



HIILIKUITUVAIPAN KÄYTTÖ SÄHKÖKONEEN ROOTTORISSA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2025

Joonas Viisanen

Tarkastaja: Tutkijaopettaja TkT Lasse Laurila

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energijärjestelmien tiedekunta

Sähkötekniikka

Joonas Viisanen

Hiilikuituvaipan käyttö sähkökoneen roottorissa

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2025

33 sivua, 6 kuvaa ja 1 taulukko

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Lasse Laurila

Avainsanat: hiilikuituvaippa, roottori, kestromagneettitahtikone, sähköauto, tehotehous

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää hiilikuituvaipan käyttöä, rakennetta, ominaisuuksia ja valmistettavuutta osana sähkökoneen roottorin rakennetta. Työssä tarkastellaan miten hiilikuituvaippa vaikuttaa roottorin rakenteeseen, moottorin suorituskykyyn sekä sähkömagneettisiin ominaisuuksiin.

Työssä keskitytään perinteisen kestromagneettitahtikoneen roottorin rakenteen sekä hiilikuituvaipalla varustetun kestromagneettitahtikoneen roottorin rakenteen tutkimiseen. Tässä työssä tutkitaan pääosin yhdysvaltalaisen sähköautovalmistajan Tesla Inc:n patentoimaa hiilikuituvaipalla varustettua moottoria. Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena ja tulokset perustuvat aiheeseen liittyviin tutkimuksiin, tieteellisiin artikkeleihin sekä patenttitietoihin.

Työn tulokset osoittavat millaisia hyötyjä ja ominaisuuksia hiilikuituvaipan käytöllä saavutetaan. Keskeisimpänä hyötynä rakenteella on moottorin pyörimisnopeuden kasvattaminen, jolloin moottorista saadaan enemmän tehoa verrattuna samankokoiseen vaipattomaan alhaisemman pyörimisnopeuden moottoriin. Pyörimisnopeutta on mahdollista kasvattaa, koska hiilikuituvaippa vahvistaa roottorin mekaanista rakennetta. Ominaisuuksia ja vääntömomenttia saadaan siis lisättyä. Kevyemmästä moottorista saadaan siis enemmän tehoa ja suorituskykyä. Erityisesti ajoneuvokäytöissä moottorin massaa pienentämällä saadaan ajoneuvon hyötysuhdetta korkeammaksi ja mahdollisesti lisää tilaa akkukapasiteetin kasvatusta varten.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Joonas Viisanen

Carbon fiber sleeve in the rotor of electric machine

Bachelor's thesis

2025

33 pages, 6 figures and 1 table

Examiner: Associate professor Lasse Laurila

Keywords: Carbon fiber band, rotor, synchronous permanent magnet motor, electric vehicle, power density

The objective of this bachelor's thesis is to examine the use, structure, properties, and producibility of a carbon fiber sleeve as part of an electric motor rotor structure. The thesis investigates how the carbon fiber sleeve affects the rotor's construction, motor performance, and electromagnetic characteristics.

The thesis focuses examining the structure of a conventional permanent magnet synchronous motor rotor and a rotor equipped with a carbon fiber sleeve. This thesis primarily examines a carbon fiber sleeved motor patented by the American electric vehicle manufacturer Tesla Inc. The thesis is conducted as a literature review, and the results are based on related research, scientific articles, and patent files.

The results of the thesis demonstrate the benefits and characteristics achieved using a carbon fiber sleeve. The most significant advantage of this structure is the increased rotational speed of the motor, which allows for greater power output compared to a similarly sized motor without a sleeve and with a lower rotational speed. The rotational speed can be increased because the carbon fiber sleeve strengthens the rotor's mechanical structure. As a result, both power and torque density can be improved. A lighter motor can therefore deliver more power and performance. In vehicle applications, reducing the motor's mass improves overall efficiency and may release space for increased battery capacity.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Symbolit

f	Taajuus	[Hz]
P	Teho	[W]
σ	Puristusjännitys	[MPa]
M	Momentti	[Nm]
λ	Lämmönjohtavuus	[W/m*K]

Lyhenteet

rpm	Pyörimisnopeus kierrosta minuutissa
IM	Oikosulkumoottori (Induction Motor)
PMSM	Kestomagneettitahtikone (Permanent Magnet Synchronous Motor)
EESM	Vieras­magne­toitu tahtikone (Externally Excited Synchronous Motor)
I2SM	(In-Rotor Inductive-Excited Synchronous Motor)
SSM	(Separately Excited Synchronous Motor)
SynRM	Synkroninen reluktanssikone (Synchronous Reluctance Motor)
SRM	Katko­jakäyt­­töinen reluktanssikone (Switched Reluctance Motor)
IPM	Roottoriin upotetut ke­stomagneetit (Interior Permanent Magnets)
SPM	Roottorin pinnalle asennetut ke­stomagneetit (Surface Permanent Magnets)
WIPM	Roottoriin upotetut ke­stomagneetit ympäröitynä vaipalla (Wrapped Interior Permanent Magnets)
FEA	Rakenteellinen elementtianalyysi (Finite Element Analysis)
AFP	Automatisoitu valmistusmenetelmä hiilikuituvaipalle (Automated Fiber Placement)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	6
2	Sähköautojen moottorit	8
2.1	Sähkömoottorien tyypit.....	9
2.1.1	Oikosulkumoottori	9
2.1.2	Kestomagneettitahtikone	10
2.1.3	Vierasmagnetoidut tahtikoneet	11
2.1.4	Tasavirtamoottorit.....	12
2.1.5	Katkojakäyttöiset reluktanssikoneet	13
2.1.6	Synkroniset reluktanssikoneet	13
2.2	Kestomagneettitahtikoneen roottorin rakenne	14
3	Hiilikuituvaippa.....	17
3.1	Hiilikuituvaippa Teslan moottorissa.....	17
3.2	Hiilikuituvaipan rakenne kestopmagneettitahtikoneessa.....	18
3.3	Hiilikuituvaipan hyödyt verrattuna perinteiseen moottorirakenteeseen	22
3.4	Hiilikuituvaipan valmistusprosessi	25
3.5	AFP teknologia valmistuksessa	26
3.6	Muut materiaalit.....	27
3.7	Hiilikuituvaipan vaikutus jäähtymykseen.....	28
4	Hiilikuituvaipan käytännön sovellukset	29
4.1	Nykyään käytössä olevat sovellukset	29
4.2	Hiilikuituvaippa osana autoteollisuuden sähköistymistä.....	29
4.3	Mahdolliset tulevaisuuden käyttökohteet	30
5	Johtopäätökset	31
	Lähteet	32

1 Johdanto

Liikenteen sähköistyminen henkilöautojen osalta Suomessa on jatkuvassa kasvussa. Vuoden 2025 alussa Suomessa liikennekäytössä olleesta henkilöautokannasta yhteensä noin 10,3 % oli ladattavia autoja. Ladattaviin henkilöautoihin lasketaan mukaan ladattavat hybridautot sekä täyssähköiset autot. Täyssähköisten henkilöautojen osuus oli noin 4,3 % ja lataushybridien osuus noin 6,0 % koko henkilöautokannasta. Liikennekäytössä olevien täyssähköautojen määrä on yli kymmenkertaistunut vuodesta 2020 vuoteen 2024 mennessä. Myös hybridautojen määrä on noin kolminkertaistunut samassa ajassa. (Autoalan tiedotuskeskus 2025)

Sähköautojen ja erityisesti niiden moottorien tehokkuutta, taloudellisuutta ja hyötysuhteita kehitetään koko ajan paremmaksi. Aikaisempaa pienemmistä ja kevyemmistä moottoreista pyritään samaan enemmän tehoa, ja tähän liittyen oleellisena asiana on moottorien pyörimisnopeuksien merkittävä kasvattaminen. Tyypillisesti esimerkiksi teollisuudessa ja sähköajoneuvoissa käytettyjen moottorien suurimmat pyörimisnopeudet ovat suurimmillaan 3000–5000 rpm luokkaa. Nykyään joissakin sähköautoissa sen sijaan käytetään moottoreita, joiden pyörimisnopeudet ovat suuruudeltaan jopa 20 000 rpm.

Tässä työssä keskitytään pääosin yhdysvaltalaisen sähköautovalmistajan Teslan sähköautojen moottorien rakenteiden tutkimiseen. Lähtökohtaisesti tarkastellaan Teslan viimeisimmäksi läpimurroksi kutsuttua ratkaisua, jossa käytetään hiilikuidusta valmistettua vaippaa vahvistamassa moottorin mekaanista rakennetta. Hiilikuituvaippa mahdollistaa moottorille korkeammat pyörimisnopeudet verrattuna perinteiseen ratkaisuun, jossa moottorin ympärillä ei käytetä erillistä vahvistavaa rakennetta. Korkeampi pyörimisnopeus johtaa suurempaan tehomäärään luotuna pienemmällä ja kevyemmällä moottorilla (Addcomposites 2025).

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää hiilikuituvaipalla varustetun moottorin rakennetta ja ominaisuuksia. Työssä etsitään vastauksia seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Millainen on kestopagneettitahtikoneen roottorin rakenne?
- Hiilikuituvaipan ominaisuudet sekä vaikutukset moottorin suorituskykyyn?
- Miten vaippa vaikuttaa sähkömagneettisiin ominaisuuksiin ja ilmaväliin?
- Minkälainen on hiilikuituvaipan valmistusprosessi?
- Hiilikuituvaipan hyödyt verrattuna perinteiseen roottorin rakenteeseen?
- Vaipan vaikutukset roottorin lämpökuormaan/jäähdytykseen?

Työssä selvitetään, millaisia hyötyjä ratkaisulla saavutetaan, kuten hyötysuhde ja tehokkuus verrattuna perinteisiin sähkömoottoreihin. Lisäksi selvitetään hiilikuituvaipan rakennetta, kestopagneettitahtikoneen roottorin rakennetta, hiilikuituvaipan valmistusmenetelmiä, sekä kustannustehokkuutta. Lopuksi selvitetään potentiaalisia sovelluskohteita rakenteelle autoteollisuuden ulkopuolelta ja pohditaan miten rakenne vaikuttaa autoteollisuuden sähköistymiseen tulevaisuudessa.

2 Sähköautojen moottorit

Täyssähköisissä henkilöautoissa käytetään tyypillisesti yhdestä neljään sähkömoottoria liikkuttamaan autoa. Moottorit ovat tyypillisesti sijoitettuna joko etu- tai taka-akselille tai molemmille. Moottorit voivat olla myös sijoitettuna suoraan pyörän napoihin. Sähkömoottorien tärkeimmät rakenteen osat ovat staattori, roottori ja käämitys. Sähköautojen moottoreille on tiettyjä erityisvaatimuksia verrattuna esimerkiksi perinteisiin teollisuuden tuotantolaitosten sähkökoneiden käyttöihin. Ajoneuvossa moottorilta vaaditaan korkeaa tehoa ja vääntömomenttia kompaktissa koossa. Korkean suorituskyvyn mahdollistamiseksi moottorit ovat tyypillisesti nestejäähdytettyjä, eli staattorin ympärillä on nestevaippa. Lisäksi moottorilta usein vaaditaan laajaa nopeusaluetta, sekä korkeaa hyötysuhdetta kaikilla nopeus ja vääntöalueilla. Moottoreilta vaaditaan luotettavuutta, korkeaa tehotiheyttä sekä hyötysuhdetta yhdistettynä järkevän kokoluokan kustannuksiin. Sähköautojen moottoreina on käytetty pääsääntöisesti neljää erityyppistä konetta, jotka esitellään tarkemmin seuraavassa kappaleessa. (Villani 2025)

Moottorien suorituskykyä saadaan parannettua nostamalla pyörimisnopeuksia. Puhuttaessa suurnopeussähkömoottorikäyttöistä voidaan rajana pitää 10 000 rpm. Sähkötekniikassa suurnopeusmoottorikäyttöjä on kehitetty ja käytetty jo muutamien vuosikymmenten aikana. Esimerkkinä vuonna 2007 Toyota Camry Hybrid Sedan mallissa käytettiin 70 kW tehoista sähkömoottoria, jonka nopeus oli 14 000 rpm. Viime vuosina autojen sähkömoottoreilta vaadittavat ominaisuudet ovat lisääntyneet. Moottoreilta vaaditaan aiempaa suurempaa tehoa, mutta samalla moottoreiden ulkoisten mittojen pitäisi pysyä kompaktina. Moottorien massa ja tilavuus halutaan saada mahdollisimman pieneksi auton tilankäytön ja kohtuullisen oma-massan takia. Autojen suuret akkukapasiteetit vievät tilaa moottoreilta, kun toimintamatkaa halutaan lisätä. Moottorien tilavuustehotiheyttä saadaan kasvatettua, kun tilavuutta saadaan pienennettyä säilyttäen samat vääntö- ja nopeusarvot. Moottorin vääntömomenttia saadaan kasvatettua pyörimisnopeutta nostamalla. Tiheyttä saadaan kasvatettua lisäämällä virrantiheyttä tai magneettivuontiheyttä, mutta nämä lisäykset vaativat myös jäähdytyskapasiteetin kasvattamista. Nykyisin nopeudet ovat kasvaneet viidentoistavuoden takaisesta, jonka myötä on kehitetty ratkaisuja moottorien mekaanisen kestävyuden takaamiseksi. Sähkömoottoreita suunniteltaessa on otettava sähköisten ominaisuuksien lisäksi huomioon laitteen

mekaanisen suunnittelun vaatimukset. Roottori on pyörivä osa, jonka seurauksena sen rakenteeseen kohdistuu voimavaikutuksia sekä mahdollista värähtelyä. Nämä vaikutukset tulee huomioida mekaanisen rakenteen mitoituksessa sekä materiaalien valinnassa. (Acquaviva 2023)

Korkean pyörimisnopeuden koneissa moottoriin saattaa muodostua värähtelyä sähkömagneettisten voimien takia. Myös rautakomponenttien pyörrevirrat sekä hystereesihäviöt kasvavat suhteessa taajuuteen yhdessä sähkömagneettisten häiriöiden kanssa. (Acquaviva 2023)

2.1 Sähkömoottorien tyypit

Vaihtovirtamoottorit mukaan lukien tahti- ja epätahtikoneet ovat tyypillisimmin käytettyjä moottorivaihtoehtoja sähköautoissa johtuen niiden korkeasta hyötysuhteesta ja kyvystä toimia muuttuvilla nopeuksilla. Tasavirtamoottorit ovat nykyään vähemmän käytettyjä, mutta niille on myös omat käyttökohteensa. Reluktanssikoneet ovat myös melko vähän käytettyjä moderneissa sähköautoissa suurimmaksi osaksi kalliimman hintansa takia (Electricmotorfeed 2024).

2.1.1 Oikosulkumoottori

Vaihtovirtamoottoreista oikosulkumoottori IM (Induction motor) on epätahtikone ja laajasti sähköautoissa käytetty malli, esimerkkinä Tesla Model S:ssä, Y:ssä, 3:ssa ja X:ssä käytetty etuakselilla. Myös esimerkiksi Audi e-Tron SUV ja Mercedes Benz EQC käyttävät oikosulkumoottoria. Staattori on moottorissa paikallaan pysyvä yleensä metallinen sylinterinen muotoinen osa, johon on kierretty kuparikäämitys. Käämityksen syötetään 3-vaiheista vaihtovirtaa, joka luo staattoriin synkroninopeudella pyörivän magneettikentän. Roottori on staattorin sisällä pyörivä osa, joka muodostuu yleensä häkkikäämityksestä. Häkkikäämitys muodostaa oikosuljetun virtapiiriin ja pyörivän staattorikäämin magneettivuon seurauksena roottorin oikosuljettuun virtapiiriin indusoituu virta. Koneen vuon ja roottoriin indusoitunut virta muodostavat yhdessä voimavaikutuksen Lorentzin voiman, joka saa roottorin pyörivään liikkeeseen. Staattorin ja roottorin virrallisissa johtimissa vääntömomentti on

vastakkaissuuntainen ja, koska staattori on kiinteästi moottorin rungossa niin roottori pyörii. Roottorin ja staattorin välissä on ilmapäivuo, joka on tyypillisesti muutaman millimetrin suuruinen. Epätahti nimitys seuraa siitä, että kuormitettaessa oikosulkumoottoria roottorin pyörimisnopeus jää jälkeen staattorin synkroninopeudesta jättämän verran, joka on tyypillisesti enintään noin 5 %. Autoteollisuudessa käytettyjen kolmivaiheisten oikosulkumoottorien hyötysuhteet ovat tyypillisesti noin 90 %. (Arenaev 2022) Oikosulkumoottorin etuja ovat suhteellisen korkea hyötysuhde, matalat valmistuskustannukset, luotettavuus ja kestävyys vahvan ja yksinkertaisen rakenteen ansiosta. Huonoina puolina ovat suuri jäähdytyksen tarve ja alhaisempi tehotehokkuus verrattuna esimerkiksi kestopagneettitahtikoneeseen. Moottori ei sisällä kuluvia osia kuten hiiliharjoja tai kestopagneetteja, joten se ei vaadi paljoa huoltoa. Oikosulkumoottori soveltuu hyvin korkeita pyörimisnopeuksia ja vaativaa mekaanista rasitusta sisältäviin kohteisiin. (Electricmotorfeed 2024)

2.1.2 Kestomagneettitahtikone

Vaihtovirtamoottoreista kestopagneettitahtikone (Permanent Magnet Synchronous Motor) on oikosulkumoottorin ohella yleisin sähköautoissa käytetty moottorityyppi. PMSM moottoreita käytetään Teslan Model S, 3, X ja Y taka-akseleilla. Myös esimerkiksi Audi e-tron GT ja Porsche Taycan käyttävät kestopagneettitahtikoneita. PMSM moottorin roottori voi olla avo- tai umpinapainen. Umpinapainen roottori on parempi vaihtoehto sähköautosovellukseen, sillä se kestää paremmin korkeita pyörimisnopeuksia verrattuna avonapaiseen roottoriin. Roottori on varustettu kestopagneeteilla, jolloin roottoria ei tarvitse erikseen magneetoida. Magneetit on kiinnitetty jonkinlaisen metallisen lieriön pinnalle tai upotettu roottorin metallisen osan sisälle. Staattori muodostuu urakäämityksestä, johon syötetään vaihtovirtaa. Tällöin staattorin ja roottorin ilmapäivään muodostuu pyörivä magneettikenttä, ja roottorin navat lukittautuvat pyörivään kenttään. Moottori on tahtikone, jolloin roottorin magneettikenttä pyörii samalla nopeudella staattorin magneettikentän kanssa. (Loganayaki 2019)

Yleisesti tahtikoneiden vääntömomentti perustuu Lorentzin voiman aiheuttamaan komponenttiin ja lisäksi reluktanssivääntömomenttiin. Avonapainen tahtikone kehittää reluktanssivääntömomenttia johtuen roottorin napojen muodosta. Napojen kohdalla magneettivuon kulkema reitti on eri pituinen ja suuntainen eri kohdissa napaa, jolloin induktanssieroa eli

reluktanssiero muodostuu navan eri kohtien välille. Reluktanssieron vaihtelu roottorin eri kohdissa pyrkii kääntämään roottorin edulliseen asentoon, jolloin reluktanssiero olisi pienin mahdollinen. Umpinapaisessa koneessa ei ole reluktanssiaeroa ollenkaan, koska magneettikentän reitti on samanpituinen kaikissa kohdissa johtuen tasaisesta navan muodosta. Reluktanssivääntömomentista on hyötyä, koska sillä saadaan täydennettyä Lorentzin voiman komponenttia. (Enpmsm 2023)

Kestomagneettitahtikoneella on korkea tehotiheys kestmagneettien ansiosta, mikä tarkoittaa korkeampaa tehoa pienemmässä tilavuudessa. Etuja on todella korkea hyötysuhde, jopa 95 %, sekä kompakti koko suhteessa korkeaan vääntömomenttiin ja tehoon. Moottori tarvitsee myös vähemmän jäähdytystä verrattuna oikosulkumoottoriin. Huonojakin puolia on kuitenkin kestmagneettien valmistus vaatii harvinaisia maametalleja, ja varannot ovat pääosin Kiinan hallussa. Valmistuskustannukset ovat kalliimpia verrattuna oikosulkumoottoriin. (Acquaviva 2023).

2.1.3 Vierasmagnetoidut tahtikoneet

Vierasmagnetoitu tahtikone EESM (Externally Excited Synchronous Motor) eroaa kestmagneettitahtikoneesta roottorin magnetoinnin osalta. Vierasmagnetoidussa tahtikoneessa roottorin magnetointi toteutetaan kuparikäämityksellä, johon syötetään virta ulkoisesta virtalähteestä. EESM-koneessa on monia merkittäviä etuja verrattuna esimerkiksi PMSM-koneeseen. EESM-koneessa magnetointia pystytään säätämään eri nopeusalueiden ja kuormituksen perusteella, jolloin moottori saadaan toimimaan mahdollisimman tehokkaasti kaikilla käyttöalueilla. Ajoneuvokäytöissä tästä on etua koska ajonopeus ja vääntömomentin tarve vaihtelevat dynaamisten ajo-olosuhteiden mukaan. Roottorin kuparikäämitys ei ole yhtä herkkä vaurioitumaan korkean lämpökuormituksen seurauksena kuin PMSM-moottorin kestmagneetit. EESM-moottori ei myöskään vaadi harvinaisia maametalleja, jonka takia rakenne on kustannustehokkaampi ja ympäristöystävällisempi verrattuna kestmagneetein varustettuun koneeseen. EESM-moottorin huonoina puolina voidaan pitää tarvetta tehon siirtämiselle roottorin käämeille. Perinteisesti siirrossa käytetään liukurenkaita, jotka voivat rajoittaa tehotiheyttä sekä rajoittaa roottorin suurinta sallittua nopeutta värähtelyjen takia. (Vinayachandran 2024)

Kaksi merkittävää valmistajaa MAHLE ja ZF ovat kehittäneet omat ratkaisunsa vierasmagnetoituihin tahtikoneisiin. MAHLE:n EESM moottorissa magnetointikäänitys on roottorin sisällä. Roottorin akselilla on langaton muuttaja, jolla sinimuotoinen vaihtovirta puoliaalto-tasasuunnataan ja roottorin käämitykselle syötetään tasavirtaa. Magnetointivirtaa voidaan siis säätää, jolloin tehokerroin $\cos\varphi \approx 1$ saadaan korkeaksi kaikilla moottorin käyttöalueilla. ZF:n I2SM (In-Rotor Inductive-Excited Synchronous Motor) moottorissa roottorin päässä akselin sisällä on osa, jolla induktiivisesti johdetaan virta roottorin käämeille. (Vinayachandran 2024)

Autovalmistajista Renault kehittää vierasmagnetoitua tahtikonetta yhdessä Valeo:n ja Valeo Siemens eAutomotive:n kanssa. Tavoitteena on saada 200 kW tehoinen moottori vuoteen 2027 mennessä Megane E-TECH Electric automalliin. Myös BMW käyttää ajoneuvoissaan vierasmagnetoitua tahtikonetta, jota BMW nimittää SSM (Separately Excited Synchronous Motor) moottoriksi. SSM:n etuja ovat korkea suorituskyky vaihtelevissa olosuhteissa sekä jopa 97 % hyötysuhde. (Vinayachandran 2024)

2.1.4 Tasavirtamoottorit

Tasavirtamoottorit jaetaan hiiliharjallisiin ja hiiliharjattomiin versioihin. Tasavirtamoottorit ovat vähemmän suosittuja moderneissa sähköautoissa ja niitä käytetäänkin enemmän hybridi-autoissa sekä apumoottoreina tietyissä tehtävissä. Tasavirtamoottorissa magnetointivirta kulkee staattorissa. Roottorissa kulkevaa virran suuntaan muutetaan kommutaattorilla. Hiiliharjallisessa moottorissa kommutointi tapahtuu aina kun roottorisauva ohittaa hiiliharjan. Harjattomassa moottorissa kommutointi toteutetaan elektronisesti. Harjallisissa moottoreissa hiiliharjat ja kommutaattori vaativat säännöllistä huoltoa. Harjaton moottori vaatii vähemmän huoltoa ja siinä on korkeampi hyötysuhde sekä parempi suorituskyky kuin harjallisessa koneessa. (Electricmotorfeed 2024) Harjattomassa moottorissa on korkea vääntömomentti matalilla kierroksilla ja korkea hyötysuhde jopa yli 95 %. Harjattomat moottorit soveltuvat hyvin korkean tehotehden vaativiin sovelluksiin.

2.1.5 Katkojakäyttöiset reluktanssikoneet

Katkojakäyttöiset reluktanssikoneet SRM (Switched Reluctance Motor) toimivat magneettireluktanssilla. Koneissa magnetointivirta kulkee staattorissa ja roottorissa ei ole käämitystä ollenkaan. Toiminta perustuu minimienergian periaatteeseen, jolloin roottori pyrkii kääntymään staattorin suhteen stabiilin tasapainoasentoon pyrkien tuottamaan minimireluktanssin. Koneet ovat huomattavasti vähemmän suosiota saavuttaneet, kuin muut moottorityypit sähköautoissa. Koneet ovat suhteellisen edullisia valmistuskustannuksiltaan verrattuna esimerkiksi kestmagneettitahtikoneeseen. Ne soveltuvat rankkoihin olosuhteisiin ja toimivat hyvin erityisesti korkeilla nopeuksilla ja matalilla kuormilla. (Electricmotorfeed 2024)

2.1.6 Synkroniset reluktanssikoneet

Synkroniset reluktanssikoneet SynRM (Synchronous Reluctance Motor) luokitellaan vaihtovirralla toimiviin tahtikoneisiin. Koneen roottori on rautainen eikä se sisällä käämitystä eikä kestmagneetteja. Staattorissa kulkee vaihtovirta, jolla luodaan pyörivä magneettikenttä ilmapäliin. Kone tuottaa ainoastaan reluktanssivääntömomenttia eli voimaa, jolla roottori pyrkii kääntymään staattorin magneettikentän suuntaiseksi. Roottorilla ei ole käämejä, jolloin roottori pysyy viileämpänä ja sillä on parempi hyötysuhde verrattuna oikosulkukoneen roottoriin. Roottorissa ei ole häviöitä kuten oikosulkumoottorissa tai kestmagneettitahtikoneessa, jolloin kone pystyy tuottamaan jatkuvasti korkeamman vääntömomentin, kuin samankokoinen oikosulkumoottori. Koneen suorituskykyyn ei vaikuta roottorin lämpötila samoin kuin muissa moottoreissa. Roottorin valmistuskustannukset ovat todennäköisesti myös halvemmat verrattuna muihin moottorimalleihin. Roottorin rakenne on yksinkertainen ja mekaanisesti kestävä, jonka ansiosta moottori sopii hyvin suuria pyörimisnopeuksia vaativiin sovelluskohteisiin. Synkronisilla reluktanssikoneilla on kuitenkin matalampi huippu- ja vääntömomentti, korkeampi melutaso sekä matalampi tehokerroin verrattuna kestmagneettitahtikoneisiin. Synkronisen reluktanssikoneen ominaistehoa voidaan kasvattaa suurentamalla roottorin pyörimisnopeutta sekä kentänheikennysaluetta. Moottorin

geometria vaatii optimointia kestäväen mekaanisen rakenteen takaamiseksi korkeilla pyörimisnopeuksilla. (Villani 2025)

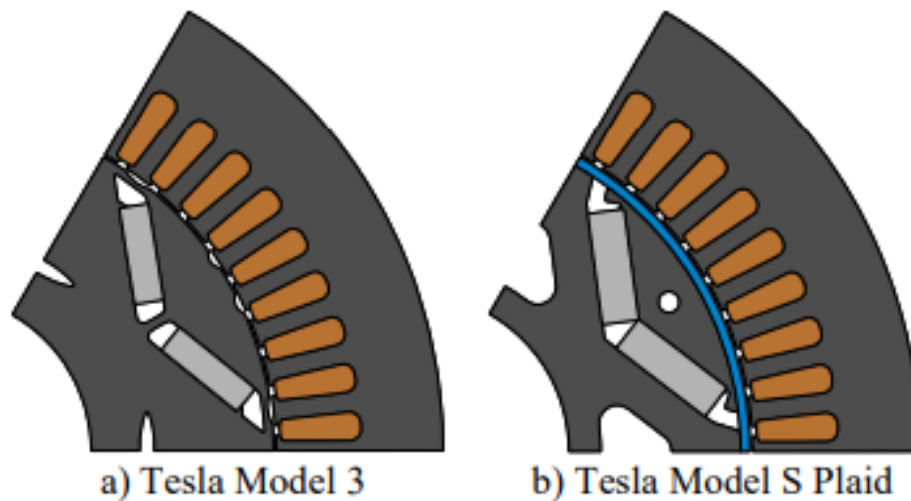
2.2 Kestomagneettitahtikoneen roottorin rakenne

Tutkitaan esimerkkinä täyssähköauton Tesla Model S Plaid kestopagneettitahtikoneen roottorin rakennetta. Roottorin runko muodostuu 529 kerroksesta kuusikulmaisia tähden muotoisia piiteräslevyjä. Roottori on siis kuusinapainen. Kestomagneetit sijoitetaan siis tähden V-muotoisiin koloihin. V-koloja on siis 6 yhteensä ja yhdessä kolossa on kaksi kestopagneettia V muodossa. V-kolot täytetään kaarevan reunan omaavalla piiteräslevyllä, jotta roottorin ulkokehästä saadaan pyöreä. Yksittäisten levyjen paksuus on tyypillisesti 0,25 mm luokkaa ja ne laminoidaan päällekkäin. Kestomagneetit ovat upotettuna laminointiin ja pysyvät näin paikoillaan. (Lammotor 2024).

Kestomagneettitahtikoneen roottorissa magneetit ovat tyypillisesti upotettuna roottorin metallirakenteen sisään tai kiinnitettynä uloimmaksi osaksi roottorin pinnalle. Kun magneetit ovat upotettuna rautarakenteeseen puhutaan IPM-rakenteesta eli (Interior Permanent Magnets). (Acquaviva 2023) Kuvasta 1 kohdasta a) nähdään esimerkkinä Tesla Model 3 kestopagneettitahtikoneen roottorin rakennetta. Kuvasta nähdään roottorin yhden navan IPM-rakenne eli kestopagneetit ovat upotettuna roottorin sisälle tässä tapauksessa V muotoon. V muodon kärjissä eli magneettien päiden kohdalla roottorin metallisen kehän rakennetta on ohennettu ja sitä kutsutaan rautasillaksi. Silta pitää roottorin rakenteen kasassa ja se on välttämätön mekaanisen kestävyuden kannalta. Eli roottorin ulkokehän metallinen rakenne on yhtenäinen. Kestomagneettien vuo pääsee virtaamaan ohuen rautasillan läpi. (Lehikoinen 2021)

Rautasillan paksuus mitoitetaan moottorin maksimi pyörimisnopeudesta johtuvien kuormitusten perusteella sekä otetaan huomioon magneettivuon virtaus ilmarakoon. IPM ratkaisussa ongelmaksi voi muodostua se, että magneettikenttä virtaa rautaa pitkin eikä ilmaraossa, eli syntyy liikaa magneettikentän hajavuota. Raudalla on korkeampi magneettinen permeabiliteetti kuin ilmalla, jolloin magneettikenttä pyrkii etenemään ilman sijasta raudassa. Rautasillan on oltava siis sopivan ohut, jotta magneettikenttä ilmaraossa on tarpeeksi vahva,

mutta samaan aikaan mekaaninen rakenne on myös tarpeeksi kestävä. Ohuenkin rautasillan kanssa rakenteeseen muodostuu aina vähän magneettikentän hajavuota ja sitä ei voi kokonaan välttää rautasiltojen kanssa. (Acquaviva 2023.)



Kuva 1. Esimerkit roottorista yhden navan osalta a) perinteisestä IPM rakenteesta sekä b) WIPM rakenteesta (J. Binder et al. 2023)

Toinen tyypillinen ratkaisu on SPM (Surface Permanent Magnet) -rakenne, jossa magneetit ovat roottorin pinnalla. Magneetit voivat olla asennettuna esimerkiksi liimalla roottorin pintaan. Tätä rakennetta ei kuitenkaan käytetä ajoneuvojen sähkömoottoreissa, koska sen mekaaninen rakenne ei kestä itsessään suuria pyörimisnopeuksia. (Acquaviva 2023.) SPM-rakennetta on käytetty myös suurnopeussähkökoneissa, kun roottori on ympäröity vaipalla (J. Binder et al. 2023).

SPM-tyyppisen roottorin rakenteessa suurnopeuskäytöillä käytännössä siis vaaditaan jonkinlainen vaippa puristamaan magneetteja roottoria vasten. SPM-moottorien roottorin rakennetta onkin laajalti käytetty vaipparakenteen suunnittelussa ja mallinnuksessa. Magneettien ollessa roottorin päällä ja vaipan suoraan magneetteja vasten saattaa muodostua ongelma vaipan kestävyuden kannalta. Napojen välissä eli magneettien päissä on raot, ja magneettien päiden kulmat pääsevät tällöin painamaan vaipan pintaa varsinkin, jos roottorissa tapahtuu lämpölaajenemista. Tällöin vaippa saattaa vaurioitua, kun magneettien reunat painavat sääröjä vaipan pintaan. (Ou et al., 2021) SPM-rakenne ei ole paras vaihtoehto ajoneuvonkäyttöihin. Magneettien ollessa suoraan vaipan pinnassa kiinni vaipan ja roottorin välissä on

riskinä mekaanisen ja lämpökuormituksen vaikutuksesta demagnetisoituminen. Vaipalla varustetussa SPM-tyyppisessä moottorissa ilmarako roottorin ja staattorin välillä on verrattain suuri, joka muodostuu mekaanisesta raosta sekä magneettien ja vaipan paksuudesta (Acquaviva 2023).

WIPM-rakenne (Wrapped Interior Permanent Magnets) on Teslan patentoima rakenne, jossa magneetit ovat upotettuna roottoriin ja roottori on ympäröity vaipalla (L. E. Olsen et al., 2021). Kuvasta 1 b) kohdasta nähdään WIPM-rakennetta, jota käytetään Tesla Model S Plaid mallin moottoreissa. Verrattuna perinteiseen IPM-rakenteeseen on tässä poistettu rautasillat kokonaan ja magneettien V-muodon kärkien molemmissa päissä on ilmakäytävät. Nämä raot ovat magneettisilloja, joiden avulla magneettivuo pääsee vaikuttamaan staattorin magneettikentän kanssa riittävällä voimakkuudella. Navan V muodon keskellä olevat metallilevyt ovat nyt siis erillisenä irto-osana roottorin keskiraudasta. Näiden levyjen ja kestopagneettien paikallaan pysymisen mahdollistaa roottoria ympäröivä vaippa- tai pantarakenne. (J. Binder et al. 2023)

Roottoreiden geometrian kannalta kolme suosituinta mallia ovat magneettien asettelun kannalta suora asettelu, v-mallinen ja kolmion mallinen asettelu. Suorassa mallissa magneetit ovat roottorin kehällä aseteltuna suorakulmaisen magneetin pidempi sivu kohtisuorassa roottorin keskipistettä kohti. V mallissa magneetit ovat kehällä aina kaksi magneettia asetettuna V kirjaimen muotoon terävä kärki kohti roottorin keskipistettä. Kolmio muodostelma on käytännössä sama kuin V malli, mutta kahden magneetin kärkien väliin on asetettu kolmas magneetti. Nämä geometriat on todettu toimiviksi mekaanisen kestävyuden kannalta suurnopeuskäytöissä kovan mekaanisen kuormituksen alla. (Acquaviva 2023)

Roottorin levyt yhdistetään toisiinsa laminoimalla. Laminoititapoja on erilaisia kuten liimaus, pulttaus, lukituskiinnikkeet, niittaus ja prässäys. Liimaus on nykyään laajalti käytetty teknologia ja itseliimautuva menetelmä soveltuu massatuotantoon hyvin. Tesla Model 3 valmistuksessa käytetään liimausta roottorilevyjen yhdistämisessä. Lukituskiinnikkeillä varustetut levyt lukittuvat automaattisesti kasauksessa aina edelliseen levyyn painettaessa uusi levy päälle. Niittaustekniikkaa käytetään yleensä laserleikattujen levyjen kanssa, jolloin reiät niiteille saadaan valmiiksi oikeisiin kohtiin. Prässäyksessä teräsnauhat prässäetään roottorin ulkokehän uriin. (Lamnow 2025)

3 Hiilikuituvaippa

Hiilikuituvaippaa käytetään esimerkiksi suuren pyörimisnopeuden sähkömoottoreissa. Vaippa on pyöreän ympyrälieriön muotoinen ohutseinämäinen holkki, joka sijaitsee roottorin ulkokehän ympärillä. Tarkastellaan missä hiilikuituvaipparatkaisua käytetään, mitkä ovat sen ominaisuudet ja rakenne sekä miten se valmistetaan.

3.1 Hiilikuituvaippa Teslan moottorissa

Yhdysvaltalainen sähköautovalmistaja Tesla on tuonut moottoreihinsa teknologian, jossa roottori ympäröidään hiilikuidusta valmistetulla lieriön muotoisella ohuella vaipalla. Vuonna 2021 Tesla julkaisi uuden mallin Tesla Model S Plaid:in, jossa käytetään hiilikuituvaippaa osana rakennetta ja teki patenttihakemuksen tälle rakenteelle. (Olsen et al. 2021)

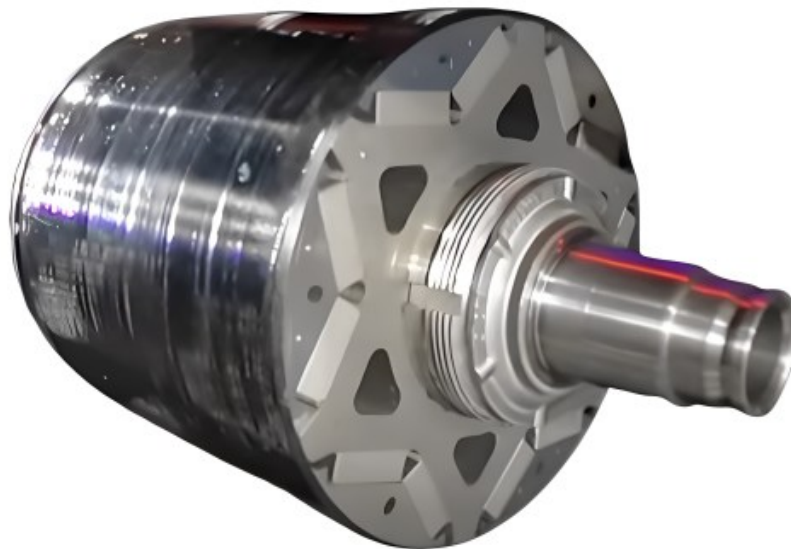
Autossa on tehoa yhteensä 761 kW eli 1020 hevosvoimaa. Autossa voimanlähteenä on kolme identtistä kestromagneettitahtikonetta. Etuakselilla yksi- ja takana kaksi moottoria. Automalli oli julkaisuhetkellä maailman nopein kaikki sarjatuotannossa olevat autot huomioon ottaen kiihdytettäessä 0–60 mph (0–96,6 km/h). Auto kiihtyy edellä mainittuun nopeuteen ajassa 1,99 sekuntia. Tesla Model S Plaid moottorin akselin pyörimisnopeus on maksimissaan noin 20 000 rpm, kun auton huippunopeus on 322 km/h. Vuonna 2025 kyseinen automalli on toisella sijalla tilastossa. Edelle on päässyt Porsche Taycan Turbo GT täyssähköauto ajalla 1,89 sekuntia. (Acquaviva 2023)

Hiilikuituvaipparakenne moottorissa kasvattaa moottorin suorituskykyä merkittävästi sekä mahdollistaa kompaktimman kokoiset ja tehokkaammat moottorit kuin aikaisemmin. Tesla on käyttänyt rakennetta ainakin kestromagneettitahtikoneissa. (Addcomposites 2024) Hiilikuituvaippa rakenteena ei itsessään ole niinkään uusi keksintö, sillä sitä on käytetty aikaisemmin muissa suuren pyörimisnopeuden omaavissa koneissa (Lehikoinen 2021).

Autoteollisuuden sähkömoottoreissa Tesla on ottanut teknologian käyttöönsä tietävästi ainakin ensimmäisten joukossa tämänhetkisen tiedon mukaan. On myös mahdollista ja jopa todennäköistä, että muutkin sähköautojen valmistajat suunnittelevat parhaillaan tai ovat jo ottaneet käyttöönsä vastaavanlaisia ratkaisuja moottoreihinsa.

3.2 Hiilikuituvaipan rakenne kestromagneettitahtikoneessa

Jatketaan Tesla Model S Plaid kestromagneettitahtikoneen roottorin rakenteen tutkimista. Plaid mallin roottorin rakenne on siis WIPM tyyppinen. Jo aiemmin mainittu IPM rakenne tarkoittaa, että magneetit ovat upotettuna roottorin rautarakenteeseen.



Kuva 2. Tesla Model S Plaid mallin hiilikuituvaipalla varustettu roottori. (Acquaviva 2023)

Tesla Model S Plaid mallin moottorissa yhdistyy IPM tyyppisen roottorin rakenteen edut yhdessä hiilikuituisen vaipan kanssa. Kuvasta 2 nähdään Tesla Model S Plaid moottorin roottorin rakenne. Roottori muodostuu käytännössä viidestä osasta eli akselistä, tähdenmuotoisesta roottorin keskiraudasta, V-muodossa olevista magneeteista, napojen kohdalla olevista vuoesteen muodostavista raudoista ja hiilikuituvaipasta. Hiilikuituvaipan päätehtävä on vahvistaa roottorin rakennetta, jotta kestromagneetit sekä roottorin rakenne pysyvät ka:ssa korkeilla pyörimisnopeuksilla. Roottorin ulkokehän rakenne metallilevyjen osalta ei

siis ole täysin umpinainen, kuten IPM rakenteessa vaan siinä on magneettisiltoja. (Acquaviva 2023)

Roottori on siis pyörivässä liikkeessä eli ympyräliikkeessä. Jos oletetaan ympyrän ratanopeuden olevan vakio eli moottori pyörii vakiokierrosnopeudella niin ratanopeuden suuruus pysyy vakiona, mutta suunta muuttuu. Tällöin kappale on kiihtyvässä liikkeessä. Normaalkiihtyvyyden suunta on kohtisuoraan ympyräradan keskipistettä kohti.

$$a_n = \frac{v^2}{r} \quad (1)$$

$$F = m \cdot a_n \quad (2)$$

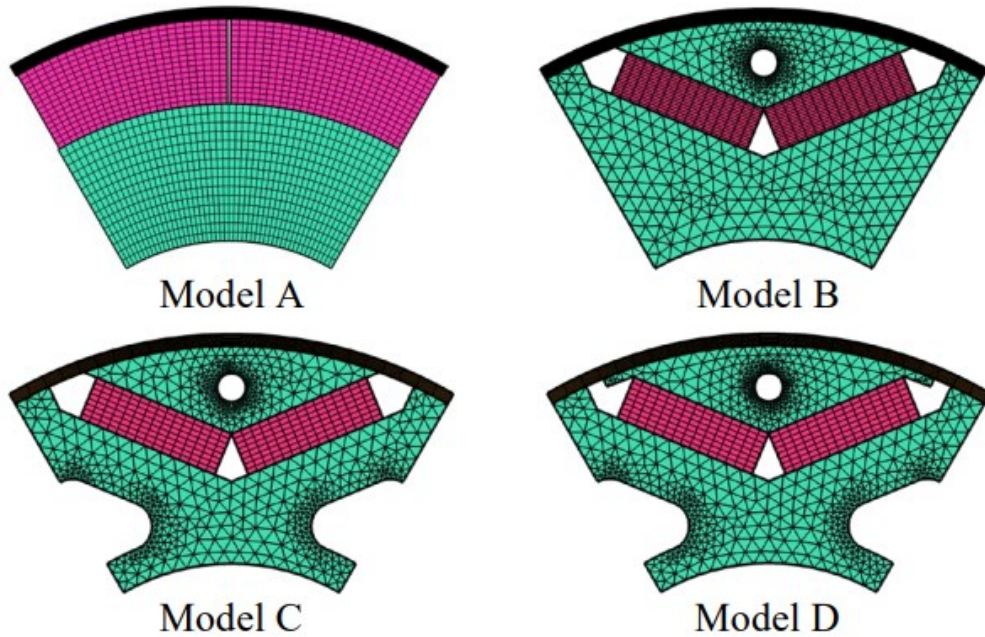
Normaalikiihtyvyys saadaan laskettua yhtälöllä 1. Normaalivoima saadaan laskettua yhtälöllä 2. Normaalikiihtyvyys kasvaa ratanopeuden kasvaessa, kun säde pysyy samana. Tällöin myös normaalivoima kasvaa. Normaalivoima pitää kappaleen ympyräradalla, eli tässä tapauksessa metallisen roottorin rakenteen tuki- ja jännitysvoimat pitävät rakenteen kasassa. Ilman hiilikuituvaipan antamaa tukivoimaa roottorin rakenne ei sellaisenaan kestäisi näin korkeita pyörimisnopeuksia.

WIPM- rakenteen suunnittelussa voidaan käyttää analyyttistä mallinnusta, jossa lasketaan roottorin jännitysvoimia, kun hiilikuituvaippa on esijännitetty, pyörivässä liikkeessä sekä lämpökuormituksen alaisena. Tuloksia on analysoitu rakenteellisen elementtianalyysin (FEA) (Finite Element Analysis) avulla. Tulokset on saatu Matlab koodilla, jota on käytetty avoimen lähdekoodin moottorien suunnittelu- ja analysointiohjelmassa SyR-e. COMSOL Multiphysics ohjelmaa on käytetty rakenteellisen elementtianalyysin FEA suunnittelussa. (J. Binder et al. 2023)

Analyyttistä mallinnusta on käsitelty lähteen J. Binder et al. 2023 sivuilla 2–3. Analyyttisessä mallinnuksessa on tehty tiettyjä yksinkertaistuksia laskennan helpottamiseksi. Rakenteellinen elementtianalyysi FEA täydentää analyyttistä mallinnusta ilman yksinkertaistuksia ja sillä voidaan arvioida todellista WIPM roottorin geometriaa. (J. Binder et al. 2023)

Kuvasta 3 nähdään neljä eri rakenteellisen elementtianalyysin mallia, jossa on yksittäinen roottorin napa. Mallit perustuvat Tesla Model S Plaid WIPM moottorin mittoihin. Malleissa

on otettu huomioon keskeiskiihtyvyyks eli kansankielellä keskipakovoima ja hiilikuituvaipan esijännitysvoima. Lämpölaajenemista, kestopagneettien magneettikentän voimaa eikä kitkavaikutuksia ole huomioitu. (J. Binder et al. 2023)



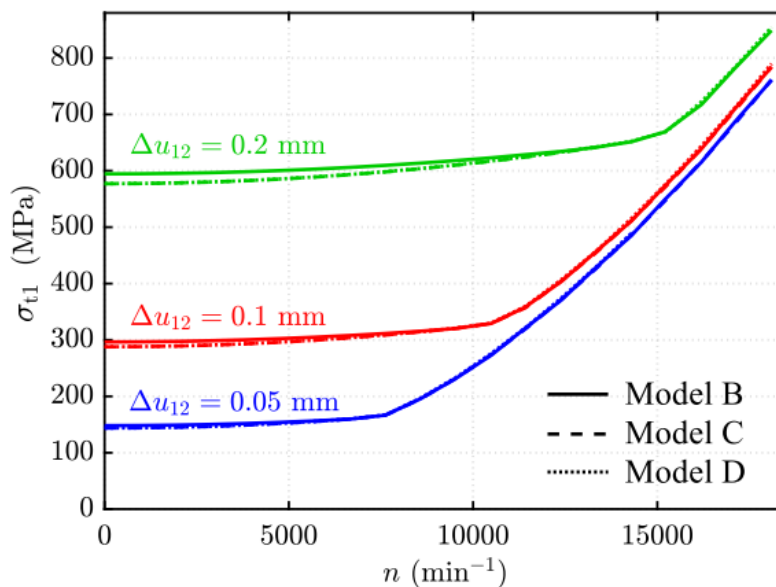
Kuva 3. Rakenteelliset elementtiansalyysin (FEA) mallit. (J. Binder et al. 2023)

Malli A, joka esitetään kuvassa 3 on geometrialtaan yksinkertaistettu eniten ja sitä käytetään analyttisessä mallinnuksessa. A mallissa kestopagneetit ja niiden välissä oleva rauta on yhdistetty ja yksinkertaistettu yhdeksi rengasmaiseksi osaksi. Myös roottorin keskiosan rauta on yksinkertaistettu rengasmaiseksi osaksi. Hiilikuituvaippa pysyy kaikissa neljässä mallissa muuttumattomana ulkokehällä.

Mallit B, C ja D simuloivat WIPM roottorin geometriaa rakenteellisessa elementtiansalyysissä. Näissä kolmessa mallissa esijännitetty hiilikuituvaippa on taivutettu magneettien välissä olevan rautaisen vuosteeseen ja ilmarakojen ylitse, jolloin saadaan simuloitua vuosteeseen reunoilla oleva paine, joka mahdollisesti murtaa vaipan rakennetta. C mallissa on lisättyä ilmataskut roottorin keskirautaan. D mallissa on vuosteeseen eli naparaudan reunoja jatkettu. D malli vastaa geometrialtaan Tesla Model S Plaid WIPM roottorin rakennetta.

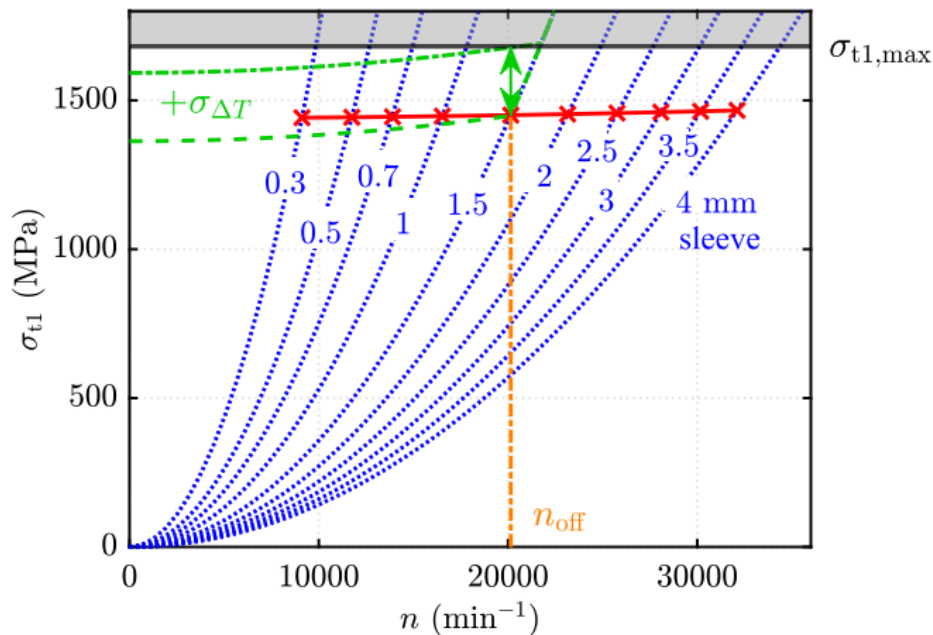
Kuvassa 4 verrataan vaipan kehän esijännitystä FEA elementtiansalyysin mallien B, C ja D osalta. Vertailussa vaipan paksuus on 2 mm ja välyk Δu 12 on kolmella eri tasolla.

Vällys Δu_{12} on vaipan sisäpinnan ja roottorin ulkopinnan välissä. Tällaisessa kahden materiaalin rajapinnassa on aina pieni välyk, joka tässä tapauksessa on pienimmillään 0,05 millimetriä. Havaitaan, että suuremmalla välyksellä Δu_{12} on oltava suurempi esijännitys. Alle 10 000 rpm pyörimisnopeuksilla havaitaan, että välyksen kaksinkertaistaminen karkeasti kaksinkertaistaa myös esijännityksen suuruuden. Nopeuden kasvaessa on esijännityksen siis oltava korkeampi. Eri välysten väliset erot esijännityksessä tasoittuvat lähelle toisiaan, kun pyörimisnopeus lähenee 20 000 rpm. Suurempi esijännitys mahdollistaa suuremman nopeuden roottorille. Kaikki kolme mallia käyttäytyvät lähes samalla tavalla kaikilla kolmella eri välyksellä. C ja D malleissa ilmataskun lisääminen pienentää esijännitystä 2,9 % verrattuna B malliin, koska ilmataskut vähentävät roottorin sisäisen rakenteen jäykkyyttä. Jäykkyyden väheneminen pienentää roottorin rakenteen vastavoimaa vaipan esijännityksestä syntyvälle voimalle. Kaikilla kolmella välyksellä ja mallilla esijännitys on noin 800 MPa luokkaa 20 000 rpm tienoilla. (J. Binder et al. 2023)



Kuva 4. Vaipan kehän suuntaisen esijännityksen suuruus kierrosnopeuden funktiona eri välyksellä Δu_{12} ja FEA malleilla B, C ja D. (J. Binder et al. 2023)

Kuvasta 5 nähdään esimerkkejä kehäjännityksen suuruudesta eri vaipan paksuuksilla lämpökuorma huomioon ottaen. Lämpökuormien aiheuttama jännityksen lisäys vaihtelee välillä 214–238 MPa, joka näkyy kuvassa punaisella käyrällä. Esimerkissä käytetylle DW236 vaipalle asetetaan varmuuskertoimeksi 2, jolloin suurin sallittu jännitys $\sigma_{t1,max} = 1680 \text{ MPa}$. Valitaan maksiminopeudeksi 20 150 rpm. Tässä maksiminopeudessa 1,5 mm paksuinen vaippa saavuttaisi suurimman sallitun jännityksen, jos sen lämpötila nousisi 120 K. (J. Binder et al. 2023)



Kuva 5. Vaipan minimipaksuudet kierrosluvun mukaan lämpökuorma huomioiden. (J. Binder et al. 2023)

3.3 Hiilikuituvaipan hyödyt verrattuna perinteiseen moottorirakenteeseen

Hiilikuituvaipalla varustetussa moottorissa roottorin ja staattorin välinen magneettinen ilmarävi muodostuu itse fyysisestä ilmaräöstä ja hiilikuituvaipan paksuudesta. Saman kokoluokan vaipattomassa moottorissa ilmarävi on tyypillisesti luokkaa 1,5 mm. (Lehikoinen 2021) Tesla Model 3 vaipattomassa IPM tyyppisessä moottorissa ilmarävi on 0,7 mm

(Acquaviva 2023). Hiilikuituvaipan paksuus on luokkaa 2 mm ja siihen lisätään vielä ilmarako, niin todellinen magneettinen ilmarako on noin kolmin tai nelinkertainen verrattuna IPM-moottoriin. Molempien moottoreiden vääntömomentti koostuu kestomagneeteista syntyvästä vääntömomentista sekä reluktanssivääntömomentista. Suurempi ilmarako pienentää molempia momentteja. Kestomagneettien osalta vääntöä saadaan lisättyä lisäämällä magneettimateriaalia. Koneen reluktanssivääntömomentti riippuu koneen pitkittäisen magneetointi-induktanssin L_d ja poikittaisen magneetointi-induktanssin L_q erotuksesta $L_d - L_q$. Suhde $\frac{L_d}{L_q}$ vaikuttaa pääosin tehokertoimeen. Suurempi suhdeluku tarkoittaa, että moottorilla on enemmän reluktanssivääntömomenttia. Mikäli ilmarakoa pystytään kasvattamaan muuttamatta suhdelukua, saadaan huippureluktanssivääntömomenttia lisättyä. (Lehikoinen 2021)

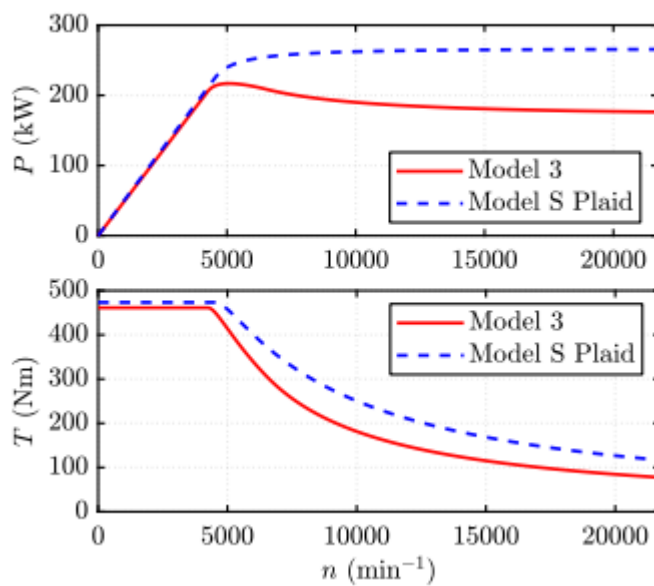
Hiilikuituvaippa mahdollistaa suuremman pyörimisnopeuden, mikä tarkoittaa suoraan kasvannutta tehotiheyttä verrattuna perinteiseen moottoriin. Fyysisesti samankokoisesta moottorista saadaan siis enemmän tehoa, kun pyörimisnopeutta kasvatetaan. (Addcomposites 2024) Moottorin massaltaan Tesla Model S Plaid'in moottori on kevyempi kuin Tesla Model 3 mallin perinteinen moottori. Massaero Plaid'in hyväksi johtuu hiilikuituvaipasta, mikä itsessään on jo kevyt sekä vaipan käytön takia roottorissa tarvitaan vähemmän terästä. Kevyemmän massan seurauksena teho- ja vääntötiheys ovat suuremmat vaipallisessa moottorissa verrattuna perinteiseen. (J. Binder et al. 2023)

Hiilikuituisella rakenteella saadaan siis massansäästöä, mikä on erityisen tärkeää ajoneuvojen osalta. Hiilikuidulla vahvistettu roottorin rakenne on merkittävästi kevyempi, kuin jos vastaavaan rakenteelliseen vahvuuteen yritettäisiin päästä metallisella rakenteella. Hiilikuitu materiaalina on kevyttä ja omaa suuren vetolujuuden. (Addcomposites 2024)

Vertaillaan Tesla Model 3 ja Model S Plaid mallien moottorien suorituskykyeroja teoreettisen mallinnuksen avulla. Model 3 on varustettu perinteisellä IPM tyyppisellä kestomagneetitahvikoneella ja Model S Plaid puolestaan WIPM tyyppisellä eli hiilikuituvaipalla varustetulla moottorirakenteella. Molemmissa moottoreissa staattori on samanlainen. Vertailussa oletetaan roottorin sähköisten ominaisuuksien ja materiaalien olevan identtisiä pois lukien Model S Plaid-mallin hiilikuituvaippa. Vaipan paksuudeksi on oletettu 2 mm. Molempien moottorien maksiminopeudeksi on asetettu 18 100 rpm ja ylikierrosnopeudeksi 20 000 rpm. Roottorin kestomagneeteille on oletettu lämpötilaksi 80 °C ja staattorin käämityksen lämpötilaksi 100 °C. Tulokset on saatu Matlab-koodilla, jota on käytetty avoimen lähdekoodin

moottorien suunnittelu- ja analysointiohjelmassa SyR-e. COMSOL Multiphysics ohjelmaa on käytetty rakenteellisen elementtianalyysin FEA (Finite Element Analysis) suunnittelussa. (J. Binder et al. 2023)

Kuvan 6 ylemmästä kuvaajasta nähdään molempien mallien teho kilowatteina moottorin pyörimisnopeuden funktiona teoreettisena mallinnuksena. Molempien moottorien tehokäyrä on käytännössä samanlainen välillä 0–5000 rpm. Mallinnuksen Model 3 moottori saavuttaa huipputehonsa 217 kW noin 5000 rpm kohdalla ja kierrosten noustessa teho laskee tasaisesti, jolloin maksiminopeudella teho on laskenut 176 kW:iin. Oikean Model 3 3D3 tyyppin moottorin huipputeho 220 kW saavutetaan 5000 rpm kohdalla. Model S Plaid moottorin tehokäyrä on käytännössä tasainen 5000 rpm:stä aina 20 000 rpm asti. Moottori saavuttaa huipputehonsa 266 kW 5000–10 000 rpm välillä ja säilyttää sen loppuun asti.



Kuva 6. Tesla Model 3 ja Model S Plaid mallien yhden moottorin teho- ja vääntökäyrät kierrosluvun funktiona teoreettisena mallinnuksena. (J. Binder et al. 2023)

Vääntömomenttikäyrät ovat molemmilla malleilla lähes samanmuotoiset. Molemmat mallit tuottavat käytännössä saman maksimivääntömomentin, joka on noin 480 Nm kierrosalueella

0–5000 rpm. 5000 kierroksen jälkeen Model 3:en vääntömomentti laskee hiukan nopeammin kuin Model S Plaid:in.

Model S Plaid mallin moottori on tasaisesti parempi väännössä sekä tehossa ja merkittävimpänä erona on 51 % suurempi teho moottorin huippunopeudella verrattuna Model 3:een. (J. Binder et al. 2023)

3.4 Hiilikuituvaipan valmistusprosessi

Kuituvahvisteisten komposiittivaippojen käyttö on yleistynyt SPM tyyppisten kestopagneettitahtikoneiden osalta samalla syventäen ja vieden eteenpäin tutkimus- ja kehitystyötä rakenteeseen liittyen. Kehityksen kolme tavoitetta ovat tarkka jännityksen suunnittelu, tehokas esijännityksen saavuttaminen valmistusprosessissa sekä korkean luotettavuuden saavuttaminen. Nämä kolme tavoitetta mahdollistavat kokonaisvaltaisen kehityksen moottorille, sekä mahdollistavat systeemin vakauden ja parantuneen tehotehokkuuden. Tavoitteiden saavuttamiseksi on olemassa neljä menetelmää, jotka auttavat pääsemään onnistuneeseen lopputulokseen. (W. Wuqiang et al., 2022)

Ensimmäisenä vaatimuksena on sopivien materiaalien määrittäminen, jotka soveltuvat korkean tehotehokkuuden suurnopeuskäyttöihin. Korkean lujuuden ja matalan tiheyden omaavilla komposiittimateriaaleilla saadaan rakenne pidettyä ohuena ja esijännitys vaipassa korkeana. Näin parannetaan moottorin hyötysuhdetta ja tehotehokkuutta. Materiaalien valinnassa on tärkeää huomioida valmiin moottorin käyttöympäristö ja olosuhteiden kuten mahdollisen korkean lämpötilan vaikutukset. Toisaalta materiaalien valinnassa vaikuttaa hinta, jotta lopputuotteen kustannukset pysyvät järkevällä tasolla. (W. Wuqiang et al., 2022)

Toisena tärkeänä asiana vaipan suunnittelussa on jännityksen mitoittaminen oikein. Jännitys komposiittirakenteisessa vaipassa on avainasemassa moottorin mekaanisen kestävyuden kannalta ja on näin ollen myös merkittävä turvallisuustekijä moottoria käytettäessä. Materiaalin suurimman lujuuden on oltava suurempi kuin mitoitettava vaipan maksimijännitys. (W. Wuqiang et al., 2022)

Kolmantena tärkeänä tekijänä on tehokkaat valmistusmenetelmät. Vaipan valmistukseen käytetään pääasiassa kahta erilaista menetelmää. Ensimmäinen menetelmä on valmistaa

vaippa tai holkki käyttämällä muottia, jonka ympärille kiedotaan kuitumateriaalia. Kuitumateriaali on nauhamaista ja kiristetään pituussuuntaisesti jännitykselle ennen kietomista muotin ympärille. Tämän jälkeen holkki irrotetaan muotista ja laitetaan roottoriin päälle joko prässämällä tai lämpösovituksella. Kaksivaiheisessa valmistusmenetelmässä huonoina puolina ovat valmistusprosessin monivaiheisuus sekä riski roottorin vaurioittamiseen präsäys vaiheessa. Toinen valmistustapa on yksivaiheinen, jossa kiedotaan jännitetty kuitulanka suoraan roottorin päälle. Tällä valmistusmenetelmällä saadaan korkeampi esijännitys vaipalle, sekä pienempi riski roottorin vaurioittamiseen verrattuna kaksivaiheiseen menetelmään. (W. Wuqiang et al., 2022)

Neljäntenä asiana on testaus, joka on tärkeänä osana laadunvarmistusta sekä käyttöturvallisuutta. Vaipalle tehdään kokeellinen testaus, jolla voidaan yksiselitteisesti todeta täyttyvätkö suunnitellut vaatimukset. (W. Wuqiang et al., 2022)

3.5 AFP teknologia valmistuksessa

Valmistuksessa käytetään AFP (Automated Fiber Placement) teknologiaa, joka mahdollistaa automatisoidun valmistusprosessin esimerkiksi hiilikuituvaipalle. Teknologia mahdollistaa tarkan ja automatisoidun jatkuvan nauhamaisen kuitumateriaalien kietomisen esimerkiksi roottorin tai muotin ympärille. AFP valmistusmenetelmä sisältää viisi eri vaihetta. Ensimmäisenä komposiittimateriaalin esimerkiksi hiilikuidun asettaminen työstökoneeseen. Seuraavaksi materiaali asetellaan automaattisella asettelulla robotiikan avulla kohteen pinnalle. Kolmannessa vaiheessa kun materiaali on asetettu kappaleen pinnalle, niin poistetaan mahdolliset ilmataskut käyttämällä rullaa, jolla painetaan kappaleen pintaa. Neljännessä vaiheessa on mahdollista käyttää lämmitystä, jolla voidaan parantaa tiettyjen materiaalien kiinnittymistä paikoilleen pintaan. Viimeisessä vaiheessa automaattinen leikkausjärjestelmä leikkaa materiaalin haluttuun muotoon tai ylimääräiset osat pois. (Addcomposites 2025)

AFP prosessin etuna on tarkka kuitujen asettelu, joka mahdollistaa rakenteen tasaisen paksuuden ja kuitujen oikean suunnan. Kuitujen suunnan asettaminen on tärkeää, koska näin saadaan rakenteen lujuus ja ominaisuudet optimoitua. Prosessin mittatarkkuus on tärkeää, koska moottoreihin liitettävän vaipan toleranssit ovat tiukkoja. AFP menetelmän etuna on toistettavuus eli se pystyy tuottamaan johdonmukaisesti korkealaatuisen lopputuloksen.

Toistettavuus lisää moottorien massatuotannon tehokkuutta. Materiaalin tehokas käyttö ja valmistusprosessin nopeus ovat AFP menetelmän etuja verrattuna perinteiseen manuaaliseen laminointiin. AFP järjestelmä pystytään tarvittaessa nopeastikin ohjelmoimaan uudelleen, jos prosessiin tarvitaan muutoksia. AFP järjestelmät sisältävät usein myös automaattista ja reaaliaikaista laadunvalvontaa, jolloin lopputuotteen taso pysyy korkeana. (Addcomposites 2025)

3.6 Muut materiaalit

Yleisimmät materiaalit hiilikuidun lisäksi ovat esimerkiksi lasikuitu ja muut korkean lujuuden kuituvahvisteiset komposiittimateriaalit. Lasikuidun lujuus ei kuitenkaan riitä suurnopeuskäytön tarpeisiin. Roottorin ulkokehän lineaarinopeuden ylittäessä 150 m/s, lasikuidun lujuus ei enää riitä. Epämagneettisista metalleista titaania käytetään, mutta esimerkiksi alumiinin lujuus ei riitä suurnopeuskäytöissä. (W. Wuqiang et al., 2022)

Taulukko 1. Roottorin vaipaksi soveltuvien materiaalien ominaisuuksia.

Materiaali	Vetolujuus [MPa]	Lämmönjohtavuus[W/m*K]
Hiilikuitu	3750	0,7
Titaaniseos	1280	7,9
Inconel 718	1030	11,4
Ruostumaton teräs	690	16,3
B20AT1200 sähköteräs	435	30,0

Potentiaalisia materiaaleja vaipan raaka-aineeksi ovat Inconel, titaaniseokset, sähköteräkset ja ruostumattomat teräkset. Taulukosta 1 nähdään hiilikuidun olevan ylivoimaisesti suurimman vetolujuuden ja pienimmän lämmönjohtavuuden omaava materiaali. Inconel 718 on nikkeli-pohjainen metalliseos, jolla on suuri vetolujuus samoin kuin titaaniseoksella. Näillä kahdella edellä mainitulla materiaalilla on noin puolet suurempi lämmönjohtavuus kuin hiilikuidulla. Ruostumaton teräs ja piipitoinen sähköteräs B20AT1200 ovat myös vaihtoehtoja, mutta niillä on muita materiaaleja merkittävästi pienempi maksimivetolujuus sekä korkea

lämmönjohtavuus. Näistä materiaaleista hiilikuidulla on korkein vetolujuus ja pienin tiheys, mikä tekee siitä myös kevyimmän rakenteen. Hiilikuidun etuna on myös pienempi lämmönjohtavuus verrattuna metalleihin. Tällöin staattorista roottoriin siirtyvä lämpökuorma jää pienemmäksi, koska hiilikuituvaippa toimii eristävänä osana moottorin osien välissä. (W. Wuqiang et al., 2022) (J. Du et al., 2022)

3.7 Hiilikuituvaipan vaikutus jäähtytykseen

Hiilikuituvaipan tehtävänä on myös vähentää roottorille syntyvää lämpökuormaa. Suurin osa lämmöstä tulee staattorista ja näin hiilikuituvaippa estää lämmön pääsyä roottoriin. Tämä pienentää kestopagneettien demagnetoitumisriskiä korkean lämmön takia, kun moottoria kuormitetaan korkealla teholla. Hiilikuituvaippa osaltaan helpottaa moottorin lämpökuorman hallintaa, mikä mahdollistaa korkeamman suorituskyvyn. (Addcomposites 2024)

Suuren pyörimisnopeuden kestopagneettitahtikoneissa, joissa on hiilikuituinen tai esimerkiksi titaaninen vaippa roottorin ympärillä ongelmaksi voi muodostua moottorin ylikuumentuminen. Tyypillisesti kestopagneetit kestävät muutamien satojen asteiden lämpötilan. Esimerkkinä N33EH-mallin kestopagneetti kestää 200 °C asteen lämpötilan. Moottorien jäähtytystä on kehitetty moottorien luotettavuuden parantamiseksi. Yhtenä ratkaisuna on puhalttaa jäähdytysilmaa roottorin keskiraudan läpi olevista reistä sekä roottorin ja staattorin ilmapölystä akselin suuntaisesti roottorin päässä olevalla puhaltimella. Kotelon päissä on erikokoiset reiät, jolloin päiden välille muodostuu paine-ero. Tämä paine-ero mahdollistaa jäähdytysilman virtauksen myös ilmaraon läpi. Samalla puhallus jäähdyttää staattorin käämityksen päätä. Moottoreissa on myös nestejäähdytys eli nestevaippa kiertää staattorin ulkokehällä jäähdyttämässä sitä. (J. Du et al., 2022)

4 Hiilikuituvaipan sovelluskohteet

Hiilikuituvaippaa ja muistakin materiaaleista valmistettuja vaippoja on käytetty sähkökooneissa jo aiemmin ja sähköajoneuvojen moottoreihin ratkaisu on otettu muutamia vuosia siten käyttöön.

4.1 Nykyään käytössä olevat sovellukset

Komposiittimateriaaleista valmistettuja holkkeja on valmistettu ja käytetty onnistuneesti Kiinassa sekä muissakin maissa. Yhdysvalloissa on käytössä 8 MW tehoinen pinta-asennettu kestmagneettitahtikone pyörittämässä kaasuturbiinia ja koneen nimellisa nopeus on 15 000 rpm. (Wuqiang et al., 2022)

Alankomaissa on ollut käytössä hiilikuituvaipalla varustettu kestmagneettitahtikone, jonka roottorin pyörimisa nopeus on maksimissaan jopa 200 000 rpm. Konea on käytetty mikroajoneuvojen kehityksessä. (Borisavljevic et al., 2010)

4.2 Hiilikuituvaippa osana autoteollisuuden sähköistymistä

Autoteollisuus suuntaa uusien autojen valmistuksessa, koko ajan suurempaan sähköajoneuvojen osuuteen kokonaisajoneuvomäärä huomioiden. Hiilikuituvaippa rakenteella on mahdollista saavuttaa moottoreille suurempi hyötysuhde ja suorituskyky. Nämä paremmat ominaisuudet mahdollistaa korkeampi tehotehokkuus eli pienemmät ja kevyemmät moottorit pystyvät tuottamaan suurempia tehomääriä. AFP-teknologia valmistuksessa mahdollistaa moottorille korkeamman hyötysuhteen optimoidun kuitujen asettelun ja näin pienempien sähkömagneettisten häviöiden ansiosta. Hiilikuidun lujuus mahdollistaa roottorin mekaanisen rakenteen vahvistamisen, jolloin suurnopeuskäyttö on mahdollista ja suorituskykyä saadaan paremmaksi. (Addcomposites 2024)

Hiilikuituvaipan lisääminen moottoriin saattaa kasvattaa valmistuskustannuksia ja monimutkaistaa tuotantoa verrattuna perinteiseen moottorin valmistukseen. Pitkällä aikavälillä hiilikuituvaipalla varustetulla moottorilla saavutetaan kuitenkin kustannushyötyjä. Kustannushyötyjä saavutetaan esimerkiksi käyttämällä automatisoitua valmistusmenetelmää AFP:tä, jossa optimoidulla kuitujen asettelulla saadaan vähennettyä materiaalihukkaa valmistuksessa. Myös tuotantoprosessi tehostuu, kun käytetään automatisoitua järjestelmää. Hiilikuituvaippa voi mahdollisesti pidentää myös moottorin käyttöikää, jolloin elinkaaren aikaiset kustannukset laskevat. (Addcomposites 2024)

4.3 Mahdolliset tulevaisuuden käyttökohteet

Tulevaisuudessa sähköajoneuvojen määrä tulee kasvamaan ja hiilikuituvaipalliset moottorit tulevat olemaan mukana tässä kasvussa. Akkuteknologioiden kehittyessä hiilikuituvaipallisten moottorien korkea hyötysuhde tulee entistä tärkeämmäksi ajoneuvojen toimintamatkan pidentämisessä. Todennäköisimmin rakenne alkaa yleistyä tehokkaammissa urheiluautoissa, joilla haetaan maksimaalista suorituskykyä. On myös mahdollista, että sähkö kilpa-autoilla ajettavassa Formula E-sarjassa otettaisiin hiilikuituvaipalla varustetut moottorit lähivuosina käyttöön. Normaalin kuluttuja hintaluokan sähköautoihin ratkaisua saadaan ehkä odottaa vielä joitain vuosia. (Addcomposites 2024)

Potentiaalisia käyttökohteita on myös autoteollisuuden ulkopuolella. Ilmailussa sähkölentokoneiden määrä tulee nousemaan tulevaisuudessa jollakin aikavälillä ja hiilikuituvaipallisten moottorien suuri tehotiheys voivat edesauttaa ilmailuun sopivien moottorien kehitystä. Teollisuudessa sähkömoottoreita käytetään paljon ja hiilikuituvaipallinen moottori tarjoaa korkean hyötysuhteen ja tehotiheyden myötä ratkaisun kohteisiin, jossa tarvitaan suorituskykyinen ja kestävä moottori. Meriliikenteessä esimerkiksi rahtilaivojen moottoreiksi eivät todennäköisesti sovellu suurnopeusmoottorit, koska laivojen potkurit pyörivät matalalla pyörimisnopeudella. Sen sijaan pienempien esimerkiksi kilpaveneiden, joiden moottoritehot vastaavat henkilöautojen moottorien tehoja voisi ajatella käyttävän hiilikuituvaipallista sähkömoottoria tehokkuuden ja keveyden ansiosta. (Addcomposites 2024)

5 Johtopäätökset

Tässä tutkimuksessa tavoitteena oli tarkastella hiilikuituvaipan käyttöä sähkökoneen roottorissa. Tutkimuksessa keskityttiin pääosin yhdysvaltalaisen sähköautovalmistajan Teslan hiilikuituvaipalla varustetun kestopagneettitahtikoneen roottorin tarkasteluun. Työssä selvitettiin roottorin rakennetta ja miten hiilikuituvaippa vaikuttaa siihen. Lisäksi tarkasteltiin hiilikuituvaipan ominaisuuksia ja vaikutuksia moottorin suorituskykyyn sekä sähkömagneettisiin ominaisuuksiin. Tutkimuksessa vertailtiin vaipparakenteen hyötyjä perinteisen roottorirakenteen omaavaan moottoriin.

Merkittävimpana tuloksena todettiin, että hiilikuituisella vaipalla varustetun kestopagneettitahtikoneen teho- ja vääntötiheyttä saadaan nostettua verrattuna vaipattomaan saman tyyppiseen moottoriin. Esimerkkinä Tesla Model S Plaid mallin yksittäinen hiilikuituvaipallinen PMSM-moottori tuottaa noin 25 % suuremman huipputehon verrattuna Tesla Model 3 perinteiseen PMSM-moottoriin. Hiilikuituvaippa siis vahvistaa roottorin rakennetta ja näin sallii moottorille korkeamman pyörimisnopeuden, mikä kasvattaa moottorin tehoa. Hiilikuituvaipalla mahdollistetaan merkittävästi korkeammat pyörimisnopeudet, kun verrataan esimerkiksi Tesla Model 3 5000 rpm ja Model S Plaid 20 000 rpm moottorien nopeuksia. Etuna on myös lämpökuorman hallinta, eli hiilikuituvaippa eristää lämmön johtumista staattorilta roottorille ja pidentää näin kestopagneettien elinikää. Hiilikuituvaipalliselle moottorille on kokonaisuudessa ennustettu pidempää elinkaarta verrattuna perinteiseen rakenteeseen. Huonoina puolina ovat moottorin kalliimmat valmistuskustannukset sekä harvinaisia maametalleja sisältävien kestopagneettien tarve. Yhteenvetona hiilikuituvaippa mahdollistaa aiempaa kevyemmät ja kompaktimmat moottorit kasvaneella teholla.

Tulevaisuudessa hiilikuituvaippavahvisteisen kestopagneettitahtikoneen käyttökohteet tulevat todennäköisesti painottumaan suurta tehoa ja suorituskykyä vaativiin ajoneuvoihin ja mahdollisesti sähkölentokoneisiin. Ajoneuvokäytöissä suuren tehotiheyden ansiosta moottorin massaa saataisiin pienemmäksi, joka mahdollistaa ajoneuvolle korkeamman hyötysuhteen ja mahdollisesti lisätilaa akkukapasiteetin kasvattamiseen. Näin ajoneuvojen toimintamatkaa saataisiin pidennettyä. Aiheen jatkotutkimuksessa voisi tarkemmin selvittää vaipan vaikutusta roottorin häviöihin ja sähkömagneettisiin ominaisuuksiin.

Lähteet

- Acquaviva, R. (2023). *High-speed IPM motors for traction application*. Diplomityö. Politecnico di Torino, Torino. [Viitattu: 2025-03-18]. Saatavissa: <https://webthesis.biblio.polito.it/29169/1/tesi.pdf>
- Addcomposites (2024). *How Tesla's 'Carbon-Wrapped' Motor with AFP could revolutionize electrification in Automotive*. [Verkkosivu]. [Viitattu: 2025-02-26]. Saatavissa: <https://www.addcomposites.com/post/how-tesla-s-carbon-wrapped-motor-with-afp-could-revolutionize-electrification-in-automotive>
- Arenaev (2022). *Different types of electric motors used in EVs*. [Verkkosivu]. [Viitattu: 2025-02-12]. Saatavissa: https://www.arenaev.com/different_types_of_electric_motors_used_in_evs-news-214.php.
- Autoalan tiedotuskeskus (2025). *Liikennekäytössä olevien ladattavien autojen määrä - Tammikuu 2025*. [Verkkosivu]. [Viitattu: 2025-01-29]. Saatavissa: https://www.aut.fi/tilastot/autokannan_kehitys/sahkoautojen_maaran_kehitys
- Binder, J., Silvagni, M., Ferrari, S., Deusinger, B., Tonoli, A. and Pellegrino, G. (2023). *High-speed IPM Motors with Rotor Sleeve: Structural Design and Performance Evaluation*. 2023 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), Newcastle upon Tyne, United Kingdom, 2023. [Viitattu: 2025-03-17]. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.cc.lut.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10110939&tag=1>
- Borisavljevic, A., Polinder, H. & Ferreira J. A. (2010). *Enclosure design for a high-speed permanent magnet rotor*. 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010), Brighton, UK, 2010. [Viitattu: 2025-03-19]. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.cc.lut.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5522536>
- Du, J., Chaojiang, L., Zhao, J., Huang, X., Liu, Y. & Lv, H. (2022). *Rotor Investigation of High-Speed Permanent Magnet Motor with Roundness Error and CFD-Thermal Distribution Analysis*. *Energies* 2022, 15(13), 4606. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/en15134606>
- Electricmotorfeed (2024). *Understanding the various types of electric motors used in electric vehicles*. [Verkkosivu]. [Viitattu: 2025-02-11]. Saatavissa: <https://electricmotorfeed.com/types-of-electric-motors-in-ev/>
- Enpmsm (2023). *Understanding the Relationship between Lorentz Force and Permanent Magnet Synchronous Motors*. [Verkkosivu]. [Viitattu: 2025-05-13]. Saatavissa: <https://www.enpmsm.com/news/understanding-the-relationship-between-lorentz-force-and-permanent-magnet-synchronous-motors/>

Lamnow (2025). *Several Methods of Motor Core Lamination Stacking*. [Verkkosivu]. [Viitattu: 2025-03-05]. Saatavissa: <https://lamnow.com/several-methods-of-motor-core-lamination-stacking/>

Lammotor (2024). *Tesla Model S Plaid vs Lucid Air Motor Stator and Rotor Comparison: Who is the Technical King?* [Verkkosivu]. [Viitattu: 2025-02-26]. Saatavissa: <https://lammotor.com/tesla-model-s-plaid-vs-lucid-air-motor/>

Lehikoinen (2021). *Tesla's "Carbon-Wrapped" Motor*. [Verkkosivu]. [Viitattu: 2025-03-05]. Saatavissa: <https://www.anttilehikoinen.fi/technology/electrical-engineering/teslas-carbon-wrapped-motor/>

Loganayaki, A. & Bharani Kumar, R. (2019). *Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Applications*. ICACCS 2019. p.1064-1069. [Viitattu: 2025-02-13]. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.cc.lut.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8728442>

Olsen, L. E., Nelson, D., Laskaris, K., Ge, H., Filip, E., Vega, C., Pellerey, P. & Papanikolaou, V (2021). *Permanent Magnet Motor With Wrapping*. [Viitattu: 2025-03-13]. Kansainvälinen julkaisunumero WO 2021/225902 A1.

Ou, J., Liu, Y. & Doppelbauer, M. (2021). *Comparison Study of a Surface-Mounted PM Rotor and an Interior PM Rotor Made From Amorphous Metal of High speed Motors*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, (1982), 2021-10, Vol.68 (10), p.9148-9159. [Viitattu: 2025-03-13]. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.cc.lut.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9209190>

Villani Marco (2025). *Synchronous Reluctance motor: a rare earth free solution for electric vehicles*. ElectricMotorEngineering. [Verkköjulkaisu]. [Viitattu: 2025-02-19]. Saatavissa: <https://www.electricmotorengineering.com/synchronous-reluctance-motor-a-rare-earth-free-solution-for-electric-vehicles/>

Vinayachandran Jinesh (2024). *The rise of Externally Excited Synchronous Motors (EESM): A Comprehensive Overview*. [Verkköjulkaisu]. [Viitattu: 2025-03-25]. Saatavissa: <https://www.linkedin.com/pulse/rise-externally-excited-synchronous-motors-eesm-jinesh-vinayachandran-j23cc>

Wuqiang, W., Yong, L., Dajun, H., Xiaodong, C., Hongquan, L., Yanrui, L. & Lisha, L (2022). *Research on Stress Design and Manufacture of the Fiber Reinforced Composite Sleeve for the Rotor of High-Speed Permanent Magnet Motor*. Energies 2022. [Viitattu: 2025-03-18]. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/7/2467>