

Konstruktion av en elektrisk maskin



Anders Fröjvik

Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation
Lund University

Förord

Examensarbete har utförts på IEA vid Lunds Tekniska Högskola åt EM-Design under hösten 2005 och våren 2006.

Jag vill tacka min handledare Mats Alaküla för hans kunskap och förmåga att inspirera.

Ett stort tack till Dan Hagstedt för allt vad han har betytt. Med oförtröttlig förmåga har han bistått med råd och hjälp när det behövts som mest. Mycket stort stöd har även Tobias Söderqvist och min flickvän Katarina Moberg gett. Med vidsynthet och inspiration har de i egenskap av varit till värdefull hjälp.

Till sist vill jag även tacka leverantörer av tjänster och produkter.

Sammanfattning

Examensarbetet

Under detta examensarbete har en elektrisk maskin för motor och generator drift konstruerats. Kraven har varit liten storlek, hög intermitterent effekt vid låga varvtal samt att rotorn skall ha ett lågt tröghetsmoment. Dessa egenskaper och flera andra gjorde att valet föll på permanentmagnetiserad borstlös axialflödesmaskin. Simuleringar har gjorts för både stator i tunnplåt och i pulvermetall, där det visat sig möjligt att uppnå de i kravspecifikationen satta prestandamålen. Av tids-, kostnads- och tillverkningsmässiga skäl gjordes prototypen i pulvermetall.

Abstract

Thesis

During this thesis an electrical machine has been designed. The demands of performance have been that in limited size it should be able to produce high peak power and having low inertia. Those criteria's and some others made permanent magnetized brushless engine the only suitable solution. The stator design has been simulated in both sheet metal and iron powder. It has been shown that it is possible to reach the specification for the application. By reasons of time, cost and manufacturing the prototype was made of iron powder.

i Innehållsförteckning

1	Inledning	6
1.1	Bakgrund och syfte	6
1.2	Kravspecifikation	6
1.2.1	Krav	6
1.2.2	Riktlinjer	7
1.3	Mål och utveckling	7
1.3.1	Examensarbetets mål	7
1.3.2	Projektets mål	7
1.3.3	Projektets utveckling	7
1.4	Avgränsningar	7
1.5	Övrigt	8
1.5.1	Resurser	8
1.5.2	Kostnadskalkyl och tidsplan	8
1.5.3	Arbetsmetoder	8
2	Elmaskinskunskap	9
2.1	Introduktion	9
2.2	Motortyper	10
2.2.1	Permanent eller fältlindnings -magnetiserad elmaskin	10
2.2.2	Borste eller borstlös elmaskin	11
2.2.3	Axial, radial och linjär -flödesmaskin	11
2.3	Att tänka på vid konstruktion av elmaskin	13
2.3.1	Grundläggande begrepp	13
2.3.2	Ekvivalent magnetkrets	14
2.3.3	Ferromagnetiska legeringar	16
2.3.4	Magneter	18
2.3.5	Lindning	20
2.3.6	Värmemodeller	21
3	Utveckling av elmaskinen	24
3.1	Val av elmaskin - Konstruktionskriterier	24
3.1.1	Ytterrotormaskinen	24
3.1.2	Axialflödesmaskin med fräst stator och enkellagermagneter	25
3.1.3	Axialflödesmaskin med trådgnistad stator och dubbla lager magneter	26
3.1.4	Rotor	28
3.1.5	Axialflödesmaskin med stator av pulvermetall	30
3.2	Simuleringar	32
3.2.1	Övergripande beskrivning	32
3.2.2	Matlabkod	32
3.2.3	FEM-analys	34
3.2.4	Utformningens påverkan	42
3.2.5	Värmeproblemet	44
3.2.6	Spänning	53
3.3	Praktisk framtagning	54
3.3.1	Elmaskinen	54
3.3.2	Testfixtur	56
3.3.3	Maskiner, bearbetning, kontakter	57
4	Resultat och sammanfattning	59

4.1	Resultat	59
4.2	Vidareutveckling av projektet	59
4.2.1	Elmaskinen	59
4.3	Berättelse om utvecklingshändelserna under projektet	60
5	Kontakter och referenser	62
5.1	Kontakter	62
5.1.1	Bevi	62
5.1.2	Sura magnets AB	62
5.1.3	Surahammars Bruks AB	63
5.1.4	Linova Tomas Lindén AB	63
5.1.5	Maskingården verktygsmaskiner AB	63
5.1.6	Magnetic components AB	63
5.1.7	Akademiska Verkstaden	63
5.2	Referenser	64
5.2.1	Brushless Permanent Magnet Motor Design	64
5.2.2	Förbränningsmotorer del 1 och del 2	64
5.2.3	Optimization of a servo motor for an industrial robot application	64
5.2.4	Kursmaterial från elmaskinkurs	64
5.2.5	Värmeöverföring	64
5.2.6	Wikipedia	64
6	Ritningar	65
7	Nomenklatur	69

1 Inledning

1.1 Bakgrund och syfte

Företaget EM-Design grundades år 2002 av författaren. Dess inriktning är konsulttjänster och produktutveckling.

Konsulttjänsterna har främst bestått av EMC testning för kunder i Cibons testlaboratorium beläget i Linköping, se bilder i figur 1 till 4. Företag som utnyttjat mina konsulttjänster har varit EneaEpact, Sectra, Autoliv, Flextronics, Wavegate, Factum Electronics, DST control, Specab, med flera.



Figur 1-4, Cibons EMC labb i Linköping

Intäkterna från konsulttjänsterna har hjälpt till att finansiera studierna på LTH samt bidragit med kapital till det första steget i utvecklingen av den produktidé som detta examensarbete utgjort.

Idén, eller innovationen, som ligger till grund för detta arbete är något författaren funderat över under flera år. För dess funktion krävs flera komponenter, där en av dessa är en elektrisk maskin (elmotor och generator) med speciella egenskaper.

Genom att förlägga konstruktionsarbetet av elektriska maskinen som ett examensarbete gavs en unik chans att tillägna mycket tid åt ett enda projekt med högt kvalificerade kunskapsresurser från Mats Alaküla och Dan Hagstedt. Förutom förhoppningen att i en framtid kunna ta fram en säljbar prototyp har examensarbetet inneburit att de egna kunskaperna inom detta breda teknikområde fördjupats.

1.2 Kravspecifikation

Kravspecifikationen gäller endast elmaskinen, vilket blev den del av projektet examensarbetet kom att handla om.

1.2.1 Krav

Uteffekt när elmaskinen används som generator skall kunna uppgå till minst 3 kW vid högst 3000 rpm och 50 % duty-cycle. Elmaskinen skall mekaniskt klara ett maximalt varvtal på minst 15000 rpm utan att förstöras av centripetalkrafterna.

Tröghetsmotståndet på rotorn skall understiga 1.5 gram/m².

1.2.2 Riktlinjer

Tankegången i konstruktionsfilosofin skall vara sådan att det hela tiden skall sättas in i ett sammanhang för kommersiell produkt. Med detta följer låga produktionskostnader, feltoleranta lösningar, lång MTBF, goda EMC-egenskaper, miljötålighet (såsom temperaturintervall, luftfuktighet, vibration, etc.), möjlighet till att anpassa för olika tillverkares modeller, god estetik, god servicebarhet, etc.

Fysiska storleken bör om möjligt hållas inom en maximal ytterdiameter på 100 mm och en längd på 60 mm.

1.3 Mål och utveckling

1.3.1 Examensarbetets mål

Målet är att konstruera och ta fram en elmaskin som uppfyller kravspecifikationen.

1.3.2 Projektets mål

Målet är att utveckla en kommersiell produkt. Detta skall ske genom egen produktutveckling fram till färdig prototyp. Därefter skall om lämpligt svenskt patent sökas för att skydda idén vid eventuell försäljning.

1.3.3 Projektets utveckling

2002	Idén föds
2003	Företaget EM-design skapas med produktutveckling som huvudinriktning
2004 Dec.	Diskussion görs om möjligheter att göra examensarbete på projektet.
2005 Jan	Etablerar kontakt med Drivhuset i Malmö för stöd i projektet
2005 Feb.	Innovation Skåne beviljar nyhetsgranskning hos patenbyrå
2005 Mars	Patentgranskning klar
2005 Maj	Tar fram förslag på examensarbetsupplägg till IEA
2005 Juni-Aug	5p förstudie på projektet.
2005 Aug.	Examensarbetet påbörjas
2006 Juni	Examensarbetet presenteras

1.4 Avgränsningar

Ursprungligt mål var att ta fram en fungerande prototyp. Detta skulle innebära både elmaskin och styrning som anpassats till testobjektet. Emellertid fick under examensarbetets gång ambitionsnivån sänkas till att enbart innefatta konstruktion av elmaskinen.

1.5 Övrigt

1.5.1 Resurser

1.5.1.1 Kunskapsmässiga resurser

Innan examensarbetet påbörjades var de egna kunskaperna om elmaskiner små. Kunskap har sedan införskaffats främst genom självstudier via böcker och Internet. Handledaren Mats har uppvisat mycket stor kunskap på områden och alltid haft svar och råd att ge. Tyvärr har tillgängligheten varit mycket begränsad. Störst hjälp under examensarbetet har doktoranden Dan Hagstedt stått för. Hans insats vid matlabprogrammeringen och fem-simuleringen blev avgörande för att examensarbetet skulle kunna slutföras. Externa kontakter, tex. materialleverantörer har fungerat som informationskällor för att få anpassade råd om utformande på ett tillverkningsmässigt bra sätt.

1.5.1.2 Framtagningsmässiga resurser

Huvuddelen av det mekaniska arbetet har utförts på egen hand med för ändamålet inköpta maskiner. Undantaget är svarvoperationer som lagts ut på akademiska verkstaden och Jocke Karlsson.

1.5.2 Kostnads kalkyl och tidsplan

Finansieringen av projektet kommer nästan helt från egen ficka. Någon egentlig kostnads kalkyl uppfördes inte innan projektets start på grund av den ringa insatthet författaren hade i ämnet. Därmed blev budgeten flytande, men givetvis söktes kostnadseffektivaste lösningarna. Yttre finansiering från institution IEA har bekostat akademiska verkstadens svarvbearbetning. Tilltänkt tid för arbetet bestod av förstudie under sommaren 2005 följt av examensarbete under hösten 2005 och första perioden våren 2006.

Efterkalkylen från projektet kan sammanfattas med att kostnaden för material, införskaffande av maskiner och utlagda tjänster underskred den befarade. Däremot har kostnaderna ifråga om egen tid överskridits kraftigt, speciellt med tanke på att endast delmål kunnat uppnås.

1.5.3 Arbetsmetoder

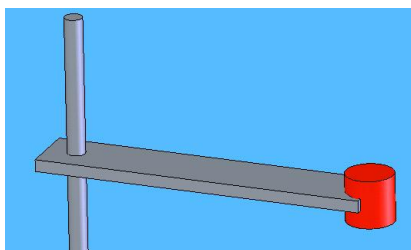
Försök gjordes till att börja med att följa produktutvecklingsmodellen PROPS. Under sommaren 2005 utfördes en förstudie där många av de styrande frågorna inför projektets riktlinjer bestämdes. Olyckligt nog stötte projektet på oförutsett stora hinder vid simulering och prototypframtagning av elmaskinen. Först i februari-mars lossnade det och nya tidplaner och arbetsupplägg gjordes. Projektets avgränsningar ändrades för att möjliggöra tidplanen. Därefter har arbetet utförts utan att någon egentlig modell tillämpats.

2 Elmaskinskunskap

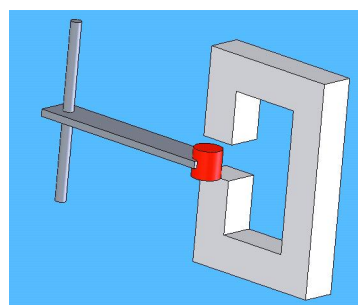
Detta kapitel börjar med en mycket enkel introduktion till elmotorn för att en läsare helt oinvgid i ämnet lättare skall kunna förstå senare sammanhang.

2.1 Introduktion

Låt en magnet sitta på en platta fäst på axel som den kan rotera fritt kring, se figur 5. Om man till detta sätter en järnbygel på så sätt att magneten kan "svänga in" mellan dess gap så kan det se ut som i figur 6.



Figur 5. Enkel rotor



Figur 6. Enkel magnetisk krets

Det bör vara lätt att föreställa sig att axeln vill rotera in mellan gapet i järnbygeln, likt en hästskomagnet vill minska avståndet till en stålplatta. Det moment som kan tillföras axeln beror på ett antal faktorer och ökar;

- Proportionellt med momentarmens längd från axelcentrum till magnetens mitt
- Med kraftigare magnet
- Med en järnbygel som leder magnetism bättre
- Om luftgap mellan magnet och järnbygel minskar

Det bör vara relativt enkelt att förstå att det nog kan vara på så sätt. Föreställ att axeln vrids långsamt så att magneten närmar sig järnbygeln. Först dras magneten mot järnet och magnetjärnbygeln skapar ett moment på axeln. När magneten är i linje med järnbygeln kommer jämvikt att uppstå. Det krävs därefter att ett moment påförs axeln för att flytta magneten ut från gapet. Detta moment benämns koggingmoment och är endast ett bekymmer som skapar en ryckighet vid axelrotation. Därför försöker man minska koggingmomentet med olika metoder.

Det som utelämnats är en spole som lindas kring järnbygeln. Påförs ström ökar fältstyrkan i luftgapet och magneten dras med än större kraft in mot järnbygeln öppning. Kan strömmen slås ifrån i samma ögonblick som magneten passerar jämviktsläget så kommer den av sin masströghet fortsätta rotera ut ur magnetfältet. Påförd energi i spolen ger ett nettotillskott av kraft på magneten och finns det inget bromsande moment på axeln kommer rotationshastigheten att öka. Mycket förenklat är det på detta vis en borstlös permanentmagnetiserad motor fungerar.

2.2 Motortyper

Det finns många olika elmaskiner som skulle kunna gå att använda för generator- respektive motordrift. I tilltänkt applikation är egenskaperna något annorlunda än för elmaskintyper som produceras i stor volym. Granskar man specifikationen på en slumpmässigt vald asynkronmotor kan man notera att den har låg uteffekt i förhållande till storlek och vikt. Funderar man på orsaken beror detta på tillämpningarna de används till. Där är vanligtvis storlek och vikt inget större bekymmer då de sitter stationärt installerade och driver fläktar, kompressorer, sågverk, hydroforpumpar, etc. Gemensamt för dessa är att de skall ha god verkningsgrad, lågt inköpspris, lång livslängd, etc. För handelverktyg såsom batteridrivna bormaskiner och radiostyrda bilar är kraven annorlunda. Här är högt effekt-vikt-förhållande, god möjlighet till varvtals- och momentreglering viktigt. Lågt pris är fortfarande prioriterat men livslängden behöver inte vara så god.

Syftet med denna jämförelse är att få läsaren att fundera kring prioriteringar för olika produkter som styr deras val av något som alldagligt endast kallas elmotor. Till tänkt applikation är kraven så högt satta att det tangerar det omöjliga att konstruera. Det krävs att det är möjligt att ta ut stora moment/effekter vid ca 25 % av maximala varvtalet. Effekttätheten per volym och vikt måste vara mycket hög. Verkningsgraden vid låga varvtal måste vara relativt god då det annars blir problem att kyla bort all värme från den lilla volymen. Vid höga varvtal då elmaskinen inte skall hantera så stor effekt bör likaså förlusterna vara små för att inte onödigt mycket energi måste värmas bort samt att värmen kan påverka elmaskinens hållbarhet/funktion.

Med detta i åtanke återstår bara några få elmaskiner att välja mellan, vilka kommer att bli genomgångna i texten nedan.

2.2.1 Permanent eller fältlindnings -magnetiserad elmaskin

Mycket tidigt stod det klart att permanentmagnetiserade elmaskinen är det enda lämpliga valet. För att skapa den momentbringande kraften i en elmaskin krävs magnetfält. Detta kan skapas genom magnetiseringslindningar eller permanentmagneter. Fördelen med magnetiseringslindningar är att storleken (läs styrkan) på magnetfälten enkelt kan regleras för olika driftsförhållanden gentemot permanentmagneter, där det är väsentligt mer komplicerat och i praktiken ofta omöjligt. Permanentmagneter kan dock uppnå väsentligt högre fältstyrka på mindre volym. **Då maximala fältstyrkan dikterar möjligt momentuttag och utrymmet i denna applikation är begränsat blir permanentmagneter det enda tänkbara alternativet.**

Fördelen med att kunna styra styrkan av magnetfältet är att det skulle kunna minskas när momentuttaget är lågt. Detta skulle innebära mindre fältväxlingar, vilket skulle minska värmeförlusterna samt koggingmomentet.

Kommentar: För att vara riktigt korrekt måste brasklappen supraledare nämnas. Dessa kan ge högre fältstyrkor än permanentmagneter, men används endast vid extrema tillämpningar då kostnaderna är mycket höga och att det krävs kringutrustning för att skapa den extrema kyla som krävs för att erhålla supraledande egenskaper.

2.2.2 Borste eller borstlös elmaskin

Det finns två typer av lösningar för att styra när statorlindningarna skall förses med ström, borstar eller borstlös elmaskin.

Elektriska bormaskiner, vinkelslipar, bilgeneratorer, radiostyrda modellbilar är exempel på borstförsedda elmaskiner. Borstarna består av kol som löper mot en kontaktförsedd yta på axeln vilka förser rotorn med ström.

Lösningen medför att strömmen kontakterar rätt lindning vid rätt tidpunkt helt utan inblandning av kringelektronik. Ur den synvinkeln är borstarna mest viktiga när det gäller motordrift, då det vid generatordrift enkelt kan arrangeras likriktning i efterföljande led, vilket gör timingen okritisk. Vid motordrift måste dock tidpunkten vara relativt noggrann. Att lösning med borstar trots det används för generatorer beror på att de även användas för att strömförsörja en fältförsvagningslindning, för minskning av koggmomentet och förluster till vissa driftförhållanden.

Skall en borstlös elmaskin användas som elmotor krävs det att strömmen anbringas vid rätt tillfälle. Detta kräver att styrelektroniken måste få reda på i vilket läge motorn är i. Detta kan göras med sensorer som känner av vinkelpositionen eller genom att använda en av faserna i trefasmaskinen.

För tilltänkt applikation är det lämpligast att välja borstlös, då det skulle vara svårt att få borstarna att fungera i oljedimman som elmaskinen befinner sig i. Att avskilja volymen i särskild kavitet och packboxar på axeln skulle öka kostnaderna och komplexiteten samtidigt som också motorlängden ökar. Ytterligare anledningar är att borstar har begränsad livslängd och det skulle vara svårmotiverat att då introducera ännu en servicepunkt. Vidare är strömmarna så stora att det krävs kraftiga dimensioner på borstarna samt att elmaskinen kommer att ha många poler vilket gör att till/från - slagsbredden på kontaktytorna blir smal. Av dessa anledningar valdes borstlös elmaskin.

2.2.3 Axial, radial och linjär -flödesmaskin

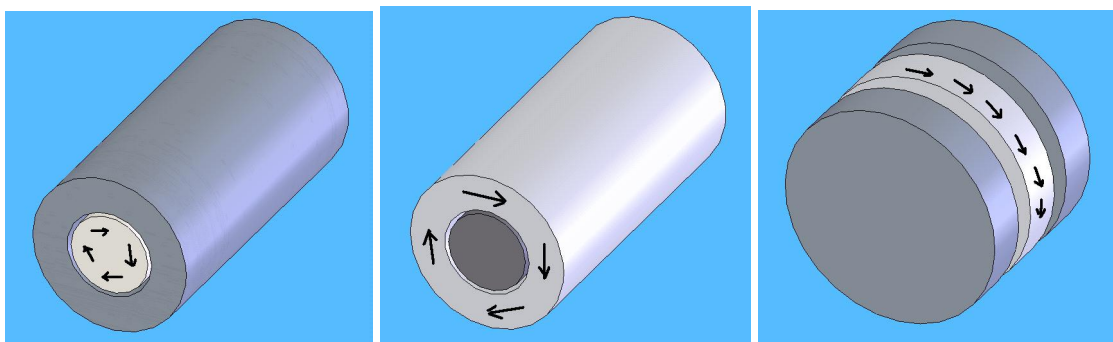
Man kan dela in maskintyperna i axial, radial och linjär -flödesmaskiner.

Linjärflödesmaskinen utför rätlinjig rörelse varpå den är ointressant i denna tillämpning då applikationen har roterande axel.

Som undergrupp till radialflödesmaskinen finns typerna inner och yttre -rotor.

Innerrotormaskin har permanentmagneter monterade på rotorn och statorn sitter utanför.

För ytterrotor är förhållandet det omvända, statorn är placerad i mitten och rotorn är monterad på utsidan. Hos axialflödesmotorn sker magnetflödet i axiell riktning. Se förklarande figur 7 till 9.



figur 7, innerrotor

Figur 8, ytterrotor

Figur 9, axialflödesmaskin

De olika motortyperna har olika fördelar. Då innerrotormaskinen har statorn på utsidan finns goda möjligheter till kylning av statorlindningarna genom sin stora yta och närhet till yttre kylelement. Ytterrotormaskinen har större yta magnet mot stator, vilket gör det möjligt att ta ut högre moment.

Vidare är den fördelaktigare att göra för kort motorlängd.

Axialflödesmaskinen används när det krävs stora moment vid låga varvtal. Möjligt uttag av moment kan beskrivas med formeln; $M = kD^2L$

Där M =moment, k =konstant, D =diameter och L =längd. Detta ger förklaring till att det är möjligt att få högt vridmoment från ytterrotor och axialflödesmaskinen.

Ytterrotormaskinen är den typ som används för motorcykelgeneratorer. Skälen är uppenbara då det är önskvärt med kort bygglängd. Då det normalt krävs mer tröghetsmoment i motorn än bara vevpartiet, fungerar även ytterrotorn som svänghjul. Det gör att motorcyklars ytterrotormaskin fyller två funktioner. Orginalmaskinen är mycket produktionsvänligt utformad. Axialflödesmaskinen är normalt mer komplicerad (läs dyr) att tillverka, vilket gör den till ovanligt förekommande.

Karakteriserande för axialflödesmaskinen:

- Högt vridmoment
- Lågt tröghetsmotstånd
- Kort bygglängd

Detta är högt värderade egenskaper i tilltänkt applikation. Dessutom kan axialflödesmaskinen utformas som mittenrotor med en stator på vardera sidan, vilket ger stora ytor som kan kylas, samt stor yta tänder-isolation-koppartråd, vilket kan vara en kritisk parameter.

Nackdelen med axialflödesmaskinen är att den kan vara komplicerad att tillverka då det inte går att lägga laminaten i lager såsom för ytterrotormaskinen, vilket fördyrar konstruktionen.

2.3 Att tänka på vid konstruktion av elmaskin

I följande stycken tas grundläggande formler upp vilka kan appliceras på en ekvivalent magnetisk krets som efterliknar en verklig elmaskin. Beräkningsarbetet är emellertid behäftat med stora problem. Några komplikationer som kan nämnas är att flödet inte fördelas homogent i tvärsnittsarean de löper genom. Järnmaterialet magnetiseras inte linjärt och statorns position ändras i förhållande till rotorn. Därför görs de viktiga optimeringsberäkningarna med hjälp av fem-analys som redovisas senare i rapporten. Detta stycke är ändå med då det är viktigt för förståelsen kring vilka parametrar som påverkas vid ändring i geometri och materialval.

2.3.1 Grundläggande begrepp

2.3.1.1 Permeabilitet

Man beskriver ett ämnes förmåga att leda magnetism genom hur stor permeabilitet det har. Som referens har man bestämt att permeabiliteten i vakuum är $4\pi \cdot 10^7$ [H/m] vilket kallas permeabilitetskonstanten μ_0 . För järn till elmotorer (icke orienterad plåt) är den normalt 2000 ggr högre *, varpå faktorn 2000 benämns relativa permeabiliteten μ_r . Det ger formeln för permeabiliteten på materialet;

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^7$: Permeabiliteten i vakuum

μ_x : Relativa permeabiliteten

μ : Permeabiliteten

Hos luft är relativa permeabiliteten nära 1, vilket betyder att μ är nära μ_0 . Alltså är luft dålig magnetisk ledare vilket gör det viktigt att hålla avståndet litet i luftgapet för att kunna komma upp i ett högt magnetiskt flöde.

Hos neodymmagneterna är relativa permeabiliteten ytterst liten, ca 1.05 högre än luft. Det gör det intressant att även hålla magneternas längd kort för att få höga fält. Risker med att göra magneterna för korta är att de kan avmagnetiseras. Därför måste de ha en minsta kritiska längd eller stort luftgap.

2.3.1.2 Permeans och Reluktans

Den magnetiska ledningsförmågan benämns Permeans. Ju högre värde desto bättre ledningsförmåga. Formeln för Permeans lyder;

$$P = \mu \cdot A / L$$

P : Permeans

A : Area

L : Längd

*; Värdet 2000 på μ_r kan skilja väsentligt vilken typ av plåt som används. Syftet var endast att ge inblick i den stora skillnaden hos permeabiliteten i luft och järn. Hos transformatorplåt (orienterad plåt) kan μ_r vara så högt som 75000 [H/m].

Inversen på permeansen kallas reluktans. Detta kan kännas som ett mer logiskt begrepp då det liknar resistansen i en elektrisk krets.

$$R = 1/P$$

R : Reluktans

2.3.1.3 Flöde, flödestäthet, fältstyrka och MMF

Med flöde menas hur stort magnetiskt flöde, ϕ , som totalt går genom någonting.

Flödestätheten, B , är flödet per tvärsnittsarea.

$$B = \mu \cdot H$$

$$\phi = B \cdot A$$

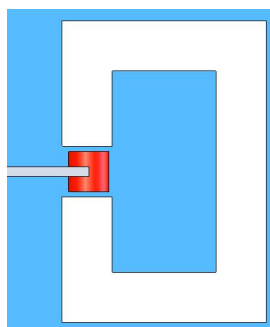
Magnetmotoriska kraften, F , beräknas med hjälp av fältstyrka och hur lång längd flödet går;

$$F = H \cdot L.$$

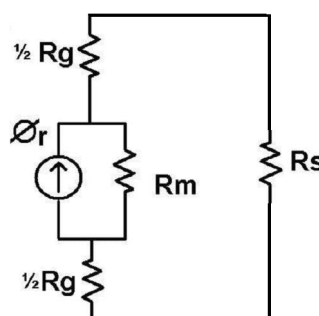
2.3.2 Ekvivalent magnetkrets

2.3.2.1 Förenklat magnetiskt flödesschema

Som ett exempel illustrerar figur 10 den enkla uppställning på magnet som förs in mellan en järnbygel. Ett magnetiskt flödesschema går att göra på denna koppling, se figur 11.



Figur 10, enkel magnetkrets



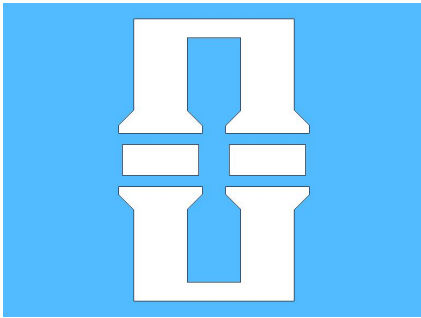
Figur 11, ekvivalent magnetkrets

ϕ_r är det flöde som skapas av magneten. Ett visst läckflöde, R_m , sker internt i magneten, vilket reducerar nyttoflödet. Hur stort det blir beror på ϕ_r och reluktansen R_m i magneten.

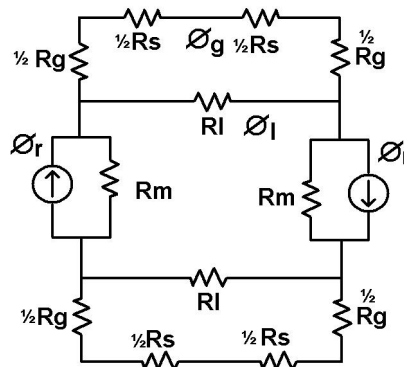
Nyttoflödet får gå mellan två luftgap med reluktansen $\frac{1}{2} R_g$ vardera samt i järnet med reluktansen R_s .

2.3.2.2 Förenklat magnetiskt flödesschema på använd elmaskin

Figur 12 visar en tvådimensionell bild på ett utsnitt av snarlikt elmaskin som skall användas i applikationen. De två rektangulära blocken i mitten representerar permanentmagneter som har sin rörelseriktning i x-led. Ovan och under sitter två statortänder vars magnetfält sammanlänkas med statorns rygg. Till detta har ekvivalent magnetkrets i figur 13 illustrerats på liknande sätt som i förra exemplet.



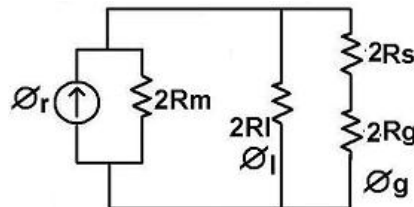
Figur 12, två tänder på linjärmotormodell



Figur 13, ekvivalent magnetkrets

Det som tillkommit är läckflödet mellan statortänderna, ϕ_l .

Det är emellertid svårblickbart många "komponenter" i denna krets. En ekvivalent krets kan skapas genom att summera reluktansen. (Detta kan ses som seriemotstånd i en elektrisk krets). Flödet kan närmast liknas strömmen i elektrisk krets, varpå ϕ_r förbli detsamma. Figur 14, visar förenklade magnetiska kretsen.



Figur 14, förenklad ekvivalent magnetkrets

Denna krets kan användas för att ta reda på magneternas arbetsområde så att de kan dimensioneras för säker drift utan avmagnetisering. Mer om detta tas upp under stycket om magneter.

$$C_\theta = \frac{A_m}{A_{ag}} \quad \text{Fluxkoncentrationsfaktor}$$

$$P_c = \left(\frac{L_m}{g} \right) \cdot \left(\frac{A_g}{A_m} \right) \quad \text{Permeanskonstant}$$

$$B_g = \frac{k_1 \cdot C_\theta \cdot B_r}{1 + k_r \left(\frac{\mu_r}{P_c} \right)}$$

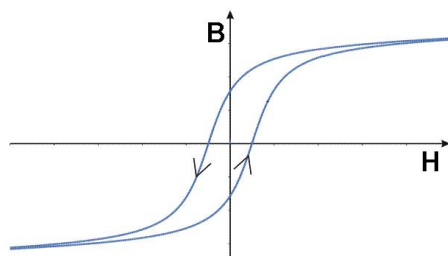
2.3.3 Ferromagnetiska legeringar

I tänkt applikation måste hänsyn tas till att förhållandena är långt från de ideala. Axeln som elmaskinen brukar, har nominellt ett litet axiellt spel vilket skulle möjliggöra ett litet luftgap. Men ifall lagren blir slitna bör det inte vara den aktuella elmaskinen som sätter gränserna. För skulle stator och rotor gå mot varandra är det sannolikt att skadorna blir förödande. Förutom elmaskinen kommer troligen stora mängder material från elmaskinens ytor flyta med oljan och fördelas på applikationens känsliga ytor. Av den anledningen sattes ett mått på 1mm luftgap på vardera sidan rotorn, vilket upplevs rimligt med den information som finns tillgänglig. Notering: I det avseendet är ytterrotormaskin mindre känslig då den tål stort axiellt spel.

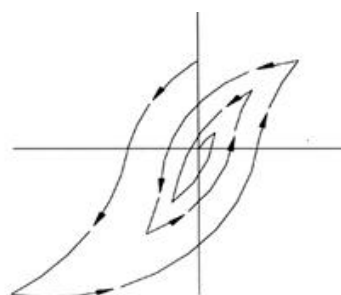
Det kan tyckas oväsentligt att beakta järnet i statorn som något som helst konstruktionskritiskt då permeabiliteten är så hög gentemot luftens och magnetens permeabilitet. Dock är så inte fallet. Magneten skapar ett kraftigt flöde och ger då en hög magnetisk flödestäthet i hela kretsen. För att kunna få rum med lindningstråd runt statortänderna reduceras tvärsnittsarean på statortänderna. Detta medför att flödestätheten blir koncentrerad. Permeabiliteten som angavs gäller bara vid låga flöden, vid högre blir järnet mycket olinjärt och går till slut in i mättnad. Då kan inte flödet höjas ytterligare och järnet skapar stora värmeförluster. Redan långt innan mättnad blir förlusterna påtagliga, varpå optimering av geometrier är en viktig del i konstruktionen av en elmaskin.

2.3.3.1 Hystereseförluster

I järnet som sluter magnetiska slingan i en elmaskin ändras de magnetiska flödesriktningarna flera gånger per rotorvarv. Varje ändring av flödet i järnet följer en magnetiseringskurva. Denna kallas hystereskurva, nykurva eller jungfrukurva och beskriver hur det är möjligt att magnetisera järnet samt storleken av förlusterna. Första figuren 15 är typisk hystereskurva där det går att se att järnet drivits så hårt i fältstyrka (H) att flödestätheten (B) inte längre kommer att kunna bli mycket högre på grund av att järnet blir mättat. Figur 16 visar hur hysteresen kan se ut vid olika grad av magnetisering.



Figur 15, hysteres



Figur 16, hysteres

Varje gång magnetiseringen ändras flyttas H-fältet mellan ett undre och övre läge. Dock följer den inte samma linje utan rör sig även i x-led, dvs. B-fältet ändrar sig. B-fältet kan här ses som en förlust och man kan förstå att den blir större, med stigande variationen av H-fältet. Denna förlust skall multipliceras med järnmängd och elektrisk frekvens.

Det skall noteras att hystereskurvan bara är relativt linjär vid måttliga magnetiseringar och viker därefter av. Man säger att järnet blir mättat, med kraftigt ökade förluster som följd.

Hysteresförluster ingår i den grupp som kallas järnförluster. Dessa skall minimeras då de minskar verkningsgraden och tillika ökar värmeutvecklingen.

Förluster uppträder vid varje växling, dvs. är proportionerligt ökande med elektriska frekvensen och olinjärt ökande med flödestätheten. Hysteresförlusten kan tecknas enligt följande;

$$P_h = k_h \cdot f \cdot B^n$$

P_h : Hysteresförlust

k_h : Konstant

f : Frekvens

n : Materialkonstant, normalt mellan 1.5-2.5

2.3.3.2 Virvelströmsförluster

$$P_c = k_c \cdot h^2 \cdot f^2 \cdot B^2$$

P_c : Virvelströmsförlust

k_c : Materialkonstant

h : Plåttjocklek

Som framgår av formeln beror virvelströmsförlusterna mycket av den elektriska frekvensen och plåttjockleken. Det man främst gör för att reducera förlusterna är att minska plåttjockleken när elektriska frekvensen måste få förbli hög. Vidare legerar man plåten med ca 4 % kisel för att minska förlusterna. En nackdel med att legera med kisel är att järnet blir mer svårbearbetat och att verktygsförslitningen vid bearbetning ökar.

2.3.3.3 Stackningsfaktor

Varje statorplåt är belagd med isolation. Då isolationsskiktet är lika tjockt på tunn som tjock plåt blir andelen magnetiskt ledande järn mindre i ett tvärsnitt med tunn plåt.

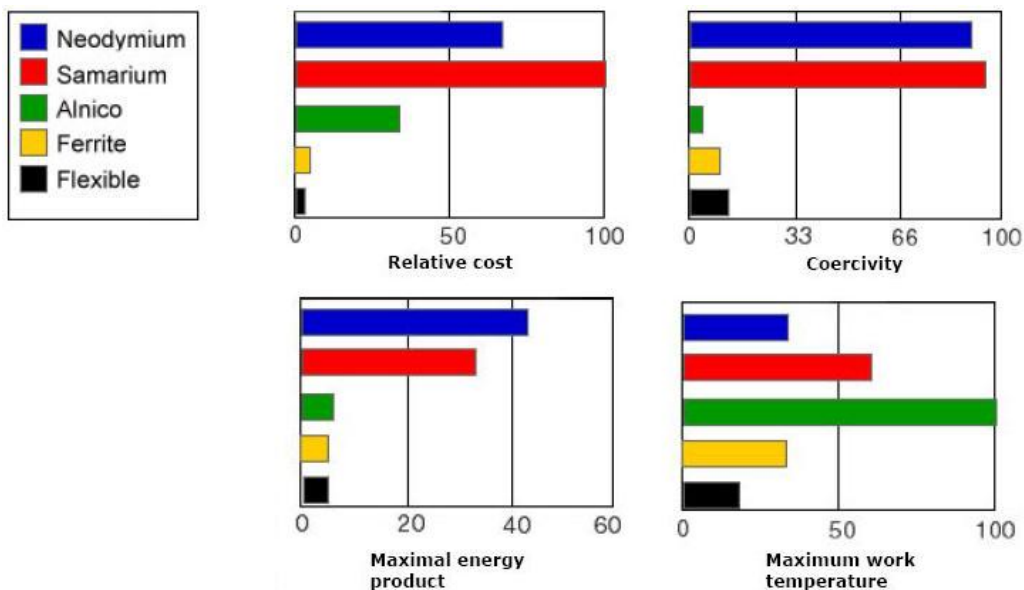
Möjligheten att överföra det magnetiska flödet minskar alltså med tunn plåt, samtidigt som virvelströmsförlusterna minskar. Det är av intresse att ange hur stor del statorn består av magnetiskt ledande järn och ej ledande isolation. Förhållandet kallas stackningsfaktor och definieras enligt följande;

K_{st} = tvärsnittsarean i järnlegeringen/hela tvärsnittsarean

2.3.4 Magneter

2.3.4.1 Magnettyper

Det förekommer i huvudsak fyra typer av magneter. Dessa är alnico, ferrit, neodmium och samarium. En överblick över deras egenskaper finns i figur 17 hämtad från Suramagnets hemsida, (ref. se kontakter).

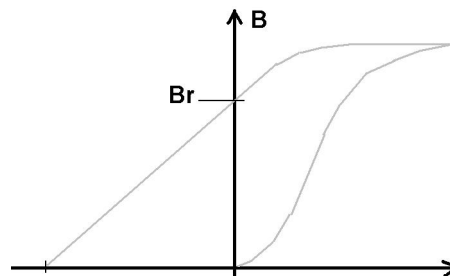


Figur 17, olika magnettyper

I högpresterande permanentmagnetiserade elmotorer är neodmium det vanligast förekommande magnetmaterialet. Alternativet till neodmium är samarium som används i de fall när extrem temperaturlåghet krävs. Alnico används bara i mycket speciella applikationer på grund av känsligheten för demagnetisering. Ferrit har mycket låg prestanda och lågt pris vilket gör typen vanlig hos enkla högvolyummotorer.

2.3.4.2 Magnetdimensionering

En magnets demagnetiseringskurva kan se ut som i figur 18.



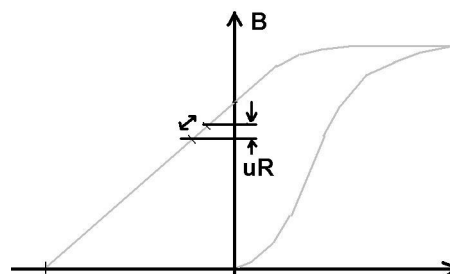
Figur 18, demagnetiseringskurva

Hela grafen sänks vid förhöjd temperatur efter formeln;

$B_r(T) = B_r(T_0)(1 + \Delta B(T - T_0))$. Det är viktigt att ta hänsyn till temperaturspekten och dimensionera för den högsta arbetstemperatur som kan uppkomma i applikationen.

ΔB : Temperaturkoefficient för aktuellt magnetmaterial

När magneterna sätts i en elmaskin belastas magneten ner längs avmagnetiseringskurvan, se figur 19. Flödestätheten B ändras inom uR.

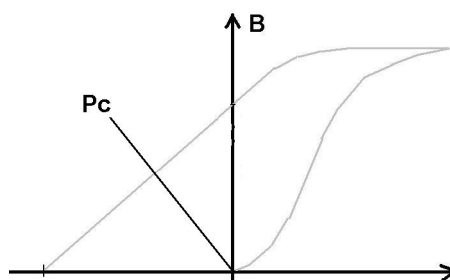


Figur 19, arbetspunkt

Arbetspunkten ges av formeln nedan;

$$B_m = B_r + \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H_m$$

Permanent avmagnetisering sker för neodymium magnet när flödestätheten blir negativ. För att ha tillräckliga marginaler bör inte demagnetiseringsgrafens korsning med hjälplinjen P_c när P_c har riktningskoefficient -1. Se figur 20.



Figur 20

Denna punkt kan beräknas med hjälp av följande formel;

$$P_c = \left(\frac{L_m}{g} \right) \cdot \left(\frac{A_g}{A_m} \right) \quad \text{Permeanskonstant}$$

2.3.5 Lindning

2.3.5.1 Termiska kopplingen

Det är kopparlindning i statorn som normalt genererar den största förlusteffekten. Olyckligt nog är det samtidigt svårt att få god termisk koppling för kylning på kopparlindningen då anläggningsytorna är små mellan;

- Statorlindningarna mot varandra på grund av elektrisk isolering och liten anläggningsyta.
- De mest närliggande statorlindningarna mot statortandsisolationen då det endast är en mycket liten del av arean som har högt kontaktryck.
- Statortandsisolationen mot statortänderna. Samma problem med att det är en liten area som har kontaktryck

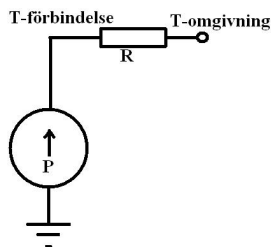
Det är därför viktigt att utforma lindningen för att så stor anläggningsyta som möjligt erhålls mot statortänderna. För att öka anläggningsytan bör det vara stort tryck på ledningen, dvs. tråden skall lindas hårt. Det förekommer även metoder för att lägga hög presskraft på koppartråden så att den plastiskt deformeras. Detta ger väsentligt större anläggningsyta och kontaktryck, vilket förbättrar den termiska övergången.

2.3.5.2 Packningstäthet, fyllfaktor

Förutom den termiska fördelen med att deformera statorlindningen för bättre värmeledning uppnås även en högre fyllfaktor. Med fyllfaktor menas andelen ledningsarea i förhållande till tillgänglig area mellan statortänderna. Denna är benämnd *ksf* i denna rapport. Den engelska benämningen är slot filling factor. Fyllnadsgraden ligger normalt på ca 50 %, vilket kan tyckas lite. Det är lätt att förstå att ett runt tvärsnitt ger luftfickor mellan trådarna, men förutom det tillkommer isoleringsmaterial runt varje ledare samt isolering mellan lindning och stator.

2.3.6 Värmemodeller

I den enklaste modellen värmer en påförd effekt upp en massa som slutligen kyls av omgivningen. Figur 21 visar hur det schematiskt kan se ut.



Figur 21, enkel värmemodell

Uppvärmningen blir givetvis större om förlusteffekten ökas. Avledningsförmågan bestäms av den termiska resistansen. Ju lägre den är desto lättare förs värmen bort. På samma vis påverkas skillnaden mellan hur hög temperaturen tillåts bli för uppvärmda objektet, "T-förbindelse", gentemot omgivningstemperaturen, "T-omgivning". Beräkning av värmeutvecklingen görs med hjälp av nedanstående ekvationer;

$$\Delta T = P(k_1 + k_2 + \dots k_n)$$

ΔT : Temperaturskillnad [grader Celsius alternativt Kelvin]

P : Effektutveckling [Watt]

k : Koefficient för termisk konduktivitet [W/mK]

$$k = \frac{Q}{t} \cdot \frac{L}{A \cdot \Delta T} \quad \text{Termiska konduktiviteten}$$

Q : Värmemängd [Joule]

t : tid [s]

L : tjocklek [m]

A : Area [m²]

För material anges ofta värmeledningsförmågan i form av termisk konduktivitet. Denna måste skalas om för aktuell area och längd som skall användas i applikationen för att erhålla den termiska konduktansen.

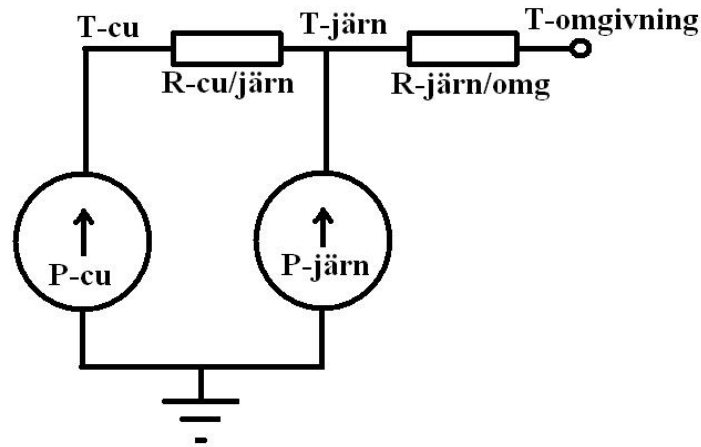
$$\text{Termisk konduktans} = k \frac{A}{l}$$

Den termiska resistansen är inversen på termiska konduktansen.

$$R_{\text{termisk}} = \frac{l}{kA}$$

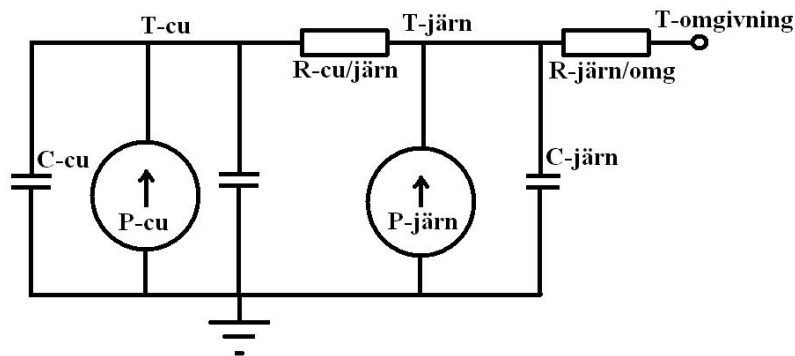
Den temperaturdifferens en värmeförlust skapar med viss termisk resistans ges av följande formel; $\Delta T = P \cdot R_{\text{termisk}}$

I elmaskinen är det emellertid mer komplicerat då både kopparledning och järnkärna alstrar värme samt att det är en termisk övergång mellan dessa via isolationen. Detta illustreras i figur 22.



Figur 22, modell med två värmekällor

Det som utelämnats i modellerna är trögheten i systemet. Är massan stor på objektet höjs temperaturen likt en RC-krets, (uppladdningskrets), där termiska resistansen ses som motstånd och trögheten som en kondensator. För kopparlindningen är denna benämnd C-cu och för järnet C-järn, se figur 23.



Figur 23, komplett värmemodell

För beräkningar till denna mer kompletta modell finns följande ekvationer,

Beräkningar för dynamiska förlopp:

$$C_{\text{järn}} \cdot \frac{\partial}{\partial t} T_{\text{järn}} = P_{\text{järn}} + P_{\text{cu}} - \frac{1}{R_{\text{järn/omg}}} (T_{\text{järn}} - T_{\text{omgivning}})$$

$$C_{\text{cu}} \cdot \frac{\partial}{\partial t} (T_{\text{cu}} - T_{\text{järn}}) = P_{\text{cu}} - \frac{1}{R_{\text{cu/järn}}} (T_{\text{cu}} - T_{\text{järn}})$$

Beräkningar för statiska förlopp:

$$P_{\text{järn}} + P_{\text{cu}} - \frac{1}{R_{\text{järn/omg}}} (T_{\text{järn}} - T_{\text{omg}}) = 0$$

$$P_{\text{cu}} - \frac{1}{R_{\text{cu/järn}}} (T_{\text{cu}} - T_{\text{järn}}) = 0$$

Behovet att beräkna värmeutvecklingen för dynamiska förlopp finns när utvecklingen av värmeförluster varierar över tiden. Startmotorn på en bil är ett bra exempel på när effektförlusterna endast sker under kort tid. Där har den tröghet som massan, (eg. $massa \times värmekapacitet$), i statorn betydelse, då den lagrar den kortvariga värmen vid drift för att motorn därefter långsamt svalnar av. Skulle startmotorn belastas kontinuerligt hade värmeutvecklingen efter någon minut överhettat motorn.

Som framgått är det endast statorns lindningar och järnkärna som varit föremål för värmeberäkningar. Emellertid sker värmeutveckling även i magneter och lagringar. Då dessa betraktas som ringa gentemot statorförlusterna tas dessa inte upp i denna modell.

3 Utveckling av elmaskinen

3.1 Val av elmaskin - Konstruktionskriterier

Under utvecklingen ändrades typ/utförande av elmaskin fyra gånger, vilket redovisas i följd nedan.

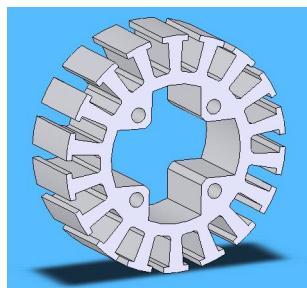
3.1.1 Ytterrotormaskinen

Av de tre motortyperna innerrotor-, ytterrotor- och axialflödesmaskin föll först valet på ytterrotormaskin. Det skulle enligt resultatet i förstudien vara möjligt att uppnå erforderliga skjuvspänningar i magnetgapet för att kunna använda en ytterrotormaskin.

Redan med relativt enkla överslagsberäkningar visade det sig att det skulle bli oöverbinnerliga problem att använda ytterrotor. För att uppnå erforderligt moment skulle elmaskinen bli väsentligt längre än originalet. Det gör att hållaren för magneterna till ytterrotorn skulle behövas göras kraftigare, vilket i sin tur gör att tröghetsmomentet blir större än vad kravspecifikationen tillåter.

Ett annat svårbemästrat problem är värmeutvecklingen och de begränsade kyltorna. Omgivningstemperaturen är hög i tilltänkt applikation, antagande har gjorts på max 80 grader C°, vilket bör stämma inom +/-10 grader C°. Bra kopparlindningar tål upp till ca 150 grader C°, varpå det gäller att termiska kopplingen är mycket god för att kylningen skall bli tillräcklig. Tyvärr är möjlig tillgänglig area ganska liten innanför statorn. Det är förstås möjligt att låta montera statorn i motsatt riktning genom att sätta den utanför tilltänkt applikation och då få bättre kylning, men det är fortfarande frågan om ganska små anläggningsytor. När det gäller ytterrotormaskinen blir det heller inte särskilt mycket anläggningsyta för gränsskiktet statorlindning-isolation-statortand.

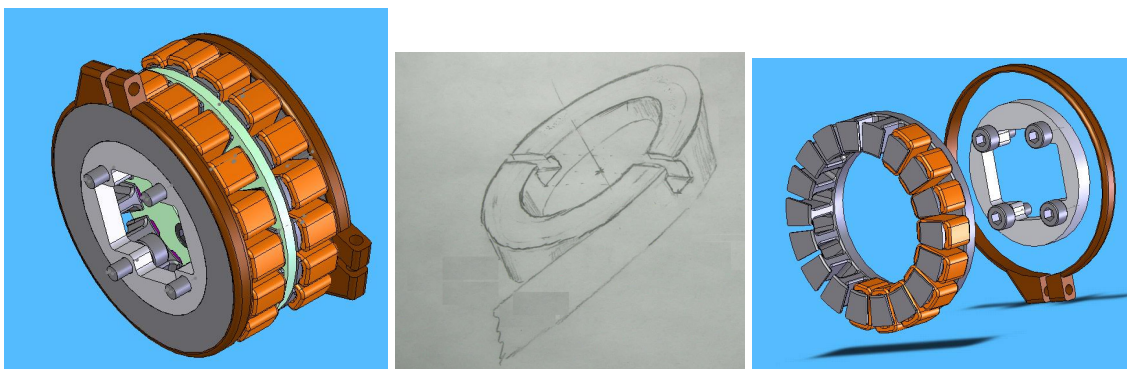
Planerna på att använda en ytterrotormaskin kom dock så långt att en tilltänkt stator ritades upp och tillverkningsmetoder planerades. Cadmodellen visas i figur 24.



figur 24, stator till ytterrotormaskin

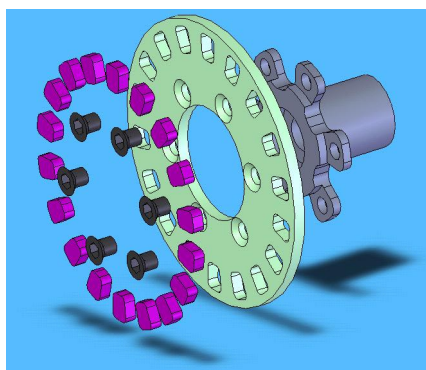
3.1.2 Axialflödesmaskin med fräst stator och enkellagemagneter

Den första designen för axialflödesmaskin bestod av en stator på var sida om en rotor, se figur 25. Fälten går främst i axiell riktning i en axialflödesmaskin, till skillnad mot radiell riktning för inner- och ytterrotormaskin. Detta medför att det inte går att stansa ut statorn i flera plåtskikt som för de två sistnämnda motortyperna. En idé skulle vara att linda en plåtremsa likt en tejproule och därefter fräsa ut tänderna. Se principskissen i figur 26. För att kunna linda elektroplåten med gott spänn, (för att erhålla god packningstäthet), måste den lindas kring något. Likaså måste statorn senare monteras. Tanken var att låta upplindningsdetaljen även utgöra monteringsplatta för statorn. För att fixera elektroplåten kan en spännring klämmas runt ytterradien. Se figur 27, som visar sprängskiss på detaljerna.



Figur 25, första axialmaskinen Figur 26, elektroplåtsupplindning Figur 27, sprängskiss stator

Kravet på rotorn är att den skall kunna bära kraftiga magneter med stor area och tillräcklig tjocklek samtidigt som den inte skapar för stort tröghetsmotstånd i sig själv. En lösning på detta är att fräsa ut rotorhållaren i aluminium för att därefter limma dit magneter i passande storlek. Alternativt skulle rotorn kunna ha stoppklackar åt ena hållet som gör att magneterna inte lossnar och en ditskruvad tunn plåt i rostfritt stål som stopp åt andra hållet. Visualiseringen i figur 28 visar första alternativet där magneterna endast limmas fast.



Figur 28, sprängskiss på rotor

3.1.3 Axialflödesmaskin med trådgnistad stator och dubbla lager magneter

3.1.3.1 Tunnare plåt

Vid beräkningar av virvelströmsförlusterna visade det sig att dessa blev alldeles för stora. Den parameter som är lättast att förändra för att få minskade förluster är plåttjockleken. Med Surahammars Bruks (ref. se kontakter) tunnaste plåt på 0.12 mm grovberäknades virvelströmsförlusterna till ca 100 W per stator vid maximalt varvtal. Detta är ganska stora förluster så tjockare plåt än så bör absolut inte användas.

Tabell 1 visar ett urklipp från datablad på tunnplåt från Surahammars Bruk. Simuleringar visade på genomsnittlig mätnad på ca 1 Tesla och med statorvikt på ca 1kg.

2500 Hz

Grade	Specific total loss, W/kg at 2500 Hz and a peak magnetic polarization $J(T)$ of										
	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10
NO 12	1,65	6,83	15,2	25,4	37,7	52,0	66,1	83,1	103	132	156
NO 18	2,18	8,33	19,1	31,7	45,9	61,5	81,1	104	130	161	198
NO 20	2,79	10,6	24,4	40,4	58,4	78,4	103	133	166	205	253

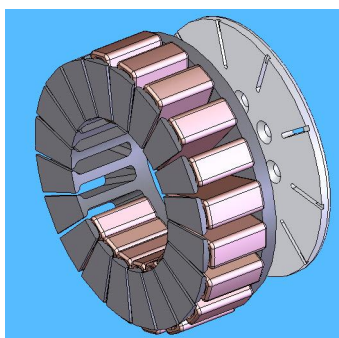
Tabell 1, järnförluster

3.1.3.2 Trådgnistning

Emellertid medför så tunn plåt att det inte går att fräsa ut statortänderna. Plåten skulle vika sig och medföra stora förluster genom kortslutningar. Magnus Lindenmo på Sura Hammars Bruk rekommenderade istället att trådgnista ut tänderna. Tomas Lindén på Linova (ref. se kontakter) som utför trådgnistning kontaktades. Efter dialog över Cadritningar trodde han det skulle vara möjligt att trådgnista med gott resultat. Enda invändningen som fanns var om kontakten mellan plåtarna skulle bli tillräcklig. Trådgnistning har beskrivits som elektrifierad bandsåg. Genom att lägga spänning mellan tråden (motsvarande bladet på bandsåg) och detaljen som skall bearbetas uppstår hög effektutveckling i kontaktytan. Denna är så hög att materialet förångas. Bearbetningen ger ytor med mycket god måttoggrannhet men är synnerligen kostsam som metod.

3.1.3.3 Svetsning av statorryggen

Risken med otillräcklig kontakt vid trådgnistning skulle kunna lösas genom att en tunn svetssträng läggs just där flödena böjer av åt olika håll i statorryggen. Denna lösning är inte unik utan förekommer på axialmaskiner. Förutom att ge god elektrisk kontakt där magnetfälten är små skulle även andra svagheter i konstruktionen förbättras från första designen på axialmotorn. Förutom att svetsen förbinder plåtlagren så fäster den även mot en monteringsplatta med hela statorns diameter, se figur 29.



Figur 29, stator med svetsad rygg

Mekaniskt är detta en väsentligt stabilare lösning än den tidigare där spänningen håller ihop statorpaketet och klämmer mot mittersta monteringsplattan. Där håller endast friktionen statorn på plats, vilket kan vara kritiskt dels med tanke på att det handlar om stora krafter från magneterna och dels då statorn utsätts för vibrationer vid tilltänkt applikation. Förutom detta förbättras den termiska kontakten väsentligt gentemot tidigare konceptet där huvudparten av statorns värme måste gå genom den lilla ytan som anligger mot monteringsplattan.

För att inte oxidera plåten krävs att statorn svetsas i miljö med inert gas. Svetsarbetet är sannolikt svårt då det gäller att inte påverka magnetfälten allt för mycket.

3.1.3.4 Avspänningsuppvärmning

När plåten böjs så kraftigt som i detta fall, bildas spänningar som ökar förlusterna. För att reducera spänningarna så är det lämpligt att avspänna plåten genom uppvärmning. För aktuell plåt rekommenderas 800 grader Celsius under inert gas. Gasen är även här till för att skydda plåten mot oxidation.

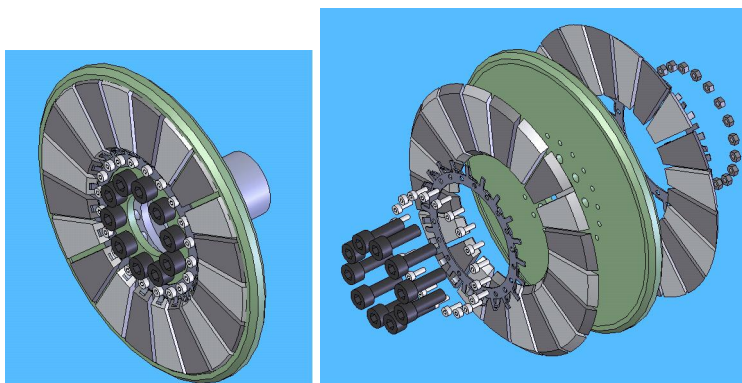
3.1.3.5 Limning

Plåten är så tunn att den behöver limmas mellan laminaten. För att kunna nå in i den tätt packade statorn krävs att limmet är lågvisköst och att det sugts upp med hjälp av vakuum.

3.1.4 Rotor

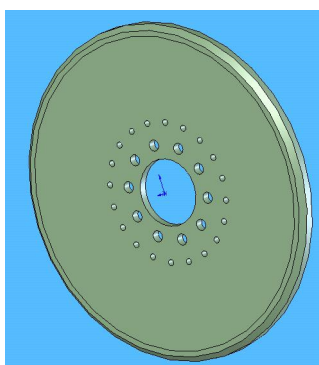
3.1.4.1 Magneter i dubbla lager

Tidigare lösning var att göra rotor i aluminium där magneter sätts in i frästa spår. Vid fem-simuleringar visade det sig gynnsamt att öka bredden på magneterna, vilket resulterar i mindre mängd aluminium emellan. Då magneterna är relativt tunga skulle hållfastheten äventyras vid höga rotationshastigheter. Det skulle vara möjligt att få till detta bättre men kräver att magneterna gjuts in från början och därefter magnetiseras. En sådan metod skulle kunna vara attraktiv vid volymproduktion men är för kostsam till denna prototyp. Förutom att det är kritiskt med hållfastheten kan det vara svårt att få magneterna att sitta kvar med endast limförband. Dels för att limförbandet utsätts för så stora krafter och dels för att rotorn cykliskt växlar i temperatur. Någon tillfredställande mekanisk lösning för att låsa magneterna är svårt att göra. Av dessa anledningar valdes en slutgiltig lösning med rotor av stål med magneter på vardera sidan, se figur 30 för monterad rotor och figur 31 för explosionsvy. Densiteten är väsentligt högre i stål, men tjockleken gick att halvera. Magneterna fixeras i ytterkant med hjälp av fasnig på rotorn och i innerkant av rostfria fjäderbleck. Se rotorskiva figur 32 och ett förstorat tvärsnitt figur 33, där fasthållningskanten visas. Figur 34 visar fjäderblecket.

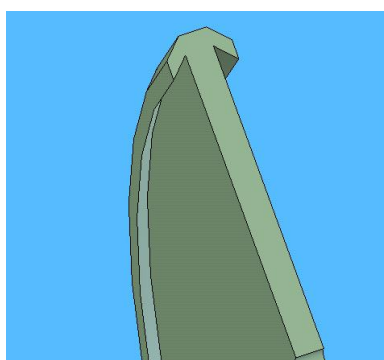


Figur 30

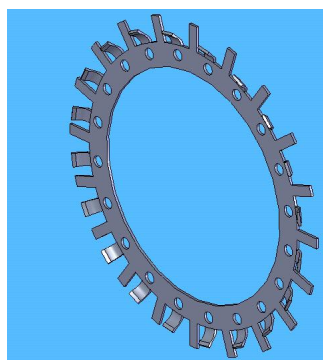
Figur 31



Figur 32



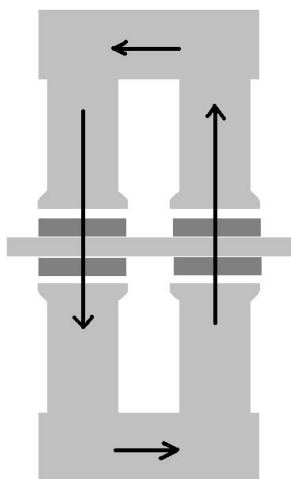
Figur 33



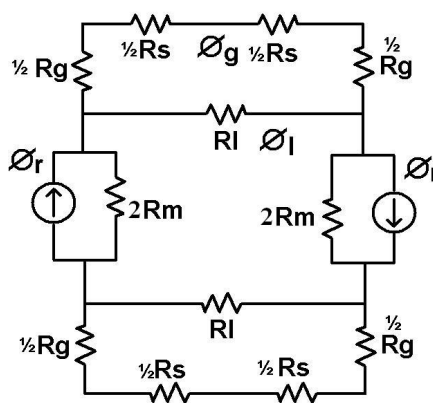
Figur 34

3.1.4.2 Flöde genom rotorn gentemot vändande flöden

Den valda rotorn har ett flöde som går axiellt genom skivan, se figur 35. Detta gör att hela flödet för en magnetiskt sluten slinga går genom fyra luftgap och fyra magneter. Ekvivalent magnetisk krets är illustrerad i figur 36.



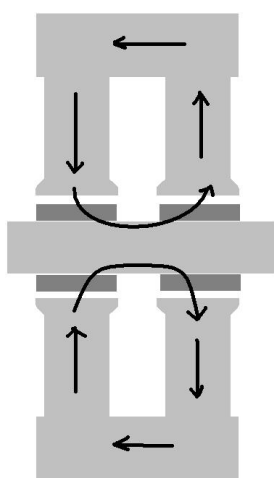
Figur 35



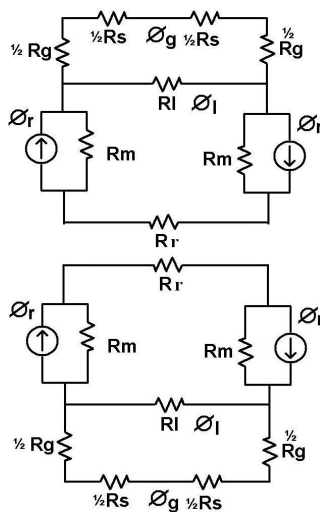
Figur 36

Ett alternativ som förkastades var att ha magneternas polarisation omvänd på ena rotorsidan. Då går flödena inte axiellt igenom rotorn utan följer rotorskivan tangentiellt, se figur 37. Motsvarande ekvivalent krets syns i figur 38. En fördel med denna konfiguration är att koggingmomentet kan minskas genom att magneterna förskjuts, alternativt en stator förskjuts, se figur 39.

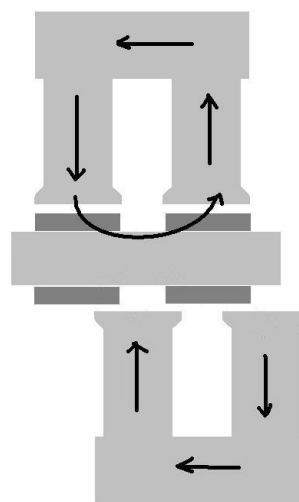
Den avgörande nackdelen med tangentiellt flöde är rotorskivans ökade tröghetsmotstånd. Om fältstyrka inte ska bli högre än i tändarna måste rotorskivan ha dubbla arean i tvärsnitt mot tändarnas tvärsnittsarea, då rotorns flödesväg delas av statorparen. Även med förskjutna magneter eller förskjuten ena stator måste rotorskivan bli mycket tjock för att inte mätta dess järn. Detta innebär en alldeles för stor massa och därtill lika tröghetsmotstånd för att kunna möta kravspecifikationen. Sannolikt skulle rotorskivan även få stora virvelströmsförluster då den är homogen.



Figur 37



Figur 38



Figur 39

3.1.4.3 Magnetmaterial

Som framgick i överblicken av magnettyper valdes neodymium för elmaskinen. Det finns flera varianter av neodymiummagneter med högre temperaturlåghet men med sämre övriga prestanda.

I projektet valdes N35H, se tabell 2, efter diskussion med säljaren Tommy Andersson på Suramagnets, (ref. se kontakter). Data på magneterna sattes in som parametrar i fem-programmet där även kompensation för temperatur gjordes.

Grade	Remanence (T)	Coercivity bHc (kA/m)	Coercivity iHc (kA/m)	Energy Product BH max (kJ/m ³)	Working temperature (max °C)
N 35	1,22	844	955	280	80
N 38	1,25	860	955	304	80
N 40	1,30	875	955	320	80
N 45	1,36	900	955	350	100
N 35 M	1,22	875	1115	280	100
N 40 M	1,30	900	1115	320	100
N 30 H	1,14	810	1350	240	120
N 35 H	1,23	900	1350	280	120
N 40 H	1,32	960	1350	320	120
N 30 SH	1,14	810	1590	240	150
N 35 SH	1,22	900	1590	280	150
N 27 UH	1,08	810	2000	220	180
N 30 UH	1,14	836	2000	240	180

Tabell 2, Neodymiummagnettyper

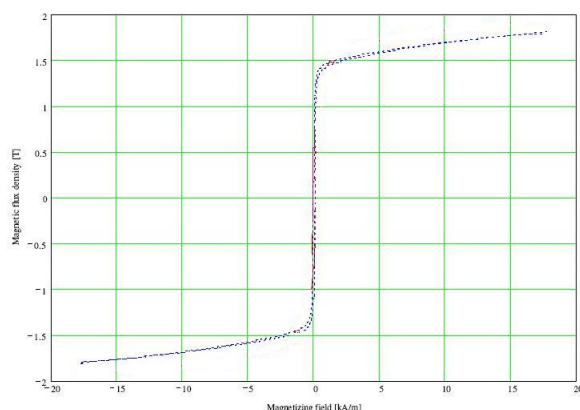
3.1.5 Axialflödesmaskin med stator av pulvermetall

3.1.5.1 Kommentarer

Som framgick i tidigare stycke är det synnerligen komplicerat att tillverka en axialflödesmaskin i tunnplåt. Avgörande för beslutet att lämna tunnplåt till förmån för pulver var att Sura Hammars bruk, (se ref, kontakter), inte kunde ge leveranstid på plåt mer precist än ”ett obestämt antal veckor fram i tiden”.

3.1.5.2 Pulver gentemot tunnplåt

Den pulvermetall som använts i simuleringar och framtagen prototypmaskin heter Permedym S2 och är köpt av Tord Cedell från Magcomp, (ref. se kontakter). Hystereskurva för materialet visas i grafen, figur 40. Mer materialdata finns i tabell 3. Egenskaperna sattes in i materialfilen i fem-programmet.



Figur 40

Description	Symbol	S1 typical value	S2 typical value	Unit
Maximum relative permeability	μ_{\max}	2950	7960	-
Maximum differential permeability	μ_{diff}	14300	19900	-
Saturation magnetization (16 kA/m)	B_{sat}	1.9	1.8	T
Coercive force	H_c	89	73	A/m
Magnetic remanence [T]	B_r	0.67	0.98	T

Tabell 3, järnpulveregenskaper

Jämförs järnpulver med tunnplåt är utformningsmöjligheterna mycket större med järnpulver. Det går att göra de mest märkliga former på statorn, vilket förstås är en stor fördel flödesmässigt.

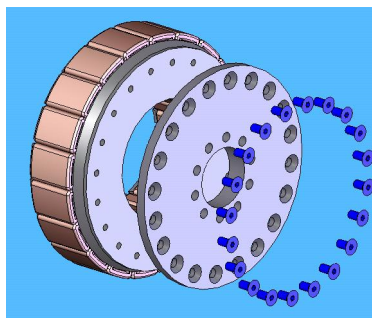
Med järnpulver blir prototypframtagningen billigare än tunnplåt då det går att ta fram statorns form med konventionell bearbetning, såsom svarvning och fräsning. Tyvärr dammar pulvermetallen vid skärande operationer, varpå rekommendation har getts att använda munskydd. Järnpulvret är mycket rostbenäget så det gäller att städa ej övertäckta ytor på bearbetningsmaskinen väl efter användning. I större volymer ses kostnaden för pulverlösningen som en risk.

Tilltänkt plåt har bättre magnetisk ledningsförmåga än pulver. Anledningen till detta är främst att plåten i magnetiska flödesriktningen är utan avbrott. Hos pulver bör varje korngräns kunna betraktas som luftgap, vilket då gör att den magnetiska ledningsförmågan, dvs. permeansen är väsentligt lägre. I plåt talas om stackningsfaktor, mängd järn gentemot isolation. Den bör vara lägre än hos tunnplåten, vilket också avspeglar sig med att järnet tidigare kommer till mättnad.

Dessa egenskaper gjorde det omöjligt att komma upp i samma prestanda som tunnplåten med samma yttermått på elmaskinen. Den parameter som är avsevärt bättre för pulver är de låga virvelströmsförlusterna. Förlusterna ökar i kvadrat med plåttjockleken och när pulvrets partiklar är så små blir dessa förluster närmast försumbara i sammanhanget.

3.1.5.3 Utformning

Fastsättning av statorn kan göras med värmeledande lim mot fästytan. I detta fall har en mer komplicerad metod valts genom att skruva en fästplatta mot statorryggen. Se figur 41 på sprängskiss. Fästplattan går att byta om elmaskinen skall användas i andra tillämpningar.



Figur 41

3.2 Simuleringar

3.2.1 Övergripande beskrivning

Som tidigare nämnts är det inte lätt att optimera en elmaskin utan att fem-program används. Genom fem-analys kan man få reda på mycket värdefull information såsom mättnadsgrad i statorns olika områden och för olika positioner på rotorn. Det går även att ta reda på hur magneterna belastas och vilka krafter som verkar.

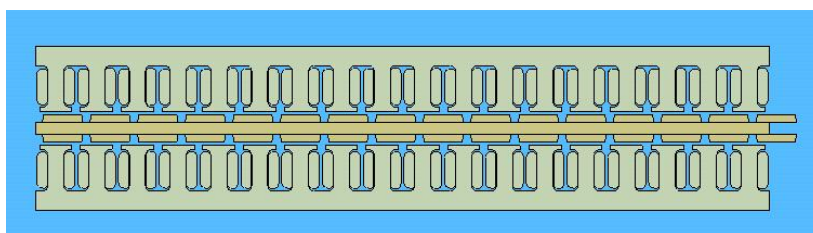
Simuleringarna gick till på så vis att all geometri lades in i ett egenskrivet matlabprogram. Vid programkörning skapas en körbar fem-programs fil. Detta görs för valbart antal kombinationer av rotationslägen, radiesegment och strömnivåer, och det skapas en fem-fil för varje kombination. För hantering av de stora mängder fem-filer som kan skapas för varje matlabprogramkörning så skapas även ett ”hålla reda på skript”, av formatet Lua. Det gör att hela batchen kan köras med automatik. Mer detaljerad beskrivning finns i flödesschema för matlabkoden senare i rapporten.

Lua filen är därefter direkt körbar i fem-programmet. Dess utdata är en detaljerad grafisk visning av fälten samt möjlighet att avläsa krafter och mycket mer på valda detaljer.

Flera iterationer har gjorts där geometrin ändrats successivt tills någon typ av avvägt optimum nåtts. En sammanställning är gjord i ett exceldokument.

3.2.2 Matlabkod

Motorns geometri är tredimensionell medan fem-programmet endast är tvådimensionellt. För att lösa detta har elmaskinen gjorts tvådimensionell genom att betrakta den som en linjärmotor, se figur 42.



Figur 42, linjärmotor

3.2.2.1 Radiesegment

Vid olika betraktningradier på axialflödesmaskinen är geometrierna på rygg, tänder och magnet inte desamma. Därför görs simuleringar för valbart antal radiesegment.

3.2.2.2 Rotorvridning

Då rotorn förflyttas ändras förhållandet mellan statorns tänder och rotorns magneter. Därför görs en programloop även för uppstegning i vinkelförflyttning av rotorn i valbart antal steg och steglängd.

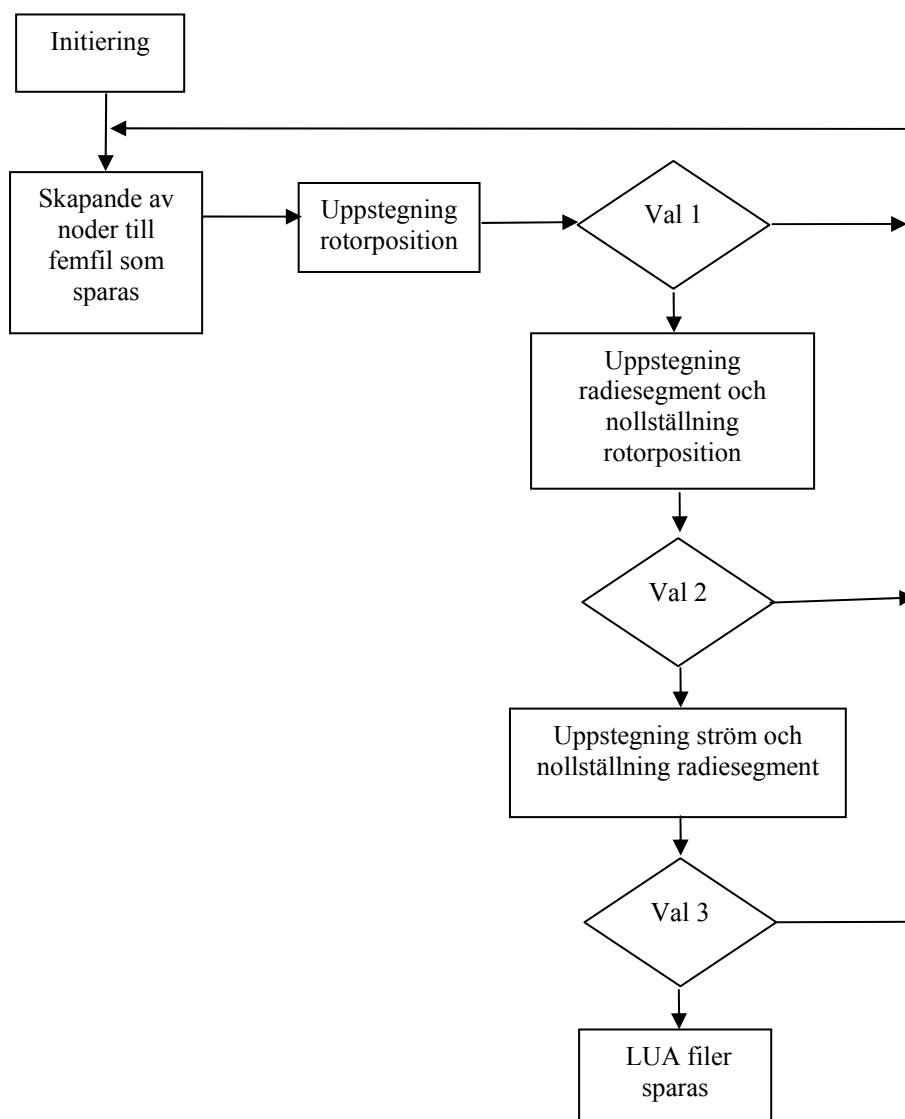
3.2.2.3 Strömupprampning

Det är intressant att ta reda på hur elmaskinen uppför sig vid olika strömmar. Förr eller senare uppträder mätnad i olika regioner av statorn. Vid en illa utformad elmaskin uppträder mätnad utan att andra delar av statorn håller särskilt hög flödestäthet. Detta är förstås olyckligt, då man naturligtvis inte vill bära på onödig barlast ifråga om outnyttjat material samt att de bitar som kommit in i mätnad inte överför mer energi utan endast orsakar värmeförluster. I fem-simuleringarna är det mycket användbart att grafiskt studera mätnaden i olika detaljer. Det går till så att två snarlika geometrier med samma statorströmmar jämförs. Den med bäst prestanda har ofta minst lokal mätnad, varpå successiva förändringar görs för att optimera utformningen. För att spara tid är programmet utformat så att det går att köra om hela batchen vid geometriändringar, dvs olika radiesegment och statorförflyttningar för olika strömmar.

3.2.2.4 Matlabflödesschema och programbeskrivning

Matlabprogrammets flödesschema visas i figur 43. Innan programmet körs läggs önskade mått på geometrier och andra parametrar in i koden.

Vid körning av programmet hämtas först en tidigare skapad materialfil i fem-programmet. Denna fil utgör en grund som därefter fylls på med geometri och andra parameter för senare simuleringar. När detta är gjort sparas filen i nytt namn. Den första körbara fem-filen är därmed skapad. Därefter följer tre lager av loopar. Innersta loopen stegar upp rotorposition, den andra radiesegment och den tredje strömupprampning. När samtliga loopar är gjorda har sannolikt mängder av fem-filer skapats. För att senare kunna köra fem-programmet effektivt sparas på slutet en LUA fil, vilket är ett kontrollskript till fem-programmet som gör att alla fem-filerna kan exekveras batchvis.



Figur 43, matlabflödesschema

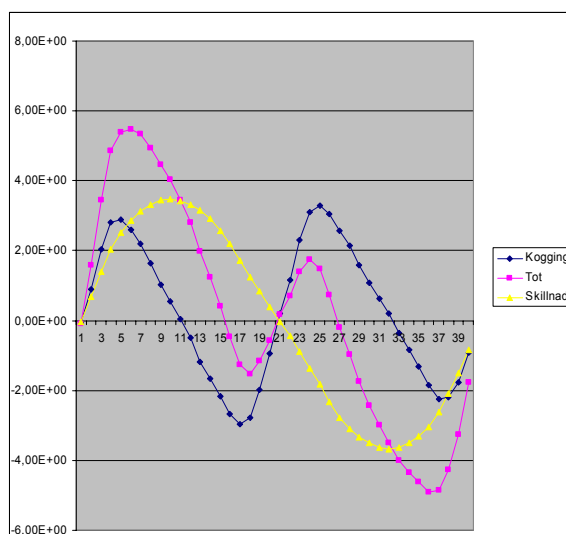
3.2.3 FEM-analys

Under optimeringen av geometrier och material skapades över 20 000 fem-filer till en volym av totalt 20 GB. Tack vare Lua skriptet kunde dessa mängder av beräkningar göras till viss del automatiskt så att en resultatfil för hela körningen skapades. Från denna överfördes data i ett sammanställningsdokument i excel.

3.2.3.1 Elmaskin med stator i tunnplåt

Alla beräkningar är baserade på ett varvtal motsvarande 3000 rpm på rotoraxeln. Vid simuleringarna beräknades effekten som erhöles vid pålagd ström, vilken betecknas "Tot" som i total effekt. Utan pålagd statorström fås en pulsation orsakad av magneternas position mot statortänderna, detta kallas koggingmoment. I diagrammen betecknas denna "Kogging". Subtraktion av kogging från totala effekten visas i grafen "skillnad". Denna är felaktig, vilket är ganska lätt att resonera sig fram till. Emellertid finns det en finess med detta då det förkortar antalet rotorpositionsförflyttningar och ändå ger ett korrekt medeleffektvärde. Figur 44 visar graf på simulering med dubbelt så

lång rotorförflyttning (egentligen rotorvridning) än det som senare görs i de skarpa simuleringarna.



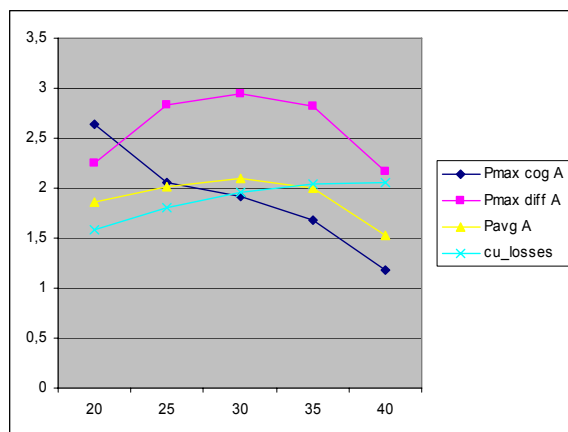
Figur 44, förklaring av grafer

Ändring av innerradie, cproc 35 %

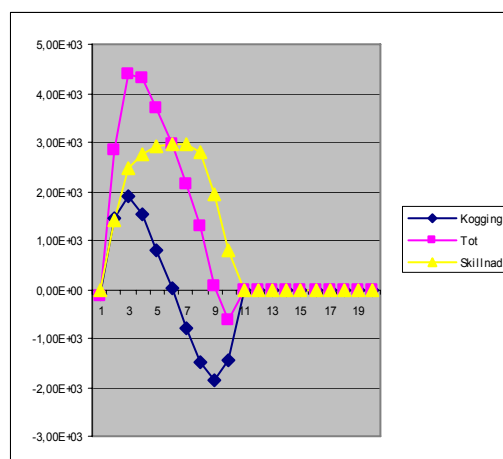
Med alla parametrar lika förutom ändring av innerradie gjordes simulering A1 till A5, se tabell 4. En innerradie på 30 mm ger mest medelut effekt. Effektfördelningen för olika vinkelpositioner syns i grafen i figur 46. Notera att skillnadseffekten är jämn och inte spetsig.

Simulering	A1	A2	A3	A4	A5
Ri	20	25	30	35	40
Ro	53	52,4	51,9	51,4	50,9
NOA	10	10	10	10	10
NOS	5	5	5	5	5
Lt	20	20	20	20	20
Cproc	35	35	35	35	35
Pmax cog	2,64	2,06	1,91	1,68	1,18
Pmax diff	2,25	2,84	2,95	2,82	2,16
Pavg	1,866	2,01	2,098	2	1,529
Awin	20,42	25,52	30,63	35,74	40,84
Imax	245	306	367	429	490
Cu_loss	159	181	196	204	205
Pavg/losses	1,17	1,11	1,07	0,98	0,75

Tabell 4, variering av innerradie



Figur 45



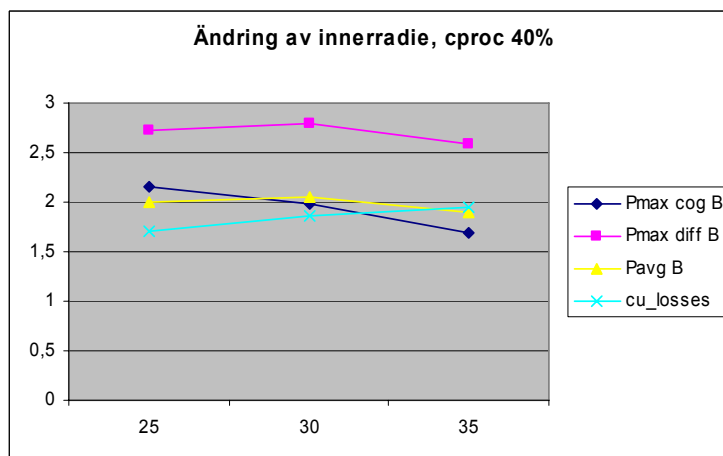
Figur 46

Ändring av innerradie, cproc 40 %

I denna mätserie är cproc ändrat till 40 procent. Resultatet visas i tabell 5 samt i grafen i figur 47 på motsvarande sätt som tidigare. Även med annan andel järn ligger optimum kvar på 30 mm innerradie.

Simulering	B2	B3	B4
Ri	25	30	35
Ro	52,6	52,2	51,7
Cproc	40	40	40
Pmax cog	2,15	1,99	1,69
Pmax diff	2,73	2,79	2,58
Pavg	2,001	2,054	1,903
Awin	23,56	28,27	32,99
lmax	283	339	396
Längd	1,89	1,72	1,54
cu_losses	171	186	194
Pavg/losses	1,1702	1,1043	0,9809

Tabell 5



Figur 47

Ändring av cproc och statorström

Jämförelse mellan cproc 35 % och 40 % gjordes samtidigt som strömmen ändrades från 12 till 120 A/mm², se tabell 6. 120 A/mm² är naturligtvis absurt hög strömtäthet för statorlindningen, men det är intressant att se hur elmaskinen presterar under extrem mättnad vid olika proportioner järn/lindning i statorn.

Simulering	A3	A3B	B3	B3B
Ri	30	30	30	30
Ro	51,9	51,9	52,2	52,2
NOA	10	10	10	10
NOS	5	5	5	5
Lt	20	20	20	20
Cproc	35	35	40	40
Pmax diff	2,95	18	2,79	18,2
Pavg	2,098	12,06	2,054	12,38
Awin	30,63	30,63	28,27	28,27
Imax	367	3676	339	3390
Längd	1,67	1,67	1,72	1,72
Lind. i fält [%]	53	53	51,6	51,6
cu_loss	196	1959	186	1860
Pavg/losses	1,07	0,616	1,104	0,666
Strömtäthet A/mm ²	12	120	12	120

Tabell 6, ändring av cproc och ström

Slutsats: Med denna begränsade ytterradi är cproc 35 procent då detta ger mest uteffekt i det arbetsområde som elektriska maskinen oftast är tänkt att användas för.

Ändring av ytterradien

Det som bör noteras i förra simuleringarna är att det trots en så hög strömtäthet som 12A/mm² inte gick att uppnå den satta kravspecifikationens 3 kW i medeluteffekt. Visserligen är detta med max 50 % dutycycle, men oron är ändå stor att de höga strömmarna kommer att medföra termiska problem. Därför provas en annan design med större ytterdiameter på statorn.

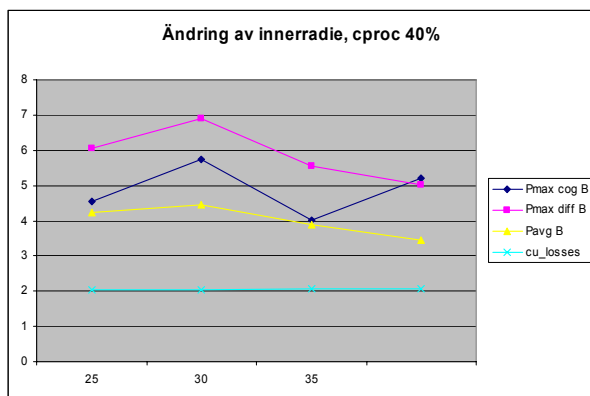
Det innebär att hela elmaskinen måste byggas med större diameter för att klara det uppsatta effektmålet. Tyvärr innebär detta att den inte får rum i den kavitet som finns tillgänglig i avsedd applikation utan får monteras utanför denna mha längre axel.

Simuleringarna gjordes för maximal yttre diameter på 150 mm, se tabell 7 och diagram i figur 48. Med dessa modifieringar blev verkningsgraden väsentligt högre tack vare att statorströmmarna kunde minskas och järnet inte kom så nära mättning. Som synes uppfylls uteffektskriteriet med onödigt stor marginal.

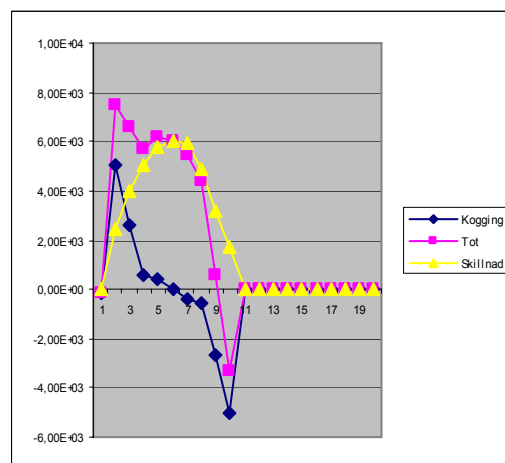
Slutsats: 45 mm innerradi utgör den bästa kompromissen därför att koggingeffekten är lägre än för mindre innerradi och att medeluteffekten är högst. Se figur 49 där graf är utritad för innerradi på 45mm.

Simulering	Big A4	Big A3	Big A5
P	20	20	20
Ri	40	45	50
Max diam.	150	150	150
Ro	70,2	69,4	68,9
Lt	25	25	25
Lyoke	7	7	7
Cproc	35	35	35
Pmax diff	6,05	6,89	5,55
Pavg	4,231	4,451	3,885
Awin	57,4	57,4	63,8
Imax	459	510	510
Längd	2,08	2,08	1,9
Lind. I fält [%]	46,9	46,9	39,7
cu_lossess	203	203	206
cu_lossess (0,1 kW)	2,03	2,03	2,06
Pavg/lossess	2,084	2,192611	1,885922
Strömtäthet A/mm ²	8	8	8
Pmedel/Pcog	0,930	0,777	0,966

Tabell 7



Figur 48



Figur 49

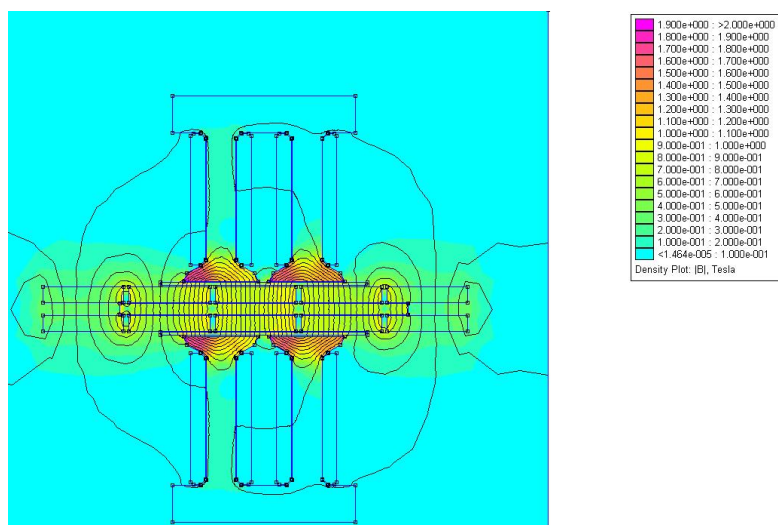
3.2.3.2 Elmaskin med stator i pulvermetall

Ändring av innerradien

Tabell 8 visar simuleringar med olika innerradier. Minsta innerradien 30 mm gav högst uteffekt. Detta kan tyckas märkligt då så inte var fallet för tunnplåt. Mindre än 30 mm testades inte då lindningarna tar en del utrymme och att statorn innanför dessa skall monteras med skruvförband. Vidare skall axeln till rotorn även få plats. I figur 50 visas det magnetiska flödet och graden av mättnad för en av de mest belastade rotorpositionerna för testning P A30.

	P A30	P A35	P A40	P A45	P A50	P A55
P	20	20	20	20	20	20
Ri	30	35	40	45	50	55
Max diam.	126	126	126	126	126	126
Ro	58,9	58,4	57,9	57,4	56,9	56,4
Lt	25	25	25	25	25	25
Lyoke	7	7	7	7	7	7
cproc	35	35	35	35	35	35
Pmax cog	4,45	3,93	3,27	2,44	1,44	0,31
Pmax diff	4,77	4,73	4,33	3,51	2,26	0,53
Pavg	3,253	3,245	2,973	2,421	1,555	0,361
Awin	38,3	44,7	51,1	57,4	63,8	70,2
Imax	459	536	613	689	766	842
Längd	2,02	1,84	1,66	1,48	1,3	1,12
Lind. I fält [%]	57,3	50,9	43,15	33,5	21,2	4,93
Cu_loss	296	315	325	326	318	302
cu_loss (0,1 kW)	2,96	3,15	3,25	3,26	3,18	3,02
Pavg/losses	1,099	1,030	0,915	0,743	0,489	0,120
Strömtäthet A/mm ²	12	12	12	12	12	12
Pmedel/Pcog	0,731	0,826	0,909	0,992	1,079	1,164

Tabell 8



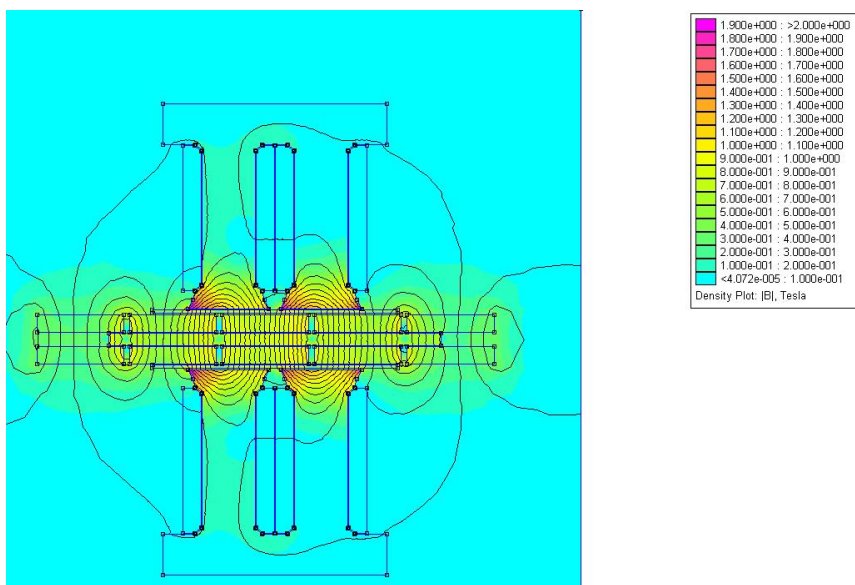
Figur 50, flödeslinjer innan optimering

Ändring av innerradien efter optimering

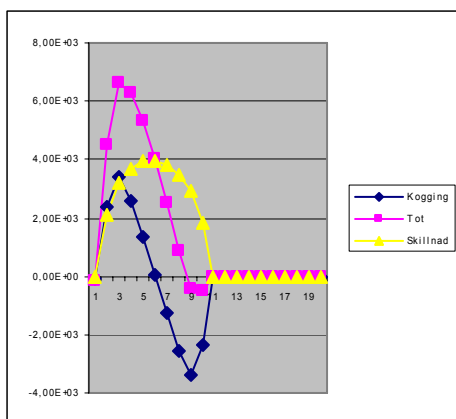
En ej redovisad optimering följde avseende statortändernas utformning, avstånd mellan magneter, med mera. Detta i syfte att reducera koggingeffekten vilken i denna simulering var mycket hög. Genom att studera mätnadsgrader med hjälp av fem-programmet var det relativt enkelt att reducera de mätnader som uppstår lokalt i statorn. Efter alla dessa ändringar utfördes återigen test med radievariering, se tabell 9. Notera att koggingeffekten minskat avsevärt och att uteffekten är nära densamma fastän strömtätheten minskats från 12 till 8 A/mm². Hela maskinen har förbättrats avsevärt, vilket tydligt syns i figur 51 där graden av mätnad visas. Jämför med den ej så optimerade geometrin för PA 30 (med samma innerradie och ytterradie). Alternativ PD 1 valdes att gå vidare med vilken har högsta uteffekten. Figur 52 visar dess momentan koggingeffekt, uteffekt och skillnadseffekt vid olika rotorpositioner. Skillnadseffekten uppför sig mycket bra med jämn och fin fördelning.

PD körningen	PD0	PD 1	PD 2
P	20	20	20
Ro	57	57	57
Cproc	30	30	30
Ri	35	30	25
Pmax cog	3,28	3,42	3,41
Pmax diff	4	3,98	3,69
Pavg	2,894	2,909	2,706
Awin	48,106	41,23	34,361
Imax	481,06	412,3	343,61
Längd	1,73	1,88	2,039
cu_loss	221,2	204	186,37
cu_loss (0,1 kW)	2,212	2,04	1,8637
Pavg/losses	1,308	1,426	1,452
Strömtäthet A/mm2	10	10	10
Pmedel/Pcog	0,882	0,851	0,794

Tabell 9



Figur 51, flödeslinjer efter optimering



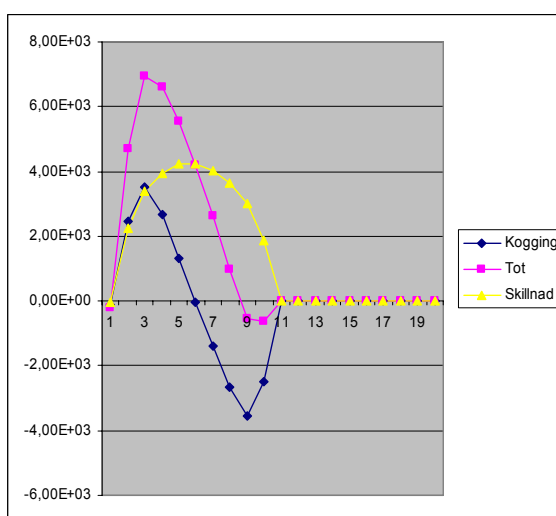
Figur 52

Ändring av cproc

Med ytterligare optimering av stator och magneter kunde maskinens prestanda ökas något, se tabell 10 och grafer i figur 53.

PD körningen	PD 3	PD 4	PD 5	PD 6
Cproc	35	25	20	20
Ri	30	30	30	35
Pmax cog	3,3	3,54	3,68	3,53
Pmax diff	3,56	4,24	4,47	4,47
Pavg	2,739	3,06	3,169	3,093
Awin	38,288	44,179	47,124	54,978
lmax	382,88	441,79	471,24	549,78
Längd	1,9217	1,8475	1,8124	1,65
cu_losses	195,7	217,1	227,19	241,8234
cu_losses (0,1 kW)	1,957	2,171	2,2719	2,418234
Pavg/losses	1,400	1,409	1,395	1,279
Strömtäthet A/mm ²	8	8	8	8
Pmedel/Pcog	0,83	0,864407	0,861141	0,876204

Tabell 10



Figur 53, PD 4

Vald geometri

PD 4 valdes som bästa alternativ trots att PD5 har något högre medeluteffekt. Anledningen står inte att finna i fem-analysen utan i temperaturledningsförmåga, bearbetning och hållfasthet. Med så snarlika prestanda är det intressantare med bredare tänder för att få statorn hållbarare.

3.2.4 Utformningens påverkan

Framtagning av matlabkod för fem-simulering samt själva simuleringarna är det som tagit mest tid och kraft under examensarbetet. Genom att testa mängder med olika geometrier har slutsatser kunnat dras för att optimera olika detaljers utformning.

3.2.4.1 Monteringsplattan till statorn

Funktionen hos monteringsplattan är att hålla fast statorn i rätt position samt vara god värmeledare.

Utformningen skiljer sig mellan statorkärna i tunnplåt och järnpulver. För tunnplåt svetsas monteringsplattan mot statorryggen, vilket gör att även statorplattan är gjord i magnetiskt ledande material. Lämpligen sker svetsning i varannan tand med ett mindre avstånd mellan statorrygg och monteringsplatta på alla ytor utom just där svetsfogen löper. Detta innebär att ringa flöde går genom monteringsplattan. Anledningen är att plattan är homogen och ger upphov till betydande virvelströmsförluster. Motorlängden ökar inte mycket då stål har mycket goda hållfasthetsegenskaper. Det kritiska är utformningen av slitsarna där svetsen skall läggas samt termiska övergången från monteringsplattan till fixtur eller applikation.

Monteringsplattan till statorn i pulvermetall görs i duraluminium av vikt- och temperaturledningsskäl. Då den inte svetsas mot statorn utan skruvas blir termiska övergången mer kritisk. Statorryggen är vald så tjock att magnetfälten är små i botten på ryggen. I annat fall skulle stora virvelströmsförluster uppstå i monteringsplattan. För att kunna montera plattan mot plan yta på fixtur alternativt applikation måste fastsättningen av förbandet försänkas.

I statorn fixeras pinnskruven med låsvätska, lämpligen Loctite 638 avsedd för förband som ej mer skall demonteras. I andra ändan av pinnskruven bör låsvätska undvikas för att påkänningen i statorn inte skall blir för stor vid demontering. Bästa alternativet är fjäderbricka och planbricka under mutter utan friktionslåsning.

Denna lösning kräver att försänkningen i sammanhanget blir djup. Förutom detta skall återstoden av plåten vara tillräcklig tjock för att inte utmattningsproblem ska uppkomma.

3.2.4.2 Statorrygg

Tunnplåt:

Om man för tillfället bortser från den inverkan fastsättningen har på statorn flödesmässigt är det den yttersta radien som har störst inverkan på de prestandaegenskaper den elektriska maskinen får. Detta beror främst av två anledningar. Magneterna liksom statortänderna är tårtbitsformade med störst area vid ytterradien. Hos statorryggen är däremot tvärsnittsarean där flödet transporteras mellan tänderna lika stort. Därför blir flödestätheten högst i ytterradien.

Den andra anledningen är att flödet har längre sträcka att gå i ytterradien. Reluktansen är proportionerligt ökande med gångsträckan. Med högst remanens och flödestäthet blir ytterradien på statorn det som dimensionerar för ryggens längd.

Svetsförbandet ger istället större problem vid innerradien. Detta är inte simulerat med fem-programmet men går lätt att resonera sig fram till.

Svetssträngarna läggs där flödet böjer av åt olika håll vilket är mitt för statortänderna. Hos innerradien är tandbredden mindre, cproc multiplicerat med aktuell radie. Med given bredd och djup på svetssträngen blir därför andelen svets större mot innerradien. Svetsen påverkar främst på ett sätt. Den är homogen, gentemot tunnplåtens lamineringar, vilket medför stora virvelströmsförluster för den flödesändring som sker där. I närhet till svetsfogen skadas isoleringen på grund av den höga temperatur som uppkommer då oxidation sker snabbt vid så pass höga temperaturer.

Pulvermetall

Det var möjligt att utnyttja pulvermetallens bearbetningsmöjligheter till ökad tvärsnittsarea på ytterradien av statortänderna. Av den anledningen skulle flödesskillnaden bli än större för pulvermetalldesignen än tunnplåt mellan innerradien och ytterradien i statorryggen. Men då pulvermetallen inte har tunnplåtens isoleringsbarriärer mot flöden i radiell riktning fördelas flödestätheten till viss del i ryggen.

Fastsättning av statorn sker som tidigare beskrivits med pinnskruv. Pulvermetall har ingen stor hållfasthet. Brottgränsen på vald pulvermetall ligger på låga 100 MPa. Då det också är sprött måste insticket av pinnskruven vara långt. Dock är det olyckligt att gå särskilt djupt i tänderna då det minskar möjligheten att överföra flöde, allra värst är dock att hållfastheten i tänderna minskar. Av denna anledning dimensionerades ryggen på statorn längre än vad som ansågs rimligt i beaktande av flödestätheten från fem-analysen, men rimligt ur hållfasthetssynpunkt.

3.2.4.3 Parallella delen av statortänderna

Designkritiskt för elmaskinens prestanda har varit utformningen av statortänderna där lindningen monteras. Tillgängligt utrymme delas mellan järnkärna och statorlindning. För tunnplåt antogs att det skulle gå att använda smalare tänder än för pulvermetall. Emellertid var det tillverkningsmässigt svårt att göra annat än raka snitt från statorcentrum med tunnplåt, vilket medförde att med samma cproc blev det mindre total tvärsnittsarea järn. Som beskrevs ovan för ryggen fördelas flödestätheten bättre i pulvermetall.

Förutom de magnetiska flödena i statortänderna finns det ytterligare två parametrar att ta hänsyn till. Kritiskt för möjligt effektuttag är att termiska resistansen hålls låg. Därav

utformades tänderna med hänsyn till detta. Hållfasthetsmässigt gjordes pulvermetalltänderna snarare åt det kraftigare hållet.

För att få god anläggning måste avrundning göras med radie anpassad efter diametern på statorlindningen. Är den för liten bildas luftgap vilket försämrar värmeledningen och ökar ytterdiametern. Vid för stor radie förloras värdefull tvärsnittsarea på järnet.

3.2.4.4 Tandspetsen

Mycket av optimeringsarbetet i fem-analys lades på utformningen av tandspetsarna på statortänderna. Minskas avståndet mellan tänderna ökas möjligheten att få god magnetisk koppling till magneterna samtidigt som läckflödet ökar mellan tänderna.

Görs tandspetsarna längre blir mätnaden lägre i spetsarna, vilket minskar förlusterna. Dessutom ökar läckflödet mellan statortänderna samtidigt som en mindre mängd statorlindning får plats.

Trots att mycket arbete lades ner på optimering vid fem-simuleringarna fick kompromisser göras vid prototyp tillverkningen för att tillräcklig hållfasthet skulle uppnås.

3.2.4.5 Magneterna

I fem-analysen kunde magneternas längd dimensioneras. Är de för korta finns risk för avmagnetisering. Vissa bitar av den verkliga utformningen simulerades inte.

Infästningen av magneterna i dess ytterradie hålls fast av rotorskivan. Kanten på rotorskivan gjordes med avvägning mellan flödesprestanda och hållfasthet. Prestanda minskar med större kant då den kortsluter flödet på ytterradien. Av den anledningen bör kanten vara så liten som möjligt. Samma kant håller i magneten av attraktionskrafter och centripetalkrafter. Då magneterna är spröda behöver kanten vara tillräcklig tjock.

3.2.5 Värmeproblemet

De fyra källorna till värmealstring i elmaskinen är;

- Lager och tätningar
- Magneternas värmegenerering
- Järnförluster i statorn
- Statorns lindningar, så kallade kopparförluster

3.2.5.1 Lager och tätningar

I tilltänkt applikation är friktion i lager och tätningar ingen parameter att ta hänsyn till. Tätningar saknas och lagrens ökade belastning på grund av elmaskinen är försumbar. Dessutom är värmebortförseln från lagren väl tillgodosedd genom deras montering och påverkar inte uppvärmningen av statorn.

Beträffande testfixturen är situationen mer komplicerad. Inköpta lager är konstruerade för låga varvtal och har kraftiga tätningar mot smuts. Sannolikt kan dessa tätningar i kombination med det högviskösa smörjmedlet, (kullagerfett), skapa problematisk värmeutveckling. En risk är att det kan utgöra ett hot för funktionen, ett annat att det värmer upp fastsättningsplattan där även de två statorblocken är monterade. Om dessa misstankar kring värmeproblemet besannas kan tätningarna tas bort och fettet avlägsnas. Tunnflytande olja eller torrt smörjmedel reducerar friktionen och därmed värmeutvecklingen så pass att värmeproblemet kan avskrivas som parameter.

3.2.5.2 Magneter

Självpuppvärmningen av magneterna är ringa i sammanhanget. Då det är frågan om axialflödesmaskin får rotorn möjlighet till god ventilation. Av den anledningen tas inte värmeutvecklingen med i beräkningarna.

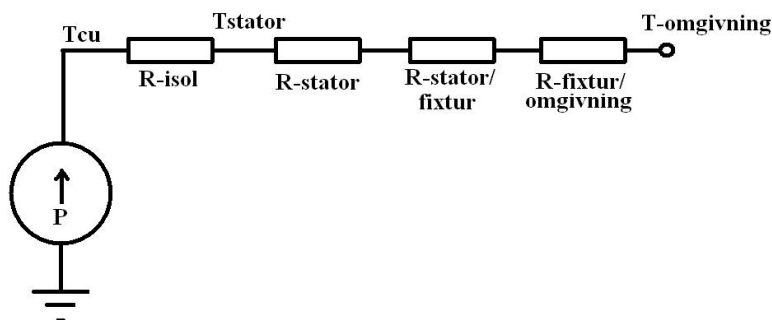
3.2.5.3 Järnmaterialiet i statorn

Det ferromagnetiska materialet i statorn genererar värme som beror på materialval, flödestäthet och elektrisk frekvens. De två sistnämnda ökar i kvadrat. För den tidigare designen med laminerad tunnplåt beräknades den totala järnförlusten uppgå till ca 100 W vid maximalt varvtal och ca 10 W vid 3000 rpm. Värmeproblemet för statorn uppkommer endast vid låga varvtalet runt 3000 rpm där tilltänkt kompensation är som störst. Vid fullvarv är elektriska maskinen i stort sett helt inaktiv och kopparförlusterna blir ringa. Alltså är det runt 3000 rpm det är konstruktionskritiskt. Övergången från tidigare design med tunnplåt till nuvarande med pulver minskar järnförlusterna. Då de var så små med tunnplåt kan de därför utelämnas i värmemodellen för pulvermetalldesignen.

3.2.5.4 Kopparförluster

Kopparlindningen är den största förluskällan. En komplicerande faktor är att värmekällan har dålig termisk koppling till kylsänkan. Från koppartråden överförs värmen till intilliggande isolerade koppartrådar för att därefter överföras genom statorisolationen till statortänderna. I de bitvis tunna tänderna överförs värmen vidare till statorns rygg där en sista termisk resistans finns i övergången till statorns fästställningsanordning.

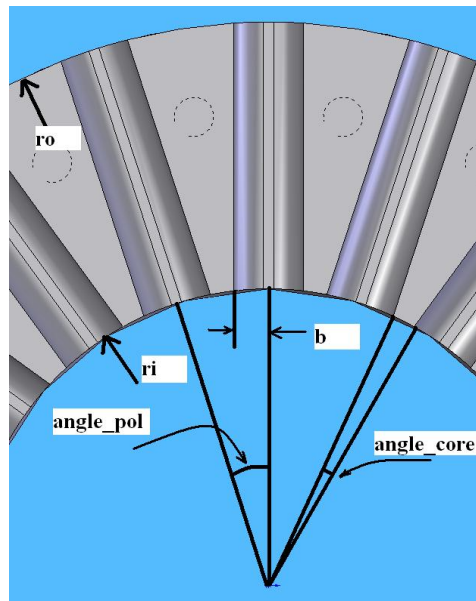
I testfixturen leds värmen relativt lätt ut i aluminiumstrukturen. Eventuellt kan det bli aktuellt med yttre kylning av fixturen, annars får det räcka med kort testtid och förlita sig på trögheten i materialens värmekapacitivitet och massa. Denna termiska modell visas i figur 54.



Figur 54, termisk modell för elmaskin i testfixtur

3.2.5.5 Förlusteffekt

Vid simuleringarna krävdes en statorström på $8\text{A}/\text{mm}^2$ för att uppnå tillräcklig uteffekt. Med hjälp av elmaskinens geometrier beräknas förlusteffekten. Figur 55 visar benämningarna på statorn i ett tvärsnitt.



Figur 55, Benämningar på statorgeometrin

c_{proc} : 25 %
 r_i : 30 mm
 r_o : 57 mm
 p : 20 poler

Beräkningar:

$$angle_{pol} = \frac{2\pi}{p} = \frac{2\pi}{20} = \frac{\pi}{10}$$

$$angle_{core} = angle_{pol} \cdot c_{proc} = \frac{\pi}{10} \cdot \frac{1}{4} = \frac{\pi}{40}$$

$$b \approx r_i \frac{angle_{pol} - angle_{core}}{2} = 30 \cdot 10^{-3} \frac{\frac{\pi}{10} - \frac{\pi}{40}}{2} = \frac{9\pi}{8 \cdot 10^3}$$

$$\begin{aligned}
 Vol_{cu,tot} &= statorantal \cdot Lt \cdot ksf \cdot \pi \left((r_o + b)^2 - (r_i - b)^2 - c_{proc} \left((r_o)^2 - (r_i)^2 \right) \right) = \\
 &= 2 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 0.5 \cdot \pi \cdot \\
 &\cdot \left(\left(57 \cdot 10^{-3} + \frac{9\pi}{8 \cdot 10^3} \right)^2 - \left(30 \cdot 10^{-3} - \frac{9\pi}{8 \cdot 10^3} \right)^2 - \frac{1}{4} \left((57 \cdot 10^{-3})^2 - (30 \cdot 10^{-3})^2 \right) \right) = \\
 &= 151.3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Total kopparvolym på elmaskinen beräknas;

$$A_{cu} = b \cdot lt \cdot ksf = \frac{9\pi}{8 \cdot 10^3} \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{2} = \frac{225\pi}{16 \cdot 10^6} = 44.18 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 = 44.18 \text{ mm}^2$$

Totalström per statortand beräknas med hjälp av strömtätheten per mm^2 multiplicerat med beräknade koppararean A_{cu} .

$$I_{tot} = 44.18 \cdot 8 = 353.4 A$$

Ekvivalent längd beräknas;

$$L_{ekv} = \frac{Vol_{cu,tot}}{A_{cu}} = \frac{151.3 \cdot 10^{-6}}{44.18 \cdot 10^{-6}} = 3.425 \text{ m}$$

Resistiviteten för normal ledningskopp är ρ : $0.0175 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ vid 20°C vilket är lika med $0.0175 \mu\Omega\text{m}^2/\text{m}$

Det tillkommer en temperaturkoefficienten $\alpha_{20} = 0.00393$ per grad.

Maximal temperatur för isoleringen är för vald lindningstråd specificerad till 180°C .

Vid denna temperatur blir resistiviteten;

$$R = \rho \frac{L_{ekv}}{A_{cu}} (1 + \alpha_{20} \cdot \Delta T) = 0.0175 \cdot 10^{-6} \frac{3.425}{44.18 \cdot 10^{-6}} (1 + 0.00393(180 - 20)) = 2.21 \text{ m}\Omega$$

Värmeutvecklingen per statorpar beräknas;

$$P = RI^2 = 2.21 \cdot 10^{-3} \cdot 353.4^2 = 276.0 \text{ W}$$

Då elmaskinen är tänkt att utnyttjas maximalt 50 % av tiden, det vill säga en duty cycle av max 50 %, kan förlusteffekterna betraktas som halva det framräknade värdet, alltså **138 W**.

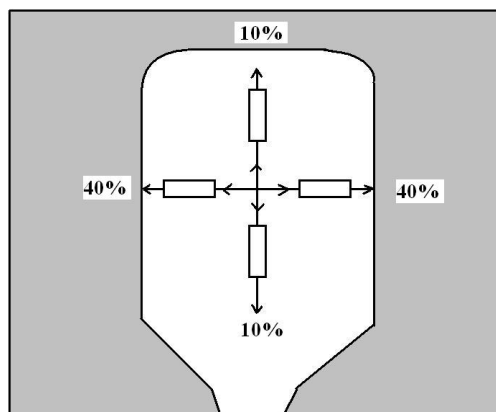
Detta är görligt att påstå då frekvensen är så hög mellan av och påslag, varpå kopparlindningens temperaturfluktuation blir ringa. Frekvensen beräknas genom

$$f = \frac{n_{maskinaxel} [rpm]}{60} = \frac{3000}{60} = 50 \text{ Hz}$$

Således blir till- respektive frånslagstiden endast 10 ms.

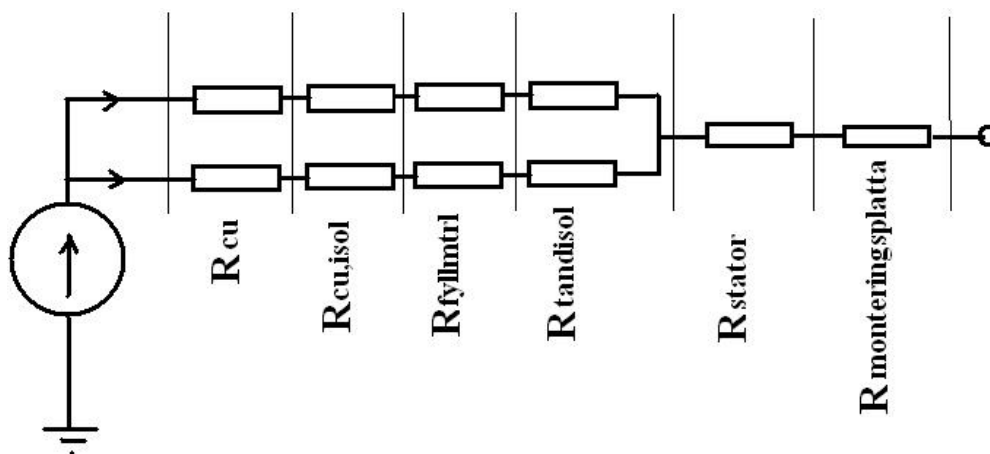
3.2.5.6 Termisk resistans

En modell på hur värmen förs ut från statorlindningarna visas i figur 56. Det som visas är utrymmet mellan statortänderna. Värmen antas bli alstrad i utrymmets mittpunkt och leds därefter ut till statortänderna. Att det är mindre andel värme som går ut i vertikal än horisontell riktning (se figuren) beror på att tvärsnittsarean är mindre och gångvägen längre.



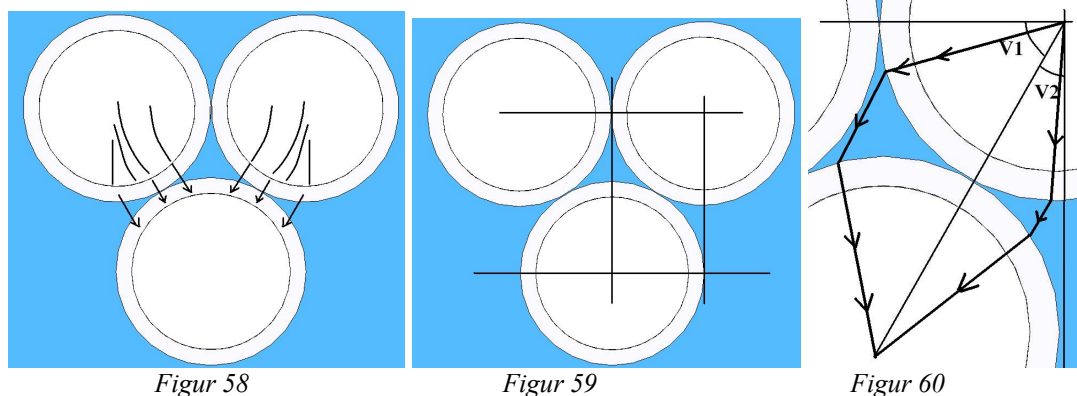
Figur 56, termisk modell

Utvecklar man modellen kan den betraktas som en serie termiska resistanser både parallellt och i serie. Parallella resistansen är de vertikalt respektive horisontellt utritade i figuren. De seriella är kopparlindningen, kopparlindningens isolation, fyllmaterialet mellan lindningarna och statortandsisolationen. Dessa är illustrerade i figur 57, där även termiska resistansen i statorn och monteringsplattan för statorn är inritad.



Figur 57, termiskt resistansnät

Det som gör beräkningarna mest komplexa är att avståndet inte är konstant på fyllmaterialet som omger statorlindningarna. Figur 58 illustrerar hur värmen kan transporteras i lindningarna. Störst energimängd går där det är minst avstånd mellan ledarna ty normalt fyllnadsmaterial har dålig värmeledningsförmåga. I figur 59 är en mindre del av statorlindningarnas tvärsnitt markerat. Denna del är uppförstorad i figur 60, där geometrier även är utritade. Bäst överföring fås som tidigare nämnts då avståndet mellan ledarna är som minst, detta utritat med linje mellan centrum på ledarna. Övriga övergångar sker med längre gångväg fyllnadsmaterial. Detta kommer att vara epoxilim i tänkt elmaskin.



Figur 58

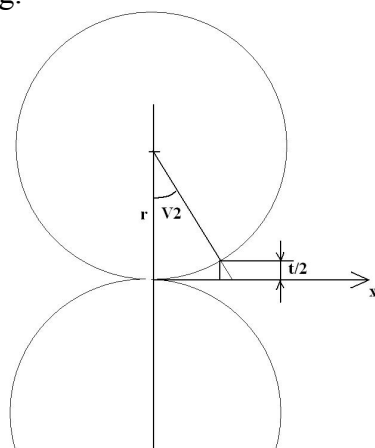
Figur 59

Figur 60

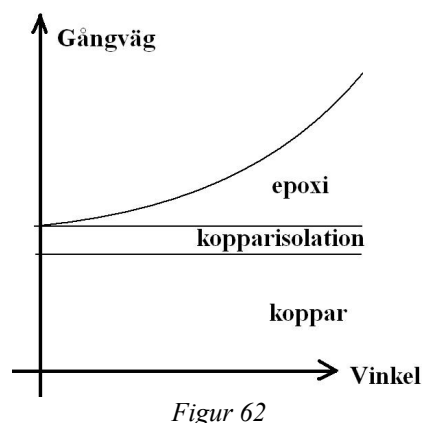
Längden på övergången i epoxylimmet ökar med stigande vinkel på V1 och V2, se figur

61. Sambandet för tjockleken t är; $t = 2r \cos(V) \left(1 - \frac{1}{\cos(V)}\right)$

V1 kan maximalt bli 60 grader och V2 maximalt 30 grader innan annan lindning tar värmeöverföringen. Grafen i figur 62 visar hur allt utom kopparisolationen ändrar sig i gångväg.



Figur 61



Figur 62

Den modell som beskrivits ovan blir för komplicerad att beräkna varpå min handledare Mats Alaküla har gett mig en approximationsformel för framtagande av den totala termiska konduktiviteten. Den lyder;

$$\lambda_{total} = \frac{\lambda_{isol} \cdot \lambda_{cu}}{k_{cu} \cdot \lambda_{isol} + (1 - k_{cu}) \lambda_{cu}} \quad \text{och} \quad R = \frac{L}{\lambda_{total} \cdot A}$$

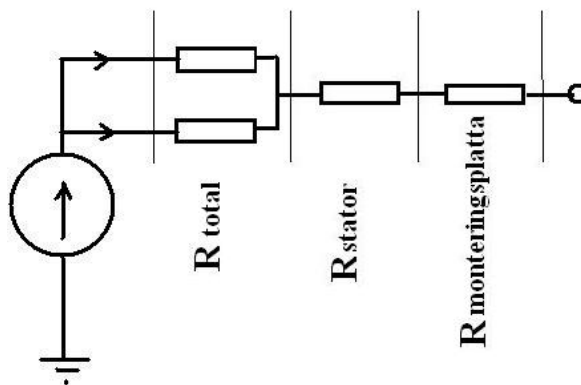
A :	Area
L :	Längd
λ_{cu} :	400 W/mK
λ_{kaptan} :	0.12 W/mK Statortandsisolationen
$\lambda_{polyurethane}$:	0.02 W/mK Isolationen runt koppartråden
λ_{epoxi} :	0.3 W/mK Fyllmaterial, epoxilim Loctite 9492 (Lämpligt högttemperaturlim)
k_{cu} :	50 % Andel ren koppar i förhållande till hela utrymmet mellan statortänderna

Då formeln endast inrymmer termisk konduktivitet för isolermaterial som samlingsbegrepp görs ett medelvärde av isolationskomponenterna.

$$\lambda_{isol} = \sqrt{\left(\frac{\lambda_{kaptan}^2 + \lambda_{polyurethan}^2 + \lambda_{epoxi}^2}{3} \right)} = \sqrt{\frac{(0.12^2 + 0.02^2 + 0.3^2)}{3}} = 0.187 \text{ W/mK.}$$

Insatt i ekvationen fås; $\lambda_{total} = \frac{0.187 \cdot 400}{0.5 \cdot 0.187 + (1 - 0.5)400} = 0.374 \text{ W/mK.}$

Jämfört med tidigare figur 57 blev värmemodellen väsentligt enklare. Se illustration i figur 63.



Figur 63, termiskt resistansnät

För beräkning av termiska resistansen behövs även gångvägen och tvärsnittsarean för både vertikal och horisontell värmeöverföring. Detta enligt tidigare visad modell i figur 76.

L_V :	Vertikal gångväg
L_H :	Horisontell gångväg, beräknad tidigare och då betecknad "b"
A_V :	Vertikal area
A_H :	Horisontell area

Horisontella gångvägen beräknas, (den från mitten på tänderna till tandrygg beräknas);

$$L_H = \frac{9\pi}{8 \cdot 10^3}$$

$$L_V = \frac{Lt}{2} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{2} = 12.5 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} A_H &= \text{statorantal} \cdot Lt \cdot p(2(r_o - r_i) + (r_i \cdot \text{angle}_{core}) + (r_o \cdot \text{angle}_{pol} - 2b)) = \\ &= 2 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \left(2(57 \cdot 10^{-3} - 30 \cdot 10^{-3}) + \left(30 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\pi}{40} \right) + \left(57 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\pi}{10} - 2 \frac{9\pi}{8 \cdot 10^3} \right) \right) = 0.0672 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_V &= \text{statorantal} \cdot (\text{ryggsida} + \text{magnetsida}) \pi (r_o^2 - r_i^2) (1 - cproc) = \\ &= 2 \cdot (1 + 1) \pi \left((57 \cdot 10^{-3})^2 - (30 \cdot 10^{-3})^2 \right) (1 - 0.25) = 0.0221 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Termiska resistansen för vertikala och horisontella riktningen beräknas;

$$R_V = \frac{L_V}{\lambda_{total} \cdot A_V} = \frac{12.5 \cdot 10^{-3}}{0.374 \cdot 0.0221} = 1.51 [\Delta C^\circ / W]$$

$$\begin{aligned} R_H &= \frac{L_H}{\lambda_{total} \cdot A_H} = \frac{\left(\frac{9\pi}{8 \cdot 10^3} \right)}{0.374 \cdot 0.0672} = 0.1406 [\Delta C^\circ / W] \\ &= 2 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \left(2(57 \cdot 10^{-3} - 30 \cdot 10^{-3}) + \left(30 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\pi}{40} \right) + \left(57 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\pi}{10} - 2 \frac{9\pi}{8 \cdot 10^3} \right) \right) = 0.0672 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Termisk resistans för järnet i statorn

I databladet för pulvermetallen anges termiska konduktiviteten till 35 W/(mK). Tvärsnittsarea och längd är svår att beräkna med någon noggrannhet då värmeförlusten från lindningarna sker längs hela statortändernas periferi. Därför uppskattas ett medelvärde av längden.

Sammanlagda tvärsnittet på samtliga statortänder för båda statorerna beräknas.

$$A_{\text{statortänder}} = \text{statorantal} \cdot \pi \cdot \text{cproc}(r_o^2 - r_i^2) = \\ = 2 \cdot \pi \cdot 0.25 \left((57 \cdot 10^{-3})^2 - (30 \cdot 10^{-3})^2 \right) = 0.00369 \text{ m}^2$$

Längden sätts till halva tandlängden plus statorns rygg.

$$L = \frac{L_t}{2} + L_{\text{yoke}} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{2} + 7 \cdot 10^{-3} = 19.5 \text{ mm}$$

$$R_{\text{stator}} = \frac{l}{kA} = \frac{19.5 \cdot 10^{-3}}{35 \cdot 0.00369} = 0.151 [\Delta C^\circ / W]$$

Termisk resistans mellan stator och monteringsplatta

Statorns rygg skruvas mot aluminiumplatta med tjugo stycken M3 skruv. Den termiska resistansen bör inte vara något problem då ytorna är stora och aluminium leder värme bra samt att det inte krävs någon isolation. Önskas en bättre värmeledning kan värmeledande pasta appliceras vid körning i testfixturen. Den termiska resistansen spänner från ca 0.5 W/mK för enklare/billigare pasta upp till ca 4 W/mK för krävande applikationer. Beräkningar görs med en relativt billig silikonbaserad pasta från Elfa (artikelnummer 80-857-98). Dess termiska resistans är 0.77 W/mK. Tjockleken på skiktet beror mycket på ytojämnheten på anläggningsytorna. Rimligen ligger den på under 0.1 mm hos de bearbetade detaljerna.

$$A = \text{Statorantal} \cdot \pi (r_o^2 - r_i^2) = 2 \cdot \pi \left((57 \cdot 10^{-3})^2 - (30 \cdot 10^{-3})^2 \right) = 0.0148 \text{ m}^2$$

$$R_{\text{stator / fixtur}} = \frac{l}{kA} = \frac{0.1 \cdot 10^{-3}}{0.77 \cdot 0.0148} = 0.0088 [\Delta C^\circ / W]$$

Beräkning av temperaturdifferensen

Genom att summera samtliga termiska resistanser kan temperaturdifferensen mellan statorlindningar och testfixtur beräknas.

$$\Delta T = P \cdot \Sigma \left(\left(\frac{R_V \cdot R_H}{R_V + R_H} \right) + R_{\text{stator}} + R_{\text{stator / fixtur}} \right) =$$

$$138 \cdot \left(\left(\frac{1.51 \cdot 0.1406}{1.51 + 0.1406} \right) + 0.151 + 0.0088 \right) = 39.8 \approx 40 \text{ C}^\circ$$

Kommentar: Beräknade temperaturdifferensen på 40 grader Celsius är inom rimlighetens gräns. Med antagen maximal omgivningstemperatur på 80 grader Celsius blir maximala temperaturen i lindningen 120 grader. Som tidigare nämnts är förlustberäkningarna baserade på 50 % duty cycle. Hade kontinuerligt full effekt använts skulle temperaturdifferensen bli den dubbla, dvs. hela 80 grader Celsius. Vid så hög temperatur skulle den elektriska maskinen bli överhettad.

3.2.5.7 Hänsyn till värmeutvecklingen

Antaganden gjordes tidigt i utvecklingsprocessen att värmeproblemet kommer att bli stort för elmaskinen. Detta har styrt utformningen för att få så goda termiska egenskaper som möjligt.

Vid fem-simuleringarna visade det sig att det inte var någon särskilt stor fördel att göra statorns innerradie så liten som slutligen valdes. Liten innerradie innebär bearbetningsmässigt och viktmässigt stora nackdelar men anläggningsarean statortråd-isolation-statortand ökas. Likaså gjordes tänderna 5 mm längre, vilket ökade hela motorlängden med endast 12 % samtidigt anläggningsarean ökade 25 %.

Vid köp av isolationsmaterial inhandlades det som hade bästa möjliga förmåga att överföra värme och klara av höga temperaturer. Lindningstråden valdes för högsta temperaturklassning 180 grader Celsius på isoleringen. Vidare finns epoxilim för temperaturer upp till 180 grader Celsius som rekommenderades av säljare av Loctite lim (beteckning Loctite 9492).

Sammanfattningsvis beträffande värmeöverföringen är att den har ombesörjts så gott det varit möjligt. Elmaskinen antas momentant producera så mycket förlustenergi att den inte kommer att kunna arbeta kontinuerligt någon längre tid. En obekant parameter är omgivningstemperaturen som kan variera kraftigt. Därför läggs en temperatursensor in i statorlindningen så att effekten kan reduceras vid för hög temperatur.

3.2.6 Spänning

Försök gjordes att ta reda på spänningen med hjälp av fem-analys. Emellertid visade det sig fungera illa. Beräknade utspänningarna var orimliga oberoende av statorposition. Då det i prototypelmaskinen inte är så kritiskt vilken utspänning som lämnas valdes lagom grov lindningstråd på ca en millimeter i diameter. Detta för att det inte resulterar i för mycket lindningsarbete och samtidigt som den är tillräckligt tunn för att vara följsam. 1 mm ytterdiameter med isolation betyder ca 0.9 mm innerdiameter ren koppar.

Beräkning av koppartrådslängd:

Med effektivt kopparkärna på diameter på 0.9 mm fås arean per statorledare till

$$A_{cu,ledare} = \frac{0.9^2 \pi}{4} \text{ mm}^2$$

$$L_{cu} = \frac{Vol_{cu,tot}}{A_{cu,ledare}} = \frac{151.3 \cdot 10^{-6}}{\frac{(0.9 \cdot 10^{-3})^2 \pi}{4}} = 237.8 \text{ m}$$

Beräkning av spänning;

$$I = 8 \cdot \frac{0.9^2 \pi}{4} = 5.09 \text{ A}$$

$$R = \rho \frac{L_{cu}}{A_{cu,ledare}} (1 + \alpha_{20} \cdot \Delta T) = 0.0175 \cdot 10^{-6} \frac{237.8}{\frac{(0.9 \cdot 10^{-3})^2 \pi}{4}} (1 + 0.00393(180 - 20)) = 10.65 \Omega$$

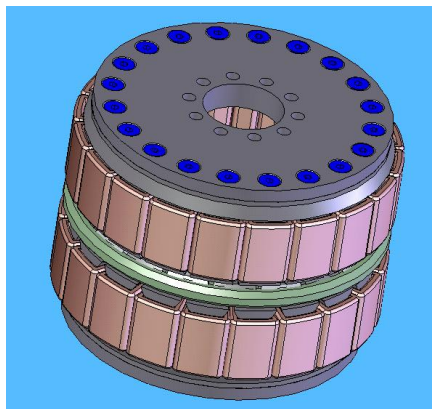
$$U = R \cdot I = 10.65 \cdot 5.09 = 54.2 \text{ V} \Leftrightarrow U_{top} = \sqrt{2} \cdot 54.2 = 76.7 \text{ V}$$

Kommentar: Denna spänning motsvarar förstås inte den obelastade spänningen utan var endast intressant för att se vilken storleksordning spänningen bör bli vid maximalt strömuttag.

3.3 Praktisk framtagning

3.3.1 Elmaskinen

Elmaskinen består av en stator på vardera sidan om rotorn i mitten, se figur 64.



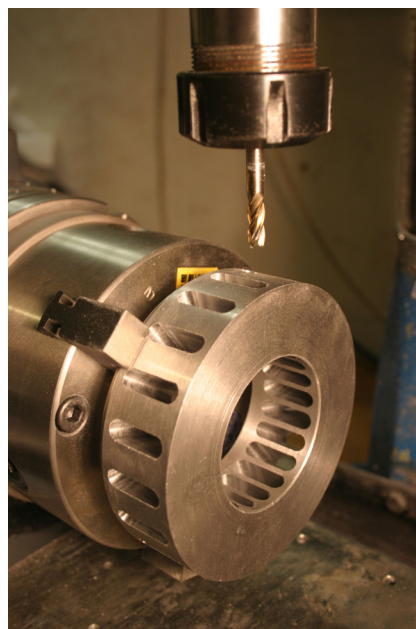
Figur 64, cadbild på komplett elmaskin

3.3.1.1 Stator

Pulvermetallen till de två statorerna inhandlades av Tord Cedells på Magcomp. Metallen bestod av två homogena kutsar som svarvade till rätt dimensioner. Bearbetningen av tänderna gjordes i fräs med rundmatningsbord. Först borrades material bort i ändpunkterna då det visat sig vara den snabbaste avverkningsmetoden. Därefter pinnfrästes tänderna ut, se figur 65 och figur 66.



Figur 65, , fräsning av statortänder



figur 66, , fräsning av statortänder

I statorns rygg sker monteringen. Det är viktigt med god mekanisk och termisk kontakt varpå tjugo stycken M3 hål gängades, se figur 67 och figur 68. Rostfria pinnskruvar ser till att magnetfälten inte påverkas. Pinnskruvarnas limmas i statorn och fastsättning sker med muttrar mot fixtur/applikation. Det innebär att påkänningen i pulvermetallen minimeras då ingen rotationsrörelse förekommer i den skruvändan.

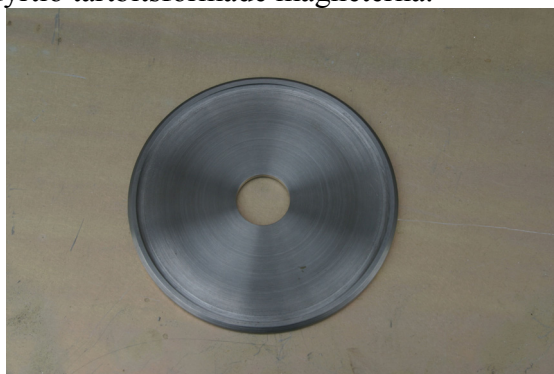


Figur 67 och 68, stator med borrade monteringshål

3.3.1.2 Rotor

För att minimera inverkan av rotorskivans tröghetsmotstånd gjordes den mycket tunn. Som beskrivits innan är flödet axiellt genomgående och statortänderna ligger helt i linje med varandra. Detta innebär större koggingmoment, vilket är en nackdel. Fördelen är att krafterna endast är fördelade i rotationsriktningen. Annars hade det inneburit att stora krafter försökt deformera skivan med risker för vibrationer och därmed materialutmattning mm. Figur 69 visar hur den tillverkade rotorskivan ser ut.

Magneterna från Suramagnets blev tillverkade efter specifikation. Figur 70 visar de fyrtio tårtbitsformade magneterna.



Figur 69, rotorskiva



Figur 70, neodymiummagneter

Axeln till elmaskinen är tillverkad i rostfritt stål, se figur 71. Lagringar med fastsättningsflänsar möjliggör justering av axelpositionen i viss mån.



Figur 71, axel

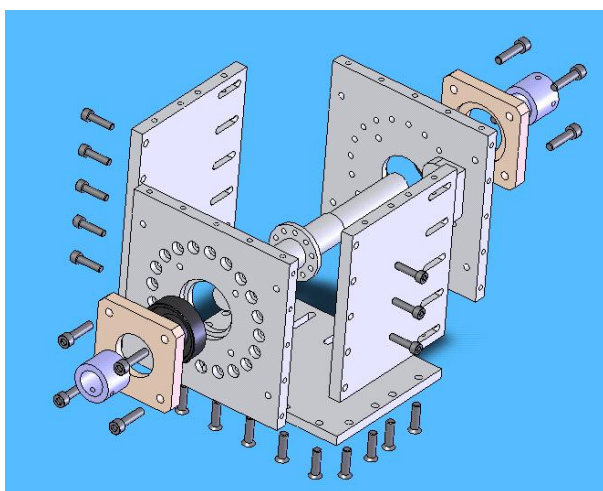
3.3.2 Testfixtur

För att kunna verifiera elmaskinens funktion och prestanda tillverkas en testfixtur. Fixturen är uppbyggd av 10 mm tjock aluminiumplåt med ett stort antal skruvförband. Genom slitsar i ena baffeln och skruvjusteringar kan elmaskinens totallängd justeras. Detta medför att luftgapslängden kan ändras samt även kalibreras för bästa möjliga parallellitet till rotorn. Genom dubbla stoppskruvar i speciallager kan offset på axel varieras. Tillsammans ger detta fullständiga frihetsgrader till önskad positionering.

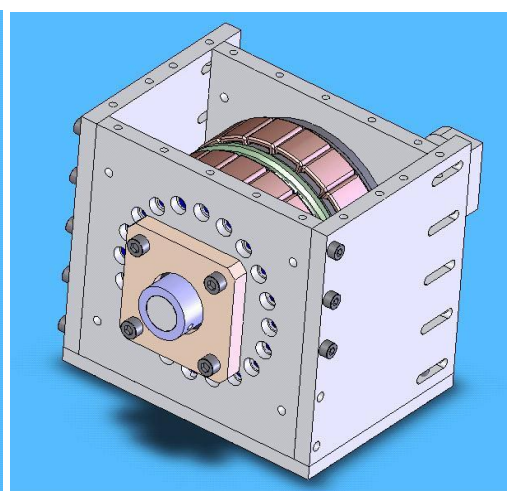
Axeln med rotorflänsen är gjord av rostfritt stål ur ett stycke. Detta minskar risken för skevhet gentemot om axeln och rotorflänsen varit tillverkade av två detaljer som därefter sammanfogas.

Fixturen är utan lock men har förborrade hål, vilket möjliggör att lock enkelt kan eftermonteras för bättre styvhet. Under testerna är god åtkomlighet viktig.

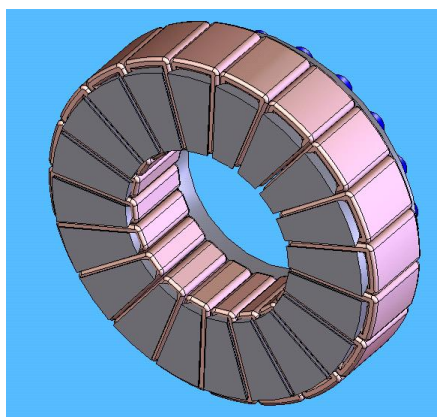
Figur 72 visar testfixturen i sprängd vy utan elmaskinen. Figur 73 visar hopsatt fixtur med elektrisk maskin. Komplet stator visas i figur 74 och motsvarande sprängd vy i figur 75.



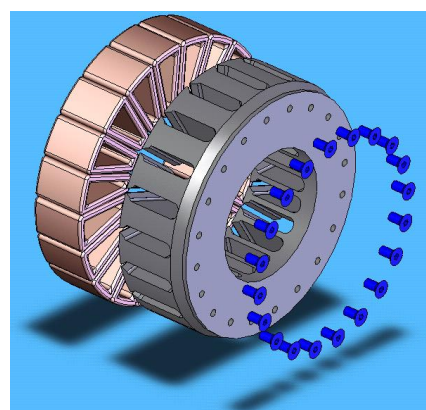
Figur 72, testfixtur utan elmaskin



Figur 73, komplett elmaskin



Figur 74, komplett stator



Figur 75, sprängd stator

3.3.3 Maskiner, bearbetning, kontakter

Då detta examensarbete även innefattade framtagande av en prototyp krävdes maskinbearbetning. Det stod tidigt klart att institutionen inte hade möjlighet att bistå med maskiner för bearbetning av detaljer till prototypen. Därför köptes en kombinationsmaskin från Jula med både svarv och fräs funktion, se figur 76.



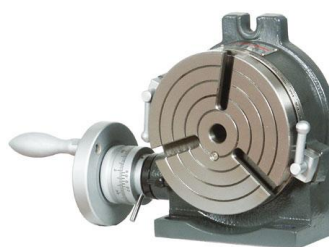
Figur 76, kombinationsmaskin

Tyvärr visade det sig att kombinationsmaskin var ett mycket dåligt köp. Konstruktionen och kvalitén var så usel att några precisionsjobb inte var möjliga att utföra. Köpet kunde hävas efter många turer.

Ersättare till kombinationsmaskinen blev en robust manuellt matad fräs. Se figur 77. För att kunna utföra fräsning av tänder på stator, hålbild för rotor samt andra detaljer inhandlades ett rundmatningsbord, se figur 78. Detta kompletterades med en chuck.



Figur 77, fräs efter service



Figur 78, rundmatningsbord

Lösningsmedel, eld och metallsåg

Testfixturens gavlar tillverkades av 10 mm tjock aluminiumplåt som kasserats från författarens tidigare arbetsplats. Plåten var täckt med svårborttaget isolermaterial. Förbränning visade sig vara en god alternativ metod, se figur 79. Grovkapning utfördes med egentillverkad såg. Ett lågbudgetprojekt som trots brist på alla förutsättningar att fungera blev riktigt bra. Sågen bestod av sticksåg och kakelskärare från Biltema, figur 80. Monteringsfäste frästes till sticksågen, figur 81. Sista bilden, figur 82, visar sågen under drift.



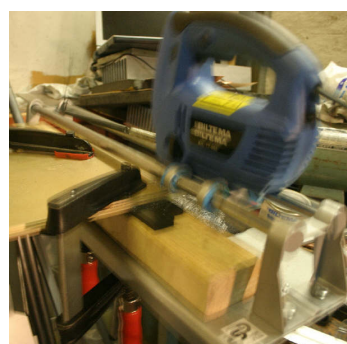
Figur 79, borttagning av isolation



Figur 80, sågkomponenter



Figur 81, anpassningsfäste till sticksåg



Figur 82, såg under drift

4 Resultat och sammanfattning

4.1 Resultat

Att döma av resultatet från simuleringarna är det möjligt att konstruera en elmaskin med prestanda som uppfyller de satta kraven. Visserligen blir storleken något större än önskat, men implementeras den redan på konstruktionsstadiet för tilltänkt applikation bör det inte öka vikt eller kritisk storlek orimligt mycket.

Tillverkningskostnaden för volymtillverkning kan bli ett hinder. Troligen blir pulvermetall alltför dyrbart såvida inte några bra tillverkningsmetoder kan tas fram. Beträffande stator i tunnplåt så är materialkostnaden låg men tillverkningsprocessen innefattar många och dyrbara steg, vilket gör att även denna lösning kan bli svår att motivera till mervärde produkten skapar.

4.2 Vidareutveckling av projektet

4.2.1 Elmaskinen

Till att börja med skall prototypmaskinen testas rejält i sin fixtur. Det som främst skall verifieras är huruvida kravspecifikationen uppnås och fem-simuleringarna överensstämmer. Mycket intressant är det även att mäta upp förluster/verkningsgrad liksom i vilken mån koggingmomentet spelar roll för stabiliteten på rotorn.

De två statorparen i prototypen lindas för enfas. Till framtida prototyper kommer det sannolikt att bli trefas. Nackdelen med trefas är minskning i möjligt uttagbart moment, men den kraftelektroniska styrningen blir enklare. Anledningen är att en av de för tillfället ej aktiva faserna kan användas för att detektera rotorpositionen. Detta medför att det inte behövs någon positionslägesgivare.

12 VDC behöver genereras till applikationen. Hur detta skall ske är ännu oklart. En enkel väg är att tappa en del spänning från några av statortänderna. En sådan lösning är enkel och eventuellt mest lämplig. Dock fördelas inte belastningen jämnt vilket medför ojämn uppvärmning. Ett mer komplicerat alternativ är att förse statorn med extra lindning som fördelas på fler statortänder.

Förutom nämnda 12V behövs även 150 till 200 VAC till applikationen. Om den skall vara bestämmande för systemspänningen är en öppen fråga. Någon extern anpassning ifråga om switchat steg är inte aktuellt. Skall spänningsomvandling ske måste det göras genom konventionell transformator eller möjligtvis genom serieregulator om systemspänningen är för hög.

När nästa prototyp skall tas fram bör stora förändringar göras. Om samma testobjekt används bör utrymmet för elmaskinen göras större på ett funktionabelt och estetiskt tilltalande sätt. Elmaskinen kan då inrymmas så att inte utsticket blir så långt, samt att diametern kan ökas för kortare längd med samma prestanda. Kylning måste förbättras. Enklast löses det med vattenblock, men ett helt passivt kylsystem i form av god vidareledning och eventuellt kylflänsar är en säkrare och billigare volymlösning. Elmaskinen måste bli mycket billigt att tillverka. Därför skall konstruktionen göras för att i högre utsträckning prioritera volymtänkande.

4.3 Berättelse om utvecklingshändelserna under projektet

Tanken på att driva idén vidare som ett examensarbete var att betrakta som ett högriskprojekt där det fanns med många fallgropar. Av den anledningen gjordes en förstudie under sommaren 2005 för att utreda lämpligheten. Grova överslagsberäkningar visade att en ytterrotormaskin, som är relativt enkel att tillverka, klarade att möta kravspecifikationen. Examensarbetet skulle innefatta framtagning av en fungerande prototyp monterad på testobjektet, (applikationen). Tidplanen var att göra elmaskinsimuleringar under första läsperioden under hösten. Detta skulle göras med elmotorkonstruktionsprogrammet PMSM-Design framtaget inom institutionen IEA. Handledaren Mats utlovade modifiering av programmet för att fungera till behöv maskintyp.

Enligt uppställd tidplan skulle elektriska maskinen färdigställas innan årsskiftet. Under första perioden under våren 2006 skulle kraftelektronisk styrning konstrueras och tas fram. Sluttid för examensarbetet beräknades till påsk 2006.

Tyvärr kom inte programmet PMSM-Design att fungera särskilt väl för tilltänkt applikation. Tiden förflöt och jag fick börja läsa in mig på ämnet elmaskinkonstruktion då hoppet till programmet falnade. Det visade sig väsentligt mer komplicerat än befarat och den ansats till optimeringsprogram jag skapade i matlab klarade endast mycket förenklade optimeringar. Dock visade enkla överslag att tilltänkt ytterrotormaskin inte hade förutsättningar att klara uppsatt kravspecifikation. Så även om programmet PMSM-Design hade fungerat skulle nyttan ändå ha varit tveksam. För den därefter valda axialflödesmaskinen blev simulering och tillverkningsproblematiken avsevärt mer komplex.

Strax efter årsskiftet hade simuleringarna inte kommit någon vart trots mycket nedlagd tid och kraft. Examensarbetet hade vuxit till något som varken var planerat eller önskat och det var inte längre möjligt att nå målet. I slutet av januari upplevdes situationen så uppgiven att allvarliga övervägande gjordes att avbryta examensarbetet.

Dan Hagstedts insats gjorde at examensarbetet trots allt fullföljdes. Han var väl förtrogen med kombinationen matlab och fem-programmet FEMM. Med hans hjälp skrevs under nästkommande två månader åttahundra rader matlabkod för styrning av fem-programmet. Det blev åtskilliga timmars simuleringar för att optimera elmaskinen så att den skulle kunna möta kravspecifikationen i uteffekt etc. Under denna tid hade jag införskaffat en begagnad fräsmaskin.

Vid beräkning av virvelströmsförlusterna blev de ödesdigert stora såvida inte extremt tunn plåt i statorn används. Detta innebar att det inte längre skulle vara möjligt att fräsa ut formen på tänderna. Rekommenderad lösning från plåtleverantören Surahammars bruk var att först linda upp plåtremsan som skall bli stator, svetsa ryggen med migsvets under inert gas, avspänningsuppvärma statorn till 800 grader Celsius, vakuumlomma statorn och därefter skära ut tänderna med trådgnistning. Med andra ord väldigt många och krävande steg.

I det läget bestämdes att enda rimliga alternativet var att löpa linan ut, varpå jag budgeterade förtitusen kronor med egna pengar för elmaskinsframtagningen exklusive inköp av verkstadsmaskiner. Dialog fördes med Tomas Lindén på Linova som utför trådgnistning. Han trodde det skulle vara möjligt att genomföra trådgnistning på statorn. Jag fick tag på information om lämpligt lim, som endast verkade gå att införskaffa från

England, kontakt med kem centrum för att låna ugn och vakuumpump. När all nödvändig information samlats in lades beställning på plåt från Surahammars bruk. Det var dock svårt att få besked om leveranstid. Efter att pressat dem på leveranstid blev beskedet till slut "ett obestämt antal veckor fram i tiden" och sjutusen kronor. Orsaken till den obestämbara leveranstiden var att de hade för mycket att göra till stora kunder. Därför skulle min beställning utföras när någon lucka uppstår. Detta var inget acceptabelt besked för ett redan kraftigt försenat projekt. Jag blev tvungen att avbryta spåret tunnplåt och istället titta närmare på pulvermetall, vilket ratats tidigare i projektet. Då främst på grund av misstanke på att det skulle vara svårt att få tillräckligt goda utmattningsegenskaper. Men pulvermetall var den sista livlinan för att få till någon prototyp överhuvudtaget i examensarbetet. Det visade sig i simuleringarna att det var svårare att uppnå tillräckligt god prestanda med pulvermetall, varpå beslutet togs att göra elmaskinen större. Detta resulterar i att den inte får rum i tilltänkt utrymme. Det positiva är att framtagningstiden och kostnaden för prototypen reducerades väsentligt. För verifiering av prestanda konstruerades en testfixtur som akademiska verkstaden utförde svararbetena på. Rundmatningsbord till fräsen inhandlades för att det skulle bli möjligt för mig att fräsa ut tänderna, hålbilder, etc.

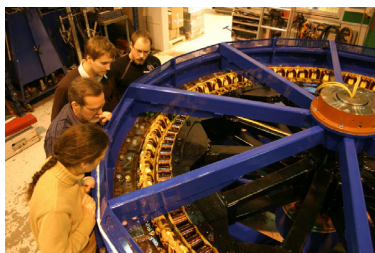
5 Kontakter och referenser

5.1 Kontakter

5.1.1 Bevi

Bevivägen 1, 384 30 Blomstermåla. www.bevi.se
Kontakt: Jan Folkhammar och Mikael Olofsson

Studiebesök gjordes på Bevi där vi i besöksgruppen fick ett mycket gott mottagande. Mitt syfte med besöket var att lära så mycket som möjligt om elmaskintillverkning och få till stånd en god kontakt för inköp av material. Jan Folkhammar visade intresse för mitt projekt och utöver svar på alla frågor lovades möjlighet till materialinköp. Dessa skedde med säljaren Mikael Olofsson. Figur 83 visar den största elmaskin Bevi renoverat. Figur 84 är från manuella monteringen av kopparlindning. Figur 85 visar konferensrummet där främst Jan talade om företaget och dess produkter.



Figur 83, stor elmaskin



Figur 84, montör



Figur 85, konferensrum

Från Bevi inhandlades emaljerad högtemperatur koppartråd till statorlindningarna, högprestandatejp av Kapton till statorisolation, temperatursensor och kopplingsterminal. Varorna hade de på lager men det tog hela sex veckor och mycket tjat för dem att bli levererade. Något kvitto utfärdades aldrig.

5.1.2 Sura magnets AB

Hamragatan 2, 614 31 Söderköping, www.suramagnets.se
Kontakt: Tommy Andersson

Utlovad leveranstid hölls och magneterna hade god måttnoggrannhet, hög ytfinish och lågt pris. Genomgående i alla kontakter så har bemötandet varit professionellt. Min kontakt med Sura Magnets är genomgående positiv. Tommy Andersson gav värdefulla tips om dimensionering och val av magnettyp. Leveransen av magneter överträffade förväntningarna.

5.1.3 Surahammars Bruks AB

Box 201, 735 23 Surahammar, www.sura.se

Kontakt: Magnus Lindenmo

5.1.4 Linova Tomas Lindén AB

Krossverksgatan 17B, 216 16 Limhamn, www.linova.se

Kontakt: Tomas Lindén

När tunnplåt var aktuellt till statorn blev trådgnistning den mest intressanta bearbetningsmetoden. På rekommendation togs kontakt med Tomas Lindén på Linova, som har trådgnistning som specialitet. Han satte sig in i konstruktionen och visade engagemang över att lösa bearbetningen. I och med övergången till pulvermetall blev det aldrig aktuellt att nyttja resursen Linova.

5.1.5 Maskingården verktygsmaskiner AB

Box 21, 233 21 Svedala, www.maskingarden.se

Kontakt: Pontus Sandberg

Av Pontus inhandlades rundmatningsbord och tillhörande chuck. Kvalitén på dessa visade sig god vilket motiverade det höga priset. Problemet med affären var att utlovade ”vi har det på hyllan” resulterade i fyra veckors leveranstid, vilket försenade projektet något.

5.1.6 Magnetic components AB

Åkerivägen 6, 241 38 Eslöv, www.magcomp.se

Kontakt: Tord Cedell

Tord Cedell har varit till stor hjälp i projektet. Förutom försäljning av pulvermetall till statorn har han bidragit många goda råd. Till en låg kostnad levererade han pulvermetallen snabbt och smidigt.

5.1.7 Akademiska Verkstaden

Hs 14 Box 118, 221 00 Lund, www.akademiskaverkstaden.se

Kontakt: Jan-Eric Falck

Rykten gjorde gällande att Akademiska verkstaden var både långsam och dyr. I detta projekt nyttjades de till att ta fram svarvade detaljer, vilket gjordes på kort tid till låg kostnad. Precisionen på utfört arbete visade sig mycket hög. Jan-Eric Falck var smidig och professionell att ha att göra med.

5.2 Referenser

5.2.1 Brushless Permanent Magnet Motor Design

Författare Duane Hanselman
ISBN 1-932133-63-1

5.2.2 Förbränningsmotorer del 1 och del 2

Författare Bengt Johansson
ISBN Nummer saknas

5.2.3 Optimization of a servo motor for an industrial robot application

Författare Svante Andersson
ISBN 91-88934-15-2

5.2.4 Kursmaterial från elmaskinkurs

Från kursen i elmaskiner av Mats Alaküla har vissa formler tagits. Hemsidan med materialet finns på adressen: <http://www.iea.lth.se/emk/>

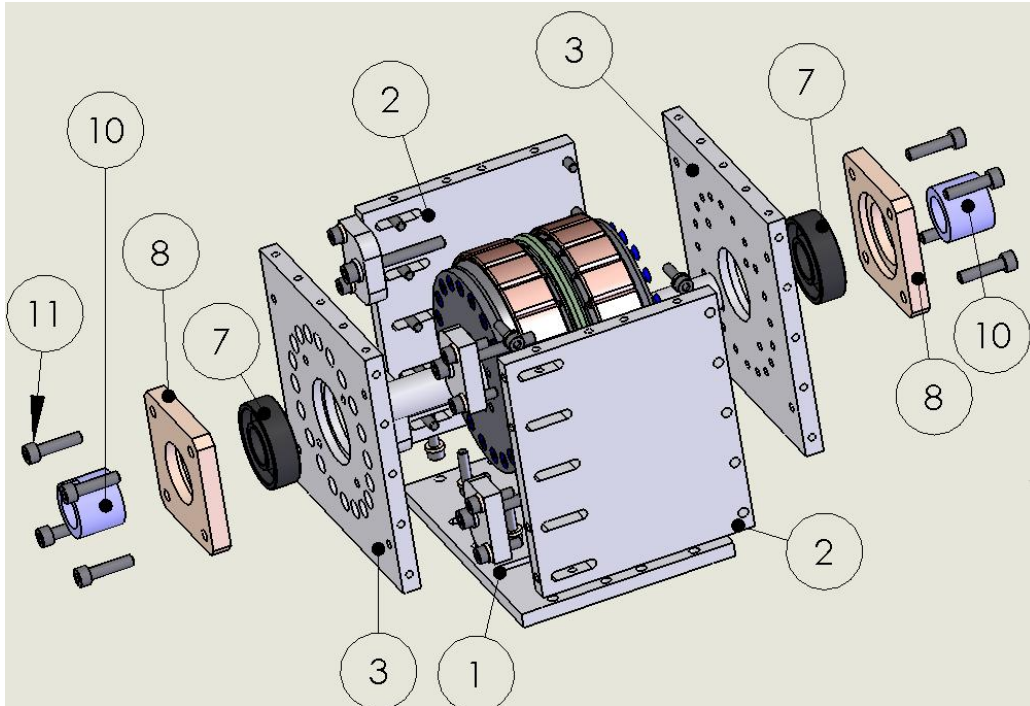
5.2.5 Värmeöverföring

Med hjälp av formler på nätsidan <http://users.aol.com/JackProot/met/spmisc.html> beräknades värmeöverföringen på elmaskinen.

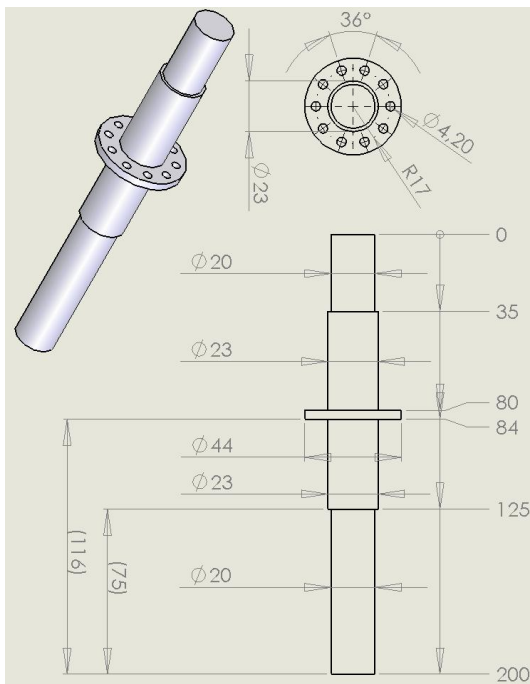
5.2.6 Wikipedia

Hämtade konstanter på resistivitet 060522 från <http://sv.wikipedia.org/wiki/Resistivitet>

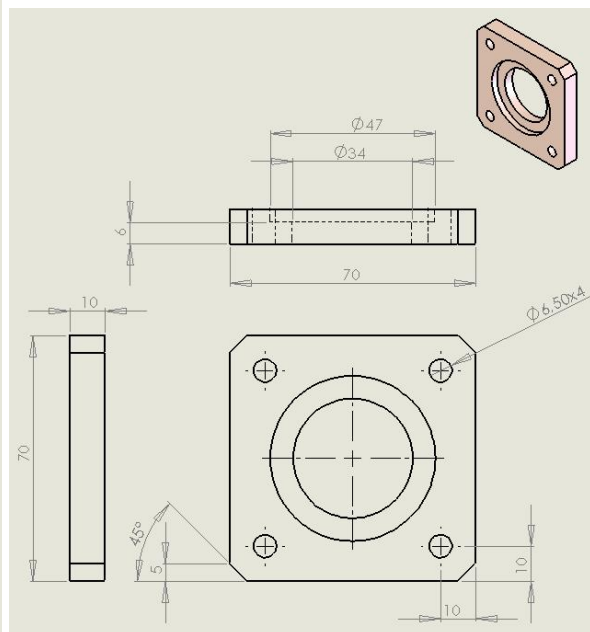
6 Ritningar



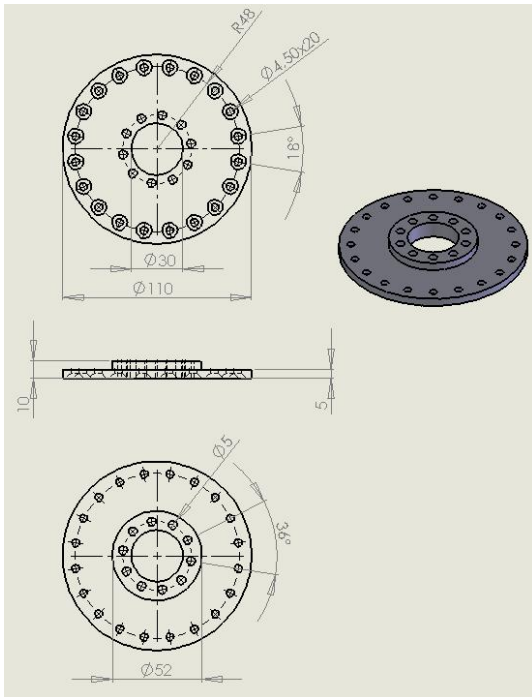
Figur 86, sprängvy testfixtur



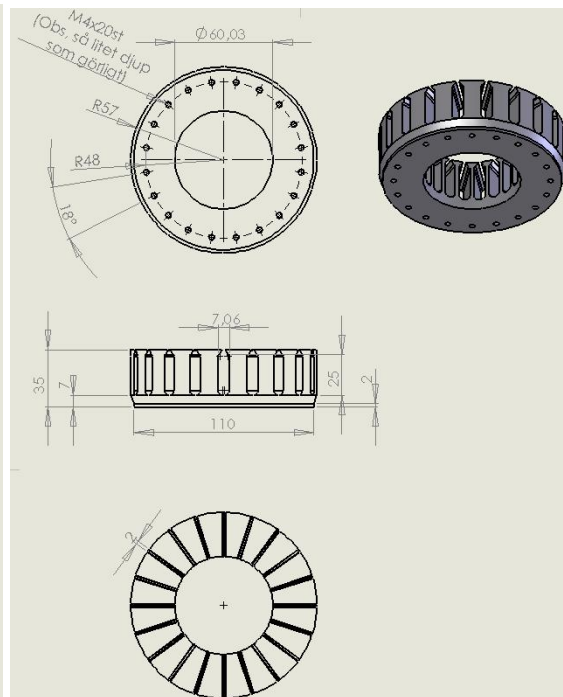
Figur 87, motoraxel i testfixtur



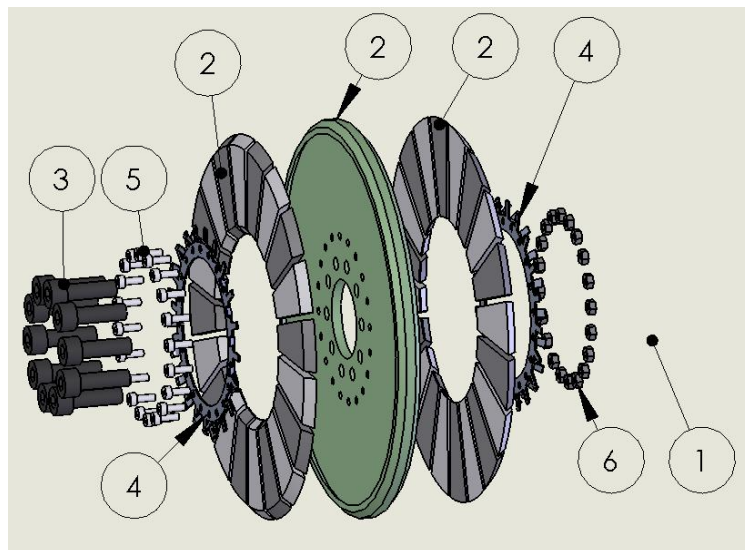
Figur 88, lagerhållare



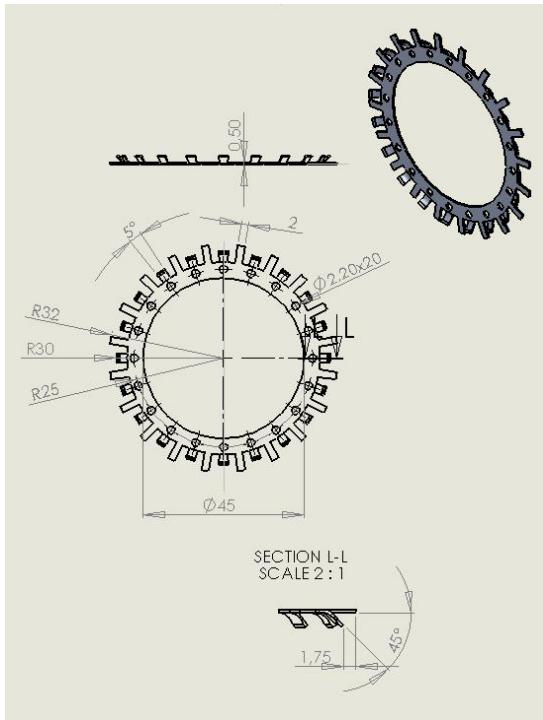
Figur 93, statorplatta



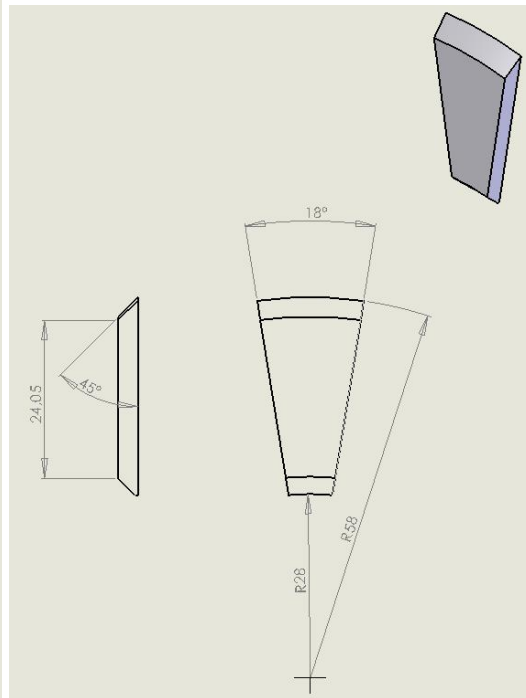
Figur 94, stator i pulver



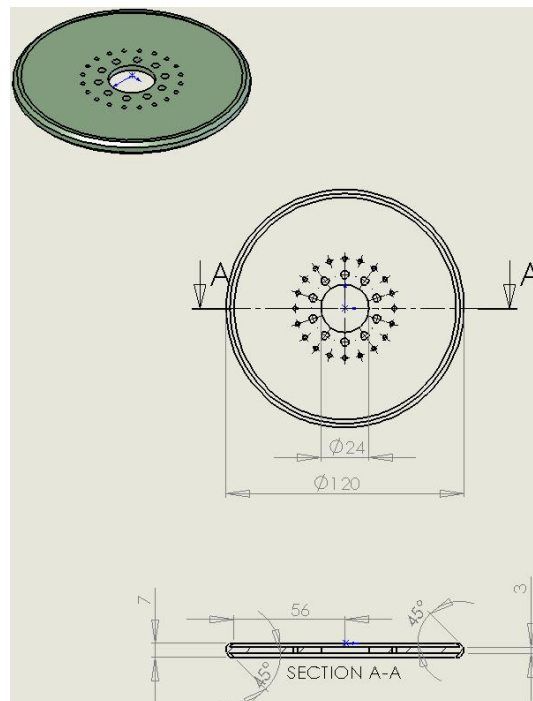
Figur 95, sprängvy rotor



Figur 96, fjäderplatta för magneter



Figur 97, Magnet



Figur 98, rotorskiva

7 Nomenklatur

För att underlätta är de mest använda förkortningarna uppräddade nedan. I fall där det upplevts mest pedagogiskt finns även förklaring till dessa i närhet till där aktuella formler används.

MTBF:	Mean Time between Failures
EMC:	Electro Magnetic Compability
CDI:	Capacitive Discharge Ignition
A:	Area [m^2]
B:	Flödestäthet
C:	Värmekapacitiviteten för materialet multiplicerat med dess vikt [Joule/kg]
Cproc:	Andel järn i statorn. Om statorn vore solid, (utan luft och koppar mellan tänderna), skulle cproc uppgå till 100 %.
C_θ :	Fluxkoncentrationsfaktor
D:	Diameter [m]
DeltaB:	Temperaturkoefficient för aktuellt magnetmaterial
f:	Frekvens
F:	Magnetmotoriska kraften (även kallad MMF)
h:	Plåttjocklek
k:	Konstant
k:	Koefficient för termiskt resistans [W/mK]
k_c :	Materialkonstant
k_h :	Konstant
kfs:	Andel koppar gentemot tillgänglig area mellan statortänderna, (eng: slot filling factor)
H:	Fältstyrka
L:	Längd [m]
L:	tjocklek [m]
Lt:	Statortandlängd
M:	Moment [Nm]
n:	Materialkonstant, normalt mellan 1.5-2.5
NOA:	Antal steg rotorn flyttades
NOS:	Antal radiesegment
P:	Effektutveckling [Watt]
P:	Permeans
p:	Poltal
P_c :	Permeans konstant
P_c :	Virvelströmsförlusterna
Pmax cog:	Maximal koggningeffekt
Pmax diff:	Maximal skillnadseffekt, dvs. maximal uteffekt
Pavg:	Medeluteffekt
P_h :	Hystereseförlust
R:	Remanens

R_g :	Remanens i luftgap
R_l :	Läckflödes reluktansen
Ri:	Statorns innerradie [mm]
Ro:	Statorns ytterradie [mm]
R_s :	Reluktansen i järnbygeln, som i elmaskin är statorn
t:	tid [s]
t:	Tidskonstant
Q:	Värmemängd [Joule]

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$: Permeabiliteten i vakuum

μ_x : **Relativa permeabiliteten**

μ : **Permeabiliteten**

θ : Flöde

θ_r : Flöde från rotor

θ_l : Läckflöde mellan tänderna

ΔT : Temperaturskillnad [grader alternativt Kelvin]