

Miikael Riuttaskorpi

**Sähkömoottoripyörämuunnos
Moottori, moottoriohjain & sähköistys
Sähkömoottoripyörämuunnosprojekti eBandit**

Opinnäytetyö

Insinööri

Sähkö- ja automaatiotekniikka

2022



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri
Tekijä/Tekijät	Miikael Riuttaskorpi
Työn nimi	Sähkömoottoripyörämuunnos – Moottori, moottoriohjain & sähköistys
Toimeksiantaja	XAMK
Vuosi	2022
Sivut	43 sivua, liitteitä 4 sivua
Työn ohjaaja(t)	Teemu Manninen

TIIVISTELMÄ

Tämä opinnäytetyö on osa sähkömoottoripyörämuunnosprojektia, jossa polttomoottorinen, vuosimallia 1996 Suzuki GSF 600 Bandit -moottoripyörä muunnetaan täyssähköiseksi ja tieliikennekäyttöön sopivaksi. Työ toteutettiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Mikkelin kampuksella, koulun rahoittamana. Työn tavoitteena oli käsitellä muunnosprojektiin valitut moottori ja moottoriohjain sekä se, miten moottoripyörän sähköistys toteutettiin. Valmis moottoripyörä jää koululle opetus/lisäkehityskäyttöön.

Eri sähkömoottorityyppejä ja näiden ohjaustapoja tutkittiin laajalti. Nykyaikana jatkuvan sähkömoottorien ja ohjaustapojen kehityksen ansioista voidaan saada parempia hyötysuhteita ja energiatehokkuutta. Sähköajoneuvoihin sopivia ratkaisuja on kehitetty sekä sähkömoottoreihin että ohjaustapoihin.

Sähkömoottoripyörämuunnoksen tärkeimmät osat ovat moottori ja sen ohjain. Nämä määrittelevät pitkälti moottoripyörän kyvykkyyden ja energiatehokkuuden. Sähkömoottorille suunniteltiin teräksiset moottorikiinnikkeet, jotka sijoitettiin rungon alkuperäisten moottorikiinnikkeiden paikoille. Vetotavaksi valikoitui alkuperäisin moottoripyörän tapaan ketjuveto. Moottori sijoitettiin myös siten, että eturattaan paikka ei muutu alkuperäisestä juurikaan. Moottoriohjain asennettiin mahdollisimman lähellä moottoria, jotta moottorin kaapelit pysyivät lyhyinä. Moottoriohjaimen avulla moottorista saadaan parhain hyötysuhde, ja moottorin jarrutusenergian talteenottoa voidaan säädellä.

Sähkömoottoripyörämuunnoksessa sähköistys tehtiin kokonaan uusiksi. Sähköistys suunniteltiin ja toteutettiin siten, että kaikki kaapeloinnit olisivat häiriöltä suojattuja, merkittyjä ja nimettyjä. Sähkökuvat piirrettiin tulevia käyttäjiä ajatellen.

Kaikki sähkömoottoripyörään valitut komponentit ovat ohjelmoitavissa ja ne keskustelevat keskenään CAN-väylän välityksellä. Lopputuloksena saatiin näyttävä, kaikki standardit täyttävä ja tieliikenteeseen sopiva sähkömoottoripyörä.

Asiasanat: sähkömoottoripyörämuunnos, sähkömoottoripyörät, sähkömoottori, moottoriohjain, sähköistys

Degree title	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Miikael Riuttaskorpi
Thesis title	Electrical motorcycle conversion – Motor, motor controller & electrics
Commissioned by	XAMK
Time	2022
Pages	43 pages, 4 pages of appendices
Supervisor	Teemu Manninen

ABSTRACT

This thesis is a part of an electric motorcycle conversion project in which a 1996 Suzuki GSF 600 Bandit internal combustion motorcycle is converted to be fully electric and suitable for road use. The work was carried out on the Mikkeli campus of the South-Eastern University of Applied Sciences, and the work was funded by the school. The aim of the work was to deal with the engine and the motor controller selected for the conversion project, as well as the electrification of the motorcycle. The finished motorcycle will remain at the school for further development.

Different types of electric motors and their control methods were extensively studied. Thanks to the continuous development of electric motors and control methods today, better motor efficiency and energy efficiency can be achieved. Solutions suitable for electric vehicles have been developed, both for electric motors and control methods.

The most important parts of an electric motorcycle conversion are the motor and its controller. These largely determine the capability and the energy efficiency of an electric motorcycle. Steel motor mounts were designed for the electric motor, which replaced the original motor mounts on the frame. A chain drive was chosen as the traction method. The engine was also positioned so that the position of the front cogwheel did not change much from the original. The motor controller was installed as close to the motor as possible to keep the motor cables short. The motor controller provides the best efficiency from the motor, and the regenerative braking can be regulated.

In the electric motorcycle conversion, the electrification was completely renewed. These were designed and implemented so that all cabling was shielded, marked and named. The electrical drawings were made with future users in mind.

All components selected for the electric motorcycle are programmable and communicate with each other via the CAN bus. The result was an impressive electric motor bike that met all standards and was suitable for road use.

Keywords: electric motorcycle conversion, electric motorcycles, electric motor, motor controller, electrics

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	SÄHKÖMOOTTORIPYÖRÄ	7
3	SÄHKÖMOOTTORIT.....	8
3.1	Epätahtimoottorit.....	9
3.1.1	Oikosulkumoottori	9
3.1.2	Liukurengasmoottori	11
3.2	Tahtimoottorit.....	11
3.2.1	Kestomagneettitahtimoottori	12
3.2.2	Vierasmagnetoitu tahtimoottori	14
3.2.3	Synkronireluktanssimoottori.....	14
3.3	Tasasähkömoottorit	16
3.3.1	Harjalliset tasasähkömoottorit.....	17
3.3.2	Harjattomat tasasähkömoottorit	20
4	SÄHKÖMOOTTORIN OHJAUSTAVAT	21
4.1	Vaihtosähkömoottorien ohjaus.....	22
4.1.1	Skalaariohjaus ja -säätö.....	22
4.1.2	Vektorisäätö.....	23
4.1.3	Suora vääntömomenttisäätö	24
4.2	Tasasähkömoottorien ohjaus.....	25
4.3	Jarrutusenergian talteenotto	26
4.3.1	Vaihtosähkömoottorin regenerointi	26
4.3.2	Tasasähkömoottorin regenerointi	26
5	SÄHKÖMOOTTORIPYÖRÄMUUNNOS.....	26
5.1	Suunnittelu.....	27
5.2	Rakentaminen.....	29
5.2.1	Moottori.....	29
5.2.2	Moottoriohjain	31

5.2.3	Akusto, akunhallintajärjestelmä ja laturi	34
5.2.4	Sähköistys	35
5.3	Ohjelmointi.....	38
5.4	Käyttöönotto ja viimeistely	41
6	YHTEENVETO	42
	LÄHTEET.....	44

LIITTEET

Liite 1. HPEVS AC-20 tehokäyrä

Liite 2. eBandit sähkökaaviot

1 JOHDANTO

Polttomoottoristen ajoneuvojen käyttökulujen lisääntyessä suurta vauhtia nähdään sähköajoneuvot jo paljon positiivisemmin kuin vuosikymmen sitten. Teknologian nopean kehityksen avulla sähköajoneuvojen hyödyt alkavat kaatamaan sen haittapuolia.

Sähkömoottoripyörätkin alkavat näyttäytymään markkinoilla, ja yhä useammat isommat valmistajat ovat koittaneet tuoda omia sähkömoottoripyöriään esille. Näiden heikkoutena kuitenkin ovat lyhyet kantamat, hitaat latausajat ja korkeat hinnat, joita on vaikeaa parantaa ennen akkuteknologian ja energiatehokkuuden kehittymistä moottoripyörien pienen koon vuoksi.

Verrattaessa sähkömoottoripyörien myyntiä polttomoottorisiin moottoripyöriin ja sähköautojen myyntiä polttomoottorisiin autoihin on niiden ero huomattavan iso, jopa kaksikymmenkertainen. Sähköpolkupyörien ja -potkulautojen myynti on viime aikoina ollut suuressa nousussa. Näiden hyötyinä ovat saatavuus, hinta ja käytännössä minkä ikäinen tahansa voi näitä käyttää. Moottoripyörää ei kuka vaan voi ajaa, ja sähkökäyttöistä moottoripyörää ei voi oikein käyttää kuin kaupunkiajossa tai pienessä matka-ajossa.

Sähkömoottoripyörämuunnoksia ihmiset ovat rakennelleet ympäri maailmaa jo jonkin aikaa, mutta Suomessa tämä ei niin yleistä ole. Moottoripyöriä ei juurikaan ole muunnettu sähköisiksi tämän kalliin hinnan ja sen tuomien hyötyjen vähyyden takia. Muunnoksessa tulee myös tilanpuute esteeksi. Sopivan ison akuston sovittaminen perinteisen moottoripyörän runkoon on haastavaa. Moottoripyörää muunnettaessa sähköiseksi tästä ei löydy juurikaan tietoa suoraan mistään, vaan se täytyy itse tutkia ja selvittää.

Tämä opinnäytetyö on osa Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Mikkelin kampuksen sähkömoottoripyörämuunnosprojektia. Projektin tavoite on muuttaa polttomoottorinen moottoripyörä täyssähköiseksi ja liikennekäyttöön sopivaksi. Moottoripyörän on tarkoitus jäädä koululle opetus- ja lisäkehityskäyttöön. Sähkömoottoripyörämuunnos koostuu rungon valinnasta,

akustosta, akunhallintajärjestelmästä, moottorista ja moottoriohjaimesta. Näiden lisäksi moottoripyörään suunnitellaan ja tehdään sähköistys ja lisätään logiikka. Omassa osuudessani keskitytään muunnosprojektin moottoriin, moottoriohjaimeen ja sähkömoottoripyörän sähköistykseen.

2 SÄHKÖMOOTTORIPYÖRÄ

Sähkömoottoripyörien markkinoinnin yleistyessä vasta nykypäivänä ovat ensimmäiset patentit aiheeseen liittyen luotu jo 1800-luvun lopulla. 1940-luvulla toisen maailman sodan syystä johtuneen polttoaineen säännöstelyn vuoksi USA:ssa ja Euroopassa muunnettiin moottoripyörä sähköiseksi. Euroopassa Socovel-yhtiö valmisti kaupallisen pienikokoisen sähkömoottoripyörän, jota valmistettiin noin 400 kappaleen verran. Sodan jälkeen polttomoottoristen ajoneuvojen suosio vei voiton ja sähköisiä moottoripyöriä ei nähty markkinoilla juurikaan.

Ensimmäinen massatuotantoon valmistettu sähköllä toimiva kaksipyöräinen oli Peugeot Scoot'Elec 1990-luvulla. 2000-luvulla tapahtuneen lithium-ion akkujen kehitys auttoi sähköllä kulkevien kaksipyöräisten yleistymistä. [1.]

Nykypäivänä sähkömoottoripyöriä näkee kuitenkin hyvin vähän liikenteessä, kun vastaavasti sähköautoja, -polkupyöriä ja -potkulautoja on päivittäin enemmän. Pääsyyksi tälle lienee se, että sähkömoottoripyörät eivät ole niin hyvin saatavilla jokaiselle. Hinnat ovat korkeat sekä käytännöllisyys ja sen hyödyt eivät vielä voita perinteistä moottoripyörää. Parhaimmillaan sähkömoottoripyörällä ajetaan noin 200 kilometriä yhdellä latauksella, ja sen lataus tyhjästä täyteen kestää optimitilanteessa lähes tunnin. Kaupunkiajoon sähkömoottoripyörät soveltuvat parhaiten, mutta tällöin parempina vaihtoehtoina voisi pitää sähköpolkupyörää tai -potkulautaa.

Suurin sähkömoottoripyörävalmistaja tänä päivänä on Zero Motorcycles -yhtiötä. Sen markkinaosuus on jopa 1/3, kun muut valmistajat jakavat keskenään lopun. Moni sähkömoottoripyörävalmistaja on joutunut sulkemaan ovensa heikon myynnin ja kovan kilpailun takia, kuten esimerkiksi Brammo ja Mission Motors.

Suomalainen Teemu Saukkio suunnitteli maailman ensimmäisen hubless-sähkömoottorin moottoripyörän takarenkaaseen, josta myöhemmin tuli Verge TS -sähkömoottoripyörä. Hubless-moottorin etuna on liikkuvien osien vähyys ja moottoripyörässä jää enemmän tilaa akustolle.

3 SÄHKÖMOOTTORIT

Sähkömoottoreita käytetään nykyään todella paljon kaikissa sovelluksissa, ja näiden käyttö nykyajoneuvoissa päävetotapana on lisännyt erilaisten sähkömoottorien kehittämistä. Moottorien peruseriaate ei kuitenkaan ole muuttunut, vaan muutos tapahtunut lähinnä rakenteessa, materiaaleissa ja tyyleissä, joilla moottoreita valmistetaan.

Sähkömoottorin tehtävä on muuntaa sille syötettyä sähköenergiaa mekaaniseksi energiaksi. Se voi toimia myös toisinpäin generaattorina, jolloin voimakoneen mekaaninen energia muunnetaan sähköenergiaksi.

Sähkömoottoreita on useita erilaisia, mutta yleisimmät näistä epätahti-, tahti- ja tasavirtamoottorit. Tasavirtamoottorit toimivat nimensä mukaisesti tasavirralla, jota sille voidaan syöttää tasajännitelähteestä. Epätahti- ja tahtimoottorit toimivat vaihtovirralla ja ovat yleisimmin kolmivaiheisia, kuten sähkön jakelujärjestelmätkin.

Sähkömoottorien toiminta perustuu virrallisten johtimien ja magneettikentän välisiin voimavaikutuksiin. Moottorissa olevat käämitykset erotetaan toisistaan magnetointikäimitykseen ja työvirtakäämitykseen. Magnetointikäimitys luo moottorin toiminnalle vaadittavan magneettikentän ja työvirtakäämityksessä kulkee moottorin ”varsinainen sähköteho”. Työvirtakäämitystä kutsutaan myös ankkurikäimitykseksi. Ankkurikäimitys voi olla joko roottorissa tai staattorissa riippuen siitä, onko kyseessä tasavirta- vai tahtimoottori. Tämän vuoksi käämityksistä kannattaa puhua roottori- ja staattorikäimityksinä.

Staattorin ja roottorin ilmavälin tulee olla mahdollisimman pieni, sillä ilman magneettinen johtavuus on erittäin huonoa rautaan verrattuna. Staattorin sisäpinta ja roottorin ulkopinta yleensä uritetaan, joihin sijoitetaan käämitykset eli urakäämitykset. Urakäämitykset tehdään vyyhdeistä, jotka muodostuvat

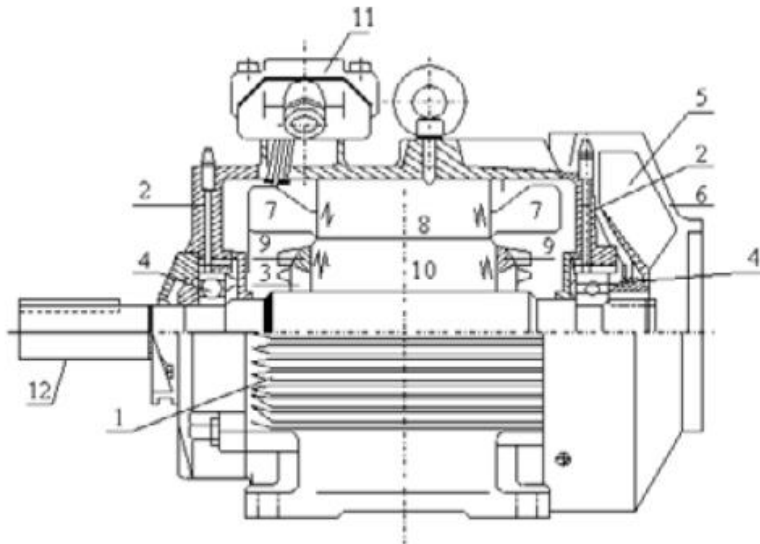
useista johdinkierroksista. Tasavirta- ja tahtimoottoreissa jompikumpi uritus voidaan korvata magneettinavoilla. [2.]

3.1 Epätahtimoottorit

Epätahtimoottorit ovat vaihtosähköllä toimivia moottoreita, joiden toiminta perustuu moottorin sisällä pyörivään magneettikenttään. Sähkömoottorin roottori pyörii magneettikentän kanssa eri tahtiin, josta tulee nimi epätahtimoottori. Epätahtimoottoreita käytetään moneen eri sovellukseen teollisuudesta ajoneuvoihin.

3.1.1 Oikosulkumoottori

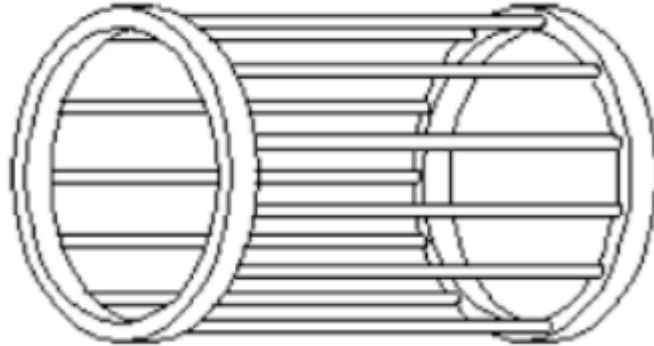
Oikosulkumoottori on epätahtimoottori, joka on yksinkertaisen ja kestävänsä rakenteensa, pitkien huoltovälien ja helppokäyttöisyytensä takia käytetyimpiä sähkömoottoreita. Käytännössä ainoita kuluvia osia on roottorin laakerit. Oikosulkumoottorin käämityksinä toimivat staattori- ja roottorikäämitykset, eikä siinä ole erillisiä magnetointikäämityksiä. Staattorin käämitykset levypaketteineen ja roottorin käämitykset levypaketteineen ovat moottorin sähköisen toiminnan kannalta tärkeimmät osat. (Kuva 1.) [2, s. 119–121]



Kuva 1. Oikosulkumoottorin rakenne. 1. Staattorin runko, 2. Laakerikilvet, 3. Roottori, 4. Laakerit, 5. Tuuletin, 6. Tuulettimen suojus, 7. Staattorikäämitys, 8. Staattorin levypaketti, 9. Roottorin käämitys, 10. Roottorin levypaketti, 11. Liitäntäkotelo, 12. Akseli [2, s. 119]

Oikosulkumoottorin nimi tulee sen häkkimäisestä roottorikäämityksestä, joka on sijoitettuna roottorin levypaketin uriin ja on liitetty yhteen molemmin puolin

oikosulkurenkailla (kuva 2). Se on painevalumenetelmällä valettu alumiinista tai tehty oikosulkurenkaisiin juotetuista kuparisauvoista.



Kuva 2. Häkkikämmityksen rakenne [3].

Staattorikämeihin syötettäessä sähköä syntyy moottorin sisälle pyörivä magneettikenttä. Pyöriessään se leikkaa roottorikämmien sauvoja, jonka seurauksena sauvoihin ja vyyhtien johdinkerrokseen indusoituu sähkömotorista jännitettä ja se saa aikaan roottorivirran. Roottorivirran ja pyörivän magneettikentän välinen voimavaikutus saa roottorin pyörimään, joka toimii siten mekaanisena energiana. [3.]

Oikosulkumoottorin tahtinopeuteen vaikuttaa sen napaparien määrä ja sille syötettävä taajuus. Tämä voidaan teoreettisesti laskea yhtälöstä 1:

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

jossa	n_s	teoreettinen tahtinopeus	[rpm]
	f	taajuus	[Hz]
	p	napapariluku	[-]

Roottorin alkaessa pyörimään staattorin synnyttämän magneettikentän kanssa epätahtiin syntyy siitä jättämää. Pienemmillä kierrosnopeuksilla jättämä on suurempaa, mutta se pienenee pyörimisnopeuden kasvaessa. Jättämän voi laskea yhtälöstä 2:

$$s = \frac{(n_s - n)}{n_s} * 100\% \quad (2)$$

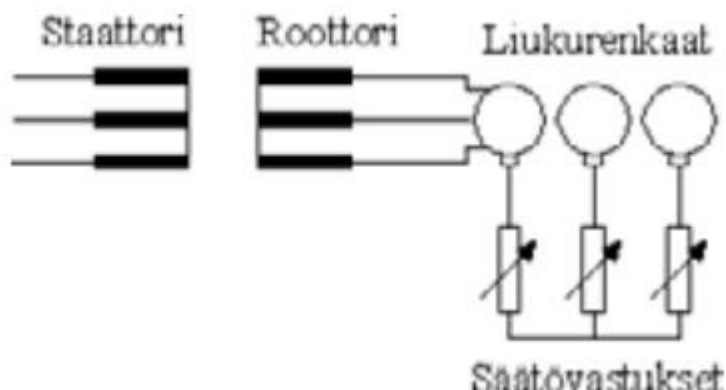
jossa	s	jättämä	[%]
	n_s	teoreettinen tahtinopeus	[rpm]
	n	roottorin nopeus	[rpm]

Pyörimisnopeus voidaan täten laskea vähentämällä jättämä tahtinopeudesta.

3.1.2 Liukurengasmoottori

Liukurengasmoottori on muuten lähes samanlainen kuin oikosulkumoottorikin, mutta se eroaa roottorin rakenteessa. Siinä roottorikäämit on eristetty roottori-raudasta. Kolmivaiheisen roottorikäämityksen toiset päät on kytketty koneen akselilla oleviin liukuharjoja laahaaviin liukurenkaisiin. Liukuharjoissa on säädettävät vastukset, joita säätämällä voidaan vaikuttaa moottorin käynnistysvirtaan ja -momenttiin. (Kuva 3.)

Liukurengasmoottoria käytetään vain erikoistapauksissa, joissa oikosulkumoottorin käynnistysvirta on liian suuri ja käynnistysmomentti liian matala [2, s.196–197].



Kuva 3. Liukurengasmoottorin periaatekuva [3].

3.2 Tahtimoottorit

Synkronimoottorien eli tahtimoottorien staattorin rakenne ja toiminta on samanlainen kuten epätahtimoottorissakin, mutta sen roottori eroaa rakenteeltaan, ja se pyörii nimensä mukaisesti samassa tahdissa kuin moottorin pyörivä

magneetikenttä. Epätahtimoottoreista poiketen tahtimoottori vaatii ohjaukseen ulkoisen ohjausjärjestelmän, kuten taajuusmuuttajan.

Tahtimoottorissa ei tapahdu jättämää, vaan sen pyörimisnopeus on sidoksissa syötettävän verkon taajuuteen ja napaparilukuun, joka voidaan laskea yhtälöstä 3:

$$n = 60 * \frac{f}{p} \quad (3)$$

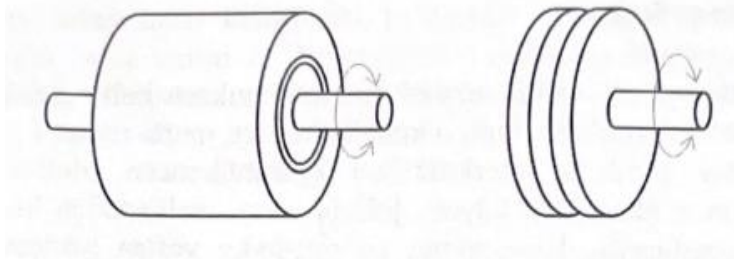
jossa	n	pyörimisnopeus	[rpm]
	f	taajuus	[Hz]
	p	napapariluku	[-]

Sen roottorin magnetointikäännyksiin syötetään magneetoimisvirtana tasavirtaa jännitelähteestä, joka luo magneettinapaan pysyvän magneettivuon. Tätä magneettivuota kutsutaan päävuoksi. Tämän tyylinen roottori toimii samalla tavalla kuin kestopagneetit, joten sen käännyks voidaan korvata kestopagneeteilla. Tahtikoneissa on siis erikseen työvirta- ja magnetointikäännyks. Lisäksi roottorissa on oikosulkumoottorin kanssa samanlainen häkkikäännyks, joka toimii roottorin niin sanottuna käynnistyskäännyksenä. Jos roottorin magnetointikäännyks on aktiivinen jatkuvasti, ei staattorin tuottama magneetikenttä saa sitä pyörimään. Käynnistysvaiheessa tahtimoottori toimii oikosulkumoottorin tavoin ja saavutettaessa magneetikentän nopeuden sen roottorin magnetointikäännyks aktivoidaan ja se tahdistuu automaattisesti. [2, s. 255–256; 4.]

3.2.1 Kestomagneettitahtimoottori

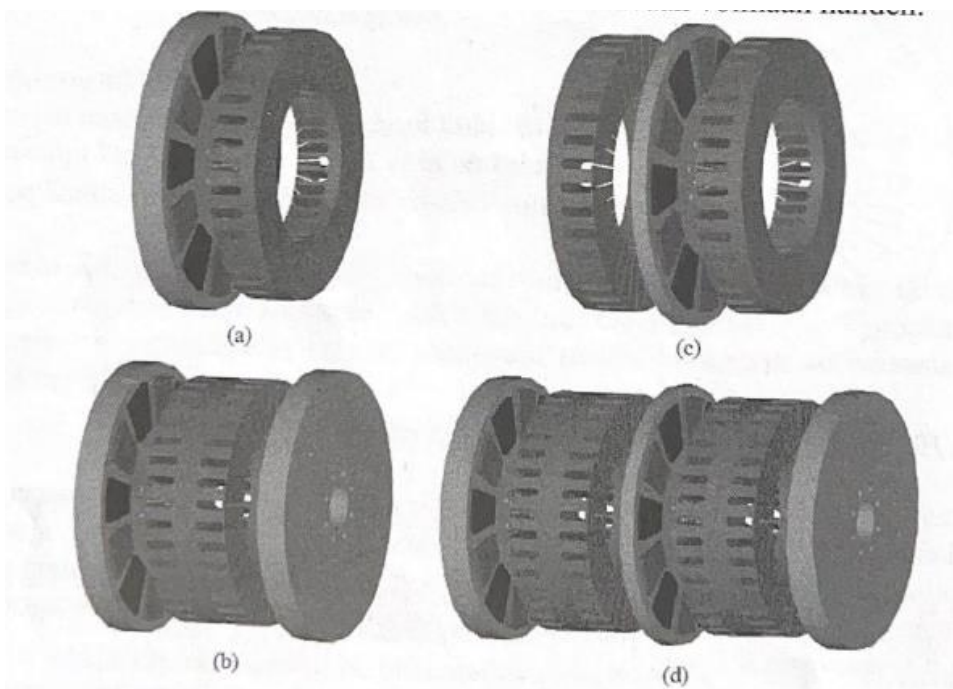
Kestomagneettitahtimoottori on tahtimoottori, jonka roottorin käännyksien tilalla on pysyvät kestopagneetit. Kestomagneettitahtimoottorin isoina etuina epätahtimoottoria vastaan on sen korkea hyötysuhde, koska kestopagneeteilla ei juurikaan häviöitä tapahdu ja vääntömomentti on korkea jo pienilläkin kierroksilla. [4; 5.] Vuosikymmenen aikana tapahtuneen kehityksen ansiosta kestopagneettitahtimoottoreita käytetään paljon sähköajoneuvoissa.

Kestomagneettitahtimootorit luokitellaan aksiaalivuo- ja radiaalivuumootto-reiksi siten, mistä suunnasta magneettivuo vaikuttaa suhteessa akselinjaan (kuva 4). Roottori voidaan valmistaa joko sen pintaan kiinnitetyillä magnee-teilla tai sen sisään upotettavilla magneeteilla. Moottorin ominaisuudet riippu-vat roottorin rakenteesta ja siitä, mihin kestmagneetit sijoitetaan. [5, s. 55.]



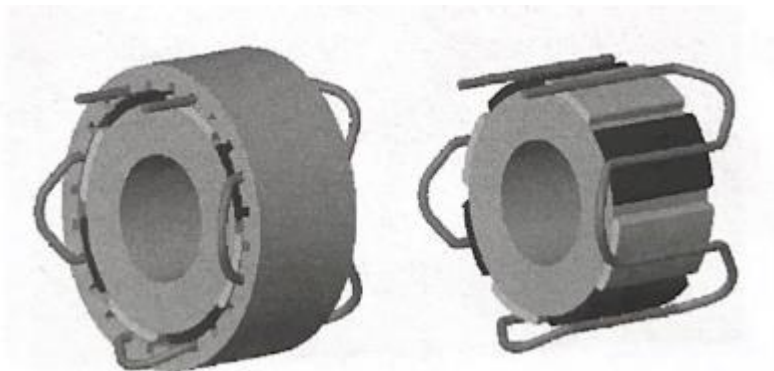
Kuva 4. Radiaalivuokone oikealla ja aksiaalivuokone vasemmalla [5, s.56].

Aksiaalivuumoottorin rakenne voidaan tehdä useista staattori-roottoriyhdistel-mistä (kuva 5). Kasvattamalla koneen pituutta voidaan lisätä modulaarisia komponentteja ja kasvattaa moottorin suorituskykyä. Epäsymmetrisen tapauk-sen – vain yksi staattori ja roottori – heikkoutena on suuri magneettinen aksia-alivoima, jonka takia akselille on järjestettävä riittävä aksiaalilaakerointi. Ra-kenteen ollessa symmetrinen ja ilmavälin tarpeeksi yhtenäinen, magneettiset aksiaalivoimat kumoavat toisensa. [5, s. 56.]



Kuva 5. Aksiaalivuokoneen erilaisia rakenteita [5, s.56].

Radiaalivuomoottori (kuva 6) on ns. perinteisempi kestmagneettitahtimoottorityyppi, jossa roottorin pintaan kiinnitetään kestmagneetit. Samoin kuin aksiaalivuomoottorissa pituutta lisäämällä moottorin suorituskykyä voidaan kasvattaa.



Kuva 6. 8-napainen radiaalivuokone, jossa on pinta-asennetut kestmagneetit [5, s.57].

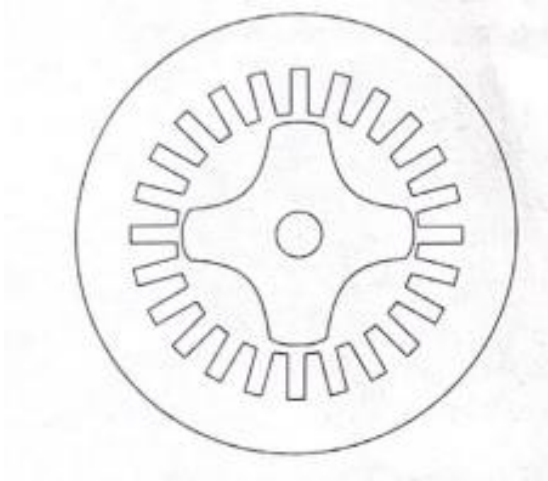
3.2.2 Vierasmagnetoitu tahtimoottori

Vierasmagnetoitua tahtimoottoria käytetään enimmäkseen korkeaa yli 1 MW mekaanista tehoa vaativissa teollisuuskohteissa. Näiden hyötysuhteet ovat erittäin suuria. [5, s.52.]

3.2.3 Synkronireluktanssimoottori

Synkronireluktanssimoottori ei rakenteeltaan eroa oikosulkumoottorista, ja se valmistetaankin pääosin samalla tekniikalla kuin oikosulkumoottorit. Sen roottorin magneettisen epäsymmetrian johdosta se eroaa oikosulkumoottorin roottorista huomattavasti.

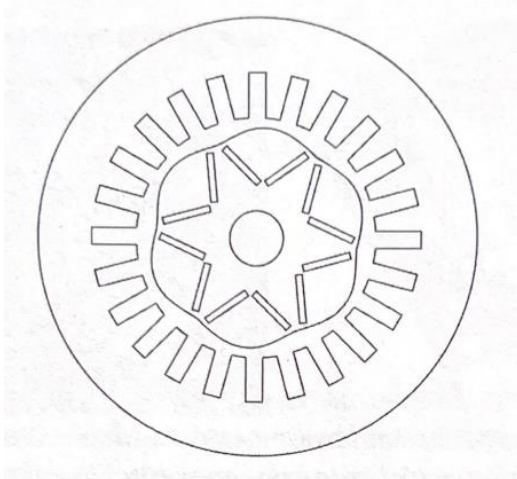
Synkronireluktanssimoottorin roottori on mekaaniselta rakenteeltaan oikosulkumoottorin roottorin kanssa lähes samanlainen, mutta siinä ei ole magnetointikämmityksiä tai kestmagneetteja ollenkaan, vaan se on periaatteessa rautainen sylinteri, jossa on ilmarakoja, jotka muodostavat sen magneettisen epäsymmetrisyyden (kuva 7). [5, s. 55.]



Kuva 7. Synkronireluktanssimoottorin poikkileikkaus [5, s.55].

Synkronireluktanssimoottorin toiminta perustuu vaihtosähkömoottoreille yleiseen tapaan pyörivään magneettikenttään, joka alkaa vetämään puoleensa roottorin parhaiten magneettikenttää johtavaa kohtaa puoleensa. Roottorin alkaessa seuraamaan magneettikenttää se alkaa pyörimään ja pyrkii asemaan, jossa roottorin kautta kulkeva magneettivuo kulkisi helpointa reittiä. Tästä johtuen moottori pyörii synkronisella eli tahtinopeudella ja yrittää pienentää magneettisen piirin reluktanssia. Synkronireluktanssimoottori saa tästä nimensä. (Kuva 8.) [6.]

Synkronireluktanssimoottorin ja kestopagneettitahtimoottorin yhdistelmällä saadaan nykyaikaan yleisesti sähkö- ja hybridiajoneuvoissa käytössä ollut moottori. Tämän tyyppisellä moottorilla saadaan suhteellisen laaja kentänheikkennysalue, mikä on normaalin tahtimoottorin heikkous. [5, s. 58.]

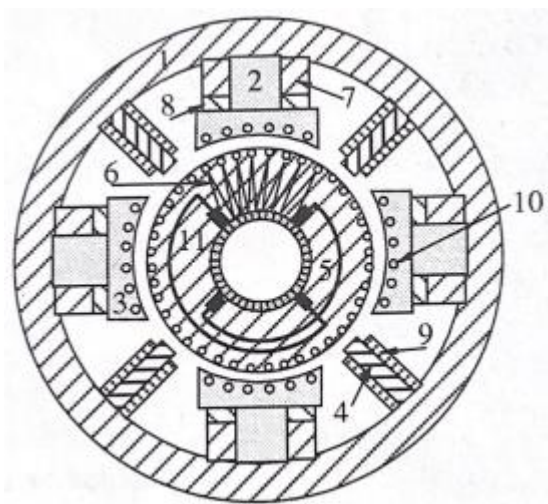


Kuva 8. Upotetuim magneetein varustetun kestopagneettitahtimoottorin poikkileikkaus [5, s.58].

3.3 Tasasähkömoottorit

Tasasähkömoottorit ovat tasavirralla toimivia sähkömoottoreita. Niiden huomattavina etuina on ohjauksen laajuus ja sen yksinkertaisuus. Ne voidaan jakaa harjallisiin ja harjattomiin tasasähkömoottoreihin riippuen niiden rakenteesta. Ne eroavat tahti- ja epätahtimoottoreiden rakenteesta paljon, sillä ne eivät vaadi pyörivää magneettikenttää toimiakseen. [4.]

Kuva 9 esittää tasasähkömoottorin rakenteen osia, joista ainakin osa on sähköisesti välttämättömiä tasasähkömoottoreille riippuen sen rakennetyylistä [2, s.267].



Kuva 9. Tasasähkömoottorin osat. 1. staattorin kehä, 2. päänavan sydän, 3. napakenkä, 4. käänönavan sydän, 5. roottorin eli ankkurin rautasydän, 6. roottori- eli ankkurikäänitys, 7. Sivuvirtakäänitys, 8. Sarjavirtakäänitys, 9. Käänönapa käänitys, 10. Kompensointikäänitys, 11. Kommutaattori harjoineen. [2, s.267]

Muiden sähkömoottorien tapaan tasasähkömoottorin rautaosat muodostavat magneettipiirin sen magneettikentälle. Sen magneettikentät ovat tasamagneettikenttiä, jonka takia kehän ja napojen rautaosat voidaan tehdä täysraudasta.

Tasasähkömoottorissa staattorin kehässä olevien päänapojen magnetointikäänitykset synnyttävät moottorin toiminnalle välttämättömän magneettikentän eli ns. pääkentän. Magnetointikäänitykset voidaan tehdä, joko sivuvirta- tai sarjavirtakäänityksenä. Roottori eli ankkuri on valmistettu sähkölevyistä,

sillä se joutuu pyörimään tasamagneettikentässä, jonka pyörimisliike aiheuttaa siinä vuon vaihtelua ja rautahäviöitä. Sen käämitys on tehty samaan tapaan kuparilangasta, kuten muissakin sähkömoottoreissa.

Roottori- eli ankkurikäämityksiin indusoituu vaihtosähkömotorinen jännite sen alkaessa pyörimään pääkentässä. Indusoitunut jännite on vaihtojännitettä, joten se on vaihtosuunnattava. Tämä voidaan hoitaa kommutoinnilla. Se voidaan tehdä kommutaattorilla liukuharjoineen, joka siten on mekaaninen vaihtosuuntaaja tai elektronisesti kommutoimalla.

Kääntönapakäämitys saa kommutaattorin harjoineen kommutoimaan ilman kipinöitä, joka auttaa harjoja ja kommutaattoria pysymään kunnossa. Se myös kompensoi ankkurin tuottaman ankkurivirran magneettikenttää eli ankkurikenttää. Lisäksi on kompensointikäämitys, joka kumoaa ankkurikenttää ainakin osittain. Kääntönapakäämitys ja kompensointikäämitys on kytkettävä ankkurikäämityksen kanssa sarjaan. [2, s.267–269; 4.]

3.3.1 Harjalliset tasasähkömoottorit

Harjalliset tasasähkömoottorit ovat vanhempi keksintö kuin harjattomat, mutta yhä käytössä useissa kohteissa niiden matalan hinnan ja yksinkertaisen rakenteensa vuoksi. Harjallisten tasasähkömoottorien isoimpana heikkoutena on sen mekaaninen vaihtosuuntaaja, jossa harjat kuluvat käytössä, joka vaikuttaa huoltokustannuksiin ja lyhentää moottorin käyttöikää. Ne voidaan jakaa neljään luokkaan riippuen magnetoimistavasta. Nämä ovat vierasmagnetoitu moottori, sivuvirta-, sarja- ja yhdysvirtamoottori. [4.]

Harjallisten tasasähkömoottorien pyörimisnopeus voidaan laskea yhtälöstä 4:

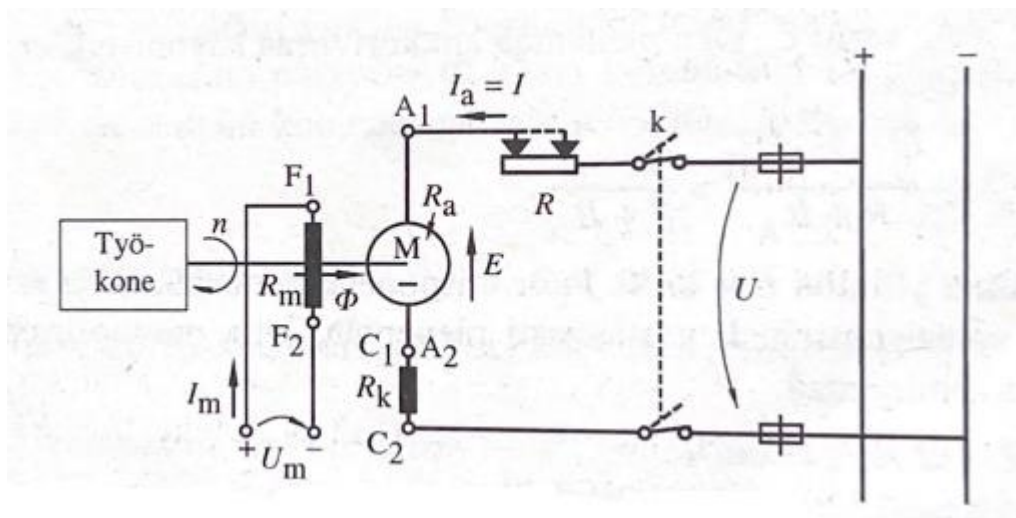
$$n = \frac{U - I_a(R + R_A)}{k\Phi} \quad (4)$$

jossa	n	pyörimisnopeus	[rpm]
	U	ankkurijännite	[V]
	I_a	ankkurivirta	[A]
	R	säätövastuksen resistanssi	[Ω]
	R_A	ankkuripiirin resistanssi	[Ω]

k	koneen rakennevakio kerroin	[-]
Φ	magneettivuo	[Vs]

Vierasmagnetoidun moottorin magnetoitivirta otetaan ulkoisesta tasajännitelähteestä, ja se ei ole sähköisesti yhteydessä ankkurivirtapiiriin kanssa (kuva 10). Ominaisuuksiltaan se muistuttaa oikosulkumoottoria monessa suhteessa.

Vierasmagnetoidun moottorin pyörimisnopeutta voidaan säädellä kolmella tavalla. Nämä ovat ankkuripiirin ankkurijännitettä säätämällä, magnetoimisvirtaa säätämällä ja vaihtamalla ankkuripiiriin käynnistysvastuksen tilalle säädettävä sarjavastus, jolloin voidaan säätää ankkuripiirin resistiivistä jännitettä. [2, s.291–294.]

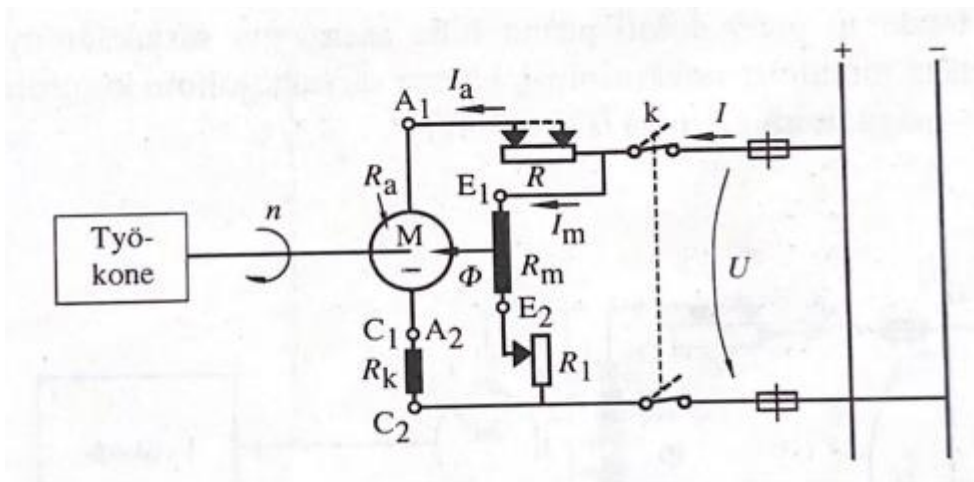


Kuva 10. Vierasmagnetoidun tasasähkömoottorin virtapiiriirros [2, s.291].

Sivuvirta- ja vierasmagnetoitu moottori eroaa toisistaan pelkästään siinä, mistä magnetoititeho otetaan. Sivuvirtamoottorin magnetoitivirta otetaan

ankkurivirran kanssa samasta jännitelähteestä eli liitinjännitteestä. Magnetoimikäämitys on kytketty ankkurikäämityksen kanssa rinnan. (Kuva 11.)

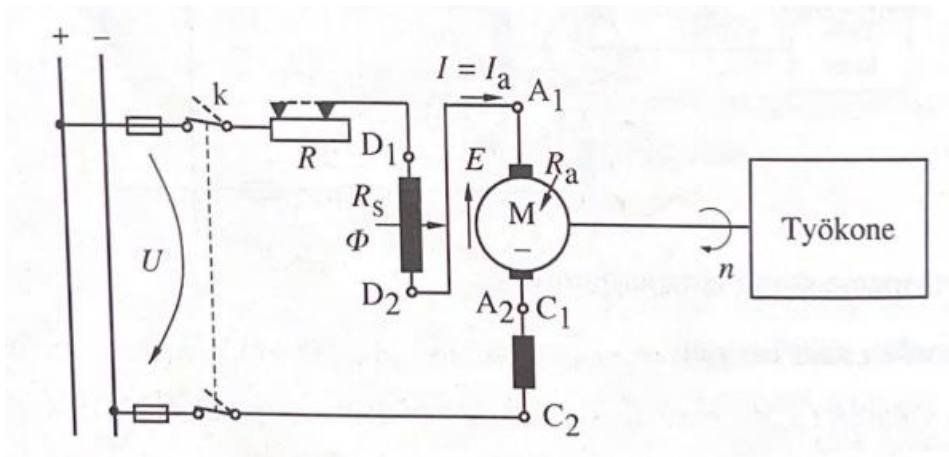
Pyörimisnopeuden säätöön kyseinen moottori sopii huonosti, sillä ankkurijännitteen säätö ei ole mahdollista. Sen pyörimisnopeutta voidaan kuitenkin säätää heikentämällä magneettikenttää magnetoimispiirin säätövastuksella ja säätämällä ankkuripiirin resistiivistä jännitehäviötä. [2, s. 294–296.]



Kuva 11. Tasasähkösisuvirtamoottorin virtapiiripiirros [2, s.295].

Sarjamoottorissa magnetointi tehdään päänapoihin asennetulla sarjakäämityksellä, joka kytketään moottorin ankkuripiirin kanssa nimensä mukaisesti sarjaan (kuva 12). Tällöin ankkurivirta toimii samalla magnetoimisvirtana.

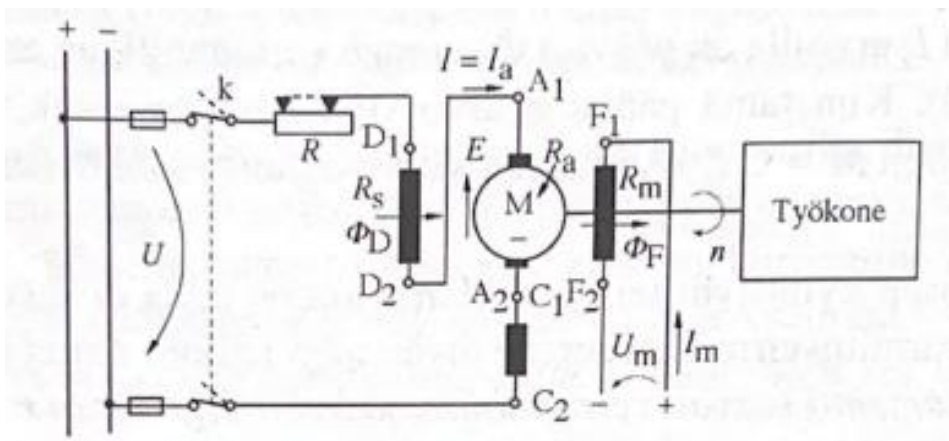
Sarjamoottorissa tyhjäkäynnillä – ankkurivirta ja magneettivuo ovat hyvin pieniä – tapahtuu nopea pyörimisnopeuden kasvu, jota moottorin pyörivät osat eivät kestä, joten sitä ei saa koskaan päästää tyhjäkäyntiin [2, s. 296–298]. Sarjamoottorin pyörimisnopeuden säätäminen on mahdollista ankkuripiiriin kytketyllä säätövastuksella. Haittana on kuitenkin tästä syntyvät ylimääräiset häviöt. Näitä moottoreita käytetään pääosin raskaissa liikennesovelluksissa. [4.]



Kuva 12. Tasasähkösarjamootorin virtapiiriirros [2, s.296].

Yhdysvirta- eli kompondimootori on sivuvirta- ja sarjamootorin yhdistelmä (kuva 13). Näissä siis magnetointikäänitys on jaettu rinnakkais- ja sarjakäänymiin. Käämeistä toinen toimii hallitsevana, joka määrittelee, onko sarja- vai sivuvirtamootorin ominaisuudet hallitsevampia. Yleisesti käytetään vain vierasmagnetoituja kompondimootoreita, joissa vahvistava sarjamagnetointikäänitys. [2, s.298–299.]

Kompondimootorin pyörimisnopeutta säädellään täysin samalla tavalla kuin vierasmagnetoidun moottorin [4].



Kuva 13. Tasasähkökompondimootorin virtapiiriirros [2, s.298].

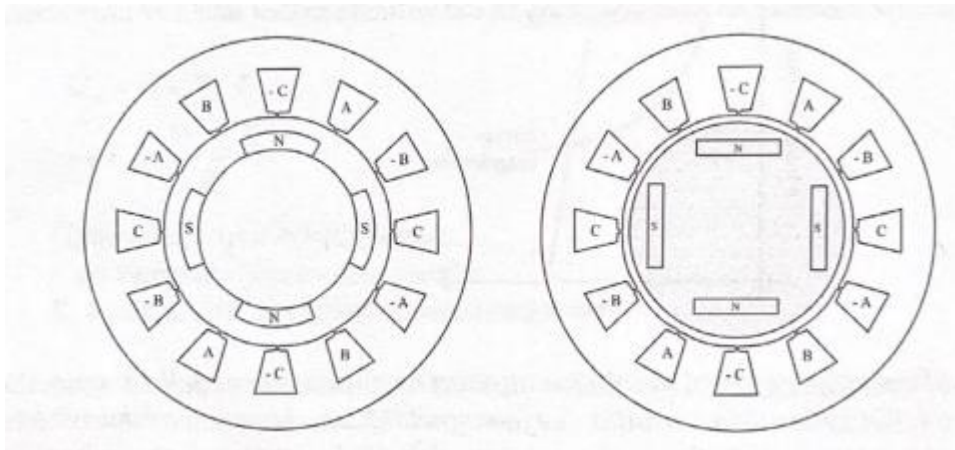
3.3.2 Harjattomat tasasähkömoottorit

Harjattomat tasasähkömoottorit (kuva 14) ovat nykyään yleisemmässä käytössä kuin harjalliset. Nämä eroavat harjallisista sen kommutoinnissa ja siinä, että harjattomissa työvirta syötetään staattoriin, kun harjallisissa se syötetään

roottorin ankkurikäännykseen. Harjattomassa ei ole mekaanista vaihtosuuntaajaa, vaan se tapahtuu elektronisesti. Harjattomat tasasähkömoottorit ovat rakenteeltaan lähes samanlaisia kuin kestopagneettitahtimoottorit. Se toimii käytännössä vaihtosähkömoottorina.

Näiden isoimpina hyötyinä on korkea hyötysuhde, pieni rakenne, ohjattavuuden helppous, huoltovapaus ja luotettavuus. Heikkouksia ovat sen korkea hinta, turvallisuus tyhjäkäynnissä ja oikosulkuilanteissa sekä korkeiden nopeuksien rajallinen kesto.

Kommutointi tapahtuu elektronisesti, jossa asentoanturit – useimmiten Hall-anturit – seuraavat roottorin asentoa ja näiden perusteella moottorinohjain syöttää virtaa moottorin käännyksiin vuorollaan ja luo magneettikentän, jolloin roottori saadaan pyörimään jatkuvasti. [4, s. 40–41.]



Kuva 14. Harjattoman tasasähkömoottorin poikkileikkauskuva. Vasemmalla pintakestopagneeteilla varustettu ja oikealla upotetuin kestopagneetein varustettu harjaton tasasähkömoottori [4, s.40].

4 SÄHKÖMOOTTORIN OHJAUSTAVAT

Suurin osa sähkömoottoreista toimii suoraan sähkön jakelujärjestelmästä tai jännitelähteen kautta ja ilman ohjainta ne voi olla yksi- tai kaksinopeuksisia. Sähkömoottorin tarkempaan ohjaukseen ja säätöön se kuitenkin vaatii erillisen moottorihjaimen. Moottorihjaimen avulla sähkömoottoria voidaan pyörittää molempiin suuntiin.

Ajoneuvokäytöissä ihminen toimii osana ohjausjärjestelmää kaasun säätelyn kautta. Tällöin pyörimisnopeudelle eivät ole tarkkuus- ja dynamiikkavaatimukset niin vaativia. [9.]

4.1 Vaihtosähkömoottorien ohjaus

Vaihtosähkömoottoreille ohjaus tapahtuu invertterillä, ja ohjaustapoja on erilaisia, kuten skalaariohjaus ja -säätö, vektorisäätö sekä suora vääntömomentin säätö [8].

Skalaariohjausta ja -säättöä käytetään silloin, kun säädöiltä ei vaadita suurta tarkkuutta. Vektorisäättöä käytetään nykyaikaisissa vaihtosähkömoottoreissa useimmiten ohjaustapana. Suora vääntömomentin säätö on eräs ohjaustapa vektorisäädölle.

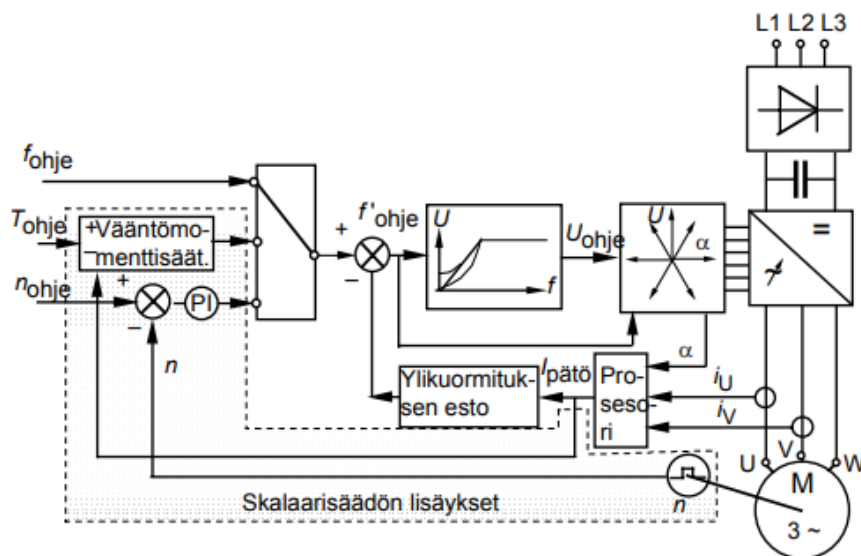
4.1.1 Skalaariohjaus ja -säätö

Skalaariohjauksessa moottorin pyörimisnopeus määräytyy muuttamalla invertterin lähtötaajuutta. Taajuutta kasvattamalla jännite kasvaa samassa suhteessa, kunnes moottorin nimellisjännite on saavutettu. Tätä kohtaa kutsutaan kentänheikennyspisteeksi, ja sen yli mentäessä jännite pidetään vakiona ja nousee kentänheikennysalueelle. Kentänheikennysalueella taajuutta kasvattamalla magneettivuo pienenee kääntäen verrannollisesti taajuuteen, joka johtaa myös vääntömomentin pienenemiseen.

Skalaariohjaus on yksinkertaisin moottorin ohjaustapa. Siinä vaihevirratt mitataan moottorista ja lasketaan pätövirtakomponentit. Moottorin vääntömomentti saadaan laskettua tästä, sillä se on suoraan verrannollinen moottorin pätövirtakomponenttiin. Siinä pyörimisnopeuden mittaaminen ei ole mahdollista.

Skalaariohjauksesta poiketen skalaarisäädössä on moottorin pyörimisnopeuden mittaaminen mahdollista takometrin avulla. Skalaarisäädöllä voidaan säätää pyörimisnopeutta tai vääntömomenttia tai molempia vuorotellen. Pyörimisnopeus on jättämän verran tahtinopeutta pienempi. Skalaarisäädössä on mahdollista seuraavat lisätoiminnot: jumisuoja, vauhtikäynnistys, verkkokatkosäätö, momenttisäätö, nopeusmittaus ja nopeussäätö takometrin avulla sekä tasavirtajarrutus. [8; 9.]

Kuvassa 15 on skalaariohjauksen ja -säädön lohkokkaavio, josta näkee tarvittavat lisäykset skalaarisäädölle.

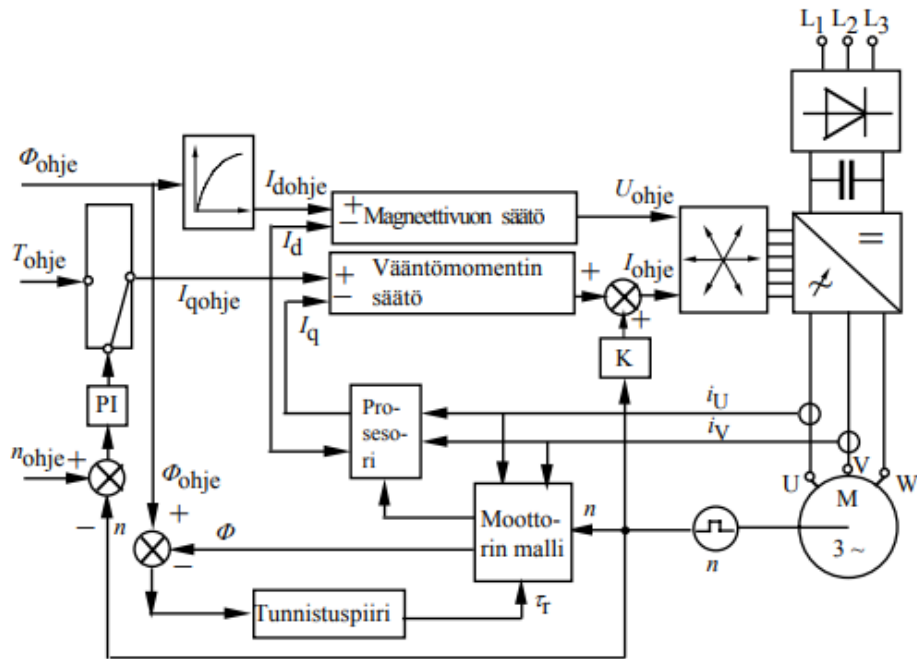


Kuva 15. Skalaariohjauksen ja -säädön lohkokkaavio [8].

4.1.2 Vektorisäätö

Vektorisäätö on skalaariohjausta ja -säätöä kehittyneempi ohjaustapa. Se käy hyvin sovelluksiin, jotka vaativat hyvää dynamiikkaa ja tarkkaa nopeudensäätöä. Se pystyy tarkkaan ohjaukseen muutostilanteissakin. Sen avulla saadaan lähes tasasähkömoottorin ohjausta vastaavat säätöominaisuudet. (Kuva 16.)

Vektorisäädössä on erikseen magneettivuon ja vääntömomentin säätö. Vektorisäätö vaatii toimiakseen takaisinkytkentää moottorilta. Takaisinkytkennän avulla saadaan moottorin pyörimisnopeus ja staattorin virtatiedot. Nämä tiedot vaaditaan vektorisäädön toimintaan. Mittaustiedot syötetään moottorin matemaattiseen malliin, joka sijaitsee vaihtosuuntaajassa mikroprosessorin muistissa. Moottorin matemaattinen malli eli moottorimalli laskee moottorin magneettivuon ja jakaa virran magneettivuota ja vääntömomenttia kuvaaviin virran osiin. Tämän ansiosta magneettivuon ja vääntömomentin säätö onnistuu erikseen. [8; 9.]



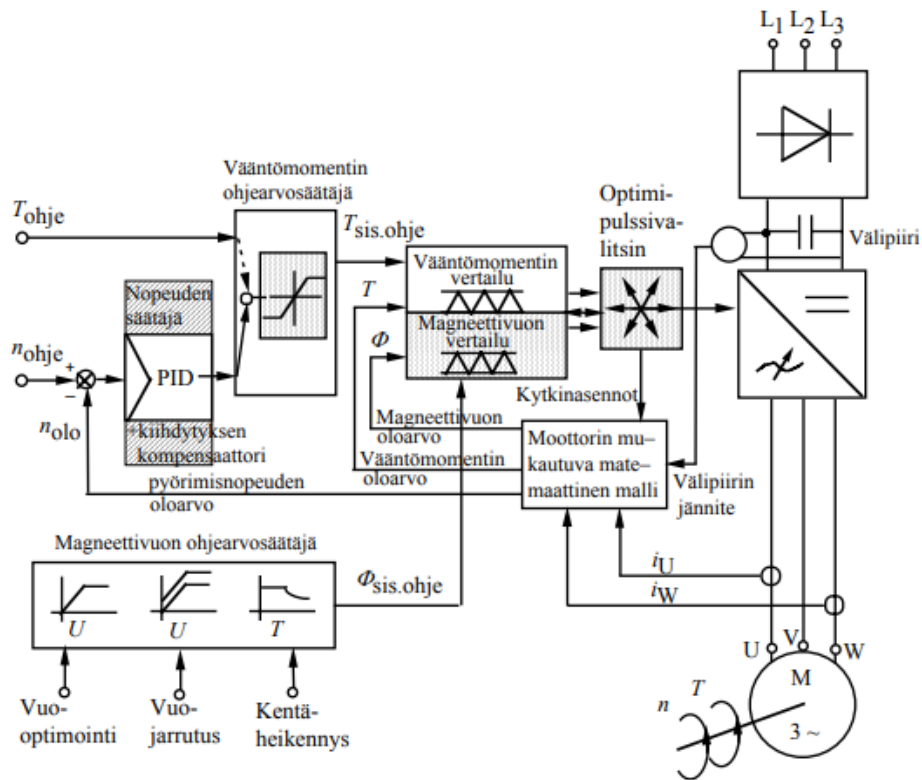
Kuva 16. Vektorisäädön lohkokaavio [8].

4.1.3 Suora vääntömomenttisäätö

Suora vääntömomenttisäätö on vektorisäätötapa, jossa moottoria ohjataan kuin vierasmagnetoitua tahtikonetta. Suoralle vääntömomentin säädölle on useampia variaatioita. (Kuva 17.)

Siinä ohjataan suoraan moottorin perussuureita pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia. Tällöin ei tarvita erikseen modulaattoria. Ohjauksessa moottorin matemaattinen malli on mukautuva, johon moottorin mitattu virta ja invertterin tasajännitevälipiirin jännite syötetään. Mikroprosessori laskee magneettivuon ja vääntömomentin oloarvot, ja vertailupiirit vertailevat oloarvoja annettuihin ohjearvoihin, jonka perusteella säädöt tapahtuvat.

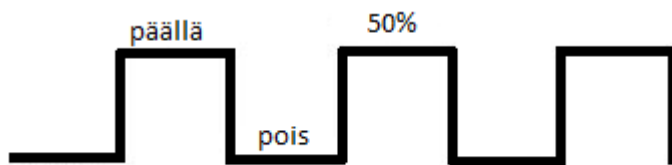
Suora vääntömomentin säädin ei kiinnitä huomiota jännitteen muotoon. Muustilanteissa syöttävä jännite ei ole sinimuotoista, mutta pyörimisnopeuden ollessa vakio syöttöjännite muuntautuu sinimuotoiseksi. [9.]



Kuva 17. Suoran vääntömomenttisäädön lohkokaavio [8].

4.2 Tasasähkömoottorien ohjaus

Tasasähkömoottoreiden ohjaus tapahtuu pääosin pulssinleveysmodulaatiolla eli PWM-ohjauksella. PWM-ohjauksessa moottorille menevää virtaa rajoitetaan muuttamalla pulssisuhdetta. Virtaa rajoitetaan moottorille katkomalla ja uudelleen kytkemällä sitä hyvin nopeaan tahtiin. Pulssisuhde esitetään prosentteina siten, kuinka kauan virta on päälle kytkettynä verrattaen pois päältä (kuva 18). Mitä korkeampi pulssisuhde, sitä korkeampi virransyöttö. [8; 9.]



Kuva 18. Pulssisuhteen kuvaaja 50 % pulssisuhteella.

Tasasähkömoottorin ohjaimessa voi olla kaksi kytkevää komponenttia eli puolisilta, jolloin moottoria voidaan pyörittää ja vähän jarruttamaan yhteen suuntaan. Jos moottorihjaimessa on neljä kytkevää komponenttia eli H-silta, sitä voidaan pyörittää ja jarruttaa molempiin suuntiin hyvin. [9.]

4.3 Jarrutusenergian talteenotto

Jarrutusenergian talteenotto eli regenerointi on hyvä tapa saada sähköajoneuville lisäkilometrejä. Suurin osa sähkömoottoreista toimii myös generaattorina, jolloin ne voivat moottoria jarruttaessa generoida energiaa, jolla voidaan ladata akkua. Tätä kutsutaan regeneratiiviseksi jarrutukseksi. Moottoriohjaimella voidaan säädellä regeneroivan jarrutuksen voimakkuutta.

4.3.1 Vaihtosähkömoottorin regenerointi

Vaihtosähkömoottoreilla jarrutusenergian talteenotto tapahtuu muuttamalla inverterin vääntömomentin suuntaa moottorin pyöriessä vastakkaiseen suuntaan. Tällöin moottori alkaa toimia generaattorina ja syöttää kolmivaiheista sähköenergiaa moottoriohjaimeen, joka muuttaa sen tasajännitteeksi akulle. [8.]

4.3.2 Tasasähkömoottorin regenerointi

Tasasähkömoottoreissa jarrutusenergian talteenotto on mahdollista riippuen moottorin tyypistä. Kestomagneettitasasähkömoottoreissa regenerointi on yksinkertainen, koska ankkurikäänitys on kestopagneetein toteutettu. Kenttäkäänityssä tasasähkömoottorissa se on hankalaa, sillä jarrutusvirta vaikuttaa moottorin magnetointiin. [8.]

5 SÄHKÖMOOTTORIPYÖRÄMUUNNOS

Sähkömoottoripyörämuunnos on polttomoottorisen moottoripyörän muuntaminen täyssähköiseksi. Se koostuu rungon valinnasta, akustosta, akunhallintajärjestelmästä, moottorista ja moottoriohjaimesta sekä moottoripyörän sähköistyksestä. Tieliikennekäyttöön rekisteröimistä varten on varmistettava, että kaikki direktiivit täyttyvät ja muutettavissa osissa on tarpeelliset hyväksynnät. Muunnokseen sopivaa moottoripyörää valittaessa täytyy ottaa huomioon rungon muokattavuus, sen muoto ja maksimipaino. Vuosimallilla on myös väliä, sillä vaatimuksia on enemmän mitä uudempi runko tulee valituksi. EMC-suojauksien hyväksyttäminen on vaadittua 2003 vuodesta valmistetuista moottoripyöristä eteenpäin.

Muunnokseen on tärkeää valita oikeanlaiset ja yhteensopivat komponentit. Vetotavan muuttaminen on mahdollista, mutta se voi vaatia takahaarukan uudelleen tekemistä, jollei valitse moottoriksi takavanteessa integroituna olevaa hub-moottoria.

5.1 Suunnittelu

Suunnittelu alkoi 2019 vuoden lopulla, jolloin opinnäytetyötä ohjaava lehtori piti sähkömoottoripyörämuunnosta varten esisuunnittelukilpailun. Esisuunnittelun tarkoituksena oli valita muunnosprojektille osat ja runko, joilla se tultaisiin rakentamaan. Tällä saadaan myös hyvä periaate minkälainen budjetti ja lopputuote tulisi olemaan. Aikomuksenamme olisi rakentaa näyttävä ja tieliikennekäyttöön soveltuva sähkömoottoripyörä, jolla olisi kantama ainakin 150 kilometriä maantiellä.

Tavoitteena oli uudelleen käyttää osia muunnossähköautoprojektista, joka oli rakennettu Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Mikkelin kampuksella vuosia aikaisemmin. Tämä tultaisiin purkamaan meidän projektiamme varten, sillä siitä oli akusto hajonnut. Tästä aioimme ottaa käyttöön johdotuksia, moottorihjain, Type 1 -latauspistoke ja -kaapeli sekä DC/DC-muunnin. Purettu moottorihjain todettiin vialliseksi projektin alussa, joten hankimme tilalle uuden samanlaisen.

Sähkömoottoripyörämuunnoksen tärkein osa on moottoripyörän valitseminen projektiin. Sen tuli olla rungoltaan helposti muokattavissa, mielellään kehtomallinen, vuosimalliltaan 90-luvulta ja semmoinen, josta saa rakennettua hyvännäköisen. Valitsimme rungoksi Suzuki GSF 600 Banditin. Tästä yhdellä meistä oli jo aikaisempaa kokemusta rakentamisesta. Kyseisen moottoripyörän runko oli juuri ihanteellinen tämän tyyppiseen projektiin.

Moottorihjaimeksi valitsimme muunnossähköautossa olleen Curtis 1238-7621:n kanssa samanlaisen Curtis 1238E-7622 -ohjaimen. Tämä määritteli pitkälti muita valitsemiamme komponentteja muunnosprojektiin. Curtisin moottorihjaimet ovat olleet suosittuja erilaisissa sähköajoneuvoprojekteissa niiden laajan ohjelmoitavuuden ja luotettavuuden ansiosta.

Moottoriksi valitsimme HPEVS AC-20 -oikosulkumoottorin, joka on tehty ohjattavaksi Curtisin moottoriohjaimella. Kyseistä moottoria on käytetty erilaisissa sähkömoottoripyörissä, ja se on kooltaan sekä tehoiltaan erittäin sopiva moottoripyöräsovellukseen. Ideoimme myös harjattoman tasasähkömoottorin käyttöä, mutta näistä ei löytynyt sopivan tehoista moottoria.

Akusto rakennetaan 18650-lithium-ion-akuista. Akun tyyppi on Samsung INR18650-30Q. Yksi akku on nimellisjännitteeltään 3.6 V, sen kapasiteetti on 3000 mAh, se kykenee 15 A jatkuvaan purkuvirtaan – maksimissaan 30 A hetkellisesti – ja 4 A latausvirtaan. Halusimme akulta mahdollisimman korkeaa kapasiteettia ja purkuvirtaa, jotta se riittäisi moottorille ja saisimme mahdollisimman korkean akkukapasiteetin rakennettua rajattuun tilaan.

Akunhallintajärjestelmäksi valikoitui Orion BMS 2. Tämäkin on suosittu malli sähköajoneuvojen akuston hallinnassa. Akunhallintajärjestelmän tarkoitus on vahtia jännitteitä ja virtoja jokaista sarjassa olevaa akkua kohden. Se pitää huolen, ettei akku pääse purkautumaan liian tyhjäksi, lataamaan liian täyteen tai purkamaan akkua liian suurella virralla.

Laturiksi valittiin Elcon TC HK-J 3.3 kW laturi. Halusimme, että moottoripyörää voidaan ladata suoraan 230 V sukopistorasiasta, jonka 16 A sulake kestää.

Moottoripyörään tehdään sähköistys kokonaan uudestaan, ja teemme kaiken valaistuksesta lähtien ohjelmoitavaksi. Akuston korkean jännitteen vuoksi DC/DC-muunnin tarvitaan laskemaan akuston jännite 12 V mikroprosessorille ja moottoripyörän sähköille. Mittaristo korvataan kosketusnäytöllä, joka toimii ajomittariston lisäksi ajotietokoneena. Valojen, vilkkujen ja äänimerkin ohjelmoinnissa käytämme Arduino-mikroprosessoria. Näyttöä ohjaa Raspberry Pi 3 model B -mikroprosessori.

Kaikki komponentit ja mikroprosessorit tulevat keskustelemaan keskenään CAN-väylän välityksellä.

Ennen moottoripyörän rakentamista kaikkien osien toiminta varmistettiin testipöydässä. Kaikki projektissa käytettävät pultit ja mutterit ovat rosteria, jotta korroosiolta vältyttäisiin.

5.2 Rakentaminen

Suunnitteluvaiheen valmistuttua haimme moottorivikaisen Suzuki GSF 600 Banditin vuosimalliltaan 1996. Moottoripyörä purettiin rungolle ja pestiin huolellisesti (kuva 19).



Kuva 19. Suzuki GSF 600 Bandit -1996 purettuna rungolle

5.2.1 Moottori

HPEVS AC-20 on kolmivaiheinen nelinapainen oikosulkumoottori, joka operoi 72–130 V jännitevälillä. Sen huipputeho 96 V nimellisjännitteellä on 49 kW, jonka se saavuttaa moottorin 650 A maksimivirralla ja 5100 rpm:n kierrosluvulla. Moottori kiertää maksimissaan 8000 rpm, sen maksimivääntö on 111 nm ja se kestää maksimissaan 180 asteen lämpötilan. Liitteestä 1 nähdään moottorin tehokäyrä. Moottori kykenee jarrutusenergian talteenottoon, jonka voimakkuus säädetään moottorihjaimella.

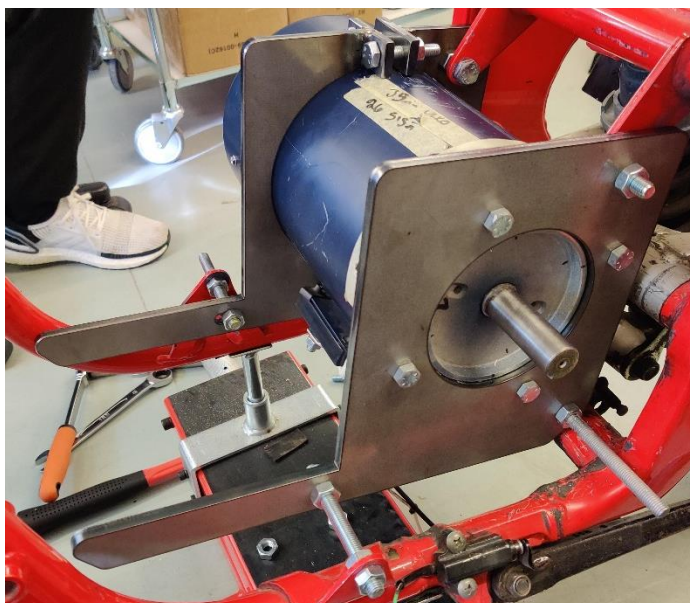
Moottori on pituudeltaan 311 mm, halkaisijaltaan 165 mm ja se painaa 27.2 kg. Sen tuuletus tapahtuu sisäisellä tuulettimella. Eli kun moottoria pyöritetään niin tuuletinsiipi tuo ilmaa moottorin jäähdytinsiiliin ja kulkee moottorin läpi toiselle puolelle. (Kuva 20.)



Kuva 20. HPEVS AC-20 oikosulkumoottori

Moottori soviteltiin runkoon siten, että vetoakseli tulee samaan kohtaan kuin missä polttomoottorin ratas sijaitsi. Vetotavaksi päätimme ottaa ketjuvedon. Vaikka paras vetotapa olisikin ollut hihnaveto, totesimme ketjuvedon olevan tarpeeksi kestävä tähän projektiin. Hihnavedon toteuttaminen olisi vaatinut takahaarukan tekemistä uudelleen.

Halusimme kiinnittää moottorin rungossa jo oleviin moottorikiinnikepaikkoihin molemmin puolin, jotta moottori olisi mahdollisimman hyvin tuettu. Moottorikiinnikkeet suunniteltiin Autodesk Fusion 360 -sovelluksella, ja teräksiset kiinnikkeet tilattiin laserleikattuina (kuva 21). Moottorin ja kiinnikkeiden väliin tehtiin tiivisteet estämään tärinää.



Kuva 21. Valmiit moottorikiinnikkeet sovitettuina paikalleen

Kun etu- ja takarattaan välinen ketjulinja oli saatu katsotuksi suoraan vatupassin ja laserin kanssa, niin kiinnikkeiden väleistä otettiin tarkat mitat. Näiden mittojen avulla moottorikiinnikkeiden väliin tehtiin rautaputkesta sorvaamalla välikappaleet, jolloin kiinnikkeet olisivat tuettuina toisiinsa ja runkoon. Tämä moottorikiinnikkeiden välinen tuenta vaadittiin myös katsastukseen.

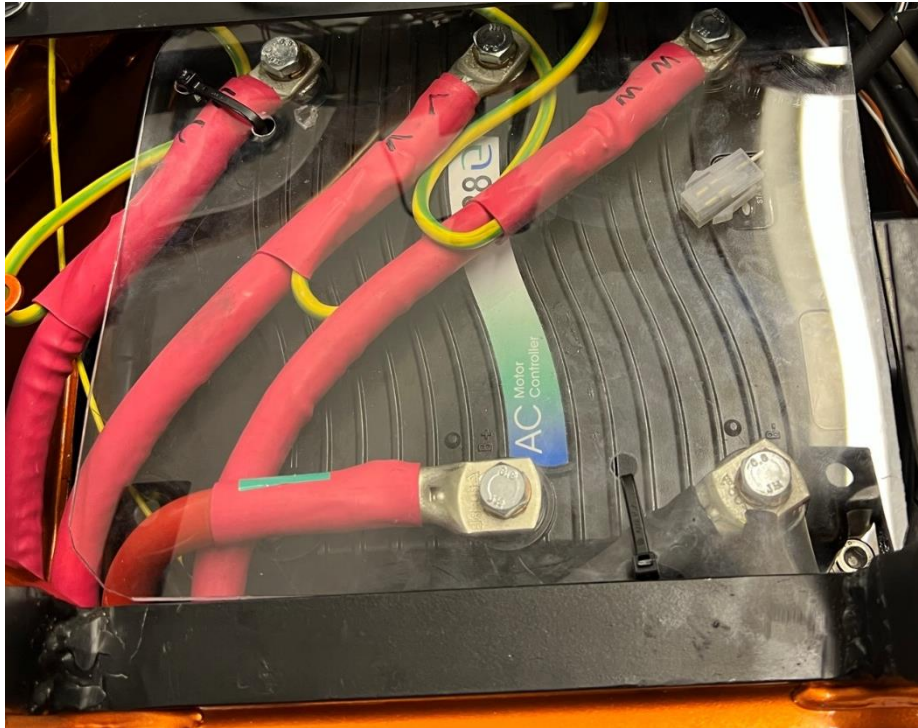
Moottori suojataan joka suunnasta mahdollisilta vesiroiskeilta ja pölyltä. Takahäkkiin ja pohjaan kiinnitetään metallilevyt. Moottorikiinnikkeiden päälle tuleva akkukotelo suojaa moottoria edestä ja päältä. Moottorikiinnikkeiden tiivisteet suojaavat moottoria sivuista. Eturattaan päälle valmistettiin lisäsuoja.

Vaihteistoa moottoripyörään ei tule, eli se on käytännössä yksivaiheinen. Vetosuhdetta muuttelemalla moottorin ominaisuuksia pystyy muuttamaan ohjelmoinnin lisäksi. Vetosuhteeksi tavoittelimme 1:5. Tällä suhteella saisimme hyvän huippunopeuden ja kiihtyvyyden sekä maltillisen sähkönkulutuksen. Ratkaisiksi valikoitui 15-piikkinen eteen ja 66-piikkinen taakse, joilla saimme vetosuhteeksi 1:4.4. Ketjut ovat erikoisvahvistetut 530 hammasjaolla olevat niittilukkuketjut.

5.2.2 Moottoriohjain

Curtis 1238E-7622 -moottoriohjain (kuva 22) on tarkoitettu oikosulkumoottoreille. Tätä voidaan käyttää kaikilla oikosulkumoottorityypeillä, mutta meidän tilaamamme ohjaimeen on asennettuna HPEVS-moottoreille tarkoitettu ohjelmisto. HPEVS-moottoreita ja Curtis-moottoriohjaimia myydään normaalisti pakettiratkaisuna.

Moottoriohjain operoi moottorin tavoin 72–130 V jännitevälillä ja syöttää maksimissaan 650 A virtaa. Se muuntaa akustolta tulevan tasajännitteen kolmivaiheiseksi vaihtojännitteeksi moottorille. Siinä on 35-pinninen AMP-liitin, jossa on esimerkiksi useita ohjelmitavissa olevia I/O pinnejä. Moottoriohjain on leveydeltään 232 mm, pituudeltaan 275 mm, korkeudeltaan 85 mm ja painoltaan 5.45 kg. Vaikka kyseinen moottoriohjain on kokonsa puolesta isompaa luokkaa, se silti sopi hyvin asennettavaksi moottoripyöräämme.



Kuva 22. Curtis 1238E-7622 moottorihjain kytkettynä ja suojattuna akkukotelon päällä ennen kytkentäkotelon ja laturin asentamista

Curtisin ohjaimet toimivat moottorinohjauksen lisäksi ohjelmoitavana logiikkana, ja sille on kehitetty Curtisin oma VCL (Vehicle Control Language) -ohjelmointikieli. VCL on täysin ohjelmoitavissa oleva alusta, mutta meidän käyttötarkoitukseemme ohjaimessa olevasta HPEVS-ohjelmistosta kaikki tarvittavat parametrisäädöt jo löytyvät. Se pystyy esimerkiksi ohjaamaan tietyn regeneroivan jarrutuksen voimakkuuden sytyttämään jarruvalon.

Ohjain käyttää hyödyksi kahden mikroprosessorin logiikkaa saavuttaakseen parhaan mahdollisen suorituskyvyn ja toiminnallisen turvallisuustason. Ensimmäinen mikroprosessori toimii pääpiirinä, jossa moottorinohjaus tapahtuu sekä se samanaikaisesti pyörittää VCL-ohjelmaa. Moottorinohjaustapana on vektorisäätö. Toinen toimii monitorointi mikroprosessorina kaikille toiminnoille ja keskustelelee pääpiirin kanssa.

Moottorihjaimen logiikalla on galvaanisesti erotettu maadoitus, joten se vaatii myös CAN-väylälle oman optoerottimen. CAN-väyläohjaus toimii valitsemamme akunhallintajärjestelmän ja moottorihjaimen välillä moitteettomasti, sillä näissä on integroituina tarvittavat viestit kommunikointiin toistensa

kanssa. Akunhallintajärjestelmä pystyy suoraan rajoittamaan moottoriohjaimen syöttämiä virtoja ja voi käskää moottoriohjaimen katkaisemaan pääkontaktorin syötön esimerkiksi latauksen ajaksi. [9.]

Moottoriohjain sijoitettiin mahdollisimman lähelle moottoria, jotta kaapelien pituus jäisi lyhyeksi. Se kiinnitettiin akkukotelon päälle, joka samalla toimii jäähdytinsiilenä, koska ohjaimen pohja on hyvin lämpöä johtavaa metallia. Ohjain saa ilmavirtaa myös ajaessa, jotta lämpenemisen kanssa ei tulisi ongelmia. Jäähdytys toimii siis passiivisena eikä vaadi erillistä vesijäähdytintä.

Moottorille tulee ohjaimelta kolmivaihesyötön lisäksi kuuden johtimen kaapeli, joista neljä on moottorin enkooderille ja kaksi lämpötilan mittaukselle. Enkooderi on moottorin nopeusanturi, joka toimii hyvin tarkkana moottorin paikanmäärittäjänä.

Ohjain toimii itsessään päävirran käynnistimenä PWM-ohjatun pääkontaktorin avulla. Kun KSI (Key Switch Input) havaitsee akustolta tulevan jännitetiedon, tekee logiikka vikakoodien tarkistuksen ja varmistaa, että pääkontaktorin voi kytkeä päälle. Tämä syöttö toimii samalla kaikille moottoriohjaimen pienitehoisille ohjauspiireille käyttöjännitteenä.

Jotta moottoripyörä olisi turvallinen käyttää, otimme käyttöön ohjaimessa olevan lukituskytkimen, jota kutsun jatkossa interlock-nimellä Curtisin tapaan. Periaate interlockilla on, että kun interlockin pin havaitsee jännitetiedon, saa ohjain luvan kytkeä taajuusmuuttajan ja moottorinohjauksen päälle eli käytännössä saa luvan ajaa. Interlock tulee kytkeä silmukkaan kaikkien käytettävien kytkimien läpi. Meillä näiksi tuli jalkatuen kytkin, tankoon asennettu erillinen kytkin ja kaasukahva.

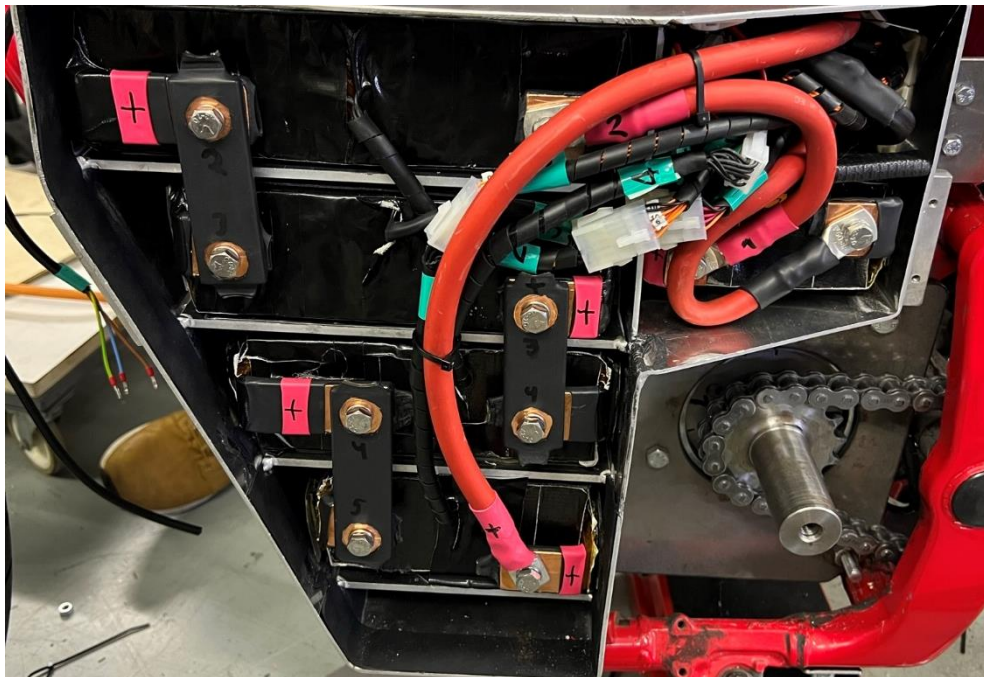
Kaasukahva on suoraan kytkettynä moottoriohjaimeen, jossa on potentiometri havaitsemassa kaasukahvan asentoa. Ohjaimessa on viisi eri tyyppiä kaasukahvalle, joista otimme tyyppi 2:n käyttöön. Tällä saamme 5 V jännitteen potentiometrille ohjaimelta ja täyden vikasuojauksen. Kaasukahvalle tulee viisi-johtiminen kaapeli, josta kolme on potentiometrille ja kaksi interlockille.

Moottoriohjaimella on erilliset pinnit eteen- ja taaksepäin pyörimiselle. Moottoria olisi ollut mahdollista pyörittää molempiin suuntiin kytkimen avulla, mutta kun kyseessä on moottoripyörä, otimme vain yhteen suuntaan pyörimisen käyttöön. Tämä toteutettiin siten, että eteenpäin-kytkin (Forward switch) kytkettiin suoraan KSI-syöttöön.

5.2.3 Akusto, akunhallintajärjestelmä ja laturi

Moottori ja moottoriohjain määritteli jännitetason ja purkuvirran, johon akuston täytyy pystyä. Akusto rakennettiin itse suunnittelemaamme alumiiniseen akkukoteloon. Akut kiinnitettiin toisiinsa nikkeliiliuskoilla, jotka pistehitsattiin kiinni akkuihin. Yhden akkukennoston reunoja pitkin kulkee kupariset pääkiskot, joilla kennostot kiinnitetään toisiinsa. Akkukennostoja tuli yhteensä viisi, jotka muodostuivat 29 sarjaan kytketystä ja 28 rinnan kytketystä akusta. Akkuja tuli kokonaisuudessaan akustoon 812 kappaletta. (Kuva 23.)

Akuston nimellisjännitteeksi saimme 104.4 V (jännitteen vaihteluväli 87–121.8 V), kapasiteetiksi 10 kWh ja jatkuvaksi purkuvirraksi 420 A (maksimi hetkellinen purkuvirta 850 A). Näillä arvoilla tavoittelemamme 150 kilometrin kantama olisi mahdollista toteuttaa.



Kuva 23. Valmis akusto akkukoteloon asennettuna ja kaapeloituna koeajoa varten

Akunhallintajärjestelmä ajateltiin alun perin rakentaa itse. Tästä saimme tehtyä toimivia prototyyppeilyjä, mutta 2020 vuoden alussa tulleen koronaviruksen takia koululle pääsy estyi täysin. Tämän vuoksi päädyimme hankkimaan valmiin akunhallintajärjestelmän, joksi valikoitui aiemmin mainittu Orion BMS 2. Tämä oli kooltaan ja ohjelmoitavuudeltaan erittäin hyvä käyttötarkoitukseemme sekä siinä oli valmiina ominaisuutena Curtisin moottoriohjaimen ja Elconin laturin integraatio CAN-väyläohjaukseen. Akunhallintajärjestelmä sijoitettiin uudelleen tekemämme takahäkin sisään penkin alle (kuva 24).



Kuva 24. Orion BMS 2 kytkettynä ja kiinnitettynä takahäkin sisään

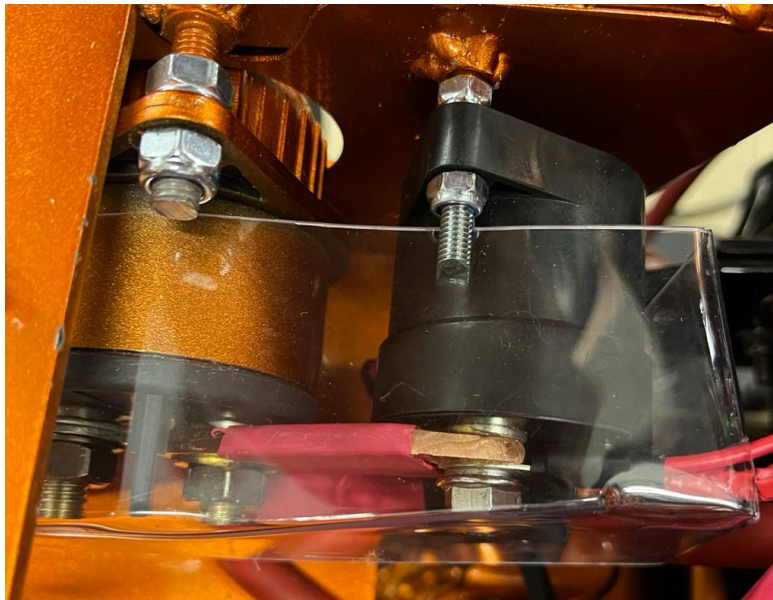
Elcon TC HK-J 3.3 kW on vaihtojännitteellä toimiva CAN-väyläohjattu laturi. Laturi on tarkoitettu li-ion akkujen lataukseen ja se lataa akuston tyhjästä täyteen noin neljässä tunnissa. Laturissa on Orion BMS 2 CAN-väyläohjauksen integraatio. Latauspistoke kiinnitettiin oikealle eteen lähelle keulaa 3D tulostetun muovikannen alle.

5.2.4 Sähköistys

Moottoripyörän alkuperäiset sähköt purettiin kokonaan pois. Tankin pohja poistettiin, jotta sinne saisi laturin ja kytkentäkotelon. Sähköistys aloitettiin sijoitettuumme komponentit paikoilleen. Tärkeimpinä kaapelivetoina pidimme voimakaapeleita, joiden pituus tulisi olla mahdollisimman pieni jännitehäviöiden minimoimiseksi. Sähkö- ja datakaapelit erotettiin toisistaan elektromag-

neettisten häiriöiden poistamiseksi, ja kaikki tämän vaativat kaapelit ovat häiriösuojattuja. Monisäikeisille kaapeleille käytimme vesitiiviitä Deutsch DT -liittimiä. Sijainnin salliessa käytimme kaapeleissa myös Molex-liittimiä. Moottorille menevä vaihtosähkösyöttö on EMC-suojattu (kuva 22), ja kaapelit kulkevat moottorin ja akkukotelon välissä eri reittiä kuin moottorin datakaapeli. Liitteestä 2 nähdään sähkökaaviot moottoripyörän sähköistä.

Pääkytkin sijoitettiin takahäkkiin siten, että se on lähellä akustoa. Pääkontaktori asetettiin pääkytkimen viereen, jotta saimme niiden välisen sähkösyötön tehtyä kuparikiskolla (kuva 25). Pääkontaktorilta tasajännitesyöttö menee 500 A sulakkeen kautta moottoriohjaimelle.



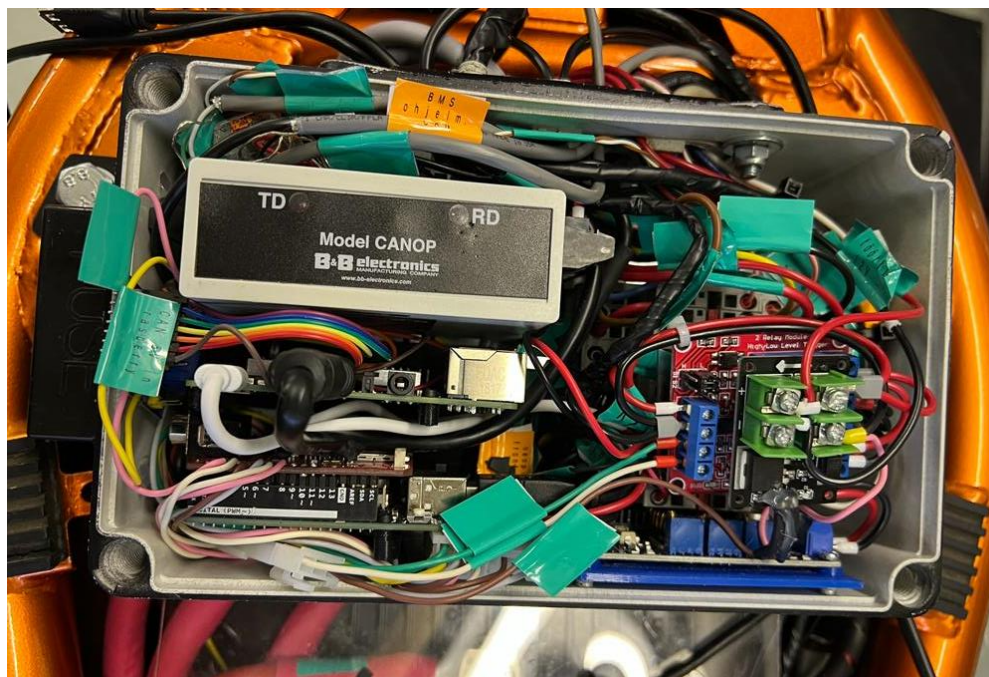
Kuva 25. Pääkytkin ja -kontaktori kytkettynä ja suojattuna

Pääkytkimeltä otetaan myös DC/DC-muuntajan ja moottoriohjaimen käyttöjännitteen syöttö (kuva 25). Akuston jännite kiertää siis avainkytkimen kautta, josta se sulakerasialla jaetaan KSI:lle, muuntajan herätteelle ja interlockille.

DC/DC-muuntajalta tulee 12 V tasajännitesyöttö sulakerasialle, jossa se jaetaan logiikoille, etuvaloille ja äänimerkille. Kaikkien sulakkeiden kokoina pidetään 20 A. Sulakerasia on kytkentäkotelon kyljessä.

Kaikki riviliitinkytkennät, releet, mikroprosessorit, 12/5 V muuntaja ja moottoriohjaimen CAN-erotin ovat vesitiiviissä kytkentäkotelossa (kuva 26). Riviliittimet erotettiin jännitetasojen mukaan toisistaan. CAN-väylän liitokset tehtiin

myös kytkinkotelossa riviliitimillä. Kaikki kytkinkotelossa olevat johtimet on merkitty ja nimetty.

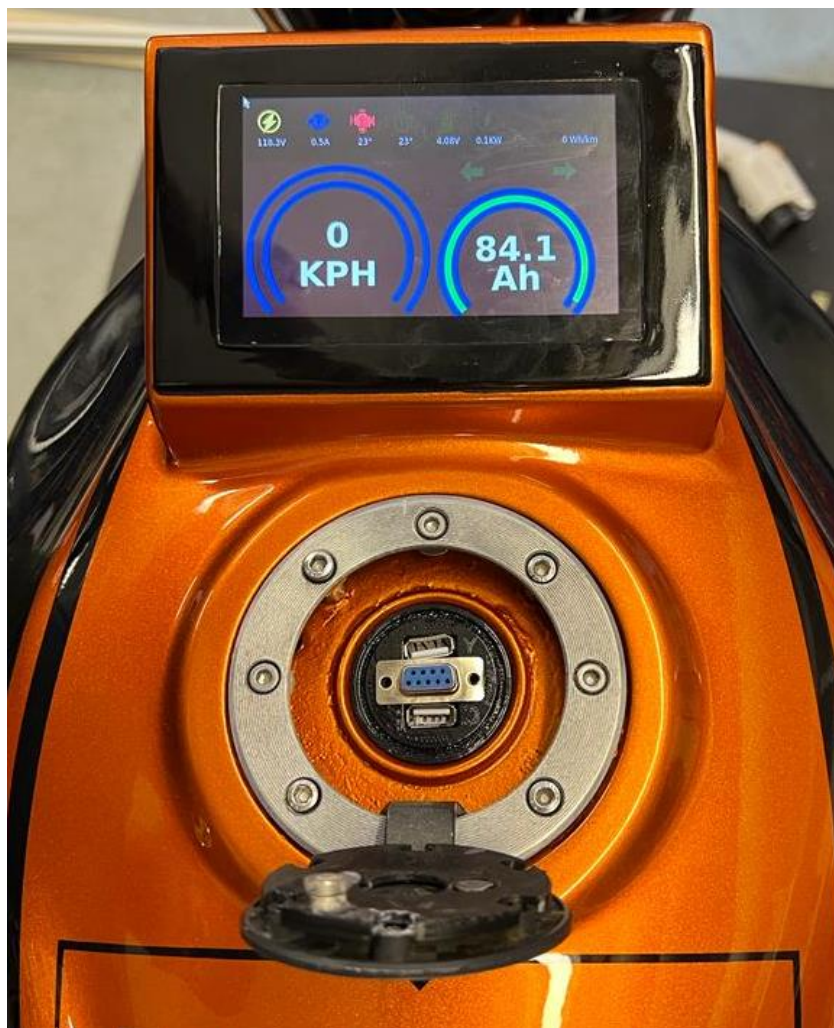


Kuva 26. Kytchentäkotelon valmiiksi kytkettynä. Vasemmalla kytchentäkotelon kyljessä sulakeraasia

Valojen, vilkkujen ja äänimerkin ohjauksesta vastaa Arduino-mikroprosessori. Ohjaustangossa on uudemmasta Suzukin moottoripyörästä saatu hallintalaite, josta kaapelointi on tuotu Arduinolle. Etuvalon alkuperäiset polttimet vaihdettiin LED-polttimoihin, ja ne toimivat releillä, joita Arduino ohjaa. Äänimerkin ohjauksen teimme releen sijaan MOSFET-ohjauksella. MOSFET ei lämpene tässä käytössä, joten se ei aiheuta ongelmia. Vilkut ja takavalot teimme ohjelmoitavissa olevilla WS2812 LED -nauhoilla. Nämä vaativat erillisen 5 V jännitelähteen – Arduinon syöttö ei kelpaa – ja pelkästään ohjaustieto tulee Arduinolta. Arduino on myös liitetty CAN-väylään, jotta näytölle saadaan valo- ja vilkkutiedot. Näytön kautta voidaan myös täten ohjata valoja, jos näin halutaan.

Moottoripyörän tankkiin tehtiin paikka kosketusnäytölle, joka toimii mittaristona ja ajotietokoneena. Näyttöä ohjaa Raspberry Pi 3 model B -mikroprosessori. Näytöltä nähdään kaikki kriittiset tiedot ajon aikana. Nämä ovat nopeus, akun kapasiteetti, akun jännite, akun virrankulutus, moottorin lämpötila, korkein lämpötila akkukennoista, akkujen keskiarvoinen jännite, teho ja kulutus. (Kuva 27.)

Tankin korkkia muutimme siten, että sen alle saimme lisättyä ohjelmointia varten USB-naarasliittimet moottoriohjaimelle ja Arduinolle sekä RS-232-portti akunhallintajärjestelmälle (kuva 27). Raspberry Pin -ohjelmointi tapahtuu langattomasti Wi-Fi yhteydellä.



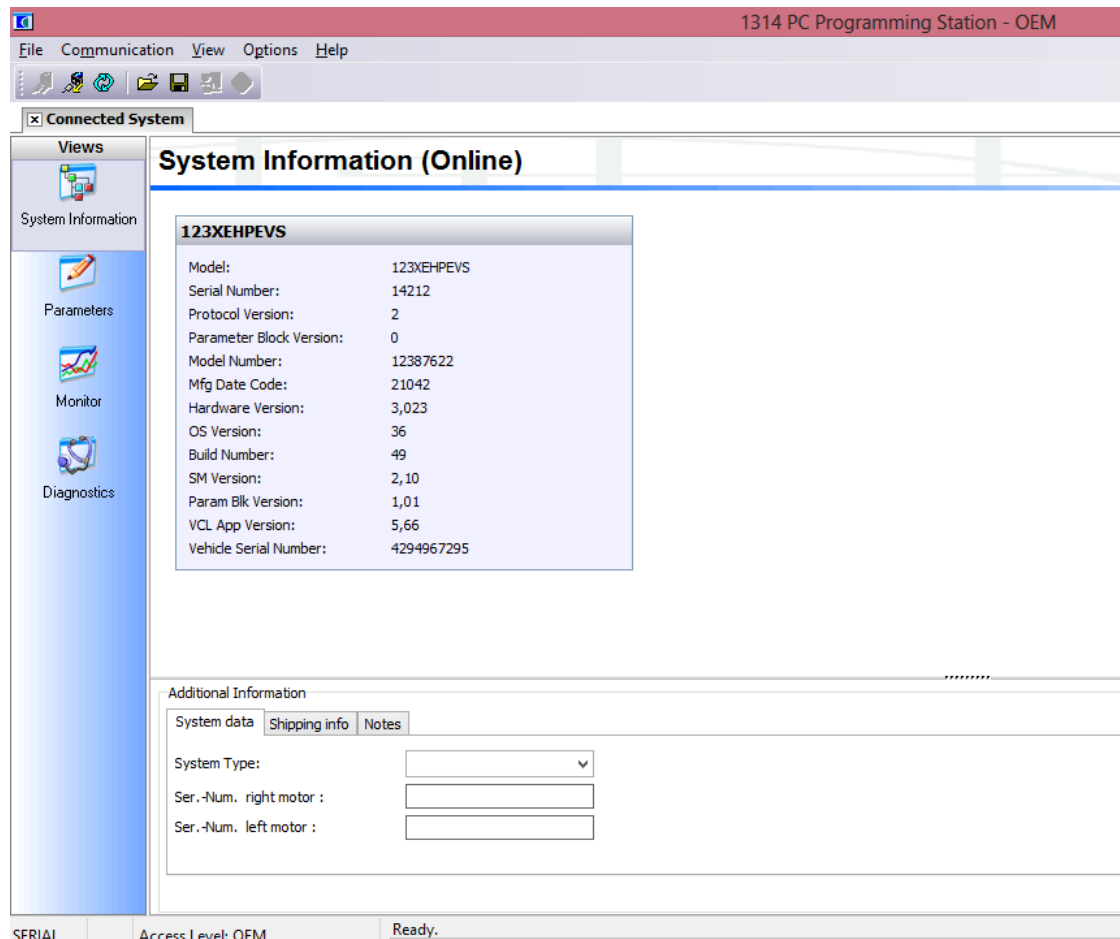
Kuva 27. Ajomittaristo ja ohjelmointiportit. USB-liittimien vieressä kirjainmerkinnät A ja C ku-
vastamassa Arduinoa ja Controlleria eli ohjainta

5.3 Ohjelmointi

Muunnosprojekti rakennettiin siinä mielessä, että kaikki olisi ohjelmoitavissa muita käyttäjiä ja opiskelijoita varten. Arduino, Raspberry Pi ja Orion BMS 2 ovat kaikki ohjelmoitavissa niille tarkoitetuilla tietokonesovelluksilla. Tässä osiossa keskitytään moottorin ohjelmointiin.

Moottorin ohjelmointi tapahtuu moottoriohjaimen omalla 1314-4402 PC Programming Station -tietokonesovelluksella. Tietokoneen ja ohjaimen väliin vaadittu käyttöliittymä on kiinteästi asennettuna moottoripyörässä, joten vain USB-kaapeli vaaditaan yhteyden muodostamiseen. Sovelluksella on mahdollista säädellä kaikkia parametreja, monitoroida haluttuja arvoja ja diagnosoida vikakoodeja.

Sovelluksen käynnistettyä ja yhteyden muodostettua näemme moottoriohjaimen logiikan tekniset tiedot, kuten mallin, sarjanumeron ja ohjelmiston version (kuva 28).

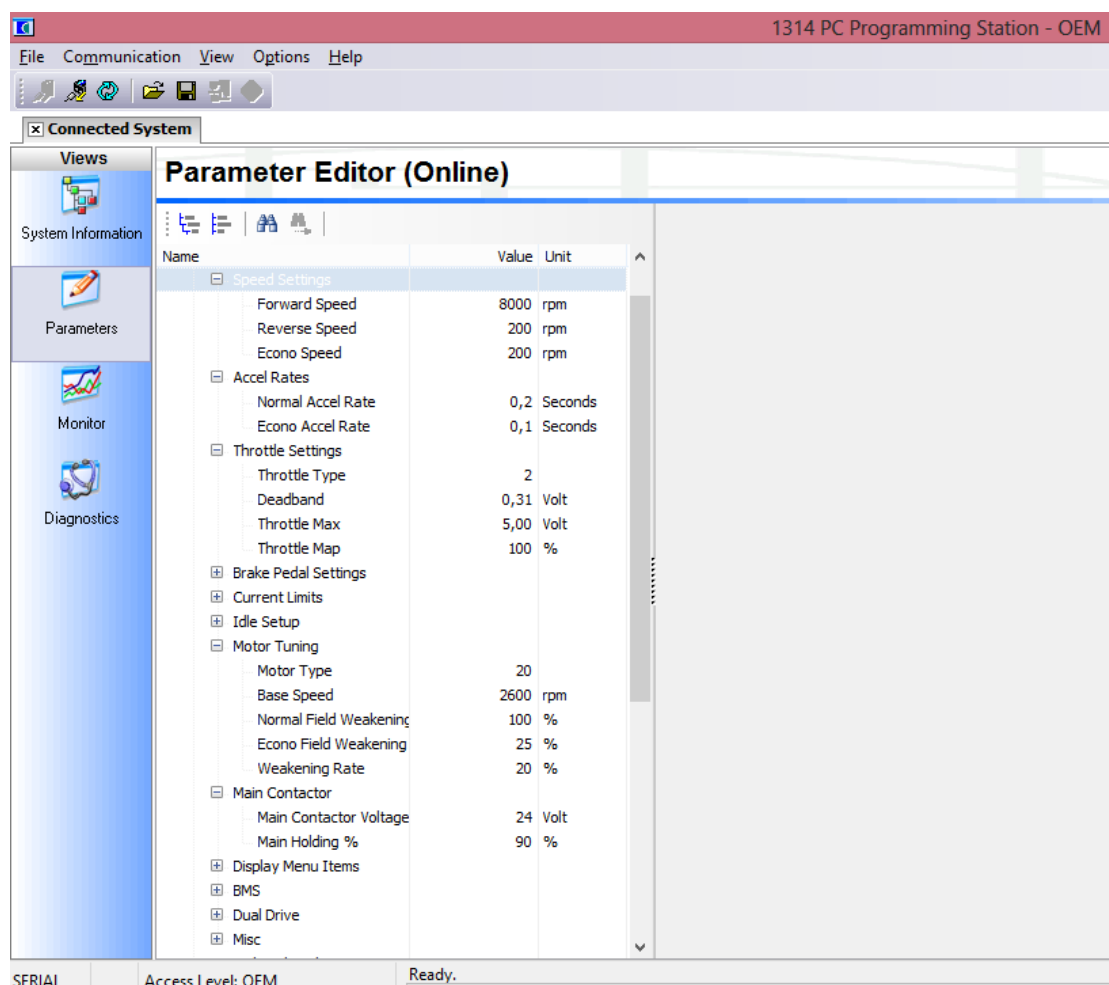


Kuva 28. 1314-4402 PC Programming Station yhdistettynä moottoriohjaimeen. Näkyvillä järjestelmän tiedot

Parametrien säädöllä on yksinkertainen käyttöliittymä, josta voi säätää kaikkia tarvittavia parametreja helposti. Parametrien muuttamisen jälkeen moottoriohjaimen tulee käynnistää uudelleen sovelluksen kautta, jotta muutokset tulevat voimaan. Koska moottoriohjaimessa on valmiiksi HPEVS-moottorien ohjelmisto,

pystyimme valitsemaan oman moottorimme parametreista, jolloin se asetti oikeat oletusarvot moottoriohjaimelle automaattisesti.

Moottorinohjauksen kannalta tärkeimmät parametrit ovat ohjaustavan ja kaasutyypin valinta sekä maksimi pyörimisnopeuden ja kiihtyvyyden säätö. Ohjaustapoja on kolme erilaista, mutta ajoneuvokäyttöön Torque Mode on näistä parhain. Tässä kaasu vastaa moottorin vääntömomentista. Moottorin maksimi pyörimisnopeutta säädetään Forward Speed -parametrilla ja kiihtyvyyttä taas Accel Rate -parametrilla. Kaasutyyppejä on viisi erilaista. Kaasukahvalle paras vaihtoehto on tyyppi 2. Kaasun herkkyyttä on mahdollista säätää Throttle Map -parametrilla, ja moottoripyörille yleisesti kaasukahvaan saa asetettua välystä eli kuinka paljon kahvaa täytyy kääntää, ennen kuin se alkaa vastaamaan kaasuun Deadband-parametrilla. (Kuva 29.)



Kuva 29. 1314-4402 PC Programming Station parametrien säätövalikko

Jarrutusenergian talteenoton tehokkuutta voidaan säätää Brake Current Limit -parametria kasvattamalla. Koska kaasukahva on lisätty interlock-silmukkaan, voimme hyödyntää Interlock Braking -parametria. Eli kaasun vapauttamalla moottori alkaa jarruttamaan regeneroiden akkuja. Jarrutuksen voimakkuutta voi säätää eri tasoille matalilla ja korkeilla nopeuksilla.

5.4 Käyttöönotto ja viimeistely

Moottoripyörälle suoritettiin koeajo Saimaa Stadiumilla, jossa testattiin kaiken olevan mekaanisesti kunnossa. Moottorin tehoa lisäiltiin hiljalleen nähdäksemme tekniikan toimivan.

Onnistuneen koeajon jälkeen moottoripyörä muutokatsastettiin tieliikennekäyttöön. Katsastus vaatii kaikista muutetuista osista dokumentaatiot mukaan, joista ilmenee tarvittavat hyväksynät. Runkomuutoksista täytyy näkyä tai olla kuvat hitsaussaumoista. Projektissamme ainoa isompi runkomuutos oli takahäkin uusiminen.

Moottoripyörä purettiin katsastuksesta päästyämme ja lähetettiin maalattavaksi. Maalauksen jälkeen moottoripyörä kasattiin viimeisen kerran (kuva 30, 31).



Kuva 30. Valmis eBandit -sähkömoottoripyörä oikealta sivulta



Kuva 31. Valmis eBandit -sähkömoottoripyörä vasemmalta sivulta

6 YHTEENVETO

Työn alussa asetetut tavoitteet saavutettiin, vaikka loppua kohden aika tuntui kiristävän kovaa vauhtia. Sähkömoottoripyörämuunnos toteutettiin pitkälti, kuten esisuunnitteluvaiheessa olimme suunnitelleet. Projektin voidaan siis sanoa

onnistuneen erinomaisesti. Moottoripyörä saatiin muunnettua täyssähköiseksi, näyttäväksi ja tieliikenteeseen sopivaksi. Tulevia käyttäjiä ajatellen, sen ohjelmointiliitännät ovat helposti saatavilla. KytKentäkoteloon ja liittimiin pääsee kärsiksi irrottamalla penkin ja tankin. Suurimpana haasteena muunnosprojektissa voisi mainita koronan aiheuttamat viivästyksset koululle pääsyn suhteen ja tilattavien osien hankinnassa komponenttipulan takia. Projektiin kului kokonaisuudessaan noin 2000 työtuntia lukuun ottamatta lukuisia tunteja, joita käytimme omiin tutkimustöihin eri vaiheissa.

Sähkömoottori saatiin asennettua suunniteltuihin moottorikiinnikkeisiin, ja näiden kiinnitys alkuperäisiin moottorin kiinnityspisteisiin onnistui moitteettomasti. Rautaputkesta tehtyjen välikappaleiden asennus aiheutti ongelmia, sillä näitä ei voitu kiinnittää, ennen kuin akkukotelo oli päällä, koska apurungon pystyi asentamaan vasta akkukotelon oltua paikallaan.

Moottoriohjaimen sijainti tuli hyvään paikkaan ajatellen jäädytystä ja kaapelin pituutta moottorille ja akustolta ohjaimelle. Moottorin ohjelmointi oli todella käyttäjäystävällistä, ja moottorista saimme riittävästi tehoja irti.

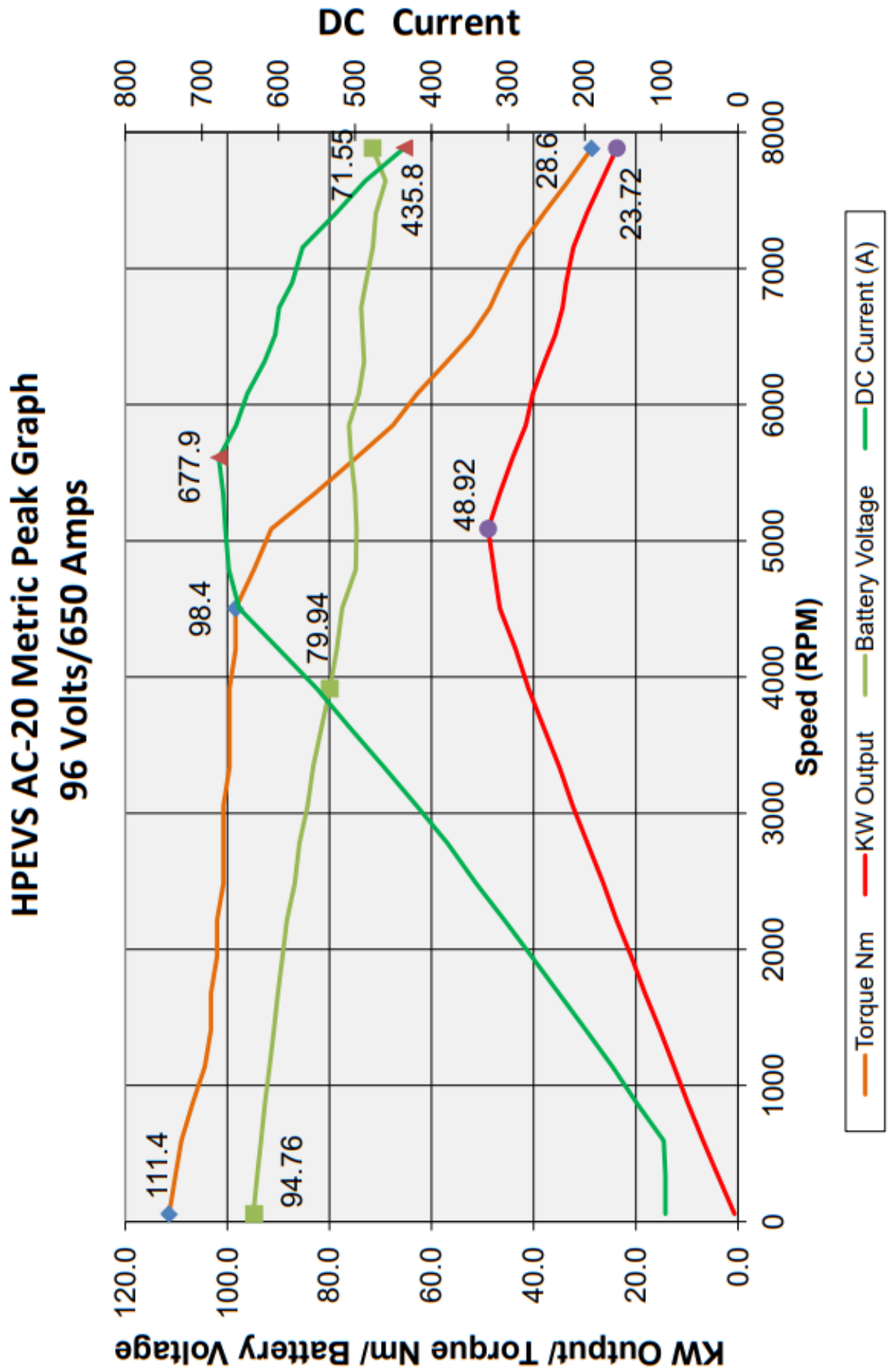
Moottoripyörän rajoitetun tilan vuoksi sähköistys tuotti haasteita etenkin kytkentäkotelossa, mutta nämä kuitenkin saatiin hoidettua. Tulevaisuutta ajatellen kytkentäkotelon voisi joko 3D-tulostaa itse tai teettää.

Projektin aikana tuli opiskeltua asioita, joita ei olisi tullut muuten eteen, ellei tähän olisi ryhtynyt. Hyvinä esimerkkeinä voi sanoa sähkömoottorin ohjelmointia ajoneuvokäytössä tai akunhallintajärjestelmän toimintaa, jota projektin alkuvaiheessa itse koitimme rakentaa.

Sähkömoottoripyörämuunnoksen tekeminen vaatii tekijältä tai sen tekijöiltä paljon aikaa, osaamista monelta saralta, rautaisia hermoja ja myös budjettia täytyy löytyä. Nykyisestä komponenttipulasta johtuen monien muunnokseen valittavien osien hinnat ovat nousseet todella paljon.

LÄHTEET

1. Dillard, T. The history of electric motorcycles: timeline. Blogi. Päivitetty 27.7.2013. Saatavissa: <https://evmc2.wordpress.com/2013/07/27/the-history-of-electric-motorcycles-notes/> [viitattu 21.4.2022]
2. Aura, L. & Tonteri, A. Sähkökoneet ja tehoelektronikan perusteet. Helsinki: WSOY. 1996.
3. Korpinen, L. Sähkökoneet: osa 1. PDF-dokumentti. Päivitetty 29.11.2007. Saatavissa: http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf [viitattu 1.5.2022].
4. Korpinen, L. Sähkökoneet: osa 2. PDF-dokumentti. Päivitetty 29.11.2007. Saatavissa: http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_2osa.pdf [viitattu 8.5.2022].
5. Hietalahti, L. Sähkökäyttö- ja hybriditekniikka ajoneuvo- ja työkonekäyttöön. 1. painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka. 2011.
6. Hänninen, J. Synkronireluktanssi- ja oikosulkumoottorin vertailu. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Sähkövoimatekniikan insinöörikoulutus. Opinnäytetyö. PDF-dokumentti. 2016. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/113075/Hanninen_Jani_Synkronireluktanssi-%20ja.pdf?sequence=1 [viitattu 15.5.2022].
7. Kenjo, T. Electric Motors and their Controls: An Introduction. 1. painos. New York. Oxford University Press. 1991.
8. ABB. Sähkömoottorikäytöt. PDF-dokumentti. ABB TTT-käsikirja 2000-07. Päivitetty 24.3.2011. Saatavissa: http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/18_S%84hk%94moottorik%84yt%94t.pdf [viitattu 24.5.2022].
9. Sähköautot – Nyt!. Moottoriohjain. WWW-dokumentti. 2011. Saatavissa: <http://www.sahkoautot.fi/wiki:kontrolleri> [viitattu 24.5.2022].
10. Curtis 1238E Manual. PDF-dokumentti. 2017. Saatavissa: https://www.maurelma.ch/Produkte/Antriebstechnik/Controller/Curtis/manual_1232E_34E_36E_38E.pdf [viitattu 27.5.2022].



eBandit sähkökaavio

