



**TURUN  
YLIOPISTO**

# **Aksiaali- ja radiaalivuomoottorit ajomoottoreina kaivosteollisuudessa**

Automaatiotekniikka  
Kone- ja materiaalitekniikan laitos, Teknillinen tiedekunta  
Kandidaatintutkielma

Laatija:  
Johannes Kuusela

13.5.2026  
Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

**Kandidutkielma**  
**Kone- ja materiaalitekniikan laitos, Teknillinen tiedekunta**  
**Turun yliopisto**

**Oppiaine:** Automaatiotekniikka  
**Tekijä:** Johannes Kuusela  
**Otsikko:** Aksiaali- ja radiaalivuomootorit ajomootoreina kaivosteollisuudessa  
**Ohjaaja(t):** Rafal P. Jastrzebski  
**Sivumäärä:** 24 sivua  
**Päivämäärä:** 13.5.2026

Tässä tutkielmassa käsitellään kirjallisuuskatsauksen muodossa erilaisia sähköisiä voimansiirron tapoja. Erityisesti keskitytään sähkömoottoreihin ja niiden eri topologioihin. Kirjallisuuskatsauksen kohteena on myös sähköisen kulkuneuvon pyörän sisään sijoitettava in-wheel-moottorin käyttö. Näitä aiheita tarkastellaan yleisestä näkökulmasta sekä raskaan teollisuuden ja erityisesti kaivosteollisuudessa käytettävien kulkuneuvojen näkökulmasta. Tutkielmassa myös mallinnetaan ja vertaillaan kahta sähkömoottoria eri topologioilla.

**Avainsanat:** Aksiaalivuo, radiaalivuo, in-wheel, raskas teollisuus

Tutkielmassa käytetyt symbolit ja niiden tarkoitus taulukossa 1

Taulukko 1

Selitys	Symboli	Yksikkö
Pyörimisnopeus	$N$	rpm
Roottorin pyörimisnopeus	$N_r$	rpm
Tahtinopeus	$N_s$	rpm
Jättämä	$S$	
Taajuus	$f$	Hz
Vääntö	$T$	Nm
Kulmanopeus	$\omega$	rad/s
Teho	$P$	W
Napa	$p$	

## **Sisällysluettelo**

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Teoreettinen viitekehys</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Sähköinen voimalinja</b>	<b>7</b>
3.1	Erilaiset sähkömoottorit	8
3.2	Epätahtimoottori	8
3.3	Tahtimoottori	9
3.4	Radiaali- ja aksiaalivuomoottori	10
<b>4</b>	<b>Sähkömoottorit ajomoottoreina kaivosteollisuudessa</b>	<b>12</b>
4.1	Mitä ajoneuvon sähkömoottoreilta vaaditaan	12
4.2	In-wheel-moottorin hyötyjä ja haasteita	12
<b>5</b>	<b>HVH410-150 vastaavan moottorin mallinnus</b>	<b>14</b>
5.1	Mallinnettavan moottorin vaatimukset	14
5.2	Toteutus	15
5.3	Radiaalivuomoottorin mallinnus	16
5.4	Aksiaalivuomoottorin mallinnus	17
5.5	Tulokset	18
<b>6</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>22</b>
	<b>Lähteet</b>	<b>23</b>

# 1 Johdanto

Maailman sähköistyminen ja erityisesti erilaisten kulkuneuvojen sähköistyminen näkyy tänä päivänä jo lähes joka puolella. Sähköautot, sähköbussit ja muut sähköiset kulkuneuvot ovat tulleet jäädäkseen. Kestävänä toimijana näyttäytyminen ja vastuullisuus ovat nousseet tärkeiksi arvoiksi lähes kaikille yrityksille. Myös raskaassa teollisuudessa, kuten kaivostoiminnassa on alettu kehittämään sähköisiä vaihtoehtoja vanhalle dieselmoottorille. Vuonna 2024 täyssähkökäyttöisten ja hybridikäyttöisten kaivosteollisuuden laitteiden markkinaosuus oli jo 18% [1].

Vakiintunut tapa sähköistää esimerkiksi nelipyöräinen kulkuneuvo on akselin keskelle sijoitettu moottori, josta mekaaninen energia siirretään pyörälle vetoakseleilla mahdollisesti vaihdelaatikon kautta. Vaihtoehtoinen ratkaisu akselin keskelle sijoitettavalle moottorille, on sijoittaa moottori itse vanteen sisään. Tällaista moottoria kutsutaan in-wheel-moottoriksi. In-wheel-moottori mahdollistaa erillisen voimansiirron poistamisen.

In-wheel-moottori itsessään ei ole uusi keksintö. Vuonna 1900 Ferdinand Porsche suunnitteli ja rakensi ensimmäisen prototyypin hybridiautosta, joka käytti in-wheel-moottoreita [2], [3]. Nykypäivänä in-wheel-moottoreita ei juurikaan käytetä sähköautoissa tai muissa raskaammissa sovelluskohteissa, joitain poikkeuksia lukuun ottamatta. Prototyyppejä esimerkiksi sähköautoista in-wheel-moottoreilla on kuitenkin valmistettu ja osa näistä on päässyt tuotantoonkin, mutta ne eivät ole saavuttaneet suuria markkinoita. Myös kaivosteollisuudesta löytyy joitain käyttökohteita, joissa in-wheel-moottoreita käytetään ajomoottoreina, esimerkiksi Sandvikin valmistama sähkökäyttöinen dumperi TH550B [4]. Kevyemmissä sovelluskohteissa sen sijaan in-wheel-moottorit ovat yleisiä, esimerkiksi Suomessakin yleistyneet sähköpotkulaudat käyttävät in-wheel-moottoreita.

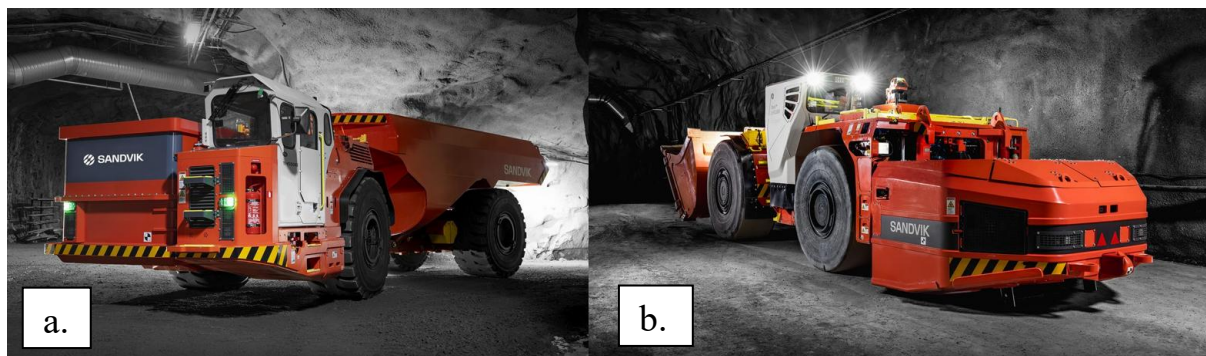
Tässä tutkielmassa perehdytään siihen, miksi aihe on tärkeä ja ajankohtainen, jonka jälkeen käydään läpi sähköisen voimalinjan komponentteja, erilaisia sähkömoottorityyppejä, niiden topologioita, hyötyjä ja haasteita. Lopussa käydään läpi vaatimuksia raskaan teollisuuden ajomoottorille ja erityisesti mitä kaivosteollisuudessa käytettävien koneiden ajomoottoreilta vaaditaan. Kaivosteollisuudessa käytettävän ajomoottorin pohjalta myös mallinnetaan kaksi sähkömoottoria eri topologioilla ja vertaillaan, kuinka ne suoriutuivat. Tässä tutkielmassa ei tarkastella tasavirralla (DC) ajettavia sähkömoottoreita vaan pelkästään vaihtovirralla (AC) ajettavia sähkömoottoreita.

## 2 Teorettinen viitekehys

Ilmastomuutoksen myötä kestävätkä ratkaisut kasvattavat suosiotaan perinteisten fossiilisia polttoaineita käyttävien ratkaisuiden rinnalla. Euroopassa on tavoitteena vähentää päästöjä 55 % vuoteen 2030 mennessä vuoteen 1990 verrattuna [5]. Tähän tavoitteeseen pääsemiseksi on välttämätöntä kehittää uusia ratkaisuja fossiilisten polttoaineiden rinnalle. Polttomoottoreiden korvaaminen sähköisillä vaihtoehdoilla on siis erittäin ajankohtaista.

Raskaassa teollisuudessa ja teollisuudessa ylipäänsä sähköisten voimanlähteiden kehittyminen on ollut jokseenkin hitaampaa, kuin esimerkiksi kuluttajille suunnatuissa tuotteissa kuten sähköautot tai sähköpotkulaudat. Kustannukset ovat yksi isoimmista tekijöistä miksi sähköistyminen on hidasta [6]. Yrityksillä on usein jo aikaisemmin hankittua polttomoottorikalustoa. Uudet hybridi tai täyssähkö ratkaisut näiden tilalle voivat olla erittäin kalliita ja mahdollisuudet sähköisille retrofit ratkaisuille ovat huonoja tai niitä ei ole lainkaan [6]. Teollisuudessa vallitsee usein myös epävarmuus kaikkea uutta kohtaan, tämän vuoksi yhtiöt eivät halua helposti lähteä kokeilemaan mitään uutta, jolla ei ole jo aikaisemmin näyttöä toimivuudesta [7]. Vaikka korkeat kustannukset ja epävarmuus hidastavat sähköistymistä, voi esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden nousseet kustannukset toimia ajavana voimana siirtyä polttomoottoreista sähköisiin ratkaisuihin [8].

Akkukäyttöiset laitteet tuovat sähköistymiseen omat haasteensa akkujen lataamisen muodossa. Laitteen käyttämä aika latauksessa, on pois laitteen tehokkuudesta, jolloin vastaavilla polttomoottorilaitteilla tankkaaminen on huomattavasti lataamista nopeampaa ja tehokkaampaa. Akkuteknologian kehittymisen myötä markkinoille on tullut entistä kehittyneempiä ja tehokkaampia akkuja, joiden lataaminen on aikaisempaa nopeampaa. Akkujen nopea lataaminen voi lisätä niiden käyttöä myös teollisuudessa [8]. On myös kehitetty teknologioita, jotka mahdollistavat akkujen vaihdon nopeasti. Akun vaihtaminen mahdollistaa työn saumattoman jatkumisen samaan aikaan, kun toinen akku lataantuu. Esimerkkinä tästä kuvassa 1a Sandvikin jo aikaisemmin mainittu akkukäyttöinen dumpperi TH550B, sekä Sandvikin akkukäyttöinen lastauskone LH518iB kuvassa 1b [4], [9].



Kuva 1 Kuvassa 1a Sandvikin valmistama akkukäyttöinen dumperi TH550B. Kuvassa 1b Sandvikin valmistama akkukäyttöinen lastauskone LH518iB. Muokattu lähteistä [4], [9].

Kaivosympäristö tuo omat erityispiirteensä työkoneiden vaatimuksille verrattain muuhun teollisuuteen. Ominaista kaivokselle voi olla pitkät mäkiäjet, isot lämpötilan vaihtelut, kosteus tai kuivuus. Erityisesti pöly voi luoda haasteita. Kaivoksessa täytyy myös toteuttaa jonkinlainen ilmanvaihto. Sähkökäyttöisillä työkoneilla etuna on se, että ne eivät lisää pakokaasujen ja lämmön aiheuttamaa tuuletustarvetta samalla lailla, kun vastaava diesel laite [7]. Alamäkiäajossa sähkökäyttöisten laitteiden etuna on regeneratiivinen jarrutus, joka mahdollistaa energian talteenoton ja akun lataamisen [4].

Normaalisti sähköisissä ajoneuvoissa käytettävät moottorit sijaitsevat ajoneuvon keskellä, jolloin voiman siirtämiseen pyörälle tarvitaan erillinen voimansiirto, eli vetoakselit ja mahdollisesti vaihdelaatikko. Nämä komponentit tuottavat lämpöä, vaativat huoltamista ja näin ollen vähentävät energiatehokkuutta [10]. Akkukäyttöisten laitteiden tehokkuutta ja akunkestoa voi siis parantaa minimoimalla energiahäviöitä. In-wheel-moottorit mahdollistavat ison energian säästön poistamalla ylimääräisiä voimansiirron osia laitteesta [11]. In-wheel-moottorin voi sijoittaa pyöritettävän pyörän sisään, jolloin itse vanne kiinnittyy suoraan moottorin roottoriin. Näin voidaan eliminoida erilaiset häviöt, joita voimansiirto normaalisti aiheuttaa [11], [12]. Toinen etu in-wheel-moottoria käyttäessä on ohjattavuus. Kun moottorit asennetaan jokaiseen pyörään, pystytään jokaisen pyörän vääntöä ohjaamaan itsenäisesti. Tämän avulla ajoneuvon käsiteltävyys ja ohjattavuus paranee huomattavasti [10].

### 3 Sähköinen voimalinja

Sähköisen voimalinjan ideana on muuntaa sähköenergiaa mekaaniseksi energiaksi. Tämä tapahtuu monen komponentin avulla. Pääkomponentteja ovat akku, invertteri, sähkömoottori ja mekaaninen voimansiirto.

Sähköenergia varastoidaan akuissa. Täysin sähköisten ajoneuvojen tapauksessa käytetään korkeajänniteakkua, jonka jännite on yleensä 400V-800V [13]. Akkuun kytkettynä on yksi tai useampi latausportti, josta akkuun saadaan ladattua lisää virtaa. Riippuen ajoneuvosta lataus voi olla mahdollista nopeasti korkeajännitteellä tai hitaammin esimerkiksi tavalliseen pistorasiaan kytketyn latausjohdon avulla. Akkujen koko vaihtelee käyttökohteen mukaan. Normaaaleissa tieliikenteessä käytettävissä autoissa kuten Tesla Model 3:ssa akun kapasiteetti on 64 kWh [14]. Raskaammissa käyttökohteissa kuten Sandvikin valmistamassa dumperissa akkujen yhteenlaskettu kapasiteetti on 354 kWh [4].

Akulta lähtevä virta on DC-virtaa eli tasavirtaa. Sähkömoottorit tarvitsevat kuitenkin toimiakseen AC-virtaa eli vaihtovirtaa. Tämän takia akulta lähtevä sähköenergia kulkee ennen moottoreita invertterille, joka muuntaa akun DC-virran AC-virraksi. Invertterin tehtävänä on myös säätää virran taajuutta ja amplitudia sopivaksi moottorille. Virran taajuus ja amplitudi määrittelevät moottorin nopeutta ja vääntöä. Yleensä akulta lähtee virtaa myös konverterille, joka muuntaa akun korkeajännitteisen DC-virran matalajännitteiseksi DC-virraksi.

Matalajännitevirtaa käytetään yleensä ajoneuvon apulaitteissa kuten valoissa.

Sähkömoottori on voimalinjan osa, joka tekee energian muunnoksen sähköenergiasta mekaaniseksi energiaksi. Sähkömoottori muuntaa energiaa magneettikenttien avulla. Staattori eli moottorin paikallaan pysyvä osa luo vaihtovirran avulla pyörivän magneettikentän, joka vetää moottorin pyörivää osaa eli roottoria mukanaan. Roottorissa on kiinni akseli, jonka avulla mekaaninen energia saadaan siirrettyä mekaaniselle voimansiirrolle.

Mekaaninen voimansiirto voi pitää sisällään ajoneuvosta riippuen erilaisia akseleita ja vaihteistoja. Moottori voi olla esimerkiksi yhdistetty vaihdelaatikkoon, joka säätelee mekaanisen voiman ja väännön määrää, laskemalla tai nostamalla kierrosnopeutta. Vaihdelaatikon jälkeen voimansiirrosta voi olla differentiaalivaihteisto eli tasauspyörästö, joka muuttaa akselin suunnan ja jakaa voiman kahdelle pyörälle. Tasauspyörästön tehtävänä on myös mahdollistaa pyörien pyöriminen eri nopeuksilla. Vaihteistojen välillä voimaa siirretään akseleita pitkin.

Sähköisillä ajoneuvoilla on mahdollista ottaa talteen jarruttamisessa syntyvää energiaa, mitä kutsutaan regeneratiiviseksi jarrutukseksi. Tällöin sähkömoottori alkaa toimia generaattorin tavoin, eli muuntamaan liike-energiaa sähköenergiaksi. Invertteri muuntaa moottorin tuottaman virran akulle sopivaksi tasavirraksi, jolloin akku lataantuu. Toinen monimutkaisempi tapa on kytkeä esimerkiksi vaihdelaatikkoon generaattori, joka mahdollistaa liike-energian talteenoton. On olemassa myös mekaanisesti toimivia energiavarastoja, kuten vauhtipyörä, johon voidaan ohjata ja ottaa käyttöön jarrutuksesta syntyvää energiaa.

### 3.1 Erilaiset sähkömoottorit

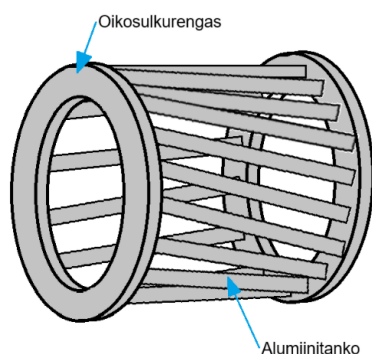
Vaihtovirralla toimivat sähkömoottorit voidaan jakaa niiden tahtisuuden perusteella kahteen eri kategoriaan, epätahtimoottoreihin ja tahtimoottoreihin. Moottorin tahtisuus riippuu siitä, pyöriikö roottori samaa vauhtia tahtinopeuden eli staattorin luoman magneettikentän kanssa vai jättääkö roottori magneettikentästä. Jokaiselle vaihtovirralla toimivalle moottorille voidaan laskea sen tahtinopeus kaavalla  $N_s = \frac{120f}{p}$ , jossa  $f$  on moottorille syötettävän vaihtovirran taajuus ja napojen lukumäärä moottorissa on  $P$  [15].

### 3.2 Epätahtimoottori

Epätahtimoottoreiden roottori pyörii tahtinopeutta hitaammin, ja tätä pyörimisnopeuksien välistä eroa kutsutaan jättämäksi (engl. slip). Jättämä voidaan laskea kaavalla  $S = \frac{N_s - N}{N_s}$ , jossa  $N$  on roottorin todellinen pyörimisnopeus ja  $N_s$  on tahtinopeus [15]. Jättämä voi kertoa moottorin toiminnasta. Jättämän ollessa  $0 < S < 1$  moottori toimii normaalina moottorina. Jättämän ollessa  $S < 0$  roottori pyörii nopeampaa kuin tahtinopeus, jolloin moottori alkaa toimia generaattorina. Generaattorina toimiessa virran talteenotto vaatii moottorin lisäksi virran talteenottoon kykenevän invertterin ja ohjausyksikön. Kun  $S > 1$  roottori pyörii täysin eri suuntaan tahtinopeuden kanssa, jolloin pyörimissuunnat vastustavat toisiaan ja johtavat nopeaan roottorin pyörimisnopeuden hidastumiseen [16].

Induktiomoottoreista yleisimpiä ovat oikosulkumoottorit. Oikosulkumoottorilla virtaa syötetään pelkästään staattorille. Oikosulkumoottorin roottori on valmistettu alumiini- tai kupari tangoista, jotka on yhdistetty toisiinsa renkaalla kuten kuvassa 2. Rengas aiheuttaa tankojen välille oikosulun, jonka mukaan moottori on nimetty [17]. Oikosulkumoottori on

vielä tänä päivänäkin yleisin ja eniten käytetty sähkömoottori. Syynä tälle voidaan pitää edullisia valmistuskustannuksia, kestäväää rakennetta ja käytön helppoutta.



Kuva 2. Oikosulkumoottorin roottorin rakenne. Kuva itse piirretty, mallina käytetty lähteen [18] kuvaa. Kolmivaiheisen induktimoottorin staattori on nimensä mukaan käämitetty kolmivaiheisesti. Tämä tarkoittaa sitä, että käämeille tulee virtaa kolmessa eri vaiheessa olevan siniaallon muodossa. Käämeissä kulkeva virta luo pyörivän magneettikentän, jonka mukana roottori lähtee pyörimään.

### 3.3 Tahtimoottori

Yleisin tahtimoottori on kestopagneettimoottori, eli sen roottori pyörii samaa vauhtia kuin staattorin luoma magneettikenttä. Kestomagneettimoottorilla tyypillistä on erittäin hyvä tehosiheys ja hyötysuhde. Näiden ominaisuuksien takia se on kasvattanut suosiotaan erilaisten sähköisten kulkuneuvojen ajomoottorina. Kestomagneettimoottorin huonoina puolina ovat valmistuksen korkeat kustannukset ja kestopagneetin epävakaaat lämpöominaisuudet [19]. Korkeat valmistuskustannukset syntyvät kalliiden kestopagneettien tarpeesta [10]. Huonoina puolena kestopagneettimoottoreiden valmistuksessa voidaan pitää myös geopolitiittisiä riskejä. Kiina tuottaa tällä hetkellä suurimman osan maailman harvinaisista maametalleista, joita tarvitaan kestopagneettimoottoreiden valmistuksessa [20].

Kestomagneettimoottorin staattorissa on kolmivaiheiset käämitykset, kuten induktimoottorissakin, mutta roottorissa on kestopagneetit, minkä ansiosta roottori saadaan seuraamaan staattorin luomaa magneettikenttää.

Toinen tahtimoottorityyppi on reluktanssimoottori. Reluktanssimoottoreiden suosio on kasvussa niiden yksinkertaisen rakenteen ja pienten materiaalikustannusten takia [21]. Reluktanssimoottorin valmistuskustannukset ovat esimerkiksi kestopagneettimoottoria

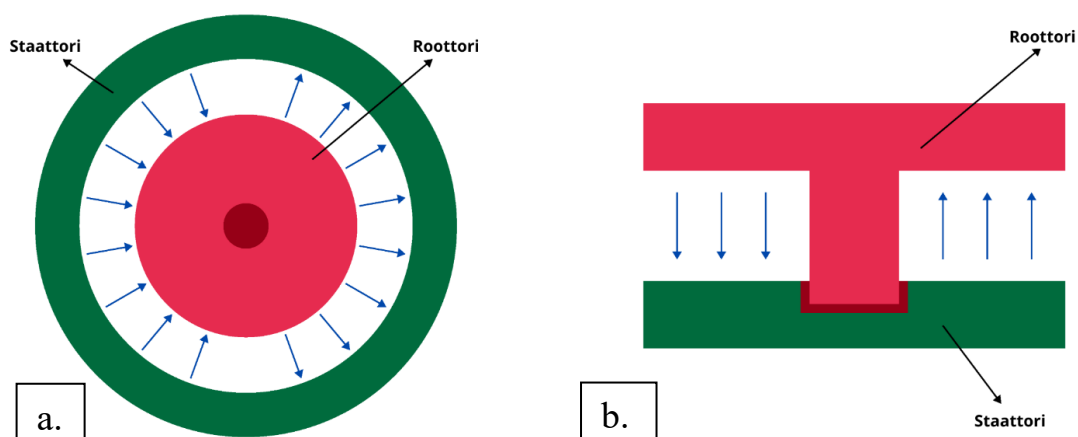
pienemmät, koska reluktanssimoottori ei käytä kestopagneetteja sen roottorissa.

Reluktanssimoottori ei kuitenkaan pärjää vertailussa kestopagneettimoottoria vastaan erityisesti väännön osalta [10]. Tätä moottorityyppiä ei kuitenkaan tarkastella tässä tutkielmassa tarkemmin.

### 3.4 Radiaali- ja aksiaalivuomoottori

Sähkömoottorin topologialla eli rakenteella voidaan vaikuttaa, mihin suuntaan moottorin magneettivuo kulkee. Magneettivuon suunnan perusteella sähkömoottorit voidaan jakaa kahteen kategoriaan: radiaalivuomoottori (engl. radial-flux motor) ja aksiaalivuomoottori (engl. axial-flux motor) [22]. Radiaalivuomoottoreita on valmistettu ja käytetty kauemmin kuin aksiaalivuomoottoreita. Pidempi historia teollisuudessa on tehnyt radiaalivuomoottorista yleisemmän moottoritopologian [10]. Viimeisien vuosikymmenten aikana edistykset teknologiassa ovat kuitenkin kasvattaneet aksiaalivuomoottorin suosiota erityisesti ajomoottorisovelluksissa [23].

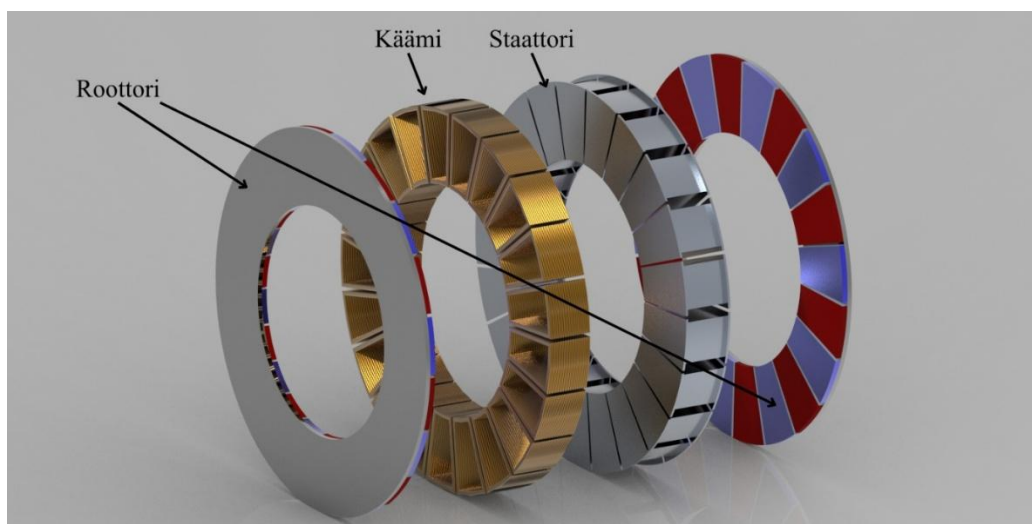
Radiaalivuomoottorissa magneettivuo kulkee staattorin ja roottorin välisessä ilmaraossa radiaalisesti eli akselista ulospäin, kuten vasemmalla kuvassa 3a Radiaalivuomoottorissa roottori voi olla joko staattorin sisällä tai ulkopuolella. Ajomoottorisovelluksissa, joissa moottori on sijoitettu vetoakselien väliin, on yleisempää käyttää moottoria, jossa roottori on staattorin sisällä. Moottorin integroiminen pyöritettävään pyörään on myös mahdollista. Tällöin puhutaan in-wheel-moottoreista. In-wheel-moottoreissa on yleisempää asettaa roottori staattorin ulkopuolelle. Tällöin roottoriin on mahdollista asettaa enemmän kestopagneetteja staattorin sisällä pyörivään roottoriin verrattuna. Kestomagneettimoottorin kohdalla kestopagneettien lisääminen parantaa moottorin vääntöä [11].



Kuva 3. Kuvassa 3a radiaalinen magneettivuo ja kuvassa 3b aksiaalinen magneettivuo. Magneettivuon reitti kuvattu sinisillä nuolilla. Kuva muokattu lähteestä [10].

Aksiaalivuomootorissa magneettivuo kulkee pyörimisakselin suuntaisesti, kuten oikealla kuvassa 3b Aksiaalivuomootoreiden etuja ovat kevyt rakenne, suuri tehotehiys, suuri vääntömomenttipainosuhde ja energiatehokkuus [23]. Aksiaalivuomootoreissa staattori ja roottori ovat lautasen tai levyn muotoisia, jolloin kestopagneettien ja akselin välinen etäisyys kasvaa. Pyöritettävän akselin ja magneetin etäisyyden kasvattaminen taas kasvattaa moottorin vääntömomenttia. Aksiaalivuomootorissa on mahdollista sijoittaa staattorin käämit täysin kohdakkain kestopagneettien kanssa, jolloin magneettikenttä saadaan mahdollisimman tehokkaasti suunnattua kestopagneettien suhteen.

Aksiaalivuomootoreiden rakenteita on lähtökohtaisesti neljä, kun ne jaotellaan staattorien ja roottorien mukaan. Aksiaalivuomootorissa voi olla joko kaksi staattoria roottorin kummallakin puolella, kaksi roottoria staattorin kummallakin puolella tai yksi staattori ja yksi roottori vastatusten. On myös mahdollista lisätä useampia staattoreita tai roottoreita samaan moottoriin (englanniksi. multi stator multi rotor) [10]. Staattoreita tai roottoreita lisäämällä saadaan helposti lisättyä moottorin ilmaraon pinta-alaa. Ilmaraon pinta-alan kasvattaminen lähtökohtaisesti lisää moottorin tuottamaa vääntöä. Yhden roottorin ja staattorin moottoreissa ongelmaksi muodostuu staattorin ja roottorin välinen magneettinen vetovoima, joka luo tarpeen painelaakereille. Painelaakerin lisääminen taas tuo haasteita kestävyiden ja valmistuksen kannalta [10], [22]. Staattorin ja roottorin toisiinsa aiheuttamat vetovoimat ja tarve painelaakerille voidaan poistaa, kun roottoreita tai staattoreita on kaksi ja ne asetetaan symmetrisesti, kuten kuvassa 4 [24].



Kuva 4. Kaksi roottorisen aksiaalivuomootorin roottorit, staattori ja staattorin päälle kiertyvät käämit. Kuva itse piirretty.

Hyvän väännön ja koon vuoksi aksiaalivuomoottori kasvattaa jatkuvasti suosiotaan esimerkiksi sähköautoissa ja muissa ajomoottorin käyttökohteissa.

## 4 Sähkömoottorit ajomoottoreina kaivosteollisuudessa

### 4.1 Mitä ajoneuvon sähkömoottoreilta vaaditaan

Tärkeimpiä ominaisuuksia, joita ajomoottorilta vaaditaan raskaissa sovelluksissa, on vääntö. Esimerkiksi aikaisemmin mainitun TH550B-dumpperin kokonaismassa maksimikuormalla on 100 100 kilogrammaa [4]. Moottoreiden täytyy saada laite liikkeelle täydellä kuormalla myös ylämäkeen liikuttaessa. Toisena tärkeänä ominaisuutena on hyötysuhde, jolla moottori toimii. Akkukäyttöisten koneiden akun riittoisuutta halutaan maksimoida, koska lataamiseen ja akunvaihtoon käytetty aika ei edistä itse työtä, johon kone on tarkoitettu. Itse moottorin hyötysuhteeseen vaikuttavat kaikki moottorin sisäiset häviöt, kuten magneettiset häviöt ja lämpöhäviöt. Koko laitteen hyötysuhteeseen vaikuttavat myös voimansiirron aiheuttamat häviöt. In-wheel-moottorilla voidaan vähentää tai eliminoida kokonaan voimansiirron aiheuttamia häviöitä.

Kaivoksille tyypillistä on, että laitteiden tulee suoriutua pitkistä ylämäki- sekä alamäkiajoista. Ylämäkiajossa moottorilta vaaditaan paljon vääntöä pitkäjaksoisesti. Alamäkiajossa sähkömoottorin regeneratiivinen jarrutus tuo etuja esimerkiksi dieselmoottoriin verrattuna. Etuna on, että itse laitteen jarrujen käyttö vähenee, jolloin esimerkiksi niiden kuumeneminen ei ole yhtä iso ongelma. Toisena etuna on energian talteenotto, joka on mahdollista nykyaikaisilla moottoreilla sekä muilla tehoelektronikan komponenteilla.

Kaivostoiminta tuo erityisiä vaatimuksia ajomoottorille, joita ei välttämättä nouse yhtä paljon esille esimerkiksi liikennekäyttöisissä sähköautoissa. Kaivoksessa lämpötilat voivat nousta todella korkeiksi, jolloin lämmönhallinta moottorissa tulee toteuttaa mahdollisimman tehokkaasti. Pelkkä ilmajäähdytys ei tällöin riitä vaan tehokkaampi tapa olisi vesi tai öljyjäähdytteinen moottori. Etuna diesel käyttöisiin laitteisiin voidaan pitää myös sitä, että sähkömoottori ei tuota pakokaasuja ja vähentää näin tuuletuksen tarvetta [7].

### 4.2 In-wheel-moottorin hyötyjä ja haasteita

In-wheel-moottorin isoimmat edut perinteisempään keskisijoitettuun sähkömoottoriin verrattuna ovat parempi hyötysuhde sekä ohjattavuus. Parempi hyötysuhde saavutetaan jo pelkästään voimansiirron komponenttien poistamisella tai vähentämisellä, koska niiden poistaminen vähentää kokonaismassaa sekä voimansiirron energiahäviöitä. Moottorin sijoittaminen pyörän sisään vapauttaa myös tilaa laitteen rungosta, joka voi mahdollistaa

esimerkiksi aikaisemmin mainitun dumperin tilanteessa isomman kuormalavan.

Komponenttien pienempi lukumäärä tarkoittaa myös vähemmän kuluvia osia, eli vähemmän huollettavaa, jolloin on mahdollista säästää valmistus- ja huoltokustannuksissa.

Ohjattavuus parantuu huomattavasti in-wheel-moottoreita käyttäessä, koska jokaista moottoria voidaan ohjata itsenäisesti. Itsenäinen ohjaus mahdollistaa vääntömomentin vektoroinnin (englanniksi. torque vectoring). Vääntömomentin vektorointi tarkoittaa sitä, että pystytään säätämään jokaiselle pyörälle syötettävää vääntöä. Tämä puolestaan parantaa pitoa esimerkiksi liukkaalla tai pehmeällä alustalla ajettaessa. Jokaisen moottorin itsenäinen ohjaus mahdollistaa myös paremman ohjattavuuden kääntyessä, esimerkiksi kääntösädettä saadaan pienennettyä pyörittämällä kääntyessä ulompia pyöriä sisempiä kovempaa.

In-wheel-moottoreille tyypillinen ongelma normaaleissa sähköautoissa on jousittamaton massa. Tätä samaa ongelmaa ei lähtökohtaisesti ole kaivostoiminnassa tai muissa raskaan teollisuuden sovelluksissa, koska ajonopeudet ovat huomattavasti normaalia tieliikennettä pienempiä. Esimerkiksi TH550B dumperissa ei ole jousitusta lainkaan, jolloin voitaisiin ajatella koko ajoneuvon massan olevan jousittamatonta massaa [7].

Haasteena in-wheel-moottorin kohdalla on jäähdytys. In-wheel-moottorin ympärillä on huomattavasti vähemmän tilaa verrattuna normaaliin rungon keskelle asennettavaan moottoriin. Tilan puute ja se että moottori on pyörän sisällä, tekee ilmajäähdytyksestä erittäin hankalan ja raskaassa käytössä lähes mahdottoman, koska tehot, joita moottorilta vaaditaan ovat todella suuret. Tällöin järkevämpi ratkaisu olisi jo aikaisemmin mainittu nestejäähdytys öljyn tai veden avulla. Jarrujen sijoittaminen in-wheel-moottorin rinnalle on myös haasteellista. Jarrut lisäävät lämmön tuottamia ongelmia [22]. Toinen tilan puutteesta aiheutuva haaste erityisesti kaivostoiminnassa on moottorin suojaaminen ulkoisilta elementeiltä kuten pölyltä, jota kaivoksissa voi esiintyä runsaasti [7].

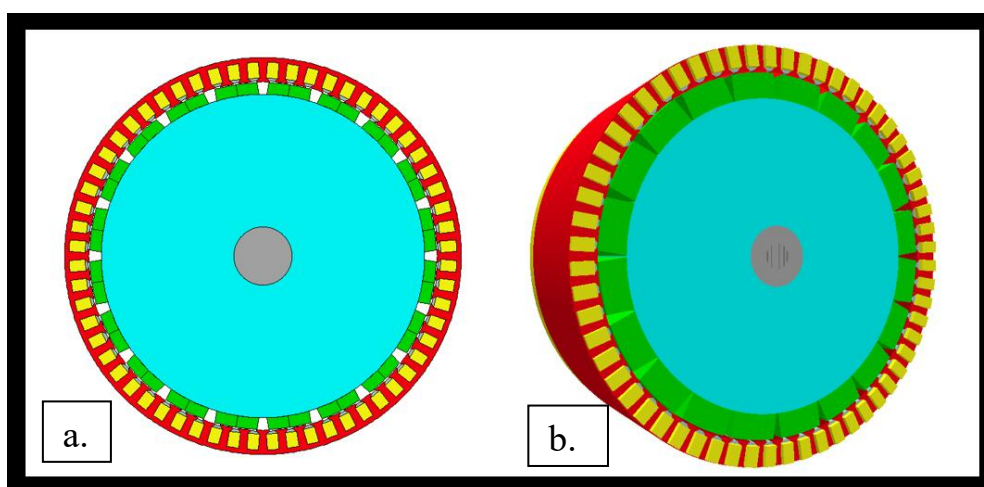


saatavilla, joten on välttämätöntä tehdä oletuksia materiaalien ja teknisten tietojen suhteen.

## 5.2 Toteutus

Moottorit mallinnetaan Ansys Motor-CAD 2025.2.2 ohjelmistolla. Ohjelmiston suurin ero muihin FEA-ohjelmistoihin on se, että sillä ei pysty vapaasti piirtää ja mallintaa erilaisia geometrioita. Motor-CAD ei jaa geometriaa tuhansiin pieniin kolmioihin, kuten FEA, vaan laskee eri pisteissä magneettivuon suunnan perusteella arvoja. Toinen vaihtoehto, jolla moottoreita voi mallintaa on Ansys RMXprt josta mallin pystyy viedä suoraan Ansys Maxwell 2D ja 3D ohjelmistoon. Vaikka Ansys Maxwell mahdollistaa monenlaiset FEA-analyysit ja on Motor-CADia monipuolisempi työkalu, tässä työssä oli tarkoituksenmukaisempaa käyttää Motor-CAD ohjelmistoa. Motor-CAD mahdollistaa nopeamman moottorin alkuvaiheen suunnittelun ja oli tärkeää, että eri arvojen testaaminen sujuu nopeasti, koska kaikkia moottorin teknisiä tietoja ei ollut saatavilla.

Ohjelmistolla pystyy mallintaa monia erilaisia sähkömoottoreita. Aluksi valitaan moottorityyppi, jotka tässä työssä olivat BPM radial ja BPM axial. Työtä tehdessä axial vaihtoehto oli vasta beta-testaus vaiheessa, joten kaikki mahdolliset toiminnot eivät olleet vielä täysin saatavilla. Moottorityypin valinnan jälkeen eri komponenteille kuten staattorille, roottorille ja käämeille annettiin arvoja, jonka perusteella ohjelmisto piirsi kuvaa mallinnettavasta moottorista. Moottoria on mahdollista tarkastella 3D mallina sekä akselin pituus ja syvyys suunnassa 2D kuvana. Kuvassa 6 mallinnettu radiaalivuomoottori radiaalisesta kuvakulmasta sekä 3D mallinnus.



Kuva 6. Motor-CAD 2025.2.2 ohjelmistolla mallinnettu radiaalivuomoottori radiaalisesta kuvakulmasta kuvassa 6a. Sekä 3D mallinnus kuvassa 6b.

Moottorin eri komponenttien arvojen asettamisen jälkeen mallinnettavalta moottorilta on mahdollisuus simuloida erilaisia kuvaajia ja arvoja ohjelmiston LAB osiossa. Tässä osiossa mallinnettavalle moottorille pystyy asettamaan arvot esimerkiksi halutulle jännitteelle ja virralle. On myös mahdollista asettaa eri vaihe-erot eri pyörimisnopeuksille, joita moottorin ohjaamisessa käytetään. Myös muiden rajoitusten ja arvojen asettaminen on mahdollista. Ohjelmistossa on myös valmiita malleja moottorin ohjaamiselle.

### 5.3 Radiaalivuomoottorin mallinnus

Radiaalivuomoottoria mallinnukseen käytettiin kaikkia arvoja, joita oli saatavilla perustuen HVH410 moottoriin. Ohjelmistolla oli myös mahdollista valita käämityksen tyyppiä hairpin käämitys. Radiaalivuomoottorin mallinnuksessa käytetyt arvot taulukossa 2

Taulukko 2

Taulukossa moottorille käytettävät mallinnusarvot. Nimellisjännite ja virta 700VDC ja 600A. Nimellisteho ja nopeus 200kW ja 2660 rpm.

Staattori			
Uraluku	60	Leveys	150mm
Ulkohalkaisija	410mm	Materiaali	M350 – 50A
Sisähalkaisija	360mm		
Käämiura			
Käämiuratyyppe	Parallel Slot	Uran aukko	5mm
Uraleveys	12mm	Hampaan kulma	40°
Urasyvyys	24mm		
Käämi			
Käämityyppi	Hairpin	Käämin leveys	10.5mm
Käämin paksuus	2.1mm	Eristeen paksuus	0
Rinnakkaisia haaroja	1	Käämitysaskel	3
Käämit/ura	6	Materiaali	Kupari
Uran täyttökerroin	80.6%		
Roottori			
Napojen lukumäärä	20	Magneettien materiaali	N30UH
Ulkohalkaisija	358mm	Magneettien paksuus	12mm
Sisähalkaisija	60mm	Magneetteja/Napa	2
Leveys	150mm	Ilmarako	1mm
Roottorin materiaali	M350 – 50A		

Moottorin tilavuus mallinnukseen käytetyillä arvoilla on  $19.80\text{dm}^3$ . Ilmaraon pinta-ala oli  $1696\text{cm}^2$ . Moottorille asetettiin DC-väylän jännitteeksi 700V ja maksimi virraksi 600A. Moottorin ohjausta testattiin ohjelmiston valmiilla malleilla, mutta teho- ja vääntökäyrät tippuivat nolnaan todella alhaisella kierrosalueella näitä malleja käyttäessä. Lopulta moottorin ohjaus toteutettiin manuaalisesti asettamalla tietty vaihe-ero tietylle kierrosalueelle. Vaihe-erot taulukossa 3

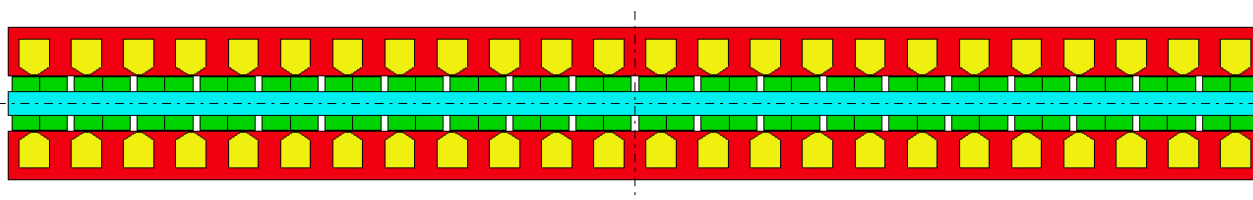
Taulukko 3

Taulukossa mallinnettavan radiaalivuomootorin ohjauksessa käytettävät vaihe-erot

Nopeus (rpm)	Vaihe-ero
0	0
500	5
1000	10
2000	20
3000	50
4000	70
5000	83
5500	90

#### 5.4 Aksiaalivuomootorin mallinnus

Mallinnettavalle moottorille valittiin kaksi staattoria ja yksi roottori. Kuvassa 7 mallinnettavan moottorin topologia. Staattorin ulkohalkaisijaksi valittiin sama 410mm, kun mallinnetulla radiaalimoottorilla. Staattoreiden ja roottorin yhteenlaskettu paksuus haluttiin myös alle 150mm. Lopullinen moottorin yhteenlaskettu paksuus oli 126mm. Tällöin moottorin tilavuus oli  $16.64\text{dm}^3$ . Ilmaraon pinta-ala mallinnettavalle moottorille oli  $1810\text{cm}^2$ . Aksiaalivuomoottorille ei ollut mahdollista valita hairpin käämitystä, joten käämeinä käytettiin suorakaidekäämitystä (englanniksi. rectangular winding).



Kuva 7. Motor-CAD ohjelmistolla mallinnettu aksiaalivuomoottori, jossa yksi roottori ja kaksi staattoria.

Aksiaalivuomootorin mallinnuksessa käytetyt arvot taulukossa 4

Taulukko 4

Taulukossa moottorille käytettävät mallinnusarvot. Nimellisjännite ja virta 700VDC ja 600A. Nimellisteho ja nopeus 134kW ja 2450 rpm.

Staattori			
Uraluku	24	Leveys	40mm
Ulkohalkaisija	410mm	Materiaali	M350 – 50A
Sisähalkaisija	260mm		
Käämiura			
Käämiuratyypä	Parallel Slot	Uran aukko	5mm
Uraleveys	25mm	Hampaan kulma	30°
Urasyvyys	30mm		
Käämi			
Käämityyppi	Rectangular	Käämin leveys	7mm
käämitystapa	Lap	Käämin korkeus	1.7mm
Rinnakkaisia haaroja	2	Eristeen paksuus	0.1
Käämikerros	2	Materiaali	Kupari
Käämikierros	20	Uran täyttökerroin	85.4%
Käämitysaskel	3		
Roottori			
Napojen lukumäärä	20	Magneettien materiaali	N30UH
Ulkohalkaisija	410mm	Magneettien paksuus	12mm
Sisähalkaisija	70mm	Magneettien	90mm
		radiaalinen paksuus	
Leveys	20mm	Magneetteja/Napa	2
Roottorin materiaali	M350 – 50A	Ilmarako	1mm

Moottorin ohjaamiseen käytettiin ohjelmiston valmista ohjausmallia ”Maximum Torque/Amp”. Tämä malli tuotti parhaat nopeusvääntökäyrät. Moottorille asetettiin DC-väylän jännitteeksi 700V ja maksimi virraksi 600A.

## 5.5 Tulokset

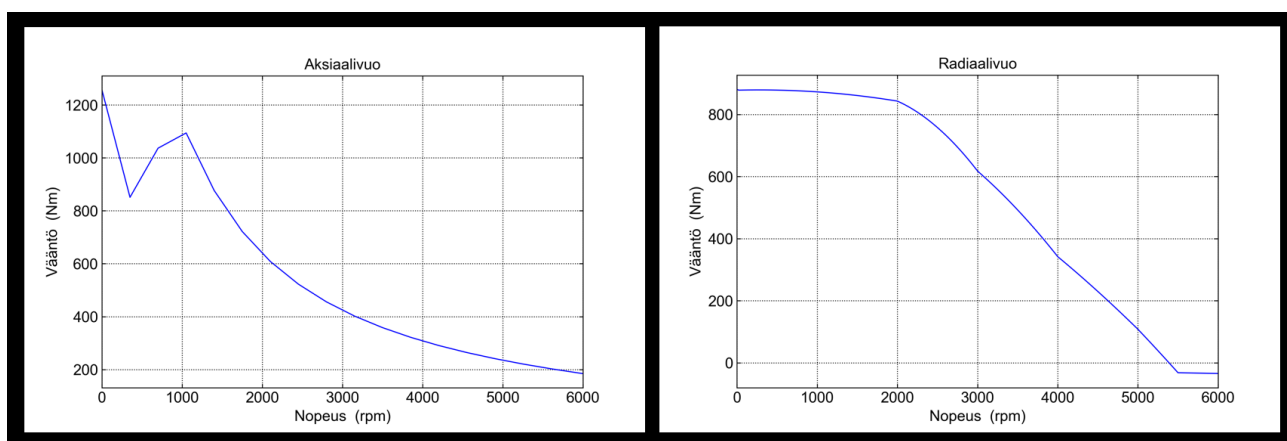
Molemmille mallinnetuille moottoreille voidaan laskea suhdeluku ilmaraon pinta-alan ja tilavuuden välillä. Aksiaalivuomoottorille tämä olisi  $\frac{1810\text{cm}^2}{16640\text{cm}^3} = 0.1088$ .

Radiaalivuomoottorille tämä olisi  $\frac{1696\text{cm}^2}{19800\text{cm}^3} = 0.0857$ . Aksiaalivuomoottorissa on siis suurempi ilmaraon pinta-ala tilavuuteen nähden. Tämä suhdeluku antaa myös suuntaa

vääntötiheydelle. Motor-CAD ei kuitenkaan laske mallinnettavan moottorin painoa, joten vääntötiheyden laskeminen ei ole mahdollista.

Mallinnettavien moottoreiden ohjaus toteutettiin kahdella eri tavalla, joka osaltaan vaikutti eroihin kuvaajien välillä.

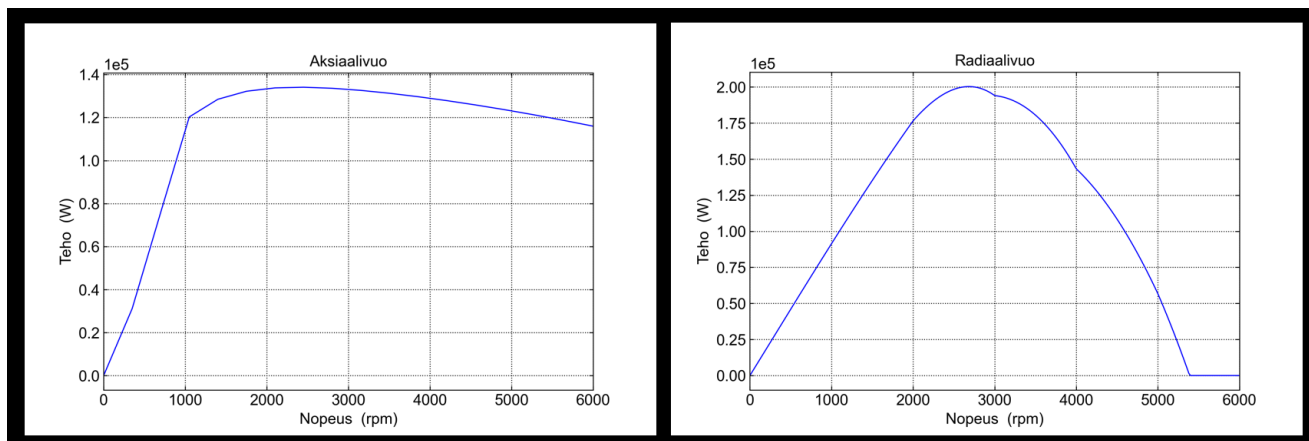
Aksiaalivuomoottorin nopeusvääntökuvaajasta nähdään, että vääntö oli 1050 rpm kierrosnopeudella noin 1100Nm, kun taas radiaalivuomoottorilla vääntö oli samalla kierrosnopeudella vain 870Nm. Aksiaali- ja radiaalivuomoottoreiden nopeusvääntökuvaajat kuvassa 8. Kuvaajista voidaan myös nähdä, että radiaalivuomoottorilla on selkeä kohta nopeus akselilla, jolloin vääntö laskee alle nollan, kun taas aksiaalivuomoottori lähestyy nollavääntöä oletettavasti paljon loivemmin.



Kuva 8. Mallinnetun aksiaali- ja radiaalivuomoottorin nopeusvääntökuvaajat.

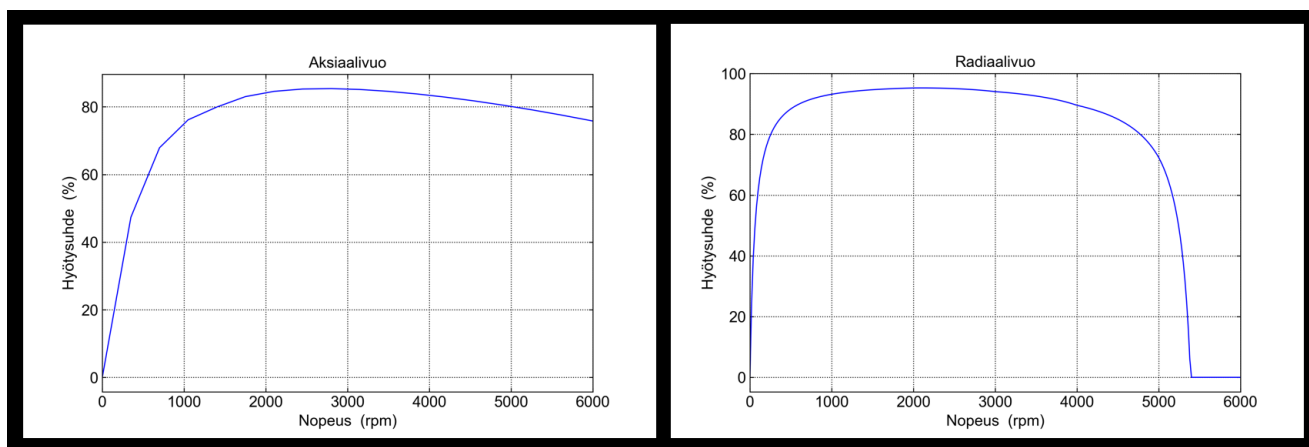
Moottorinohjaus toteutettiin aksiaalivuomoottoria mallintaessa Motor-CADin valmiilla ”Maximum Torque/Amp” ohjausmallilla, kun taas radiaalivuomoottorin ohjaus toteutettiin manuaalisesti taulukon 3 mukaisilla vaihe-eroilla. Erilaisten ohjaustapojen takia myös kuvaajat ovat erimuotoisia.

Aksiaalivuomoottorin huipputeho 134kW saavutettiin 2450 rpm kierrosnopeudella. Radiaalivuomoottorin huipputeho 200kW saavutettiin 2660 rpm kierrosnopeudella. Myös tehon kuvaajiin kuvassa 7 vaikuttaa moottorin ohjaustapojen ero. Radiaalivuomoottorin vääntökuvaajasta nähdään, että se pystyy pitämään korkeaa vääntöä suuremmalla kierrosnopeudella, joka tarkoittaa myös suurempaa huipputehoa. Radiaalivuomoottorin kuvaajia vertaamalla voidaan havaita, että huipputeho asettuu lähes samalle kierrosnopeudelle, jolla vääntökäyrä lähtee laskemaan.



Kuva 9. Mallinnetun aksiaali- ja radiaalivuomoottorin tehonopeuskuvaajat.

Aksiaalivuomoottorin huippuhyötysuhde oli 85.39 %, kun taas radiaalivuomoottorin huippuhyötysuhde oli 95.26 %. Hyötysuhteen kuvaajista kuvassa 8 nähdään, että kumpikin moottori toimii suhteellisen hyvällä hyötysuhteella lähes koko kierrosnopeusalueella. Radiaalivuomoottorin hyötysuhde kuitenkin nousee matalalla kierrosnopeudella huomattavasti aksiaalivuomoottorin hyötysuhdetta nopeammin.



Kuva 10. Mallinnetun aksiaali- ja radiaalivuomoottorin hyötysuhteenopeuskuvaajat.

Motor-CAD ohjelmistosta oli mahdollista nähdä eri häviöitä. Merkittävin häviö molemmille moottoreille oli kuparihäviö. Aksiaalivuomoottorin kuparihäviöt olivat lähes 20kW, kun taas radiaalivuomoottorilla kuparihäviöt olivat noin 5.7kW. Kuparihäviöt ovat staattorissa esiintyviä lämpöhäviöitä. Tästä voidaan päätellä, että aksiaalivuomoottorin staattori ei ollut parhaalla tavalla optimoitu käytetyille tehoille.

Mallinnus vahvistaa oletuksen siitä, että aksiaalivuolla voidaan saavuttaa suurempi vääntötiheys radiaalivuohon verrattuna. Olettamuksena oli myös, että aksiaalivuolla olisi

suurempi tehotehitys. Tässä mallinnuksessa radiaalivuomoottorin teho oli huomattavasti suurempi ja myös ilman tietoa mallinnetun moottorin painosta, voidaan olettaa, että mallinnetun radiaalivuomoottorin tehotehitys oli suurempi. Tämän takia mallinnuksen luotettavuus ei ole parhaalla mahdollisella tasolla, vaan vaatisi vielä enemmän perehtymistä eri konfiguraatiovalintoihin ja niiden vaikutuksiin. Moottorinohjauksella saattoi myös olla osansa lopullisissa tuloksissa. Aksiaalivuomoottorin suhteellisen heikko hyötysuhde osaltaan vaikutti mallinnuksen luotettavuuteen, koska myös aksiaalivuomoottorilta olisi voinut olettaa yhtä suurta tai jopa suurempaa hyötysuhdetta, kuin radiaalivuomoottorilta. Osaltaan radiaalivuomoottorissa käytetty hairpin käämitys voi vaikuttaa parempaan hyötysuhteeseen pienentämällä kuparihäviöitä. Tätä oletusta tukisi myös se, että samaa käämitystä käytetään juuri suuren väännön ja hyötysuhteen omaavassa HVH410 moottorissa.

Vaikka aksiaalimoottori saavutti pienemmän huipputehon, voisi sen vääntö olla riittävän korkea matalilla kierrosnopeuksilla esimerkiksi raskaan teollisuuden käyttötarkoituksiin, koska ajonopeudet ovat suhteellisen matalia. Edellytyksenä kuitenkin olisi paremman hyötysuhteen saavuttaminen.

## 6 Yhteenveto

Tässä työssä oli tarkoituksena tehdä kirjallisuuskatsaus sähköiseen voimansiirtoon ja erityisesti sähkömoottoreihin. Kirjallisuuskatsauksen kohteena oli myös raskaan teollisuuden ja erityisesti kaivostoiminnan tuoman vaatimukset erilaisille sähköisen voimansiirron konfiguraatioille, kuten in-wheel-moottoreille. Kirjallisuuskatsauksen jälkeen tarkoituksena oli mallintaa kaksi sähkömoottoria eri topologioilla perustuen jo teollisuuden käytössä olevaan BorgWarnerin HVH410 moottoriin. Sähkömoottoreiden mallinnuksella oli tarkoitus selvittää miten erilaiset topologiat vaikuttavat sähkömoottoreiden vääntöön, tehoon ja hyötysuhteeseen ja vastaisiko tulokset kirjallisuuskatsauksessa tehtyihin olettamuksiin.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella olettamuksena oli, että aksiaalivuomootorilla olisi suurempi tehotiheys ja vääntötiheys, kuin radiaalivuomootorilla. Sähkömoottoreiden mallinnuksella onnistuttiin vahvistamaan vain suurempi vääntötiheys tietyllä kierrosnopeudella. Mallinnuksen luotettavuus ei kuitenkaan yltänyt parhaalle mahdolliselle tasolle. Tämän takia jatkotarkastelulla ja moottoreiden mallien kehittämiseksi olisi vielä tilaa. Osaltaan myös aikaisemman kokemuksen puute Ansys ohjelmistojen parissa, sekä aikapaine vaikuttivat mallinnuksen onnistumiseen. Mallintaminen oikealla FEA-ohjelmistolla voisi myös antaa tarkempia ja luotettavampia tuloksia. Motor-CAD ohjelmiston ja FEA-ohjelmistojen mallinuksissa voi joissain tapauksissa olla suuriakin eroja tuloksissa.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella voidaan kuitenkin olettaa aksiaalivuomootoreiden kasvattavan suosiota jatkossa erityisesti ajomoottoreina. Uusien jatkuvasti kehittyvien teknologioiden myötä voidaan olettaa myös in-wheel-moottoreiden tulevaisuuden olevan erittäin kirkas.

## Lähteet

- [1] "Mining Equipment Market Size & Share, Growth Report 2034", Global Market Insights Inc. Viitattu: 26. huhtikuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/mining-equipment-market>
- [2] "Ahead of his time: Electric wheel-hub motor from 1900", Porsche Newsroom. Viitattu: 26. lokakuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://newsroom.porsche.com/en/2024/history/porsche-wheel-hub-motor-development-electric-vehicle-38129.html>
- [3] "When was the first electric Porsche car made?" Viitattu: 26. lokakuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.porsche.com/stories/innovation/gamechanger-how-ferdinand-porsche-designed-first-hybrid-car/>
- [4] "TH550B". Viitattu: 8. helmikuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.mining.sandvik/fi/products/laitteet/dumpperit/th550b/#features>
- [5] "Vuoden 2030 tavoitteet - Euroopan komissio". Viitattu: 5. helmikuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: [https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/overall-targets-and-reporting/2030-targets\\_fi](https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/overall-targets-and-reporting/2030-targets_fi)
- [6] K. Pate, F. E. Breidi, T. Salem, ja J. Lumkes, "Industry Perspectives on Electrifying Heavy Equipment: Trends, Challenges, and Opportunities", *Energies*, vol. 18, nro 11, touko 2025, doi: 10.3390/en18112806.
- [7] H. Eriksson, "Sandvik Mining and Construction Oy lecture", 25. helmikuuta 2026.
- [8] A. U. Khan, L. Huang, ja A. Bruland, "Transitioning to zero emission construction: A comparative study of diesel and electric loaders and trucks in Norwegian tunnel construction", *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 164, s. 106847, loka 2025, doi: 10.1016/j.tust.2025.106847.
- [9] "LH518iB". Viitattu: 8. helmikuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.mining.sandvik/fi/products/laitteet/lastauskoneet/lh518ib/>
- [10] K. Deepak, M. A. Frikha, Y. Benômar, M. E. Baghdadi, ja O. Hegazy, "In-Wheel Motor Drive Systems for Electric Vehicles: State of the Art, Challenges, and Future Trends", *Energies*, vol. 16, nro 7, maaliskuu 2023, doi: 10.3390/en16073121.
- [11] M. Said Jneid ja P. Harth, "Radial Flux In-Wheel-Motors for Vehicle Electrification", *Cogn. Sustain.*, vol. 3, syys 2024, doi: 10.55343/cogsust.105.
- [12] Y. Sun, M. Li, ja C. Liao, "Analysis of Wheel Hub Motor Drive Application in Electric Vehicles", *MATEC Web Conf.*, vol. 100, s. 01004, tammi 2017, doi: 10.1051/mateconf/201710001004.
- [13] M. Hassani Sadi, Z. Sadeghi, ja J. Bauman, "A Comprehensive Review of Universal Fast-Charging Techniques for 400-V and 800-V Electric Vehicles", *IEEE Access*, vol. 13, s. 153212–153233, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3603845.
- [14] "Tesla Model 3 RWD (Highland)", EV Database. Viitattu: 13. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://ev-database.org/car/3403/Tesla-Model-3-RWD>
- [15] V. Venkatesh, *Electrical Engineering*. New Delhi: Alpha Science International, 2014.
- [16] A. Faizan, "Induction Motor Torque Speed Characteristics", Electrical Academia. Viitattu: 17. tammikuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://electricalacademia.com/induction-motor/torque-speed-characteristics-induction-motor/>
- [17] admin, "Difference between Squirrel Cage and Slip Ring Induction Motor", Electrical Concepts. Viitattu: 7. helmikuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://electricalbaba.com/difference-between-squirrel-cage-and-slip-ring-induction-motor/>
- [18] Z. Anthony, S. Bandri, E. Erhaneli, Y. Warmi, Z. Zulkarnaini, ja A. Y. D. Rachman, "A winding design for improving 3-phase induction motor performance", *Int. J. Electr. Comput. Eng. IJECE*, vol. 14, nro 3, s. 2413–2421, kesä 2024, doi: 10.11591/ijece.v14i3.pp2413-2421.
- [19] K. T. Chau, *Electric vehicle machines and drives: design, analysis and application*. Singapore: IEEE, Wiley, 2015.
- [20] G. Cortina, M. Guadagno, L. Berzi, ja M. Delogu, "Environmental Impact and Recycling Routes of Rare Earth Elements in Permanent Magnets of Electric Machines for Industrial and Automotive Applications: A Systematic Review", *Eng. Proc.*, vol. 131, nro 1, s. 11, 2026, doi: 10.3390/engproc2026131011.

- [21] S. Hussain, A. Kallaste, M. U. Naseer, M. Sarap, H. Tiismus, ja T. Vaimann, "Preliminary Design Analysis of an Axial Flux Yokeless Stator Switched Reluctance Machine", teoksessa *2023 IEEE 64th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, loka 2023, s. 1–6. doi: 10.1109/RTUCON60080.2023.10413130.
- [22] L. Li, L. Dai, S. Niu, W. Fu, ja K. T. Chau, "Critical Review of Direct-Drive In-Wheel Motors in Electric Vehicles", *Energies*, vol. 18, nro 6, maaliskuu 2025, doi: 10.3390/en18061521.
- [23] B. Casey, "What's the Difference Between Axial- and Radial-Flux Electric Motors?", *Electronic Design*. Viitattu: 25. lokakuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.electronicdesign.com/technologies/power/article/21276212/ecm-pcb-stator-tech-whats-the-difference-between-axial-and-radial-flux-electric-motors>
- [24] A. Credo, M. Tursini, M. Villani, C. D. Lodovico, M. Orlando, ja F. Frattari, "Axial Flux PM In-Wheel Motor for Electric Vehicles: 3D Multiphysics Analysis", *Energies*, vol. 14, nro 8, huhtikuu 2021, doi: 10.3390/en14082107.
- [25] "Electric Drive Motors". Viitattu: 1. maaliskuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.borgwarner.com/technologies/electric-drive-motors>
- [26] "Remy Pds - hvh410 150 Sheet Euro PR 3 16 | PDF | Electric Motor | Vehicle Technology", Scribd. Viitattu: 11. huhtikuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.scribd.com/document/575178606/remy-pds-hvh410-150-sheet-euro-pr-3-16>
- [27] T. K. Ink, "Application Manual", Viitattu: 11. toukokuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: [https://www.diyelectriccar.com/attachments/remy\\_hybrid\\_application\\_manual\\_rev\\_2-trb-9-25-2013-pdf.110413/](https://www.diyelectriccar.com/attachments/remy_hybrid_application_manual_rev_2-trb-9-25-2013-pdf.110413/)