

Jussi Siitari

Induktiomoottorin suunnittelu ja toteutus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Koulutusohjelman nimi

Insinöörityö

24.11.2015

Tekijä(t) Otsikko	Jussi Siitari Insinööriyön otsikko
Sivumäärä Aika	33 sivua + 24 liitettä 24.11.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Elektroniikka ja terveydenhuollon tekniikka
Ohjaaja(t)	Lehtori Kai Lindgren
<p>Tässä insinööriyössä on tarkoituksena perehtyä sähkömoottorien toimintaan, rakenteisiin ja komponentteihin. Lisäksi tavoitteena on mitoittaa ja simuloida suunniteltua induktiomootoria. Moottorin tulee olla rakenteeltaan yksinkertainen, jotta moottorin toimintaa voitaisiin analysoida, sekä nimellisarvoiltaan sellainen, että moottorin mitoitus- ja simulointituloksia voitaisiin verrata jo olemassa oleviin moottoreihin. Aihe on melko laaja ja aikataulutusta johtuen prototyypin rakentaminen on jätetty työstä pois.</p> <p>Työ koostuu kolmesta eri osasta: Ensimmäisessä osassa on käsitelty sähkömoottoreihin liittyviä perusasioita. Toinen osa koostuu moottorin mitoituksesta ja simuloinnista saaduista tuloksista. Kolmannessa osassa on yhteenveto projektista. Mitoitus on toteutettu Matlab-ohjelmointikielellä, johon on löydetty valmis algoritmi, jolla moottori voidaan mitoittaa halutunlaiseksi. Simulointityökaluna on käytetty Simulink-ohjelmistoa. Yhteenvetoon on koottu tulokset ja moottoreiden vertailu.</p> <p>Tulokset osoittivat, että tällä tavalla on mahdollista suunnitella moottori, jota voidaan vertailla teolliseen moottoriin.</p>	
Avainsanat	Induktiomoottori, sähkömoottorit, matlab

Author(s) Title	Jussi Siitari Designing and Implementation of an Induction Motor
Number of Pages Date	33 pages + 24 appendices 24 November 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical engineering
Specialisation option	Electronics and health care technology
Instructor(s)	Kai Lindgren, Senior Lecturer
<p>This thesis explores the function, structure and components of electric motors. In addition, aims to measure and simulate induction motor designed in this study. The motor has to be simple in structure, so that analyzing the function of the motor would be reasonable. Rated values of the motor were chosen so, that final results are comparable with results of the commercial motors. The topic is quite extensive and construction of the prototype was omitted due to lack of time.</p> <p>Work consist of three different parts, the first part includes basic details about motors. The second part includes the results for simulating and sizing of the motor. The third part is the summary of the project. Sizing of the motor was implemented by hooke-jeeves algorithm in matlab. Simulink was used as simulation tool. The summary contains results and comparison of motors.</p> <p>The results indicated that it is possible to design an induction motor by this way and its values are comparable with industrial motor.</p>	
Keywords	Induction motor, electric motors, matlab

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Sähkömoottorien historia	2
3	Sähkömoottorityypit	3
3.1	Tasavirtamoottori	3
3.1.1	Rakenne	4
3.1.2	Kommutointi	6
3.2	Vaihtovirtamoottorit	7
3.2.1	Epätahtimoottorit/induktiomoottorit	8
3.2.2	Tahtimoottorit	10
3.2.3	Tahtimoottorin käynnistäminen	13
3.2.4	Leimausarvot	13
4	Keskeiset käsitteet	15
4.1	Näennäisteho, pätöteho ja loisteho	15
4.2	Jättämä, tahtinopeus ja napaluku	16
4.3	Vääntömomentti, hyötysuhde ja sijaiskytkentä	17
4.4	Epätahtimoottorin nopeuden säätö ja häviöt	19
5	Moottorin mitoitus	20
5.1	Suunniteltava moottori	20
5.2	Vertailumoottori	24
5.3	3-vaiheinen AC staattorikäänitys	25
5.4	Roottorin häkkikäänitys	26
5.5	Roottorin pyöräminen	27
6	Yhteenveto	31
	Lähteet	32

Liitteet

- Liite 1. Vertailtavaan moottoriin liittyviä tietoja
- Liite 2-3. Input-tiedosto
- Liite 4-5. Output-tiedosto
- Liite 6. Anto- ja ottotehot
- Liite 7. Hyötysuhde ja tehokerroin vääntömomentin funktiona
- Liite 8. Hyötysuhde ja tehokerroin jättämän funktiona
- Liite 9. Häviöt
- Liite 10. Kustannukset
- Liite 11. Magneettivuo staattorivirran funktiona
- Liite 12. Magneettivuon tiheys staattorivirran funktiona
- Liite 13. Magnetoinnin induktanssi staattorivirran funktiona
- Liite 14. Moottorin geometria
- Liite 15. Staattorin ja roottorin halkaisijat
- Liite 16. Roottorin slottien mitat
- Liite 17. Staattori- ja roottorivirta jättämän funktiona
- Liite 18. Staattorin slottien mitat
- Liite 19. Staattorin ja roottorin virrantiheydet
- Liite 20. Staattorin ja roottorin painot
- Liite 21. Vääntömomentti jättämän funktiona
- Liite 22. Staattorin ja roottorin virrallisten osien painot
- Liite 23. Staattorikäänitys
- Liite 24. Käämityksen kulku

1 Johdanto

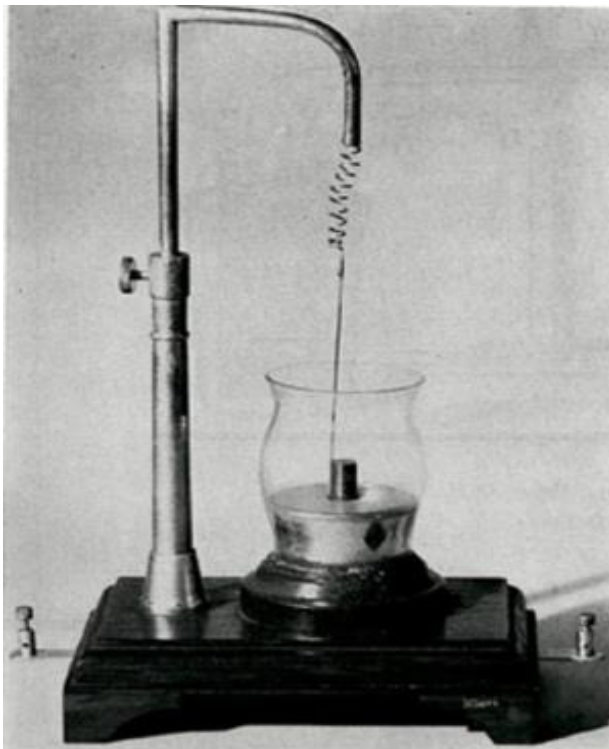
Tässä insinööriyössä on tarkoituksena perehtyä sähkömoottorien toimintaan, rakenteisiin ja komponentteihin. Lisäksi tavoitteena on mitoittaa, ja simuloida suunniteltua induktiomoottoria. Moottorin tulisi olla rakenteeltaan yksinkertainen, jotta moottorin toimintaa voitaisiin analysoida, sekä nimellisarvoiltaan sellainen, että moottorin mitoitus- ja simulointituloksia voitaisiin verrata jo olemassa oleviin moottoreihin.

Sähkömoottoreilla on iso merkitys nykymaailmassa: Niitä käytetään todella monissa sovelluksissa mekaanisen energian tuottajana. Esimerkkeinä mainittakoon auton starttimoottori, junien moottorit, pesukoneet sekä muut pienkodinkoneet. Sähkömoottorin pääasiallinen tarkoitus on muuntaa sähköenergiaa mekaaniseksi energiaksi eli liikkeeksi, mutta se voi toimia myös päinvastoin eli muuntaa mekaanista energiaa sähköenergiaksi. Tällöin on kyse generaattorista.

Työ koostuu kolmesta eri osasta, ensimmäisessä osassa on perehdytty peruskäsitteisiin kuten toimintaan, rakenteeseen ja komponentteihin. Toinen osa koostuu suunnittelusta ja mitoituksesta. Kolmas osa koostuu tuloksista ja yhteenvedosta.

2 Historia

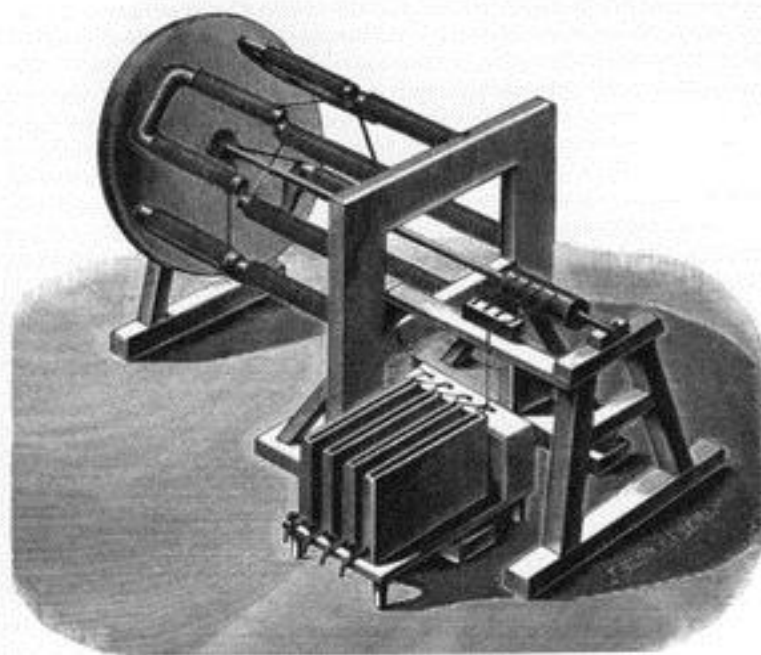
Vuonna 1820 tanskalainen Hans Christian Oersted havaitsi, että johtamalla sähkövirtaa kelalle käärittyn johtimeen sen ympärille syntyy magneettikenttä. Tämä oli ensimmäinen kerta kun havaittiin, että mekaanista liikettä pystyttäisiin tuottamaan sähkövirran avulla. Vuonna 1821 britannialainen fyysikko Michael Faraday teki kaksi koetta, joissa hän demonstroi sähkömagneettista pyörimisliikettä (kuva 1). Kojeessa oli pystysuorassa oleva johto, joka pyöri magneetin ympärillä. Vuonna 1822 englantilainen Peter Barlow rakensi ensimmäisen sähkömagnetismin perustuvan pyörivän laitteen, laitetta kutsuttiin barlowin pyöräksi (Barlow's Wheel).[1.]



Kuva 1. Faradayn koe [1]

Toukokuussa vuonna 1834 saksalainen fyysikko Moriz Jacob loi ensimmäisen oikean pyörivän sähkömoottorin, joka pystyi tuottamaan merkittävästi mekaanista voimaa. Kyseinen moottori pystyi nostamaan 10–12 paunaa painavan esineen noin 0.3 m/s nopeudella. Kyseisen moottorin mekaaninen teho vastasi noin 15:tä wattia. Moottori on nähtävissä kuvassa 2. Vuotta myöhemmin hollantilaiset Stratingh and Becker esittelivät oman sovelluksen, jossa he liikuttivat pientä autoa sähkömoottorilla. Syksyllä 1838 Moriz Jacob esitteli jälleen uuden moottorinsa. Kyseisen moottorin teho oli 300 Wattia,

ja se kykeni siirtämään 14:ää veneessä olevaa ihmistä suuren joen poikki 2.5 km/h:n tuntinopeudella. Virtalähteenä käytettiin sinkkiparistoja.[1.]



Kuva 2. Ensimmäinen oikea sähkömoottori vuodelta 1834 [1]

3 Sähkömoottorityypit

3.1 Tasavirtamoottori

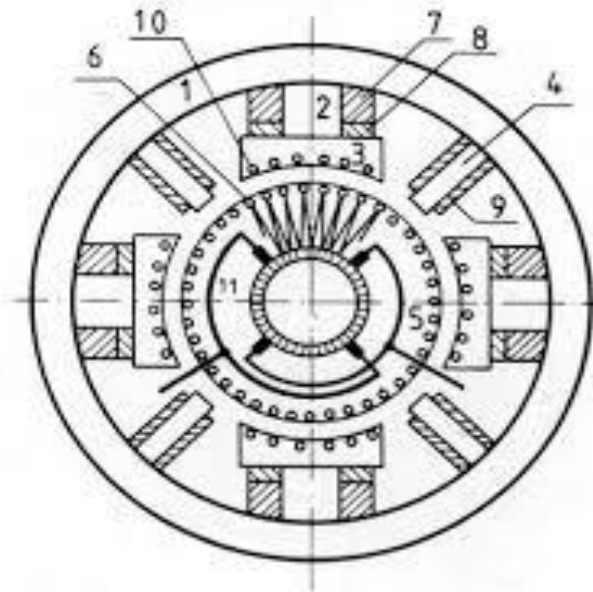
Tasavirtamoottorilla (dc) tarkoitetaan moottoria, joka toimii tasavirralla. Kommutaattori toimii kyseisessä moottorityypissä mekaanisena vaihtosuuntaajana, se siis mahdollistaa jatkuvan pyörimisliikkeen. Tasavirtamoottoreita on olemassa monenlaisia, esimerkiksi mainittakoon askelmoottorit, servot sekä harjalliset ja harjattomat tasavirtamoottorit. Tasavirtamoottorit- ja generaattorit ovat periaatteessa rakenteeltaan samanlaisia, joten samaa moottoria voidaan käyttää joko generaattorina tai moottorina. [2;3;4.]

3.1.1 Rakenne

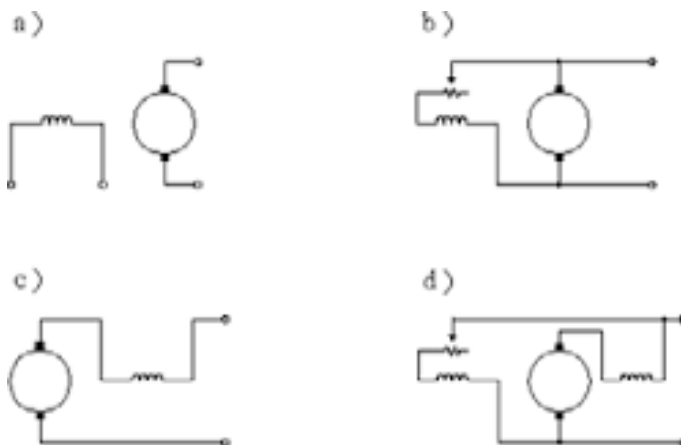
Tasavirtamoottorin rakenne poikkeaa merkittävästi molemmista vaihtovirtamoottorityypeistä, koska se ei tarvitse toimiakseen muuttuvaa magneettikenttää eli kiertokenttää. Koneen rautaosat muodostavat magneettipiirin sen magneettikentälle. Tasavirran aiheuttamista tasakentistä johtuen koneen kehä ja napojen rautaosat voidaan tehdä täysraudasta. Roottori, eli koneen pyörivä osa, johon on kiinnitetty akseli voimansiirtoa varten, on sen sijaan tehty sähkölevystä, koska se joutuu pyörimään tasamagneettikentässä. Kuvassa 3 on esitetty tasavirtamoottorin osat.

Pyörimisliike tasamagneettikentässä aiheuttaisi rautaosilla häviöitä ja vuonvaihtelun. Pääkenttä synnytetään koneen staattorissa eli seisojassa (roottorin ympäröivä osa) olevilla päänapojen magnetointikäämityksillä. Kuparilangasta tehty magnetointikäämitys on eristetty staattorista, roottorikäämitys taas on valmistettu eristetystä kuparijohtimesta tai muotojohtimesta. Kun roottori pyörii päänapojen muodostamassa magneettikentässä, roottorikäämitykseen indusoituu vaihtosähkömotorinen jännite. Moottoreissa tämä jännite on vastajännite moottoriin vaikuttavalle liitinjännitteelle. Tasavirta, jonka magnetointikäämitys tarvitsee, voidaan ottaa, joko erillisestä lähteestä, tai roottorin lähteestä sarjassa tai rinnan.

Moottoria, jonka magnetointi tapahtuu ulkoisesta virtalähteestä otetulla jännitteellä, kutsutaan vierasmagnetoiduksi moottoriksi. Itsemagnetoidut moottorit voidaan jakaa kolmeen eri ryhmään: sarjavirta, sivuvirta ja komppoundimoottoreiksi. Sivuvirtamoottorissa roottorikäämitys on kytketty rinnan sivuvirtakäämityksen kanssa, sarjavirtamoottorissa sarjavirtakäämitys on kytketty sarjaan roottorikäämityksen kanssa ja komppoundimoottorissa roottorikäämitys on kytketty sarjaan sarjavirtakäämityksen kanssa, ja näiden sarjaan kytkentä on kytketty rinnan sivuvirtakäämityksen kanssa (kuva 4). [4.]



Kuva 3. Tasavirtamoottorin osat: 1 Staattorin kehä, 2 Päänavan sydän, 3 napakenkä, 4 kääntönavan sydän, 5 roottorin eli ankkurin sydän, 6 roottori eli ankkurikäimitys, 7 sivuvirtakäämitys, 8 sarjavirtakäämitys, 9 kääntönavan käämitys, 10 kompensointikäimitys. 11 kommutaattori harjoineen [4]



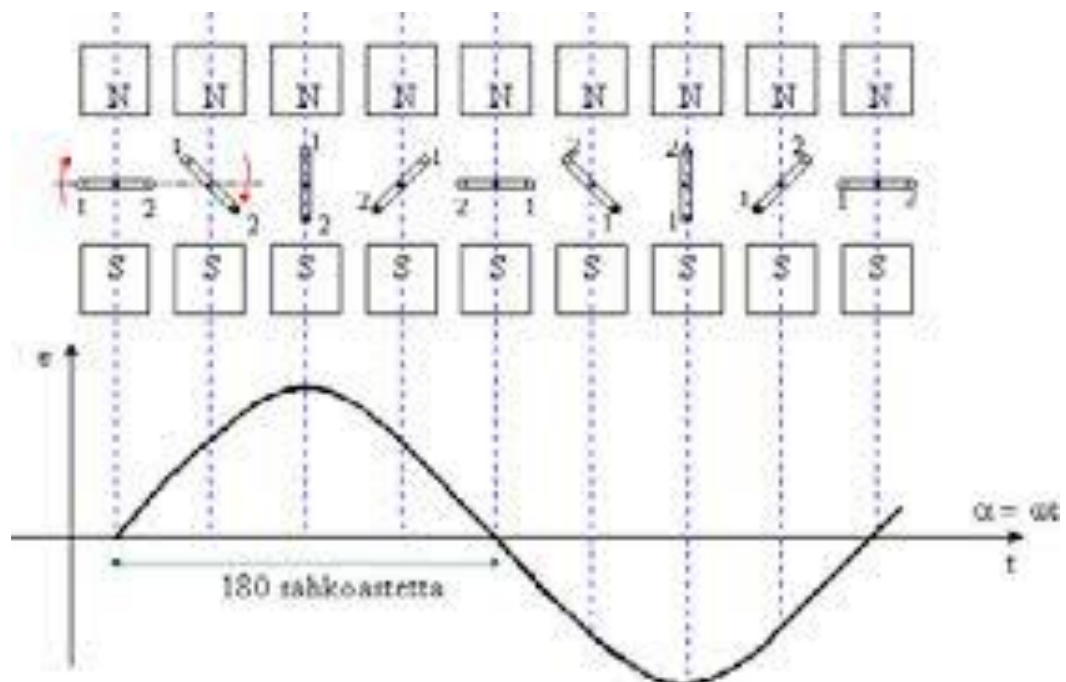
Kuva 4. Eri moottoreiden käämien kytkentäperiaatteet: a) vierasmagnetoitu moottori, b) sivuvirtamoottori, c) sarjavirtamoottori, d) kompondimoottori. [4]

3.1.2 Kommutointi

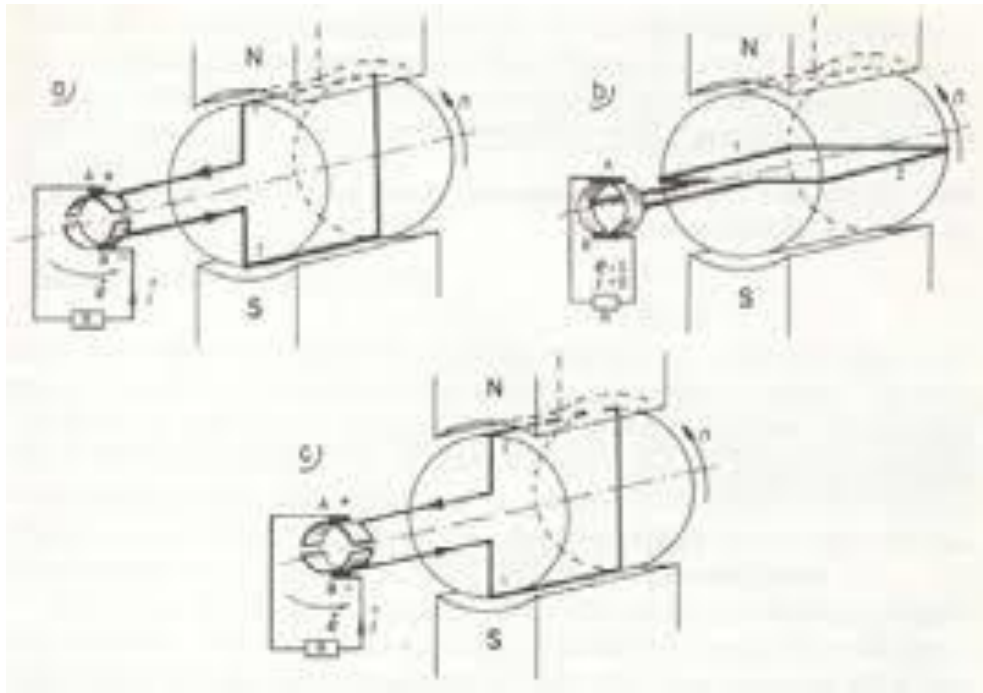
Kommutaattori toimii tasavirtamoottoreissa mekaanisena vaihtosuuntaajana. Sitä käytetään, jotta pyörimisliike olisi jatkuvaa. Tasavirtageneraattoreissa toimenpide on päinvastainen. Siinä roottoriin, jota voimakone pyörittää, indusoitunut sähkömotorinen voima (smv) on vaihtosähköä, joka on tasasuunnattava.

Kommutaattorin liukurengas on jaettu lamelleiksi ja näihin on silmukoiden päät yhdistetty. Kuvasta 6 voidaan nähdä, että harjojen välinen jännite tasasuunnataan, koska harja A on yhdistetty N-navan alla liikkuvaan sauvaan ja harja B puolestaan on yhdistetty S-navan alla liikkuvaan sauvaan. Sijoittamalla ankkuriin useampia silmukoita saadaan jännitteen sykliisyys pieneksi.

Moottorin ollessa kytkettynä verkkoon sen roottorin ja magnetointinapojen välille syntyy voimia. Kommutaattorin avulla mahdollistetaan se, että kaikissa N-navan alla olevissa johtimissa kulkee virta samaan suuntaan, kuin myös S-navan alla olevissa johtimissa. Kaikki voimat vaikuttavat tällöin samaan suuntaan. Kuvissa 5 ja 6 on havainnollistettu kommutaattorin toimintaa. [4.]



Kuva 5. Roottorin silmukkaan induoituneen jännitteen hetkellisarvoja kun roottori on eri asennoissa.[4]



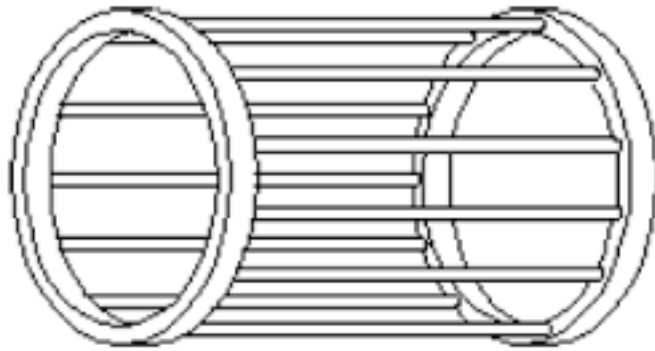
Kuva 6. Kommutaattorin toimintaperiaate [5]

3.2 Vaihtovirtamoottorit

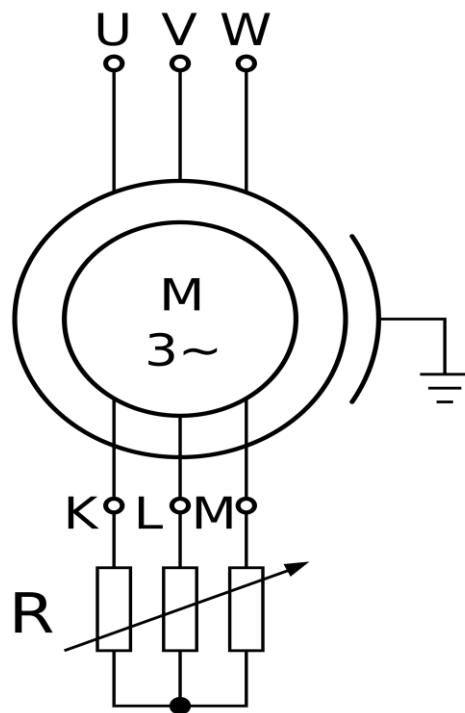
Tässä luvussa käsitellään vaihtovirtamoottoreita. Vaihtovirtamoottorit (ac) on pääsääntöisesti jaettu kahteen kategoriaan. Nämä ovat synkroniset eli tahtimoottorit sekä asynkroniset eli epätahtimoottorit. Tahti- ja epätahtimoottorin staattorit ovat periaatteessa samankaltaisia, eli molempien staattorissa on kauttaaltaan lovetettu, laminoitu sylinterin muotoinen ydin sekä 3-vaihekäämitys, johon sinimuotoinen vaihtojännite johdetaan taajuudella f . Kyseinen vaihtojännite synnyttää roottorin ja staattorin väliseen ilmatilaan magneettivuon, jonka nopeus on n_s , sitä kutsutaan myös synkroniseksi nopeudeksi.[6, s. 9.]

3.2.1 Epätahtimoottorit/induktiomoottorit

Epätahtimoottorit tai induktiomoottorit jaetaan yleisesti kahteen kategoriaan: oikosulku- ja liukurengasmootoreihin. Epätahtimoottorin roottori pitää sisällään kauttaaltaan love- tetun ja laminoidun alumiinisen roottoriytimen, joka on oikosulkumoottoreissa suljettu oikosulkurenkailla. Oikosulkumoottorin roottorissa on häkkikäänitys (kuva 7), ja liuku- rengasmootorin roottorissa staattorikäänityksen kaltainen 3-vaihekäänitys. Liukuren- gasmootorissa roottori on kytketty eristettyjen kuparirenkaiden (liukurenkaat) kautta harjoihin. Kyseisiä harjoja ei pidä sekoittaa kommutaattorin harjoihin sillä kyseiset har- jat eivät muuta roottorivirran taajuutta vaan toimivat mekaanisina virtakytkiminä. [6, s. 9;7.]

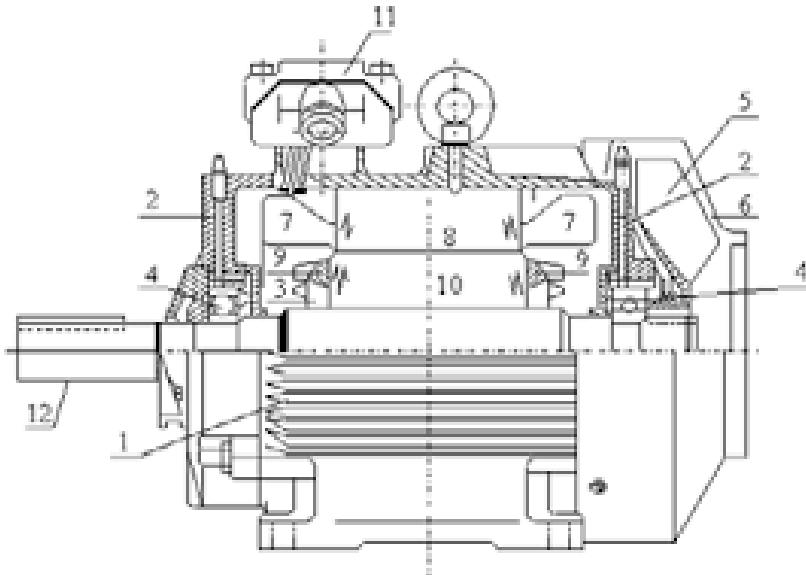


Kuva 7. Häkkikäänityksen rakenne [7]



Kuva 8. Liukurengasmoottorin kaavakuva [8]

Oikosulkumoottorissa staattorivirta aiheuttaa staattorikäämityksessä muuttuvan magneettikentän, jonka nopeus on n_s ja taajuus f . Kyseisen magneettikentän kenttäviivat leikkaavat roottorikäämin sauvoja. Tämän seurauksena sauvoihin indusoituu sähkömotorinen voima (E_r), joka saa aikaan roottorivirran (I_r). Voimavaikutus virran I_r aiheuttaman kentän ja staattorikäämityksen aiheuttaman magneettikentän välillä saa roottorin pyörivään liikkeeseen. Sähköteho, jonka moottori tarvitsee, syötetään siis ainoastaan staattorikäämitykseen. Liukurengasmoottorin toimintaperiaate (kuva 8) on muuten sama kuin oikosulkumoottorissa (kuva 9), eli moottorin roottorikäämitykseen syntyy myös sähkömotorinen voima. Erona on kuitenkin se, että koneen ulkopuolelle tuotujen käämipäiden kytkennästä riippuu se, lähteekö roottori pyörimään. Roottorivirta on nolla, mikäli päät ovat irti, moottori ei tällöin kehitä momenttia.



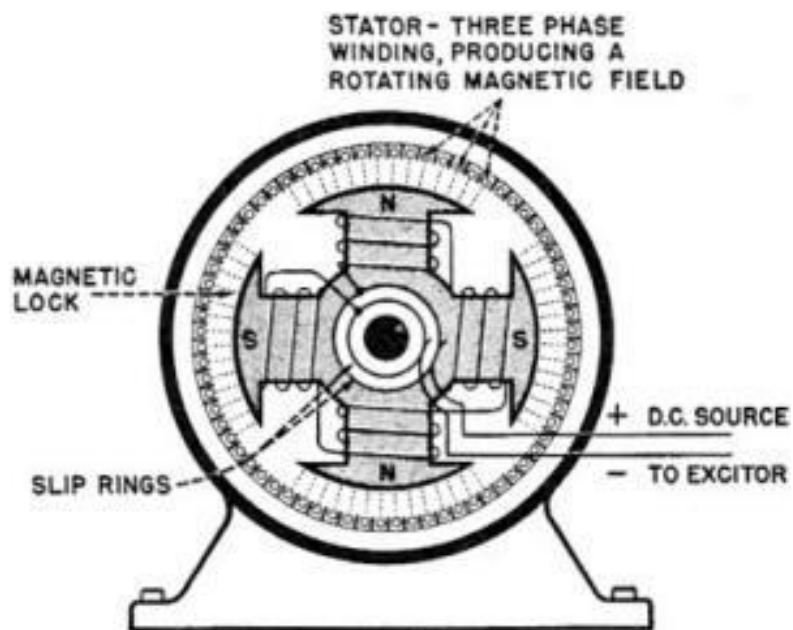
Kuva 9. Oikosulkumoottorin rakenne: 1 staattorin runko, 2 laakerikilvet, 3 roottori, 4 laakerit, 5 tuuletin, 6 tuulettimen suojus, 7 staattorikäänitys, 8 staattorin levypaketti, 9 roottorin käänitys, 10 roottorin levypaketti, 11 liitäntäkotelo, 12 akseli [7]

Sähköisen vääntömomentin ollessa suurempi kuin roottoria jarruttava vääntömomentti, moottori alkaa pyörimään. Mikäli roottoria kuormitetaan mekaanisesti, se tarvitsee suuremman sähköisen vääntömomentin, jotta pyörimisliike alkaa. Roottori pyörii kentän kanssa samaan suuntaan. Roottorin ja staattorikentän välinen nopeusero pienenee, kun roottorin nopeus kasvaa, tästä seuraa roottorivirran ja jännitteen, sekä taajuuden alentuminen. Jos roottori pyörisi staattorikentän kanssa samalla nopeudella, roottorisauvat eivät leikkaisi vuoviivoja ollenkaan ja virta (I_r) ja sähkömotorinen voima (E_r) olisivat nolla. [6 s.9; 7.]

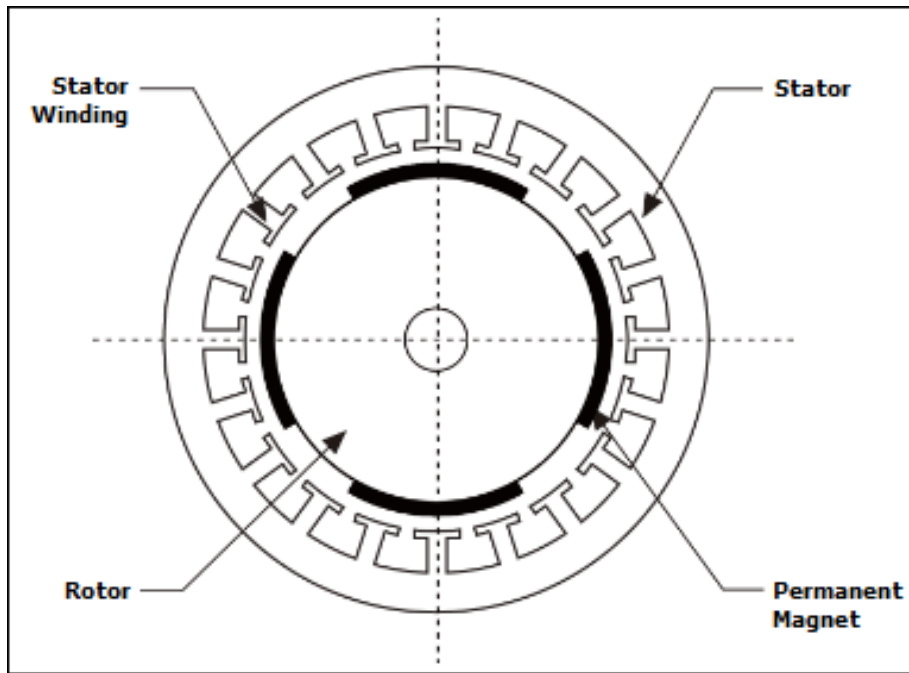
3.2.2 Tahtimoottorit

Moottoreita, joiden roottori pyörii samalla nopeudella staattorikentän kanssa, nimitetään synkronisiksi moottoreiksi eli tahtimoottoreiksi. Kuten aikaisemmin on mainittu, tahtimoottorin staattori on periaatteessa samankaltainen kuin epätahtimoottorin staattori. Tahtimoottorin roottori taas muistuttaa rakenteeltaan harjallisen kommutaattorimoottorin eli tasavirtamoottorin staattoria.

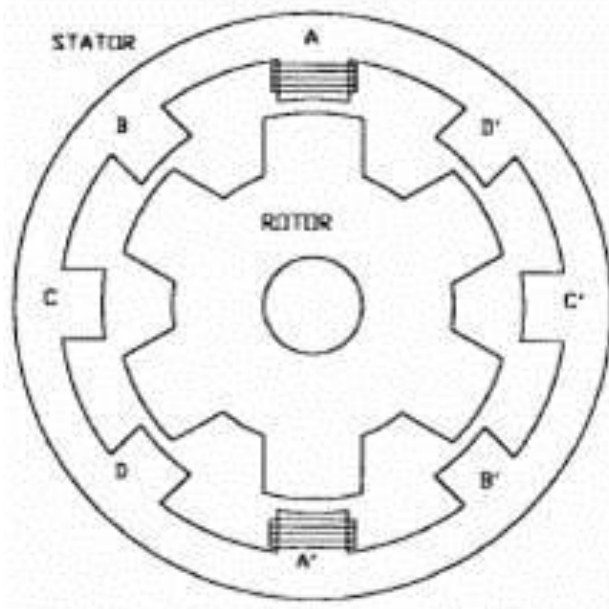
Roottori on laminoitu, ja siinä on käämitys, johon syötetään magneetoimisvirtana tasavirtaa. Käämit on asetettu avonapojen ympärille tai niille sopiviin aukkoihin (avonapamoottori). Tahtimoottorin roottorissa voi olla myös käämien sijasta kestmagneetit, jotka luovat ilmarakoon heteropolaarisen magneettivuon saman napaluvun omaavan staattorin kanssa. Roottorin taajuus on tasavirrasta johtuen 0, joten roottorin nopeus (n) on sama kuin staattorikentän ($n=n_s$). Tahtimoottoreita ovat siis tasavirralla magneetoitavat tahtimoottorit (kuva 10), kestmagneettitahtimoottorit (PMSM) (kuva 11) ja reluktanssimoottorit (kuva 12).[6 s.11.]



Kuva 10. Tasavirralla magneetoitavan tahtimoottorin rakenne (avonapainen) [9]



Kuva 11. Kestomagneetti tahtimoottorin rakenne [10]



Kuva 12. Reluktanssimoottorin rakenne [11]

3.2.3 Tahtimoottorin käynnistäminen

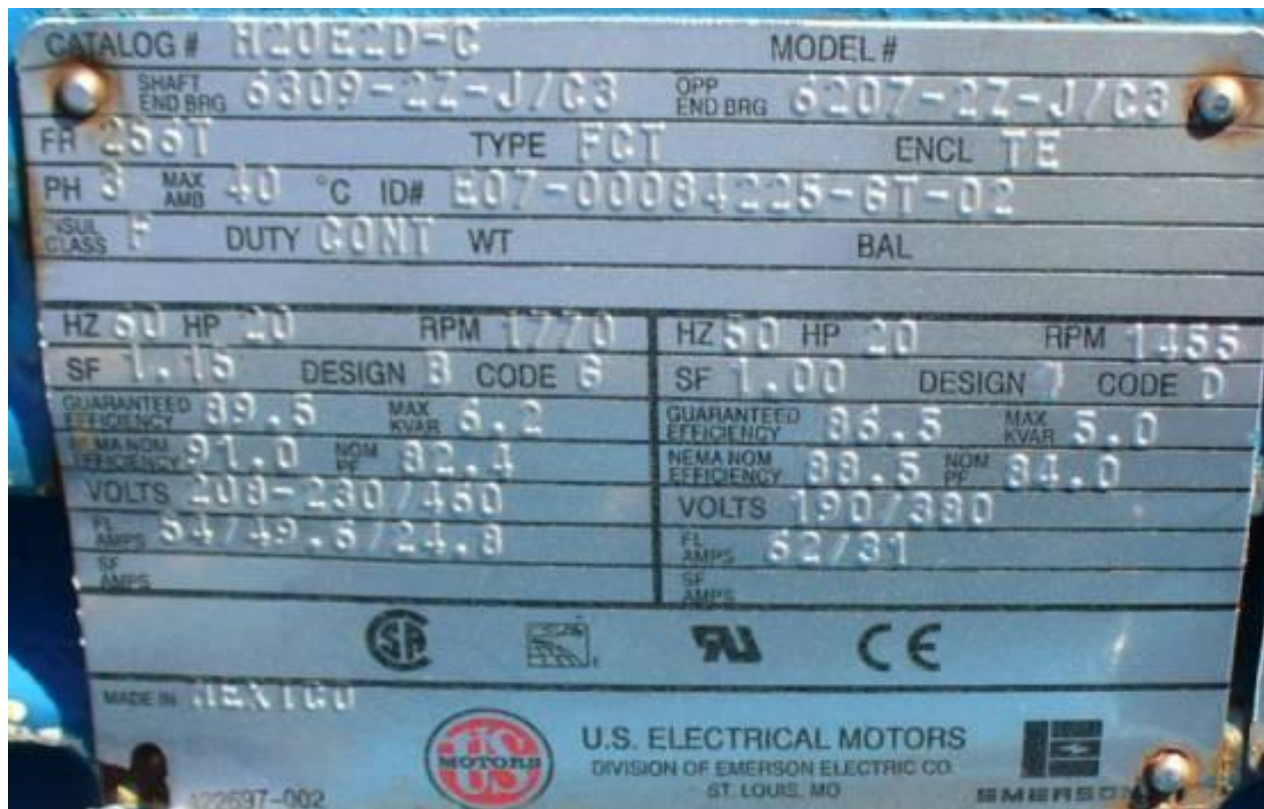
Tahtimoottori ei ole itsekäynnistyvä moottori. Roottori on painava ja sitä on mahdotonta saada samaan tahtiin staattorikentän kanssa kun roottori on täysin pysähtynyt. Tästä syystä kaikilla tahtimoottoreilla on jonkinlainen käynnistyslaite. Yksinkertainen ratkaisu on toinen moottori, joko dc tai ac moottori. Käynnistysmoottori alkaa pyörittämään kuormittamatonta roottoria siihen asti kunnes roottorin nopeus on noin 90 – 95 prosenttia tahtinopeudesta. Tämän jälkeen käynnistysmoottori kytketään irti ja roottori saavuttaa tahtinopeuden, kun tasavirta kytketään roottoriin. Yhtenä mahdollisuutena on myös lisätä häkkikäämityksen kaltainen käynnistyskäämitys roottorin tasavirtakäämityksen yhteyteen. Kyseinen induktiokäämitys kiihdyttää moottorin lähelle tahtinopeutta, eli se toimii samalla periaatteella kuin induktiomooottoreissa. Käynnistyskäämitys on melko yleinen tahtimoottoreissa. [9.]

3.2.4 Leimausarvot

Moottoreiden yhteydessä olevat leimausarvokyltit sisältävät muun muassa seuraavat tiedot:

- teho (nimellinen) tai näennäisteho (kVA tai MVA)
- moottorin (pölyn tai roiskeen kestävyys) toimintaympäristöä ja jäähdytystä koskevat tiedot (esimerkiksi vesi-jäähdytys)
- nopeus kierroksina per minuutti (rpm) vakionopeudella pyöriville moottoreille. Kantanopeus (nb) ja maksiminopeus (nmax) moottoreille, joiden nopeutta voi vaihtaa.
- pääjännite
- tehokerroin
- nimellisvirta
- suurin sallittu moottorin lämpötilan nousu.

- suurin toimintaympäristön lämpötila, ja korkeus
- syöttävän virtalähteen taajuus (Hz)
- roottorin inertia
- eristeluokka
- Monissa moottoreissa on myös niin sanottu "service factor", joka ilmaisee kuinka paljon ylimitoitettua tehoa moottori voi jatkuvasti syöttää ilman ylikuumenemistä. [6.]



Kuva 13. Esimerkki 3-vaiheisen induktiomoottorin kilpiarvoista [12]

4 Keskeiset käsitteet

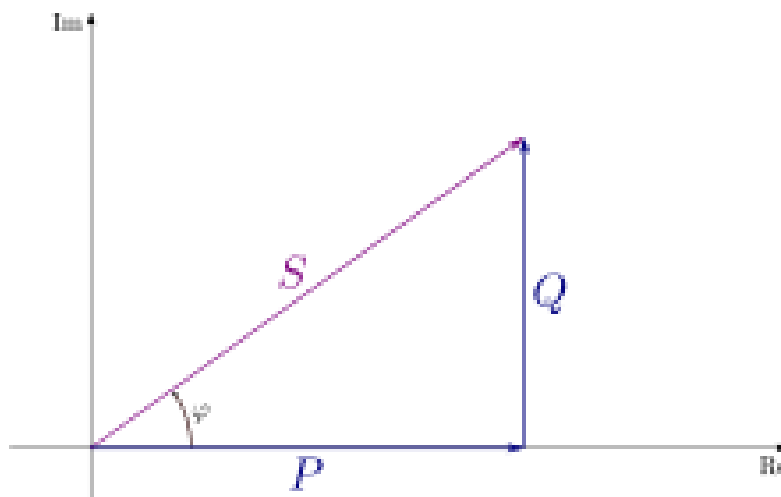
Tässä luvussa käsitellään epätahtimoottoreihin liittyviä keskeisiä käsitteitä.

4.1 Näennäisteho, pätöteho ja loisteho

Sähkömoottorin toimiessa ideaalisesti sen sinimuotoisen jännitteen ja virran vaihe-ero on nolla ($\varphi_1=0$), koska absorboitunut staattorivirta on vähäistä, ja täten kuparihäviöt vaihtosähköä syöttävässä sähköverkossa ovat olemattomia. Tällöin kaikki teho on niin sanotusti aktiivista tehoa eli pätötehoa (P), joka on muutettavissa koneen mekaaniseksi tehoksi. Tämä on mahdollista saavuttaa kaikilla kuormitustasoilla synkronisissa moottoreissa, joissa tasavirtaa syötetään roottorikäännytykseen, mikäli roottorikentän aiheuttavaa tasavirtaa voidaan kontrolloida. Sähköverkkoon kytketyillä induktiomooottoreilla, tämä on mahdotonta, koska magneettikenttä aiheuttaa induktiivista kuormaa, josta syntyy induktiivista loistehoa (Q). [6 s.15;13.]

Näennäisteho (S) on tällöin pätötehon ja loistehon geometrinen summa (kuva 14), joka lasketaan kaavalla 1:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1)$$



Kuva 14. Osoitinpiirros tehoista [13]

Näennäisteho voidaan myös laskea kolmivaiheisessa sähköverkossa toimivalla sähkömoottorilla seuraavalla kaavalla:

$$S = 3U_V I^* = 3 \frac{U}{\sqrt{3}} I^* = \sqrt{3} U I^* \quad (2)$$

U_V =vaihejännite

U = pääjännite

I^* =päävirran kompleksikonjugaatti

Tehokerroin eli cosini ϕ (cos ϕ) ilmaisee pätö- ja näennäistehon suhdetta ja se lasketaan kaavalla 3:

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \quad (3)$$

4.2 Jättämä, tahtinopeus ja napaluku

Jättämä (s) tarkoittaa sitä kuinka paljon roottorin nopeus (n) on prosentuaalisesti jäljessä staattorin nopeutta eli tahtinopeutta (n_s). Napaluvulla (2p) tarkoitetaan moottorin pyörivän magneettikentän tuottamien magneettisten pohjois- ja etelänapojen kokonaismäärää. [7;14.]

Tahtinopeus lasketaan kaavalla 4:

$$n_s = 60 \frac{f_0}{p} \quad (4)$$

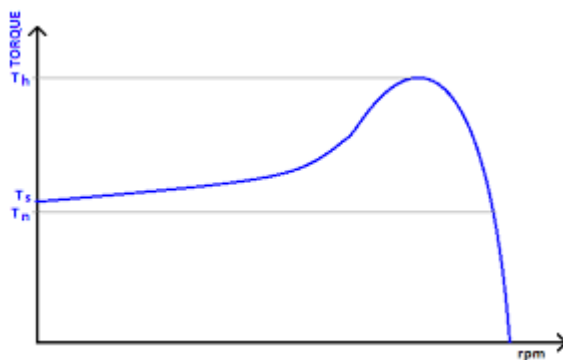
Jossa f_0 on syöttävän verkon taajuus ja p on napapariluku.

Jättämä lasketaan kaavalla 5:

$$s = \frac{(n_s - n)}{n_s} 100\% \quad (5)$$

4.3 Vääntömomentti, hyötysuhde ja sijaiskytkentä

Kun moottoria kuormitetaan, mekaaninen vääntömomentti, joka vastustaa koneen sähköistä vääntömomenttia kasvaa, ja aiheuttaa roottorin pyörimisnopeuden (n) alenemisen. Tällöin kasvaa myös roottorin ja staattorin kentän välinen nopeusero, sekä roottorivirta ja sähköinen vääntömomentti. Tällöin roottorin pyörimisnopeus muuttuu ja roottori jää pyörimään uudella nopeudella, jossa kuormituksen ja moottorin momentit ovat yhtä suuret. Moottorin nopeus siis riippuu kuormituksesta. Kuvassa 15 on oikosulkumoottorin tyypillinen momenttikäyrä. [7.]



Kuva 15. Oikosulkumoottorin tyypillinen vääntömomenttikäyrä. T_h on huippumomentti, T_n on nimellismomentti ja T_s on käynnistysmomentti. X-akselilla nopeus kierroksina per sekunti (rpm). [16]

Sähköinen vääntömomentti lasketaan kaavalla 6:

$$T_e = \frac{P_i}{\omega} \quad (6)$$

Jossa P_i on moottorin ilmaväliteho ja ω on roottorin kulmanopeus (ks. kaava 7)

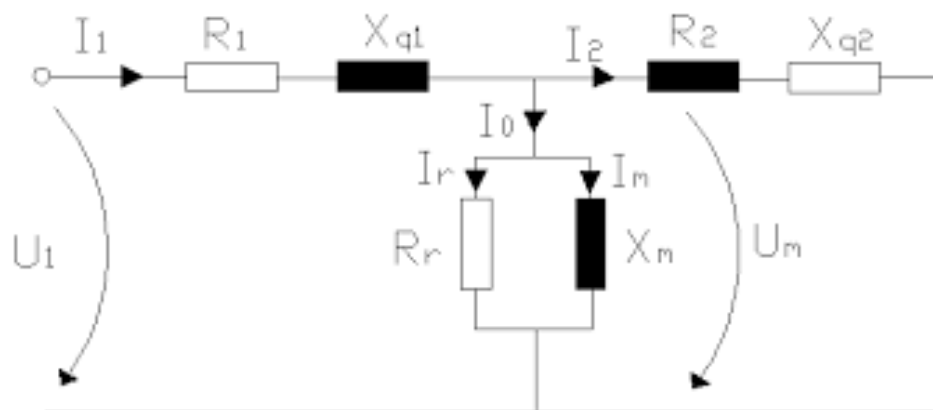
$$\omega = 2\pi f \quad (7)$$

Moottorin nimellishyötysuhde lasketaan kaavalla 8:

$$n = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{\sqrt{3}U_n I_n \cos\varphi_n} \quad (8)$$

Missä P_2 on moottorin antama teho ja P_1 on moottorin arvokilven tiedoista (nimellisarvoista) laskettu teho.

Sijaiskytkennän (kuva 16) tarkoituksena on auttaa ymmärtämään moottorin sähköistä toimintaa sekä laskemaan moottorin sähköisiä arvoja. Moottorin sähköiset arvot redusoidaan vastaamaan yksivaiheista syöttöä. [17.]



Kuva 16. Oikosulkumoottorin yksivaiheinen sijaiskytkentä[17]

- U_1 = Syöttöjännite
- I_1 = Staattorivirta
- R_1 = Staattoriresistanssi
- X_{q1} = Staattorihajareaktanssi
- I_2 = Roottorivirta
- R_2 = Roottoriresistanssi
- X_{q2} = Roottorihajareaktanssi
- U_m = Magnetointijännite
- I_0 = Tyhjäkäyntivirta
- I_r = Rautahäviövirta
- I_m = Magnetointivirta
- R_r = Rautahäviöresistanssi
- X_m = Magnetointireaktanssi

4.4 Epätahtimoottorin nopeuden säätö ja häviöt

Epätahtimoottorin pyörimisnopeus riippuu jättämästä, syöttävän verkon taajuudesta ja napapariluvusta. Nopeutta voidaan siis säätää muutamalla jotakin näistä edellä mainituista parametreista. Taajuusmuuttajaa käyttämällä voidaan muuttaa syöttävän verkon virran taajuutta. Staattori voidaan myös varustaa kahdella eri käämityksellä, joissa on eri napapariluku, ja haluttu nopeus määrittää sen, kumpaa käämistystä milloinkin käytetään. Liukurengasmootorissa nopeutta voidaan muuttaa myös jättämän avulla sen roottoriresistanssia säätämällä. Kun roottoriresistanssia lisätään, loivenee moottorin momenttikäyrän muoto ja uusi toimintapiste saavutetaan uudella jättämällä. [7.]

Staattori- ja roottorikämmityksissä syntyviä sähkövirrasta johtuvia häviötä kutsutaan yleensä kuparihäviöiksi. Rautahäviöt syntyvät siitä, kun staattorin magneettikenttä lämmittää moottorin rautaosia kuten staattorin ydintä. Mekaaniset häviöt aiheutuvat kitkasta, jota esiintyy muun muassa moottorin laakereissa ja ilmajäähdyttimessä, kun se jäähdyttää moottoria. [18.]

Kuparihäviöt lasketaan kaavalla 9:

$$P_{cl} = RI^2 \quad (9)$$

5 Moottorin mitoitus

Moottorin mitoitus toteutetaan Matlab-ohjelmointikielillä, johon on löydetty valmis algoritmi, jolla moottori on mahdollista mitoittaa halutunlaiseksi. Ohjelma perustuu Hooke-Jeevesin algoritmiin, ja sen on tehnyt Ion Boldea. Koneen suunnittelussa on käytetty melko paljon esimerkeissä olevia parametrejä, joita muuttamalla on koneen rakenne yritetty optimoida mahdollisimman hyväksi. Lisäksi mallia on katsottu myös vertailmoottorista. Optimoinnissa oleville parametreille on annettu maksimi- ja minimiarvot. Ohjelma yrittää saada Hooke-jeevesin algoritmin avulla kokonaiskustannukset mahdollisimman pieneksi.

Kokonaiskustannuksiin vaikuttavien parametrien (joille on annettu mahdollisimman toteuttamiskelpoiset minimi- ja maksimiarvot) keskiarvosta lasketaan ensiksi alkuarvo kokonaiskustannusfunktioille. Tämän jälkeen ohjelma laskee, jonkun parametrin maksimi ja minimiarvon erotuksen ja jakaa sen kymmenellä. Tämä on ensimmäisen askeleen mitta. Kyseisen askeleen pituudella liikutaan funktiossa joka suuntaan, (ylös, alas, oikealle ja vasemalle) jotta löydetään uusi minimiarvo. Mikäli uutta minimiarvoa ei funktioille löydy, niin askeleen pituutta lyhennetään puoleen ja ohjelma palauttaa funktion arvoksi edellisen minimiarvon. Tämä toistetaan niin kauan kunnes askel on tarpeeksi pieni. Tämä toimenpide tehdään jokaisella parametrilla, jonka askel pienentää kokonaiskustannuksia.

5.1 Suunniteltava moottori

Koska suunniteltavan moottorin on haluttu olevan rakenteeltaan yksinkertainen, on suunniteltavaksi moottorityypiksi valittu oikosulkumoottori, jossa on häkkikäämitys. Moottorin on ajatus pyöriä vakionopeudella, eli nopeuden säätöä ei tarvitse ottaa huomioon, vaan moottori kiihdytetään taajuusmuuttajalla pyörimisnopeuteensa nollostä hertsistä 50 hertsiin. Staattorissa on yksikerroksinen 3-vaihekäämitys, ja sen käämit on kytketty tähteen. Napapariluku on kaksi, joten siinä on siis kaksi sähköisesti muodostettua pohjois- ja etelänapaa. Nimellistehoksi (P_n) on valittu 510 kW, vaihejännitteeksi (U_{vn}) 400V ja verkontaajuudeksi (f_n) 50 Hz. Tehokertoimen ($\cos\phi$) on suunniteltu olevan noin 0.9 ja hyötysuhteen noin 0.8 kuormituksesta riippuen.

Moottorin staattorissa voisi olla ainakin 24 slottia. Se tarkoittaisi sitä, että jokaista napaa ja vaihetta kohti olisi kaksi slottia staattorissa. Roottorissa puolestaan olisi tällöin ainakin 16 slottia. Kyseisiin roottorislotteluihin asennetaan häkkikäälityksen johdintangot. Suunniteltava moottori muistuttaa jonkin verran rakenteeltaan kuvassa 17 olevaa rakennetta. Suurimpana erona on se, että slottien muodot sekä niiden lukumäärä poikkeavat suunniteltavasta moottorista. Taulukossa 1 on esitetty roottorislottien lukumäärän suhdetta napaparilukuun ja q1:een.

Napapariluku	q1	Roottorislottien lukumäärä
1	4	18 20 22 28 30 33 34
	6	25 27 28 29 30 43
2	2	16 18 20 30 33 34 35 36
	3	24 28 30 32 34 45 48
	4	30 36 40 44 57 59
	5	36 42 48 50 70 72 74
	6	42 48 54 56 60 61 62 68 76 82 86 90
3	2	20 22 28 44 47 49
	3	34 36 38 40 44 46
	4	44 46 50 60 61 62 82 83
4	2	26 30 34 35 36 38 58
	3	42 46 48 50 52 56 60
6	2	69 75 80
	2.5	86 87 93 94

Taulukko 1. Taulukossa on listattuna roottorislottien yleinen lukumäärä napapariluvun ja q1:n suhteen q1 tarkoittaa staattorislottien lukumäärää per vaihe per napa.[6; s.722.]

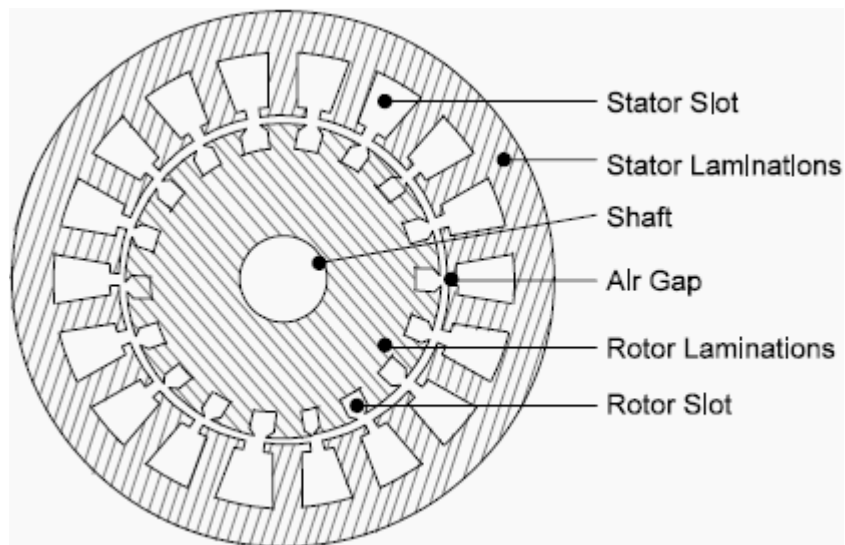
$$q1 = \frac{Nslot}{m*2p} \quad (10)$$

Jossa $Nslot$ on staattorislottien lukumäärä, ja m on vaiheiden lukumäärä.

Nyt on saatu valituksi alkuparametrit sekä muut mahdolliset rajoitteet:

- $P_n = 510 \text{ kW}$
- Verkkotaajuus $f_n = 50 \text{ Hz}$
- Napapariluku $P = 2$
- Hyötysuhde $\eta = 0.8$
- Staattorissa on laminoitu AC 3-vaihekäämitys.
- Roottorissa on laminoitu häkkikäämitys, jonka pituus on yhtä suuri kuin staattorin pituus.
- Staattorissa noin 24 slottia, kun taas roottorissa ainakin 16.
- Vaihejännite $U_v = 400 \text{ V}$
- Tehokerroin $\cos \varphi_n = 0.9$
- Laminoitu staattori.
- Vakionopeus
- Nimellisahtinopeus $n_{sn} = 60 \frac{f_n}{p} = 60 \frac{50 \text{ Hz}}{2} = 1500 \text{ rpm}$.
- Roottorin pyörimisnopeus häviöistä riippuen $n = 0.95 * n_{sn} = 1425 \text{ rpm}$.
- Pieni ilmaväli $g = 4 \text{ mm}$
- $q_1 = 2$
- Staattorissa on yksikerroksinen käämitys.

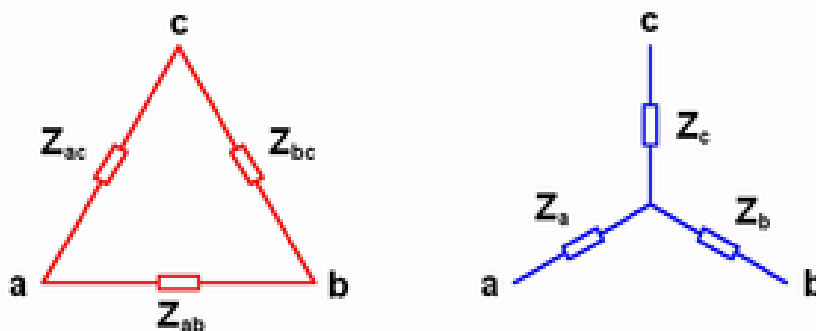
- Virrantiheyden maksimiarvo roottorissa ($J_r \text{ max}$) 2.5 A/mm^2 . Mikäli roottorivirta pysyy vakiona ja virrantiheys laskee, kasvaa roottorin pinta-ala. Tästä seuraa se, että roottori painaa enemmän ja siihen on käytetty enemmän materiaalia.
- Virrantiheyden maksimiarvo staattorissa ($J_s \text{ max}$) 2.5 A/mm^2 .



Kuva 17. Staattori- ja roottorigeometria suunniteltavassa moottorissa muistuttaa yllä olevan kuvan rakennetta.[19]

5.2 Vertailumoottori

Vertailu ja referenssimoottoriksi on löydetty abb:n valmistama induktiomoottori. Kyseinen induktiomoottori on nimellisteholtaan yhtä suuri, siinä on sama napaluku, sama jännite ja samaa suuruusluokkaa oleva nimellisjännite, nopeus, tehokerroin sekä hyötysuhde. Roottori- ja staattorigeometria ovat pääpiirteittäin samanlaiset, vaikka kaikista parametreistä ei ole varmuutta eikä tarkkoja kuvaajia moottorin toiminnasta ole saatavilla. Vertailumoottorin staattori on datalehden tietojen mukaan kytketty kolmioon. Käynnistettäessä se taas voi olla tähteen kytketty tai sitten siinä on taajuusmuuttajakäynnistys. Tähteen kytketyn staattorin virta on pienempi johtuen jokaisen vaiheen saamasta pienemmästä jännitteestä kolmiokytkentään verrattuna, moottori ei tällöin käynnistettäessä kuormita sähköverkkoa yhtä voimakkaasti (kuva 18.). Saavuttaessaan maksimipyörimisnopeutensa se vaihdetaan kytkimen avulla kolmiokytkentään. Työssä mitoitettu staattori on kytketty tähteen, joka aiheuttaa hivenen eroa virtoihin sekä resistansseihin vaiheiden välillä, eikä mahdollista vaihtoa kolmio kytkentään ole otettu huomioon. Johdinmateriaaleina vertailumoottorissa on käytetty pääosin rautaa ja kuparia. Lisätietoja vertailumoottorista voi katsoa liitteestä 1.



Kuva 18. Vasemmalla olevassa kolmiokytkennässä jokaiseen käämiin (Z) johdetaan yksi vaihe ja käämin toinen pää kytketään seuraavan käämin eteen. Kun taas tähtikytkennässä käämien loppupäät on kytketty yhteiseen tähtipisteeseen.

5.3 3-vaiheinen AC staattorikäänitys

Sinimuotoisen magneettivuon luomiseen ilmvälissä tarvitaan 3-vaiheinen staattorikäänitys. Kyseinen magneettivuo jakaantuu roottorin ympärille. Induktiomootoreiden 3-vaihekäänitys koostuu limitetyistä vaihekäämeistä. AC- käänityksen suunnittelu tarkoittaa sitä, että tietty määrä keloja jaetaan useille staattorisloiteille ja vaiheille, minkä jälkeen ne kytketään tähteen tai kolmioon kuten on aikaisemmin mainittu. Käänitys voi olla joko yksi tai kaksi kerroksinen. [6 s.206]

Moottoria on optimoitu sekä yksi- että kaksikerroksisena. Kun muut parametrit pysyvät muuttumattomina, optimaatio, missä staattorikäänitys oli yksikerroksinen määrittyi staattorisloitten (N_{slot}) lukumääräksi 24 ($q_1=2$), kun taas kaksikerroksisena optimoitu moottori ilmoitti staattorisloitten lukumääräksi 48 ($q_1=4$). Tehokerroin oli huonompi yksikerroksisena simuloidussa staattorissa kuin kaksikerroksisena simuloidussa staattorissa. Koska ohjelma ei piirrä staattorikäänitystä täydellisesti, (liite14) päätettiin valita yksikerroksinen staattorikäänitys, tehokertoimen huononemisesta huolimatta, jotta käänit ja niiden kulkureitin voisi itse piirtää. Yksikerroksisena tämä on huomattavasti selkeämpää. Käytännössä näin isojen moottoreiden staattorikäänitystä ei tehdä yksikerroksisena, vaikka simuloinnista se meni läpi. Kaavoilla 11, 12 ja 13 on määritetty staattorikäänityksen ominaisuuksia.

$$Y = \frac{2\pi}{24} p = \frac{2\pi}{24} 2 = \frac{4\pi}{24} = \frac{\pi}{6} = 30^\circ \quad (11)$$

Y on yhden käänin jänneväli radiaaneina ja asteina per napapari.

$$Q = \frac{N_{slot}}{2p} = \frac{24}{4} = 6 \quad (12)$$

Q on napajako slotteina ilmaistuna, eli kuusi slottia per napa.

$$\sigma = q_1 Y = 2 * 30^\circ = 60^\circ \quad (13)$$

Vaiheen leveys asteina on 60° , eli kaksi vierekkäistä slottia kuuluu samaan vaiheeseen.

Huomataan, että $Y \cdot Q = 180^\circ$, koska yhdessä napaparissa on 12 slottia (kaksi napaa), ja $(12 \cdot 30 = 360^\circ = 2\pi)$, joten kyseessä on käämitys, jonka jänneväli on täysimittainen eli yhden napajaan pituinen. Kelojen lukumäärä on puolet slottien lukumäärästä. Ne ovat sarjassa, koska input-tiedostossa on määritetty parametri "parallel path=1" ja kierrosten lukumääräksi on output-tiedostossa annettu 12. (ks. liite 2, liite 3, liite 23 ja liite 24).

5.4 Roottorin häkkikäämitys

Roottorin häkkikäämitys on täysin symmetrinen. Tämän vuoksi vierekkäisten virtojen välillä on oikosulkurenkaalla vaihesiirto, joka lasketaan seuraavasta kaavasta:

$$a_{er} = \frac{2\pi p}{N_r} \quad (14)$$

Missä N_r on roottorislottien lukumäärä.

Oikosulkurenkaan virta I_r voidaan tämän seurauksena laskea kaavalla 15:

$$I_r = \frac{I_b}{2 \sin \frac{a_{er}}{2}} \quad (15)$$

Missä I_b on roottorin johdintangossa kulkevan virran suuruus.

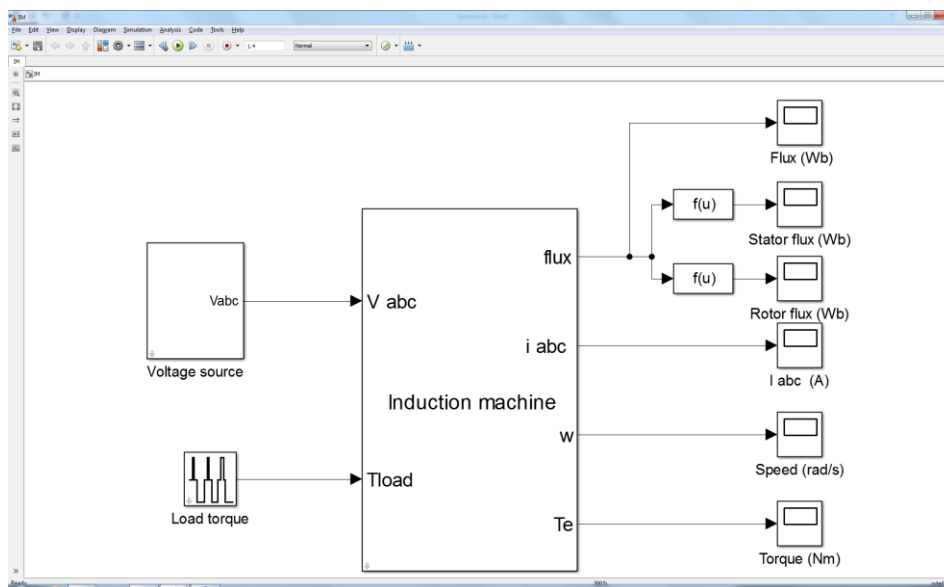
Oikosulkurenkaan (R_r) ja johdintangon (R_b) resistanssit lasketaan seuraavilla kaavoilla:

$$R_b = \rho_b \frac{l_b}{A_b}; \quad R_r = \rho_r \frac{l_r}{A_r}; \quad (16)$$

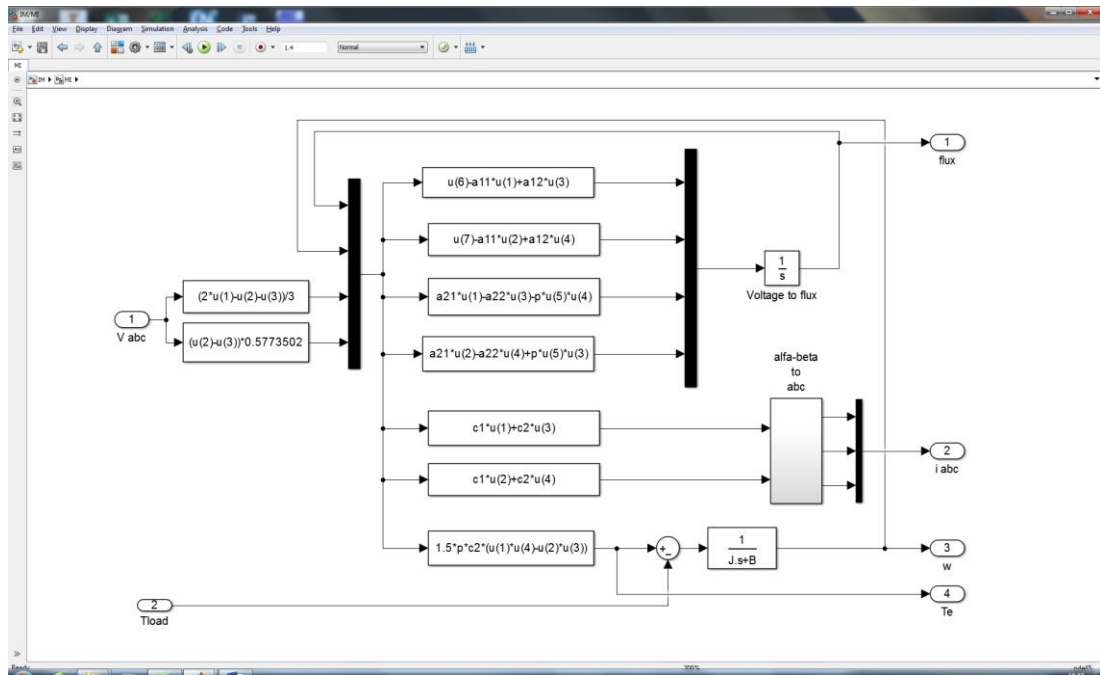
Missä ρ on johdinmateriaalin resistiivisyys, l on pituus ja A on pinta-ala.

5.5 Roottorin pyöriminen

Roottorin pyörimisliikettä ajan funktiona on tarkasteltu simulinkilla, joka on graafinen ohjelmointityökalu dynaamisten järjestelmien analysoimiseen. Induktiomoottorin toiminnan analysoimiseen on löydetty valmis maski (kuva 19 ja 20). Eli tehtäväksi jäi vain parametrien syöttäminen output-tiedostosta ja kuormitusmomentin valitseminen, siten että se vastaisi realistista tilannetta.



Kuva 19. Kuvakaappaus maskista.



Kuva 20. Kuvakaappaus Blokki-diagrammista.

Maskiin syötettävät parametrit:

Napapariluku = 2

Staattori-resistanssi = 0.003447Ω

Roottori-resistanssi = 0.004251Ω

Staattori-induktanssi = $L_{sl} + L_{m0} = 0.000405 \text{ H} + 0.004256 \text{ H} = 0.004661 \text{ H}$

Magnetointi-induktanssi (L_{m0}) = 0.004256 H

Roottori-induktanssi = $R_{sl} + L_{m0} = 0.000114 \text{ H} + 0.004256 \text{ H} = 0.004370 \text{ H}$

Roottorin inertia = n. 63.9 kgm^2

Kitkakerroin = 0.02

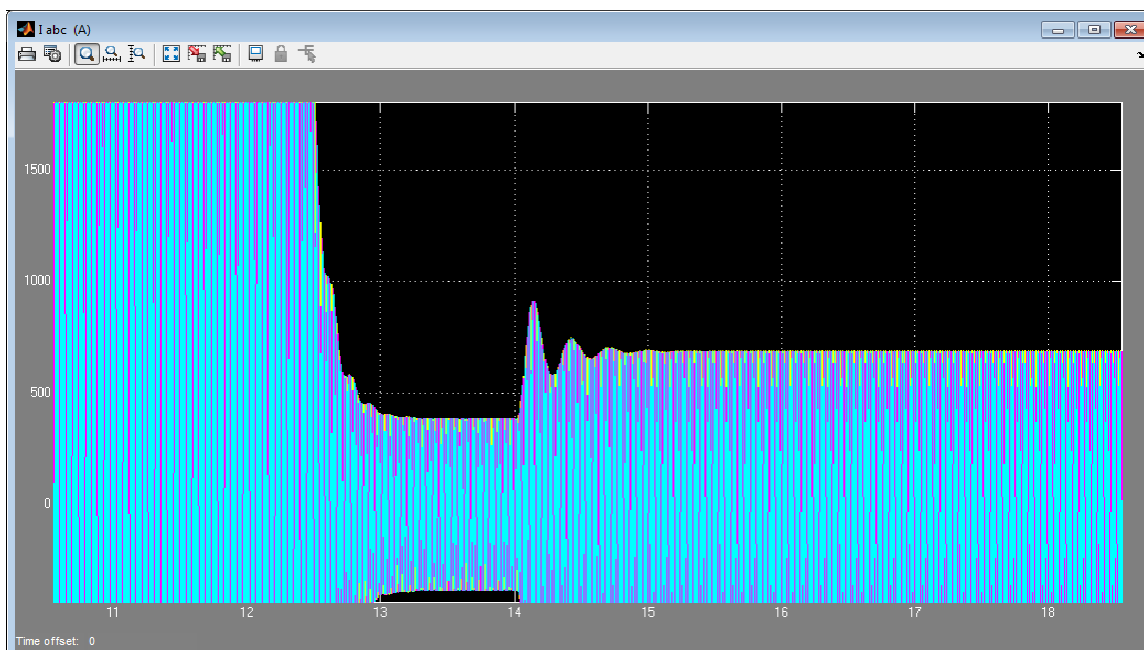
$f = 50 \text{ Hz}$

$U_v = 400 \text{ v}$

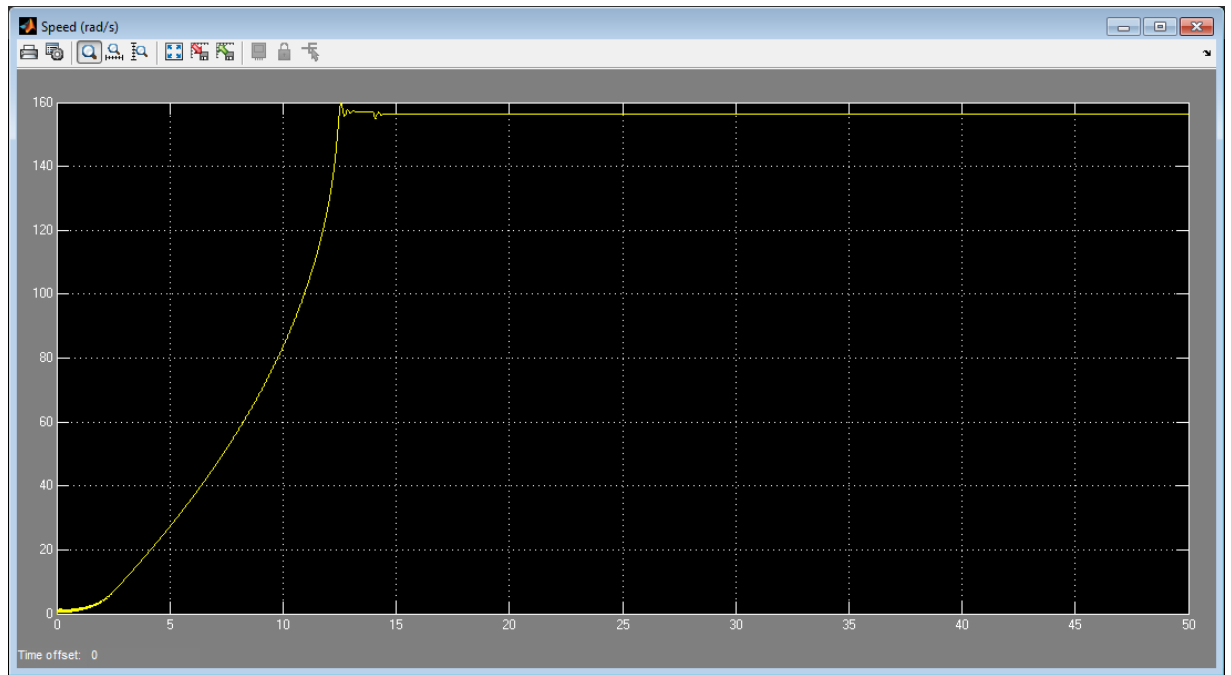
L_{sl} = staattorin vuotoinduktanssi

L_{sr} = roottorin vuotoinduktanssi

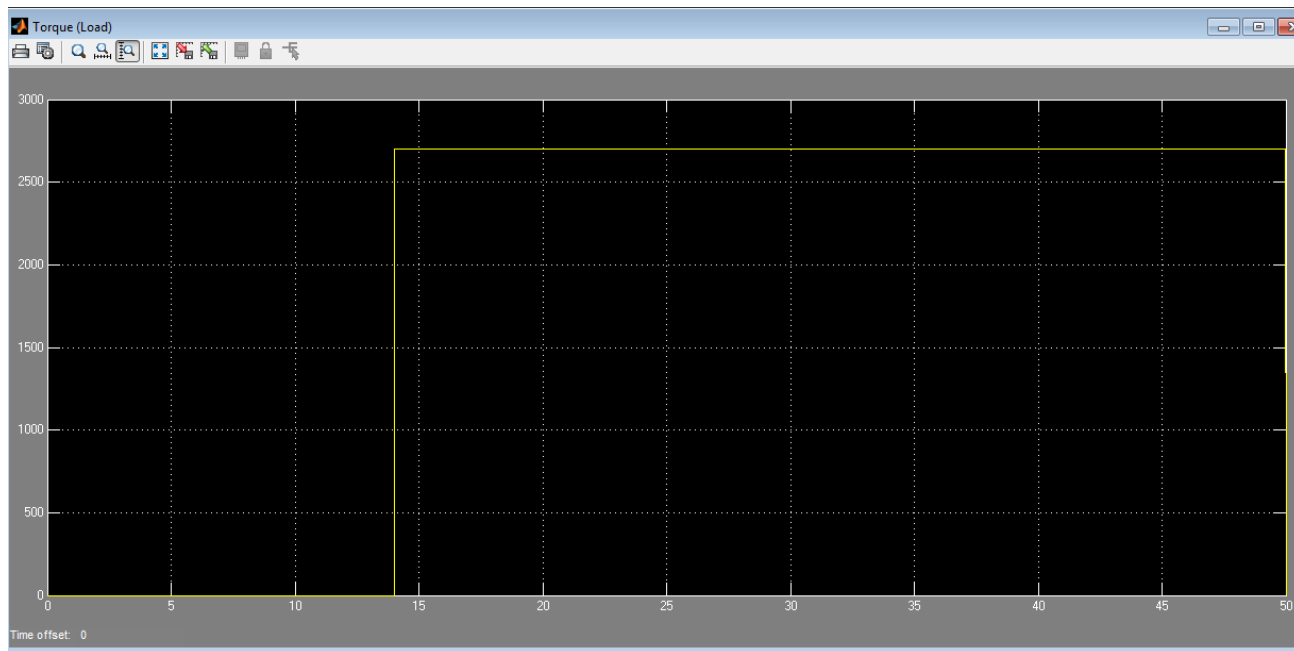
Moottoria on simuloitu ensiksi niin, että siinä ei ole minkäänlaista kuormaa ja katsottu missä ajassa se kiihtyy täyteen pyörimisnopeuteensa. Tämän jälkeen kuormitusmomentiksi on asetettu kolmasosa huippumomentista (kuva 23) (n.2700Nm) aikavälillä 14–50 sekuntia, simulointiajan ollessa 50 sekuntia. Huomataan, että virta vastaa lähes nimellisvirtaa ja 2700Nm kuormitusmomentti ei hidasta roottoria verrattuna kuormittamattomaan. Roottorin pyörimisnopeus on noin 155 rad/s (1480 rpm) (kuva 22) mikä tarkoittaa sitä, että roottori pyörii lähes tahtinopeudella. Virran ollessa noin 650 A (kuva 21).



Kuva 21. Kuvakaappaus staattorivirrasta. Virta asettuu lähelle nimellisvirran arvoa kun kuormitus muuttuu nolasta hivenen alle nimelliskuormituksen aiheuttaman momentin suuruiseksi (n. 2700 Nm).



Kuva 22. Kuvakaappaus moottorin nopeuden kuvaajasta.



Kuva 23. Kuvakaappaus kuormitusmomentin kuvaajasta.

6 Yhteenveto

Työn tekeminen oli kiinnostavaa ja opettavaista. Tuloksena saatiin mitoitettua induktiomoottori, jonka ominaisuuksia voidaan tarkastella kuvaajista (liite 6–24) ja edellä olevan kappaleen simulointituloksista, sekä verrata vertailumoottoriin. Aihe oli melko laaja ja aikataulun vuoksi aihetta jouduttiin rajaamaan, esimerkiksi prototyypin rakentamisesta luovuttiin jo aikaisessa vaiheessa. Ohjelman toiminta ja osa mitoituksessa käytettävistä parametreista jäi hivenen epäselväksi puutteellisten ohjelmointitaitojen vuoksi. Itse ohjelmaan ei tehty muita muutoksia kuin se, että kuvaajat tallennettiin nimettyinä png-tiedostoina suoraan kansioon, missä niitä pystyy paremmin tarkastelemaan. Ohjelma sisälsi pääohjelman lisäksi 27 aliohjelmaa.

Tässä työssä mitoitettulla moottorilla on huonompi tehokerroin ja hyötysuhde kuin vertailu moottorissa, mikä selittyy varmasti osittain yksikerroksisella staattorikäymyksellä. Nimellisvirta taasen on pienempi kuin vertailumoottorissa. Kupari-, rauta- ja kokonaishäviöt ovat vertailumoottorissa pienemmät mikä voi selittyä suuremmasta materiaali määrästä kaupallisen moottorin staattorissa. Vertailumoottorin roottorin paino on alhaisempi verrattuna mitoitettuun moottoriin mikä voi selittää sen, että huippu- ja nimellismomentti on pienemmät vertailumoottorissa (liite 1 ja liite 4-5). Vaikuttaisi siltä, että työssä mitoitettu moottori häviäisi melko paljon vertailumoottorille. Alla olevassa taulukossa on, edellä mainittujen ominaisuuksien vertailu.

Vertailumoottori			Mitoitettu moottori		
Parametri	Tunnus	Arvo	Parametri	Tunnus	Arvo
Tehoker.	cosfi	0.89	Tehoker.	cosphin	0.77
Hyötysuh.	eta	96.8%	Hyötysuh.	etan	95.8%
Nim.virta	I1	854A	Nim.virta	I1n	570A
Häviöt	Ptot	16.9Kw	Häviöt	Pcu+Pfe+Pmec	n.22kw
Roo.paino	Tot.rotor	800kg	Roo. paino	WeightRt	990kg
Huip.mom	Tmax	6900Nm	Huip.mom	Tn	n.8200Nm
Nim.mom	Tn	3200Nm	Nim.mom	Tn	n.3500Nm

Taulukko 2. Moottoreiden perusominaisuuksien vertailu

Lähteet

1. Doppelbauer, Martin. The invention of the electric motor 1800-1854. Verkkodokumentti. < <http://www.eti.kit.edu/english/1376.php>> Luettu 27.7.2015.
2. Baumgartner, Hans. Tasavirtakone. Verkkodokumentti. <<http://hasseb.fi/reports/tasavirtakone.pdf>> Luettu 28.7.2015.
3. General on motors. Verkkodokumentti. <http://mechatronics.mech.northwestern.edu/design_ref/actuators/motor_theory.html> Luettu 28.7.2015.
4. Korpinen, Leena. Sähkökoneet, osa2. Verkkodokumentti. <http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_2osa.pdf> Luettu 30.7.2015.
5. Kantanen, Lasse. Tasasähkökoneen huolto ja koestus. Verkkodokumentti. <http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/9794/Kantanen.Lasse.pdf?sequence=2kirja>> Luettu 1.8.2015
6. Boldea, Ion, Tutelea, Lucian. 2009. Electric Machines. CRC Press.
7. Korpinen, Leena. Sähkökoneet, osa1. Verkkodokumentti. <http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf> Luettu 3.8.2015.
8. Wound rotor motor. Verkkodokumentti. <https://en.wikipedia.org/wiki/Wound_rotor_motor> Luettu 5.8.2015.
9. A-C motors The Universal motors. Verkkodokumentti. <<http://www.rfcafe.com/references/Electricity-Basic-Navy-Training-Courses/electricity-basic-navy-training-courses-chapter-16.htm>> Luettu 8.8.2015.
10. Supported motor types. Verkkodokumentti.<http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/374169A-01/lvemsimshared/motor_type/> Luettu 10.8.2015.
11. Sliding Controller of Switched Reluctance Motor. Verkkodokumentti.<http://leipt.academicdirect.org/A12/151_162.htm> Luettu 15.8.2015.
12. US Electrical Motors 20 HP 1455-1770 RPM 50-60 Hertz AC Induction Motor. Verkkodokumentti. <<http://www.mgmelectricalsurplus.com/Details/Motors/AC%20Induction%20-%20Squirrel%20Cage/219.php>> Luettu 16.8.2015.

13. AC power. Verkkodokumentti.
<https://en.wikipedia.org/wiki/AC_power#Reactive_powe> Luettu 23.8.2015.
14. Komission asetus (EY) N:o 640/2009. Verkkodokumentti. <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=celex:32009R0640>> Luettu 25.8.2015.
15. Korpinen, Leena. Vaihtosähkön perusteet. Verkkodokumentti.
<http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/liite1.pdf> Luettu 1.9.2015.
16. Honkanen, H. Sähkömoottoreiden valinta. Verkkodokumentti.
<http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/STEK_SMOOTT.pdf> Luettu 2.9.2015.
17. Lindström, Kari. Kolmiulotteinen Vaijerikamera. Verkkodokumentti.
<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/44583/Lindstrom_Kari.pdf?sequence=1> Luettu 2.9.2015.
18. Electrical motor efficiency. Verkkodokumentti.
<http://www.engineeringtoolbox.com/electrical-motor-efficiency-d_655.html> Luettu 5.9.2015.
19. Construction of 3-phase induction motor. Verkkodokumentti. <<http://electrical-engineering-portal.com/construction-of-3-phase-ac-induction-motors>> Luettu 20.10.2015

Vertailtavaan moottoriin liittyviä tietoja

Brief-tuloslehti - Muistio									
Tiedosto		Muokkaa		Muotoile		Näytä		Ohje	
OUTPUT ADEPT ver. 8.2			Base program: S113			Date 22.01.2014			
Type: HXR 400LG4			Ref 3607HG300			Product id 110		H_number 53282	
Comments:									
Full load point		St.conn: Delta			Starting		St. slot		Rt. slot
Un	0.400 kv	zform1	18.000	Is	4616.1 A	slotttype1	1	slotttype2	1
I1	853.788 A	e1	3	Is/Ik	1.136	bsi1	14.00	bso2	7.30
Im	192.318 A	bcu1	12.54	Is/In	5.389	bso1	14.00	bsi2	7.30
E/U	0.937	hcu1	2.96	Ts	2.389 kNm	hstot1	68.50	hstot2	52.80
Pmec	2.750	a1	2	Ts/Tn	0.729	hsn1	63.50	hs2	50.30
PFe	3.193	ypitch1	10	Tmax	6.855 kNm	hisw1	5.00	hsy2	2.50
Pcu1	4.337	Jku/Par	3+ 3/1-R	Tmax/Tn	2.095	bsyf1	7.00	bsy2	4.00
Pcu2	3.953								
Padd	2.634	Rt cage	Bar	Ring	Dimensions	Magn.circuit (no-load)			
Ptot	16.869	ATout[mm ²]	349.4	1540.0	l_tot1	585.00	E/U	0.967	Ampt
Pn	510.000 kw	Jout[A/mm ²]	3.057	3.207	lid	595.00	Bd	0.623	3293
P1	526.869 kw	MaterOut	Cu	Cu	l_tot2	595.00	Bts2	1.279	21
eta	96.798 %	ATin [mm ²]	0.0	0.0	lm1	1180.00	Bts4	0.803	
cosfi	0.8908	Jin [A/mm ²]	0.000	0.000	do1	680.00	Btr2	0.987	51
fn	50.000 Hz	MaterIn	Cu	Cu	di1	420.00	Btr4	1.561	
speed	1488.584 rpm				di2	140.00	Bys1	1.123	64
s	0.761 %				zts1	13.09	Byr1	0.802	16
PtotRd	11.424 kw	weights [kg]			zts4	22.46	I0Q	199	3446 A
JCu1	2.247 A/mm ²	St.iron	797.91		ztr2	14.91			
Q1/Q2	48/ 58	Rt.iron	441.15		ztr4	9.46	Control data		
Airflow	1.687 m ³ /s	St.copper	332.19		2H1A	123.00	delta	2.500 mm	
St.nominal	67.5 K	Rt.bars	120.80		2H2A	169.40	I0	199.298 A	
Rt.nominal	85.6 K	Rt.rings	30.43		D1A	557.00	P0	6.344 kw	
GRAD	0.0 K	Tot.rotor	800.00		D2A	309.40	Ik	4063.456 A	
TEMP	0.0 °C	Jmot	15.58 kgm ²				R1ph20	0.00151 ohm	
Qout	0.000 m ³ /s						STemp	67.5 K	
							RTemp	85.6 K	
							FMRADDYN	2951.5 N/mm	

Input tiedosto

```

%Technical request
Pn=510;          % KW -roted power
fn=50;          % Hz - base speed
Vfn=400; % V - phase voltage

%Primary Dimension
poles=4;        % number of poles
nphase=3; % number of phase
ParallelPaths=1; % parallel current path

%Optimization variable limitations
elsp_min=6; %kA/m          Minimum          Specificate electric load
Bagsp_min=0.4; %T Minimum Specificate magnetic inductin in air gap
lcpertau_min=0.5; %mm Minimum value of Core stack length
Js_min=2; %A/mm^2 Minimum Stator current density
Jr_min=2; %A/mm^2 Minimum Rotor current density
sBt_min=0.8; %T Mimnimum Specificate magnetic inductin in stator Tooth
sBy_min=1; %Minimum magnetic induction in rotor yoke
rBt_min=0.8; %T Minimum magnetic induction in stator yoke
rBy_min=1; %T Minimum magnetic induction in rotor yoke
q1_min=2; %number of stator slots per pole per phase
sMs_min=0.5; %mm Minimum value of Stator open width
rMs_min=0.3; %mm - Minimum Mouth of rotor slot
sh4_min=0.3; %mm - Minimum stator coil height
rh1_min=0.3; %mm Minimum height of mouth of rotor slot
cSpan_min=0.66; %Copil open

elsp_max=20; %kA/m          Maximum Specificate electric load
Bagsp_max=0.85; %T Maximum Specificate magnetic inductin in air gap
lcpertau_max=2; %mm Maximum value of Core stack length
Js_max=2.5; %A/mm^2 Minimum Stator current density
Jr_max=2.5; %A/mm^2 Maximum          Rotor current density
sBt_max=1; %T Maximum Specificate magnetic inductin in stator Tooth
sBy_max=2; %T Maximum magnetic induction in stator yoke
rBt_max=1; %T Maximum magnetic induction in stator yoke
rBy_max=2; %T Maximum magnetic induction in rotor yoke
q1_max=6; %number of stator slots per pole per phase
sMs_max=2; %mm Maximum value of Stator open width
rMs_max=2; %mm Maximum Mouth of rotor slot .
sh4_max=2; %mm - Maximum stator coil height
rh1_max=2; %mm Maximum height of mouth of rotor slot
cSpan_max=1; %Copil open

%Minimum variation
dXmin=[0.2 0.01 0.05 0.05 0.05 0.02 0.02 0.02 0.02 1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.02 1];

%Secondary data prescriptin
layers=1;

%Technological dimensions - Geometric minimum dimensions
hag=4;
rDi_min=52; %mm - Mnimum shaft diameter
sW3_min=2; %mm width of top slots
dlr=3; %mm diferenta dintre lungimea rotorului si a
lf1=8; %mm - right part of overhang coils
lf2=8; %mm - distanta bobina si scut
sf=0.97; %stacking factor
sSlotFill=0.4; %slot filling factor
kJendr2Jr=0.8;
rss=0; % - rotor slot slant in number of rotor slot pitch

```

```

etaSpec=0.80;    % required efficiency
cosPhiSpec=0.9; % required power factor
Is_max=6;       %pu - mazimum value of the starting current

sAlpha=12;      %degrees-weangle
slotInsulThick=0.15; % Thickness of slot insulation
slotClosureThick=0.5; % Thickness of slot closure (wedge)

nce=1; % number of elementary conductors
Kso=0.3;

M19; %Magnetic material data for stator
rWm='Al';

%Objective function coefficients
cu_pr=10; %USD/kg copper price
Al_pr=1; %USD/kg Al price
lam_pr=5; %USD/kg lamination price
rotIron_pr=5; %USD/kg - shaft iron price
energy_pr=0.1; %USD/kWh energy price
pmw_pr=5; %USD/kg passive material price
hpy=1500; %h hour per year
ny=100; %years of use
kct=1; %over temperature penalty cost coefficient

% Other specification
Tw1=105; %deg. C - stator winding temperature
Tw2=125; %deg. C - rotor winding temperature
Tw_max=155; %deg.C - maximum winding temperature
Tamb=50; %deg.C - temperature of cooling fluid
alpha_t=14.2; %W/m^2*deg. thermal transmission coefficient
kff=4.5; %increasing factor of cooling surface
kpfe=2.25; %iron losses factor (the iron loss are larger due field non-uniformity)
Pmec=12*Pn; %W assumed mechanical losses 0.5%Pn
Pem_n=1000*Pn+Pmec; % W - maximum electromechanically power
run_mode='o'; % Run mode: 'o' - optimization, 'e' - performances evaluation
output_file='im1_ohg1.m'; % Name of the output file
t_file='im1_ohg1.txt'; % Name of the table output file
trace_file='im1_ohg1'; % Name of the tr

```

Output tiedosto (im1_ohg1.m)

```

% Electrical rated parameters
Pn=510.000000;% W - rated power
fn=50.000000;% Hz - rated frequency
Vfn=400.000000;% V - dc voltage
I1n=570.758358; % A - Rated current
etan=0.958341; % Rated efficiency
cosphin=0.772662; % Power factor
Pcu=6344.780909;% W - Rated copper loss
Pfe=9704.888997;% W - Rated iron loss
Pmec=6120.000000; % W - Mechanical loss (given in input file)
sR=0.003447; % Ohm Stator (dc) resistance
rR=0.004251; % Ohm Rotor (dc) resistance
sR=39.309833; % Ohm Iron loss equivalent resistance
Lm0_sat=0.004256; % H Magnetization inductance (at rated field)
Lsl=0.000405; % H Stator leakage inductance
Lrl=0.000114; % H Rotor leakage resistance
rJ=63.890443; % kgm^2 Rotor inertia

%Optimization variable
elasp=20.000000; % T -Specificate electric load
Bagasp=0.623759; % T -Airgap flux density
Icpertau=2.000000;% Ratio of core stack length per pole pitch
Js=2.095820; %A/mm^2 Stator current density
Jr=2.000000; % A/m^2 Rotor current density
sBt=1.000000; % T - Flux density in stator Tooth
sBy=1.624414; % T - Flux density in stator Yoke
rBt=1.000000; % T - Flux density in rotor Tooth
rBy=1.458391; % T - Flux density in rotor Yoke
sh4=2.000000; % mm - Top of stator teeth height
sMs=0.500000; % mm - Stator slot open width
rMs=1.730470; % mm - Rotor slot open width
rh1=0.300000; % mm - Top of rotor teeth height
q1=2.000000; % Number of stator slots per pole per phase
cSpan=0.833333; % pu - Coil open
rSlots=36.000000 % Number of Rotor slots

% Constructive dimensions
sDo=838.000000;% mm - Stator outer diameter
sDi=607.813562;% mm - Stator inner diameter
lc=848.396924; % mm - Core length
hag=4.000000; % mm - air-gap
shOA=56.688479; % mm - Total stator sloth height
sh4=2.000000;% mm - Stator tooth pole tip height- fig.3.1
sh3=3.183918;% mm - Stator wedge place height - fig.3.1
sh1=50.854561;% mm - Stator coil height
shy=58.404740;% mm - Stator yoke width
swp=49.627895;% mm - Stator tooth width
sW1=44.019721;% mm - Stator slot width (root)
sW2=30.629461;% mm - Stator coil width (top)
sMs=0.500000;% mm - Stator slot mouth
sBareD; % mm - Diameter of stator equivalent bare
R1=309.090699; % mm - Radius of tooth head
N1=12.000000;% Turns per coil
rDo=599.813562;% mm - Rotor outer diameter
rDi=399.000000;% mm - Rotor inner diameter
rhy=64.991024;% mm - Rotor yoke width
rhOA=35.491378; % mm - Total rotor sloth height
rh2=8.498170;% mm - height of botom part of rotor bar
rh3=20.542457;% mm -
rW1=17.019196;% mm - width of rotor bar at bottom
rW2=13.424732;% mm - width of top rotor bar

```

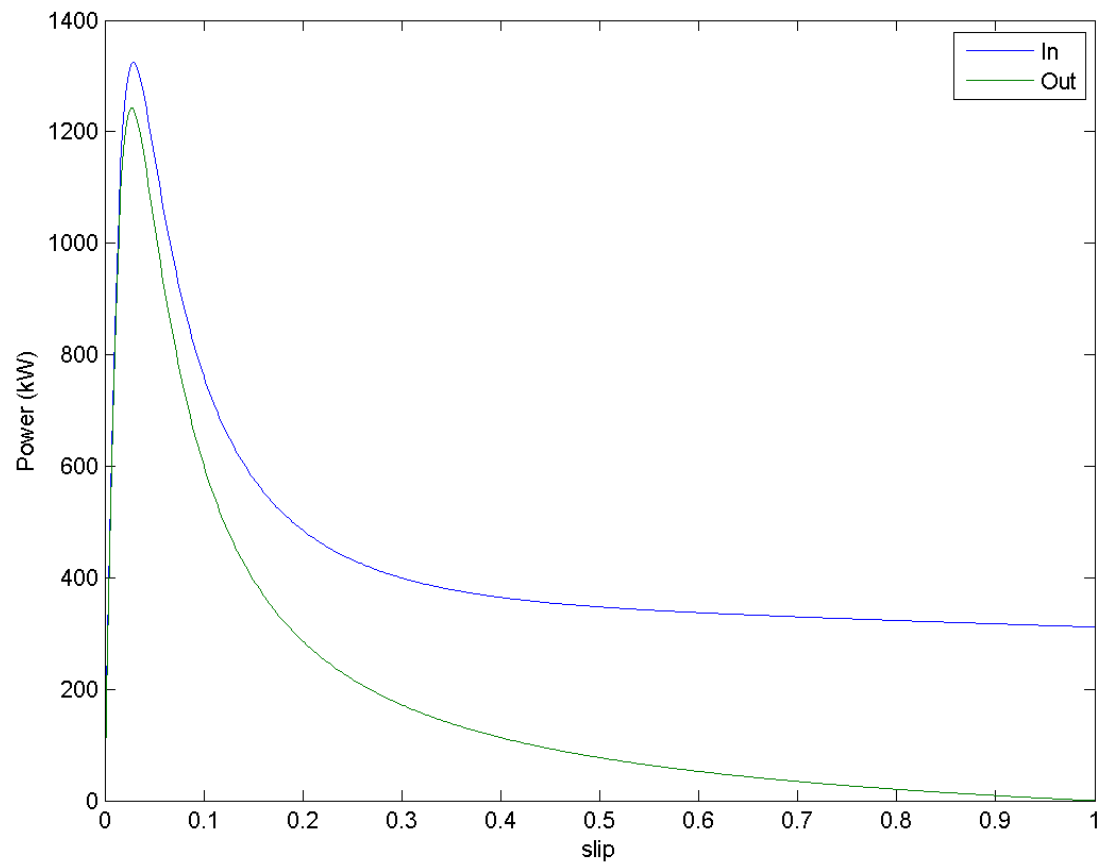
% Weights

WeightStCu=251.822975; % kg -
WeightStTeethIron=440.349295; % kg -
WeightStCoreIron=918.190047 ;% kg -
WeightStIron=1358.539343; % kg -
WeightSt=1610.362318 ;% kg -
WeightRtBare=85.692224; % kg -
WeightRtRing=8.071227; % kg -
WeightCage=93.763452 ;% kg -
WeightRtTeethIron=287.995743; % kg -
WeightRtCoreIron=608.104546; % kg -
WeightRtIron=896.100289; % kg -
WeightRt=989.863741; % kg -
WeightM=2600.226058; % kg -
WeightIronUsed=4507.683960; % kg -

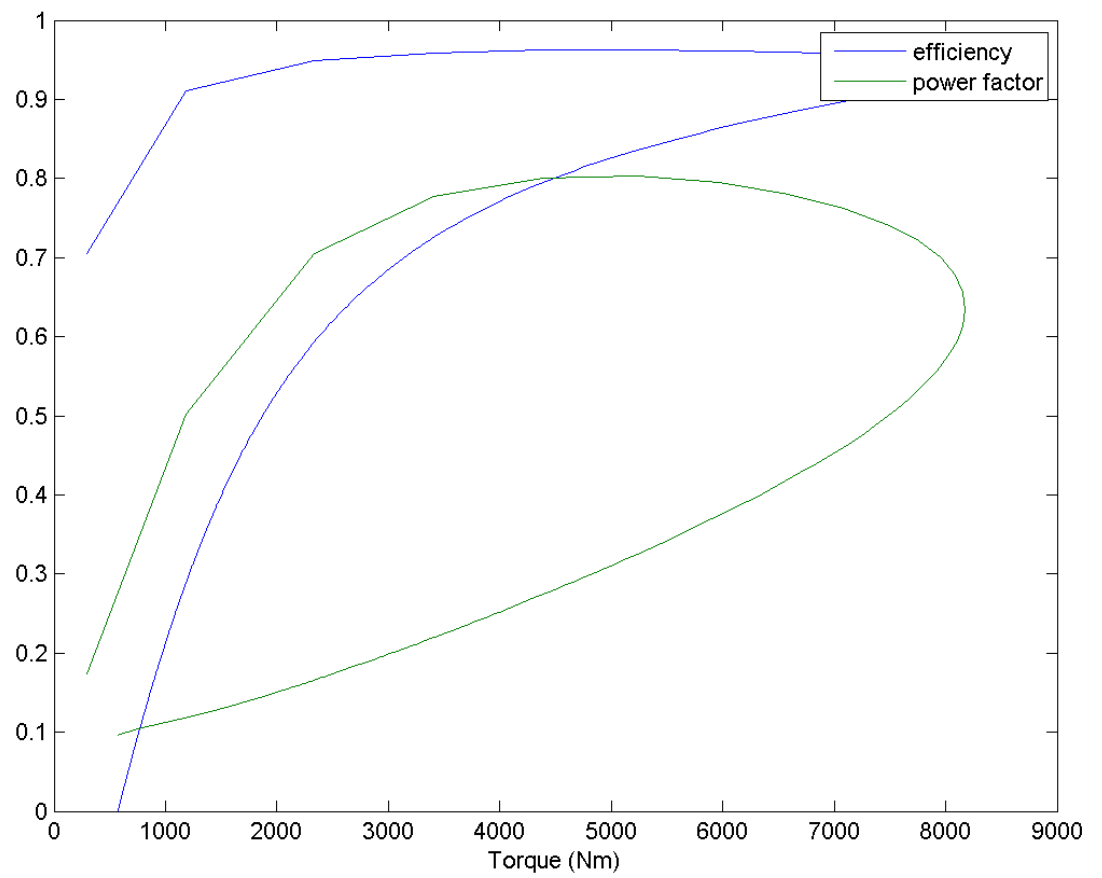
% Costs

cu_c=2518.229751 % USD Copper cost
lam_c=22538.419801 % USD Lamination cost
cage_c=93.763452 % USD
pmw_c=13001.130291 % USD passive material cost
i_cost=38151.543295 % USD initial cost
energy_c=332545.048590 % USD energy loss cost
t_cost=370696.591885 % USD total cost

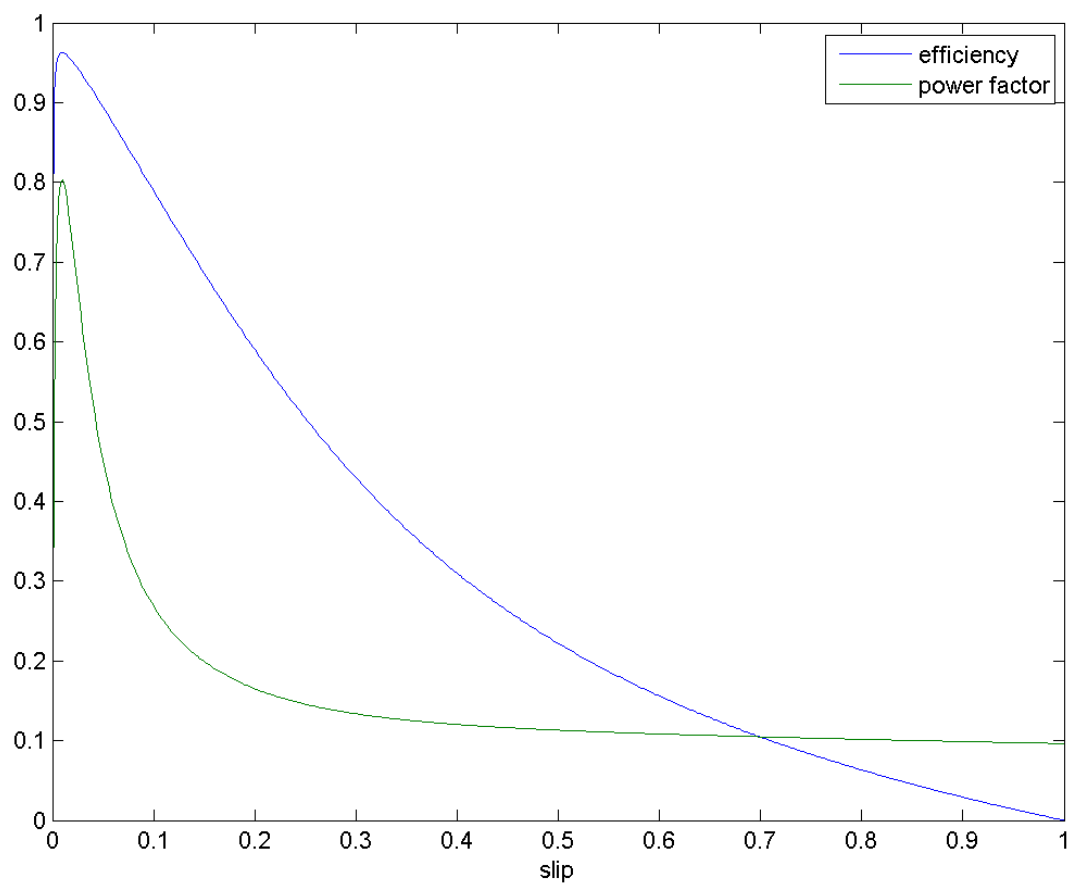
Anto- ja ottotehot



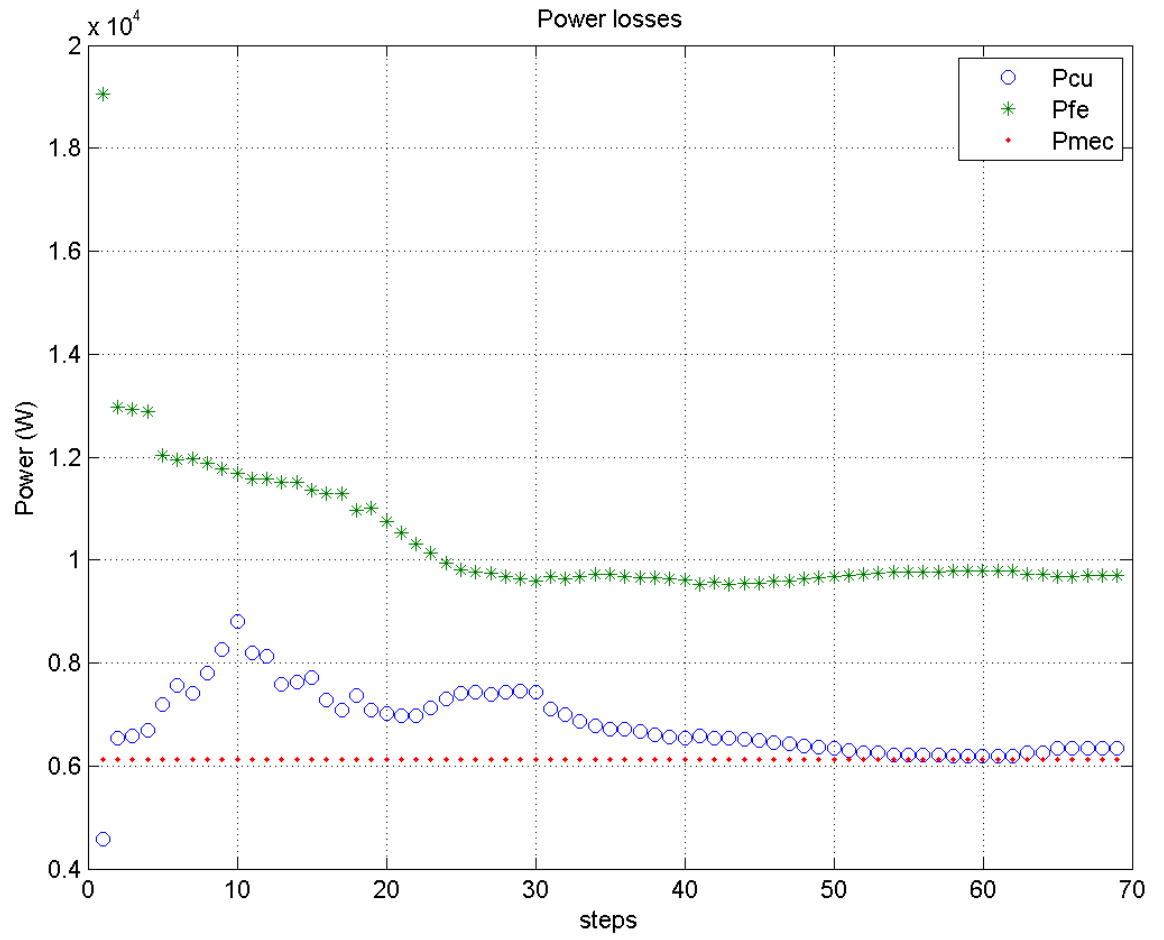
Hyötysuhde ja tehokerroin vääntömomentin funktiona



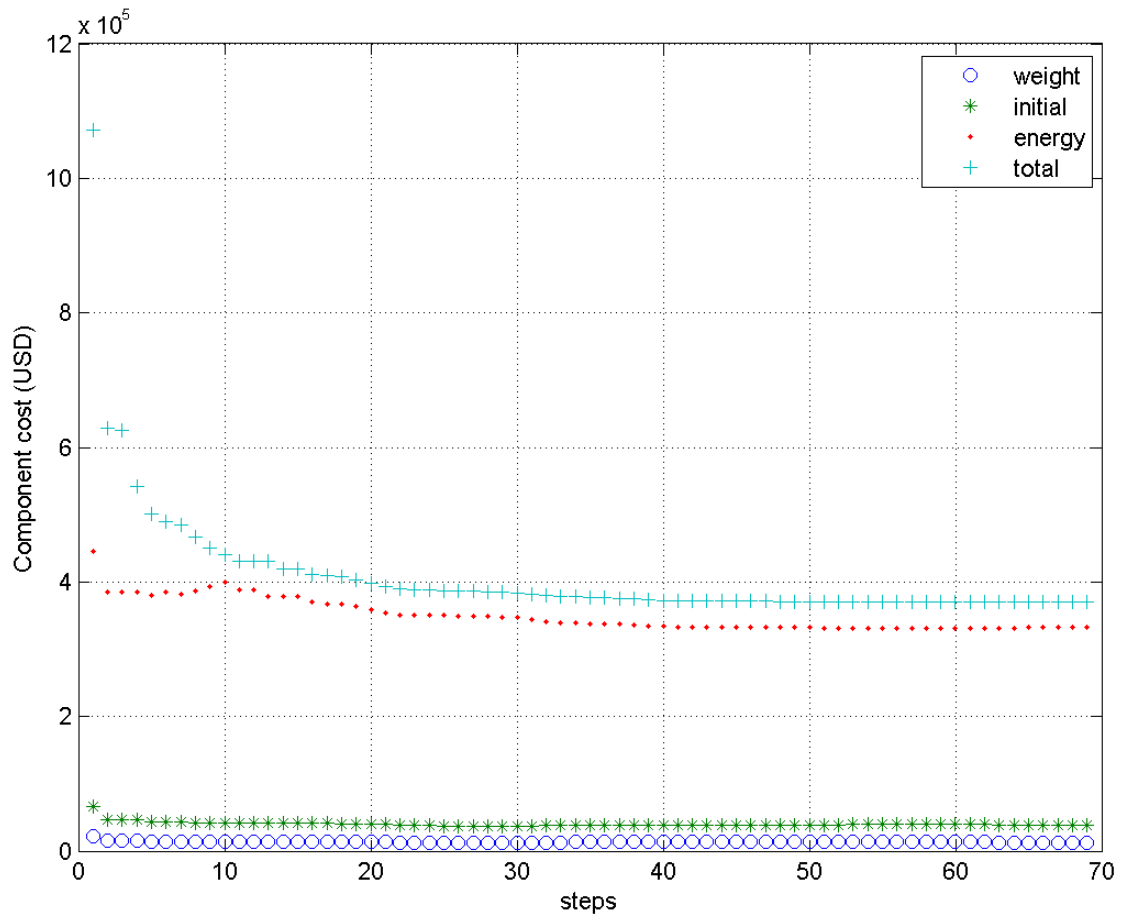
Hyötysuhde ja tehokerroin jättämän funktiona



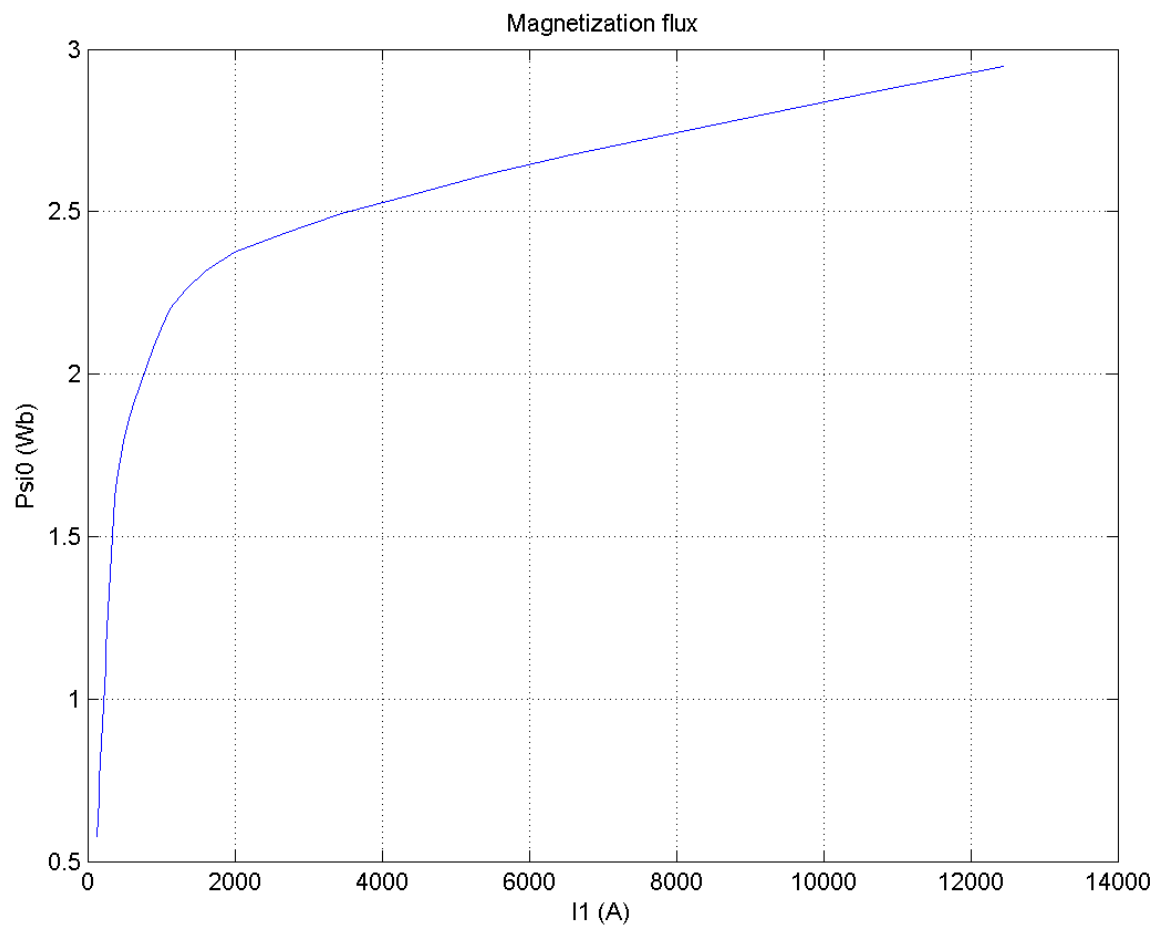
Häviöt

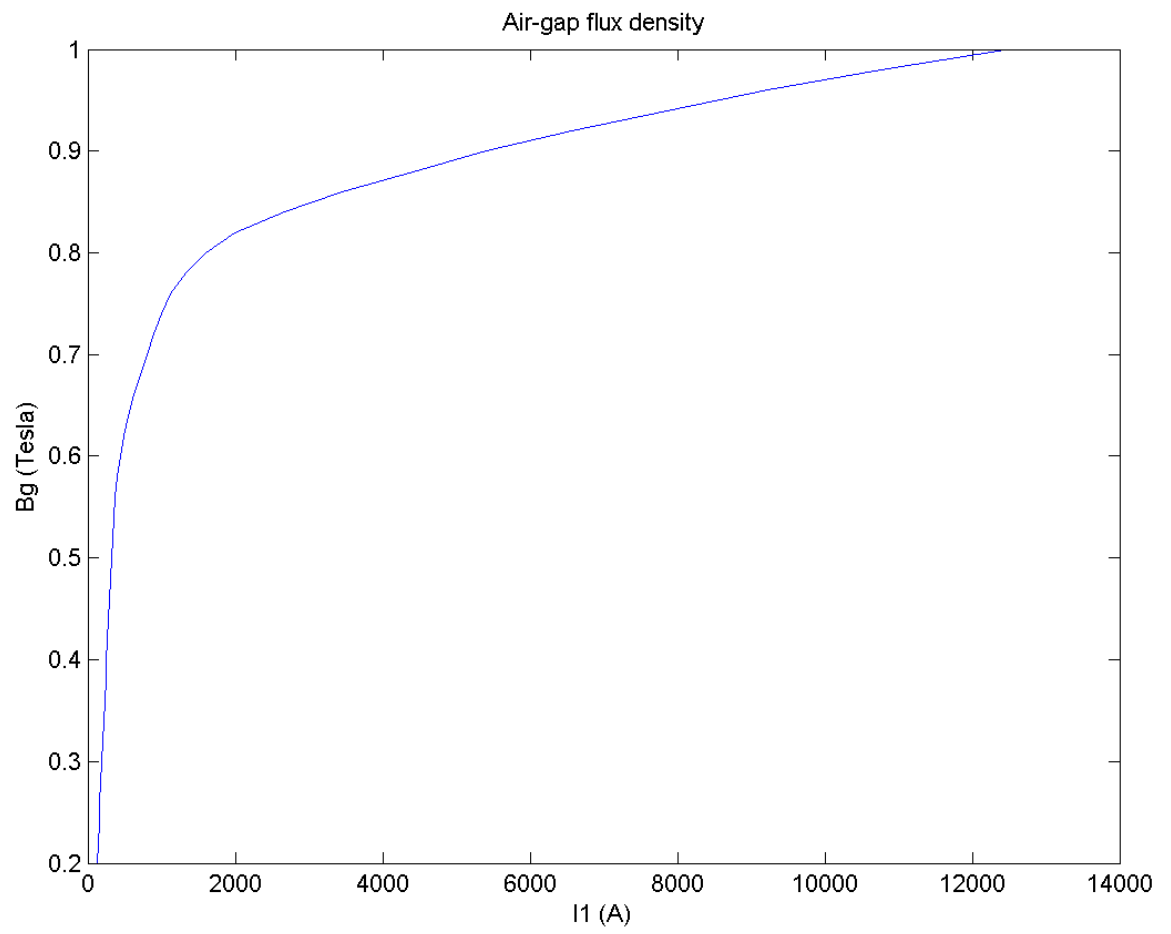


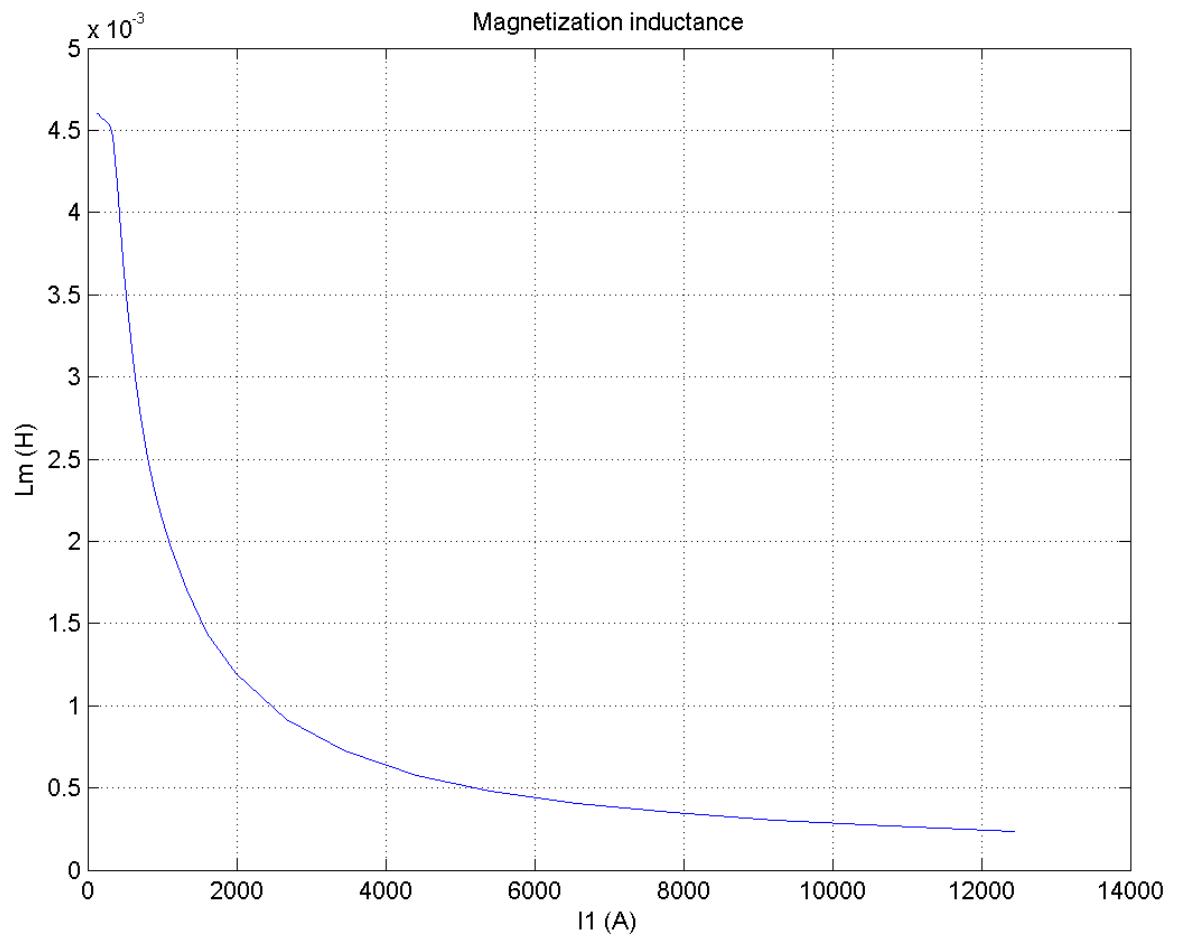
Kustannukset



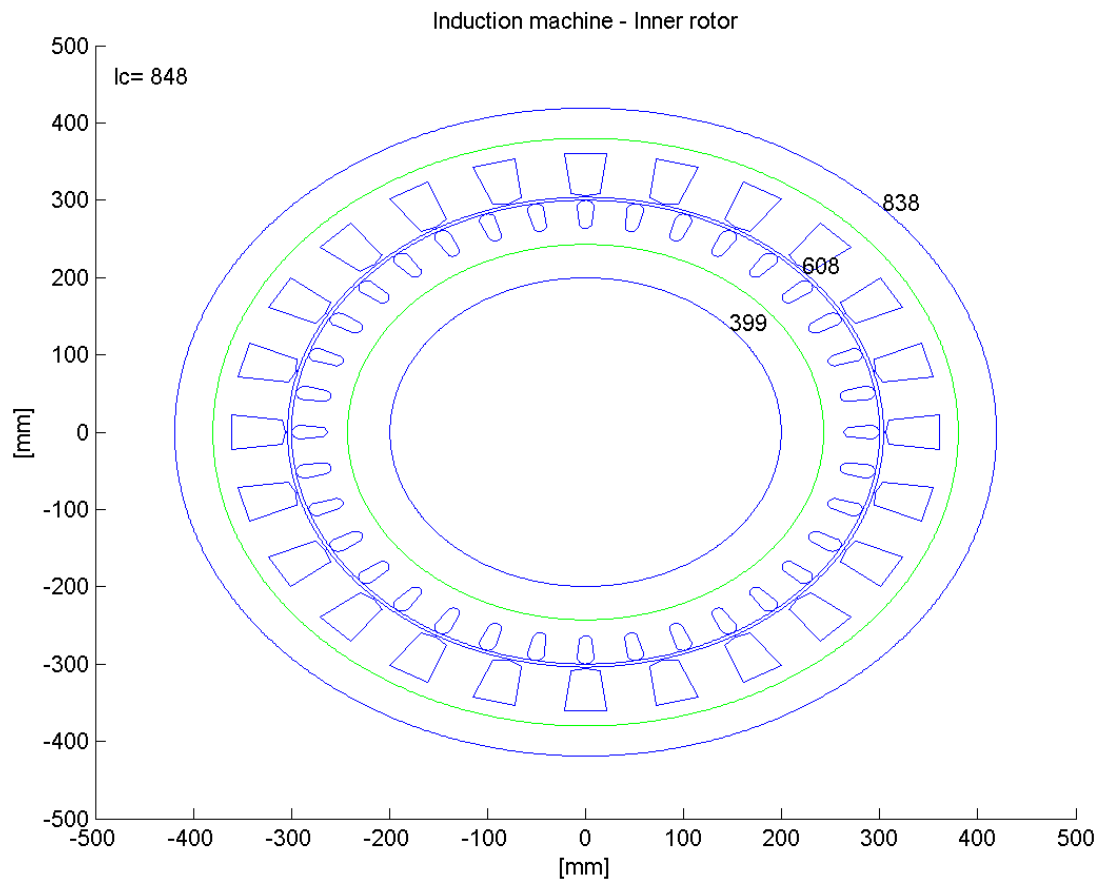
Magneettivuo staattorivirran funktiona



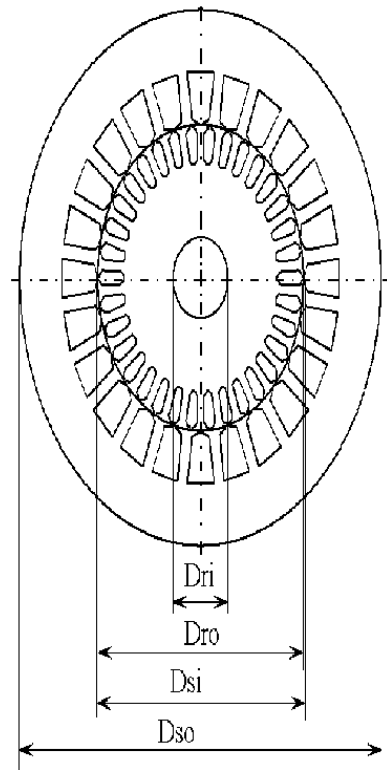
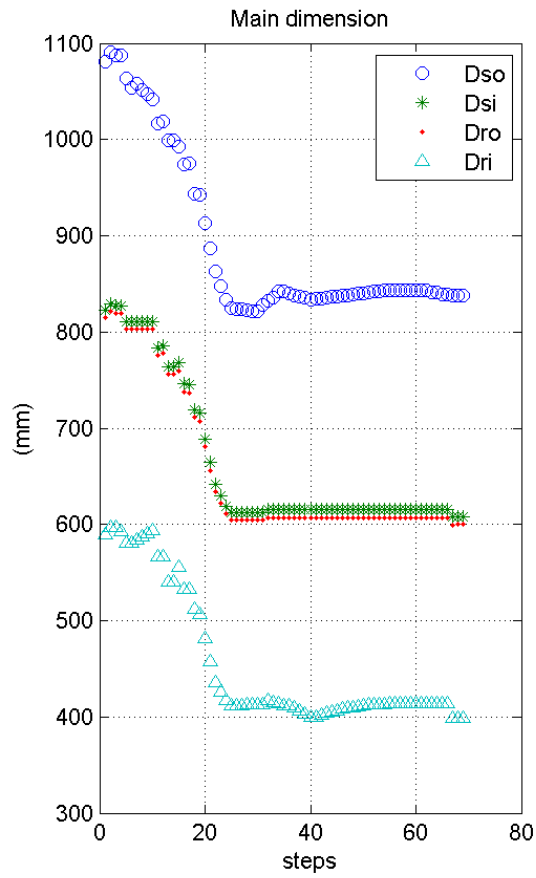
Magneettivuon tiheys staattorivirran funktiona

Magnetoinnin induktanssi staattorivirran funktiona

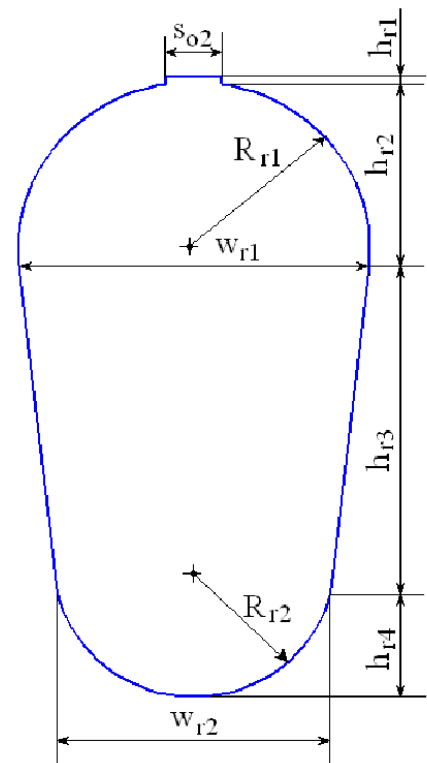
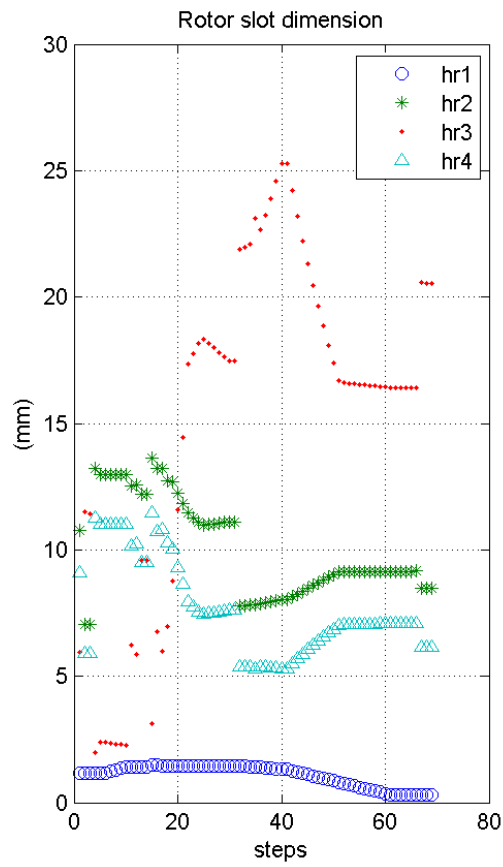
Moottorin geometria



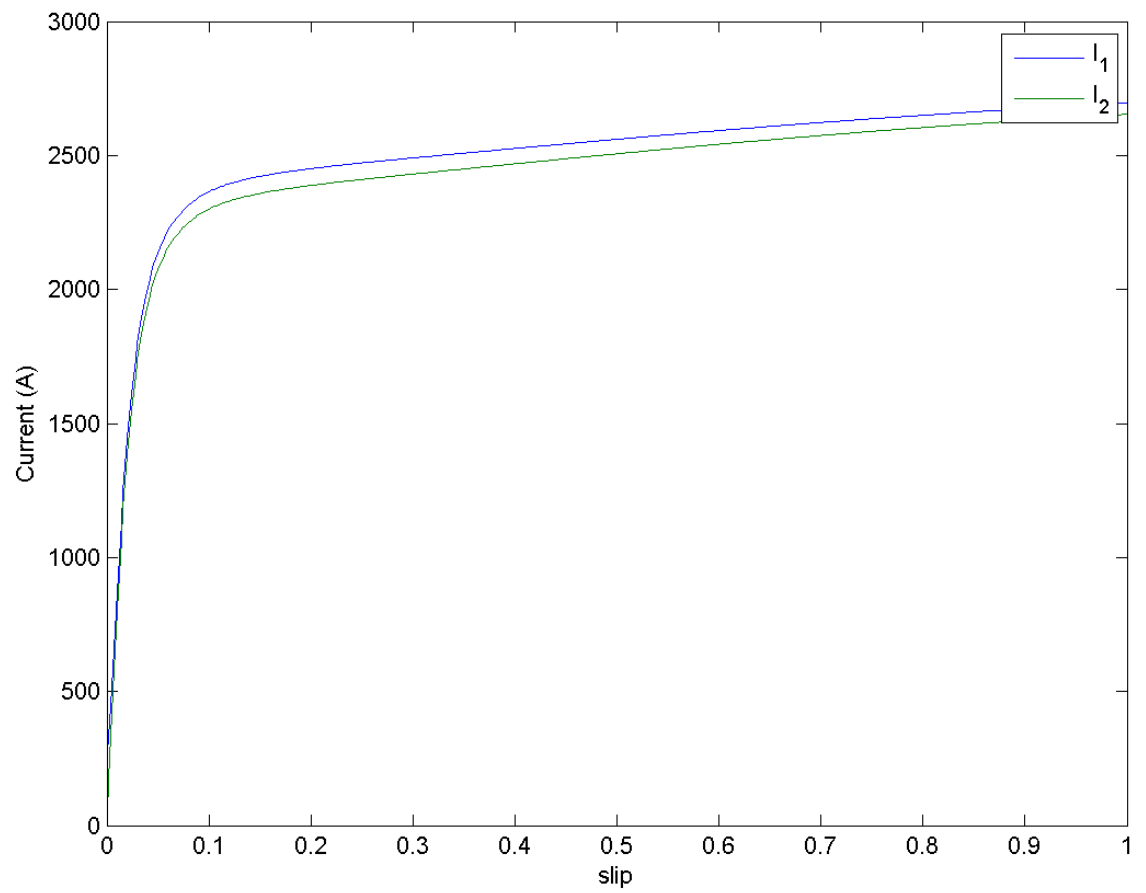
Staattorin ja roottorin halkaisijat



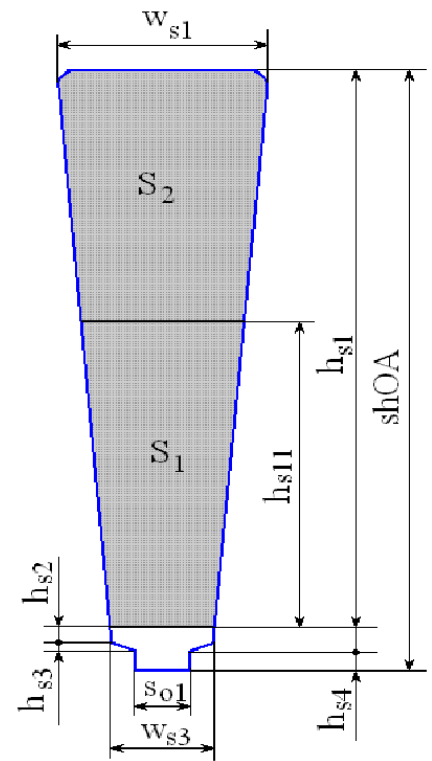
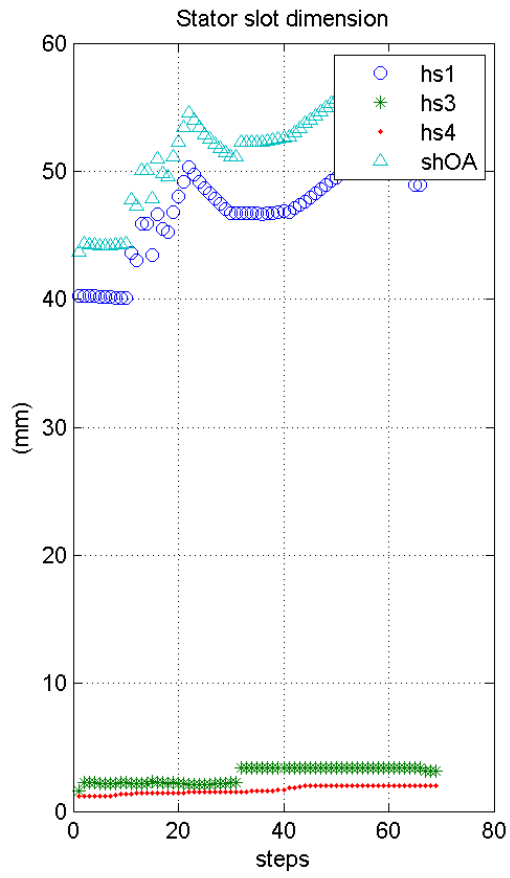
Roottorin slottien mitat



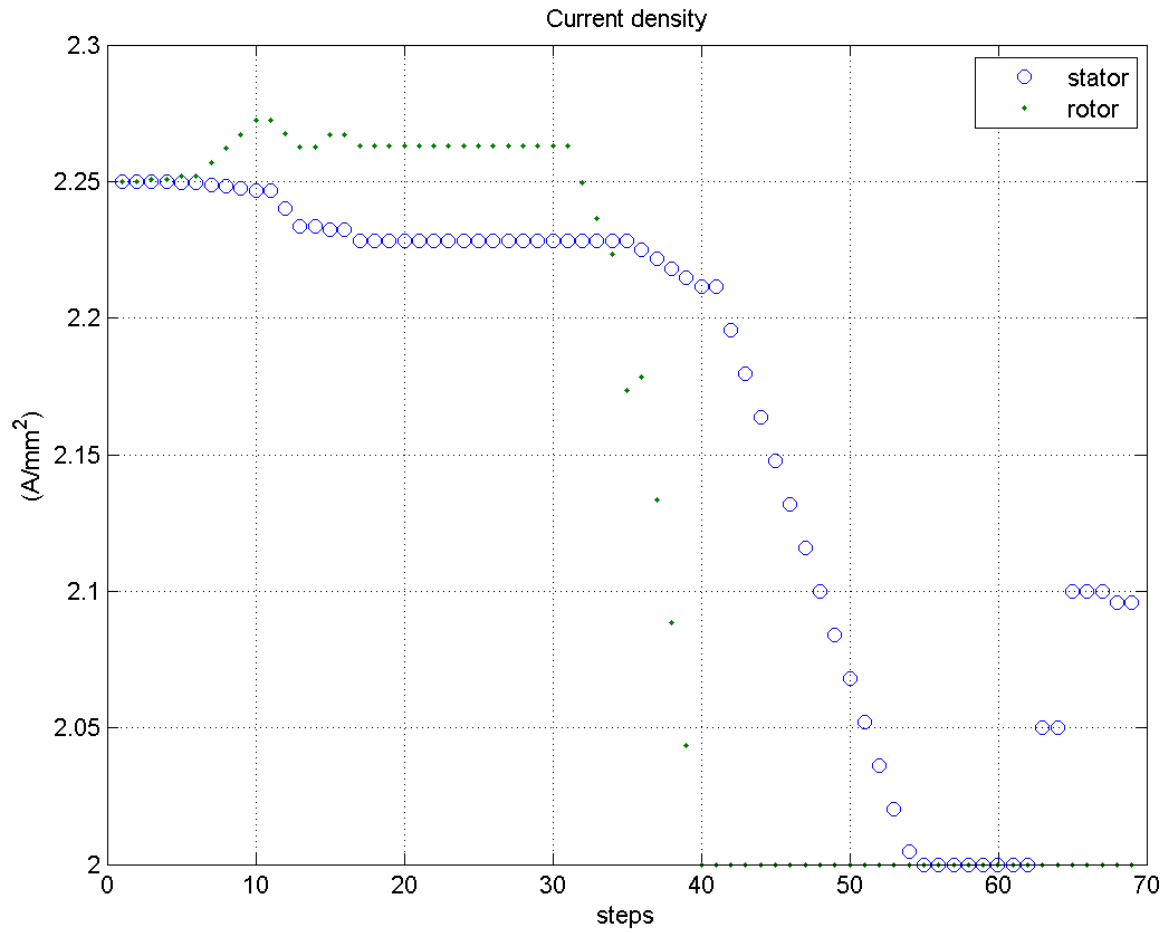
Staattori- ja roottorivirta jättämän funktiona



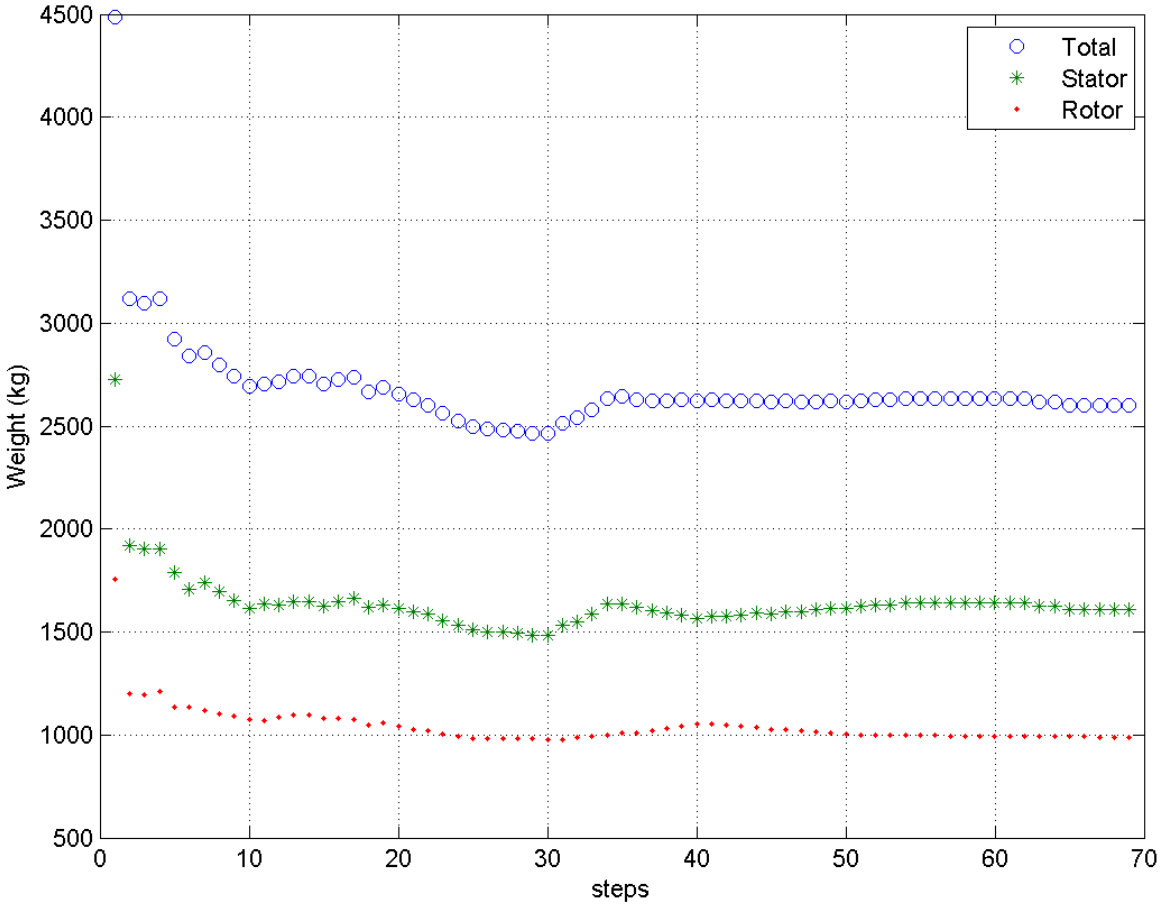
Staattorin slottien mitat

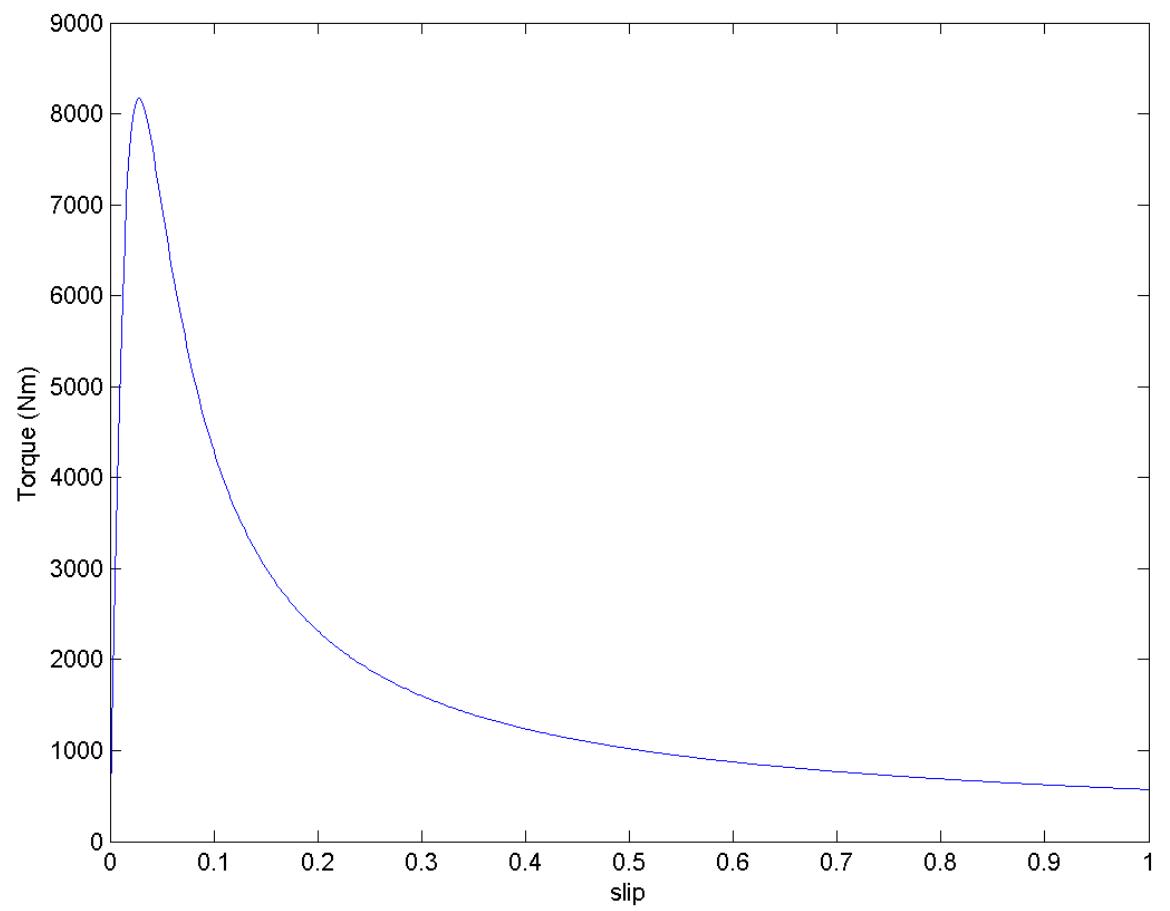


Staattorin ja roottorin virrantiheydet

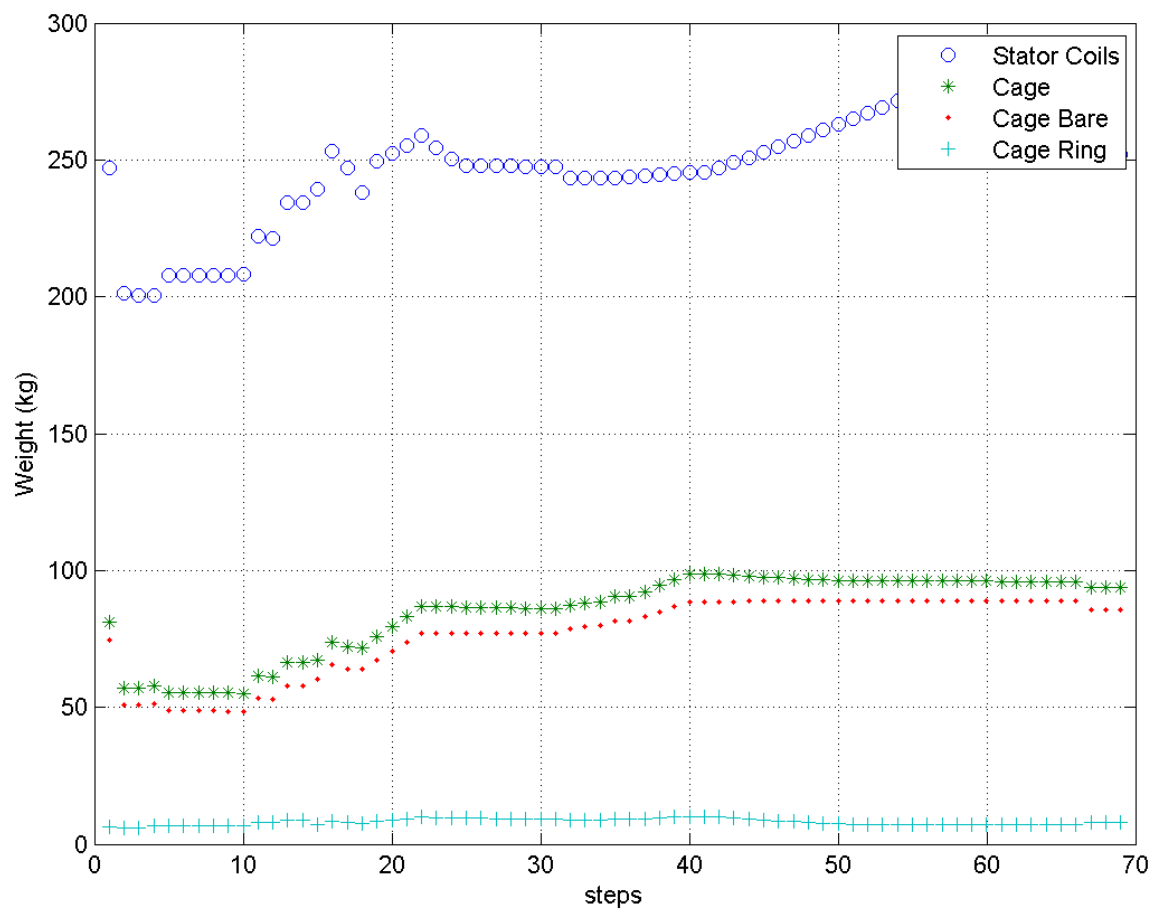


Staattorin ja roottorin painot



Vääntömomentti jättämän funktiona

Staattorin ja roottorin virrallisten osien painot



Staattorikäänitys

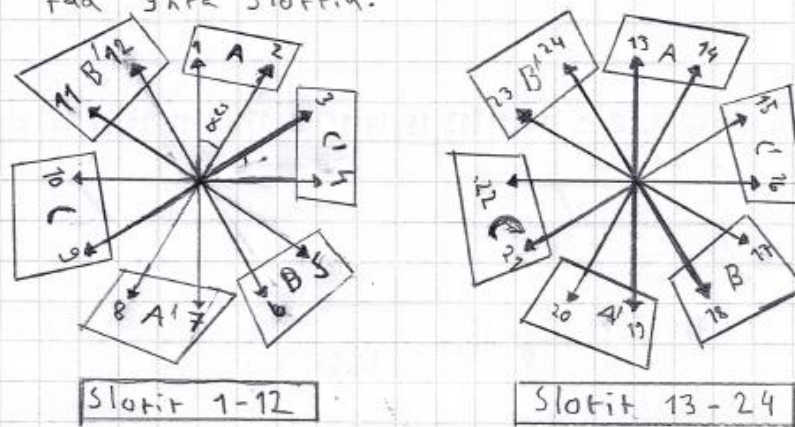
$$N_s = 24 \quad \alpha_{es} = \frac{2H}{N_s} P_1 = \frac{2H}{24} 2 = \frac{2H}{6}$$

$$t = L(D(24, 2)) = 2 = P_1$$

$$\alpha_{et} = \frac{2H}{N_s} t = \frac{2H}{24} 2 = \frac{H}{6} = \alpha_{es}$$

- Muodostetaan selyyden vuoksi kaksi vaihetähteä.

(molemmille napapareille yksi.) Jokainen huoli vastaa yhtä slottia.



A-vaihe	B-vaihe	C-vaihe
1, 8	5, 12	3, 10
2, 7	6, 11	4, 9
13, 20	17, 24	15, 22
14, 19	18, 23	16, 21

Staattorikäännyksen kulku

