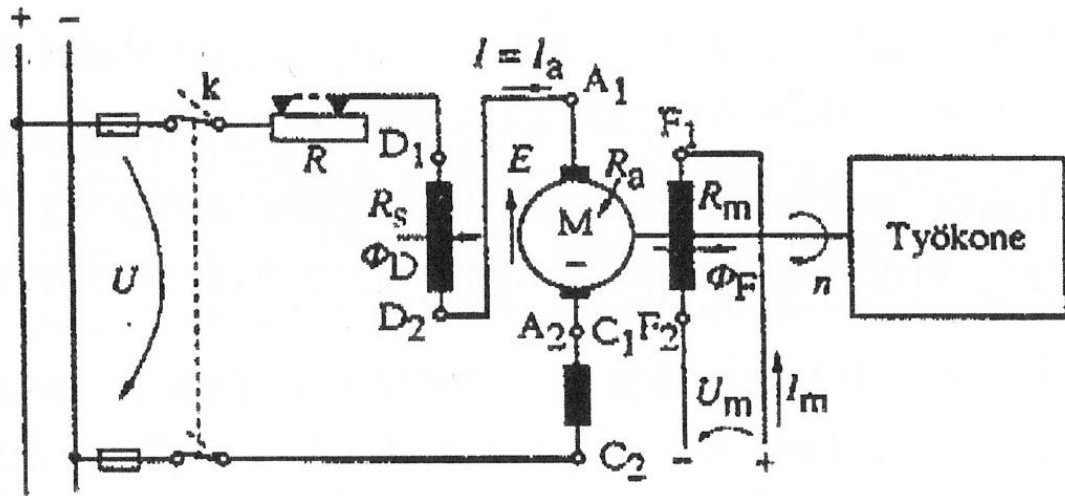
Sarjamoottorille ominaisia käyttökohteita ovat käytöt, joissa joudutaan ajamaan vaihtelevilla kuormilla, eri pyörimisnopeuksilla sekä käytöissä, joissa ei joudu käymään tyhjänä. Käytännössä sarjamoottoreita on käytetty raskaissa liikennekäytöissä sen tuoman hyvän vääntömomentin vuoksi. [11, s.296.]



KUVA 5. Sarjamoottorin virtapiiripiirros (11, s.296)

Kompoundimoottorin eli yhdysvirtamoottorin magnetointikäänitys on tehty käyttämällä sekä sarja- että rinnakkaismagnetointikäänityksiä. Näiden kahden käänityksen painoarvoa muuttamalla voidaan määrätä, kumman puolen ominaisuudet ovat hallitsevampia. Käytännössä yleisin compoundimoottori on vierasmagnetoitu compoundimoottori, jossa on vahvistava sarjamagnetointikäänitys. Se kestää tyhjäkäyntiä, jonka aikana se toimii kuin sivuvirtakone, mutta sen pyörimisnopeuden säätö tapahtuu samoin kuin vierasmagnetoidussakoneessa. Pyörimisnopeus voidaan siis säätää joko roottoriin jännitteen säädöllä, magnetointia heikentämällä tai roottoriin resistiivistä jännitettä säätämällä.

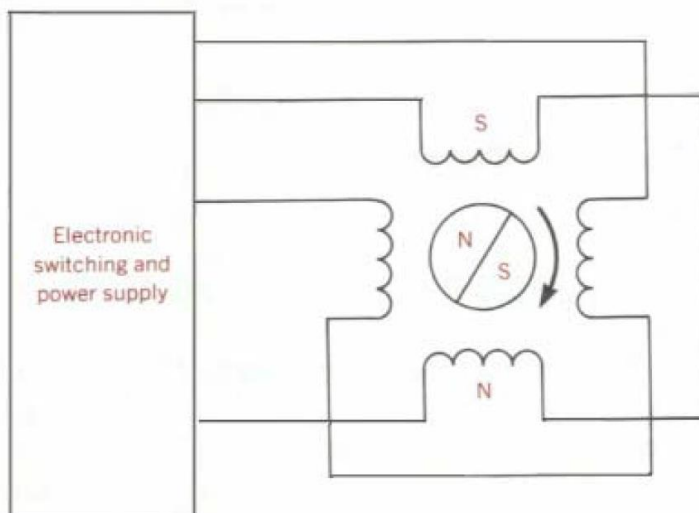
Kompoundimoottorissa on siis sarja- ja rinnavirtakoneiden parhaat ominaisuudet. Sillä on hyvät ominaisuudet pyörimisnopeuden säätöön sekä korkea käynnistysvääntömomentti. [11, s. 298.]



KUVA 6. Compoundimoottorin virtapiiripiirros (11, s.298)

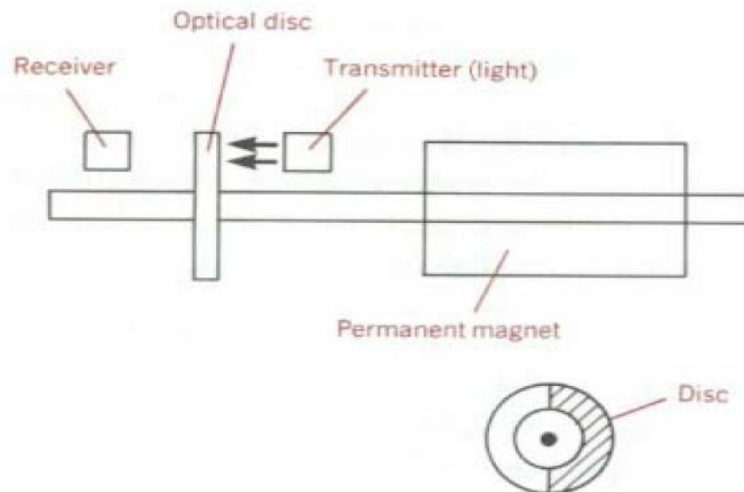
4.1.2 Hiiliharjattomat DC-moottorit

Hiiliharjaton tasasähkömoottori eli elektronisesti kommutoitu moottori (ECM) on tahtimoottori, jota ohjataan tasasähköllä. Yleisimmin moottorit ovat kestopagneettimoottoreita, joissa roottoriin on kiinnitetty kestopagneetit ja staattoriin sähkömagneetit. Harjattomat koneet tarjoavat paremman tehopainosuhteen kuin harjalliset, ja niissä on parempi hyötysuhde. Hiiliharjaton tasasähkömoottori on myös hiljaisempi, luotettavampi ja pitkäikäisempi kuin harjallinen.



KUVA 7. Hiiliharjattoman tasasähkömoottorin toimintaperiaate (Hoekstra Robert L. Robotics and automated systems)

Yksi vaihtoehto elektroniselle kommutoinnille on optinen. Roottoriin kiinnitetään levy, joka pyörii vastaanottimen ja lähettimen välissä. Valon katketessa antaa lähetin tiedon kääntää jännitteen suuntaa.



KUVA 8. Optisen kommutoinnin periaate (Hoekstra Robert L. Robotics and automated systems)

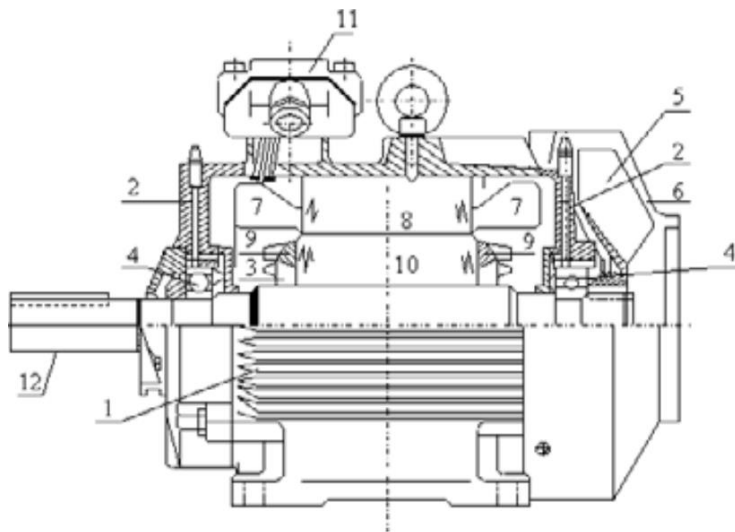
Hiiliharjattomat tasasähkökoneet ovat yleisimpiä pienemmissä käytöissä, joissa tarkkuudella on suuri merkitys. Tällaisia kohteita ovat muun muassa tietokoneiden cd-asetat, cd-soittimet ja tulostimet. [8.]

4.2 AC-moottorit

AC-moottoreiden eli vaihtosähkömoottoreiden toiminta perustuu pyörivään magneettikenttään. Vaihtosähkömoottorit voidaan luokitella epätahti- tai tahtimoottoriksi sen mukaan, pyöriikö niiden roottori samassa tahdissa staattorin kanssa. [11, s.119.]

4.2.1 Oikosulkumoottori

Oikosulkumoottori on sähkökoneista eniten käytetty. Sen hyvinä puolina on yksinkertaisen rakenteen tuoma kestävyys, helppokäyttöisyys ja pitkät huoltovälit. Käytännössä sen ainut kuluva osa on roottorin laakerit. Sillä on tasasähkökoneisiin verrattuna pitempi pyörimisnopeuden alue, jolla sitä voidaan käyttää tehokkaasti. Sitä voidaan myös ajaa yli tuplasti nimellismomenttia suuremmalla kuormalla, jonka vuoksi se on turvallinen muun muassa ajoneuvokäytössä.



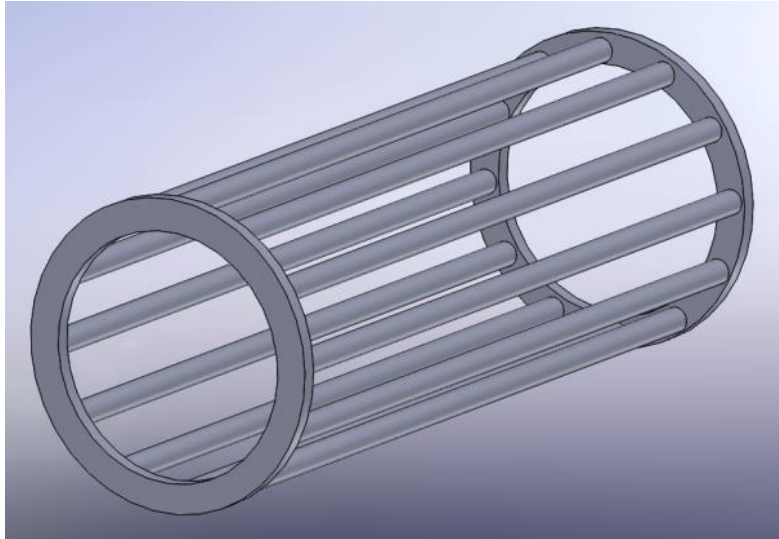
Oikosulkumoottorin rakenne. 1 staattorin runko, 2 laakerikilvet, 3 roottori, 4 laakerit, 5 tuuletin, 6 tuulettimen suojus, 7 staattorikäänitys, 8 staattorin levypaketti, 9 roottorin käänitys, 10 roottorin levypaketti, 11 liitäntäkotelo, 12 akseli. /1/

KUVA 9. Oikosulkumoottorin rakenne (11, s.544)

Oikosulkumoottorin toiminta perustuu staattorikäänitykseen syötettyyn virtaan, joka luo pyörivän magneettikentän. Magneettikenttä pyöriä napaparikerrallaan syötettävän taajuuden nopeudella. Tämä magneettivuoto leikkaa roottorin sauvoja. Magneettikentän leikatessa sauvat indusoituu niihin virtaa, joka magnetoi roottorin. Oikosulkumoottorin roottorissa on niin sanottu häkkikäänitys (kuva 3), jossa roottorin sauvat ovat molemmista päistä oikosuljettu renkaalla. Sauvat itsessään uppoavat roottorin uriin. Magnetoitu roottori pyrkii seuraamaan staattorin pyörivää magneettikenttää, joka tuottaa moottorin vääntömomentin.

Oikosulkumoottorin pyörimisnopeus riippuu sen napapariluvusta, taajuudesta ja jättämästä. Napapariluku on roottorissa olevien, vastakkain aseteltujen sauvojen

pariluku. Taajuus puolestaan tarkoitetaan staattoriin syötettävän jännitteen taajuutta. Jättämällä taas tarkoitetaan roottorin magnetoinnissa tapahtuvia tehohäviöt, jonka vuoksi roottori jää pyörivän magneettikentän jälkeen. [11 s.119-120]



KUVA 10. Häkkikämmityksen rakenne

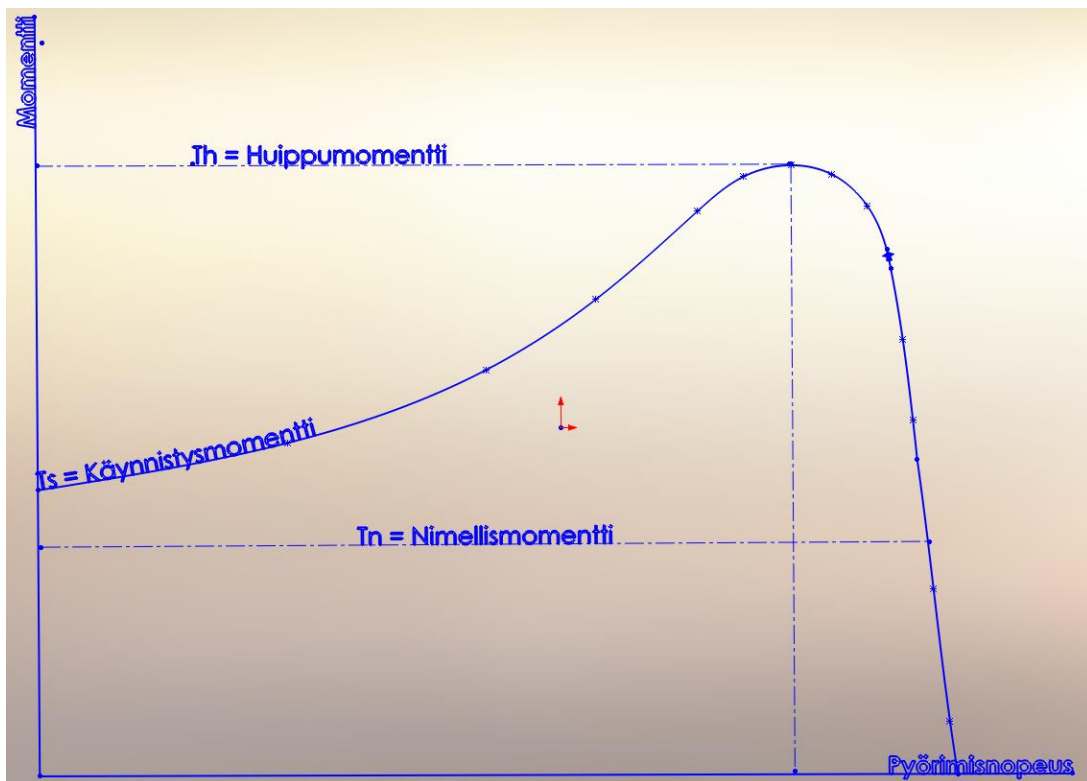
Oikosulkumoottorin nopeus lasketaan kaavasta:

$$n = \frac{60 * f}{p} \quad (1)$$

n = magneettikentän pyörimisnopeus (rpm)

f = taajuus (Hz)

p = napapariiluku (napaluku 6 = napapariiluku 3)

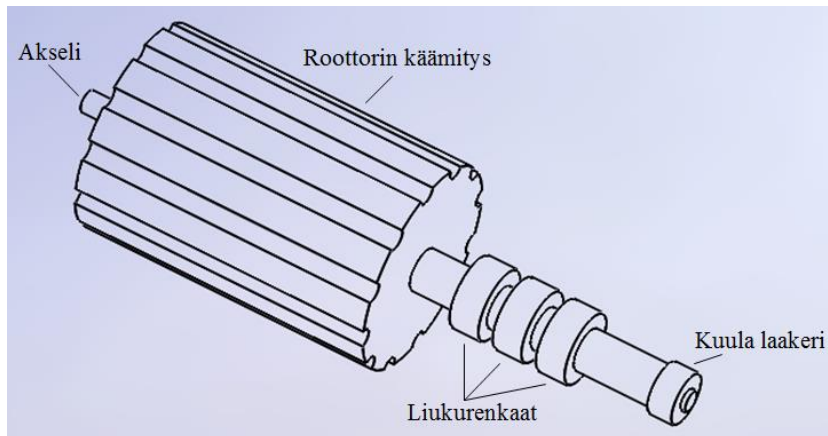


KUVA 11. Oikosulkumoottorin tyypillinen momenttikäyriä

4.2.2 Liukurengasmoottori

Liukurengasmoottori on myös epätahtimoottori, eli sen roottori ja staattori pyörivät epätahdissa. Liukurengasmoottori eroaa oikosulkumoottorista pääasiassa vain käämityksen osalta. Siinä käämityksen toiset päät on kytkettynä akselilla oleviin liukurenkaisiin. Näissä liukurenkaissa on laahaavat harjat, jotka on kytketty säädettäviin vastuksiin. Nämä vastukset mahdollistavat roottoriin resistanssin muuttamisen ja näin ollen moottorin ominaisuuksien säätämisen.

Roottoriin resistanssia säädetään, kun halutaan muuttaa momenttikäyriä. Käytännössä kun roottoriin resistanssia kasvatetaan, huippumomentti saavutetaan jo pienemmällä kierroksilla, ja resistanssia pienentämällä saadaan huippumomentti suuremmilla kierroksilla. Resistanssin säädöllä voidaan myös säätää käynnistysvirtaa. [4;11, s.196-197.]

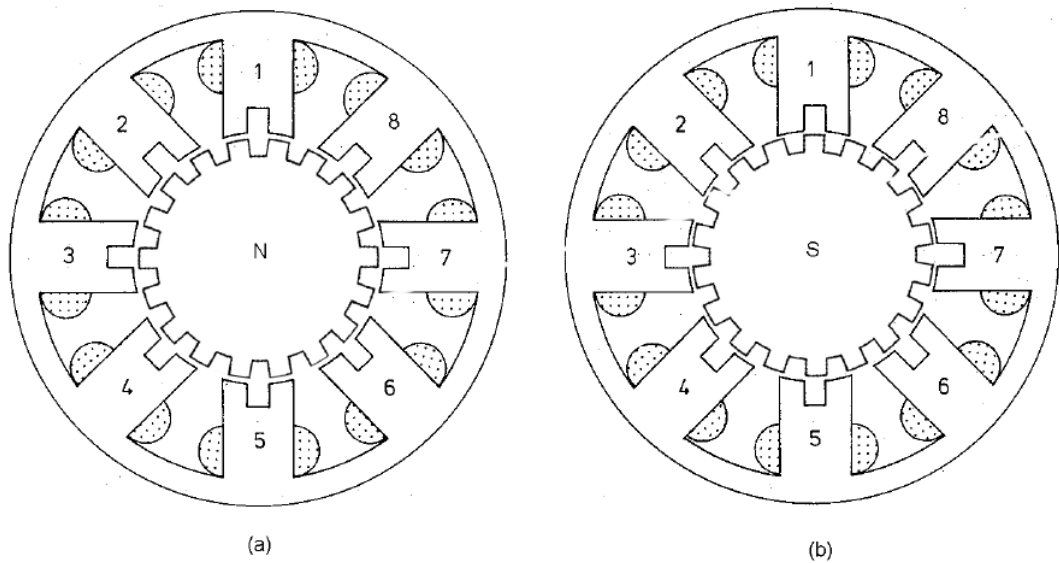


KUVA 12. Liukurengasmootorin roottori

4.2.3 Hybridiaskelmoottori

Hybridiaskelmoottori on kestopagneettimoottorin ja reluktanssimootorin eli SR-mootorin yhdistelmä. Staattori on rakenteeltaan reluktanssimootorista lukuun ottamatta staattorin napojen hammastuksia. Roottoriin puolestaan koostuu normaalista reluktanssikoneesta poiketen eristetyistä sähkölevyistä, joissa on hammastus sekä kestopagneetteja. Kestopagneettien tarkoitus on luoda akselin suuntainen magneettivuo.

Kestopagneetit voivat olla joko kiekon tai sylinterin muotoisia. Mikäli on käytetty kiekonmuotoista kestopagneettia, on se asennettu sähkölevypakettien väliin, kun taas sylinterinmuotoista käytettäessä kestopagneetti on roottorirakenteen sisällä. [5.]



KUVA 13. Hybridiaskelmoottorin poikkileikkaus pohjois- ja etelänapojen kohdilta (Acarnley 1982)

Tärkeimpänä ominaisuutena normaalin reluktanssimoottorin välillä ajoneuvokäytössä on, että hybridiaskelmoottorilla voidaan myös toteuttaa regenerointi, eli jarruenergian talteenottaminen, joka on nykypäivän kaupallisissa sähköautoissa välttämätön ominaisuus. [5, s.7-11.]

4.2.4 Kestomagneettitahtimoottori

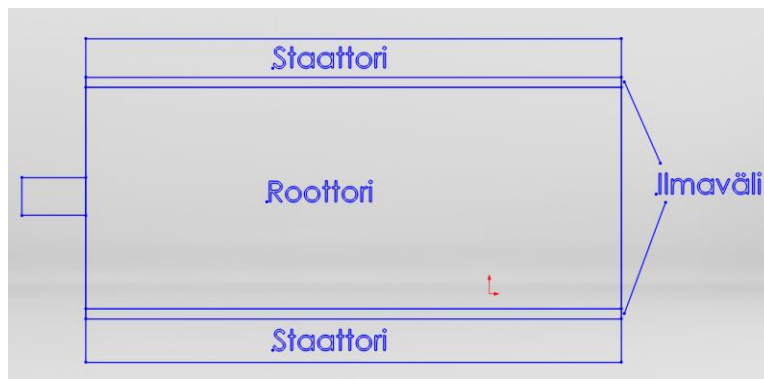
Kestomagneettitahtikoneet voidaan jakaa pintamagnetoituihin ja upotetuilla magneeteilla varustettuihin koneisiin. Niiden erona on nimensämukaisesti kestomagneettien kiinnityspaikka roottorissa, joka myös vaikuttaa moottorin ominaisuuksiin. Molempia tyyppjä ohjataan taajuusmuuttajalla. Kestomagneettimoottorilla saadaan normaalia induktiokonetta parempi hyötysuhde ja tehokerroin, koska niiden roottorin häviöt ovat huomattavasti pienemmät. Pintamagnetoiduissa koneissa saadaan symmetrisempi magneettikenttä, kun taas uppoasennetuilla saavutetaan parempi mekaaninen kestävyys.

Itse kestomagneetteina käytetään korkean energiatulon maamateriaaleja, kuten neodyymi-rauta-booria (NdFeB). Tällaiset aineet ovat herkkiä lämpötilan muutoksille

ja osa myös korroosiolle. Käytännössä käytettävä materiaali määräytyy sen mukaan, millaisia ominaisuuksia moottorilta halutaan. Mitä suurempi aineen remanenssi, eli magneettinen voimakkuus, sitä suurempi magneettivuontiheys ilmavälissä eli parempi vääntömomentti. [6, s.12.]

Toinen tapa jakaa kestmagneettimoottorit on aksiaalivuokoneet ja radiaalivuokoneet. Koneet eroavat toisistaan siinä, missä suunnassa magneettikenttä leikkaa akselilinjan.

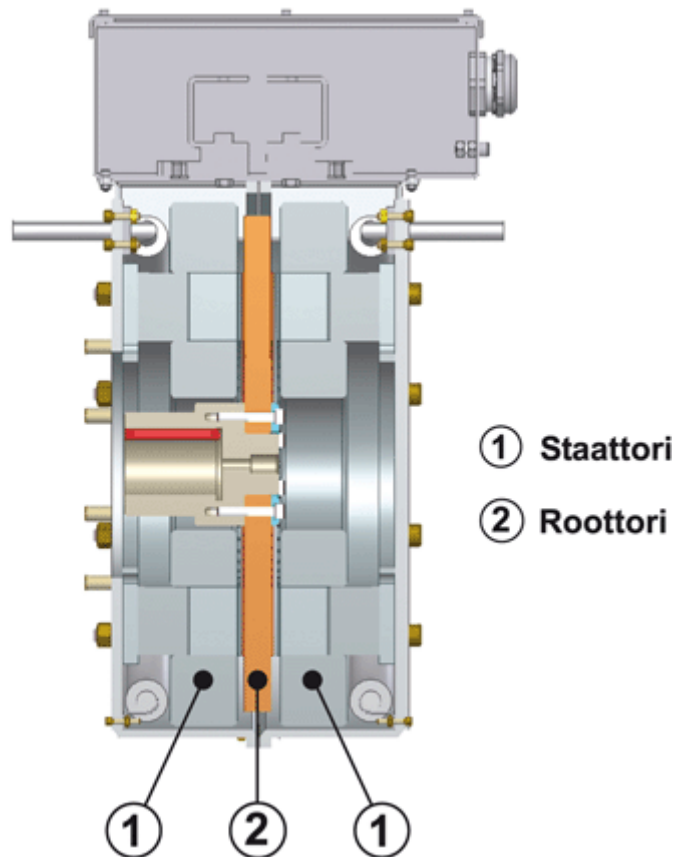
Radiaalivuokoneessa kestmagneetit ovat roottorin ympärillä ja tällöin ilmaväli muodostuu lieriönmuotoisen roottorin ulkokaaren ja staattorin sisäkaaren väliin. Tällöin tehojen kasvattaminen tapahtuu akselin suunnassa pituutta lisäämällä. Radiaalivuokoneet voidaan tästä syystä rakentaa hyvin kapeaksi halkaisijaltaan.



KUVA 14. Radiaalivuokoneen rakenne

Aksiaalivuokoneessa rakenne on päinvastainen kuin radiaalivuokoneessa. Se voidaan toteuttaa yksi- tai kaksipuoleisena, jolla tarkoitetaan staattorien määrää. Yksipuoleiset aksiaalivuokoneet soveltuvat väännön puolesta kevyempiin käyttöihin johtuen magneettikentän epäsymmetriasta, joka rasittaa laakerointia ja aiheuttaa värinöitä.

Kaksipuoleisessa aksiaalikonessa symmetriset magneettikentät puolestaan kumoavat toisensa ja näin ollen vähentävät värinöitä ja pidentävät laakereiden käyttöikä. Aksiaalivuokoneessa tehoja voidaan lisätä ilmavälin pinta-alaa nostamalla, joka tapahtuu halkaisijaa kasvattamalla tai kaksipuolista rakennetta. [6, s.14.]



KUVA 15. Kaksipuoleisen aksiaalivuokoneen rakenne (axcomotors.com kestomagneettitahtikone)

5 SÄHKÖMOOTTORIN OHJAUS

Sähkömoottorin käyttö ajoneuvokäytössä tarkoittaa, että moottori ei voi toimia ilman ohjausta, koska kuormitus vaihtelee paljon. Varsinkin kun otetaan huomioon, että sähköautot ovat vielä toistaiseksi tarkoitettu lyhyisiin tai keskipitkiin matkoihin. Tämä tarkoittaa paljon kiihdytyksiä ja jarrutuksia liikkeelle lähdöissä sekä itse tien aiheuttamat kuormituksen muutoksen ylä- ja alamäkinä.

5.1 DC-moottorin ohjaus

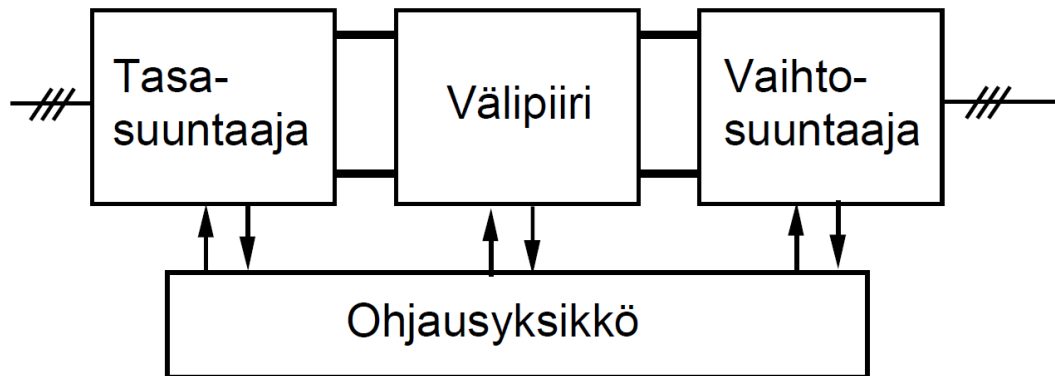
Tasasähkömoottorin ohjaus on periaatteeltaan vaihtosähkömoottoreita huomattavasti yksinkertaisempaa. Tasasähkömoottoria ohjataan PWM:llä eli pulssin leveys - modulaatiolla, jota on käsitelty tarkemmin vaihtosähkömoottorien ohjaustavoissa.

PWM-ohjaus toteutetaan tehoista riippuen erilaisilla transistoreilla, kuten IGBT:llä tai MOSFET:lla. Riippuen siitä, kuinka monta kytkevää komponenttia on käytetty, voidaan moottorin kiihdytyksen ja jarrutuksen ominaisuuksia parantaa. Muun muassa ajoneuvokäytössä neljällä kytkevällä komponentilla saavutetaan hyvät ominaisuudet sekä kiihdyttämiseen että jarruttamiseen.

5.2 AC-moottorin ohjaus

Kun puhutaan AC-moottorin ohjauksesta ajoneuvokäytössä, käytetään aina taajuusmuuttajaa eli invertteriä. Vaikka ajoneuvokäytössä invertteriin syötetään usein tasasähköä, on perustaajuusmuuttajan toiminnan selvitys helpompaa aloittaa vaihtosähkösyötöstä.

Taajuusmuuttajan sisään syötetään vaihtosähköä, joka tasasuunnataan kuusi- tai 12-pulssisuuntaajalla. Tämän jälkeen piikkivirrat tasataan ja syötetään välipiiriin, johon on yleensä lisätty purkautumisvastuksen turvallisuuden lisäämiseksi. Välipiirin turvallisuudesta vastaa myös IGBT (Insulated gate bipolar transistor), joka on bipolaaritransistorin ja MOSFETin yhdistelmä. Sen tehtävä on välipiirin jännitteen noustessa syöttää tehoa jarruvastukseen, eli sähköautossa takaisin akustoon regeneroinnin muodossa. Välipiiri syöttää tehon piikkeinä IGBT-päätteille, jotka ohjaavat moottorille syötettävää tehoa. [12.]



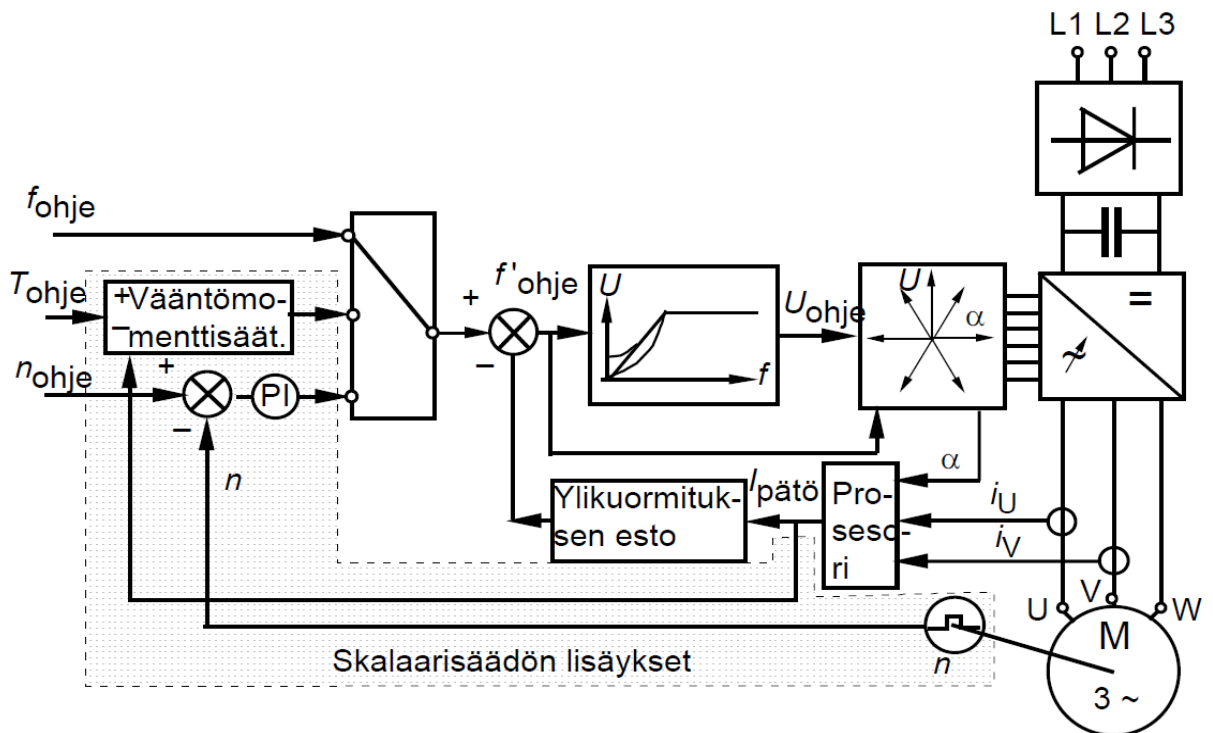
KUVA 16. Taajuusmuuttajan lohkokaavio (12, s.17)

5.3 Skalaarisohjaus ja -säätö

Skalaariohjaus tarkoittaa moottorin pyörimisnopeuden ohjaamista jännitteen skalaaristen suureiden avulla. Skalaari itsessään on suure, jolla on vain suuruus jossain mittayksikössä, mutta ei suuntaa. Jännitteen skalaarisia ominaisuuksia ovat taajuus ja itseisarvo.

Skalaariohjaus on yksinkertaisin tapa ohjata moottorin pyörimisnopeutta. Skalaariohjauksessa staattorijännitteen ja taajuuden suhde pysyy käytännössä samana lukuun ottamatta kentänheikennysaluetta, joka alkaa nimellisjännitteen ylittämisen jälkeen. Tämän jälkeen jännite pysyy vakiona, mutta vääntömomentti laskee. Tämänkaltaisen ohjaus soveltuu yksinkertaisiin käyttöihin, joissa on pienet dynamiikkavaatimukset.

Skalaariohjaus mittaa moottorin vaihevirrat, joista saadaan laskettua pätövirtakomponentit. Tätä kautta saadaan laskettua moottorin vääntömomentti, koska se on suoraan verrannollinen jännitteen ja pätövirran tuloon.



SKUVA 17. Skalaariohjauksen ja -säädön lohkokkaavio (12, s.23)

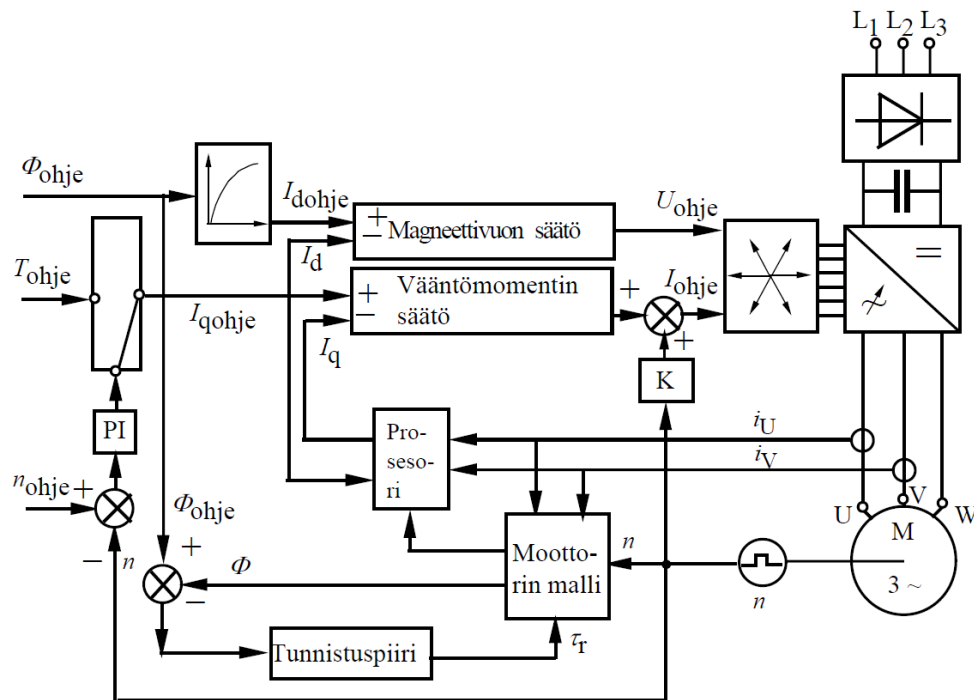
Skalaarisäätö puolestaan mahdollistaa pyörimisnopeuden ja vääntömomentin säädön. Pyörimisnopeus on käytännössä jättämän verran tahtinopeutta pienempi. Skalaarisäätöä on mahdollista saada lisätoimintoja, kuten takometri nopeusmittausta varten. [9, s.36-37; 12, s.23.]

5.4 Vektorisäätö

Kun halutaan skalaariohjausta dynaamisesti tarkempaa säätöä, voidaan se toteuttaa vektorisäädöllä. Vektorisäätö mahdollistaa koneen tarkan ohjaamisen myös muutostilanteissa. Siinä missä skalaarisäädössä tiedettiin ainoastaan suuren suuruus, täytyy vektorisäädössä tietää myös suunta. Vektorisäätö tarvitsee myös skalaarista poiketen tarkan pyörimisnopeus tiedon.

Taajuusmuuttaja mittaa moottorin vaihevirrät ja muuttaa ne vuon suuntaisiin tai vastasuuntaisiin komponentteihin. Tämä tieto syötetään yhdessä pyörimisnopeustiedon kanssa vaihtosuuntaajassa sijaitsevaan mikroprosessoriin, jossa on moottorin matemaattinen malli. Malli laskee magneettivuon ja jakaa virran

vääntömomentin ja magneettivuon komponentteihin. Kyseinen komponentteihin jakaminen tunnetaan myös kenttäorientointina. Tämän jälkeen moottoria voidaan ohjata näitä kahta komponenttia muuttamalla. Vektorisäädön pyörimisnopeus mitataan yleisimmin takometrillä. [9, s.48/ 12 s.25]



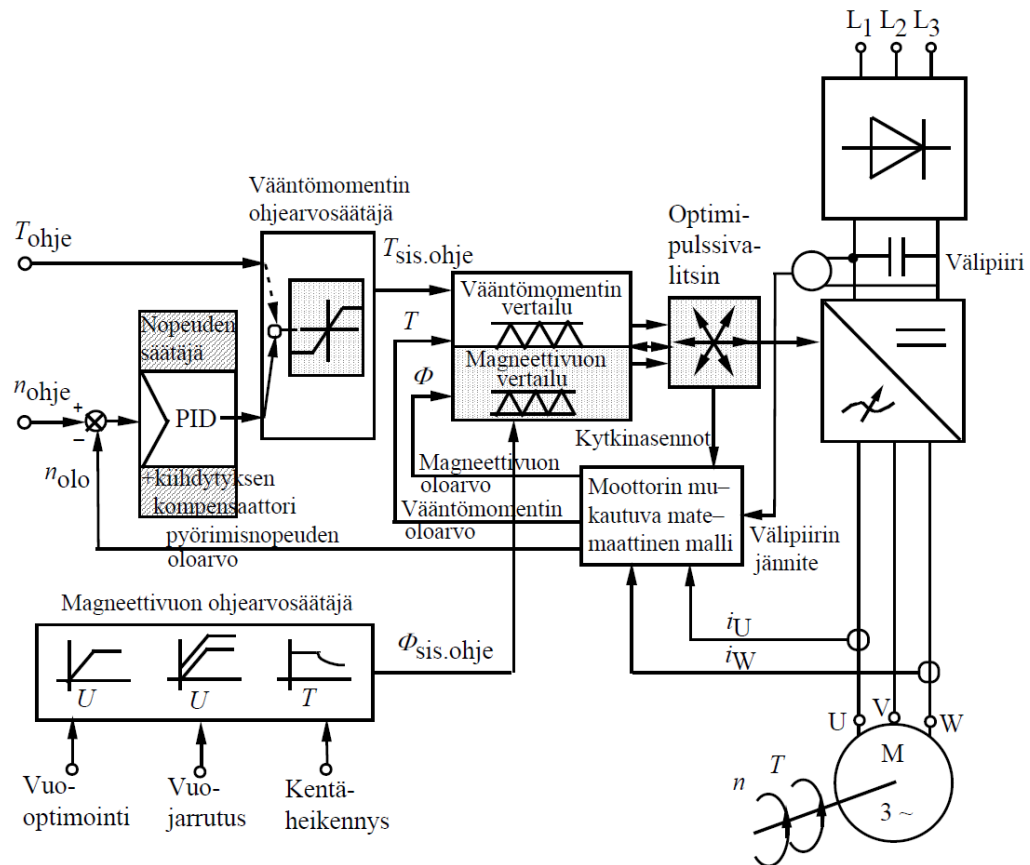
KUVA 18. Vektorisäädön lohkokaavio (12, s.25)

5.5 DTC-säätö

Suora vääntömomenttisäätö eli direct torque control mahdollistaa nimensä mukaisesti suoran vääntömomentin ja pyörimisnopeuden ohjaamisen. DTC on moottorinohjausmenetelmistä kehittynein, ja sen variaatioita on lukuisia. DTC on periaatteessa erilainen tapa toteuttaa vektorisäätö.

Suorassa vääntömomentinsäädössä mitataan moottorin virtaa ja invertterin tasajännitevälipiirin jännitettä, jotka syötetään moottorin mukautuvaan matemaattiseen malliin. Mikroprosessori laskee magneettivuon ja vääntömomentin oloarvot. Komparaattorit vertaavat laskettuja oloarvoja ohjearvoihin, jotka tulevat ohjearvosäätäjiltä. Komparaattorin antamien tietojen perusteella optimipulssin valitsin

suorittaa tarvittavat kytkentämuutokset. DTC ei kiinnitä huomiota syöttävän jännitteen muotoon, minkä vuoksi muutostilanteissa jännite ei ole sinimuotoista. Tasaisella kuormituksella jännite palaa sinimuotoiseksi. [12, s.26.]

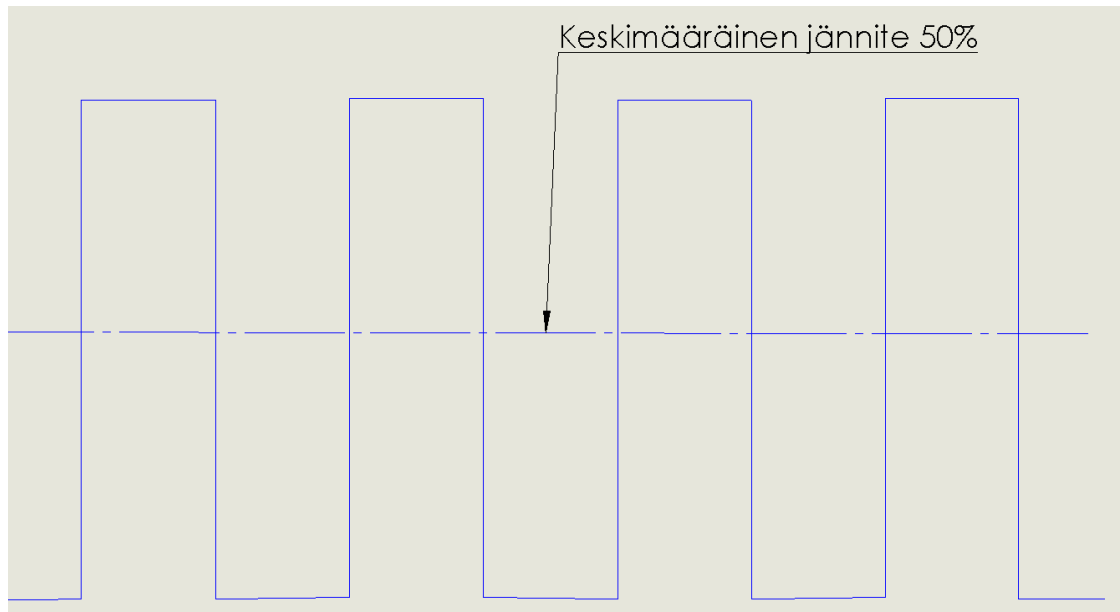


KUVA 19. DTC:n lohkokaavio (12, s.26)

5.6 Pulssinleveysmodulaatio

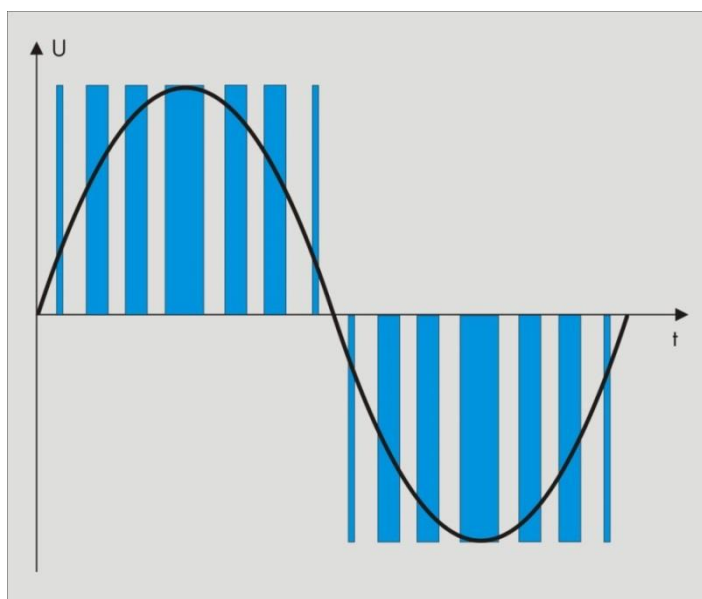
PWM eli pulse-width modulation on varsinkin tasasähkömoottorin ohjauksessa käytetty ohjaustapa. Se perustuu kuormaa syöttävän jännitteen pulssisuhteen muutoksiin niin, että lähtösignaalin keskiarvo on värähtelyjakson ajalta sama kuin modulointisignaalin arvo. Pulssisuhdetta itsessään kuvataan prosenttilukuna siten, että kuinka monta prosenttia jakson ajasta virta pääsee läpi. Kuva 20 kuvaa pussin suhdetta jaksonaikaan.

Se, kuinka monta erilaista pulssisuhdevaihtoehtoa saadaan aikaa, kutsutaan resoluutioksi. Mitä isompi resoluutio, sitä tarkempi säätö.



KUVA 20. Yhden vaiheen jännite 50% pulssisuhteella

Tarkastellessa kahta vaihetta muodostuu tällöin erilevyisiä pulsseja, jotka ovat positiivisella tai negatiivisella puolella. Oikein suodatettuna jännite mukaillee siniaallon muotoa. Jännitteen muuttaminen tapahtuu pulssien leveyttä muuttamalla. Jaksonaikaa säätämällä saadaan haluttu taajuus. [12, s.18.]



KUVA 21. Kahden vaiheen pulssimainen tasajännite, joka mukaillee sinikäyrää

PWM-ohjauksella saavutetaan hyvä hyötysuhde, koska häviöt pystytään minimoimaan.

6 REGENEROINTI

Regenerointi eli jarruenergian talteenotto on varsinkin nykypäivän kaupallisissa sovelluksissa välttämätön ominaisuus. Se tarkoittaa karrikoidusti sitä, että auton liikkeessa jalan pois nostaminen kaasulta tai jarrua painettaessa mahdollistaa AC-moottorin toimimisen generaattorina ja syöttää virtaa takaisin akustolle nostaen näin auton toimintasädetä.

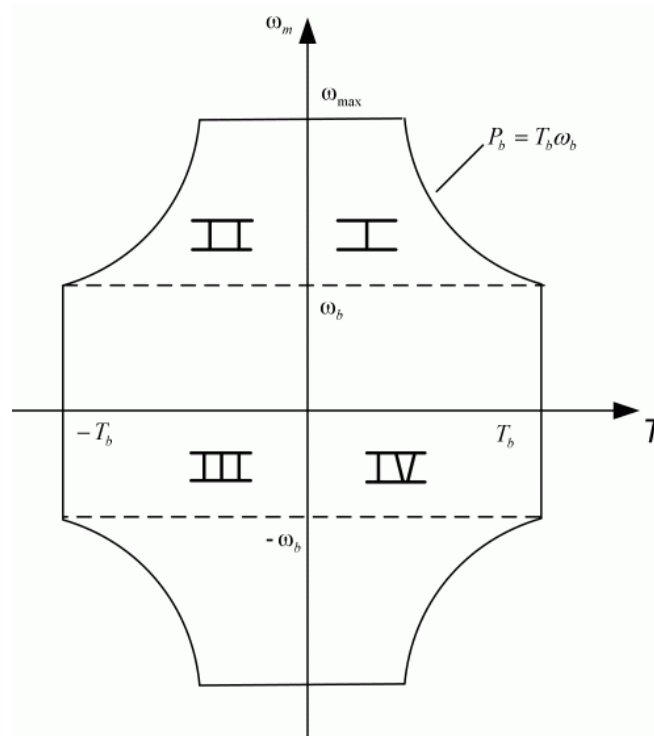
6.1 DC-moottorin regenerointi

Tasasähkömoottorin jarruenergien talteenotto on riippuvainen moottorin rakenteesta. Kestomagneettimoottorissa regenerointi on vielä helppo järjestää, kun roottorin magnetoinnista huolehtivat kestopagneetit. Kenttäkäämityissä tasasähkömoottoreissa ongelma ei ole yhtä yksinkertainen, koska jarrutusvirta häiritsee moottorin magnetointia. [10.]

6.2 AC-moottorin regenerointi

Vaihtosähkömoottorilla jarruenergian talteenotto on mahdollista, koska moottori pystyy toimimaan generaattorina ilman muutoksia. Kun tehon syöttäminen moottorille lopetetaan, vääntömomentin suunta muutetaan invertterillä pyörimissuunnan vastaiseksi. Koska moottorin teho on mekaaninen kulmataajuus kerrottuna vääntömomentilla tarkoittaa se, että vääntömomentti ja teho muuttuvat negatiivisiksi. Tämä johtaa siihen että tehoa alkaa siirtyä vaihtosuuntajan kautta DC-välipiiriin.

Teollisuudessa välipiirissä olisi jarruvastus, jossa syötetty teho muutettaisiin lämmöksi, mutta sähköautokäytössä on energiatehokkaampaa käyttää saatu energia akkujen lataamiseen, josta se voidaan taas ottaa uudelleen käyttöön. [10.]



KUVA 22. KULMANOPEUS VÄÄNTÖMOMENTIN FUNKTIONA (SAHKOAUTOT.FI)
[10]

7 ECELICA MUUNNOSSÄHKÖAUTO

7.1 Suunnittelu

Muunnossähköauto projekti alkoi syyskuussa 2012, kun saimme ilmoituksen alkavasta projektista, ja halukkaita pyydettiin ottamaan yhteyttä projektin vetäjään Teemu Manniseen. En hakenut projektiin mukaan, sillä tarkoitus oli saada lopputyön aihe Suur-Savon Sähköltä, missä olen työskennellyt kahtena kesänä. Muutaman päivän päästä projektin vetäjä pyysi meitä mukaan projektiin, ja pienen mietinnän jälkeen lähdin projektin mukaan.

Ensimmäisellä viikolla pidettiin aloituspalaveri ja aloitettiin aihion valinta. Mietittiin mahdolliset yhteistyökumppanit ja koulutuslinjat, jotka olivat kiinnostuneita lähtemään mukaan projektiin.

Projektia suunniteltiin alussa usean opintolinjan yhteistyö projektiksi. Autopuolelta ei kuitenkaan löytynyt projektista kiinnostuneita opiskelijoita ja vaikka materiaali puolella oltiin aluksi kiinnostuneita projektista, niin loppujen lopuksi projektin aloitti, suunnitteli ja toteutti ainoastaan sähköpuolen opiskelijat projektipäällikkönsä johdolla.

Aihion valinnassa oli alussa puhetta pakettiautoista ja tila-autoista. Pidemmän pohdinnan ja auton tulevan käyttötarkoituksen päättämisen jälkeen päädyimme Toyota Celicaan. Suurimmat syyt aihion valinnassa oli maksimi akselimassojen suhde kokonaismassaan, joka jättää Celicassa noin 350 kg työskentelyvaraa. Toinen iso tekijä oli ulkonäkö, sillä auto tulee PR-autoksi. Kolmas etu oli se, että auto on etuveto, ettei voimansiirron järjestäminen hankaloidu.

Alkupalaverista parin viikon sisällä saimme projektin budjetin selville, joka oli 44 000 €. Aihio löytyi Lahdesta 5 000 € hintaan, ja sitä päästiin hakemaan 20.11.2012. Auton purkaminen aloitettiin välittömästi, ja muunnokseen tarvittavien komponenttien selvitystyö oli käynnissä.



KUVA 23. Aihion nouto 20.11.2012

Teimme pitkään selvitystyötä täyssähköauton Nissan Leafin moottorin ja alennusvaihteiston saamiseksi projektiin. Se olisi tarjonnut huimat tehot ja olisi ollut hinnaltaankin budjettiin sopiva. Moottori voimansiirtoineen olisi saatu käyttöön. Päädyimme käyttämään kuitenkin yksinkertaisempaa ja edullisempaa tekniikkaa. Syy tähän oli lefin moottorin rakenne, se oli hybridimoottori eli kestromagneettivusteinen reluktanssimoottori. Tänä tarkoitti sitä että sen ohjaaminen olisi ollut huomattavasti hankalampaa ja siihen soveltuva ohjain olisi noin tuplasti moottorin hinnan. Koska projektia lähdetään toteuttamaan ilman aikaisempaa sähköauto kokemusta, oli soveliasta valita ensimmäiseen versioon helpommin ohjattava moottori, vaikka se tarkoittikin pienempiä tehoja. Leafin moottorin kanssa ongelmia olisi myös tullut sen kilpiarvojen kanssa. Olisimme saaneet moottorin tarkat tiedot ainoastaan momenttipenkissä itse mittaamalla. Tällaiseen soveltuvaa laitteistoa olisimme joutuneet hakemaan muualta mikä puolestaan olisi voinut aiheuttaa aikataulu ongelmia.

Useiden moottori & invertteri vaihtoehtojan jälkeen päädyimme pakettiin HPEVS AC 50 oikosulkumoottori + Curtis 1238 invertteri. Pakettia oli aiemmin käytetty muutossähköauto projekteissa menestyksekkääksi, hinta oli budjettiin sopiva ja saatavuus hyvä.

Akuston hankinnassa hinta oli todella määräävässä osassa sillä erihintaisia/painoisia ratkaisuja löytyi paljon. Lyijy akustot eivät olleet harkinnassa ollenkaan niiden huonon tehotiheyden vuoksi. Järkevin ratkaisu meille oli hyvän kylmäsiidon omaavat Calp-CA seriesin akut. Ne ovat LiFePo4 (Litium-rauta-polymeeri) akkuja, joista valitsimme 180 Ah version. Akkuja asennettiin 36 kpl, joista jokaisen jännite on 3,28 V. Näin ollen akuston pääjännitteeksi tuli 118 V. Energiaa akustosta voidaan siis saada yli 21 kWh. Yhden akun paino on 5,6 kg eli koko akuston painoksi jäi 201,6 kg.

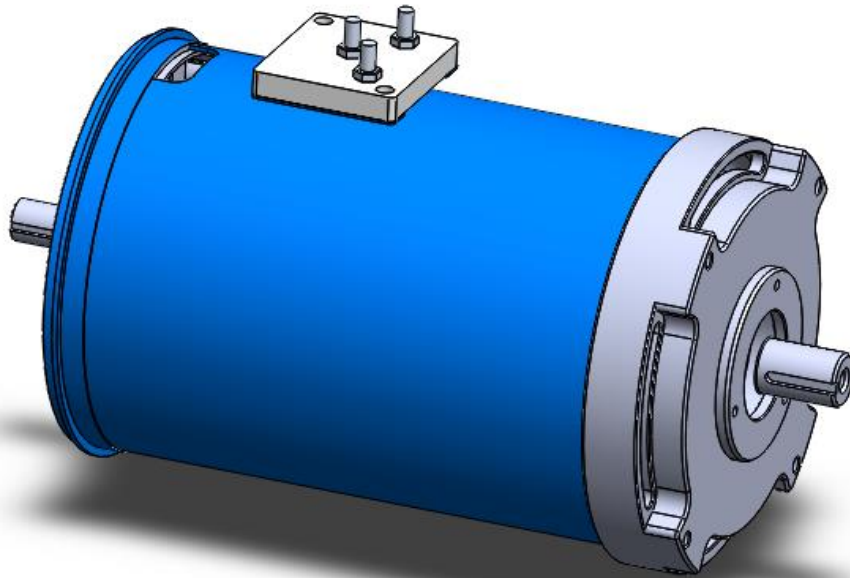


KUVA 24. Akuston sovittamista sille rakennettuun koteloon

Suurimmat ja tärkeimmät hankinnat saatiin keväällä 2013 hoidettua. Auto oli tuolloin purettu melkei kokonaan ja saatujen palapelin palasten sovittaminen voitiin aloittaa. Käytännön toteutus suunniteltiin sitä mukaan kun asioita tuli vastaan, luonnollisesti tulevaisuuden tarpeet huomioiden. Ensimmäisten asioiden joukossa oli akuston sijoittaminen ja suojaaminen, moottorin asennus sekä moottorin ja vaihteiston yhteen sovittaminen. Käytännössä eteneminen oli isommista kokonaisuuksista kohti pienempiä yksityiskohtia.

7.1.1 Moottori - HPEVS AC 50

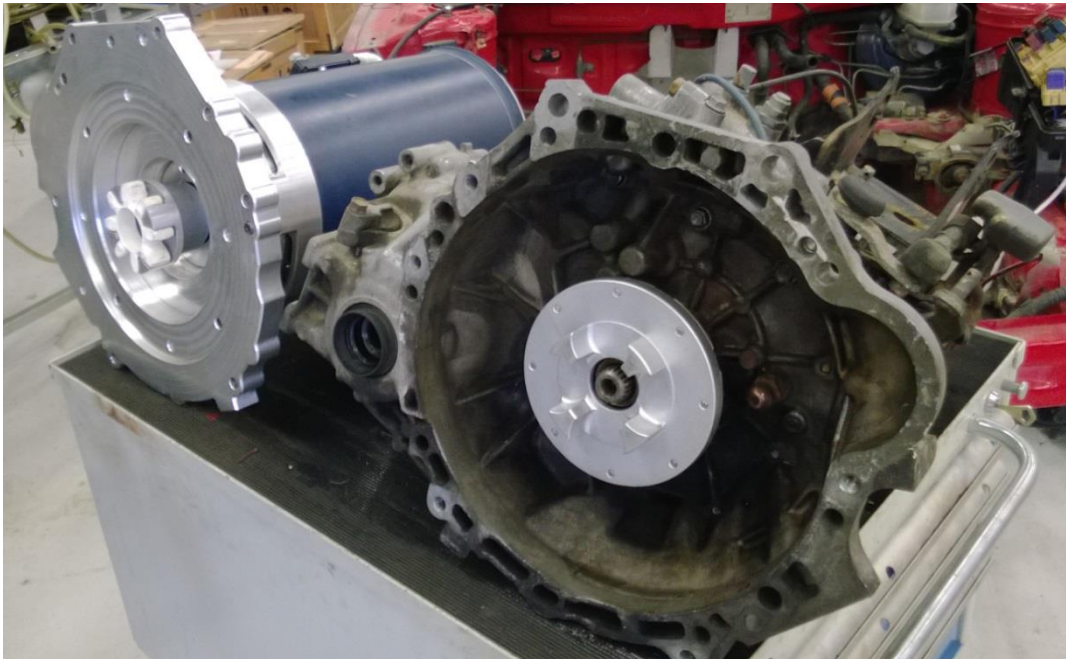
eCelican moottoriksi valittiin HPEVS AC 50-26.26, oikosulkumoottori. Moottorissa on akseli molemmissa päissä joka antaa enemmän asennus vaihtoehtoja. Moottori on suunniteltu alle 1 575 kg ajoneuvoille. AC 50 tarjoaa 53,47 kW huipputehon ja 163,4 Nm väännön. Painoa moottorilla on 52,2 kg. Moottorin nimellisjännite on 96 V ja nimellisvirta on 650 A. Sen halkaisija on 22,8 cm ja pituus akselin päästä toiseen 45,95 cm. Moottorin koko momenttikäyrä ja tarkemmat tiedot löytyvät liitteistä 1 ja 2.



KUVA 25. HPEVS AC50-26.26 Oikosulkumoottori

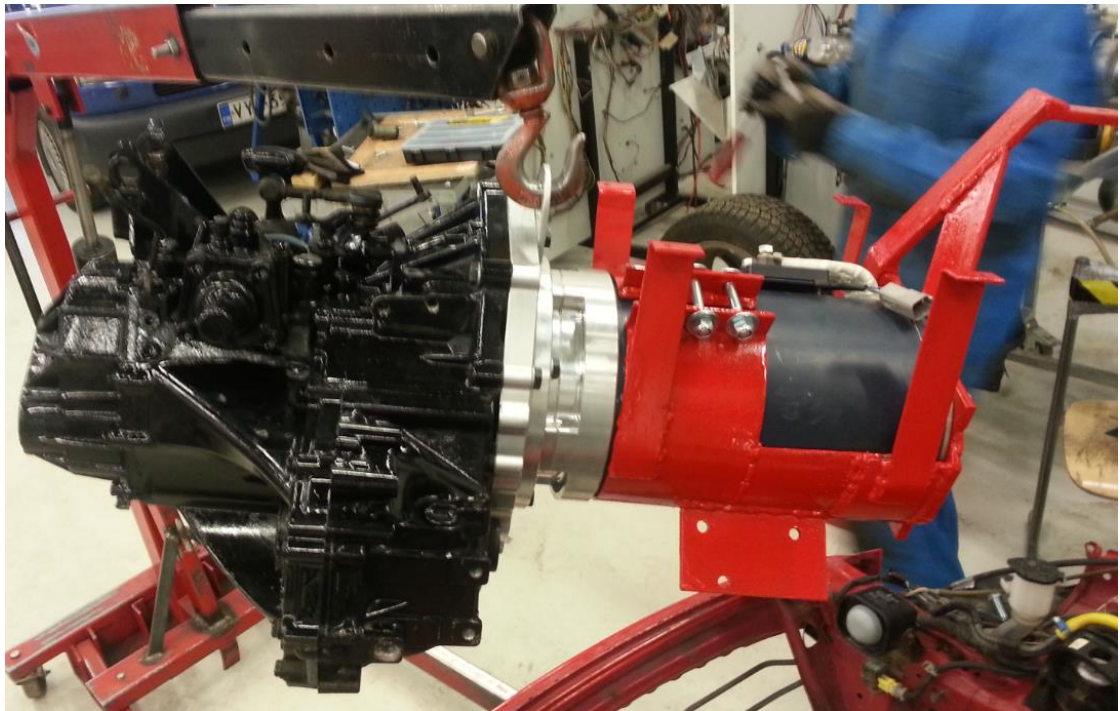
Voimansiirron järjestämisessä mietittiin pääasiassa kahta vaihtoehto. Alennusvaihteen käyttöä, joka olisi ollut todennäköinen vaihtoehto mikäli moottori olisi ollut kestopagneettimoottori. Alennusvaihte tarkoittaa sähkömoottoreissa että vaihdelaatikko poistetaan ja käytössä on kiinteällä välityssuhteella oleva hammaspyörästö. Valinnassa päädyttiin kuitenkin muunnosprojekteissa yleiseen malliin eli vaihdelaatikon säilyttämiseen ja voimansiirron pitämiseen samanlaisena kuin polttomoottorikäyttöisenä. Karrikoidusti, polttomoottori pois, sähkömoottori tilalle. Vaihdelaatikon käyttö mahdollistaa moottorin ajamisen optimikierronnopeus alueella maksimaalisen hyötysuhteen ja vääntömomentin saavuttamiseksi.

Päätös käyttää auton omaa vaihdelaatikkoa voimansiirrossa meinasin että moottorin ja vaihdelaation väliin oli rakennettava välipalikka. Ratkaisussa jätettiin myös kytkin pois koska vaihteiden vaihto pystyttiin suorittamaan ilman sitä. Kytkimen poisjättäminen jätti vaihdelaatikon suun avoimeksi joka tuli saada välipalikkalla peitettyä. Koska välipalikka tuli olla kohdistettu täysin oikein, eikä projektiryhmällä ollut sen tekemiseen tarvittavaa ammattitaitoa tai välinäistöä, annettiin tehtävä Mikkelin ammattikorkeakoulun konelaboratorion tehtäväksi. Kesän 2013 jälkeen saatiinkin täydellisesti mittojen mukaan tehty voimansiirron kestävä välipalikka.



KUVA 26. AC50, välipalikka ja vaihdelaatikko ennen lopullista kiinnittämistä

Moottorille täytyi vielä rakentaa tuentaa pystysuoran liikkeen estämiseksi. Tällaista räsitystä aiheuttaa esimerkiksi montut ja muut tien epätasaisuudet. Moottorin ympärille rakennettiin panta, jonka päälle saatiin myös invertterille asennus paikka. Pantaan kiristettiin moottorin ympärille ja se jakoi moottorin painon kahteen tukipisteeseen, jotka sijaitsivat moottorin alla sekä päädyssä.



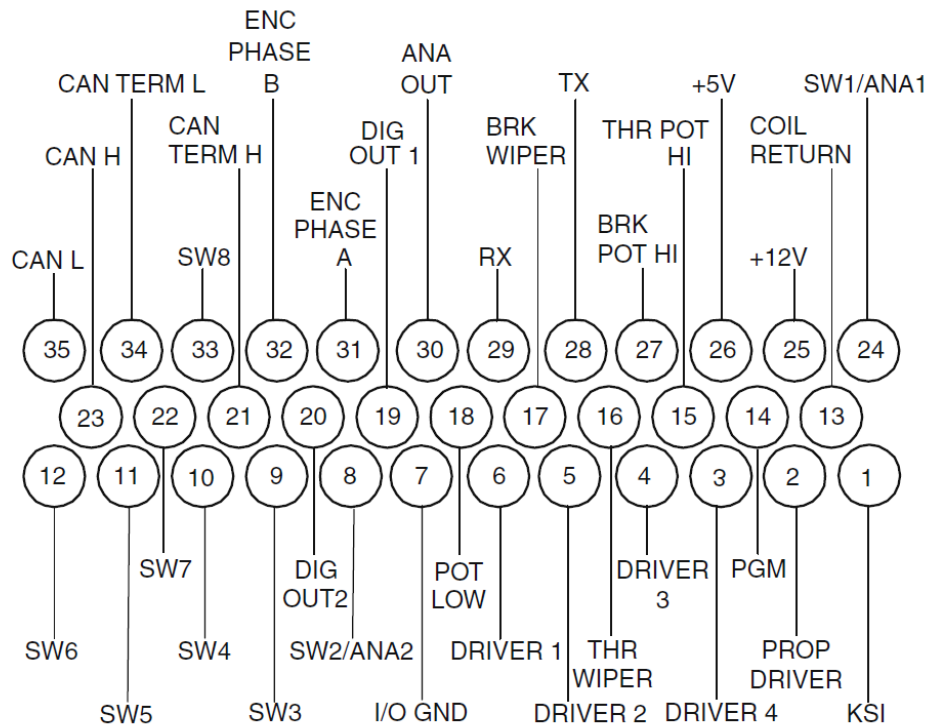
KUVA 27. Moottori ja vaihdelaatikko tuentoineen ennen asennusta

Moottorin asennuksessa tuli huomioida myös se ettei tuuletusaukosta pääse likaa sisään. Moottorin tuuletusaukko on suoraan rengasta ja sen heittämää likaa kohti. Tämä otettiin huomioon laittamalla suojamuovia jokaiseen suuntaan mitä ei lokasuojat tai muut autossa valmiina olleet suojat suojanneet. Ilman kierrolle jätettiin noin 20 cm tilaa. Vaihtoilma kiertää moottorin yläpuolelta moottorin läpi.

7.2 Invertteri - Curtis 1238R-7601

Moottorinohjain, taajuusmuuttaja eli invertteri valikoitui moottorin kanssa pakettiratkaisuna. Curtis on tunnettu varsinkin ajoneuvokäyttöön tarkoitetuista moottoriohjaimista. Curtis 1238R on suunniteltu muunnosautoja silmälläpitäen mikä helpotti parametrien säätöä ja kytkentää huomattavasti. Ohjain sisältää valmiina pinnit johon tuoda tieto kiihdyttämisestä ja jarruttamisesta kuten kuva 28 kertoo. Curtis on myös täysin ohjelmoitavissa VCL:lää (vehicle control language) käyttäen. Curtis on myös eCelicassa se joka ohjaa pääkontaktoria eli sitä milloin akustolta tuleva syöttö

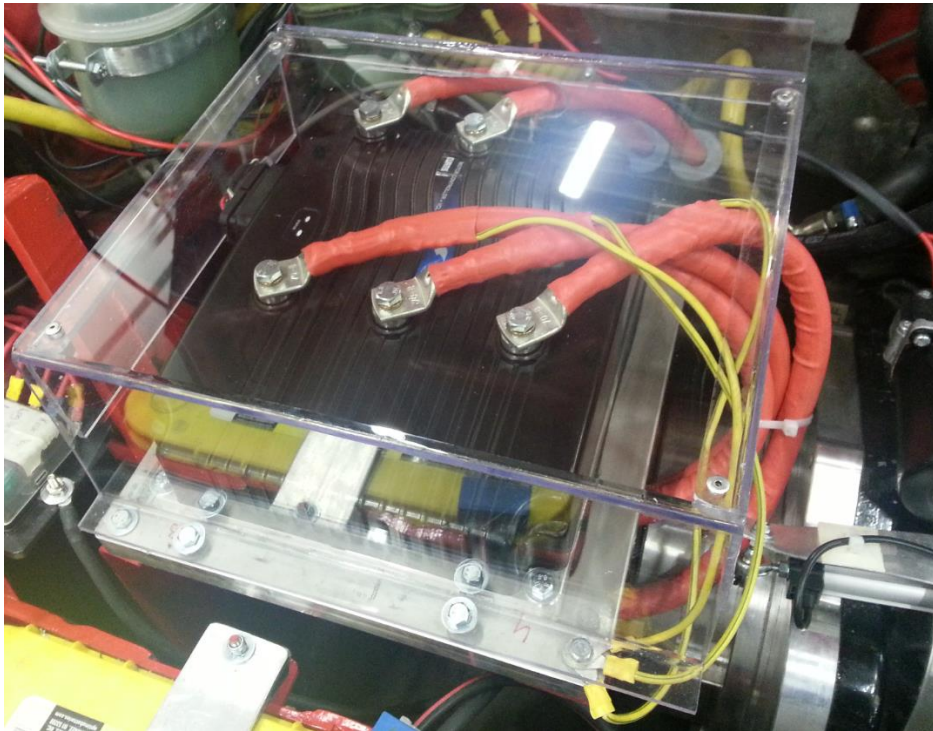
kytketään päälle. Pääkontaktorin ohjaukseen tosin lisättiin vielä oma hätäseis kytkin jolla voidaan ongelman tilanteen sattuessa kytkeä moottori kylmäksi.



KUVA 28. Curtis 1238R liitin

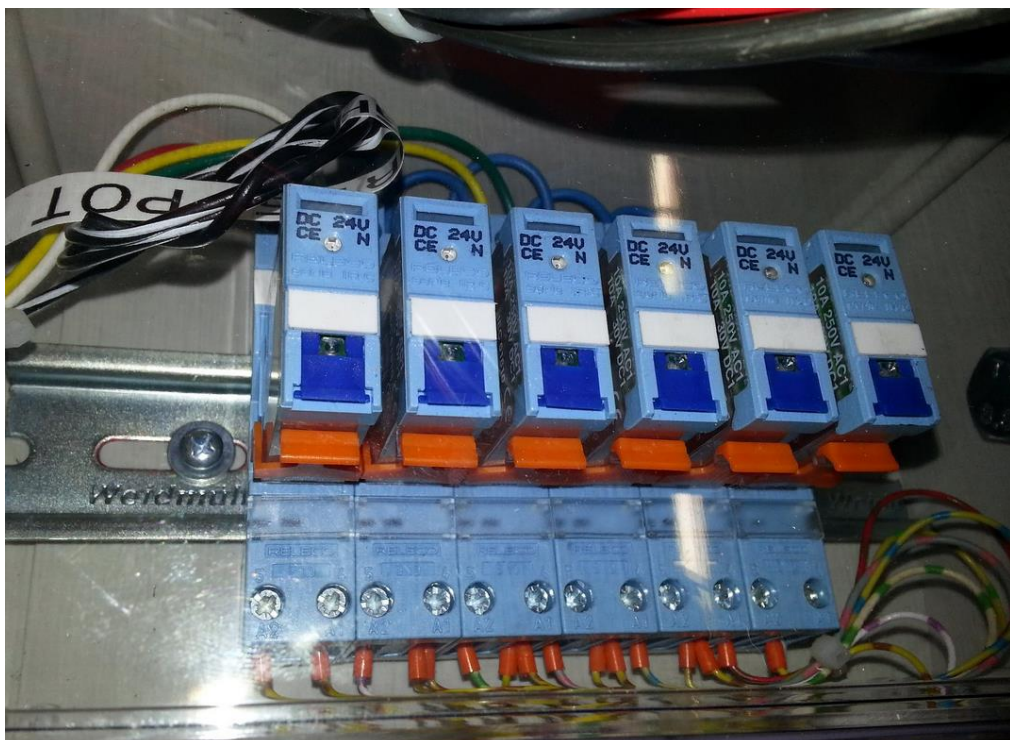
Invertterin mukana tuli myös oma näyttö, josta pystyi näkemään tärkeimpiä tietoja ajonaikana. Näyttö asennettiin vaihteen valitsimen kanssa vaihdekepin tilalle. Näytöstä voi valita haluamansa tietoja menu-näppäintä painamalla. Näyttöön saa esimerkiksi näkymään, moottorin pyörimisnopeuden, virran, jännitteen tai moottorin lämpötilan.

Invertterin kanssa auton liikkumista ohjaa myös logiikka Modican M340, joka on keskiraskas teollisuuslogiikka. Kaikki ohjaamista vaativat laitteet on kytketty tähän logiikkaan ja niin on invertterikin. Logiikan käyttö ei millään muotoa ole pakollista muunnossähköautossa ja kyseiseen projektiin se otettiin mukaan että siitä saadaan tulevaisuudessa oppimisympäristö koululle sekä sillä saatiin yhtenäinen ohjaus kokonaisuus auton laitteille, kuten alipainepumput ja sähköinen ohjaustehostin.



KUVA 29. Curtis 1238R-7601 kytkettynä ja suojattuna

Koska logiikan käyttöjännite on 24Vdc:tä ja Curtiksella 12 Vdc:tä täytyi näiden välille tehdä releohjaus.



KUVA 30. Curtiksen ja logiikan välinen releohjaus

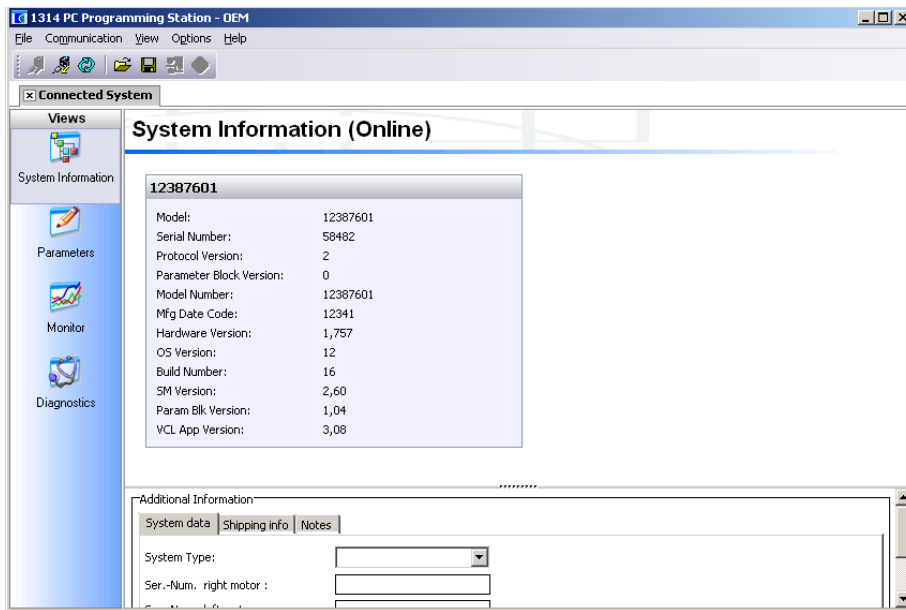
Päävirtakaapeleiden täytyis täyttää EU:n talouskomission (UNECE:n) sääntö nro. 100, kohta 5.1.1.5.3, joka määrittää että koteloimattomat suurjänniteväylien kaapelit on oltava ulkokuoreltaan oransseja. Itse kaapelina käytimme 70 mm^2 monisäikeistä hitsauskaapelia, jonka päälle kutistettiin oranssi kutistesukka.



KUVA 31. Curtis 840 näyttö ja vaihteen valitsin

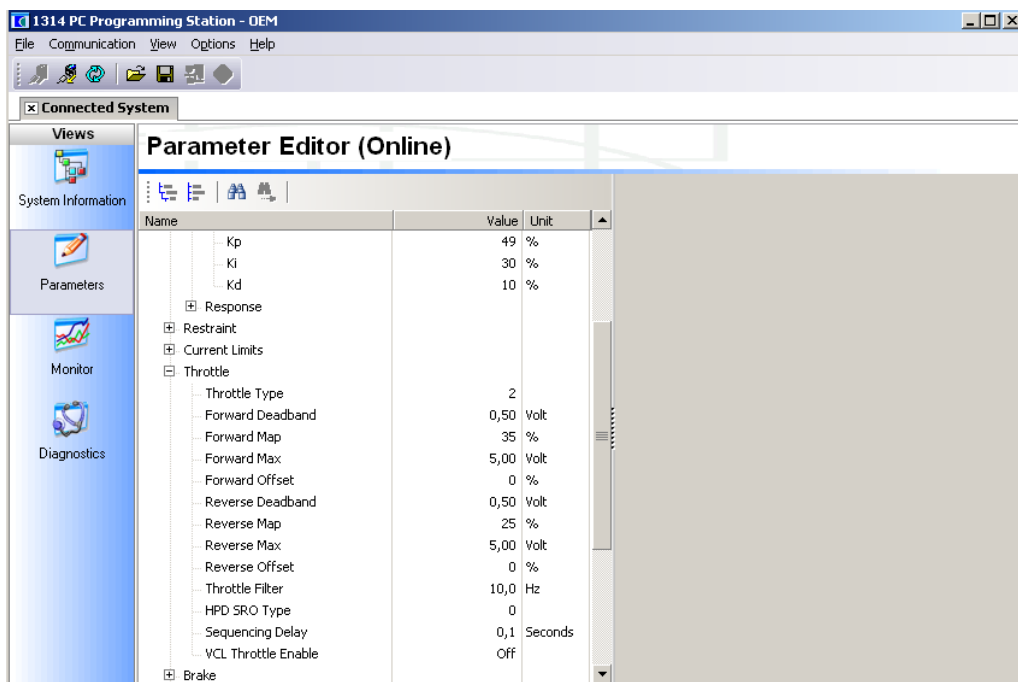
7.2.1 1314 PC Programming station

Curtis 1238R mukana toimitettiin ohjaimen ohjelmointiin tehty communication dongle. Taustatietojen mukaan donglen avulla yhteyden saaminen tietokoneeseen ei aina ole ongelmatonta. Ongelmaksi kuitenkin paljastui se, ettei donglea ole alunperinkään kytketty oikein liittimiinsä. Tehtaan tekemien virheiden korjaututta yhteydessä ei enää tullut vastaan ongelmia.



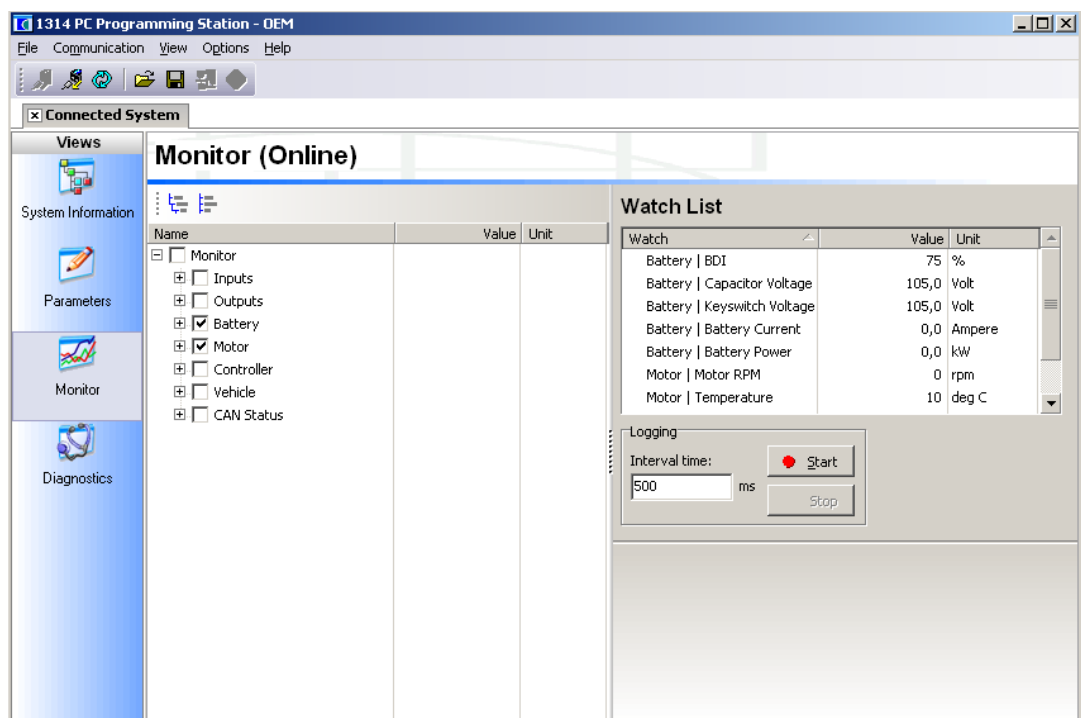
KUVA 32. Curtis 1314 PC Programming station, System information

Ohjelma mahdollistaa invertterin parametrien muuttamisen ja seuraamisen myös ajon aikana. Itse parametri lista on hyvin pitkä ja mikäli haluaa ohjausta muokata vielä parametrejä enemmän on se mahdollista tehdä käyttäen VCL:ää (vehicle communication language). VCL:ä mahdollistaa inverterin liittimen pinnien uudelleen ohjelmoimisen haluttuihin käyttöihin.

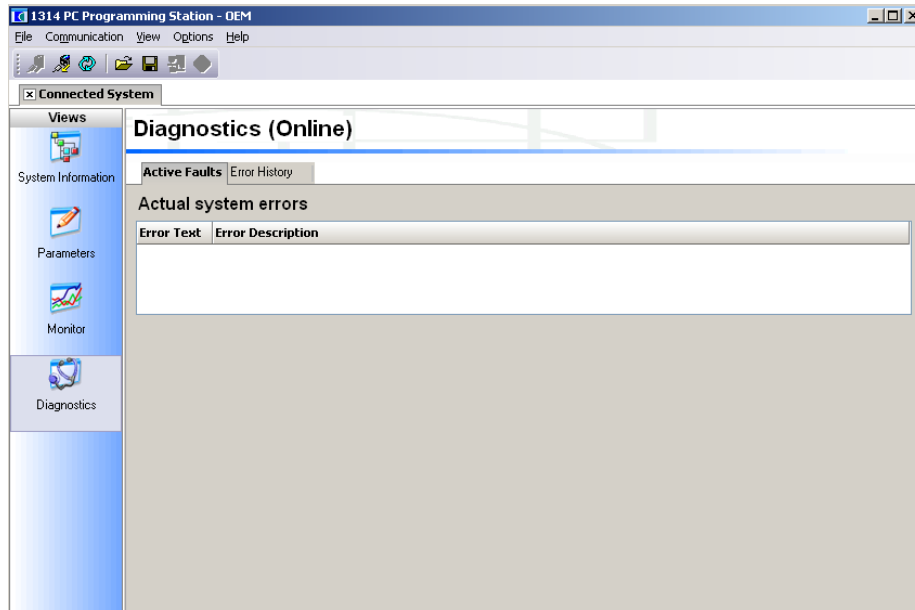


KUVA 33. Curtis 1314 Parametri valikko

Ajaminen kannalta tärkeimmät parametrit ovat control moden valinta sekä kaasutus kartan asetukset. Control modella valitaan mitä ohjaustapaa invertteri käyttää, pyörimisnopeuden säätöä vai suoraa momenttisäätöä. Throttle map puolestaan määrittää kaasun herkkyyden. Sillä määritetään prosentteina kuinka monta prosenttia kaasupolkimesta voidaan painaa ennen kuin nopeus lähtee kasvamaan nopeasti. Korkea throttle map prosentti mahdollistaa helpon liikuttelun ahtaissa tiloissa kun taas pieni throttle map prosentti tekee ajoneuvosta hyökkäävän jo pienillä kaasun painalluksilla.



KUVA 34. Curtis 1314 monitorointi mahdollistaa ajonaikaisten tietojen tallentamisen ja seuraamisen



KUVA 35. Curtis 1314 Diagnostics ilmoittaa havaitut häiriöt

7.3 Projektin mekaaniset muutokset

Auton peräkontti purettiin täysin projektin alkuvaiheessa. Vararengas poistettiin ja tila otettiin uuteen käyttöön. Takakontin pohjaa nostettiin noin 15 cm, jotta kaikki saatiin hyvin mahtumaan. Mikäli tulevaisuudessa autoon tullaan lisäämään elektroniikkaa, on hyvin todennäköistä että laajennukset tehdään peräkonttiin.



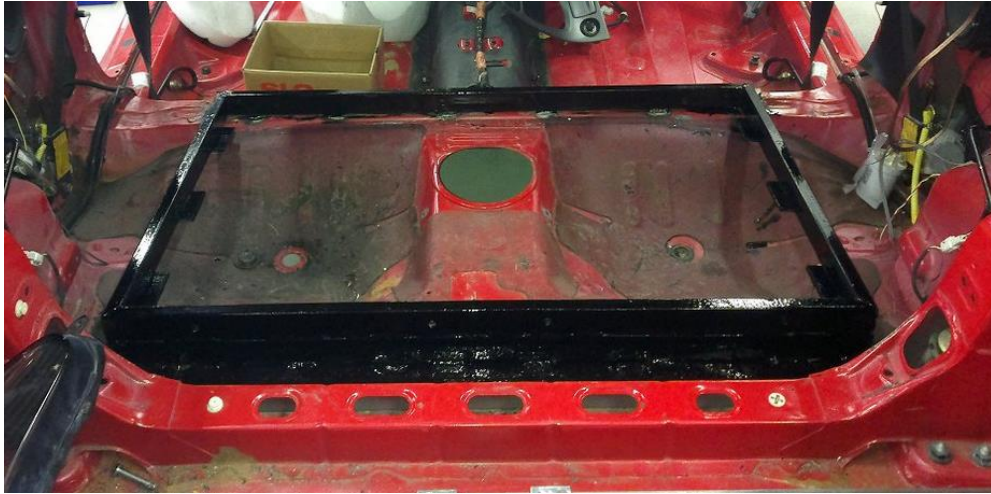
KUVA 36. Peräkontin korotus kehikko ja laturin teline

Rakensin peräkonttiin uuden kehikon tukemaan uutta pohjalevyä, joka tehtiin vanerista. Vanhat pohjamuovit poistettiin, koska ne olisivat vieneet liiaksi tilaa. Vararengaspaikan syvennykseen rakensin telineen akuston laturille ja DC/DC muuntimille, joilla ladataan auton keulassa olevaa käyttöakkaa. Laturille tulee syöttö kontaktorilta jota puolestaan syötetään verkkosähköllä latauspisteistä. Kontaktori on lisätty väliin että voinne ohjata missä tilanteissa lataus menee päälle. DC/DC muuntimien tehtävä taas on pudottaa akustolta tuleva jännite 12 Vdc, joka sopii käyttöakun lataukseen. Peräkonttiin asennettiin myös kotelo, johon laitettiin releohjaukset akuston lämmitykselle ja käyttöakun lataukselle.



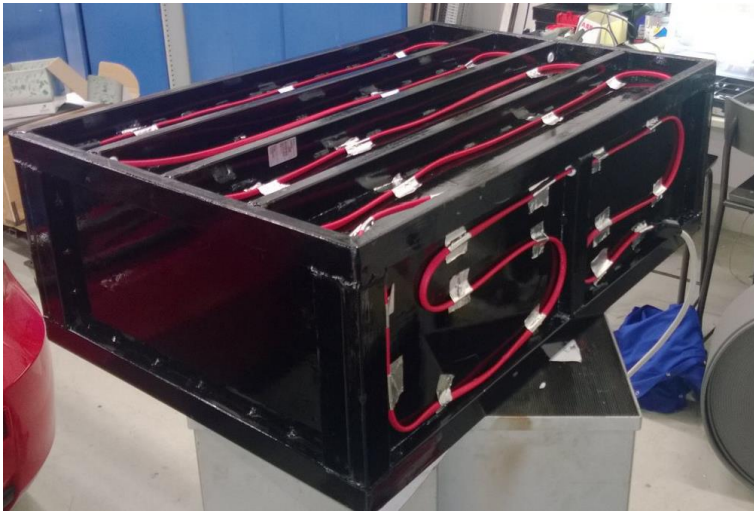
KUVA 37. Vararengaan syvennykseen asennettu laturi ja DC/DC muuntimet

Takapenkit poistettiin kokonaan ja autosta tehtiin kaksipaikkainen. Takapenkkien tilalle sovitettiin akusto. Tämä tehtiin koska akusto oli painojakauman vuoksi laitettava taka-akselin etupuolelle ja emme halunneet jakaa akustoa useampaan pienempään osaan. Tällöin ainoa paikka mihin koko akusto saatiin mahtumaan ilman ongelmia oli takapenkkien paikka. Takapenkin ollessa alustana hiukan kenossa keulaa kohti, tuli akustokin asennettua pieneen etukenoon.



KUVA 38. Takapenkin tilalle hitsattu akuston laatikon paikka

Akustolaatikko kiinnitettiin paikalleen 14 pultilla jotka menevät autonrunkoon hitsatun kehon ja akuston kehon pohjarautojen lävitse.



KUVA 39. Akuston kehikko ja sen lämmitys

Takapenkkien tilalle asennettiin myös auton pääkontaktori sekä intsetehty shunttivastus virranmittausta varten. Akuston hallinnasta vastaavat BMS-moduulit (3 kpl) asennettiin akustolaatikon takaseinäällä. BMS huolehtii virran ja lämpötilan mittauksista sekä se tasoittaa kennojen jännitteitä epätasaisessa kuormituksessa.



KUVA 40. BMS-Moduulit, Master 14 sekä slave 14 ja slave 8

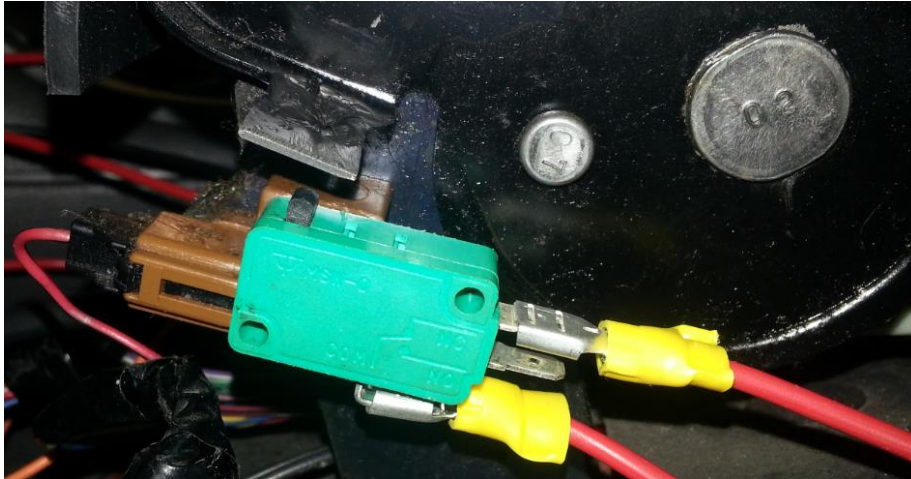
Ohjaamon näkyvimmistä muutoksista vastaa keskikonsoliin asennettu kosketusnäyttö. Se on logiikkaan yhdistetty ja mahdollistaa ohjelmoinnin kautta kaiken auton informaation näyttämisen. Tulee tulevaisuudessa opiskelijoille ohjelmointikohteeksi.



KUVA 41. Keskikonsolin kosketusnäytöstä näkee esimerkiksi valitun vaihteen ja apulaitteiden tilan

Vaihdekeppi poistettiin ja tilalle lisättiin vaihteen valitsin sekä moottoriohjaimen oma näyttö. Kuva 41. Käsijarru pidettiin vielä toistaiseksi mekaanisena ja jätettiin sähköinen version tulevaisuuden kehityskohteeksi. Käsijarruun kuitenkin lisättiin rajakytkin huolehtimaan siitä ettei auton akusto voi lähteä latautumaan ennen kuin

käsijarru on vedetty päälle. Tämä on yleinen turvallisuudesta huolehtiva ominaisuus, joka huolehtii ettei häiriönkään takia auto pääse liikkeelle latauksen aikana.



KUVA 42. Käsijarrun rajakytkin mahdollistaa akuston lataamisen ainoastaan silloin kun käsijarru on päällä

Auton pohjasta purettiin muunmuassa pakoputkisto, jonka tilalle taivuteltiin metalliputket päävirtakaapeleita varten. Putket kulkevat konehuoneesta takapenkin kohdalle josta putket taipuvat akuston päänapojen kohdalle. Pohjasta myös poistettiin bensatankki.



KUVA 43. Pakoputkin tilalla asemmetut päävirtakaapeleiden putket

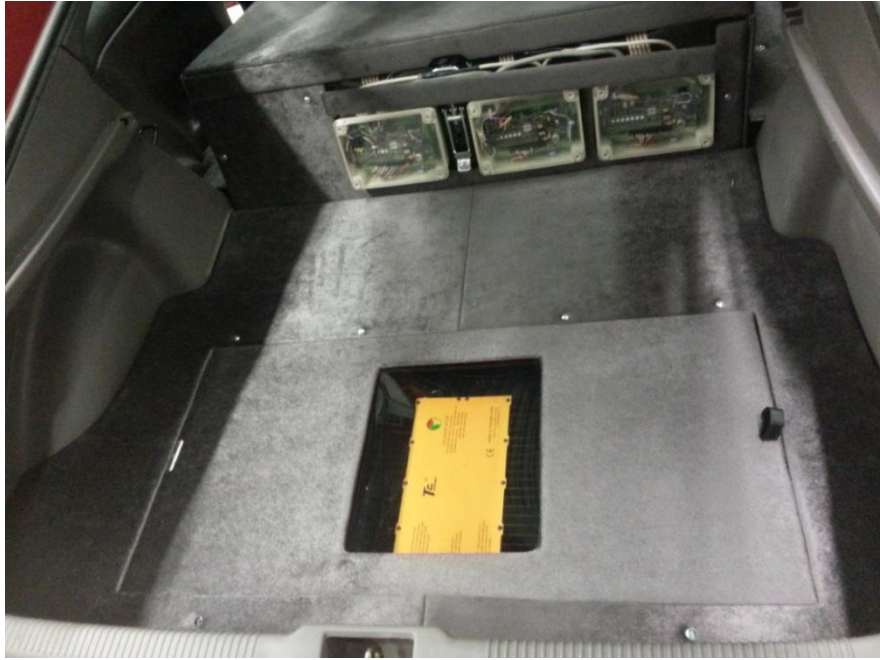
Auton konehuone purettiin lähes täysin projektin alkuvaiheessa. Ohjaustehostin vaihdettiin sähköiseen ja jarruille asennettiin alipainepumppu. Molempien ohjaus tehtiin Modican M340 logiikalla ja ne ovat vielä säädettävissä kosketusnäytöltä. Kosketusnäytöltä voi esim. säätää nopeutta jossa ohjaustehostin lähtee pois päältä.

Konehuoneeseen rakennettiin lähes kaikki uudestaan. Kuvan X oikeassa yläkulmassa on alipainepumppu antureineen. Sen alapuolella on vaihdelaatikko, jonka päälle on rakennettu vaihteistoa ohjaava robotiikka. Oikeassa alalaidassa sijaitsee elektroniikka laatikko joka pitää sisällään Modiconin logiikan, sitä syöttävän muuntaja sekä pyörimisnopeutta mittaavien abs-antureiden taajuus jännite muuntimet jotka on myös itse tehty. Vasemmassa alalaidassa on auton omien laitteiden käyttöakku ja virranmittaus. Kuvasta piiloon jääneet invertterin releohjaukset on sijoitettu käyttöakun etupuolella. Akun yläpuolella puolestaan on invertteri pleksistä taivutellun suojan takana. Sähköiseksi muunnetun ohjaustehostimen tunnistaa vihreästä väristään kuvan 44 vasemmasta yläreunasta. Näiden isoimpien osien sijoittelun lisäksi asennettu releohjauksia ja sulakebokseja.



KUVA 44. Konehuone kaikkien muutosten jälkeen

Kun auto saatiin ajokelpoiseksi ja kaikkien toimilaitteiden testaukset tehtyä oli auto saatava vielä esittely kelpoiseksi. Verhoilin auton 3 mm paksulla autonverhoilukankaalla. Verhoilu tuli vaneerin päälle jotka leikkasin tarvittaviin muotoihin. Takakonttiin tein vaneerista luukun ja pleksista ikkunan josta pääsee ilman purkamista käsiksi laturiin ja peräkontin kytkentöihin.



KUVA 45. Valmis verhoiltu takakontti



KUVA 46. Verhoiltu akusto



KUVA 47. valmis muunnossähköauto ecelica edestä



KUVA 48. muunnossähköauto ecelica, rakentajien nimet teipattuna molemmin puolin

8 YHTEENVETO

Projektin alkuvaiheessa oli hyvin pääpiirteittäinen käsitys siitä, mitä projekti tulee pitämään sisällään ja miten paljon työtunteja se tulisi vaatimaan. Projektin alkupalaverin 17.10.2012 ja ensiesittelyn 8.1.2014 väliin mahtuvat 1200 työtuntia pitävät sisällään lukemattoman määrän uuden oppimista aina verhoilusta hitsaukseen.

Projekti voidaan todeta onnistuneeksi. Auto saatiin liikkumaan sähköllä, ja auton omat hallintalaitteet toimivat moitteetta.

Moottorin asennus saatiin toteutettua suunnitellusti josta iso kiitos kuuluu myös Mikkelin ammattikorkeakoulun konelaboratoriolle, jonka tekemä moottorin ja vaihteiston välinen välipalikka mahdollisti saumattoman voimansiirron. Moottori ja invertteri saatiin asennettua aivan päällekkäin ja välikaapeleiden pituus saatiin lyhyeksi. Auton on saatu säädettyä todella helpoksi ajaa, loivan kaasutuskartan takia. Invertterin näyttö toimii hyvin ja ajonaikana on helppo seurata moottorin tietoja. Käytännössä järjestelmät saatiin toimimaan hyvin yhteen, mikä myös näkyy eheänä kokonaisuutena.

Projektin aikana tuli todella paljon kehitysideoita, ja projektiin voisi helposti saada aikaa kulumaan vaikka kuinka paljon. Aikataulun takia useita, toiminnan kannalta ei niin tärkeitä ideoita hylättiin ja jätettiin tulevaisuuden kehityskohteiksi.

Vaikka muunnossähköautoja on rakennettu pienilläkin budjeteilla, yleisesti puhuttaessa ei projektia voi sanoa kustannustehokkaaksi. Tähän kun lisätään työtunnit, joita ensikertalaisella rakentajalla tulee lähes väkisin yli 1 000, voidaan todeta muunnossähköautojen olevan enemmin harrastajille sopivia projekteja kuin taloudellista hyötyä tavoitteleville.

Rakentajalta projekti vaatii monipuolista osaamista. Jo pelkästään mekaaninen puoli vaatii paljon huomioimista, sillä esimerkiksi raskas akusto on pystyttävä asentamaan luotettavasti osaksi runkoa tai vähintään kiinnittämään siihen ilman vaaraa edes onnettomuustilanteissa. Sähköinen puoli vaatii paljon manuaalien lukemista ja

perehtymistä tekniikkaan. Näiden lisäksi myös autotekniikan tuntemus on oltava vähintään kohtalaisella tasolla.

Oppimiskohteena projekti on taas vertaansa vailla, se sisältää harvinaisen monipuolisesti sähkötekniikan sovelluksia sekä mekaanisia muunnoksia. Se sisältää useiden jännitetasojen tuotteita, tasa- ja vaihtovirtaa käyttäviä sovelluksia, ohjelmointia sekä näiden kaikkien mekaanisen sovittamisen autokäyttöön ottaen huomioon kosteuden ja tärinän aiheuttamat vaatimukset.

Projektiauto on vielä opinnäytetyötä kirjoittaessa katsastamatta, koska kehitys sen ympärillä tulee jatkumaan. Ajaminen on kuitenkin mahdollistettu koekilvillä, joten testit voidaan suorittaa normaalissa käytössä.

LÄHTEET

[1] Sähköautot – Nyt! WWW-dokumentti.

<http://www.sahkoautot.fi/wiki>. Historia. Luettu 13.1.2014. Päivitetty: ei päivitys tietoa

[2] Motiva Oy. WWW-dokumentti.

http://www.motiva.fi/liikenne/henkiloautoilu/valitse_auto_viisaasti/autotyyppeja/tayssahkoauto. Luettu 13.1.2014. Päivitetty 19.10.2012.

[3] Ensto Oy. WWW-dokumentti.

<http://www.ensto.com/fi/ratkaisut/sahkoautonlataus/sahkoautoiluvahentaapaastoja>
Luettu 13.1.2014. Päivitetty: ei päivitys tietoa

[4] Korpinen Leena. 1997. PDF-dokumentti. Sähkökoneet: osa 1.

http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf
Luettu 14.1.2014. Päivitetty 29.11.2007.

[5] Veli-Matti Sainio. 2010. Hybridiaskelmootorin mallinnus ja ohjaus nosturi-sovelluksessa. Aalto-yliopisto. Diplomityö.

[6] Antti Hiltunen. 2013. Kestomagneettigeneraattorin kuormitus vaihtelevalla teholla ja nopeudella. Tampereen ammattikorkeakoulu. Insinöörityö.

http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/58095/Hiltunen_Antti.pdf?sequence=1

[7] Sähkökäytöt. PDF-dokumentti. 2007. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Mekatroniikan peruskurssi. Konetekniikan osasto.

[8] Brushless DC-motor. WWW-dokumentti. 2013.

http://en.wikipedia.org/wiki/Brushless_DC_electric_motor

[9] Antti Vuorivirta. 2002. Moottorimalliton skalaarisäätö.

Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu Diplomityö.

[10] Sähköautot – Nyt! WWW-dokumentti.

<http://www.sahkoautot.fi/wiki:kontrolleri>. Luettu 17.1.2014.

Päivitetty: ei päivitys tietoa

[11] Lauri Aura ja Antti J. Tonteri. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniiikan perusteet.

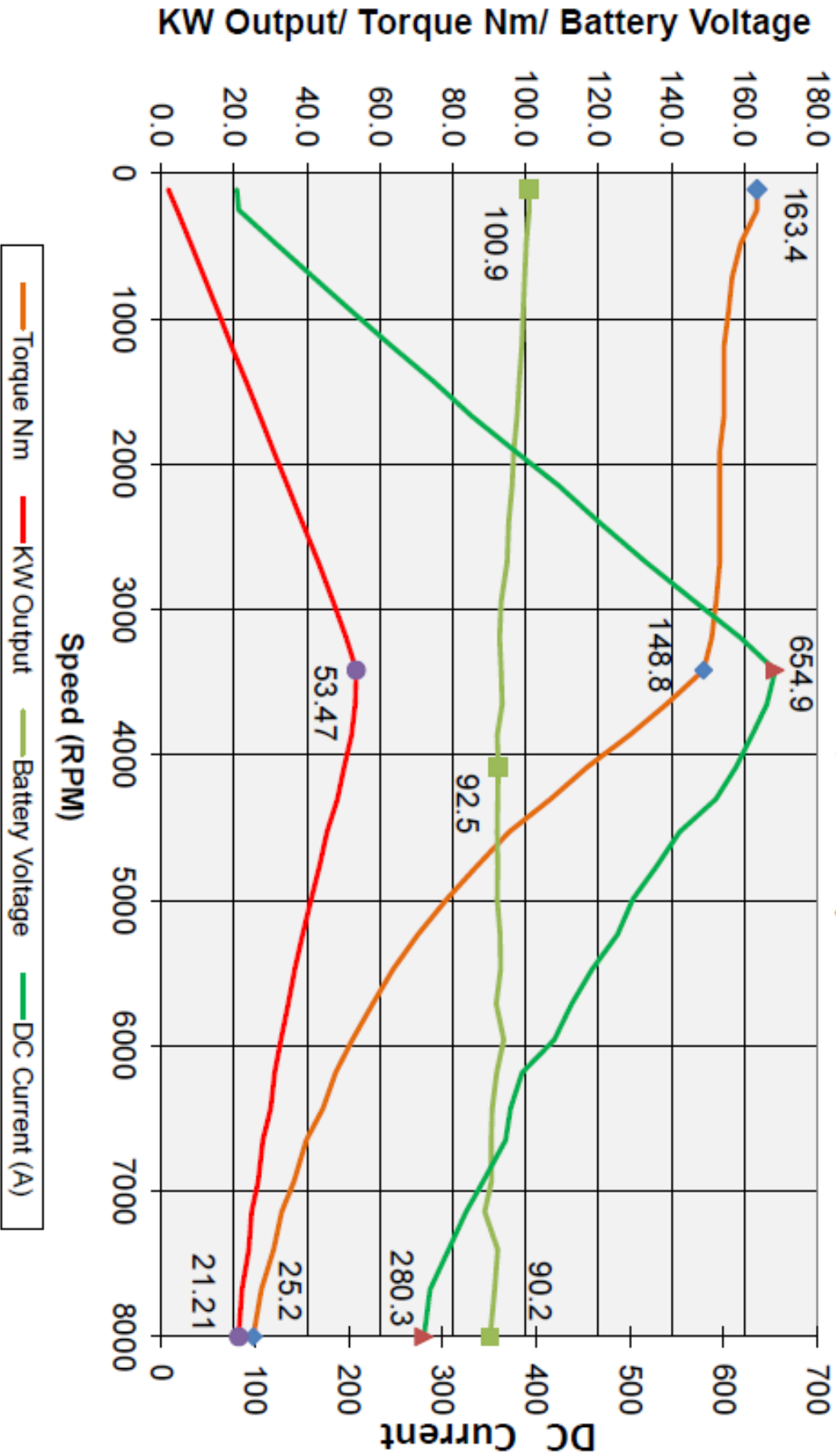
Helsinki: WSOY

[12] Sähkömoottorikäytöt. PDF-dokumentti. ABB TTT-Kirja-2000

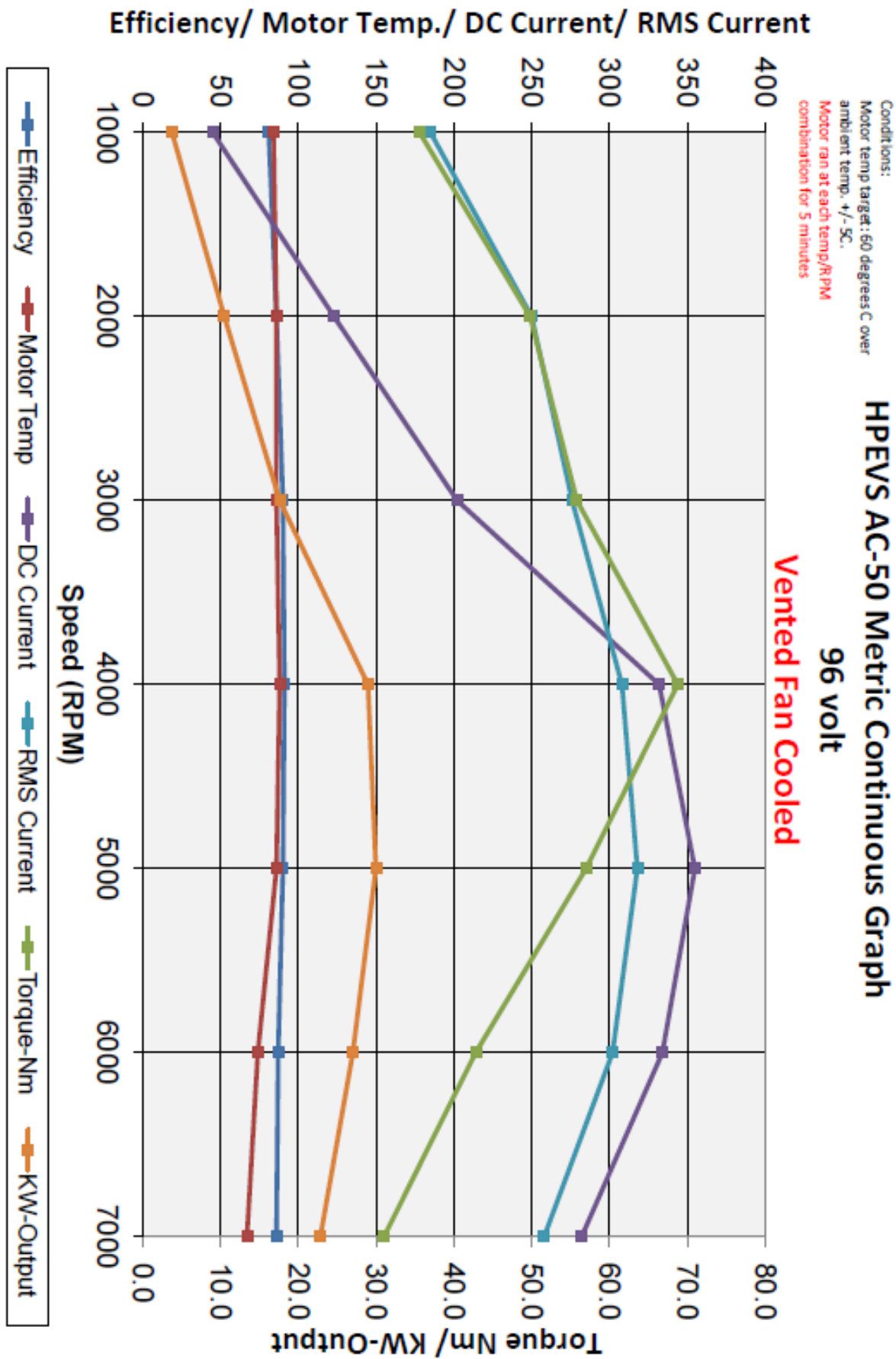
<http://cna.mikkeli.ammk.fi/Public/JormPekk/ABB/TTT-KIRJA->

[2000/S%C3%84HK%C3%96MOOTTORIK%C3%84YT%C3%96T.pdf](http://cna.mikkeli.ammk.fi/Public/JormPekk/ABB/TTT-KIRJA-2000/S%C3%84HK%C3%96MOOTTORIK%C3%84YT%C3%96T.pdf)

HPEVS AC-50 Metric Peak Graph 96 Volts/650 Amps

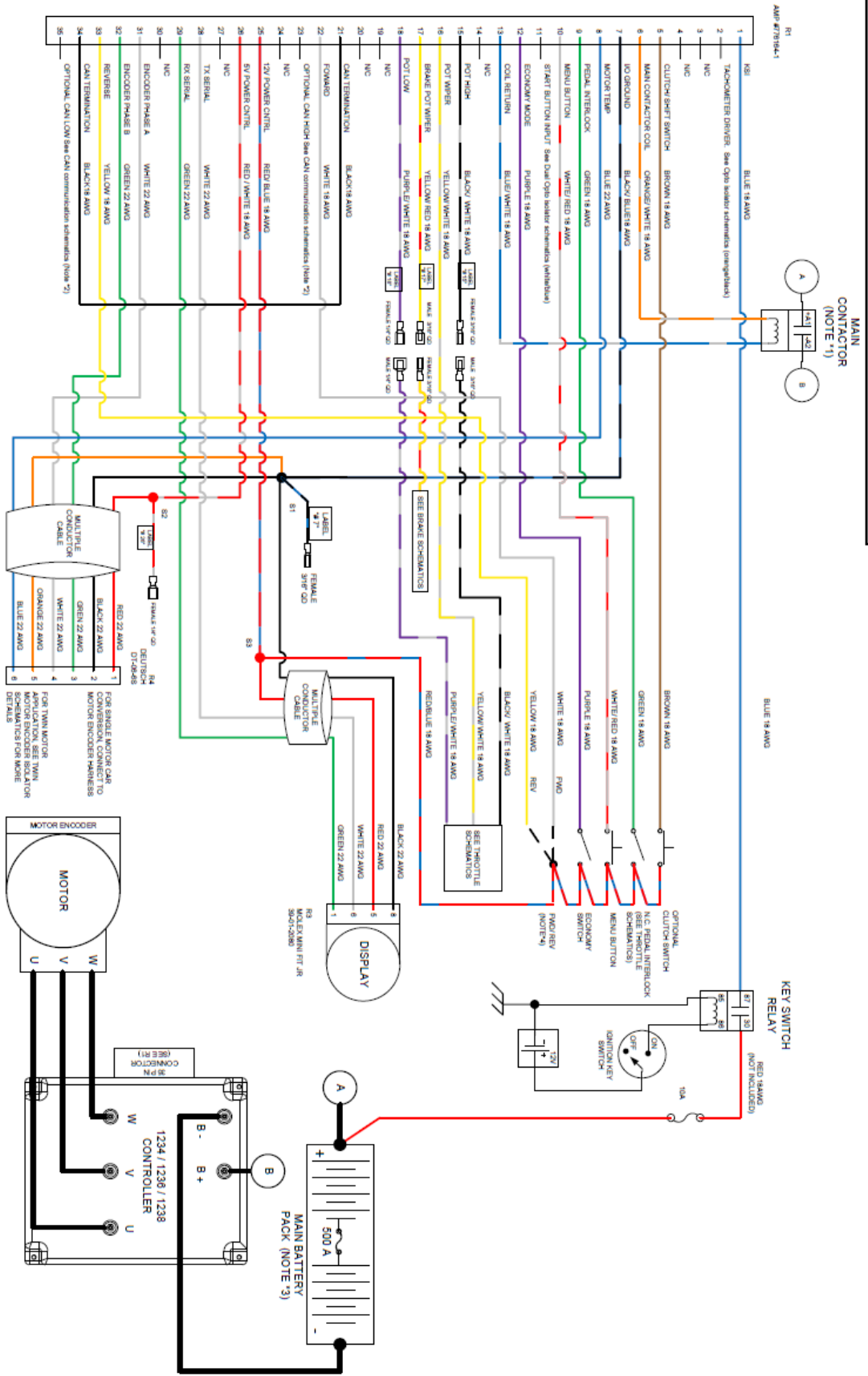


HPEVS AC-50, Vääntö ja teho pyörimisnopeuden funktiona



Curtis 1238R kytentäkaavio

NOTICE: This drawing is the property of Performance Electric Vehicle Systems, Inc. and its subsidiaries and affiliates (individually and collectively "PEVS") and contains highly proprietary, confidential, and trade secret information of PEVS. The recipient of this drawing agrees, (a) to use the information contained herein solely for the purpose of manufacturing the product specified by PEVS, (b) to maintain the drawing open PEVS's request. This notice shall appear on any copies or partial reproductions of this drawing.



NOTES:

(1) USE SUPPLIED CONTACTOR

(2) THE CONTROLLER CAN COMMUNICATION NEEDS TO BE ISOLATED FROM OTHER CAN BASED COMPONENTS. A CAN ISOLATOR MAY BE NEEDED. POSSIBLE SOURCE OF CAN ISOLATOR IS CANOP FROM B&B ELECTRONICS (www.bb-elec.com)

(3) A BATTERY MANAGEMENT SYSTEM (BMS) IS STRONGLY RECOMMENDED IF LITHIUM ION BATTERIES ARE USED. POSSIBLE SOURCE OF BMS IS EMERT ENERGY SYSTEMS ORION BMS (www.orionbms.com)

(4) FORWARD IS CLOCKWISE MOTOR ROTATION FROM ENCODER SIDE VIEW. DEPENDING ON TRANSMISSION CONFIGURATION, USE EITHER WIRE TO OBTAIN DESIRED ROTATION. USE FWD & REV SWITCH IN DIRECT DRIVE APPLICATIONS

CAD TYPE	APPLICABLE	
VISIO	SOFTWARE	
UNIT	DRAWINGS	10110-AUTO-CONVERSION
NONE		
DRW SIZE		
A		
DATE		
2/12/13		
SCALE		
1:1		
SHEET	1 OF 1	REVISION C
		HPESV