

FEM-modellering og analyse av magnetfeltet i endeområdet til store synkrongeneratorer

Tobias Forseth Stokland

Master i energi og miljø

Innlevert: juni 2016

Hovedveileder: Arne Nysveen, ELKRAFT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elkraftteknikk

NORGES TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET

NTNU



MASTEROPPGAVE

Kandidatens navn: Tobias Forseth Stokland

Fag: **ELKRAFTTEKNIKK**

Oppgavens tittel (norsk): FEM-modellering og analyse av magnetfeltet i endeområdet til store synkrongeneratorer

Oppgavens tittel (engelsk): Modelling and analysis of end-region magnetic field in large synchronous generators

Oppgavens tekst:

De største vannkraftgeneratorene i Norge har direkte vannkjøling av viklingen i statoren. Strømbelastningen i statoren er større i disse maskinene enn i luftkjølte maskiner. I noen maskiner har dette medført høye virvelstrømstap og oppvarming i endeområdet av stator-kjernen. Studenten skal studere dette teoretisk og utarbeide FEM-modeller for analyse av magnetfeltet og beregning av tapene. Det kan også være aktuelt å gjennomføre målinger for å kunne beregne tapene i ståldeler nøyaktig.

Masteroppgaven er en videreføring av prosjektarbeidet høsten 2015 og omhandler numerisk modellering og analyse av vannkraftgeneratorer under ulike stasjonære drift.

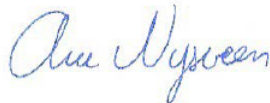
Mer spesifikt omhandler masteroppgaven:

- Videreutvikle FEM-modeller for 2D- og 3D-analyse av magnetfeltet i enderegionen av statorens blikkpakke.
- Uttesting og sammenligning av ulike metoder for beregning av magnetfeltet i stasjonær drift. Rotasjon og lineære magnetiske egenskaper skal inkluderes.
- Analyse av det aksielle magnetfeltet i statorens blikkpakke ved ulike driftsmodi.
- Hvis tid, estimere størrelsen på overflatetap i blikkpakken

Videre detaljer avklares med veiledere i løpet av prosjektet.

Oppgaven gitt:	15. januar 2016
Oppgaven revidert:	19. mai 2016
Besvarelsen leveres innen:	10. juni 2016
Besvarelsen levert:	9. juni 2016
Utført ved (institusjon, bedrift):	Inst. for elkraftteknikk/NTNU
Kandidatens veileder:	Geir Aalvik, Statkraft
Faglærer:	Professor Arne Nysveen

Trondheim, 19. mai 2016



Arne Nysveen
faglærer

Forord

Denne oppgaven er en masteroppgave skrevet ved NTNU under sivilingeniørstudiet Energi og Miljø med fordypningsområde elektrisk energiteknikk. Oppgaven gir 30 studiepoeng og tas i tiende semester. Teksten er skrevet med tanke på en leser som har grunnleggende kunnskaper innenfor elkraftfaget, og derfor antas noen begreper kjent for leseren.

Jeg vil gjerne rette en stor takk til veileder og professor Arne Nysveen for sin faglige tyngde innenfor fagfeltet og for alltid å være tilgjengelig og engasjert. Jeg vil også takke postdoc Mostafa Valavi for sin hjelp og støtte gjennom prosjektet, spesielt med tanke på alle utfordringene i forbindelse med simuleringene i Ansys Maxwell. I tillegg vil jeg takke min kjæreste og norsklærer Marthe for at hun tok seg tiden med å lese korrektur på oppgaven min.

Trondheim, 9. juni 2016.

Tobias Forseth Stokland

Sammendrag

Denne oppgaven er en videreføring av prosjektoppgaven skrevet av undertegnede høsten 2015. Under prosjektoppgaven ble det implementert en modell av en generator i analyseprogrammet Ansys Maxwell. Dette er et feltberegningsprogram som gjør feltberegninger ved hjelp av *finite element metoden* (FEM). Modellen ble utviklet med utgangspunkt i en av Statkraft sine generatorer. Det ble implementert både en 2D- og en 3D-modell av generatoren. Videre i prosjektoppgaven ble modellen verifisert for tomgangskjøring. Både den induerte spenningen, magnetfeltet i generatoren og tapssimuleringer ble gjennomført og sammenlignet med reelle verdier fra Statkraft.

Resultatet fra prosjektoppgaven var altså en modell av en generator som var verifisert i tomgang. I denne oppgaven ble modellen testet for ulike driftssituasjoner. Dette medførte at fasestrømmen i statorviklingene måtte implementeres. To forskjellige metoder ble utprøvd før det ble bestemt å tilknytte generatormodellen til en ekstern krets.

Underveis i arbeidet med oppgaven ble det aksielle feltet som penetrerer overflaten av stator analysert for forskjellige driftssituasjoner. Driftssituasjonene som ble valgt ut var: tomgang, undermagnetisert og overmagnetisert drift av generatoren. Gjennom simuleringresultatene ble det konkludert med at det høyeste aksielle feltet oppstår når generatoren opererer i undermagnetisert tilstand. I simuleringene ble det plassert et målepunkt 30 mm fra luftgapet på statoroverflaten, her ble RMS-verdien til feltet målt for en periode. Her ble det målt et aksielt felt på 180-190 mT for undermagnetisert, 90-100 mT for overmagnetisert, mens feltet for tomgangskjøring var i området 80-90 mT.

Disse analysene viste at det aksielle feltet, altså lekkfluksen, er størst når generatoren opererer undermagnetisert. Grunnen til dette er at magnetfeltene fra rotor og stator ved overmagnetisert kjøring av generatoren til en viss grad nøytraliserer hverandre. Denne nøytraliseringen er mye lavere ved undermagnetisert kjøring av generatoren.

Videre ble det gjort 2D-simuleringer for et lite utsnitt av enderegionen til generatoren. Her ble det konkludert med at lamineringen i stator fører til at lekkfluksen kun går i de øverste statorlagene, noe som gjør at dette området er særlig utsatt for virvelstrømstap. Virvelstrømmene som oppstår i enderegionen kan føre til termsike skader på generatoren.

Abstract

This master thesis is a continuation of the project written the fall of 2015. During the fall of 2015, a model of a generator was implemented in a simulation software called Ansys Maxwell. Maxwell is a Finite Element Analysis (FEM) tool for electromagnetic field simulation. The implementation was based on a real Statkraft-generator. Both a 2D- and 3D-model was implemented in Maxwell. During the project in the fall of 2015 both the 2D and the 3D-model was verified at no load. The model was verified by comparing the induced voltage, the magnetic field in the machine and the core loss with given values form Statkraft.

In the master thesis, the model was tested for different operation conditions. This means that the phase currents in the stator windings needed to be implemented. Two different methods were tested before it was decided to connect the generator to an external grid.

During the master thesis, the axial field that penetrates the surface of the stator was analyzed at different loading conditions. These conditions was: no load, underexcited and overexcited operation of the generator. Based on the results of the simulations it was concluded that the highest axial field occurs when the generator operate in underexcited mode. In the simulations, a measuring point was placed 30 mm from the air gap at the surface of the stator. At this point the RMS-value for the axial field was calculated for one period. When the generator was in underexcited mode the field was in the range of 180-190 mT, for overexcited mode the field was 90-100 mT and at no load the field was 80-90 mT.

The results obtained during the thesis shows that the axial field is highest when the generator is running at underexcited condition. The reason for this is that when the generator is working at overexcitation the field from the rotor and the stator is in almost opposite direction of each other, resulting in a smaller total field. When the generator is working at an underexcited mode, the angel between the rotor- and the stator field is much smaller.

A 2D-model of the stator end region was also implemented in Maxwell. The purpose of this simulation was to further study the flux and eddy currents in the end region. Based on these simulations it is clear that the flux only operates in the top layers of the stator. This is because of the laminations layer in the stator. This means that it is only in the top layers that is vulnerable for big eddy current losses, which can lead to thermal damage in the stator.

Innhold

1	Introduksjon	1
2	Teori	3
2.1	Oppbygging av synkrongeneratoren	3
2.2	Utpregede poler	6
2.3	Beregning av vinkel	8
2.4	Indusert spenning og feltstrøm	9
2.5	Virvelstrømstap	10
3	Maskinen	11
4	Oppbygging av Modellen	13
4.1	2D-modellen	13
4.2	3D-modellen	17
5	Forklaring av problemet	23
6	Materialer	25
7	Mesh	27
8	Forskjellige metoder	31
8.1	Terminalmetoden	31
8.2	Ekstern krets	34
8.3	Verifisering av terminalmetoden	36
8.4	Verifisering av ekstern krets	37
8.5	Valg av metode	40
9	Simuleringsoppsett	41
9.1	Modellen av generatoren	41
9.2	Tomgang	42
9.3	Overmagnetisert	43
9.4	Undermagnetisert	44
9.5	Forskjellige målepunkter	47
9.6	Fluks og virvelstrømmer i enderegionen	48

10 Resultater	51
10.1 2D-simuleringer	51
10.2 Tomgang	52
10.3 Overmagnetisert	56
10.4 Undermagnetisert	57
10.5 Fluks og virvelstrømmer i enderegionen	59
11 Diskusjon	61
11.1 Aksielt felt som funksjon av driftssituasjon	61
11.2 Punktmålingene	62
11.3 Linjeglott	63
11.4 Feilkilder	64
11.5 Fluks og virvelstrømmer i enderegionen	66
12 Konklusjon	69
13 Videre arbeid	71
14 Appendiks	73
14.1 Datablad for spesifisering av stål	73
14.2 B-H-kurven for ståltypen brukt i rotor <i>steel_1010</i>	74
14.3 Verifisering av simuleringsoppsettet for overmagnetisert kjøring	75
14.4 Verifisering av simuleringsoppsettet for undermagnetisert kjøring	76
14.5 Utregning av passiv last ved nominell kjøring av generatoren	77
14.6 Reduksjon av feltviklingsstrøm	78
14.7 Utregning av polhjulsvinkel for nominell last	79

1 Introduksjon

Sammen med utviklingen av elektriske maskiner og turbiner har effekten til synkrongeneratoren økt kraftig. Sammen med effekten har også fluksen i maskinen og strømmene i stator økt. Dette fører til en økning av magnetfelt i maskinen, som igjen har ført til at stator er mer utsatt for kjernetap. Stator er delt opp i tynne lamineringslag i lengderetningen, dette gjør at de totale kjernetapene reduseres kraftig. Samtidig vil endepartiet til stator være utsatt for både lekkfluks fra rotor samt fluks fra endeviklingene. Dette fører til at statoroverflaten og pressanordningen er svært utsatt for virvelstrømstap. Virvelstrømstapene fører til oppvarming av endepartiet. I ekstreme tilfeller kan kraftig varmeutvikling føre til deformering av deler av endepartiet. Statkraft opplevde dette for en av sine største generatorer i Norge, Svartisen. I forbindelse med en kraftig vinterstorm i 2006, førte flere kortslutninger i det lokale nettet ved generatoren til så kraftig varmeutvikling i endepartiet, at generatoren havarerte. Dette havariet ble etterfulgt av en reparasjonstid på flere måneder [7]. Dette er svært kostbart, og det er derfor viktig å undersøke i hvilke driftssituasjoner faren for oppvarming av endepartiet er størst.

Denne oppgaven er en videreføring av prosjektoppgaven som ble skrevet av undertegnede høsten 2015. I prosjektoppgaven ble en modell av en generator implementert i softwareprogrammet Ansys Maxwell. Dette er et feltberegningsprogram som gjør feltberegninger ved hjelp av *finite element metoden* (FEM). Modellen ble implementert på bakgrunn av datablad og tekniske tegninger av en konkret Statkraft-generator. Det ble utviklet både en 2D- og 3D-modell av generatoren. Videre i prosjektoppgaven ble generatoren verifisert for tomgangskjøring. Verifiseringen ble gjort gjennom måling av magnetfelt, induert spenning og en tapsanalyse.

Resultatet fra prosjektoppgaven var altså en modell av en generator som var realistisk i tomgangskjøring, både for 2D og 3D. Planen for denne oppgaven er å utvikle modellen videre. Først må en pressanordning for stator designes, siden denne befinner seg i det aktuelle området. Deretter må statorviklingene deles opp i ulike faser og en metode må finnes for å kjøre modellen for normal drift. Videre må det finnes to til tre forskjellige driftssituasjoner som kan modelleres og sammenlignes for å finne ut ved hvilken driftssituasjon magnetfeltet i enderegionen er størst.

2 Teori

2.1 Oppbygging av synkrongeneratoren

Norsk produksjon av elektrisk energi består hovedsakelig av vannkraft [6]. Hovedkomponentene i et vannkraftverk er turbin og generator, fra turbinen går det en aksling inn til rotoren i generatoren. Selv om det finnes flere typer generatorer, er trefase synkronmaskin enerådende når det kommer til elektrisk produksjon av kraft til nettet[2]. Det er en trefase synkronmaskin denne oppgaven skal omhandle.

Statoren består i hovedsak av stål og har form som en rett, hul sylinder. På innsiden av stator er det jevnt fordelt med spor som er skåret ut av stator. Inne i disse sporene ligger blant annet viklingene som blir induisert av magnetfeltet fra rotoren. I store maskiner er det ofte staver i stedet for viklinger. Disse stavene inneholder mange ledere som alle er separert fra hverandre med isolasjon. Grunnen til at man deler opp lederen i flere mindre staver er for å unngå strømfortregning. I mange store maskiner består sporene også av to separate staver kalt over- og understav. Stavene i samme spor kan være samme fase eller de kan være forskjellige faser. For å unngå overslag mellom stavene er det et lag med isolasjon mellom dem. Siden stavene utsettes for vekslende mekaniske og magnetiske påkjenninger er stavene holdt på plass av kiler og pressbolter.

Det totale antall viklinger (Q_s) i stator er alltid et heltall og alltid delelig på tre, slik at hver fase har like mange viklinger. Det er vanlig at stator deles opp i flere soner kalt polsoner, τ_p .

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{P}, \quad (1)$$

der D er den indre diameteren til stator og P er det totale antall poler. τ_p tilsvarer den delen av stator som tilhører en pol. Hvis rotoren til en maskin har seks poler, kan man dele stator opp i seks forskjellige polsoner. En annen viktig parameter for oppbygningen av generatoren er antall viklinger per pol og fase.

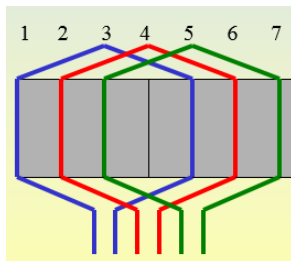
$$q_s = \frac{Q_s}{P \cdot m}, \quad (2)$$

der m er antall faser, som nesten alltid er tre i generatorer. Det enkleste er hvis q_s er et heltall, da vil det for eksempel være tre viklinger per fase, per pol. Men det er også vanlig at q_s ikke er et heltall, da kalles viklingsoppsettet for *brudden vikling*. En maskin kan for eksempel ha 114 viklinger og 14 poler. Dette vil gi

$$q_s = \frac{114}{14 \cdot 3} = 19/7. \quad (3)$$

I dette tilfellet vil en vikling tilhøre to forskjellige poler. Men hvis man summerer opp alle viklingene for sju poler, her halve maskinen, vil man se at antall viklinger per pol og fase blir et heltall. Det er fordeler og ulemper med begge løsningene, men det vil det ikke bli gått inn på i denne oppgaven.

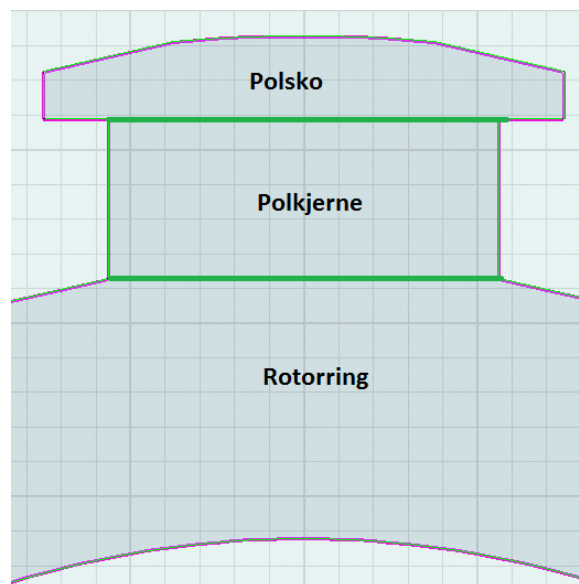
I generatorer er det mest vanlig å legge viklingene i sløyfer rundt stator. En vikling kan for eksempel gå inn i spor nummer 1, snu på kortsiden av generatoren, komme ut igjen gjennom spor 5. Slik som den blå viklingen i figur 1. På kortsiden av generatoren går viklingen ut av statorsporet, ut i fri luft før den snur og går tilbake i et annet spor, dette kalles endevikling. Her bøyes viklingen før den igjen går inn i sporet. På store maskiner som har staver i stedet for viklinger, vil endeviklingene eller endestavene stikke et godt stykke ut av stator og ut i luften. Når alle viklingene er montert i stator, seriekobles alle viklingene fra samme fase sammen og fasespenningen fra maskinen får et samlet uttak [4]. I store maskiner kan det også være parallellkobling mellom de forskjellige viklingene for samme fase.



Figuren er tatt fra Robert Nilssens powerpoint i faget ELK-22.

Figur 1: Generell viklingsoppsett i generator.

Lengden på en vikling, altså hvor mange spor det skal være mellom inngang og utgang på en viklingsløyfe, kalles skrittlengde. Det mest logiske vil være at viklingen starter i spor nummer 1 og kommer tilbake etter en polsone τ_p . På denne måten vil den induerte spenningen i de to sporene ikke ha noe faseforskyvning og vektorene kan legges sammen ved å summere amplitudene på spenningsvektorene. Dette vil gi den maksimale spenningen for en vikling. Men dette er ikke vanlig å gjøre i store generatorer. Vanligvis har maskinene en skrittforkortning, typisk på et eller to spor. Skrittforkortning sier hvor mange spor kortere viklingen er, sammenlignet med en vikling som går over en polsone. Det er flere grunner til at dette gjøres. For det første vil dette redusere lengden på viklingen. Redusert viklingslengde, reduserer forbruket av kobber, noe som gjør maskinen billigere. For det andre vil skrittforkortning gi redusert induering av overharmoniske spenninger. Ulempen med å bruke skrittforkortning er at spenningsvektorene som skal legges sammen ikke er helt i fase, dette vil føre til at den totale induerte spenningen i viklingen blir litt lavere. Men dette spenningsstapet er relativt lite og de nevnte fordelene er såpass store at man i de fleste maskiner velger å bruke skrittforkortning [4].



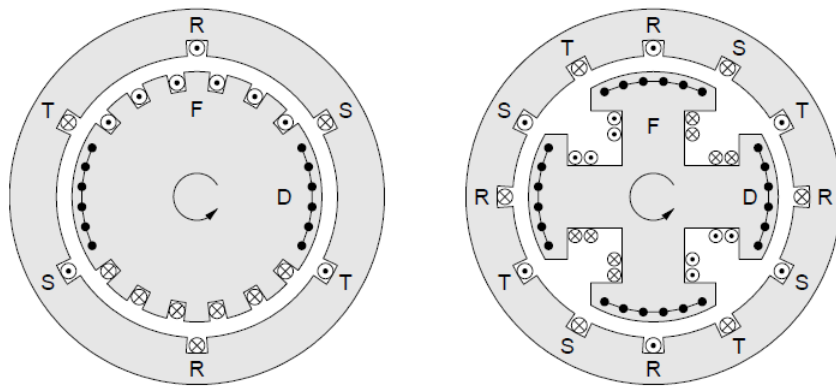
Figur 2: Forskjellige områder i rotor.

I denne oppgaven er en pol delt inn i to områder. Nemlig polkjerne og polsko. Polskoen er den ytterste delen av polen, den er som regel avrundet i forhold til stator, slik at luftgapet er mer eller mindre konstant. Mellom polskoen og rotorringen ligger den delen som blir kalt polkjernen. Dette kan sees i figur 2. Feltviklingene som ligger på rotor sørger for at det blir induert spenninger i statorviklingene. Feltviklingene ligger rundt og langsmed polkjernen.

Disse viklingene blir spenningsatt ved hjelp av sleperinger og i disse går det kun en likestrøm. For synkrongenerator er det også vanlig med dempestaver i rotor. Kort sagt er funksjonen til dempestavene å dempe eventuelle mekaniske svingninger som kan oppstå ved transiente hendelser, som for eksempel kortslutninger i nettet. [3].

2.2 Utpregede poler

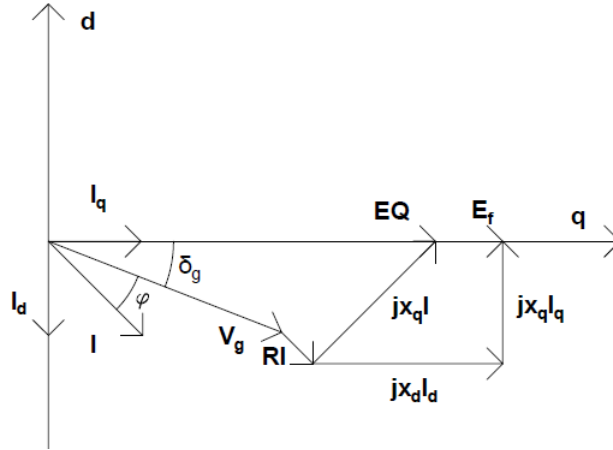
Synkronmaskiner deles vanligvis inn i to hovedgrupper, rund rotor og rotor med utpregede poler. En generator med rund rotor er som navnet tilsier rund og viklingene ligger anlagt i spor. På grunn av geometrien til runde rotor, er de lettere å stabilisere og tåler høye sentrifugalkrefter. Dette er årsaken til at de blir brukt i systemer med høy rotasjonshastighet slik som gass- og dampturbiner[3]. For systemer med lavere rotasjonshastighet, må rotor bestå av flere poler, slik at frekvensen ut på nettet skal bli korrekt. For dette formålet brukes rotor med utpregede poler. Siden de fleste turbinene i norske vannkraftverk har relativ lav rotasjonshastighet, er det mest vanlig med utpregede poler i Norge.



Figur 3: Rund rotor til venstre og rotor med utpregede poler til høyre.

Figur 3 viser forskjellen på rund rotor og rotor med utpregede poler. Begge rotorene har fire poler, noe som gjør at rotasjonshastigheten er den samme. Utrekninger for maskiner med utpregede poler er mer komplisert enn for maskiner med rund rotor. Forklaringen ligger i at luftgapet mellom rotor og stator ikke er konstant, det vil si at reluktansen varierer. Reluktansen er motstanden i den magnetiske kretsen der magnetfeltet går. Siden reluktansen varierer, deles rotor inn i to akser, d- og q-akse. Ved disse aksene er luftgapet og dermed reluktansen konstant. d-aksen går rett ut av sentrum til polen, mens q-aksen ligger 90 elektriske grader bak. Det vil si at q-aksen ligger midt mellom to nabopoler. Oppretting av to akser fører også til at synkronreaktansen deles opp i to komponenter, x_d og x_q . For å regne ut den totale

induserte spenningen må det tas hensyn til begge aksene, og både q- og d-komponenten til strømmen må regnes ut. Figuren under viser en generell fremstilling av et fasediagram som er delt inn i d- og q-akse.



Figur 4: Fasediagram for synkromaskin med utpregede poler.

På bakgrunn av fasediagrammet kan den interne spenningen for en generator med utpregede poler regnes ut. Første skritt i utregningen av den totale induserte spenningen, \underline{E}_f , starter ved å finne δ_g , dette for å plassere q-aksen i forhold til terminalspenningen \underline{V}_g , som er referanse. Vinkelen δ_g finnes ved å regne ut \underline{E}_Q , som ligger langsmed q-aksen.

$$\underline{E}_Q = \underline{V}_g + (R + jX_q) \cdot \underline{I},$$

der I er den totale strømmen og R er resistansen til statorviklingene. Vinkel δ_g er vinkelen til \underline{E}_Q , når den er kjent kan lengden til I_d og I_q finnes ved hjelp av trigonometriske beregninger. Der $\beta = \delta_g + \varphi$.

$$I_d = I \cdot \sin(\beta).$$

$$I_q = I \cdot \cos(\beta).$$

Deretter må I_d og I_q gjøres om til viserform for videre beregninger.

$$\underline{I}_d = I_d \angle \delta_g - 90^\circ.$$

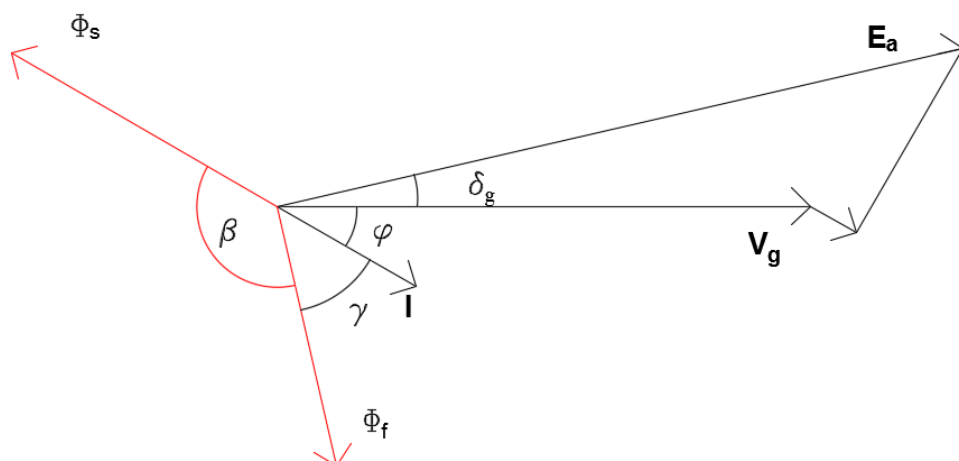
$$\underline{I}_q = I_q \angle \delta_g.$$

Når \underline{I}_q og \underline{I}_d er regnet ut på viserform, kan \underline{E}_f finnes ved vanlig vektorregning.

$$\underline{E}_f = \underline{V}_g + jx_d \cdot \underline{I}_d + jx_q \cdot \underline{I}_q + R \cdot \underline{I}.$$

2.3 Beregning av vinkel

Det er to hovedkilder til det totale magnetfeltet i generatoren. Det er feltet fra feltviklingene i rotor, mens det andre er fra statorviklingene. Både feltet fra rotor og stator samles til to separate resulterende felt. Når det skal gjøres undersøkelser for det totale feltet er det viktig å undersøke hvordan de to magnetfeltene påvirker hverandre. Figur 5 viser et generelt fasediagram for en generator med de tilhørende magnetfeltene.



Figur 5: Generelt fasediagram med vektorer til magnetfeltene for synkronmaskin.

Fasediagrammet i figur 5 er et generelt fasediagram med magnetfeltvektorer for rund rotor. Her ble det brukt rund rotor for å gjøre det lettere å se hvordan magnetfeltene opptrer. De røde vektorene er for magnetfeltet, mens de svarte vektorene er for strøm og spenning. Lengden til magnetfeltvektorene er ikke skalert, men det er kun vinklene som er interessante her. I følge Faradays lov er den induerte spenningen lik den negative deriverte av rotorfeltet, dette gjør at rotorfeltet, Φ_f , ligger 90 grader bak E_a . Mens feltet fra statorviklingene, Φ_s , ligger 180 grader bak fasestrømmen I . β er vinkelen mellom de to magnetfeltene, denne kan finnes gjennom geometriske utregninger. Siden det er 180 grader mellom Φ_s og I , vil

$$\beta = 180 - \gamma.$$

Det vil si at β kan finnes gjennom γ . Det er det 90 grader mellom E_a og Φ_f , siden alle vinklene mellom I og E_a er kjent kan γ finnes.

$$\gamma = 90 - \varphi - \delta_g.$$

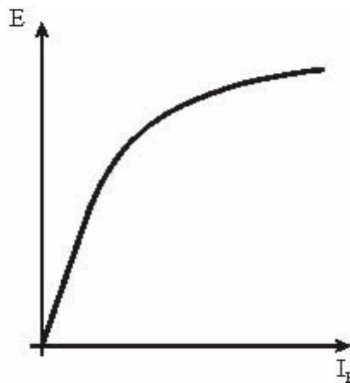
Nå som γ er funnet, kan det finnes et uttrykk for β .

$$\beta = 180 - \gamma = 180 - (90 - \varphi - \delta_g) = 90 + \varphi + \delta_g.$$

Dette uttrykket gjør at det er mulig å finne faseforskyvningen mellom de to magnetfeltene kun ved å regne ut effektfaktor og polhjulsvinkel.

2.4 Indusert spenning og feltstrøm

Den interne genererte spenningen for en synkrongenerator gis ofte med den enkle formelen: $E_a = K \cdot \phi \cdot \omega$ [1]. Der K er en konstant som regnes ut på bakgrunn av den geometriske formen til maskinen, ϕ er fluksen i generatoren, mens ω er vinkelfrekvensen til maskinen. For en generator i drift vil geometrifaktoren K være konstant under drift. Vinkelfrekvensen vil også være konstant, da frekvensen på nettet er konstant. Det vil si at den interne induerte spenningen kun blir regulert ved hjelp av fluksen i maskinen. Fluksen i generatoren blir generert av feltstrømmen, I_f , som sirkulerer i feltviklingene i rotor. Fram til materialene i generatoren går i metning vil fluksen i maskinen være proporsjonal med strømmen i viklingene. Siden konstantene K og ω er konstant under drift, vil da E_a være proporsjonal med feltstrømmen frem til metning. Når materialene i generatoren går i metning vil ikke spenningen øke, selv om feltstrømmen øker.



Figur 6: Magnetiseringskurve for synkrongenerator.

Figur 6 viser sammenhengen mellom feltstrøm og induert spenning. Før metning oppnås vil den induerte spenningen være proporsjonal med feltstrømmen. En generator som opererer i overmagnetisert tilstand vil være i metningsområdet. Mens en generator i undermagnetisert drift vil ligge nærmere det lineære området på kurven i figur 6.

2.5 Virvelstrømstap

Variierende magnetfelt fører til kjernetap for blant annet for elektriske maskiner og for transformater. I en synkronmaskin blir forskjellige deler av maskinen påvirket av varierende flukser. Stator blir påvirket av et varierende magnetfelt fra rotor og fra viklingene i stator. Kjernetapene kan deles inn i to hovedgrupper, hysterestap og virvelstrømstap. Siden det er virvelstrømtapene som dominerer i enderegionene er det kun disse tapene som blir gjennomgått her. Når for eksempel et magnetisk ledende objekt utsettes for et eksternt varierende magnetfelt vil objektet sette opp interne strømmen. Disse interne strømmene setter opp et magnetfelt som er motsatt rettet av det eksterne feltet. Dette skjer naturlig da naturen alltid prøver å oppnå likevekt. De interne strømmene kalles virvelstrømmer og når de sirkulerer i materialer med elektrisk motstand oppstår det varmeenergi i objektet. For å redusere størrelsen på virvelstrømmer blir for eksempel stator i elektriske maskiner delt opp i tynne lamineringslag. Dette gjør at områder som blir påvirket av feltet blir mindre, slik at de induserte virvelstrømmene som oppstår blir mindre.

3 Maskinen

Modellen som skal implementeres i denne oppgaven er laget med utgangspunkt i en av Statkraft sine maskiner. På grunn av fabrikant- og produksjonshemmeligheter kan ikke alle fakta om maskinen komme frem i denne oppgaven. Likevel er det noe informasjon er viktig for å kunne forstå oppbyggingen av maskinen og resultatene. Derfor vil noe generell informasjon om generatoren komme her. Maskinen har en merkeytelse på 320 MVA og en linjespenning ut av maskinen på 16.6 kV, med andre ord en av de største norske generatorene i drift. Statorviklingene er vannkjølt, mens rotor og statorblikk er luftkjølt. Faseviklingene i stator er delt inn i to parallelle kretser. En viktig parameter er omdreiningshastigheten på 428.6 omdreininger per minutt. En generator med denne omdreiningshastigheten har 14 poler. Maskinen har en indre diameter på 4400 mm og en lengde på 3750 mm. Maskinen ble produsert på 1980-tallet.

4 Oppbygging av Modellen

For å analysere magnetfeltet og oppvarmingen som skjer i stator ble analyseprogrammet Ansys Maxwell brukt. Maxwell er spesielt laget for å gjøre elektromagnetiske feltberegninger, og det kan brukes til både 2D og 3D-modeller. Softwareprogrammet bruker *finite element method* (FEM) for å gjøre sine analyser.

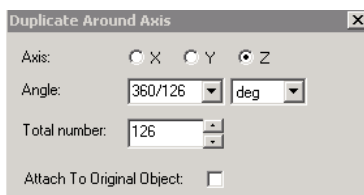
Hensikten med denne oppgaven var å undersøke feltet i enderegionen. For at simuleringsmodellen skulle være realistisk måtte den lages i 3D. Etter hvert viste det seg at det var svært utfordrende å lage modellen direkte i 3D. Det ble derfor bestemt at en modell også skulle utvikles i 2D. Modellene ble utviklet skritt for skritt, dermed kunne en del først gjøres i 2D og deretter overføres til 3D. Modelleringsprosessen var svært tidkrevende. Statkraft hadde detaljerte tegninger av generatoren, som var vanskelig å implementere på en god måte. Noen detaljer ble ikke implementert, da de var vanskelig å implementere og ansett for mindre viktig. Både 2D- og 3D-modellen ble modellert symmetrisk rundt origo. 2D-modellen ligger i xy-planet. 3D-modellen ligger også i xy-planet, mens lengden på maskinen ligger langsmed z-aksen.

Modellen ble noe modifisert sammenlignet med den originale maskinen. Det var viktig at modellen kunne deles opp, slik at simuleringstiden gikk ned. Derfor ble det bestemt at det totale antall spor (Q_s) skulle økes til 126. Dette gjorde at antall viklinger per pol og fase (q_s) ble et heltall. På denne måten kunne modellen deles opp og simuleringen kunne kjøres for kun en eller to poler, i stedet for hele maskinen. Siden antall spor økte i forhold til den originale maskinen, måtte hvert spor gjøres smalere slik at den totale stålmengden i maskinen skulle bli omentrent lik stålmengden i den originale maskinen.

4.1 2D-modellen

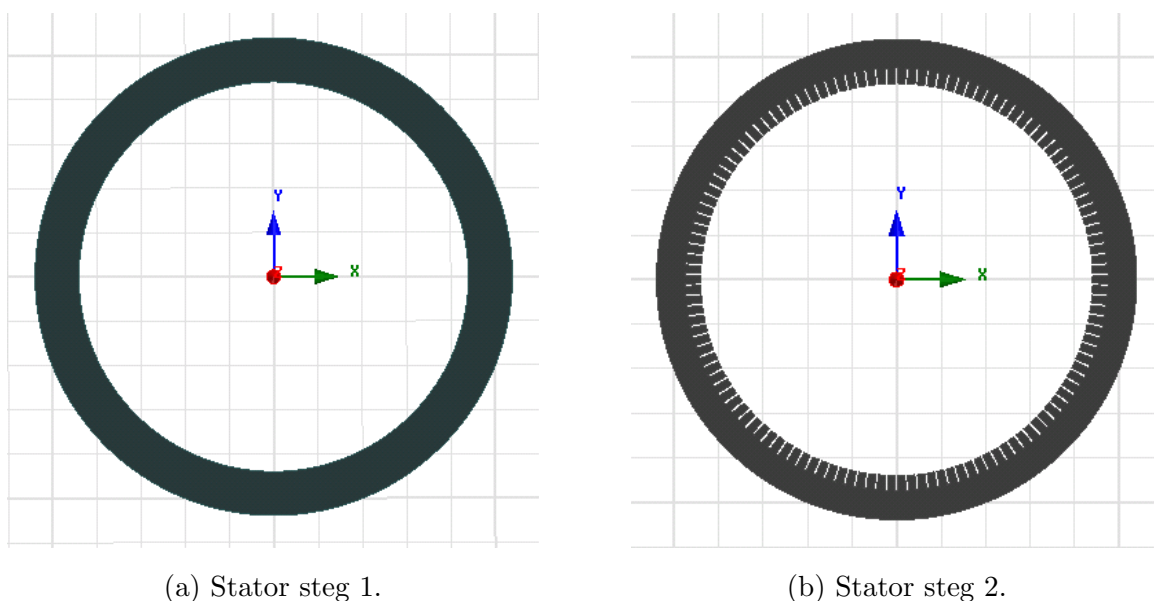
Det første som ble implementert var stator. Denne ble utformet med to sirkler med forskjellig radius. Begge ble plassert symmetrisk rundt origo. Den største sirkelen hadde den ytre diameteren til stator, mens den indre sirkelen hadde den indre diameteren. Ved å trekke den indre sirkelen fra den ytre, står man igjen en flat, hul sylinder som er grunnlaget for en stator. (Se figur 8a). Sporene i stator ble laget ved å skjære ut et rektangulært spor på innsiden stator. En av styrkene til Maxwell er at programmet er svært god på symmetriske operasjoner. Det gjorde det mulig å først lage et spor, for deretter å be programmet om å

duplisere 126 slike spor, jevnt fordelt rundt z-aksen. Dupliseringsfunksjonen er vist i figur 7.



Figur 7: Dupliseringsfunksjonen i Maxwell.

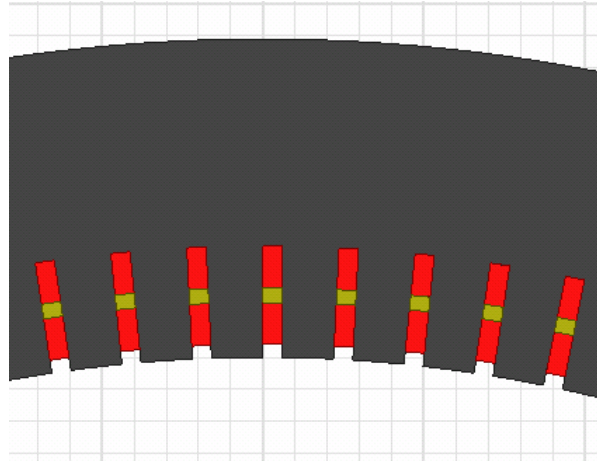
Når alle disse rektanglene var skåret ut av stator, var selve statoren ferdig og det var mulighet å sette inn viklingene. Se figur 8b.



Figur 8: Statorutvikling.

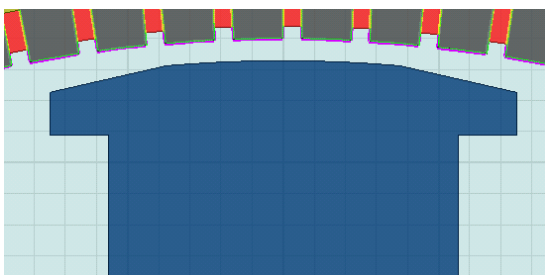
Ytterst i sporene er det i vanlige generatorer plassert en kile, som skal holde viklingene på plass. Denne kilen påvirker ikke magnetfeltet. Det ble derfor bestemt at i stedet for en kile, skulle det bare være luft ytterst i sporet. Innenfor luften ligger understaven. Understaven består egentlig av flere delledere, men i modellen er det bare én solid kobberleder. Magnetfeltet utenfor lederen blir det samme hvis strømmen i den solide lederen er den samme som den totale strømmen av alle dellederne. Derfor kan denne tilnærmingen gjøres uten å påvirke resultatet i noen grad. I en vanlig maskin ville det også vært isolasjon mellom lederen og stator, men siden overslagsproblematikk ikke er en del av denne oppgaven, ble ikke dette tatt hensyn til. Over- og understaven må være adskilt slik at endeviklingene ikke kolliderer. Et lag med isolasjon ble brukt for å skille stavene fra hverandre. Innenfor isolasjonslaget ligger

overstaven. Over- og understaven, samt isolasjonslaget er lagt inn som rektangler i sporene og deretter blitt duplisert 126 ganger rundt stator. Figur 9 viser et utsnitt av resultatet. Her er de røde rektanglene er over- og understaver, mens de gule rektanglene er isolasjon.

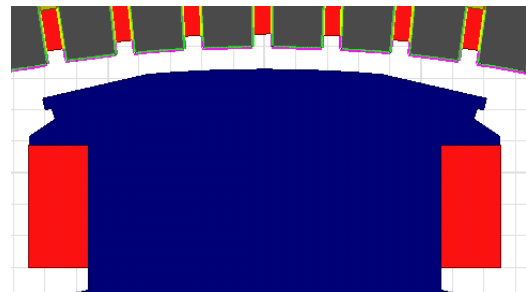


Figur 9: Utsnitt av stator, med vikling og isolasjon.

Polene til rotor var en utfordring å lage. Den første tanken var å lage en pol som hadde en konstant avstand til stator. Men dette stemte ikke med de opplysningene som Statkraft hadde om maskinen. I databladet til maskinen var det oppgitt minimum- og maksimumavstand mellom stator og pol. For at designet skulle stemme mest mulig med den originale maskinen ble polskoen delt inn i tre deler. I midten var det en rund del som hadde konstant avstand fra stator, mens på hver side var det skrå linjer som gjorde at avstandene økte til den gitte maksimalavstanden. Disse tre delene utgjorde polskoen. Etter at polskoen var ferdig, ble et rektangel lagt til på innsiden av polskoen. Dette er polkjernen og det er her feltviklingene ligger.



(a) Pol steg 1.

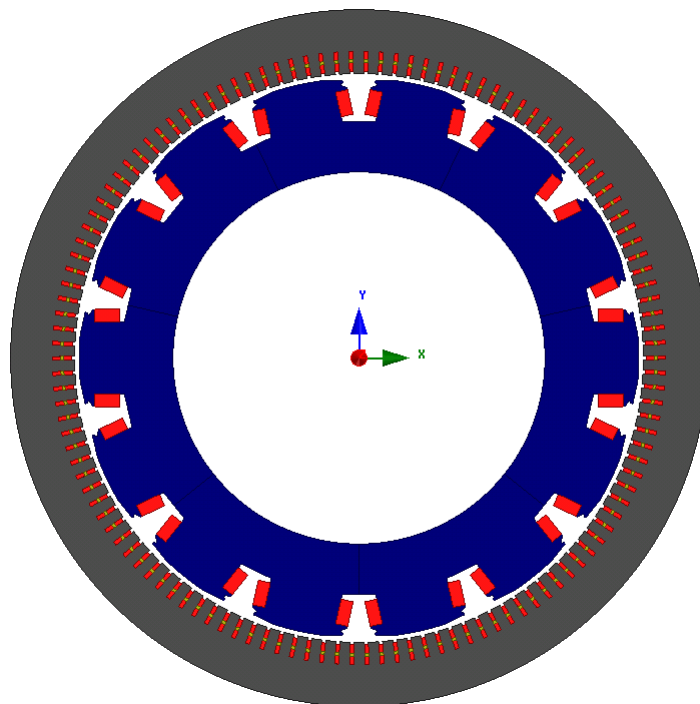


(b) Pol steg 2.

Figur 10: Poldesign.

Det første designet av polen kan sees i figur 10a. Her kommer det tydelig frem at avstanden til stator er konstant for den midtre delen av polskoen, mens sidene på polen har en større avstand. Etter hvert kom det mer detaljerte, tekniske tegninger fra Statkraft. På bakgrunn av disse tegningene måtte det gjøres endringer på endestykket til polskoen. I de originale tegningene er det kuttet ut en bit av polskoen, dette ble også gjort i modellen og kan sees i figur 10b. Neste skritt var å lage feltviklingene. Disse ble plassert inntil polkjernen, under polskoen. I figur 10b er feltviklingene de røde rektanglene på hver side av polkjernen.

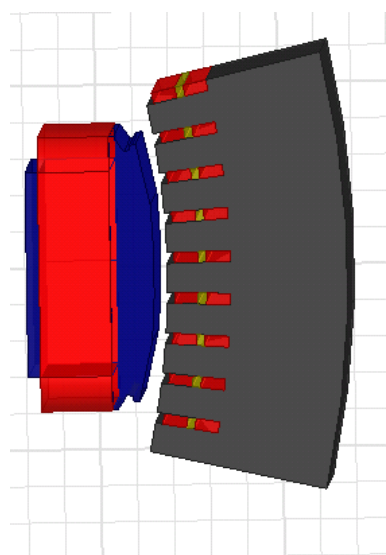
Når selve polen var ferdig, ble dupliseringskommandoen brukt igjen, slik at det ble 14 poler jevnt fordelt på innsiden av stator. Neste skritt var å sette alle polene sammen, slik at det ble en rotor. Det ble trukket rette linjer mellom innsiden av hver av polkjernene, slik at alle ble til ett sammenhengende objekt. Deretter ble det lagt en sirkel innenfor polene slik at alle polene hang sammen med rotorringen. I en vanlig maskin ville det ha vært en aksling i midten med staver ut til rotorringen, men den delen av maskinen er ikke viktig for denne oppgaven, og ble derfor utelatt. Da rotoren var ferdig implementert var 2D-modellen av generatoren ferdigstilt. Resultatet av modellen kan sees i figur 11.



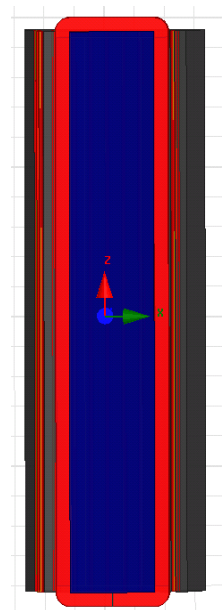
Figur 11: Den ferdige 2D-modellen.

4.2 3D-modellen

3D-modellen ble utviklet i samme rekkefølge som 2D-modellen. Det første som ble designet var stator. Her ble det brukt to rette sylindere. Den ene sylindere hadde diameter lik den ytre diameteren til maskinen, mens den andre hadde en diameter lik den indre diameteren. Den innerste sylindere ble trukket fra den ytterste, slik at en rett, hul sylindere sto igjen. Så ble sporene laget. Igjen ble samme metode som i 2D-modellen brukt, men her måtte også høyden til maskinen tas i betraktning. Etter at sporene i stator var ferdig, ble de fylt med viklinger og isolasjon på samme måte som i figur 9. Polene ble konstruert ved først å tegne polsnittet fra 2D-modellen i xy -planet. For å få rett høyde og samme form på hele polen ble sweep-funksjonen brukt. Denne funksjonen fungerer på den måten at det horisontale 2D-snittet går langs en vertikal linje, slik at denne flaten får høyden til den gitte linjen, men samtidig beholder snittet sitt langs med linjen. På denne måten gikk polen fra 2D til 3D. Ved å bruke denne funksjonen ble en pol med ønsket snitt og høyde designet. Figur 12a viser en pol og det tilhørende statorområdet for 3D-modellen. Snittet er sett ovenfra og ned. Figur 12b viser samme bilde, men her sett fra innsiden av generatoren, ut mot polen.



(a) Pol og stator sett ovenfra.

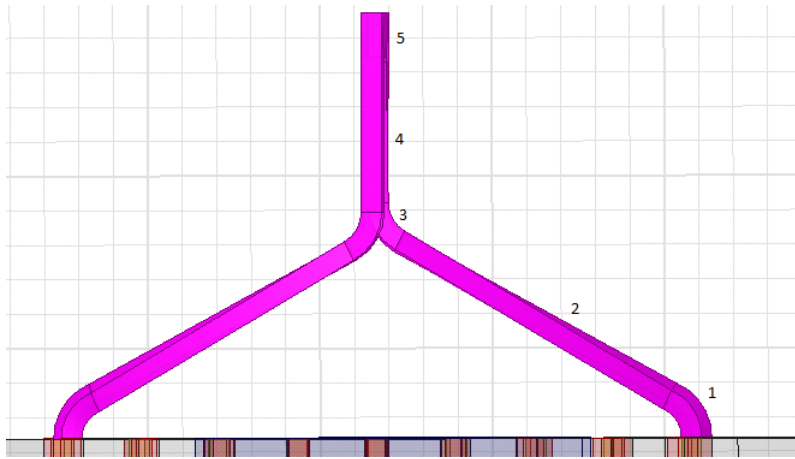


(b) Pol og stator sett fra siden.

Figur 12: Pol og det tilhørende statorområdet.

Det blå i figurene over er rotor, mens det røde rundt er feltviklingen. Feltviklingen ble laget ved å legge en linje med en gitt avstand rundt hele polkjernen. Rundt hjørnene av polkjernen ble linjen avrundet slik at feltviklingen skulle bli rund og ikke rektangulær. Deretter ble en

flate med tverrsnittet av feilutviklingen plassert slik som feltviklingen ligger i 2D-modellen (se figur 11). Så ble linja og flaten markert og sweep-funksjonen ble igjen bruk, slik at feltviklingen ble som i figur 12b.

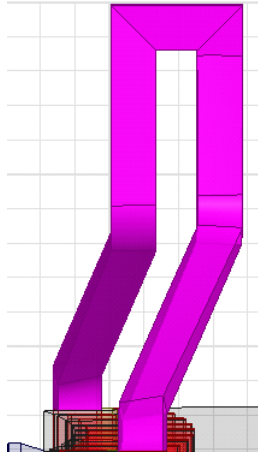


Figur 13: Endevikling med nummerering.

Den største utfordringen i designet var å forme endeviklingene. Disse har ikke en velkjent geometrisk form, og det er derfor ikke mulig å bruke noen av de innebygde Maxwell-funksjonene når endeviklingene skulle designes. I tillegg har endeviklingene en form som gjør at designet går i både x-, y-, og z-retning. Endeviklingene er satt sammen av fem delstykker, (se figur 13). Figuren viser den ferdige endeviklingen, hvor de fem delstykkene er markert. I underkant av bildet er toppen av stator, bildet er tatt i xz-planet, det vil si at y-aksen går innover i bildet. Viklingene går fra understav til overstav. Over- og understaven ble utviklet parallelt fra begge sider til og med del 4. Da begge stavene var kommet til dette punktet ble de satt sammen ved hjelp av et rektangel på toppen. Alle delstykkene ble laget på samme måte, nemlig først å trekke et linjestykke for deretter å bruke sweep-funksjonen for å lage en stav rundt linjen.

Den første delen av viklingen som ble laget var en sving opp og ut fra stator (del 1). Lengden og radius på svingen var gitt i de tekniske tegningene. Denne “startsvingen” var identisk for både over- og understav. Neste del av viklingen var linjestykke 2. I dette strekket går staven både i x-, y- og z-retning. Lengden i de forskjellige retningene var gitt i tegningene, men siden over- og understaven har forskjellige utgangspunkt, er linjestykke 2 forskjellige for de to stavene. Del 3 besto av en sving med gitt radius og lengde. Denne svingen var lik for både over- og understaven. Etter del 3 sto endeviklingene på linje (i y-retning), men hadde ikke samme høyde. Gjennom del 4 ble høyden justert, slik at begge sidene fikk rett

høyde opp fra statoroverflaten. Et problem som oppsto når viklingene var kommet frem til del fire, var at de ikke sto vinkelrett på hverandre. Siden over- og understaven ikke hadde beveget seg like mye i y-retning, var flatene skjeve i forhold til hverandre. For å løse dette ble delstykke nummer to laget på nytt. For å kompensere for denne skjevheten ble det brukt en funksjon som gjorde at stykke to, ble vridd tilbake i motsatt y-retning, slik at toppene på endeviklingene ble stående vinkelrett på hverandre.

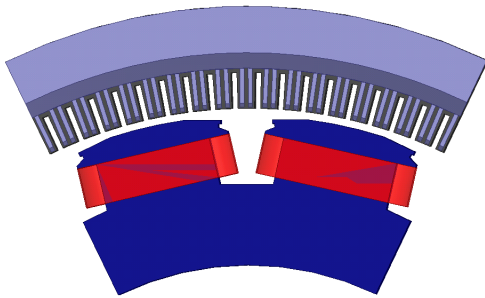


Figur 14: Endevikling sett i yz-planet.

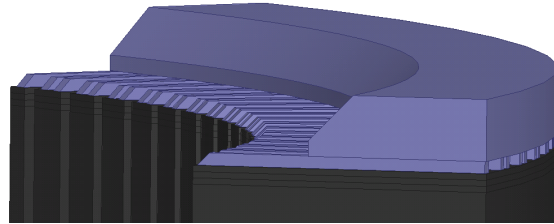
Figur 14 viser endeviklingen sett i yz-planet, dette er samme bilde som i figur 13, sett fra siden. Fra denne vinkelen kommer det tydelig frem hvordan over- og understaven blir koblet sammen (del 5). Når begge stavene hadde kommet frem til del fire og sto vinkelrett på hverandre, var det mulig å koble dem sammen med et rett rektangel. Dermed var endeviklingen ferdig og ble deretter koblet sammen med de tilhørende over- og understavene. Etter dette ble hele viklingen markert og duplisert 126 ganger rundt z-aksen. Ved dette punktet var 3D-modellen ferdigutviklet, og klar for testkjøring. Dette ble gjort under arbeidet med prosjektoppgaven høsten 2015.

I masteroppgaven våren 2016 var det nødvendig å legge til pressanordning for generatoren, slik at 3D-modellen skulle være mest mulig reell. Alle generatorer har en pressanordning rundt hver kortside dette er på grunn av de store og varierende kreftene som virker på maskinen. Det er viktig at alle lamineringsslagene holdes på riktig plass. Samtidig er det også store magnetiske krefter på endeviklingene, slik at disse også trenger mekanisk støtte. Pressanordningen består som regel av et ikke-magnetisk materiale. Det kan for eksempel være vanlig å bruke rustfritt stål. Pressanordningen består vanligvis av to deler pressfingrene og pressringen/platen. Pressfingrene går ut på tennene og sørger for at det blir et press på hver

tann. Siden det er presstener på hver side av maskinen vil kreftene virke mot hverandre fra hver side og lamineringslagene blir presset sammen. Pressringen ligger på oversiden av pressfingrene, ute på statoråket og sørger for å sikre åket for de fysiske påkjenningene. For at modellen i Maxwell skal bli så realistisk som mulig, ble pressanordningen utformet på grunnlag av tekniske tegninger for den konkrete Statkraft-maskinen modellen er bygd opp etter. Siden maskinen er så stor, er det brukt to fingre per statortann. Samtidig starter hver finger nesten helt ytterst på en statortann og går nesten helt ut til enden av åket. Pressringen ligger på oversiden av fingrene ute på statoråket. Både fingrene og statorringen er avrundet i enden som er nærmest rotor. Figur 15a viser utformingen av pressanordningen for generatoren.



(a) Pressanordning sett ovenfra.

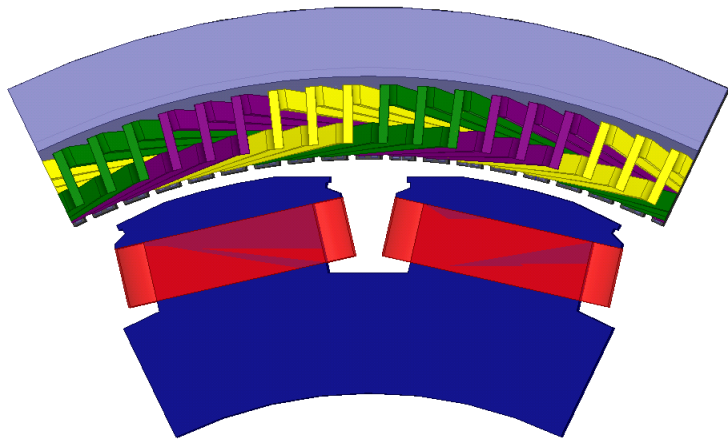


(b) Utsnitt av pressanordningen ved statoroverflaten.

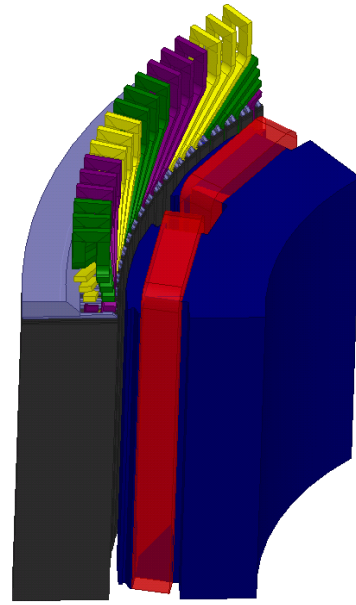
Figur 15: Utsnitt av pressanordningen.

I figur 15a er generatoren sett fra oversiden. Rotor er blå, mens det røde er feltviklingene. På oversiden av stator ligger pressanordningen, som er grå i dette utsnittet. Her er statorviklingene fjernet fra bildet, slik at det skal være enklere å se hvordan pressanordningen ligger. I figur 15b er også rotor fjernet fra bildet. Her er toppen av stator og pressanordningen sett fra siden. Her er det viktig å legge merke til at pressanordningen er avrundet for kortsidene ved luftgapet.

Etter at pressanordningen var lagt inn i modellen var 3D-modellen av generatoren ferdig implementert. Når det gjelder hvilke materialtyper som ble brukt blir dette gjennomgått i kapittel 6. Figurene under viser hele generatoren i 3D der alle delene er tatt med i bildet.



(a) Den modellerte generatoren i 3D sett ovenfra.



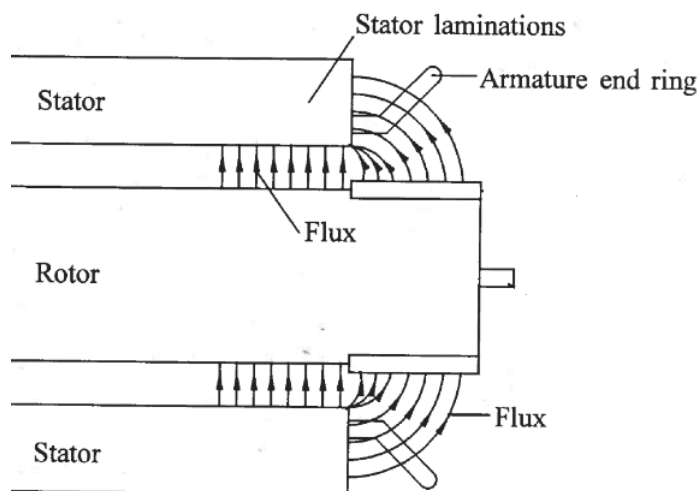
(b) Den modellerte generatoren i 3D sett fra siden.

Figur 16: Den ferdig implementerte generatoren i 3D.

Figur 16 viser den ferdigstilte modellerte generatoren i 3D. I figur 16a er utsnittet tatt fra oversiden, mens i figur 16b ser man maskinen fra siden. I figurene er pressringen blå-grå, stator er mørk-grå, mens rotoren er blå. Feltviklingene som ligger rundt rotor er rød, mens statorviklingene er delt opp i gul, grønn og lilla, ettersom de tilhører ulike faser.

5 Forklaring av problemet

Før simuleringsoppsett og resultatene kommer, vil dette kapitlet bli brukt til å gi en mer grundig, samt visuell forklaring rundt problemstillingen vedrørende oppvarming av endepartiet i stator.



Figur 17: Fluks i endepartiet for generator.

Figur 17 viser et utsnitt av endepartiet for en generator. Utsnittet er gjort midt i maskinen og de tre hoveddelene består av rotor i midten, med stator på hver sin side. Denne figuren viser i hovedsak hvordan den magnetiske fluksen opptrer i endepartiet for vanlig operasjon. Det meste av fluksen går radielt ut fra rotor og inn i stator, det er denne effekten som er ønskelig i en generator. Samtidig er det tydelig at en del av fluksen går i luften fra rotor og ned på overflaten til stator. Dette er ikke ønskelig og det blir sett på som lekkfluks. Når rotor roterer vil den radielle fluksen treffe statorviklingene og indusere en spenning. Lekkfluksen som penetrerer stator fra oversiden bidrar i veldig liten grad til indusert spenning i viklingene. Statoren i elektriske maskiner består av mange tynne lag av stål, med laminering mellom seg. Disse lagene er vanligvis i området rundt 0.5 mm. For maskinen i figur 17 ligger lamineringslagene i vertikal retning. Dette gjør at den radielle fluksen ikke er noe stort problem her, ettersom den deles opp i mange forskjellige lamineringslag. Men den delen av fluksen som ikke går radielt, men som treffer normalt på overflaten av statoråket vil “møte” oversiden av et stort lamineringslag. Det vil si at fluksen ikke vil bli delt mellom ulike lag, men at det øverste laget får hele lekkfluksen. Dette fører til at det går store virvelstrømmer i de øverste

lamingeringslagene, sammenlignet med lengre ned i maskinen. I tillegg er pressanordningen på statoroverflaten utsatt for et varierende magnetfelt. Selv om pressfingrene består av et ikke-magnetisk materiale, vil det også her bli indusert virvelstrømmer.

Et annet viktig bidrag er påvirkningen fra endeviklingene. Endeviklingene befinner seg over kortsiden av stator, slik som på figur 17. Siden det går store vekselstrømmer i disse viklingene vil det oppstå et varierende magnetfelt rundt disse viklingene. Siden det elektriske stålet i generatoren leder magnetfelt mye bedre enn luft, vil magnetfeltet fra statorviklingene trekkes mot, og delvis gå igjennom den øverste delen av stator, dermed er dette enda en kilde som virker inn i denne regionen. Som et resultat av både feltet fra rotor og fra endeviklingene, vil det oppstå mye større virvelstrømmer for endepartiet i generatorer, og dermed er akkurat denne delen av maskinen svært utsatt for terminske skader.

6 Materialer

For at modellen skulle være så lik originalen som mulig, var det svært viktig at de materielle egenskapene brukt i modellen var så lik de originale materialet som mulig. Statkraft hadde ikke informasjon om materialtypene brukt for generatoren som modellen var bygd opp etter. Det ble derfor bestemt å finne informasjon om materialtypene på nett, med de verdiene som er forventet for en slik maskin fra 1980-tallet. Det var nødvendig med informasjon om de ikke-linjære magnetiseringskurvene til rotor- og statorstålet. Cogent Power er en leverandør av elektrisk stål som hadde tilgjengelig informasjon om deres produkter [5]. Etter en gjennomgang av de forskjellige stålproduktene til Cogent Power, ble det bestemt at det skulle brukes elektrisk stål av typen *300-35A* for stator, siden denne ståltypen hadde forventete verdier for vår maskin. Databladet som ble brukt i stator finnes i appendiks 14.1. Stålkvaliteten er som regel høyere i stator enn i rotor. Det ble derfor valgt å bruke det innebygde materialet *steel_1010* for rotor. Dette var en materialtype som allerede lå inne i Maxwell. Verdiene brukt for magnetiseringskurven for rotor-stålet kan sees i appendiks 14.2. Både for rotor og stator ble det lagt inn lamineringsslag i y-retningen. Lamineringen hadde en *stacking factor* på 0.95, noe som anses som vanlig for elektriske maskiner. For pressanordningen ble det valgt å bruke rustfritt stål som allerede lå inne i Maxwell. *Stainless Steel* er definert med konstant permeabilitet på 1. Dette er en forventet verdi for pressanordningen, og den lave permeabiliteten gjør at magnetfeltet ledes mye dårligere i pressanordningen sammenlignet med stator og rotor.

7 Mesh

Når Ansys Maxwell kjører simuleringer bruker den en bestemt metode for å lage en løsning for en modell. Helt i starten av simuleringene blir det dannet et rutenett i de forskjellige objektene modellen består av, fra nå kalt mesh. Meshet består av mange punkter, fra nå kalt noder. Det blir kalkulert resultater for alle nodene i meshet. Mellom noder blir det interpolert et svar. Det vil si at stor avstand mellom nodene fører til at det helhetlige resultatet blir mer unøyaktig. Derfor er det ønskelig å ha et så tett mesh som mulig. Problemet med å ha et tett mesh er at programmet må regne løsninger for hver enkelt node, noe som vil si at simuleringstiden øker med antall noder. Dette kapitlet beskriver metoden som ble brukt for å lage et mesh som gir en nøyaktig løsning, uten at simuleringstiden ble for lang.

Et “triks” som ble brukt var å lage dummyobjekter. Tanken her er å definere ekstra objekter for et mindre område der et presist resultat er nødvendig. Ved å kun øke antall noder der man ønsker en presis løsning, fremfor hele objektet, vil antall noder holdes lavt og simuleringstiden holdes nede, samtidig som det oppnås et bedre resultat i kritiske områder. Dette trikset ble brukt i stator i denne oppgaven. Siden dette prosjektet går ut på å undersøke feltet i enderegionen av stator, er det viktig å oppnå et nøyaktig svar her. Dermed ble stator delt inn i fire forskjellige objekter. Helt øverst i stator var det tre lag med en tykkelse på 1 cm, mens det siste laget besto av resten av stator. På denne måten kunne antall noder økes drastisk helt i toppen av generatoren, der et nøyaktig resultat var nødvendig, mens resten av generatoren kunne ha en lavere tetthet av noder og dermed holde simuleringstiden nede. Denne metoden kunne med hell også være brukt på lufta i luftgapet eller ved den delen av rotor som vender mot luftgapet, men dette lot seg ikke gjøre. Siden skillet mellom stasjonær og bevegelig løsning ligger midt i luftgapet, var det vanskelig å definere et område med høy mesh-tetthet her. For rotoren var det vanskelig å legge til et lag på innsiden av luftgapet, siden utformingen av rotor her ikke er konstant (se utforming av rotor i figur 10b).

Det neste spørsmålet var hvor tett nodene måtte være for at simuleringen skulle være nøyaktig. Ved et unøyaktig mesh, ville resultatene ikke være troverdige, heller ikke til å gjøre sammenligninger mellom ulike driftssituasjoner. For å finne ut hvor tett meshet skulle være, ble det bestemt å kjøre samme simulering flere ganger, samtidig som meshet ble gjort finere og finere. Denne prosedyren ble gjennomført helt til forskjellen i resultatene var under 1 %. Denne “itereringsprosessen” tok utgangspunkt i *default*-meshet som Maxwell automatisk setter opp for en modell. Etter første simulering ble det valgt ut noen resultater. Disse

resultatene ble lagret, meshet ble gjort finere, ny simulering ble kjørt og nye resultater ble lagret og sammenlignet. Det ble bestemt at det aksielle magnetfeltet ved statoroverflaten skulle brukes som “avgjørelsesparameter” for å se hvor stor endring det var fra simulering til simulering. Etter mange kjøring og gradvis økning av antall noder kom det til et punkt der resultatet endret seg med mindre enn 1% for hver simulering. Da besto modellen av ca. 770 000 noder.

Under itereringsarbeidet med å bestemme meshet, ble det for hver simulering skrevet ned antall mesh i de forskjellige delene av maskinen og det aksielle feltet (B_z) for tre forskjellige punkter på statoroverflaten for sammenligning.

1.simulering		2.simulering	
Antall punkter totalt	616389	Antall punkter totalt	629408
Stator	123301	Stator	123425
Statorlag_dummy	37573	Statorlag_dummy	37708
Rotor	99759	Rotor	102330
Pressanordning totalt	53017	Pressanordning totalt	53111
Feltvikling	46000	Feltvikling	52000
T1	-0,0713	T1	-0,0711
T2	-0,1847	T2	-0,1847
T3	0,294	T3	0,2935
3. simulering		4. simulering	
Antall punkter totalt	642458	Antall punkter totalt	674795
Stator	124390	Stator	125554
Statorlag_dummy	37499	Statorlag_dummy	43824
Rotor	109803	Rotor	110647
Pressanordning totalt	53041	Pressanordning totalt	61636
Feltvikling	52000	Feltvikling	52000
T1	-0,0712	T1	0,0725
T2	-0,1844	T2	-0,1846
T3	0,2934	T3	0,2946
5. simulering		6. simulering	
Antall punkter totalt	714237	Antall punkter totalt	766097
Stator	130143	Stator	132460
Statorlag_dummy	44057	Statorlag_dummy	45087
Rotor	110505	Rotor	115620
Pressanordning totalt	60765	Pressanordning totalt	61052
Feltvikling	55000	Feltvikling	55000
T1	-0,0724	T1	-0,0725
T2	-0,1858	T2	-0,1859
T3	0,294	T3	0,294

Figur 18: Itereringsprosessen for meshet.

Tabellene over viser hvordan meshet ble økt for de største og viktigste objektene gjennom itereringsprosessen. Tabellen viser bare de seks siste iterasjonene i prosessen. For å spare

tid ble itereingsprossen utført for statisk simulering, da en statisk simulering går raskere enn en transient. Da det riktige antall noder var funnet, ble meshinnstillingene fra den statiske simuleringen overført til den transiente simuleringen. I radene med påskriften *Statorlag_dummy* refereres det til de tre dummyobjektene som ligger øverst i stator, og her er det summen av nodene i de tre lagene. De tre siste radene *T1*, *T2*, *T3* er referert til tre forskjellige målepunkter på statoroverflaten. Disse punktene ble valgt fordi de er i det aktuelle området og gir dermed en god indikator på hvordan resultatene endrer seg for hver iterasjon.

8 Forskjellige metoder

I prosjektoppgaven høsten 2015 ble det kun simulert situasjoner med tomgang. I tomgang er det kun strøm i feltviklingene, mens generatoren er koblet fra nettet slik at det ikke går strøm i statorviklingene. I masteroppgaven skulle det aksielle feltet ved forskjellige normale driftssituasjoner undersøkes. Derfor måtte fasestrømmene i stator implementeres. Det var to forskjellige metoder som kunne brukes for å få dette til. Den første metoden gikk ut på å legge inn terminaler i alle faseviklingene, fra nå av kalt terminalmetoden. Mens den andre metoden var å koble generatormodellen til en ekstern krets i Ansys Maxwell. I dette kapitlet blir begge metodene forklart, forsøkt verifisert og til slutt blir det valgt en metode som skulle brukes videre i prosjektet. Alle verifiseringer som er gjort i dette kapitlet ble gjort på 2D-modellen. 2D-modellen ble brukt for å gjennomføre verifiseringen raskere, men også fordi denne modellen var viktig for oppgaven.

8.1 Terminalmetoden

I Ansys Maxwell kan man definere en flate som en terminal. I feltviklingene er det for eksempel plassert to tverrsnitt i viklingen. Disse tverrsnittene er definert som strømterminaler med retning på strømmen. På denne måten kan man få ønsket strøm til å flyte gjennom objektet. Denne metoden ble også brukt for statorviklingene. For hver vikling ble det lagt inn to tverrsnitt som ble definert som terminaler. Da alle statorviklingene hadde fått to terminaler ble alle terminalene delt inn i tre grupper for hver sin fase. Disse fasegruppene ble kalt *PhaseA*, *PhaseB*, *PhaseC*. Når alle terminalene var samlet i en gruppe kunne strømmen for alle terminalene og dermed for alle viklingene for en fase, justeres gjennom fasestrømmen. Hver fase fikk et uttrykk for strømmen som skulle flyte i faseviklingene. A-fasen fikk følgende uttrykk:

$$I_a = I \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot TIME + a),$$

der I er amplituden til fasestrømmen, $TIME$ er tiden i en transient simulering og a er en eventuell faseforskyvning. Det samme uttrykket ble også brukt for de andre fasene, bare med andre faseforskyvningsledd. B-fasen fikk faseforskyvningsleddet:

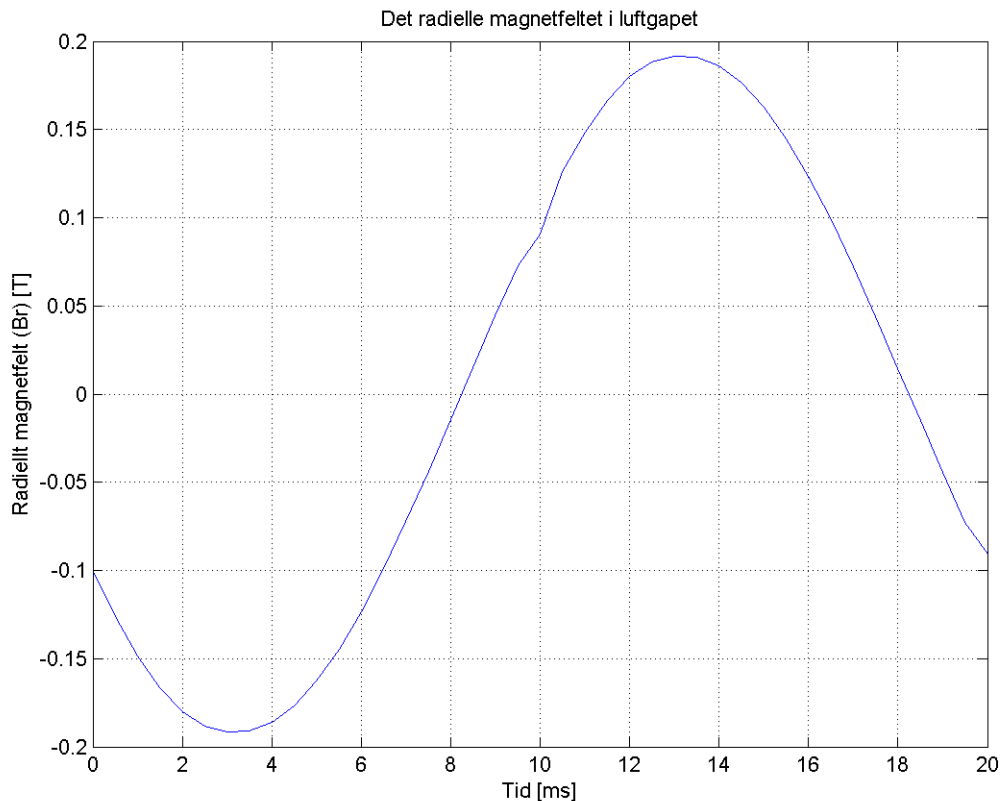
$$b = a + \frac{2 \cdot \pi}{3}$$

Mens C-fasen fikk:

$$c = a + \frac{4 \cdot \pi}{3}$$

På denne måten ble det oppnådd vekselstrøm med riktig faseforskyvning for statorviklingene. Denne strømmen var det også mulig å regulere slik at forskjellige driftssituasjoner kunne simuleres. Ved å regne ut strømmen ved forskjellige driftssituasjoner kunne amplituden på fasestrømmene I justeres slik at den passet med forskjellige situasjoner. Dermed kunne modellen tilpasses ulike driftssituasjoner. Samtidig kunne man gjennom å endre på faseforskyvningsparameterene a , b og c endre på forskyvningen til fasestrømmen.

For å være sikker på at implementeringen av faseviklingene var riktig måtte det gjøres en simulering. Grunnleggende elektrisk maskin-teori sier at det som følge av statorstrømmene vil dannes et resulterende magnetfelt i luftgapet med sinusform. Derfor ble det kjørt en simulering for en periode uten rotasjon og strøm i feltviklingene for å se hvordan det resulterende magnetfeltet fra stator så ut.

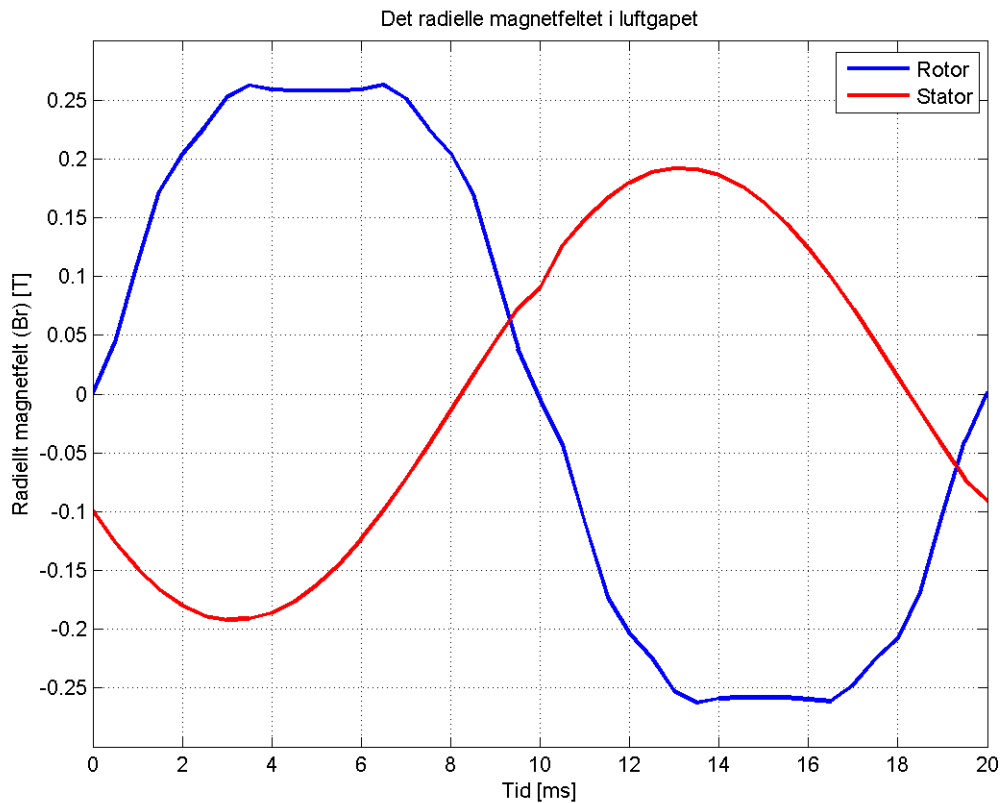


Figur 19: Den radielle komponenten av magnetfeltet midt i luftgapet.

Figur 19 viser det radielle magnetfeltet for en periode med kun strøm i statorviklingene. Her er det målt ved et målepunkt midt i luftgapet mellom rotor og stator. Som forventet

danner det resulterende magnetfeltet en sinuskurve, noe som tilsier at faseviklingene er riktig implementert. Hvis faseviklingene hadde vært plassert i feil rekkefølge i stator eller at faseforskyvningen mellom fasene hadde vært feil, ville ikke det resulterende magnetfeltet blitt en sinuskurve.

Etter at strømmen i statorviklingene var implementert og verifisert, måtte neste problem rundt terminalmetoden løses. Den største utfordringen med denne metoden var hvordan man kan kontrollere at strøm- og spenningsvektoren roterer riktig i forhold til hverandre. Ved et generelt fasediagram ligger vektorene med en viss faseforskyvning mellom seg. Dermed ble spørsmålet hvordan man skulle sikre seg at denne forskyvningen ble riktig ved bruk av terminalmetoden. Løsningen ble å bruke fasediagrammet i delkapitel 2.3. I dette kapitlet ble det utviklet et uttrykk for vinkelen mellom de resulterende magnetfeltene fra rotor og stator. Vinkelen mellom rotorfeltet og statorfeltet er, $\beta = 90 + \delta + \varphi$. Polhjulsvinkelen (δ) og effektfaktoren (φ) er mulig å regne ut med håndkalkuleringer basert på den oppgitte terminalspenningen (16.6 kV) og den tilkoblede lasten ved ulike driftssituasjoner. Utregningen av polhjulsvinkel for nominell last kan sees i appendiks 14.7. Når effektfaktor og polhjulsvinkel var kjent kunne vinkelen mellom rotor- og statorfeltet regnes ut for forskjellige driftssituasjoner. Deretter var det mulig å kjøre to separate simuleringer, en med rotasjon og feltstrøm og en med kun strøm i statorviklingene. Videre var det mulig å måle faseforskyvingen mellom det resulterende rotorfeltet og det resulterende statorfeltet. Gjennom å faseforskyve disse feltene i forhold til hverandre, ved å bruke forskyvningsparameterne a, b og c i uttrykkene for statorstrømmene, var det mulig å oppnå en riktig driftssituasjon. På denne måten var det sikkert at strøm- og spenningsvektorene lå riktig i forhold til hverandre.



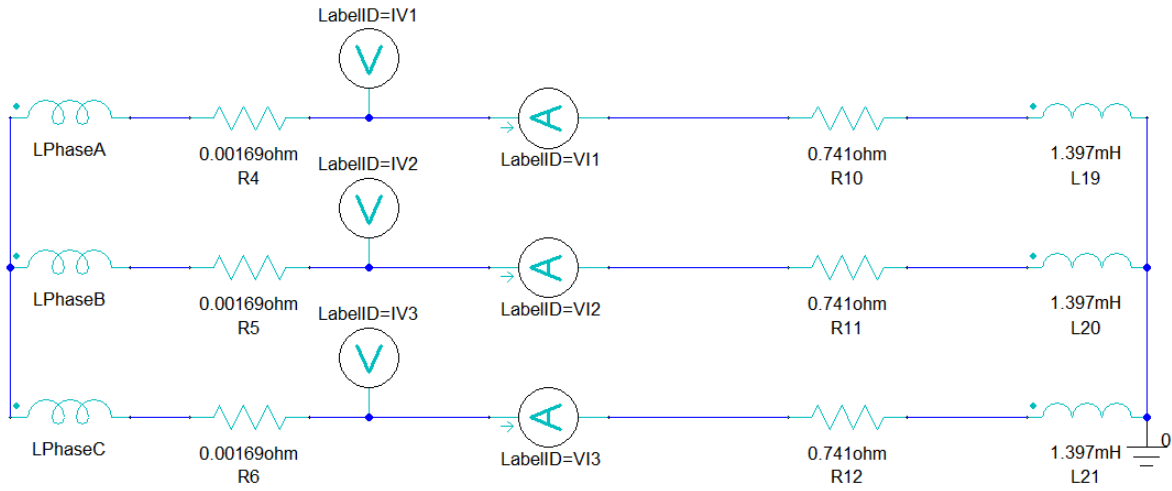
Figur 20: Sammenligning av magnetfeltet fra rotor og stator.

Figur 20 viser de to sammensatte plottene av magnetfeltet fra stator og rotor. Den blå kurven er den radielle komponenten av magnetfeltet til rotor, målt for en periode midt i luftgapet, mens den røde stammer fra statorviklingene. Ut fra figur 20 er det vanskelig å si noe om hvor mye faseforskyvning det er mellom rotor- og statorfeltet, men denne figuren er kun tatt med for å vise hvordan denne metoden fungerer. Når det resulterende feltet fra begge bidragene var plottet for en periode, ble Matlab brukt til å finne toppunktet for hver av dem. Ved å sammenligne toppunktene var det mulig å finne faseforskyvningen og ved å justere statorfeltet ble riktig faseforskyvning oppnådd.

8.2 Ekstern krets

Den andre alternative måten for å få strøm i statorviklingene var å legge til en ekstern krets som var koblet til generatoren. Tanken bak dette alternativet gikk ut på å indusere spenning i statorviklingene, som igjen var koblet til en ekstern krets med last. Da ville det være induserte spenninger i viklingene som var koblet til impedansene i lasten, som igjen

førte til at det “naturlig” begynte å flyte strøm i viklingene. Generatoren er stjernekoblet i simuleringsoppsettet og er direkte koblet til en lokal last. Tanken er at generatoren skal holde terminalspenningen til den originale maskinen ved terminalene, og at lasten skal være koblet til her. På denne måten vil det være kjent hvilken spenning som ligger over lasten, samtidig som effekten til maskinen er kjent gjennom de tekniske garantiene for den originale generatoren. Siden både effekt og spenning er kjent for lasten, er det lett å regne ut hvor stor den lokale lasten skal være for forskjellige driftssituasjoner.

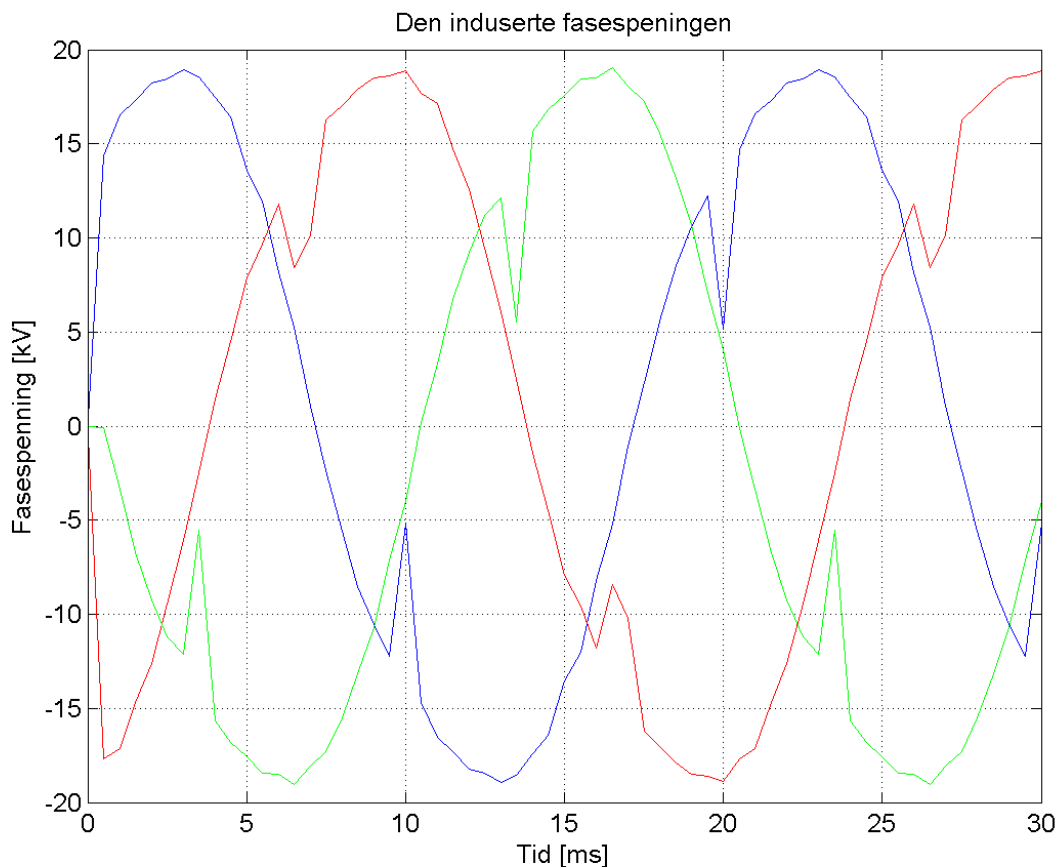


Figur 21: Den eksterne kretsen for nominell last.

Figur 21 viser den eksterne kretsen som er koblet på generatoren. Helt til venstre, markert med navnene *LPhaseA*, *LPhaseB*, *LPhaseC*, er statorviklingene fra maskinen. Disse er koblingen mellom modellen av generatoren og den eksterne kretsen. De interne induktansene i generatoren blir tatt høyde for gjennom utformingen av generatormodellen, mens resistansene i statorviklingene blir lagt til i den eksterne kretsen. Disse er markert med *R4*, *R5*, *R6* i kretsen og verdiene er hentet fra databladet til Statkraft. Videre mot høyre er det spenningsmålere for hver fase. Disse ligger i overgangen mellom generator og nett og måler dermed terminalspenningen. De er koblet mellom fase og jord og viser derfor fasespenningen. Mellom generator og last er det også plassert amperemeter for hver fase, som måler strømmene for hver fase. Til høyre for dette ligger lasten. Den nominelle lasten for generatoren er en passiv RL last. Helt til høyre er også lasten jordet slik at det blir en case der en lokal last er koblet til generatorterminalene på den ene siden, mens den andre siden er jordet.

8.3 Verifisering av terminalmetoden

Etter at bidraget fra rotor og stator var kontrollert hver for seg, var tiden inne for å prøve en simulering der begge var involvert. Dette var den første simuleringen av en reell driftssituasjon ved bruk av terminalmetoden. Forsøket ble gjort for 2D-modellen ved nominell drift. Siden strømmen nå var “satt” av bruker, var det den induserte spenningen som var mest interessant å undersøke.



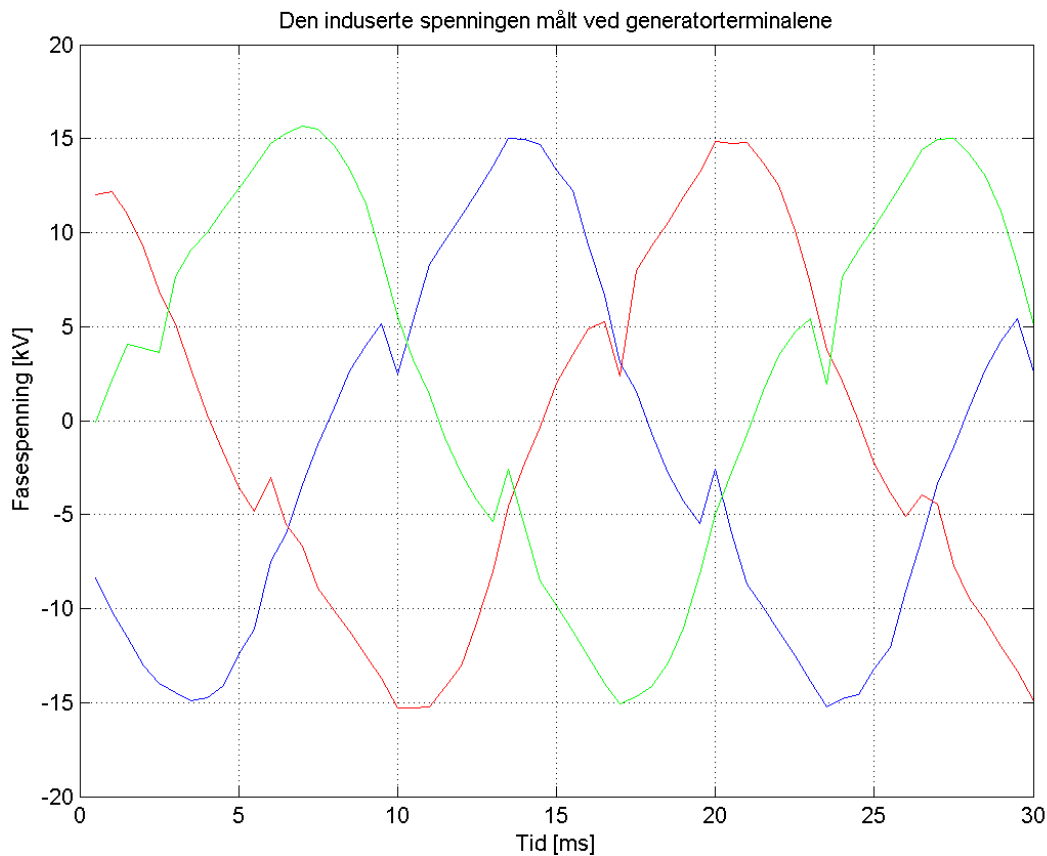
Figur 22: Den induserte spenningen for terminalmetoden ved nominell drift.

Figur 22 viser den induserte fasespenningen i statorviklingene ved bruk av terminalmetoden. For å verifisere spenningskurven ble den sammenlignet med den originale Statkraftmaskinen som modellen var bygd opp etter. Terminalspenningen for den originale maskinen var 16.6 kV (RMS, linjespenning). Dermed var det ønskelig at resultatet skulle være i dette området. Spenningskurvene i figur 22 bruker litt tid før de stabiliserer seg i stasjonær drift. Derfor ble perioden 10-30 ms brukt for å finne RMS-verdien til spenningskurvene. Resultatene ble eksportert fra Maxwell og overført til Matlab hvor RMS-utregninger ble gjort. Denne

utregningen viste at den gjennomsnittlige induserte linjespenningen for denne metoden var 22.66 kV. Det vil si at den induserte spenningen var alt for høy sammenlignet med det som var forventet. Samtidig er det flere grove hakk i spenningskurvene. Dette tyder på at det er noe som er galt i modellen, eller at noen av strømkildene i modellen ikke fungerer sammen. Mange nye simuleringer med andre driftsinnstillinger ble prøvd ut, men det var ikke mulig å få fjernet hakkene i spenningskurven eller å få rett indusert spenning.

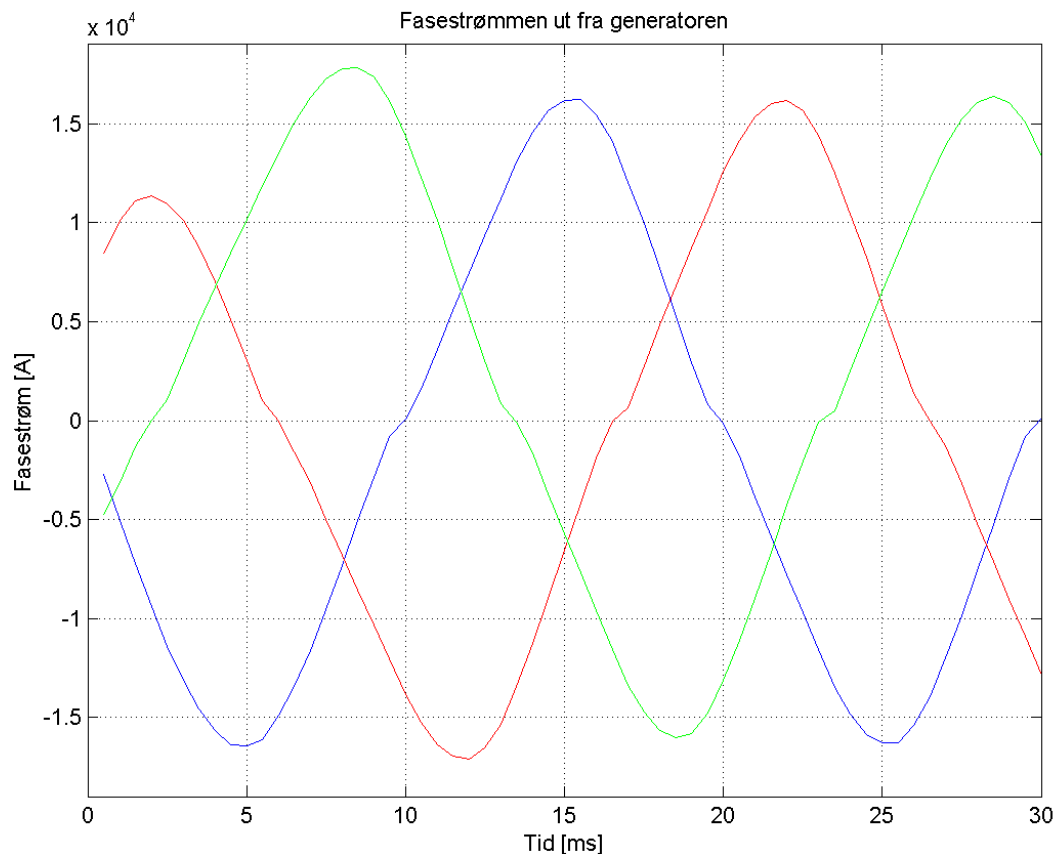
8.4 Verifisering av ekstern krets

Som nevnt tidligere var en ekstern krets tilkoblet generatorviklingene slik at strømmen naturlig skulle begynne å flyte etter hvert som spenning ble indusert i viklingene. Før denne “teknikken” skulle brukes måtte det gjøres en verifisering av simuleringsoppsettet. Det ble bestemt at det skulle kjøres en simulering med 2D-modellen for nominell last. Ved å anta at den modellerte maskinen har samme terminalspenning og effekt som den originale maskinen kan man regne seg frem til verdier for den passive lasten. Nominell last for maskinen er ved en effektfaktor på 0,86, *lagging*. Det vil si at den passive lasten består av en resistans og en induktans, utregning av den passive lasten kan sees i appendiks 14.5. Det er flere formål med denne testen. For det første kan det kontrolleres om strøm- og spenningskurvene har en fin sinusform. Det må også kontrolleres om terminalspenningen holder den ønskede verdien, og om strømmene i hver fase stemmer med det forventende.



Figur 23: Terminalspenning ved nominell last.

Figur 23 viser fasespenningene målt ved terminalene under testing med nominell last. Spenningene er plottet som funksjon av tiden over 1.5 periode (30 ms). Ved første øyeblikk er det tydelig at spenningskurvene ikke er perfekt sinus. Grunnen til dette er ukjent. Det ble forsøkt mange forskjellige metoder for å få glatte, fine sinuskurver, men dette var ikke oppnåelig. På samme måte som ved terminalmetoden ble RMS-verdiene for spenningen utregnet for perioden 10-30 ms, ettersom systemet da har oppnådd stasjonær drift. For denne metoden ble den gjennomsnittlige linjespenningen for fasene målt til 16.77 kV.



Figur 24: Fasestrøm ved nominell last.

Figur 24 viser fasestrømmen målt i amperemetrene i den eksterne kretsen for testing med nominell last. Her er også strømmen plottet som funksjon av tiden for 1.5 periode. Her er kurvene mer glatt og sinusformet. Videre ble signalet behandlet på samme måte som spenningskurven, ved at de første 10 ms ble utelatt når RMS-verdien av signalet skal kalkuleres. Den forventede fasestrømmen for denne driftssituasjonen med tanke på terminalspenning og last (basert på den originale maskinen) er 11 130 A (se utregning i appendiks 14.5). Den gjennomsnittlige utregnede RMS-verdien for alle fasestrømmen er på 10 709 A. Det gir et avvik på litt under 4 %.

8.5 Valg av metode

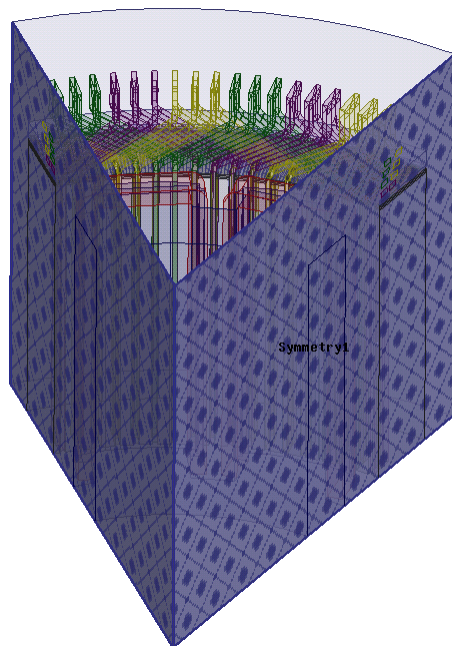
Ingen av de to metodene ga perfekte resultater. For terminalmetoden var det stygge hakk i sinuskurven, samtidig som den induserte spenningen var for høy. For ekstern kretsmetoden er det også noen små hakk, men verdiene var tilnærmet realistiske. Samtidig var strømmene i viklingene korrekte for ekstern krets metoden. Det var bare aktuelt å bruke en av metodene videre, da det ville tatt for lang tid å gå videre med begge. Det ble bestemt å bruke den eksterne kresten videre. Det var flere grunner til at dette alternativet var mer foretrukket fremfor terminalmetoden. En situasjon med en ekstern krets å foretrekke, da det ligner mer på en reell situasjon. I tillegg, når den induserte spenningen og strømmen stemte godt overens med de reelle verdiene til Statkraft, var valget ganske enkelt. En annen fordel var at det var tidkrevende å justere slik at magnetfeltet fra rotor og stator lå riktig i forhold til hverandre for terminalmetoden, mens for situasjonen med den eksterne kretsen skjedde dette av seg selv. Dette gjorde det enklere når andre situasjoner enn nominell drift skulle undersøkes. Selv om begge metodene ikke hadde perfekt sinus for spenningen, var ikke dette så viktig da det er strømmen som er avgjørende på magnetfeltet og ikke spenningen. Et av ankerpunktene mot å velge ekstern kretsmetoden var at denne var svært tidkrevende, sammenlignet med terminalmetoden. Simuleringstiden ble faktisk over tidoblet etter den eksterne kretsen ble tilkoblet.

9 Simuleringsoppsett

I dette kapitlet vil alle simuleringsoppsettene bli gjennomgått og forklart, deretter vil resultatene fra oppsettene komme i neste kapitel. Tidligere i oppgaven ble det bestemt at det var metoden med den eksterne kretsen som skulle brukes videre i prosjektet. Dermed blir alle simuleringer utført med en ekstern krets fra nå av (utenom tomgangssimuleringen). Meshinnstillingene blir gjennomgått i kapitel 7. Siden resultatene fra de ulike simuleringene skulle sammenlignes senere var det nødvendig at meshet for de ulike oppsettene var de samme, slik at dette ikke skulle føre til noen endringer. For de ulike driftssituasjonene var det kun den eksterne kresten og magnetiseringsstrømmen som ble endret, det vil si at selve 3D-modellen av generatoren var den samme for hvert enkelt case.

9.1 Modellen av generatoren

Som nevnt tidligere var det gjort noen justeringer på modellen sammenlignet med den originale generatoren. Antall spor ble økt til 126, dette ble gjort for at antall spor per polområde (q_s , se formel 2) skulle bli et heltall. Siden q_s er et heltall blir alle polområder lik og dermed er det mulig med symmetriske grensebetingelser. Ved å bruke grensebetingelser var det mulig å dele opp modellen og kun kjøre simulering for 2/14 av modellen. Det vil si at det kun ble modellert for 2 av 14 poler. Det ble brukt en grensebetingelse kalt *master and slave*. Denne betingelsen fungerer på den måten at to av sideflatene til modellen blir avmerket (se figur 25), og den ene blir mastersiden, mens den andre blir slavesiden. Kort sagt vil alt som går ut ved mastersiden automatisk komme inn på slavesiden. Slavesiden må altså følge det samme, som mastersiden gjør. Når rotor roterer ut av mastersiden, vil den komme inn igjen på slavesiden. Det samme vil skje for alt av felt også. Siden generatoren er symmetrisk for annen hver pol vil det samme resultatet oppnås som hvis hele maskinen hadde blitt kjørt, bare at simuleringstiden nå er mye kortere.



Figur 25: Grensebetingelser for generatoren.

Figur 25 viser hvor grensebetingelsene er lagt inn. Samtidig ble maskinen delt på halve lengden, dette også for å redusere simuleringstiden. Generatoren er symmetrisk om xy -planet og derfor kan den deles opp der uten at det har noe påvirkning for resultatene i enderegionen. For å kompensere for denne oppdelingen var det mulig å legge inn hvor mange symmetriske deler modellen var delt opp i. Siden modellen kun besto av 2 av 14 poler, samt at den var delt rundt xy -planet, ble det lagt inn en symmetrisk kompensasjon på $2 \cdot 7 = 14$.

En annen viktig grensefunksjon i Maxwell er isolering. I modellen er alle lederne av kobber med en innebygd ledningsevne. Stålet brukt i stator og rotor har også en liten ledningsevne. For at strømmen i feltviklingen kun skal gå i selve viklingen og ikke ut i rotor, måtte det settes på et isolerende grensesjikt mellom feltvikling og rotor. Det samme måtte også gjøres mellom stator og alle statorviklingene.

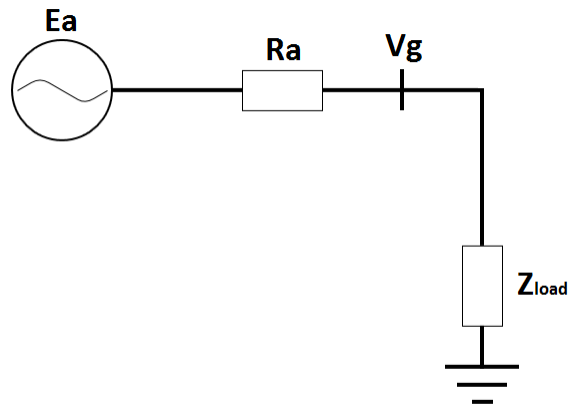
9.2 Tomgang

Den første driftssituasjonen som skulle testes var tomgang. I denne driftssituasjonen er ikke generatoren koblet til nettet, mens terminalspenningen er 16.6 kV. Det måtte gjøres noen innstillinger slik at modellen kunne kjøre for denne driftssituasjonen. Først måtte tomgangsstrømmen settes på feltviklingene i modellen. Denne var oppgitt i de tekniske be-

skrivelsene fra Statkraft. Videre ble det ikke koblet til noen ekstern krets siden simuleringen skulle være for tomgang. Deretter ble statorviklingene i maskinen satt til å ha to parallelle kretser slik som den ekte maskinen har. Videre ble det valgt en transiten løsning av generatormodellen, med tidsskritt på 0.5 ms. Simuleringstiden ble satt til 1.5 periode (30 ms), noe som vil si at programmet lagret løsninger for 60 forskjellige tidsskritt. Basert på erfaring fra 2D-modellen tar det ca. 10 ms (en halv periode) før systemet stabiliserer seg og *steady state* oppstår. Med en simulering over 1.5 periode, vil det da være en periode mellom 10 - 30 ms å studere systemet på, mens det operer i stasjonær drift. En lengre simuleringstid var også vurdert for å være sikker på at målingene skjer i *steady state*, men dette ble for tidkrevende.

9.3 Overmagnetisert

Den andre casen som skulle testes var nominell drift. Et tenkt linjediagram for situasjonen kan sees i figur 26.



Figur 26: Linjediagram for simuleringssopsettet.

I figuren over er E_a den interne induerte spenningen, mens R_a er resistansen til statorviklingene. Den interne reaktansen til maskinen blir automatisk tatt hensyn for av programmet gjennom utformingen av maskinen og trengs derfor ikke å tas hensyn til i den eksterne kretsen. Dermed blir V_g terminalspenningen til generatoren som er direkte koblet til den lokale lasten. Siden den nominelle effekten av maskinen og den nominelle effektfaktoren er kjent, gjør dette at den nominelle lasten kan regnes ut. Slike utregninger gjøres lettest ved å bruke et pu-system. Her velges $V_{ref} = 16.6$ kV og $S_n = 320$ MVA som referanse for henholdsvis spenning og effekt. Effektfaktoren ved nominell last er 0.86 (*lagging*) = -30.86° .

$$S_n = 320 \angle -30.86^\circ \text{ MVA} = 0.86 - j0.51 \text{ pu.}$$

Videre kan den nominelle lasten til den eksterne kretsen regnes ut ved hjelp av generatorspenningen og lasten:

$$Z_{Load} = \frac{V_g^2}{S_n} = \frac{1.0^2}{0.86 - j0.51} = 1.0 \angle 30.86^\circ \text{ pu.}$$

Siden verdiene må legges inn i ohm og henry i den eksterne kretsen, må referansen til impedansen for systemet regnes ut for å finne de reelle verdiene for systemet.

$$Z_{ref} = \frac{V_g^2}{S_n} = \frac{(16.6 \cdot 10^3)^2}{320 \cdot 10^6} = 0.861 \frac{\Omega}{\text{pu}}$$

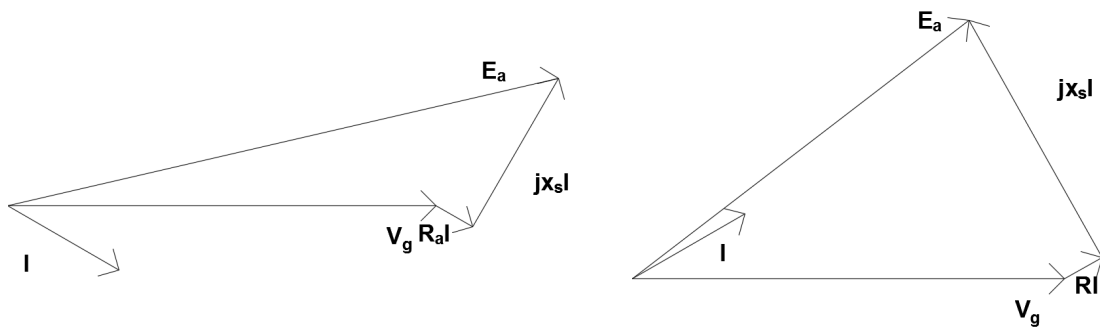
Dette gir en nominell last på: $Z_{Load} = Z_{Load} \cdot Z_{ref} = 0.741 + j0.439 \Omega$. Videre må induktansen gjøres om til henry for å legges inn i den eksterne kretsen.

$$L = \frac{0.439}{\omega} = 1.397 \text{ mH.}$$

De utregnede verdiene er per fase og ble satt inn i den eksterne kretsen (se figur 21). Det neste som ble gjort var å stille inn modellen av generatoren riktig. Først ble det satt riktig rotasjonshastighet for rotoren, samt feltstrømmen som gjelder ved nominell last. Deretter ble statorviklingene i maskinen satt til å ha to parallelle kretser slik som den ekte maskinen har. Videre ble det valgt en transiten løsning av problemet, med tidsskritt på 0.5 ms. Simuleringstiden ble satt til 1.5 periode (30 ms).

9.4 Undermagnetisert

Den nominelle effekten av generatoren skjer ved overmagnetisert kjøring av generatoren, altså at strømmen ligger bak terminalspenningen. Det neste som var interessant å teste var hvordan magnetfeltet i enderegionen ble påvirket av å kjøre generatoren i undermagnetisert tilstand og sammenligne disse resultatene med den nominelle simuleringen. Når generatoren opererer i undermagnetisert tilstand vil den interne spenningen E_a være mye lavere, dermed måtte det gjøres en beregning for å finne ut hvor stor strømmen i feltviklingene skulle være for å få rett driftssituasjon.



(a) Driftssituasjon med overmagnetisert generator. (b) Driftssituasjon med undermagnetisert generator.

Figur 27: Fasediagram for under- og overmagnetisert generator.

Figur 27 viser den generelle forskjellen på de to driftssituasjonene. For at sammenligningen skulle være reell, var det viktig at strømmen i faseviklingene skulle være den samme for begge tilfellene. Dermed ble det bestemt å kjøre modellen for samme effektfaktor, altså 0.86, men med motsatt fortegn. På denne måten var det sikkert at påvirkningen av magnetfeltet fra endeviklingene var like stor i begge tilfellene. For dette simuleringsoppsettet ble det også brukt en ekstern krets med en lokal last. Utregningen av impedansen ble gjort på samme måte som tidligere, se utregningene nedenfor.

$$S_n = 320 \angle 30.86^\circ \text{ MVA} = 0.86 + j0.51 \text{ pu.}$$

Videre kan lasten til den eksterne kretsen regnes ut ved hjelp av generatorspenningen og lasten:

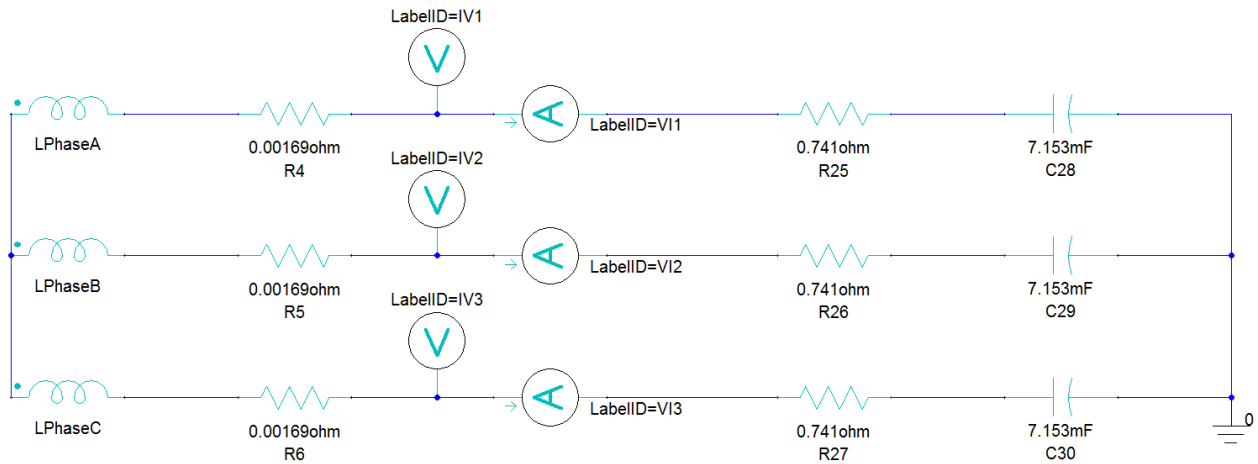
$$Z_{Load} = \frac{V_g^2}{S_n} = \frac{1.0^2}{0.86 + j0.51} = 1.0 \angle -30.86^\circ \text{ pu.}$$

$$\text{Videre er referansen for impedansen regnet ut til: } Z_{ref} = \frac{V_g^2}{S_n} = \frac{(16.6 \cdot 10^3)^2}{320 \cdot 10^6} = 0.861 \frac{\Omega}{\text{pu}}$$

Dette gir en last på: $Z_{Load} = Z_{Load} \cdot Z_{ref} = 0.741 - j0.439 \Omega$. Videre må induktansen gjøres om til farrad for å legges inn i den eksterne kretsen.

$$C = \frac{1}{0.439 \cdot \omega} = 7.251 \text{ mF.}$$

Etter at verdiene var regnet ut ble den eksterne kretsen satt opp, og resultatet kan sees i figur 28.



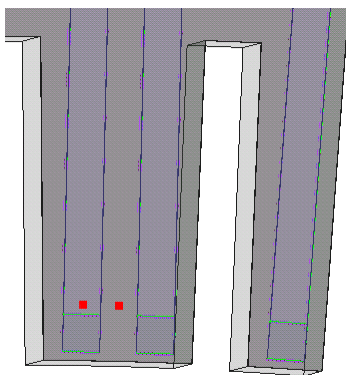
Figur 28: Den eksterne kretsen til generatoren for undermagnetisert kjøring av generatoren.

Etter at den ekstrene kretsen var klar, måtte det også gjøres innstillinger på selve generatoren. Siden den induserte spenningen i denne driftssituasjonen er mye lavere, må også strømmen i feltviklingene reduseres. For nominell last hadde Statkraft verdier for feltstrømmen, men det fantes ikke informasjon for verdien på feltstrømmen i undermagnetisert tilstand.

For å finne ut hva feltstrømmen skulle være for undermagnetisert tilstand ble det utført håndkalkuleringer av den interne spenningen for både over- og undermagnetisert drift av generatoren. Lengden til E_a (indusert spenning) ble regnet ut for de ulike situasjonene og forholdet mellom dem ble regnet ut. Utregningen av de ulike feltstrømmene kan sees i appendix 14.6. Deretter ble feltstrømmen for den undermagnetiserte driftssituasjonen beregnet ved å redusere feltstrømmen. Dette med en faktor tilsvarende forholdet mellom E_a for de ulike situasjonene. Problemet med denne metoden er at generatoren i overmagnetisert tilstand opererer i det ikke-lineære området og dermed er ikke forholdet mellom feltstrømmen og E_a lineært. Dette gjør at metoden for beregning av feltstrømmen ikke er helt korrekt. Men under verifisering av den utregnede feltstrømmen for 2D-modellen viste det seg at den utregnede feltstrømmen gav et tilfredsstillende resultat. Etter at den nye feltstrømmen var beregnet var det klart for simulering. Som i forrige tilfelle ble det valgt en transient simulering som gikk over 1.5 periode (30 ms), med tidsskritt på 0.5 ms.

9.5 Forskjellige målepunkter

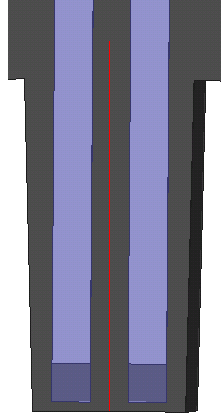
For å lettere kunne hente ut og sammenligne resultatene ble det lagt inn ulike punkter og linjer i generatormodellen. Disse punktene var ikke en del av simuleringsløsningen, men ble lagt inn i modellen som “ikke-simulerte” objekter. Dermed kunne de brukes for å hente ut resultater for interessante områder uten å påvirke resultatet noe. Disse punktene og linjene ble plassert på akkurat samme område for alle tre driftssituasjonene, slik at sammenligninger var hensiktsmessige.



Figur 29: Plassering av målepunkter.

Figur 29 viser utsnittet av en statortann, sett ovenfra, med pressfingre på. Målepunktene er de to røde prikkene. Det ene punktet ligger oppå statortannen, mens det andre punktet ligger mellom pressfingrene, oppå statoroverflaten. Begge punktene har lik radiell avstand fra luftgapet. Denne avstanden er 30 mm. Punktet på statortannen er kalt $T1$, mens punktet på statoroverflaten er kalt $Q1$. Høydeforskjellen mellom statoroverflaten og oversiden av pressfingrene er 20 mm. Hensikten er å undersøke forskjellen på feltet mellom de to punktene. For å ha mer sikkerhet rundt målingene ble to andre målepunkter plassert på det samme området på annen vilkårlig tann. Disse punktene ble kalt $T2$ og $Q2$. I utgangspunktet skal feltstyrken være den samme siden avstanden fra luftgapet er den samme.

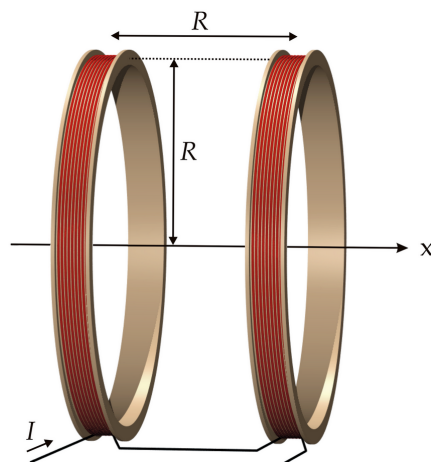
På samme måte som for punktene ble det lagt inn linjer for å gjøre målinger på. Linjen gikk fra kanten av stator og inn midt mellom statortennene og lå på overflaten av stator. Linjestykket er 200 mm og kan sees i figur 30. Det ble lagt linjer på andre statortenner slik at eventuelle variasjoner mellom tenner kunne oppdages.



Figur 30: Plassering av målelinjen.

9.6 Fluks og virvelstrømmer i enderegionen

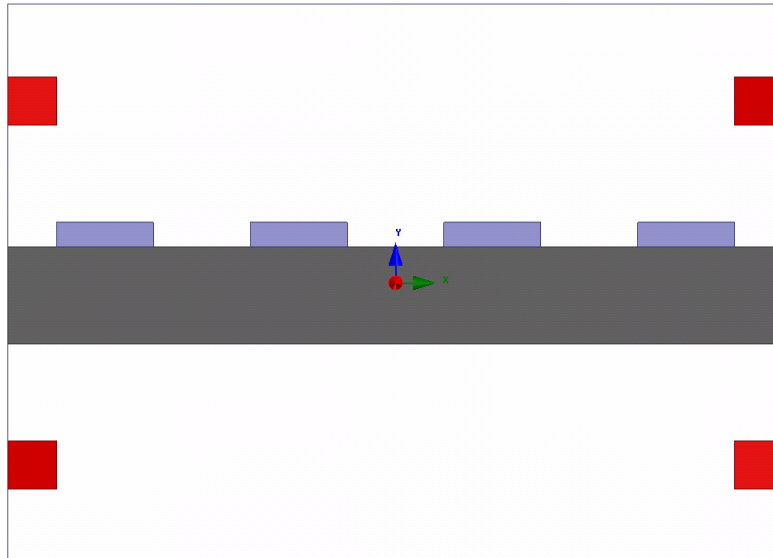
I tillegg til 3D-simuleringene ble det bestemt å gjennomføre en 2D-simulering for å nærmere undersøke flukslinjene og virvelstrømmene rundt pressfingrene og øvre del av stator. Ved å sette på et ytre felt som står loddrett på den modellerte statoroverflaten var det mulig å se hvordan det aksielle feltet, altså lekkfluksen, fordeler seg ved statoroverflaten. For å oppnå et konstant magnetfelt for enderegionen i simuleringen ble et oppsett kalt *Helmholtz Coils* brukt. Tanken bak *Helmholtz Coils* er å plassere et prøveobjekt midt mellom to spoler med samme radius og strømtetthet. Videre skal avstanden mellom spolene være lik radiusen til spolene. På denne måten vil magnetfeltet for prøveobjektet, her enderegionen til stator, være tilnærmet konstant.



Figur 31: Oppsettet for Helmholtz Coils.

Figur 31 viser oppsettet av *Helmholtz Coils*. Ved å plassere prøveobjektet i midt mellom

spolene vil et tilnærmet konstant magnetfelt oppnås for prøveobjektet. Dette oppsettet ble brukt som utgangspunkt for implementeringen i Ansys Maxwell. Simuleringsoppsettet kan sees under.



Figur 32: Simuleringsoppsett for nærmere undersøkelse av enderegionen.

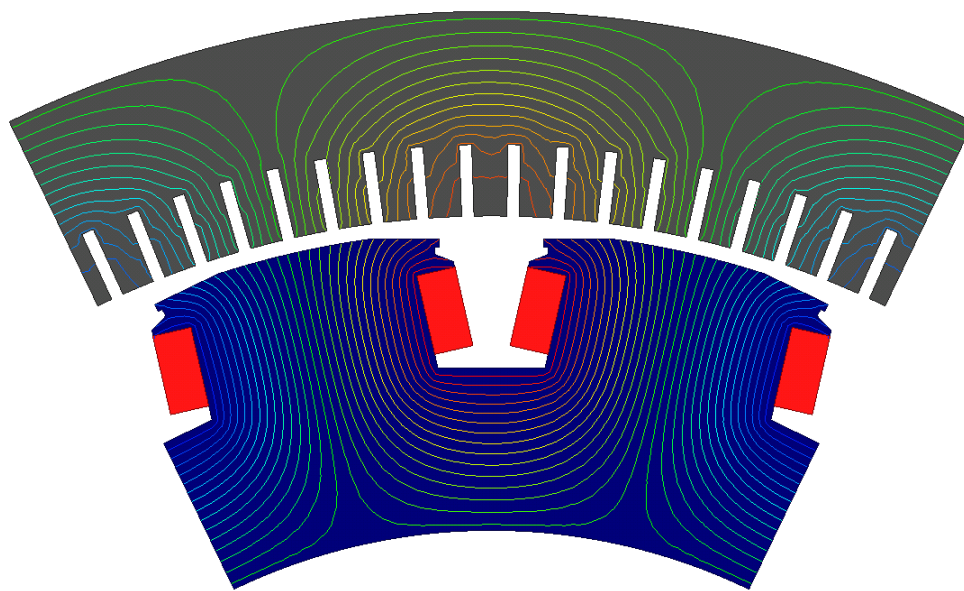
Figur 32 viser simuleringsoppsettet som ble brukt i Maxwell. De røde kvadratene symboliserer spolene, det grå rektanget symboliserer stator, mens de blå-grå rektanglerne skal symbolisere pressfingrene. Stator er definert med 10 ganger høyere permeabilitet i x- og z-retning enn i y-retningen. Dette for å ta høyde for lamineringslagene i stator, som gjør at den magnetiske ledningsevnen i y-retningen er mye lavere. Høyre og venstre sidefate er definert med mostatt symmetri, siden strømretningen i spolene er motsatt vei. Pressfingrene består av rustfritt stål med permeabilitet lik 1, på samme måte som for generatormodellen. Siden modellen er symmetrisk rundt x-aksen ble modellen delt ved x-aksen med en symmetrisk grensebetingelse. Videre ble simuleringen gjennomført med *Eddy current-solver*, dette ble gjort for at Maxwell skulle ta høyde for virvelstrømmene.

10 Resultater

I dette kapitlet vil resultatene fra simuleringene bli presentert. Resultatene fra både 2D- og 3D-simuleringene fra de ulike driftssituasjonene vil komme her. De viktigste resultatene, samt sammenligning av de ulike situasjonene, vil bli diskutert i diskusjonskapitlet. Resultatkapitlet vil bli delt opp i fem delkapitler; 2D-resultater, tomgang, overmagnetisert, undermagnetisert og til slutt fluks og virvelstrømmer i enderegionen.

10.1 2D-simuleringer

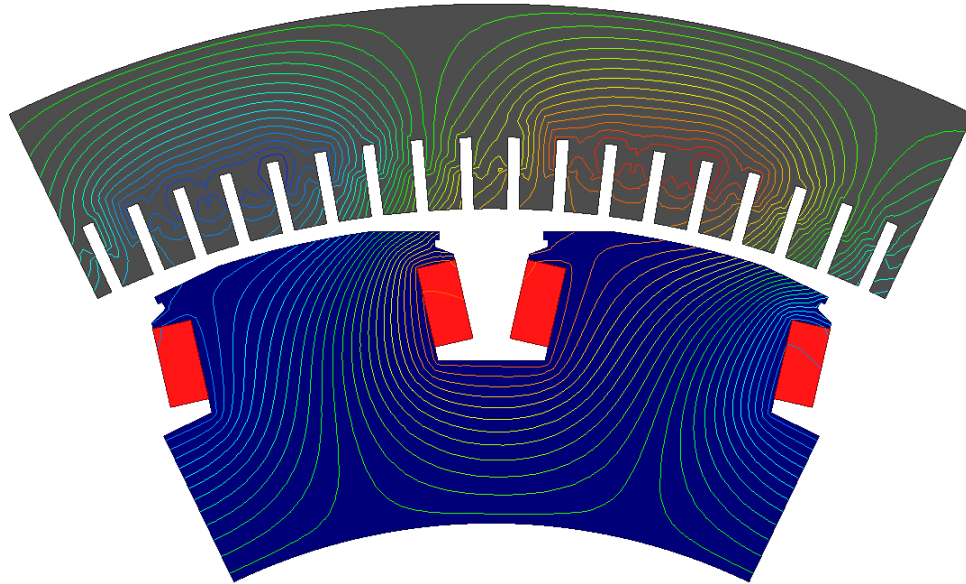
En viktig del av dette prosjektet var 2D-modellen av generatoren. Selv om denne modellen ikke kan brukes til å avgjøre størrelsen på magnetfeltet i enderegionen, var den viktig for å undersøke om modellen fungerte hensiktsmessig. Ansys Maxwell tillater kun å tegne flukslinjer for 2D-modeller. Derfor var det viktig å undersøke at flukslinjene var hensiktsmessige før resultatene fra 3D-modellen ble vurdert. Først ble tomgang testet ut. Her forventes det at flukslinjene sirkulerer rundt feltviklingene uten noe forskyvning, ettersom det kun er et felt i generatoren.



Figur 33: Fluksen for 2D-simulering i tomgang.

Figur 33 viser fluksen i generatoren i tomgang. Her er stator grå, rotor blå, mens de røde rektanglene er feltviklingene. Utsnittet er gjort ved tidspunktet $t = 0.02$, da rotoren har rotert en periode og starter på utgangspunktet. Siden rotoren ligger perfekt i forhold til statoren er

det enklere å se hvordan flukslinjene går i maskinen. I dette plottet er statorviklingene fjernet slik at plottet skal bli mer oversiktlig, men de er likevel en del av løsningen. Videre er det aktuelt å sammenligne dette resultatet med flukslinjene for generatoren under belastning. Under belastning er det forventet at flukslinjene er mindre sirkulerende rundt polene og mer skjeve, siden feltet fra feltviklingene blir påvirket av feltet fra statorviklingene.



Figur 34: Fluksen for 2D-simulering for undermagnetisert generator.

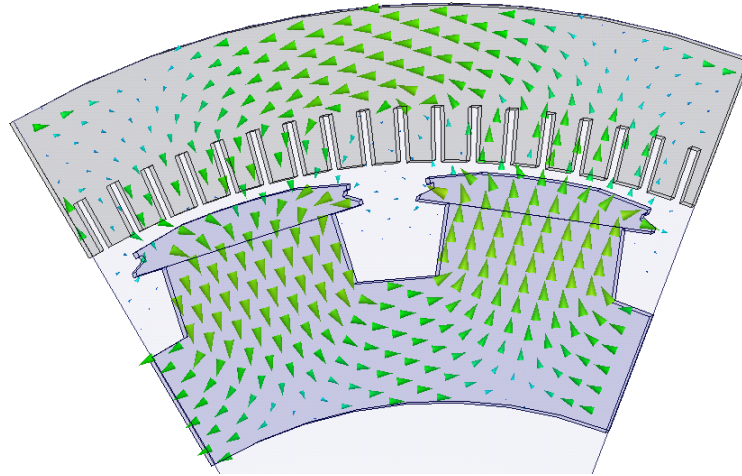
Figur 34 viser hvordan fluksen blir påvirket av å kjøre generatoren med last. Driftssituasjonen her er med *leading* effektfaktor, altså undermagnetisert generator. Se simuleringsoppsett i delkapittel 9.4. Utsnittet her er også gjort etter en periode, ved $t = 0.02$ s. Ved å sammenligne figur 33 og 34 er det lett å se at flukslinjene blir påvirket av magnetfeltet som oppstår på grunn av statorstrømmene.

10.2 Tomgang

Det var naturlig å starte med 3D-resultatene i tomgang, da dette er den mest grunnleggende driftssituasjonen for generatoren. For tomgang vil rotor rottere med en hastighet og feltstrøm, slik at det blir induisert en terminalspenning på 16.6 kV. Generatorterminalene er frakoblet den eksterne kresten, slik at det ikke går strøm i statorviklingene. Dermed er det kun strømmen i feltviklingene som setter opp magnetfelt i maskinen.

For å verifisere simuleringsoppsettet ble RMS-verdien tatt ut for terminalspenningen, i perioden 10-30 ms. For denne perioden har systemet oppnådd stabilitet. Terminalspenningen ble

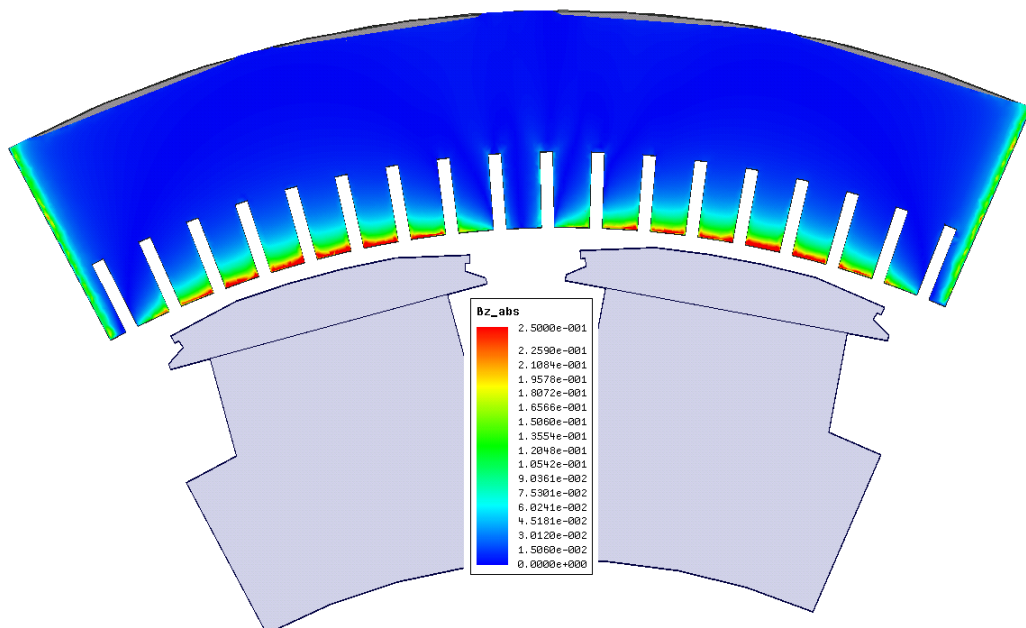
målt til 17.07 kV. Den originale terminalspenningen til generatoren er 16.6 kV.



Figur 35: Magnetfeltet fremstilt med vektorer i generatoren ved tomgang.

Figur 35 viser vektorene til magnetfeltet i generatoren for tomgang. Utsnittet er tatt ovenfra og ned på statoroverflaten ved tidspunkt $t = 0.02$. I dette plottet er det mulig å se hvordan magnetfeltet sirkulerer i generatoren. Siden det ikke er mulig å plote flukslinjene i 3D, er dette et viktig resultat siden det viser hvordan feltet i maskinen går. Ved å sammenligne med flukslinjene i figur 33 ser man at feltet sirkulerer på samme måte.

I denne oppgaven var det viktig å finne ut hvor påvirkningen av magnetfeltet i enderegionen var størst. Ved tomgang er det som sagt kun feltviklingene som skaper magnetfelt, dermed er forventet å finne høyest felt i nærheten av polene. Det var også viktig å skille mellom det radielle feltet og det aksielle feltet, siden det er det aksielle feltet som blir sett på som lekkfluks og som skaper problemene. Figuren under viser det aksielle feltet (z-komponenten) på overflaten av stator ved tomgang.



Figur 36: Den aksielle komponenten til magnetfeltet ved overflaten av stator.

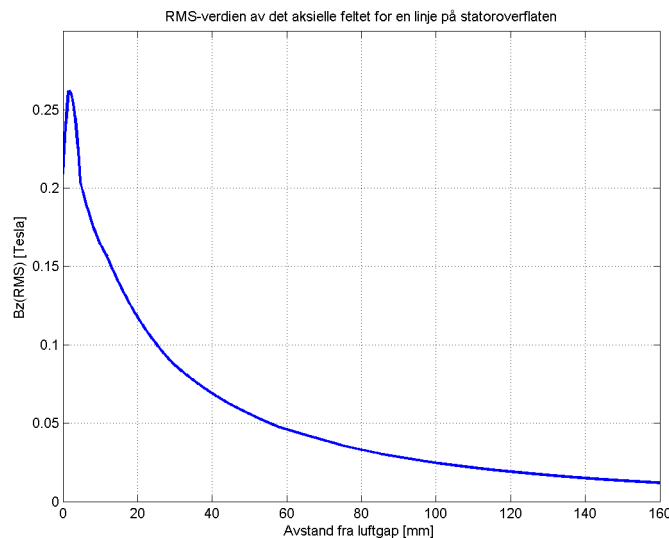
Figur 36 viser intensitetsplottet av det aksielle feltet i absoluttverdi for generatoren i tomgang. Utsnittet er gjort for tidspunktet $t = 0.02$. Det ble valgt å plotte for absoluttverdi for å få et bedre og mer synlig resultat på hvor det er felt og hvor det ikke er felt. Hvilken retning feltet går er ikke viktig her, da det er styrken på det aksielle feltet som er avgjørende for mengden av virvelstrømmer som induseres i statoroverflaten. For de to grensesjiktene er feltet høyt. Dette er ikke naturlig, og er en feil som muligens oppstår på grunn av grensebetingelsene. Som forventet er feltet sterkest ved luftgapet. Det kan også legges merke til at styrken til det aksielle feltet følger formen til polene, noe som er naturlig.

For at det skulle være enklere å sammenligne de forskjellige driftssituasjonene ble det valgt ut noen punkter som skulle gjelde for alle situasjonene. For disse punktene ble det målt både maksimal- og RMS-verdi for en periode med stasjonær drift. Disse punktene ble plassert på statoroverflaten og på pressfingrene (se avsnitt 9.5). Det ble kontrollert at den radiale avstanden til luftgapet var den samme for alle punktene, slik at resultatene skulle være sammenlignbare.

	T1	Q1	T2	Q2
B_z [T] (max)	0.0941	0.1286	0.0960	0.1182
B_z [T] (RMS)	0.0700	0.0934	0.0713	0.0882

Tabell 1: Z-komponenten til magnetfeltet ved ulike punkter.

Ut fra resultatene kan det konkluderes med flere ting. For det første er verdiene konsekvent høyere for Q-punktene. Dette er punktene som ligger mellom pressfingrene på statoroverflaten. For tomgang er RMS-verdien av det aksielle feltet i området 70-90 mT. Målepunktene ligger som sagt 30 mm i radiell avstand fra luftgapet.

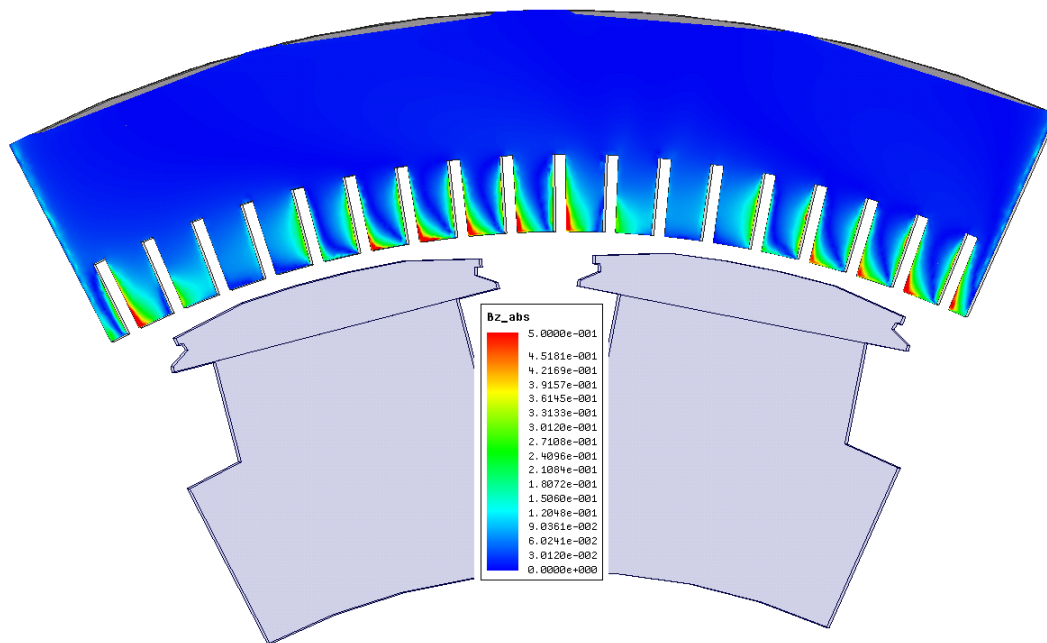


Figur 37: Det aksielle magnetfeltet for en linje på statoroverflaten.

Som nevnt i simuleringkapitlet ble det også valgt ut en linje på statoroverflaten for å undersøke det aksielle feltet på. Denne linja ble lagt fra luftgapet og innover mellom pressfingrene se avsnitt 9.5. Figur 37 viser hvordan det aksielle feltet avtar fra luftgapet og utover statoråket. Her har resultatene for en linje blitt regnet ut for perioden 10-30 ms, deretter har data fra disse blitt overført til Matlab hvor RMS-verdien til perioden har blitt utregnet og plottet for linjen. Som forventet avtar feltet raskt etterhvert som avstanden fra luftgapet øker.

10.3 Overmagnetisert

Det neste som skulle testes var kjøring av generatoren for nominell last. Bakgrunnen og simuleringsoppsettet kan leses i simuleringskapitlet, avsnitt 9.3. For dette oppsettet ble også terminalspenningen og fasestrømmen kontrollert. Resultatet var en terminalspenning på 16.87 kV og en fasestrøm på 11 916 A. Strøm- og spenningskurvene for simuleringen kan sees i appendiks 14.3.



Figur 38: Det aksielle magnetfeltet på overflaten av stator.

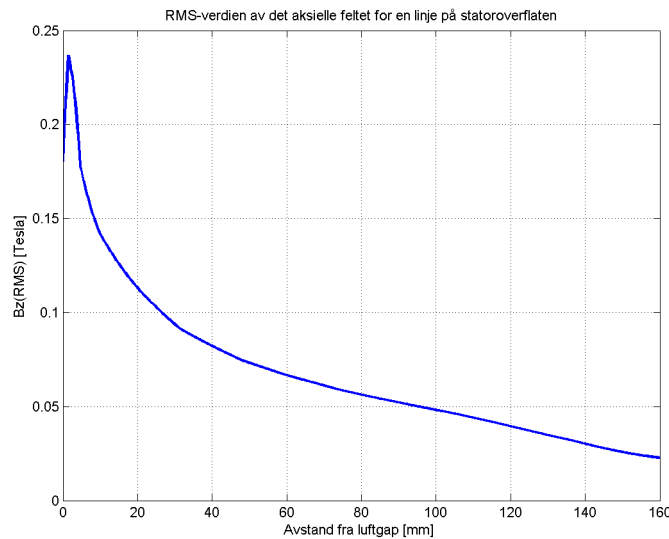
Intensitetsplottet i figur 38 viser den absolutte styrken på det aksielle magnetfeltet på overflaten til stator. Her er utsnittet gjort fra oversiden og ned på statoroverflaten ved $t = 0.02$. Dette plottet viser altså kun styrken på feltet ved dette tidspunktet. Som forventet er feltet påvirket på strømmen fra statorviklingene slik at fordelingen er svært andeledes sammenlignet med tomgang, som kan sees i figur 36. Det er svært vanskelig å lese av nøyaktige verdier for et intensitetsplott, derfor er først og fremst områdene som påvirket av feltet som er av interesse her.

Som nevnt i avsnittet om tomgang ble det laget en tabell for sammenligning av resultatene under forskjellige driftssituasjoner. Denne tabellen viser størrelsen på det aksielle feltet for utvalgte punkter for en periode og kan sees under.

	T1	Q1	T2	Q2
B_z [T] (max)	0.1578	0.1317	0.1596	0.1487
B_z [T] (RMS)	0.1159	0.0980	0.1200	0.1016

Tabell 2: Z-komponenten til magnetfeltet ved ulike punkter.

Som forventet kan man se at det aksielle feltet for denne driftssituasjonen er litt høyere enn for tomgang. Siden det tok en periode før resultatene ble stasjonær, er maksimalpunktene og RMS-verdien tatt ut fra perioden 10-30 ms. I tabell 2 er det verdt å legge merke til at feltet konsekvent er høyere på pressfingrene (T-punktene) sammenlignet med på statoroverflaten (Q-punktene). Dette er altså motsatt av resultatene for tomgang, se tabell 1.



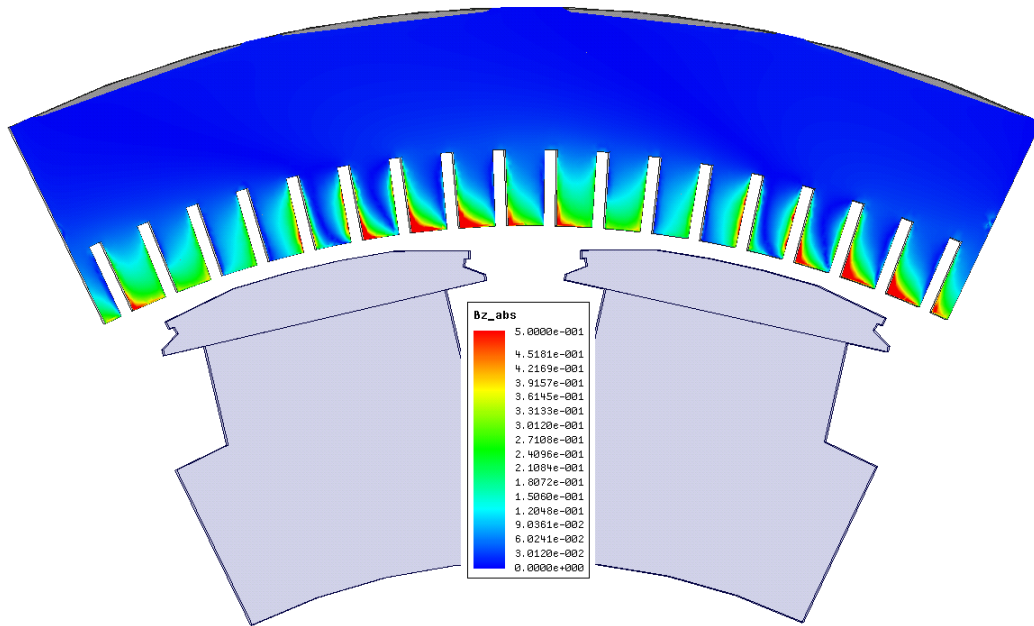
Figur 39: Det aksielle magnetfeltet for en linje ved statoroverflaten.

Som for tomgangskjøring ble det aksielle feltet for målelinja tatt ut. Figur 39 viser hvordan det aksielle feltet avtar med avstanden til luftgapet. Her er også resultatene for en periode (10-30 ms) tatt ut og RMS-verdien ble utregnet i Matlab.

10.4 Undermagnetisert

Det neste som ble testet var kjøring av generatoren i undermagnetisert tilstand. Oppsettet for denne simuleringen kan sees i delkapittel 9.4. For disse resultatene var det viktigst å sammenligne med driftssituasjonen der generatoren er overmagnetisert. Det var viktig å finne ut

av konsekvensene av å kjøre generatoren i undermagnetisert tilstand gjorde for resultatet. Verifiseringen av terminalspenningen og fasestrømmen resulterte i en terminalspenning på 16.84 kV og en fasestrøm på 11 098 A. Strøm- og spenningskurvene for simuleringen kan sees i appendiks 14.4.



Figur 40: Den aksielle komponenten til magnetfeltet ved overflaten av stator.

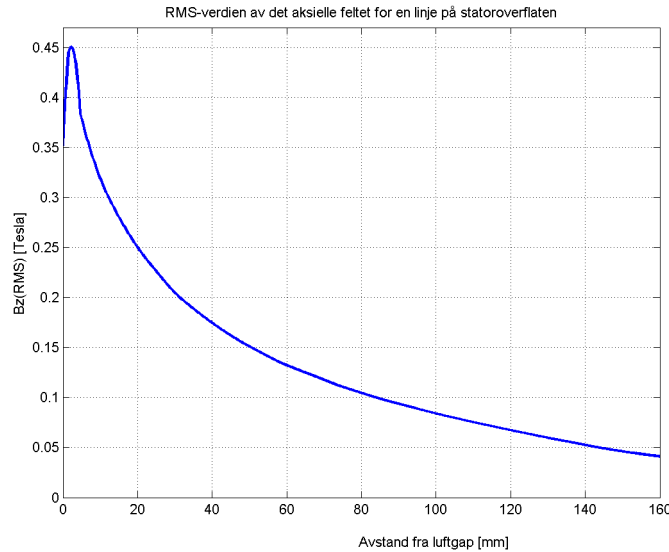
Som for de andre driftssituasjonene ble det generert et intensitetsplott for det aksielle feltet ved statoroverflaten ved tidsskrittet $t = 0.02$ s. Ved å gjøre en rask sammenligning er det tydelig at feltet er større for denne driftssituasjonen, sammenlignet med de andre.

	T1	Q1	T2	Q2
B_z [T] (max)	0.2627	0.2785	0.2915	0.3055
B_z [T] (RMS)	0.1711	0.1829	0.1832	0.1918

Tabell 3: Z-komponenten til magnetfeltet ved ulike punkter.

På samme måte som for tomgang og overmagnetisert, ble det aksielle feltet for de utvalgte punktene også her tatt ut for perioden 10-30 ms. Når disse resultatene sammenlignes med

de andre punktmålingene er det tydelig at det aksielle feltet er størst for undermagnetisert kjøring av generatoren. Disse resultatene samsvarer også med resultatene i tomgang, der feltet er størst ved statoroverflaten, men motstatt av resultatene for overmagnetisert, der feltet var høyest på pressfingrene.

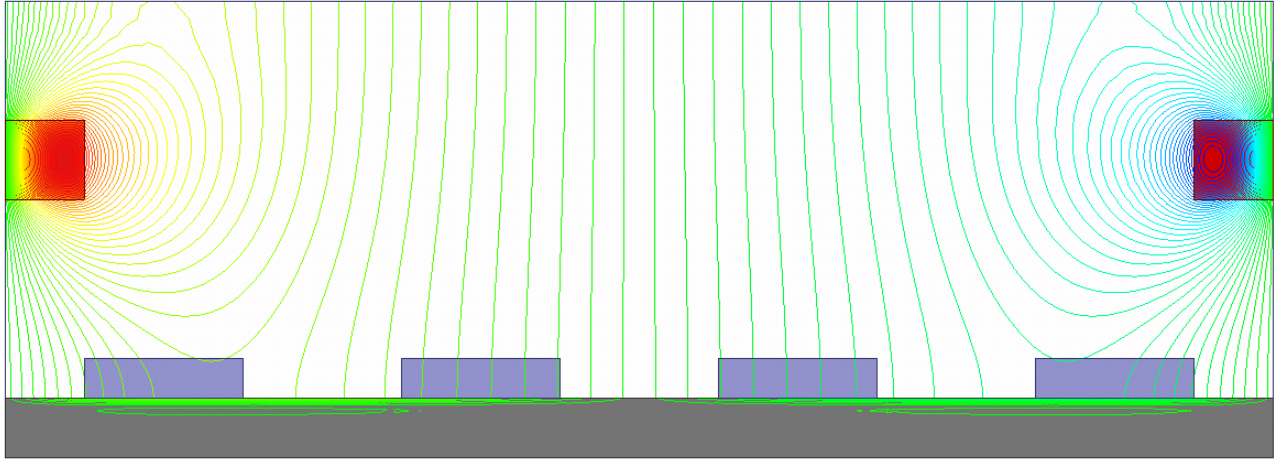


Figur 41: Det aksielle magnetfeltet for en linje ved statoroverflaten.

Figur 41 viser på samme måte som for tomgang og overmagnetisert kjøring hvordan feltet avtar med avstanden fra luftgapet. Dette plottet har samme form som de andre linjeplottene. Det man kan legge merke til her er at feltet er klart høyere enn for tomgang og overmagnetisert tilstand.

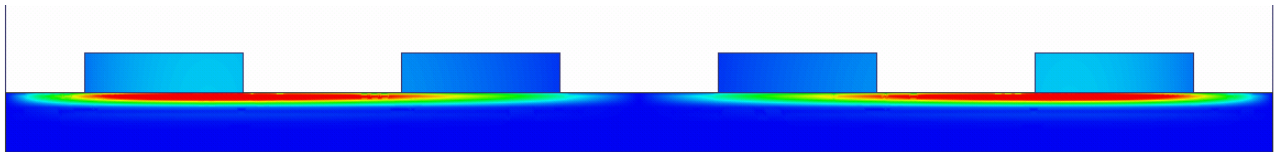
10.5 Fluks og virvelstrømmer i enderegionen

For å få et nærmere overblikk over fluks og virvelstrømmer for endeområdet i stator ble det som nevnt i simuleringskapitlet gjennomført en 2D-simulering av statoroverflaten med et påtrykt aksielt felt.



Figur 42: Fluks ved statoroverflaten.

Figur 42 viser hvordan fluksen fordeler seg ved statoroverflaten for det aksielle feltet som den blir påtrykt. Spolen over statorutsnittet gjør at det oppstår et tilnærmet uniformt aksielt felt som penetrerer statoroverflaten.



Figur 43: Fordelingen av virvelstrømmer.

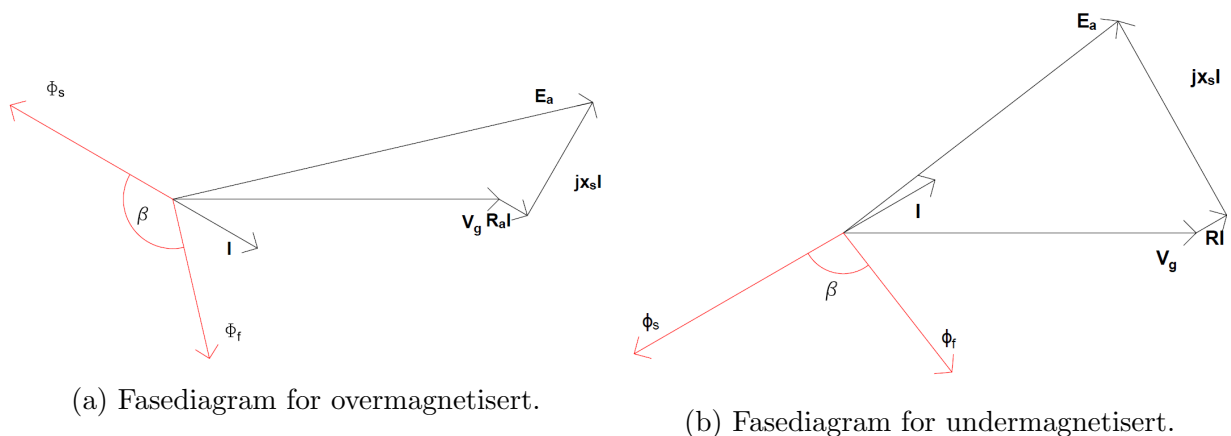
Figur 43 viser et utsnitt av hvordan virvelstrømmene fordeler seg ved statoroverflaten samt pressfingrene. Her er det absoluttverdien til virvelstrømmene som er plottet, siden retningen til virvelstrømmene ikke spiller noen rolle når det kommer til oppvarming. For dette intensitetsplottet er det ikke tatt med noen skala for hvor stor strømtettheten for virvelstrømmene er. Grunnen til dette er at denne 2D-simuleringen ikke er helt realistisk, og kun skal brukes kvantitativt og ikke kvalitativt.

11 Diskusjon

Dette kapitlet vil bli brukt til å diskutere de viktigste resultatene fra resultatkapitlet. Det vil komme mer grundige forklaringer på de oppnådde resultatene, sammenligninger av forskjellige resultater, samt diskusjon rundt ulike feilkilder.

11.1 Aksielt felt som funksjon av driftssituasjon

Gjennom resultatene var det tydelig at effekten av det aksielle magnetfeltet i endeområdet av stator var størst i undermagnetisert tilstand. Dette kan tydelig sees i plottene av komponenten B_z på overflaten for overmagnetisert kjøring (figur 38) og for under magnetisert kjøring (figur 40), samt tabellene 2 og 3. I utgangspunktet var det forventent at magnetfeltet ville være størst ved overmagnetisert kjøring, siden feltstrømmen da er større enn for undermagnetisert. Men når dette viste seg å ikke være tilfellet måtte det gjøres undersøkelser på hvorfor dette ikke var utfallet. I et system der det eksisterer to separate magnetfelt er det ikke mulig å kun legge bidragene fra dem sammen, man må også ta hensyn til retningen til magnetfeltene. For å undersøke dette nærmere ble fasediagrammene for de to driftssituasjonene tegnet opp. I disse diagrammene ble også vektorene til de to magnetfeltetene som opptrer i maskinen tatt med. Vektordiagrammene kan sees i figuren under.



Figur 44: Fasediagram for over- og undermagnetisert tilstand.

Fasediagrammene over er kun tegnet for rund rotor selv om generatoren i modellen har utpregede poler. Denne fremstillingen er gyldig uavhengig av rotordesign, da konklusjonen blir den samme. De røde vektorene representerer de ulike magnetfeltene. Lengdene til magnetfeltvektorene har ingen referanse og er kun for å gi et bilde av situasjonen, vinklene deres derimot

stemmer med virkeligheten. Feltet fra rotorviklingene, Φ_f , står 90 grader på den induserte spenningen E_a . Fra grunnleggende elektrisk maskin-teori er det vanlig å legge sammen vektorene til magnetfeltene til de ulike fasene til et resulterende magnetfelt, på samme måte som tre spenningsfaser legges sammen til en resulterende spenningsvektor. Det resulterende magnetfeltet fra stator, Φ_s , ligger 180 grader bak den resulterende fasestrømmen.

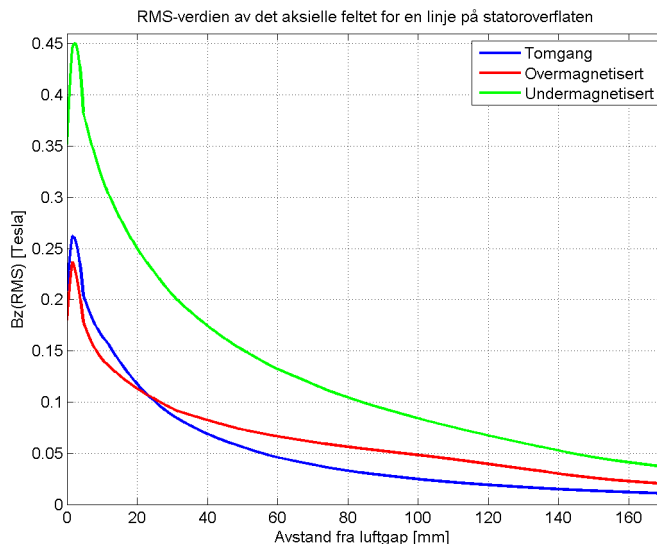
Ut fra figur 44 er det tydelig at vinkelen, β , mellom magnetfeltene fra rotor og stator er mye større ved overmagnetisert enn ved undermagnetisert kjøring. Siden β for overmagnetisert er nærmere 180 grader vil de to magnetfeltene til en viss grad utligne hverandre, slik at det totale feltet blir lavere. Siden denne utligningen er mye mindre for undermagnetisert kjøring, vil det totale feltet bli større i denne driftssituasjonen selv om feltet fra feltviklingene er mindre. Dette fører videre til at det aksielle magnetfeltet blir større for undermagnetisert kjøring av generatoren.

11.2 Punktmålingene

Tabellene 1, 2, 3 i resultatkapitlet viser styrken for det aksielle feltet for utvalgte punkter. Som resten av resultatene tilsier er feltet høyest for undermagnetisert kjøring, deretter overmagnetisert og lavest for tomgang. Som nevnt i avsnitt 9.5 er det to målepunkter med samme radielle avstand på en statortann. Et punkt på oversiden av pressfingeren (T-punkt) og et på statoroverflaten (Q-punkt). For tomgangs- og for undermagnetisert kjøring er det aksielle feltet høyest på statoroverflaten, mens for overmagnetisert kjøring er feltet høyest på pressfingrene. Det er usikkerhet rundt hvor det ikke er en klar sammenheng mellom resultatene for ulike driftssituasjoner. I utgangspunktet var det forventet at feltet skulle være høyere ved statoroverflaten enn på pressfingeren. Grunnen til dette er at pressfingeren består av rustfritt stål med en relativ permeabilitet på 1, altså den samme som for luft. På grunn av det varierende magnetfeltet i enderegionen vil det oppstå virvelstrømmer i pressfingrene. Disse virvelstrømmene setter opp et magnetfelt som gjør at det aksielle magnetfeltet går rundt pressfingrene og ned på stator, noe som gjør at det forventede feltet er størst her. Men siden resultatene i denne rapporten spriker kan det verken konkluderes med det ene eller det andre. Hvis det hadde vært mulig å lage flukslinjer for 3D-modeller i Maxwell kunne det blitt undersøkt nærmere hvordan magnetfeltet går rundt pressfingrene. Hvis man antar at teorien om at feltet søker området mellom pressfingrene stemmer, vil det gjøre at dette området er utsatt for et høyt aksielt felt noe som igjen øker faren for store lokale virvelstrømtap.

11.3 Linjeplott

For å lettere sammenligne linjeplottene for de ulike driftssituasjonene ble det bestemt å plote for alle situasjonene i et plott. Resultatet av dette kan sees i figuren under.



Figur 45: Det aksielle magnetfeltet for en linje ved statoroverflaten for alle driftssituasjonene.

Figur 45 viser linjeplottet for alle de tre driftssituasjonene. Som forventet er feltet sterkest nærmest luftgapet og avtar jo lengre bort man kommer. Som de andre resultatene viser, er det aksielle feltet klart kraftigst for undermagnetisert drift. Det som er mest overraskende er at feltet er nesten like kraftig både for tomgangs- og for overmagnetisert kjøring. Dette tyder på at selv om rotorfeltet er kraftigere for overmagnetisert kjøring ($I_f = 1920$ A) enn for tomgangskjøring ($I_f = 876$ A) vil motvirkningen av statorfeltet føre til at det totale feltet i overmagnetisert kjøring faktisk blir omentrent like stort som ved tomgangskjøring. Et annet viktig poeng er at ved luftgapet der rotorfeltet er den viktigste bidragsyteren er det tomgangsfeltet som er størst, men etterhvert, jo lengre ut på statoråket man kommer vil det aksielle feltet være størst for undermagnetisert kjøring. Dette lar seg logisk forklare med at påvirkningen fra endeviklingene er større jo lengre ut på statoråket man kommer, og siden det ikke går noen strøm i endeviklingene i tomgangskjøring, vil det ikke bli noen påvirkning fra dem i denne situasjonen.

For linjeplottene må også den lille *peaken* helt i starten av plottet kommenteres. Som det kan sees i figur 45 er det en liten peak etter noen millimeter for alle driftssituasjonene. Det kan være to årsaker til dette. Linjen som feltet er plottet etter starter helt ytterst på stator-

tannen og går innover på statoråket. Noen millimeter inn på statoråket ligger pressfingrene og dermed kan det være at mesteparten av feltet da søker inn mot området mellom pressfingrene, mens det tidligere fordelte seg jevnt på statortannen. En annen forklaring kan være at Maxwell har problemer med å lage riktige løsninger ved kanten av stator. Generelt etter å ha jobbet med dette programmet er det tydelig at løsninger nær en kant eller mellom ulike objekter, kan være usikre. Dermed kan dette også være en grunn for at det kommer en unaturlig peak.

11.4 Feilkilder

Det er flere feilkilder som må tas i betraktning når resultatene i denne oppgaven skal verifiseres. Den første feilkilden er selve utformingen av generatoren i Maxwell. Modellen er basert på en av Statkraft sine generatorer, men antall viklinger er økt fra 114 til 126 for å kunne bruke symmetriske grensebetingelser. Dette gjør at stålmengden i maskinen ikke er lik den originale. Samtidig som det er gjort endringer for den modellerte generatoren ble de originale merkeverdiene for effekt, strøm og spenning brukt. En feilkilde kan da være at de utregnede lastene i den eksterne kretsen ikke har riktig verdi i forhold til effekten til den modellerte generatoren. En annen feilkilde som oppstår er at synkronreaktansen for generatormodellen ikke blir den samme siden geometrien blir endret. Men siden resultatene både i prosjektoppgaven og masteroppgaven er realistiske og stemmer godt med Statkraft sine egne verdier kan denne feilkilden sees på som relativt liten. Andre deler av utformingen av generatoren er også en mulig feilkilde. På de tekniske tegningene gitt av Statkraft var det mange små detaljer som ikke ble implementert i modellen. Dette gjelder spesielt for rotor og delvis for endeviklingene. De detaljene som ikke ble implementert ble sett på som mindre betydningsfulle eller svært vanskelig å utforme. Konsekvensene av dette blir sett på mindre relevant i det store bildet og vil neppe påvirke sluttresultatet i stor grad.

Selv om det forelå mye i de tekniske beskrivelsene av generatoren manglet det informasjon om materialene som ble brukt i rotor, stator og for pressanordningen. Dette førte til at antagelser måtte brukes når materialtypene skulle defineres. Ved å velge et materiale med for eksempel for lav permeabilitet ville det påvirke resultatet i stor grad. I arbeidet med prosjektoppgaven ble forskjellige ståltypen utprøvd i rotor og stator, slik at realistiske verdier ble oppnådd. En annen viktig antagelse rundt materialene ble gjort i forbindelse med å redusere feltstrømmen for undermagnetisert kjøring. Her ble det antatt at den induerte spenningen er proporsjonal med feltstrømmen i rotor. Dette gjelder kun områder der mate-

rialene i maskinen ikke er i nærheten av metningsområdet. For overmagnetisert generator er maskinen i metningsområdet og dette vil si at antagelsen i utgangspunktet er feil. Ettersom testene i 2D-modellen stemte godt for terminalspenningen og fasestrømmen ble det bestemt å bruke den utregnede verdien for feltstrømmen.

For hver simulering setter Maxwell opp et mesh med noder som programmet lager løsninger for. Hvis dette meshet er for grovt vil løsningene bli for unøyaktige. (I kapittel 7 er det en gjennomgang av prosessen for å komme fram til et riktig mesh). Det er ingen generell måte å avgjøre om meshet er grundig nok. Selv om iterasjonsprosessen som ble foretatt var grei, kan det ikke sies med sikkerhet om meshet ble fint nok. Men å øke antall noder var uaktuelt da simuleringstiden allerede var lang, hele fem døgn. Hvis simuleringene hadde blitt kjørt på en kraftigere prosessor, kunne meshet blitt gjort enda finere for å være enda mer sikker på at resultatet ble riktig. Meshet er som nevnt tidligere konstant for hvert tidsskritt. Men også lengden på hvert tidsskritt er en mulig feilkilde. Med en rotasjonshastighet på 428.6 rpm og et tidsskritt på 0.5 ms, vil rotoren forflytte seg ca. 1.3 grader per tidsskritt noe som gjør at rotoren ikke dekker hele statoren med en glidende bevegelse. Selv om dette er tilfelle, er skrittlengden såpass kort at det ikke skal utgjøre noen stor feilkilde når resultatene regnes ut for en hel periode.

Selv om det er mange feilkilder i denne oppgaven er det viktig å huske på at simuleringsmodellen er den samme for alle driftssituasjonene. Det vil si at selv om resultatene fra hver enkelt simulering kan være unøyaktige, for eksempel styrken på magnetfeltet på et punkt, vil den relative feilen være lik for alle situasjoner. Dermed er det slik at mange av feilkildene ikke gjelder for sammenligninger, men mer for enkelt resultat.

En svært viktig feilkilde som påvirker alle simuleringene og gjør sammenligner mindre gyldig er den transiente oppstarten av en simulering. I figur 24 i verifiseringskapitlet ser man hvordan strømmene trenger tid før de stabiliserer seg. Dette vil si at det ikke er sikkert at fullstendig steady state er oppnådd i den perioden resultatene er tatt ut. For å være sikker på at resultatene hentes ut ved steady state kunne det vært lurere å kjøre simuleringen lengre, samt hentet RMS-verider ut fra to perioder fremfor en. Problemet med dette er at simuleringstiden for 30 ms var fem døgn, noe som gjorde at det ikke var aktuelt å kjøre lengre simuleringer. Hvor stor denne påvirkningen har vært på resultatene er vanskelig å si, men dette er absolutt en mulig feilkilde.

11.5 Fluks og virvelstrømmer i enderegionen

I delkapitel 10.5 kan det sees flukslinjer og induerte virvelstrømmer for enderegionen av stator ved et påtrykt aksielt felt. For flukslinjene i figur 42 ser man hvordan flukslinjene fordeler seg i stator. Siden permeabiliteten er betydelig lavere i y-retningen på grunn av lamineringslagene går flukslinjene mest i x-retningen når de kommer inn i stator, noe som gjør at inntregningsdybden blir lav, sammenlignet med lengden til stator. Siden fluksen kun opererer i de øverste lagene av stator, vil også virvelstrømmene kun befinne seg helt øverst i stator. Dette kan sees i figur 43. Disse simuleringene viser og bekrefter at det er de øverste lagene i stator som er mest utsatt for oppvarming som følge av virvelstrømmer.

Inntregningsdybden til et material kan utregnes gjennom formelen:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

Der ω er vinkelhastigheten, μ er permeabiliteten og σ er konduktiviteten til materialet. Dette gjør at det er mulig å regne ut inntregningsdybden til virvelstrømmene. For pressfingrene er den relative permeabiliteten 1 og konduktiviteten er 1 100 000 s/m. Dette gir en inntregningsdybde på:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{(2\pi 50) \cdot (1.4\pi 10^{-7}) \cdot 1100000}} = 0.0678 \text{ m} = 6.8 \text{ cm. for det rustfrie stålet i stator.}$$

For stator er permeabiliteten ikke konstant, men man kan regne med en relativ permeabilitet på ca. 1000. Konduktiviteten til stålet i stator er 2 000 000 s/m. Dette gir en inntregningsdybde på:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{(2\pi 50) \cdot (1000 \cdot 4\pi 10^{-7}) \cdot 2000000}} = 0.0016 \text{ m} = 1.6 \text{ mm. altså en mye lavere inntregningsdybde.}$$

For pressfingrene er inntregningsdyben ganske stor. Dette gjør at virvelstrømmene fordeler seg på et større område, noe som fører til at den termiske oppvarmingen blir mye lavere her. For stator derimot er inntregningsdyben lavere, dermed vil varmetapene være større for stator.

Tidligere i oppgaven ble det lansert en teori om at det aksielle feltet går rundt pressfingrene. Denne teorien bygde på at de induerte virvelstrømmene i pressfingrene setter opp et magnetfelt som gjør at det aksielle feltet tvinges til å gå rundt pressfingrene. Gjennom resultatene i delkapitel 10.5 virker ikke dette å være tilfellet. Grunnen til dette er at virvelstrømmene i pressfingrene fordeler seg for et større område, noe som gjør at magnetfeltet som oppstår fra virvelstrømmene blir lavt. Dermed går det aksielle feltet rett gjennom pressfingrene, slik at det aksielle feltet blir omentrent det samme både ved statoroverflaten og ved pressfingrene. Samtidig er denne modellen ikke et nøyaktig bilde av det som skjer for en fullstendig modell

av hele generatoren. Dermed er det ikke mulig å gi noe direkte konklusjon på bakgrunn av denne simuleringen.

12 Konklusjon

I denne rapporten har det aksielle magnetfeltet for statoroverflaten blitt undersøkt for forskjellige driftssituasjoner. De tre situasjonene var tomgang, undermagnetisert og overmagnetisert kjøring av generatoren. Det ble foretatt forskjellige målinger av det aksielle feltet for de forskjellige situasjonene.

Ut fra de forskjellige resultatene som kan sees i resultatkapitlet, er det ingen tvil om at det aksielle feltet er størst ved undermagnetisert driftssituasjon. Grunnen til dette er at magnetfeltet fra stator og rotor motvirker hverandre i en mindre grad her, sammenlignet med overmagnetisert drift. Faktisk er motvirkningen mellom rotor- og statorfeltet så stor at det aksielle feltet ved overmagnetisert kjøring nesten ikke er større enn for tomgangskjøring.

Det ble målt RMS-verdier for målepunktene på statoroverflaten 30 mm inn på statoråket. Her ble det målt et aksielt felt i området 180-190 mT for undermagnetisert tilstand, 90-100 mT for overmagnetisert, mens for tomgang ble feltet målt til 80-90 mT. Videre var ikke resultatene konsekvent med tanke på om feltet var høyest på pressfingrene eller ved statoroverflaten.

Det siste som ble undersøkt var hvordan flukslinjene og virvelstrømmene fordeler seg i ende-regionen. Fluksen har en relativ lav inntrengingsdybde som følge av at permeabiliteten er lavere i lengderetningen for stator. Dette gjør at også virvelstrømmene kun opererer helt i overflaten. Videre var det ingen ting som tydet på at flukslinjene går rundt pressfingrene som følge av det lokale feltet som settes opp på grunn av virvelstrømmene i pressfingrene.

13 Videre arbeid

Gjennom denne oppgaven har magnetfeltet i enderområdet av stator blitt analysert i forskjellige driftssituasjoner for stasjonær drift. Underveis i prosjektet ble det konkludert med at påvirkningen av magnetfeltet er størst ved undermagnetisert generator. Det er mye mer som kan gjøres rundt denne problemstillingen. Først av alt ville det vært interessant å kjøre noen simuleringer med kortslutninger i nettet. En av Statkraft sine største generatorer, Svartisen, hadde i 2006 et havari som følge av kraftig oppvarming i endepartiet. Dette førte til deformering og en reparasjonstid på flere måneder [7]. Dette problemet oppsto under flere kortslutninger i tilkoblingsnettet under en kraftig vinterstorm. Ved kortslutninger (fase-fase) eller (jord-fase) vil det gå en svært stor strøm i de berørte fasene, noe som vil et kraftig magnetfelt rundt viklingene til de kortsluttede fasene. Dette kan igjen føre til at det aksielle feltet i generatoren blir farlig høyt. Hvordan en kortslutning skal implementeres i Ansys Maxwell er litt uklart, men det er en mulighet å kjøre en simulering der en av fasene er direkte jordet i den eksterne kretsen. For at dette skal bli en reell simulering, må det regnes kortslutningsimpedanser for det lokale nettet ved generatoren. Ved implementering av en driftssituasjon med kortslutning i nettet, må det også legges inn dempevilklinger i rotor, slik at effekten av disse kommer med i beregningen.

Selv om resultatene gav en god indikasjon på hvilke driftssituasjoner som var mest kritisk for generatoren, kunne det gjerne ha vært testet for flere driftssituasjoner, slik at resultatene var sikrere. Siden simuleringstiden til modellen var fem døgn, var det ikke tid til å teste modellen for flere driftssituasjoner i prosjektet. Det hadde spesielt vært interessant å teste en situasjon hvor effektfaktoren hadde vært null, og generatoren kun hadde fungert som en synkronkompensator. Ved en slik situasjon ville magnetfeltene fra rotor og stator vært i fase, slik det resulterende feltet ville blitt svært kraftig.

En annen ting som kunne ha blitt utført med denne modellen er ulike metoder for skjerming av feltet. Det er utført eksperimenter der det er lagt inn metallskjermer med god magnetisk ledningsevne for å skjerme stator for det varierende magnetfeltet. Det hadde vært svært interessant og sett hvor mye feltet kan reduseres ved ulike skjermingsmuligheter og design. Et annet designknep som er brukt for noen maskiner er *step-back* på statoroverflaten. For dette designet er statortennene trappeformet helt ytterst ved luftgapet. Dette blir gjort for å redusere feltet helt ytterst på statortennene.

14 Appendiks

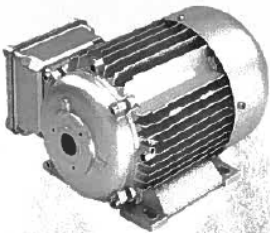
14.1 Datablad for spesifisering av stål

Typical data for SURA® M300-35A

T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz	W/kg at 100 Hz	W/kg at 200 Hz	W/kg at 400 Hz	W/kg at 1000 Hz	W/kg at 2500 Hz
0,1	0,03	0,07	30,9	0,04	0,09	0,23	1,07	4,45
0,2	0,08	0,17	40,2	0,17	0,40	1,00	4,08	16,1
0,3	0,15	0,30	46,4	0,35	0,85	2,15	8,48	33,6
0,4	0,24	0,45	52,1	0,58	1,41	3,61	14,0	56,9
0,5	0,35	0,62	57,9	0,84	2,06	5,36	20,9	86,6
0,6	0,48	0,82	64,4	1,14	2,81	7,42	29,2	124
0,7	0,61	1,05	72,0	1,46	3,66	9,75	39,0	170
0,8	0,76	1,31	81,1	1,83	4,61	12,4	50,6	227
0,9	0,92	1,63	92,6	2,23	5,65	15,4	64,1	297
1,0	1,10	2,03	108	2,66	6,80	18,8	79,8	382
1,1	1,30	2,55	130	3,16	8,09	22,5	98,0	
1,2	1,54	3,32	168	3,72	9,54	26,8		
1,3	1,82	4,71	250	4,39	11,2	31,6		
1,4	2,20	8,61	510	5,23	13,4	37,7		
1,5	2,62	23,7	1440	6,22	15,7	44,3		
1,6	2,98	64,1	3490					
1,7	3,25	138	6700					
1,8	3,41	255	11300					

Loss at 1.5 T, 50 Hz, W/kg	2,62
Loss at 1.0 T, 50 Hz, W/kg	1,10
Anisotropy of loss, %	10
Magnetic polarization at 50 Hz	
H = 2500 A/m, T	1,55
H = 5000 A/m, T	1,65
H = 10000 A/m, T	1,78
Coercivity (DC), A/m	45
Relative permeability at 1.5 T	830
Resistivity, μΩcm	50
Yield strength, N/mm ²	370
Tensile strength, N/mm ²	490
Young's modulus, RD, N/mm ²	185 000
Young's modulus, TD, N/mm ²	200 000
Hardness HV5 (VFN)	185

*RD represents the rolling direction
TD represents the transverse direction
Values for yield strength (0,2 % proof strength)
and tensile strength are given for the rolling direction
Values for the transverse direction are approximately 5% higher*



cogent
Surskammars Bruks AB

7

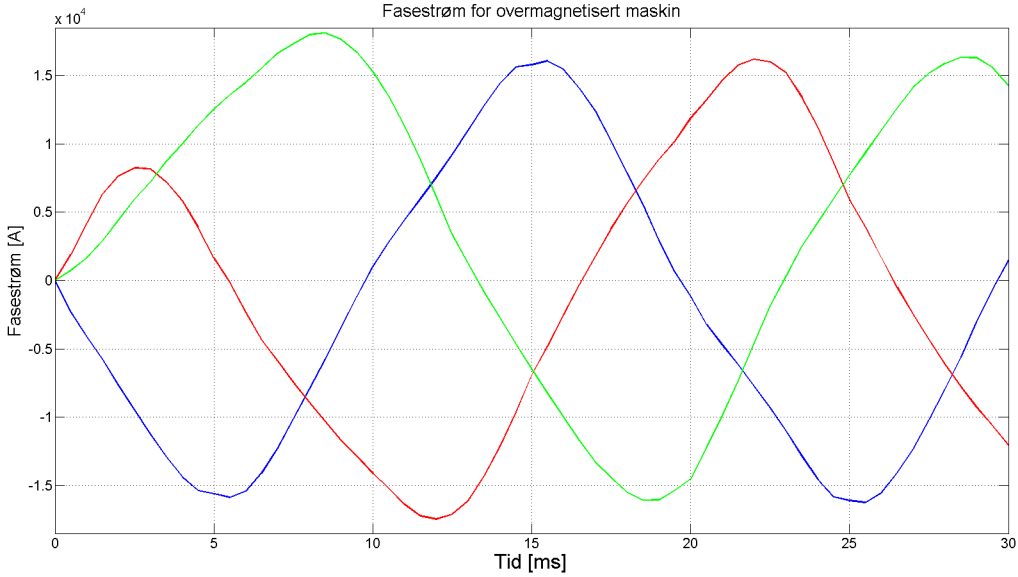
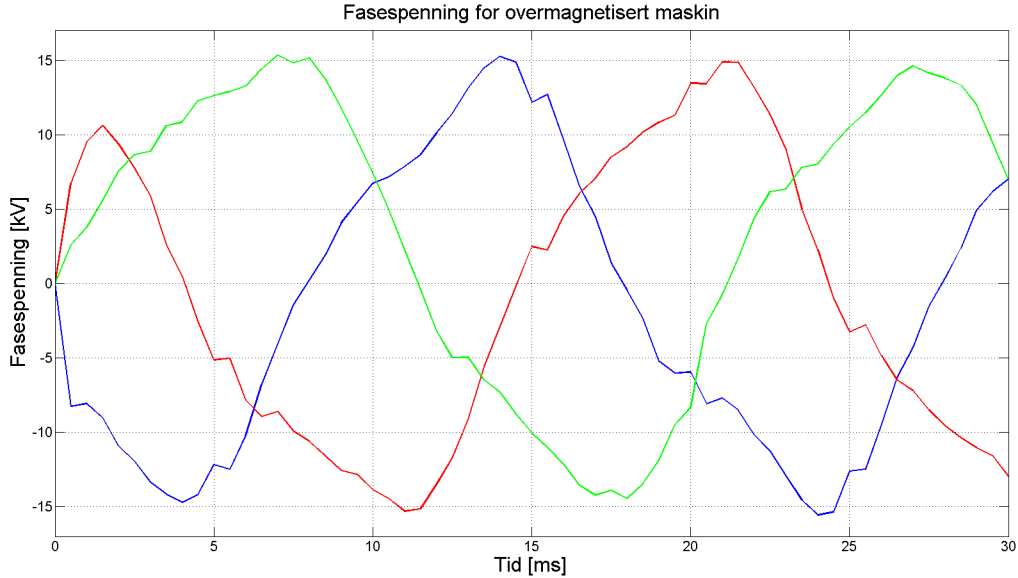
Figur 46: Dette databladet ble brukt for å spesifisere stålet i stator.

14.2 B-H-kurven for ståltypen brukt i rotor *steel_1010*

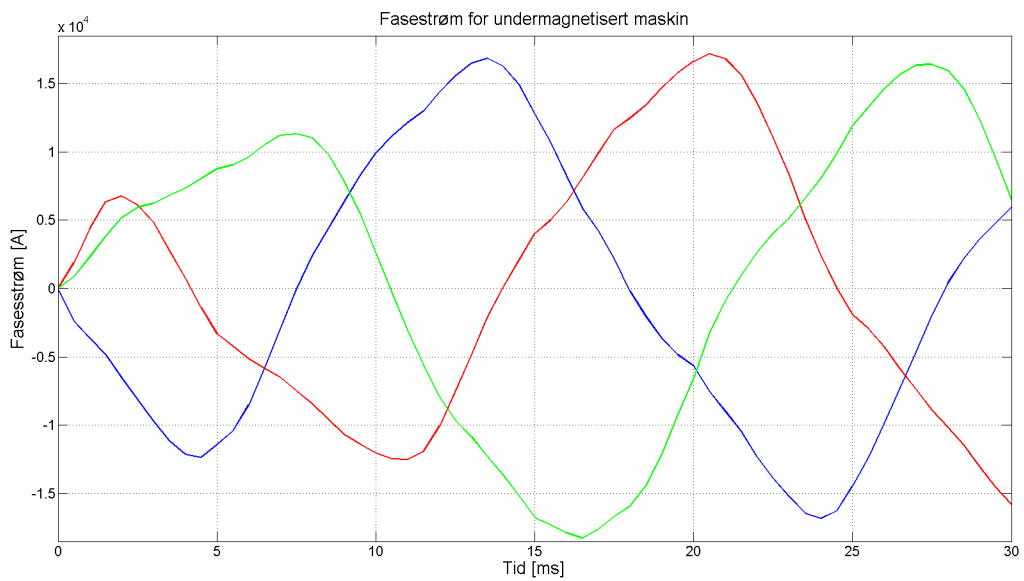
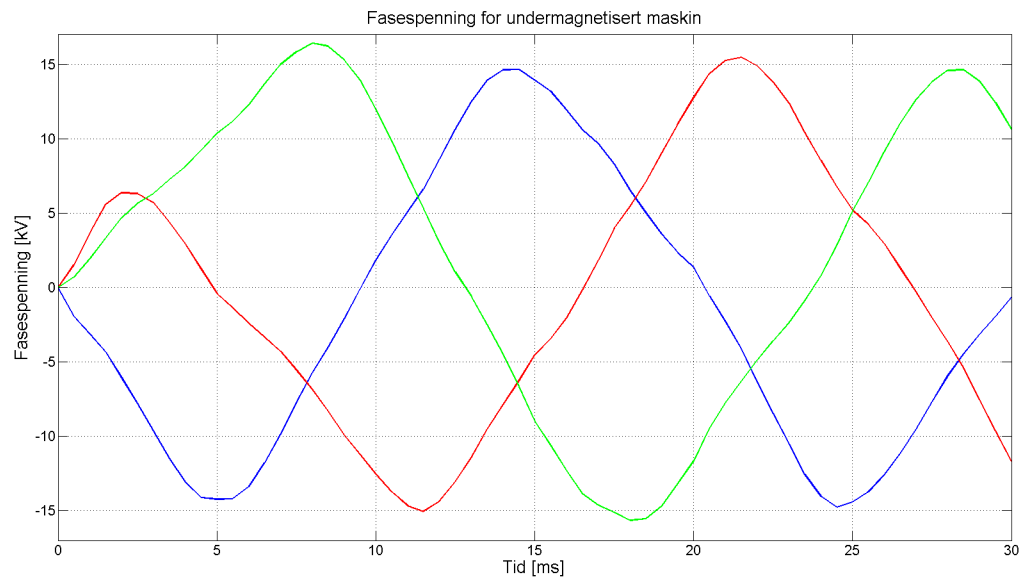
H	B
0	0
238,7	0,2003
318,3	0,3204
358,1	0,40045
437,7	0,50055
477,5	0,5606
636,6	0,7908
795,8	0,931
1114,1	1,1014
1273,2	1,2016
1591,5	1,302
2228,2	1,4028
3183,1	1,524
4774,6	1,626
6366,2	1,698
7957,7	1,73
15915,5	1,87
31831	1,99
47746,5	2,04
63662	2,07
79577,5	2,095
159155	2,2
318310	2,4

Figur 47: Disse verdiene var innebygd i programmet for materialet *steel_1010* som ble brukt i rotoren.

14.3 Verifisering av simuleringsoppsettet for overmagnetisert kjøring



14.4 Verifisering av simuleringsoppsettet for undermagnetisert kjøring



14.5 Utregning av passiv last ved nominell kjøring av generatoren

Utregning av den passive lasten ved nominell drift gjøres lettest ved å bruke et pu-system. Her velges $V_{ref} = 16.6$ kV og $S_n = 320$ MVA som referanse for henholdsvis spenning og effekt. Effektfaktoren ved nominell last er 0.86 (*lagging*) = -30.86° .

$$S_n = 320 \angle -30.86^\circ \text{ MVA} = 0.86 - j0.51 \text{ pu.}$$

Videre kan den nominelle lasten til den eksterne kretsen regnes ut vha. generatorspenningen og lasten:

$$Z_{Load} = \frac{V_g^2}{S_n} = \frac{1.0^2}{0.86 - j0.51} = 1.0 \angle 30.86^\circ \text{ pu.}$$

Siden verdiene må legges inn i ohm og henry i den eksterne kretsen, må referansen til impedansen for systemet regnes ut for å finne de reelle verdiene for systemet.

$$Z_{ref} = \frac{V_g^2}{S_n} = \frac{(16.6 \cdot 10^3)^2}{320 \cdot 10^6} = 0.861 \frac{\Omega}{\text{pu}}$$

Dette gir en nominell last på: $Z_{Load} = Z_{Load} \cdot Z_{ref} = 0.741 + j0.439 \Omega$. Videre må induktansen gjøres om til henry for å legges inn i den eksterne kretsen.

$$L = \frac{0.439}{\omega} = 1.397 \text{ mH.}$$

Ved den nominelle lasten kan fasestrømmen finnes gjennom:

$$I = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot V_g} = \frac{320 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 16.6 \cdot 10^3} = 11\,130 \text{ A.}$$

14.6 Reduksjon av feltviklingsstrøm

Antar at den induserte spenningen er proporsjonal med strømmen i feltviklingene. Antar videre at forskjellen mellom den utregnede lengden på E_a varierer lite om det regnes med rund rotor eller med utpregede poler.

$$\underline{E}_a = \underline{V}_g + (R_a + jx_d) \cdot \underline{I}$$

R_a kan neglisjeres da, $R_a \ll x_d$.

$$\underline{E}_{a,N} = \underline{V}_g + jx_d \cdot \underline{I}$$

$$\underline{E}_{a,N} = 1.0 + j1.15 \cdot 1.0 / \underline{-30.68^\circ}$$

$$\underline{E}_{a,N} = 1.0 + 0.587 + j0.989 = 1.587 + j0.989 = 1.870 / \underline{31.93^\circ}$$

Lengden til den induserte spenningen ved nominell drift, $E_{a,N} = 1.870$. Nå må lengden til den induserte spenningen, $E_{a,2}$ ved *leading* effektfaktor finnes.

$$\underline{E}_{a,2} = \underline{V}_g + jx_d \cdot \underline{I}$$

$$\underline{E}_{a,2} = 1.0 + j1.15 \cdot 1.0 / \underline{30.68^\circ}$$

$$\underline{E}_{a,2} = 1.0 - 0.587 + j0.989 = 0.413 + j0.989 = 1.072 / \underline{67.33^\circ}$$

Lengden til den induserte spenningen ved *leading* effektfaktor er $E_{a,2} = 1.072$. Nå kan den nye feltstrømmen finnes, gjennom å finne forholdet mellom de to induserte spenningene, Δ .

$$\Delta = \frac{E_{a,2}}{E_{a,N}} = \frac{1.072}{1.870} = 0.57. \text{ Den vil si at den nye feltstrømmen blir } I_{f,2} = I_{f,N} \cdot 0.57.$$

14.7 Utregning av polhjulsinkel for nominell last

Antar at terminalspenningen, V_t , er konstant $16.6 \text{ kV} = 1.0 \text{ pu}$. Effektreferanse brukt ved utregningene er den nominelle effekten $S_n = 320 \text{ MVA}$. Siden maskinen opererer med nominell last, er strømmen i systemet $I = 1.0 \text{ pu}$. Nominell effektfaktor er 0.86 lagging, noe som vil si en vinkel på $\phi = 30.68^\circ$.

Siden denne utregningen gjelder for en generator med utpregede poler, må utregningen deles opp i dq-referanse. For å finne I_d og I_q må δ_g bestemmes gjennom å plasere q-aksen i forhold til V_t , noe man finner ved å regne ut E_Q .

$$\begin{aligned}\underline{E_Q} &= \underline{V_g} + (R + jX_q) \cdot \underline{I} \\ \underline{E_Q} &= 1.0 + (0.00196 + j0.8) \cdot \underline{I} / -30.68^\circ \\ \underline{E_Q} &= 1.0 + 0.8 / 89.86^\circ \cdot 1.0 / -30.68^\circ \\ \underline{E_Q} &= 1.0 + 0.8 / 59.18^\circ \\ \underline{E_Q} &= 1.0 + 0.410 + j0.687 \\ \underline{E_Q} &= 1.410 + j0.687 \\ \underline{E_Q} &= 1.568 / 25.98^\circ\end{aligned}$$

Det vil si at $\delta_g = 25.98^\circ$. For å finne I_d og I_q , må α regnes ut.

$$\begin{aligned}\alpha &= \delta_g + \phi \\ \alpha &= 25.98^\circ + 30.68^\circ = 57.86^\circ.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}I_d &= I \cdot \sin(\alpha) = 1.0 \cdot \sin(57.86) = 0.847 \\ I_q &= I \cdot \cos(\alpha) = 1.0 \cdot \cos(57.86) = 0.532 \\ \underline{I_d} &= I_d / \delta_g - 90^\circ = 0.847 / -64.02^\circ \\ \underline{I_q} &= I_q / \delta_g = 0.532 / 25.98^\circ\end{aligned}$$

Nå kan den induserte spenningen, $\underline{E_f}$, regnes ut.

$$\begin{aligned}\underline{E_f} &= \underline{V_t} + jx_d \cdot \underline{I_d} + jx_q \cdot \underline{I_q} + R \cdot \underline{I} \\ \underline{E_f} &= 1.0 + j1.15 \cdot 0.847 / -64.02^\circ + j0.8 \cdot 0.532 / 25.98^\circ + 0.00196 \cdot 1.0 / -30.68^\circ \\ \underline{E_f} &= 1.0 + 0.867 + j0.427 - 0.186 + j0.383 + 0.001686 - j0.001 \\ \underline{E_f} &= 1.692 + j0.809 \\ \underline{E_f} &= 1.875 / 25.98^\circ\end{aligned}$$

Altså er polhjulsvinkelen for nominell last $\delta = 25.98^\circ$

Referanser

- [1] Stephen J. Chapman. *Electric Machinery Fundamentals, fifth edition*. Mc Graw-Hill, 2012.
- [2] Kjell Saugstad Ivar Gunvalsen. Elektrisk maskin. Hentet 06.10.15 fra [https : //snl.no/elektrisk_maskin](https://snl.no/elektrisk_maskin).
- [3] J. Bumby J. Machowski, J. Bialek. *Power system dynamics, stability and control*. Wiley, 2008.
- [4] V. Harbovcová J. Pyrhönen, T. Jokinen. *Desing of Rotating Electrical Machines*. Wiley, 2008.
- [5] Cogent Power. Cogent power. Hentet 06.11.15 fra [http : //cogent – power.com/](http://cogent-power.com/).
- [6] SSB. Elektrisitet årstall 2013. Hentet 06.10.15 fra <https://www.ssb.no/elektrisitetaar>.
- [7] Statkraft. Svartisen kraftverk. Hentet 03.12.15 fra <http://www.statkraft.no/media/pressemeldinger/Pressemeldinger-arkiv/2006/statkraft-as-svartisen-kraftverk-utvides/>.