

SÄHKÖKÄYTTÖINEN KOTTIKÄRRY
Electric wheelbarrow
Eemeli Kettunen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Eemeli Kettunen
Sähkökäyttöinen kottikärry

2020

Kandidaatintyö.
25 sivua, 13 kuvaa, 4 taulukkoa
Tarkastaja: Professori Juha Pyrhönen

Sähköiset voimansiirtojärjestelmät ovat yleistymässä kovaa vauhtia ja korvaavat perinteisiä polttomoottorikäyttöisiä voimansiirtotekniikoita. Erityisesti sähköiset voimansiirtotekniikat ovat näkyneet teollisuuden ja liikenteen käyttökohteissa, mutta viime vuosina niiden osuus myös kevyen liikenteen kulkuneuvoissa, kuten polkupyörissä ja potkulaudoissa, on alkanut kasvaa.

Työ selvittää, millä edellytyksillä sähköistä voimansiirtojärjestelmää voisi hyödyntää tavallisessa kottikärryssä ja millaisilla komponenttivalinnoilla voimansiirtojärjestelmä olisi mahdollista tällöin toteuttaa. Selvityksessä perehdyttiin sähköisten kottikärryjen markkinatilanteeseen, sähköisen voimansiirtojärjestelmän teknisiin vaatimuksiin sekä voimansiirron eri komponenttien tekniikoihin. Työ toteutettiin soveltavana tutkimuksena.

Tutkimuksessa selvisi, että sähköisiä kottikärryjä on jo myynnissä muutamien valmistajien toimesta. Sähköisen voimansiirron suunnittelun perusta luotiin valitsemalla tekniset vaatimukset, jotka suunniteltavan järjestelmän tuli toteuttaa. Tekniset vaatimukset perustuvat realistisiin arvioihin normaaleista kottikärryn käyttöolosuhteista sekä jo olemassa oleviin toteutusratkaisuihin. Teknisiä vaatimuksia apuna käyttäen voitiin laskea järjestelmän maksimitehontarve, jonka avulla voitiin valita sopivat järjestelmän komponentit.

Sähköisen voimansiirron moottoriksi valikoitui vaihteistoon yhdistetty harjaton tasavirtamoottori ja energiavarastoksi litiumioniakku sekä näiden komponenttien vaatimat lisäjärjestelmät, kuten moottorinohjausjärjestelmä. Tutkimuksessa havaittiin lisäksi, että teknisten vaatimusten merkitys suunniteltavan järjestelmän toteutuksessa on merkittävä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT
School of Energy Systems
Electrical Engineering

Eemeli Kettunen

Electric wheelbarrow

2020

Bachelor's Thesis.

25 pages, 13 pictures, 4 tables

Examiner: Professor Juha Pyrhönen

Electric drivetrains are becoming common at a fast pace and are replacing traditional internal combustion engine drivetrain technologies. Electric drivetrain technologies have become common in the use of industry and transportation. During the past few years, their share has increased also within light traffic, such as in bicycles and scooters.

The paper investigates the requirements how an electric drivetrain could be utilized in a common wheelbarrow and what kind of component selections should be made to engineer such a powertrain. The process of investigation included an overview on the market situation of electric powered wheelbarrows, the technical requirements for the electric drivetrain as well as study on different component technologies of the drivetrain. The work was carried out as an applied research.

The study found that there already exist some electric powered wheelbarrows on the market by a few different manufacturers. The design process of the electric wheelbarrow was set up by selecting technical requirements that were to be fulfilled by the designed system. The technical requirements were based on a realistic estimate on the use of a normal wheelbarrow and on existing implementation solutions. Based on the selected technical requirements the maximum power requirement of the system could be calculated and therefore suitable components could be selected.

The motor of the electric powertrain was chosen to be a brushless direct current motor and lithium-ion battery was chosen as the energy storage of the system. These components also required some additional systems, such as motor control system. The study also concluded that the significance of the technical requirements played a remarkable part in the design of the electric powertrain.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	Johdanto.....	6
2.	Käsittely.....	10
2.1	Tekniset vaatimukset	10
2.2	Kottikärryn voimansiirron mitoitus	13
2.3	Käytettävien voimansiirron komponenttien valinta	16
2.3.1	Moottori ja vaihteisto.....	17
2.3.2	Akusto	19
2.3.3	Ohjaus ja kori	21
3.	Yhteenveto.....	23
	Lähdeluettelo	24

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

A_f	ajoneuvon etupinta-ala
C_d	ilmanvastuskerroin
C_r	vierintävastuskerroin
g	putoamiskiihtyvyys
h	korkeus
k_m	pyörimisinertian kerroin
l	pituus
m	massa
P	teho
p	paine
v	nopeus
α	nousukulma
ρ	tiheys

1. JOHDANTO

Kottikärry on yksipyöräinen kuljetusväline, jonka avulla painavankin massan siirtäminen paikasta toiseen onnistuu ilman suuria voimanponnistuksia. Varhaisimmat historialliset todisteet kottikärryn käytöstä löytyvät seinämaalauksen muodossa Kiinasta Han-dynastian aikakaudelta vuodelta 118 jaa. (Needham, 1965), mikä tekee kottikärrystä lähes kaksituhatta vuotta vanhan keksinnön. Tästä huolimatta kottikärry on nykypäivänäkin edelleen suuressa suosiossa oleva työväline.

Kottikärryn toimintaperiaate perustuu kolmeen hyvin yksinkertaiseen fysiikan mekanismiin: vipuun, pyörään ja kaltevaan tasoon. Vipu mahdollistaa painavan kuorman nostamisen pienellä voimalla, pyörä helpottaa kuorman siirtämistä ja kalteva taso helpottaa kuorman purkamista. Jokainen näistä mekanismeista on tärkeä osa kottikärryn toimintaa, eikä kottikärryn perustoimintaperiaate ole juuri muuttunut sen alkuaajoista tähän päivään.

Teknologia sen sijaan on ottanut suuria kehitysaskaleita vuosien varrella. Yksi muutosaloista on ollut perinteisten fossiilisia polttoaineita käyttävien voimanlähteiden korvaaminen joko täysin sähköisillä voimansiirroilla tai vaihtoehtoisesti hybridikäyttöillä, joissa sähkömoottori toimii yhdessä polttomoottorin kanssa. Sähkömoottorikäytöt ovat yleistyneet etenkin kaivos- ja meriteollisuudessa käytettävissä koneissa. Tämän lisäksi sähköiset voimansiirtojärjestelmät ovat yleistyneet myös kuluttajatasen tuotteissa, kuten henkilöautoissa, mutta myös kevyen liikenteen kulkuvälineissä, kuten polkupyörissä ja potkulaudoissa. Huomion arvoista on havaita, että sähköisiä voimansiirtoja on asennettu myös laitteisiin, joissa alkuperäinen voimanlähde ei ole fossiilinen polttoaine, vaan sen sijaan ihminen.

Herää kysymys siitä, olisiko sähköinen voimansiirtojärjestelmä mahdollista asentaa kottikärryyn, ja millaisilla komponenttivalinnoilla järjestelmä olisi mahdollista toteuttaa. Järjestelmän suunnittelussa tulisi ottaa huomioon kottikärryn käyttötarkoituksen lisäksi ainakin sen käyttöympäristö. Voisiko sähkömoottorikäyttöinen kottikärry korvata perinteisen ihmiskäyttöisen kottikärryn, vai onko järkevämpää pitäytyä koneessa, jonka toiminta on havaittu toimivaksi jo tuhansien vuosien ajan.

Internetin hakukoneen avulla selviää, että vaikka sähköisiä kottikärryjä ei vielä juuri näy missään, ei idea ole täysin uusi. Hakuosumia sähköisten kottikärryjen toteutuksista löytyy useita kappaleita. Sähköisten kottikärryjen valmistajista kone- ja tarvikevalmistaja Makita lienee nimekkäin. Lisäksi itsetehtyjen kottikärryjen rakentamista on dokumentoitu ja taltioidu esimerkiksi sosiaaliseen mediaan.

Kuluttajamarkkinoilla olevien sähkökäyttöisten kottikärryjen tutkiminen voi mahdollisesti antaa arvokasta tietoa oman sähköisen voimansiirtojärjestelmän suunnitteluun. Tällä tiedolla voidaan vähentää tarpeetonta arvailua suunnittelun lähtöarvoista, kuten esimerkiksi kottikärryn nopeudesta, kantamasta ja nousukulmasta. Tästä syystä tarkasteltaviksi laitteiksi on valittu vain ne kottikärryt, joista on saatavilla tarpeeksi olennaisia teknisiä tietoja. Tämä rajaus poistaa useimmat itse rakennetut kottikärryt tarkastelusta.

Kuvassa 1.1 on esitelty Makita LXT DCU180Z -kottikärry, joka on Makitan näkemys sähköavusteisesta kottikärrystä. Makitan laite poikkeaa hieman perinteisestä kottikärrystä sekä ulkomuodoltaan että varustukseltaan. Moottorin ohjausyksikkö sekä akkupaikat on sijoitettu ylös ohjaajan käsien väliin, mikä helpottaa akkujen vaihtamista, mutta tekee kottikärryn nos-

tamisesta raskasta. Kottikärryä ei kuitenkaan välttämättä tarvitse nostaa, sillä apupyörät helpottavat kottikärryn kuljettamista ja erillinen apurunko mahdollistaa pelkän kuorman kippaamisen.



Kuva 1.1 Makita LXT DCU180Z akkutoiminen kottikärry (Makita Oy Finland, 2020).

Teknisten tietojen mukaan sähköistä voimansiirtoa voidaan käyttää yhdellä tai kahdella Makitan omalla 18 V, 6.0 Ah irrotettavalla litiumioniakulla, millä saavutetaan jopa 7 kilometrin kantama. Laitteessa käytettävät akut ovat Makitan LXT-sarjaa, jota käytetään yleisesti muisakin Makitan akkukäyttöisissä työkaluissa. Laitteessa on kaksiportainen nopeusvalinta eteenpäin 3.5 km/h maksiminopeudella ja yksi nopeus taaksepäin. Laite pystyy 130 kg maksimikapasiteetilla nousemaan maksimissaan 12° nousukulmaa. (Makita Oy Finland, 2020).

Sveitsiläisen PowerPac:n Elektro-Dumper Typ ED120RG kottikärry kuvassa 1.2 muistuttaa ulkomuodoltaan hyvin paljon Makitan versiota. Suurin ulkomuodollinen eroavaisuus löytyy ohjausjärjestelmän ja akuston sijoituksesta kaukalon alle. PowerPac:n tapauksessa akun vaihtaminen onnistuu vain kaukalon kippauksella, joten on toivottavaa, että akku ei tyhjene juuri silloin, kun kottikärry on kuormattuna. Elektro-Dumperissa on Makitan tavoin erillinen apurunko helpottamassa kaukalon kippausta.



Kuva 1.2 Elektro-Dumper Typ ED120RG akkutoiminen kottikärry (PowerPac Schweiz, 2020).

Voimansiirtojärjestelmä toimii yhdellä 24 V, 10 Ah laitekohtaisella lyijyakulla, joka tarjoaa 3–5 tunnin toiminta-ajan. 230 W moottori tarjoaa datalehden mukaan 89 Nm vääntömomentin ja pystyy 35° nousukulmaan. Kottikärry kykenee 120 kg maksimikapasiteettiin ja moottoria pystyy ajamaan sekä eteen- että taaksepäin noin 3 km/h nopeudella. (PowerPac Schweiz, 2020).

Zipper Maschinen tarjoaa peräti kaksi variaatiota sähköisestä kottikärrystä, joiden eroavaisuuksia on käytännössä vain akun toiminta-aika. Tästä syystä tarkasteluun valittiin kuvassa 1.3 esitetty suuremman akkukapasiteetin ZI-EWB500-malli.



Kuva 1.3 Zipper ZI-EWB500 akkutoiminen kottikärry (Zipper Maschinen, 2020).

Zipperin kottikärry on ulkomuodoltaan lähellä perinteisen kottikärryn ulkonäköä. 24 V, 12 Ah lyijyakulla toimiva 500 W moottori pystyy 7 km/h kulkunopeuteen, mutta ei tarjoa mahdollisuutta peruuttaa sähköavusteisesti. Laitteen ilmoitettu toiminta-aika on 8 h. Pitkä toiminta-aika tulee tarpeeseen, sillä akku ei ole käyttäjän vaihdettavissa. Moottorin tehoksi on ilmoitettu 500 W ja kärryn maksimikapasiteetiksi 150 kg. (Zipper Maschinen, 2020).

Viimeisenä tarkastelussa on kuvan 1.4 Bravo Mobarrow POWER -sähkökäyttöinen kottikärry. Akkuna toimii 12 V, 22 Ah lyijyakku, joka ei ole käyttäjän vaihdettavissa. Täydellä latauksella saavutetaan jopa 6 tuntia käyttöaikaa. Moottorin teho on 300 W ja matkanopeus on 3.2–4 km/h. Mobarrow POWER ei mahdollista peruuttamista sähköavusteisesti. Kottikärryn maksiminousukulma täydellä 120 kg kuormalla on 35°. (Isolit-Bravo, 2020).



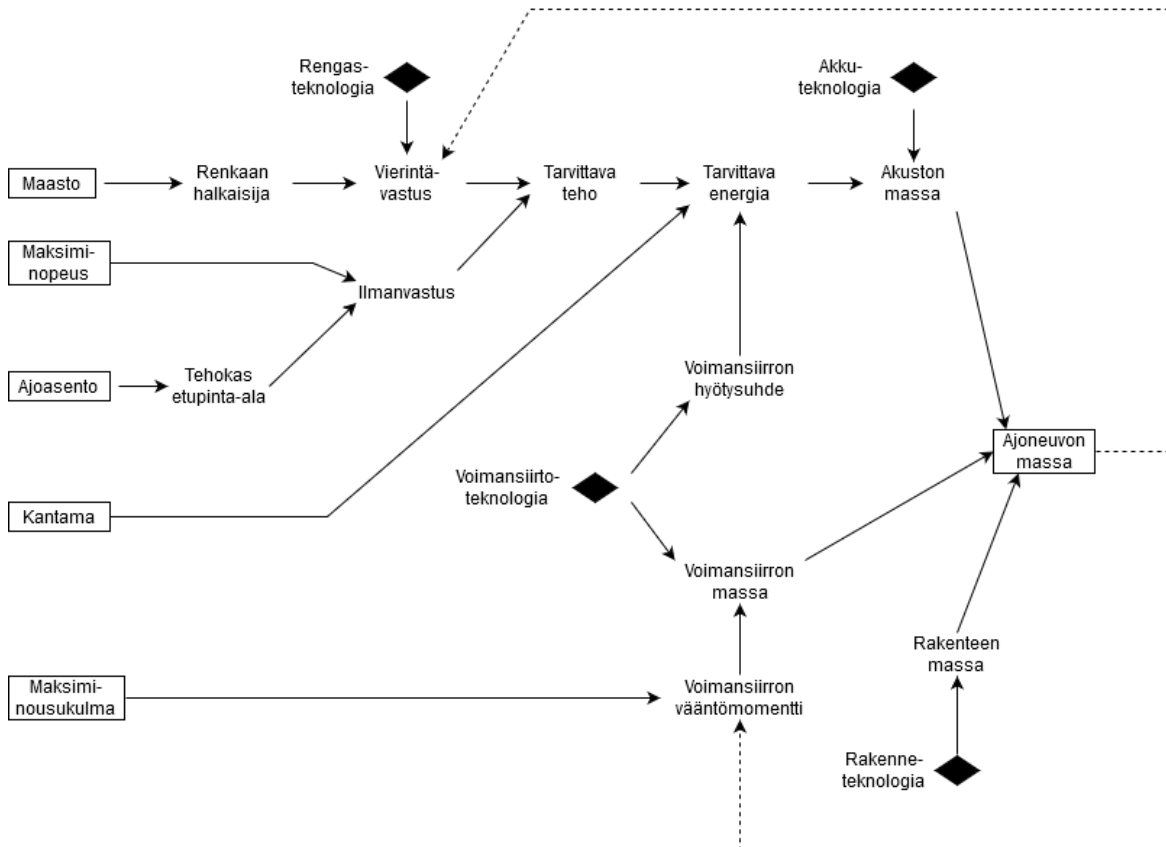
Kuva 1.4 Bravo Mobarrow POWER akkutoiminen kottikärry (Isolit-Bravo, 2020).

Bravon kottikärrystä löytyy ominaisuus, jota ei muista esitellyistä malleista löydy. Erikseen päälle kytkettävä regeneratiivinen jarrutus mahdollistaa kottikärryn jarruttamisen moottorin avulla esimerkiksi alamäessä. Samalla moottorin tuottama energia voidaan varastoida akkuun ja näin pidentää kärryn toiminta-aikaa.

Esitellyistä kottikärryistä voidaan huomata, että tekniset toteutukset vaihtelevat paljon mallien välillä. Teknisiä tietoja tutkimalla voidaan havaita, että ilmoitetut tiedot käytetyistä komponenteista ovat hyvin vähäisiä ja esimerkiksi käytetyistä moottoreista ei juuri löydy tarkempia tietoja. Kuvista 1.1–1.4 voidaan kuitenkin päätellä, että kaikissa malleissa käytetään renkaan vanteen sisälle asennettua napamoottoria. Myös osa annetuista tiedoista on hieman epäselviä, kuten toiminta-ajan ilmoittaminen tunneissa ilman tarkempaa tietoa käyttöasteesta.

2. KÄSITTELY

Sähkökäyttöinen ajoneuvokokonaisuus koostuu monesta pienemmästä tekijästä, kuten kuvassa 2.1 esitetyistä sähkökäyttöisen ajoneuvon massan kausaalimallista voidaan havaita. Tärkeimmät ajoneuvon massaun vaikuttavat komponentit voidaan tiivistää rengas-, akku-, voimansiirto- ja rakenneteknologioihin, mutta näidenkin välillä on sisäisiä riippuvuuksia. Voimansiirto- ja rengasteknologiat vaikuttavat suoraan tarvittavaan energiamäärään ja tarvittava energiamäärä vaikuttaa akkuteknologian kautta akuston massaun.



Kuva 2.1 Sähkökäyttöisen ajoneuvon massan kausaalimalli. Sekä suorituskyky että teknologiavalinnat vaikuttavat kokonaismassaun. (Ulrich, 2005).

Sähkökäyttöisen ajoneuvon suunnittelua on vaikea aloittaa ilman alkutietoja. Tämän työn osalta tällaisia tietoja ei ole ennalta asetettu, joten suunnittelussa on käytettävä apuna muualta saatavaa tietoa. Tässä kohtaa keskitytään suunniteltavan järjestelmän teknisiin vaatimuksiin. Kun sähköiselle voimansiirrolle asetetaan ennakkoon tiettyjä vaatimuksia, jotka suunniteltavan järjestelmän tulee täyttää, on suunnittelulle olemassa pohja. Tällöin järjestelmä voidaan mitoittaa ja komponenttien valinta tehdä vertaamalla komponenttien teknisiä tietoja sähköisen voimansiirron teknisiin vaatimuksiin.

2.1 Tekniset vaatimukset

Tämän työn tarkoituksena ei ole keksiä kottikärryä uudelleen, joten suunnittelun lähtökohdaksi valitaan tavallinen kottikärryn runko, kuten kuvien 1.3 ja 1.4 kottikärryissä on käytetty. Näin suunniteltava järjestelmä ei ole täysin riippuvainen käytetyn kottikärryn runkotyypistä, vaan se voidaan asentaa lähes mihin tahansa kottikärryyn vain pienillä muutoksilla.

Tutkimalla kotimaisten jälleenmyyjien kottikärrytarjontaa selviää, että myytävien kottikärryjen kaukalotilavuudet vaihtelevat 100 litrasta 120 litraan. Tarkastelun ulkopuolelle on jätetty rakenteeltaan kevyimmät sekä poikkeuksellisen suurella kaukalolla olevat kottikärryt. Käytetyllä rajauksella kottikärryjen ilmoitetut kantavuudet asettuvat vähintään samaan linjaan kappaleessa 1 tarkasteltujen kottikärryjen kanssa ollen noin 120–200 kg. (Isojoen Konehalli Oy, 2020) (STARK, 2020).

Tyypillisen maa-aineksen, joka koostuu enimmäkseen tasalaatuisesta hiekasta, tiheys on noin $1\,440\text{ kg/m}^3$ (Lindeburg, 2014). Jos 100-litrainen kottikärry kuormattaisiin täyteen tällaista hiekkaa, tulisi kuorman massaksi 144 kg. Keskimääräinen kotitalouskäyttö ei kuitenkaan edellytä näin suurien kuormien jatkuvaa siirtoa, eikä sähköistä voimansiirtoa joka tapauksessa ole järkevää mitoittaa lähelle kottikärryn rungon maksimikapasiteettia. Näin ollen, jos laitteelta edellytetään esimerkiksi 120 kg kuljetuskapasiteettia, voidaan voimansiirto suunnitella vaatimuksen mukaisesti. Kuljetuskapasiteetin päälle lasketaan kottikärryn ja voimansiirtojärjestelmän omamassa, mistä saadaan laskettua laitteelle kokonaismassa.

Kottikärryn kulkunopeus on järkevää mitoittaa perustuen käyttäjän luonnolliseen kulkunopeuteen. Kottikärryn operoiminen kävelynopeutta suuremmissa nopeuksissa voidaan todeta haastavaksi ja potentiaalisesti myös vaaralliseksi käyttäjälle ja muulle ympäristölle. Siten kulkunopeuden mitoittaminen ihmisen kävelynopeutta suuremmaksi on tarpeetonta. Luonnollisesti ihmisten kävelynopeuksissa on paljon eroavaisuuksia, mutta keskimääräisenä kävelynopeutena voidaan pitää noin 5 km/h, eli 1.4 m/s. Nopeuden lisäksi tarvitaan kiihdytysaika laitteen maksiminopeuteen. Ihmisen keskimääräisen kiihtyvyyden hänen liikkueksaan väkijoukossa on mitattu olevan noin 0.7 m/s^2 (Teknomo, 2002). Tällä kiihtyvyydellä kiihdytys 1.4 m/s nopeuteen kestää noin 2 s.

Kottikärryn tarvittavan nousukulman määrittäminen osoittautuu haasteeksi. Käyttökohteiden vaihdellessa yhtenäisen suunnittelukriteerin löytäminen tämän osalta on vaikeaa, ellei jopa mahdotonta, jos pohditaan pelkästään kottikärryjen mahdollisia käyttökohteita. Kappaleessa 1 käsiteltävien jo markkinoilla olevien sähköisten kottikärryjen maksiminousukulmat vaihtelevat 12° – 35° välillä, joten valitaan tältä väliltä 20° kulma ja tarkastellaan, mitä kyseinen nousukulma mahdollistaa. Eräs täysin mahdollinen skenaario kottikärryn käytölle on maa-aineksen lastaaminen auton perävaunuun. Käytettäessä ajosiltaa, nousukulma α lasketaan yhtälöllä

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{h}{l}\right), \quad (2.1)$$

missä

h lavan korkeus
 l ajosillan pituus

Tyypillisen auton kevytperävaunun lavan korkeus on noin 0.5 m ja peräkärryn ajoramppien pituudet keskimäärin vähintään 1.5 m (Isojoen Konehalli Oy, 2020). Näin nousukulmaksi saadaan yhtälöllä (2.1) 19.5° , joten 20° nousukulma kuormitettuna vaikuttaisi olevan kohtuullinen vaatimus voimansiirrolle. Kottikärryn ei kuitenkaan tarvitse pystyä nousemaan maksiminousukulmaa maksiminopeudessa, vaan vaatimuksena on ainoastaan kyky kulkea 20° kulmassa.

Kappaleessa 1 esiteltyjen kottikärryjen teknisissä tiedoissa on esitelty toiminta-ajan käsite, lukuun ottamatta Makitan kottikärryä, jonka teknisissä tiedoissa puhutaan kantamasta. Toiminta-aika on tässä tapauksessa hyvin harhaanjohtava käsite, koska se ei kerro oikeastaan juuri mitään laitteen toiminnasta. Toiminta-aika riippuu täysin sähköisen voimansiirron käyttöasteesta kyseisellä ajanjaksolla. Jos kottikärryä ajetaan kuormittamattomana tasaisella alustalla, on toiminta-aika huomattavasti enemmän kuin jos kottikärryä ajetaan täydellä kuormalla ylämäkeen. Lisäksi kottikärryn kiihdyttäminen kuluttaa vakionopeudella kulkua enemmän energiaa.

Paremmen kuvan kottikärryn toiminnasta antaa Makitan käyttämä termi kantama, eli kuinka pitkä matka kottikärryä voidaan sähköisellä voimansiirrolla ajaa yhdellä akun latauksella. Kantamankin yhteydessä voimansiirron käyttöasteella on suuri vaikutus, mutta kantama on helpompaa muotoilla tekniseksi vaatimukseksi. Makitan tapauksessa yhdellä 18 V, 6 Ah akulla saavutetaan 3.5 km kantama, mutta tässä ei ole täysin selvää, millä kuormituksella kyseinen kantama saavutetaan. Käyttäjän vaihdettavissa oleva akusto mahdollistaa sen, että kottikärryn toiminta ei rajoitu yhteen akun lataukseen. Yhdellä akulla saavutettavan kantaman tulisi kuitenkin olla riittävä, sanotaan 3 km, jotta akkuja ei tarvitse olla vaihtamassa koko aikaa. Sähköiselle voimansiirrolle asetetut tekniset vaatimukset on koottu taulukkoon 1.

Taulukko 1 Tekniset vaatimukset.

		Vaatimus
Huippunopeus	m/s	1.4
Kiihdytysaika 0–5 km/h	s	2
Kokonaismassa	kg	120
Nousukulma	°	20
Kantama	m	3000

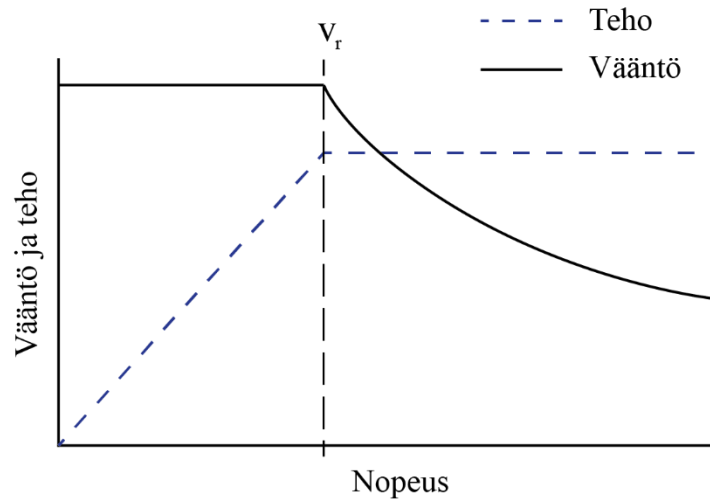
Myös laitteen käyttöturvallisuus tulee ottaa huomioon suunnittelutyössä. Toteutuksessa tulee varmistua siitä, että voimansiirtoa ei pysty esimerkiksi tahattomasti käyttämään. On myös varmistuttava siitä, että voimansiirto pysähtyy, mikäli käyttäjä ei kykene ohjaamaan kottikärryä. Näin voi tapahtua esimerkiksi tilanteessa, jossa käyttäjä kaatuu kottikärryä käytäessään.

Käytettävä akkutyyppejä vaikuttaa merkittävästi tarvittavaan suojauspiiriin ja sen toimintaan. Jotkin akkutyypit ovat rakenteeltaan ja toiminnaltaan herkempiä kuin toiset. Tällöin niiden käyttäminen vaatii enemmän suojaustoimintoja, jotta akku pysyy ehjänä ja ennen kaikkea sen käyttö on turvallista. Esimerkiksi litiumakun suojauspiiriin on estettävä akun purkautuminen katkaisujännitettä pienemmäksi, jolloin akusta tulisi käyttökelvoton. Litiumakun kohdalla suojauspiiriin on myös hallinnoitava purkuvirtaa, jottei se kasva suuremmaksi kuin, mitä akku pystyy luovuttamaan. (Greencycle Oy, 2020).

2.2 Kottikärryn voimansiirron mitoitus

Liikkuvan ajoneuvon toiminta voidaan jakaa kolmeen pääasialliseen alueeseen: alkukiihdytys, kulku nimellinopeudessa ja kulku maksiminopeudessa. Näiden osa-alueiden huomiointaminen sähköisen voimansiirron suunnittelussa tarkoittaa, että voimansiirto toimii riittävästi myös muilla mahdollisilla osa-alueilla. Kolmeen mainittuun alueeseen vaikuttavat suunnittelurajoitteet ovat ajoneuvon nimellinen nopeus, nimellinopeuden saavuttamiseen tarvittava aika, ajoneuvon maksiminopeus sekä ajoneuvon massa ja muut fyysiset ominaisuudet. (Ehsani;Rahman;& Toliyat, 1997).

Kuvassa 2.2 on esitetty sähkömoottorin vääntömomentti ja teho nopeuden funktiona. Sähkömoottorin tuottama nimellisivääntömomentti on vakio aina nimellinopeuteen asti. Samalla moottorin teho kasvaa lineaarisesti ja nimellisteho saavutetaan moottorin nimellisessä nopeudessa. Nimellinopeutta korkeammilla nopeuksilla moottorin teho on vakio, ja vääntömomentti pienenee kääntäen verrannollisesti moottorin nopeuteen.



Kuva 2.2 Sähkömoottorin vääntö ja teho nopeuden funktiona (Fasil, 2018).

Voimansiirron teknisten vaatimusten mukaiset käyttöolosuhteet vaativat moottorilta alhaista nopeutta, mutta suurta vääntömomenttia. Tästä syystä moottorin vakiotehoalue voidaan jättää huomiotta voimansiirron toteutuksessa, jolloin suunnittelussa käytettävä maksiminopeus on sama kuin moottorin nimellinopeus.

Moottorilta vaadittava kokonaisteho määräytyy usean eri tekijän summasta. Tehoa tarvitaan vierintä- ja ilmanvastuksen ylittämiseen sekä ajoneuvon kiihdyttämiseen. Lisäksi pinnan kaltevuus kasvattaa tai vähentää tarvittavan tehon määrää. Kokonaisteho voidaan ilmoittaa yhtälöllä

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{vierintä}} + P_{\text{ilma}} + P_{\text{kulma}} + P_{\text{kiihdytys}} \quad (2.2)$$

Vierintävastuksen ylittämiseen vaadittu teho voidaan approksimoida yhtälöllä (Ulrich, 2005)

$$P_{\text{vierintä}} = mgC_r v \quad (2.3)$$

missä

m	massa
g	putoamiskiihtyvyys, 9.81 ms^{-2}
C_r	vierintävastuskerroin
v	nopeus

Ilmanvastuksen aiheuttama tehohäviö voidaan laskea yhtälöllä

$$P_{\text{ilma}} = \frac{1}{2} \rho_{\text{ilma}} C_d A_f v^2 \quad (2.4)$$

missä

ρ_{ilma}	ilman tiheys
C_d	ilmanvastuskerroin
A_f	ajoneuvon etupinta-ala

Ilmanvastuskertoimen ja ajoneuvon etupinta-alan tuloa, eli tehokasta etu-pinta-alaa, voidaan käsitellä yhtenäisenä terminä (Ulrich, 2005). Pinnan kaltevuuden vaatima teho saadaan laskettua yhtälöllä (Ehsani;Rahman;& Toliyat, 1997)

$$P_{\text{kulma}} = mg \sin(\alpha) \quad (2.5)$$

Ajoneuvon kokonaismassan kiihdyttämiseen tarvittava teho voidaan laskea (Fasil, 2018)

$$P_{\text{kiihdytys}} = k_m m \frac{dv}{dt} \quad (2.6)$$

missä

k_m	pyörimisinertian kerroin
-------	--------------------------

Vaadittava kokonaisteho voidaan siis approksimoida muotoon

$$P_{\text{tot}} = mg C_r v + \frac{1}{2} \rho_{\text{ilma}} C_d A_f v^2 + mg \sin(\alpha) + k_m m \frac{dv}{dt} \quad (2.7)$$

Taulukossa 2 on esitetty voimansiirron mitoituksessa käytetyt arvot. Osa arvoista, kuten tyypillinen vierintävastuskerroin, on approksimoitu käyttäen apuna erilaisiin sähköskoottereihin tehtyä tutkimusta (Ulrich, 2005).

Taulukko 2 Voimansiirron mitoituksessa käytettävät arvot.

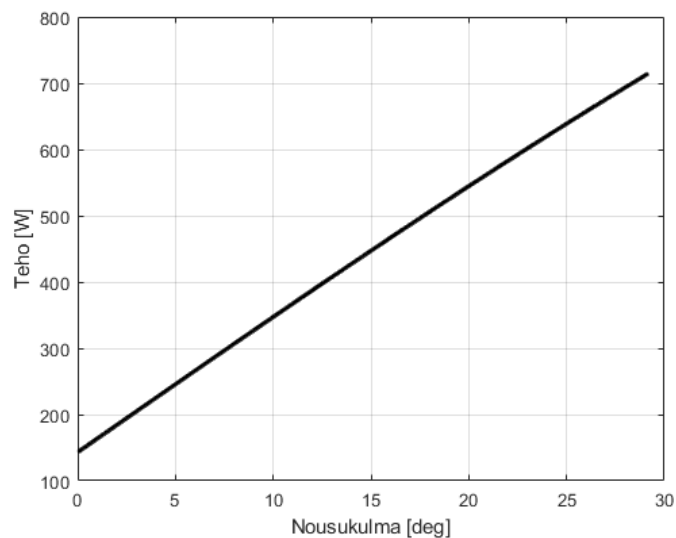
		Arvo
Kokonaismassa	kg	120
Tyypillinen vierintävastuskerroin		0.02
Maksiminopeus	m/s	1.39
Ilman tiheys	kg/m ³	1.225
Tyypillinen tehokas etupinta-ala	m ²	0.80
Pyörimisinertian kerroin		1.09
Tyypillinen renkaan halkaisija	m	0.33

Sijoittamalla taulukkojen 1 ja 2 arvot yhtälöihin (2.3)–(2.6) voidaan laskea eri tekijöiden kuluttamat tehot. Näiden lisäksi voidaan laskea vaadittu kokonaisteho kuljettaessa maksiminopeudessa tasaisella alustalla ja 20° kulmassa sekä vaadittu maksimiteho, joka saadaan kiihdytettäessä maksiminousukulmassa. Lasketut tehotarpeet on koottu taulukkoon 3.

Taulukko 3 Tehokomponenttien vaatimat arvot sekä kokonaistehot.

		Teho
$P_{\text{vierintä}}$	W	32.7
P_{ilma}	W	0.9
$P_{\text{kulma (pinta 20°)}}$	W	402.6
$P_{\text{kiihdytys}}$	W	90.9
$P_{\text{tot}} (v_{\text{max}}, \text{pinta } 0°)$	W	33.6
$P_{\text{tot}} (v_{\text{max}}, \text{pinta } 20°)$	W	436.2
$P_{\text{max}} (\text{kiihdytys, pinta } 20°)$	W	527.1

Kuljettaessa tasaisella pinnalla maksiminopeudessa tehoa tarvitaan vain 34 W. Hitaassa 5 km/h vakionopeudessa vierintävastuksella on selkeästi ilmanvastusta suurempi vaikutus tehotarpeeseen. Kiihdytys 0–5 km/h lisää tehotarvetta 91 W. Nousukulman vaikutus tehotarpeeseen voidaan nähdä kuvasta 2.3.



Kuva 2.3 Nousukulman vaikutus vaadittavaan kokonaistehoon.

Nousukulman vaikutus kokonaistehotarpeeseen on selkeästi suurin. Suunnitellussa 20° nousukulmassa tarvittava teho on 440 W. Tehotarve muuttuu lineaarisesti nousukulman muuttuessa. Maksimitehotarve 530 W saadaan tilanteessa, jossa kottikärryä kiihdytetään nousukulman ollessa maksimaalinen, eli vaatimusten mukainen 20°.

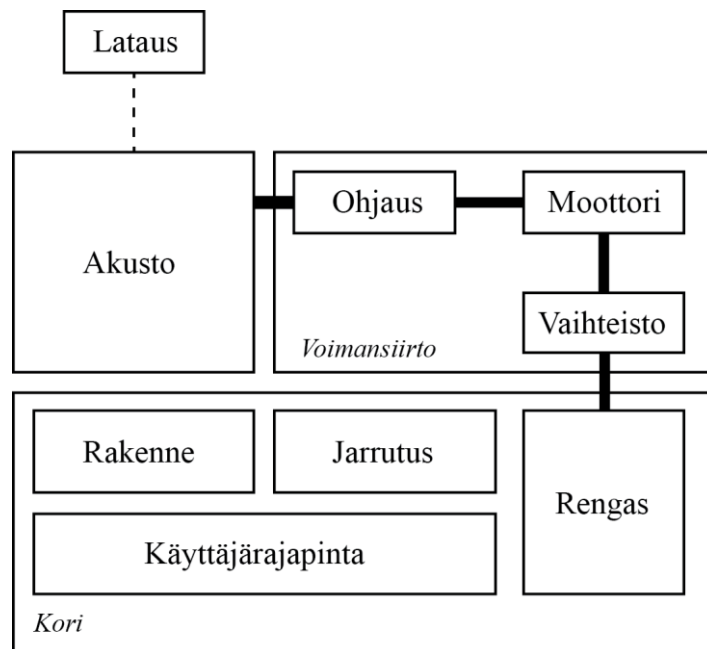
Kokonaistehoista voidaan laskea ominaisenergiankulutus jakamalla tarvittava teho nopeudella

$$E = \frac{P_{\text{tot}}}{v} \quad (2.8)$$

Tasaisella pinnalla maksiminopeudella kuljettaessa ominaisenergiankulutus on noin 24 J/m. Maksimiominaisenergiankulutus on vastaavasti noin 380 J/m. Lasketut arvot eivät sisällä voimansiirrossa tapahtuvia häviöitä, joita syntyy esimerkiksi moottorissa ja vaihteistossa. Tyypillinen voimansiirron hyötysuhde tässä kokoluokassa voisi olla noin 70–80 %, joten tarvittavaksi ominaisenergiankulutukseksi saadaan noin 30–500 J/m.

2.3 Käytettävien voimansiirron komponenttien valinta

Sähköinen voimansiirto on usean eri komponentin muodostama järjestelmäkokonaisuus. Kuvassa 2.4 on esitetty sähköajoneuvon järjestelmäarkkitehtuuri pääkomponentteineen. Akusto toimii järjestelmän energiavarastona. Akuston energia käytetään voimansiirrossa, joka koostuu moottorista, sen ohjausjärjestelmästä ja vaihteistosta. Loput järjestelmästä koostuu korista, johon on lueteltu sen rakenne, rengas ja jarrutus, unohtamatta käyttäjärajapintaa. Voimansiirron komponenttien valinnan pohjana käytetään ennalta asetettuja teknisiä vaatimuksia. Nämä vaatimukset koskevat erityisesti voimansiirtoa ja akustoa, mutta osittain myös korin komponentteja.



Kuva 2.4 Sähköajoneuvon järjestelmäarkkitehtuuri (Ulrich, 2005).

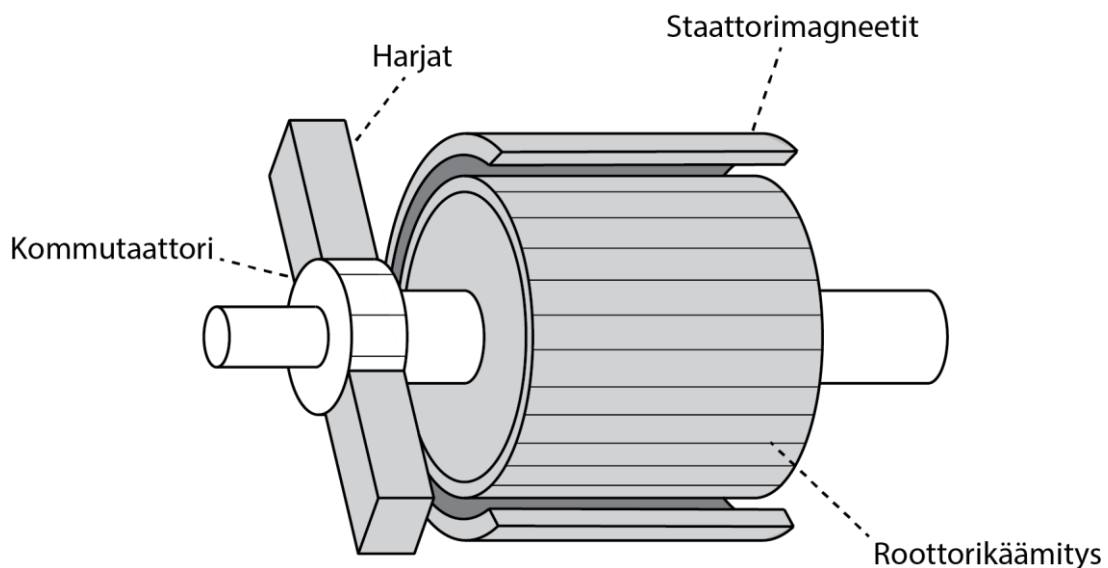
Ulrichin (2005) esittelemä järjestelmäarkkitehtuuri on vain suuntaa antava, mutta sen avulla suunnittelu voidaan jakaa useampaan pienempään välivaiheeseen. Näiden välivaiheiden jälkeen koossa on järjestelmäkokonaisuus, joka tässä tapauksessa on kottikärryyn soveltuva sähköinen voimansiirtojärjestelmä.

2.3.1 Moottori ja vaihteisto

Sähkömoottori muuttaa akustolta saatavan sähköisen energian mekaaniseksi energiaksi, eli renkaan pyörimiseksi ja sitä kautta laitteen liikkeeksi. Moottori voidaan asentaa osaksi voimansiirtoa joko suoravetoisesti tai vaihteiston välityksellä. Vaihteiston yhtenä tarkoituksena on vaihtaa nopeutta vääntöön ja päinvastoin, jolloin pienelläkin nopeasti pyörivällä moottorilla voidaan saavuttaa laitteiston vaatima suuri vääntömomentti. Pyörimisliikkeen suunnanvaihtoon ei sähkökäytöissä tarvita erillistä peruutusvaihdetta.

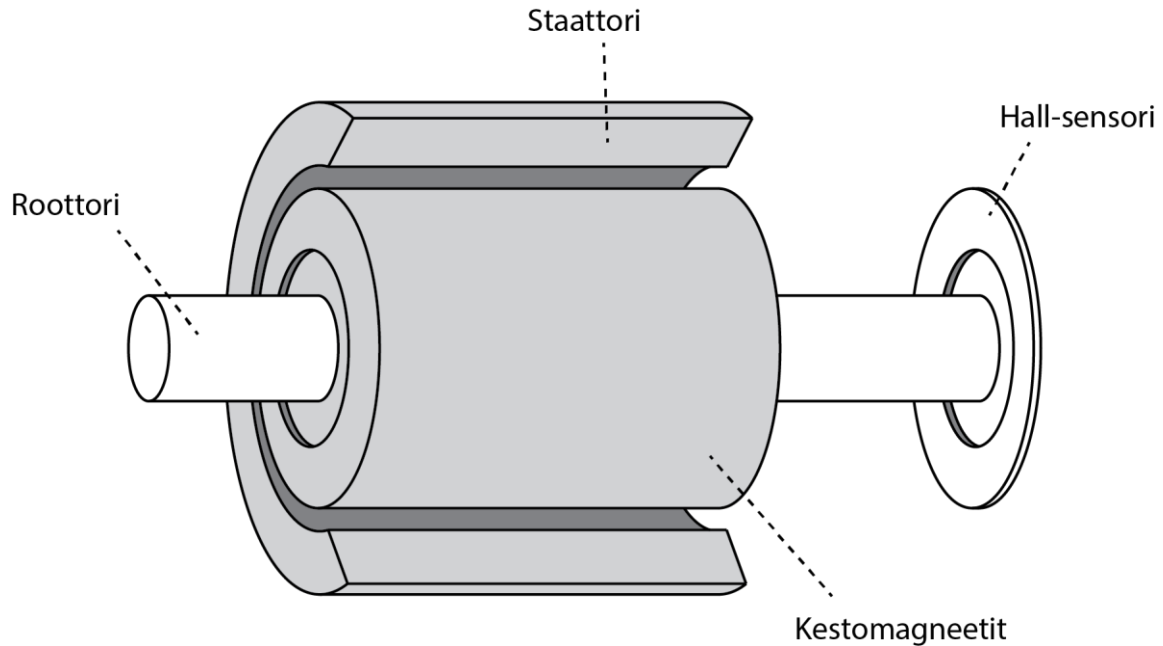
Sähkökäyttöisen kottikärryn kohdalla vaihteisto ei ole välttämätön, sillä moottorilta vaadittu teho ja vääntö voidaan saavuttaa jo pelkällä hyvin mitoitetulla moottorilla. Jos vaihteistoa ei tarvita, ei vaihteistosta myöskään aiheudu häviöitä voimansiirron kokonaisuhyötysuhteeseen.

Tasavirtamoottorit voidaan jakaa kahteen eri tyyppiin: harjallisiin (BDC) ja harjattomiin (BLDC). BDC-moottoreissa kommutointi tehdään hiiliharjoilla ja kommutaattorilla, kuten kuvassa 2.5 on havainnollistettu. Tällainen rakenne on hyvin yksinkertainen ja edullinen toteuttaa, eikä moottorin käyttö vakionopeudella vaadi erillistä moottoriohjausta. Hiiliharjojen haittapuoli on kuitenkin niiden kuluminen, joten harjallisia moottoreita joudutaan huoltamaan aika ajoin.



Kuva 2.5 Harjallisen DC-moottorin rakenne.

BLDC-moottoreissa ei käytetä hiiliharjoja, minkä takia niiden huollon tarve on hyvin vähäinen. Nimestään huolimatta BLDC-moottoreita ei kuitenkaan voida ohjata suoraan tasasähköllä, vaan ne vaativat aina ohjausjärjestelmän toimiakseen. Moottorin kommutointi hoidetaan elektronisesti ja sen vaihteistamiseen tarvitaan roottorin asentotakaisinkytkentä esimerkiksi Hall-sensorilla. (Koski, 2010). Kuvassa 2.6 on esitetty BLDC-moottorin rakenne. BLDC-moottorin etuihin voidaan laskea myös suuri teho suhteessa kokoon sekä tehokkuus kaikilla nopeuksilla nimelliskuormalla (Motion Control & Motor Association, 2017).



Kuva 2.6 Harjattoman DC-moottorin rakenne.

Nykyään hybridikäyttöissä käytetään lähes poikkeuksetta BLDC-moottoreita tai kestopagneettitahtikoneita. Joissain täyssähköisissä ajoneuvoissa, kuten Tesla Roadsterissa, käytetään kuitenkin oikosulkumoottorikäyttöä (AC). BLDC-moottorit ja AC-moottorit ovat rakenteeltaan osittain samanlaisia. Molemmat käyttävät samanlaista staattorirakennetta ja 3-vaiheisia moduloivia vaihtosuuntaajia. Moottoreiden eroavaisuudet löytyvät roottorirakenteista ja vaihtosuuntaajien ohjauksesta. (Rippel, 2007).

DC-moottoreiden käyttö sähköisissä ajoneuvoissa vaikuttaa loogisimmalta ratkaisulta, kun tarvittava sähköenergia on säilötty akkuihin. AC-moottorin hyödyt korostuvat moottorin koon kasvaessa, sillä BLDC-moottorin kokoa kasvatettaessa, sen magneettiset häviöt kasvavat samassa suhteessa. AC-käytön kohdalla vastaavaa ongelmaa ei ole, sillä sen magneettikentän voimakkuutta voidaan jännitteen avulla pienentää, jos tarvittava vääntömomentti on alhainen. Näin magneettikenttää säätämällä sen aiheuttamia pyörrevirta- ja hystereesihäviöitä voidaan pienentää parantaen käytön kokonaishyötysuhdetta. (Rippel, 2007).

Kuitenkin tavalliseen kottikärryyn suunniteltava sähköinen voimansiirto on kokoluokassaan hyvin pieni, joten BLDC-moottori soveltuu voimansiirtojärjestelmän moottoriksi parhaiten. Jos voimansiirto toteutetaan ilman vaihteistoa ja moottori asennetaan suoravetoisesti akselille, saadaan moottorin tarvittavaksi maksiminopeudeksi laskettua 0.33 m rengashalkaisijalla 80.4 rpm. 80 rpm on tarvittavana maksiminopeutena hyvin matala, sillä yleisimpien BLDC-moottoreiden nimellinopeudet ovat noin 1000–2000 rpm luokkaa. Markkinoilla on toki olemassa moottoreita, jotka ovat suunniteltu toimimaan alhaisilla nopeuksilla, mutta moottorin nimellinopeus on joka tapauksessa tärkeää ottaa huomioon voimansiirron kokonaisuudessa. Lisäämällä esimerkiksi 6:1-vaihte voimansiirtojärjestelmään, voidaan moottoria hyödyntää huomattavasti paremmin ja samalla vaihteiston avulla moottorista saadaan enemmän vääntöä.

Mitoitettu 530 W maksimitehotarve vastaa moottorilta vaadittavaa huipputehoa. BLDC-moottorin nimellistehon ja huipputehon suhde riippuu pitkälti moottorista, mutta kaksinkermainen huipputeho nimellistehoon verrattuna on melko realistinen arvio. Näin ollen nimellisteholtaan jo 300 W moottori olisi teholtaan riittävä ja 400 W moottori kykenee vaatimuksiin suurella todennäköisyydellä.

Selkeästi järkevin moottorivaihtoehto kottikärryn voimansiirtoon on napamoottori, joka asennetaan akselin ympärille kumipyörän vanteen sisään. Napamoottoriin on usein integroitu vaihteisto ja sen asentaminen kottikärryyn on helppoa ja vaivatonta. Tällöin myöskään voimansiirtoon ei jää näkyviin vaarallisia pyöriviä osia, joita pitäisi erikseen suojata, kuten kuvasta 2.7 ilmenee. Tässä tapauksessa siis kuvan 2.4 järjestelmäarkkitehtuurista poiketen moottori, vaihteisto ja rengas ovat yksi kokonaisuus.



Kuva 2.7 Uumotor:n valmistama 500 W BLDC-napamoottori (Uumotor, 2020).

Internetistä löytyy monia vaihtoehtoja käytettäväksi napamoottoriksi. Esimerkiksi uumotor.com tarjoaa useita vaihtoehtoja 350–500 W kokoluokassa noin US\$150 hintaan (Uumotor, 2020). Moottoreiden ilmoitettu nimellijännite on 36–48 V, mikä tarkoittaa, että maksimitehotilanteessa tarvitaan, voimansiirron hyötysuhde huomioiden, vastaavasti 16–12 A virtaa akustolta. Suuremman nimellijännitteen valinta tarkoittaa siis pienempää maksimivirtaa ääritilanteissa.

2.3.2 Akusto

Akusto toimii sähköisen voimansiirron energiavarastona ja sen on pystyttävä luovuttamaan voimansiirrolle sen tarvitsema teho myös hetkellisissä maksimitilanteissa. Lisäksi akuston kapasiteetin on oltava riittävä täyttämään kottikärrylle asetettu minimikantama normaalikäytössä.

Erilaisia akkutyyppejä on useita ja niiden ominaisuudet vaihtelevat paljon. Akun koko, kuormitusvirta ja energiatiheys ovat esimerkiksi tällaisia ominaisuuksia. Yleisimmät nykyään käytössä olevat akkutyypit ovat nikkelimetallihybrid- (NiMH), litiumioni- (Li-ion) ja lyijy-akut (Battery University, 2017). Näiden akkujen teknologiat vaihtelevat paljon, eikä tässä työssä ole tarvetta perehtyä sen enempää eri akkutyypien kemiallisiin ominaisuuksiin.

Suunnittelun kannalta tärkeämpää on, että valittu akkutyyppe toimii tarkoitetussa käyttökohteessa ja täyttää asetetut vaatimukset. Suunniteltavan voimansiirron kannalta tärkeitä NiMH-, Li-ion- ja lyijyakkujen ominaisarvoja on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4 Eri akkutyyppejen ominaisarvoja (Battery University, 2017).

		Lyijy Akku	NiMH	Li-ion
Ominaisenergia	Wh/kg	30–50	60–120	110–160
Pikalatausaika	h	8–16	2–4	2–4
Kuormitusvirta				
- maksimi	C	5	5	>2
- optimi	C	0.2	<0.2	<1
Huoltotarve		3–6 kk	60–90 pvä	Ei tarvita
Itsepurkautuminen / kk	%	5	30	10

Lyijy Akku on ollut edellä mainituista akkutyypeistä pisimpään käytössä. Sen valmistaminen on edullista ja yksinkertaista, sen käyttö on luotettavaa ja se kykenee korkeaan kuormitusvirtaan. Lyijy Akkun käytön rajoitteita ovat kuitenkin matala energiatiheys, mikä tarkoittaa huonoa painon suhdetta akusta saatavaan energiaan. Lisäksi perinteiset lyijy Akkut kestävät huonosti syväpurkauksia, joten ne sopivatkin parhaiten käyttösovelluksiin, joissa syväpurkauksia tapahtuu vain harvoin. Markkinoilla on erilaisia lyijy Akkutyyppijä, jotka paikkaavat perinteisen lyijy Akkun heikkouksia, kuten juuri syväpurkaukskestävyyttä, mutta nämäkään ratkaisut eivät ratkaise matalan ominaisenergian ongelmaa. (Battery University, 2017).

Nikkelimetallihydridiakut ovat korvanneet markkinoilla nikkelikadmiumakut, joiden käyttö kiellettiin EU:n alueella kuluttajatuotteissa vuonna 2009 johtuen kadmiumin vaarallisuudesta (EUR-Lex, 2014). NiMH-akut tarjoavat melko hyvän energiatiheyden ja ne ovat suhteellisen ympäristöystävällisiä sisältäen vain mietoja toksiineja sekä niiden kierrättäminen on kannattavaa. NiMH-akuilla on kuitenkin melko paljon rajoitteita. Samoin kuin lyijy Akkut, NiMH-akut kestävät huonosti syväpurkauksia. Jatkuvat syväpurkaukset etenkin korkeilla purkuvirroilla alkavat huonontaa akkujen suorituskykyä jo 200–300 latausyökin jälkeen. Akut eivät myöskään ole ideaalisia suurille kuormitusvirroille, vaikka ne kykenevätkin melko suuriin virtoihin. Toistuvat ja suuret virrat aiheuttavat ennenaikaista akun heikkene mistä, joten NiMH-akut eivät välttämättä ole ideaalinen ratkaisu tämänkaltaiseen sähköiseen voimansiirtojärjestelmään. NiMH-akkuja pidetäänkin yleisesti vain väliaikaisena askeleena kohti litiumakkuteknologiaa. (Battery University, 2017).

Litiumioniakut ovat nykyisin yleisimmin sähköajoneuvoissa käytetty akkutyyppe (U.S. Department of Energy, 2020). Li-ion-akut tarjoavat jo nykyisellään kohtalaisen energiatiheyden ja tekniikassa on potentiaalia vielä suurempiin kapasiteetteihin. Akkuja ei tarvitse huoltaa ja niiden itsepurkautuminen on alle puolet NiMH-akuista. Lisäksi akut kestävät hyvin toistuvia purkautumisia. Li-ion-akut tarvitsevat kuitenkin suojapiirin rajoittamaan jännitettä ja virtaa, jotta akun toiminta on turvallista. Akkujen kuormitusvirta on vaatimaton, mutta erityyppisillä sekoituksilla, kuten litium-rautafosfaattiakuilla (LiFePO₄), voidaan kuormitusvirtaa nostaa jopa 25 C:hen (Battery University, 2019). (Battery University, 2017).

Litiumioniakut vaikuttavat parhaalta vaihtoehdolta sähköiseen voimansiirtoon. Ne sisältävät parhaan ominaisenergian ja ne kestävät käytön vaatimaa toistuvaa purkautumista. Lisäksi

oikein valittuina litiumioniakut pystyvät suoriutumaan voimansiirron vaatimasta maksimitehosta. Akut kuitenkin vaativat järjestelmään lisättävän suojauspiirin, jotta niiden käyttö voi olla turvallista.

Yhdeksi akkuvaihtoehdoksi voidaan valita kuvan 2.8 Ryobi 36 V, 9.0 Ah High Energy -akku. 36 voltin jännitteellä akulta vaadittava maksimivirta on noin 16 A, jonka esimerkkiakku pystyy turvallisesti luovuttamaan. Akku on käyttäjän vaihdettavissa, joten kottikärryn käyttöä pystyy pidentämään pelkällä akun vaihdolla.

Yhden akun tuottama kantama voidaan laskea aiemmin lasketun energiankulutuksen kautta. Laskettu maksimienergiankulutus oli 500 J/m, eli 139 mWh/m. Ryobin akun kapasiteetti on 324 Wh, joten yhden akun kantamaksi saadaan noin 2330 m. Keskimäärin energiankulutus ei kuitenkaan ole maksimikulutuksen tasossa, joten realistinen kantama on laskettua arvoa enemmän. Jos kantama lasketaan keskimääräisellä ominaisenergialla 300 J/m, kantamaksi saadaan 3800 m, joten kyseisellä akulla voidaan saavuttaa asetettu 3000 m vaatimus.



Kuva 2.8 Ryobi 36 V, 9.0 Ah High Energy -akku (Ryobi, 2020).

Ryobin akussa on lisäksi integroitu suojauspiiri suojaamassa yksittäisiä litiumionikenoja. Näin ollen akustolle ei tarvita enää erillistä suojausjärjestelmää. Akun lataus voidaan suorittaa turvallisesti esimerkiksi Ryobin omalla akkulaturilla.

2.3.3 Ohjaus ja kori

Kuten jo aikaisemmin on käsitelty, kottikärryyn valittu BLDC-moottori tarvitsee toimiakseen erillisen ohjausjärjestelmän, jonka avulla moottoria voidaan pyörittää. BLDC-moottoriohjaimia on saatavilla lukemattomia eri versioita. Yksinkertaisimmat ohjaimet pystyvät ainoastaan pyörittämään moottoria yhteen suuntaan, mutta käytännössä halvimmissakin ohjaimissa on tätä enemmän toimintoja.

Moottoriohjaimen valinta tulee tehdä valitun moottorin parametrien perusteella. Käytettävä jännite ja moottorin maksimivirta ovat tärkeimmät kriteerit ohjaimen valinnassa. Kuvassa 2.9 on esitetty RoboteQ:n SBL1360 BLDC-moottoriohjain, joka kestää maksimissaan 60 V käyttöjännitteen ja 30 A maksimivirran ollen siis yhteensopiva valittuun järjestelmään.



Kuva 2.9 RoboteQ SBL1360 BLDC-moottoriohjain (RoboteQ, 2020).

RoboteQ:n ohjain sisältää kattavan listan eri toimintoja. Ohjaimella pystyy ajamaan moottoria sekä eteen- että taaksepäin ja se tukee regeneroivaa jarrutusta, eli moottorin jarrutusenergia voidaan ottaa talteen akustoon. Moottoriohjainta voi käyttää jopa radio-ohjaimella, mutta kottikärryn kohdalla järkevin ohjaustapa lienee analoginen, peukalolla ohjattava ohjausvipu. Ohjaimen toimintaa voi räätälöidä yksinkertaisilla ohjelmakoodeilla.

Käyttöturvallisuuden kannalta moottoriohjain sisältää piirin oikosulkusuojauksen, yli- ja alijännitesuojauksen, lämpötilasuojauksen sekä säädettävän virtarajan. Lisäksi ohjaimessa on ns. ”vahtikoira”, eli ohjain sammuttaa moottorin automaattisesti, jos se havaitsee käyttäjän hallinnan menetyksen. Yhdistettynä akkujen omiin suojauksiin, voidaan järjestelmän todeta olevan käyttäjälleen turvallinen.

Vaikka valittu napamoottori kykenee sähköisesti jarruttamaan itseään ja moottoriohjain kykenee regeneroimaan moottorin taltioiman jarrutusenergian, voidaan käyttöturvallisuutta parantaa vielä entisestään lisäämällä järjestelmään mekaaninen käyttäjän operoima jarru. Esimerkiksi levyjarru on suhteellisen helppo asentaa akselille napamoottorin rinnalle.

3. YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli selvittää voisiko sähköistä voimansiirtoa hyödyntää kottikärry-käytössä sekä millaisilla komponenttiratkaisuilla kyseinen voimansiirto voitaisiin toteuttaa. Työssä tutkittiin sähköavusteisten kottikärryjen nykymarkkinatilannetta, mitä hyödyntäen pystyttiin valitsemaan sopivat tekniset vaatimukset mitoitettavalle voimansiirtojärjestelmälle. Teknisten vaatimusten avulla mitoitettiin ja valittiin sopivat komponentit, joilla sähköinen voimansiirtojärjestelmän olisi mahdollista toteuttaa.

Markkinakatsauksessa huomattiin, että sähköavusteisia kottikärryjä löytyy jo useamman eri valmistajan valikoimasta. Lisäksi yksityishenkilöt ovat rakentaneet vastaavia järjestelmiä tee-se-itse-projekteina ja dokumentoineet prosesseja sosiaaliseen mediaan. Markkinoilta löytyvien kottikärryjen teknisten toteutusten havaittiin olevan osittain samankaltaisia, mutta eroavaisuuksia löytyi esimerkiksi käytetyistä akkutekniikoista.

Sähköisen voimansiirron tehotarve ja ominaisenergiankulutus laskettiin järjestelmälle asetettujen teknisten vaatimusten pohjalta. Tehotarpeen todettiin riippuvan useasta eri tekijästä, joista merkittävin oli kuljettavan pinnan kulma. Voimansiirron mitoitettu maksimitehotarve oli noin 530 W ja maksimiominaisenergiankulutus voimansiirron hyötysuhde huomioiden oli noin 500 J/m.

Käytettäväksi moottoritekniikaksi valikoitui BLDC-moottori. BLDC-moottoritekniikka mahdollisti suuren tehon suhteessa moottorin kokoon ja tehokkuuden kaikilla nopeuksilla moottorin nimelliskuormalla. Pienen moottorikoon ansiosta BLDC-moottori pystyttiin toteuttamaan napamoottorina kottikärryn renkaan vanteen sisällä. Kottikärryn hitaan kulkunopeuden takia voimansiirtoon oli järkevää lisätä vaihteisto, jonka avulla moottorin koko pyörimisnopeusaluetta voitiin hyödyntää. Samalla vaihteiston avulla pienestä moottorista saatiin enemmän vääntöä. BLDC-moottorin etujen kääntöpuolena oli tarve erilliselle moottorinohjausjärjestelmälle. Ohjausjärjestelmän avulla pystyttiin kuitenkin räätälöimään sähköisen voimansiirron toimintaa sekä toteuttamaan moni käyttöturvallisuuden kannalta tärkeä suojausmenetelmä.

Järjestelmän akkua valittaessa tutkittiin lyijy-, NiMH- ja Li-ion-akkuja, joista litiumioniakkujen todettiin olevan järkevin ratkaisu tämänkaltaiseen voimansiirron toteutukseen. Li-ion-tekniikan etuja oli mm. akkutekniikan erinomainen ominaisenergia, jonka avulla voimansiirtojärjestelmän paino ei kasva tarpeettoman suureen osaan koko laitteen painosta.

Sähköisen voimansiirtojärjestelmän toteutuksessa havaittiin, että järjestelmän suunnittelulla on hyvin perustavanlaatuinen vaikutus koko prosessin onnistumiseen. Teknisten vaatimusten ja tehontarpeen välisen riippuvuuden todettiin olevan huomattava. Voimansiirron komponenttien mitoituksen perustuessa laskettuun tehontarpeeseen, teknisten vaatimusten realistinen asettaminen on lähtökohta sille, onko toteutettava sähköinen voimansiirtojärjestelmä käyttökelpoinen.

LÄHDELUETTELO

- Battery University. (2017). *What's the Best Battery?* Noudettu osoitteesta https://batteryuniversity.com/learn/archive/whats_the_best_battery
- Battery University. (2019). *Types of Lithium-ion.* Noudettu osoitteesta https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
- Ehsani, M.;Rahman, K. M.;& Toliyat, H. A. (1997). Propulsion System Design of Electric and Hybrid Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 19-27.
- EUR-Lex. (2014). *Access to European Union law.* Noudettu osoitteesta Disposal of spent batteries and accumulators: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=LEGISSUM:l21202>
- Fasil, M. (2018). *Design, modelling, and fabrication of a ferrite magnet axial flux in-wheel motor.* PhD Thesis, DTU Electrical Engineering.
- Greencycle Oy. (2020). *Akkujen suojaus.* Noudettu osoitteesta <https://www.greencycle.fi/page/57/akkujen-suojapiirit>
- Isojoen Konehalli Oy. (2020). *Kottikärryt.* Noudettu osoitteesta IKH: <https://www.ikh.fi/fi/tikkaat--telineet--varastointi/kuljetuskarryt/kottikarryt>
- Isolit-Bravo. (2020). *Bravo Mobarrow Electric powered wheelbarrow.* Haettu 6. 4 2020 osoitteesta http://www.energian.net/bravo/mobarrow_catalogue_2014.pdf
- Koski, J. P. (2010). *Harjattoman DC-moottorin ohjaus.* Vaasa: Vaasan ammattikorkeakoulu.
- Lindeburg, M. R. (2014). *Civil Engineering Reference Manual for the PE Exam.* Belmont: Professional Publications, Inc.
- Makita Oy Finland. (2020). *Kottikärry LXT.* Haettu 6. 4 2020 osoitteesta <https://www.makita.fi/product/dcu180z.html>
- Motion Control & Motor Association. (2017). *Motion Control Online.* Noudettu osoitteesta Brushed DC Motors Vs. Brushless DC Motors: <https://www.motioncontrolonline.org/blog-article.cfm/Brushed-DC-Motors-Vs-Brushless-DC-Motors/24>
- Needham, J. (1965). *Science and Civilisation in China: Volume IV, Physics and Physical Technology.* Cambridge: The Press Syndicate of the University of Cambridge.
- PowerPac Schweiz. (2020). *Elektroschubkarren mit Elektromotor.* Haettu 6. 4 2020 osoitteesta <https://www.powerpac.ch/multi-dumper/elektro-dumper-typ-ed120-rg/>
- Rippel, W. (2007). *Tesla.* Noudettu osoitteesta Induction Versus DC Brushless Motors: https://www.tesla.com/fi_FI/blog/induction-versus-dc-brushless-motors
- RoboteQ. (2020). *Brushless DC Motor Controllers.* Noudettu osoitteesta SBL1360: <https://www.roboteq.com/products/products-brushless-dc-motor-controllers/sbl-family/sbl1360-detail>
- Ryobi. (2020). *36 V 9.0 Ah High Energy -akku.* Noudettu osoitteesta <https://fi.ryobitools.eu/tarvikkeet/akut-ja-laturit/36v/akut/ry36b90a/ry36b90a/>
- STARK. (2020). *Kottikärryt ja betonimyllyt.* Noudettu osoitteesta Stark Suomi: <https://www.stark-suomi.fi/fi/tyokalut/kottikarryt-ja-betonimyllyt>
- Teknomo, K. (2002). *Microscopic Pedestrian Flow Characteristics: Development of an Image Processing Data Collection and Simulation Model.* Japan: Tohoku University.
- U.S. Department of Energy. (2020). *Energy Efficiency & Renewable Energy.* Noudettu osoitteesta Batteries for Hybrid and Plug-In Electric Vehicles: https://afdc.energy.gov/vehicles/electric_batteries.html
- Ulrich, K. T. (2005). Estimating the technology frontier for personal electric vehicles. *Transportation Research Part C*, 448-462.

- Uumotor. (2020). *Category: Wheelbarrow motor*. Noudettu osoitteesta <https://www.uumotor.com/hub-motor/wheelbarrow-motor>
- Zipper Maschinen. (2020). *ZI-EWB500 // electric wheelbarrow*. Haettu 6. 4 2020 osoitteesta <https://www.zipper-maschinen.at/datasheet.cfm?artikelID=9486&sprache=EN>
- Zipper Maschinen. (2020). *ZI-EWB500 electric wheelbarrow*. Haettu 6. 4 2020 osoitteesta <https://www.zipper-maschinen.at/EN/electric-wheelbarrow-9486>