AKSIAALIVUOKONEIDEN SOVELTUVUUS MOBIILIKÄYTTÖIHIN

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan koulutusohjelma, kandidaatintyö

2025

Miika Nieminen

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Lasse Laurila

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
LUTin energiajärjestelmien tiedekunta
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Miika Nieminen

Aksiaalivuokoneiden soveltuvuus mobiilikäyttöihin

Sähkötekniikan kandidaatintyö
2025
35 sivua, 11 kuvaa ja 4 taulukkoa
Tarkastaja: Tutkijaopettaja Lasse Laurila
Avainsanat: Aksiaalivuokone, sähkökulkuneuvo

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää, analysoida ja vertailla aksiaalivuokoneiden ja radiaalivuokoneiden toimintaperiaatteita, ominaisuuksia ja rakenteita ja niiden perusteella arvioida aksiaalivuokoneen soveltuvuutta erilaisiin mobiileihin käyttökohteisiin. Työssä on tarkoitus selvittää voiko vähemmän käytetty aksiaalivuoteknologia soveltua mobiilikäyttöihin jopa paremmin kuin radiaalivuoteknologia.

Rakenteellisten ja teknisten ominaisuuksien erojen pohjalta analysoidaan kokonaisvaltaisesti aksiaalivuokoneen soveltuvuutta liikenteen jokaiselle osa-alueelle (työkoneissa sekä tie-, raide-, meri- ja ilmailuliikenteessä). Työssä pyritään tarkastelemaan mahdollisimman laajasti erityyppisiä ja eri kokoluokan kulkuneuvoja ja niiden monenlaisia vaatimuksia sähköiseltä voimalinjalta, jotta löydetään mahdollisimman monia potentiaalisia käyttökohteita aksiaalivuokoneille.

Tämän kirjallisuuskatsauksena toteutetun kandidaatintyön perusteella todettiin aksiaalivuokoneiden tarjoavan useita etuja radiaalivuokoneisiin nähden, yhtenä mobiilikäyttöjen kannalta tärkeimpänä etuna suurempi ominaisvääntömomentti ja ominaisteho. Myös rakenteeltaan aksiaalivuokone eroaa radiaalivuokoneesta ja ulkomittojensa puolesta ne voivat soveltua paremmin integroitavaksi etenkin joihinkin hybridi- mutta myös täyssähköisiin kulkuneuvoihin.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Electrical engineering

Miika Nieminen

Suitability of axial flux machines in mobile applications

Bachelor's thesis

2025

35 pages, 11 figures and 4 tables

Examiner: Associate Professor Lasse Laurila

Keywords: Axial flux motor, electric vehicle

The objective of this bachelor's thesis is to investigate, analyze, and compare the operating principles, characteristics, and structures of axial flux and radial flux machines, and based on this comparison, to evaluate the suitability of the axial flux machine for various mobile applications. The work aims to determine whether the less commonly used axial flux technology might be even better suited for mobile applications than radial flux technology.

Based on the differences in structural and technical characteristics, the suitability of axial flux machines is systematically analyzed across all transport sectors (heavy machinery, road-, rail-, marine-, and aviation vehicles). The study aims to cover a wide range of vehicle types and sizes, considering their diverse electric powertrain requirements, to identify numerous potential applications for axial flux machines.

Conducted as a literature review, this thesis concludes that axial flux machines offer several advantages over radial flux machines. One of the most significant benefits for mobile applications is their higher torque and power density. Furthermore, the distinct structure and external dimensions of axial flux machines may make them more suitable for integration into certain hybrid and fully electric vehicles.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

PMSM	kestomagneettitahtikone (Permanent Magnet Synchronous Motor)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1 Johdanto 6
2 Radiaali- ja aksiaalivuokoneiden vertailu 9
2.1 Radiaalivuokoneet 9
2.2 Aksiaalivuokoneet 10
2.3 Rakenteellisten erojen vertailu 11
3 Aksiaalivuokoneiden käyttökohteet liikenteessä 17
3.1 Tieliikenteessä 17
3.2 Työkoneet 19
3.3 Meriliikenteessä 22
3.4 Raideliikenteessä 24
3.5 Ilmailuiikenteessä 25
4 Johtopäätökset 28
Lähdeluettelo 31

1 Johdanto

Liikenteen sähköistyminen on keskeinen osa globaalia ilmastonmuutoksen hillintää ja fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämistä. Euroopan unionissa tämä kehitys on näkynyt erityisen vahvana liikennesektorissa, kun sähkö- ja hybridiajoneuvojen myynti on kasvanut merkittävästi viime vuosikymmenen aikana. Esimerkiksi täyssähköautojen rekisteröinnit ovat kasvaneet EU:ssa 21,5 tuhannesta autosta vuonna 2013 1,5 miljoonaan autoon vuonna 2023. Vuonna 2023 kaikista EU:ssa rekisteröidyistä autoista noin 23 % oli sähköisellä voimalinjalla varustettuja. (European Environment Agency, 2024) Tästä huolimatta sähköisen voimalinjan tekniset haasteet, kuten perinteisiin polttomoottoriajoneuvoihin verrattuna suurempi massa, korkeammat hankintakustannukset ja rajallinen toimintasäde, hidastavat liikenteen laajempaa sähköistymistä.

Sähköisen voimalinjan yleistyminen liikenteessä edellyttää jatkuvaa kehitystyötä, ja erilaisten sähkökoneiden optimointi mobiilikäyttöihin on yksi välttämätön osa liikenteen sähköistämisen kehityksessä. Kehitystyö on kuitenkin keskittynyt lähinnä radiaalivuokoneisiin, jotka vielä dominoivat liikenteen sähköisiä voimalinjoja, eikä aksiaalivuokoneita ole mobiilikäytöissä siksi tutkittu tai testattu samassa mittakaavassa, kuin radiaalivuokoneita. Tämä siitäkin huolimatta, että aksiaalivuokoneiden vahvuudet ovat jo pitkään olleet tiedossa ja niitä on yleisesti käytetty esimerkiksi hisseissä jo vuodesta 1996 (KONE, n.d.).

Radiaalivuokoneiden tekniset rajoitukset ovat kuitenkin viime aikoina nostaneet kiinnostusta aksiaalivuokoneisiin myös mobiilikäytöissä, ja muutamat valmistajat, kuten Jaguar, Koenigsegg sekä Ferrari, ovat jo varustaneet joitain mallejaan aksiaalivuokoneilla (YASA, n.d.a). Tällä hetkellä aksiaalivuokoneita löytyy kuitenkin pääasiassa vain premium-ajoneuvoista, joissa edullinen hankintahinta ei ole asiakkaalle välttämättä oleellisin kriteeri. Tämä viittaisi aksiaalivuokoneen olevan valmistajille radiaalivuokoneita kalliimpi vaihtoehto, mikä voi osaltaan vaikuttaa radiaalivuokoneiden suosioon mobiilikäytöissä. Vaikka aksiaalivuokoneet ovat vielä tällä hetkellä harvinaisia liikenteen ratkaisuissa niiden edut voivat ratkaista liikenteen sähköistymisen haasteita tulevaisuudessa. Aksiaalivuokoneiden etuja ovat muun muassa pienempi koko ja kevyempi rakenne (kuva 1), jotka ovat erityisen tärkeitä mobiilikäytöissä, missä tila ja massa ovat usein kriittisiä tekijöitä. Tämän takia niiden

rakenteelliset ominaisuudet voivat mahdollistaa radiaalivuokonetta helpomman integroitavuuden niin erilaisiin hybridiratkaisuihin kuin myös täyssähköisiinkin ajoneuvoihin. (Shao et al., 2021)

Kuva 1. YASA:n aksiaalivuokone (vas.) ja Teslan radiaalivuokone vierekkäin. Molemmat tuottavat noin 400 Nm vääntömomentin ja ovat halkaisijaltaan samaa kokoluokkaa. Aksiaalivuokone on kuitenkin huomattavasti lyhyempi ja myös kevyempi. (Lampinen, 2024)

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on tuottaa tutkimusmateriaalia, jota voi hyödyntää liikenteen sähköisten voimalinjojen suunnittelussa ja siten edistää liikenteen sähköistymistä. Työn tavoitteena on selvittää ja analysoida aksiaalivuokoneiden teknisiä ominaisuuksia, ja niiden perusteella arvioida aksiaalivuokoneen soveltumista erilaisiin mobiilikäyttöihin. Työssä verrataan aksiaalivuokoneita yleisemmin käytettyihin radiaalivuokoneisiin ja pohditaan miten erot, kuten tehotiheys, koko tai hinta, vaikuttavat valintaan kahden konetyypin välillä, kun suunnitellaan ajoneuvolle voimalinjaa. Tarkoituksena on myös tunnistaa potentiaalisia käyttökohteita, mihin aksiaalivuokone voi soveltua radiaalivuokonetta paremmin. Lisäksi työssä pohditaan, ovatko radiaalivuokoneen ominaisuudet rajoittaneet joissain ajoneuvoissa sähköisen voimalinjan hyödyntämistä, missä aksiaalivuokone voisi puolestaan soveltua käytettäväksi.

Työn tutkimuskysymykset ovat:

- Miten aksiaalivuokone eroaa rakenteeltaan radiaalivuokoneesta?
- Mitä etuja/haittoja rakenteelliset erot aiheuttavat?
- Miten aksiaalivuokoneen ja radiaalivuokoneen valmistuskustannukset vaikuttavat konetyypin valintaan?

- Missä mobiileissa käytöissä aksiaalivuokoneita on jo hyödynnetty?
- Mitkä ovat potentiaalisimpia käyttökohteita aksiaalivuokoneille ja miksi?

Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena hyödyntäen vertaisarvioituja tieteellisiä julkaisuja sekä tutkimuksia, patentteja ja valmistajien nettisivuja. Tutkimuksen rajauksena on keskittyä sähkömoottoreiden teknisiin ominaisuuksiin ja valmistuskustannuksiin, jättäen ulkopuolelle yksityiskohtaiset materiaalitieteelliset ja valmistustekniset näkökulmat. Työn toisessa luvussa selvitetään aksiaali- ja radiaalivuokoneiden rakenteellisia eroja sekä vertaillaan näiden ominaisuuksia. Kolmannessa luvussa selvitetään aksiaalivuokoneiden nykyisiä sovelluksia ja potentiaalisia tulevia mobiilikäyttökohteita. Työ päättyy johtopäätöksiin ja pohdintaan tutkimustulosten merkityksestä ja mahdollisista jatkotutkimuksista.

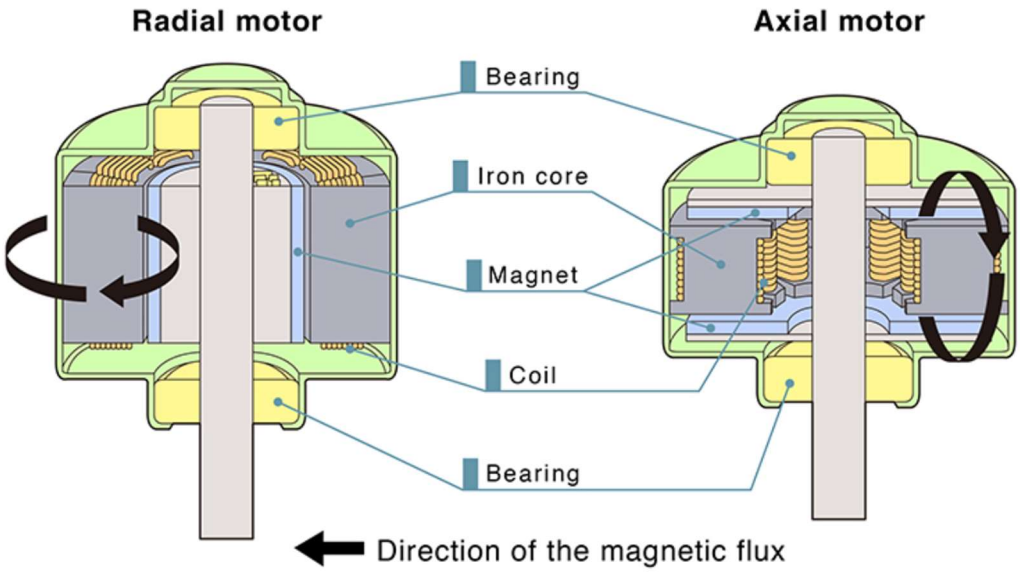
2 Radiaali- ja aksiaalivuokoneiden vertailu

Sähkömoottorin voi toteuttaa usealla toimintaperiaatteella, joista tässä työssä tarkastellaan vain kestomagneettitahtikoneita (PMSM, Permanent Magnet Synchronous Machine), sillä ne sopivat erinomaisesti mobiilikäyttöihin ja ovat tässä työssä vertailukelpoisia, sillä aksiaalivuokoneet ovat yleensä PMSM-koneita. Tässä luvussa käydään sähkökoneen perusidea lyhyesti läpi, jotta ymmärretään miten ja miksi aksiaali- ja radiaalivuokoneiden rakenteelliset erot vaikuttavat koneen suorituskykyyn.

PMSM-kone muuntaa sähköisen energian kineettiseksi energiaksi staattorin sähkömagneettien vuorovaikuttaessa roottorin kestomagneetteihin. Sekä staattorilla että roottorilla on siis magneettivuo, jotka Lorentz-voiman periaatteella aiheuttavat voiman toisiinsa nähden. Tämä voima syntyy symmetrisesti akselin ympärille koneen ilmaraossa, jolla tarkoitetaan tilaa staattorin ja roottorin välissä. Tällöin Lorentz-voima saa aikaan roottorin vääntömomentin staattorin suhteen. (Jumayev et al., 2013) Vaikka perusperiaate on kummassakin konetyypissä sama, aksiaali- ja radiaalivuokoneilla on oleellisia eroja siinä, miten vääntömomentti toteutetaan.

2.1 Radiaalivuokoneet

Yleensä PMSM-radiaalivuokoneen rakenne on roottori sylinterimäisen staattorin sisällä. Roottori on pysyvästi magnetoitu kestomagneettien avulla ja staattorin vaihtuva magneettikenttä tuotetaan sähkömagneeteilla eli käämeillä, jotka ovat yleensä kuparijohtimia. Staattorin ja roottorin paikat voivat myös olla toisin päin tai staattoreita voi olla kaksi. Staattorin johtimet on asetettu akselin suuntaisesti indusoiden magneettivuon, joka kulkee säteen suuntaisesti eli radiaalisesti akseliin nähden (kuva 2, vasemmalla). Tästä myös johtuu nimitys “radiaalivuokone”.



Kuva 2. Vasemmalla radiaalivuokoneen - ja oikealla aksiaalivuokoneen rakenne. Kuvan aksiaalivuokone on toteutettu yhdellä staattorilla ja kahdella roottorilla. (Nidec, 2021)

2.2 Aksiaalivuokoneet

Aksiaalivuokone muodostuu yksinkertaisimmillaan yhdestä levymäisestä staattorista ja roottorista. Kuitenkin koneen suorituskykyä ja kestävyyttä parantaa merkittävästi toisen staattorin tai roottorin käyttö niin että koneessa on joko kaksiosainen staattori yksiosaisen roottorin kummallakin puolella tai toisinpäin. Aksiaalivuokoneissa on myös mahdollista käyttää useampia staattoreita ja roottoreita, mikä lisää koneen vääntömomenttia sekä tehoa, tehden kuitenkin koneesta suuremman ja painavamman. Käämit on asetettu staattorissa akselin suhteen radiaalisesti indusoiden magneettivuon, joka kulkee akselin suuntaisesti (kuva 2, oikealla). Myös aksiaalivuokoneissa vääntömomentti tuotetaan Lorentz-voiman avulla ilmaraossa, tai useimmiten ilmaraoissa. Myös kuvan 2 esittämässä aksiaalivuokoneessa on kaksi ilmarakoa, yksi staattorin kummallakin puolella.

2.3 Rakenteellisten erojen vertailu

Koneita vertaillessa, kuten myös kuvista 1 ja 2, huomataan helposti aksiaalivuokoneen olevan lyhyempi verrattuna saman teholuokan ja halkaisijan radiaalivuokoneeseen. Tämä johtuu siitä, että aksiaalivuokoneessa ilmaraon pinta-ala ei riipu aksiaalisesta pituudesta, toisin kuin radiaalivuokoneessa. PMSM-koneessa vääntömomentti syntyy kuten edellä mainittu, ilmaraossa, joten ilmaraon pinta-ala vaikuttaa merkittävästi koneen vääntömomenttiin. Kun verrataan kahta PMSM-konetta, joissa kestomagneetteina käytetään samaa materiaalia magnetoituna samaan voimakkuuteen, eli magneettivuon tiheys on vakio, silloin magneettivuon lävistämä pinta-alan suuruus vaikuttaa suoraan kokonaisvuohon, ja sitä kautta staattorin tuottamaan voimaan roottoriin nähden. On myös hyvä ottaa huomioon, että suuremman kokonaisvoiman lisäksi vääntömomentin suuruuteen vaikuttaa voiman keskimääräinen etäisyys akselin keskeltä. Myös tämä etäisyys on tyypillisesti aksiaalivuokoneissa suurempi, mikä myös osaltaan vaikuttaa aksiaalivuokoneen suurempaan vääntömomenttitiheyteen. (Parviainen, 2005)

(Echle, Neubauer and Parspour, 2018) tutkimuksessa vertailtiin käsityökaluihin suunniteltuja aksiaali- sekä radiaalivuokoneita, joiden ulkohalkaisijat ja tehot olivat samat (50 mm ja 300,5 W). Taulukossa 1 on esitetty näiden kahden koneen oleellisimman erot.

Taulukko 1. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta vääntömomenttitiheyden $\mathrm{Nm/cm^3}$ olevan aksiaalivuokoneissa suurempi kuin radiaalivuokoneessa. Huomataan myös, ettei kestomagneettimateriaalia kulu samantehoisessa aksiaalivuokoneessa enempää kuin radiaalivuokoneessa. Taulukko muokattu lähteestä (Echle, Neubauer and Parspour, 2018).

Parametri	**Aksiaali-vuokone**	**Radiaalivuo-kone**	**yksikkö**
Keskivääntömomentin huippuarvo	704,9	663,2	mNm
Akselin suuntainen pituus	21,4	30,3	mm
Raudan tilavuus	18,4	18,7	$\mathrm{cm^3}$
Kestomagneetin tilavuus	2,14	2,17	$\mathrm{cm^3}$
Tehotiheys	7,15	5,06	$\mathrm{W/cm^3}$
Vääntömomenttitiheys	16,78	11,16	$\mathrm{mNm/cm^3}$

(Patil and Ugale, 2022) tutkimuksessa vertailtiin hieman suurempia 2,5 kW:n aksiaali- sekä radiaalivuokoneita, joiden vääntömomentit, tehot ja pyörimisnopeudet olivat samat (7,96 Nm, 2,5 kW ja 3000 rpm). Taulukossa 2 on esitetty näiden kahden koneen oleellisimman erot.

Taulukko 2. Myös tässä tutkimuksessa päästiin samankaltaisiin tuloksiin sekä vääntömomenttitiheydestä, että kestomagneettimateriaalin määrästä. Taulukko muokattu lähteestä (Patil and Ugale, 2022).

Parametri	**Aksiaali-vuokone**	**Radiaalivuo-kone**	**yksikkö**
Hyötysuhde	88,92	86,03	%
Kokonaismassa	2,1	4,86	kg
Raudan massa	1,6	4,1	kg
Kestomagneetin massa	0,2	0,26	kg
Tehotiheys	1,19	0,51	PU
Vääntömomenttitiheys	3,79	1,64	PU

Kattavamman vertailun vuoksi etsittiin sähkökonevalmistajien nettisivuilta ja datalehdistä tietoa 15 aksiaali- ja 15 radiaalivuokoneesta. Taulukoissa 3 ja 4 on listattu näiden sähkökoneiden tietoja, joiden perusteella voidaan vertailla ominaistehon sekä ominaisvääntömomentin eroja kahden konetyypin välillä.

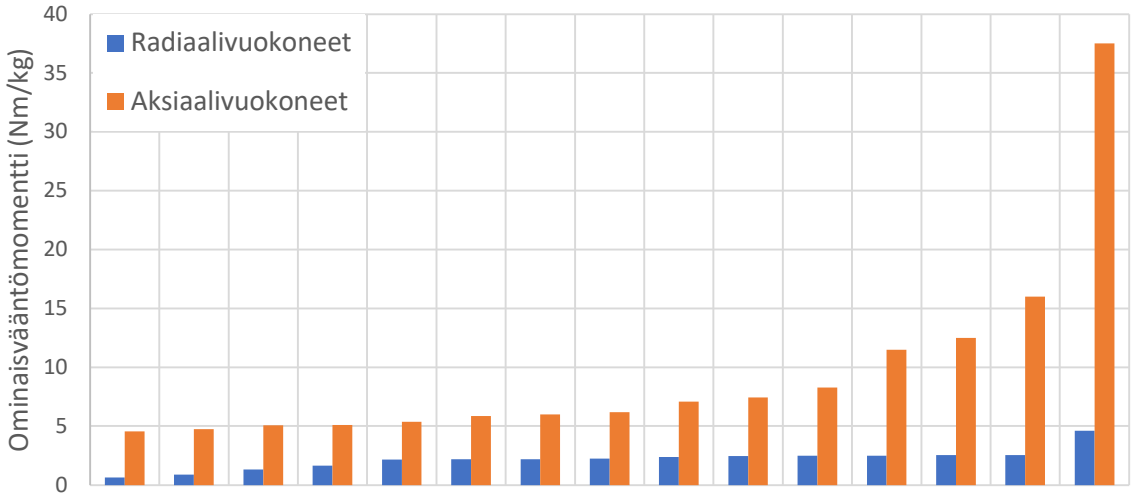
Taulukko 3. Eräiden valmistajien ilmoittamia arvoja aksiaalivuokoneidensa suorituskyvystä. (GKN EVO, n.d.; Beyond Motors, n.d.; Brogen motors, n.d.; Evolito Ltd, n.d.)

teho (kW)	**vääntömo-mentti (Nm)**	**nopeus (rpm)**	**pituus (mm)**	**halkaisija (mm)**	**massa (kg)**	**valmistaja**
59	100	12000	110	258	22	GKN EVO
64	145	8000	110	300	30.5	GKN EVO
75	120	7500	117	260	14.5	Beyond motors
81	220	3500	147	408	41	Brogen motors
94	260	5000	110	380	42	GKN EVO
104	450	2200	178	486	75	Brogen motors
111	330	3200	165	519	65	Brogen motors
128	290	8000	212	300	57	GKN EVO
130	310	5800	135	340	27	Beyond motors
143	620	2200	199	490	106	Brogen motors
173	1100	1500	202	555	148	Brogen motors
188	580	5000	212	380	82	GKN EVO
207	208	10000	125	370	13	Evolito
230	600	4500	147	425	48	Beyond motors
250	1500	2500	170	450	40	Evolito

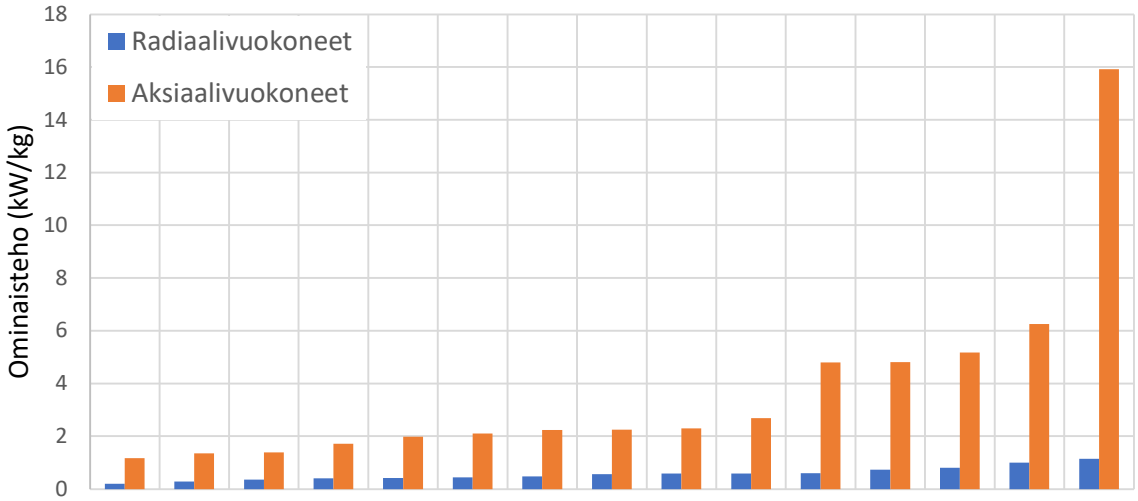
Taulukko 4. Eräiden valmistajien ilmoittamia arvoja radiaalivuokoneidensa suorituskyvystä. (Danfoss Editron, n.d.; Vem Motors, n.d.; Higen Motor, n.d.; Wolong, n.d.)

teho (kW)	**vääntömo-mentti (Nm)**	**nopeus (rpm)**	**pituus (mm)**	**halkaisija (mm)**	**massa (kg)**	**valmistaja**
22.9	73				55	Wolong
30	191	1500	66	451	75	Danfoss Editron
30	191	1500	66	451	85	Danfoss Editron
33	179	1800	66	451	75	Danfoss Editron
40	210	1800	66	451	85	Danfoss Editron
45	164	2600	66	451	75	Danfoss Editron
48	210	2200	317	305	85	Danfoss Editron
50	208	2300	66	451	85	Danfoss Editron
50	136	10000			62	Higen motor
55	240	10000			95	Higen motor
75	239	3000			375	Vem Motors
85	184	4400	317	305	85	Danfoss Editron
95	600	1500			130	Higen motor
97	140	6600	317	305	85	Danfoss Editron
160	509	3000			580	Vem Motors

Taulukoiden 3 ja 4 pohjalta laskettiin koneiden ominaisvääntömomentit (vääntömomentti / massa) ja ominaistehot (teho / massa), jotka havainnollistettu kuvissa 3 ja 4. Taulukoissa esitetyt arvot, joita myös laskuissa käytettiin, ovat valmistajien ilmoittamia nimellisarvoja. Osa varsinaisesti mobiilikäyttöihin suunnitelluista koneista täytyi jättää huomiotta, sillä valmistajat ilmoittivat koneistaan vain huippuarvot.



Kuva 3. Tarkasteltujen sähkökoneiden ominaisvääntömomentit. Sinisellä radiaalivuokoneet ja oranssilla aksiaalivuokoneet. Kuva havainnollistaa hyvin, kuinka aksiaalivuokoneissa tyypillisesti on selkeästi radiaalivuokoneita suurempi ominaisvääntömomentti (tässä tapauksessa keskimäärin noin 3,4 kertainen).



Kuva 4. Tarkasteltujen sähkökoneiden ominaistehot. Ominaistehot piirretty kuvaajaan samalla lailla kuin edellisen kuvan ominaisvääntömomentit. Keskimäärin aksiaalivuokoneissa oli noin 5,5 kertaa suurempi ominaisteho kuin radiaalivuokoneissa.

Aksiaalivuokoneet tarjoavat siis paljon selkeitä etuja radiaalivuokoneisiin verrattuna. Mobiilikäyttöjen kannalta tärkeimpiä etuja ovat pienempi koko ja massa sekä suurempi teho- ja vääntömomenttitiheys. Aksiaalivuokoneissa on kuitenkin myös haasteensa, jotka voivat selittää, miksi useammat kulkuneuvot eivät käytä ainakaan vielä aksiaalivuokoneita. Esimerkiksi jäähdytys voi olla haastavaa, etenkin silloin kun vaaditaan tehokkaampaa nestejäähdytystä. Tämä johtuu siitä että, aksiaalivuokoneen staattori on usein kahden roottorin välissä, joten jäähdytyskanavia ei voi toteuttaa yhtä yksinkertaisesti kuin radiaalivuokoneissa, joissa jäähdytettävä staattori ei ole molemmin puolin ympäröity roottoreilla. Aksiaalivuokoneiden suunnittelu on myös haastavampaa, sillä magneettivuo täytyy ajatella kolmiulotteisena toisin kuin radiaalivuokoneissa kaksiulotteisena. Tämä tekee simuloinneista ja laskelmista monimutkaisempia. Lisäksi aksiaalivuokoneiden ohjaus on haastavampaa. Todennäköisesti suurin syy aksiaalivuokoneiden harvinaisuuteen mobiilikäytöissä on kuitenkin hinta sekä tuotantokapasiteetti. Aksiaalivuokoneiden valmistus on kalliimpaa eikä niillä ole samassa mittakaavassa tuotantoa kuin radiaalivuokoneilla. Jos tuotanto lisääntyy ja kehittyy siten että koneiden saatavuus- ja hintaerot pienenevät, aksiaalivuokoneet todennäköisesti yleistyvät, niin erilaisissa mobiilikäytöissä, kuin myös muissa kohteissa. (Yeaphi, n.d.)

3 Aksiaalivuokoneiden käyttökohteet liikenteessä

Sähköisten kulkuneuvojen julkinen keskustelu on suurimmaksi osaksi keskittynyt tieliikenteen ratkaisuihin, mutta myös muilla liikenteen osa-alueilla sähköistyminen on edennyt. Raideliikenteessä, meriliikenteessä, ilmailuliikenteessä ja työkoneissa on jo käytössä sähköisiä kulkuneuvoja, ja niiden kehittämiseen ja yleistymiseen panostetaan maailmanlaajuisesti. Esimerkiksi EU:n tavoitteena on vähentää vuoden 1990 kokonaishiilidioksidipäästöjä vähintään 55 % vuoteen 2030 mennessä ”Fit for 55” -paketin tavoitteiden mukaisesti. Tämä paketti sisältää säädöksiä liikenteen jokaiselle osa-alalle. (Council of the European Union, n.d.)

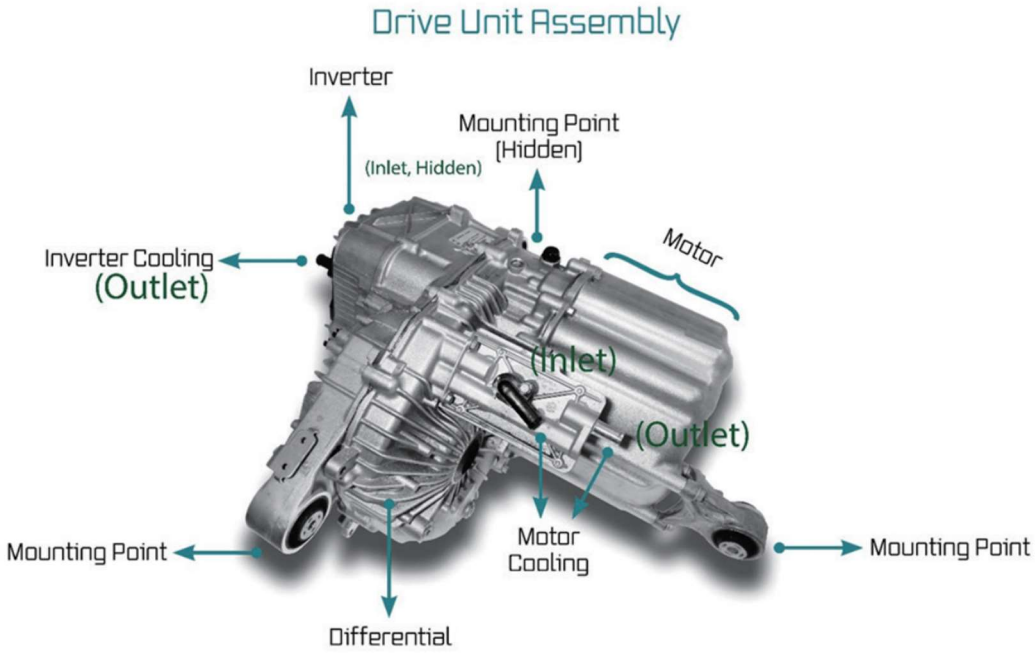
Liikenteen eri osa-aloilla kulkuneuvojen käyttöprofiilit ja muut vaatimukset voivat poiketa suuresti toisistaan. Tässä luvussa selvitetään, millaisia vaatimuksia eri liikenteen osa-alueilla on voimalinjalle ja arvioidaan niiden pohjalta aksiaalivuokoneiden soveltuvuutta kullakin osa-alueella.

3.1 Tieliikenteessä

Tieliikenteen vaatima erittäin laaja käyttöprofiili kaupunkiajosta maantieajoon asettaa omat erityisvaatimuksensa voimalinjalle. Kulkuneuvon on pystyttävä nopeuden tasaiseen ylläpitoon sekä muutoksiin vähintään 0–120 km/h alueella, jotta se pystyy operoimaan tarkoituksenmukaisesti julkisilla teillä. Tämä vaatii koko voimalinjalta, mutta erityisesti sähkökoneelta kykyä toimia koko käyttöprofiilin alueella mahdollisimman suurella hyötysuhteella ylikuumenematta. Konetyypin valinnalla kulkuneuvon kokonaishyötysuhteeseen voidaan vaikuttaa suoraan koneen oman hyötysuhteen, sekä välillisesti vääntömomenttitiheyden ja tehotiheyden vaikutusten avulla.

Tarkastellaan esimerkkitapausta Tesla Model 3 (perusmalli), joka on yksi tämän hetken myydyimmistä täyssähköautoista maailmanlaajuisesti. Model 3:n omamassa on 1760 kg, akkukapasiteetti 57,5 kWh, sähkökone PMSM radiaalivuokone, alennusvaihteen suhde 9,03:1 (EV Database, n.d.; Tesla, n.d.). Koska voimalinjassa käytetään alennusvaihdetta, jolla on

suuri välityssuhde, voidaan todeta, ettei sähkökone itsessään tuota vaadittavaa vääntömomenttia. Kuvassa 5 on esitetty Tesla Model 3:n sähkökonekokoonpano.



Kuva 5. Tesla Model 3 moottorikokoonpano. Kuvasta huomataan, kuinka pieni osa sähkökone on kokonaisuutta ja alennus- sekä jakovaihteisto vievät suhteessa paljon tilaa sekä massaa. (Lin *et al.*, 2023)

Yksi potentiaalinen hyötysuhteen, massan sekä valmistuskustannuksien säästökohde löytyy siis alennusvaihteesta, joka olisi teoriassa mahdollista pienentää tai poistaa kokonaan voimalinjasta, jos sähkökone itsessään tuottaisi kulkuneuvon vaatiman vääntömomentin. Myös jakovaihteisto olisi mahdollista poistaa voimalinjasta käyttämällä kahta sähkökonetta. Kahden koneen voimalinjassa vääntömomentti myös kaksinkertaistuisi, mutta koneita ohjaava tehoelektroniikka monimutkaistuisi, sillä kumpikin kone vaatisi oman ohjausyksikön.

Vielä tällä hetkellä suoraa verrokkia aksiaalivuokoneella varustettuun täyssähköautoon ei ole, mutta aksiaalivuokoneita valmistavan YASA:n tuotteitta löytyy suorituskykyisistä hybridiautoista. Ferrari 296 GTB:n polttomoottoria avustaa suoraan akseliin kytketty aksiaalivuokone. Lamborghinin mallit Temerario sekä Revuelto, Koenigsegg Regera sekä Ferrari SF90 Stradale kaikki käyttävät samankaltaista polttomoottorin sekä aksiaalivuokoneen yhdistelmää, mutta tämän lisäksi kahta aksiaalivuokonetta, ilman jakovaihteistoa, toisella akselilla tehden kulkuneuvosta nelivetoisen. Myös Jaguar on käyttänyt tutkimukseen

tarkoitetussa C-X75 mallissaan YASA:n aksiaalivuokoneita. C-X75:n voimalinja oli toteutettu neljällä aksiaalivuokoneella, yksi kullekin renkaalle. (YASA, n.d.a)

Kuorma-autojen alalla sähköistyminen on vielä alkuvaiheilla, sillä sähköisten voimalinjojen tämänhetkiset rajoitukset tekevät kuormaliikenteen pitkät toimintamatkat raskailla kuormilla hyvin haastavaksi. Esimerkiksi Volvo FH Electric -kuorma-auton valmistajan ilmoittama toimintamatka on enintään 300 km, kun taas EU:n alueella kuorma-autoliikenteen kolmesta pituusluokasta (150–299 km, 300–499 km, 500–999 km) pisin eli 500–999 km on yleisin (Eurostat, 2024; Volvo, n.d.). Myös tällä alalla aksiaalivuokoneet voivat tulevaisuudessa tarjota ratkaisun, sillä aksiaalivuokoneen suuri vääntömomenttitiheys edesauttaa entistä raskaamman kaluston sähköistämistä ja koneen vaatima pienempi tilavuus ja massa vapauttaa kapasiteettia energiavarastolle mahdollistaen näin pidemmät toimintamatkat.

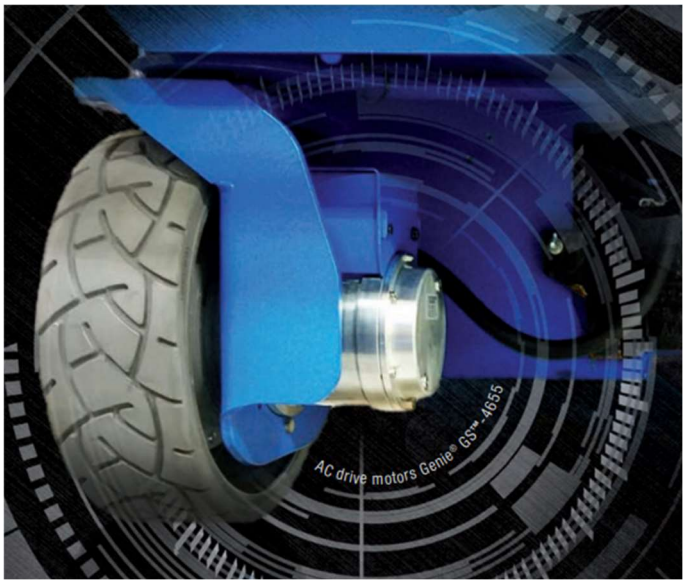
Aksiaalivuokoneet voivat siis ratkaista useita tieliikenteen sähköistämisen haasteita. Muotonsa ja vääntömomenttitiheytensä ansiosta sen integroitavuus erilaisiin hybridi- tai täyssähkökohteisiin on radiaalivuokonetta vapaampaa. Esimerkiksi koneen voi sijoittaa suoraan polttomoottorin kanssa samalle akselille tai suoraan ajavien renkaiden keskiöön. Aksiaalivuokone voi myös parantaa kulkuneuvon kokonaishyötysuhdetta tekemällä kulkuneuvosta kevyemmän, joten vähemmän energiaa kuluu kulkuneuvon omamassan liikuttamiseksi. Massan hallinta ei ole pelkästään suorituskyvyn kannalta tärkeää. Vaikkakin merkitys on vähäistä, raskaat kulkuneuvot kuluttavat tiestöä sekä renkaita nopeammin. Ääritapauksissa liian raskaat autot voivat myös johtaa mm. pysäköintihallien kapasiteetin ylittymiseen. (Jolly, 2024)

3.2 Työkoneet

Koska työkoneiden kirjo on hyvin laaja, tässä työssä voidaan tarkastella vain muutamia esimerkkitapauksia. Pyritään valitsemaan mahdollisimman eri kokoluokan työkoneita eri käyttötarkoituksilla ja näiden perustella arvioida miten erilaiset sähkökoneet soveltuvat työkoneisiin.

Trukkeja sekä henkilönostimia on jo pitkään valmistettu sähköisellä voimalinjalla, sillä niitä käytetään paljon sisätiloissa, missä polttomoottorien käyttö melu- ja päästöhaittojen takia ei ole suotavaa. Kummassakin käyttökohteessa pääasiallinen toiminta eli kuorman nosto ja

lasku tapahtuu hydrauliikan avustamana. Vaikka hydraulijärjestelmä vastaa voiman kasvattamisesta, sähkökoneelta toivotaan silti suurta vääntömomenttia nopeuden vuoksi. Tämä erityisesti silloin, jos laitteen ajo tapahtuu saman hydraulijärjestelmän avulla, jotteivät siirtymät kuluta aikaa. Jos ajo on toteutettu ilman hydrauliikkaa, sähkökone on tavanomaisesti sijoitettu suoraan vetävien renkaiden yhteyteen. Tällöin sähkökoneelta toivotaan tarpeeksi suurta vääntömomenttia, mahdollistamaan käytön ilman tilaa ja huoltoa vaativia alennusvaihteita. Kuvissa 6 a) ja b) pienten työkoneiden renkaan yhteyteen sijoitettuja sähkökoneita.



a)

b)

Kuva 6: a) Genie saksilavan E-Drive ajomoottori, joka on suoraan yhdistetty vetävään renkaaseen (Genielift, n.d.). b) KORDELin Ajomoottoriyksikkö haarukkatrukkeihin ym. kalustoon (KORDEL, n.d.).

Kuvien 6 a) ja b) haarukkatrukkien ja henkilönostinten kaltaiseen kalustoon pienet aksiaalivuokoneet voivat tuoda etuja tilansäästössä sekä voimalinjan yksinkertaisuudessa poistamalla tarpeen mekaaniselle välitykselle. Aksiaalivuokoneen voisi sijoittaa esimerkiksi suoraan vetävien renkaiden keskiöön (napamoottoriksi). Pieni sähkökone on eduksi, kun tarvitaan pientä ja ketterää laitetta, jota on helppo operoida varasto- ja myymälähyllyjen väleissä. Laitteen pieni koko on myös silloin merkittävää, kun sitä on tarkoitus kuljettaa esimerkiksi kuorma-autolla lastin mukana.

Isommassa kalustossa kuten traktoreissa ja kaivinkoneissa täyssähköiset ratkaisut eivät ole kovin yleisiä sillä niiltä vaaditaan raskaiden tehtävien suorittamista työvuoron kestävissä

sykleissä, ja akusto ei välttämättä ole paras energiavarasto tähän. Kuitenkin hybridiratkaisut ovat tänä päivänä melko yleisiä. Nämä on pääasiassa toteutettu siten että polttomoottori tuottaa vain sähköenergiaa ja sähkökone vastaa laitteen toiminnasta. Tällöin sähkökone ei saa viedä tilaa eikä massaa enempää kuin dieseltyökoneen mekaanisten osien poistaminen ja moottorin pienentäminen vapauttaa, jottei runkoon vaadita kalliita muutostöitä. Tämän tyylisiin työkoneisiin aksiaalivuokone voi olla erinomainen valinta juuri pienen koon takia. Myös hieman erilainen ratkaisu olisi mahdollista aksiaalivuokoneen levymäisen muodon ansiosta. Aksiaalivuokone voitaisiin samaan tapaan kuin edellä mainituissa superautoissa sijoittaa suoraan polttomoottorin jatkoksi samalle akselille pitäen työkoneen voimalinjan muuten samanlaisena kuin dieseltyökoneissa. Tämä helpottaisi hybridityökoneiden suunnittelua ja valmistamista, kun olemassa olevia ratkaisuja ei tarvitse muokata kovin paljoa.

Vielä tästä isommissa työkoneissa kuten kaivosalan maansiirtokoneissa on hyödynnetty sähköistä voimalinjaa niiden regeneratiivisen jarrutuksen takia. Tämä on mahdollistanut kuorman kanssa alas ajettaessa merkittävän energian talteenoton. tämä energia on riittänyt ajamaan laite takaisin ylös ilman kuormaa ja energiaa on jopa jäänyt ”ylimääräistä” hyödynnettäväksi muissa kohteissa. Nämä valtavat maansiirtokoneet ovat hyödyntäneet jo pitkään radiaalivuokoneita ja niiden massa ja koko huomioon ottaen sähkökoneen koko tai massa ovat melko pieniä tekijöitä. Toisaalta renkaille vaaditaan suuri vääntömomentti, jotta tämmöisen raskaan työkoneen saa ajettua ylös ja myös siksi että kuorman kanssa alas ajettaessa regeneratiiviselta jarrulta vaaditaan voimaa, sillä mekaanisten jarrujen käyttö apuna, on paitsi energian ”hukkaamista”, myös monesti mahdotonta jarrujen ylikuumenemisen vuoksi. Myös näissä kohteissa napamoottorit voisivat siis olla mahdollisia aksiaalivuokoneen käyttökohteita vääntömomenttinsa ansiosta. Työkoneissa huollon tarve on myös merkittävässä roolissa mikä tukee aksiaalivuokoneen valintaa, jottei laite vaadi huollettavia alennusvaihteita.

a)

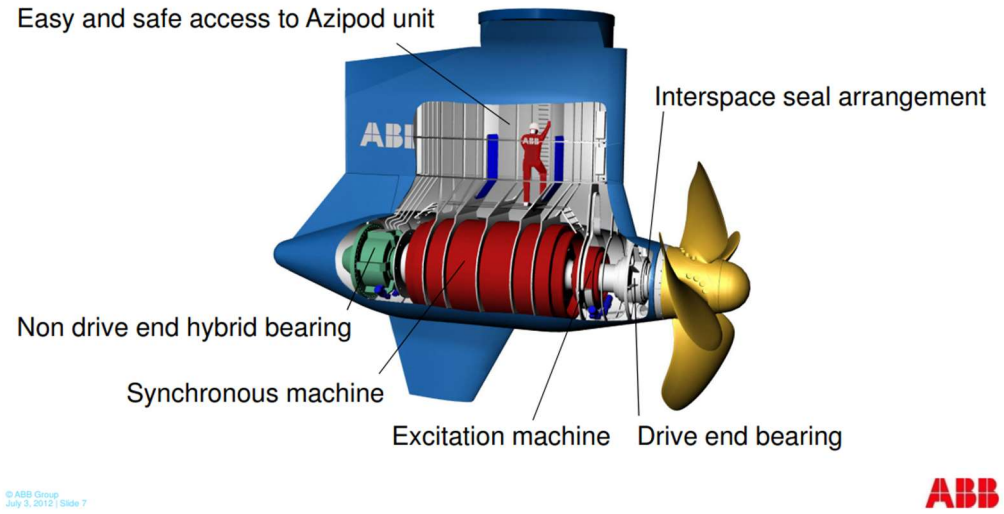
b)

Kuva 7: a) Komatsu 830E maansiirtokone(Komatsu, n.d.). b) Kyseisen maansiirtokoneen yksi ajomoottoriyksikkö. Tässäkin kohteessa radiaalivuokoneen kanssa käytetään alennusvaihteistoa, joka lisää sekä valmistuskustannuksia ja huollon tarvetta, että häviöitä mekaanisissa osissa (Huigong Group, n.d.).

3.3 Meriliikenteessä

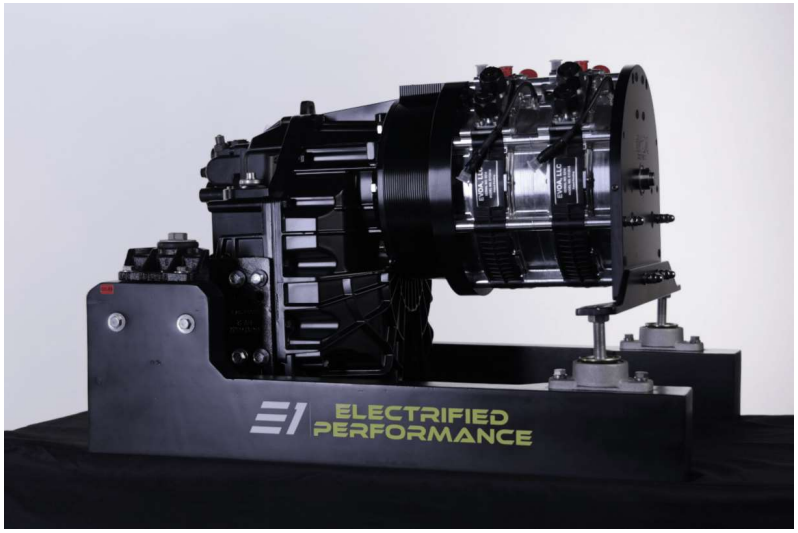
Laivaliikenteessä sähköisiä voimalinjoja, kuten ABB:n Azipod-potkurijärjestelmää, on käytetty polttomoottoriin verrattuna paremman hyötysuhteen takia jo pitkään (Azipod vuonna 1991) isoissa matkustaja-aluksissa, jäänmurtajissa sekä tankkereissa (ABB, 2021). Nämä isot alukset lastinsa kanssa painavat itsessään jo niin paljon, ettei sähkökoneen tehotiheydellä ole käytännön merkitystä konetyypin valinnassa. Koneen valintaan vaikuttaa enemmän sijoittelu, suurissa laivoissa sähkökone on tyypillisesti sijoitettu potkurin kanssa laivan rungon ulkopuolelle. Tämä sijoittelu vapauttaa tilaa rungon sisäpuolelta rahdille tai matkustajien tiloille. Koneen sijoittaminen potkurin yhteyteen vähentää liikkuvien osien tarvetta sähkökoneen ja potkurin välistä. Tällä tavoin kone ei myöskään vaadi erillistä jäähdytystä, koska kone on jatkuvasti veden alla ja näin ollen luonnollisesti nestejäähdytetty. Kun sähkökone on asetettu suoraan potkurin eteen, sen halkaisija ei saa olla liian suuri hydrodynaamisten ominaisuuksien varmistamiseksi, mutta pituudella ei ole niin suurta merkitystä. Tämän takia aksiaalivuokone ei tuo merkittäviä etuja suurten laivojen potkurijärjestelmiin ja usein on järkevämpää valita radiaalivuokone. Valmistajat kuten ePropulsion ja Torqeedo ovat kehittäneet myös samankaltaisia potkurijärjestelmiä skaalattuna mökkiveneiden

kokoluokkaan ja kaikkeen tältä väliltä käyttäen radiaalivuokoneita (ePropulsion, n.d.; Torqeedo, n.d.).



Kuva 8: ABB:n kehittämä Azipod-potkurijärjestelmä. Kuvasta hahmottaa kuinka potkurijärjestelmään sopii muotonsa puolesta radiaalivuokone. Potkurijärjestelmässä ei myöskään ole alennusvaihdetta, joten sähkökone tuottaa itsessään järjestelmän vaatiman vääntömomentin. Kuva lähteestä: (ABB, n.d.)

Toisaalta vaatimukset sähkökoneelle ovat erilaiset, jos veneen teholähteenä käytetään perämoottoria, jossa sähkökone ei ole suoraan yhdistetty potkuriin, tai sisämoottoria, joita yleisimmin löytyy huviveneistä (Main Channel Marina, 2022). Huviveneissä voimalinjaa valittaessa rungon kantokyky sekä koneen tilantarve ovat tärkeämpiä vaatimuksia kuin rahtilaivoissa. Yksityiselle huviveneen omistajalle hinta sekä huollettavuus voivat myös olla ratkaisevia tekijöitä, joten on kannattavaa suosia halvempaa konetta, kunhan se ei lisää liikkuvien osien määrää voimalinjassa. Huviveneen käyttöprofiiliin soveltuu sekä radiaali- että aksiaalivuokone ilman erillistä vaihteistoa, joten valintaan vaikuttaa kompromissi hinnan, massan sekä tilavuuden välillä. Aksiaalivuokoneiden yleistyessä tulevaisuudessa hintaero tulee kaventumaan ja aksiaalivuokone voi olla veneilyssäkin järkevämpi vaihtoehto. Tällä hetkellä ainakin EVOA E1 sisäperämoottorinen suorituskykyinen huvivene on varustettu aksiaalivuokoneella, sen vääntömomenttitiheyden takia (kuva 9) (YASA, n.d.b).



Kuva 9: EVOA E1 huviveneen sisämoottoriyksikkö. Yksikössä on kaksi YASA:n aksiaalivuokonetta.

Erityisen hyvin aksiaalivuokoneet voivat soveltua käytettäväksi pienten n. 5 m pitkien mökkiveneiden kanssa, joita käytetään sekä soutaen että perämoottorilla, sillä perämoottori saisi olla mahdollisimman pieni ja kevyt, jotta sen nostot ja laskut sekä mahdollisesti kokonaan perälaudasta irrottaminen soudun tai säilytyksen ajaksi olisi mahdollisimman vaivatonta. Näiden veneiden perälaudan vahvuus myös rajoittaa suurten ja painavien perämoottorien käyttöä.

3.4 Raideliikenteessä

Raideliikenne on sähköistymisen suhteen kaikista liikenteen osa-alueista kehittynein. Jo vuonna 1879 Werner von Siemens esitteli Berliinin teollisuusnäyttelyssä sähköveturin, jonka menestyksen pohjalta Siemens rakennutti Berliiniin sähköraiteet raitiovaunulla, joka aloitti sähköisen raideliikenteen voittokulun. Raideliikenteen sähköistyminen oli jo tuolloin toteutettavissa, sillä kulkuneuvo ei vaadi erillistä energiavarastoa raiteiden toimiessa johtimina. Sähköveturit olivat höyryvetureita soveltuvampia kaupunkiympäristöön melu- sekä päästöhaitattomana. (Siemens, 2013) Raideliikenteen sähköisillä voimalinjoilla, sisältäen sähkökoneet, on siis ollut hyvin pitkä aika kehittyä.

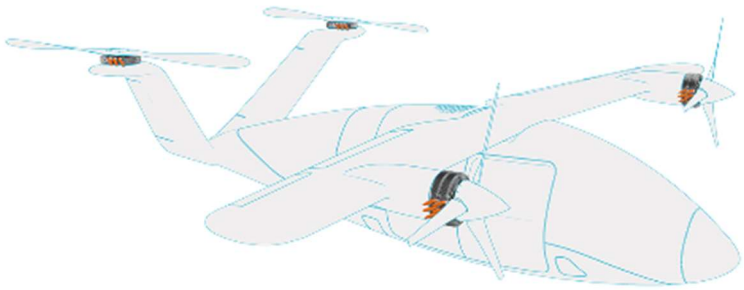
Junaliikenteessä, oli kyse matkustaja- tai rahtijunasta, nopeuksien muutokset eivät ole yhtä oleellisia kuin esimerkiksi tieliikenteessä, missä kulkuneuvon nopeus vaihtelee kaupungissa nopeasti ja usein 0–50 km/h välillä. Tämän takia veturin massalla ei myöskään ole yhtä suurta vaikutusta kulkuneuvon operointiin. Sähkökoneen massa ei myöskään haittaa kulkuneuvon kapasiteettia, sillä raideliikenteessä on hyvin tyypillistä kuljettaa suuria massoja (Suomessa suurin sallittu massa akselia kohden on 22,5 tonnia). Massan lisäksi sähkökoneen valinnassa täytyy ottaa huomioon tila, jota veturissa myös riittää. Veturin sähkökone on tavanomaisesti sijoitettu akselin rinnalle ja koska akseli on noin rataleveyden suuruinen (Suomessa 1524 mm, Euroopan yleisin 1435 mm), on mahdollista käyttää myös pitkää sähkökonetta. (Väylävirasto, 2024)

Raitiovaunu- tai metroliikenteessä toisaalta käyttöprofiili on erilainen. Kuormat eivät ole yhtä suuria ja pysähdyksiä sekä kiihdytyksiä on enemmän. Näihin kevyemmät aksiaalivuokoneet voisivat tuoda massaa säästämällä hyötyä, mutta vaikutus ei ole yhtä suuri kuin esimerkiksi henkilöautoissa ja niin kauan kuin aksiaalivuokoneella ja radiaalivuokoneella on suuri hintaero, raideliikenteessä tuskin tullaan näkemään aksiaalivuokoneita.

3.5 Ilmailuiikenteessä

Ilmailuliikenteen sähköistäminen on liikenteen eri osa-aloista kaikista haasteellisin ja myös vähiten edennyt. Sähköisen voimalinjan massa verrattuna perinteiseen on merkittävästi suurempi, johtuen akuston ja lentoturbiinipolttoaineen energiatiheyksien suuresta erosta, litiumioniakku: 243Wh/kg, Jet A1: 12 kWh/kg (Skytanking, n.d.; Orbtronic, n.d.). Haasteista huolimatta sähkölentokoneita on kehitetty niin perinteisten valmistajien kuin uusien startuppien toimesta (Air Charter Service, n.d.).

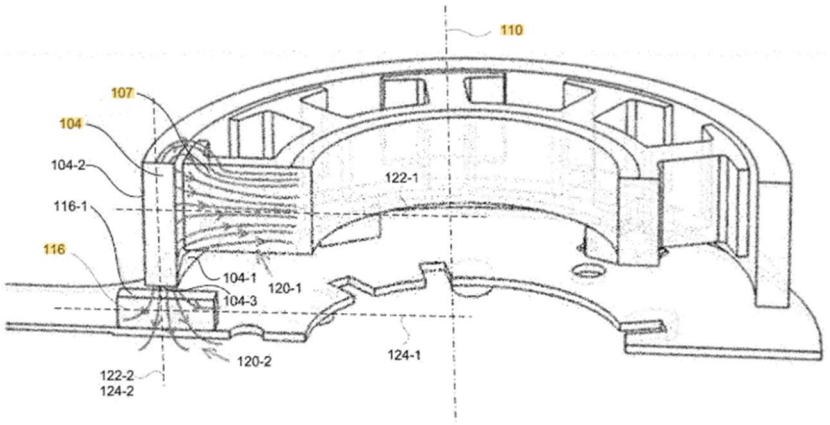
Tehotiheyden maksimointi on tärkein seikka, sillä ilma-aluksen suorituskykyyn vaikuttaa huomattavasti kulkuneuvon kokonaismassa, myös sähkökoneen viemä tilavuus on tärkeässä roolissa (Cervinka et al., 2014). Tämän takia konetyyppiä valittaessa suurin painoarvo on sähkökoneen massan ja tilavuuden minimoinnilla ja aksiaalivuokone sopii erinomaisesti näihin kriteereihin. Siksi esimerkiksi Evoliton ACCEL sähkölentokone käyttää voimalinjassaan aksiaalivuokoneita ja myös Axyal on aikeissa tuottaa aksiaalivuokonein varustettuja pieniä lentokoneita (kuva 10) (ACCEL, n.d.; Axyal, n.d.).



Kuva 10: Axyal:n suunnitelma pienestä matkustajalentokoneesta. Kuvassa korostettuna aksiaalivuokoneet (2 kummallakin siivellä ja 1 kummallakin perävakaimella). Kuva lähteestä: (AXYAL, n.d.)

Niin perinteisten valmistajien, kuten Airbus tai Boeing, kuin startup-valmistajien lentokoneiden sähkökoneista on hyvin vähän tietoa ja tämän työn tutkimusten perusteella ei voi arvioida aksiaalivuokoneiden tai radiaalivuokoneiden suosiota lentokonekäytössä. Kuitenkin edellä mainitut esimerkit todistavat aksiaalivuokoneiden olevan mahdollinen osa lentoliikenteen sähköistämistä.

Lentokoneiden lisäksi myös helikoptereita on pyritty sähköistämään ja myös tällä alalla teho- ja vääntömomenttitiheyden optimointi on ensisijaisen tärkeää. Samoin sähköhelikoptereiden konevalinnasta ei löydy varmaa tietoa mutta esimerkiksi FlyNow:n patenteista käy ilmi että, vaikka käytetään radiaalivuokonetta, kone on ulkomuodoltaan aksiaalivuokoneen mallinen ”leveä ja litteä” (Greil, 2021). Myös monet pienet nelikopterit ja muut vastaavat ”dronet”, esimerkkinä DJI:n nelikopteri, käyttävät samantapaisia ”litteitä” radiaalivuokoneita (Chen, 2022).



Kuva 11: DJI:n nelikopterin sähkökoneen patenttipiirros. Vaikka kone on tyypiltään radiaalivuokone, se muistuttaa ulkomuodoltaan aksiaalivuokonetta. Kuva patenttipiirroksesta: (Chen, 2022)

Tällaiset radiaalivuokoneet, jotka ulkomuodoiltaan ovat aksiaalivuokoneiden kaltaisia ”leveitä ja litteitä” voisi olla kannattavaa vaihtaa tehokkaammilla ja kevyemmillä aksiaalivuokoneilla. Kunhan aksiaalivuoteknologia yleistyy ja tuotanto kasvaa jokaisessa kokoluokassa, onkin hyvin todennäköistä, että tämä muutos tullaan näkemään.

4 Johtopäätökset

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää ja analysoida aksiaalivuokoneiden teknisiä ominaisuuksia ja arvioida niiden soveltuvuutta erilaisiin mobiilikäyttöihin vertaamalla niitä yleisemmin käytettyihin radiaalivuokoneisiin. Työn tarkoituksena oli tuottaa tutkimusmateriaalia liikenteen sähköisten voimalinjojen suunnittelun avuksi ja tunnistaa potentiaalisia käyttökohteita, joissa aksiaalivuokoneen edut pääsisivät mahdollisimman hyvin esiin.

Kirjallisuuskatsauksena toteutettu tutkimus onnistui vastaamaan sille asetettuihin tavoitteisiin ja tutkimuskysymyksiin. Työssä selvitettiin aksiaali- ja radiaalivuokoneiden keskeiset rakenteelliset erot, joista oleellisin on magneettivuon suunta suhteessa akseliin (aksiaalinen vs. radiaalinen), mistä myös nimitykset aksiaali- sekä radiaalivuokone. Jotta tämä magneettivuon suunta saadaan aksiaaliseksi, täytyy magneetit ja käämit asetella eri tavalla kuin radiaalivuokoneissa, mikä taas puolestaan johtaa luonnollisesti lyhyempään ”levymäiseen” koneeseen verrattuna radiaalivuokoneeseen, joka on usein sylinterimäinen. Rakenteellisten erojen tärkeimmiksi seurauksiksi tunnistettiin aksiaalivuokoneiden merkittävästi suurempi vääntö- ja tehotiheys sekä pienempi koko ja massa verrattuna vastaavan teholuokan radiaalivuokoneisiin. Nämä edut ovat erityisen tärkeitä mobiilikäytöissä. Haittapuolina nousivat esiin monimutkaisempi rakenne, haastavampi jäähdytys ja suunnittelu sekä erityisesti korkeammat valmistuskustannukset ja vähäisempi tuotantokapasiteetti, jotka tällä mahdollisesti rajoittavat niiden laajempaa käyttöönottoa. Tämän takia, vaikka aksiaalivuokoneiden edut ovatkin tunnistettu, radiaalivuokoneet edelleen dominoivat liikenteen sähköisiä voimalinjoja. Aksiaalivuokoneita kuitenkin on jo hyödynnetty mobiilikäytöissä, mutta pääasiassa suorituskykyisissä premium-autoissa ja tietyissä erikoissovelluksissa.

Yksi kiinnostavimmista havainnoista oli aksiaalivuokoneiden tarjoama potentiaali voimalinjojen yksinkertaistamiseen. Niiden korkea vääntömomenttitiheys mahdollistaa teoriassa alennusvaihteiden pienentämisen tai jopa poistamisen tietyissä sovelluksissa, mikä säästäisi tilaa, massaa ja potentiaalisesti parantaisi kokonaishyötysuhdetta. Eli pienemmän ja kevyemmän sähkökoneen hyödyntäminen tuo myös välillisiä säästöjä, alennusvaihteen pienentäminen tai poistaminen tuo säästöjä. Kun kulkuneuvosta tulee näin kevyempi sekä mekaaniset häviöt pienenevät, samaan suorituskykyyn vaaditaan vähemmän energiaa, joten akustoa voi

esimerkiksi pienentää, joka tuo taas merkittäviä säästöjä. Lisäksi aksiaalivuokoneen litteä muoto mahdollistaa uudenlaisia integrointitapoja, kuten sijoittamisen suoraan polttomoottorin ja vaihteiston väliin hybridiratkaisuissa tai renkaiden napoihin (napamoottorit).

Tutkimustulokset ovat linjassa aiempien tutkimusten (esim. Echle et al., 2018; Patil & Ugale, 2022; Shao et al., 2021) kanssa koskien aksiaalivuokoneiden korkeaa teho- ja vääntömomenttitiheyttä sekä kompaktia muotoilua. Tämä työ laajentaa aiempia vertailuja systemaattisella tarkastelulla eri liikenteen osa-alueilla (tie-, työ-, meri-, raide- ja ilmailuliikenne) ja arvioimalla aksiaalivuokoneiden soveltuvuutta vastaamalla kunkin alan erityisvaatimuksiin.

Työn kontribuutio on ensisijaisesti käytännöllinen ja tutkimuksellinen. Se kokoaa yhteen ajantasaista tietoa aksiaalivuokoneista ja niiden potentiaalista mobiilikäytöissä, tarjoten suunnittelijoille ja tutkijoille perustellun katsauksen aksiaalivuokoneiden mahdollisuuksista ja haasteista. Laajemmassa yhteiskunnallisessa perspektiivissä aksiaalivuokoneiden kehitys ja yleistyminen voisivat edistää liikenteen sähköistymistä erityisesti niillä sektoreilla, joissa paino, koko ja tehokkuus ovat kriittisiä tekijöitä, kuten tieliikenteessä ja ilmailuliikenteessä. Tämä tukisi osaltaan ilmastotavoitteiden, kuten esimerkiksi työssäkin mainitun EU:n "Fit for 55" -paketin, saavuttamista. Tulokset viittaavat siihen, että radiaalivuokoneiden ominaisuudet, erityisesti niiden suurempi koko ja pienempi vääntömomenttitiheys, ovat saattaneet rajoittaa optimaalisten sähköisten voimalinjaratkaisujen toteuttamista tietyissä tila- ja massakriittisissä sovelluksissa, joihin aksiaalivuokone voisi soveltua paremmin.

Tutkimuksen rajoitteena oli sen perustuminen puhtaasti kirjallisuuteen ja valmistajien julkaisemiin tietoihin ilman omia kokeellisia mittauksia tai simulaatioita. Yksityiskohtaiset valmistustekniset ja materiaalitieteelliset näkökulmat sekä tarkka kvantitatiivinen kustannusvertailu jäivät tarkastelun ulkopuolelle, vaikka kustannukset tunnistettiin yhdeksi vaikuttavaksi eroksi kahden konetyypin välillä. Myös ajantasaista, yksityiskohtaista tietoa käytetyistä sähkökonetyypeistä etenkin uusimmissa ja kehitysvaiheessa olevissa sovelluksissa (kuten sähkölentokoneissa) oli rajallisesti saatavilla.

Tärkeimpinä jatkotutkimusaiheina nousevat esiin muun muassa aksiaali- ja radiaalivuokoneiden valmistamisen eroihin ja etenkin siihen, mistä hintaerot johtuvat. Myös jäähdytysratkaisuja on tärkeä tutkia ja kehittää sillä monissa mobiilikäytöissä hyötysuhteen parantamiseksi sähkökoneet ovat jäähdytettyjä ja myös aksiaalivuokoneiden staattorin jäähdyttämisen täytyy onnistua, jotta se voi kilpailla samoista käyttökohteista radiaalivuokoneiden

kanssa. Muita mielenkiintoisia tutkimusaiheita olisi selvittää kummankin konetyypin valmistusteknillisiä haasteita, ja myös onko konetyypeissä eroa elinkaaren pituudessa ja esimerkiksi kierrättämisen haastavuudessa, sillä nämä ovat merkittävässä roolissa kulkuneuvon ympäristöystävällisyydessä.

Lähdeluettelo

ABB. (2021). Suomessa kehitetty ABB:n sähköinen Azipod® -potkurikäyttöjärjestelmä on tehostanut merenkulkua jo 30 vuotta. Viitattu 26.02.2025. Saatavissa https://new.abb.com/news/fi/detail/76497/suomessa-kehitetty-abbn-sahkoinen-azipodr-potkurikayttojarjestelma-on-tehostanut-merenkulkua-jo-30-vuotta

ABB. (n.d.). Azipod_XO_Presentation.pdf. Saatavissa https://library.e.abb.com/public/590ce0d16e7d72f5c1257a330027e777/Azipod_XO_Presentation.pdf

ACCEL. (n.d.). ACCEL: Spirit Of Innovation | World's Fastest Electric Plane. Viitattu 28.02.2025. Saatavissa https://evolito.aero/accel/

Air Charter Service. (n.d.). How close are we to electric planes. Viitattu 11.03.2025. Saatavissa https://www.aircharterservice.com/about-us/news-features/blog/how-close-are-we-to-electric-planes

AXYAL. (n.d.). AXYAL Propulsion. Viitattu 22.03.2025. Saatavissa https://www.axyal.com/home

Beyond Motors. (n.d.). Beyond Motors | Axial Flux Electric Motors Technology. Viitattu 26.04.2025. Saatavissa https://www.beyondmotors.io/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwtJ6_BhDWARIsAGanm-KfmRDfWFlraAlVH6HICR3Piy-QqdfyMW8qx3GMPhYYJ3FqG6clpkc0AaAt4cEALw_wcB

Brogen Motors. (n.d.). Axial Flux Motor | Compact & Powerful | OEM ODM Manufacturer. Viitattu 26.04.2025. Saatavissa https://brogenmotors.com/product/axial-flux-motor/

Cervinka, D, Knobloch, J., Prochazka, P., Kadlec, J., Cipin, r. & Pazdera, I. (2014). Electric powered airplane VUT 051 RAY'. Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics - Mechatronika 2014. pp. 6–10. Saatavissa DOI: 10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018228

Chen, Z. (2022). Motor positional sensing. Saatavissa patenttinumero: US11411472B2

Council of the European Union. (n.d.). Fit for 55: increasing the uptake of greener fuels in the aviation and maritime sectors. Viitattu 23.02.2025. Saatavissa https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/fit-for-55-refueleu-and-fueleu/

Danfoss Editron. (n.d.). High voltage multipurpose motors. Viitattu 26.02.2025. Saatavissa https://www.danfoss.com/en/products/dps/electric-converters-motors-and-systems/electric-motors/high-voltage-multipurpose-motors/

Echle, A., Neubauer, A. & Parspour, N. (2018). Design and Comparison of Radial Flux and Axial Flux Brushless DC Motors for Power Tool Applications. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM). Saatavissa DOI: 10.1109/ICELMACH.2018.8507221

ePropulsion. (n.d.). Pod Drive Series | Electric Outboard Motor | ePropulsion. Viitattu 26.02.2025. Saatavissa https://www.epropulsion.com/pod-drive/

European Environment Agency. (2024). New registrations of electric vehicles in Europe. Viitattu 15.02.2025. Saatavissa https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/new-registrations-of-electric-vehicles

Eurostat. (2024). Road freight transport statistics. Viitattu 18.03.2025. Saatavissa https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Road_freight_transport_statistics

EV Database. (n.d.). Tesla Model 3. Viitattu 02.03.2025. Saatavissa https://ev-database.org/car/1991/Tesla-Model-3

Evolito Ltd. (n.d.). Axial Flux Motors | Electric Motors For Aerospace. Viitattu 26.04.2025. Saatavissa https://evolito.aero/axial-flux-motors/

Genielift. (n.d.). Genie E-Drive Scissor Lifts. Viitattu 26.03.2025. Saatavissa https://www.genielift.com/en/e-drive

GKN EVO. (n.d.). Axial Flux Electric Motor Datasheet. Viitattu 26.04.2025. Saatavissa https://studylib.net/doc/10699376/axial-flux-electric-motor-range

Greil, J. (2021). Auftriebs- und Flugsteuerungseinheit für ein Fluggerät und Fluggerät. Saatavissa patenttinumero: DE102019123725A1

Higen Motor. (n.d.). higen-motor-11232_gvpfls. Viitattu 26.04.2025. Saatavissa https://cdn.komachine.com/media/company-catalog/higen-motor-11232_gvpfls.pdf

Huigong Group. (n.d.). Wheel Motor Assembly 5GEB25 For Komatsu 830E Dump Truck. Huigong (Hebei) Technology Co., Ltd. Viitattu 26.04.2025. Saatavissa https://www.hebeihuigong.com/products/wheel-motor-assembly-830e.html

Jolly, J. (2024). Are electric cars too heavy for roads, bridges and car parks? The Guardian, 25 March. Saatavissa https://www.theguardian.com/business/2024/mar/25/are-electric-cars-too-heavy-for-british-roads-bridges-and-car-parks

Jumayev, S., Borisavljevic, A., Boynov, K., Lomonova, E. A. & Pyrhönen, J. (2013). Force and torque calculation methods for airgap windings in permanent magnet machines. Saatavissa DOI: 10.1109/EVER.2013.6521582

Komatsu. (n.d.). 830E-5 Electric Drive Mining Truck. Viitattu 26.04.2025. Saatavissa https://www.komatsu.com/en/products/trucks/electric-drive-mining-trucks/830e-5/

KONE. (n.d.). Innovaatiot | KONE Suomi. Viitattu 6.04.2025. Saatavissa https://www.kone.fi/tietoa-meista/kone-yrityksena/innovaatiot/

KORDEL. (n.d.). Drive technology for industrial trucks. Viitattu 26.03.2025. Saatavissa https://www.kordel.de/en/material-handling.html

Lampinen, M. (2024). Axial flux motors: the future of performance in an EV era. Automotive World, 29 November. Saatavissa https://www.automotiveworld.com/articles/axial-flux-motors-the-future-of-performance-in-an-ev-era/

Lin, C.-L., Dai H.-M., Chao, C.-H., Wei, S. & Yang C.-F. (2023). Drivetrain and Powertrain Thermal Analyses of a Tesla Model 3 Electric Vehicle. Sensors and Materials, 35(12), s. 4133. Saatavissa DOI: 10.18494/SAM4593

Main Channel Marina. (2022). How To Choose The Best Inboard Model For You. Viitattu 27.02.2025. Saatavissa https://www.mainchannel.com/blog/how-to-choose-the-best-inboard-model-for-you--50310

Nidec. (2021). Super-flat Actuator FLEXWAVE with Axial Flux Motor. Viitattu 13.02.2025. Saatavissa https://www.nidec.com/en/technology/casestudy/flexwave/

Orbtronic. (n.d.). NCR18650B 18650 Battery Panasonic-Japan 3400mAh Li-ion 3.7V Flat Top Rechargeable. Viitattu 11.03.2025. Saatavissa https://www.orbtronic.com/batteries-chargers/panasonic-3400mah-18650-li-ion-battery-cell-ncr18650b

Parviainen, A. (2005) Design of axial-flux permanent-magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines. Väitöskirja. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto (Acta Universitatis Lappeenrantaensis / Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, 208) Saatavissa URN:ISSN:1456-4491

Patil, A.S. & Ugale, R.T. (2022). Design and Comparative Analysis of Axial Flux and Radial Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor for a 2-Wheeler Electric Vehicle Application. 2022 IEEE Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation (IATMSI), pp. 1–4. Saatavissa DOI: 10.1109/IATMSI56455.2022.10119282

Shao, L., Navaretne, R., Popescu, M. & Liu, G. (2021). Design and Construction of Axial-Flux Permanent Magnet Motors for Electric Propulsion Applications—A Review. IEEE Access, 9, pp. 158998–159017. Saatavissa DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3131000

Siemens. (2013). Siemens presents the world's first electric railway. siemens.com Global Website. Viitattu 18.03.2025. Saatavissa https://www.siemens.com/global/en/company/about/history/stories/on-track.html

Skytanking. (n.d.). Skytanking - Glossary: Jet Fuel. Viitattu 11.03.2025. Saatavissa https://www.skytanking.com/news-info/glossary/jet-fuel/

Tesla. (n.d.). Model 3 Owner's Manual. Viitattu 02.03.2025. Saatavissa https://www.tesla.com/ownersmanual/model3/en_cn/

Torqeedo. (n.d.). Propulsion Technology – Torqeedo. Viitattu 26.02.2025. Saatavissa https://www.torqeedo.com/en/green-propulsion/propulsion-technology.html

Vem Motors. (n.d.). 12-General-catalogue_2017_pms-motors. Viitattu 27.04.2025. Saatavissa https://www.vem.fi/wp-content/uploads/2018/03/12-General-catalogue_2017_pms-motors.pdf

Volvo. (n.d.). Volvo FH Electric. Viitattu 18.03.2025. Saatavissa https://www.volvotrucks.fi/fi-fi/trucks/electric/volvo-fh-electric.html

Väylävirasto. (2024). Railway network - Finnish Transport Infrastructure Agency – YJA. Viitattu 23.03.2025. Saatavissa https://vayla.fi/transport-network/railway-network

Wolong. (n.d.). Permanent-magnet synchronous motors for controlled drive systems. Viitattu 26.04.2025. Saatavissa https://www.wolong-electric.com/ge/upload/2019/01/29/15487528637443p8kpx.pdf

YASA. (n.d.a). A Story Of Electrified Performance. Viitattu 29.01.2025. Saatavissa https://yasa.com/applications/

YASA. (n.d.b). EVOA: Marine Propulsion powered by YASA Motors. Viitattu 26.02.2025. Saatavissa https://yasa.com/applications/evoa/

Yeaphi. (n.d.). News - Advantages, Difficulties, and New Developments of Axial Flux Motors. Viitattu 27.04.2025. Saatavissa https://www.yeaphi.com/news/advantages-difficulties-and-new-developments-of-axial-flux-motors/