

Aleksi Mallasto

Sähkökäyttöisen juniorformulaveneen moottori

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

11.3.2013

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Aleksi Mallasto Sähkökäyttöinen juniorformulavene 45 sivua 11.3.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	sähkövoimatekniikka
Ohjaaja	lehtori Jukka Karppinen
<p>Tässä insinöörityössä on selvitetty erilaisten moottorien sopivuus sähkökäyttöisen juniorformulamoottoriveneen ajomoottoriksi.</p> <p>Työ tehtiin kirjallisuustutkimuksena. Aineistona käytettiin sekä painettua kirjallisuutta että Internet-dokumentteja. Kirjallisen aineiston kokoamiseen käytettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun kirjastoa ja eri kurssien materiaaleja.</p> <p>Työssä käytiin aluksi läpi, millaiseen sovellukseen etsitään moottoria, minkä jälkeen keskityttiin erilaisiin sähkömoottoreihin, niin tasa- kuin vaihtosähkömoottoreihin, ja lopuksi valittiin sopiva moottori. Työssä päädyttiin siihen tulokseen, että kestopagneettimoottori sopii parhaiten ajomoottoriksi pod-tyyliseen ratkaisuun.</p>	
Avainsanat	sähkömoottori, kestopagneettimoottori

Author Title Number of Pages Date	Aleksi Mallasto Electrical Engine for a Junior Motorboat 45 pages 15 September 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructor	Jukka Karppinen, Senior Lecturer
<p>In this graduate study the main objective was to study different kind of motors and how they fit to be used as a driving motor for an electrical junior formula motorboat.</p> <p>This study is based on professional literature. Both written material and Internet documents were examined. The written material was collected from the library of Helsinki Metropolia University of Applied Sciences and from materials of different school courses.</p> <p>First the study goes through the implementation of where the engine is going to be used. Then the study concentrates on different kind of engines, both direct current and alternating current. In the final chapter of the research the most suitable engine for the motorboat is explained.</p> <p>The result of this study show that permanent magnet motors are the most suitable engine to be used as pod application.</p>	
Keywords	Electric motor, Permanent magnet motor

Sisällys

Kansisivu

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Juniorformulamoottoriveneelle halutut ominaisuudet	2
2.1	Luokkavastaavuus bensiinikäyttöisiin veneisiin nähden	2
2.2	Veneeseen kaavailtu moottori	3
3	Sähkömoottorit	4
4	Tasasähkömoottorit	5
4.1	Tasasähkömoottorin rakenne	5
4.1.1	Tasasähkömoottorin kommutointi	7
4.1.2	Tasasähkökoneen sähkömotorinen jännite ja pyörimisnopeus	8
4.1.3	Tasasähkömoottorin ilmapälin sähkövääntömomentti	9
4.1.4	Ankkurireaktio	10
4.2	Sarjamoottori	11
4.2.1	Sarjamoottorin käynnistys	13
4.2.2	Sarjamoottorin pyörimisnopeus ja sen säätö	13
4.2.3	Sarjamoottorin vääntömomentti	14
4.3	Vierasmagnetoitu moottori	15
4.3.1	Vierasmagnetoidun moottorin käynnistys	16
4.3.2	Vierasmagnetoidun moottorin pyörimisnopeuden säätö	16
4.4	Sivuvirtamoottori	17
4.4.1	Sivuvirtamoottorin käynnistys	19
4.4.2	Sivuvirtamoottorin pyörimisnopeuden säätö	19
4.5	Kompoundimoottori	19
4.5.1	Kompoundimoottorin käynnistys	20

4.5.2	Kompoundimoottorin pyörimisnopeuden säätö	20
5	Vaihtosähkömoottorit	22
5.1	Kiertokenttä kolmivaihekäämityksessä	22
5.2	Kiertokentän nopeus	23
5.3	Epätahtimoottorit	23
5.3.1	Epätahtimoottorien toimintaperiaate	24
5.3.2	Epätahtimoottorin käynnistäminen	25
5.3.3	Epätahtimoottorien pyörimisnopeuden säätö	26
5.3.4	Epätahtimoottorien vääntömomentti	27
5.3.5	Oikosulkumoottori	29
5.3.6	Liukurengasmoottori	31
5.4	Tahtimoottorit	32
5.4.1	Tahtimoottorin roottorirakenne	32
5.4.2	Tahtimoottorin käynnistys	33
5.4.3	Tahtimoottorin pyörimisnopeus	34
5.4.4	Tahtimoottorin vääntömomentti	34
5.5	Synkroninen reluktanssikone	35
5.6	Kestomagneettimoottorit	36
5.6.1	Kestomagneettimateriaalit	37
5.6.2	Radiaalivuomoottori	39
5.6.3	Aksiaalivuomoottori	40
6	Yhteenveto	42
	Lähteet	44

Lyhenteet ja symbolit

Lyhenteet

a	ankkurikäämin rinnakaishaaraparien lukumäärä
AlNiCo	alumiini-nikkeli-koboltti-yhdiste
c	konevakio
$\cos\varphi$	tehokerroin
E_{smj}	sähkömotorinen jännite
E_r, smv	sähkömotorinen voima
f	taajuus
I_a	ankkurivirta
$I_a R_a$	käämin jännitehäviö
I_k	käynnistysvirta
I_m	magnetoimisvirta
k	konekohtainen vakio
k_f	konevakio
l_{km}	lukumäärä
M	momentti
n	pyörimisnopeus
NdFeB	neodyymi-rauta-boori-yhdiste
n_n	nimellinen pyörimisnopeus
n_s	synkroninen nopeus
p	napapariluku
P	moottorin tuottama mekaaninen teho
P_a	sähkö- eli ankkuriteho
R_a	ankkuripiirin resistanssi
R_m	magnetointikäämin resistanssi
s_a	ankkurisauvojen lukumäärä
s	jättämä
SmCo	samarium-koboltti-yhdiste
T	vääntömomentti
U_a	liitin jännite

Symbolit

φ	pääkenttä / magneettikenttä
φ_a	ankkurikenttä
φ_n	yhden navan magneettivuo
ω_m	moottorin kulmapyörimisnopeus
η	hyötysuhde

1 Johdanto

Insinööriytyössä haettiin sopivaa moottoria sähkökäyttöisen juniorformulaveneen ajomoottoriksi. Moottori on suunniteltu sijoitettavaksi veneen alle pod-tyylisenä ratkaisuna. Jos työn päämäärä tavoitetaan, voidaan veneen suunnittelu ja mahdollisesti rakennus aloittaa. Uudentyyppisellä sähkökäyttöisellä moottoriveneellä pystyttäisiin ajamaan myös alueilla, joissa bensiinikäyttöiset veneet ovat kiellettyjä melusaasteen takia. Uudentyyppiselle veneelle olisi myös kysyntää formulaveneharrastelijapiireissä, jolloin sähkökäyttöisen veneen pohjalta voitaisiin perustaa uusi veneluokka bensiinikäyttöisten veneluokkien rinnalle.

Jotta moottoriveneelle voitaisiin valita sopiva moottori, tulee valitsijalla olla tietoa erilaisista sähkömoottoreista. Tässä työssä käydään läpi erilaisia tasa- ja vaihtosähkömoottoreita, niiden rakennetta, käynnistystä, pyörimisnopeutta ja sen säätöä sekä muita ominaisuuksia. Lopuksi valitaan sopivimmat moottorityypit.

2 Juniorformulamoottoriveneelle halutut ominaisuudet

2.1 Luokkavastaavuus bensiinikäyttöisiin veneisiin nähden

Ajatuksena on, että sähkökäyttöisen veneen teho olisi samaa luokkaa joko SJ 15-junioriluokan kanssa 15 hv tai T 400S-luokan kanssa eli 25 hv. Sähkökäyttöiselle veneelle tehot olisivat hevosvoimien sijaan watteina: 11,25 kW tai 18,65 kW. Koska ollaan luomassa uutta veneluokkaa voidaan teholuokka säätää sopivaksi valitulle moottorille sopivaksi. [1.]

2.2) Veneen runko ja moottorin sijainti

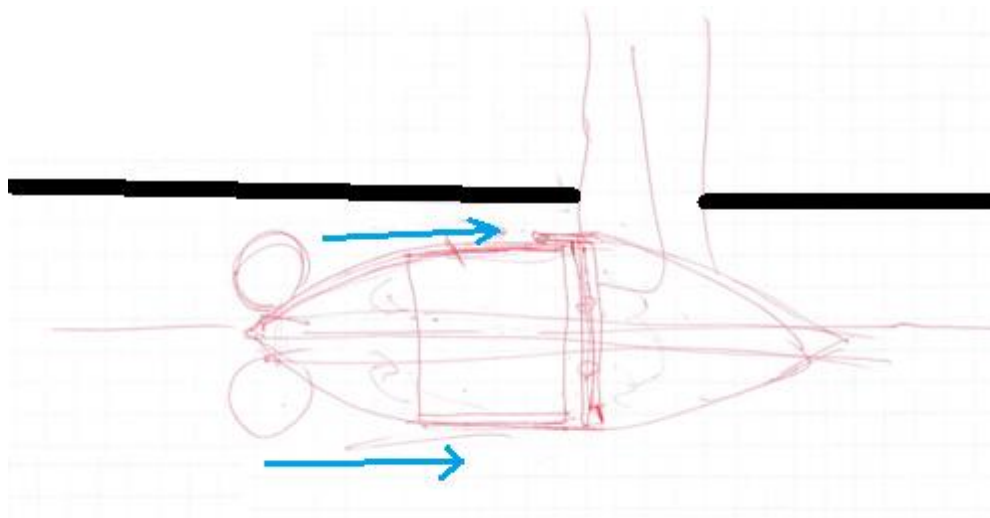
Veneen runkona käytetään valmista SJ 15 -luokan runkoa, jonka pituus on 3,1m joko suoraan sellaisenaan tai muunnettuna tarpeen mukaan. Yhteispainoksi on kaavailtu n. 175 kg, mitä käytetään myös SJ 15 -luokassa.



Kuva 1. SJ 15-luokan veneen runko [2]

Moottori voidaan sijoittaa kokonaan veden alle eri tavoilla joko peräsimeen tai pod-tyylisenä ratkaisuna. Tässä työssä käytetään vetävää pod-tyylistä ratkaisua, jolloin propelli osoittaa kokkaan päin. Koska moottori sijoitetaan kokonaan veteen, täytyy sen ympärille rakentaa vedenpitävä suojakotelo, jotta vesi ei aiheuttaisi oikosulkuja moottorissa. Jotta moottori ei ylikuumentuisi tiiviissä kotelossa, kotelo täytyy puristaa kiinni moottoriin. Näin moottorin lämpö johtuu ensin suojakoteloon ja tästä edelleen veteen. Mahdollisuuksien mukaan ilman kiertäminen varmistetaan poraamalla moottoriin pituussuunnassa ilmarakoja, jos niitä ei ole alkuperäisesti olemassa. Moottorin tulee olla

myös varsin pieni ja tehokas kokoisekseen, sillä moottorin halkaisijan kasvaessa myös veden vastus kasvaa.



Kuva 2. Moottori pod-ratkaisuna; mustaviiva on veneen pohja, siniset nuolet näyttävät veden kulkua [3]

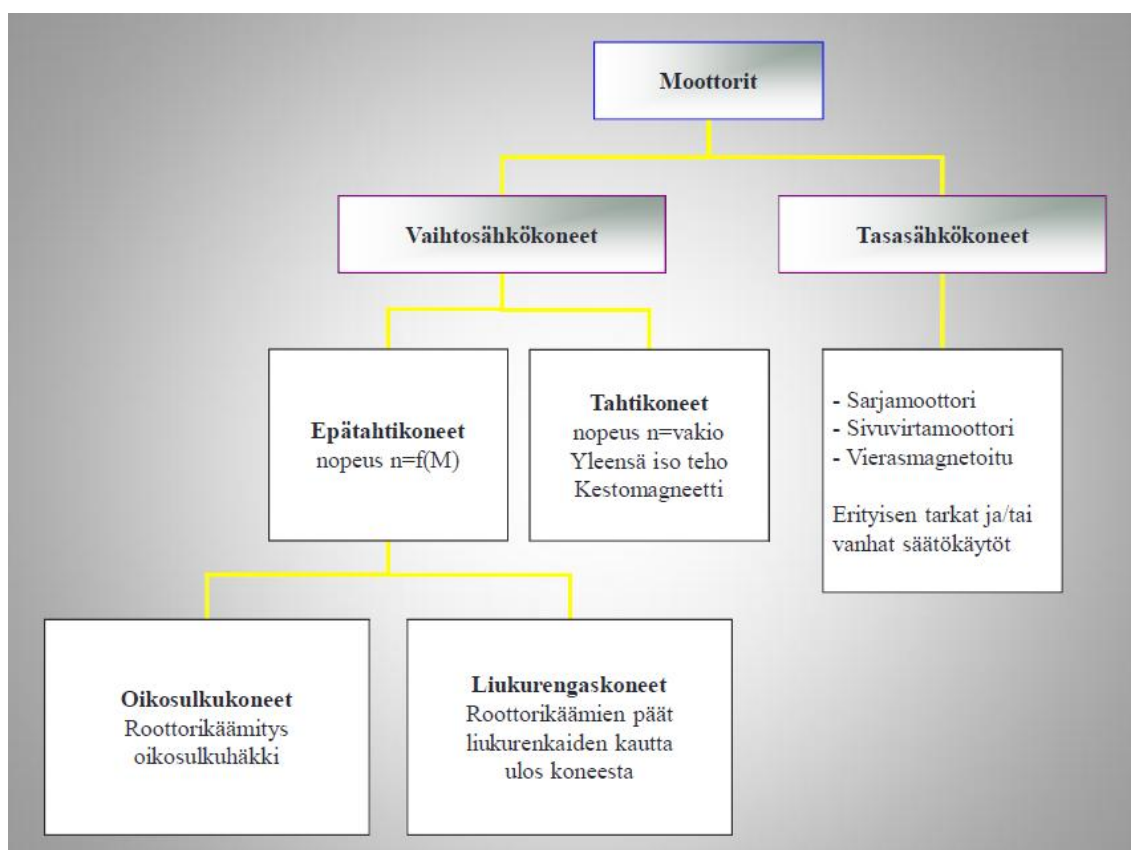
2.2 Veneeseen kaavailtu moottori

Moottorin tehoksi on kaavailtu 10 - 25 kW ja halkaisijaksi korkeintaan 120 mm, koska moottorin pitää olla kapea ja tehokas, moottorin pituus kasvaa. Moottorin pyörimisnopeudelle ei ole asetettu rajoja, sillä venettä vetävä propelli voidaan kustomoida vastaamaan annettua pyörimisnopeutta. Myöskään moottorin vääntömomentille ei ole annettu rajoja.

3 Sähkömoottorit

Sähkömoottorilla muunnetaan sähköinen teho mekaaniseksi tehoksi halutulla pyörimisnopeudella ja vääntömomentilla. Sähkömoottorit jaetaan kahteen pääryhmään: tasa- ja vaihtosähkömoottorit. Kuten nimikin sanoo, tasasähkömoottorit toimivat tasasähköllä ja vaihtosähkömoottorit vaihtosähköllä. Koska melkein kaikkia sähkökoneita voidaan käyttää sekä moottorina että generaattorina, voidaan käyttää yhteisesti kone sanaa.

Kuvasta 3 nähdään, miten moottorit on jaoteltu:



Kuva 3. Sähkömoottorien jaottelu [4]

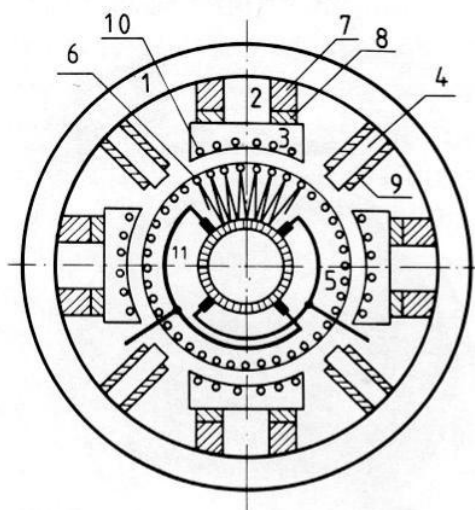
4 Tasasähkömoottorit

Tasavirtamoottoreilla on pitkä perinne teollisuuden säädettyjen käyttöjen ajomoottoreina helpon, tarkan ja laajan säädettävyyden ansiosta. Tasasähkömoottorien pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia on helppo ja nopea ohjata tarkasti ankkurivirran avulla varsin yksinkertaisella tekniikalla. Pyörimisnopeus on suoraan verrannollinen ankkuripiirin jännitteeseen, joten usein nopeussäätö toteutetaan suoraan ankkurijännitteen säädöllä tyristorisiltaa käyttäen, tällöin magnetointivirta pidetään vakiona. DC-koneet ovat säilyttäneet suosionsa esimerkiksi paino- ja paperikoneissa, rullainkäytöissä, kulukuvälineissä ja pienitehoisissa apumoottorikäytöissä. Tasasähkömoottorin rakenne on periaatteessa samanlainen kuin tasasähkögeneraattorin, joten samaa konetta voidaan käyttää sekä moottorina että generaattorina oikeanlaisella ohjaustekniikalla.

Tasasähkömoottorien huonoina puolina voidaan pitää niiden mutkikasta ja kallista rakennetta sekä suurta huollon tarvetta. Moottorien kommutaattori ja hiiliharjat vaativat jatkuvaa ja säännönmukaista huoltamista, sillä hiiliharjat kuluvat konetta käytettäessä. Hiiliharjoja on erilaisia, joilla on erilaiset liukuominaisuudet ja sähkön johtavuudet. Yleensä harjat tehdään kovasta hiilestä, grafiitista tai metallilla seostetusta grafiitista. Kovat harjalaitteet kuluvat hitaammin, mutta niiden sähkönjohtavuus on huonompi kuin pehmeiden harjojen. Kovilla harjoilla on myös suuremmat hankaushäviöt. Harjojen sallitut virrantiheydet ovat suuruusluokaltaan $J = 0,05 \dots 0,25 \text{ A/mm}^2$ ja jousen synnyttämä harjapaine on n. $160 \dots 190 \text{ g/cm}^2$. Harjan ja kommutaattorin välillä on ylimenojännite, joka on suuruudeltaan noin 1 V.

4.1 Tasasähkömoottorin rakenne

Tasasähkökoneen rautaosat muodostavat koneen magneettikentälle magneettipiirin. Moottorin kehä ja napojen rautaosat voidaan tehdä täysraudasta, sillä moottorin kentät ovat tasakenttiä, jolloin ei synny häviöitä. Roottorin rautaosat pitää tehdä täysraudan sijasta levyrakenteisena, jotta voidaan rajoittaa pyörrevirtahäviöiden syntymistä, sillä roottori joutuu pyörimään tasamagneettikentässä, jolloin pyörimisliike aiheuttaa vuon vaihtelua ja rautahäviöitä. Moottorin rakenne esitellään kuvassa 4 (ks. seur. s.).



Kuva 4. Tasavirtamoottorin rakenne; 1 staattorin kehä, 2 päänavan sydän, 3 napakenkä, 4 kääntönavan sydän, 5 roottorin rautasydän, 6 roottori (ankkurikäämitys), 7 sivuvirtakäämitys, 8 sarjavirtakäämitys, 9 kääntönavan käämitys, 10 kompensointikäämitys, 11 kommutaattori harjoineen [5, s. 8.]

Tasasähkökone perustuu pyörivään kommutaattoriin ja sen hyödyntämiseen. Kommutaattori on kiilanmuotoisista toisistaan eristetyistä kupariliuskoista tehty sylinterimäinen rakenne, joka on sijoitettu koneen roottoriakselille. Käämityksen kaksi päätä kytketään kommutaattoriin siten, että jokaiseen liuskaan liitetään yhden vyyhden alkupää ja toisen vyyhden loppupää. Kommutaattorille syötetään tasavirtaa hiiliharjojen välityksellä. Roottorikäämitykseen indusoituu vaihtosähkömotorinen jännite sen pyöriessä magnetointikäämitysten (staattorissa) muodostamassa magneettikentässä. Moottorikäytössä tämä jännite on luonteeltaan vastajännite moottoriin vaikuttavalle liitinjännitteelle. Koska roottoriin indusoitunut jännite on vaihtojännitettä, on roottoriin syötettävä tasajännite vaihtosuunnattava ensin. Roottorikäämitykseen eli ankkurikäämitykseen indusoitunutta jännitettä kutsutaan ankkurijännitteeksi.

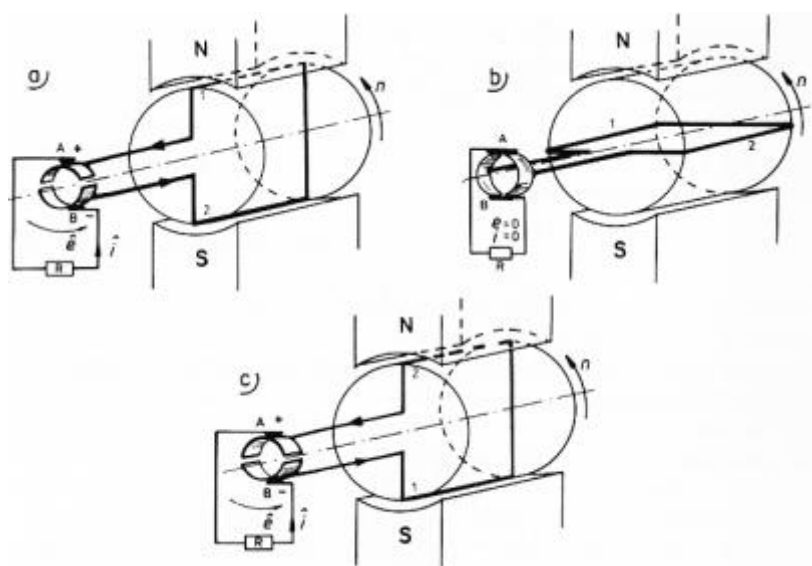
Tasasähkökoneen magnetointi on sijoitettu staattoriin, joka luo koneen toiminnalle tarpeellisen magneettivuon eli ns. pääkentän. Magnetointia varten kehälle on kiinnitettyä magneettinavat, joiden ympärillä on magneetoiva käämitys. Syöttämällä tasavirtaa tähän käämitykseen syntyy tasavuo, joka leikkaa ankkurikäämitystä.

Tasasähkökoneen ominaisuudet riippuvat sen magnetointitavasta, eli miten magnetointikäämitys on kytketty roottorikäämin kanssa. Yleisimmät tavat ovat

- sarjakone; magnetointikäämitys kytketään sarjaan ankkurikäämityksen kanssa
- sivuvirtakone; magnetointikäämitys kytketään ankkuripiirin rinnalle
- kompoundi- eli yhdysvirtamagnetoitu; ratkaisussa on yhdistelmä vieras- ja sarjamagnetoidusta tapauksista
- vierasmagnetoitu; koneen magnetointikäämiä syötetään erillisestä lähteestä.

4.1.1 Tasasähkömoottorin kommutointi

Tasasähkömoottorin roottoriin muodostuva sähkömotorinen jännite on vaihtosähköä joka on vaihtosuunnattava. Tätä toimenpidettä kutsutaan kommutoinniksi, jonka suorittaa kommutaattori. Kommutaattori esitellään kuvassa 5:



Kuva 5. Kommutaattorin ja kommutoinnin periaate [6, s. 5]

Koska tasasähkökonetta voidaan käyttää sekä moottorina että generaattorina täytyy kommutaattorin toimia molempiin suuntiin, jolloin kommutaattori on periaatteessa mekaaninen tasa-vaihtosuuntaaja. Roottorin liukurengas on halkaistu kahdeksi puolikkaaksi (kuva 5), ja kommutaattorin hiiliharjat on asetettu niin, että harjojen välinen jännite tulee generaattorissa tasasuunnatuksi. Moottorissa vastaavasti tasajännite vaihtosuunnataan, jonka seurauksena roottori alkaa pyöriä päänapojen muodostamassa magneettikentässä.

4.1.2 Tasasähkökoneen sähkömotorinen jännite ja pyörimisnopeus

Tasavirtakoneen roottorin pyöriessä magneettikentässä siihen syntyy sähkömotorinen jännite (smj), jonka suuruus E saadaan kaavasta yksi.

$$E = \frac{p}{a} s \frac{n}{60} \phi_n, \quad (1)$$

missä E on sähkömotorinen jännite, p on napaparien lukumäärä, a on ankkurikäämin rinnakkaishaaraparien lukumäärä, s_a on ankkurisauvojen lukumäärä, n on pyörimisnopeus, ϕ_n on yhden navan magneettivuoto.

Jos kaavaan 1 sijoitetaan konekohtaisen vakion k kaava 2, saadaan sähkömotorisen voiman kaavaksi 3.

$$k = \frac{ps}{a60}, \quad (2)$$

missä k on konekohtainen vakio

$$E = kn\phi \quad (3)$$

jolloin nähdään, että sähkömotorinen jännite riippuu ainoastaan konekohtaisesta vakioista k , pyörimisnopeudesta n ja vuosta ϕ .

Tasasähkömoottorin E toimii syöttävän liitinjännitteen vastajännitteenä, jolloin E on ankkuripiirin liitinjännitettä U , käämin jännitehäviön $I_a R_a$ verran pienempi. Tällöin käynnistyneen moottorin liitinjännite saadaan kaavasta 4 (ks. seur. s.).

$$U_a = E + I_a R_a. \quad (4)$$

Yhtälöiden 3 ja 4 avulla saadaan pyörimisnopeuden kaava 5. [2, s. 33; 5, s.11.]

$$n = \frac{U - I_a R_a}{k \phi} \quad (5)$$

4.1.3 Tasasähkömoottorin ilmapälin sähkövääntömomentti

Tasasähkömoottorin ankkurin kehittämä sähköteho (eli ankkuriteho) P_a on ohmin lain mukaan

$$P_a = E I_a \quad (6)$$

Mekaniikan mukaan ankkurin kokonaissähkötehoa vastaa koneen ilmapälinssä vaikuttava sähkövääntömomentti

$$M = \frac{P_a}{2\pi n} \quad (7)$$

Tällöin yhtälöistä 3, 6 ja 7 saadaan sähkövääntömomentin kaava muotoon

$$M = \frac{E I_a}{2\pi n} = \frac{k n \phi I_a}{2\pi n} = \frac{k}{2\pi} \phi I_a \quad (8)$$

Kun kaavaan 8 sijoitetaan kaava 2, saadaan sähkövääntömomentin kaava muotoon

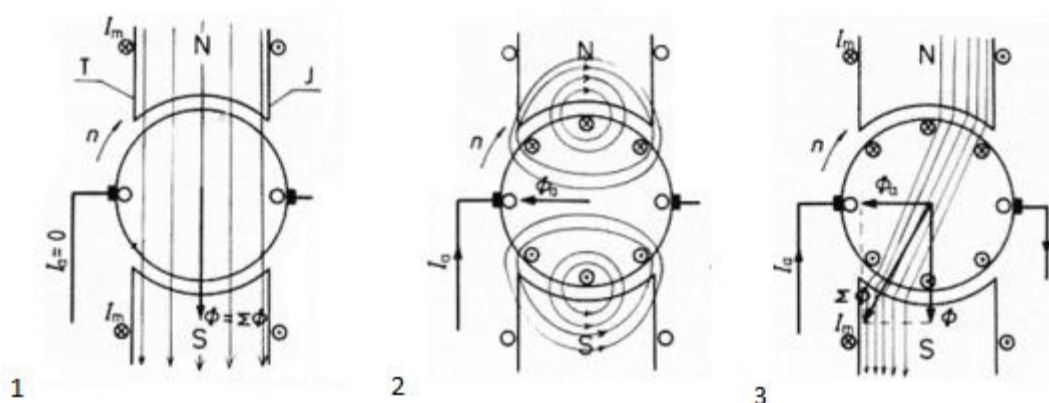
$$M = \frac{p s}{2\pi a} \phi I_a = C \phi I_a, \quad (9)$$

missä C on koneen rakenteesta riippuva vakio. [7, s. 7.]

4.1.4 Ankkurireaktio

Tasavirtamoottoria (tai -generaattoria) kuormitettaessa sen roottorikäämityksessä kulkee ankkurivirta I_a , joka synnyttää koneen pääkentälle Φ poikittaisen ankkurimagneettikentän Φ_a , jonka suuruus riippuu ankkurivirrasta I_a . Tämän ankkurikentän Φ_a vaikutusta pääkenttään kutsutaan ankkurireaktioksi.

Ankkurireaktio pienentää koneen päävyötä, mikä pienentää myös koneen sähkömotorista voimaa vahvistamalla magnetointikäämityksen synnyttämää pääkenttää magnetointinavan toisella reunalla ja heikentämällä sitä toisella reunalla. Ankkurireaktiolla on myös toinenkin haitallinen vaikutus, kommutaattorin kipinäinti. Kommutaattorin harjat ovat napojen puolivälissä, missä koneen ollessa tyhjäkäynnissä, eli ankkurivirta on pieni, on magneettivuon tiheys nolla. Ankkurivirta (koneen ollessa kuormitettuna) luo ankkurikentän, jonka seurauksena rezultoivan magneettikentän nollassa siirtyy. Tällöin kommutoiva vyyhti on magneettikentässä. Tällöin siihen indusoituu jännite, joka pyrkii vastustamaan virran muutosta, ja kommutaattorissa esiintyy kipinäintiä. Tämä kipinäinti kuluttaa liukuharjoja ja kommutaattoria. Ankkurireaktiota kuvataan kuvassa viisi.

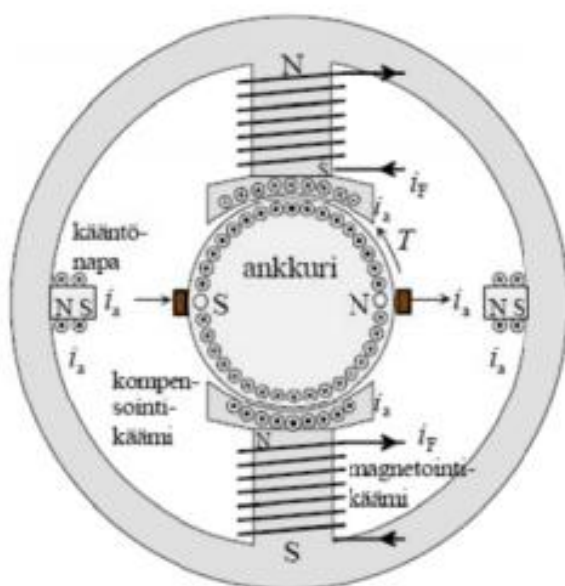


Kuva 5. Ankkurireaktio, 1) Ankkurivirta sauvassa synnyttää ankkurivuon, 2) Ankkurivuo on poikittainen päävuohon nähden, 3) Päävuon ahto rautapiirin reunalle, mistä johtuu kyllästymisen, reluktanssin kasvu, vuon pientyminen, stabiilisuusongelmia [8, s. 5; 11, s. 16.]

Ankkurireaktiota voidaan pienentää kahdella tavalla: 1) päänapojen uriin sijoitetaan kompensointikäämitys tai 2) sijoittamalla päänapojen väliin kääntönavat.

1) Ankkurikentän ϕ_a vaikutuksia pääkenttään ϕ voidaan vähentää päänapojen uriin sijoitetulla kompensointikäämityksellä, joka magnetoi vastakkaiseen suuntaan kuin ankkurikäämitys. Tämä kumoaa ankkurikentän päänapojen kohdalla.

2) Ankkurireaktio voidaan kumota sijoittamalla päänapojen väliin kääntönavat, jotka ovat ankkuripiirin kanssa sarjassa. Koska ankkuripiiri ja kääntönavat on kytketty sarjaan, kulkee ankkuripiirin kautta koko ankkurivirta I_a , jolloin niiden synnyttämä kääntönapakenttä vaihtelee kuormituksen mukaan kumoten ankkurireaktion kääntönavan kohdalla. Kääntönapojen periaatekuva nähdään kuvassa 6:

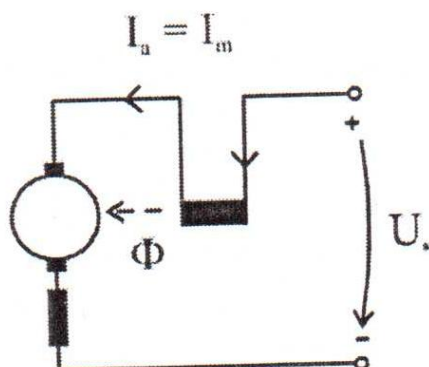


Kuva 6. Kääntönapojen sijoitus ja vaikutus tasasähkömoottorissa [8, s. 6]

4.2 Sarjamoottori

Sarjamoottorissa magnetointikäämi on roottorikäämin kanssa sarjassa nimensä mukaisesti. Tämä johtaa siihen, että koko kuormitusvirta menee magneettikäämin läpi. Jotta magnetointikäämitys kestäisi tämän virran, magnetointikäämitys tehdään paksummasta johtimesta kuin esim. sivuvirtamoottorin magnetointikäämitys. Sarjamoottorin magnetointikäämityksessä on yleensä vähemmän kierroksia kuin sivuvirtamoottoreissa. Kuormituksen kasvaessa kasvaa myös navan päävu. Sarjakytkenässä ankkuripiiri

on sarjassa magnetointipiirin kanssa kuvan 7 osoittamalla tavalla. Sarjamoottorin verkosta ottama kokonaisvirta on $I = I_m = I_a$.



Kuva 7. Sarjakoneen periaatekytkentä [10, s. 24]

Moottorin sijaiskytkennän matemaattinen kaava saadaan kaavasta 4 lisäämällä magnetointikäämin resistanssi R_m .

$$U = E + I \cdot (R_a + R_m), \quad (10)$$

missä U on jännite, E on roottorin smv, I on virta, R_a on roottorikäämin resistanssi, ja R_m on magnetointikäämin resistanssi.

Ankkurivirta I_a saadaan kaavasta 10 johtamalla, tähän sijoitetaan kaava 3, jolloin ankkurivirta saadaan muotoon

$$I_a = \frac{U - E}{(R_a + R_m)} = \frac{U - kn\phi}{(R_a + R_m)} \quad (11)$$

Koneen pyörimisnopeuden kaava saadaan kaavaan 5 lisäämällä R_m :

$$n = \frac{U - (I_a) \cdot (R_a + R_m)}{k\phi} \quad (12)$$

4.2.1 Sarjamoottorin käynnistys

Moottoria käynnistettäessä sitä ei voida suoraan kytkeä täyteen jännitteeseen, sillä aluksi, kun pyörimisnopeus n on nolla, on myös ankkurikäämitykseen indusoitunut sähkömotorinen voima E nolla. Moottorin käynnistys tapahtuu nostamalla jännitettä asteittain tai asentamalla piiriin säätövastus sarjaan moottorin kanssa. Kaavasta 13 nähdään alkutilanne, ja miten käynnistysvirta muodostuu:

$$I_k = \frac{U}{R + R_a}, \quad (13)$$

missä I_k on käynnistysvirta, U on liitinjännite, R on sarjavastuksen arvo ja R_a on ankkuriin resistanssi.

Ankkurin lähdettyä pyörimään ankkurikäämitykseen indusoituu vastasähkömotorinen voima, mikä pienentää ankkurivirtaa. Ankkurivirran kasvaessa suuremmaksi voidaan sarjavastusta säätää pienemmäksi asteittain, eli aluksi sarjavastuksen täytyy olla suurimmillaan. Tämä estää, ettei piirin virta pääse kasvamaan liian suureksi. Ankkurin lähdettyä pyörimään saadaan piirin virran kaavaksi 14:

$$I = \frac{U - E}{R + R_a}, \quad (14)$$

missä E on ankkurikäämitykseen indusoitunut sähkömotorinen voima. [8, s. 12.]

4.2.2 Sarjamoottorin pyörimisnopeus ja sen säätö

Kaavasta 12 (ks. s. 12) voitiin havaita, että pyörimisnopeus n riippuu vahvasti ankkurivirrasta I_a^* . Tästä seuraa, että tyhjäkäynnissä, jossa $I_a \approx 0$, eli ϕ on pieni, sarjamoottorin pyörimisnopeudeksi saadaan

$$n_0 \approx \frac{U}{k\phi} \quad (15)$$

* Vuo saadaan kaavasta 16:

$$\phi = K_f^* I_a, \quad (16)$$

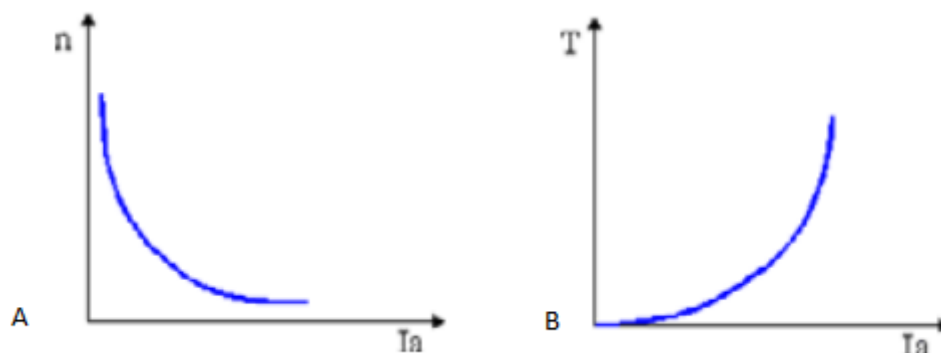
missä K_f on koneen rakenteesta riippuva vakio.

Kaavasta 15 (ks. s. 13) voitiin havaita, että sarjamoottorin pyörimisnopeus on suuri, kun virta I_a on pieni. Tätä ilmiötä, jossa pyörimisnopeus saavuttaa tyhjäkäynnissä vaarallisen suuren arvon, kutsutaan ryntäämiseksi. Ryntäämisen takia moottoria ei saa koskaan päästää täysin kuormittamattomaksi, sillä moottori ei kestä tällaista raskautta. Tästä syystä konetta ei saa käyttää esim. hihnäkäytöissä, sillä hihna voi katketa moottorin käydessä, jolloin kuormitus katoaa. [8, s. 8.]

4.2.3 Sarjamoottorin vääntömomentti

Koska sarjamoottoreille pätee vääntömomentin kaava (kaava 9, ks. s. 9) ja sarjamoottorin magnetointivirtana toimii ankkuri- eli kuormitusvirta (kaava 14, ks. s. 13), vääntömomentti kasvaa kuormituksen kasvaessa ja on verrannollinen kuormitusvirran neliöön (kaava 17). Tästä seuraa, että sarjamoottorin tuottama vääntömomentti on siis hyvä, ja se kasvaa nopeasti kuormituksen kasvaessa, mikä nähdään kuvassa 8:

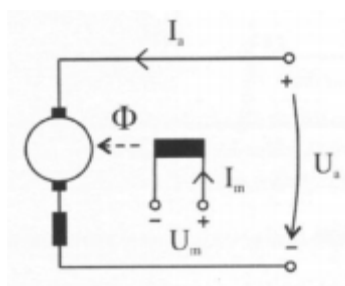
$$M = C\phi I_a = C I_a^2 \quad (17)$$



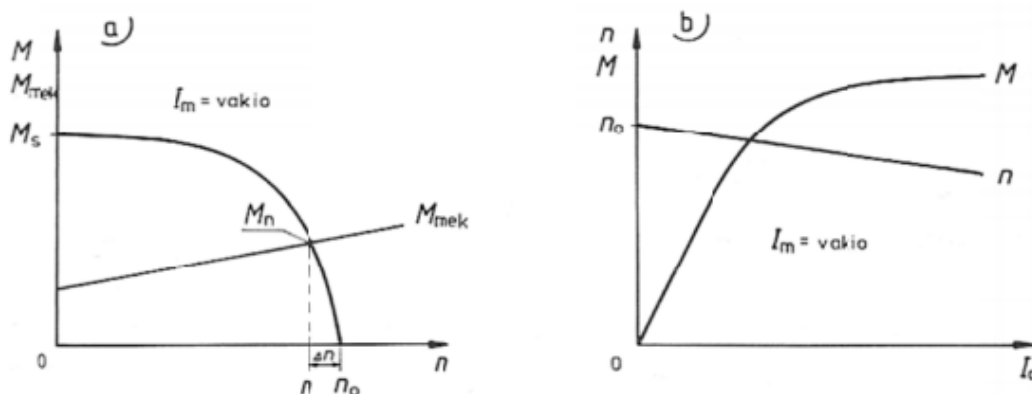
Kuva 8. A) sarjamoottorin pyörimisnopeuden riippuvuus kuormitusvirrasta ja B) momentin riippuvuus kuormitusvirrasta [5, s. 15]

4.3 Vierasmagnetoitu moottori

Vierasmagnetoidussa moottorissa magnetointivirta, joka magnetoi moottorin erillisen magnetointikäämityksen avulla, otetaan ulkoisesta lähteestä kuvan 9 periaatteen mukaisesti. Magneettipiiri on ankkurista erillään ja magnetointia voidaan säätää mm. säätövastuksella. Koneen magnetointivirta riippuu magnetointijännitteestä ja vastuksesta. Kuormituksen muutokset eivät pahemmin vaikuta vierasmagnetoidun moottorin pyörimisnopeuteen, mutta kuorman kasvaessa koneen vääntömomentti kasvaa suhteellisen jyrkästi. Tämän takia koneella on hyvät pyörimisnopeuden ja vääntömomentin säätöominaisuudet.



Kuva 9. Vierasmagnetoidun moottorin periaatekytkentä [10, s. 25]



Kuva 10. Vierasmagnetoidun tasasähkökoneen ominaiskäyrät a) sähkövääntömomentti pyörimisnopeuden funktiona, b) sähkövääntömomentin ja pyörimisnopeuden riippuvuus ankkurivirrasta [8, s. 14]

Kuten kuvasta 10 nähdään (kohta b), moottorin pyörimisnopeus muuttuu vain vähän kuormituksen muuttuessa. Sähköinen vääntömomentti sen sijaan kasvaa melko jyrkästi kuormituksen kasvaessa.

4.3.1 Vierasmagnetoidun moottorin käynnistys

Vierasmagnetoidun koneen käynnistämisen tulee ottaa huomioon, että magnetointivirta on kytketty ja aseteltu arvokilvessä ilmoitetun arvon suuruiseksi, jotta kone saa riittävän käynnistysmomentin. Jos riittävää käynnistysmomenttia ei saada aikaiseksi, kun koneelle syötetään ankkurivirtaa, kone voi ylikuumentua jopa tyhjäkäynnillä.

Koska moottoripiirin resistanssi koostuu pelkästään ankkuripiirin resistanssista, joka on pieni (moottori on käytännössä oikosulussa), on moottori käynnistettävä pehmeästi, jotta välttyttäisiin oikosulun aiheuttamalta virran nousulta. Tämä suoritetaan, kuten sarjakoneen kohdalla joko 1) säätämällä ankkuripiirin jännitettä tai 2) sijoittamalla säätövastus sarjaan ankkuripiirin kanssa.

1) kun säädetään ankkuripiirin jännitettä, voidaan moottori käynnistää säätämällä ankkurijännitettä portaittain välillä $0-U_n$.

2) säätövastus sijoitetaan sarjaan ankkuripiirin kanssa, ja jos lähdejännitettä ei voida säätää, ankkuripiirin kanssa sarjassa tulee käyttää säätövastusta, jota käytetään vain koneen käynnistymisessä.

Vierasmagnetoituun moottoriin pätee samat käynnistysvirran ja virran kaavat kuin sarjamagnetoituun koneeseen (kaavat 13 ja 14, ks. s. 13).

4.3.2 Vierasmagnetoidun moottorin pyörimisnopeuden säätö

Vierasmagnetoidun koneen pyörimisnopeutta voidaan säätää kolmella eri tavalla 1) muuttamalla ankkurijännitettä, 2) muuttamalla magnetoimisvirtaa I_m ja 3) muuttamalla ankkuripiirin resistanssia.

1) Muuttamalla ankkurijännitettä:

Sarjakoneen pyörimisnopeutta alueella $0 - n_n$ säädetään muuttamalla ankkurijännitettä (ankkurijännitteen säätäminen on myös yksi tapa käynnistää moottori, joten käytettäessä tätä tapaa vältetään ylimääräiseltä käynnistysvastukselta)

2) Muuttamalla magnetoimisvirtaa I_m :

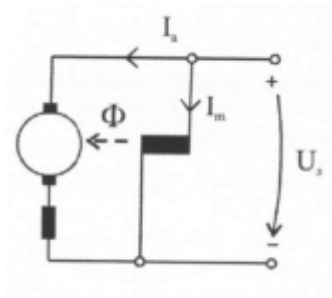
Koska tasavirtamoottorin päävuoto on riippuvainen magnetoimisvirrasta I_m , voidaan nopeussäätö suorittaa muuttamalla magnetoimisvirtaa. Magnetoimisvirran pienentäminen pienentää päävuotoa ϕ , mikä kasvattaa pyörimisnopeutta n . Tätä säätötapaa kutsutaan magneettikentän heikennykseksi. Kentänheikennystä käytetään, kun moottoria ajetaan nimellistä pyörimisnopeutta suuremmilla kierroksilla, yleensä alueella $n = 1 - 2,5 n_n$.

3) Muuttamalla ankkuripiirin resistanssia:

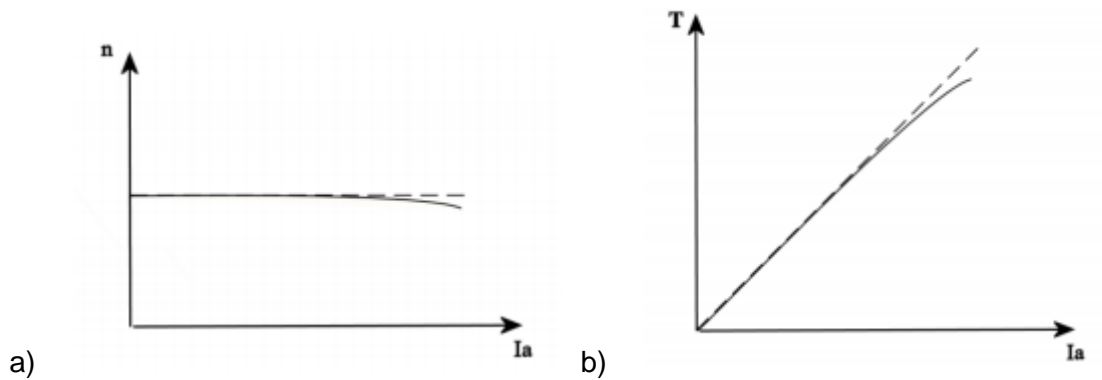
Vierasmagnetoidun koneen pyörimisnopeutta voidaan säätää muuttamalla ankkuripiirin resistanssia säätövastuksella (korvaa käynnistysvastuksen). Koska ylimääräinen resistanssi tuottaa jännitehäviöitä, tästä tavasta on luovuttu lähes kokonaan. Lisäksi ankkurivirran ollessa pieni säätöresistanssin suuruus vaikuttaa vain vähän pyörimisnopeuteen.

4.4 Sivuvirtamoottori

Sivuvirtamoottorin rakenne on lähes vastaava vierasmagnetoidun kanssa. Eroa on vain magnetointitavassa. Sivuvirtamoottorin magnetointijännite otetaan ankkuripiirin (roottopiirin) rinnalta (kuva 11, ks. seur. s.). Sivuvirtamoottoreille tyypillistä on, että pyörimisnopeus muuttuu vain vähän kuormituksen muuttuessa ja että kuormituksen kasvaessa vääntömomentti kasvaa jyrkästi, kuten kuvasta 12 (ks. seur. s.) nähdään. Tämän takia sivuvirtamoottoreilla on hyvät pyörimisnopeuden ja vääntömomentin säätöominaisuudet. Moottorin pyörimissuuntaa on myös helppo muuttaa vaihtamalla joko magnetointi- tai roottorikäämityksen virran napaisuutta. Jos molempien napaisuudet vaihdetaan, pyörimissuunnan muutosta ei tapahdu.



Kuva 11. Sivuvirtamoottorin periaatekytkentä [8, s. 25]



Kuva 12. a) Sivuvirtamoottorin pyörimisnopeus kuormituksen funktiona. b) Sivuvirtamoottorin vääntömomentti roottorivirran funktiona [5, s. 13]

Sivuvirtamoottorin verkosta ottama kokonaisvirta on $I = I_m + I_a$.

Koska sivuvirtamoottoriin pätee jännitteen kaava (kaava 4), moottorin virran tarve saadaan muotoon

$$I_a = \frac{U - E}{R_a} = \frac{U - kn\phi}{R_a} \quad (18)$$

Yhtälöstä 18 voitiin nähdä, että moottorin ottama virta riippuu pyörimisnopeudesta n .

4.4.1 Sivuvirtamoottorin käynnistys

Sivuvirtamoottori käynnistetään samalla tavalla kuin vierasmagnetoitumoottori (ks. 4.3.1) eli joko nostamalla ankkuripiirin jännitettä tai sijoittamalla säätövastussarjaan ankkuripiirin kanssa. Tämä siksi, että käynnistäessä myös sivuvirtamoottorin vastasähkömotorinen voima E on nolla, koska pyörimisnopeus n on nolla, ja moottorin resistanssin ollessa pieni häviöiden minimoimiseksi virta on suuri.

4.4.2 Sivuvirtamoottorin pyörimisnopeuden säätö

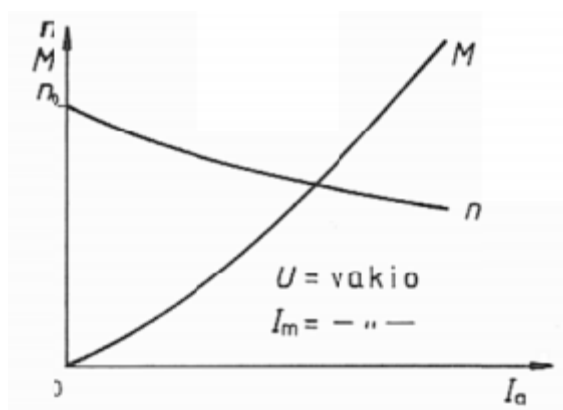
Vaikka sivuvirtamoottori ja vierasmagnetoitu moottori ovat ominaisuuksiltaan lähes samanlaiset, poikkeaa niiden pyörimisnopeuden säätäminen toisistaan. Sivuvirtamoottorin pyörimisnopeus pysyy lähes samana, jos liitinjännitettä muutetaan. Tämä johtuu siitä, että magnetoimisvirta I_m muuttuu samassa suhteessa kuin ankkurijännite U . Pyörimisnopeutta voidaan säätää siis vain kahdella tavalla 1) muuttamalla magnetoimisvirtaa sarjavastuksella tai 2) säätämällä ankkuripiirin resistiivistä jännitehäviötä sarjavastuksella.

4.5 Kompoundimoottori

Kompoudikoneessa, jota kutsutaan myös yhdysvirtamagnetoiduksikoneeksi, on sekä sarja- että sivuvirtakäämitykset. Riippuen kumpi käämi on hallitseva on moottorin sarja- tai sivuvirtamoottorin ominaisuudet hallitsevia. Yleensä kompoundimoottoreilla sivuvirta ominaisuudet ovat hallitsevia, jolloin sivuvirtakäämitykset toimivat varsinaisina magnetoitinkäämityksinä, ja sarjakäämityksellä joko heikennetään tai vahvistetaan sivuvirtakäämityksen muodostamaa magneettikenttää. Kompoudikonetta kutsutaan vastakompoundoituksi, jos kentät heikentävät toisiaan (esim. sarjakäämityksen kenttä heikentää sivuvirtakäämityksen synnyttämää kenttää) ja myötäkompaundoituksi, kun kentät vahvistavat toisiaan (esim. sarjakäämityksellä vahvistetaan sivuvirtakäämityksen kenttää).

Yleisimmin käytetty kompoundimoottori on vierasmagnetoitu myötäkompaundoitu moottori. Tällainen moottori tuottaa suuremman vääntömomentin kuin vierasmagnetoitu moottori, mikä johtuu siitä, että kuormituksen kasvaessa ankkurivirta kasvaa, mikä kasvattaa samalla sarjakäämityksen tuottamaa vuota. Toisin sanoen päävuo kasvaa

kuormituksen kasvaessa, mikä pienentää pyörimisnopeutta enemmän kuin vierasmagnetoitu moottori liitinjännitteen ja magnetoimisvirran pysyessä vakiona. Kuvassa 13 esitetään myötäkompaundoidun moottorin pyörimisnopeus ja vääntömomentti ankkurivirran (kuormituksen) funktiona.



Kuva 13. Myötäkompaundoidun kompaundimoottorin ominaiskäyrät [8, s. 16]

Kenttää heikentävä käämitys ei saa olla liian voimakas, sillä kuormituksen kasvaessa tarvitaan lisää vääntömomenttia, joka on vuon funktio. Heikentävä käämitys heikentää vuota ja tämän lisäksi ankkurireaktio heikentää vuota ankkurivirran kasvaessa. Tämän takia liian voimakas kentänheikennyskäämi voi saada moottorin epävakaaksi.

4.5.1 Kompoundimoottorin käynnistys

Kompoundimoottorit käynnistetään samalla tavalla kuin sarja- ja vierasmagnetoidut moottorit (ks. 4.2.1 ja 4.3.1).

4.5.2 Kompoundimoottorin pyörimisnopeuden säätö

Kompoundimoottorin pyörimisnopeutta säädellään samalla tavalla kuin vierasmagnetoidun koneen pyörimisnopeutta. Koska kompaundimoottorin hallitseva käämi voi olla joko hallitseva sarja- tai sivuvirtakäämi ja hallitsevan käämin ominaisuudet, riippuu säädön voimakkuus siitä, kumpi on hallitseva.

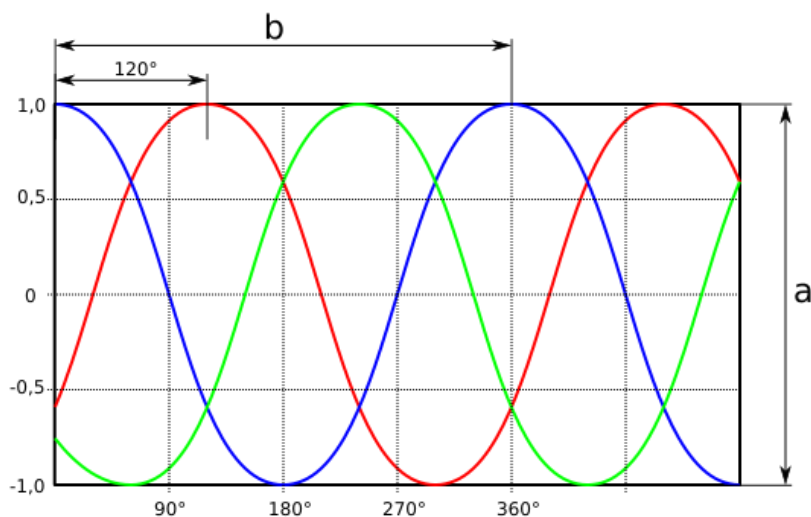
Moottorin käytös kuormituksen kasvaessa riippuu siitä, onko moottori vasta- vai myötäkompaudoitu. Myötäkompaudoitun moottorin ollessa kyseessä kasvaa vuo ϕ kuormituksen kasvaessa, jolloin kaavan 12 mukaisesti vuon kasvaessa pyörimisnopeus laskee. Koska kom poundimoottorissa on myös sivumoottorin ominaisuuksia, pyörimisnopeus laskee hitaammin kuin sarjamoottorin kohdalla. Tästä syystä myötäkompautoitu moottori sopii korvaamaan sarjamoottorin tilanteissa, joissa moottorin pääsee tyhjäkäynnille. Vastakompaudoitun moottorin tapauksessa vuo ϕ pienenee kuorman kasvaessa. Moottorin heikentävän käämityksen voimakkuudesta riippuen pyörimisnopeus voi kasvaa, pysyä vakiona tai laskea.

5 Vaihtosähkömoottorit

Vaihtosähkömoottorien toiminta perustuu pyörivään magneettikenttään koneen sisällä. Vaihtosähkömoottorien yleisimmät tyypit ovat epätahti- ja tahtimoottorit. Vaihtosähkömoottoria kutsutaan epätahtimoottoriksi, jos roottorin pyörimisnopeus poikkeaa koneen sisällä pyörivän magneettikentän pyörimisnopeudesta (eli tahtinopeudesta). Vastaavasti vaihtosähkömoottoria kutsutaan tahtikoneeksi, jos roottori pyörii samaa nopeutta magneettikentän kanssa. Tahtimoottoria voidaan myös kutsua synkronikoneeksi ja epätahtimoottoria asynkronikoneeksi. Kuten tasasähkömoottoreita, myös vaihtosähkömoottoreita voidaan käyttää lähes kaikissa tapauksissa generaattorina.

5.1 Kiertokenttä kolmivaihekäämityksessä

Vaihtosähkömoottorin pyörivä magneettikenttä luodaan staattorikäämityksen avulla. Perinteisissä kolmivaihemoottoreissa pyörivä magneettikenttä tuotetaan syöttämällä kolmivaiheiseen staattorikäämitykseen kolmivaiheinen vaihtojännite 120° :n vaihesiirrolla. Kuvasta 14 nähdään kolmivaiheinen vaihtojännite 120° :n vaihesiirrolla.



Kuva 14. Kolmivaihevirta 120° :een vaihesiirrolla [11]

Kun staattorikäänitys kytketään symmetriseen kolmivaiheiseen jännitteeseen, käämeissä alkaa kulkea symmetrinen virta. Virta synnyttää käämeissä magnetomotorisen voiman, joka on virran kanssa samanvaiheinen. Tämä magnetomotorinen voima on huipussaan yhdessä käämissä hetkellä, jolloin kyseisen käämin virta on huipussaan. Samaan aikaan muiden vaiheiden virrat ovat puolet negatiivisesta maksimistaan, kuten kuvasta 14 (ks. s. 22) nähtiin. Resultoiva magnetomotorinen voima on kuitenkin samansuuntainen maksimiarvoisen vaiheen kanssa. Tämän takia staattorissa syntyy magneettivuo, jolla on N- ja S-navat. Kun kenttä pyörähtää ja käämi, jolla on virta huipussaan, vaihtuu, pyörähtää myös magneettikenttä eteenpäin. Tämä synnyttää pyörivän magneettikentän.

5.2 Kiertokentän nopeus

Kierto- eli staattorikentän nopeus (synkroninen nopeus) riippuu vaihtosähkön taajuudesta f , ja napapariluvusta p kaavan 19 mukaisesti:

$$n_s = \frac{f}{p}, \quad (19)$$

missä n_s on synkroninen nopeus, f on taajuus ja p on napapariluku.

Kaavaa 19 käyttämällä saadaan kaksinapaisen (yksinkertaisin vaihtosähkökone, napapari on yksi) staattorikentän nopeudeksi Suomessa (50 Hz) 3 000 r/min. Moottoriin voidaan myös käämiä sama vaihe moneen kertaan. Kun käämit asetellaan tasavälein (esim. kaksinapaisessa koneessa 180° :n ja nelinapaisessa 90° :n välein), kasvaa moottorin magneettikentän kierrosten määrä ja pyörimisnopeus laskee, esim. nelinapainen (napapariluku on 2) moottori pyörii 50 Hz:llä 1 500 r/min.

5.3 Epätahtimoottorit

Epätahtimoottoreiksi kutsutaan vaihtosähkömoottoreita, joiden roottori pyörii erinopeudella (aina hitaammin) kuin moottorin sisällä pyörivä magneettikenttä. Yleisimmät epätahtimoottorit ovat oikosulku- ja liukurengasmoottoreita, mutta myös muunlaisia erikoismoottoreita on olemassa. Täysin suljettu epätahtikone on yksinkertaisuutensa ja

kestävyytensä takia teollisuuden yleisin käytetty sähkömoottorityyppi. Epätahtimoottoreita voidaan liittää joko suoraan verkkoon tai muuntajaan, jolla pystytään säätämään pyörimisnopeutta.

5.3.1 Epätahtimoottorien toimintaperiaate

Epätahtimoottorin pyörivä magneettikenttä leikkaa roottorikäämin sauvoja, jolloin sauvoihin indusoituu sähkömotorinenvoima E_r , joka saa aikaan roottorivirran I_r . Roottorivirran ja pyörivän magneettikentän välinen voimavaikutus saa roottorin pyörimään. Mikäli roottori saavuttaisi pyörivän magneettikentän, se ei enää leikkaisi magneettivuota. Tällöin roottoriin ei enää indusoituisi jännitettä, eikä se enää pyörisi. Liukurengasmoottorin roottorikäämitykseen syntyy myös smv E_r , mutta kone lähtee pyörimään vain, jos koneen ulkopuolelle tuotujen käämipäät on yhdistetty. Jos päät ovat irti, virta on nolla eikä moottori kehitä momenttia.

Epätahtimoottorien teoreettisena tahtinopeutena (miten nopeasti pyörivä magneettikenttä pyörii, eikä miten nopeasti roottori pyörii) käytetään synkronista nopeutta n_s kaavan 19 (ks. s. 23) mukaisesti.

Epätahtikoneiden todellista pyörimisnopeutta kuvataan yleensä jättämän avulla. Jättämä on pyörivän magneettikentän ja roottorin välinen nopeusero, joka yleensä ilmoitetaan suhteellisenä jättämänä eli jättämän prosentuaalisena arvona. Suhteellinen jättämä lasketaan kaava on kaavasta 20:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} * 100\%, \quad (20)$$

missä s on jättämä, n_s on synkroninen nopeus ja n on todellinen pyörimisnopeus. [7, s. 51.]

Pienten ja keskisuurten moottorien jättämät ovat kuormituksesta riippuen 5 - 15 %. Suurilla moottoreilla jättämä on 0,8 - 2 %.

5.3.2 Epätahtimoottorin käynnistäminen

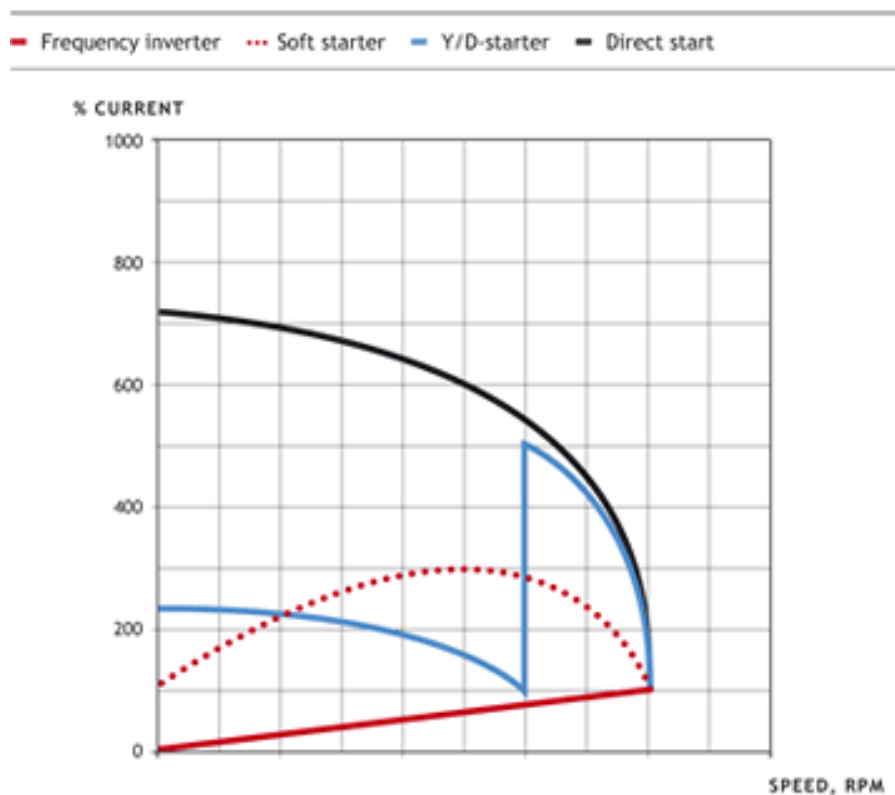
Epätahtimoottori alkaa pyöriä, kun sähköinen vääntömomentti on suurempi kuin pyörimistä vastustavan kuorman mekaaninen vääntömomentti. Roottorin pyörimisnopeuden kasvaessa staattorikentän ja roottorin sauvojen leikkausnopeus pienenee, mikä pienentää myös roottorin sähköistä vääntömomenttia. Kun sähköinen vääntömomentti on yhtä suuri mekaanisen vääntömomentin kanssa, vakiintuu moottorin pyörimisnopeus.

Epätahtimoottorien käynnistysvirta on noin 5 - 10 -kertainen nimellisvirtaan verrattuna. Vaikka käynnistymisvirta on suuri, moottori ei aina kehitä tarpeeksi suurta käynnistymismomenttia, jolloin moottori ei lähde pyörimään. Suuri käynnistymisvirta voi myös verkosta riippuen aiheuttaa verkkoon liian paljon häiriöitä, jolloin käynnistymisvirtaa täytyy rajoittaa erillisellä käynnistyslaitteella. Mikäli moottoria ohjataan taajuusmuuttajalla, moottori ei tarvitse erillistä käynnistyslaitetta.

Yksi edellä mainittu käynnistyslaite on tähti-kolmio-käynnistin, jota kutsutaan myös Y/D-käynnistimeksi. Moottori kytketään käynnistuksen ajaksi tähteen, jolloin moottorin

käämityksen jännite on $\frac{1}{\sqrt{3}}$ nimellisjännitteestä. Tällöin vastaavasti käämitysvirta ale-

nee samassa suhteessa. Pienemmän jännitteen takia moottorin verkosta ottama virta on vain kolmasosa kolmiokytkentään verrattuna, mikä samalla laskee käynnistysmomentin kolmasosaan. Moottorin lähdettyä pyörimään muutetaan kytkentä kolmioon, sillä kolmiossa moottori tuottaa suuremman momentin. Kuvasta 15 (ks. seur. s.) nähdään tähti-kolmio-käynnistuksen (sininen) ja suoran startin (kolmiokäynnistys) välinen ero. Kuvassa on myös taajuuden muuttajan (punainen) ja pehmeän käynnistuksen (punainen katko) avulla tehty käynnistys. Työssä ei kuitenkaan paneuduta näihin tapoihin.



Kuva 15. Epätahtimootorin käynnistys [12]

Liukurengasmootorit varustetaan yleensä roottoriin kytkettävällä säätövastuksella. Tämän vastuksen avulla voidaan säätää käynnistysvirtaa sekä vääntömomenttia. Aluksi vastus on suuri, jolloin momentti on suuri. Kun moottori käynnistyy, pienennetään vastuksen arvoa, jolloin nopeus kasvaa. Kun liukurengasmootori on saavuttanut nimellinopeutensa, vastus oikosuljetaan, jolloin moottori jää pyörimään tavallisena oikosulkumoottorina.

5.3.3 Epätahtimootorien pyörimisnopeuden säätö

Epätahtimootorien pyörimisnopeus n saadaan kaavasta 21 [13, s. 13]

$$n = 60 \cdot \frac{f(1-s)}{p}, \quad (21)$$

missä f on taajuus, s on jättämä ja p on napapariluku.

Kuten kaavasta 21 (ks. s. 26) nähdään, moottorin pyörimisnopeuteen vaikuttaa verkon taajuus, moottorin jättämä ja napapariluku. Taajuutta pystytään säätämään helposti taajuusmuuttajalla, jolla säädellään moottori syötettävän virran taajuutta.

Staattorikäämityksen napaparilukua pystytään säätämään vain vähän, sillä staattoriin pystytään rakentamaan vain kaksi eri käämitystä, joista jompikumpi toimii vuorollaan. Staattorin napapariluvut voivat olla esim. $p = 1$ ja $p = 2$, jolloin moottorin nopeudet 50 Hz:n taajuudella ovat 3 000 r/min ja 1 500 r/min riippuen, kumpi käämitys on käytössä.

Jättämää pystytään säätämään vain liukurengasmoottorilla roottoriresistanssia säätämällä. Jättämän kasvaessa yhä suurempi osa ilmvälitehosta muuttuu roottorin resistanssissa lämmöksi, jolloin moottorin hyötysuhde huononee nopeuden hidastuessa.

Epätahtimoottorien pyörimissuuntaa pystytään vaihtamaan helposti, sillä pyörimissuunta vaihtuu, kun minkä tahansa vaiheen paikkaa muutetaan kytkennän muutoksella. Tällöin pyörivämagneettikenttä pyörii toiseen suuntaan, ja tämä taas alkaa pyörittämään roottoria toiseen suuntaan.

5.3.4 Epätahtimoottorien vääntömomentti

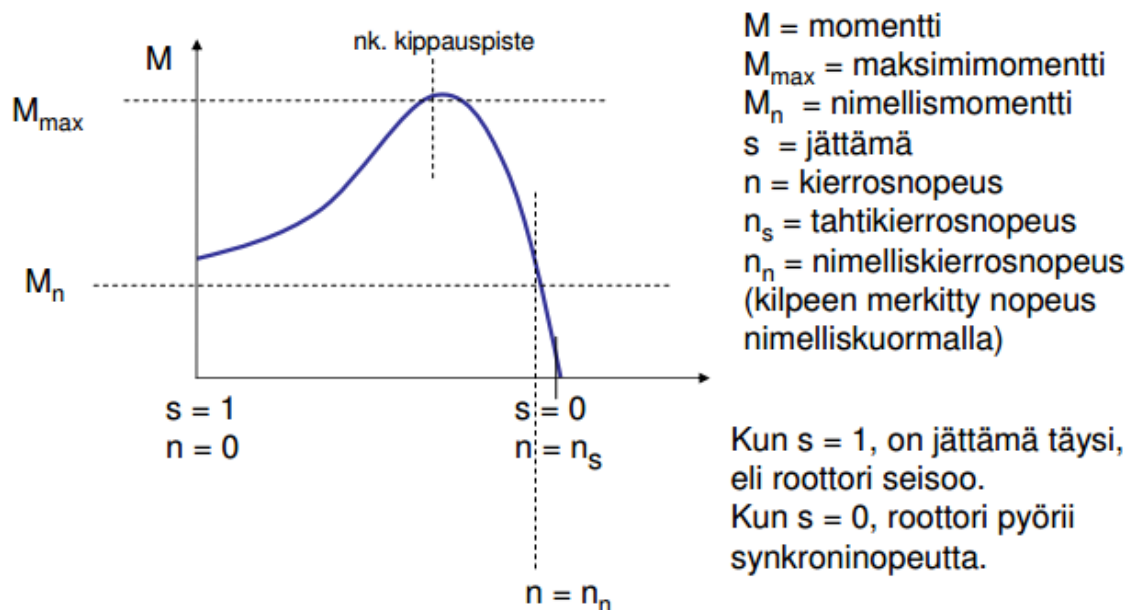
Vääntömomentin kasvaessa pienenee oikosulkumoottorien pyörimisnopeus, sillä moottoria kuormittaessa sen mekaaninen vääntömomentti kasvaa. Tämä puolestaan vastustaa sähköistä vääntömomenttia. Moottorin pyörimisnopeuden pienentyessä kasvaa roottorin ja staattorin pyörivän magneettikentän välinen nopeusero, jolloin roottorin virta kasvaa. Kun roottorin virta kasvaa, kasvaa myös moottorin sähköinen vääntömomentti. Kun moottorin ja kuormituksen momentit ovat yhtä suuret, vakiintuu pyörimisnopeus. Tästä johtuen moottorin pyörimisnopeus ei ole vakio, vaan riippuu kuormituksesta.

Epätahtimoottorin vääntömomentti T saadaan kaavasta 22 [15, s. 10].

$$T = \frac{P}{2 * \pi * \frac{n}{60}} , \quad (22)$$

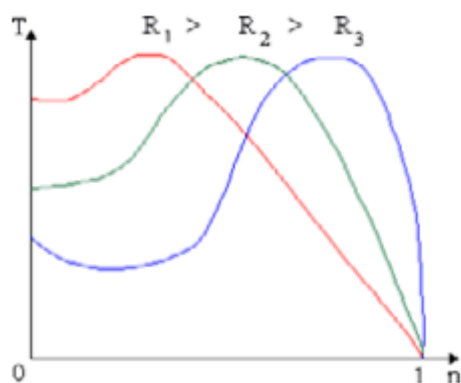
missä P on moottorin tuottama mekaaninen teho ja n on kierrosta minuutissa.

Oikosulkumoottoreilla on tyypillinen momentin kuvaaja, joka nähdään kuvassa 16. Kuvasta nähdään, että oikosulkumoottorien maksimimomentti on jopa 2 - 3-kertainen nimellismomenttiin verrattuna. Moottoria voidaan pyörittää nimellismomenttia suuremmalla momentilla hetken aikaa, mutta tällöin riittävästä jäähdyttämisestä tulee huolehtia, jottei moottori ylikuumene. Moottoria ei saa kuormittaa maksimimomenttia suuremmalla momentilla ettei moottori kippaa. Kippaus tarkoittaa sitä, että moottori pysähtyy, kuten kuvasta 16 nähdään:



Kuva 16. Oikosulkumoottorin vääntömomenttikäyrä [16, s. 1]

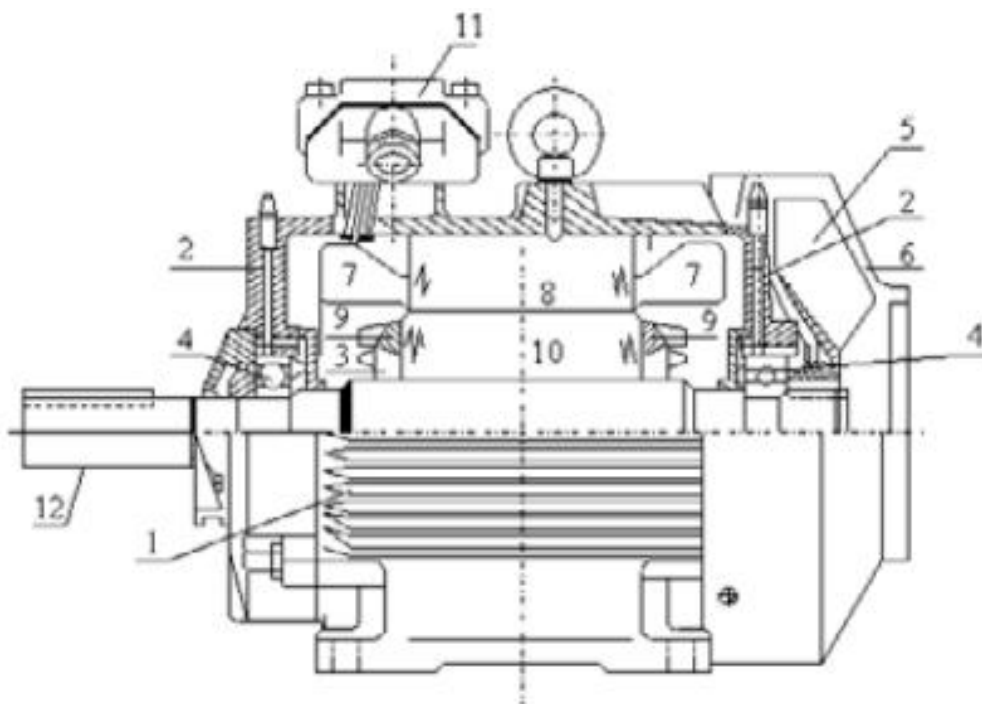
Käyrän muotoon pystytään vaikuttamaan koneen rakenteella ja erityisesti roottoriipiirin resistanssilla. Resistanssin kasvaessa kasvaa myös jättämä ja käynnistysmomentti. Roottoriipiirin resistanssin kasvaessa myös moottorin maksimimomentti saavutetaan pienemmillä nopeuksilla. Resistanssi ei vaikuta maksimimomentin suuruuteen, kuten kuvasta 17 (ks. seur. s.) nähdään.



Kuva 17. Oikosulkumoottorin momenttikäyrät eri roottoriresistanssin arvoilla [13, s. 11]

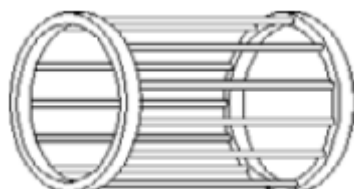
5.3.5 Oikosulkumoottori

Oikosulkumoottori on saanut nimensä oikosuljetusta käämityksestä. Oikosulkumoottori on yksinkertaisen rakenteensa vuoksi yleisin käytössä oleva epätahtimoottori. Toisin kuin muilla yleisimpiin kuuluviin moottorityypeillä, oikosulkumoottorissa ei ole erillistä magnetointikäämityksiä vaan ainoastaan suhteellisen yksinkertaiset staattori- ja roottorikäämitykset. Esimerkkikuvasta 18 (ks. seur. s.) nähdään moottorin toiminnan kannalta tärkeimmät osat, joita ovat staattorin käämitykset levypaketteineen (kohdat 7,8) ja roottorin käämitys levypaketteineen (kohdat 9, 10). Oikosulkumoottorit ovat mekaanisesti kestäviä, sillä käytännössä moottorin osista kuluu ainoastaan laakerit.



Kuva 18. Oikosulkumoottorin rakenne: 1) staattorin runko, 2) laakerikilvet, 3) roottori, 4) laakerit, 5) tuuletin, 6) tuulettimen suojus, 7) staattorikäämitys, 8) staattorin levypaketti, 9) roottorin käämitys, 10) roottorin levypaketti, 11) liitäntäkotelo, 12) akseli [13, s. 8]

Roottorikäämitys on tehty häkkikäämityksenä, joka on rakenteeltaan yksinkertainen, rautalevyistä koottu lieriö, jonka pinnalla on käämitysurat. Niissä kulkee roottoriraudasta eristämättömät käämit, joiden päät on oikosuljettu oikosulkurenkailla kuvan 19 mukaisesti. Yleensä roottorikäämityksessä on yksi sauva uraa kohden, mutta kun moottorilta halutaan erilaisia ominaisuuksia, sauvan muotoa tai määrää uraa kohden voidaan vaihdella. Käämitykset ovat tehty painevalelumenetelmällä alumiinista tai oikosulkurenkaisiin juotetuista kuparisauvoista. Staattorikäämitys on symmetrinen, ja se on kytketty joko tähteen tai kolmioon.

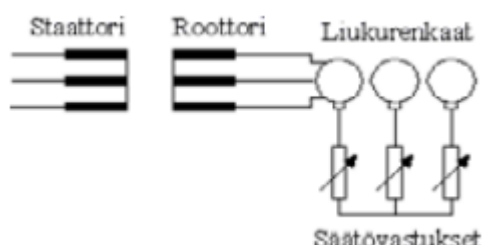


Kuva 19. Oikosulkumoottorin häkkikäämitys [13, s. 8]

Oikosulkumoottori voi olla joko yksi- tai kolmivaiheinen. Kolmivaiheinen moottori ei tarvitse erillistä lisälaitetta tuottaakseen pyörivää magneettikenttää, joka luo edellytyksen koneen toiminnalle. Yksivaiheinen moottori taas ei synnytä itsestään pyörivää magneettikenttää, vaan sykkivän magneettikentän. Tämä puolestaan synnyttää tilanteen, jossa on kaksi vastakkaissuuntaisesti pyörivää magneettikenttää, joka ei pysty itsestään käynnistämään moottoria. Moottori käynnistetään antamalla sille alkunopeus, joka voidaan antaa kumpaan suuntaan tahansa (moottori voi pyöriä molempiin suuntiin). Alkunopeus taas saadaan aikaisesti asettamalla moottoriin apukäämi 90 sähköasteen päähän pääkäämistä. Kun apukäämi on käytössä, apu- ja pääkäämin virrat ovat lähes 90 asteen vaihesiirrossa, ja kone toimii kuin kaksivaiheinen moottori,. Tällöin koneen ilmaväliin syntyy kierokenttää vastaava kenttä ja roottori lähtee pyörimään. Käynnistysen jälkeen apukäämi sammutetaan.

5.3.6 Liukurengasmoottori

Liukurengasmoottorit ovat rakenteeltaan ja ominaisuuksiltaan lähes oikosulkumoottorien kaltaisia. Tämä johtuu siitä, että liukurengasmoottori poikkeaa oikosulkumoottorista vain roottorin osalta. Roottorikäämitys on eristetty roottorista ja kytketty tähteen toisesta päästä. Toiset päät tuodaan moottorin ulkopuolelle käyttäen apuna hiiliharjoja ja liukurenkaita, joista moottori on saanut nimensä. Moottorin ulkopuolelle tuotuihin päihin kytketään säätövastus, jolla pystytään säätämään moottorin käynnistysvirtaa ja momenttia. Kuvasta 20 nähdään liukurengaskoneen kytkentäperiaate. Säätövastusta käytetään yleensä vain käynnistykseen, sillä moottorin lähdettyä käyntiin roottorikäämitys oikosuljetaan joko asettamalla säätövastus nolleen tai oikosulkulaitteella. Oikosulkulaitte asettaa roottorin oikosulkuun ja nostaa hiiliharjat ylös, jolloin vältetään hiiliharjojen turhalta kulumiselta ja turhalta hankaushäviöltä.



Kuva 20. Liukurengasmoottorin kytkentäperiaate [13, s. 9]

5.4 Tahtimoottorit

Tahtimoottorin roottori pyörii moottorin sisäisen magneettikentän ja syöttävän verkon taajuuden kanssa samalla nopeudella, mistä tahtimoottori nimitys tuleekin. Teollisuuden käyttämät suuret moottorit ovat yleensä tahtimoottoreita, sillä ne ovat usein taloudellisin vaihtoehto. Tahtikoneita käytetään yleisesti kolmivaihegeneraattoreina ja kun tarvitaan yli 1 MW mekaanista tehoa. Nykyisin kestromagneettimoottorit ovat yleistyneet keski- ja pienitehoisissa moottorisovelluksissa. Tahtikoneita käytetään yleensä kolmivaiheisinä generaattoreina.

Tahtimoottorit ovat rakenteeltaan lähes samankaltaisia kuin epätahtimoottorit, sillä ainoastaan roottorin rakenne on erilainen. Tahtimoottoreita ovat vierasmagnetoidut moottorit (avo- ja umpinapamoottorit, joita kutsutaan yleisesti vain tahtimoottoreiksi), synkronireluktanssimoottorit ja kestromagneettimoottorit.

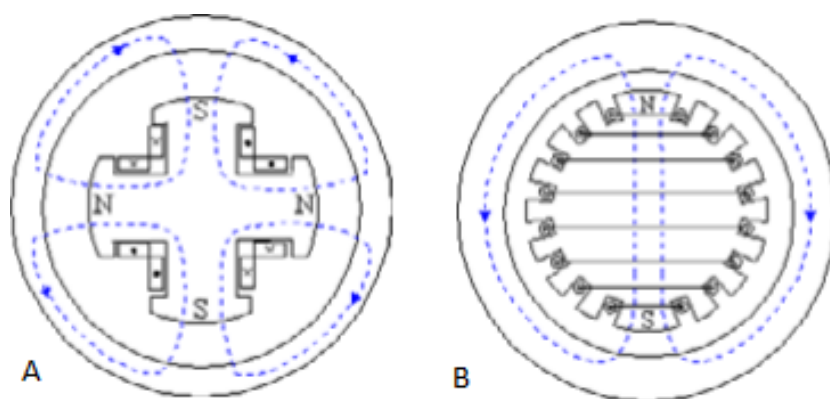
5.4.1 Tahtimoottorin roottorirakenne

Tahtikoneen roottori voidaan rakentaa joko avo- tai umpinapaiseksi. Avonapaista roottoria käytetään pienillä nopeuskierroksilla (n. 75 - 500 r/min), kun taas umpinapaista käytetään suurilla nopeuksilla (n. 3 000 r/min). Roottorin magneettivuo synnytetään tasajännitteellä. Tätä vuota kutsutaan päävuoksi. Jos päävuon synnyttämä tasasähkö syötetään moottorin ulkopuolelta, moottoria kutsutaan harjalliseksi. Jos tasajännite synnytetään sisäisellä generaattorirakenteella, kutsutaan moottoria puolestaan harjattomaksi. Kuvassa 21 (ks. seur. s.) havainnollistetaan avo- ja umpinapaisen roottorien rakennetta. Jos napapyörä on valmistettu kestromagneetista, erillistä magnetointivirtaa ei tarvita.

Umpinapaisen moottorin roottori on sylinterimäinen, jossa magnetointikäämitys on sijoitettu roottorin uriin. Uria ei ole sijoitettu tasaisesti roottorin kehälle, vaan välissä on myös alueita, joissa ei ole uria. Näitä urattomia alueita kutsutaan magneettinavoiksi. Magneettinavoilla pyritään saamaan aikaan mahdollisimman sinimuotoinen vuontiheys ilmavälissä.

Avonapakoneen roottori ei ole sylinterimäinen, kuten umpinapaisen, vaan roottori on tehty umpiteräksestä, joka koostuu erillisistä navoista (avonavoista), joista moottorin nimi tulee. Roottori on rakennettu umpiteräksestä, sillä tasasähköllä napojen vuot eivät

vaihtelee, jolloin ei synny rautahäviöitä. Roottorin akselille on sijoitettu koneen napaluvun mukainen määrä magneettinapoja ja myös staattorille on sijoitettu yhtä monta magneettinapaa. Jokaisella navalla on omat magnetointikääminsä, jotka on kytketty sarjaan siten, että navat magnetoituvat vuorotellen S- ja N-navoiksi. Käämitys on rakennettu joko lattakuparista tai muotolangasta.



Kuva 21. Tahtikoneen a) 4-napainen avonaparoottori b) 2-napainen umpinaparoottori [5, s. 1]

Roottorin magnetointivirta voidaan kestopagneettitahtikoneessa korvata magneettien magnetomotorisen voiman avulla. Kestomagneettimateriaali on ilmankaltaista materiaalia, joten kestopagneetti ei tee koneesta avo- tai umpinapaista. Jos magneetit on upotettu roottoriin tai jos magneetit on varustettu napakengin, koneesta tulee avonapainen magneettiselta luonteeltaan, ja se kehittää myös reluktanssivääntömomenttia. Jos kestopagneettimateriaali on teräslieverön pinnalla, tai roottori on vain kestopagneettia, kone on magneettisesti luonteeltaan umpinapainen. [11, s. 45.]

5.4.2 Tahtimoottorin käynnistys

Tahtimoottorin käynnistäminen riippuu siitä, miten moottori on rakennettu. Jos moottoriin on sijoitettu häkki- eli vaimennuskäämitys, moottori voidaan käynnistää suoraan verkkoon. Tahtimoottorien häkkikäämitys on kuitenkin usein liian heikko käynnistääkseen moottoria riittävän nopeasti. Häkkikäämituksen ensisijainen tarkoitus onkin tasata moottorin käyntiä erilaisissa kuormitustilanteissa. Mikäli häkkikäämitys on tarpeeksi vahva, tahtimoottori voidaan käynnistää samalla tavalla kuin oikosulkumoottori (ks. kohta 5.3.2). Ilman häkkikäämitystä olevia moottoreita ei voida mitenkään käynnistää suoraan verkkoon, vaan käynnistykseen tarvitaan taajuudenmuuttajaa, jolloin moottori käynnistyy suoraan tahtiin.

Tahtimoottoria käynnistäessä tulee myös kiinnittää huomiota tasavirtamagnetointiin. Magnetointi tulee olla päällä, jos käytetään taajuudenmuuttajaa, mutta jos moottori käynnistetään ilman taajuudenmuuttajaa, tasavirtamagnetointi tulee olla pois päältä. Tämä johtuu siitä, että tasavirtamagnetointi voi aiheuttaa napakäämin vastakkaiskentän, joka voi estää koneen käynnistymisen.

5.4.3 Tahtimoottorin pyörimisnopeus

Tahtimoottorien pyörimisnopeus on suoraan sidoksissa syöttävän verkon taajuuteen f , kuten kaavasta 23 nähdään.

$$n = 60 * \frac{f}{p}, \quad (23)$$

missä on pyörimisnopeus, f on taajuus ja p on napapariluku.

Tahtimoottorien pyörimisnopeuteen pystytään siis vaikuttamaan joko napapariluvulla tai taajuudella. Taajuutta pystytään nykyisin säätämään helposti taajuudenmuuntajilla, joita on erilaisia. Työssä ei esitellä erilaisia taajuudenmuuttajia, vaan todetaan, mikä olisi paras muuttaja tietyllä moottorilla, jos muuntajasta on väliä.

5.4.4 Tahtimoottorin vääntömomentti

Tahtimoottorien vääntömomentin kaava on kaava 24:

$$T = \frac{P_e}{\omega_m} = \frac{P_e}{2\pi * f_m} = \frac{60 * P_e}{2\pi * n}, \quad (24)$$

missä T on vääntömomentti, P_e on moottorin mekaaninen teho, ω_m on moottorin kulmapyörimisnopeus, f_m on moottorin taajuus, ja n on pyörimisnopeus.

Moottorin mekaaninen teho P_e saadaan muunnettua sähköiseksi tehoksi P_s hyötysuhteen η avulla. Sähköisen tehon kaavaksi saadaan 25:

$$P_s = \frac{P_e}{\eta}, \quad (25)$$

Sähköinen teho P_s voidaan laskea myös kaavalla 26 kolmivaihetapauksissa.

$$P_s = \sqrt{3} U^* I^* \cos\varphi, \quad (26)$$

missä U on jännite, I on virta ja $\cos\varphi$ on tehokerroin.

Kaavasta 24 (ks. s. 34) nähdään, että vääntömomentti määräytyy pyörimisnopeuden ja moottorin tehon mukaan. [14, s. 15.]

5.5 Synkroninen reluktanssikone

Synkroninen reluktanssikone on rakenteeltaan yksinkertainen. Reluktanssimoottorin roottorilla ei ole käämitystä, eikä kestopagneettia, kuten kuvasta 22 (ks. seur. s.) nähdään, vaan koneen vääntömomentin tuottokyky perustuu koneen roottorin reluktanssieroihin. Kone tuottaa ainoastaan reluktanssivääntömomenttia. Koneen rakenne on muutoin lähes samanlainen kuin avonapaisen tahtikoneen, sillä ainoastaan edellä mainittu roottori on erilainen. Synkronireluktanssimoottori tarvitsee aina oman vektorisäätöisen taajuusmuuttajaohjauksen.

Moottorin hyvinä puolina voidaan pitää hyvää hyötysuhdetta, tehokkuutta, synkronista käyntiä ja kevyttä rakennetta. Synkronisen käynnin ansiosta moottori ei tarvitse erillisiä pyörintäantureita. Moottorin huonoksi puoleksi luetaan pieni ilmaväli staattorin ja roottorin välissä. Pienen ilmavälin takia moottori ei sovellu tärinälle alttiisiin kohteisiin.



Kuva 22. Synkronisen reluktanssikone [15]

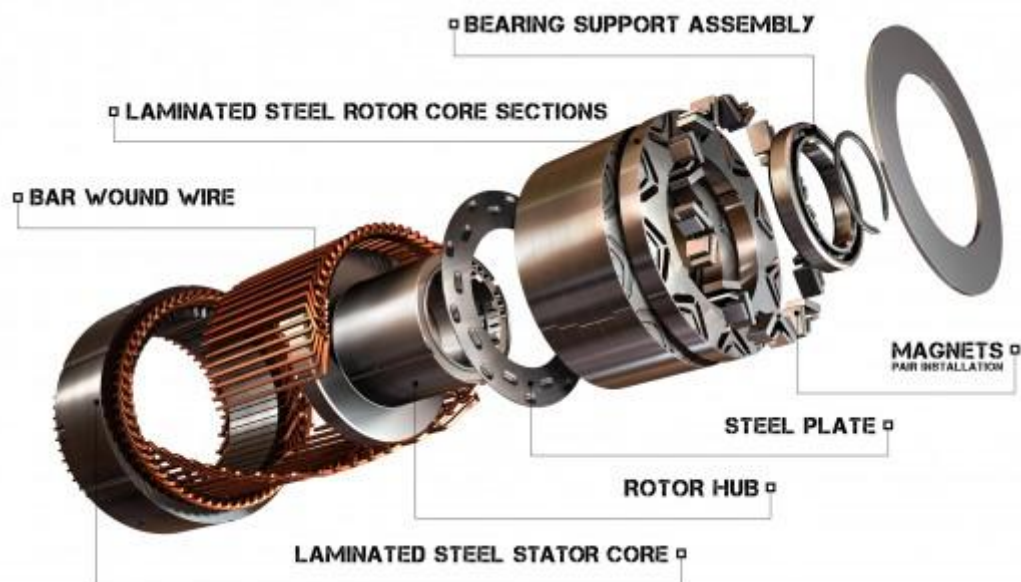
5.6 Kestomagneettimootorit

Kestomagneettimootorit on kehitetty jo 1800-luvulla, mutta yleistyneet vasta viime aikoina kehittyneiden taajuusmuuttajien ja uusien kestopomagneettimateriaalien johdosta. Kestomagneettimootorit ovat poikkeus tahtikoneiden osalta, sillä ne ovat pieniä verrattuna normaaleihin tahtimootoreihin. Kestomagneettimootorien kehittymisen on mahdollistanut voimakkaat kestopomagneetit, jotka eivät demagnetoidu niin herkästi. Tosin vieläkin ongelmana on kestopomagneettimateriaalien demagnetoituminen moottorin lämmitessä, joten jäähdytyksestä täytyy pitää huoli. Kestomagneetti voidaan tehdä eri materiaaleista, jotka jakaantuvat neljään kaupalliseen pääluokkaan.

Kestomagneettimootorit yhdistävät epätahti- ja tahtimootorien hyvät puolet vääntömomentin osalta. Epätahtimootorien vääntömomentti on suurimmillaan käynnistyessä ja laskee pyörimisnopeuden kasvaessa. Tahtimootorien vääntömomentti on pienimmillään käynnistyessä ja kasvaa pyörimisnopeuden kasvaessa, joten kestopomagneettimootoreilla on laaja vääntömomenttialue.

Kestomagneettimootorien staattori on samanlainen kuin tahtimootoreilla, mutta roottorin käämitys on tehty kestopomagneetista sähkömagneetin sijaan. Roottorin magneettivuon synnytetään nimensäkin mukaan kestopomagneeteilla, joten moottorin hyötysuhde paranee verrattuna normaaleihin tahtimootoreihin. Kuvasta 23 (ks. seur. s.) nähdään kestopomagneettimootorin rakenne. Moottorin ominaisuudet riippuvat erittäin vahvasti roottorin rakenteesta, joten moottoreita voidaan modifioida tiettyyn käyttöön helposti

muuttamalla roottorin rakennetta. Kestomagneettimoottorit tarvitsevat aina oman taajuudenmuuttajan, joka on vektorisäätöinen ja jolla ohjataan moottorin pyörimisnopeutta. Kestomagneettimoottoreilla on varsin rajoittunut kentänheikennysalueen ajettavuus, sillä kentänheikennysalueelle päästään vain syöttämällä moottoriin demagnetoivaa virtaa. [16 s.25]



Kuva 23. Kestomagneettimoottorin rakenne [17]

Kestomagneettimoottoreita on kahta päätyyppiä, radiaali- ja aksiaalivuokoneet. Jako perustuu siihen, miten magneettivuo vaikuttaa akseliinjaan nähden.

5.6.1 Kestomagneettimateriaalit

Kestomagneettimateriaalit jaetaan kaupallisesti neljään eri pääluokkaan, joita ovat Al-NiCo, Ferriitti, NdFeB ja SmCo.

AlNiCo eli *alumiini-nikkeli-koboltti-yhdisteellä* on hyvä lämpötilastabiilisuus, hyvä energiataso (kuinka voimakas magneetti on) ja korkea remanenssi, eli jäännösmagnetismi, jolla mitataan aineeseen jäävää magnetoitumaa ulkoisen magneettikentän poistuessa. AlNiCo yhdisteen huonona puolena voidaan pitää alhaista koersiivikentän voimakkuutta. Jos koersiivikentän voimakkuus on alhainen, magneetti voi demagnetoitua helposti esimerkiksi suuren ankkurireaktion tai korkean lämpötilan takia. [18, s. 6; 19.]

Ferriitti on materiaali, josta tiedetään BaFe_2O_3 ja SrFe_2O_3 . Ferriittimagneeteilla on korkea koersiivikentän voimakkuus, jolloin magneetit eivät demagnetoidu niin herkästi. Ferriittimagneetit ovat myös halpoja verrattuna muihin kestopagneettimateriaaleihin ja niistä pystytään myös tekemään helposti erimuotoisia. Huonona puolena voidaan pitää alhaista energiatasoa verrattuna muihin kestopagneetteihin. Ferriitti materiaalit ovat myös kovia ja hauraita, jolloin magneetit voivat haljeta helposti. [18, s. 5; 20.]

NdFeB eli *neodyymi-rauta-boori* on yhdiste, jossa on käytetty harvinaisia maametalleja. NdFeB yhdisteellä on korkea koersiivikentän voimakkuus, jolloin magneetit eivät demagnetoidu niin helposti. NdFeB-magneetit ovat myös tehokkaita verrattuna muihin kestopagneetteihin (korkea energiataso). Vaikka maametallimagneetit ovat kalliita, niillä on hyvä hinta-laatu-suhde. Yhdiste ei sovellu käyttötarkoituksiin, joissa lämpötila nousee yli 312 °C:een, sillä tässä asteessa magneetti menettää ferromagneettiset ominaisuutensa ja muuttuu paramagneetiksi Tällöin yhdiste menettää magneettisen voimakkuutensa. NdFeB-yhdisteillä on huono korroosioresistanssi, joten magneetit tulee suojata päällysteellä. [18, s. 5; 21.] Käytännössä lämpötila ei saisi nousta yli 150 °C:een, sillä muutoin yhdiste demagnetoituu,. Demagnetoitumislämpötilä riippuu kuitenkin yhdisteen laadusta. [22]

SmCo eli *samarium-koboltti*, johon on NdFeB:n tapaan käytetty harvinaisia maametalleja. Tästä yhdisteestä käytetään kahta yhdistelmää: Sm_1Co_5 ja $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. SmCo yhdisteillä on monia hyviä puolia, kuten korkea koersiivikentän voimakkuus, korkea energiataso ja hyvä lämpötilakestävyys. Toisin kuin NdFeB-yhdisteet SmCo-yhdisteet eivät tarvitse päällystettä, sillä niillä on hyvä korroosioresistanssi, vaikka ne sisältävätkin harvinaisia maametalleja. Huonona puolena voidaan pitää korkeaa hintaa. [18, s. 5; 23; 24.]

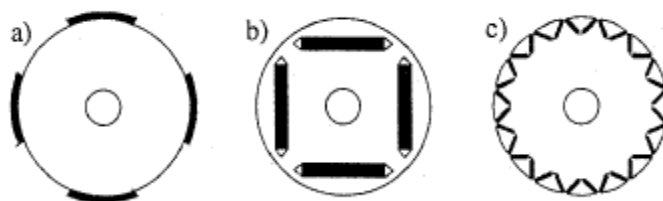
Taulukosta 1 (ks. seur. s.) nähdään eri kestopagneettimateriaalien ominaisuuksia tarkemmin.

Taulukko 1. Eri kestmagneettimateriaalien ominaisuuksia [16, s. 29]

	AlNiCo 5-7	Ferriitti	Sm ₂ Co ₁₇	NdFeB
Remanenssivuontiheys, B_r [T]	1,35	0,405	1,06	1,12
Koersiivivoima, H_c [kA/m]	58,9	294	748	844
BH_{max} [kJ/m ³]	59,7	30,6	207	239
B_r lämpötilakerroin [%/°C]	-0,02	-0,2	-0,025	-0,1
Curie-lämpötila [°C]	890	450	800	310
Resistivisyys [$\mu\Omega\text{cm}$]	47	$>10^4$	86	150

5.6.2 Radiaalivuomoottori

Radiaalivuorakenteisen moottorin roottori voidaan toteuttaa joko ilman rautaa voimakkailla magneeteilla tai massiivi- tai levyrakenteisena. Ilman rautaa magneettien pitää olla voimakkaat, sillä magneettikenttä kulkee ilman ylitse, missä se kulkee huominkin verrattuna rautaan. Raudaton rakenne vaatii myös suurta kytkentätiheyttä moottoria ohjaavalta taajuusmuuntajalta, mikä johtuu moottorin todella pienistä induktansseista. Lisäksi raudaton roottori tuhlaa kestmagneettimateriaalia, sillä roottoripuolella magneettiipiiri sulkeutuu ilmaa pitkin. Massiivirakennetta käyttäessä kestmagneetit kiinnitetään roottorin pinnalle. Levyroottorirakennetta käyttäen roottorit rakennetaan samantyyliksi kuin epätahtimoottorien roottorit. Kestomagneetit voidaan sijoittaa roottoriin pinta- tai sisäasennuksena kuvan 24 mukaisesti.



Kuva 24. Erilaisia kestmagneettimoottorien roottoreiden rakenteita: a) roottorin pinnalle asennetut magneetit b) roottorin sisään tangenciaalisesti asennetut magneetit c) roottorin sisään v-muotoon asennetut magneetit [16, s. 26.]

Pintamagneettimoottoreissa magneetit sijoitetaan nimensäkin mukaisesti roottorin pintaan joko liimaamalla tai pinnan avulla. Liimaamisen hyvänä puolena voidaan pitää pientä ilmaväliä, jolloin moottori on tehokas. Huonoina puolina voidaan pitää magneettien kiinni pysymistä massanhitauten (ns. keskipakovoiman) takia, joten liimattuja moottoreita voidaan ajaa vain hitailla kierroksilla. Hiilikuitupinnan avulla magneetit pysyvät paremmin kiinni roottorissa suuremmilla pyörimisnopeuksilla, mutta ilmaväli kasvaa pinnan takia. Pinta-asennuksen johdosta magneettien tulee olla joko pieniä tai muotoiltuja, mikä nostaa magneettien hintaa.

Pinta-asennetuilla magneeteilla roottorin halkaisija saadaan pieneksi. Tämän takia pinta-asennetuilla moottoreilla on pieni hitausmomentti. Moottorin huonona puolena voidaan pitää sitä, että moottoria ei kannata ajaa kentänheikennysalueella vääntömomentin heikentymisen takia. Tämä johtuu taajuusmuuttajan tarpeesta syöttää suuri demagnetointivirta, mikä estää jännitteen nousun.

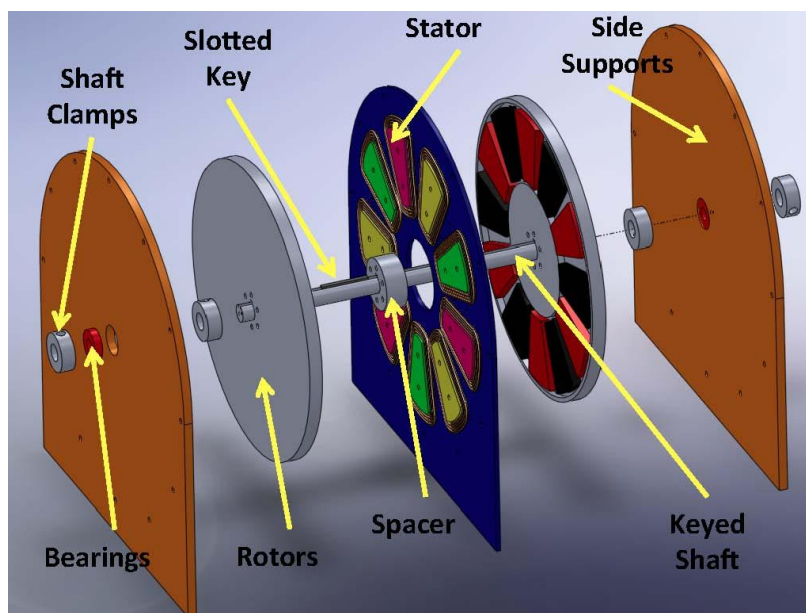
Sisä- eli uppoasennuksilla pyritään moottorista saamaan mekaanisesti kestävämpi verrattuna pinta-asennuksiin. Mekaanisen kestävyuden lisäksi sisäasennuksilla pyritään kasvattamaan magnetoimisinduktanssia, jolloin moottoria pystyttäisiin ajamaan myös kentänheikennysalueella. Uppomagneetit voivat olla suorakaiteen muotoisia toisin kuin pinta-asennuksissa, mikä alentaa magneettien käsittelykuluja. Toisaalta uppoasennus tuhlaa enemmän kestopintamagneettimateriaaleja ja on monimutkaisempi tehdä, jolloin hinta nousee. Myös moottorien halkaisija kasvaa pinta-asennukseen verrattuna.

Tietyillä uppoasennustavoilla saadaan ilmavuontiheydestä helposti sinimuotoinen, mikä on kiistatta suurin etu pinta-asennuksiin verrattuna. Sinimuotoinen roottorin mmv on eduksi, koska hidaskäyntisissä moninapaisissa koneissa vakoluku q on usein pieni. Tämän johdosta staattorin mmv sisältää paljon harmonisia aaltoja, eikä näin ollen ole sinimuotoinen. Jos halutaan pieni vääntömomenttiväri, tulee roottorin mmv:n olla sinimuotoinen. [7, s. 97.]

5.6.3 Aksiaalivuomoottori

Aksiaalivuorakenteinen moottori voi sisältää useamman staattori-roottori yhdistelmän yhdellä akselilla, jolloin roottorilaippa on kahden staattorilaipan välissä kuvan 25 (ks. seur s.) mukaisesti. Sijoittamalla useita staattori-roottori-yhdistelmiä peräkkäin voidaan koneen suorituskykyä kasvattaa. Koska moottori on epäsymmetrinen, kasvaa mag-

neettinen aksiaalivoima aina, kun lisätään yksi yhdistelmä lisää. Jotta moottori kestäisi suuren aksiaalivoiman, tulee akselin laakeroinnista tehdä tarpeeksi vahva. Nopeissa käytöissä joudutaan roottorin halkaisijaa pienentämään massanhitauden (ns. keskipakovoiman) takia. Tällaisissa tapauksissa voidaan staattori-roottori-yhdistelmiä lisäämällä kasvattaa moottorin tehoa, mikä kasvattaa moottorin pituutta.



Aksiaalivuomoottorin roottorirakenne [25]

Aksiaalivuomoottoireilla voidaan säästää tilaa pituussuunnassa verrattuna perinteisempään radiaalivuomoottoriin, mutta aksiaalivuomoottorin halkaisija yleensä kasvaa suuremmaksi. Aksiaalivuomoottorilla on joitakin etuja radiaalivuomoottoireihin verrattuna. Kestomagneetit voidaan muotoilla suorakulmaisiksi poikkileikkauspinnoiltaan, mikä laskee magneettien käsittelykuluja. Kestomagneetit voidaan sijoittaa joko roottorin sisälle tai kylkipinnoille.

6 Yhteenveto

Koska etsityn moottorin suurin rajoittava tekijä tässä käytössä on halkaisija, moottorilla tulee olla pieni halkaisija. Halkaisija ei saa kasvaa, jottei vedenvastus kasvaisi liian suureksi ja moottorin teho kuluisi vedenvastuksen voittamiseksi. Tästä syystä olisi parempi käyttää kestopagneettimoottoria. Kestopagneettimoottoreilla on myös muita ominaisuuksia, joiden takia olisi suositeltavaa käyttää juuri sentyyppisiä moottoreita. Kestopagneettimoottorit eivät kuumene niin paljon, sillä roottorikäänitys tehdään kestopagneetilla. Kestopagneettimoottorit ovat myös varsin tehokkaita verrattuna muihin samankokoisiin moottoreihin. Moottorien ohjaus onnistuu helposti taajuusmuuntajalla. Kestopagneettimoottoreilla on hyvä hyötysuhde.

Kestopagneettimoottorin tyyppi voi vaihdella rakentajan haluamien ominaisuuksien ja budjetin mukaan. Moottorityyppi voisi olla joko 1) pannalla tuettu pinta-asennettu radiaalivuomoottori, 2) uppoasennettu radiaalivuomoottori tai 3) nopeakierroksinen aksiaalivuomoottori.

1) Radiaalivuomoottorit ovat hyviä pienen halkaisijan takia. Hiilikuitupannalla tuettu pinta-asennettu moottori on siksi hyvä, koska moottorin pyörimisnopeus olisi parempi kuin liimatuilla pinta-asennetuilla moottoreilla. Hiilipannallista konetta ei kuitenkaan kannata rakentaa ferriitistä, joten moottorin hinta kasvaa kestopagneettimateriaalikustannusten takia. Moottorin huonona puolena voidaan pitää kentänheikennysalueajon puuttumista, mikä rajoittaa kierrosnopeuden nimelliseen.

2) Uppoasennettu radiaalivuomoottori on mekaanisesti kestävämpi kuin pinta-asennettu moottori. Tämän takia moottori kestäisi paremmin veneen pomppiessa veden päällä. Uppoasennetun moottorin halkaisija kuitenkin kasvaisi suuremmaksi kuin pinta-asennetun, joten tulee miettiä, onko halkaisijan koko vai moottorin kestävyys tärkeämpi. Uppoasennetut radiaalivuomoottorit maksavat myös enemmän kuin pinta-asennetut.

3) Nopeakierroksista aksiaalivuomoottoria voidaan suosittaa, koska moottorin halkaisija on pienempi kuin hitaan aksiaalivuomoottorin. Moottoria voidaan myös kasvattaa pituussuunnassa lisäten tehoa.

Jatkoehdotukset

Koska työssä on käyty sähkömoottoreita läpi vain yleisesti, voitaisiin sähkökäyttöistä juniorformulamoottorivene-projektia jatkaa keskittymällä jo valittuihin moottorityyppeihin. Moottorin valintaan pystytään syventymään paremmin, kunhan projektin edetessä selviää tarkemmin, mitä moottorilta vaaditaan. Moottorin valintaan vaikuttaa mm seuraavat seikat, mitä ei olla vielä päätetty: moottorille varattu budjetti, valitun veneen rungon koko, kaavailtu pyörimisnopeus, maksimi virta ja jännite sekä moottorilta sallitut maksimi ulkomitat.

Moottorin valinnan lisäselvityksen lisäksi tulevaisuudessa tulisi keskittyä moottorin ohjaamiseen. Moottorin ohjaus on sidoksissa valittuun moottoriin. Tämän takia pitäisi ensin valita käytettävä moottori, minkä jälkeen voidaan valita moottorin ohjaus. Työssä on käyty erilaisia säätötapoja hyvin suuripiirteisesti läpi, siksi lisäselvitys on tarpeen.

Lähteet

- (1) Moottoriveneharrastesivu <<http://www.boatrace.fi/pages/veneluokat/rata-luokat/sj15.php> Vierailtu> 15.3.2013
- (2) Veneen runko <http://image.nettix.fi/extra/boating/500201_500300/moottorivene-omavalmiste-500277_I_dfab50598e07443a.jpg> Vierailtu 28.3.2013
- (3) Mallasto, Aleksi. 2013. Kokouspöytäkirja 26.2.2013
- (4) Ijäs, Jari; Massinen, Osmo. 2011. Moottoriluennot portfolio 11012012, SMO avaus päiväys 01112011.pdf. Sähkömoottorit kurssi
- (5) Korpinen, Leena. SÄHKÖKONEET, osa 2. Verkkodokumentti <http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_2osa.pdf> Vierailtu 3.10.2013
- (6) Ijäs, Jari; Massinen, Osmo. 2011. Moottoriluennot portfolio 11012012, SMO periaate DC-kone.pdf. Sähkömoottorit kurssi
- (7) Hietalahti, Lauri. 2010. Muuntajat ja sähkökoneet. Tammertekniikka
- (8) Baumgartner, Hans. 2008. Tasavirtakone. Verkkodokumentti <<http://hasseb.fi/reports/tasavirtakone.pdf>> Vierailtu 7.10.2013
- (9) Juha Pyrhönen. 2006. Luentomoniste_pyrhonen_2006.pdf, Sähkömoottorit kurssi
- (10) Ellala, Jani. Pienjännitemoottoreiden sähköisen kunnonvalvonnan kehittäminen Tornio Works kylmävalssaamalla. Verkkodokumentti <http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/59862/Ellala_Jani.pdf?sequence=2> Vierailtu 15.10.2013
- (11) File: 3-phase-voltag. Verkkodokumentti <<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:3-phase-voltage.svg>> Vierailtu 27.10.2013
- (12) These are the benefits of soft starters. Verkkodokumentti. <http://www.beijer.se/web/web_aut_en.nsf/alldocuments/C12571ED004C2D9BC12572AD003210BD> Vierailtu 28.10.2013
- (13) Korpinen, Leena. SÄHKÖKONEET, osa1. Verkkodokumentti <http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf> vierailtu 27.10.2013
- (14) Hietalahti, Lauri. 2011. Säädettyt sähkömoottorikäytöt. Tammertekniikka
- (15) ABB. Taking the motor world by storm. Verkkodokumentti. <<http://www.abb.com/cawp/seitp202/31f34a07b3083c6fc1257a600041b8a8.aspx> vierailtu 18.11.2013>

- (16) Leppä, Ari. 2003. Insinööriyö, Kestomagneettitahtikonekäytön soveltaminen pape-
riteollisuuden linjakäytöissä. Lappeenrannan teknillinen yliopisto
- (17) Gizmag Team. GM shows 85 kW permanent magnet EV motor. Verkkodokument-
ti. <<http://www.gizmag.com/gm-85-kw-ev-motor/20329/>> Vierailtu 3.11.2013
- (18) Nummelin, Ville. 2006. Insinööriyö, Kestomagneettimoottorit
- (19) Alnico Magnets (AlNiCo). Verkkodokumentti
<<http://www.duramag.com/materials/alnico-magnets/>> Vierailtu 11.11.2013
- (20) Ferrite Permanent Magnets. Verkkodokumentti.
<<http://www.arnoldmagnetics.com/Ferrite.aspx>> Vierailtu 15.11.2013
- (21) Neodymium Magnets (NdFeB). Verkkodokumentti.
<<http://www.duramag.com/materials/neodymium-magnets-ndfeb/>> Vierailtu 15.11.2013
- (22) Karppinen, Jukka. 2013. Sähköpostikeskustelu 25.11.2013
- (23) Samarium Cobalt Magnets. Verkkodokumentti.
<http://www.mmcmagnetics.com/ourproducts/main_SmCo.htm> Vierailtu 15.11.2013
- (24) Samarium Cobalt Magnets. Verkkodokumentti.
<<http://www.allmagnetics.com/smco.htm>> Vierailtu 15.11.2013
- (25) Axial Flux Motor. Verkkodokumentti.
<http://flyingv.ucsd.edu/nima/Axial_Flux/Axial_Flux.html> Vierailtu 20.11.2013