

Effekten av kortslutningsstrømmer på strømbegrensende spoler i høyspenningsanlegg med synkrongenerator

Torbjørn Vadder

Master of Science in Electric Power Engineering
Innlevert: juni 2015
Hovedveileder: Trond Toftevaag, ELKRAFT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elkraftteknikk

Oppgavebeskrivelse

Effekten av kortslutningsstrømmer på strømbegrensende spoler i høyspenningsanlegg med synkrongenerator

Oppgaven tar utgangspunkt på en kortslutning som fant sted i et vannkraftverk vinteren 2009.

Kandidaten skal:

- beskrive kortslutningsforløpet og ulike elektriske fenomen som oppstår som følge av en kortslutning, med fokus på en strømbegrensende spole, i et høyspentanlegg med synkrongenerator.
- vurdere hvordan koblingssituasjonen i kraftverket påvirker den elektromekaniske påkjenningen som vil oppstå i strømbegrensende spole, ved en kortslutning.
- vurdere hvordan utforming/design av spolens innkapsling påvirker de ulike elektriske fenomen i et slikt anlegg.
- gi anbefalinger vedrørende design av strømbegrensende spoler og dens innkapsling.

Verktøy:

Det skal benyttes numeriske metoder til beregning av elektromekaniske krefter. Transient-simulering i ANSYS Maxwell, som benytter elementmetoden, skal benyttes til dette arbeidet. Virvelstrømmer i innkapslingen skal være med i betraktningen.

Beregning av transientspenning utføres i EMTP-ATP. Til dette arbeidet skal det benyttes en forenklet modell, basert på reaktorens frekvensrespons, som konstrueres på basis av verdier hentet fra magnetisk problemløsning med virvelstrømmer i ANSYS Maxwell.

Forord

Denne rapporten er resultatet av min masteroppgave utført ved Institutt for elkraftteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelig universitet. Rapporten er skrevet våren 2015.

En stor takk går til PhD Stipendiat Abbas Lotfi ved NTNU for mye hjelp til simuleringene og for mange faglig nyttige diskusjoner. Jeg vil rette en takk førstelektor Trond Toftevaag for veiledning og innspill gjennom både spesialiseringsprosjektet og masteroppgaven. Jeg vil også takke Øyvind Ølstad og Anders Morstad ved ABB i Oslo for informasjon og hjelp underveis i prosjektet.

Sammendrag

Beregning av kortslutningsstrømmer i høyspentanlegg, spesielt for feil nær en generator, er essensielt ved konstruksjon av et slikt anlegg. Det er en kjent sak at elektrodynamiske krefter, skapt av kortslutningsstrømmer, er den dimensjonerende faktoren for utstyr som fører strømmer i denne størrelsesordenen. Ved å benytte en strømbegrensende spole vil den mekaniske påkjenningen, som oppstår i samleskinner og annet tilkoblet utstyr, bli redusert. Under en kortslutning vil spolen sette opp et kraftig magnetfelt. Avhengig av innkapslingens konstruksjon kan det induseres virvelstrømmer i innkapslingen. Virvelstrømmene setter opp sitt eget magnetfelt som igjen påvirker kreftene som vil oppstå i spolen.

Oppgaven baserer seg på en hendelse som fant sted i vannkraftverket Blåfalli Vik hvor det oppstod en kortslutning for noen år siden. Kortslutningsstrømmen forårsaket deformasjon av den strømbegrensende spolen, som igjen førte til jordslutning nært generatoren. Dokumentasjon fra anlegget er lagt til grunn for å lage simuleringsmodellen.

Ved å benytte transientsimulering i ANSYS Maxwell undersøkes kreftene som virker på spolen under kortslutning. Simuleringsmodellen linkes opp mot en ekvivalentkrets for å ta hensyn til foranliggende nett og seriekapasitanser. I tillegg undersøkes transientspenningene som oppstår ved bryting av kortslutningsstrømmen. Dette ble gjort ved å modellere spolen med en ekvivalentkrets og simulerer i ATP Draw. Spolens frekvensrespons innhentes fra simuleringene i ANSYS Maxwell, og en ekvivalentkrets utarbeides på bakgrunn av dette. Både tilfelle med og uten strømklipping undersøkes.

Deformering av den strømbegrensende spolen, i kombinasjon med spenningstransienter var trolig årsaken til gjennomslaget på generatorsiden av reaktoren ved hendelsen i Blåfalli Vik. Under kortslutning vil en strømbegrensende spole bli utsatt for store påkjenninger det er viktig for en designer av slikt utstyr å vite om.

- Spolen vil bli utsatt for en oscillerende kraft, både i lengde- og høyderetning.
- Konstrueres innkapslingen i ledende materiale vil det induseres virvelstrømmer som vil påvirke kraften som virker på spolen. Virvelstrømmene vil produsere varme, som kan medføre brannfare.
- Det er anbefalt å lage innkapslingen i et ikke ledende materiale.
- Det vil oppstå overspenninger ved utkobling av kortslutningsstrømmen. I simulerings-tilfellet var toppverdien til transientspenningen 3,5 ganger nominell spenning.

Abstract

Short circuit calculations of high voltage installations, specifically for faults close to the generator, are considered the most important issue in design and analysis. Electrodynamic forces generated by large short circuit currents is known to be the dimensioning factor for equipment carrying such high currents.

By utilize the current limiting reactor, the mechanical stress, which occurs in busbars and other connected equipment, is reduced. During the short circuit, the reactor will produce a large magnetic field. Depending on the construction of the enclosure of the reactor, there might be induced eddy currents. These eddy currents produce their own magnetic field, which will affect the force production in the reactor.

The thesis is based upon an incident in the Bláfalli Vik powerplant, where a short circuit occurred some years ago. The high current resulted in destruction of the reactor and a earth fault close to the generator. As a basis for the simulations, documentation from the installation is used.

To study the forces acting on the reactor, transient study in ANSYS Maxwell is applied. An equivalent circuit is linked to the simulations, in order to include the grid and series capacitances.

An EMTP simulation in ATP Draw is used to study the transient voltage which will arise after clearing of the fault.

The frequency response of the reactor is obtained using the FEM-simulations. An equivalent circuit is made based on these results. The study was performed both with and without current chopping.

It seems reasonable to believe that deformation of the reactor, in combination with a voltage surge, caused the earth fault close to the generator in Bláfalli Vik.

During a short circuit, the current limiting reactor will be exposed to stresses, which is important for a designer to have knowledge about:

- The reactor will be exposed to oscillating currents, both in axial and radial direction.
- When producing the enclosure in a conductive material, eddy currents will be induced in the enclosure. The eddy currents will affect the forces produced in the reactor. It will also cause energy loss, which may result in a fire hazard.
- It is recommended to produce the enclosure in a non conductive material.
- After clearing the fault current, a voltage surge will arise. In these simulation the peak of the overvoltage reached almost 3,5 times the nominal voltage.

Innhold

Oppgavetekst	i
Forord	iii
Sammendrag	v
Abstract	vii
Innhold	ix
Figurer	xiii
Tabeller	xvii
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Målsetning	1
1.3 Forutsetninger og begrensninger	2
1.4 Arbeidsverktøy/simulator	2
1.5 Rapportens struktur	2
2 Teorigrunnlag	3
2.1 Kortslutning og kortslutningsforløpet	3
2.1.1 Kortslutning nær en generator	4
2.1.2 Strømbegrensende spole	6
2.2 Elektromagnetisme	6
2.2.1 Induksjon	6
2.2.2 Transformatorvikling under kortslutning	7
2.3 Overspenning ved bryting av kortslutningsstrøm	9
2.3.1 Tilbakevendende spenning	9
2.4 Strømklipping ved bruk av vakuumbrytere	11
3 Simuleringsmodell og metode	13
3.1 Beskrivelse av tilfellene	13
3.2 Simuleringsmodell for kraftstudie	14
3.2.1 Geometri og materialer	14
3.2.2 Grensebetingelser	17
3.2.3 Eksitasjon	17

3.2.4	Maskestørrelse	20
3.2.5	Parametere	21
3.2.6	Betraktningstid	21
3.2.7	Postprosessering	21
3.3	Transientstudie	22
3.3.1	Impedansens frekvensrespons	23
3.3.2	To-blokkers Fysisk Cauer	24
3.3.3	Transientsimulering	26
4	Simuleringsresultater	27
4.1	Tilfelle A, kraftstudie. Kun tilkoblet nett.	27
4.2	Tilfelle B, kraftstudie. Tilkoblet nett og generator.	31
4.3	Tilfelle C, kraftstudie. Kun tilkoblet generator.	36
4.4	Tilfelle D, kraftstudie. Tilkoblet nett og generator. Innkapsling etter data- blad.	40
4.5	Tilfelle E, kraftstudie. Tilkoblet nett og generator. Innkapsling elektrisk isolert.	45
4.6	Oppsummering av kraftstudie	49
4.7	Vurdering av simuleringsresultatene fra kraftstudie	49
4.8	Tilfelle F, transientstudie med normal innkapsling	50
4.9	Tilfelle G, transientstudie med isolert innkapsling.	54
4.10	Vurdering av simuleringsresultatene fra transientstudie	57
5	Diskusjon	59
5.1	Kraftstudie	59
5.1.1	Innkapslingens påvirkning	59
5.1.2	Strømtetthet og varmeutvikling i innkapslingen	61
5.1.3	Koblingssituasjonenes påvirkning	61
5.2	Transientspenning	62
5.3	Overslag på generatorsiden	62
5.4	Anbefaling til design av innkapslingen	62
6	Konklusjon	65
7	Videre arbeid	67
7.1	Dynamisk modellering under kortslutning	67
7.2	Forbedring og verifisering av simuleringene	67
	Bibliografi	69

Vedlegg:	
A Beregning av impedans ved de ulike tilfellene	71
B Reaktorens datablad	77
C Beregning av parametere for frekvensrespons	81
C.1 Skript for summering av LR-matriser	81
C.2 Utleddning av uttrykket for Fysisk Cauer ekvivalent	82
C.3 Matlabsript og metode for beregning av parametere	83
D Ekvivalentkrets for FEM-modell	87
E Bilder av reaktoren etter havari	89
F Vedlagte filer	91

Figurer

2.1	Enfase RL-krets	3
2.2	Enfase kortslutningsstrøm.	4
2.3	Kortslutningsforløpet ved en trefase kortslutning nær en synkrongenerator.	5
2.4	Komponenter i kortslutningsstrømmen.	6
2.5	Kraften som virker på parallelle ledere som fører strøm i samme retning.	7
2.6	Kreftene som virker på trafoviklingene under kortslutning.	8
2.7	Skisse av transformator.	9
2.8	Enfasekrets med induktiv belastning.	10
2.9	Tilbakevendende spenning over brytergapet	10
3.1	Enlinjeskjema av kraftverket.	14
3.2	Grunnlag for simuleringsmodellen.	15
3.3	Skisse av innkapslingen og ekvivalenter til innkapslingen.	16
3.4	Simuleringsmodellen	18
3.5	Grensebetingelser for simuleringsmodellen.	18
3.6	Ekvivalentskjema til simuleringsmodellen.	19
3.7	Skjermdump fra kapasitanssimulering.	20
3.8	Periodeinndeling for studie av kraftens distribusjon i reaktoren.	22
3.9	Reaktorens induktans som funksjon av frekvens. Modell med innkapsling.	23
3.10	Reaktorens resistans som funksjon av frekvens. Modell med innkapsling.	24
3.11	To-blokkers Fysisk Cauer-ekvivalentkrets.	24
3.12	Ekvivalentkrets for studie av transientspenning	26
4.1	Kortslutningsstrømmen som funksjon av tid, ved tilfelle A	27
4.2	Kraft per meter som virker på folielagene i X-retning, ved tilfelle A	28
4.3	Den radielle kraften per meter som virker på reaktoren, ved tilfelle A	28
4.4	Kraftens distribusjon i reaktorens X-retning, ved tilfelle A	29
4.5	Kraften som virker på folielagene i Y-retning, ved tilfelle A	29
4.6	Aksielle krefter som virker på reaktoren, ved tilfelle A	30
4.7	Kraftens distribusjon i reaktorens Y-retning, ved tilfelle A	30
4.8	Kortslutningsstrømmen som funksjon av tid, ved tilfelle B	31
4.9	Kraft per meter som virker på folielagene i X-retning, ved tilfelle B	32
4.10	Den radielle kraften per meter som virker på reaktoren, ved tilfelle B	32
4.11	Kraftens distribusjon i reaktorens X-retning, ved tilfelle B	33
4.12	Kraften som virker på folielagene i Y-retning, ved tilfelle B	33
4.13	Aksielle krefter som virker på reaktoren, ved tilfelle B	34
4.14	Kraftens distribusjon i reaktorens Y-retning, ved tilfelle B	34

4.15	Strømtetthet i innkapslingens sidevegg, ved tilfelle B	35
4.16	Effekttap per meter i innkapslingens vegger, ved tilfelle B.	35
4.17	Kortslutningsstrømmen som funksjon av tid, ved tilfelle C	36
4.18	Kraft per meter som virker på folielagene i X-retning, ved tilfelle C	37
4.19	Den radielle kraften per meter som virker på reaktoren, ved tilfelle C . . .	37
4.20	Kraftens distribusjon i reaktorens X-retning, ved tilfelle C	38
4.21	Kraften som virker på folielagene i Y-retning, ved tilfelle C	38
4.22	Aksielle krefter som virker på reaktoren, ved tilfelle C	39
4.23	Kraftens distribusjon i reaktorens Y-retning, ved tilfelle C	39
4.24	Kortslutningsstrømmen som funksjon av tid, ved tilfelle D	40
4.25	Kraft per meter som virker på folielagene i X-retning, ved tilfelle D	41
4.26	Den radielle kraften per meter som virker på reaktoren, ved tilfelle D . . .	41
4.27	Kraftens distribusjon i reaktorens X-retning, ved tilfelle D	42
4.28	Kraften som virker på folielagene i Y-retning, ved tilfelle D	42
4.29	Aksielle krefter som virker på reaktoren, ved tilfelle D	43
4.30	Kraftens distribusjon i reaktorens Y-retning, ved tilfelle D	43
4.31	Strømtetthet i innkapslingens sidevegg, ved tilfelle D	44
4.32	Effekttap per meter i innkapslingens vegger, ved tilfelle D.	44
4.33	Kortslutningsstrømmen som funksjon av tid, ved tilfelle E	45
4.34	Kraft per meter som virker på folielagene i X-retning, ved tilfelle E	46
4.35	Den radielle kraften per meter som virker på reaktoren, ved tilfelle E . . .	46
4.36	Kraftens distribusjon i reaktorens X-retning, ved tilfelle E	47
4.37	Kraften som virker på folielagene i Y-retning, ved tilfelle E	47
4.38	Aksielle krefter som virker på reaktoren, ved tilfelle E	48
4.39	Kraftens distribusjon i reaktorens Y-retning, ved tilfelle E	48
4.40	Transientspenningene ved generatorsiden av reaktoren.	50
4.41	Detaljfigur av transientspenningen ved generatorsiden av reaktoren. . . .	51
4.42	Transientspenningene ved magnetiseringssiden av reaktoren.	51
4.43	Transientspenningens form ved generatorsiden av reaktoren.	52
4.44	Detaljfigur av transientspenningen ved generatorsiden av reaktoren. . . .	53
4.45	Transientspenningens toppverdi som funksjon av strømklipping.	53
4.46	Transientspenningene ved generatorsiden av reaktoren	54
4.47	Detaljfigur av transientspenningen ved generatorsiden av reaktoren. . . .	54
4.48	Transientspenningene ved magnetiseringssiden av reaktoren.	55
4.49	Transientspenningens form ved generatorsiden av reaktoren.	55
4.50	Detaljfigur av transientspenningen ved generatorsiden av reaktoren. . . .	56
4.51	Transientspenningens toppverdi som funksjon av strømklipping.	56
5.1	Prinsipp for magnetfeltets utbredelse mellom folielagene.	60

Vedlegg:

C.1	Resistiv frekvensrespons for reaktor med innkapsling.	84
C.2	Induktiv frekvensrespons for reaktor med innkapsling.	84
C.3	Resistiv frekvensrespons for reaktor uten innkapsling.	85
C.4	Induktiv frekvensrespons for reaktor uten innkapsling.	85
E.1	Foto av strømbegrensende spole etter kortslutning.	89
E.2	Foto av tilkoblingsskinne til strømbegrensende spole etter kortslutning. . .	90

Tabeller

3.1	Ulike tilfellene til simuleringene.	13
3.2	Data for transientstudie.	26
4.1	Oppsummering av kraftstudie.	49

Vedlegg:

C.1	Frekvensresponsen for rektoren, med og uten innkapsling.	82
-----	--	----

Nomenklaturliste

B	Magnetisk flukstetthet	Tesla
C	Kapasitans	Farad
E	Spennings effektivverdi	Volt
e	Spennings momentanverdi	Volt
F	Kraft	Newton
f	Frekvens	Hz
i	Strømmens momentanverdi	Ampere
I	Strømmens effektivverdi	Ampere
L	Induktans	Henry
R	Resistans	Ohm
u	Spennings momentanverdi	Volt
Z	Impedans	Ohm
δ	Penetrasjonsdybde	m
ϵ	Permittivitet	Fm^{-1}
μ	Permeabilitet	Hm^{-1}
σ	Konduktivitet	Ω^{-1}
ϕ	Fasevinkelen	radianer
ω	Vinkelhastigheten	s^{-1}

Innledning

1.1 Bakgrunn

Beregning av kortslutningsstrømmer i høyspentanlegg, spesielt nær en generator, er essensielt ved konstruksjon av slike anlegg. Det er en kjent sak at elektrodynamiske krefter, skapt av kortslutningsstrømmer er den dimensjonerende faktoren for utstyr som fører slike strømmer. Ved å benytte en strømbegrensende spole vil den mekaniske påkjenningen, som oppstår i samleskinner og annet tilkoblet utstyr, bli redusert.

Vinteren 2009 oppstod det en kortslutning i magnetiseringstransformatoren i vannkraftverket Blåfalli Vik. Magnetiseringstransformatoren var plassert etter en folieviklet strømbegrensende spole. Hendelsesforløpet under kortslutningen er noe uklart, men det endte med en jordslutning på generatorsiden av spolen, noe som resulterte i en mye større kortslutningsstrøm og påfølgende ødeleggelser.

I litteraturen er det beskrevet hvordan transformatoren tåler en kortslutning, men det er ikke funnet noe som omhandler folieviklet seriereaktorer.

1.2 Målsetning

Kandidaten skal:

- beskrive kortslutningsforløpet og ulike elektriske fenomen som oppstår som følge av en kortslutning, med fokus på en strømbegrensende spole, i et høyspentanlegg med synkrongenerator.
- vurdere hvordan koblingssituasjonen i kraftverket påvirker den elektromekaniske påkjenningen som vil oppstå i strømbegrensende spole, ved en kortslutning.
- vurdere hvordan utforming/design av spolens innkapsling påvirker de ulike elektriske fenomen i et slikt anlegg.
- gi anbefalinger vedrørende design av strømbegrensende spoler og dens innkapsling.

1.3 Forutsetninger og begrensninger

Oppgaven er videre arbeid av spesialiseringsprosjektet, som omhandlet kortslutninger og effekten av kortslutninger i kraftverk[1]. Data for beregning av kortslutningsimpedans er hentet herfra, og forutsetningene fra prosjektet følger med til denne rapporten. Det forventes at leseren har grunnleggende kunnskap innen elektroteknikk.

Nøyaktige design på den strømbegrensende spolen har ikke latt seg skaffe, men ut fra fotografier og tegningsgrunnlag er det antatt at modellen gjenspeiler den faktiske spolen på en tilfredsstillende måte. Følgende forenklinger er gjort i simuleringmodellen:

- Tilkoblingsklemmer er ikke tatt med i modellen.
- Gjennomføringen i innkapslingen er ikke tatt med i modellen.
- Seriekapasitansen mellom folielagene er forenklet til å være lik mellom alle lagene.

1.4 Arbeidsverktøy/simulator

Simuleringer er utført i ANSYS Maxwell og ATP Draw.

Figurer har blitt tegnet i Microsoft Visio.

Utrekninger er gjort i Maplesoft Maple 18.

Microsoft Excel sammen med Matlab er benyttet til postprosessering av simuleringresultater og beregning av parametere til transientstuide av reaktoren.

Rapporten er laget i tekstbehandlingsverktøyet L^AT_EX.

1.5 Rapportens struktur

Nødvendig teorigrunnlag for rapporten er presentert i Kapittel 2. Deler av dette kapitlet er hentet fra spesialiseringsprosjektet[1] som ble utført i høsten 2014.

Beskrivelse av tilfellene som undersøkes, oppbygning av simuleringmodellene og metoden for postprosessering er beskrevet i Kapittel 3.

I Kapittel 4 presenteres simuleringresultatene i samme rekkefølge som tilfellene ble undersøkt. I noen av diagrammene er det 80 ulike kurver. Ytterpunktene i diagrammet er da markert, men er ingen markering av de andre kurvene. Trendene er kommentert i teksten.

I Kapittel 5 diskuteres simuleringresultatene opp mot teorigrunnlaget og konklusjonen er i Kapittel 6. Anbefalinger for videre arbeid er presentert i Kapittel 7.

I vedleggene presenteres utregninger, datablad, ekvivalentkrets og Matlabscrip.

Simuleringmodellene er lagt ved som elektroniske vedlegg.

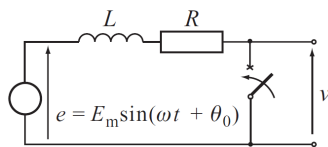
Reaktorens datablad er et tidlig utkast. Målene og elektriske egenskaper stemmer ikke overens med den endelige reaktoren.

Teorigrunnlag

2.1 Kortslutning og kortslutningsforløpet

Ved en kortslutning i et elektrisk anlegg oppstår det ofte store strømmer. Dette fører til både mekaniske og termiske påkjenninger på anlegget. Dimensjonering av anleggets komponenter krever kjennskap til størrelsen og varigheten til kortslutningsstrømmene[2].

For å analysere forløpet til en kortslutningsstrøm er det vanlig å betrakte en enfasekrets bestående av en spenningskilde, en resistans, en induktans og en bryter. En slik krets er vist i Figur 2.1.



Figur 2.1: Enfase RL-krets, Figuren er hentet fra [3].

Hvis bryteren legger inn ved $t = 0$, vil strømmen i bli gitt ved:

$$e = L \frac{di}{dt} + Ri \quad (2.1)$$

Løser for i :

$$i = K e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{E_m}{Z} \sin(\omega t + \theta_0 - \phi) \quad (2.2)$$

Hvor:

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$$

θ_0 punktet i AC-syklusen hvor feilen oppstår

ϕ fasevinkelen

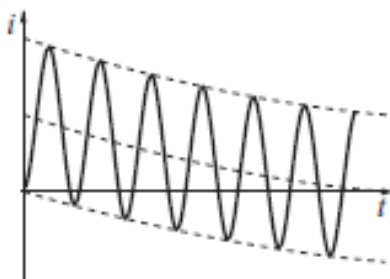
Formel 2.2 består av to ledd. Et transient likestrømsledd og et stasjonær vekselstrømsledd. Ved å si at strømmen i ved $t = 0^+$ er lik i ved $t = 0^-$ og at $i = i_0$ ved $t = 0^-$ får vi:

$$K = i_0 - \frac{E_m}{Z} \sin(\theta_0 - \phi) \quad (2.3)$$

Ved å betrakte Formel 2.3 ser man at likestrømsleddet vil bli størst ved $\theta_0 - \phi = -\frac{\pi}{2}$. Da vil initialverdien til likestrømsleddet bli:

$$\begin{aligned} K_{maks} &= i_0 - \frac{E_m}{Z} \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) \\ &= i_0 - \frac{E_m}{Z} \cdot (-1) \\ &= i_0 + \frac{E_m}{Z} \end{aligned}$$

Likestrømsleddet vil dempes til null med en tidskonstant $T = L/R$. Figur 2.2 viser kortslutningsstrøm hvor $(\theta_0 - \phi) = \frac{-\pi}{2}$



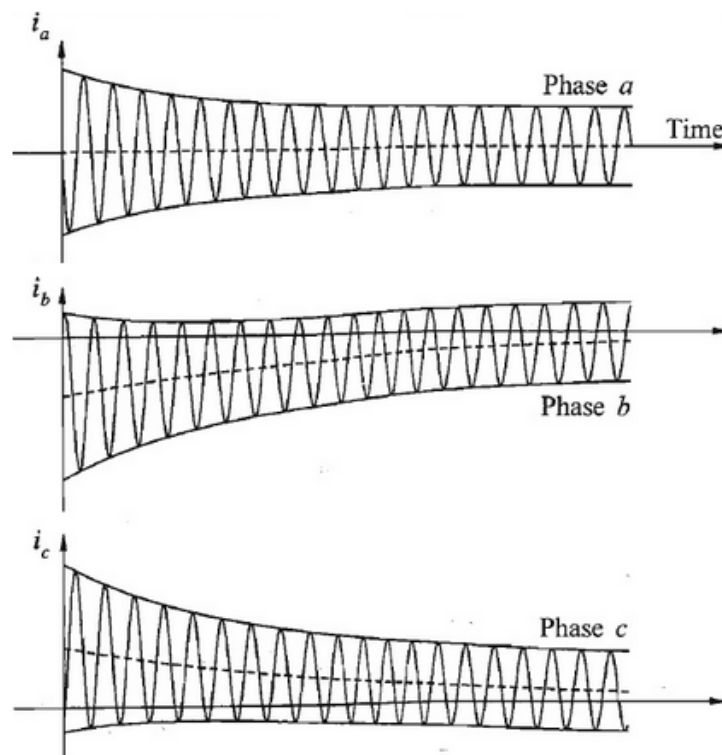
Figur 2.2: Enfase kortslutningsstrøm med stasjonær- og likestrømskomponent. [3].

Ved et trefasesystem vil fasevinklene til spenningene være ulike, noe som resulterer i at både likestrømsleddet og vekselstrømsleddet er ulikt mellom fasene. Figur 2.3 viser kortslutningsforløpet ved en trefaset kortslutning nær en synkrongenerator. [4, 3]

2.1.1 Kortslutning nær en generator

En kortslutning nær generator gir store kortslutningsstrømmer og påfølgende store mekaniske påkjenninger, både på maskinen i seg selv og på tilkoblet utstyr som fører kortslutningsstrømmen [5]. En kortslutning nær en generator fører til endring i strømmene både i generatorens rotor og stator. Denne endringen fører igjen til endring av fluksens bane, som igjen vil påvirke generatorens kortslutningsreaktans. Som følge av dette betraktes AC-delen av en kortslutning i tre komponenter. Det er en *subtransient-komponent*, en *transientkomponent* og en *stasjonærkomponent*.

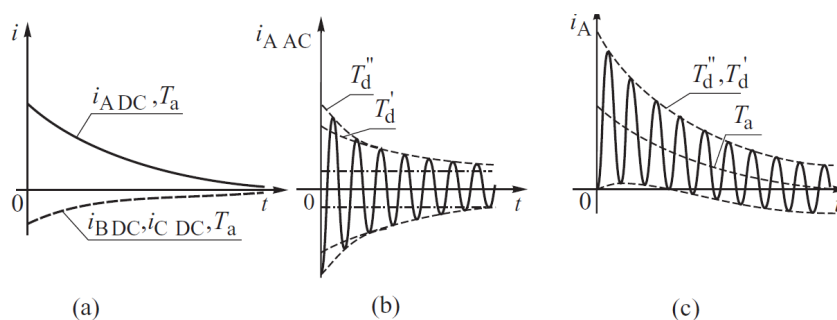
- **Subtransient-komponent:** Fluksbanen går gjennom rotorens dempervikling, rotorens feltvikling og luftgapet. Ekvivalentreaktans X_d'' . Dempes med tidskonstanten T_d'' .
- **Transientkomponent:** Fluksbanen går gjennom rotorens feltvikling og luftgapet. Ekvivalentreaktans X_d' . Dempes med tidskonstanten T_d' .



Figur 2.3: Kortslutningsforløpet ved en trefase kortslutning nær en synkrogenerator. Stiplet linje viser likestrømløddet. Figuren er hentet fra [4].

- **Stasjonærkomponent:** Fluksbanen går gjennom luftgapet. Ekvivalentreaktans X_d [3].

I tillegg til AC-komponentene er det et likestrømsledd som dempes med tidskonstanten T_a . Den totale kortslutningsstrømmen er en sum av disse tre komponentene og likestrømsleddet. Likestrømsleddet er avhengig av kortslutningsimpedansen reaktive andel. Ved høyere andel induktiv impedans blir likestrømsleddet større. Hvis likestrømsleddet er tilstrekkelig stort kan dette føre til at det går flere perioder før kortslutningsstrømmens første nullgjenomgang. Generatorbryteren bør da forsinkes for å unngå bryting av likestrøm. De ulike komponentene og den totale kortslutningsstrømmen er vist i Figur 2.4.



Figur 2.4: Komponenter i kortslutningsstrømmen. (a) Likestrømsleddet (b) Vekselstrømsleddet (c) Total kortslutningsstrøm. Figuren er hentet fra [3].

2.1.2 Strømbegrensende spole

Store kortslutningsstrømmer setter store krav til bryterevne i vern og mekanisk dimensjonering av annet utstyr. I produksjonsanlegg som kraftverk, hvor kortslutningsstrømmen gjerne er høy, kan det være ønskelig å redusere kortslutningsstrømmen i deler av anlegget. Dette kan gjøres med en strømbegrensede spole, ofte kalt en reaktor. Da reaktansen i spolen bør holdes konstant gjennom kortslutningsforløpet er det kun spole med luftkjerne som er egnet til dette formålet[6].

2.2 Elektromagnetisme

En strøm gjennom en leder vil skape et magnetfelt, B . Magnetfeltets styrke i luft er proporsjonalt med strømmen og følger strømmens vekslinger i tid[7].

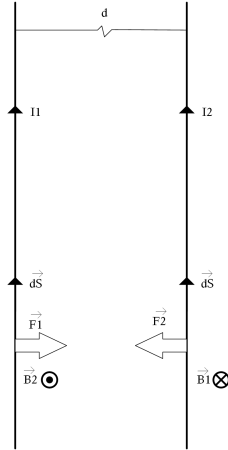
2.2.1 Induksjon

Faradays lov beskriver induksjon. Når et magnetfelt varierer med tiden vil det induseres et elektrisk felt med en tilhørende spenning.

Hvis et ledende materiale blir utsatt for et slikt felt vil det resultere i en induisert strøm.

Retningen på denne strømmen er gitt av Lenz' lov, som sier at magnetfeltet skapt av strømmen er motsatt rettet av magnetfeltet som induerte strømmen. [8] [9]

Gitt to parallelle ledere som fører en strøm i samme retning, som vist i Figur 2.5. Kraften som virker på ledningene i lengdeelementet $d\vec{s}$ av den ene leder er [10]:



Figur 2.5: Kraften som virker på parallelle ledere som fører strøm i samme retning.

$$d\vec{F} = Id\vec{S} \times \vec{B} \quad (2.4)$$

Hvor \vec{B} er det magnetiske feltet som er satt opp av den andre lederen:

$$|\vec{B}| = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}$$

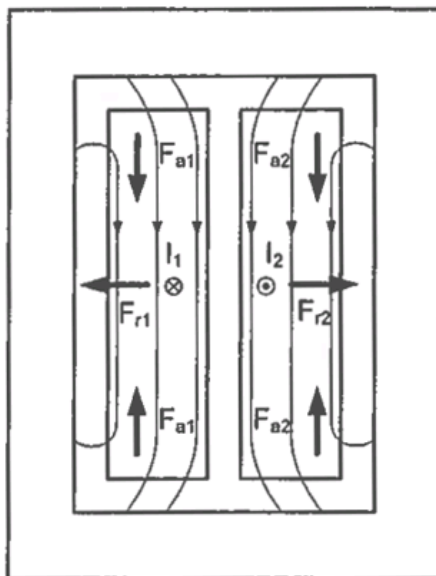
Hvor d er avstanden mellom lederene. Kraften F per lengdeenhet blir:

$$F = I \frac{\mu_0 I}{2\pi d} = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi d} \quad (2.5)$$

Dersom to parallelle ledere fører strøm i samme retning vil disse tiltrekkes hverandre, hvis de fører strøm med motsatt retning vil det oppstå en frastøtende kraft [11].

2.2.2 Transformatorvikling under kortslutning

Radielle krefter som virker på viklingene skyldes den aksielle lekkasjefluksen. For de indre viklingene, lavspenningviklingene, virker kreftene mot transformatorens bein, og resulterer i en komprimerende kraft. De ytre viklingene, høyspenningviklingene, blir utsatt for en ekspanderende kraft. Kreftene som virker på transformatorviklingene og lekkasjefluksen er vist i Figur 2.6.



Figur 2.6: Kraftene som virker på trafoviklingene under kortslutning. Figuren er hentet fra [12].

Ved å anta at viklingene er jevnt fordelt radielt i transformatoren, at H-feltet i transformatorkjernen er null, flukstettheten i viklingene øker lineært i indre vikling og reduseres lineært i ytre vikling og at den midlere diameteren, D_m , er liten sammenlignet med bredden til viklingen, kan den radielle kraften i transformatoren beregnes med Formel 2.6. Transformatorskisse med målsetting er vist i Figur 2.7.

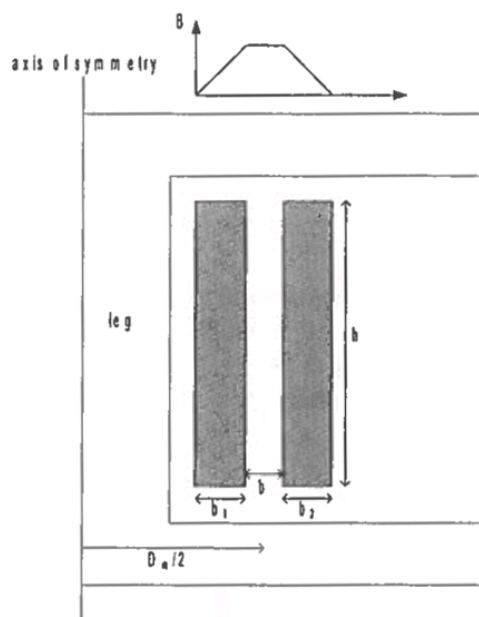
$$F_r = \frac{1}{2} \mu_0 \left(\frac{NI}{h} \right)^2 \cdot \pi D_m h \quad (2.6)$$

Kraftens amplitude er lik på begge viklingene, men den er rettet innover på indre vikling og utover på ytre vikling.

Aksielle krefter som virker på transformatoren skyldes den radielle delen av lekkasjefluksen på viklingens topp og bunn. Hvis viklingen plasseres i senter mellom åkene vil netto aksial kraft være null. Kraftene akkumuleres, det medfører at den største påkjenningen er midt i viklingen.

Kraften i viklingene kan beregnes med Formel 2.7.[12]

$$F_a = \frac{1}{2} \mu_0 \left(\frac{NI}{h} \right)^2 \cdot \pi D_m \left(b + \frac{b_1 + b_2}{3} \right) \quad (2.7)$$



Figur 2.7: Skisse av transformator. Figur er hentet fra [12].

2.3 Overspenning ved bryting av kortslutningsstrøm

Ved normal drift er kontaktene i en bryter lukket og det går en strøm i kretsen. Ved en feilsituasjon vil bryteren få et signal om å åpne og ved hjelp av et mekanisk drivverk åpner kontaktene seg. Normalt sett brytes ikke strømmen av dette, men det tennes en lysbue mellom de åpne kontaktene. Lysbuen består av plasma som holder en høy temperatur forårsaket av energien avgitt fra strømmen i lysbuen.

Konduktiviteten i plasma er sterkt temperaturavhengig. Ved høy temperatur er ledeevnen god, ved lavere temperatur er ledeevnen dårligere. Spenningsfallet over lysbuen, gjennom mesteparten av strømmens halvperiode, er tilnærmet konstant. Ved strømmens nullgjennomgang vil effekten produsert i lysbuen være null. Da synker temperaturen i lysbuen og ledeevnen reduseres. Når lysbuen blir tilstrekkelig nedkjølt blir den isolerende og slukker.

For at brytingen skal være vellykket må gjenntennning mellom kontaktene unngås. [13]

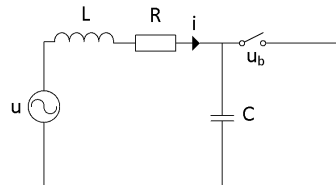
2.3.1 Tilbakevendende spenning

Etter at lysbuen har slukket vil det oppstå en spenning over bryteren. Spenningens amplitude, og hvor raskt den bygges opp er avgjørende for om det oppstår gjenntennning. Formen på den tilbakevendende spenningen er avhengig av kretsens oppbygning og belastningen. En resistiv og kapasitiv krets er enklere å bryte enn en induktiv krets.

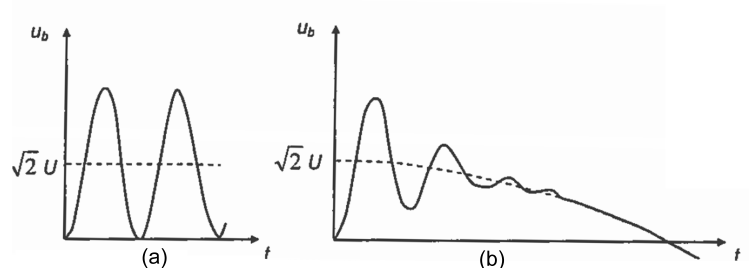
Når en induktiv krets med spredkapasitanter brytes, vil spenningen på lastsiden

dempes, men det skapes høyfrekvente oscillerende spenningstransienter. Spenningen over kontaktene i bryteren blir da 2 p.u. momentant etter brytingen. I tilfeller hvor kontaktåpningen ikke har åpnet seg nok til å motstå den høye spenningen vil en gjenntenning oppstå, og brytingen vil være mislykket. [13]

I denne oppgaven undersøkes en kortslutning etter en spole. En slik krets er vist i Figur 2.8. Bølgeformen for tilbakevendende spenning er illustrert i Figur 2.9.



Figur 2.8: Enfasekrets med induktiv belastning.



Figur 2.9: Tilbakevendende spenning over brytergapet ved bryting av kortslutningsstrøm. Når transientfrekvensen er høy i forhold til nettfrekvensen blir det som i (a). Ved å ta hensyn til demping i kretsen blir bølgeformen som i (b). Figuren er hentet fra [13].

2.4 Strømklipping ved bruk av vakuumbrytere

Strømklipping er et uønsket fenomen i bryterteknologien og skjer når lysbuen blir slukket før strømmens naturlige nullgjennomgang. Strømklipping fører til overspenninger i systemet med amplitude gitt av Formel 2.8.

$$u = i_0 \sqrt{\frac{L_b}{C_b}} \quad (2.8)$$

Hvor:

u = Spenningens amplitude på lastsiden av bryteren.

i_0 = Strømmens amplitude ved strømklipping.

L_b = Induktans på nettsiden av bryteren.

C_b = Kapasitans på nettsiden av bryteren.

Vakuumbryteren er mye brukt i systemer opp til 38 kV og som det ligger i navnet benyttes vakuum som brytermedium. Når kontaktene beveger seg fra hverandre konsentreres strømstyrken til noen punkter. Strømtettheten øker og temperaturen stiger. Metall fra overflaten fordamper, og en lysbue tennes.

Når avstanden mellom elektrodene øker deler den opprinnelige enkle lysbuen seg i flere mindre lysbuer på katoden. Disse kalles katodeprikker og hver av katodeprikkene fører omtrent den samme strømmengden, normalt noen titalls ampere. Antall katodeprikker varierer gjennom strømforløpet.

Hvis strømstyrken blir tilstrekkelig høy, over 10-15 kA, endrer lysbuen karakter. Katodeprikkene går fra å være spredt og diffuse, til en konsentrert lysbue. Når strømstyrken synker igjen vil lysbuen dele seg til flere katodeprikker og bli diffus igjen. Når halvperioden går mot slutten, reduseres antall katodeprikker en etter en. Like før strømmens nullgjennomgang slukker den siste katodeprikk og strømmen klippes. En vakuumbryter klipper normalt strømmen i størrelsesorden 2 - 15 A. [13].

KAPITTEL 3

Simuleringsmodell og metode

Simuleringsmodellene tar utgangspunkt i en strømbegrensende spole, plassert mellom generatoruttaket og magnetiseringstransformatoren, i kraftverket Blåfalli Vik. I 2009 oppstod det en feil i anleggets magnetiseringstransformator, noe som førte til en kortslutning. Hendelsesforløpet er uklart, men reaktoren havarerte og en jordslutning nær generatoruttaket var et faktum. Forenklet enlinjeskjema av kraftverket er vist i Figur 3.1.

3.1 Beskrivelse av tilfellene

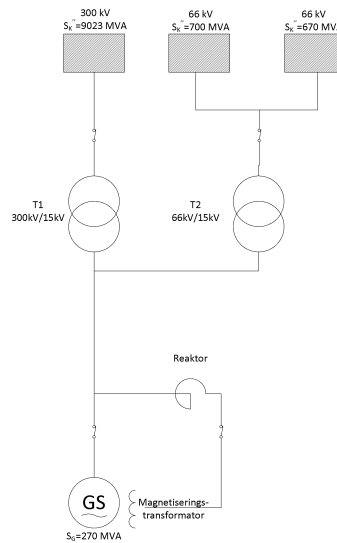
Den mekaniske belastningen betraktes ved hjelp av elementmetoden/FEM-simuleringer i ANSYS Maxwell og transientspenningene simuleres i ATP Draw.

Elektromagnetiske simulering utføres ved ulike koblingstilfeller i kraftverket og ved ulikt design av innkapslingen. Transientsimuleringene utføres ved høyest mulig kortslutningsstrøm og både med og uten innkapsling.

De ulike tilfellene er presentert i Tabell 3.1. Utregning av kortslutningsimpedansene, R_s og L_s er basert på utregning av kortslutningsstrøm i [1], vist i Vedlegg A.

Tabell 3.1: Ulike tilfellene til simuleringene.

Tilfelle	Type studie	Tilkoblet nett	Tilkoblet generator	L_s [μH]	R_s [$\text{m}\Omega$]	Innkapslingstype
A	Magnetisk	Ja	Nei	313,147	5,907	Normal
B	Magnetisk	Ja	Ja	184,971	2,336	Normal
C	Magnetisk	Nei	Ja	450,939	1,667	Normal
D	Magnetisk	Ja	Ja	184,971	2,336	Etter datablad
E	Magnetisk	Ja	Ja	184,971	2,336	Isolert strømvei
F	Transient	Ja	Ja	184,971	2,336	Normal
G	Transient	Ja	Ja	184,971	2,336	Ingen



Figur 3.1: Enlinjeskjema av kraftverket.

3.2 Simuleringsmodell for kraftstudie

Simuleringsmodellen er basert på prosjekteringsgrunnlaget til kraftverket.

Figur 3.2 viser konstruksjonen av reaktoren og innkapsling, avgrensning for simuleringen og aksene.

3.2.1 Geometri og materialer

Reaktor

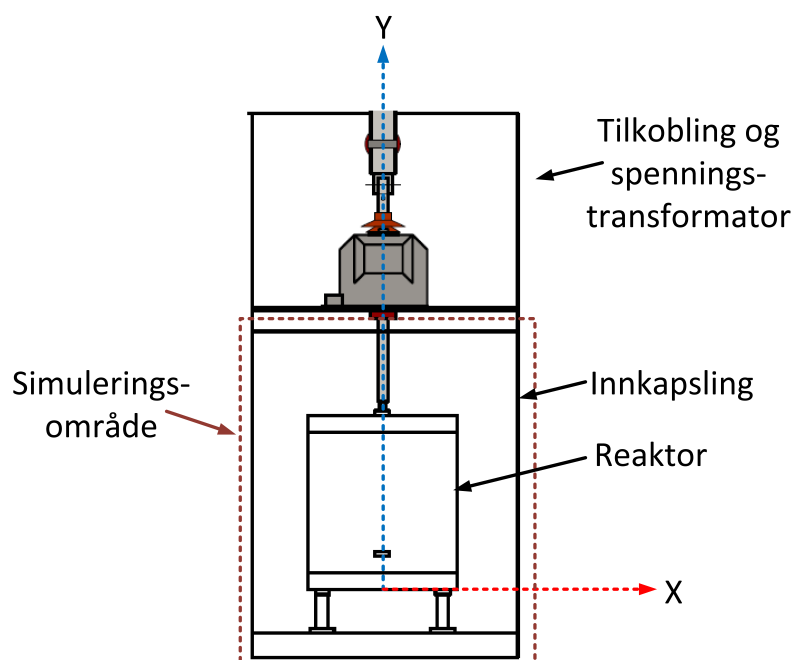
Reaktorens ytre mål er hentet fra tegningsgrunnlaget:

Indre radius	150 mm
Ytre radius	288 mm
Høyde	460 mm

Faktiske spesifikasjoner for reaktoren har ikke latt seg oppdrive. Ut i fra bilder og tegninger er følgende antatt:

Folietykkelse	1,5 mm
Isolasjonstykkelse	0,25 mm
Vendinger	80

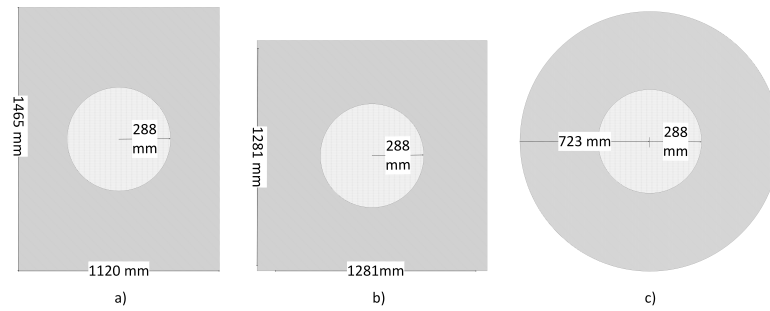
Folien er av aluminium og isolasjonsmediet mellom vendingene er polyesterresin. Materialeegenskapene fra ANSYS Maxwell benyttes. Hvert folielag representeres med en kvadrat, mens isolasjonslaget ikke modelleres. Kapasitansen i isolasjonen inkluderes i ekvivalentkretsen, som beskrevet i Delkapittel 3.2.3.



Figur 3.2: Grunnlag for simuleringsmodellen.

Innkapsling

Simuleringene tar hensyn til virvelstrømmer i innkapslingen. Innkapslingen er konstruert i aluminium og har en platetykkelse på 3,2 mm. Døren og gjennomføringer til strømskinne er neglisjert. Den faktiske innkapslingen til reaktoren er rektangulær. I todimensjonal simulering lar det seg ikke gjøre å modellere en rektangulær innkapsling. Det lages en sirkulær og kvadratisk ekvivalent, på samme måte som normal praksis ved modellering av transformatorbatterier[14]. I simuleringsmodellen benyttes to ulike geometriske modeller. En kvadratisk ekvivalent benyttes ved betraktning av krefter, hvor kreftenes retning i kartesiske koordinater er av interesse. En sirkulær ekvivalent benyttes til beregning av kapasitans mellom reaktoren og innkapslingen og til beregning av RL-matrise til transientstudie. De ulike geometriske modellene er vist i Figur 3.3.



Figur 3.3: Skisse av innkapslingen og ekvivalenter til innkapslingen. a) Faktisk innkapsling b) Rektangulær innkapsling c) Sirkulær innkapsling. Reaktoren er representert med prikker og arealet av innkapslingen er representert med striper.

Innkapslingen har målene:

$$\text{Lengde} = 1465 \text{ mm}$$

$$\text{Bredde} = 1120 \text{ mm}$$

Innkapslingens areal:

$$\begin{aligned} A &= \text{Side1} \cdot \text{Side2} \\ &= 1,465 \text{ m} \cdot 1,120 \text{ m} \\ &= 1,6408 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Sirkulær ekvivalent:

$$\begin{aligned} A &= 2\pi r^2 \rightarrow r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \\ r &= \sqrt{\frac{1,6408 \text{ m}}{\pi}} \\ &\approx 0,72269 \text{ m} \\ &= 723 \text{ mm} \end{aligned}$$

Kvadratisk ekvivalent:

$$\begin{aligned} A &= (\text{Side})^2 \rightarrow \text{Side} = \sqrt{A} \\ \text{Side} &= \sqrt{1,6408 \text{ m}^2} \\ &\approx 1,2809 \text{ m} \end{aligned}$$

Simuleringsmodellens mål og akser er vist i Figur 3.4.

Geometri for tilfelle D

I tilfelle D konstrueres innkapslingen basert på formler i datablad. Datablad anbefaler at avstanden mellom reaktoren og nærmeste ledende materiale minimum er den høyeste av følgende beregninger:

Radiell retning:

$$1,1 \cdot a$$

eller

$$1 \cdot a + 80 \text{ mm}$$

Hvor:

$$a = \text{Reaktorens ytre diameter}$$

Som gir avstandene:

$$1,1 \cdot 2 \cdot 288 \text{ mm} = 633,6 \text{ mm}$$

$$2 \cdot 288 \text{ mm} + 80 \text{ mm} = 656 \text{ mm}$$

$$656 \text{ mm} > 633,6 \text{ mm}$$

Lengden for sidene i et kvadrat blir da:

$$2 \cdot (288 \text{ mm} + 656 \text{ mm}) = 1888 \text{ mm}$$

Aksiell retning:

$$0,5 \cdot a$$

Som gir avstanden:

$$0,5 \cdot 2 \cdot 288 \text{ mm} = 288 \text{ mm}$$

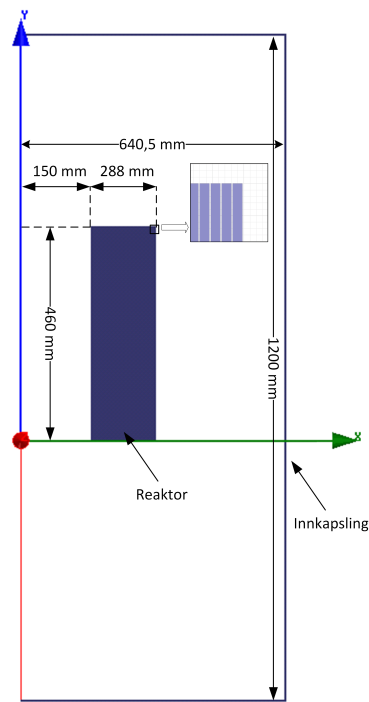
3.2.2 Grensebetingelser

Langs senter av spolen, ved Z-aksen benyttes en tangentiell symmetrisk akse som grensebetingelse.

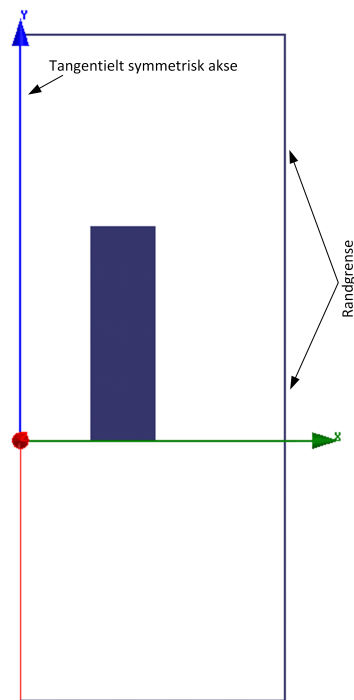
Svært lite av den elektriske fluksen penetrerer innkapslingen. Randen til problemet defineres derfor rett på utsiden av innkapslingen. Grensebetingelsene er vist i Figur 3.5.

3.2.3 Eksitasjon

Simuleringsmodellen eksiteres fra en ekvivalentkrets. Ekvivalentkretsen består av foranliggende nett, serie- og indre-kapasitans og viklinger. Hver av viklingene kobles mot et

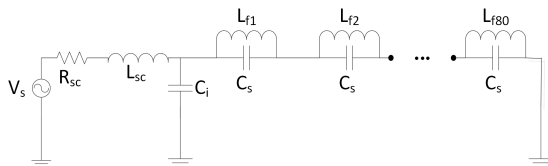


Figur 3.4: Simuleringsmodellen



Figur 3.5: Grensebetingelser for simuleringsmodellen.

folielag i reaktoren. Ekvivalentkretsen er vist i Figur 3.6 og Vedlegg D. Spenningskilden settes til å gi størst mulig likestrømsledd, som beskrevet i Delkapittel 2.1. Kortslutningsimpedansene hentes fra Delkapittel 3.1.



Figur 3.6: Ekvivalentsskjema til simuleringsmodellen.

Kapasitans mellom reaktor og innkapsling

Til ekvivalentkretsen er det behov for kapasitansen mellom reaktoren og innkapslingen ved den innerste folien og ved den ytterste folien. Kapasitans beregnes ved elektrostatiske simulering i ANSYS Maxwell. Modellen bygges etter sirkulær ekvivalent. En spenning påtrykkes indre og ytre vending i reaktoren. Potensialet til resterende vendinger er flytende, og innkapslingens potensial er 0 V. Skjermdump fra simuleringsresultatene er vist i Figur 3.7. Kapasitansen mellom indre folie og innkapsling er 8,5865 pF og kapasitansen mellom ytre folie og innkapsling er 50,805 pF.

Kapasitans mellom folielagene

Den store overflaten mellom folielagene fører til at kapasitansen mellom lagene blir tilnærmet lik som en platekondensator med samme dimensjon og kan beregnes med Formel 3.1.

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{2\pi r h}{d} \quad (3.1)$$

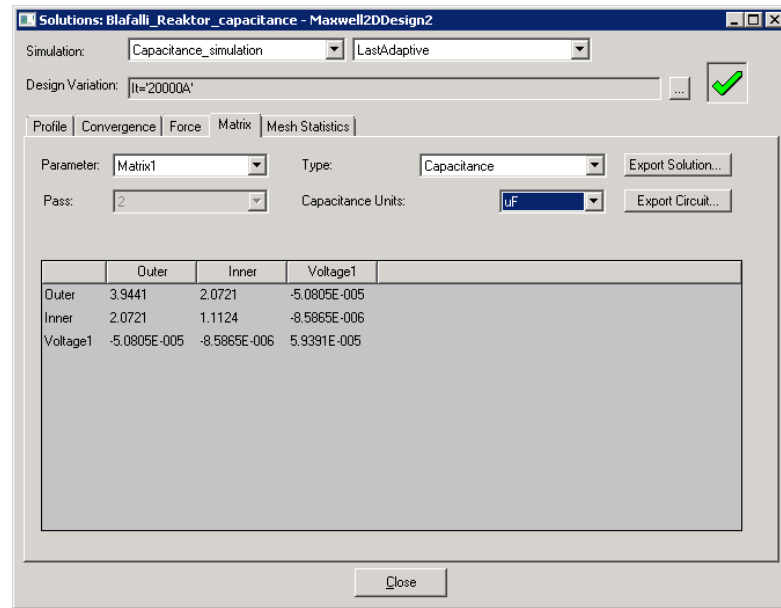
Midlere radius:

s

$$\begin{aligned} r_{midlere} &= r_{indre} + \frac{r_{ytte} - r_{indre}}{2} \\ &= 150 \text{ mm} + \frac{288 \text{ mm} - 150 \text{ mm}}{2} \\ &= 219 \text{ mm} \end{aligned}$$

Kapasitansen:

$$\begin{aligned} C &= \epsilon_r \epsilon_0 \frac{2\pi r h}{d} \\ &= 3,5 \cdot 8,854 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2\pi \cdot 0,219 \cdot 0,460}{0,25 \cdot 10^{-3}} \\ &\approx 78,46 \text{ nF} \end{aligned}$$



Figur 3.7: Skjermdump fra kapasitanssimulering mellom indre folie og innkapsling og ytre folie og innkapsling. Voltage1 representerer innkapslingen.

3.2.4 Maskestørrelse

Maskestørrelsen er avhengig av penetrasjonsdybden og tykkelsen til materialet. Penetrasjonsdybden angir hvor dypt i materialet strømtettheten og det magnetiske feltet er redusert med faktoren $e^{-1} \approx 0,3678$ [9]. Hvis penetrasjonsdybden er mye større enn materialtykkelsen vil strømmen og magnetfeltet fordele seg uniformt i materialet. FEM-simuleringene utføres ved 50 Hz. Penetrasjonsdybden for aluminium ved 50 Hz:

$$\begin{aligned} \delta &= \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \\ \delta_{al} &= \sqrt{\frac{2}{2\pi 50 \cdot \mu_0 \cdot \mu_{al} \cdot \sigma_{al}}} \\ &= \sqrt{\frac{2}{2\pi 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 38 \cdot 10^6}} \\ &\approx 11,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

Ved 50 Hz er folietykkelsen mye mindre enn penetrasjonsdybden, $1,5 \text{ mm} \ll 11,5 \text{ mm}$. Strømmen og magnetfeltet vil da fordele seg uniformt, og maskestørrelsen er av liten betydning. Maskestørrelsen settes til 1 mm.

3.2.5 Parametere

Hvert enkelt folielag defineres som et parameter for beregning av kraft.

3.2.6 Betraktningstid

Betraktningstiden er fra kortslutningsøyeblikket til det forventes at effektbryteren har løst ut. Dette er satt til 2 fulle perioder, 40 ms. Tidssteg for FEM-simuleringene er 0,2 ms.

3.2.7 Postprosessering

Resultatene fra simuleringene er oppgitt i kraft per meter.

Følgende situasjoner er vurder:

- Kraften per meter som virker på hvert folielag, X- retning
- Kraften som virker på hvert folielag, Y-retning
- Kraftens distribusjon i reaktoren, X- og Y-retning
- Radielle krefter per meter
- Aksielle krefter

Kraften som virker på hvert folielag

Resultatene fra kraftstudiet blir oppgitt i Newton per meter, i både X- og Y-retning. Langs X-aksen plottes resultatene direkte.

Langs Y-aksen kan den totale kraften som virker på hvert av folielagene beregnes. Dette gjøres ved å multiplisere kraften folielagene blir utsatt folielagets lengde, som vil variere med radiusen. Dette løses ved at datasettet importeres i Excel og multipliseres med lengden. Folielagets lengde beregnes:

$$\text{Lengde} = \text{Omkrets}$$

$$\text{Radius} = \text{Folienummer} \cdot (\text{Folietykkelse} + \text{Isolasjonsykkelse}) + R_{indre} - \frac{\text{Folietykkelse}}{2}$$

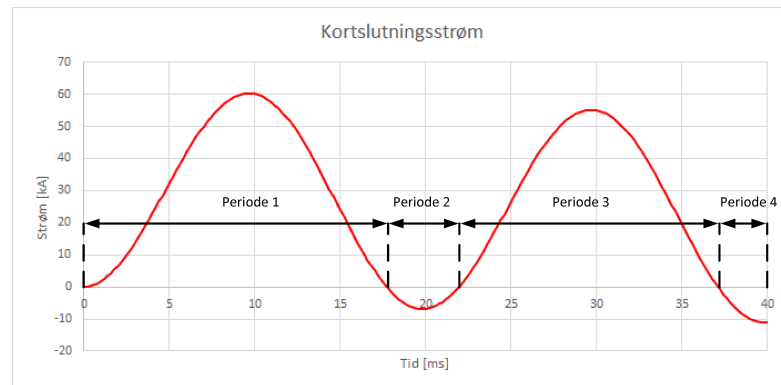
$$\text{Lengde} = 2 \cdot \pi \cdot \text{Radius}$$

Kreftene på hvert folielag plottes som en funksjon av tid.

Kraftens distribusjon i reaktoren

Det er interessant å studere hvordan kraften fordeler seg i reaktoren og hvordan kraft-distribusjonen utvikler seg over tid. Tidsforløpet deles opp i fire perioder. Hver periode ender ved strømmens nullgjennomgang. Periodeinndelingen er vist i Figur 3.8.

I hvert enkelt folielag beregnes kraftens gjennomsnitt over periodene. Gjennomsnittskraften plottes som en funksjon av folienummer.



Figur 3.8: Periodeinndeling for studie av kraftens distribusjon i reaktoren.

Radielle og aksielle krefter

Under kortslutning blir reaktoren utsatt for komprimerende og ekspanderende krefter i X-retning og aksielle krefter i Y-retning. Kraftene beregnes ved å summere momentanverdien av kraften på hvert folielag. Dette plottes som en funksjon av tid.

Strømtetthet

Den høyeste strømtettheten vil være ved i sideveggen ved reaktorens midtpunkt. Det vil si i en høyde på 230 mm. Strømtettheten i dette punktet hentes ut og plottes som funksjon av tiden.

Varmetap

Ved å integrere effektapet over innkapslingens sidevegg, i den inkluderte kalkulatoren i ANSYS Maxwell, beregnes varmetapet. Dette plottes som en funksjon av tid.

3.3 Transientstudie

Som beskrevet i Delkapittel 2.3 kan det oppstå høyfrekvente transientspenninger ved bryting av kortslutningsstrøm. Nærhetseffekten og virvelstrømmer påvirker impedansen i lederen ved endring i frekvensen.

Mellom reaktorens tilkoblingsklemmer og samleskinnene, både på generatorsiden og magnetiseringssiden, er avstanden mellom faseleder og innkapslingen lavest. Ved den minste avstanden er også den laveste holdfastheten, og dermed er risikoen for gjennomslag størst. Områdene med lavest avstand mellom strømførende leder og jordpotensiale er derfor av interesse. Ved transientstudie betraktes spenningstransientene på hver side av spolen.

Som Delkapittel 2.4 nevner brytes kortslutningsstrømmen ved/i tilknytting til strøm- mens naturlige nullgjennomgang. ANSYS Maxwells mulighet til bryting av strøm er kun

gitt av forhåndsinnstilt tidsbryter. Det viste seg vanskelig å styre dette til riktig koblingstidspunkt, noe som resulterer i simulering med klipping av store strømmer. ATP-draw er vurdert til et bedre verktøy for å simulere transientforløp i reaktoren.

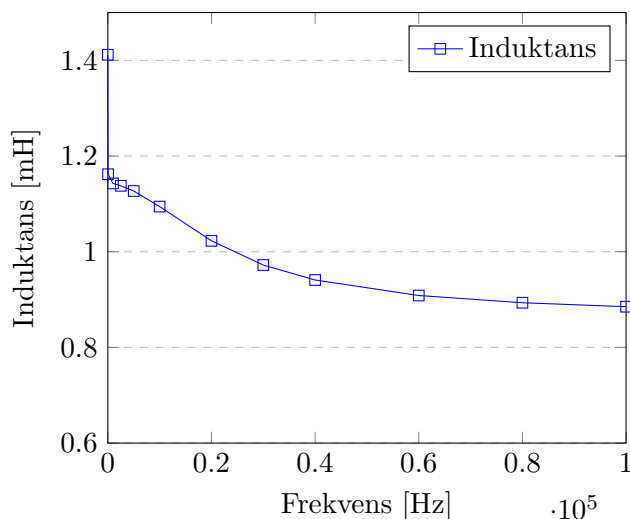
Frekvensen til transientspenning ligger normalt fra noen hundre hertz til noen kilohertz[13]. Fra FEM-simuleringene var transientspenningen litt over 60 kHz.

3.3.1 Impedansens frekvensrespons

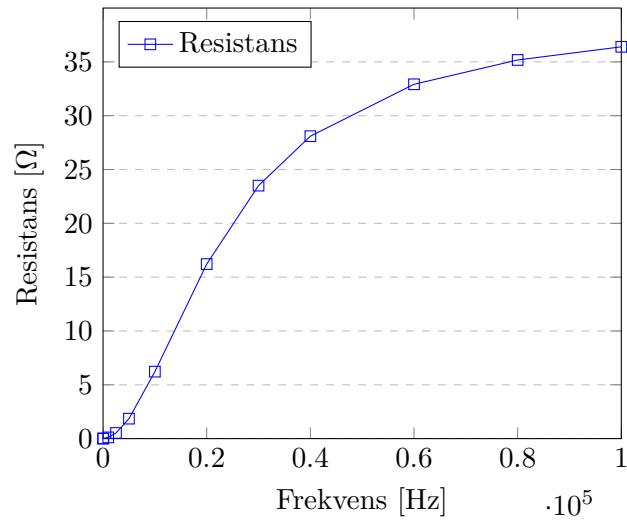
Impedansens frekvensrespons beregnes ved bruk av FEM-modellen. Frekvensresponsen mellom nært likestrøm og opp til 100 kHz beregnes. Valg av 100 kHz som øvre betraktning er i fra FEM-simuleringenes indikasjon på spenningstransientens frekvens. Impedansmatrisen hentes ut ved ulike frekvenser. Frekvensmatrisen består av hvert enkelt folielags selvinduktans, selvresistans, folielagets gjensidige induktans mot alle andre folielag og folielagets gjensidige resistans med alle andre folielag. For modellen på 80 folielag gir en RL-matrise på 80x160 felter. For å finne totalinduktansen og totalresistansen i kretsen summeres samtlige selvinduktanser sammen med gjensidige induktanser, og alle selvresistanser sammen med gjensidige resistanser. Dette gjøres i Matlab med metoden vist i Vedlegg C.

Metoden gjentas til reaktorens frekvensrespons er representert i det hele frekvensintervallet.

Figur 3.9 og Figur 3.10 viser henholdsvis reaktorens induktansrespons og resistansrespons. Responsen passer godt med responsen som vil oppnås ved bruk av en fysisk Cauer-ekvivalent[15].



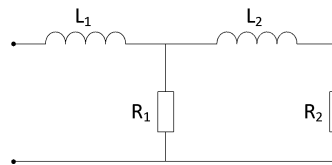
Figur 3.9: Reaktorens induktans som funksjon av frekvens. Modell med innkapsling.



Figur 3.10: Reaktorens resistans som funksjon av frekvens. Modell med innkapsling.

3.3.2 To-blokkers Fysisk Cauer

En to-blokkers Fysisk Cauer-ekvivalentkrets er vist i Figur 3.11.



Figur 3.11: To-blokkers Fysisk Cauer-ekvivalentkrets.

Uttrykket for impedansen er utledet i Vedlegg C:

$$Z_{Cauer} = \frac{R_1^2 R_2 + R_1 R_2^2 + \omega^2 L_2 R_1}{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L_2)^2} + j\omega \left(\frac{L_2 R_1^2}{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L_2)^2} + L_1 \right)$$

Hvor den reelle delen består av: $\frac{R_1^2 R_2 + R_1 R_2^2 + \omega^2 L_2 R_1}{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L_2)^2}$.

Og den imaginære delen består av: $j\omega \left(\frac{L_2 R_1^2}{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L_2)^2} + L_1 \right)$.

Beregning av parametere

Reaktorens resistans ved likestrøm beregnes med Formel 3.2.

$$R_{DC} = \frac{l}{\sigma A} \quad (3.2)$$

R_{DC} er lik med R_1 parallelt med R_2 i ekvivalentkretsen. Siden $R_1 \gg R_2$ antas $R_2 = R_{DC}$.

Beregner R_{DC} :

$$\begin{aligned} l &= r_{midlere} \cdot 2 \cdot \pi \cdot N \\ &= 219 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 80 \end{aligned}$$

$$\sigma_{al} = 38 \cdot 10^6$$

$$\begin{aligned} A &= H \cdot B \\ &= 1,5 \text{ mm} \cdot 460 \text{ mm} \\ &= 690 \cdot 10^{-6} \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{DC} &= \frac{l}{\sigma A} \\ &= \frac{219 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 80}{38 \cdot 10^{-6} \cdot 690 \cdot 10^{-6}} \\ &\approx 4,2 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

H og B er hentet fra Delkapittel 3.2.1. $r_{midlere}$ er hentet fra delkapittel 3.2.3. σ_{al} er hentet fra materialedatabasen til ANSYS Maxwell.

Kapasitans mellom reaktor og jord

Kapasitansen mellom reaktoren og innkapsling er simulert i delkapittel 3.2.3. Indre kapasitans er 8,5865 pF og ytre kapasitans er 50,805 pF.

Seriekapasitans

Kretsens seriekapasitans er seriekobling av kapasitansene mellom folielagene, som er utregnet i delkapittel 3.2.3 til 78,46 nF.

Seriekapasitansen er gitt ved Formel 3.3.

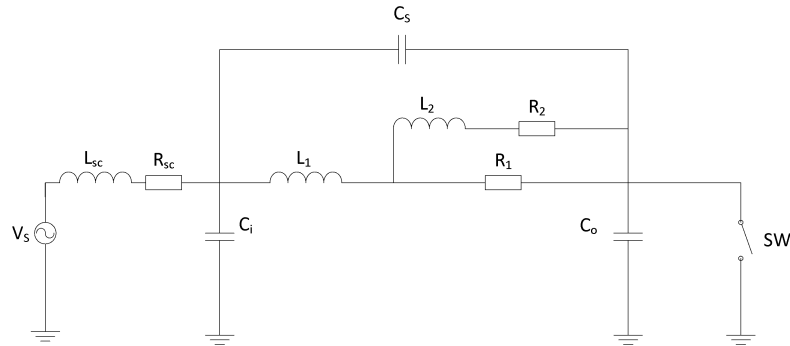
$$C_S = \frac{1}{\sum_{n=1}^n \frac{1}{c_n}} \quad (3.3)$$

$$C_S = \frac{1}{\sum_{n=1}^{80} \frac{1}{78,46 \text{ nF}}}$$

$$C_S = 780,75 \text{ pF}$$

3.3.3 Transientsimulering

Modellen bygges i ATP-draw etter Figur 3.12. For å oppnå god oppløsning på høyfrekvente transientspenninger settes tidssteg til $1 \cdot 10^{-8}$ s. Simuleringen kjøres og spenningen på hver side av reaktoren plottes. Strømklipping økes trinnvis og spenningstrasientens toppverdi noteres ved hvert tilfelle.



Figur 3.12: Ekvivalentkrets for studie av transientspenning, basert på Fysisk-Cauer-ekivalent.

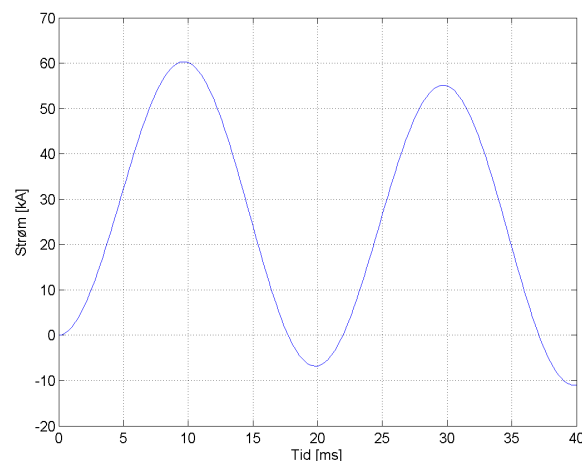
Tabell 3.2: Data for transientstudie.

Parameter	Med innkapsling	Uten innkapsling
	Verdi	Verdi
V_s	15 kV	15 kV
L_{sc}	184,971 μH	184,971 μH
R_{sc}	2,336 m Ω	2,336 m Ω
L_1	0,8758 mH	0,9456 mH
R_1	38,29 Ω	46,82 Ω
L_2	0,2561 mH	0,3652 mH
R_2	4,2m Ω	4,2m Ω
C_s	780,75 nF	780,75 nF
C_i	8,5865 pF	8,5865 pF
C_o	50,805 pF	50,805 pF

Simuleringsresultater

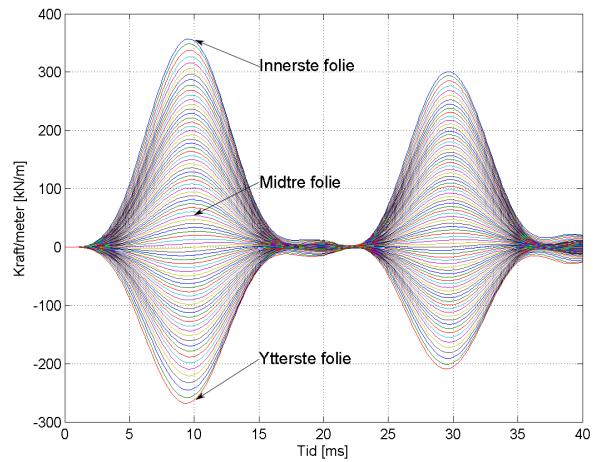
4.1 Tilfelle A, kraftstudie. Kun tilkoblet nett.

Simuleringsresultatene fra tilfelle A, Kraftstudie med kun tilkoblet nett er presentert i påfølgende delkapittel. Kortslutningsstrømmen som en funksjon av tid er vist i Figur 4.1.



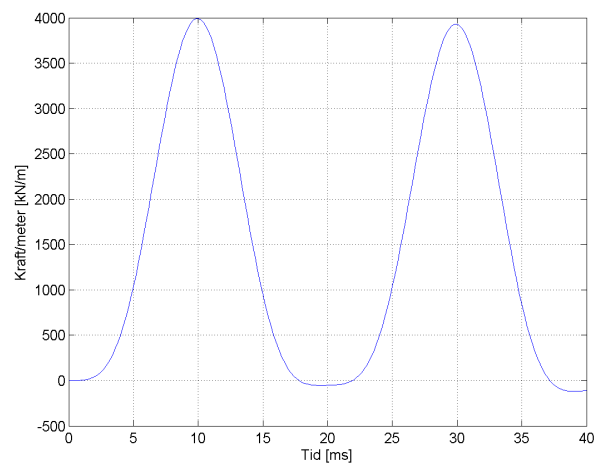
Figur 4.1: Kortslutningsstrømmen som funksjon av tid, ved tilfelle A

Figur 4.2 viser kraften per meter som virker på folielagene i X-retning. Folielag 1, det innerste laget, blir utsatt for den største kraften i positiv X-retning med toppverdi på 348 kN/m. Folielag 2 blir utsatt for noe mindre kraft og er representert med den nest øverste kurven. Slik fordeler kraften seg til folielag nummer 80, det ytterste laget. Det blir utsatt for den største kraften i negativ x-retning, med en toppverdi på -269 kN/m og er representert med den nederste kurven.



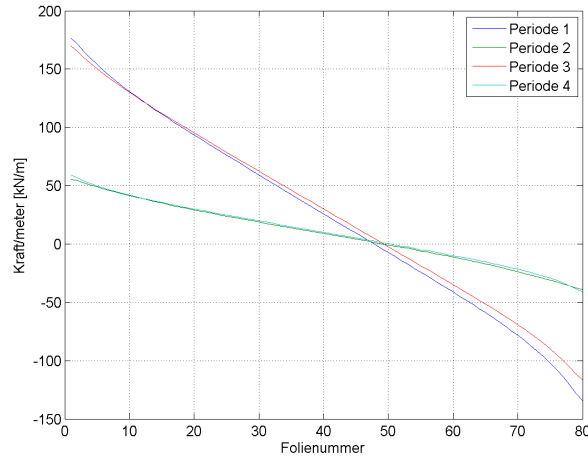
Figur 4.2: Kraft per meter som virker på folielagene i X-retning, ved tilfelle A

Figur 4.3 viser den radielle kreftene per meter som virker på reaktoren. Første toppverdi, etter omtrent 10 ms, er på 3999 kN/m. Andre toppverdi, etter omtrent 30 ms, er på 3927 kN/m.



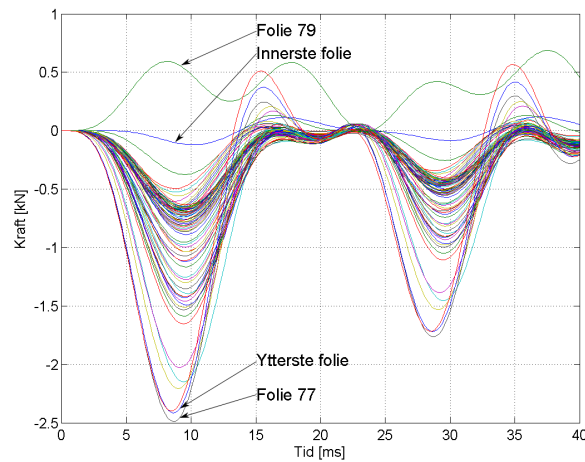
Figur 4.3: Den radielle kraften per meter som virker på reaktoren, ved tilfelle A

Figur 4.4 viser kraftens distribusjon i reaktoren. Ved periode 1 er kraftens nullpunkt ved folie 48, periode 2 og 4 ved folie 50 og periode 3 ved folie 49.



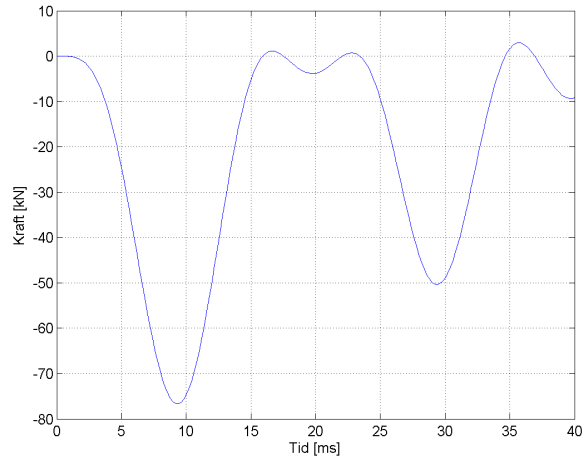
Figur 4.4: Kraftens distribusjon i reaktorens X-retning, ved tilfelle A

Figur 4.5 viser kraften som virker på folielagene i Y-retning. Folielag 77 blir utsatt for den største kraften i negativ Y-retning, med en toppverdi på -2,49 kN. Folielag 79 blir utsatt for den største kraften i positiv Y-retning, med en toppverdi på 0,59 kN.



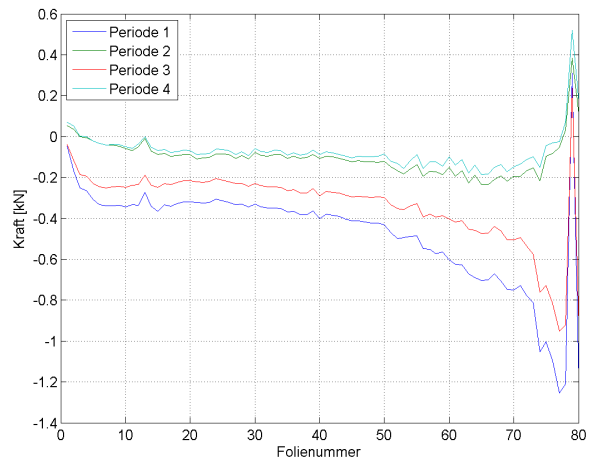
Figur 4.5: Kraften som virker på folielagene i Y-retning, ved tilfelle A

Figur 4.6 viser de aksielle kreftene som virker på reaktoren. Første toppverdi, etter omtrent 9 ms, er på -76 kN. Andre toppverdi, etter omtrent 29 ms, er på -50 kN.



Figur 4.6: Aksielle krefter som virker på reaktoren, ved tilfelle A

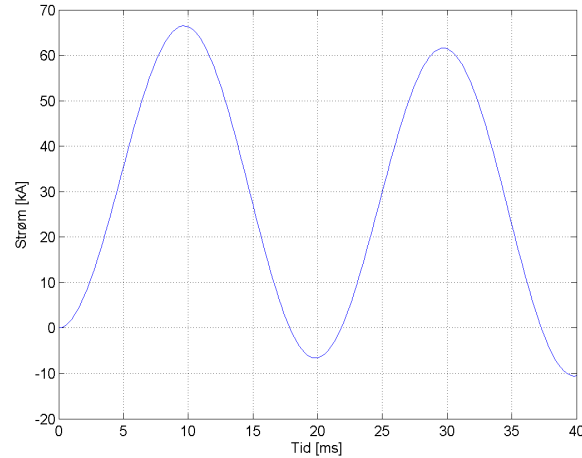
Figur 4.7 viser kraftens distribusjon i reaktoren. Ved periode 1 og 3 er kraftens nullpunkt ved folie 78 og 79, i periode 2 og 4 er kraftens nullpunkt ved folie 3 og 77.



Figur 4.7: Kraftens distribusjon i reaktorens Y-retning, ved tilfelle A

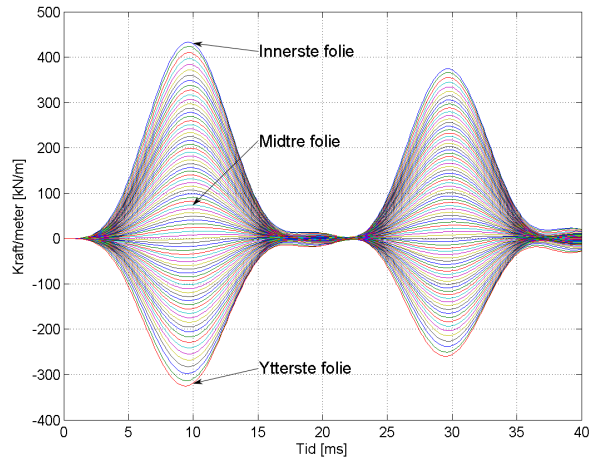
4.2 Tilfelle B, kraftstudie. Tilkoblet nett og generator.

Simuleringsresultatene fra tilfelle B, Kraftstudie med tilkoblet nett og generator er presentert i påfølgende delkapittel. Kortslutningsstrømmen som en funksjon av tid er vist i Figur 4.8.



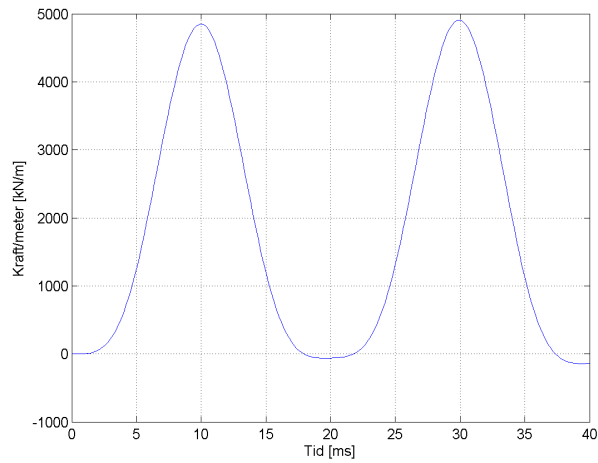
Figur 4.8: Kortslutningsstrømmen som funksjon av tid, ved tilfelle B

Figur 4.9 viser kraften per meter som virker på folielagene i X-retning. Folielag 1, det innerste laget, blir utsatt for den største kraften i positiv X-retning med toppverdi på 432 kN/m. Folielag 2 blir utsatt for noe mindre kraft og er representert med den nest øverste kurven. Slik fordeler kraften seg til folielag nummer 80, det ytterste laget. Det blir utsatt for den største kraften i negativ x-retning, med en toppverdi på -325 kN/m og er representert med den nederste kurven.



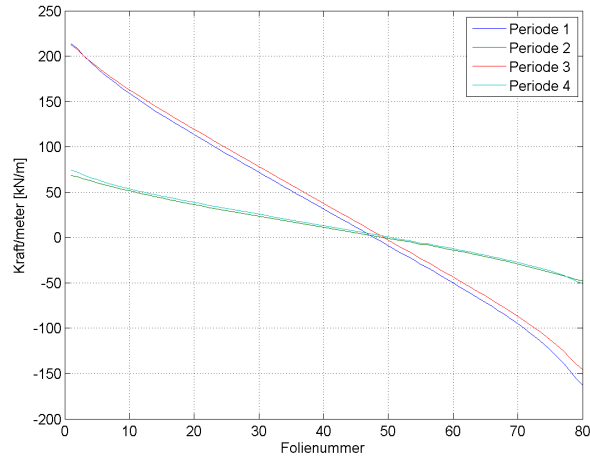
Figur 4.9: Kraft per meter som virker på folielagene i X-retning, ved tilfelle B

Figur 4.10 viser den radielle kraften per meter som virker på reaktoren. Første toppverdi, etter omtrent 10 ms, er på 4837 kN/m. Andre toppverdi, etter omtrent 30 ms, er på 4902 kN/m.



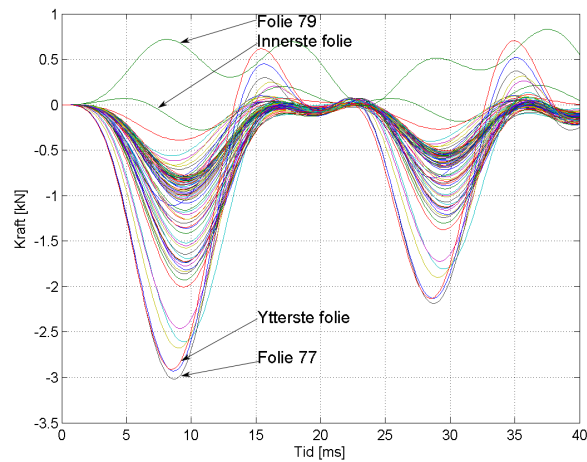
Figur 4.10: Den radielle kraften per meter som virker på reaktoren, ved tilfelle B

Figur 4.11 viser kraftens distribusjon i reaktoren. Ved periode 1 er kraftens nullpunkt ved folie 48, periode 2 og 4 ved folie 50 og periode 3 ved folie 49.



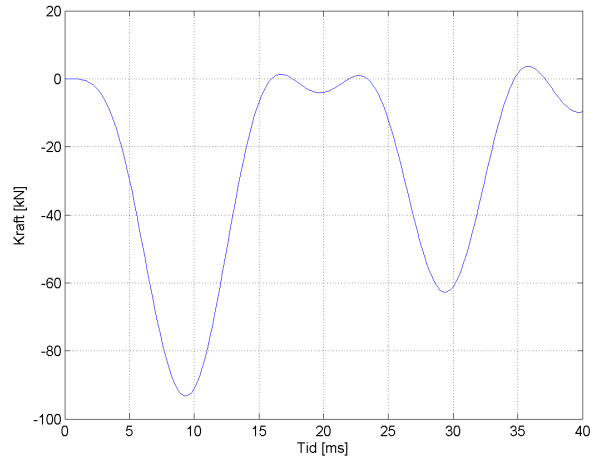
Figur 4.11: Kraftens distribusjon i reaktorens X-retning, ved tilfelle B

Figur 4.12 viser kraften som virker på folielagene i Y-retning. Folielag 77 blir utsatt for den største kraften i negativ Y-retning, med en toppverdi på -3 kN. Folielag 79 blir utsatt for den største kraften i positiv Y-retning, med en toppverdi på 0,7 kN.



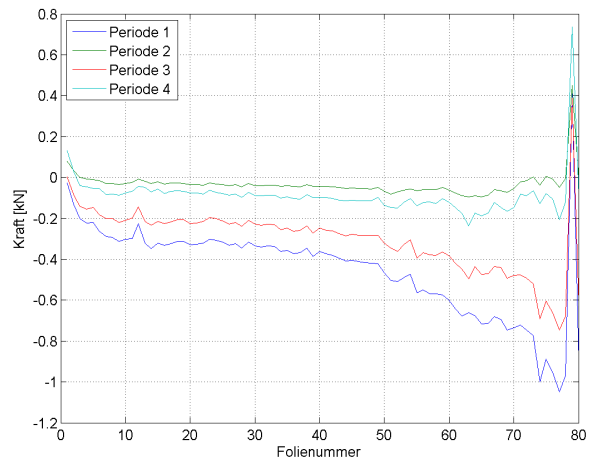
Figur 4.12: Kraften som virker på folielagene i Y-retning, ved tilfelle B

Figur 4.13 viser de aksielle kreftene som virker på reaktoren. Første toppverdi, etter omtrent 9 ms, er på -95 kN. Andre toppverdi, etter omtrent 29 ms, er på -64 kN.



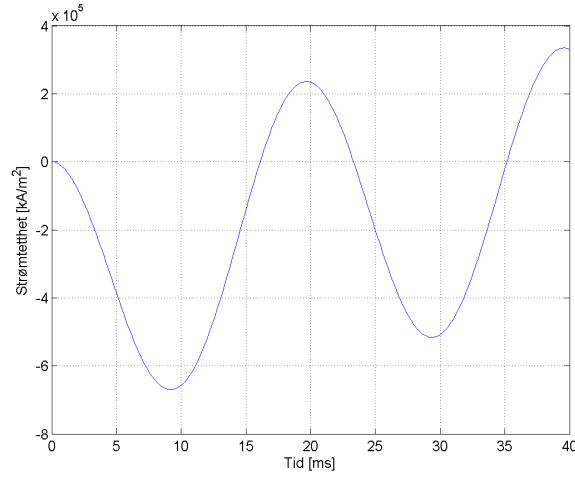
Figur 4.13: Aksielle krefter som virker på reaktoren, ved tilfelle B

Figur 4.14 viser kraftens distribusjon i reaktoren. Ved periode 2 er kraftens nullpunkt ved folie 3 og 77. Ved periode 4 er kraftens nullpunkt ved periode 5 og 77. Ved periode 1 og 3 kraftens nullpunkt ved folie 78 og 79.



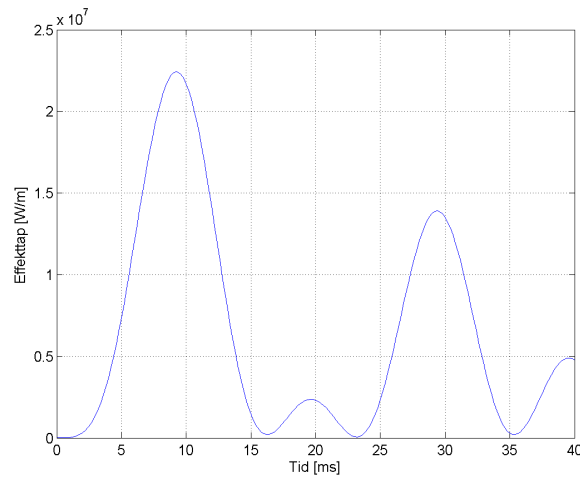
Figur 4.14: Kraftens distribusjon i reaktorens Y-retning, ved tilfelle B

Figur 4.15 viser strømtettheten i innkapslingen. Den største strømtettheten er på $-6,7 \cdot 10^5$ A/m², etter 9,2 ms.



Figur 4.15: Strømtetthet i innkapslingens sidevegg, ved reaktorens midtpunkt i høyderetningen.

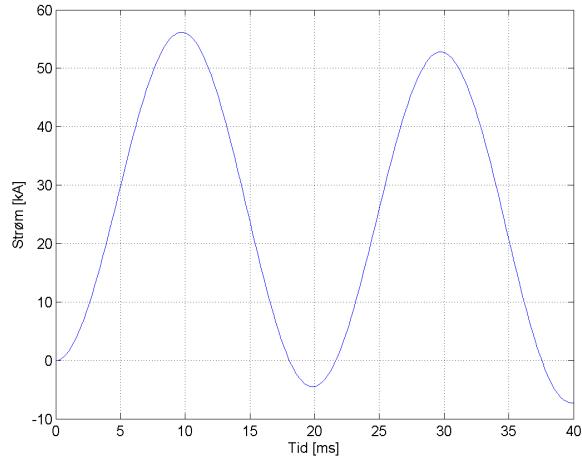
Figur 4.16 viser effekttapet i innkapslingens sidevegg. Det høyeste effekttapet oppstår etter 9,2 ms og er på $2,2 \cdot 10^7$ W/m .



Figur 4.16: Effekttap per meter i innkapslingens vegger, ved tilfelle B.

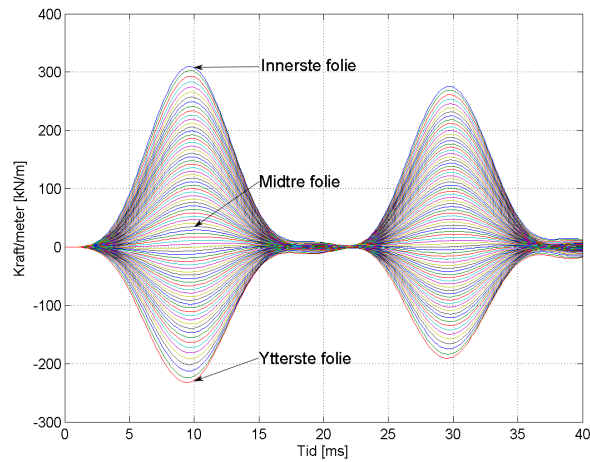
4.3 Tilfelle C, kraftstudie. Kun tilkoblet generator.

Simuleringsresultatene fra tilfelle C, Kraftstudie med kun tilkoblet generator er presentert i påfølgende delkapittel. Kortslutningsstrømmen som en funksjon av tid er vist i Figur 4.17.



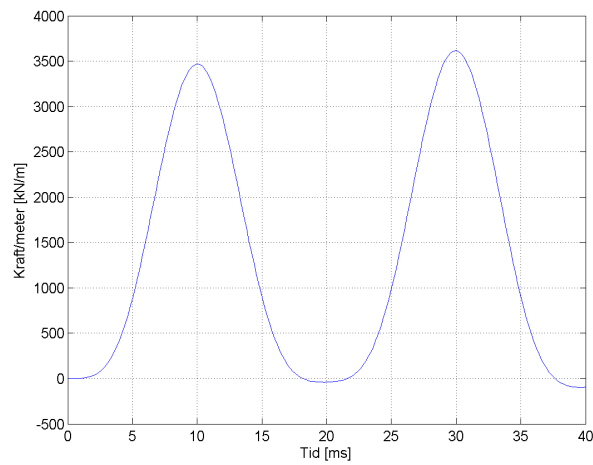
Figur 4.17: Kortslutningsstrømmen som funksjon av tid, ved tilfelle C

Figur 4.18 viser kraften per meter som virker på folielagene i X-retning. Folielag 1, det innerste laget, blir utsatt for den største kraften i positiv X-retning med toppverdi på 309 kN/m. Folielag 2 blir utsatt for noe mindre kraft og er representert med den nest øverste kurven. Slik fordeler kraften seg til folielag nummer 80, det ytterste laget. Det blir utsatt for den største kraften i negativ x-retning, med en toppverdi på -232 kN/m og er representert med den nederste kurven.



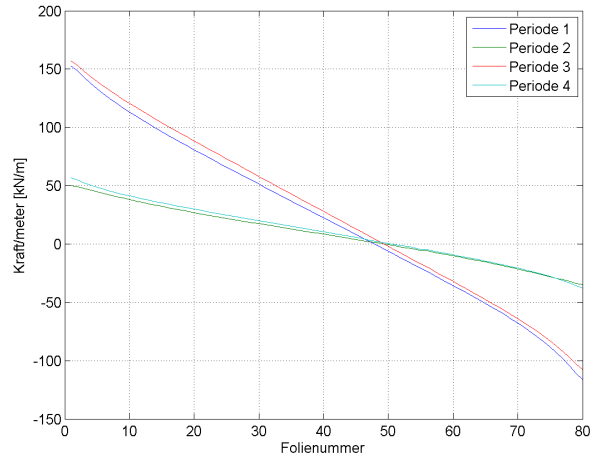
Figur 4.18: Kraft per meter som virker på folielagene i X-retning, ved tilfelle C

Figur 4.19 viser den radielle kraften per meter som virker på reaktoren. Første toppverdi, etter omtrent 11 ms, er på 3461 kN/m. Andre toppverdi, etter omtrent 30 ms, er på 3606 kN/m.



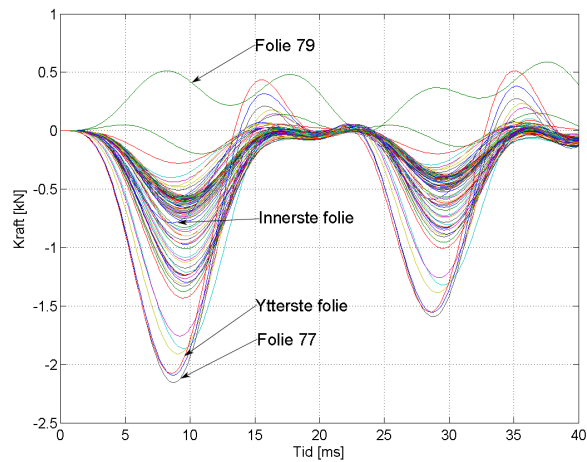
Figur 4.19: Den radielle kraften per meter som virker på reaktoren, ved tilfelle C

Figur 4.20 viser kraftens distribusjon i reaktoren. Ved periode 1 er kraftens nullpunkt ved folie 48, periode 2 og 4 ved folie 50 og periode 3 ved folie 49.



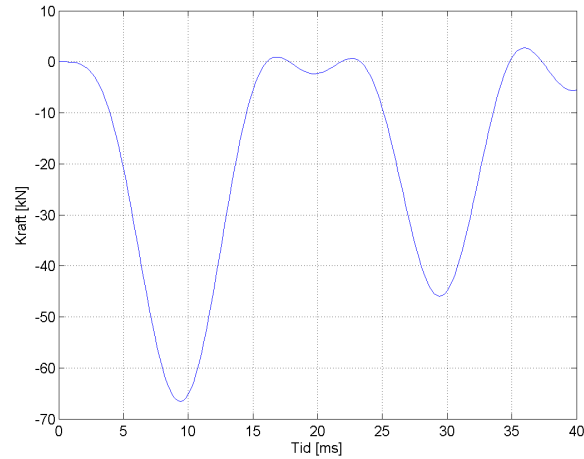
Figur 4.20: Kraftens distribusjon i reaktorens X-retning, ved tilfelle C

Figur 4.21 viser kraften som virker på folielagene i Y-retning. Folielag 77 blir utsatt for den største kraften i negativ Y-retning, med en toppverdi på -2,15 kN. Folielag 79 blir utsatt for den største kraften i positiv Y-retning, med en toppverdi på 0,51 kN.



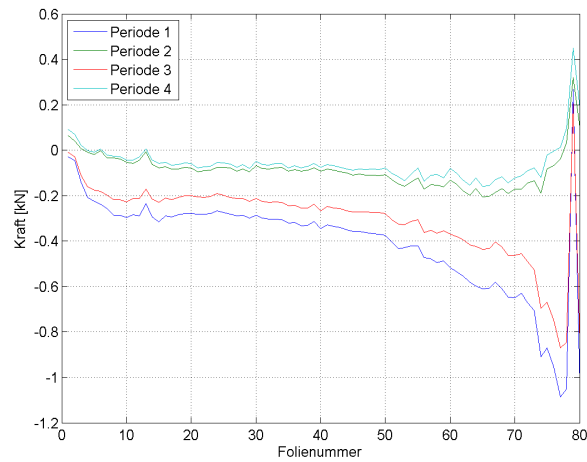
Figur 4.21: Kraften som virker på folielagene i Y-retning, ved tilfelle C

Figur 4.22 viser de aksielle kreftene som virker på reaktoren. Første toppverdi, etter omtrent 9 ms, er på -67 kN. Andre toppverdi, etter omtrent 29 ms, er på -46 kN.



Figur 4.22: Aksielle krefter som virker på reaktoren, ved tilfelle C

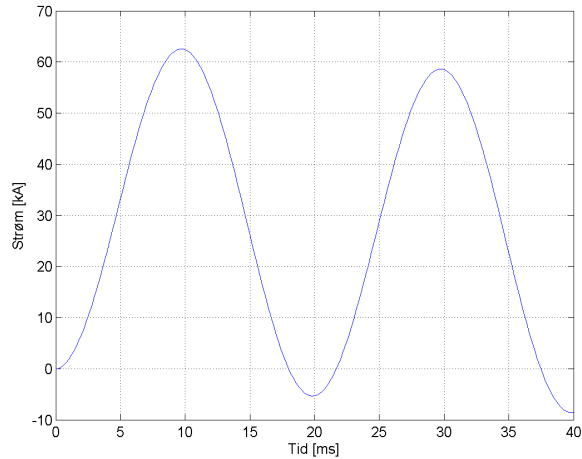
Figur 4.23 viser kraftens distribusjon i reaktoren. Ved periode 2 er kraftens nullpunkt ved folie 3 og 77. Ved periode 4 er kraftens nullpunkt ved periode 5 og 77. Ved periode 1 og 3 kraftens nullpunkt ved folie 78 og 79.



Figur 4.23: Kraftens distribusjon i reaktorens Y-retning, ved tilfelle C

4.4 Tilfelle D, kraftstudie. Tilkoblet nett og generator. Innkapsling etter datablad.

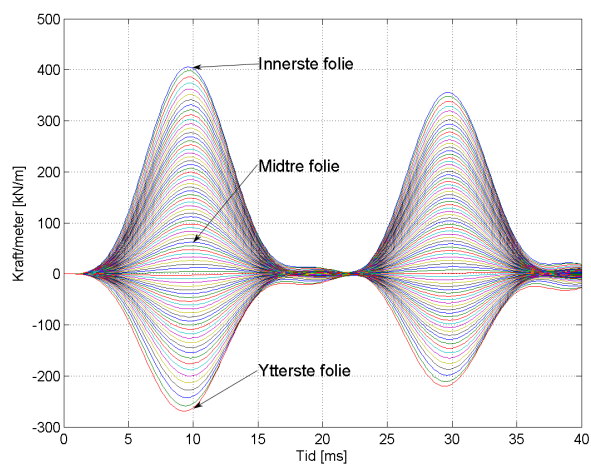
Simuleringsresultatene fra tilfelle D, Kraftstudie med tilkoblet nett og generator, hvor innkapslingen er dimensjonert etter datablad, er presentert i påfølgende delkapittel. Kortslutningsstrømmen som en funksjon av tid er vist i Figur 4.24.



Figur 4.24: Kortslutningsstrømmen som funksjon av tid, ved tilfelle D

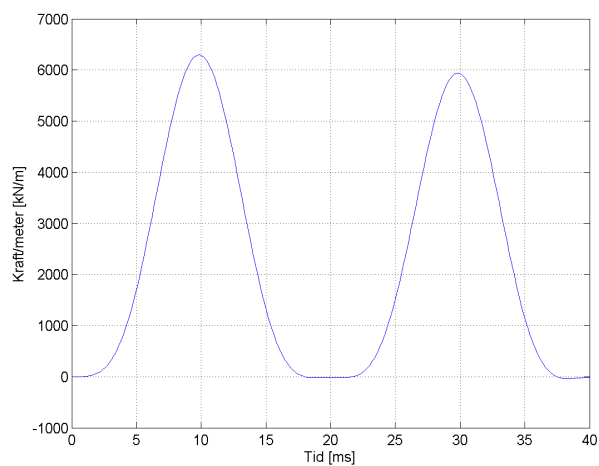
Figur 4.25 viser kraften per meter som virker på folielagene i X-retning. Folielag 1, det innerste laget, blir utsatt for den største kraften i positiv X-retning med toppverdi på 405 kN. Folielag 2 blir utsatt for noe mindre kraft og er representert med den nest øverste kurven. Slik fordeler kraften seg til folielag nummer 80, det ytterste laget. Det blir utsatt for den største kraften i negativ x-retning, med en toppverdi på -269 kN og er representert med den nederste kurven.

4.4. TILFELLE D, KRAFTSTUDIE. TILKOBLET NETT OG GENERATOR. INNKAPSLING ETTER DATABLAD.



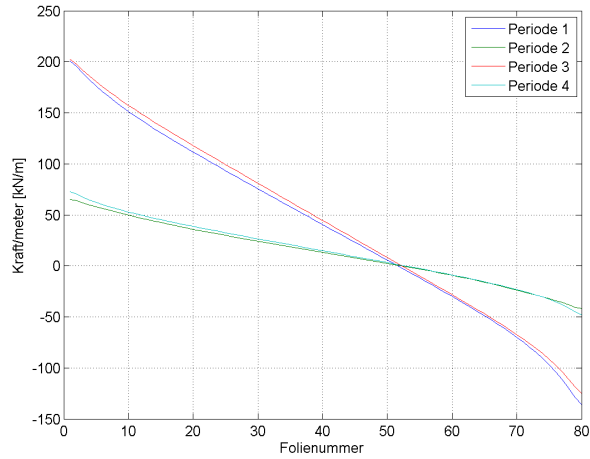
Figur 4.25: Kraft per meter som virker på folielagene i X-retning, ved tilfelle D

Figur 4.26 viser den radielle kraften per meter som virker på reaktoren. Første toppverdi, etter omtrent 10 ms, er på 6286 kN. Andre toppverdi, etter omtrent 30 ms, er på 5928 kN.



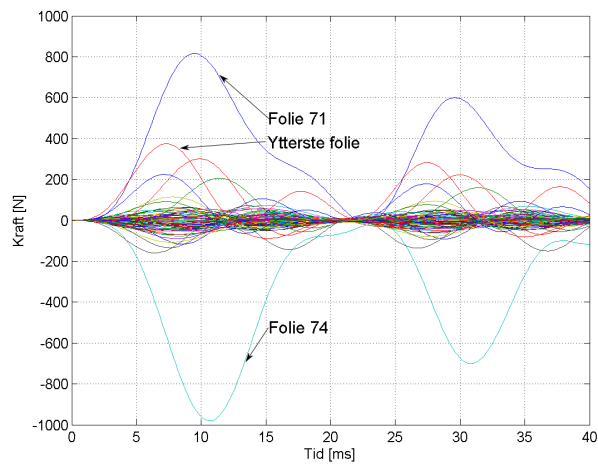
Figur 4.26: Den radielle kraften per meter som virker på reaktoren, ved tilfelle D

Figur 4.27 viser kraftens distribusjon i reaktoren. Kraftens nullpunkt er ved folie 52 i alle perioder.



Figur 4.27: Kraftens distribusjon i reaktorens X-retning, ved tilfelle D

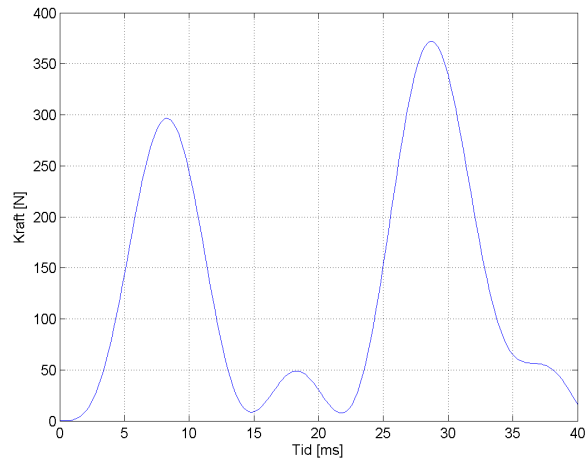
Figur 4.28 viser kraften som virker på folielagene i Y-retning. Folielag 74 blir utsatt for den største kraften i negativ Y-retning, med en toppverdi på -980 N. Folielag 71 blir utsatt for den største kraften i positiv Y-retning, med en toppverdi på 815 N.



Figur 4.28: Kraften som virker på folielagene i Y-retning, ved tilfelle D

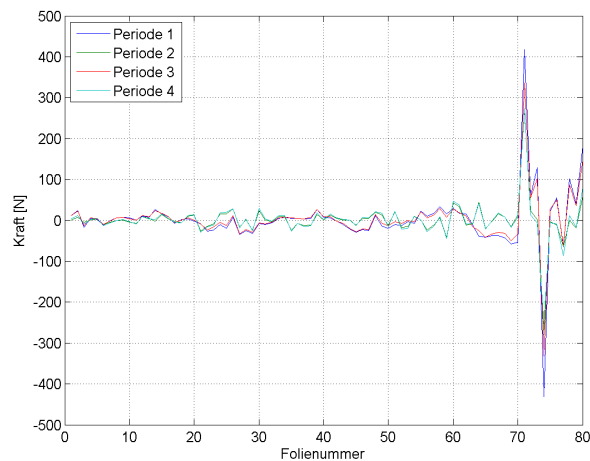
4.4. TILFELLE D, KRAFTSTUDIE. TILKOBLET NETT OG GENERATOR. INNKAPSLING ETTER DATABLAD.

Figur 4.29 viser de aksielle kreftene som virker på reaktoren. Første toppverdi, etter omtrent 8 ms, er på 296 N. Andre toppverdi, etter omtrent 29 ms, er på 372 N.



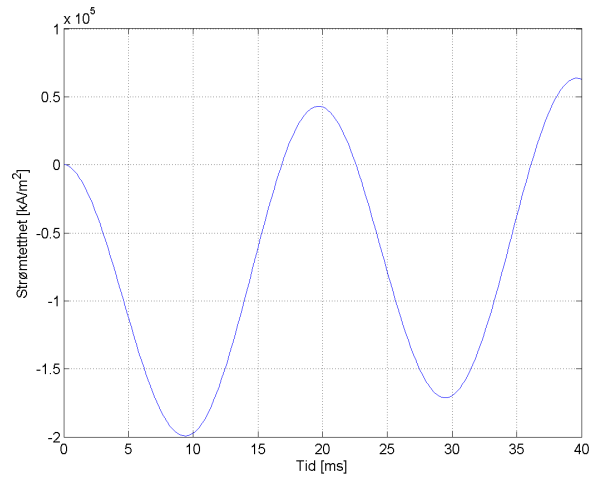
Figur 4.29: Aksielle krefter som virker på reaktoren, ved tilfelle D

Figur 4.30 viser kraftens distribusjon i reaktoren. Kraften er rundt nullpunktet i de 70 innerste og 5 ytterste folielagene. Ved folielag 71 oppstår en topp i positiv Y-retning, og ved folielag 74 oppstår en topp i negativ Y-retning.



Figur 4.30: Kraftens distribusjon i reaktorens Y-retning, ved tilfelle D

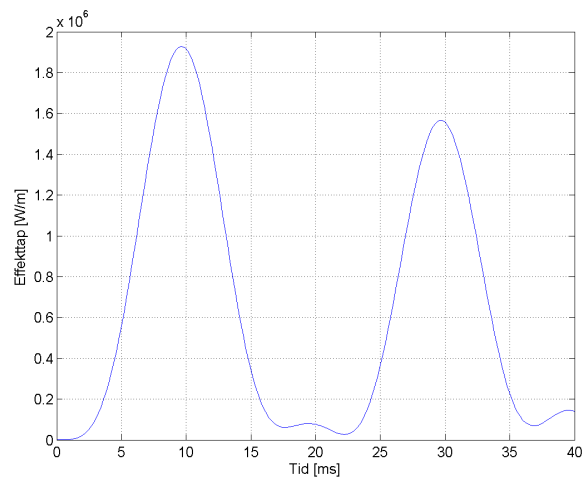
Figur 4.31 viser strømtettheten i innkapslingen. Den største strømtettheten er på $-2 \cdot 10^5$, etter 9,4 ms.



Figur 4.31: Strømtetthet i innkapslingens sidevegg, ved reaktorens midtpunkt i høyderetningen.

Figur 4.32 viser effekttapet i innkapslingens sidevegg.

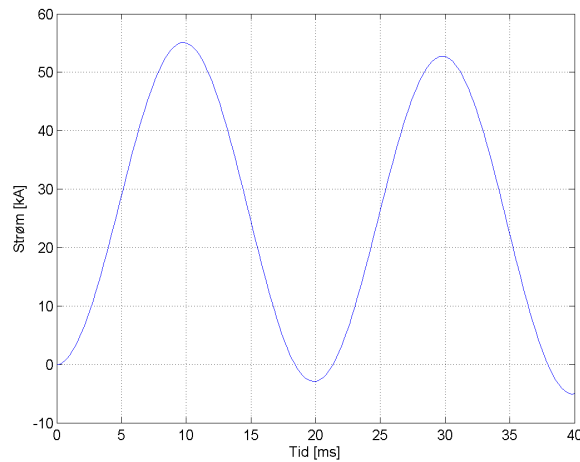
Det høyeste effekttapet oppstår etter 9,4 ms og er på $1,9 \cdot 10^6$ W/m .



Figur 4.32: Effekttap per meter i innkapslingens vegger, ved tilfelle D.

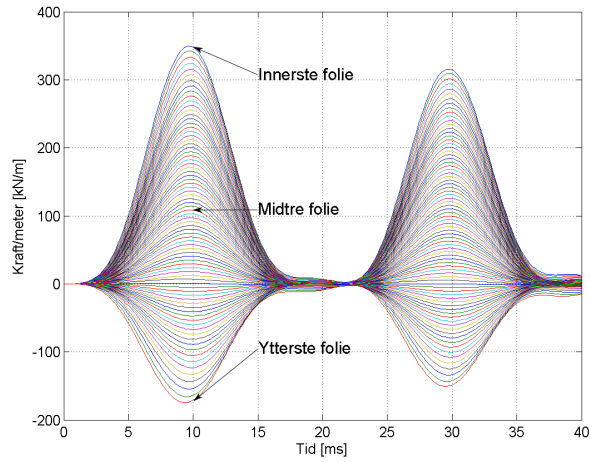
4.5 Tilfelle E, kraftstudie. Tilkoblet nett og generator. Innkapsling elektrisk isolert.

Simuleringsresultatene fra tilfelle E, Kraftstudie med tilkoblet nett og generator, hvor innkapslingen er elektrisk isolert, er presentert i påfølgende delkapittel. Kortslutningsstrømmen som en funksjon av tid er vist i Figur 4.33.



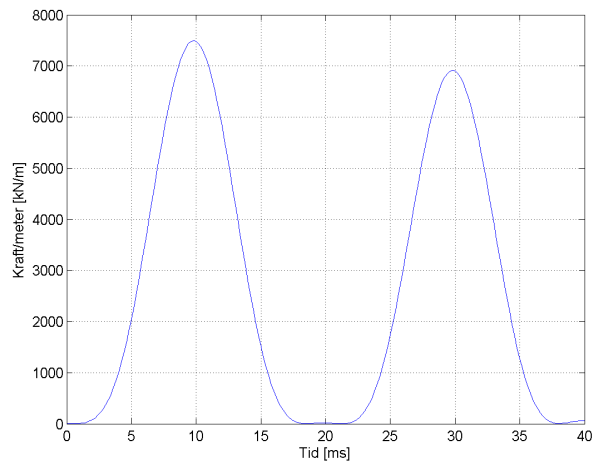
Figur 4.33: Kortslutningsstrømmen som funksjon av tid, ved tilfelle E

Figur 4.34 viser kraften per meter som virker på folielagene i X-retning. Folielag 1, det innerste laget, blir utsatt for den største kraften i positiv X-retning med toppverdi på 349 kN. Folielag 2 blir utsatt for noe mindre kraft og er representert med den nest øverste kurven. Slik fordeler kraften seg til folielag nummer 80, det ytterste laget. Det blir utsatt for den største kraften i negativ x-retning, med en toppverdi på -174 kN og er representert med den nederste kurven.



Figur 4.34: Kraft per meter som virker på folielagene i X-retning, ved tilfelle E

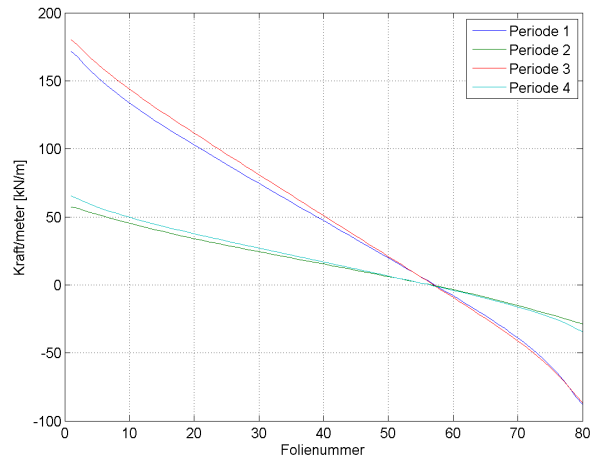
Figur 4.35 viser de radielle kraften per meter som virker på reaktoren. Første toppverdi, etter omtrent 10 ms, er på 7479 kN. Andre toppverdi, etter omtrent 30 ms, er på 6899 kN.



Figur 4.35: Den radielle kraften per meter som virker på reaktoren, ved tilfelle E

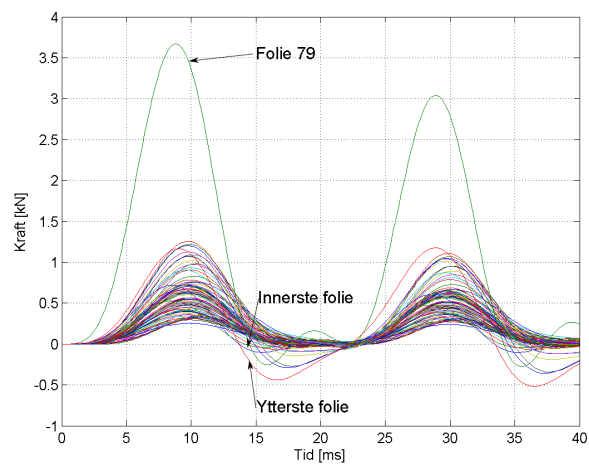
4.5. TILFELLE E, KRAFTSTUDIE. TILKOBLET NETT OG GENERATOR. INNKAPSLING ELEKTRISK ISOLERT.

Figur 4.36 viser kraftens distribusjon i reaktoren. Kraftens nullpunkt er ved folie 57 i alle perioder.



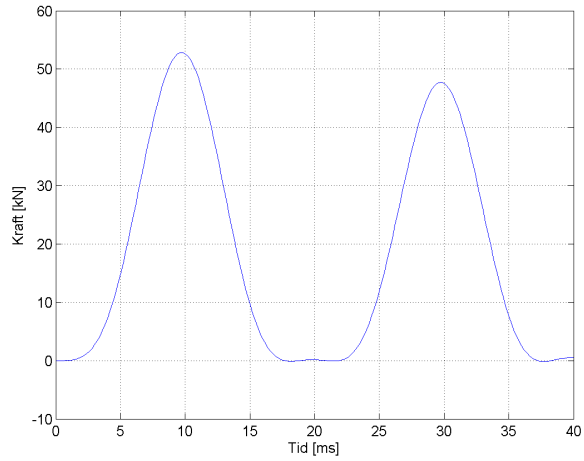
Figur 4.36: Kraftens distribusjon i reaktorens X-retning, ved tilfelle E

Figur 4.37 viser kraften som virker på folielagene i Y-retning. Folielag 71 blir utsatt for den største kraften i positiv Y-retning, med en toppverdi på 3,67 kN.



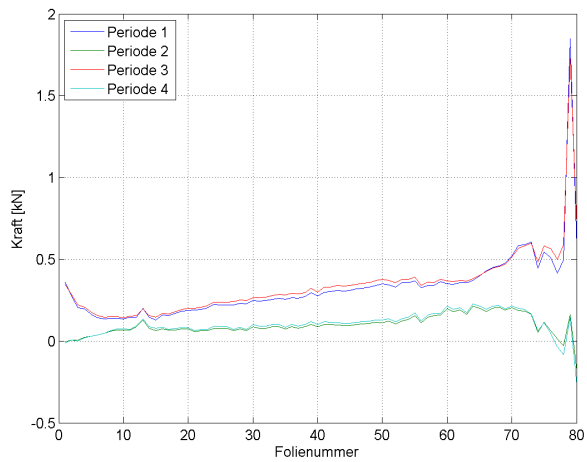
Figur 4.37: Kraften som virker på folielagene i Y-retning, ved tilfelle E

Figur 4.38 viser de aksielle kreftene som virker på reaktoren. Første toppverdi, etter omtrent 10 ms, er på 53 kN. Andre toppverdi, etter omtrent 30 ms, er på 48 kN.



Figur 4.38: Aksielle krefter som virker på reaktoren, ved tilfelle E

Figur 4.39 viser kraftens distribusjon i reaktoren. Kraften er i positiv Y-retning for hele periode 1 og 3. Periode 2 og 4 er kraften i positiv i folie 1 til 77, hvor den svinger til negativ Y-retning.



Figur 4.39: Kraftens distribusjon i reaktorens Y-retning, ved tilfelle E

4.6 Oppsummering av kraftstudie

Toppverdiene til kreftene som virker i folielagene i X- og Y-retning, radielle- og aksielle krefter er samlet i Tabell 4.1.

Tabell 4.1: Oppsummering av kraftstudie.

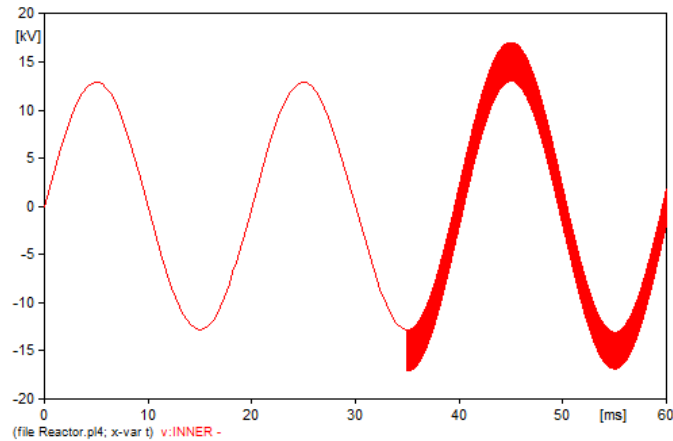
Tilfelle	A	B	C	D	E
Innkapslingstype	Normal	Normal	Normal	Etter datablad	Isolert
Koblingssituasjon	Nett	Nett og generator	Generator	Nett og generator	Nett og generator
Strøm [kA]	60,3	66,4	56,2	62,5	55,1
Kraft/m X-retning [kN/m]	348	432	309	405	349
Radielle krefter/m [kN/m]	3999	4902	3606	6286	7479
Kraft Y-retning [kN]	-2,49	-3,03	-2,15	-0,98	3,67
Aksielle krefter [kN]	-76	-95	-67	0,372	53

4.7 Vurdering av simuleringsresultatene fra kraftstudie

Når det jobbes med simuleringsverktøy er det alltid muligheter for at det oppstår feil i resultatene. Om mulig bør simuleringsresultatene verifiseres med laboratorieforsøk. Laboratorietesting er inngår ikke i denne oppgavens arbeidsomfang, så en god verifisering lar seg ikke gjøre. I X-retning ser simuleringsresultatene fornuftig ut, og lar seg forklare ved hjelp av grunnleggende elektromagnetisme. Resultatene i Y-retning bør benyttes noe mer varsomt. Ved flere tilfeller blir tilstøtende folielag utsatt for krefter som er motsatt rettet, noe som vanskelig lar seg forklare. Det er derfor nærliggende å anta at det har oppstått noen numeriske feil i disse simuleringene. Selv om det sannsynligvis er noe feilkilder, kan resultatene benyttes for å finne trender i kraftforløpet.

4.8 Tilfelle F, transientstudie med normal innkapsling

Figur 4.40 viser transientspenningen, mellom fase og jord, ved generatorsiden av reaktoren. Bryteren åpner ved strømmens nullgjennomgang. Det oppstår en høyfrekvent transientspenning ved bryteøyeblikket.



Figur 4.40: Transientspenningene ved generatorsiden av reaktoren. Bryteren åpner ved strømmens nullgjennomgang.

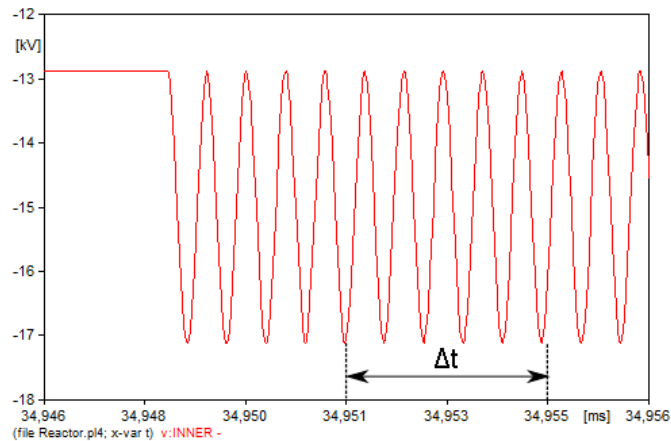
Figur 4.41 viser detaljbilde i bryteøyeblikket. Transientspenningen har en amplitude på omtrent 4,2 kV og høyeste fasespenning er på -17,1 kV. Fra figuren kommer det frem at 5 perioder er over på omtrent $4 \mu\text{s}$. Frekvensen på transienten blir da:

$$\Delta t \approx (4/5) \mu\text{s}$$

$$f = \frac{1}{\Delta t}$$

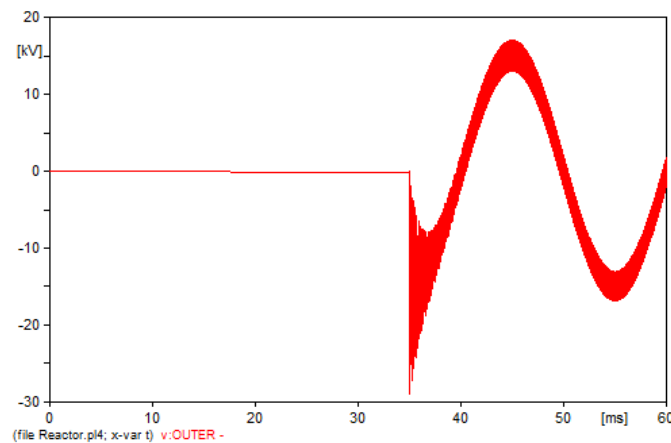
$$f = \frac{1}{(4/5) \cdot 10^{-6}}$$

$$f = 1,25 \text{ MHz}$$



Figur 4.41: Detaljfigur av transientspenningen ved generatorsiden av reaktoren.

Figur 4.42 viser transientspenningen, mellom fase og jord, ved magnetiseringssiden av reaktoren. Bryteren åpner ved strømmens nullgjennomgang. Det oppstår en høyfrekvent transientspenning ved bryteøyeblikket.



Figur 4.42: Transientspenningene ved magnetiseringssiden av reaktoren. Bryteren åpner ved strømmens nullgjennomgang.

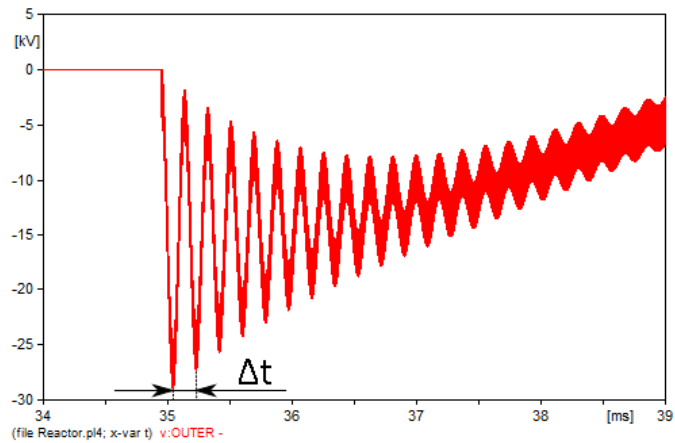
Figur 4.43 viser transientspenningens form etter brytingen. Transientspenningen består av tre komponenter. En komponent som følger nettfrekvensen, en veldig høyfrekvent transient, som er beregnet til 1,25 MHz, og en tredje komponenten. Frekvensen til den tredje komponenten er utregnet nedenfor.

$$\Delta t \approx 184 \mu s$$

$$f = \frac{1}{\Delta t}$$

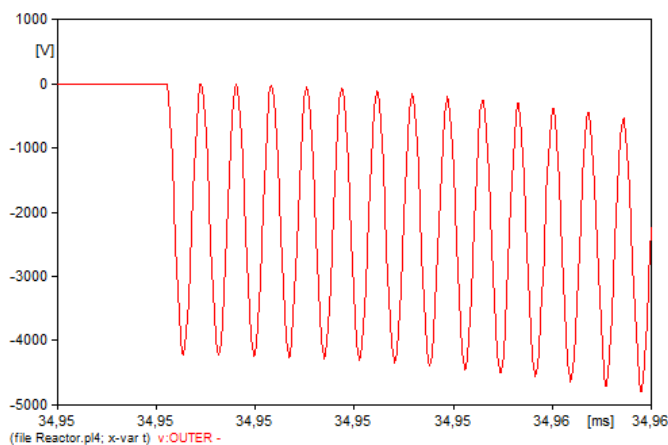
$$f = \frac{1}{184 \cdot 10^{-6}}$$

$$f \approx 5,4 \text{ kHz}$$



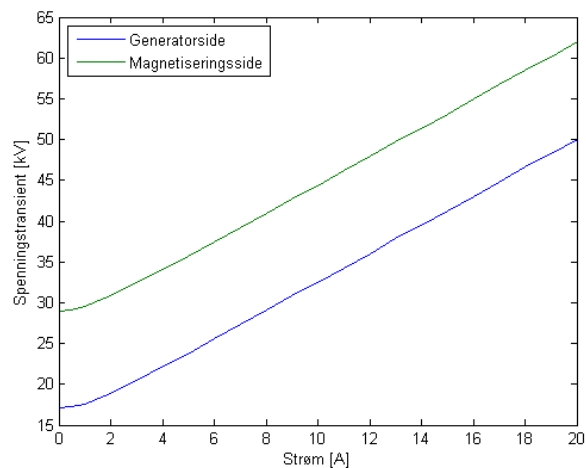
Figur 4.43: Transientspenningens form ved generatorsiden av reaktoren.

Figur 4.44 viser detaljbilde i bryteøyeblikket. Transientspenningen har en amplitude på omtrent 4,2 kV, og høyeste fasespenning er på omtrent -29 kV.



Figur 4.44: Detaljfigur av transientspenningen ved generatorsiden av reaktoren.

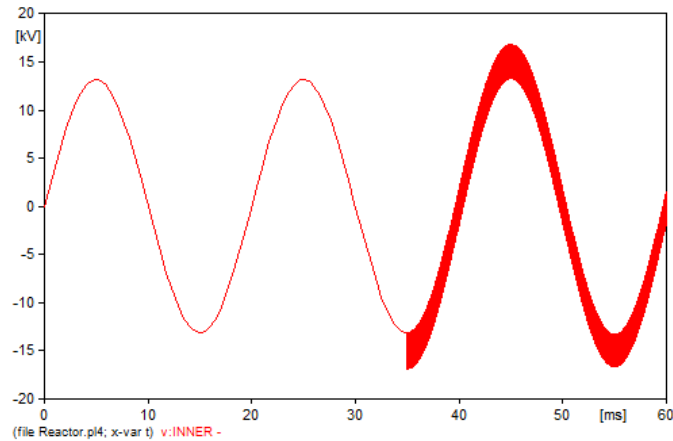
Figur 4.45 viser transientspenningenes toppverdi som funksjon av strømklipping. Den laveste transientspenningen er ved ingen strømklipping. Da er transientspenningen ca 17,1 kV ved generatorsiden og ca 29 kV ved magnetiseringssiden. Den høyeste transientspenningen er ved den største strømklippingen, 20 A. Da er transientspenningen ca 50 kV ved generatorsiden og ca 62 kV ved magnetiseringssiden. Transientspenningen er alltid størst på magnetiseringssiden av reaktoren.



Figur 4.45: Transientspenningens toppverdi som funksjon av strømklipping.

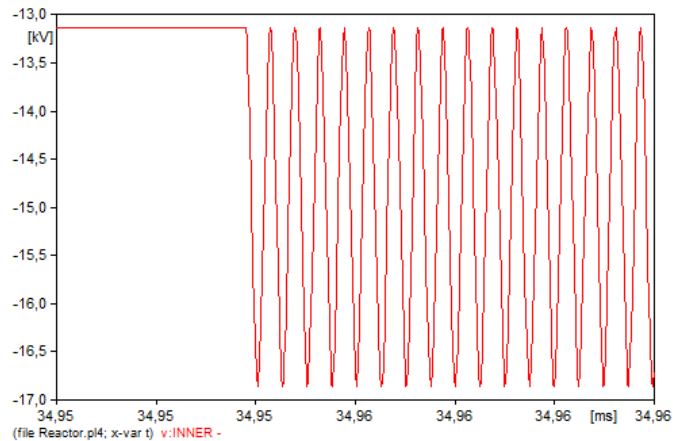
4.9 Tilfelle G, transientstudie med isolert innkapsling.

Figur 4.46 viser transientspenningen, mellom fase og jord, ved generatorsiden av reaktoren. Bryteren åpner ved strømmens nullgjennomgang. Det oppstår en høyfrekvent transientspenning ved bryteøyeblikket.



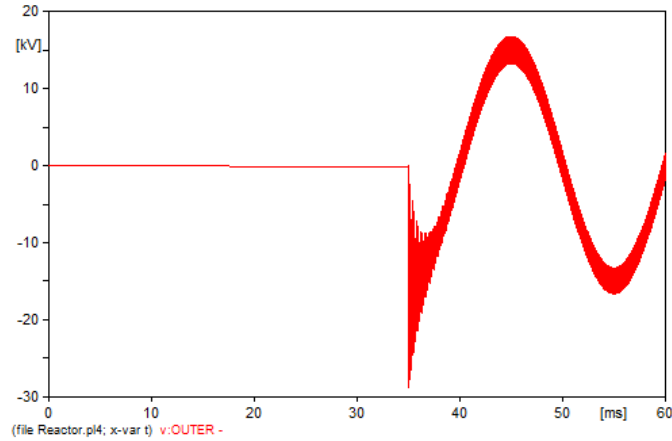
Figur 4.46: Transientspenningene ved generatorsiden av reaktoren. Bryteren åpner ved strømmens nullgjennomgang.

Figur 4.47 viser detaljbilde i bryteøyeblikket. Transientspenningen har en amplitude på omtrent 3,7 kV og høyeste fasespenning er på ca -16,9 kV.



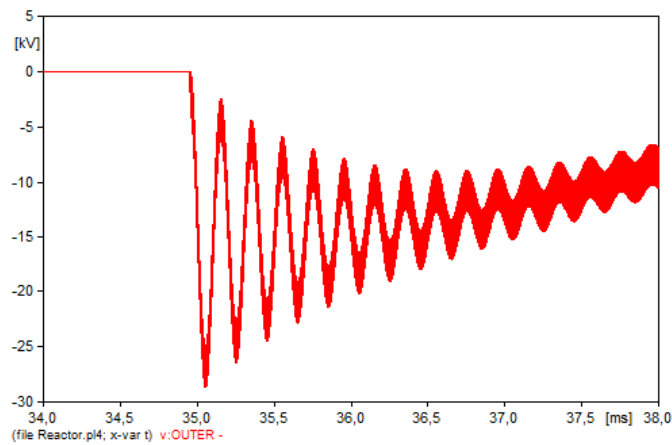
Figur 4.47: Detaljfigur av transientspenningen ved generatorsiden av reaktoren.

Figur 4.48 viser transientspenningen, mellom fase og jord, ved magnetiseringssiden av reaktoren. Bryteren åpner ved strømmens nullgjennomgang. Det oppstår en høyfrekvent transientspenning ved bryteøyeblikket.



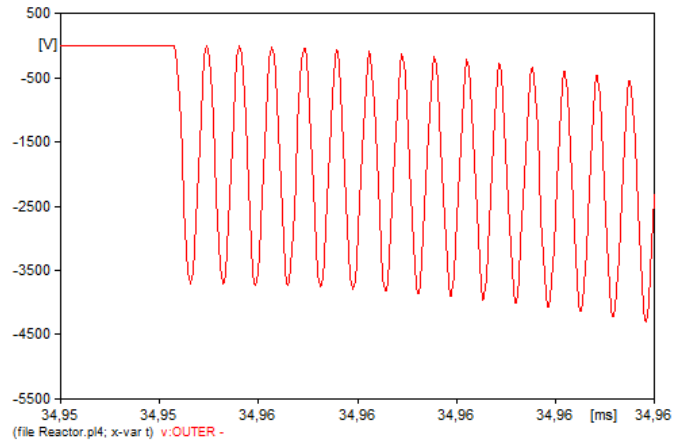
Figur 4.48: Transientspenningene ved magnetiseringssiden av reaktoren. Bryteren åpner ved strømmens nullgjennomgang.

Figur 4.49 viser Transientspenningens form etter brytingen. Høyeste fasespenning er på omtrent -28,7 kV.



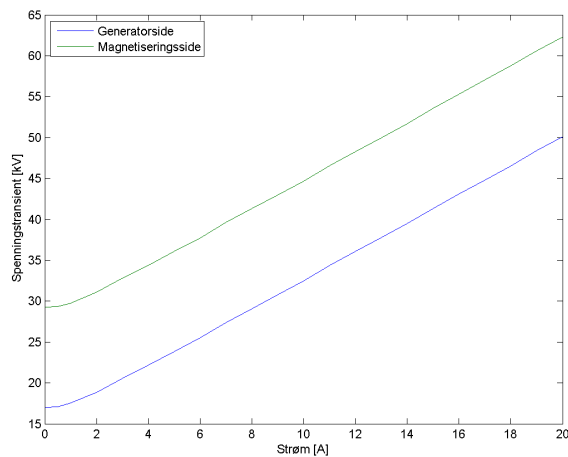
Figur 4.49: Transientspenningens form ved generatorsiden av reaktoren.

Figur 4.50 viser detaljbilde i bryteøyeblikket. Transientenspenningen har en amplitude på omtrent -3,7 kV.



Figur 4.50: Detaljfigur av transientenspenningen ved generatorsiden av reaktoren.

Figur 4.51 viser transientenspenningenes toppverdi som funksjon av strømklipping. Den laveste transientenspenningen er ved ingen strømklipping. Da er transientenspenningen ca 17 kV ved generatorsiden og ca 29,3 kV ved magnetiseringssiden. Den høyeste transientenspenningen er ved den største strømklippingen, 20 A. Da er transientenspenningen ca 50,1 kV ved generatorsiden og ca 62,3 kV ved magnetiseringssiden. Transientenspenningen er alltid størst på magnetiseringssiden av reaktoren.



Figur 4.51: Transientenspenningens toppverdi som funksjon av strømklipping.

4.10 Vurdering av simuleringsresultatene fra transientstudie

Til representasjon av generator og tilkoblet nett benyttes en enkel spenningskilde og kortslutningsimpedans. Reaktoren representeres med en To-blokkers Cauer ekvivalent, basert på frekvensresponsen opp til 100 kHz. Da det ikke er tatt hensyn til demping i ekvivalentkretsen, og frekvensen til noen av transientene viste seg å være høyere enn antatt, gir ikke simuleringsresultatene et reelt bilde av transientspenningen, men er fortsatt godt egnet til å gi en indikasjon på hvorvidt bryting av kortslutningsstrømmen kan medføre overspenninger som igjen kan føre til jordslutning.

Diskusjon

Ved en kortslutning i et høyspentanlegg nær en synkrongenerator vil det oppstå store strømmer. Kortslutningsstrømmen vil bestå av et betydelig likestrømsledd. I simuleringene er kortslutningsforløpet undersøkt i 40 ms. I denne tidsperioden er det tre nullgjennomganger. Kortslutningsforløpet deles opp i fire perioder, hvor hver periode begynner ved strømmens nullgjennomgang, som beskrevet i Delkapittel 3.2.7.

5.1 Kraftstudie

Ved konstruksjon av foliereaktor er det nødvendig med kunnskap om den mekaniske styrken til reaktoren, klemmesystemet og støtteisolatorene. Hvis den elektromekaniske påkjenningen blir for stor vil reaktoren bli deformert og i verste fall vil den havarere.

5.1.1 Innkapslingens påvirkning

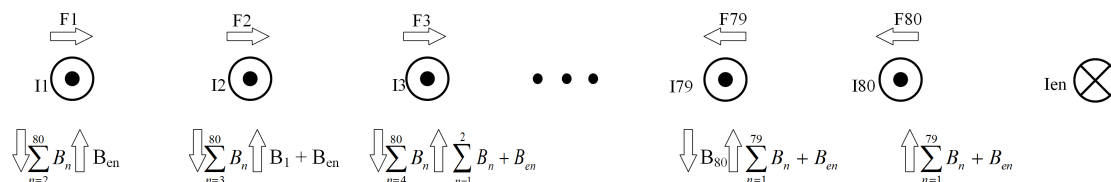
I delkapittel 2.2 forklares hvilke elektromekaniske krefter som virker på to parallelle ledere når de fører strøm i samme retning. I en foliereaktor er prinsippet det samme, men det er 80 parallelle ledere som fører strøm i samme retning. Rundt hvert folielag er det et magnetfelt. Magnetfeltets retningen er gitt av høyrehåndsregelen. Magnetfeltet satt opp av et lag vil være motsatt rettet på de innenforliggende lagene sammenlignet med de utenforliggende lagene. Magnetfeltet vil avta med avstanden, noe som resulterer i at nærliggende folielag vil ha et større bidrag enn folielag som ligger lengre unna.

Magnetfeltene fra alle folielagene summeres til et resulterende magnetfelt. Ettersom retningen på feltene må tas med i betraktningen vil noen av magnetfeltene forsterke hverandre og noen vil oppheve hverandre.

Da strømmen er lik i alle folielag, og kraften er produkt av magnetfeltet og strømmen, vil det være magnetfeltet som er avgjørende for hvordan kraften mellom folielagene fordeles seg.

Magnetfeltets retning ved de innerste lagene er motsatt av de ytterste. Det forklarer at indre folielag utsettes for en stor kraft i positiv X-retning og ytterste folielag utsettes for en stor kraft i negativ X-retning. Magnetfeltet som går i innkapslingen vil indusere

en virvelstrøm. I følge Lenz' lov vil strømretningen være motsatt i reaktoren og innkapslingen. Virvelstrømmen i innkapslingen vil da sette opp et nytt magnetfelt som vil påvirke kraftutviklingen i reaktoren. Prinsippet for hvordan kraften oppstår i de ulike lagene er vist i Figur 5.1.



Figur 5.1: Magnetfeltet som virker på folielagene, strømretningen i folien og innkapslingen og den totale kraften som virker på hvert folielag. Numrene representerer folienummer og «en» representerer innkapslingen.

Formel 2.4 beskriver kraften en strømførende leder vil bli utsatt for i et magnetfelt. I reaktoren settes magnetfeltet, \vec{B} , opp av strømmen, \vec{i} . Når strømretningen endres, vil naturligvis også magnetfeltets retning endres. Dette resulterer i at retningen til kraften, \vec{F} , forblir konstant. For en folieviklet reaktor vil de innerste folielagene presses utover på utenforliggende lag og ytterste lagene vil presses innover. Dette resulterer i at en komprimerende kraft virker på folielagene.

For vurdering av innkapslingens påvirkning sammenlignes tilfelle B, D og E. Disse tilfellene har samme kortslutningsimpedans, mens innkapslingen er henholdsvis hentet fra prosjekteringsgrunnlaget, konstruert ut i anbefalinger fra datablad og konstruert i et isolerende materiale.

På grunn av gjensidig induktans vil innkapslingen påvirke reaktorens totale induktans. Dette fører til forskjell i kortslutningsstrømmene som går i reaktoren ved hvert av tilfellene. Til tross for endring i strømstyrke er trendene for reaktorens påvirkning klare.

X-retning

For kraften som virker på hvert av folielagene, Figur 4.9, 4.25 og 4.34, blir tilfelle B utsatt for størst påkjenning. Da innkapslingen gir et bidrag til folielagene som virker i negativ retning er det naturlig at den høyeste negative verdien er i dette tilfellet. I positiv X-retning er også den høyeste verdien i tilfelle B. Innkapslingen reduserer kraften i positiv X-retning, men på grunn av den høye strømstyrken vil også den høyeste positive kraften oppstå ved tilfelle B.

For kraften som virker radielt deformerende på reaktoren er situasjonen en annen. Ved tilfelle E blir reaktoren utsatt for den største deformerende kraften, 7479 kN/m. Tilfelle D blir reaktoren utsatt for deformerende kraft på 6286 kN/m og ved tilfelle B er kraften på 4902.

Innkapslingen bidrar til en kraft i negativ X-retning på alle folielagene. *Ettersom den totale deformerende kraft er i positiv X-retning vil innkapslingens påvirkning redusere den totale deformerende kraften i X-retning.*

Y-retning

Som beskrevet i Delkapittel 4.7 bør resultatene i Y-retning benyttes med varsomhet. Selv om simuleringsresultatene trolig inneholder noe feil gir trendene en god indikasjon om kreftene som oppstår i reaktoren. Simuleringsresultatene viser at kraften som oppstår i Y-retning for hvert av folielagene er veldig ulike for de tre tilfelle, vist i Figur 4.12, 4.28 og 4.37.

I tilfelle B blir hoveddelen av folielagene utsatt for en kraft i negativ Y-retning. Ved tilfelle E blir hoveddelen av folielagene utsatt for en kraft i positiv Y-retning og ved tilfelle D blir flesteparten av lagene utsatt for en veldig liten kraft, sammenlignet med de andre tilfelle. Denne kraften er omtrent jevnt fordelt i positiv og negativ Y-retning.

De aksielle kreftene viser også det samme. Ved tilfelle B vil reaktoren presses mot gulvet med en kraft på 95 kN, ved tilfelle E vil reaktoren presses opp med en kraft på 53 kN og ved tilfelle D vil reaktoren presses opp med en kraft på 0,37 kN.

Innkapslingen vil forårsake en kraft mot senter av reaktoren i radiell retning og kraft nedover i aksial retning.

5.1.2 Strømtetthet og varmeutvikling i innkapslingen

Under kortslutning induseres det en stor virvelstrøm i innkapslingen. Figurene 4.15 og 4.31 viser strømtettheten ved henholdsvis tilfelle B og tilfelle D. Strømmen induseres av magnetfeltet i innkapslingen. Da innkapslingen i tilfelle B er mye nærmere reaktoren enn tilfelle D, blir denne utsatt for et kraftigere magnetfelt, som igjen induserer en større virvelstrøm.

Effekttapet i innkapslingen ved tilfelle B er vist i Figur 4.16 og tilfelle D er vist i Figur 4.32. Selv om forskjellen på varmeutviklingen i de to tilfellene er stor vil begge medføre en betydelig brannfare.

Da innkapslingen i tilfelle E er laget i isolerende materiale vil det ikke induseres virvelstrømmer i denne. Både varmeutviklingen og kraften som virker på reaktoren er avhengig av den induserte strømmen i innkapslingen.

5.1.3 Koblingssituasjonenes påvirkning

Tilfelle A, B og C er simulert med samme simuleringsmodell og innkapsling, men med ulik kortslutningsimpedans. Kortslutningsimpedansen representerer de ulike koblingssituasjonene. Simuleringene sammenlignes for å vurdere hvordan koblingssituasjonene påvirker den elektromekaniske påkjenningen i den strømbegrensende spolen.

Kortslutningsimpedansen er avhengig av hvilke komponenter som er tilkoblet. Ved lav kortslutningsimpedans blir kortslutningsstrømmen høy. Som Formel 2.5 forklarer er kraften et resultat av strømmen i kvadrat når det kun betraktes to ledere. Da koblingssituasjonen har direkte sammenheng med styrken på kortslutningsstrømmen er det selv sagt at koblingssituasjonen vil ha påvirkning på de elektromekaniske kreftene som oppstår.

Fra simuleringene kommer det frem at kreftene som virker, både i X- og Y-retning, er tilnærmet formlike for alle betraktningene. På grunn av den økte strømstyrken øker

også kraftens toppverdi. I simuleringene kommer det frem at strømstyrken i hovedsak har innflytelse på kraftens amplitude, mens kraftens distribusjon og utvikling i spolen, i liten grad blir påvirket av ending i koblingssituasjonen.

5.2 Transientspenning

Til transientstudie benyttes en forenklet nettmodell bestående av spenningskilde, kortslutningsinduktans og kortslutningsresistans. Reaktoren modelleres med en innvendig og en utvendig kapasitans, samt en Fysisk Cauer-ekvivalent. Simuleringene gir en god indikasjon på transientspenningens toppverdi. Denne modellen tar ikke hensyn til spenningstransientens demping. Intensjonen med transientstudien er å vurdere om overspenninger ved bryting av strømmen kan være en medvirkende årsak til jordslutning på generatorsiden av reaktoren og første spenningstransientene vil være tilstrekkelig for å vurdere dette. Transientspenningen ble undersøkt med innkapsling konstruert som i prosjekteringsgrunnlaget og med elektrisk isolert innkapsling. Da det kun er marginale forskjeller mellom tilfellene omtales kun tilfelle med innkapsling etter prosjekteringsgrunnlaget. Ved bryting i strømmens nullgjennomgang er amplituden til fasespenningen 17 kV på generatorsiden av reaktoren. På magnetiseringssiden av reaktoren kommer spenningen opp i 29 kV.

Som nevnt i 2.4 benyttes ofte vakuumbrytere i slike typer anlegg og vakuumbrytere vil føre til strømklipping. Formel 2.8 viser at overspenningen som oppstår ved strømklipping er et proporsjonal med strømstyrken ved klippingen. Dette stemmer godt med Figur 4.45. Den totale spenningen ved strømklipping fører til høye overspenninger. Strømklipping mellom 2 og 15 A er normalt og ved 15 A oppstår en spenning på 41 kV ved generatorsiden og 53 kV på magnetiseringssiden, noe som gir overspenning på omtrent 3,5 ganger nominell spenning.

5.3 Overslag på generatorsiden

Figur E.2 viser at det var et gjennomslag på generatorsiden av reaktoren. Årsaken til gjennomslaget var trolig en kombinasjon av at reaktoren utsatt for så store krefter at den ble deformert og transientspenningene. Fra bildet er det tydelig at tilkoblingsskinnen ble vridd og i løpet av kortslutningsforløpet er det sannsynlig at avstanden mellom skinnen og innkapslingen ble redusert. Når det i tillegg oppstår transientspenninger er risikoen for gjennomslag stor.

5.4 Anbefaling til design av innkapslingen

Innkapslingens design påvirker størrelsen på virvelstrømmen som induseres. Av de undersøkte tilfellene vil det induseres størst virvelstrøm i tilfelle B, noe mindre i tilfelle D og ved tilfelle E vil det ikke induseres virvelstrømmer.

Med tanke på de radielle kreftene vil virvelstrømmene ha en gunstig påvirkning. Den mest gunstige situasjonen er ved Tilfelle B. De aksielle kreftene ved tilfelle D er nesten ikke-eksisterende. Tilfelle B vil føre til en kraft som virker ned mot gulvet og tilfelle E fører til en kraft som vil "løfte" reaktoren.

I et kraftverk er driftssikkerheten svært viktig. Om det først oppstår en ulykke er det ønskelig å begrense skadeomfanget og minimere nedetiden. Innkapslingen i tilfelle D gir gunstige forhold fra et kraftperspektiv. Men på grunn av den økte brannfaren som oppstår er ikke denne innkapslingen å anbefale.

Tilfelle E er minst gunstige med tanke på radielle deformerende krefter. Dette setter større krav til klemmesystemet. Det er også en aksial kraft tilstede, som støtteisolatorene må motstå. Av de undersøkte innkapslingstypene vurderes tilfelle E som det mest hensiktsmessige designet, på grunn av brannfaren som vil oppstå ved bruk av innkapsling utført i et ledende materiale.

Konklusjon

Ved kortslutning i et høyspentanlegg, nær en synkrongenerator, vil det oppstå store kortslutningsstrømmer med et stort likestrømsledd. Komponentene som fører kortslutningsstrømmen vil bli utsatt for en stor mekanisk påkjenning. Deformering av den strømbegrensende spolen, i kombinasjon med spenningstransienter var trolig årsaken til gjennomslaget på generatorsiden av reaktoren ved hendelsen i Blåfalli Vik.

- ✓ Den elektromekaniske påkjenningen øker med kortslutningsstrømmen.
- ✓ Konstrueres innkapslingen i ledende materiale vil det induseres virvelstrømmer som vil påvirke kraften som virker på spolen. Virvelstrømmene vil produsere varme, som kan medføre brannfare.
- ✓ Koblingssituasjonen har i hovedsak innflytelse på kraftens amplitude, mens kraftens distribusjon og utvikling i liten grad blir påvirket.
- ✓ En ledende innkapsling reduserer de radielle deformerende kreftene som virker på en folieviklet strømbegrensende spole.
- ✓ Innkapsling konstruert i et ledende materiale vil bidra med en aksiell kraft rettet nedover.
- ✓ Av de undersøkte tilfelle er det anbefalt at innkapslingen konstrueres i et isolerende materiale.
- ✓ Ved bryting av kortslutningsstrømmer vil det oppstå spenningstransienter. I simuleringstilfellene kunne disse bli opptil 3,5 ganger nominell spenning.

Videre arbeid

7.1 Dynamisk modellering under kortslutning

Under store kortslutninger vil reaktoren bli deformert. Deformasjonen endrer reaktorens geometri, som igjen vil endre magnetfeltet. Ending i magnetfeltet påvirker kreftene som oppstår i reaktoren. Påvirkningen av spolens deformasjon under kortslutning bør undersøkes.

Nær generator kan likestrømleddet i kortslutningsstrømmen være stor og det kan gå flere perioder før strømmens første nullgjennomgang. For å unngå å klippe strømmen må utkoblingen forsinkes og kortslutningsstrømmen kan virke i flere perioder. Dette vil skape en oscillerende kraft, som virker på tilkoblet utstyr, som reaktorer og samleskinner. Å sette opp en dynamisk simulering av kortslutningsforløpet og undersøke hvordan slikt utstyr blir påvirket av kortslutningsstrømmen er av interesse for videre arbeid.

7.2 Forbedring og verifisering av simuleringene

Det er benyttet en todimensjonal simuleringsmodell i dette arbeidet. Det medfører visse forenklinger som bruk av ekvivalent innkapsling. For å oppnå fullgode resultater bør det lages en detaljrik tredimensjonal modell. Modellen bør inkludere tilkoblingsskinner, støtteisolatorer, gjennomføringer og dør i innkapslingen.

Det bør også settes opp et laboratorieeksperiment for å verifisere resultatene fra simuleringene.

Bibliografi

- [1] T. Vadder. *Kortslutningsberegninger og effekten av kortslutning*. Norwegian University of Science and Technology, Desember 2014.
- [2] P. Gjerde. *Teknisk og økonomisk dimensjoneringsunderlag for skinner, kabler og platekapslede skap i lav- og mellomspenningsanlegg*. Trondheim : Norges tekniske høgskole, Institutt for elkraftteknikk, 1981.
- [3] Jan Machowski, Janusz W Bialek, and J. R Bumby. *Power system dynamics*. Wiley, 2008.
- [4] N.J. and Balu, P. Kundur, and M.G. Lauby. *Power system stability and control / P. Kundur ; edited by Neal J. Balu, Mark G. Lauby*. New York : McGraw-Hill, 1994.
- [5] J.C. Das. *Power system analysis : short-circuit load flow and harmonics / J.C. Das*. Boca Raton, Fla. : CRC Press, 2012.
- [6] Kopatsch. G. Kaempfer. S. *ABB Switchgear manual*. Berlin :Cornelsen, 2002.
- [7] J Körner, E Lundström, and Chr Beck-Friis. *Elektroteknisk handbok*. 1941.
- [8] David M Cook. *The theory of the electromagnetic field*. Prentice-Hall, 1975.
- [9] Prof. Dr. Ing. Robert Nilssen. *Electromagnetics in Power Engineering, TET5100/TET4140*. Norwegian University of Science and Technology, Autumn 2012.
- [10] L. O Svaasand. *Elektrisitet og magnetisme. - Del 2*. Tapir, 1985.
- [11] Richard Wolfson and Jay M Pasachoff. *Physics with modern physics for scientists and engineers*. Addison-Wesley, 1999.
- [12] Arne Nysveen. *TET 4195 High Voltage Equipment: Power Transformer*. Norwegian University of Science and Technology, Spring 2011.
- [13] Magne Runde. *Current Interruption in Power Grids*. Norwegian University of Science and Technology, 2014.
- [14] Elmer Sorrentino and Juan Carlos Burgos. Application of 2d linear models for computing zero-sequence magnetizing impedances of 3-phase core-type transformers. *Electric Power Systems Research*, 117:123–133, 2014.

- [15] Saeed Jazebi, Francisco de Leon, and Behrooz Vahidi. *Duality-Synthesized Circuit for Eddy Current Effects in Transformer Windings*, volume 28. 2013.
- [16] *Norsk Elektroteknisk Komite (NEK). NEK IEC 60909-0, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents.* Geneve : International Electrotechnical Commission, 2001.

Beregning av impedans ved de ulike tilfellene

Manuelle beregninger basert på formlene i IEC 60909[16] og anleggsdata hentet fra spesialiseringsprosjektet[1]. Regnearket baserer seg også på arbeid gjort i dette spesialiseringsprosjektet. Beregningene tar for seg impedansen i tilfelle A, B og C.

Mapleutregningene vises på de fire kommende sider.

▼ Bidrag fra 300 kV – nettet

▼ Overliggende nett

$$\left[\begin{array}{l} > U_{HV} := 300 \cdot 10^3 : c := 1.1 : S_{300} := 9023 \cdot 10^6 : U_{LV} := 15 \cdot 10^3 : XR := 8 : \\ \hline > t_r := \frac{U_{HV}}{U_{LV}} : \\ \hline > Z_{300} := \frac{c \cdot U_{HV}^2}{S_{300}} \cdot \frac{1}{t_r^2} : \\ \hline > X_{300} := \text{solve} \left(\sqrt{X^2 + \left(\frac{X}{XR} \right)^2} = Z_{300} \cdot X \right) : \\ \hline > X_{300} := \text{simplify}(X_{300}) \text{ assuming } X_{300} :: \text{positive} : \\ \hline > R_{300} := \frac{X_{300}}{XR} : \\ \hline Z_{300} := \text{Complex}(R_{300}, X_{300}) : \end{array} \right.$$

$$\left[\begin{array}{l} > t_r := \frac{U_{HV}}{U_{LV}} : \\ \hline > Z_{300} := \frac{c \cdot U_{HV}^2}{S_{300}} \cdot \frac{1}{t_r^2} : \\ \hline > X_{300} := \text{solve} \left(\sqrt{X^2 + \left(\frac{X}{XR} \right)^2} = Z_{300} \cdot X \right) : \\ \hline > X_{300} := \text{simplify}(X_{300}) \text{ assuming } X_{300} :: \text{positive} : \\ \hline > R_{300} := \frac{X_{300}}{XR} : \\ \hline Z_{300} := \text{Complex}(R_{300}, X_{300}) : \end{array} \right.$$

$$\left[\begin{array}{l} > Z_{300} := \frac{c \cdot U_{HV}^2}{S_{300}} \cdot \frac{1}{t_r^2} : \\ \hline > X_{300} := \text{solve} \left(\sqrt{X^2 + \left(\frac{X}{XR} \right)^2} = Z_{300} \cdot X \right) : \\ \hline > X_{300} := \text{simplify}(X_{300}) \text{ assuming } X_{300} :: \text{positive} : \\ \hline > R_{300} := \frac{X_{300}}{XR} : \\ \hline Z_{300} := \text{Complex}(R_{300}, X_{300}) : \end{array} \right.$$

$$\left[\begin{array}{l} > X_{300} := \text{solve} \left(\sqrt{X^2 + \left(\frac{X}{XR} \right)^2} = Z_{300} \cdot X \right) : \\ \hline > X_{300} := \text{simplify}(X_{300}) \text{ assuming } X_{300} :: \text{positive} : \\ \hline > R_{300} := \frac{X_{300}}{XR} : \\ \hline Z_{300} := \text{Complex}(R_{300}, X_{300}) : \end{array} \right.$$

$$\left[\begin{array}{l} > X_{300} := \text{simplify}(X_{300}) \text{ assuming } X_{300} :: \text{positive} : \\ \hline > R_{300} := \frac{X_{300}}{XR} : \\ \hline Z_{300} := \text{Complex}(R_{300}, X_{300}) : \end{array} \right.$$

$$\left[\begin{array}{l} > R_{300} := \frac{X_{300}}{XR} : \\ \hline Z_{300} := \text{Complex}(R_{300}, X_{300}) : \end{array} \right.$$

$$\left[\begin{array}{l} Z_{300} := \text{Complex}(R_{300}, X_{300}) : \end{array} \right.$$

▼ Linje LIN-1-300

$$\left[\begin{array}{l} > l_{LIN1} := 2.3 : r_{LIN1} := 0.0377 : x_{LIN1} := 0.413 : \\ \hline > R_{LIN1} := \frac{l_{LIN1} \cdot r_{LIN1}}{t_r^2} : \\ \hline > X_{LIN1} := \frac{l_{LIN1} \cdot x_{LIN1}}{t_r^2} : \\ \hline > Z_{LIN1} := \text{Complex}(R_{LIN1}, X_{LIN1}) : \end{array} \right.$$

$$\left[\begin{array}{l} > R_{LIN1} := \frac{l_{LIN1} \cdot r_{LIN1}}{t_r^2} : \\ \hline > X_{LIN1} := \frac{l_{LIN1} \cdot x_{LIN1}}{t_r^2} : \\ \hline > Z_{LIN1} := \text{Complex}(R_{LIN1}, X_{LIN1}) : \end{array} \right.$$

$$\left[\begin{array}{l} > X_{LIN1} := \frac{l_{LIN1} \cdot x_{LIN1}}{t_r^2} : \\ \hline > Z_{LIN1} := \text{Complex}(R_{LIN1}, X_{LIN1}) : \end{array} \right.$$

$$\left[\begin{array}{l} > Z_{LIN1} := \text{Complex}(R_{LIN1}, X_{LIN1}) : \end{array} \right.$$

▼ Kabel KAB-T1

$$\left[\begin{array}{l} > l_{KAB1} := 0.5 : r_{KAB1} := 0.076 : x_{KAB1} := 0.1287 : \\ \hline > R_{KAB1} := \frac{l_{KAB1} \cdot r_{KAB1}}{t_r^2} : \\ \hline > X_{KAB1} := \frac{l_{KAB1} \cdot x_{KAB1}}{t_r^2} : \\ \hline > Z_{KAB1} := \text{Complex}(R_{KAB1}, X_{KAB1}) : \end{array} \right.$$

$$\left[\begin{array}{l} > R_{KAB1} := \frac{l_{KAB1} \cdot r_{KAB1}}{t_r^2} : \\ \hline > X_{KAB1} := \frac{l_{KAB1} \cdot x_{KAB1}}{t_r^2} : \\ \hline > Z_{KAB1} := \text{Complex}(R_{KAB1}, X_{KAB1}) : \end{array} \right.$$

$$\left[\begin{array}{l} > X_{KAB1} := \frac{l_{KAB1} \cdot x_{KAB1}}{t_r^2} : \\ \hline > Z_{KAB1} := \text{Complex}(R_{KAB1}, X_{KAB1}) : \end{array} \right.$$

$$\left[\begin{array}{l} > Z_{KAB1} := \text{Complex}(R_{KAB1}, X_{KAB1}) : \end{array} \right.$$

Trafo T1

$$\text{> } S_{T1} := 270 \cdot 10^6 : e_x := 0.12 : e_r := 0.005 :$$

$$\text{> } X_{T1} := \frac{U_{LV}^2 \cdot e_x}{S_{T1}} :$$

$$\text{> } R_{T1} := \frac{U_{LV}^2 \cdot e_r}{S_{T1}} :$$

$$\text{> } Z_{T1} := \text{Complex}(R_{T1}, X_{T1}) :$$

Total impedans fra 300 kV – nett :

$$\text{> } Z_1 := Z_{300} + Z_{LIN1} + Z_{KAB1} + Z_{T1} :$$

Bidrag fra 66kV-nettet

Overliggende nett SK1

$$\text{> } U_{HV} := 66 \cdot 10^3 : c := 1.1 : S_{66,1} := 700 \cdot 10^6 : U_{LV} := 15 \cdot 10^3 : XR := 15 :$$

$$\text{> } t_r := \frac{U_{HV}}{U_{LV}} :$$

$$\text{> } Z_{66,1} := \frac{c \cdot U_{HV}^2}{S_{66,1}} \cdot \frac{1}{t_r^2} :$$

$$\text{> } X_{66,1} := \text{solve}\left(\sqrt{X^2 + \left(\frac{X}{XR}\right)^2} = Z_{66,1} \cdot X\right) :$$

$$\text{> } X_{66,1} := \text{simplify}(X_{66,1}) \text{ assuming } X_{66,1} :: \text{positive} :$$

$$\text{> } R_{66,1} := \frac{X_{66,1}}{XR} :$$

$$\text{> } Z_{66,1} := \text{Complex}(R_{66,1}, X_{66,1}) :$$

Overliggende nett SK2

$$\text{> } S_{66,2} := 670 \cdot 10^6 :$$

$$\text{> } Z_{66,2} := \frac{c \cdot U_{HV}^2}{S_{66,2}} \cdot \frac{1}{t_r^2} :$$

$$\text{> } X_{66,2} := \text{solve}\left(\sqrt{X^2 + \left(\frac{X}{XR}\right)^2} = Z_{66,2} \cdot X\right) :$$

$$\begin{aligned} &> X_{66,2} := \text{simplify}(X_{66,2}) \text{ assuming } X_{66,2} :: \text{positive} : \\ &= \\ &> R_{66,2} := \frac{X_{66,2}}{XR} : \\ &= \\ &> Z_{66,2} := \text{Complex}(R_{66,2}, X_{66,2}) : \end{aligned}$$

▼ Kabel KAB1-66/KAB2-66

$$\begin{aligned} &> l_{KAB66} := 0.3 : r_{KAB66} := 0.0277 : x_{KAB66} := 0.1533 : \\ &= \\ &> R_{KAB66} := \frac{l_{KAB66} \cdot r_{KAB66}}{t_r^2} : \\ &= \\ &> X_{KAB66} := \frac{l_{KAB66} \cdot x_{KAB66}}{t_r^2} : \\ &= \\ &> Z_{KAB66} := \text{Complex}(R_{KAB66}, X_{KAB66}) : \end{aligned}$$

▼ Kabel KAB-T2

$$\begin{aligned} &> l_{KABT2} := 0.05 : r_{KABT2} := 0.0277 : x_{KABT2} := 0.1533 : \\ &= \\ &> R_{KABT2} := \frac{l_{KABT2} \cdot r_{KABT2}}{t_r^2} : \\ &= \\ &> X_{KABT2} := \frac{l_{KABT2} \cdot x_{KABT2}}{t_r^2} : \\ &= \\ &> Z_{KAB-T2} := \text{Complex}(R_{KABT2}, X_{KABT2}) : \end{aligned}$$

▼ Trafo T2

$$\begin{aligned} &> S_{T2} := 100 \cdot 10^6 : e_x := 0.10 : e_r := 0.005 : \\ &= \\ &> X_{T2} := \frac{U_{LV}^2 \cdot e_x}{S_{T2}} : \\ &= \\ &> R_{T2} := \frac{U_{LV}^2 \cdot e_r}{S_{T2}} : \\ &= \\ &> Z_{T2} := \text{Complex}(R_{T2}, X_{T2}) : \\ &= \\ &> \end{aligned}$$

Total impedans fra 66 kV – nett :

$$\left[\begin{array}{l} > Z_2 := \frac{1}{\frac{1}{Z_{66,1} + Z_{KAB66}} + \frac{1}{Z_{66,2} + Z_{KAB66}}} + Z_{KAB-T2} + Z_{T2} : \end{array} \right.$$

▼ Bidrag fra generator

$$\left[\begin{array}{l} > S_G := 270 \cdot 10^6 : xd := 0.17 : U_{LV} := 15 \cdot 10^3 : ra := 0.002 : \\ > X_G := \frac{xd \cdot U_{LV}^2}{S_G} : \\ > R_a := \frac{ra \cdot U_{LV}^2}{S_G} : \\ > Z_G := \text{Complex}(R_a, X_G) : \end{array} \right.$$

▼ Imepdans ved case A, B og C

$$\left[\begin{array}{l} > Z_A := \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}} : \\ > Z_B := \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_G}} : \\ > Z_C := Z_G : \\ > R_A = \text{Re}(Z_A) \end{array} \right. \quad R_A = 0.005907444786 \quad (4.1)$$

$$\left[\begin{array}{l} > L_A = \text{simplify}\left(\frac{\text{Im}(Z_A)}{2 \cdot \text{Pi} \cdot 50}\right) \end{array} \right. \quad L_A = 0.0003131474578 \quad (4.2)$$

$$\left[\begin{array}{l} > R_B = \text{Re}(Z_B) \end{array} \right. \quad R_B = 0.002336455197 \quad (4.3)$$

$$\left[\begin{array}{l} > L_B = \text{simplify}\left(\frac{\text{Im}(Z_B)}{2 \cdot \text{Pi} \cdot 50}\right) \end{array} \right. \quad L_B = 0.0001849135609 \quad (4.4)$$

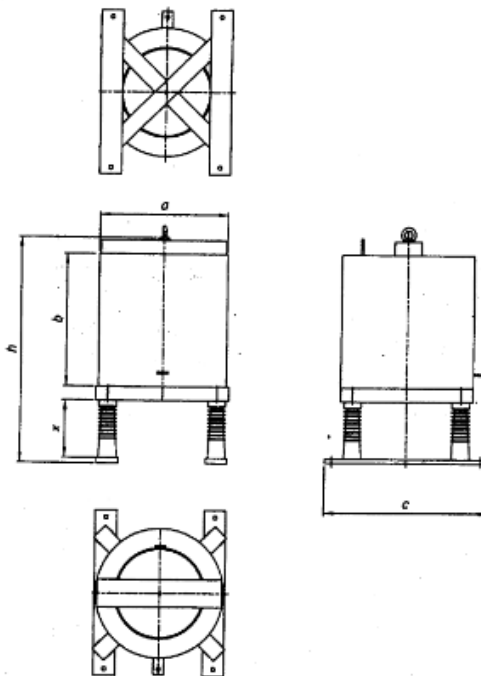
$$\left[\begin{array}{l} > R_C = \text{Re}(Z_C) \end{array} \right. \quad R_C = 0.001666666667 \quad (4.5)$$

$$\left[\begin{array}{l} > L_C = \text{simplify}\left(\frac{\text{Im}(Z_C)}{2 \cdot \text{Pi} \cdot 50}\right) \end{array} \right. \quad L_C = 0.0004509390054 \quad (4.6)$$

Reaktorens datablad

Reaktorens datablad er presentert på de tre påfølgende sider. Navn, identifikasjonsnummer og prosjektnummerering er fjernet.

Appendix
 Preliminary drawing only one phase; not showing details



item		1
a / mm	app.	580
c / mm	app.	660
h / mm	app.	900

Minimum magnetic distance between reactor and metal pieces (closed loops excluded)

Axial : $0,5 * a$

Radial : $1,1 * a$ or $1 * a + 80$ mm (the greater value)

Certified according to DIN EN 9001 - Registration-No. [REDACTED]

12. Current Limiting Reactors

		Confirmation/ Comments
.1	Type	Inrush current limiting reactors Installed inside cubicles
.2	Design	one-phased; air cored; mounted on postinsulators
.3	Rated voltage	24 kV
.4	Rated frequency	50 Hz
.5	Rated current	100 A _{RMS}
.6	Rated inductance	1000 µH
.7	Thermal fault current duration	3 sec.
.8	Thermal short time current I _{kt}	25 kA _{thm} / 3 sec.
.9	Total losses at rated current at 75°C	25 W
.10	Terminals (copper bars)	50 x 5 with 9
.11	Coil material	Aluminium band
.13	Number of support insulators	4
.14	Insulators	24,0 kV indoor cast resin post insulators
.15	Enclosure	IP00 for indoor use
.16	Cooling	air cooled, natural ventilation (AN)
.17	Electrical - lay - out	acc. to VDE 0550 / 0532 and IEC 289
.18	Impregnation	completely impregnated under vacuum and over pressure in polyester resin acc. to temperature class H, temper-hardened under furnace temperature of 150 °C

Date: 08.08.04

Page 1-2



		Confirmation Comments	
.19	Terminals	copper-bars acc. or similar to DIN 6206	✓
.20	Temperature class	T50/B	✓
.21	Tolerance of the inductance	0 % ... + 20 % basing on LN	✓
.22	Max. ambient temperature	75 °C	*3)
.23	Rating plate	Engleish	✓
.24	Quality assurance	according to ISO 9001	✓
.25	Quantity	3 pcs.	✓
.26	Delivery Date	3 pcs. – KW27 2005	✓
.27	Standards / Tests	according to IEC	*4)
.28	Documentation	Technische Beschreibung, Maßbild, elektr. Schaltbild und Prüfprotokolle jeweils in Deutsch und Englisch. Maßbild mit Drosselgewicht, elektr. Schaltbild und Einbauvorschrift vorab mit der AB	✓

Wichtig: Die Maß- und Schaltbilder werden umgehend benötigt.

- *1) Before reactor IK* = 25 kA
After reactor IK* = 16 kA
Reactor is able to withstand 16 kA
- *2) Total losses 100W
- *3) Max. ambient temperature 50°C
- *4) Without lightning impulse test; extra cost EURO 800,00

Date: 09.08.04

Page 2-2



Beregning av parametere for frekvensrespons

C.1 Skript for summering av LR-matriser

Matrisen for hver frekvens hentes ut fra Ansys Maxwell og defineres som matrisen Zmat:

Zmat=[

$$\begin{bmatrix} L_1 & R_1 & L_{21} & R_{21} & L_{31} & \dots & L_{n1} & R_{n1} \\ L_{12} & R_{12} & L_2 & R_2 & L_{32} & \dots & L_{n2} & R_{n2} \\ L_{13} & R_{13} & L_{23} & R_{23} & L_3 & \dots & L_{n3} & R_{n3} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ L_{1N} & R_{1N} & L_{2N} & R_{2N} & L_{3N} & \dots & l_{nN} & R_{nN} \end{bmatrix}$$

];

Kjører skriptet:

```
for i=2:2:160;
Ltot(i)=sum(Zmat(:,i));
end;
for i=1:1:160;
Rtot(i)=sum(Zmat(:,i));
end;
sum(Ltot)
sum(Rtot)
```

Matlab returnerer nå induktansen og resistansen ved den aktuelle frekvensen. Resultatene

fra simuleringene er vist i Tabell C.1.

Tabell C.1: Frekvensresponsen for rektoren, med og uten innkapsling.

Frekvens [Hz]	Uten innkapsling		Med innkapsling	
	Induktans [mH]	Resistans [Ω]	Induktans [mH]	Resistans [Ω]
0,0001	1,4117	0,0042	1,4117	0,0042
50	1,2909	0,0106	1,162	0,0146
1000	1,2726	0,13	1,1428	0,1152
2500	1,2671	0,6382	1,1378	0,5244
10000	1,2131	7,8968	1,1269	1,8558
20000	1,121	20,7001	1,0944	6,2212
30000	1,0561	29,8454	1,0228	16,2152
40000	1,0169	35,418	0,9722	23,5035
50000	0,993	38,0611	0,9409	28,0949
60000	0,9778	41,0288	0,9085	32,9174
80000	0,9602	43,5478	0,8934	35,1763
100000	0,9507	44,881	0,8851	36,398

C.2 Utledning av uttrykket for Fysisk Cauer ekvivalent

$$\begin{aligned}
 Z_{ekvivalent} &= (j\omega L_2 + R_2 || R_1 + j\omega L_1) \\
 &= \frac{R_1 R_2 + j\omega L_2 R_1}{R_1 + R_2 + j\omega L_2} + j\omega L_1 \\
 &= \frac{(R_1 R_2 + j\omega L_2 R_1)(R_1 + R_2 - j\omega L_2)}{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L_2)^2} + j\omega L_1 \\
 &= \frac{(R_1(R_2 + j\omega L_2)(R_1 + R_2 - j\omega L_2))}{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L_2)^2} + j\omega L_1 \\
 &= \frac{R_1(R_2 R_1 + R_2^2 - j\omega L_2 R_2 + j\omega L_2 R_1 + j\omega L_2 R_2 + \omega^2 L_2^2)}{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L_2)^2} + j\omega L_1 \\
 &= \frac{R_1(R_2 R_1 + R_2^2 + \omega^2 L_2) + jR_1(\omega L_2 R_1 + \omega L_2 R_2 - \omega L_2 R_2)}{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L_2)^2} + j\omega L_1 \\
 &= \frac{R_1^2 R_2 + R_1 R_2^2 + \omega^2 L_2 R_1 + j\omega L_2 R_1^2}{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L_2)^2} + j\omega L_1 \\
 &= \frac{R_1^2 R_2 + R_1 R_2^2 + \omega^2 L_2 R_1}{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L_2)^2} + j\omega \left(\frac{L_2 R_1^2}{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L_2)^2} + L_1 \right)
 \end{aligned}$$

C.3 Matlabscript og metode for beregning av parametere

```

%Laster inn datapunktene
data=[
0.0001  1.4117  0.0042
50      1.2909  0.0106
1000    1.2726  0.13
2500    1.2671  0.6382
10000   1.2131  7.8968
20000   1.121   20.7001
30000   1.0561  29.8454
40000   1.0169  35.418
50000   0.993   38.0611
60000   0.9778  41.0288
80000   0.9602  43.5478
100000  0.9507   44.881
];

%Definerer variablene for datapunktene hentet fra FEMsimulering.
%RFEM er resistiv del og LFEM er induktiv del.
w=2*pi.*data(:,1);
freq=data(:,1);
RFEM=data(:,3);
LFEM=data(:,2);

%Applikasjonen Curve Fitting-
% benyttes til A beregne parameterene
%Til beregning av resistansene benyttes reelldelen av uttrykket:
%R1*(R1*4.2e-3+(4.2e-3)^2+x^2*L2^2)/((R1+4.2e-3)^2+(x*L2)^2)

%Til beregning av induktans benyttes den imaginaere delen av uttrykket:
%((R1^2*L2)/((R1+4.2e-3)^2+(x*L2)^2)+L1)
% R2 er beregnet til 4.2e-3

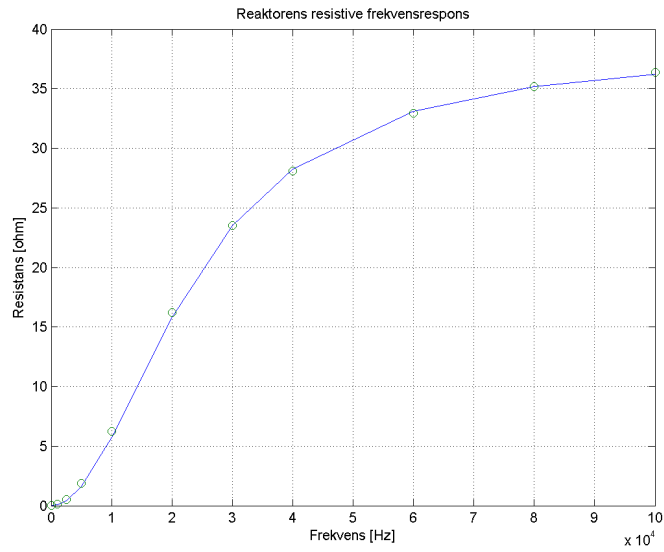
%Data fra curve fitting
R1=46.82;
L1=0.0009456;
L2=0.0003652;

%Definerer formel for kretsen
Zeq=(R2+w.*L2*1i).*R1./(R1+(R2+w.*L2*1i))+w.*L1*1i;

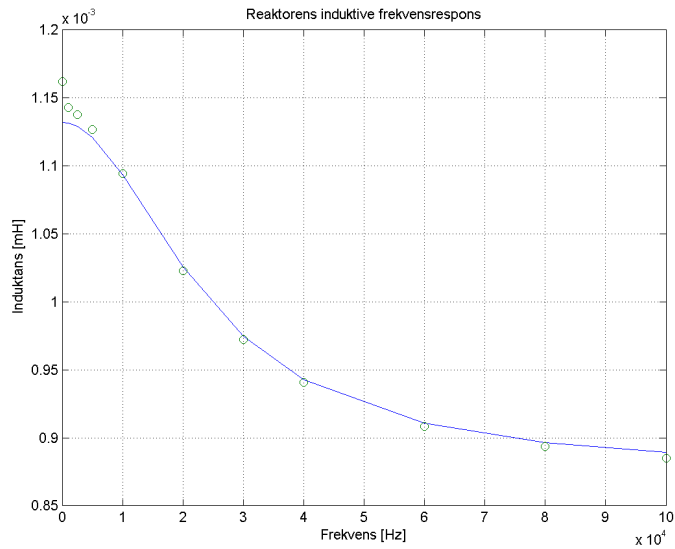
%Plotter datapunktene sammen med henholdsvis reell og imaginaer del av
%formelen og henter ut figurene
figure
plot(freq,real(Zeq),freq,RFEM,'o')
title('Reaktorens resistive frekvensrespons')
xlabel('Frekvens [Hz]')
ylabel('Resistans [ohm]')
grid on
print -dpng Resistiv

figure
plot(freq,imag(Zeq)./w,freq,LFEM./1000,'o')
title('Reaktorens induktive frekvensrespons')
xlabel('Frekvens [Hz]')
ylabel('Induktans [mH]')
grid on
print -dpng Induktiv
}

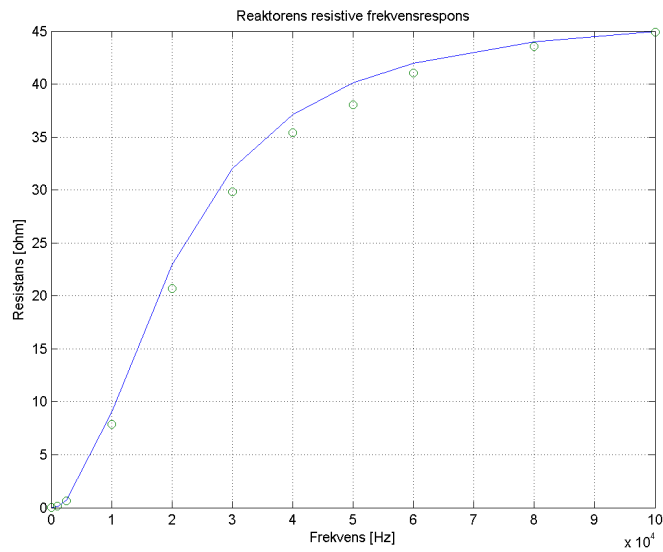
```



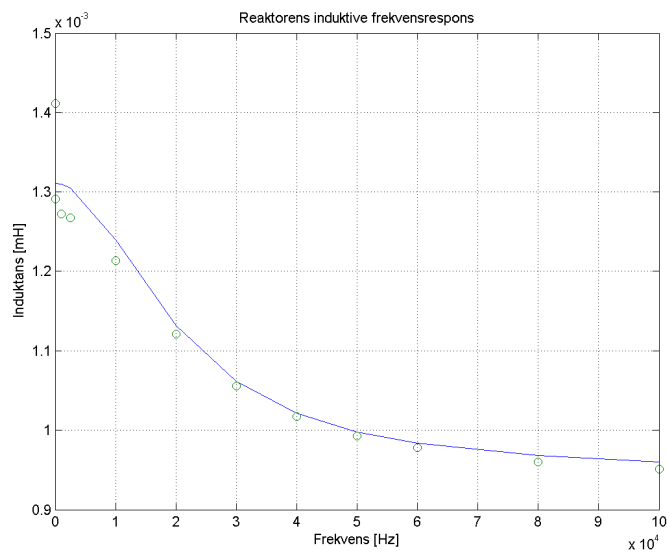
Figur C.1: Resistiv frekvensrespons for reaktor med innkapsling. Sirkler markerer resultater fra simuleringene. Linjen representerer formelen med parametere fra Curve Fitting Tool.



Figur C.2: Induktiv frekvensrespons for reaktor med innkapsling. Sirkler markerer resultater fra simuleringene. Linjen representerer formelen med parametere fra Curve Fitting Tool.



Figur C.3: Resistiv frekvensrespons for reaktor uten innkapsling. Sirkler markerer resultater fra simuleringene. Linjen representerer formelen med parametere fra Curve Fitting Tool.

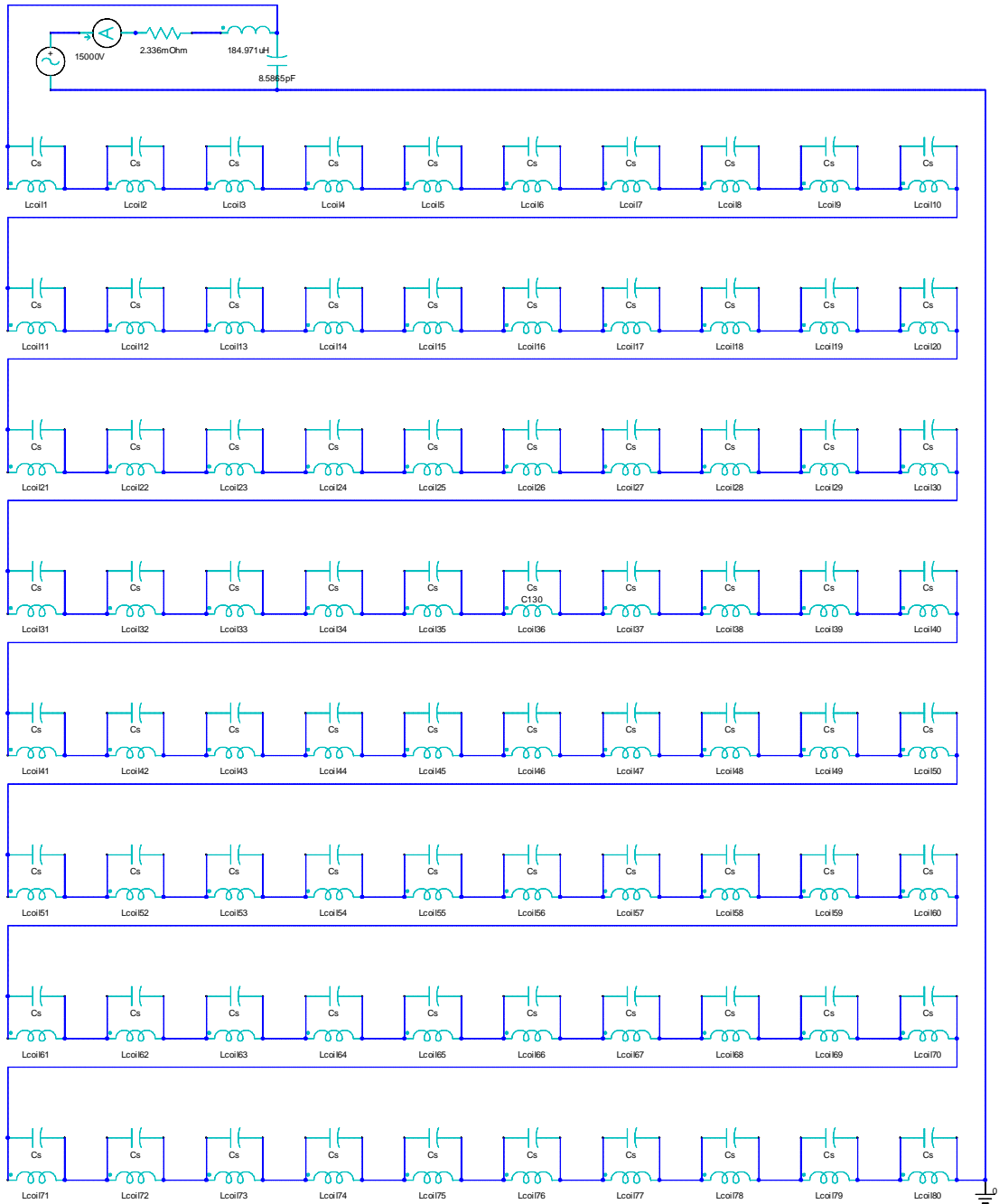


Figur C.4: Induktiv frekvensrespons for reaktor uten innkapsling. Sirkler markerer resultater fra simuleringene. Linjen representerer formelen med parametere fra Curve Fitting Tool.

Ekvivalentkrets for FEM-modell

Ekvivalentskjema for eksitasjon av simuleringsmodellen er vist på neste side.

VEDLEGG D. EKVIVALENTKRETS FOR FEM-MODELL



Bilder av reaktoren etter havari

Bilder fra spolen etter kortslutningen er vist i Figur E.1 og E.2.



Figur E.1: Foto av strømbegrensende spole etter kortslutning.



Figur E.2: Foto av tilkoblingsskinne til strømbegrensende spole etter kortslutning. Rød viser sted hvor det trolig har oppstått gjennomslag.

Vedlagte filer

Følgende filer er lagt ved oppgaven:

- ANSYS Maxwell simuleringsmodell - FEMstudy.zip
- EMTP ATP Draw simuleringsmodell - ATPstudy.acp