



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Joni Kokkonen

Sähkökäyttöisen golfajoneuvon proto- tyypin suunnittelu ja toteutus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkövoimatekniikka

Insinöörityö

21.4.2019

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Joni Kokkonen Sähkökäyttöisen golfajoneuvon prototyypin suunnittelu ja toteutus 40 sivua 21.4.2019
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	sähkö- ja automaatiotekniikan koulutusohjelma
Ammatillinen pääaine	sähkövoimatekniikka
Ohjaaja	lehtori Arja Ristola
<p>Tässä opinnäytetyössä suunnitellaan ja rakennetaan golfkentille soveltuva sähkökäyttöisen ajoneuvon prototyyppi, jonka tehtävänä on kuljettaa pelaajaa ja tämän varusteita golfkentällä. Työn tavoitteena on luoda ajoneuvo, jota ei nykyisillä golfmarkkinoilla ole.</p> <p>Työssä tutustutaan ajoneuvon rakentamiseen aina osien valinnasta lähtien. Lisäksi tutustutaan internetissä myytäviin sähkökäyttöisten ajoneuvojen komponentteihin, joita työhön oli tarjolla.</p> <p>Työssä käydään läpi sähköajoneuvoille tärkeitä komponentteja kuten moottoria, moottorin ohjainta sekä akkua. Koska markkinoilla on paljon vaihtoehtoja, on mm. akkujen valintaan syytä kiinnittää huomiota jo turvallisuuden kannalta. Työssä pyritään pureutumaan luotettavan akun valintaan.</p> <p>Ajoneuvon rakentamista käydään läpi vaiheittain ongelmien ja niiden ratkaisuihin. Ajoneuvon rakenteen määrittää suurelta osin ajoneuvossa käytettävä moottorityyppi. Moottorin valinta vaikuttaa muiden työssä käytettävien komponenttien valintaan.</p> <p>Lopuksi valmista ajoneuvon prototyyppiä testataan käytännössä ja ajoneuvolle pyritään löytämään jatkokehittämisen aiheita. Opinnäytetyön tuloksena on toimiva golfajoneuvon prototyyppi.</p>	
Avainsanat	golfajoneuvo, harjaton tasavirtamoottori, moottorihjain, akku

Author Title Number of Pages Date	Joni Kokkonen Electrically operated Golf-vehicle prototype design and implementation 40 pages 21 April 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical and automation engineering
Professional Major	Electrical power engineering
Instructor	Arja Ristola, Senior Lecturer
<p>In this thesis study, a prototype of an electrically powered vehicle suitable for golf courses was designed and constructed. The purpose of the vehicle is to carry the player and his equipment on the golf course. The aim of the work was to create a vehicle that is not presently available in the current golf market.</p> <p>In the thesis, we'll get acquainted with the construction of the vehicle starting from the selection of parts. In addition, information is given out about electrical components sold in the internet, that are suitable for this project.</p> <p>The thesis also includes details of important components for the vehicle, like motor controller and battery. Because there are many options in the market, for example the batteries should be carefully selected for safety reasons. One aim of this thesis study is to try to select a reliable battery.</p> <p>How the construction work was carried out is explained step by step, with its problems and solutions. Type of the motor chosen to this vehicle guides the design of the vehicle's structure. The motor also guides the selection of speed controller and battery.</p> <p>Finally, the finished prototype of the vehicle was tested in practice and further development topics for it are suggested. The result is working prototype that can be used on a golf course.</p>	
Keywords	golfvehicle, brushless dc-motor, motor controller, battery

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Ajoneuvon rakenne	2
2.1	Suunnittelun lähtökohdat	2
2.2	Ajoneuvon rakennevaihtoehdot	4
3	Voimansiirto ja renkaat	6
3.1	Ketju- ja hihnaveto	6
3.2	Integroidut vaihteistot	8
3.3	Suora veto ja napamoottorit	9
4	Moottori ja moottoriohjain	11
4.1	Harjattomat dc-moottorit	11
4.2	Bldc-moottoriohjaimet	13
5	Akut	15
5.1	Akkujen kapasiteetti	16
5.2	Akkujen lataus ja purkaminen	17
5.3	Litiumakkujen suojaus	18
5.4	Akkumarkkinat	18
6	Komponenttien valinta ajoneuvoon	19
6.1	Moottorin mitoitus ja valinta	19
6.2	Moottoriohjaimen valinta	24
6.3	Akun valinta ja vertailu	25

7	Ajoneuvon rakentaminen	28
7.1	Rungon rakentaminen	28
7.2	Prototyypin kiinnitys golfkärryyn	29
7.3	Moottoriohjain, hallintalaitteet ja akku	30
7.4	Ajoneuvon lisätuenta ja mekaaninen jarru	31
8	Testaus	32
8.1	Ajoneuvon ominaisuudet ja ensimmäinen ajotesti	33
8.2	Ajotesti golfkentällä	34
9	Yhteenveto	36
	Lähteet	38

1 Johdanto

Suomessa golfia on pelattu yli 80 vuoden ajan. Maamme ensimmäinen golfseura perustettiin vuonna 1932 Helsingissä ja Suomen golfliitto perustettiin 1957. Tämän jälkeen laji on hiljalleen levinnyt myös muualle maahan. Suurin golfinnostus koettiin 1980-luvun puolivälin jälkeen, jolloin Suomeen rakennettiin useita kymmeniä golfkenttiä. (1, s. 2.)

Suomen golfalan liikevaihto on n. 250 miljoonaa euroa ja se työllistää maassamme n. 2000 ihmistä. Golfin potentiaalia on tutkittu Suomessa ja arvio on, että 1,7 miljoonaa ihmistä on lajista kiinnostunut. 700 000 ihmistä haluaisi kokeilla lajia. (2, s. 3.)

Tämän insinööriyön tavoitteena on suunnitella golfin pelaamista avustava golfajoneuvon prototyyppi, jolla pelaaja voi liikkua golfkentällä. Ajoneuvon tarkoitus on olla golfauton kaltainen, pelaajaa ja tämän varusteita kuljettava ajoneuvo. Markkinatutkimuksen mukaan markkinoilla ei ole mitään sähköistä liikkumisvälinettä, joka olisi sähköisen karryn ja golfauton välissä. Tästä syystä insinööriyön tarkoituksena on tuottaa ajoneuvon prototyyppi, jota golfmarkkinoilta ei löydy.

Prototyypin on tarkoitus olla golfkarryyin liitettävä lisäosa. Prototyyppi tulee olla liitettävissä mihin tahansa golfkarryyin ja sen on voitava kuljettaa myös pelaajaa golfkentällä. Ajoneuvon tulee olla golfkentälle sopiva, niin että se ei aiheuta vahinkoa pelialustaan. Ajoneuvosta tehdään sähkökäyttöinen, jolloin sen käyttöä ei rajoiteta kentällä.

Insinööriyön tarkoituksena on tuottaa prototyyppi, jota on mahdollista kehittää tulevaisuudessa kaupalliseen tarkoitukseen. Prototyyppiä testataan ja sille etsitään jatkokehityskohteita. Prototyypin komponenttien hankintaan budjetoidaan 600 euroa.

Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia ajoneuvon suunnittelun ja rakentamisen vaiheita ja haasteita. Lisäksi tutkitaan ajoneuvolle tärkeiden komponenttien moottorin, moottorinohjaimen ja akun valintaa.

Kyselyn perusteella sähkökäyttöisiä apuvälineitä ei rajoiteta tai valvota golfkentillä. Kumminkaan omia sähkökäyttöisiä golfautoja ei yleensä hyväksytä kentillä, vaan golfautot

tulee vuokrata golfkerhoilta. Myöskään kilpapelaaamisessa ei ajoneuvoja käytetä. (3, s. 1.) Nämä rajoitukset ohjaavat prototyypin suunnittelua.

2 Ajoneuvon rakenne

2.1 Suunnittelun lähtökohdat

Insinööriyönaihetta aloitettiin tutkimalla, miten golfpelaaja voi liikkua varusteineen kentällä mahdollisimman helposti. Yleisesti golfkentillä on pelaajien käytössä työnnettäviä golfkärriä, joihin pelaaja asettaa mukanaan olevan golfvarusteensa. Nykyään kärryt ovat hyvin monipuolisia ja markkinoilla on paljon malleja, jotka taittavat pieneen tilaan ja ovat näin pelaajien itse ostettavissa sekä kuljetettavissa esim. auton takakontissa. Kuvassa 1 on työnnettävä golfkärry.



Kuva 1. Golfpelaajan varustus: taittuva golfkärry, jossa pelaajan varusteet. (4, s. 1).

Markkinoilla on myös golfkärriä, jotka toimivat sähköisesti. Kärryt liikkuvat oman moottorinsa ja akun avulla. Näissä kärryissä käyttäjä ohjaa kärryä joko kaukosäätimellä tai työntökahvoissa olevista ohjaimista. Kyseiset mallit eivät tosin mahdollista pelaajan liikkumista kärryn mukana, vaan pelaaja joutuu kävelemään kärryn perässä. Markkinatutkimuksen mukaan hinnat Suomessa myytävillä kyseisillä kärryillä vaihtelevat 700 - 2000 €:n välillä (5, s. 1; 6, s. 1).

Pelaajat voivat liikkua kentällä myös golfautolla. Yksi esimerkki golfautosta on kuvassa 2. Golfautoja vuokraavat golfkentät.



Kuva 2. Perinteinen golfauto (7, s. 1).

Pelaajan ei kannata ostaa omaa golfautoa, koska sen kuljettaminen kentältä toiselle on haastavaa. Lisäksi usealla golfkentällä on kieltö, joka kieltää pelaajilta omien golfautojen käytön (3, s. 1). Tällöin järkevimmäksi vaihtoehdoksi tulee vuokrata golfauto golfklubilta. Hinta vuokraukselle on yleensä 25 - 50 euroa per kierros riippuen kentästä. Golfautojen käytölle on myös joillakin kentillä asetettu rajoituksia. Esimerkkinä kenttien ollessa huonossa kunnossa kesän alussa tai syksyllä voi autojen käyttö ja vuokraus olla rajattua. Lisäksi joissakin kentillä vuokraus on sallittua vain pelaajille, joilla on esittää lääkärintodistus heikenneestä liikkumiskyvystä (3, s. 1).

Koska markkinatutkimuksen perusteella golfauton ja sähkökäyttöisen golfkärryn välissä ei ole mitään ajoneuvoa, lähdettiin ajoneuvoa suunnittelemaan niin, että ajoneuvo olisi kiinnitettävissä golfkärryyn ja pelaajan olisi mahdollista kulkea ajoneuvon päällä. Jotta ajoneuvon rakenne pystyttäisiin suunnittelemaan ja testaamaan, hankitaan ajoneuvon pohjaksi Masters icart One Compact -kärry. Kärryn hinta hankittaessa golfcenter.fi:n liikkeestä oli 189 €. Kärry on esiteltyinä kuvassa 3.



Kuva 3. Masters icart One Compact -kärry ja golfpelaajan varusteet.

2.2 Ajoneuvon rakennevaihtoehdot

Ajoneuvon rakenteeksi oli käytännössä kaksi vaihtoehtoa. Vaihtoehtoina oli toteuttaa ajoneuvo joko kaksipyöräisenä tai yksipyöräisenä. Suunniteltavan ajoneuvon oli tarkoitus olla golfkärryyn kiinnitettävä lisäosa, joten ajoneuvosta oli tehtävä mahdollisimman pieni, jotta sen kuljettaminen olisi mahdollisimman helppoa. Lisäksi ajoneuvon tuli olla mahdollisimman yksinkertainen toteuttaa, jotta ajoneuvon rakennuskustannukset eivät nouse liian korkeiksi. Edellä mainitut tavoitteet eivät kuitenkaan saa vaikuttaa ajoneuvon ajettavuuteen eikä turvallisuuteen.

Koska varsinkaan yksipyöräisen rakenteen rakentamisesta ei työn alussa ollut juurikaan kokemusta, etsittiin tietoa eri sähköajoneuvoista. Etsittäessä esimerkkejä rakenteeltaan vastaavista sähköisistä ajoneuvoista löytyi muutama sähköinen ajoneuvo, joita oli syytä käyttää esimerkkinä ajoneuvon rakenteen hahmottelemisessa.

Kuvassa 4 on esiteltyä Onewheel-merkkinen sähköinen ajoneuvo, jonka rakennetta käytettiin esimerkkinä ajoneuvon rakenteelle.



Kuva 4. Onewheel (8, s. 1).

Onewheel on tasapainolaudan kaltainen sähköinen ajoneuvo, jolla voidaan ajaa muuttamalla painopistettä renkaan ympärillä. Jotta ajoneuvo toimii oikein, tarvitsee ajoneuvon moottori monimutkaisen ohjausjärjestelmän.

Toisena esimerkkinä ajoneuvon rakenteelle käytettiin erään harrasterakentajan valmistamaa sähköisen tasapainolaudan kytkentää golfkärryyn. Kuvassa 5 on esiteltynä kyseinen rakenne.



Kuva 5. Sähköisen tasapainolaudan kiinnitys golfkärryyn (8, s 1).

Kyseinen rakenne on rakennettu käyttäen apuna markkinoilla olevaa sähköistä tasapainolautaa. Tasapainolauta on kiinnitetty golfkärryyn metallitangon avulla. Rakenne on

yksinkertainen ja vaatii ainoastaan kiinnityksen rakentamisen tasapainolaudan ja golfkärryn välille. Ajoneuvoa ohjataan kääntämällä golfkärryä ja nopeutta voidaan säätää painopistettä muuttamalla tasapainolaudalla.

Koska kuvan 5 ratkaisu on yksinkertainen ja toimiva, valitaan myös prototyypin rakenne samankaltaiseksi. Ajoneuvo pyritään kuitenkin rakentamaan vain yksirenkaisena, kuten Onewheel. Tällöin komponenttien hankintakulut jäävät pienemmiksi, koska rakenne tarvitsee vain yhden moottorin ja moottoriohjaimen. Ajoneuvon nopeuden säätö ja jarrutus pyritään tekemään kädellä ohjattavan ohjaimen avulla eikä tasapainosääteisenä. Lisäksi ajoneuvoa tulee pystyä jarruttamaan mekaanisesti hätätilanteessa.

3 Voimansiirto ja renkaat

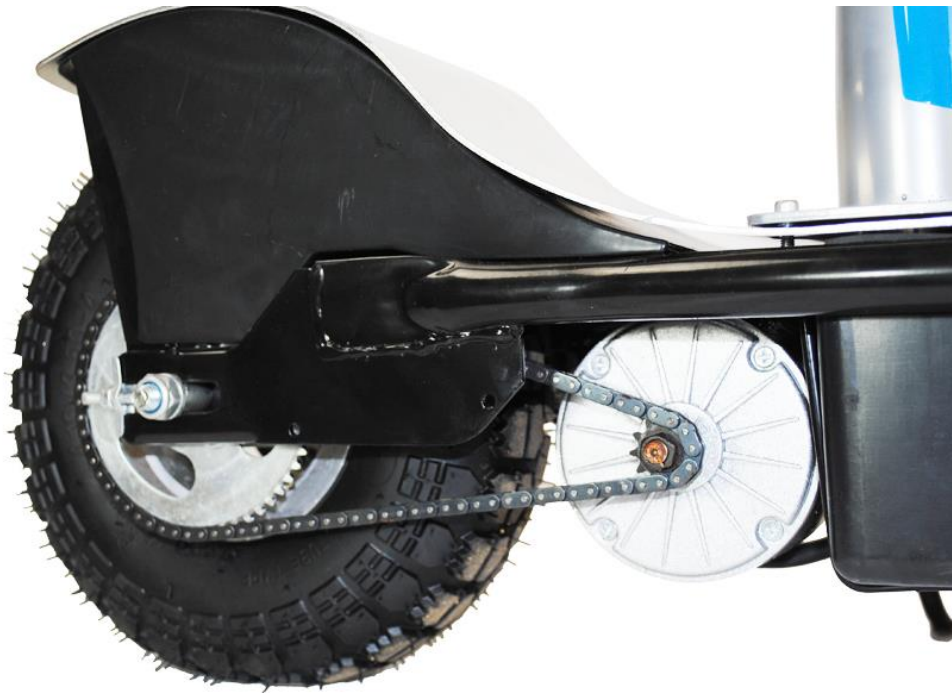
Ajoneuvon rakenteeseen vaikuttaa oleellisesti se, miten sähkömoottorin ja vetävän renkaan tai renkaiden voimansiirto toteutetaan. Yleisesti voimansiirto voidaan toteuttaa sähkömoottorilta renkaalle ketjuvetona, hihnavetona tai käyttäen hyväksi vaihteistoa. Myös suoraveto moottorilta renkaalle on mahdollista, mutta tämä vaatii moottorin tarkan mitoituksen sovellukselle.

Koska moottorin mitoituksessa ongelmana on yleensä moottorin pyörimisnopeuden ja momentin väärä suhde, on mietittävä, miten voima välitetään renkaalle. Tällöin nopeuden ja momentin suhdetta on pystyttävä mahdollisesti muuttamaan välitysten avulla.

Lähtökohtaisesti suunniteltavan ajoneuvon voimansiirtoon on valittavissa kolme eri tapaa, joista pyritään valitsemaan taloudellisin ja kyseiseen käyttötarkoitukseen parhaiten sopiva tapa.

3.1 Ketju- ja hihnaveto

Ketju- tai hihnavetoisessa voimansiirrossa voima siirretään sähkömoottorilta renkaalle käyttäen apuna hammasrattaita tai hihnapyöriä. Kuvassa 6 on esiteltynä ketjuvetona toteutettu voimansiirto.



Kuva 6. Ketjuvälitteinen voimansiirto (10, s. 1).

Ketjuvedossa moottorilta tuleva voima siirretään vetävälle pyörälle ketjulla, joka pyörittää renkaassa kiinni olevaa hammasratasta. Hihnavedossa voima siirtyy renkaalle hihnalla ja hihnapyörillä. Näiden välityksien toimintaperiaate on samanlainen.

Ketjuvälityksen suurin hyöty on sen säädettävyys ja sen edullinen toteutus. Rataspyörien kokoa vaihtamalla on mahdollista säätää tarvittavaa momenttia ja nopeutta. Tällöin moottorin valinta ajoneuvoon on helpompaa, koska moottorin pyörimisnopeus ja momentti ei ole täysin sidottuna moottorin nimellisarvoihin.

Ketjuvedon huonona puolena on välityksiin kuluva teho sekä sen tarvitsema tila ajoneuvossa. Esimerkkinä polkupyörien välityksien on arvioitu aiheuttavan n. 4 - 5 %:n häviön kokonaistehosta (11, s. 1). Lisäksi ketjun ja rattaiden kuluminen ja likaantuminen tulee ottaa huomioon suunniteltaessa ketjuvetoista rakennetta. Jotta osien kuluminen saadaan minimiin, tulee ketjut ja hammasrattaat suojata. Ketjuille ja hihnoille tyypillistä kulumista ovat myös niiden venyminen. Tällöin välityksien rakentamisessa tulee huomioida mahdollisuus kiristää ketjua tai hihnaa.

3.2 Integroidut vaihteistot

Sähköpyöriin ja sähköpotkulautoihin tarkoitettuja moottorivaihteistoyhdistelmiä on nykyisin tarjolla paljon. Kuvassa 7 on esiteltynä 36 voltin, 1000 watin tasavirtamoottoriin integroitu vaihteisto. Vaihteistossa voima välitetään pyörän akselille hammaspyörien avulla. Akselilta voima voidaan välittää suoraan renkaalle tai siirtää voimaa vielä eteenpäin käyttäen ketju- tai hihnavälitystä.



Kuva 7. Integroitu vaihteisto ja sähkömoottori. Voima välitetään moottorilta akselille hammaspyörien avulla (12, s. 1).

Vaihteistolla pystytään ketjuvedon tavoin muuttamaan moottorin pyörimisnopeuden ja momentin välistä suhdetta. Muuntosuhde on vakio integroiduissa vaihteistoissa, eikä sitä pysty muuttamaan. Tällöin on tärkeää tietää tarvittava nopeus ja momentti ennen moottorin ja vaihteiston hankintaa.

Integroidun vaihteiston hyvinä puolina ovat sen kompakti koko ja huollon vähäisyys. Koska välitykseen tarvittavat osat on suojattu, on kuluminen pienempää verrattuna ketjuvetoon. Tällöin huollontarve laitteistolle on huomattavasti pienempi. Koska vaihteisto

on asennettu yleensä aina moottorin kylkeen, on sen tarvitsema tila ajoneuvossa myös huomattavasti pienempi.

3.3 Suoraveto ja napamoottorit

Suorassa vedossa sähkömoottori on yleensä asennettu suoraan pyörää pyörittävälle akselille. Suoran vedon etuna on sen yksinkertainen toteutus, koska välityksiä ei tarvita. Tällöin myös välityksistä aiheutuvat häviöt jäävät minimiin. Suoraveto on käytännössä vaikea toteuttaa, koska tarvittavan nopeuden ja momentin sovittaminen sovellukseen on vaikeaa ilman moottorin suunnittelua kyseistä sovellusta varten.

Sähköpyörissä ja sähköpotkulaudoissa suoran vedon ongelmaa on ratkottu sijoittamalla moottori pyöritettävän renkaan keskelle. Tätä ratkaisua kutsutaan napamoottoriksi. Kuvassa 8 on esitetty sähköpyörän napamoottori.



Kuva 8. 240 watin tehoinen polkupyörän napamoottori (13, s. 1).

Napamoottoriratkaisu voidaan rakentaa juuri sovelluksen mukaisesti, jolloin moottorin pyörintänopeus ja momentti saadaan suoraan sovitettua tarvittavaksi. Napamoottoreille

on tyypillistä suuri halkaisijan koko verrattaessa tavalliseen tasavirtamoottoriin, joita sähköajoneuvoissa käytetään. Koko ei ole golfajoneuvosovelluksessa haitta, koska sen sijoitus renkaan keskellä on optimaalinen tilan hallinnan kannalta.

Napamoottori voidaan toteuttaa kahdella tavalla: suorallavedolla tai sisään rakennetun vaihteiston avulla. Yleensä vaihteistona käytetään kuvan 9 mukaista planeettapyörästä napamoottorin sisällä. Käyttämällä planeettapyörästä napamoottorin lisänä voidaan moottoria pyörittää suuremmalla nopeudella, jolloin moottorin hyötysuhde on parempi, kun taas itse rengas pyörii planeettapyörästä avulla hitaammin.



Kuva 9. Napamoottori ja napamoottorin planeettapyörästä. Planeettapyörästä tehtävä on toimia vaihteena renkaan ja moottorin välillä (14, s. 1).

Napamoottorin huonona puolena on sen huonompi hyötysuhde verrattuna tavalliseen tasavirtamoottoriin. Yleisesti napamoottori on kestävä ja vähän huoltoa tarvitseva, mutta ongelmalliseksi on muodostuneet planeettapyörästä varustetut napamoottorit, joiden hammaspyörät ovat alttiita kulumiselle ja rikkoontumiselle. (13, s. 1.)

4 Moottori ja moottoriohjain

4.1 Harjattomat dc-moottorit

Tässä insinöörityössä tullaan ajoneuvon moottorina käyttämään harjatonta dc-moottoria. Nykyisin harjattomia dc-moottoreita käytetään erilaisissa sovelluksissa. Bldc-moottorin (Brushless Direct Current Motor) etuina on sen hyvä nopeus- ja vääntömomenttiominaisuudet. (9, s. 8.) Verrattaessa bldc-moottoria muihin moottorityyppeihin, on bldc-moottorilla paljon hyviä puolia, kuten kompakti koko, hiljaisuus ja pitkäikäisyys (10, s. 1). Kuvassa 10 on vertailtu pienten, n. 200 W:n tehoisten moottorityyppien ominaisuuksia ja toimintaa.

Comparison of small-size industrial speed control motors


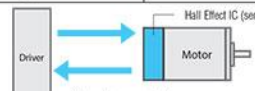
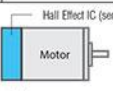
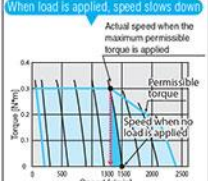
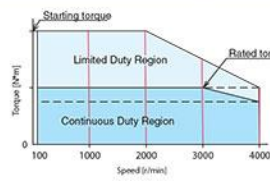
	Inverter + Three Phase Motor	Brushless Motor	Servo Motor
Composition / Structure / System	Three-phase induction motor + General-purpose inverter  Open-loop control	Sensor mounted to magnet motor (SPM type) + Dedicated driver The same as the servo motor except that Hall Effect IC (sensor)  Closed-loop control	Encoder is mounted to magnet motor (SPM type/IPM type) Encoder detects rotor position, more accurately than sensor. 
Control Function	Speed control with accuracy not required	Speed control (Torque control is partly possible)	Speed control, position control, torque control
Rotation Speed (speed ratio)	100–2400 r/min (1:24)	80–4000 r/min (1:50)	Up to 5500 r/min
Torque	 When load is applied, speed slows down Actual speed when the maximum permissible torque is applied Permissible torque Speed when no load is applied	 Starting torque Limited Duty Region Rated torque Continuous Duty Region Even if load is applied, consistent torque and speed are maintained.	
Price for Reference: Motor (w/ gear) + Driver	200 W - \$374 Comparatively inexpensive	200 W - \$441 Less expensive than servo motor	200 W - \$1,500 Comparatively expensive to other control motors (Different depending on the accuracy and output of encoder)
Motor Exterior	Induction motor	The same mounting as induction motor. Length (depth on the size of motor) is very short.	Mounting is small for its output. Length (depth on the size of motor) is very long.
Efficiency / Energy Saving Performance	Efficiency of induction motors is not high.	High efficiency thanks to permanent magnet motor	
Speed Regulation (lead)*	-3 ~ -15%	±0.2 ~ ±0.5%	±0.01%
Responsiveness	Low	High	High
Overrun	Yes, Large variations	Yes, Large variations	Performs highly accurate positioning
Suitable Operations	<ul style="list-style-type: none"> The main use is for operation at a fixed speed When speed needs to be changed quickly 	<ul style="list-style-type: none"> When speed changes, torque and speed are kept stable. Multi-speed operation 	<ul style="list-style-type: none"> Highly-responsive and high-precision positioning, speed control, and torque control Multi-speed operation

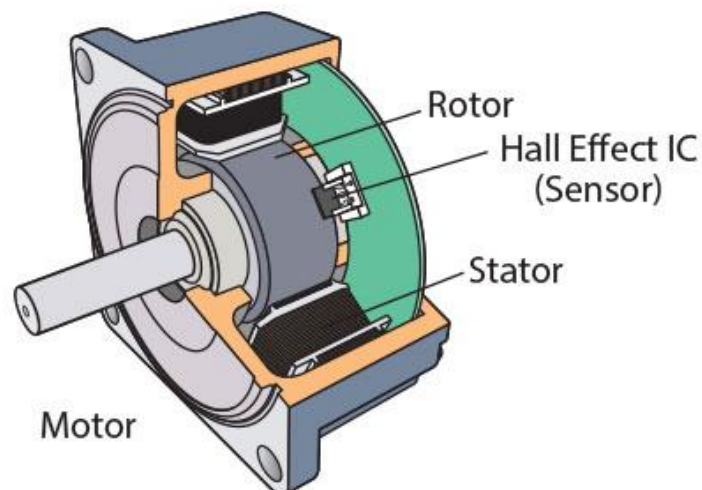
Table 1

Kuva 10. Pienten n. 200 W:n tehoisten moottorityyppien vertailu teollisuuskäytössä (15, s. 1).

Bldc-moottori asettuu ohjausominaisuuksiltaan induktiomoottorin ja servomoottorin väliin, servomoottorin ollessa paras ohjauksen kannalta. Nopeusominaisuuksiltaan bldc-moottori on parempi kuin induktiomoottori. Bldc-moottoreilla on paljon samoja ominaisuuksia kuin servomoottoreilla, mutta hinnaltaan bldc on huomattavasti edullisempi kuin servomoottori. (15, s. 1.)

Harjattoman dc-moottorin rakenne on melko yksinkertainen. Kuvassa 11 on esiteltyä moottorin rakenne. Roottoria, joka on tehty kestopagneetista, pyöritetään magneettikentällä, joka muodostuu staattorin käämeihin johdetusta virrasta. Harjallisessa dc-moottorissa (Dc-motor with brushes) virran kulku hoidetaan harjoilla ja kommutaattorin avulla. Kommutaattori on sijoitettu roottoriin, jossa sijaitsee ns. ankkurikäänitys. Ankkurikäänitys toimii päävirtapiirinä, jolloin roottoriin täytyy syöttää virtaa. Virta syötetään roottorille hiiliharjojen kautta, jotka ovat kosketuksissa kommutaattorin kanssa.

Bldc-moottorin Virranohjaukseen ohjain tarvitsee yleensä Hall-antureita, jotka on asennettu moottoriin. Takaisinkytkentä voidaan toteuttaa myös ilman antureita, jolloin moottorinohjain mittaa käämityksiltä takaisin tulevaa virtaa ja tätä tietoa apuna käyttäen päättää roottorin asennon. (16, s. 1.)



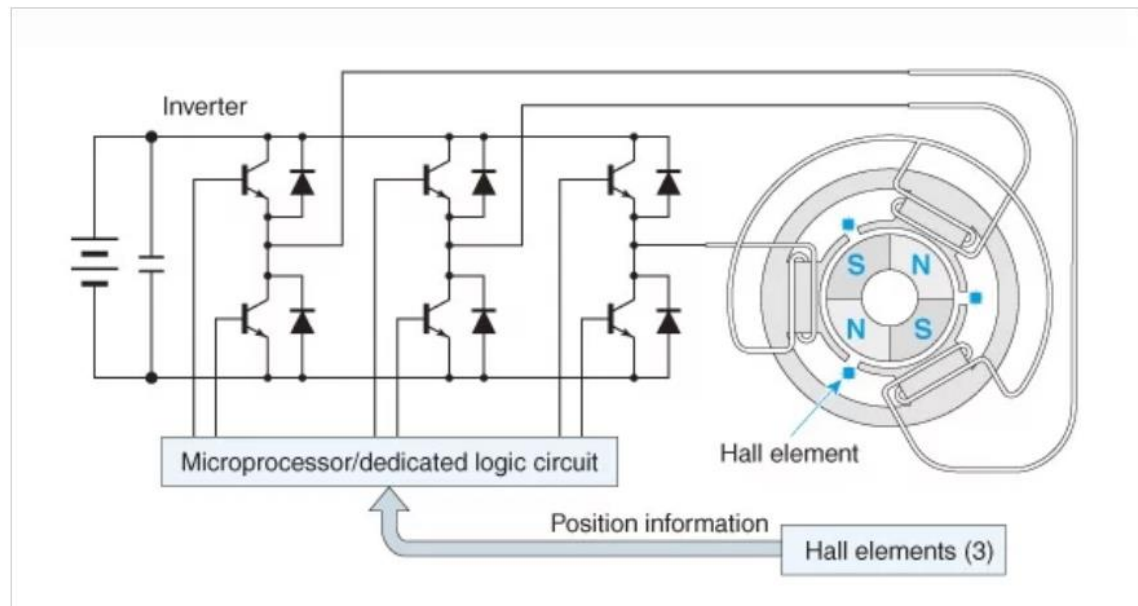
Kuva 11. Bldc-moottorin rakenne (15, s. 1).

Bldc-moottorien huonona puolena on, että moottoria ei voi ohjata suoraan tasasähköllä, vaan moottori tarvitsee ohjaukseen moottorinohjaimen. Moottoriohjaimen tehtävänä on ohjata moottorin kommutointia elektroniikan avulla. Moottoriohjain tarvitsee moottorilta takaisinkytkennän, jotta se tietää moottorin roottorin kulloisenkin asennon. Hall-anturin käyttö moottorissa on hyvä tapa tunnistaa moottorissa roottorin asento. Hall-antureiden tiedon perusteella moottoriohjain suorittaa virran syöttöä moottorin käämeille.

4.2 Bldc-moottoriohjaimet

Moottoriohjaimen tehtävä on ohjata valitun moottorin pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia. Harjattomissa tasavirtamoottoreissa ohjaus on toteutettu yleensä PWM-ohjauksena (Pulse Width Modulation), jossa ohjain säätelee moottorille annettavan jännitepulsin leveyttä. (17, s. 8.)

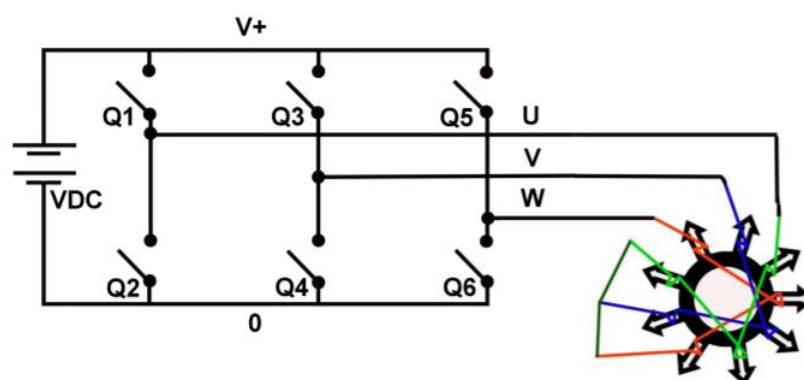
Harjattoman tasavirtamoottorin ohjaamiseen tarvitaan elektroniikkapiiri, joka säätää roottorin nopeutta. Kuten aikaisemmin mainittiin, roottorin asentotieto saadaan moottorilta Hall-antureiden avulla, joita moottorissa on kolme. Tämä asentotieto viedään mikroprosessorille, joka ohjaa moottorin staattorille kulkevaa virtaa. (17, s. 8.) Kuvassa 12 on selvennettyinä ohjaimen kytkentää.



Kuva 12. Ohjaimen kytKentä moottoriin ja takaisinkytkentä (18, s.1).

Ohjaimen saatua tiedon Hall-antureilta ohjaa se kuvassa 12 näkyviä bipolaaritransistoreja, jotka syöttävät moottorille virtapulsseja.

Bldc-ohjaimen toimintaa voidaan mallintaa kytkinmatriisin avulla. Kuvassa 13 on esitelty ohjaimen toimintaa yksinkertaistettuna. Kytkinmatriisissa kytkimiä Q1 - Q6 pyritään ohjaamaan pareittain. Kytkinmatriisin ylä- ja alapuolelta suljetaan kytkin, jotta moottorin käämityksille saadaan kulkemaan virta oikeaan aikaan.



Kuva 13. Kytkinmatriisi. Kuvan kaltaisella ohjauksella voidaan ohjata harjatonta tasavirtamoottoria (17, s. 21).

Esimerkiksi kun prosessori haluaa antaa signaalin moottorin käämitykselle U, täytyy sen sulkea kytkimet Q1 ja Q4. Tällöin virta kulkee käämitykseen U ja takaisin käämityksestä V. Jotta roottorin pyörimissuunta jatkaa myötäpäivään, täytyy seuraava askel ohjata kytkimillä Q1 ja Q6. Tällöin virta kulkee käämitykselle U ja takaisin ohjaimelle W:n kautta. Jotta moottori saadaan pyörimään myötäpäivään, täytyy taulukon 1 mukaista transistorien kytkentäjärjestystä noudattaa.

Taulukko 1. Ohjaustaulukko.

Vaihe	Johtavat kytkimet	Virran kulku-suunta
1	Q1, Q4	U-V
2	Q1, Q6	U-W
3	Q3, Q6	V-W
4	Q3, Q2	V-U
5	Q5, Q4	W-U
6	Q5, Q2	W-V

5 Akut

Akun tehtävä on varastoida sähköenergiaa sähkökemiallisessa muodossa. Kun akkua ladataan, muuttaa se sähköenergian kemialliseksi energiaksi ja käytettäessä toisin päin. Kemiallisessa sähköparissa jännitesarjan mukaan vähemmän jalo metalli syöpyy liuokseen jalomman pelkistyessä levyille. (19, s 7.)

Akkutyyppejä on useita ja jokaisella akkutyypillä on erilaisia sovelluksia etuineen ja haittoineen. Yleisimpiä akkutyyppejä ovat lyijyakku (Pb), nikkeli-kadmium-akku (NiCd), nikkelimetallihybridiakku (NiMH). (19, s. 8.) Tässä prototyypissä käytetään litiumioniakkua (Li-Ion) sen ominaisuuksien takia. Litiumioniakun tärkeimpänä ominaisuutena on korkea energiatiheys, jolloin akun paino saadaan pidettyä mahdollisimman pienenä suhteessa tarvittavaan akkukapasiteettiin.

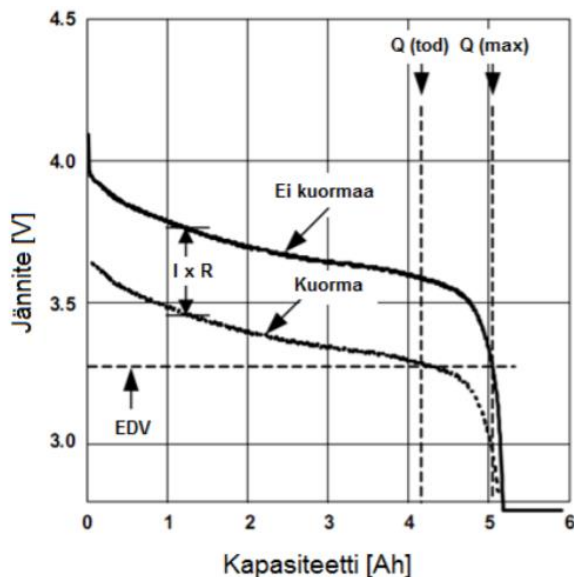
Litiumakku -nimitystä käytetään kaikista akuista, joissa litiumionit kuljettavat varauksia elektrodilta toiselle. Litiumakuissa käytetään useita litiumyhdisteitä, jotka vastaanottavat ja vapauttavat litiumyhdisteitä. Näiden materiaalivalintojen perusteella määräytyvät akun

ominaisuudet, kuten nimellisjännite ja -kapasiteetti, lataus- ja purkunopeus ja elinikä. (20, s. 1.)

5.1 Akkujen kapasiteetti

Akkujen kapasiteetti ilmoitetaan yleensä joko wattitunteina (Wh) tai ampeeritunteina (Ah). Esimerkiksi ampeeritunteina ilmoitettu kapasiteetti Ah kertoo, kuinka monta ampeeria akusta voidaan ottaa, jotta akku kestää tunnin ajan. Esimerkiksi 10 Ah:n akku kestää 10 ampeerin ottamisen akusta tunnin ajan.

Akkujen kapasiteetti on kuitenkin aina riippuvainen purkuvirrasta ja käyttölämpötilasta. Kapasiteetti on verrannollinen akun jännitteeseen. Akun jännite ei riipu pelkästään varauksen tasosta, siihen vaikuttaa myös akkua purkava virta. Mitä suurempi purkausvirta, sitä suurempi on akun jännitteenalenema. Jännitteenalenema taas on seurausta akun sisäresistanssista. Akkujen valmistajat määrittävät yleensä akun nimelliskapasiteetin purkamalla akkua vakiovirralla huoneenlämmössä, kunnes akku saavuttaa pienimmän jännitteen, EDV-jännitteen, jolla akku ei vaurioidu. (21, s. 12.) Kuvassa 14 on kuvattuna kuorman vaikutusta jännitteen alenemaan yhdessä litiumakun kennossa.



Kuva 14. Kuorman vaikutus akun kapasiteettiin (21, s. 13).

Tästä syystä akun kapasiteetti ei pysy vakiona purkuvirran kasvaessa. Akun lopullinen kapasiteetti on riippuvainen purkuvirrasta, ja akku on valittava aina sovelluksen mukaan. Arvioitaessa akun todellista kapasiteettiä voidaan apuna käyttää valmistajan ilmoittamia kuvaajia eri kuormilla. (21, s. 13.)

5.2 Akkujen lataus ja purkaminen

Yleisesti akkujen valinnassa eri sovelluksiin on tärkeää tietää akkujen kapasiteetin ja jännitteen lisäksi myös akun lataus- ja purkausvirroista. Laitteet ottavat akulta virtaa, jolloin laitteiston jatkuva virta ja hetkelliset piikkivirrat tulee tietää, jotta laitteistolle voidaan valita oikea akku.

Akuista ilmoitetaan yleensä C-arvo, joka kertoo akun maksimipurkausvirran. C-arvo ilmoitetaan suhteessa akun maksimikapasiteettiin. Esimerkkinä 1 C:n arvo tarkoittaa, että 10 Ah:n akkua voidaan purkaa 10 A:n virralla. 5 C:n arvo tarkoittaa siis 50 A:n maksimipurkausvirtaa. (22, s. 1.) Akuista voidaan myös ilmoittaa hetkellinen piikkivirran C-arvo, jolla akkua saa kuormittaa hetkellisesti tietyllä C-arvolla.

Akun maksimilatausvirta ilmoitetaan C-arvon avulla. Akun latausvirran arvo on aina pienempi kuin akun purkausvirta.

Litiumakkuja ladattaessa on otettava huomioon akkujen luonne epävakaina akkuna. Lataus- ja purkausvirtoja ei saa missään tapauksessa ylittää, jotta akku ei vaurioidu. Litiumakku ei myöskään kestä yli- tai alijännitettä. Tyypillisiä merkkejä akun vaurioitumisesta on akun epänormaali muoto tai pullistuminen sekä kuumeneminen ladattaessa. Litiumakkuja ladattaessa tulisi käyttää aina oikeaa latauslaitetta.

5.3 Litiumakkujen suojaus

Koska litiumakut ovat luonteeltaan epävakaita, on akuilla oltava aina suojapiiri. Suojapiirin tehtävä on suojata mm. ali- ja ylijännitteiltä sekä liialliselta lämpenemiseltä. Akkujen suojapiireillä on eroja. Paremmissa suojapiireissä on yleensä aina enemmän suojaavia ominaisuuksia kuin huonommissa, kuten akkukennojen tasaisen latauksen valvonta. (23, s. 1.)

Suojapiirin tehtävä on pitää akku hyvä kuntoisena sekä parantaa akun käyttöikä. Koska akut yleensä koostuvat useista akkukennoista, on suojauspiirin tehtävänä tasata kennojen välistä varaustasoa. Kun akun kaikkien kennojen varaustasot pidetään samalla tasolla ja yli- ja alilatausta vältetään, akkujen käyttöikä pitenee. (23, s. 1.)

5.4 Akkumarkkinat

Nyky aikaisten akkukäyttöisten sovellusten, kuten sähköpyörien ja sähköpotkulautojen aikakaudella akkujen markkinat ovat laajentuneet. Akkuvaihtoehtoja ja valmistajia on paljon. Suurin osa akuista valmistetaan Aasiassa, lähinnä Kiinassa. Vaikka itse akkujen valmistajia on paljon, hallitsee akkujen kennojen valmistusta suurimmaksi osaksi kaksi valmistajaa, Panasonic ja Samsung. Näiden kahden valmistajan kennoja on yleisesti pidetty turvallisimpina ja laadukkaimpina markkinoilla. (24, s. 1.)

Koska markkinat ovat laajat, on liikkeellä myös väärennöksiä ja netistä tilattavien akkujen valinnassa tulee olla varovainen. Yleisimpänä huijauksena käytetään akkukennon valmistajan väärentämistä. Akkuvalmistaja saattaa käyttää kennoja, joiden valmistaja on jokin tuntematon, epäluotettava valmistaja, mutta silti kennoihin on saatettu painattaa jonkin luotettavan ja tunnetun valmistajan tiedot. Väärennöstä on vaikea huomata kuin vasta myöhemmin, kun akku rikkoutuu tai menettää varaussykyään nopeammin kuin oli luvattu. Tässä vaiheessa takuu ei yleensä enää auta akun ostajaa, mikäli takuu akulle on annettu. (24, s. 1.)

6 Komponenttien valinta ajoneuvoon

Komponenttien valinnassa tämän prototyypin tärkein komponentti on sähkömoottori. Moottorin valinta ohjaa moottoriohjaimen ja akun valintaa. Moottoriohjain valitaan moottorin tarvitseman jännitetason ja tehon perusteella. Akun valintaan vaikuttavat valittu jännitetaso, arvioitu akkukapasiteetti sekä moottorin ja ohjaimen tarvitsema maksimivirta. Moottorin valinta vaikuttaa myös ajoneuvon rungon rakenteeseen.

6.1 Moottorin mitoitus ja valinta

Moottorin valinnassa tärkeintä on moottorilta vaadittavan tehon määrittäminen. Tehon määrittämisen hankaluutena on se, että tarkkaa vierimisvastusta on vaikea arvioida. Koska ajoneuvo kulkee käytössä pääosin joustavalla nurmialustalla, aiheuttaa se merkittävän vierimisvastuksen ajoittain.

Jotta ajamista vastustavista voimista saatiin jotakin arviota, pyrittiin käyttämään pyöräilyyn tarkoitettuja vastustaulukoita vastustavista voimista. Varsin käteväksi työkaluksi vastustavien voimien arvioimiseen osoittautui Analyticcycling.com:n pyöräilijään vaikuttavia voimia arvioiva laskuri.

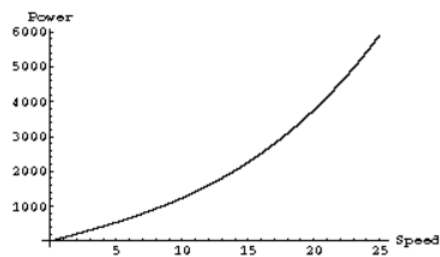
Oletuksena vastusten arvioimiseksi käytettiin kuljettajan ja tämän varusteiden massana 100 kg ja ajoneuvon kokonaismassana 30 kg. Golfajoneuvon oletetaan myös kulkevan pääosin tasaisella alustalla, jolloin nousukulmaa ei huomioida. Vaadittava nopeus on 20 km/h. Ajajan ja ajoneuvon peittämäksi pinta-alaksi edestä katsottuna arvioidaan 0,7 m². Ilmantiheyden arvioidaan olevan merenpinnan tasolla 1,226 kg/m³. Vierintävastuskertoimenä käytetään arvoa 0,08, jonka arvioidaan olevan auton renkaan ja keskikovan maaperän välinen vierintävastus. Koska ajoneuvon rakentamisessa tullaan käyttämään leveää rengasta, on auton renkaan vierintävastus lähimpänä ajoneuvossa käytettävää rengasta. (25, s. 1.)

Nämä tiedot vietiin Analyticcyclingin.com laskuriin. Taulukossa 2 on esiteltyinä laskurin antamat vastustavat voimat ja tarvittava teho moottorille.

Taulukko 2. Analyticcycling.com:in laskurin tulokset vastustavista voimista (26, s. 1).

Forces On Rider

Frontal Area	0.70 m ²
Coefficient Wind Drag	0.50 dimensionless
Air Density	1.226 kg/m ³
Weight	130.0 kg
Coefficient of Rolling	0.080 dimensionless
Grade	0.000 decimal
Wind Resistance	6.6 kg m/s ²
Rolling Resistance	102.0 kg m/s ²
Slope Force	0.0 kg m/s ²
Cadence	0. rev/min
Crank Length	190. mm
Pedal Speed	0.00 m/s
Average Pedal Force	ComplexInfinity kg m/s ²
Effective Pedaling Range	70. degree
Effective Pedal Force	ComplexInfinity kg m/s ²
Speed	5.55 m/s
Power	602.7 watts



Laskurin tuloksen mukaan, vierintävastus on suurin vastustava voima. Tätä tulosta tulee pitää arviona, koska tarkkaa vierintävastusta on vaikea määrittää. Laskurin antamat tiedot varmistettiin laskemalla vastaavilla arvoilla vierintävastus, ilmanvastus ja teho. Jos vierintävastuskerroin tiedetään, voidaan vierintävastus laskea kaavalla 1.

$$F_r = c m g \quad (1)$$

F_r on vierintää vastustava voima (N)

c on Vierintävastuskerroin

m on ajajan massa (kg)

g on putoamiskiihtyvyyys ($9,81 \text{ m/s}^2$).

Myös ilmanvastuksen aiheuttama vastusvoima voidaan laskea kaavalla 2, mikäli ajajan ja ajoneuvon peittämä pinta-ala tiedetään, sekä ilmanvastuskerroin on tiedossa. Lisäksi tulee tietää ilmantiheys ja ajoneuvon nopeus.

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

F_d on Ilmavastus (N)

ρ on ilmantiheys (1.226 kg/m^3 merenpinnan tasossa)

v on ajajan nopeus (m/s)

A on ajoneuvon ja ajajan pinta-ala (m^2)

C_v on ilmanvastuskerroin.

Kaavasta huomataan, että ilmanvastus kasvaa nopeuden neliössä. Tällöin hitailla nopeuksilla ilmanvastuksen merkitys vastusvoimana ei ole merkittävä. Koska ilmanvastuskertoimen määrittäminen rakennettavalle ajoneuville oli vaikeaa, käytettiin kertoimena 0,5, jota Analyticcycling.com:n laskuri ehdotti käytettäväksi, mikäli kerrointa ei tiedetä. Myös ajoneuvon ja ajajan pinta-ala arvioitiin. Analyticcycling.com:n laskurin mukaan pyöräilijän pinta-ala on $0,4 \text{ m}^2 - 0,7 \text{ m}^2$, joten laskenta-arviossa tyydyttiin käyttämään tämän arvion maksimia, $0,7 \text{ m}^2$.

Moottorilta vaadittava teho saadaan laskelmalla kaavalla 3. Laskentaan tarvitaan ajoneuvon kulkua vastustavat voimat sekä ajoneuvolta vaadittava nopeus.

$$P = F_T v \quad (3)$$

F_T on moottorin voima (W)

F_T on ajoneuvon kaikki kulkua vastustavat voimat (N)

v on ajoneuvolta vaadittava nopeus (m/s).

Laskettaessa teho kyseisillä kaavoilla moottorin tarvittavaksi tehoksi saatiin n. 600 W. Tätä arvoa voidaan pitää minimiarvona moottorille, koska golfkentän vierimisvastus saattaa nostaa tarvittavaa tehoa. Tosin ylämäissä ajettaessa voidaan olettaa, että kuljettaja voi astua ajoneuvon päältä pois, jolloin ajoneuvon massa on ainoastaan 30 kg. Tarvittaessa kuljettaja voi myös avustaa ajoneuvon kulkua jyrkissä mäissä, jolloin nousukulmaa ei tarvitse ottaa huomioon moottorin mitoituksessa.

Mietittäessä ajoneuvon mahdollisimman yksinkertaista toteutusta oli ajoneuvon rungon kannalta helpoin toteutus käyttää ajoneuvossa napamoottoria. Tällöin ajoneuvon rakentamisessa ei tarvitse huolehtia välityksien rakentamisesta. Ajoneuville päätettiin valita napamoottori, joka on asennettu tarkoitukseen mahdollisimman hyvin sopivaan renkaaseen. Tällöin myös renkaan muoto ja koko ohjasi moottorin valintaa.

Vaihtoehtoina ajoneuvon rengas-napamoottoriksi oli kolme eri vaihtoa: Peipeis-scooterin phub-147, Chengdu Lunyeen LY145 ja Annou biken CXZ-M3. Rakenteeltaan kaikki vaihtoehdot olivat samankaltaisia. Ainoastaan renkaiden koko ja tehovaihtoehdot erosivat vaihtoehdoissa. Kaikki vaihtoehdot olivat kiinalaisvalmisteisia. Taulukossa 3 on vertailtu moottorien ominaisuuksia.

Taulukko 3. Rengas-napamoottorien vertailu.

Merkki	Phub-147	Ly145	CXZ-M3
Max teho	600 W	800 W	600 W
Jännitetaso	24 – 60 V	24 – 48 V	24 – 48 V
Max nopeus	20 - 35km/h	Ei tiedossa	20 km/h
Jarru	Sähköinen/mekaaninen	Sähköinen	Mekaaninen/sähköinen
Renkaan koko	10 x 6.0-5,5	14,5 x 7,0-6	14,5 x 7,0-6
Hinta	243 €	211 €	322 €

Taulukossa 3 ilmoitettuihin hintoihin on laskettu kaikki kulut, kuten rahti ja tullimaksut. Moottoreita tilattaessa moottorien jännitetaso oli usein valittavissa. Moottoreista pystyi valitsemaan, asennetaanko niihin vaihteisto, jolloin myös nopeus ja vääntöominaisuutta pystyi hieman tilattaessa valitsemaan. Moottorivaihtoehtoina oli myös tehokkaampia moottoreita, mutta niiden hinnat olivat huomattavasti kalliimpia tai renkaan muoto ja koko rajasi moottorin pois.

Ajoneuvon valittavan rengas-napamoottorin renkaan koolla ja muodolla oli iso rooli. Renkaan tuli olla mahdollisimman leveä, mutta vannekoon ei välttämättä kovinkaan suuri, jotta ajoneuvon painopiste saadaan mahdollisimman alas. Myös renkaan kuviointi ei saanut olla liian iso, jotta golfkentän nurmikkoon ei jäisi painaumuksia ajettaessa.

Parhaana vaihtoehtona rengas-napamoottoriksi pidettiin Peipeis-scooterin Phub-147:ää. Kuvassa 15 esiteltynä valittu rengas ja napamoottori.



Kuva 15. Ajoneuvon valittu rengas-napamoottori (27, s. 1).

Valitun moottorin hyvä puoli oli, että renkaaseen on mahdollista asentaa levyjarru mekaanista jarrutusta varten. Lisäksi renkaan muoto on tarvittavan kaltainen. Rengas on leveä ja matala profiilinen. Moottorin jännitetasoksi valittiin 36 V ja tehoksi suurin mahdollinen 600 W.

6.2 Moottoriohjainten vertailu ja valinta

Moottoriohjaimen valinta tehtiin valitun moottorin perusteella. Ohjaimen tuli kestää 600 W:n teho, sekä maksimissaan hetkellinen 32 A:n virta moottorille. Lisäksi ohjaimen tuli toimia 36 V:n jännitetasossa. Ohjaimen valinnassa oli tärkeää, että ohjaimella on mahdollisuus jarruttaa moottoria sähköisesti. Ohjaimen oli hyvä antaa tietoa mm. akun varustasosta sekä mahdollisesti ajoneuvon nopeudesta.

Käytännössä moottoriohjaimen valinnassa ei ollut montaa vaihtoehtoa. Koska suurin osa harrastesähkömoottoreista ja näiden ohjauselektronikasta valmistetaan Kiinassa, tuli moottoriohjain tilata myös kiinalaiselta valmistajalta. Vaihtoehtoja moottoriohjaimeksi oli kaksi: Greentimen valmistama 600 W motor bldc controller ja L-fasterin 800W bldc controller kit. Molemmissa moottoriohjaimissa oli mahdollisuus räätälöidä ohjain moottorin tehon ja jännitetason mukaan. Lisäksi molemmissa ohjaimissa oli lähes samat ominaisuudet, mutta ainoana erona L-fasterin moottoriohjaimessa oli, että ohjaimen mukana

tuli kaikki tarvittavat hallintalaitteet moottorihjaimen ohjaamiseen. Greentimen ohjaimen hinta kaikkien kulujen jälkeen on 22 € ja L-fasterin ohjaimen 91 €

Hintaerosta huolimatta valinnassa päädyttiin L-fasterin moottorihjainsarjaan, joka on esitetty kuvassa 16. Moottorihjaimen mukana tuli myös LCD-näyttö ja nopeudensäädin.



Kuva 16. Valittu moottorihjainsarja (28, s. 1).

Ohjaimen valinnassa oli tärkeää, että ajoneuvoa rakennettaessa ei tule ongelmia yhteensopivuuksien kanssa. Tämän takia oli järkevää valita sarja, jossa mukana on kaikki tarvittavat komponentit, vaikkakin hinta oli 69 € kalliimpi kuin Greentimen moottorihjaimen.

6.3 Akun valinta ja vertailu

Koska akun tärkein osa on akkukenno, oli tärkeää valita akku niin, että pystyy varmistumaan kennonvalmistajasta. Huono kenno saattaa olla vaarallinen, koska se saattaa räjähtää ladattaessa tai purettaessa akkua.

Koska akku tuli olemaan todennäköisesti kallein osa ajoneuvossa, tuli sen hankinta miettiä tarkkaan. Koska kentän vierintävastusta on vaikea määrittää ja tarkkaa ajoneuvon sähkönkulutusta ei tiedetä, on mietittävä, miten toimitaan, mikäli hankitun akun kapasiteetti ei olekaan riittävä. Tällöin akkukapasiteetti on oltava laajennettavissa.

Valittaessa akkua ajoneuvon on tärkeimpinä seikkoina akun hinta, turvallisuus ja saavuus. Ulkomailta tilattaessa akkujen hinnat ovat selkeästi halvempia kuin Suomesta

toimitettavat akut. Ulkomailta tilattavien akkujen muodoissa on paljon enemmän valinnan varaa kuin Suomesta tilattavien, jolloin oikeanmuotoisen akun löytäminen ulkomailta on tässä tilanteessa helpompaa kuin Suomesta tilattavien.

Ulkomailta tilaamisen huono puoli on akkujen luotettavuus. Ulkomailta hankitun akun riskinä on, että akku on huonolaatuinen. Tällöin akun palauttaminen tai vaihtaminen on ongelmallista. Tästä syystä akku pyritään hankkimaan Suomesta, mutta akkujen hintoja on syytä verrata ulkomailta hankittaviin akkuihin.

Koska akun on ehdottomasti kestävä koko golfkentän kiertäminen, tulee akun olla tarpeeksi suuri. Esimerkkinä Peuramaa golfin pisimmän kentän Porkkalan kokonaispituus on 6127 m. Tähän lisättyä väylien välissä tapahtuvat siirtymät, on kokonaispituus n. 8 kilometriä. Mitoitus on tehtävä vähintään niin, että ajoneuvolla pääsee koko kierroksen akun loppumatta.

Akun kapasiteetin laskemisessa käytettiin samoja oletusarvoja vastustavista voimista kuin moottorin mitoituksessa. Ajoneuvolla lasketaan tasaisella vauhdilla ajettavan 20 km/h tasaista nopeutta tasaisessa maastossa. Tällöin tuulenvastuksen arvona on 6,6N ja vierintävastus 102,0 N. Ajoneuvolta vaadittava teho on tällöin 602,7 W. Jotta ajoneuvolla päästään 8 kilometrin matka 20 km/h:n vakionopeudella, on akun kapasiteetin oltava siis teoriassa vähintään 241 Wh:n kokoinen.

Koska arviossa ei oteta huomioon mm. moottoriohjaimen ottamaa tehoa tai akunpurkauksesta aiheutuvaa jännitteenalenemaa akussa, on akku syytä mitoittaa hieman suuremmaksi. Valittava akku pyritään mitoittamaan yli 300 Wh:n suuruiseksi.

Akkuvaihtoehtoina ajoneuvoille oli kolme akkua. Taulukossa 4 on esiteltynä näiden akkujen vertailutiedot, jotka toimittajat akuista antoivat.

Taulukko 2. Akkuvaihtoehdot ajoneuvoon.

	Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 2	Vaihtoehto 3
Merkki	Panasonic	GZR	Kedanone
Kapasiteetti	12Ah	10,4Ah	10,0Ah
Paino	2,3kg	2,6kg	2,0kg
Koko	220mm*85mm*120mm	380mm*40mm*100mm	185mm*75mm*65mm
Jatkuva virta ulos	25A	Ei tiedossa	30A
Akkukennot	Panasonic 18650 LiM-nCo	LG	Ei tiedossa
Hinta	325 €	189 €	86 € + Rahti
Toimittaja	e-spin.fi, Suomi	Verkkokauppa.com, Suomi	Battery application store, Kiina

Vaihtoehdoista ajoneuvon akuksi valittiin GZR:n 10,4 Ah:n, 374 Wh:n sähköpyörän akku. Kuvassa 17 on esitettynä valittu akku. Tämä vaihtoehto oli luotettavuuden ja hinnan kannalta järkevin vaihtoehto. Vaikka Kedanonen akun hinta oli selvästi muita vaihtoehtoja edullisempi, oli akun valmistajan luotettavuus kyseenalainen, koska kennovalmistaja ei ollut tiedossa. Lisäksi ongelmien syntyessä on akun takuupalautus hyvin vaikeaa, koska toimittajan sijainti on Kiinassa. Panasonicin akku oli akkukapasiteetiltään paras akku ajoneuvolle, mutta akun hinta oli huomattavan paljon korkeampi muihin vaihtoehtoihin verrattuna.



Kuva 17. Ajoneuvoon valittu GZR Pedelec L -akku (29, s. 1).

Verkkokauppa.com:ltä kysyttiin lisätietoja valitusta akusta, mutta toimittaja ei suostunut näitä antamaan vedoten liikesalaisuuteen. GZR-merkki on Verkkokauppa.comin valmistama sähköpyörämerkki. Tästä syystä yritys ei voinut antaa tarkempia tietoja akun teknisistä tiedoista. (30, s. 1.) Näin ollen vaihtoehdon huonona puolena on, että oli oletettava akun kestää tarvittavan jatkuvan purkausvirran.

7 Ajoneuvon rakentaminen

7.1 Rungon rakentaminen

Ajoneuvon runko oli tarkoitus rakentaa mahdollisimman yksinkertaisena, jotta ajoneuvon paino pysyisi mahdollisimman pienenä. Rungosta oli myös tarkoitus tehdä mahdollisimman tukeva, kuitenkin kohdistamatta liikaa painoa itse golfkärryyn. Kuvassa 18 on esitelty napamoottorin kiinnitys, johon ajajan paino tulisi kohdistumaan pääosin.



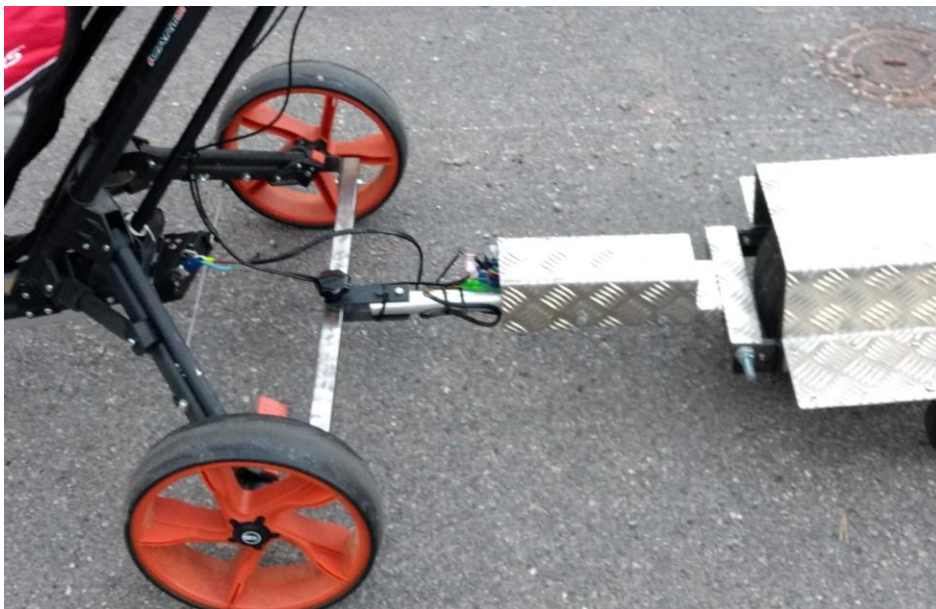
Kuva 18. Ajoneuvon runko. Napamoottori on kiinnitetty akselinsa varaan runkoon.

Golfkärryistä on pyritty yleensä tekemään mahdollisimman kevyitä, joten ne on yleensä mitoitettu kestäämään vain varusteiden aiheuttama paino kärrylle. Tästä syystä ajoneuvo tuli rakentaa niin, että suurin osa ajoneuvon ja ajajan painosta kohdistuu vain napamoottorin akselille.

Runko rakennettiin pääosin hitsaamalla. Moottorin akseli ja rungon kulmaosien kiinnityksessä apuna käytettiin pultteja, jotta napamoottori pystytään tarvittaessa irrottamaan rungosta.

7.2 Prototyypin kiinnitys golfkärryyn

Prototyypin kiinnityksessä golfkärryyn pyrittiin mahdollisimman yksinkertaiseen ratkaisuun. Koska golfkärryn rakenne itsessään on melko heikko, oli rakennetta vahvistettava ylimääräisellä metallirakenteella, joka on esiteltynä kuvassa 19. Metallitanko kiinnitettiin golfkärryn irroitettaviin renkaisiin, jolloin tanko on irrotettavissa, ja golfkärry pystytään edelleen taittamaan kasaan kuljetuksen ajaksi. Tanko liikkuu myös pystysuunnassa golfkärryyn nähden, jolloin rakenne on joustava liikuttaessa epätasaisessa maastossa.



Kuva 19. Prototyypin kiinnitys golfkärryyn.

Prototyyppi on kiinnitetty golfkärryyn alumiiniputken avulla. Kiinnitys mahdollistaa prototyypin liikkumisen vaakasuunnassa suhteessa golfkärryyn. Tällöin ajoneuvo ohjaaminen onnistuu kääntämällä golfkärryä ohjaustangosta. Alumiiniputki on myös irrotettavissa, jolloin prototyyppi mahtuu pienempään tilaan kuljetusta varten.

7.3 Moottorihjain, hallintalaitteet ja akku.

Moottorihjain oli järkevintä sijoittaa prototyypin runkoon, jolloin ajoneuvon kokoaminen ja purkaminen kuljetuksesta käyttöön oli mahdollisimman helppoa. Tällöin kuljetusta varten irrotettavien sähköliittimien määrä olisi vähäinen. Myöskään moottorihjaimen mukana tullut johtosarja ei mahdollistanut moottorihjaimen sijoitusta kauas itse moottorista. Ajoneuvon nopeudensäädin, LCD-näyttö ja jarruohjain sijoitettiin golfkärryn työntökahvaan. Kuvassa 20 on esitettyä nopeudensäätimen sijoitus golfkärryssä.



Kuva 20. Ohjainlaitteiden kiinnitys golfkärryyn.

Ajoneuvon akku sijoitettiin myös golfkärryyn. Tälle järkevin paikka oli golfkärryn pohjassa. Kuvassa 21 on akun sijoitus.



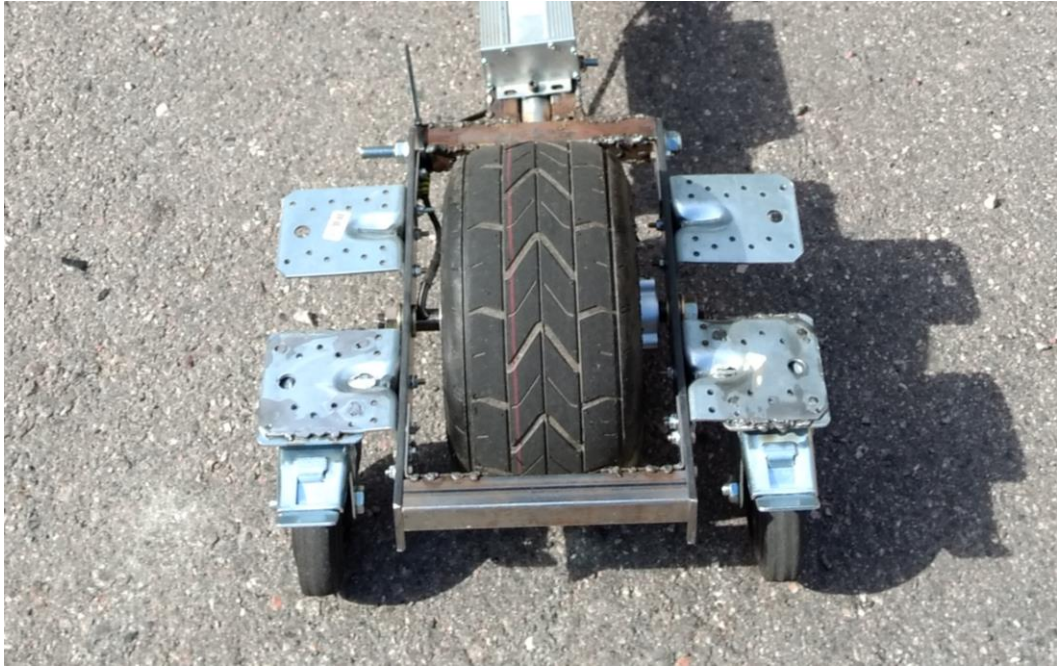
Kuva 21. Akun sijoitus golfkärryn pohjassa.

Akun sijoitus kärryyn mahdollistaa sen helpon irrottamisen latausta varten. Lisäksi tarvittaessa akkukapasiteettiä voitaisiin helposti lisätä, koska laajennukseen on varattu tarvittava tila.

Johdotus komponenttien välillä tehtiin komponenttien mukana tulleilla johtosarjoilla. Ainoastaan akun ja moottoriohjaimen välinen johdotus jouduttiin tekemään itse. Akun ja moottoriohjaimen johdotuksessa käytettiin 2,5 mm²:n paksuista kuparijohtoa.

7.4 Ajoneuvon lisätuenta ja mekaaninen jarru

Ajoneuvoa rakennettaessa huomattiin ongelma suunnitellussa yksipyöräisessä rakenteessa. Vaikka golfkärryn rakennetta vahvistettiin metallitangolla, oli ensimmäisten testusten perusteella ajoneuvo liian tasapainoton siihen astuttaessa. Tästä syystä prototyyppiin oli syytä rakentaa apupyörät, jotta ajoneuvon ajettavuus parantui. Kuvassa 22 on esiteltyinä apupyöräratkaisu.



Kuva 22. Ajoneuvon apupyörien sijoitus rungon taakse.

Apupyörinä käytettiin umpikumisia kalustepyöriä. Pyörät hitsattiin kiinni runkoon. Renkaat on mahdollista vaihtaa tarpeen vaatiessa.

Apupyörissä on mukana myös mekaaninen jarru, jota voidaan käyttää käyttöjarruna. Jarrut voidaan myös lukita, jolloin ajoneuvo voidaan pysäköidä niin, että se ei lähde liikkeelle.

8 Testaus

Ajoneuvolle suoritettiin kaksi ajotestiä. Ensimmäisen ajotestin tarkoitus oli testata ajoneuvon osien toimivuutta, ajoneuvon ajettavuutta ja akun kestävyttä. Toinen ajotesti tehtiin ajoneuvon käyttötarkoituksen mukaisesti golfkentällä oikealla golfkierroksella. Tämän testin tarkoitus oli testata ajoneuvon toimivuutta käytännössä ja hankkia palautetta kehitysideoiksi.

8.1 Ajoneuvon ominaisuudet ja ensimmäinen ajotesti

Ensimmäisessä ajotestissä ajoneuvon toimintaa pyrittiin selvittämään perustasolla. Tärkeimpänä tavoitteena oli, että ajoneuvon komponentit toimivat oikein, eivätkä aiheuta ongelmia varsinaisessa testissä. Toiseksi tärkeintä oli selvittää, minkälainen ajettavuus ajoneuvolla on. Mikäli ajettavuudessa on ongelmia, voidaan rakenteeseen tehdä vielä muutoksia. Kolmantena tavoitteena oli selvittää, oliko akun mitoitus oikea. Akun tulisi tässä testissä kestää vähintään golfkentän kiertämiseen tarvittava matka eli n. 8 km:n matka.

Ajotestin tavoite oli ajaa täydellä akulla asfaltilla niin pitkään kuin akun varaustaso laskisi niin alhaiseksi, että ajoneuvo ei kulje kuorma päällä. Kuormana ajoneuvolla oli ajaja (n. 85 kg) ja pelaajan varusteet, golfbägi ja mailat (n. 15 kg).

Ennen varsinaista testiä ajoneuvon ominaisuuksia testattiin lyhyellä ajolla. Tärkeimpänä oli varmistaa, että ajoneuvon jarrutus oli toimiva. Sähköinen jarru todettiin toimivaksi. Ajettaessa ajoneuvolla sähköinen jarru todettiin tarpeeksi tehokkaaksi, jotta sitä voidaan pitää ajoneuvon käyttöjarruna. Näin ollen ajaessa mekaanista jarrua ei tarvitse käyttää muuten kuin ajoneuvoa pysäköitäessä ylämäkeen sekä hätätilanteissa. Mekaanisen jarrun toiminta testattiin myös ajossa ja sen todettiin pysäyttävän ajoneuvo hätätilanteessa.

Jarrutuksen lisäksi testattiin moottorihjaimen antamien tietojen luotettavuutta ajoneuvon ohjaimen LCD-näytölle. Ohjaimen antamat tiedot olivat ajoneuvon nopeus, akun jännite, kuljettu matka sekä akulta otettu virta. Ohjaimen nopeustietoa voitiin pitää melko hyvänä. Tätä tietoa verrattiin puhelimen GPS-paikannuksen antamiin tietoihin. Nopeustietoa testattiin ajamalla 100 m:n matka tasaisella nopeudella 10 km/h:n, 20 km/h:n ja 23 km/h:n nopeudella. Ohjaimen antamaa tietoa verrattiin gps:n antamaan tietoon, joka erosi maksimissaan ± 1 km/h:n verran ohjaimen antamasta tiedosta. Tässä testissä ajoneuvon maksiminopeudeksi saatiin tasaisella 23 km/h.

Akun jännitteen tarkistelussa apuna käytettiin Fluke 325 -true-RMS-mittaria. Akun navoista otettiin napajännite, jota verrattiin ohjaimen antamaan jännitetietoon. Myös tätä tietoa voitiin pitää tarpeeksi luotettavana ajoneuvon käyttöä varten. Jännitemittausta

tehtiin akun eri kuormitustilanteissa ja mittauksien eron todettiin olevan eri tilanteissa maksimissaan $\pm 0,2$ V.

Ohjaimen antamat tiedot virrasta ja kuljetusta matkasta eivät olleet paikkansa pitäviä. Ohjaimen antama virran arvo ei ollut lähelläkään Fluke 325:lla tehtyä virran mittausta. Epäselväksi jäi, mitä tämä arvo todellisuudessa mittaa. Myös kuljetun matkan mittaus näytti huomattavasti enemmän kuin puhelimen GPS-mittaus, joten mittausta ei voida pitää luotettavana.

Ajotestin aikana pyrittiin seuraamaan komponenttien toimintaa ja lämpötilaa. Apuna lämpötilan mittaamisessa oli Black&Deckerin TLD 100 -infrapunalämpömittari. Lämpötila mittarilla pyrittiin varmistamaan, että mikään komponenteista ei ajon aikana kuumene niin, että komponentti rikkoutuisi. Mittauksia tehtiin noin 2 km:n ajon jälkeen moottorista, ohjaimesta sekä renkaan pinnasta. Havaittavaa lämpenemistä ei havaittu. Myös komponenttien toiminnassa ei ajotestin aikana havaittu muutoksia.

Ajotestissä ajettiin yhteensä 11,15 km:n matka. Matkan mittauksessa käytettiin puhelimen GPS-mittausta ja karttaa hyväksi. Ajotestin alussa akun napajännite oli 41,8 V, ja ajon päättyessä napajännite oli laskenut 36,1 V:iin. Tällöin ajoneuvon maksiminopeus tasaisella oli hidastunut 20 km/h:n tasolle, joten testaus päätettiin lopettaa. Ajoneuvoa olisi voinut vielä ajaa, mutta tämä nähtiin tarpeettomaksi, koska testille määritelty vähimmäismatka oli jo ylitetty.

Ajon aikana todettiin ajoneuvon hallinnan olevan hyvä ainakin asfaltille ajoon. Tiukoissa käännoksissä ajoneuvolla ajaminen vaatii hieman tasapainottelua, mutta yleensä ajamista pystyy pitämään yksinkertaisena. Ajoneuvon runko todettiin myös kestäväksi ja tukevaksi käyttötarkoitusta varten. Täten ajoneuvon runkoon tai rakenteeseen ei tarvinnut tehdä muutoksia ennen kenttätestiä.

8.2 Ajotesti golfkentällä

Toinen ajotesti oli kiertää ajoneuvolla kokonainen 18-reikäinen kierros Kirkkonummen Peuramaan golfkerhon Vanha peura -kentällä. Tarkoitus oli kerätä tietoa, miten ajoneuvo toimii käytännön oloissa ja miten akku kestää ajon kenttäolosuhteissa. Testi suoritettiin

normaalilla golfkierroksella, jossa mukana oli kolme muuta pelaajaa. Sää testin aikana oli puolipilvinen ja kuiva. Nurmikko oli testin aikana normaalissa kesätilassa, kuiva ja hyvin hoidettu. Ajoneuvon kuormana toimi sama kuorma kuin ensimmäisessä ajotestissä.

Jo testauksen alussa havaittiin, että golfkentällä ajettavan alustan vierintävastus oli huomattavasti korkeampi kuin asfaltilla. Ajoneuvon renkaat upposivat nurmialustaan odotettua enemmän. Tämä vaati huomattavasti enemmän tehoa moottorilta etenemiseen kuin asfaltilla. Moottorin momentti oli kumminkin riittävä kentällä etenemiseen, vaikka ajoneuvolla joutui ajamaan myös väylän ulkopuolella. Ajoneuvolla päästiin myös tavoitteena olleeseen 20 km/h:n nopeuteen kentällä, jota voitiin pitää kentälle sopivana vauhtina.

Vaikka vetävän renkaan kuviointi ajoneuvossa on hyvin kevyt, ei liikkeellelähdeissä ollut ongelmia ja pito oli tarvittava kentällä liikkumiseen. Tosin, määrällä kentällä pidon kanssa saattaa olla ongelmia. Ajettaessa jyrkkiä ylämäkiä kentällä (Peuramaan kenttä on rakennettu osin laskettelurinteeseen, jolloin mäet ovat poikkeuksellisen jyrkkiä.), ei ajoneuvo jaksanut aina mäkiä ylös. Tällöin ajoneuvon päältä oli astuttava pois ja kuljettaa ajoneuvoa sen rinnalla käveltäessä. Tätä ei koettu kovinkaan ongelmaiseksi asiaksi.

Kun ajoneuvolla oli ajettu n. 5 km:n matka oli akun jännite ohjaimen mukaan vähentynyt alle 37 V:n. Koska vierintävastus kentällä oli huomattavasti suurempi kuin ensimmäisessä ajotestissä, oli akun kapasiteetti laskenut jo oletettua nopeammin alhaiselle tasolle. Jotta akku ei loppuisi kesken kierroksen, ajettiin kärryä sen rinnalta, niin että kärryn painona oli ainoastaan golfvarusteet. Tällä tavoin toimittua, akku kesti kierroksen loppuun saakka ja ajoneuvolla pystyi vielä ajamaan kyydissä oltaessa viimeisillä rei'illä. Kierroksen jälkeen ohjain näytti akun jännitteeksi 35,7 V.

Yleisesti ajoneuvo oli toimiva golfkentän vaativassa ympäristössä. Ajoneuvo oli hiljainen eikä se aiheuttanut painaumia kenttään, jota voitiin pitää ongelmana. Koska ajoneuvo oli hiljainen, se ei myöskään häirinnyt muita kentällä olleita pelaajia. Ajoneuvo tosin aiheutti ihmetystä muissa pelaajissa, ja sitä tultiin ihmettelemään muilta golfväyliltä. Vastaanotto oli pääosin positiivinen pelaajien keskuudessa.

Akun nopea purkautuminen aiheutti hieman stressiä kentällä. Mikäli akku loppuu kesken kierroksen, prototyyppi pitää irroittaa golfkärrystä. Tästä syystä akku on tärkeä mitoittaa jatkossa niin, että se ei varmasti lopu kierroksen aikana.

9 Yhteenveto

Ajoneuvon prototyyppi oli toimiva, mutta kehitettävää jäi runsaasti, jotta idean kaupallistamista voidaan miettiä. Kuvassa 23 on esiteltyä valmis prototyyppi kiinnitettynä golfkärryyn.



Kuva 23. Valmis prototyyppi kiinnitettynä golfkärryyn.

Prototyypin rakentamisessa pysyttiin asetetussa budjetissa. Kokonaiskustannus prototyypille oli 571 €. Aikaisemmin valittujen komponenttien lisäksi prototyyppiin hankittiin metalliosia sekä kiinnikkeitä n. 30 €:n edestä. Lisäksi moottorihjaimen hankittiin erillinen nopeudensäädin, joka ohjasi sähköistä jarrua. Ohjaimen hinta oli 6 €.

Koska ajoneuvon akkukapasiteetti ei ollut golfkierroksen kannalta riittävä, tulee akkukapasiteettiä kasvattaa. Helpoin ratkaisu tähän on lisätä ajoneuvoon toinen 10,4 Ah:n kapasiteetin akku. Tämä ratkaisu tosin nostaa ajoneuvon kokonaishintaa n. 30 %. Tätä ratkaisua on pidettävä kuitenkin välttämättömänä käytettävyyden kannalta.

Golfajoneuvon painoa tulee myös keventää, jotta sen liikutteleminen on mahdollisimman vaivatonta. Prototyypin valmistuksessa käytettiin pääosin rautaosia, mutta runkorakenne pystytään oikeilla ratkaisuilla rakentamaan myös kevyemmästä alumiinista. Lisäksi renkaan ja moottorin kotelointia tulee miettiä tiiviimmäksi, koska ajettaessa nurmikolla, nostaa pyörivä rengas paljon irtoruohoa maasta, jolloin ruoho takertuu ajoneuvon eri osiin. Ratkaisuna on renkaan kotelointi niin, että kotelo olisi mahdollisimman lähellä rengasta. Näin irtoava ruoho jää koteloon.

Myös ajoneuvon kiinnittämiseen golfkärryyn tulee miettiä helpompi ratkaisu. Ratkaisun tulee olla säädettävä, jotta kiinnitys onnistuu mihin tahansa golfkärryyn. Tällöin tulee ottaa huomioon eri golfkärryjen rakenteet.

Nämä asiat huomioon ottaen, tulevaisuuden suunnitelmana on seuraavaksi rakentaa kokonaisuus, jossa yhdistyisi golfkärry sekä sitä työntävä osa. Tällöin kokonaisuus voidaan muokata mahdollisimman käytännölliseksi eikä liitettävyyttä tule ongelmaksi. Rakenne on näin helpompi suunnitella liikuteltavaksi.

Prototyypin rakentaminen antoi hyvät lähtökohdat jatkokehitykseen. Työn rakentamisessa selvisi paljon ongelmakohtia, joihin tulee paneutua seuraavan prototyypin rakentamisessa. Työn rakentamisen yhteydessä selvisi myös napamoottorin luomat mahdollisuudet vastaavanlaisten sähköisten ajoneuvojen suunnittelussa. Napamoottorien edulliset hinnat ja yksinkertainen toteutus mahdollistavat erilaisten sähköisten ajoneuvojen rakentelun. Tätä opittua tietoa pyritään jatkossa käyttämään hyväksi sähköisten ajoneuvojen harrastuksien parissa.

Lähteet

- 1 Golf Suomessa. 2018. Verkkoaineisto. Suomen golfliitto. < <https://golf.fi/pelaajalle/golf-suomessa/>>. Luettu 12.3.2018.
- 2 Suomen golfin strategia. 2016. Powerpoint-esitys. Suomen golfliitto.
- 3 Syväpuro, Outi. 2018. Peuramaa Golf Oy. Kirkkonummi. Sähköpostikeskustelu 21.12.2017
- 4 Sun Mountain Reflex golfkärä. 2018. Verkkoaineisto. Smartgolf.fi <<https://www.yterigolf.fi/palvelut/golfautot>>. Luettu 14.3.2018.
- 5 Sähkökärä. 2018. Verkkoaineisto. Golfbalance.fi. < <https://www.golfbalance.fi/tuotteet/karryt/sahkokarryt/6201/>>. Luettu 23.8.2018
- 6 Sähkökäyttöiset golfkärä. 2018. Verkkoaineisto. smartgolf.fi. < <https://www.smartgolf.fi/category/184/sahkokayttoiset-golfkarryt>>. Luettu 23.8.2018.
- 7 Golfautot. 2018. Verkkoaineisto. Yteri golf. < <<https://www.yterigolf.fi/palvelut/golfautot>>. Luettu 14.3.2018.
- 8 Onewheel. 2018. Verkkoaineisto. Xlkites.com < <https://www.xlkites.com/one-wheel/1146-onewheel.html>> . Luettu 14.3.2018.
- 9 Golfing hoverboard buddy. 2018. Verkkoaineisto. Youtube.com. <<https://www.youtube.com/watch?v=68hNKI0gsjl>>. Luettu 1.3.2018.
- 10 Electric scooters. 2019. Verkkoaineisto. ordermygiftonline.co.uk. <https://www.ordermygiftonline.co.uk/product/zipper-electric-scooters-for-kids-300w/>. Luettu 1.3.2019.
- 11 Drag Force Formulas. 1998. Verkkoaineisto. Rainer Pivit. <<https://www.sheldonbrown.com/rinard/aero/formulas.htm>>. Luettu 2.4.2019.
- 12 Electric motors with gearbox. 2019. Verkkoaineisto. Monsterscooterparts.com. <<https://www.monsterscooterparts.com/36vo10wadidr.html>>. Luettu 3.4.2019.

- 13 36V240W Electric hub motor. 2019. Verkkoaineisto. dhgate.com. <<https://www.dhgate.com/product/36v240w-electric-hub-motor-wheel-set-for/424077026.html>>. Luettu 8.4.2019.
- 14 Hub motors. 2019. Verkkoaineisto. electricbike.com. <<https://www.electricbike.com/hubmotors/>>. Luettu 9.4.2019.
- 15 Brushless DC Motors vs. Servo Motors vs. Inverters. 2019. Orientalmotor.com. Verkkoaineisto. electricbike.com. <<https://www.orientalmotor.com/brushless-dc-motors-gear-motors/technology/brushless-dc-motors-servo-motors-inverter.html>>. Luettu 10.4.2019.
- 16 Brushless motors. 2018. Verkkoaineisto. Nidec corporation. <<https://www.nidec.com/en-EU/technology/capability/brushless/>>. Luettu 17.8.2018.
- 17 Koski, Juha. 2010. harjattoman dc-moottorin ohjaus. Opinnäytetyö. Verkkoaineisto. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/16698/Koski_Juha.pdf?sequence=1/>. Luettu 17.8.2018.
- 18 Davis, Nick. 2017. All About BLDC Motor Control: Sensorless Brushless DC Motor Controllers. Verkkoaineisto. <<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/sensorless-brushless-dc-blDC-motor-control>>. Luettu 21.8.2018.
- 19 Rukundo, Roger. 2017. Li-akkujen lataus, purku ja lämpötilakäyttäytyminen. Opinnäytetyö. Verkkoaineisto. <<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/132184/Roger%20Rukundo%20Opinnaytetyon.pdf?sequence=1>>. Luettu 1.9.2018.
- 20 Kallio, Tanja ym. 2015. Litiumioniakku. Verkkoaineisto. <https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/131247/mod_resource/content/2/Ty%C3%B6%205%2C%20Litiumioniakku%2C%20ty%C3%B6hje.pdf>. Luettu 2.9.2018.
- 21 Matikainen, Juho. 2014. Litium-polymeeri- ja litium-rautafosfaattiakkujen käyttö kannettavassa audiolaitteessa. Kandidaatintyö. Verkkoaineisto. <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/95733/jm_kandi_final.pdf?sequence=2>. Luettu 17.8.2018.
- 22 A guide to understanding battery specifications. 2008. Verkkoaineisto. MIT electric vehicle team. <http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf>. Luettu 5.9.2018.
- 23 Akkujen suojapiirit. 2018. Verkkoaineisto. Greencycle.fi. <<https://www.greencycle.fi/page/57/akkujen-suojapiirit>>. Luettu 17.3.2018.

- 24 Akkujen kennoista. 2018. Verkkoaineisto. Greencycle.fi. < <https://www.greencycle.fi/page/55/akkujen-kennoista> >. Luettu 17.3.2018.
- 25 Rolling resistance. 2018. Verkkoaineisto. Engineer toolbox. <https://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html>. Luettu 17.3.2018.
- 26 Compton, Tom. 2001. Forces on rider. Verkkoaineisto. Analyticcycling.com < https://www.analyticcycling.com/ForcesPower_Page.html>. Luettu 17.3.2018.
- 27 10inch 10 inch 10*6.00-5.5 wide tyre BLDC brushless gearless dc wheel hub motor. 2018. Verkkoaineisto. Peipeiscooter.com < <https://www.peipeiscooter.com/10inch-wide-tyre-brushless-gearless-dc-wheel-hub-motor-36-60v-350w-600w-scooter-hub-motor-phub-147.html>>. Luettu 17.3.2018.
- 28 Electric-Bike-Thumb-Throttle-LCD-display-With-Controller-800W. 2018. Verkkoaineisto. Aliexpress.com < <https://www.aliexpress.com/item/450W-1000W-Electric-Bike-Thumb-Throttle-LCD-display-With-Controller-800W-Electric-Scooter-Brushless-Hub-Motor/32774188221.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.20b24c4dvd-jndp>>. Luettu 17.3.2018.
- 29 GZR Pedelec Battery L. 2018. Verkkoaineisto. Verkkokauppa.com < <https://www.verkkokauppa.com/fi/product/60171/hjmmh/GZR-Pedelec-Battery-L-vara-akku?list=OZCYkR9loqwZhTzthEDzJ9n6VKZWejNhEIFgZRd28h6Ub-vhnwjghh4UkhhHfnNf3MDx>>. Luettu 17.3.2018.
- 30 Harju, Juha. 2018. Verkkokauppa.com. Sähköpostikeskustelu 18.9.2018

