

Jesse Kurronen

Kestomagneettitahtikoneen sähkömagneettinen suunnittelu Superkart-autoon

Opinnäytetyö
Sähkö- ja automaatiotekniikka

2020



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tekijä	Tutkinto	Aika
Jesse Kurronen	Insinööri (AMK)	Huhtikuu 2020
Opinnäytetyön nimi		39 sivua 4 liitettä
Kestomagneettitahtikoneen sähkömagneettinen suunnittelu Superkart-autoon		
Toimeksiantaja		
Jesse Kurronen		
Ohjaaja		
Jyrki Liikanen, Marko Rilla (Tkt)		
Tiivistelmä		
<p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli toteuttaa sähkömagneettinen suunnittelu suorituskyylyltään kilpailukykyiselle kestopagneettitahtikoneelle Superkart-autoon. Kestomagneettitahtikoneen suunnittelulla Superkart-autoon annetaan vaihtoehto fossiilisten polttoaineiden käyttämiselle sarjassa. Suunnitellun koneen soveltuvuutta kilpailuihin täytyi myös arvioida.</p> <p>Kestomagneettitahtikone suunniteltiin käyttäen apuna analyttistä laskentaa ja Cedratin Flux2D-ohjelmaa, joka perustuu FEM-laskentaan. Suunnittelu aloitettiin käymällä läpi koneen reunaehdot ja vaatimukset. Staattorille ja roottorille suunniteltiin geometriamalli, valittiin soveltuva käämitys ja magneettinapayhdistelmä, vertailtiin erilaisia valmistusmateriaaleja ja näistä valittiin parhaiten soveltuvat. Niiden pohjalta suoritettiin sähkömagneettinen laskenta koneen ominaisuuksien selvittämiseksi. Koneen geometriaa paranneltiin työn edetessä. Tässä työssä on esitetty versio koneesta, joka osoittautui parhaaksi suunnitelluista. Energiavaraston suunnittelu ei kuulunut työhön, joten energiavarastosta tehtiin vain esimerkkimalli, joiden pohjalta jännite- ja virta-arvot sekä kapasiteetti voitiin arvioida koneen suunnittelua varten.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena saatiin suorituskyylyltään kilpailukykyisen kestopagneettitahtikoneen malli ja nimellisarvot. Koneen suorituskyykykäyrät esitettiin, ja todettiin koneen olevan kilpailukykyinen Superkart-sarjassa käytettäviä polttomootoreita vastaan. Koneetta on mahdollista parantaa vielä keventämällä sitä ja hienosäätämällä geometriaa. Tällöin olisi huomiotava sähköjärjestelmä kokonaisuutena ja näiden pohjalta tehdä muutoksia.</p>		
Asiasanat		
Sähkömagneettinen suunnittelu, kestopagneettitahtikone, Superkart		

Author	Degree	Time
Jesse Kurronen	Bachelor of Engineering	April 2020
Thesis title Electromagnetic Design of Permanent Magnet Synchronous Machine for Superkart		39 pages 4 appendices
Commissioned by Jesse Kurronen		
Supervisor Jyrki Liikanen, Marko Rilla (D.Sc.)		
<p data-bbox="164 763 300 792">Abstract</p> <p data-bbox="164 835 1452 976">The objective of this thesis was to carry out electromagnetic design for a competitive permanent magnet synchronous machine for a Superkart. A Permanent magnet synchronous machine design provides a less polluting alternative for the use of fossil fuels in the series. The feasibility of the planned machine for competition -use also was evaluated.</p> <p data-bbox="164 1019 1469 1417">The permanent magnet synchronous machine was designed using analytical calculation and Cedrat's Flux2D software based on FEM computation. The design was started by reviewing the machine's boundary conditions and requirements. A geometry model was designed for the stator and the rotor, a suitable winding and a magnetic pole combination were selected, different materials were compared, and the most suitable ones were selected. Based on these, an electromagnetic calculation was performed to determine the properties of the machine. Machine geometry was improved as work progressed. This work presents a version of the machine that turned out to be the best one designed for use in competitions. Designing the energy storage was not part of this thesis, so the energy storage was just an example model, which could be used to estimate the voltage, current and capacity for the machine design.</p> <p data-bbox="164 1460 1455 1668">As a result of this thesis, the model and the nominal values of a competitive permanent magnet synchronous machine were obtained. The machine's performance curves were presented and found to be competitive against the internal combustion engines used in the Superkart series. It is possible to further improve the machine by reducing weight and fine-tuning the geometry. In that case, the electrical system as a whole, should be considered, and changes made based on these.</p>		
<p data-bbox="164 1682 320 1711">Keywords</p> <p data-bbox="164 1753 1273 1783">Electromagnetic design, Permanent magnet synchronous machine, Superkart</p>		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	8
2	SÄHKÖKONETYYPIT JA VALINTA	9
2.1	Pyörivän sähkökoneen rakenne.....	9
2.2	Tasasähkökoneet	10
2.2.1	Harjalliset tasasähkökoneet.....	10
2.2.2	Harjattomat tasasähkökoneet	11
2.3	Kiertokenttäkoneet.....	11
2.4	Induktio- eli epätahtikoneet.....	12
2.5	Tahtikoneet.....	13
2.5.1	Vieras magnetoidut tahtikoneet	13
2.5.2	Synkronireluktanssitahnikoneet	14
2.5.3	Kestomagneettitahtikoneet	14
2.6	Konetyypin valinta ja perustelu	15
3	SUPERKART-SARJA.....	16
3.1	Reunaehdot	17
3.1.1	Ulkomitat.....	17
3.1.2	Suorituskykyvaatimukset	18
4	SÄHKÖKONEEN MALLINTAMINEN	19
4.1	Käämitys ja roottori	20
4.2	Materiaalit	22
4.3	Geometria.....	23
5	SÄHKÖMAGNEETTINEN LASKENTA.....	25
5.1	Vastajännite.....	25
5.2	Jännitemalli.....	27
5.3	Vääntömomenttiväre.....	30
5.4	Oikosulku.....	31
5.5	Induktanssit	32

5.6 Häviöt	33
6 POHDINTA	34
LÄHTEET	36
LIITTEET	40

LIITTEET

Liite 1. PMSM-220-1900-Final-Winding.xlsx Excel-tiedosto

Liite 2. Dahrentrad Pyörö- ja muotokuparien tekniset tiedot

Liite 3. Vacuumschmelze Soft Magnetic Cobalt-Iron Alloys

Liite 4. Cogent SURA M270-50A datasheet

TÄRKEIMMÄT KÄYTETYT MERKINNÄT

<i>A</i>	pinta-ala [m ² , mm ²]
<i>B</i>	magneettivuo [T]
CoFe	kobolttirauta
<i>d</i>	halkaisija [mm]
<i>E</i>	jännitelähde
<i>E</i>	vastajännite [V]
FEM	finite element method
<i>H</i>	magneetikentän voimakkuus [kA/m]
hp	hevosvoima
<i>I</i>	virta [A]
<i>L</i>	kela
<i>L</i>	induktassi [H]
<i>l</i>	pituus
NdFeB	neodyymi-rauta-boori
<i>n</i>	pyörimisnopeus [rpm]
<i>P</i>	pätöteho [kW]
PMSM	kestomagneettitahtikone
<i>Q</i>	loisteho [kVar]
<i>Q</i>	uramäärä
<i>q</i>	uraa/napa/vaihe
<i>R</i>	vastus
<i>R</i>	resistanssi [Ω]
<i>r</i>	säde
<i>S</i>	näennäisteho [kVA]
Sw	kytkin
<i>T</i>	vääntömomentti [Nm]
<i>U</i>	jännite [V]
Vac	vaihtojännite
Vdc	tasajännite
<i>X</i>	reaktanssi [Ω]

Käytettyjä alaindeksejä

d	pitkittäis
demag	demagnetointi
e	päätyinduktanssi
fe	rauta
k	oikosulku
loss	häviö
peak	huippuarvo
ph	vaihe
teeth	hammas
yoke	selkä
q	poikittais

1 JOHDANTO

Autourheilu ja moottoriajoneuvot ovat koko ajan siirtymässä enemmän sähkökäyttöisiksi. Formula F1 -sarjasta johdettu Formula Electric ja MotoGP-sarjasta johdettu MotoE-sarja ovat nostaneet suosiotaan. Tähän on vaikuttanut vahvasti lainsäädännölliset toimet päästöjen vähentämiseksi, yleinen ympäristötietoisuus ja ajoneuvovalmistajien vastuullisuus. Polttomoottoreiden haittoina ovat niiden huono hyötysuhde, suuret päästöt ja useimmiten käytettyjen fossiilisten polttoaineiden, kuten bensiinin, uusiutumattomuus. Tämän takia sähkömoottoreiden suunnittelu ja kehittäminen on tärkeää tänä päivänä. Sähkökoneen toimintaperiaate on jo kehitetty 1800-luvulla [1] ja sähkömoottoreita käytettiin ensisijaisena moottorikäyttöisten ajoneuvojen voimanlähteenä 1890-luvulla ja 1900-luvun alussa [2]. Polttomoottorit kuitenkin ohittivat niiden polttoaineen saatavuuden ja varastoinnin helppouden takia sähkökoneet ajoneuvoikäytössä. Myös kehittämätön akkuteknologia myötävaikutti tähän.

Superkart-sarja on CIK-FIA:n alainen kilpa-autoilusarja, jossa kilpaillaan karting autoa muistuttavilla, suurella tehopainosuhteella olevilla kilpa-autoilla. Tällä hetkellä sarjassa ajetaan 450 cc nelitahtisilla tai 250 cc kaksitahtisilla moottoreilla. Superkart-sarja on monelle kilpakuljettajalle askel karting-autojen ja tehokkaampien formuloiden välillä. Tällä hetkellä sarjassa ei sallita sähkökoneita, mutta tulevaisuuden kehityksen kautta sähköisiin kilpa-ajoneuvoihin siirtyminen antoi minulle ajatuksen kehittää fyysisiltä mitoiltaan superkartiin mahtuvan ja suorituskyvyltä kilpailukykyisen sähkökoneen.

Akkuteknologian kehittymisen ja uusiutumattomien polttoaineiden ympäristövaikutuksen myötä sähkökoneiden käyttö ajoneuvoissa on lisääntynyt huomattavasti. Akut ovat pienempiä, kevyempiä ja energiatiheydeltään parempia kuin esimerkiksi viime vuosisadan lopulla. Kestomagneettitahtikoneet ovat nousseet suosiossa suuren tehotiheyden ja hyvän hyötysuhteen vuoksi. Myös kestopagneettimateriaalit ovat kehittyneet huomattavasti 1980-luvulla keksityn neodyymi-rauta-boori-seoksen (NdFeB) keksimisen jälkeen [3]. NdFeB-magneetin energiatiheys on korkea, ja se sietää kohtuullisen paljon lämpöä ennen demagnetoitumista.

Sähkökoneet käsittävät sekä sähkömoottorit että generaattorit. Yleisesti ottaen sähkökonetta voi käyttää molempiin tarkoituksiin, ja koska ajoneuvokäytössä konetta käytetään sekä ajomoottorina että jarrutusenergian talteenottoon, työssä käytetään sähkökone-nimitystä moottorin sijaan.

Sähkökoneen suunnittelussa pitää ottaa huomioon monia erilaisia asioita. Olennaisia asioita sähkökonetta suunniteltaessa on sen käyttökohde, suorituskykyvaatimukset ja fyysiset rajoitukset eli reunaehdot. Nämä määrittävät koneen suurimman mahdollisen fyysisen koon ja sitä kautta asettavat rajoituksia vääntömomentille ja jäähdytykselle. Myös esimerkiksi tässä työssä valittu asennustapa, eli vetoakselin ympärille asennus, aiheuttaa ongelmia, jos koneesta tulee liian pitkä ja halkaisijaltaan pieni. Paino on eräs tärkeä asia, mikä pitää ottaa huomioon, varsinkin kun käyttökohde on Superkart. Superkartit ovat tunnettuja keveydestään ja ohjattavuudesta. Nämä ominaisuudet kärsivät, jos paino lisääntyy liikaa.

Tässä työssä perehdytään kestopagneettitahtikoneen sähköiseen suunnitteluun ja laskentaan. Kestomagneettitahtikone suunnitellaan alusta asti ottaen huomioon käyttökohteen tuomat rajoitukset ja vaatimukset.

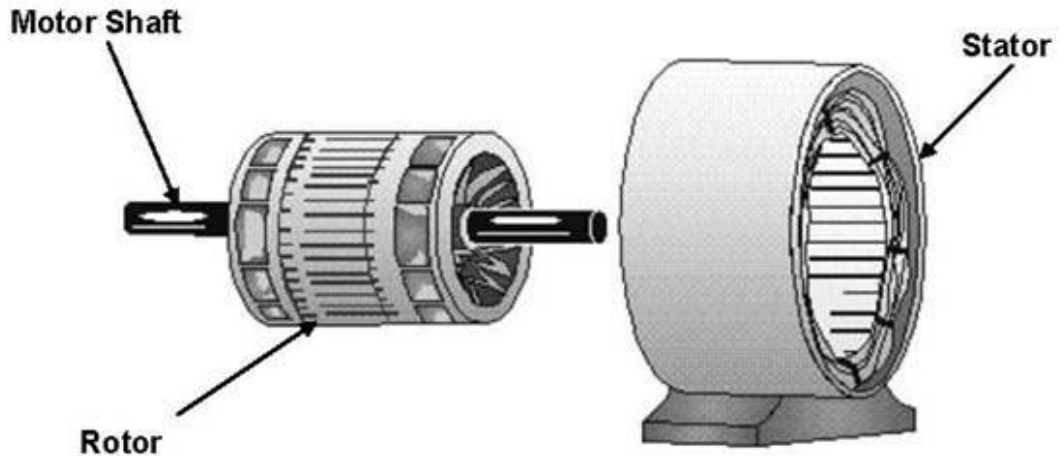
2 SÄHKÖKONETYYPIT JA VALINTA

Sähkökoneita on sekä pyörivä- että lineaariliikkeisiä. Pyörivien sähkökoneiden tarkoitus on muuntaa sähköinen energia mekaaniseksi energiaksi tai päinvastoin. Sähkömagneettinen piiri koostuu kahdesta pääosasta, staattorista ja roottorista. Staattori ja roottori tulevat englannin kielen sanoista stationary and rotary, eli seisoja ja pyörijä. Tässä kappaleessa käydään läpi sähkökonetyypit, niiden toimintaperiaatteet sekä hyödyt ja haitat. Kappaleen lopussa esitellään valittu konetyyppi ja sen tärkeimmät ominaisuudet, jotka johtivat valintaan.

2.1 Pyörivän sähkökoneen rakenne

Pyörivän sähkökoneen rakenne koostuu tyyppillisesti aktiiviosista, jotka käsittävät staattorin, käämityksen, roottorin, rungon, päätykilvet, laakeroinnin, akselin

ja kytkentäkotelon. Tässä työssä keskitytään staattorin ja roottorin rakentamiseen sekä niiden sähkömagneettiseen suunnitteluun. Kuvassa 1 on esitettyä pyörivän sähkökoneen staattori, roottori ja akseli.



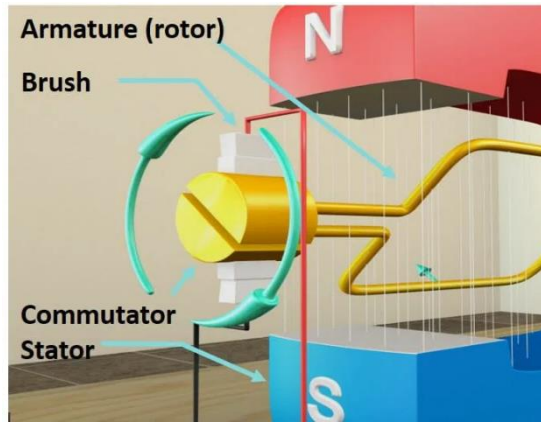
Kuva 1. Pyörivän sähkökoneen staattori, roottori ja akseli esitettyinä [4]

2.2 Tasasähkökoneet

Ensimmäiset kehitetyt sähkökoneet 1830-1840-luvuilla olivat akku- tai paristo-käyttöisiä tasavirtakoneita [5].

2.2.1 Harjalliset tasasähkökoneet

Harjallisen tasasähkökoneen staattori koostuu joko kestromagneeteista tai käämityksestä. Roottorissa on roottorikäänitys, ja siihen johdetaan tasavirtaa. Virrallisena roottorikäänitys luo magneettikentän roottoriin. Roottorin magneettikentän navat hakeutuvat lähelle staattorin vastakkaisia magneettinapoja aiheuttaen pyörivän liikkeen. Roottorin pyöriminen jatkuu kommutaattorin ansiosta. Kun roottorin magneettinapa on staattorin vastakkaisen magneettinavan kohdalla, hiiliharjat vaihtavat roottorikäänityksen napaisuuden kommutaattorilla ja kohdakkain olevat navat alkavat hylkiä toisiaan jatkaen pyörivää liikettä. [3.] Harjallisen tasasähkökoneen etuna on sen yksinkertainen säätö. Haittapuolina suuri huollontarve sekä monimutkainen ja painava rakenne. [6.] Kuva 2 on havainnekuva harjallisen tasasähkökoneen kommutoinnista.



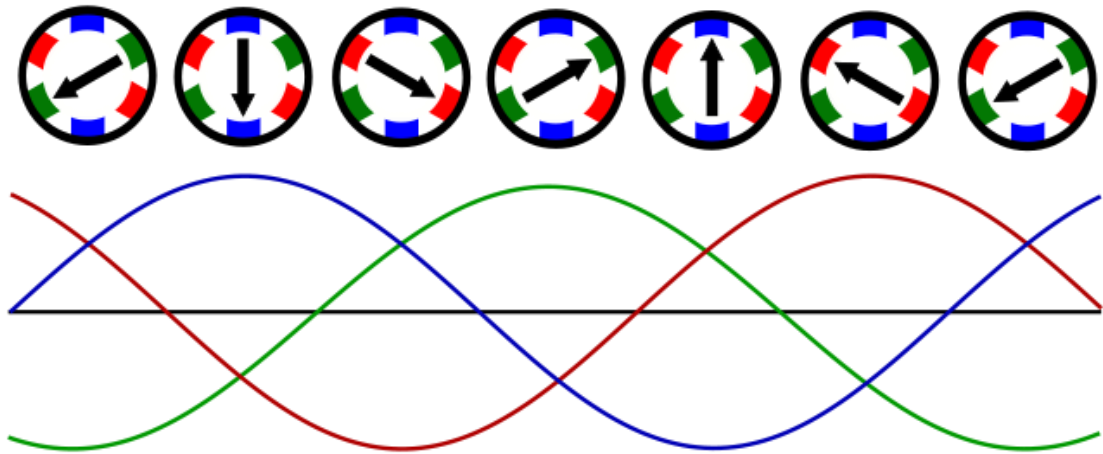
Kuva 2. Harjallisen tasasähkökoneen kommutointi esitettynä [7]

2.2.2 Harjattomat tasasähkökoneet

Nimensä mukaisesti harjattomassa tasasähkökoneessa ei ole hiiliharjoja. Roottoriin sijoitetut magneetit aiheuttavat roottorin magneettikentän käämitysten sijaan. Staattorissa on vaihekäämitykset, joihin tasasähkö syötetään. Akselilla sijaitseva Hall-paikkatietoanturi antaa ohjaukselle roottorin kulman, ja ohjaus hoitaa staattorin napaisuuden vaihtamisen. Etuna harjattomaan tasasähkökoneeseen nähden on sen vähäinen tai olematon huollon tarve ja paremmat dynaamiset ominaisuudet. Haittoina ovat koneen kalliit rakennuskustannukset ja monimutkainen ohjaus. [8.]

2.3 Kiertokenttäkoneet

Kaikkien kiertokenttäkoneiden toimintaperiaate perustuu siihen, että staattorin käämitykseen johdetaan vaihtosähköä, joka luo nimensä mukaisesti staattoria kiertävän magneettikentän. Roottorin magneettikenttä seuraa staattorin magneettikenttää ja aiheuttaa pyörivän liikkeen. Kuvassa 3 on esitetty kiertokenttäkoneen staattoria kiertävä kenttä. Roottorin magnetointitapa riippuu konetyypistä. Kiertokenttä koneet jaetaan kahteen ryhmään, epätahtikoneet ja tahtikoneet.

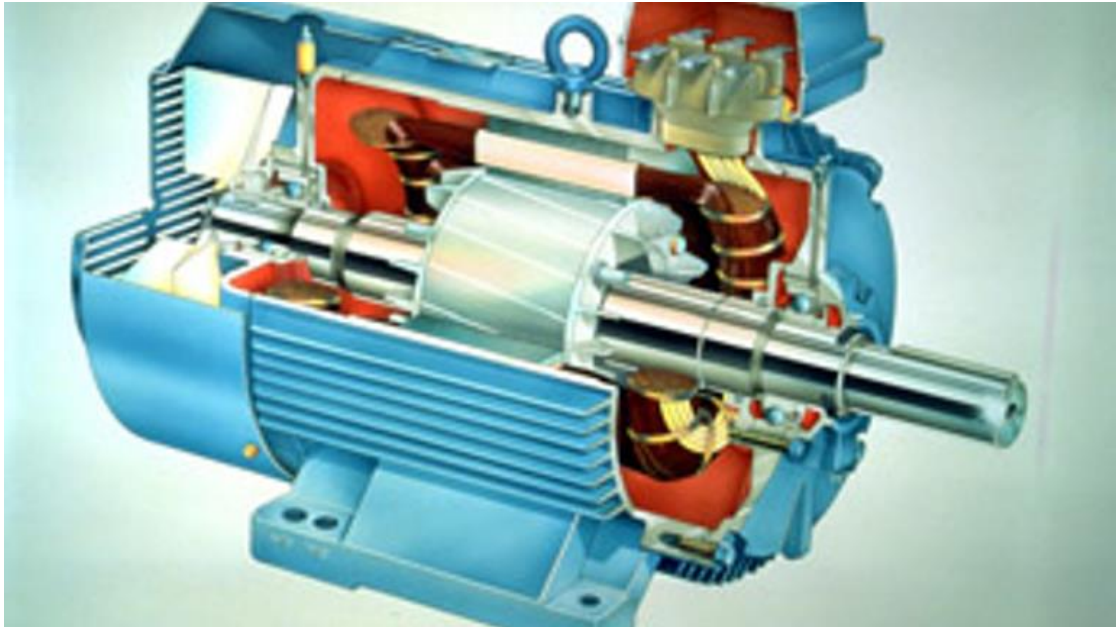


Kuva 3. 3-vaihevaihtosähkön aiheuttaman staattoria kiertävän kentän kuvaus [9]

2.4 Induktio- eli epätahtikoneet

Induktiokone on vaihtosähkökone, jonka roottori pyörii eri nopeudella eli epätahdissa staattorikäälityksen sähkökentän kanssa. Sähkökentän ja roottorin pyörimisnopeuseroa kutsutaan jättämäksi. Jättämä on tärkeässä roolissa induktiokoneen vääntömomentin tuotossa. Induktiokoneen toimiessa pienellä kuormalla jättämä on hyvin pieni. Kuorman kasvaessa myös jättämä kasvaa. Jättämää kuvataan yleensä prosentiosuutena tahtinopeudesta. Staattorin sähkökenttä indusoi roottorin sauvoihin virran, joka aiheuttaa roottoriin magneettikentän. [6.]

Induktiokone on yleisimmin käytetty konetyyppi maailmassa. Sen etuina ovat sen yksinkertainen ja kestävä rakenne ja oikein mitoitetuna hyvät ylikuormitus- ja kentänheikennys-ominaisuudet. Suurimpana haittapuolena on sen huono hyötysuhde, koska roottorin magnetisointi hoidetaan staattorilla. Tämä tarkoittaa myös sitä, että koneella on huonompi virta/vääntömomenttisuhde verrattuna esimerkiksi kestmagneettitahtikoneeseen. [10.] Kuvassa 4 on esitettynä halkaistun induktiokoneen rakenne, josta voidaan nähdä roottorin päissä sijaitsevat oikosulkurenkaat ja niissä olevat jäähdytysrivit.



Kuva 4. Induktiokoneen rakenne [11]

2.5 Tahtikoneet

Tahtikone on vaihtosähkökone, jonka roottori pyörii staattorin magneettikentän kanssa samalla nopeudella eli tahdissa. Tahtikoneet voidaan jakaa magneettinapaisiin ja reluktanssikoneisiin. Magneettinapaisia koneita ovat vierasmagnetoidut ja kestmagnetoidut koneet. Reluktanssikoneissa ei ole magneettinapoja roottorissa, vaan sen toimiminen perustuu roottoripeltien muotoiluun ja sen aiheuttamaan reluktanssieroon d - ja q -akseleiden välillä.

2.5.1 Vierasmagnetoidut tahtikoneet

Vierasmagnetoitu tahtikone voidaan tehdä harjallisena tai harjattomana. Harjallisessa tahtikoneessa magnetointiteho otetaan erillisestä tasasähkölähteestä. Magnetointivirta johdetaan roottorikäimitykselle hiiliharjojen kautta. Harjattomassa tahtikoneessa magnetointiteho otetaan akselille sijoitetusta ulkonapaisesta vaihtosähkögeneraattorista tasasuuntaamalla. Vierasmagnetoitujen tahtikoneiden etuna on niiden verkkoon tahdistuvaisuus ja mahdollisuus loistehon säätöön. Haittapuolina on suuri massa vääntömomenttiin nähden, roottorin monimutkainen rakenne ja tiheä huoltoväli verrattuna muihin kierto-kenttäkoneisiin. [8].

2.5.2 Synkronireluktanssitahkoneet

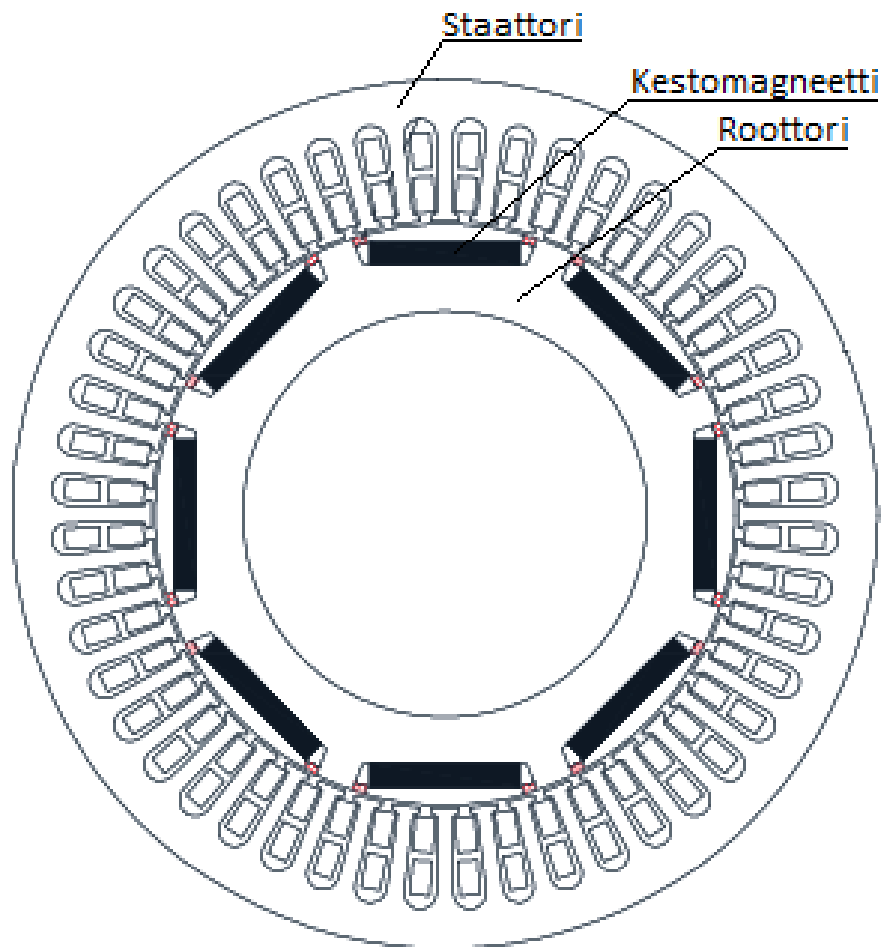
Synkronireluktanssitahkoneen roottorissa ei ole magnetointia. Roottorin napat on "uritettu" ja näiden urien väliset vuoretit sallivat staattorin magneettikentän kulkemisen roottorin napojen läpi. Kuvasta 5 voi nähdä roottorissa olevat urat, joilla pitkittäis- ja poikittasakselien välinen reluktanssiero saadaan aikaiseksi. Konetyypin etuina ovat halpa ja kestävä rakenne. Haittapuolena pienempi tehotiheys kestmagneettitahkoneeseen verrattuna. [12.]



Kuva 5. Synkronireluktanssitahkone [13]

2.5.3 Kestomagneettitahkoneet

Kestomagneettitahkoneessa roottorin magneettikenttä luodaan nimensä mukaisesti kestmagneeteilla. Kestomagneettitahkoneen etuna on sen yksinkertainen roottorirakenne, suuri tehotiheys, roottorista puuttuvat magnetointihäviöt sekä käämityn roottorin virtalämpöhäviöt. Haittapuolina on magnetoinnin säätämättömyys ja kalliit rakennus- ja materiaalikustannukset. Kuvassa 6 on esitettyä kestmagneettitahkone roottorin uriin upotetuilla magneeteilla.



Kuva 6. Yksinkertainen kestopagneettikoneen rakenne roottorin uriin upotetuilla magneeteilla [14]

2.6 Konetyypin valinta ja perustelu

Konetyypiksi valittiin kestopagneettitahtikone sen suurimman tehotehyyden, hyvien dynaamisten ominaisuuksien ja hyötysuhteen ja pienten häviöiden takia [12]. Oikein suunniteltuna koneesta saadaan pienempi ja kevyempi, mutta silti tehokas. Koska tässä opinnäytetyössä ei tarvitse ottaa huomioon rakennus- tai materiaalikustannuksia, on tämä konetyyppi paras valinta.

3 SUPERKART-SARJA

Kansainvälinen karting komissio (International Karting Commission) on yksi FIA:n (Fédération Internationale de l'Automobile) alla toimivista autourheilua säännöstelevistä komissioista. CIK-FIA:n tehtävänä on kehittää, edistää, koodinoida ja säädellä kartingiin liittyviä toimia ympäri maailmaa. [15.] Superkart-sarja on yksi CIK-FIA:n alla toimivista kilpailusarjoista. Superkarteilla ajetaan täysikokoisilla kilpa-autoradoilla, joilla autojen nopeus nousee jopa 250 kilometrin tuntivauhtiin ja yhden kilpailun keskimääräinen pituus on 15 minuuttia.

Autot ovat tarkasti säädetyjä, ja niiden tekniset rajoitukset ovat tarkkaan määriteltä karting-säännöksissä. Superkart-auto on maalla ajettava, yksipaikkainen kilpa-ajoneuvo ilman kattoa, ohjaamoja ja jousitusta. Superkartissa saa olla korinosia, tai se voi olla paljasrunkoinen. Siinä on neljä rengasta, joiden pitää koskettaa maahan superkartin ollessa paikallaan. Edessä olevat renkaat ohjaavat suunnan ja takana olevat ovat kiinnitettynä yhteen jäykkään akseliin ja hoitavat voiman välittämisen maahan. [16.] Kuvassa 7 on Superkart-auto Peter Elkmannin ajamana.



Kuva 7. Superkart-auto. Kuvassa Peter Elkmann (Saksa), 2018 FIA Karting European Superkart Championship, Le Mans, Ranska [17]

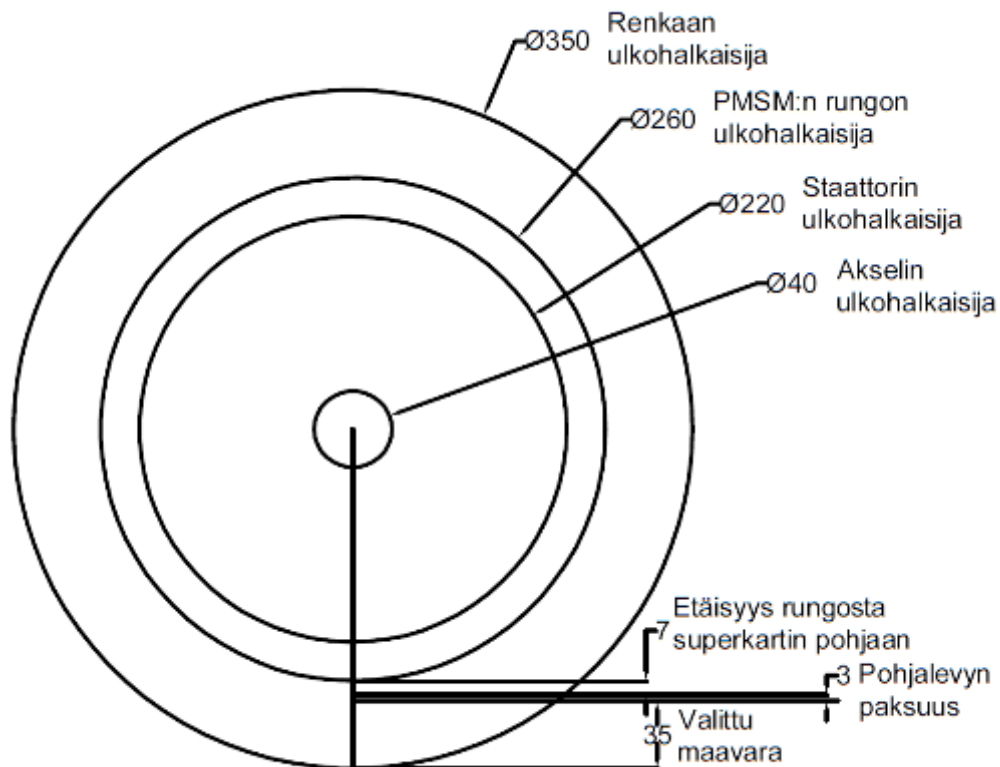
3.1 Reunaehdot

Reunaehdot tarkoittavat työtä tai ongelmaa rajoittavia tekijöitä tai säännöksiä. Työn tai ongelman ratkaisut täytyy siis suorittaa tiettyjen ennalta annettujen tai havaittujen rajoitusten eli reunaehtojen sisällä. Ensimmäiset reunaehdot määrittyvät CIK-FIA:n asettamien säännösten kautta ja määrittävät koneen suurimman mahdollisen koon ja myös hyväksyttävän massan, jotta auton massa säilyy hyväksyttävissä rajoissa, ajo-ominaisuudet säilyisivät ja autosta tulisi kilpailukykyinen. Reunaehdot esiintyvät myös koneen sähköisen laskennan puolella.

3.1.1 Ulkomitat

Koneen suurin mahdollinen halkaisija rajoittuu superkartin taka-akselin korkeudesta. Akselin laakerointipisteet ja pakollinen takajarrulevy rajoittavat taas koneen suurimman mahdollisen pituuden. Superkartin akselivälin pitää olla 1060 – 1270 mm välillä ja raidevälin vähintään $\frac{2}{3}$ akselivälin pituudesta. Kokonaisleveys saa olla enintään 1400 mm. Maavaran pitää olla 65 ja 25 mm välillä. Mikään superkartin osa ei saa tulla näiden rajoitusten ulkopuolelle. Takaylitys akselista mitattuna saa olla enintään 400 mm. Superkartin pohjalevyn pitää olla valmistettu yhdestä jäykästä kappaleesta, ja sen täytyy päättyä rungon ulommaisiin putkiin asti. Takarenkien suurin sallittu ulkohalkaisija on 350 mm. Superkartin massan täytyy olla vähintään 218 kg kuljettajan kanssa. [16.]

Kuvassa 8 on esitettyinä valitut ulkomitat (mm) koneelle. Rungon säteittäinen paksuus on 20 mm nestejäähdytysvaipan takia ja turvallinen ulkohalkaisija 260 mm. Maavara kasvatettiin 35 millimetriin 25 millimetrin minimimitasta turvallisuussyistä, jotta mahdollisen maakosketuksen sattuessa kone ei vaurioidu. Pohjalevyn ja rungon väliin jää 7 mm, kun pohja valmistetaan 3 mm paksumasta hiilikuidusta. Koneen staattorin suurimmaksi ulkohalkaisijaksi saadaan 220 mm, jotta voidaan maksimoida vääntömomentin tuotto ja roottorin pienimmäksi sisähalkaisijaksi 40 mm, koska säännökset vaativat 40 millimetrin akselipaksuuden. Koneen aktiiviosan pituudeksi asetettiin 350 mm. Vyyhdenpäiden ja rungon kanssa kokonaispituudeksi tuli 500 mm. Tämän pituuden rajoittaa pakollinen jarrukokoonpano ja taka-akselin laakerointiväli.



Kuva 8. PMSM:n valitut ulkomitat

3.1.2 Suorituskykyvaatimukset

Kansainvälisessä Superkart-sarjassa käytetään joko 250 cm³ 2-tahti- tai 450 cm³ 4-tahtimoottoreita [15]. Vertailukohteeksi valittiin 250 cm³ 2-tahtimoottori sen suuremman suosion takia. Superkart-autojen moottoreita valmistavan PVP Kartingin 250 cm³ PVP motor 252 tuottaa 100 hp ja 60 Nm kierrosnopeudella 14 000 rpm [18]. Moottorin välittämä huippuvääntömomentti ensimmäisellä vaihteella taka-akselille voidaan laskea, kun tiedetään kampiakselin ja vaihteiston ensiöakselin, vaihteiston ensiöakselin ja toisioakselin sekä vaihteiston toisioakselin ja taka-akselin välityssuhteet. Kyseiset välityssuhteet ovat edellä mainitussa järjestyksessä: 2.2308, 2.6666 ja 0.7742 [18].

$$T_{\text{taka-akseli}} = T_{\text{moottori}} \times \text{kokonaisvälityssuhde} \quad (1)$$

Jotta suunnitellusta sähkökoneesta tulisi kilpailukykyinen, pitäisi sen tuottaa vähintään 276.3 Nm 100 kilometrin tuntinopeudessa, joka vastaa 250 cm³ moottorin 1. vaihteen huippunopeutta. Koneen nimellispiste kannattaa laskea

tämän yläpuolelle, koska magneettien lämmitessä koneen tuottama vääntömomentti pienenee hieman. Nimellispisteeksi valitaan 125 km/h, joka vastaa 350 mm halkaisijalla olevalla renkaalla 1896 rpm. Koneen täytyy myös pystyä 2-kertaiseen ylinopeuteen, eli 3792 rpm, jotta saavutetaan haluttu 250 km/h huippunopeus.

Samsung INR18650-30Q Li-ion-kennoja käyttämällä pystytään Suunnittelemaan energiavarasto, jonka liitinjännitteeksi saatiin 302,4 V (352,8–210 V) ja jatkuvaa purkuvirtaa 168 A. Kennoja on 84 kappaletta sarjassa, ja näitä paketteja 14 rinnakkain. Energiavaraston kennojen määräksi tuli 1176 kpl ja kokonaispainoksi 52,9 kg. [19.] Energiavaraston mitoituksessa otettiin huomioon suunnitellun koneen jännite- ja virtavaatimukset sekä kilpailujen kesto, jotta energiavarasto on riittävä. Energiavarasto massa yritettiin pitää mahdollisimman pienenä, jotta kilpa-ajoneuvon kokonaismassa ei kasvaisi liikaa.

4 SÄHKÖKONEEN MALLINTAMINEN

Sähkökoneen mallintaminen ja sähkömagneettinen laskenta toteutetaan käyttäen Cedratin Flux2D-ohjelmaa. Flux2D on FEM-laskentaan perustuva tietokoneohjelma. FEM-laskenta on numeraalinen tapa ratkaista vaativia differentiaaliyhtälöitä, joille on määrätty kaksi tai useampia reunaehtoja. Ongelman ratkaisussa FEM jakaa ratkaistavan ongelman useampaan pienempään helpommin ratkaistavaan ongelmaan (finite elements). Tämä suoritetaan verkottamalla alue, jolle on etukäteen määritellyt ominaisuudet ja reunaehdot. Pienempi helpommin ratkaistava ongelma syntyy verkotuksen solmupisteiden välille. Jokainen solmupisteiden väli käsitellään erillisenä ongelmana ja summataan lopulliseen tulokseen. Tällä tavoin saadaan ratkaistua alkuperäinen paljon monimutkaisempi ongelma. Verkotusta tihentämällä saadaan tarkempia ratkaisuja, mutta laskenta-aika kasvaa huomattavasti. FEM-laskentaa voidaan käyttää useilla eri tieteen aloilla, kuten esimerkiksi lämpötekniikassa, mekaanisten rakenteiden analysoimisessa ja sähkömagnetismissä. [20.]

4.1 Käämitys ja roottori

Monivaiheisen sähkökoneen käämitys voidaan toteuttaa joko kokovakokäämityksenä tai murtovakokäämityksenä. Kokovakokäämityksellä tarkoitetaan käämistystä, jossa staattorin uraluku on jaollinen napa- ja vaiheluvuilla, tällöin vakoluku on aina kokonaisluku. Kokovakokäämityksessä koneen päissä vyyhdet joutuvat väistämään toisiaan, jolloin vyyhden päästä tulee helposti pitkä. Murtovakokäämityksellä tarkoitetaan käämistystä, jossa vakoluku poikkeaa kokonaisluvusta. Murtovakokäämityksen etuja perinteiseen kokovakokäämitykseen verrattuna ovat sen lyhyemmät vyyhdenpäät ja oikein suunniteltuna pieni vääntömomenttiväre. Tyypillisen murtovakokäämityksen murtoluku on alle 0,5, jolloin käämitys voidaan toteuttaa napakäämityksenä. Napakäämityksessä käämivyyhti kiertää yhden staattorinhampaan ympäri. Taulukossa 1 ja 2 on esitettyä erilaisia uraluku-napapariluku-yhdistelmiä. Murtovakokäämitys voidaan toteuttaa myös yli 0,5 murtoluvulla, joka on kompromissi kokovakokäämityksen ja murtovakokäämityksen väliltä. Tällöin vyyhden päästä tulee osittain limittäinen, mutta silti lyhyempi, kuin kokonaisluvulla olevilla käämistyksillä.

Taulukko 1. Yksikerrosmurtovakokäämistysten käämistyskertoimet eri uraluku-napapariluvuille [21]

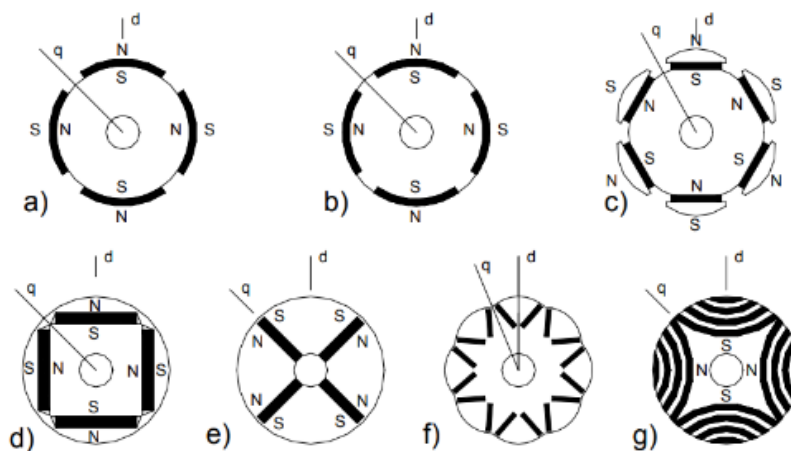
Uraluku Q	Napapariluku 2p									
	4	6	8	10	12	14	16	20	22	26
6	0,866		0,866							
9		0,866	0,960	0,960						
12			0,866	0,966		0,966	0,866			
15				0,866		0,957	0,957			
18					0,866	0,844	0,960			
21		$q > 0,5$				0,866				
24							0,866	0,966	0,958	0,958

Taulukko 2. Kaksikerrosmurtovakokäämistysten käämistyskertoimet eri uraluku-napapariluvuille [21]

Uraluku Q	Napapariluku 2p																
	4	6	8	10	12	14	16	20	22	24	26	28	30	32	34	42	
6	0,866		0,866	0,500	0,500	0,866	0,866	0,500	0,500	0,866	0,866	0,500	0,866	0,500			
9		0,866	0,945*	0,945*	0,866	0,617	0,328	0,328	0,617	0,866	0,949	0,949	0,866	0,617	0,328	0,866	
12			0,866	0,933	0,933	0,866		0,250	0,25				0,866	0,933			
15				0,866	0,951*	0,951*	0,866	0,866	0,621	0,39							
18					0,866	0,902	0,945	0,945	0,902	0,866	0,647						
21						0,866	0,890	0,953*	0,953*	0,89	0,866						
24							0,866	0,933	0,949	0,949	0,933		0,866	0,760			
27								0,877	0,915	0,945	0,954	0,954	0,945	0,915	0,877		
30									0,866	0,874	0,936	0,951	0,951	0,936			
33			$q > 0,5$							0,866	0,903	0,928	0,954	0,945			
36											0,866	0,867	0,902	0,933	0,945	0,953	0,933

Staattorin käämityksessä päädyttiin murtovakokäämitykseen. Valittu murtovakokäämitys on 10/24-murtovakokäämitys. 10/24 on paranneltu versio 10/12:sta. 10/24-murtovakokäämityksellä saadaan pienennettyä vääntömomentin tuotolle haitallisia harmonisia komponentteja verrattuna 10/12-murtovakokäämitykseen, jolloin vääntömomenttiväre pienenee entisestään. Haitta puolena on sen hieman limitetyt vyyhdenpäät. Lyhyet vyyhdenpäät auttavat saavuttamaan pienemmän koon ja massan. [22.]

Kestomagneettisähkökoneen roottorin voi suunnitella monella eri tavalla. Magneettien sijaintia ja suuntausta muuttamalla voidaan vaikuttaa tarvittavan magneettimateriaalin määrään. Kuvassa 8 on esitettyä seitsemän erilaista kestopagneettirottorimallia. Tässä työssä päädyttiin käyttämään radiaalisuuntaan asennettuja magneetteja. Tällä periaatteella voidaan minimoida magneettivuon oikosulkeutuminen magneetinnapojen välillä ja jotta magneettien tuottama vuo voitaisiin hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti [23]. Vaikka pinta-magneeteilla varustetulla roottorilla saavutetaan samat edut, aiheuttaa magneettien kiinnitys mekaanisia ja magneettien alttius harmonisille komponenteille magneettisia ongelmia roottorissa. Roottorin laminaatit kiinnitetään alumiiniseen roottoriholkkiin magneettisesti johtamattomilla lohenpyrstökiiloilla, ja eri magneetinnapojen roottorilaminaatit eivät kosketa toisiaan ilmävälin puolella.



Kuva 9. Erilaisia kestopagneettisähkökoneen roottorimalleja. a) pintamagneetti, b) upotettu magneetti, c) napakenkä, d) uraan asennettu magneetti, e) radiaalisuuntaan asennettu magneetti, f) v-magneetti ja g) kestopagneetti avustettu synkronireluktanssikoneen roottori [24]

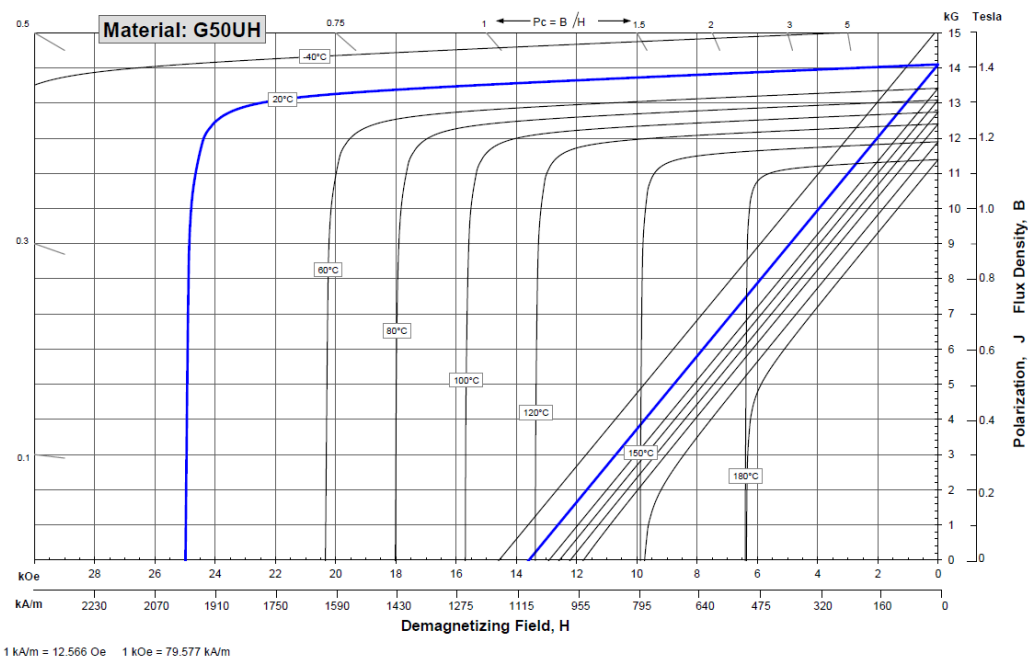
4.2 Materiaalit

Koneen käämitysmateriaaliksi valittiin kupari sen paremman sähkönjohtavuuden vuoksi verrattuna alumiiniin. Käämintälankana käytetään pyörölankaa. Laskennan perusteella optimaalinen langan paksuus uran geometrialla on 0,9 mm, jolla saavutettiin täytetektoimeksi 0,61 (ks. liite 1). Laskennan apuna käytettiin Dahrentradin DAMID 200-pyörölangan teknisiä tietoja (ks. liite 2) ja yleisesti hyväksi todettuja laskentatapoja. Flux2D:n piirimalliin vaiheresistanssin arvoksi laskettiin 80-asteiselle käämitykselle 42,8 mΩ (ks. liite 1), kun vaiheen käämikierroksen poikkipinta-ala on 33,1 mm². Käämityksen kokonaismassaksi tuli 30,2 kg.

Staattorissa ja roottorissa käytetään magneettivuon kuljettamiseen yleensä sähköpeltiä. Sähköpelliksi tähän koneeseen valittiin Vacuumschmelzen Vacoflux 50 -kobolttirauta. Kyseinen sähköpeltili valikoitui parhaaksi vaihtoehdoksi sen korkean magneettisen saturoitumispisteen ja vähäisten rautahäviöiden vuoksi normaalisti käytetyn piiseostetunraudan sijaan. Vacoflux 50:n magneettinen saturoitumispiste on 2,35 T, kun taas esimerkiksi piiseostetulla M270-50-sähköpellillä se on 1,75 T. Suunniteltavan koneen suhteellisen korkean sähkötaajuuden takia Vacoflux 50:n pienemmät rautahäviöt ovat myös suotavat (ks. liitteet 3, 4). Roottorin ja staattorin sähköpeltien kokonaismassaksi tuli 64,8 kg.

Tänä päivänä kestopagnetoiduissa sähkökoneissa käytetään pääasiassa kahta eri kestopagneettimateriaalia, toinen on samarium-koboltti (SmCo) ja toinen neodyymi-rauta-boori (NdFeB). Kestomagneettimateriaaleilla on kaksi parametria, jotka määrittelevät sen kestopagneettiominaisuudet, remanenssi- vuontiheys ja koersiivivoima ja näitä kuvataan BH-käyrällä. Remanenssi- vuontiheys kertoo kestopagneetin voimakkuuden ja koersiivivoima lämmön ja vastakkaisen magneettikenttien sietokyvyn. SmCo-kestopagneetteja käytetään pääasiassa vain, kun tarvitaan korkeita (200+ °C) lämpötiloja kestäviä kestopagneetteja. NdFeB-kestopagneetteja käytetään yleisemmin sen suuremman remanenssi- vuontiheyden ja halvemman hinnan takia. Kestomagneettimateriaaliksi valittiin NdFeB G50UH. G50UH magneetin korkea magneettivuon- ja energiatiheys sekä korkea lämpöluokka auttavat saavuttamaan vaaditut suorituskykyvaatimukset. Kuvassa 10 on esitetty lämpötilariippuvat BH-

käyrät Arnold Magnetic Technologies:in valmistamista G50UH-magneeteista. Kuvasta selviää, miten magneetin tuottama vuo on riippuvainen lämpötilasta. Käytettävän magneettimateriaalin kokonaismassaksi tuli 6,1 kg.



Kuva 10. G50UH:n magneettiset ominaisuudet [25]

4.3 Geometria

Staattorin ulkohalkaisijaksi laskentaan valittiin 219 mm. Yhden millimetrin pienennys alkuperäisestä 220 mm:stä johtuu laminaattipakan valmistusmenetelmästä. Pakka hitsataan kasaan staattoriselän puolelta, ja se aiheuttaa sähköisiä oikosulkuja peltien välille sekä pienentää vuoreitin pinta-alaa. Nämä oikosulkualueet aiheuttavat pyörrevirtoja, jotka lämmittävät staattorin selkää.

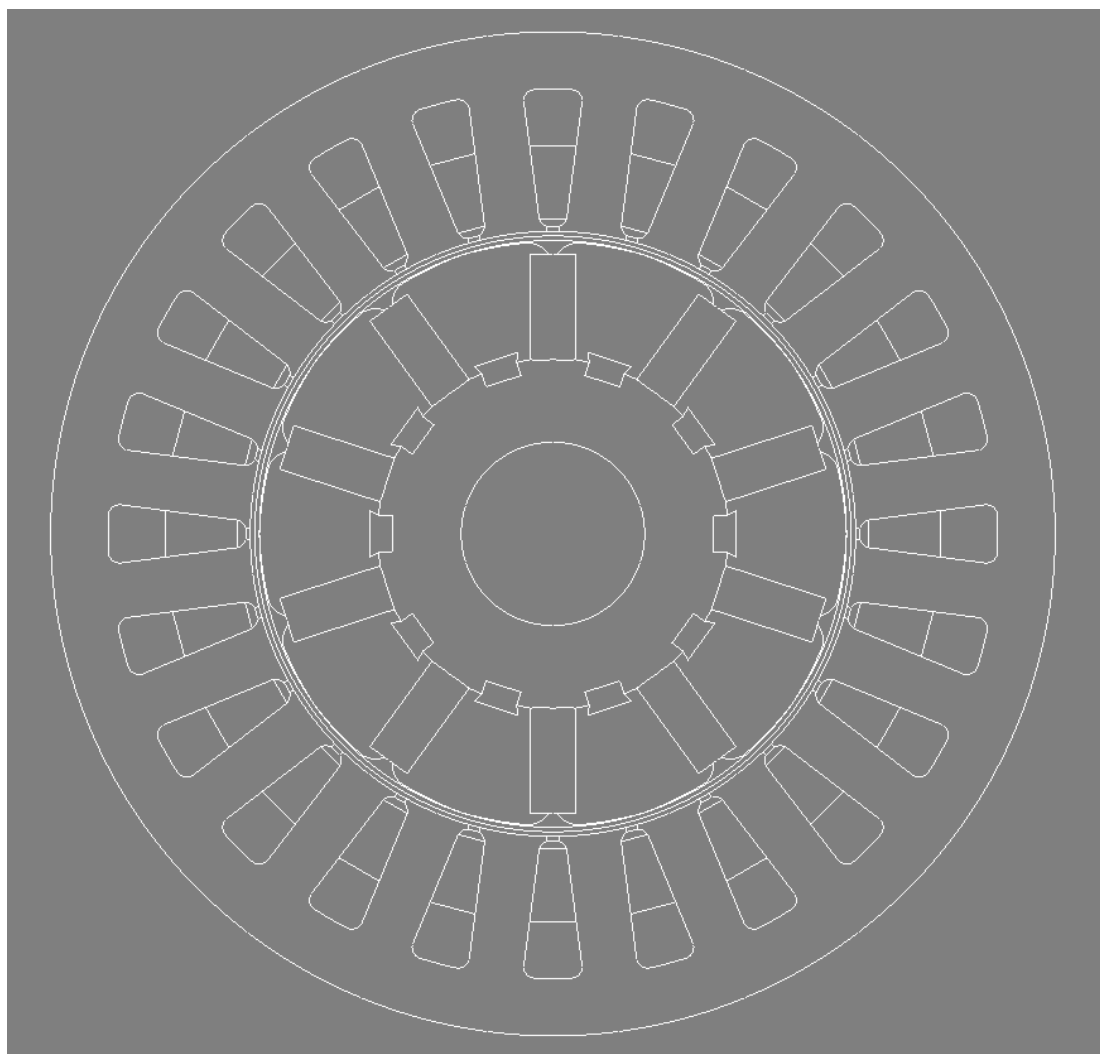
Staattorin hampaan ja selän tärkein tehtävä on toimia kulkureittinä magneettivuolle ja magneettivuon tiheys niissä, määrittää hampaan minimileveyden ja selän minimipaksuuden. Hampaan leveydessä päädyttiin 12 mm:iin ja selän paksuudessa 12,5 mm:iin. Vuontiheydet hampaassa ja selässä jätettiin tarkoituksella huomattavasti alle magneettisen saturoitumispisteen, jotta äkillisen vääntömomentitarpeen tullen vuota voidaan kasvattaa. Vuovara mahdollistaa myös halvemmän sähköpellin käyttämisen kyseisellä rakenteella, jos kustannukset ovat tarpeellista ottaa huomioon. Sähköpellin suuri magneettinen kuormitus kasvattaa myös pellissä tapahtuvia rautahäviöitä merkittävästi.

Ilmavälin tarkoituksena on luoda mekaaninen erotus staattorin ja roottorin välille sekä mahdollistaa roottorin vapaa pyöriminen. Ilmavälin pituudeksi valittiin 2 mm, joka tämän kokoluokan koneessa on suhteellisen suuri. Tämä johtuu koneen korkeasta syöttötaajuudesta. Ilmavälin pienentäminen aiheuttaisi ilmavälivuon harmonisten amplitudien kasvamista, joka johtaisi suuriin pintahäviöihin roottorissa ja magneettien mahdolliseen demagnetoitumiseen. Suuret pintahäviöt roottorissa kuumentavat roottoria ja vaativat jäähdytykseltä enemmän. [23.]

Roottorin ulkohalkaisijaksi määräytyi 128 mm, sisähalkaisijaksi valittiin 76 mm. Näillä mitoilla mahdollistettiin tarvittavan magneettimateriaalin mahtuminen roottoriin sekä saatiin roottorin vuolle riittävästi tilaa vääntömomentin maksimoimiseksi. Roottoria saadaan kevyemmäksi, kun kaikki alue, mitä ei tarvita magneettivuon kuljettamiseen, korvataan alumiinisella roottoriholkilla. Taulukossa 3 on esitetty koneen tärkeimmät geometria parametrit ja kuvassa 11 koneen lopullinen geometria.

Taulukko 3. Koneen mitat

Selite	Arvo	Yksikkö
staattorin ulkohalkaisija	219	mm
staattoriselän paksuus	12,5	mm
hampaan leveys	12	mm
hampaan korkeus	31	mm
staattorin sisähalkaisija	132	mm
ilmavälin pituus	2	mm
roottorin ulkohalkaisija	128	mm
roottorin sisähalkaisija	76	mm
magneetin paksuus	10	mm
magneetin leveys	23	mm
uran pinta-ala	271	mm ²



Kuva 11. Koneen lopullinen geometriamalli

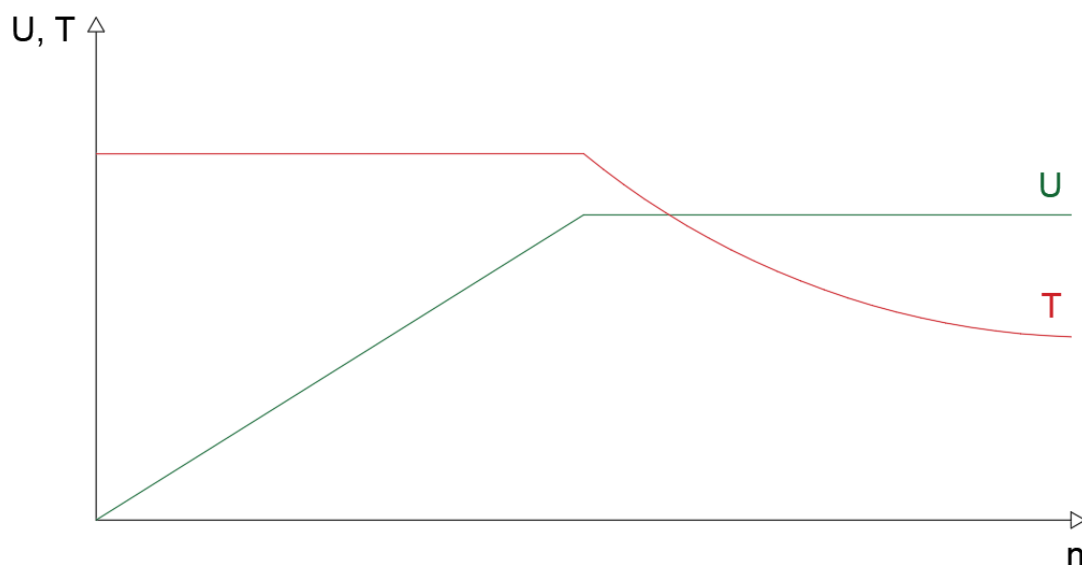
5 SÄHKÖMAGNEETTINEN LASKENTA

Koneen sähkömagneettisella laskennalla selvitetään koneen ominaisuudet ja se, täyttääkö kone sille asetetut vaatimukset. Laskentakokonaisuus koostuu monesta eri osasta, ja tässä kappaleessa käydään läpi eri laskentavaiheet, laskennassa käytetyt piirimallit ja laskentojen tulokset.

5.1 Vastajännite

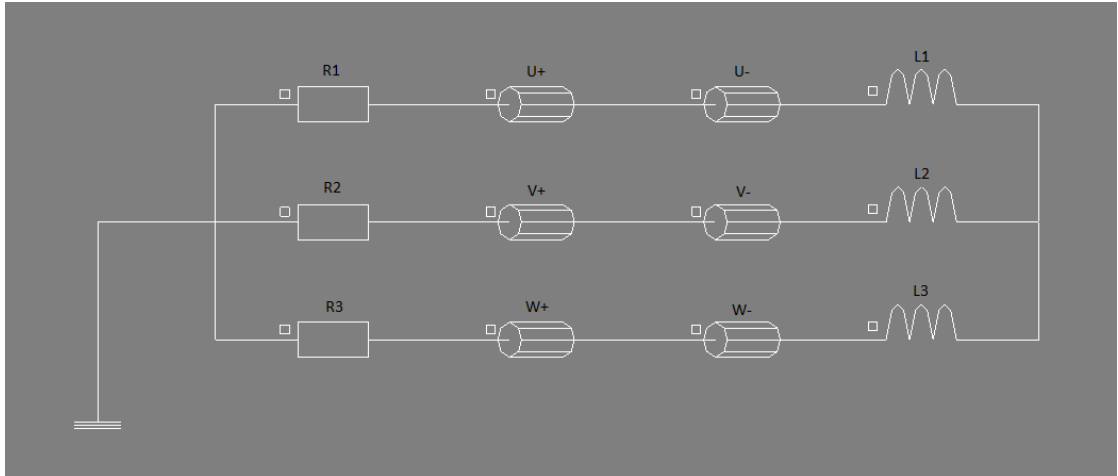
Vastajännite on magneettien käämitykseen indusoima jännite, joka on suoraan taajuuteen verrannollinen. Vastajännite on riippuvainen magneettimateriaalin aikaansaamasta vuontiheydestä, joka läpäisee käämin. Vuontiheyteen vaikuttaa magneettien lisäksi magneettipiirin reluktanssi, jossa tärkein vaikuttava tekijä on ilmapälin pituus. Lisäksi jännite on suoraan verrannollinen teholliseen käämikierrosmäärään. Näiden kahden tekijän avulla vastajännite

voidaan säätää halutulle tasolle. Kuvassa 12 havainnoidaan, miten vääntömomentti ja jännite käyttäytyvät pyörimisnopeuden funktiona. Tässä työssä koneen vastajännite säädettiin siten, että kone toimii kentänheikennysalueella nimellisteholla vasta yli nimellisnopeuden. Kentänheikennyksellä tarkoitetaan tilannetta, jolloin koneeseen syötettävää jännitettä ei kyetä nostamaan ja pyörimisnopeuden lisääminen toteutetaan nostamalla syöttötaajuutta. Tällöin kone on tyypillisesti alimagnetoitu.



Kuva 12. Vääntömomentin T ja jännitteen U käyttäytyminen pyörimisnopeuden funktiona

Vastajännitettä säätämällä optimoidaan myös taajuusmuuttajalta otettava maksimi virta. Koneen vastajännitteeksi säädettiin $E = 223,5 \text{ V}$, jolloin jännitteiden suhde $E/U = 0,806$. Kuvassa 13 on vastajännitteen laskennassa käytetty piirimalli. Siinä on vastukset $R1$ - $R3$, jotka vastaavat koneen havainnoimaa kuormaa, käänitykset $U+$, $U-$, $V+$, $V-$, $W+$ ja $W-$ ja kääminpäiden hajainduktanssit $L1$ - $L3$.



Kuva 13. Flux2D:ssä vastajännitteen laskennassa käytetty piirimalli

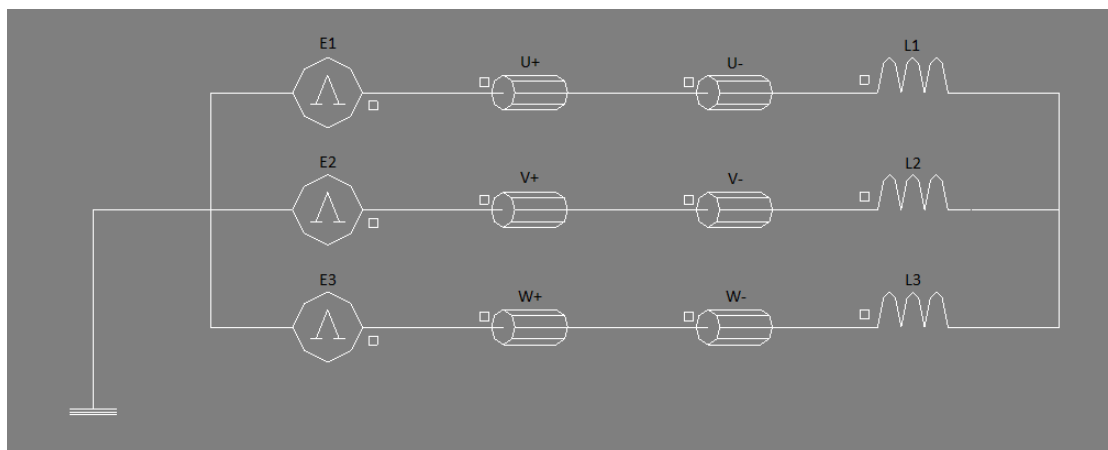
Kääminpäiden hajainduktanssit on laskettu käyttäen yhtälöitä 2 ja 3.

$$X_{\sigma} = \frac{4m}{Q} qN^2 \omega \mu_0 l_s \lambda_s \quad (2)$$

$$L_{\sigma} = \frac{X_{\sigma}}{\omega} \quad (3)$$

5.2 Jännitemalli

Jännitemallilla voidaan laskea koneen toiminta eri nopeuksilla. Laskennassa koneen käämityksiin ajetaan sinimuotoista nimellisjännitettä. Ohjelma laskee sille asetetuilla parametreilla tietyn ajanjakson halutulla pyörimisnopeudella. Jännitemallilla saadaan koneen tuottama sähköinen vääntömomentti, koneen ottama virta, teho ja kuparihäviöt. Mallista saadaan lisäksi selville vuontiheydet roottorissa, ilmavälissä ja staattorissa sekä se, kulkeeko staattorin käämiurissa kuinka paljon hajavuota. Jännitemallilla laskettaessa muutetaan piirimallissa vastuksien tilalle jännitelähteet, jotka syöttävät koneelle sinimuotoista jännitettä. Kuvassa 14 nähdään jännitemallissa käytetty piirimalli. Piirimallissa komponentit E1-E3 ovat jännitelähteitä.



Kuva 14. Flux2D:ssä jännitemallin laskennassa käytetty piirimalli

Koneen toimintapisteet lasketaan $0,25 \times n$, $0,5 \times n$, $0,75 \times n$, ... $2 \times n$ pyörimisnopeuksilla, jolloin saadaan koneen toiminta riittävän hyvin havainnollistettua. Laskenta suoritetaan 10 sähköjakson ajan, jolloin jännitemalli kerkeää tasoitua riittävästi tuloksia varten. Taulukossa 4 on esitetty jännitemallissa käytetyt parametrit. Koneita ajetaan nimellispyörimisnopeuteen vakio U/f -suhteella ja siitä eteenpäin kaksinkertaiseen pyörimisnopeuteen vakio jännitteellä, taajuuden noustessa suoraan verrannollisesti pyörimisnopeuteen nähden.

Taulukko 4. Jännitemallissa käytetyt parametrit

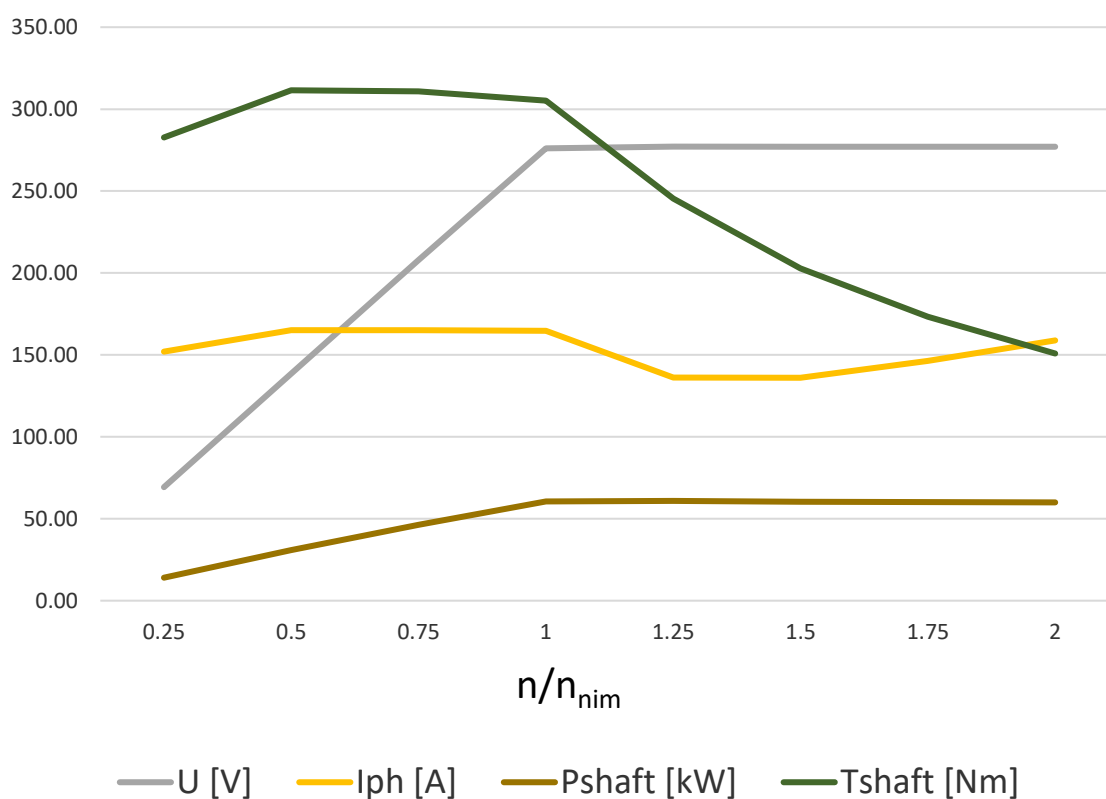
Selite	Tunnus	Arvo	Yksikkö
Vaihejännite	U_{ph}	40-160	V
Syöttötaajuus	f	39,5-316	Hz
Pyörimisnopeus	n	474-3792	rpm
Teholliset käämikierrokset	N	20	
Vaiheresistanssi	$R_{ph} @ 80^{\circ}C$	42,82	$m\Omega$
Kääminpään hajainduktanssi	L_{σ}	41,18	μH

Kuvassa 15 voidaan nähdä koneen tärkeimmät suorituskyvyn parametrit pyörimisnopeuden funktiona. Laskennassa ei ole käytetty IR-kompensaatiota pienemmillä pyörimisnopeuksilla, ja tästä johtuu kuvassa näkyvä alhaisempi vääntömomentti (vihreä) käyrän alussa. IR-kompensaatiolla pyritään kumoamaan käämityksen resistanssin suuri vaikutus alhaisilla taajuuksilla. Tällöin virta ja vääntömomentti pysyvät vakioina. Koneen ottama virta (keltainen) taajuusmuuttajalta on optimoitu, jolloin nimellispisteen virta ja virta suurimmalla pyörimisnopeudella on sama. Otettava maksimi vaihevirta nimelliskuormalla

on $I_{ph} = 165$ A, jolloin virrantiheydeksi saatiin $4,99$ A/mm². Kone jäähtyy vesi-vaippajäähdytyksellä hyvin. Taulukossa 5 on esitettyä tyypilliset kestopagneettitahtikoneiden virrantiheydet jäähdytystavan mukaan. Voidaan huomata, että laskettu virrantiheys jää huomattavasti alle tyypillisen laskenta-arvon.

Taulukko 5. Tyypilliset kestopagneettitahtikoneen virrantiheydet jäähdytystavan mukaan [26]

Cooling type	Current density, [A/mm ²]
Convection air cooling	2–4
Forced air cooling	4–8
Water stator jacket	6–14
Direct in-wire armature cooling	10–25
Direct immersion and spray liquid cooling	8–28



Kuva 15. Suorituskyky pyörimisnopeuden funktiona

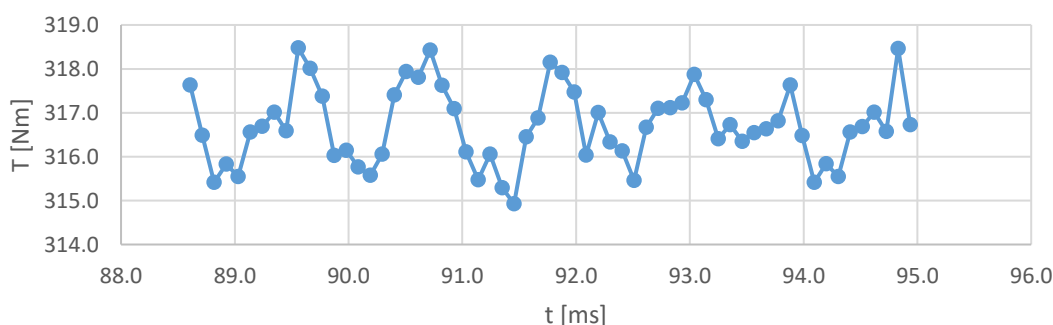
Kone tuottaa 304,52 Nm vääntömomenttia aina nimellispisteeseen asti ja 150,52 Nm suurimmalla nopeudella. Koneesta voidaan hetkellisesti ottaa 660 Nm vääntömomenttia, jolla voidaan kompensoida mahdollista lisääntyneitä massaa. Taulukossa 6 on esitettyä koneen laskennasta saadut nimellisarvot.

Taulukko 6. Koneen laskennasta saadut nimellisarvot

Nimellisarvot			
Selite	Tunnus	arvo	yksikkö
Akseliteho	P_{shaft}	60,46	kW
Pääjännite	U	277	V
Virta	I	165	A
Syöttötaajuus	f	158	Hz
Akselivääntömomentti	T_{shaft}	304,52	Nm
Pyörimisnopeus	n	1896	rpm
Toiminta-alueen maksimi pyörimisnopeus	n_{max}	3792	rpm
Tehokerroin	$\cos\phi$	0,83	
Sähköinen hyötysuhde	η_{el}	92,13	%

5.3 Vääntömomenttiväre

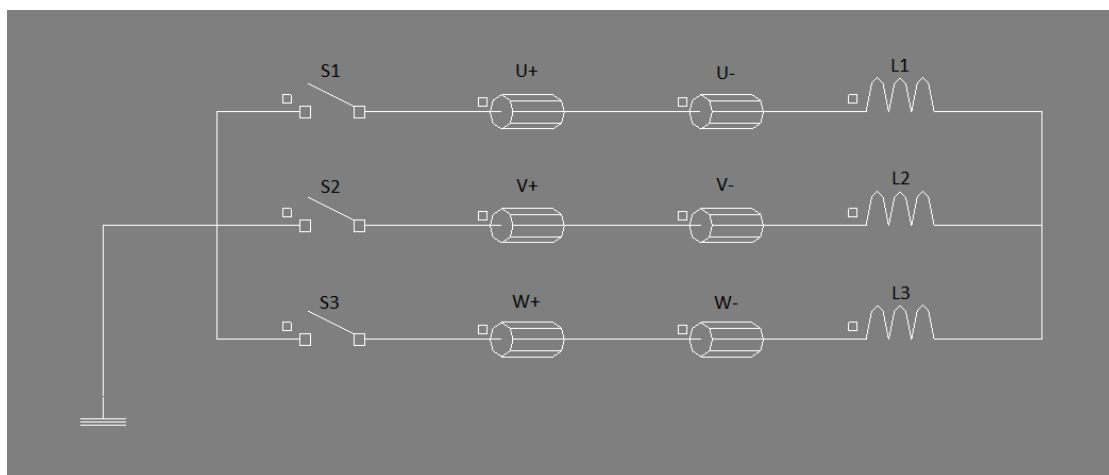
Vääntömomenttiväre (T_{ripple}) koostuu kahdesta komponentista, joista toinen johtuu koneen rakenteesta ja toinen järjestelmän epäideaalisuuksista. Vääntömomenttiväreen merkittävin komponentti (T_{cogging}) pystytään laskemaan koneen geometrian perusteella. Tämä johtuu koneen käämityksestä, urituksesta ja ilmaväligeometriasta. Ne yhdessä aiheuttavat ilmavälivuontiheyteen sini-muodosta poikkeavia komponentteja. Loppuosa vääntömomenttiväreestä koostuu järjestelmän epäideaalisuuksista, kuten epätasapainosta, kuormituksen vaihtelusta ja laakeroinnin kitkojen vaihteluista. Näiden mallintaminen konetta suunnitellessa on mahdotonta, koska niitä ei yleensä tunneta tässä vaiheessa. Koneen vääntömomenttiväre T_{ripple} ilmaistaan prosenttiosuutena koneen kokonaisvääntömomentista, ja se saatiin jännitemallilaskennasta. Kuvassa 15 on esitetty vääntömomenttiväre yhden sähköjakson ajalta. Lasketun vääntömomenttiväreen arvoksi (peak-to-peak) saatiin 3,5 Nm, joka vastaa noin prosenttia kokonaisvääntömomentista.



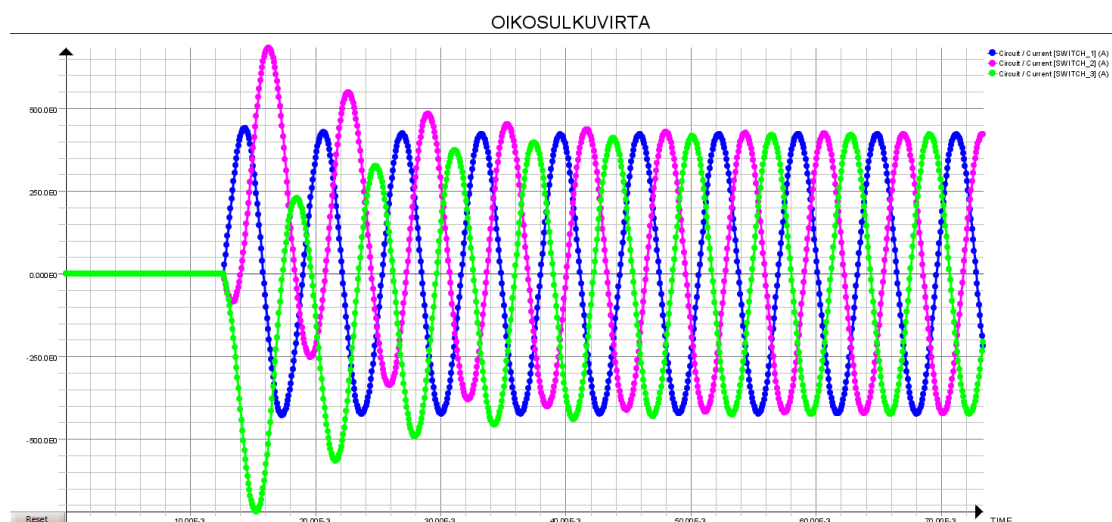
Kuva 15. Vääntömomenttiväre yhden sähköjakson ajalta

5.4 Oikosulku

Oikosulkulaskennalla selvitetiin koneen tuottama jatkuva oikosulkuvirta sekä magneettien oikosulkuvirtakestoisuus. Laskenta suoritetaan pyörittämällä konetta ilman jännitettä. Kahden sähköjakson jälkeen kuvan 16 kytkimet S1-S3 laitetaan kiinni, jolloin magneettien indusoima jännite oikosulun kautta synnyttää oikosulkuvirran. Oikosulkuvirta on alussa suuri ja koneen pyörimisen jatkessa tasaantuu jatkuvaksi oikosulkuvirraksi. Kuvassa 17 on esitettyä koneen virran käyttäytyminen äkillisen 3-vaiheisen oikosulun sattuessa. Äkillisen oikosulkuvirran huippuarvo $I_{k,peak} = 720$ A ja jatkuvan oikosulkuvirran huippuarvo $I_{k,peak} = 423$ A.

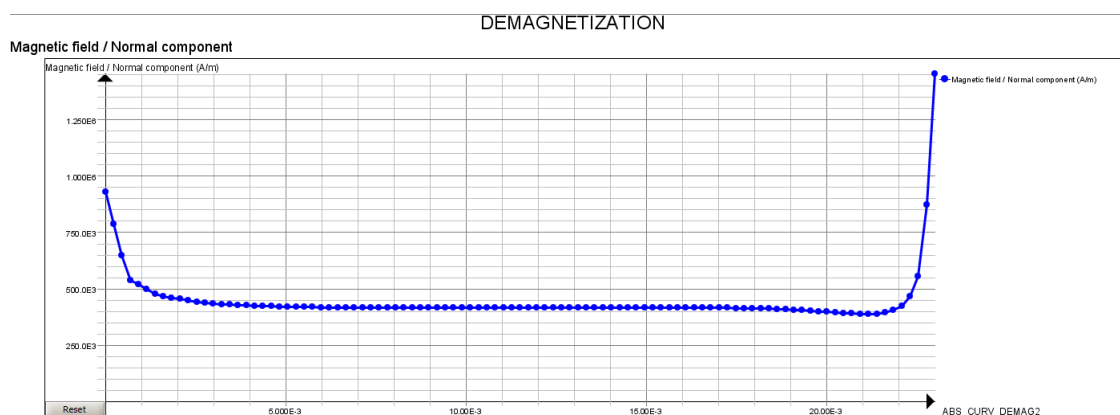


Kuva 16. Flux2D:ssä oikosulku laskennassa käytetty piirimalli



Kuva 17. Oikosulkuvirrat äkillisen 3-vaiheisen oikosulun sattuessa

Magneettien oikosulkukestoisuus voidaan arvioida, kun tiedetään magneettiin kohdistuva vastakkainen kentänvoimakkuus transienttiolosuhteissa. Transienttiolosuhteilla tässä tapauksessa tarkoitetaan 2- tai 3-vaiheista oikosulkua. Suurimman vastakkaisen kentänvoimakkuuden perusteella ja kuvan 10 avulla voidaan selvittää suurin magneettien lämpötila ilman demagnetoitumista. Magneetit kestävät koneessa oikosulun 75°C käyttölämpötilassa. Vastakkaisen kentänvoimakkuudeksi laskennasta saatiin $H_{demag} = 1450$ kA/m. Kuvassa 18 on kohtisuoran kentänvoimakkuuden kuvaaja, ajan hetkellä, kun oikosulkuvirta on suurimmillaan.



Kuva 18. Magneettiin kohdistuvan kohtisuoran kentänvoimakkuuden kuvaaja

5.5 Induktanssit

Induktanssien laskennassa käytetään samanlaista piirimallia kuin jännitelaskennassa, mutta laskenta suoritetaan Steady State Magnetic -tilassa. Geometriassa magneetit muutetaan ilmaksi. Roottorin kulmaa muutetaan asteen askelilla 72° eli kahden magneettinavon verran. Laskennasta saadaan koneen ottaman virran maksimi- ja minimiarvot. Kuvassa 19 on esitetty laskennasta saadut virta-arvot. Vastajänniteen, maksimi ja minimi virtojen sekä taajuuden avulla voidaan laskea L_d - ja L_q -induktanssit yhtälöillä 4 ja 5.

Results		
Curve	Minimum	Maximum
Mod(I(VOLTAGESOU...)	302.339727651288	365.4065329788251
Mod(I(VOLTAGESOU...)	302.3423606255092	365.1837764896523
Mod(I(VOLTAGESOU...)	302.3344192584345	365.1816841909391

Kuva 19. Maksimi ja minimi virrat induktanssi laskennasta

$$L_d = \frac{E}{I_{\max} * 2 * \pi * f} \quad (4)$$

$$L_q = \frac{E}{I_{\min} * 2 * \pi * f} \quad (5)$$

Induktanssien arvoiksi saatiin $L_d = 0,36$ mH, $L_q = 0,43$ mH, jolloin induktanssisuhteeksi tuli $L_d/L_q = 0,83$. Induktanssisuhteella tarkoitetaan magneettinavan pitkittäis- ja poikittaisakselin suuntaisen magneettisen ilmavälin pituuden eroavuuden aiheuttamaa muutosta niiden suuntaisiin induktansseihin. Umpinapaisen koneen induktanssisuhde on 1, koska magneettisen ilmavälin pituus on sama pitkittäis- ja poikittaisakseleilla. Avonapaisella koneella induktanssit voivat erota toisistaan huomattavasti ja induktanssisuhde voi olla yli tai alle 1 riippuen roottorin rakenteesta. Induktanssisuhteella voidaan vaikuttaa koneen reaktanssivääntömomentin tuottoon ja samalla vääntömomentin tuottamiseen tarvittavan virran määrään, koneen äänitasoon ja staattoriin kohdistuviin dynaamisiin voimiin etenkin radiaalisuunnassa. [23.]

5.6 Häviöt

Pyörivässä sähkökoneessa tapahtuvat häviöt jaetaan neljään eri ryhmään. Nämä ovat kuparihäviöt, rautahäviöt, mekaaniset häviöt ja lisähäviöt. Kuparin resistanssi johtimissa aiheuttaa virran neliöön verrannollisia lämpöhäviöitä, joita kutsutaan kuparihäviöiksi. Johtimen resistanssi muodostuu DC- ja AC-komponenteista. DC-komponentti saadaan kuparin johtavuudesta ja AC-komponentti on lisähäviö, joka johtuu virranahdosta urissa olevissa johtimissa. AC-komponentin mallintaminen FEM:ssä on pyörölanka käämille hyvin vaativa tehtävä johtuen lankojen satunnaisesta sijainnista urassa. Tyypillisesti arvo vaihtelee 5–30 % DC-komponentista. [23.] Koneessa tapahtuvat kuparihäviöt saadaan jännitemallilaskennasta. Kuparihäviöt nimellispuolella ovat $P_{cu,loss} = 4,01$ kW. Rautahäviöt johtuvat hystereesi- ja pyörrevirtahäviöistä sähköpeltissä. Näihin voidaan vaikuttaa raudan seostamisella ja sähköpellin paksuudella. Rautahäviöt voidaan laskea yhtälöllä 6, kun tiedetään vuontiheys staattorin hampaassa ja selässä sekä sähköpeltien massa [27]. Laskennasta saa-

tiin vuontiheydeksi hampaassa $B_{teeth} = 1,95$ T ja selässä $B_{yoke} = 1,5$ T nimellis-
pisteessä. Staattorin massat vastaavasti hampaassa $m_{teeth} = 25,3$ kg ja se-
lässä $m_{yoke} = 23,0$ kg. Rautahäviöiksi laskettiin $P_{fe,loss} = 0,83$ kW.

$$P_{fe,loss} = 1,6 * P_{fe} * \left(\frac{f}{50}\right)^{1,5} * \left(\frac{B}{2}\right)^2 * m \quad (6)$$

Konetta suunniteltaessa lisähäviöiden määräksi käytetään 0,5 % koneen sähkötehosta [28]. Tämän perusteella koneen nimellispisteessä lisähäviöt $P_{add,loss} = 0,33$ kW. Koneen suunnittelussa ei oteta huomioon laakeroinnista johtuvia mekaanisia ja jäähdytyshäviöitä. Mekaanisiin häviöihin vaikuttaa muun muassa superkartin taka-akselin laakerointi, jota on vaikea arvioida.

6 POHDINTA

Laskennasta saaduista tuloksista voidaan todeta, että kone täyttää sille asetetut suorituskykyvaatimukset ja mahtuu fyysiseltä kooltaan taka-akselin ympärille ja akselin laakeroinnin sekä jarrukokoonpanon välille. Koneen nimellispiste on määritelty 304,52 Nm:iin, joka on 29 Nm enemmän kuin 250 cm³ 2-tahtimoottori. Koska kone kykenee tuottamaan tämän vääntömomentin nollassa nopeudesta, on kiihtyvyys suurempi kuin polttomoottorilla, jolla vääntömomenttihuippu saavutetaan vasta korkeammilla kierroksilla. Kone kykenee myös kaksinkertaiseen ylinopeuteen, jolloin voidaan saavuttaa vaadittu 250 kilometrin tuntinopeus. Koneen ja energiavarasto kokonaismassaksi tuli 154 kg, joka lisää ajoneuvon massaa 100 kg verrattuna polttomoottorilla varustettuun. Lisääntyneen massan kiihdyttämiseen vaadittava lisävääntömomentti saadaan tuotettua koneella hetkellisesti.

S1-käyttöluokassa koneen lämpenemä mitoitetaan jatkuvalla käytöllä nimellispisteessä tasaisella kuormituksella. Superkart-auton moottorin käyttö eroaa suuresti edellä mainitusta käyttötavasta, ja mitoitettu nimellispiste tarkoittaa kiihdytyksessä tarvittavaa vääntömomenttia ja virtaa. Koska koneesta ei jatkuvasti oteta täyttä tehoa, pysyy roottori ja käämitys todennäköisesti viileänä. Jos testattaessa todettaisiin, että roottori lämpenee yli 75°C käyttölämpötilan, voisi magneetin lämpöluokkaa nostaa portaan ylöspäin. Oikosulun tapahtu-

essa roottorin kunnolla ei ole suurempaa merkitystä, koska staattori olisi käytökelvoton joka tapauksessa. Koneen lämpeneminen ja mekaanisen rasituksen kesto vaatii koneen rakentamista ja testausta. Tämän takia koneen suunnittelussa on käytetty kokemusperäisiä arvoja, jotka tiedetään toimiviksi.

Jos kone valmistettaisiin ja otettaisiin kilpailukäyttöön, pitäisi koneen, energia-varaston ja taajuusmuuttajan suunnittelu suorittaa kokonaisuutena. Tämän työn laajuuden huomioon ottaen olisi kokonaisvaltainen suunnittelu ollut mahdoton toteuttaa. Työ antaa kuitenkin hyvän pohjan jatkokehitykselle, jossa voitaisiin käyttää apuna tässä saatuja tuloksia.

LÄHTEET

1. Guillemin, A. Electricity and Magnetism. Kalifornia: Macmillan and Company. 1891.
2. Electric Cars. Edison Tech Center. Verkkoartikkeli. 2014. Saatavissa: <https://edisontechcenter.org/ElectricCars.html> [viitattu 17.03.2020].
3. Neomagneetti valloitti maailman. *Tiede* 2/2010. 18.03.2010. Saatavissa: https://www.tiede.fi/artikkeli/jutut/artikkelit/neomagneetti_valloitti_maailman [viitattu: 14.04.2019].
4. Shrink Fitting Stator and Rotor with Induction. HLQ Induction Equipment Co.,LTD. Kuva. 2020. Saatavissa: <https://dw-inductionheater.com/shrink-fitting-stator-and-rotor-with-induction.html> [viitattu: 15.04.2020].
5. DC Motor, How It Works. Magnetic Innovations. 2019. Saatavissa: <https://www.magneticinnovations.com/dc-motor-how-it-works/> [viitattu 19.10.2019].
6. Dirjish, M. What's the Difference Between Brush DC And Brushless DC Motors? Electronic Design. Verkkoartikkeli. 16.02.2012. Saatavissa: <https://www.electronicdesign.com/electromechanical/what-s-difference-between-brush-dc-and-brushless-dc-motors> [viitattu 19.10.2019].
7. Brushed DC Motor Mechanism. Magnetic Innovations. Kuva. 2020. Saatavissa: <http://www.magneticinnovations.com/faq/attachment/brushed-dc-motor-mechanism/> [viitattu 15.04.2020].
8. Aura, L. & Tonteri, A.J. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. Helsinki: WSOY. 1996.
9. Rotating Magnetic Field. Wikipedia. Kuva. 2019. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Rotating_magnetic_field [viitattu 15.04.2020].

10. Puranen, J. Induction motor versus permanent magnet synchronous motor in motion control applications: a comparative study. 2006. Väitöskirja. Lappeenrantaan Teknillinen Yliopisto. Sähkötekniikan osasto. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/31238> [viitattu 19.10.2019].
11. Minimizing AC Induction Motor Slip. EC&M. Kuva. 01.04.2020. Saatavissa: <https://www.ecmweb.com/content/article/20892152/minimizing-ac-induction-motor-slip> [viitattu: 15.04.2020].
12. Villani, M. High Performance Electrical Motors for Automotive Applications – Status and Future of Motors with Low Cost Permanent Magnets. 2018. PDF-dokumentti. Saatavissa: http://www.refreedrive.eu/wp-content/downloads/2018_WMM_Paper_UNIVAQ.pdf [viitattu 19.10.2019].
13. Construction of Synchronous Reluctance Motor. Engineering Solutions. Kuva. 2020. Saatavissa: <https://en.engineering-solutions.ru/motorcontrol/syrm/> [viitattu 15.04.2020].
14. Fangwu, M., Hongbin, Y., Lulu, W., Liang, W. & Cansong, G. Analytical Calculation of Armature Reaction Field of the Interior Permanent Magnet Motor. 2018. Artikkel. Energies. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/327565224_Analytical_Calculation_of_Armature_Reaction_Field_of_the_Interior_Permanent_Magnet_Motor [viitattu 15.04.2020].
15. CIK-FIA Specific Internal Regulations. 2016. Fédération Internationale de l'Automobile. PDF-dokumentti. Päivitetty 2016. Saatavissa: http://www.cikfia.com/uploads/media/Web_RIP_2016.pdf [viitattu 13.09.2019].
16. Karting Technical Regulations. 2019. Fédération Internationale de l'Automobile. PDF-dokumentti. Päivitetty 2019. Saatavissa: http://www.cikfia.com/fi-admin/content/REGULATIONS/Technical/Technical%20Regulations/2019/Web_RT2019.pdf [viitattu 13.09.2019].

17. FIA Karting – Logical Win for Peter Elkman. Fédération Internationale de l'Automobile. Verkkoartikkeli. 2018. Saatavissa: <https://www.fia.com/news/fia-karting-logical-win-peter-elkmann> [viitattu 15.04.2020].
18. PVP motor 252. 2011. PVPKart. Verkkosivu. Päivitetty 2011. Saatavissa: <https://pvpkart.com/> [viitattu 03.01.2020].
19. Samsung INR18650-30Q Li-Ion akkukenno 3000 mAh / 15 A. Akkula.fi. Tekniset tiedot. Saatavissa: https://www.akkula.fi/epages/akkula.sf/fi_FI/?ObjectPath=/Shops/20110228-11092-27846-1/Products/1340030 [viitattu 07.03.2020].
20. Allaire, G. & Craig, A. Numerical Analysis and Optimization: An Introduction to Mathematical Modelling and Numerical Simulation. Oxford: OUP. 2007.
21. Jussila, H. Napakäämityn murtovakokestomagneettitahtikoneen suunnittelu. 2005. Diplomityö. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto. Sähkötekniikan osasto. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/30138/TMP.objres.168.pdf?sequence=1> [viitattu 15.04.2020].
22. Gerling, D. Electrical Machines Mathematical Fundamentals of Machine Topologies. Neubiberg, Saksa: Springer. 2015.
23. Kurronen, P. The Switch Drive Systems Oy. TkT/sähkötekniikka. Keskustelu 7.3.2020.
24. Heikkilä, T. Permanent Magnet Synchronous Motor for Industrial Inverter Applications – Analysis and Design. 2002. Väitöskirja. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto. Sähkötekniikan osasto. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/31173/TMP.objres.359.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [viitattu 15.04.2020].

25. Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets G50UH. Arnold Magnetic Technologies. Datalehti. 2018. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.arnold-magnetics.com/wp-content/uploads/2018/11/N50UH_GBDD_181031.pdf [viitattu 15.04.2020].
26. Ponomarev, P. Tooth-Coil Permanent Magnet Synchronous Machine Design for Special Applications. 2013. Väitöskirja. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto. Sähkötekniikan osasto. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/93286/dissertation.pdf?sequence=2&isAllowed=y> [viitattu 15.04.2020].
27. Pyrhönen, J., Jokinen, T. & Hrabovcova, V. Design of Rotating Electrical Machines. New Jersey: John Wiley & Sons. 2008.
28. IEC 60034-2-1:2014. 2014. International electrotechnical Commission. PDF-dokumentti. Päivitetty 2014. Saatavissa: <https://webstore.iec.ch/publication/121> [viitattu 03.03.2020].

LIITTEET

Liite 1. PMSM-220-1900-Final-Winding.xlsx Excel-tiedosto

Liite 2. Dahrentrad Pyörö- ja muotokuparien tekniset tiedot

Liite 3. Vacuumschmelze Soft Magnetic Cobalt-Iron Alloys

Liite 4. Cogent SURA M270-50A datasheet