

Storholt, Jon  
Solstad, Stian  
Føllesdal, Harald Hansen  
Rønning, Martin Borgland

## Vern og selektivitet i maritime DC systemer

Bacheloroppgave i BIELE40 Elektroingeniør

Veileder: Norheim, Ian

Mai 2022



Storholt, Jon  
Solstad, Stian  
Føllesdal, Harald Hansen  
Rønning, Martin Borgland

## **Vern og selektivitet i maritime DC systemer**

Bacheloroppgave i BIELE40 Elektroingeniør  
Veileder: Norheim, Ian  
Mai 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for informasjonsteknologi og elektroteknikk  
Institutt for elkraftteknikk



# Sammendrag

Gjennom å vurdere sikringer opp mot halvledervern som vern av DC-anlegget i et hybridskip er hensikten med denne oppgaven å gi svar på om vernene fungerer tilfredsstillende med hensyn på selektivitet og kortslutningsstrømmer og ta stilling til hvilken løsning som er best.

Systemets oppbygging og virkemåte er beskrevet og relatert til relevant teori. Spesielt vektlagt er kortslutninger i DC-anlegg og funksjonen til de to ulike vern-typene vi tar for oss i oppgaven; smeltesikringer og halvledervern.

I det store og hele er dimensjoneringen av anlegget gitt av oppdragsgiver. Størrelser på komponenter har blitt satt direkte inn i modellen der det har vært mulig, og der parameterene har vært vanskelig å bestemme utifra dokumentasjonen, har komponentstørrelser blitt estimert på andre måter.

En modell av alle deler av anlegget ble laget i Simulink for å simulere strømmer og spenninger i ulike deler av kretsen under et kortslutningsforløp. Fokuset for simuleringene er varige feil på ulike deler av DC-anlegget simulert over kort tid. Dette har vi gjort for et utvalg av caser med tanke på å avgjøre hva som fungerer og hvor godt det fungerer i ulike situasjoner. Blant annet har vi med forskjellen på kortslutningsbidraget fra batteribanken når det er nytt (BOL), kontra når det nærmer seg slutten av levetiden (EOL). Det store spørsmålet er hvorvidt vernutløsningen skjer på en måte som gjør at driften kan opprettholdes uavbrutt på andre deler av anlegget enn den feilbefengte delen, om selektiviteten er opprettholdt.

Gjennom å granske resultatene av simuleringene var det mulig å konkludere med at høyhastighetssikringer kan gi tilfredsstillende beskyttelse og selektivitet under gitte forutsetninger, men løsningen dette gjelder kan kun forsvares med en bestemt tolkning av DNV's regelverk. Sett opp imot utstyrets maksimale merke-kortslutningsstrøm, oppnår man tilfredsstillende elektromekanisk beskyttelse ved bruk av sikringer, men kontinuerlig selektiv drift av omformere under et kortslutningsforløp viste seg generelt sett å ikke være mulig. En kombinasjonsløsning med halvledervern ved omformere og sikringer ved batteri gir heller ikke bedre selektivitet pga. underspenningsgrensen på DC-samleskinne. Løsninger med ett enkelt halvledervern i plusspolen vil mangle en fullstendig beskyttelse mot feil på DC-siden. Bruk av halvledervern i både pluss og minus pol vil gi beskyttelse mot feil i begge retninger. Gjennom å bruke halvledervern i alle deler av DC-kretsen blir de ulike komponentene utsatt for lavere kortslutningsstrøm på grunn av raskere vernutløsning. Her kan drift av omformere opprettholdes selv i en feilsituasjon.

# Abstract

Through comparing the performance of conventional high-speed fuses with electronic DC circuit breakers (EDCB) as protection units for the DC system in a hybrid propulsion ship, this report seeks to answer the following questions: Do the proposed solutions have satisfactory performance in terms of selectivity and limiting short-circuit currents? Which solution has the best performance?

The system layout and operation characteristics have been described and related to relevant theoretical topics. Short-circuit faults in a DC system has been particularly emphasized along with a thorough description of the operation of fuses and the EDCB.

The parameters and sizes of different units in the system has at large been provided in the assignment by the client. Where possible the unit parameters have been inserted directly into the simulation model, or otherwise when these have been difficult to determine, they have been adapted into the model through other means.

A comprehensive model of the system has been created, allowing the simulation of currents and voltages in different parts of the circuit throughout the course of a short-circuit fault. The simulations are limited to fixed short-circuit faults at different locations over the course of a short time span. A variety of fault-cases have been selected based on the objective - to investigate the functionality of the proposed solutions in different states/configurations of the system. Two such cases investigate the contribution of the battery towards a short-circuit fault when the battery is new (BOL) as opposed to when it is nearing the end of its lifetime (EOL).

The main issue is whether or not the protection units' breaking processes happen in a way such that the healthy part of the system can continue its normal operation - whether selectivity is maintained throughout a fault situation.

Through analyzing the simulation results, it was possible to conclude that high-speed fuses could provide sufficient protection and selectivity when subject to a specific interpretation of the DNV codes. Protection was satisfactory and within the boundaries specified for short-circuit currents by the equipment manufacturers. However, on a general basis the system with fuses was not able to maintain operation of the healthy parts of the system throughout a short-circuit fault. A combined solution with EDCB's protecting the Active Front-End Rectifiers (AFE) and fuses protecting the battery units did not improve selectivity. This was

due to the undervoltage limit set for the DC-busbar. We also found that solutions involving only a single EDCB breaker in the positive pole will lack sufficient protection from faults on the DC side. By placing an EDCB in both the positive and negative pole, the system will be protected from faults in both directions. The solution with EDCB's protecting all parts of the DC-system proved to have the best performance, both in terms of rapid disconnection, short-circuit current limiting, as well as providing selectivity that allows normal AFE-operation throughout the course of a fault in the DC system.

# Innhold

<b>Sammendrag</b> . . . . .	<b>i</b>
<b>Abstract</b> . . . . .	<b>ii</b>
<b>Innhold</b> . . . . .	<b>iv</b>
<b>Figurer</b> . . . . .	<b>vi</b>
<b>Tabeller</b> . . . . .	<b>x</b>
<b>Akronymer</b> . . . . .	<b>xi</b>
<b>Ordliste</b> . . . . .	<b>xii</b>
<b>1 Introduksjon</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn . . . . .	1
1.2 Problembeskrivelse og metode . . . . .	2
1.3 Rammer og forenklinger . . . . .	3
<b>2 Systembeskrivelse</b> . . . . .	<b>5</b>
2.1 Skipsystem/Fremdriftssystem . . . . .	5
2.2 Elektrisk anlegg / Kraftsystem . . . . .	5
2.3 Driftsprofil . . . . .	9
2.4 Normer og standarder . . . . .	11
<b>3 Vern av elektriske anlegg</b> . . . . .	<b>13</b>
3.1 Grunnleggende teori . . . . .	13
3.2 AC Distribusjon . . . . .	15
3.3 DC Distribusjon . . . . .	18
3.3.1 Spesielle forhold i DC krets . . . . .	18
3.3.2 DC komponenter og kortslutningsbidrag . . . . .	22
3.4 Vern i DC distribusjon . . . . .	24
3.4.1 Selektivitet . . . . .	24
3.4.2 Sikringer . . . . .	24
3.4.3 Halvledervern . . . . .	29
<b>4 Simuleringsmodell</b> . . . . .	<b>31</b>
4.1 Oppbygging av simuleringsmodell . . . . .	33
4.1.1 AC-nett . . . . .	33
4.1.2 Halvledervernblokk . . . . .	37
4.1.3 Sikringsblokk . . . . .	39
4.1.4 Batteriblokk . . . . .	43
4.1.5 DC Tavle . . . . .	44
4.1.6 Induksjonsmaskiner . . . . .	44



4.1.7	Landstrøm . . . . .	45
4.1.8	AC Motor og omformer blokk . . . . .	46
4.2	Kriterier for vellykket simulering . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Simulerings resultat . . . . .</b>	<b>49</b>
5.1	Sikringer . . . . .	50
5.1.1	Kortslutning i omformer Generator / Landstrøm [F1] . . . . .	50
5.1.2	Kortslutning i DC tavle [F4] . . . . .	52
5.1.3	Kortslutning i Batteri tilkobling [F5] . . . . .	54
5.1.4	Kortslutning i Batteri streng 1 [F6] . . . . .	56
5.2	Halvledervern og sikringer til batteri . . . . .	58
5.2.1	Kortslutning i omformer Generator / Landstrøm [F1] . . . . .	58
5.2.2	Kortslutning i DC tavle [F4] . . . . .	60
5.2.3	Kortslutning i Batteri tilkobling [F5] . . . . .	63
5.2.4	Kortslutning i Batteri streng 1 [F6] . . . . .	67
5.3	Halvledervern . . . . .	71
5.3.1	Kortslutning i omformer Generator / Landstrøm [F1] . . . . .	71
5.3.2	Kortslutning i DC tavle [F4] . . . . .	73
5.3.3	Kortslutning i Batteri tilkobling [F5] . . . . .	77
5.3.4	Kortslutning i Batteri streng 1 [F6] . . . . .	81
5.4	Halvledervern i pluss og minus . . . . .	85
5.4.1	Kortslutning i DC tavle [F4] . . . . .	85
<b>6</b>	<b>Diskusjon, konklusjon og videre arbeid . . . . .</b>	<b>87</b>
6.1	Diskusjon . . . . .	87
6.1.1	Simuleringsresultat . . . . .	87
6.1.2	Feilkilder . . . . .	88
6.1.3	Økonomi . . . . .	90
6.2	Oppsummering og konklusjon . . . . .	91
6.3	Videre arbeid . . . . .	92
	<b>Bibliografi . . . . .</b>	<b>94</b>
<b>A</b>	<b>Ekstra simuleringer . . . . .</b>	<b>98</b>
A.1	Sikringer . . . . .	98
A.1.1	Kortslutning i omformer akselgenerator/motor [F2] . . . . .	98
A.1.2	Kortslutning i omformer baugthruster [F3] . . . . .	100
A.2	Halvledervern og sikringer til batteri . . . . .	102
A.2.1	Kortslutning i omformer akselgenerator/motor [F2] . . . . .	102
A.2.2	Kortslutning i omformer baug thruster [F3] . . . . .	104
A.3	Halvledervern . . . . .	106
A.3.1	Kortslutning i omformer akselgenerator/motor [F2] . . . . .	106
A.3.2	Kortslutning i omformer baug thruster [F3] . . . . .	108

# Figurer

1.1	Forenklet enlinjeskjema AC- og DC-distribusjon på frakteskipet Misje.	2
1.2	Forenklet enlinjeskjema som viser typiske løsninger for DC-system med sikringer og halvledervern. . . . .	3
2.1	Trefase omformer med IGBT kan operere i alle fire kvadranter. . . .	6
2.2	Omformer til AC-nett . . . . .	7
2.3	Batterispennning ved opp- og utlading [13] . . . . .	8
2.4	Trefase synkrongenerator ekvivalentskjema [14] . . . . .	9
2.5	Driftsprofil PTO og PTI. Gjengitt med tillattelse fra Wärtsilä . . . . .	10
2.6	Driftsprofil Boost og Landstrøm. Gjengitt med tillatelse fra Wärtsilä	11
3.1	RL Transient model . . . . .	15
3.2	Ekvivalentkretsene for subtransient, transient og stabil tilstand når generatorene antas å være ubelastet før feil inntraff . . . . .	16
3.3	Ekvivalent kretser av en induksjonsmotor stabil og transient tilstand	17
3.4	Øverst figur viser eksakt og figur under forenklet per-fase ekvivalent av trefase transformator. Referert til primærside av transformator	18
3.5	Likestrømskrets i det kortslutningsstrømmen brytes. Ser bort i fra kortslutningsmotstanden $R_{ks}$ . . . . .	19
3.6	Kortslutningsforløp med kortslutning og brudd. Rød kurve viser strøm, blå kurve viser bryterspenningen $U_{br}$ og lilla kurve viser sikringstilstanden. . . . .	19
3.7	Faktisk konfigurasjon av batteripakke, -moduler og -celler. . . . .	23
3.8	Ekvivalentskjema for batteripakke med tilkoblinger . . . . .	23
3.9	Prinsipptegning av høyeffekt smeltesikring.Gjengitt med tillatelse fra Eaton [29] . . . . .	25
3.10	Proessen før og under lysbuedannelse. Den røde, stiplede linjen viser den potensielle strømmen uten den strømbegrensende effekten.[29] . . . . .	26
3.11	Strøm vs. tid sikringkarakteristikk for Bussmann 170M6648 1000A sikringer, hentet fra produsentens datablad. Over linjen A - A er kurvene stippet pga. usikker utløsning i dette området. Gjengitt med tillatelse fra Eaton. [32] . . . . .	28

3.12	Doble høyhastighetssikringer i parallell benyttes i omformerne. Gjengitt med tillatelse fra Eaton [32]	28
3.13	Halvledervern med spenning- og strømkurver	30
3.14	Vern løsninger med to halvledervern.	30
4.1	Ekvivalentkrets med feillokasjoner	32
4.2	Hovedmodell	34
4.3	AC-generatorer er modellert med <i>Synchronous Machine</i> pu <i>Standard</i> -blokk og <i>Excitation System</i> -blokk.	35
4.4	Oppstart av en generator	36
4.5	Kortslutningsforløp på en generator	36
4.6	Modell av halvledervern.	38
4.7	Styringslogikk for modell av halvledervern	38
4.8	Nedratifisering av $I^2t$ -verdi ved andre spenninger enn nominell.[32]	39
4.9	Sikringsmodell med to brytekretser kretser for smelte- og lysbueforløp.	40
4.10	Sikringsmodell med logikk for styring av smelte- og lysbueforløp. Her gjøres et oppslag i energi - tid karakteristikken for sikringen.	41
4.11	Testtilfelle av sikringsmodell med en peak-feilstrøm på ca.36kA. Gjennomsluppet energi ved smelting var ca. 1,6 MJ og smeltetiden var 3,443ms.	42
4.12	Avlesning for testtilfelle	42
4.13	Prosessen med å linearisere sikringskarakteristikken innebar en tilnærming for å få en kontinuerlig funksjon som kunne brukes i Simulink.	43
4.14	Batterimodell med DC-spenningskilde, ekvivalent R og L og batterimodulsikring på 500A.	44
4.15	Landstrømtilkoblingen er modellert som en ideell trefasekilde, en trefasetransformator-blokk og en <i>Universal Bridge</i> IGBT-blokk som er brukt uten gate styring.	46
4.16	AC-motorene i modellen består av en <i>Asynchronous Machine</i> -blokk samt tilhørende firekvadrantomformer og filter for tilkobling til DC-samleskinnen.	47
4.17	Akselgenerator/motoren kortslutning simuleringer.	47
5.1	Kortslutning i omformer Generator / Landstrøm ved 1100V og BOL batterier, modell med sikringer	50
5.2	Kortslutning i omformer Generator / Landstrøm ved 1100V og EOL batterier, modell med sikringer	51
5.3	Kortslutning i DC tavle ved 1100V og BOL, modell med sikringer	52
5.4	Kortslutning i DC tavle ved 800V og EOL, modell med sikringer	53
5.5	Kortslutning i Batteri tilkobling 1100V og BOL, modell med sikringer	54
5.6	Kortslutning i Batteri tilkobling ved 800V og EOL, modell med sikringer	55

5.7	Kortslutning i Batteri streng 1 ved 1100V og BOL, modell med sikringer . . . . .	56
5.8	Kortslutning i Batteri streng 1 ved 800V og EOL, modell med sikringer	57
5.9	Kortslutning i omformer Generator / Landstrøm ved 1100V og BOL	58
5.10	Kortslutning i omformer Generator / Landstrøm ved 800V og EOL .	59
5.11	Kortslutning i DC tavle ved 1100V og BOL . . . . .	60
5.12	Strømmåling i sikrings batteri 1 og batteri sikring(12) . . . . .	60
5.13	Kortslutning i DC tavle ved 800V og EOL . . . . .	61
5.14	Strømmåling i sikrings batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen .	62
5.15	Kortslutning i Batteri tilkobling ved 1100V og BOL . . . . .	63
5.16	Strømmåling i sikrings batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen .	63
5.17	Kortslutning i Batteri tilkobling ved 800V og EOL . . . . .	65
5.18	Strømmåling i sikrings batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen .	65
5.19	Kortslutning i Batteri streng 1 ved 1100V og BOL . . . . .	67
5.20	Strømmåling i sikrings batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen .	67
5.21	Kortslutning i DC tavle ved 800V og EOL . . . . .	69
5.22	Strømmåling i sikrings batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen .	69
5.23	Kortslutning i omformer Generator / Landstrøm ved 1100V og BOL	71
5.24	Kortslutning i omformer Generator / Landstrøm ved 800V og EOL .	72
5.25	Kortslutning i DC tavle ved 1100V og BOL . . . . .	73
5.26	Strømmåling i sikring batteri 1 og sikring12 som står i DC-tavlen .	73
5.27	Kortslutning i DC tavle ved 800V og EOL . . . . .	75
5.28	Strømmåling i sikrings batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen .	75
5.29	Kortslutning i Batteri tilkobling 1100V og BOL . . . . .	77
5.30	Strømmåling i sikrings batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen .	77
5.31	Kortslutning i Batteri tilkobling ved 800V og EOL . . . . .	79
5.32	Strømmåling i sikrings batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen .	79
5.33	Strømmåling i sikring batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen .	80
5.34	Kortslutning i Batteristreng 1 ved 1100V og BOL . . . . .	81
5.35	Strømmåling i sikring batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen .	81
5.36	Kortslutning i Batteri streng 1 ved 800V og EOL . . . . .	83
5.37	Strømmåling i sikrings batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen .	83
5.38	Strømmåling i sikrings batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen .	83
5.39	Strøm og spenning halvledervern til omformerne . . . . .	85
5.40	Strøm og spenning i halvledervern til batteri . . . . .	86
6.1	Akkumulert energi og smeltepunkt for 1000A sikring . . . . .	91
A.1	Kortslutning i omformer akselgenerator/motor [F2] ved 1100V og BOL batterier, modell med sikringer . . . . .	98
A.2	Kortslutning i omformer akselgenerator/motor [F2] ved 800V og EOL batterier, modell med sikringer . . . . .	99
A.3	Kortslutning i omformer baugthruster [F3] ved 1100V og BOL batterier, modell med sikringer . . . . .	100

A.4	Kortslutning i omformer baugthruster [F2] ved 800V og EOL batterier, modell med sikringer . . . . .	101
A.5	Kortslutning i omformer akselgenerator/motor ved 1100V og BOL .	102
A.6	Kortslutning i omformer akselgenerator/motor ved 800V og EOL . .	103
A.7	Kortslutning i omformer baug thruster ved 1100V og BOL . . . . .	104
A.8	Kortslutning i omformer baugthruster ved 800V og EOL . . . . .	105
A.9	Kortslutning i omformer akselgenerator/motor ved 1100V og BOL .	106
A.10	Kortslutning i omformer akselgenerator/motor ved 800V og EOL . .	107
A.11	Kortslutning i omformer baugthruster ved 1100V og BOL . . . . .	108
A.12	Kortslutning i omformer baugthruster ved 800V og EOL . . . . .	109

# Tabeller

4.1	Komponenter navngiving til figur 4.1. . . . .	33
4.2	Oppgitte verdier for trafo hentet fra[44]. . . . .	37
4.3	Batteriparametere. . . . .	44
4.4	Verdiene for roterende maskiner i anlegget. [47] [48] [43] . . . . .	45
5.1	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.1 . . . . .	50
5.2	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.2 . . . . .	51
5.3	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.3 . . . . .	52
5.4	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.4 . . . . .	53
5.5	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.5 . . . . .	54
5.6	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.6 . . . . .	55
5.7	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.7 . . . . .	56
5.8	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.8 . . . . .	57
5.9	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.9 . . . . .	58
5.10	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.10 . . . . .	59
5.11	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.11 og 5.12 . . . . .	61
5.12	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.13 og 5.14 . . . . .	62
5.13	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.15 og 5.16 . . . . .	64
5.14	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.17 og 5.18 . . . . .	66
5.15	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.19 og 5.20 . . . . .	68
5.16	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.21 og 5.22 . . . . .	70
5.17	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.23 . . . . .	71
5.18	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.24 . . . . .	72
5.19	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.25 og 5.26 . . . . .	74
5.20	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.27 og 5.28 . . . . .	76
5.21	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.29 og 5.30 . . . . .	78
5.22	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.31, 5.32 og 5.33 . . . . .	80
5.23	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.34 og 5.35 . . . . .	82
5.24	Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.36, 5.37 og 5.38 . . . . .	84

# Akronymer

**BOL** Beginning of Life. vii–ix, 43, 50, 52, 54, 56, 58, 60, 63, 67, 71, 73, 77, 81, 87, 88, 90, 92, 98, 100, 102, 104, 106, 108

**DNV** Det Norske Veritas. i, ii, 5, 11, 48, 92

**EMS** Energy Management System. 6

**EOL** End of Life. i, ii, vii–ix, 31, 43, 51, 53, 55, 57, 59, 61, 65, 69, 72, 75, 79, 83, 87, 88, 90, 92, 99, 101, 103, 105, 107, 109

**IGBT** Insulated-gate bipolar transistor. vi, vii, 6, 29, 37, 46, 92

**PTI** Power take-in. vi, 7, 9, 10, 33

**PTO** Power take-out. vi, 7, 9, 10, 33

**soc** State of Charge. 10

# Ordliste

**C-rate** Mål på strømmen et batteri lades eller utlades med. 1C i utladningsstrøm tilsvarer den strømmen batteriet er merket for å kunne levere i én time. f.eks. 10A i én time tilsvarer 10Ah kapasitet. 7

**firekvadrant omformer** Omformere som er i stand til å omgjøre mellom AC- og DC-spenning og hvor effektflyten kan gå i begge retninger. En induksjonsmaskin tilkoblet AC-siden av en slik omformer kan operere i alle fire kvadranter av et moment - hastighet diagram (figur 2.1). 6

**halvledervern** Halvledervern basert på IGBT-teknologi. I denne sammenheng skiller vi mellom halvledervern brukt til vernformål og halvlederbryter som svitsjeenheten i en firekvadrant omformer. 2

**smeltesikring** Konvensjonell sikring utført med metalltråd som smelter og skaper elektrisk brudd ved overbelastning eller kortslutning. 2

**State of Charge** Et mål på ladetilstanden til et batteri sammenlignet med fulladet tilstand. 7



# Kapittel 1

## Introduksjon

### 1.1 Bakgrunn

Shippingindustrien står for opp til 90 prosent av all transport og den produserer også 3 prosent av alle drivhusgassene i verden. Den globale handelsorganisasjonen *International Chamber of Shipping* representerer 80 prosent av verdens flåter har uttalt et mål om total dekarbonisering innen år 2050 [1]. For å oppnå målet kreves nyteknologier og ny og grønnere teknologi.

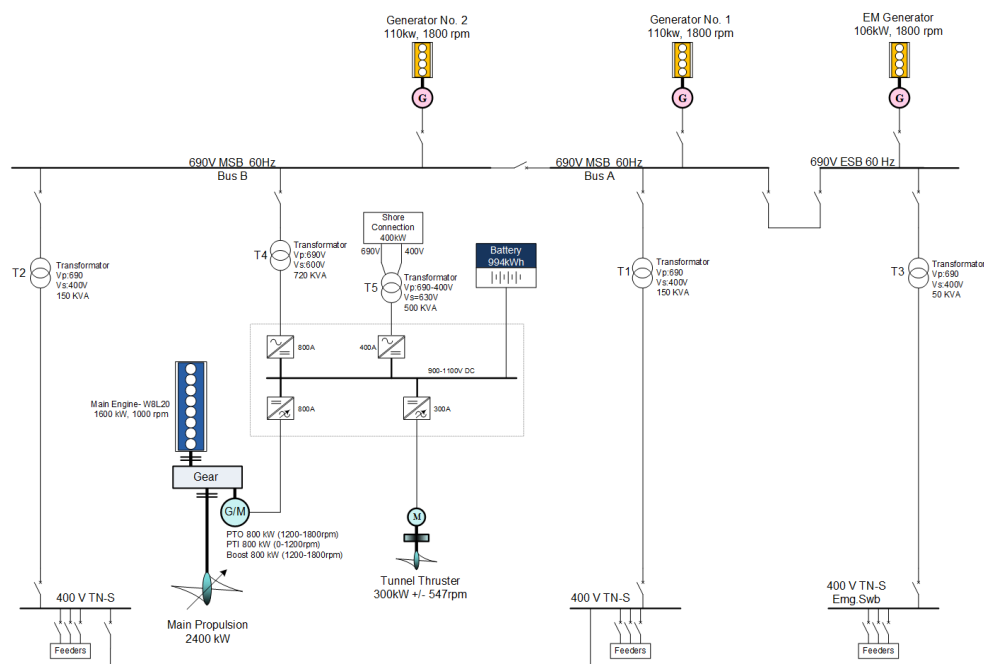
Wärtsilä er en global leverandør av produkter og løsninger til marine- og energimarkedene. Wärtsilä har et bredt portefølje av maritime produkter som skipsmaskineri, drivverk, gir, navigasjon, gassoppbevaring og -rensesystem, automasjon og elektrosystem. Wärtsiläs hovedaktiviteter i Norge er utvikling og salg av totale fremdriftssystemer og løsninger innen elektro- og automasjonssystemer for skip og offshoreinstallasjoner. Wärtsilä konsernet har operasjoner på over 200 lokasjoner i 70 ulike land og leverer til kunder over hele verden. Totalt er det rundt 1000 ansatte i Wärtsilä Norge. [2]

På grunn av strengere krav fra IMO [3] om lavere utslipp på nye skip bygges det flere diesel-hybridskip som skal gjøre industrien mer miljøvennlig. Planen til IMO er å fortsette å gjøre utslippskravene strengere og på den måten styre industrien mot utslippsmålet. Et diesel-hybridskip benytter seg av kombinasjonen av en hovedmotor og en elektromaskin med et energilager, som batterier, som jobber i lag på akslingen for å drifte propellen, på den måten kan motoren jobbe på konstant turtall der den er mest effektiv. Det er estimert at en slik løsning kan ha en besparelse på mellom 0 og 30% avhengig av type skip og driftsmønster[4].

Økt bruk av DC-distribusjonssystemer om bord i maritime applikasjoner med høyere effekter og strenge krav til beskyttelse har skapt behov for raskere vern. Siden hver omformer har kondensatorer i størrelsesorden noen hundre mikro farad til flere tusen kan selektivitet være en utfordring. En av nybyggene til Wärtsilä er levert med en kombinasjon av halvleder vern og sikringer på DC-tavlen. Wärtsilä ønsker utført en studie som vurderer vern, kortslutningstrømmer og selektivitet på dette anlegget, samt at det gjøres en vurdering av alternative vernløsninger som for eksempel kun halvleder vern eller sikringer.

Et forenklet enlinjeskjema for bulkskipet Misje er vist i figur 1.1. Installasjon av kraftelektronikk og DC-distribusjon samt bruk av energilagringssystemer øker derfor i den marine industrien. Som for et AC-distribusjonsystem så er det krav til selektivitet i DC-distribusjonen. Kravene til forsyningssikkerhet ombord skip er spesielt strenge, og derfor er selektivitet i kraftsystemet svært viktig.

Selektivitet kan oppnås gjennom integrering av forskjellige typer vern som smeltesikringer, halvleder-baserte vern eller en kombinasjon. En DC-kortslutning og selektivitetsanalyse utføres som regel av omformerleverandøren grunnet at interne omformerparameter som kan påvirke analysen ikke deles uten videre. Wärtsilä har den siste tiden levert flere nybygg med diesel-mekanisk hybrid system.



**Figur 1.1:** Forenklet enlinjeskjema AC- og DC-distribusjon på frakteskipet Misje.

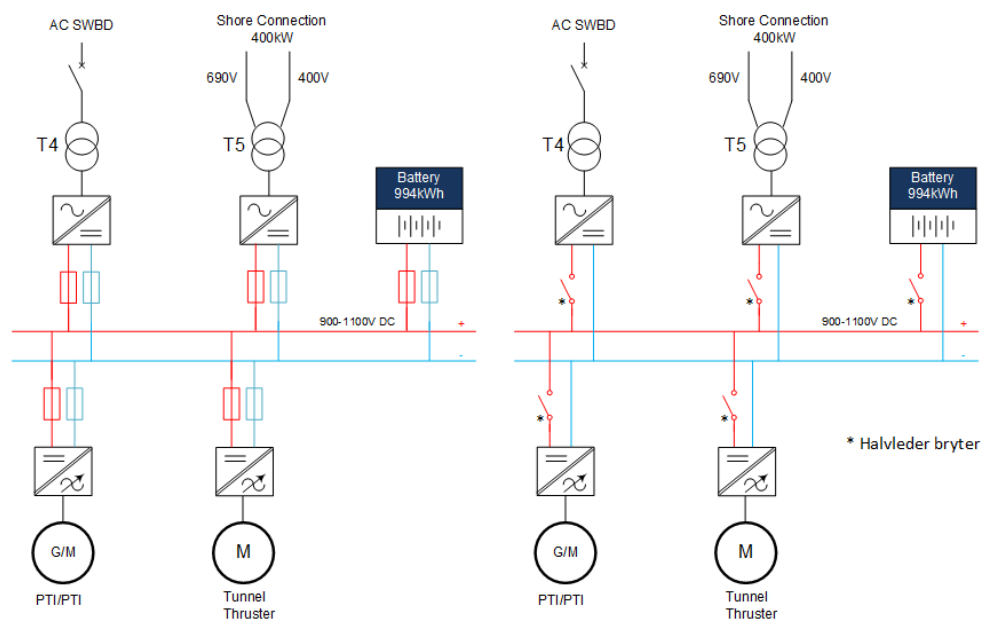
## 1.2 Problembeskrivelse og metode

Hensikten med oppgaven er å vurdere vern og selektivitet i DC-distribusjonsystemet om bord på frakteskipet Misje.

Problemstillinger:

1. Fungerer konvensjonelle sikringer tilfredsstillende som vern i et slikt anlegg, spesielt med hensyn på krav til kortslutningsstrømmer og selektivitet?
2. Fungerer elektroniske halvledervern bedre enn konvensjonelle sikringer som vern for hele eller deler av anlegget?

For å løse denne problemstillingen skal det bygges opp en simuleringsmodell av det elektriske anlegget om bord på skipet Misje. Med denne modellen skal det være mulig å simulere med både halvledervern og sikringer. Modellen skal være bygget opp, så langt det er mulig, av de faktiske komponentene som er benyttet om bord på skipet. Av simuleringsresultatet skal det framkomme hvilke kortslutningsstrømmer og spenninger som DC-anlegget utsettes for. Det skal videre sjekkes om vern har løst ut og om de friske delene av anlegget er berørt av kortslutningen. Et av de underliggende målene er å få en dypere forståelse av selektivitet og krav til selektivitet i dagens DC-distribusjonssystemer. Dette kan være til hjelp for valg av vernløsninger i framtidens maritime DC-systemer. Figur 1.2 viser typiske løsninger for DC-distribusjonssystem med sikringer og halvledervern.



**Figur 1.2:** Forenklet enlinjeskjema som viser typiske løsninger for DC-system med sikringer og halvledervern.

### 1.3 Rammer og forenklinger

Følgende rammer og forenklinger er satt for prosjektet:

- Analysen er gjeldende for oppgitt skip.
- Systemparametere er gitt av oppdragsgiver.
- Feilscenarier er begrenset til de tilfeller som er simulert.
- Lysbueforløpet i sikringene er forenklet.
- Simuleringene tar kun for seg pol-til-pol DC-kortslutning.
- Modellen hensyntar ikke omgivelsestemperatur.
- Elektromotorene med tilhørende omformer er ikke tatt med i simuleringene.

- AC-kabel, omformerfilter er ikke tatt med i modell.
- Omformere fra AC-tavlene ble forenklet i modellen til å være en diodelike-  
retter.
- Vern på AC-distribusjonen er ikke tatt med.
- Det ble brukt en forenklet modell av halvledervern og sikring.
- Det ble brukt en forenklet kortslutningsmodell av batteriet.
- Landstrømmen ble forenklet til en AC-kilde og transformator.

## Kapittel 2

# Systembeskrivelse

### 2.1 Skipsystem/Fremdriftssystem

Skipet denne rapporten tar for seg er et bulkskip bygget av Colombo Dockyard i Sri Lanka. Skipet bygges for Misje Eco Bulk som er et datterselskap av Misje bulk [5]. Et bulkskip er et skip uten mellomdekk slik at det er enkelt å laste og losse løse masser. Skipet har en kapasitet på 5000 dødvektstonn som plasserer den i klassen minibulk [6]. Reder eller eier av skipet er Misje Eco Bulk. I henhold til skipssikkerhetsloven (§43)[7] er det reders plikt å be om tilsyn av skipet av godkjent tilsynsmyndighet/klaseselskap. For dette skipet er det valgt å benytte Det Norske Veritas.

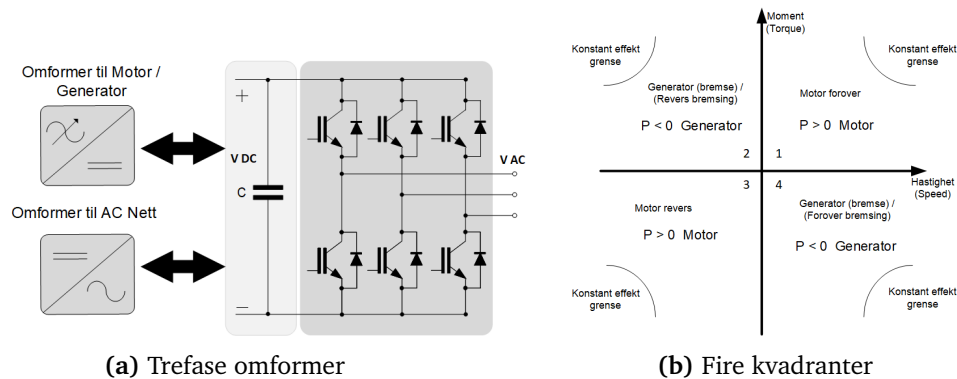
Skipet er satt opp med et batteri-hybridsystem som skal sørge for å redusere utslippene gjennom å kjøre hovedmotoren med jevn belastning og til tider gå med ren elektrisk fremdrift.

Fremdriftssystemet til fartøyet består av en dieselmotor på 1600kW, en induksjonsmaskin på 800kW som også skal kunne fungere som en generator, ett gir for å koble sammen induksjonsmaskinen og dieselmotoren, og en vridbar propell som skal levere 2400kW ved 175RPM. For å hjelpe med navigering er det montert en tunnel-thruster i baugen på 300kW. [8]

### 2.2 Elektrisk anlegg / Kraftsystem

Det elektriske anlegget er av type trefase TN-S og består av en todelt 690V AC-hovedtavle, én 690V nødtavle, tre 400V underfordelingstavler og én DC-tavle. DC-distribusjonssystemet er et toleder isolert system. Det er to hjelpegeneratorer koblet til hver sin side av hovedtavlen og en nødgenerator koblet til nødfordelingstavlen. Det er totalt installert fem transformatorer. Trafo T4 ligger mellom AC-hovedtavlen og DC-tavlen.

DC-tavlen består av fire omformere, en til AC-hovedfordeling, en til landstrøm, en til akselgenerator/motor og en til elektromotoren som driver baugthrusteren. DC-tavlen har også en avgang til batteripakken. DC-tavlen har en nominell spen-



Figur 2.1: Trefase omformer med IGBT kan operere i alle fire kvadranter.

ning på 975V DC, men siden batteriet er koblet direkte på DC-tavlen så vil spenningen på tavlen følge spenningen på batteriet.

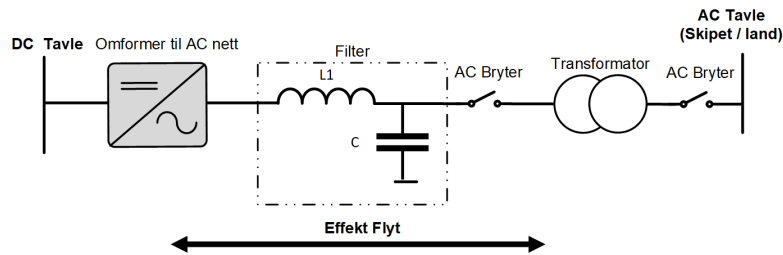
### Firekvadrant omformere

Omformerne som er brukt i dette anlegget benytter pulsbreddemodulasjon til å variere AC-utgangsspenning og -frekvens, samt til å styre DC-utgangsspenningen. Omformerne er utstyrt med IGBTer med antiparallelle dioder. [9] Se figur 2.1a. Omformerne kan omgjøre fra AC til DC og drive induksjonsmaskiner i alle fire kvadranter. Retningen på maskinen kan snus og den kan opptre både som motor og generator. Se figur 2.1b. For å stabilisere og jevne ut DC-spenningen i omformeren brukes en kondensator.

Omformerne som brukes til motorene har som funksjon å variere spenning og frekvens ut til motoren for på den måten å kunne styre motorens kraft og turtall. Omformeren kan operere i flere forskjellige modi slik som moment, kraft og hastighet. I hastighetsmodus varieres momentet slik at konstant hastighet oppnås, i momentmodus varieres kraften for å få konstant moment og i kraftmodus leveres en konstant effekt i kW ut til motoren. Omformeren til motorene har en egen applikasjonsprogramvare som har til mål å kontrollere og optimalisere motordriften. Omformeren til AC-Tavlen og landstrømmen er utstyrt med et LC-filter for å filtrere spenning og strøm. Omformerne har en egen applikasjonsprogramvare som har til mål å styre og kontrollere utgangsspenning og -frekvens til AC-nettet, samt styre effektlyt. Frekvensen ut fra omformeren til AC-nettet holder fast frekvens (+/- 2-5%). Omformeren kan variere spenning ut på DC-tavlen når den er satt til å kontrollere spenningen på DC-tavlen og forsyne effekt fra AC-tavlen til DC-tavlens forbrukere. Omformerne til AC-nett og landstrøm styres av EMS-systemet, og motor-omformerne styres av fremdriftskontrollen. Spenningen ut fra en trefase diodelikeretter er gitt av formel 2.1a og 2.1b som vises med og uten kommuteringsspenningsstap. [10]

$$V_{DClink} = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot V_{LL} \approx 1.35 \cdot V_{LL} \quad (2.1a)$$

$$V_{DClink} = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot V_{LL} - 6f L_{line} I_d \quad (2.1b)$$



Figur 2.2: Omformer til AC-nett

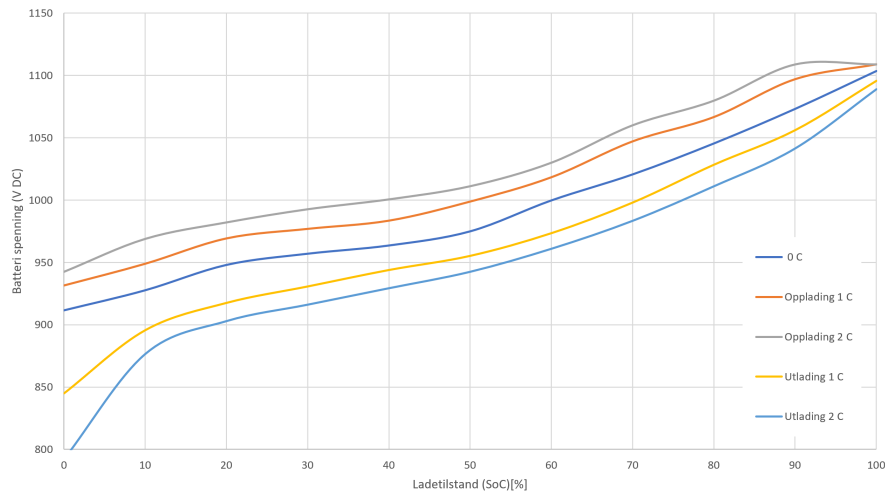
## Batteri

Batteriet benyttes til å jevne ut belastningen på hovedmotoren ved at elektromotoren tar ut den varierende belastningen gjennom forsyning fra batteriet. De kan også benyttes til å drifte elektromotoren for ren elektrisk fremdrift, men da begrenset til 800kW fremdrift og med begrenset tid. I modusen for «Peak shaving» kan batteriene lades ut med maksimalt 2C, og med et maksimalt 1C i gjennomsnitt i løpet av en time [11]. For at batteriene skal kunne leve lengst mulig er det anbefalt at batteriene ikke lades mer en 80% eller under 30%. Under normal drift med «Peak shaving» vil batteriene ligge mellom 70% og 80%.

I batterisystemet er de minste enhetene battericellene. Batterimodulene består av 24 (4,2V) oppladbare litium-ion NMC-celler koblet to i parallell og tolv i serie som gir en spenning på 50,4V DC. 22 batterimoduler koblet i serie utgjør en batteripakke med opptil 1100V DC-(figur 3.7). Åtte batteripakker (124kWh) er koblet i parallelt som gir totalt 994kWh energi kapasitet. [12]. Figur 2.3 viser hvordan spenningen på batteri endrer seg for ulike *State of Charge* og for ulike C-rater.

## Akselgenerator/motor og baugthrustermotor

Både akselgenerator/motor og baugthrustermotoren er av typen induksjonsmaskin. Akselgenerator/motoren er koblet inn på giret sammen med hovedmotoren og kan fungere som en motor ved at den driver giret rundt eller som generator ved at den blir drevet rundt av hovedmotoren. Den kan også jobbe sammen med hovedmotoren i motordrift og bidra med 800kW ekstra til fremdrift. Et mye brukt begrep i industrien for akselgenerator/motoren er de engelske forkortelsen PTI / PTO.

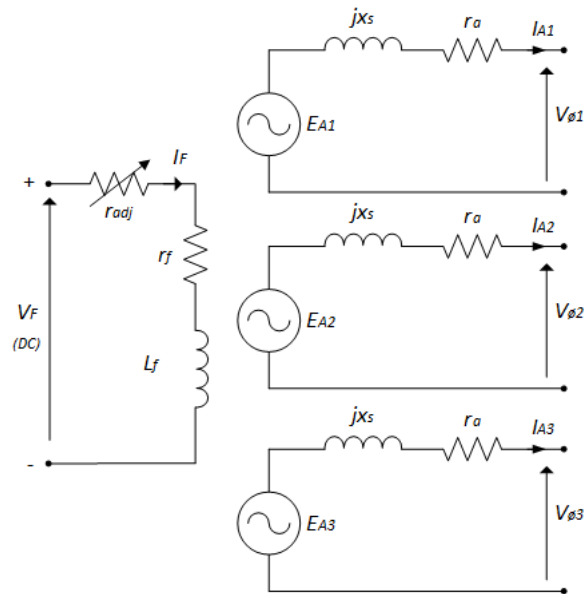


Figur 2.3: Batterispenning ved opp- og utlading [13]

### Synkrongenerator

Skipet er utstyrt med to synkrongeneratorer til å lade systemet underveis. I en synkrongenerator skapes et magnetisk felt i rotoren enten vha. permanentmagnetisering eller ved å indusere en likestrøm i rotor for på den måten lage en elektromagnet. Rotoren blir dreid ved å bruke en ekstern kraft på akslingen. Synkrongeneratoren får navnet sitt fra at frekvensen ut av generatoren følger omdreiningene inn ganger antall polpar. Figur 2.4 viser ekvivalentskjema for en trefas synkrongenerator, her ser man magnetiseringstrømmen komme inn på  $V_f$  som skaper magnetfeltet som igjen skaper spenningen ut på viklingene [14].





Figur 2.4: Trefase synkrongenerator ekvivalentskjema [14]

## 2.3 Driftsprofil

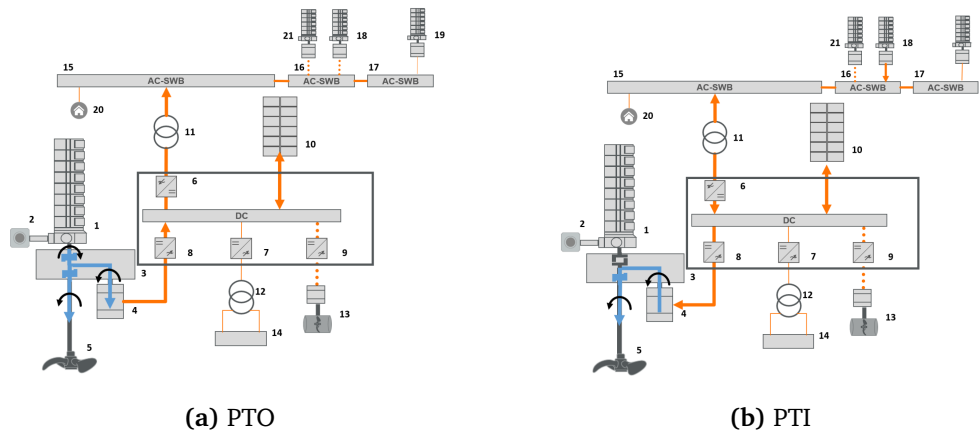
Skipet har følgende fire hoveddriftsmoduser; generatordrift (PTO), motordrift (PTI), Boost og landstrømsmodus. Figur 2.5 og figur 2.6 viser hovedkomponentene til fremdrift og hvordan de blir benyttet, og samt energiflyten i ulike driftsmoduser.

### Generatordrift

I generatordrift så er både hovedmotor og hovedpropellen clutchet inn. Akselgeneratoren brukes da som en generator og leverer da energi til DC-tavlen og AC-hovedtavlen. Den omformerer som er tilkoblet hovedtavlen holder fast frekvens og spenning. I denne modusen så kan batteriet lades og baugthrusteren være i drift. Maskinen leverer en maksimal kontinuerlig effekt på 800kW ved turtall mellom 1200 RPM til 1800 RPM. Generatordrift vises i figur 2.5a.

### Motordrift

I denne modusen vil motoren som er montert på giret sammen med hovedmotoren bruke strøm fra batteriene og/eller hjelpegeneratorene til fremdrift. I denne modusen har skipet mulighet til å gå med null utslipp i situasjoner der det kreves.



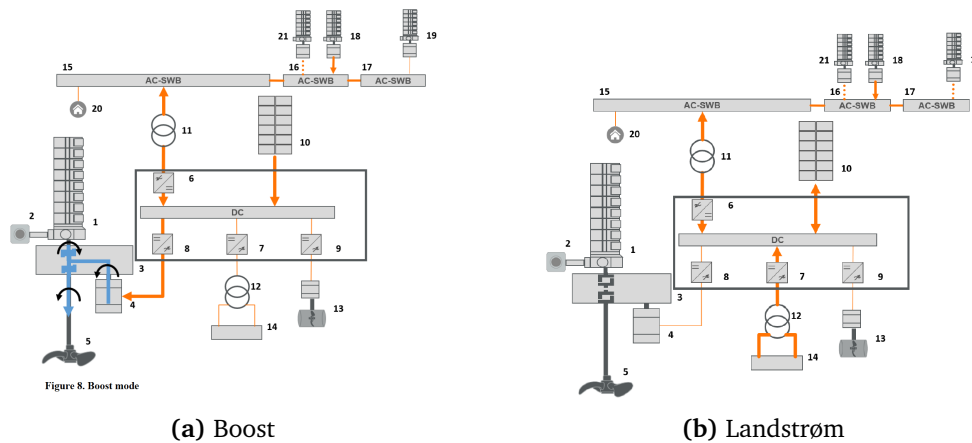
Figur 2.5: Driftsprofil PTO og PTI. Gjengitt med tillatelse fra Wärtsilä

### Boost

I boost modus så er både hovedmotoren og hovedpropellen clutchet inn. Akselgeneratoren/motoren vil i denne modusen brukes som en motor. Motoren kan yte 800kW (1200-1800RPM). Akselgenerator/motoren vil sammen med dieselmotor drive hovedpropell slik at maks hastighet kan oppnåes. Akselgeneratoren/motoren kan kun benyttes for en begrenset periode med full effekt. Dette skyldes at batteriet vil gradvis tappes ned. Batteri soc grensen er satt til 30%. Hjelpegenerator 1 og 2 kan også benyttes som en støtte til propellene i denne modusen.

### Havne/Landstrøm

Denne modusen har to underfunksjoner; landstrøms- og havnemodus. Ved landstrømsmodus så er hovedmotoren, propeller og Akselgenerator/motor frakoblet. Landstrøm er tilkoblet og leverer strøm til AC-og DC-distribusjon. Både landstrøm, hjelpegenerator 1/2 og batteriet kan samkjøres i denne modusen. I havnemodus så er hovedmotoren clutchet inn og akselgeneratorene tilkoblet DC-tavlen. Hovedmotoren leverer da strøm til AC-og DC-tavlen. Denne modusen kan brukes til å lade opp batteriene med høyere lade strøm (C-rate).



Figur 2.6: Driftsprofil Boost og Landstrøm. Gjengitt med tillatelse fra Wärtsilä

## 2.4 Normer og standarder

Klasseselskapet sin jobb er å være en uavhengig tredjepart som skal kontrollere om skipet er i godkjent stand og trygt å seile. Med uavhengig tredjepart menes at de ikke skal ha noen eierinteresse som kan påvirke deres vurdering av skipet, de to andre er reder/eier og mannskapet om bord på skipet. Kravet om å benytte et klasseselskap kommer fra skipssikkerhetsloven som alle skip som seiler med Norsk flagg er underlagt[7]. For dette skipet er det DNV som har funksjonen som klasseselskap. DNV har et stort regelverk som dekker de fleste typer skip og driftsformer, hvilken av disse reglene som er gjeldene for er avhengig av hvilke notasjoner skipet har. De relevante notasjonene for denne oppgaven er notasjonene «Ships (RU-ship)» og «Battery(power)», i tillegg finnes det en notasjon for landstrøm, men ettersom landstrømmen på dette skipet er under 1MVA blir ikke skipet underlagt den.

Regelverket til notasjonen «Ships» er delt opp i flere deler, del 4 heter «System and components» og i kapittel 8 finner man reglene som gjelder for elektriske installasjoner. Her finner man alle regler knyttet til prosjektering, kontroll og testing av elektriske anlegg på skip. I regelverket punkt 1.1.2 finner vi henvisningen til supplerende regelverk som gjelder, her står det dersom man har batterier installert gjelder også regelverket «part 6 additional class notations, Chapter 2 Propulsion, power generation and auxiliary systems». Tabell 1 i det supplerende regelverket [15] forklarer hvilke notasjoner finnes under «Battery» og der kan man se at skipet havner under notasjonen «Battery Power». På grunn av måten regelverket er satt opp er regelverket for «Power» et supplerende regelverk til «Safty» og derfor gjelder begge regelverkene, men «Power» er styrende der det er strengere en «Safty»

Punkt 2.1.1 forklarer kravene til en hovedstrømstilførsel [16]. Her står det listet opp forskjellige former for tilførsler, blant annet generatorer og batterier slik som er benyttet på skipet. Det står også her at hver hovedstrømstilførsel normalt

skal være fullstendig uavhengig av hverandre og ikke være avhengig av noen felles komponenter . Hver hovedstrømtilførsel skal også være stor nok til:

- Forsyning som er nødvendig for normal drift og framdrift
- Starte den største essensielle motoren om bord, bortsett fra thrustere, uten svigninger i spenning eller frekvens større enn det som er tillatt.
- Sørge for normale boforhold

Et sentralt punkt 2.2.2 [16] sier at man normalt skal ha minimum to hovedstrømtilførsler. I henhold til lastanalysen til skipet [8] vil skipet trekke maks 300kW til andre ting enn fremdrift. Her er det rom for tolkning av regelverket og vi har ikke fått klare retningslinjer på hva som gjelder. En måte å se på dette er at fartøyet er utstyrt med to generatorer på hovedtavlen som gjør at kravene til hovedstrømtilførsler er oppfylt, men ettersom de to generatorene er små så er det ikke sikkert de kan oppfylle kravet hver for seg og må da regnes som en hovedstrømtilførsel sammen. Dersom de to generatorene må legges sammen må man da se på DC-tavlen med akselgeneratoren som en av de to hovedtilførselene og da kommer det et krav om å opprettholde i tilførselen igjennom en kortslutning. Hvis man antar at de to generatorene kan tolkes som som to tilførsler, da kan man se på hele DC-systemet som en ikke-essensiell komponent og heller se på det som et hjelpemiddel til å spare drivstoff, på den måten faller kravene til selektivitet og drift igjennom kortslutning bort.

Punkt 7.1.4 [16] forklarer kravet til selektivitet, her står det at kun den brytermekanismen nærmest feilen skal løse ut, videre står det at selektiviteten skal sørge for kontinuerlig tilførsel av strøm til de essensielle deler av anlegget. Det supplerende regelverket for batteri står det at en enkel feil i batterisystemet ikke skal føre til at noen hovedfunksjoner blir utilgjengelig, strømproduksjon er definert som en hovedfunksjon i henhold til tabell 2 [15]. Ettersom det er montert en akselgenerator som er påkoblet DC-bussen må en sikring til batteriene sørge for at batteriene blir koblet fra før feilen har mulighet til å påvirke muligheten generatoren har til å produsere.

## Kapittel 3

# Vern av elektriske anlegg

En viktig del for valg og dimensjonering av utstyr til elektriske anlegg er å ta hensyn til de største og minste kortslutningsstrømmene som kan oppstå i ulike deler av anlegget. Driftsstrømmer som oppstår under normal belastning må kunne skilles effektivt fra de lave kortslutningsstrømmene som oppstår under feil med høy impedans. Vern må koordineres slik at utkoblinger på grunn av feil eller overbelastning fungerer selektivt og bare frakobler de delene av anlegget som er nødvendige for å isolere feilstedet. Samtidig må resten av anlegget kunne være i drift. For å kunne lage en modell for kortslutningssimuleringer i det elektriske anlegget må vi sette opp ekvivalente kretser for de ulike komponentene som inngår, og til slutt sette disse sammen i et overordnet ekvivalentskjema.

Den maksimale kortslutningstrømmen brukes til å dimensjonere den elektromekaniske og termiske kapasitetene til fordelingstavlene (AC og DC) / utstyret ombord i skipe. Det er den ledende faktoren som bestemmer hvilke mekaniske og termiske egenskaper man skal velge utstyr ut ifra.

Den minste kortslutningstrømmen brukes som basis for selektivitetsanalyse/relékoordineringsstudie og dimensjonering av størrelse på vern. Et vern må løse ut på lavere strøm enn den laveste kortslutningstrømmen.

Minste og høyeste kortslutningsstrøm finnes ut i fra analyse av de ulike driftmodusene som finnes i anlegget. Alle aktuelle driftmoduser simuleres med hensyn på kortslutning og resultatet for de ulike driftmodusene sammenlignes.

### 3.1 Grunnleggende teori

#### Induktans

En spole er en grunnleggende kretselement som har den egenskapen at den motstår endringer i strøm. Dersom strømmen igjennom spolen er konstant vil ikke spolen bidra med noe, men dersom strømmen endrer seg vil spenningen over spolen endre seg i henhold til ligning (3.1). Et vanlig bruksområde for en spole er et energilager ettersom den vil forsøke å holde strømmen konstant[17]

$$V_L = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (3.1)$$

Når man lukker en bryter i en krets med en spenningskilde, en motstand og induktans i serie så er strømmen gitt av:

$$i_L = I(1 - e^{-t/\tau}), I = \frac{V}{R}, \tau = \frac{L}{R} \quad (3.2)$$

Tidkonstanten er gitt av  $\tau = \frac{L}{R}$ . Stabil tilstand ansees oppnådd etter  $5\tau$ . [18]

Energien i en induktans er gitt av:

$$W_{br} = \frac{1}{2} Li^2 \quad (3.3)$$

### Kondensator

En kondensator er i likhet med en induktans et energilager i en krets. Forskjellen på en kondensator og en induktans er at der induktansen motsetter seg strømninger motsetter kondensatoren spenningsendringer. Spenningen over en kondensator er gitt av ligning (3.4) [17][18].

$$V_C = \frac{1}{C} \int i dt \quad (3.4)$$

Strømmen ved oppladning og utladning av en kondensator er gitt av [19]

$$i_c = I \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, I = \frac{V}{R}, \tau = RC \quad (3.5)$$

### Tidskonstant

I et system med kondensator og/eller spole tilstede så brukes tidskonstanten  $\tau$  aktivt til å vurdere endringsegenskapen til systemet. Den oppgives i enheten sekunder [s]. Tidkonstanten er gitt av  $\tau = \frac{L}{R}$  for spole, og  $\tau = RC$  for kondensator. Stabil tilstand ansees oppnådd etter de begge har nådd  $5\tau$ . En tau er 0,63 av spenningen i stabil tilstand ved oppladning og 0,37 i utladning. [18]

### RC krets

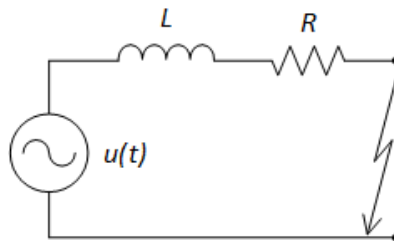
En RC krets er en krets med både en motstand og en kondensator. For en RC krets bruker vi tidskonstanten til å bestemme hvor rasket en kondensator lader seg opp eller lader seg ut. Den er gitt ved  $V_i$  lager en tanget for systemet hvor stigningsgraden er gitt som  $t=0$ . Det punktet hvor hvor  $t=0$  vil denne krysse verdien for  $V$  når  $t=RC$ . [18]

### RL krets

En RL krets er en krets med både en motstand og en spole tilstede. En spole vil motsette seg en endring. Den er konstruert ved at man tar en leder som er dekket av et dielektrisk materiale og kveiler den opp. I noen tilfeller rundt et magnetisk materiale. I likehet med en kondensator regnes den som at den går i metning når den når  $5\tau$ . [18]

## 3.2 AC Distribusjon

Selv om denne oppgaven hovedsaklig omhandler feil og feilhåndtering på DC-tavlen og DC-analyse så må også bidraget fra AC-systemet forklares. Dette siden det er tilkoblet AC-kraftkilder og forbrukere på DC-tavlen. Prosedyren for å utføre en kortslutningsberegning i et AC-anlegg er at det først utføres en effektflytanalyse. Dette skyldes at man ønsker å finne spenning og effekter på de ulike tavlene og komponentene for den driftmodusen det gjelder. Spenninger og effekter før feilen inntreffer har innvirkning på kortslutningsbidraget fra de ulike komponentene. Det vil for eksempel oppstå høyere kortslutningsstrøm fra en generator som er belastet enn ubelastet. Så utføres det en kortslutningsberegning med utgangspunkt i verdiene som ble funnet under effektflytanalysen. Det finnes ulike standarder for beregning av kortslutningsstrømmer i AC-anlegg. To av disse er IEC60909 og IEC61363. Som basis for analyse og beregning av kortslutning i et AC-anlegg så brukes en RL-transientkrets som vist i figur 3.1.



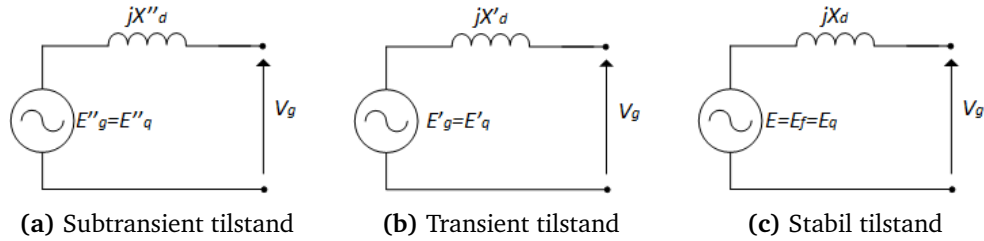
Figur 3.1: RL Transient model

$$u(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t + \alpha) \quad (3.6)$$

Følgende ligning gjelder for en RL-transientkrets[14]:

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) \quad \rightarrow \quad L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t + \alpha) \quad (3.7)$$

$$i(t) = i_{ac}(t) + i_{dc}(t) = \frac{\sqrt{2}V}{Z} [\sin(\omega t + \alpha - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{-\frac{t}{\tau}}] \quad (3.8)$$



**Figur 3.2:** Ekvivalentkretsene for subtransient, transient og stabil tilstand når generatorene antas å være ubelastet før feil inntraff

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \qquad \theta = \tan^{-1} \frac{X}{R} \qquad (3.9)$$

$$T = \frac{L}{R} = \frac{X}{\omega R} = \frac{X}{2\pi f R} \qquad (3.10)$$

**Generator [20]**

Som beskrevet i avsnitt 2.2 om synkrongenerator så består per-fase ekvivalenten til en trefase synkrongenerator av en spenningskilde i serie med en reaktans (Synkronreaktans  $X_d$ ). Ved en kortslutning så brukes samme ekvivalentkrets, men reaktansen endres med tid og antall sykluser som har gått siden feilen inntraff. Tidsperioden etter en kortslutningen deles opp i følgende tre tilstander: subtransient  $X''_d$ , transient  $X'_d$  og stabil  $X_d$ . Den subtransiente perioden varer de første 2 til 3 syklusene, transient de neste 8 til 10 syklusene, så kommer stabil tilstand. Kortslutningsbidraget fra en synkrongenerator avhenger om den er belastet eller ikke og når kortslutningen inntreffer. Ved belastning så må  $d$  og  $q$ -aksen tas med i beregningen. Det er også forskjell i kortslutningsbidraget fra sylindrisk rotor og rotor med utpregede poler. I IEC60909 og IEC61363 er det angitt standard måter for å beregne kortsluningsbidraget fra en generator.

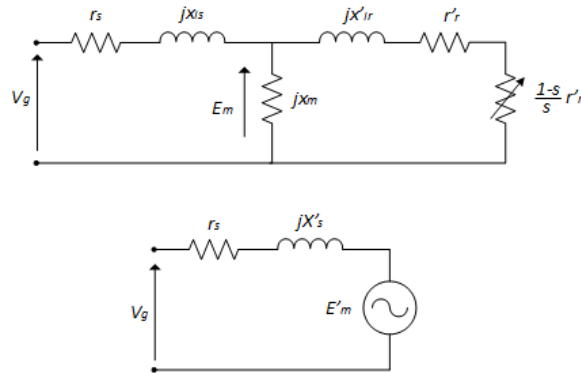
**Induksjons maskin [21]**

Under en kortslutning så kommer det et strømbidrag fra induksjonsmaskinen. Om maskinen er driftet av en omformer så vil maskinen gi et strøm bidra til kortslutningen via friløpsdiodene i omformereren. Dette gjelder kun ved kortslutning på DC-tavlen eller DC-delen av en av komponentene. Dette bidraget kan regnes ut ved bruk av en forenklet per-fase transientekvivalenten av en trefase induksjonsmaskin. I figur 3.3 så viser øverst en per-fase ekvivalent ved stabil tilstand og nederst en forenklet transientekvivalent av en trefase induksjonsmaskin.

Ekvivalent parameter ved stabil tilstand:

- $V_g$  per fase statorspenning





**Figur 3.3:** Ekvivalent kretser av en induksjonsmotor stabil og transient tilstand

- $r_s$  per fase statormotstand
- $E_m$  internspenning
- $X_{ls}$  statorvikling lekkreaktans
- $X_m$  magnetisering reaktans
- $x'_{lr}$  per fase rotorvikling lekkreaktans
- $r'_r$  per fase rotormotstand
- $s$  slip

Stator transientreaktansen kan beregnes på følgende måte:

$$x'_s = x_{ls} + \frac{x_m x'_{lr}}{x'_{lr} + x_m} \quad (3.11)$$

Den interne transientspenningen kan beregnes på følgende måte:

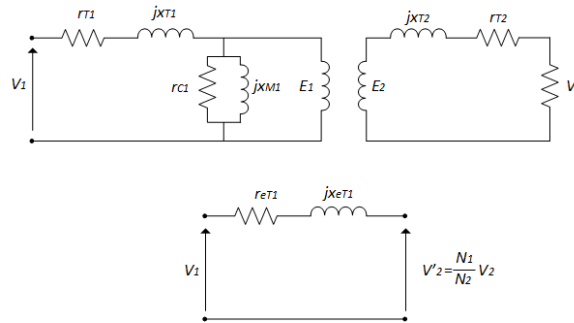
$$E'_{m0} = V_{g0} - (r_s + jX'_m)I_{as0} \quad (3.12)$$

$V_{as0}$  og  $I_{as0}$  er spenning og strøm rett før forstyrrelse/kortslutningen inntreffer. Tidskonstanten for DC-komponenten  $T_s$  og kortslutningstransient  $T'$  er gitt av:

$$T' = \left(x'_{ls} + \frac{x_{ls} \cdot x_m}{x_{ls} + x_m}\right) \cdot \frac{x'_s}{\omega_e \cdot r'_r} \quad T_s = \frac{x'_s}{\omega_e \cdot r_s} \quad (3.13)$$

### Transformator

[22] Ved kortslutningsberegninger så brukes forenklet per-fase ekvivalent av tre-fase transformatorer som vist i figur 3.4. I databladet så oppgis impedansen som regel i per-unit (prosent) av transformator størrelsen. Altså spenning og tilsynelatende effekt. Under en kortslutning vil en trafo bidra med et dempende ledd slik det er vist i den nedre delen av figur 3.4



Figur 3.4: Øverst figur viser eksakt og figur under forenklet per-fase ekvivalent av trefase transformator. Referert til primærside av transformator

### 3.3 DC Distribusjon

DC-fordelingsnett har andre utfordringer enn AC-nett. Der en bryter i AC-nett kan vente på en naturlig nullgjennomgang, eksisterer ikke denne i DC-kretser. Bryteren i et DC-nett må derfor være i stand til å bryte den fulle strømmen som går igjennom bryteren. Dette fører til en stor strømendring og dermed stor transient bryterspenning når strømmen brytes. Selv om komponentene til AC-system har vært på markedet lenge er det meste av dette utstyret ikke mulig å bruke i et DC-anlegg, vanligvis er utstyret for et DC-fordelingsnett dyrere og ikke alltid tilgjengelig for alle systemer. [23]

DC-fordelingsnettet om bord er et radiaalt fordelingsnett med symmetrisk monopolkonfigurasjon, det vil si at mellom omformerne går det både pluss og minus med isolert jord.

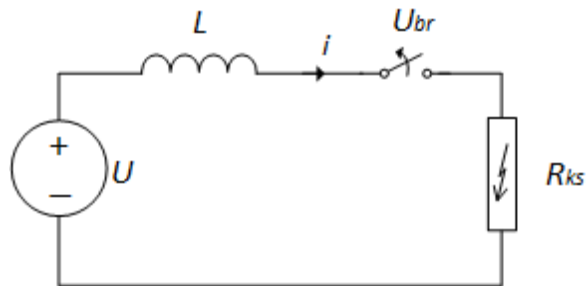
En konsekvens ved kortslutning er at spenningen faller ved fordelingen, dette kan igjen føre til at omformerne legger seg ut og at hele DC-fordelingen blir satt ut av spill. Kondensatoren vil her ha som jobb å opprettholde spenningen på et nivå over nivået der omformerne legger seg ut, på den måten kan den friske delen av anlegget være i drift gjennom en kortslutning. [24]

#### 3.3.1 Spesielle forhold i DC krets

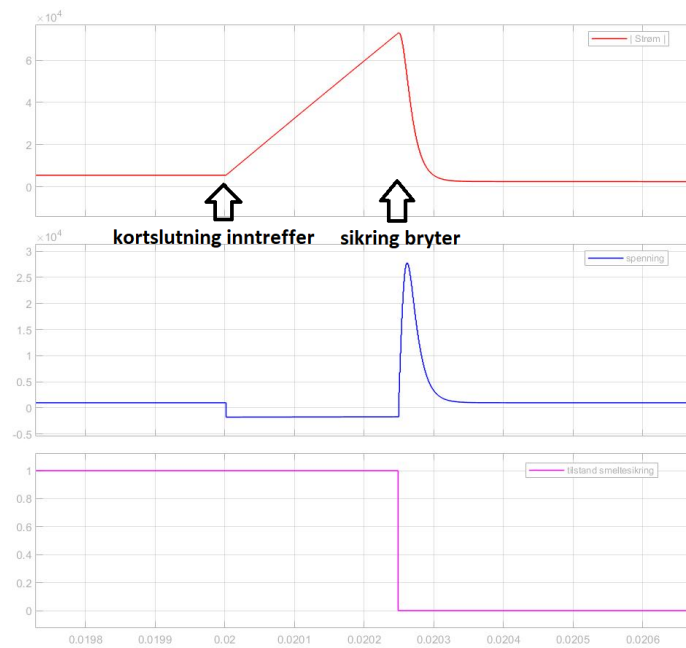
##### Transient bryterspenning

figur 3.5 viser en forenklet modell av et DC-system. Dersom  $R_{last}$  blir kortsluttet vil det først føre til en kortslutningstrøm igjennom bryteren som så vil bli brutt. Det er i bryteøyeblikket at endringen i strømmen ( $\frac{di}{dt}$ ) i kretsen er på sitt høyeste. For å undersøke konsekvensen av dette ser vi på uttrykket for den transiente bryterspenningen, ligning (3.14), som er utledet i [25].

$$U = L \frac{di}{dt} + U_{br} \tag{3.14}$$



**Figur 3.5:** Likestrømskrets i det kortslutningsstrømmen brytes. Ser bort i fra kortslutningsmotstanden  $R_{ks}$ .



**Figur 3.6:** Kortslutningsforløp med kortslutning og brudd. Rød kurve viser strøm, blå kurve viser bryterspenningen  $U_{br}$  og lilla kurve viser sikringstilstanden.

Løst med hensyn på strømdringen gir dette:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L}(U - U_{br}) \quad (3.15)$$

Uten å løse denne førsteordens differensialligningen kan vi her se at summen av spenninger i parantesen i ligning (3.15) avgjør fortegnet til strømdringen. Så lenge  $U_{br}$  er lavere enn påtrykt spenning  $U$ , er fortegnet positivt. Når kortslutningen brytes vil bryterspenningen  $U_{br}$  bli mye større enn  $U$  og dermed blir fortegnet til strømdringen negativt som illustrert i figur 3.6.

Sagt med andre ord følger det av Kirchoffs spenningslov at strømmen i en DC-kortslutning som brytes bare kan synke dersom motspenningen over bryteren er høyere enn påtrykt spenning. Denne høye motspenningen kan være ødeleggende for bryteren og føre til at isolasjonsevnen. Halvledervern er utformet på en måte som gjør at den

En annen konsekvens er at en stor strømdring medfører en høy, transient bryterspenning som ikke bare skaper problemer for vernet i forsøket på å bringe strømmen til null, men som også forplanter seg til resten av kretsen og kan forårsake sammenbrudd i isolasjonen til andre komponenter med overslag til jord eller minuspol som følge.

For å begrense den transiente spenningen som oppstår når bryteren legger seg ut kan bryteren tvinge strømmen til null gjennom å sette opp en motspenning. En annen metode for å dempe spenningen er å benytte en metaloksid varistor i parallell over bryteren. En svakhet med denne løsningen er at små strømmer kan forårsake en høyere overspenning enn det utstyret er laget for. En annen metode er å benytte en kondensatorkrets over bryteren som enten fanger opp energien eller lader ut energien gjennom en resistor [26].

Hvordan disse transiente spenningene faktisk dempes eller hvilken metode som benyttes er ikke en del av denne oppgaven. I denne sammenheng skal vi kun beskrive to vern som har ulike metoder for å begrense høye strømdringer. I korte trekk benytter smeltesikringer seg av lysbueprosessen til å lade ut strømmen før den går helt til null, mens halvledervern foretar en kontrollert utladning ved å slippe gjennom kortere og kortere pulser inntil strømmen har gått til null.

### Energi i bryteforløp

Som vist i foregående avsnitt utsettes vernet for høye strømmer og spenninger under kortslutningsforløpet. Energien en bryter som vist i figur 3.5 utsettes for finner man gjennom følgende integral [25]:

$$U = L \frac{di}{dt} + U_{br} \quad (3.16)$$

$$W_{br} = \int_0^{t_1} i(t)U_{br} dt \quad (3.17)$$

$$W_{br} = \frac{1}{2}Li_0^2 + \int_0^{t_1} (U - U_0)id t \quad (3.18)$$

Halvedervern må være designet til å tåle energien den blir utsatt for. Som vi ser i ligning (3.18) står startstrømmen for bryteprosessen,  $i_0$ , kvadrert og vil dermed ha en avgjørende betydning for energimengden. Med en raskt økende feilstrøm betyr dette at en hurtig utkobling er svært viktig for å begrense energimengden. Videre ser vi som tidligere nevnt at spenningsdifferansen, her  $U - U_0$ , er den avgjørende faktoren for å bringe effekten, og energien ned.

### Feil i DC krets

Høye motspenninger og energibegrensninger på raske halvledervern og annet utstyr i kretsen er to av utfordringene man møter ved feil i DC-kretser. En grunnleggende oppsummering av feiltyper i DC-anlegg gis i boken *Protection Principle and Technology of the VSC-Based DC Grid*, kap. 3.1 [27].

Feiltypene som kan oppstå i rene DC-anlegg begrenser seg til to typer:

- Pol-til-pol feil. Feilstadiene ved en slik feil begynner med:
  1. Bidraget fra utladning av kondensatorer. Fordi spenningen i begynnelsen av feilforløpet her er høyere enn spenningen på AC-siden, vil det meste av strømbidraget i kretsen komme fra kondensatoren. I korte trekk er utladningsprosessen en underdempet oscillasjonsprosess som beskrives med en andregrads differensialligning. Dette gjør at strømmen stiger ekstremt hurtig, og spenning faller tilsvarende raskt under null.
  2. Når DC-spenningen faller lavere enn spenningen på AC-siden vil friløpsdiodene åpne og lede via naturlig kommutering. Dette medfører at kortslutningsbidraget kan komme fra både AC- og DC-siden, men bare fra AC-siden i den respektive halvperioden der AC-spenningen er høyere. Dermed får vi her en transientrespons som beskrives av et ligningssett med førsteordens diff. ligninger basert på spenningsforskjellene mellom AC- og DC-siden.
  3. Når DC-kondensatoren(e) er fullstendig utladet vil friløpsdiodene for de tre fasene lede synkront på grunn av opp- og utladning av linjeinduktansene. Dette kan fra AC-siden betraktes som en trefasefeil.
- Pol-til-jord feil. I likhet med pol-til-pol feil vil det første stadiet i feilforløpet være:
  1. Utladning av kondensatorene. Dette beskrives også med en andregrads differensialligning, men forskjellen er at overgangsmotstanden mot jord her vil inngå som et resistivt dempeledd i prosessen.
  2. Når DC-spenningen faller, vil også her AC-siden bidra inn mot feilen via friløpsdiodene. En numerisk løsning av denne prosessen foreligger,

men det er vanskelig å utlede en analytisk løsning i tidsdomenet for spenninger og strømmer i dette stadiet.

For denne oppgaven som tar for seg et DC-anlegg med minuspole adskilt fra jord, betrakter vi kun pol-til-pol feil.

### 3.3.2 DC komponenter og kortslutningsbidrag

#### Kondensator

Ved kortslutning på DC-anlegget kommer kortslutningstrømmen momentant på grunn av kondensatoren som ligger i omformerne. I situasjonen der få omformere ligger inne på tavlen, for eksempel ved generatordrift, når kun to omformere ligger inne er det ikke sikkert at den strømmen som er lagret i kondensatorene til omformerne er nok til å få sikringen til å ryke. Det monteres derfor på en ekstra kapasitans som har til jobb og forsyne en kortslutning med energi nok til at sikringen ryker. [24]

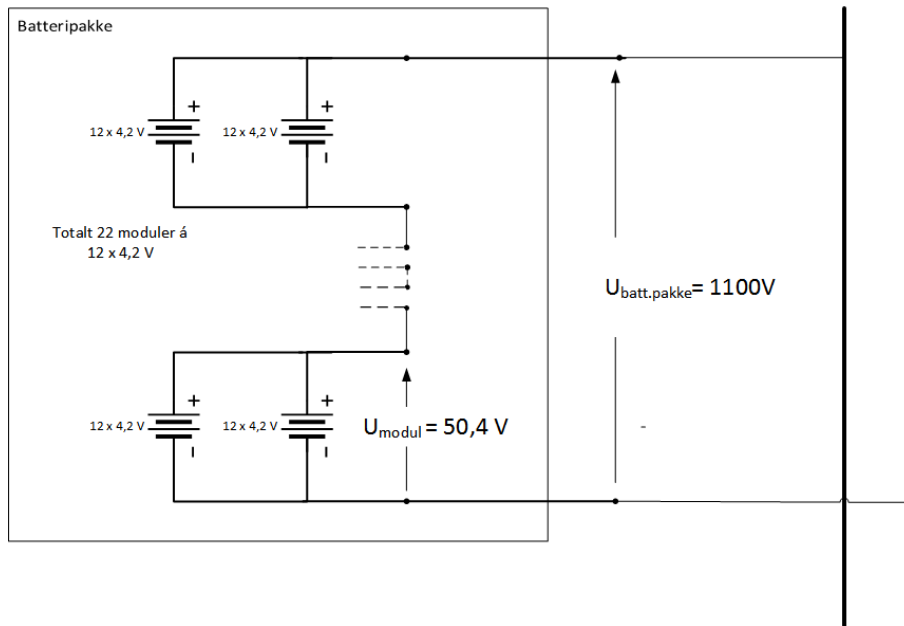
Energien lagret i en kondensator er gitt av:

$$W_c = \frac{1}{2}CV^2 \quad (3.19)$$

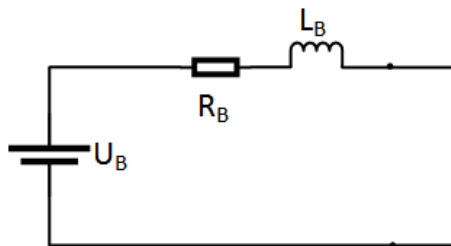
#### Batteri

Batteribanken som er tilkoblet DC-skinnen består av åtte separate batteripakker. Disse er i sin tur bygget opp av 22 batterimoduler som er seriekoblet for å oppnå ønsket spenning. I hver batterimodul ligger flere sett av battericeller der 12stk. 4,2V - celler er seriekoblet. En prinsippkisse av konfigurasjonen i batteripakkene vises i figur 3.7.

Ekvivalentskjemaet for et batteri består av en ideell DC spenningskilde med en resistans og induktans i serie. Disse representerer indre motstand i battericellene samt lederresistans ( $R_B$ ) og kortslutningsinduktansen i interkablingen i batteripakken ( $L_B$ ). [28] (figur 3.8)



Figur 3.7: Faktisk konfigurasjon av batteripakke, -moduler og -celler.



Figur 3.8: Ekvivalentskjema for batteripakke med tilkoblinger

For å bestemme verdiene for ( $R_B$ ) og ( $L_B$ ) brukte vi opplysninger fra leverandør om merkespenning, merkestrøm og tidkonstant for batteripakken ved maksimal og minimal ladetilstand, innsatt i uttrykkene (3.20) & (3.21).

$$R_B = \frac{U_B}{I} \quad (3.20)$$

$$L_B = R_B \tau \quad (3.21)$$

Innsatte verdier og resultater for batteriparametre er gjengitt i tabell 4.3.

## 3.4 Vern i DC distribusjon

### 3.4.1 Selektivitet

Selektivitet er at sikringen eller vernet nærmest feilen skal løse ut, og på den måten opprettholdes friske deler av anlegget operativt selv etter en feil. Det finnes flere forskjellige metoder og oppnå selektivitet på, de to vanligste er selektivitet igjennom tidsforsinkelse og selektivitet igjennom strøm. Prinsippet bak selektivitet igjennom strøm er at størrelsen på feilen vil variere ut ifra hvor i anlegget feilen ligger, altså en feil nært strømkilden vil gi en større kortslutning enn en feil på enden av fordelingsnettet. På den måten kan sikringen nærmest kilden stilles inn på en minste kortslutningsstrøm som kan oppnås ved neste sikring før den sikringen tar over kortslutningsbeskyttelsen for den neste delen av kabelen. Fordelen med denne typen selektivitet er at en feil nært kilden vil bli kunne oppdaget fort og lagt ut, mens en feil lengre ut vil bli tatt av andre sikringer. En bakdel med denne metoden er at den krever en forskjell i induktans mellom sikringene for at det skal fungere, og for vår oppgave kan induktansen mellom sikringene neglisjeres[17].

Den andre metoden og oppnå selektivitet på er igjennom tidsforsinkelse mellom sikringene. Ved denne metoden settes sikringen ved slutten av fordelingssystemet slik at den legger ut momentant, og alle sikringene vider mot kilden legges til en liten tidsforsinkelse ved hver sikring. På denne måten vil kun den sikringen som forsyner feilen legge ut. Bakdelen ved et slikt system er at ved en feil nær kilden må feilen opprettholdes lenge før den kan legges ut[17].

### 3.4.2 Sikringer

#### Virkemåte

Konvensjonelle smeltesikringer er bygget opp av et smelteelement omsluttet av et lukket kammer. Smelteelementet kan være en streng eller tynne plater av sølv, kobber eller et annet materiale med fysiske dimensjoner som gjør at strøm ved en gitt verdi er i stand til å smelte tråden som dermed bryter strømmen ved ønsket strømnivå.

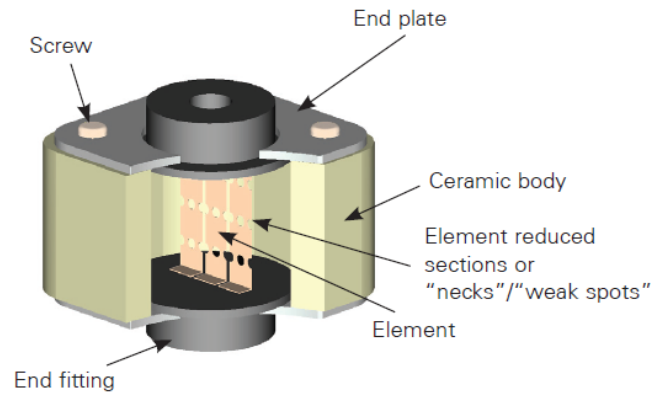
Prosessen kan beskrives i to steg [30]:

1. Perioden før lysbuedannelse
2. Perioden med lysbue

#### 1. Perioden før lysbuedannelse

Ved normalt strømtrekk under sikringens merkeverdi vil sikringselementet, som har en betydelig lavere resistans enn en leder, varmes opp på grunn av strømmen. Samtidig blir varmen avgitt til omgivelsene, og på den måten er det en termisk balanse der temperaturen holdes stabil. Dersom strømmen øker til en verdi høyere enn merkestrøm vil denne ekstra energien tas opp i smelteelementet raskere enn varmen kan avgis til omgivelsene. Temperaturen vil da øke inntil materialet





**Figur 3.9:** Prinsipptegning av høyeffekt smeltesikring. Gjengitt med tillatelse fra Eaton [29]

begynner å smelte. I en forenklet modell der omgivelsestemperaturen blir neglisjert og strømmen antatt konstant kan smelteintegralet 3.22 for sikringselementet settes opp på denne måten [31]:

$$\int_0^{t_{smelte}} R \cdot i^2 dt = \int_{T_0}^{T_{smelte}} c_v \cdot V \cdot dT \quad (3.22)$$

Her representerer venstre side av ligningen den elektriske energimengden integrert over tiden det tar før elementet begynner å smelte. Høyre side representerer utbredelse av termisk energi i sikringsmaterialet integrert over temperaturøkningen fra romtemperatur til smeltetemperatur. Løsningen av dette integralet gir oss et uttrykk (3.23) for smeltetiden som en funksjon av strøm, materialkonstanter og den aktuelle omgivelsestemperaturen:

$$t_{smelte} = \frac{a^2 \cdot k(T_0)}{i^2} \quad (3.23)$$

## 2. Perioden med lysbue

Dette er den tiden det tar fra materialet begynner å smelte til strømmen har gått ned til 0. Når den normale strømveien gjennom sikringsmaterialet smelter bort, dannes det ionisert gass i bryterkammeret som er i stand til å lede strømmen, men da med en høyere resistans enn før smeltetidspunktet. På grunn av kretsinduktansen vil høye spenninger dannes i sikringen i det strømmen brytes, og lysbuer oppstår lokalt mellom de ulike delene av smelteelementet. Ettersom mer og mer av

sikringsmaterialet smelter bort, vil avstanden til slutt bli så stor at lysbuen slukker, og bryter strømmen fullstendig. [30]

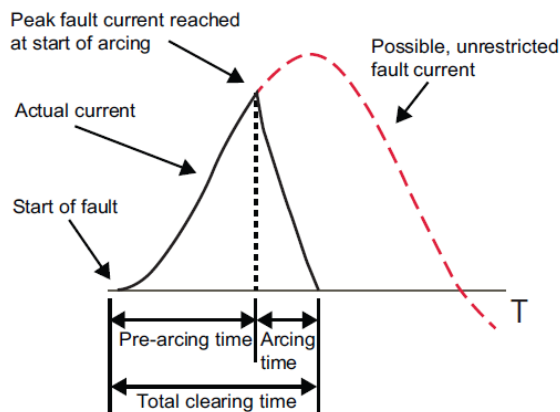
Den totale brytetiden er summen av smeltetid og tiden fra lysbue begynner til strømmen har gått ned til 0.

$$t_{bryte} = t_{smelte} + t_{lysbue} \quad (3.24)$$

Bryteintegralet (3.25) beskriver mengde gjennomsluppet energi i sikringen. Gjennom tester kan produsenten angi strømverdiene som skal føre til brudd sammen med tilhørende usikkerheter i et strøm-tid diagram. Se figur 3.11.

$$\int_0^{t_{bryte}} i^2 dt \quad (3.25)$$

Dersom strømmene i en smeltesikring er så høye at de starter smelteprosessen i sikringselementet, men ikke bryter fullstendig, kan dette endre materialegenskapene slik at sikringen løser ut for tidlig ved neste kortslutning. Av denne grunn er det viktig å planlegge sikringsstørrelsene med god margin mellom smeltetid og brytetid.



**Figur 3.10:** Prosessen før og under lysbuedannelse. Den røde, stiplede linjen viser den potensielle strømmen uten den strømbegrensende effekten.[29]

### Aktuelle sikringer i skipets DC-anlegg

Det benyttes høyhastighets smeltesikringer i hver enkelt streng i batteribanken. Disse er av typen Bussmann 170M6648 1000A. Den samme sikringen benyttes også som vern av firekvadrant omformere, men da med to sikringer i parallell. Hver enkelt av disse har en strøm-tid karakteristikk som vist i figur 3.11.

Databladet [32] for smeltesikringene oppgir følgende verdier for effekttopp ved merkestrøm:

$$P_{Tap} = 135W$$

$$I_n = 1000A$$

Vi benytter disse verdiene for å bestemme indre resistans i batteripakkene. Siden bare aktivt effekttap er angitt ser vi bort ifra evt. induktans i sikringen og antar at under en kortslutning er det  $P_{Tap}$  som gjør seg gjeldende, tross for at kortslutningsstrømmer kan være mange ganger høyere enn merkestrøm. Lysbueresistansen under brudd er ikke oppgitt og ses bort ifra i denne betraktningen som hensyntar kortslutningsbidraget fra batteribanken mot resten av kretsen før sikringsbruddet inntreffer. Resistans ved merkestrøm i sikringen blir da:

$$R_{sikr} = 2 \cdot \frac{P_{Tap}}{I_n^2} = 2 \cdot \frac{135W}{(1000A)^2}$$

$$R_{sikr} = 0,27m\Omega$$

NB! Uttrykket ganges med to fordi det er sikring i både pluss- og minuslederen.

Til beskyttelse av hver enkelt av de 22 batterimodulene benyttes 500A sikringer av typen SIBA URM NH3L gPV. Tilsvarende utregning er gjort for SIBA-sikringen, men ikke oppgitt her pga. manglende tillatelse fra rettighetshaver. [33]

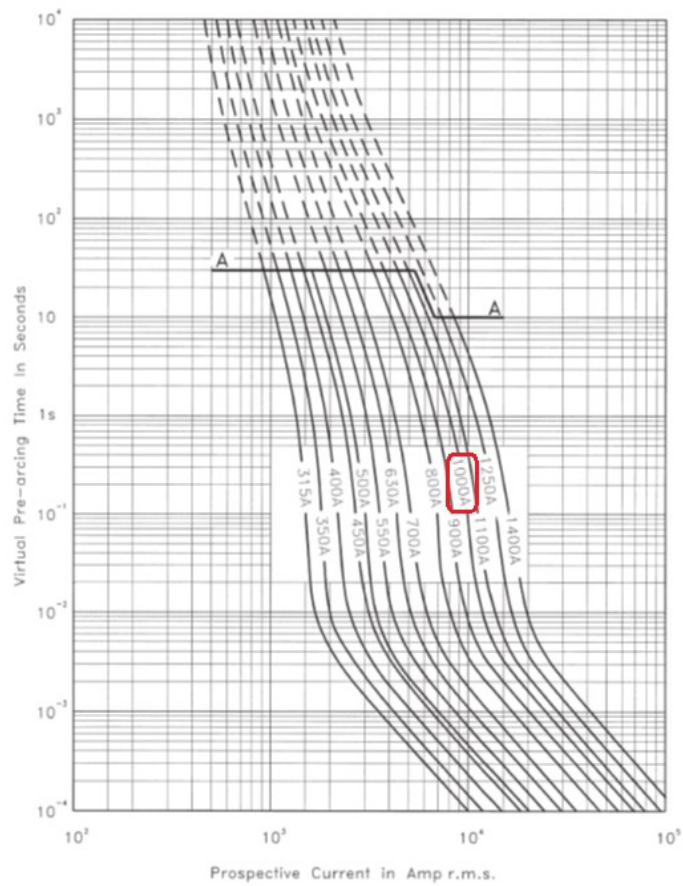
### Fordeler og ulemper med smeltesikringer

Fordelene med å benytte smeltesikringer til beskyttelse av et elektrisk anlegg er:

- Den innebygde strømbegrensende effekten under en kortslutning - Strømveien gjennom en lysbue har langt høyere resistans enn den vanlige strømveien gjennom sikringen, og lysbuene som oppstår internt i det sikringen bryter vil dermed øke spenningsfallet og senke strømmen gjennom sikringen. Dette er med på å begrense gjennomsluppet energi og potensialet til å ødelegge annet utstyr i kretsen.
- Teknologien er velkjent og det finnes sikringer til de fleste bruksområder, både høyeffektsikringer som egner seg til å bryte høye kortslutningsstrømmer raskt, og trege sikringer som kan gi et forsinket sikringsbrudd ved overbelastning.
- En sikring som har smeltet vil ikke kunne koble inn strøm igjen før den er byttet ut med en ny sikring. Dette kan være positivt fra et sikkerhetsperspektiv.

Ulempene er:

- Det kan være utfordrende å planlegge et elektrisk anlegg med full selektivitet på grunn av de relativt store marginene som trengs mellom utløsekurvene for smeltesikringer.



**Figur 3.11:** Strøm vs. tid sikringkarakteristikk for Bussmann 170M6648 1000A sikringer, hentet fra produsentens datablad. Over linjen A - A er kurvene stiptet pga. usikker utløsning i dette området. Gjengitt med tillatelse fra Eaton. [32]

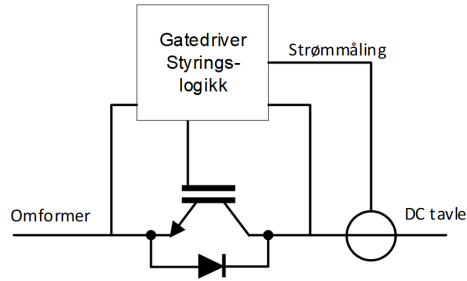


**Figur 3.12:** Doble høyhastighetsikringer i parallell benyttes i omformerne. Gjengitt med tillatelse fra Eaton [32]

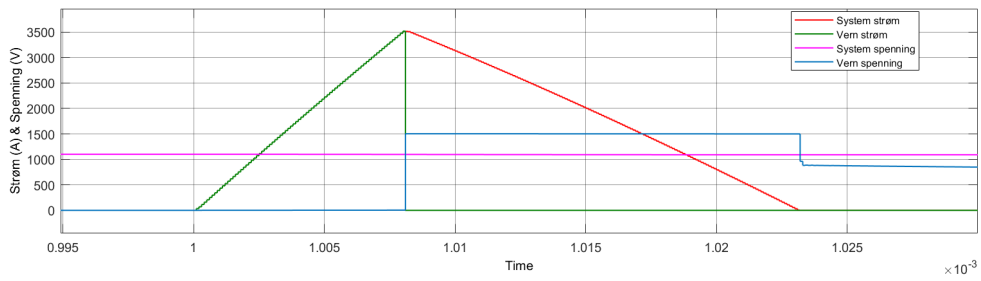
- En smeltesikring som har røket må fysisk skiftes ut før anleggsdelen kan settes i drift igjen. Dette kan være en tidkrevende operasjon som krever at man har mannskap på stedet og reservesikringer tilgjengelig.
- Smeltetiden i en sikring skaper en unødvendig forsinkelse dersom det eneste hensynet er å koble ut feil så fort som mulig.

### 3.4.3 Halvledervern

Det finnes i dag halvledervern som er basert på insulated gate bipolar transistor (IGBT) og diode eller revers integrated gate-commutated thyristors (IGCT), og metalloksidvaristor (MOV). [34] [35] Figur 3.13a viser et eksempel på et slikt halvledervern med IGBT og diode, styringslogikk inkludert strøm og spenning måling. I påslått tilstand så leder IGBTen når strømretning er fra DC-tavlen til omformeren og dioden når strømretningen er fra omformeren til DC tavlen. Kretsen i figur 3.13a gir kun beskyttelse i en retning. Det vil si om montert som anvist i figur så vil vernet kun beskytte omformeren. For å gi beskyttelse i begge retninger så kan det monteres et halvledervern i begge polene eller et halvledervern i serie der det ene vernet er snudd i forhold til det andre. Se figur 3.14a og figur 3.14b. Ved en feil med halvledervern i begge polene så vil en diode lede feilstrommen og IGBTen i motsatt pol vil bryte strømmen uavhengig av hvilken side av vernet feilen oppstår. Ved en AC-spenning på 600 – 690V og DC-link spenning på ca. 1000V så brukes IGBTer med merkespenning på rundt 1700V [36]. Til å ta opp den induktiv energi i systemet og driver strømmen til null brukes ofte en metall-oksidasvaristor (MOV) koblet i parallell halvlederene. En MOV kan drive strømmen til null ved å sette opp en spenningen som er høyere en system spenningen, men på et nivå som ikke skader halvlederen som slår av strømmen.[37] Når en feil inn-treffer og strømmen går over et forhåndsdefinert strøm nivå slås IGBTen av nesten umiddelbart. Strømmen ledes da til MOVen som tar opp den induktive energien og driver strømmen til null. Figur 3.13b viser strøm og spenning ved en kortslutning. Strømmen gjennom IGBTen (Grønn kurve) stiger raskt, høystrøm blir detektert og vern åpner samtidig som det blir satt opp en motspenning (Blå) som er høyere en systemspenningen (Lilla) til strømmen har falt til null. Systemstrøm (Rød) er strømmen som må absorberes enten av en MOVen, IGBT eller annen energi absorberende komponent/krets. Leverandørene av DC-tavlen og omformerne til skipet denne oppgave tar for seg har patent på et halvledervern basert på IGBT og diode.[38] Som beskrevet i artikkel [34] og manual[39], og som dokumentert i kortslutningrapporten [40] kan dette halvledervernet bryte strømmen på ca. 5-10 mikrosekunder. I oppgaven har det blitt brukt en forenklet versjon av halvledervern med IGBT og diode med motspennings spenningkrets bestående av en IGBT og ideell spenningskilde på 1500V. Brytetid har blitt justert i henhold til oppgitt tid på 5 mikrosekunder og strømgrense på 3.5kA, 0 s. I simuleringsmodellen er det kun benyttet halvledervern i en av fasene.

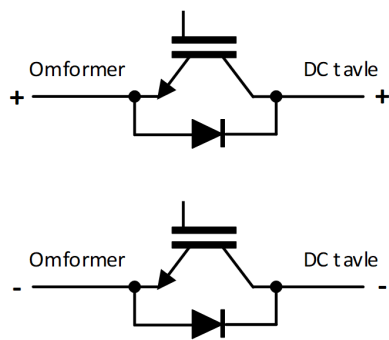


(a) Halvledervern

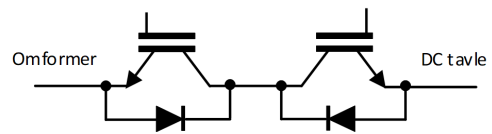


(b) Halvledervern kurve

Figur 3.13: Halvledervern med spenning- og strømkurver



(a) Halvledervern i pluss og minus pol



(b) To halvledervern i serie, ett vern er snudd i forhold til det andre.

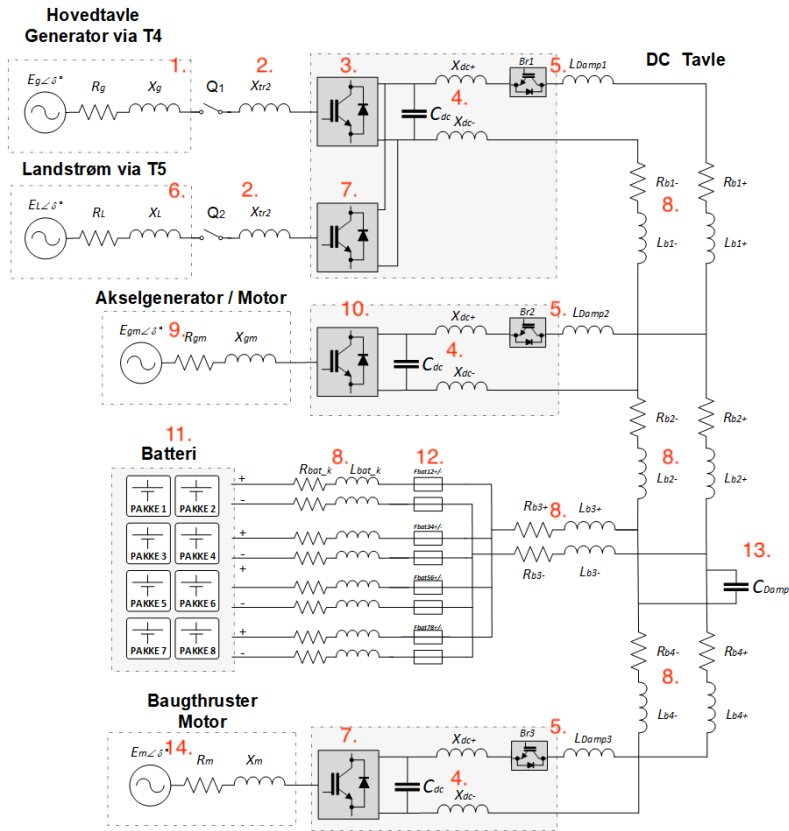
Figur 3.14: Vern løsninger med to halvledervern.

## Kapittel 4

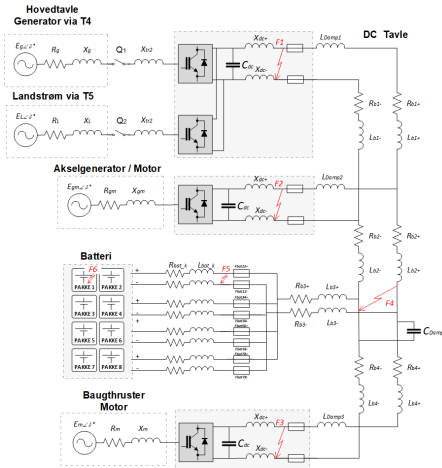
# Simuleringsmodell

Det er utarbeidet tre ulike simuleringsmodeller en med kun sikringer, en med sikringer montert mot batteriene og halvledervern mot omformerne, og en modell med kun halvledervern. Likt for alle modellene er at sikringene inne i selve batteriene er smeltesikringer. Videre er det utarbeidet fire forskjellige batterimodeller, en med nye BOL og fullt oppladet til 1100V, en med BOL batterier og utladet batterier 800V, en med EOL og 1100V og en med EOL batterier og utladet batterier 800V. Simuleringene ble først gjennomført med BOL 1100V batterier, så med EOL 800V. Etter disse simuleringene ble det besluttet å ikke gjennomføre simuleringene med EOL 1100V og BOL 800V. Figur 4.1b viser en forenklet modell av simuleringen med sikringer, figur 4.1c viser modellen for halvledervern og figur 4.1a viser hybridmodellen. Feillokasjonene som simuleres er vist i, figur 4.1b og figur 4.1c, samme feillokasjoner gjelder også for modellen med sikringer.

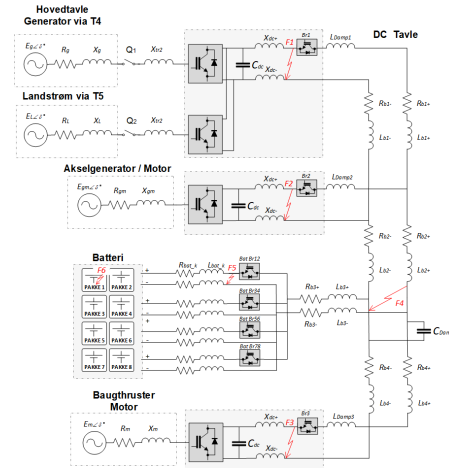
Figur 4.1 viser en forenklet modell, oversikt over komponentene i den forenklete modellen finnes i tabell 4.1 og den fulle hybridutgaven av simuleringsmodellen finnes i figur 4.2



(a) Men halvledervern til omformere og sikringer til batteri



(b) Men sikringer til omformere og batteri



(c) Men halvledervern til omformere og batteri

Figur 4.1: Ekvivalentkrets med feillokasjoner



Nummer	Komponent	Nummer	komponent
1	AC-fordelingsnett	8	motstand og induktans på fordelingskinner
2	Bryter til omformer	9	PTI/PTO maslin
3	Omformer til AC-nettet	10	Omformer til PTI/PTO maskin
4	Filterkretsen til omformere	11	Batterier
5	Halvledervern	12	Sikringer
6	Landstrøm med trafo	13	Kondensator montert på DC-skinne
7	Omformer til thruster	14	Thrustermotor

Tabell 4.1: Komponenter navngiving til figur 4.1.

## 4.1 Oppbygging av simuleringsmodell

For å kunne analysere funksjonen og de elektriske egenskapene til sikringer og halvledervern så realistisk som mulig ble de ulike elementene i anlegget modellert i Matlab Simulink. Til dette ble det brukt moduler fra biblioteket *Simcape Electrical, Specialized Power Systems* [41] med komponentdata hentet fra oppdragsgiver og tilpassninger gjort der det ikke har vært mulig å oppdrive data. Samplingstiden er på henholdsvis 0.1 mikrosekund for halvleder simuleringene og på 1 mikrosekund for sikringssimuleringene. Simuleringslengden varierer fra 0.010 til 3 s. Kortslutningen skjer 0.005 sekunder ut i simuleringen. Kortslutningsmotstanden er satt til  $1\text{m}\Omega$ .

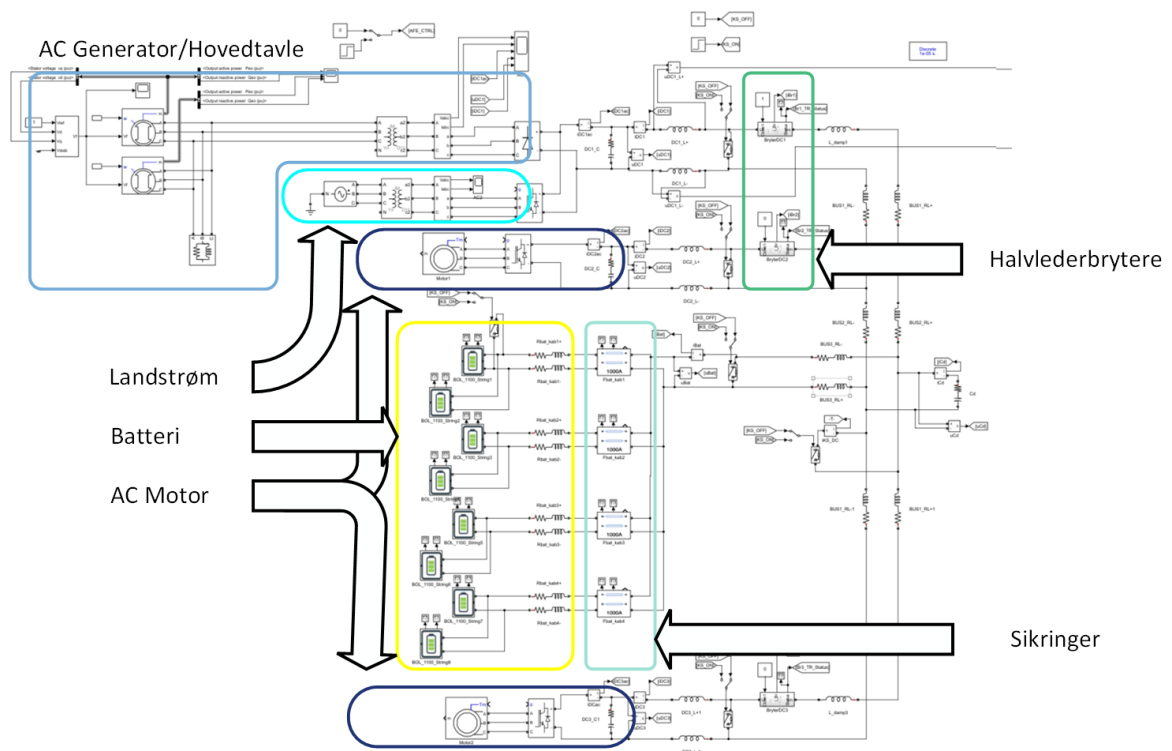
En forenkling som er gjort i modellen er simuleringen av firekvadrant omformeren, her er det benyttet en likeretterbro istedenfor. For at spenningen på DC-nettet skal være rett er størrelsen på trafo T4 og T5 justert for å treffe med spenningen.

Figur 4.2 viser den fulstendige simuleringsmodellen som ble utarbeidet. Hvis en sammenligner modellen med den forenklete modellen vist i figur 4.1 ser man i figur 4.1 at hele AC-nettet er forenklet ned til en vekselstrømskilde, en motstand og en induktans, det samme gjelder thrustermotoren og induksjonsmaskinen.

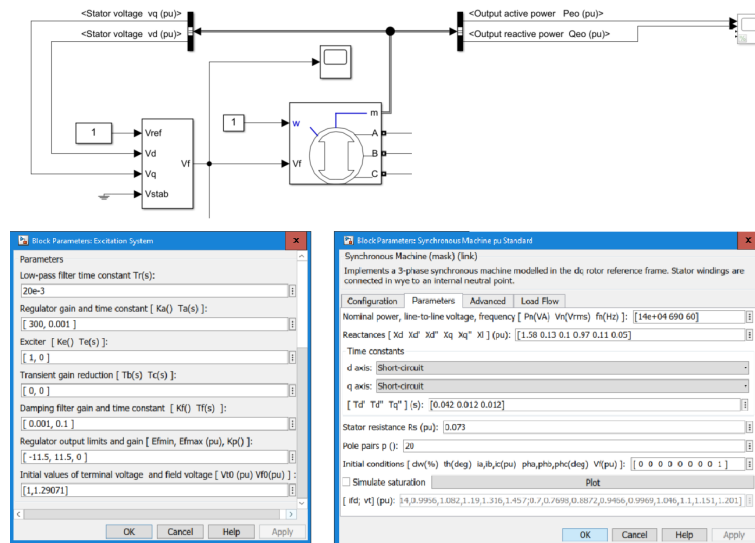
### 4.1.1 AC-nett

#### Generator

I henhold til artikkel [42] kan en synkronmaskin benyttes til å simulere en generator, den skal være egnet til å simulere både transiente, subtransiente og steady-state kortslutninger. Ut fra artikkelen er det benyttet en synkronmaskin med en



Figur 4.2: Hovedmodell

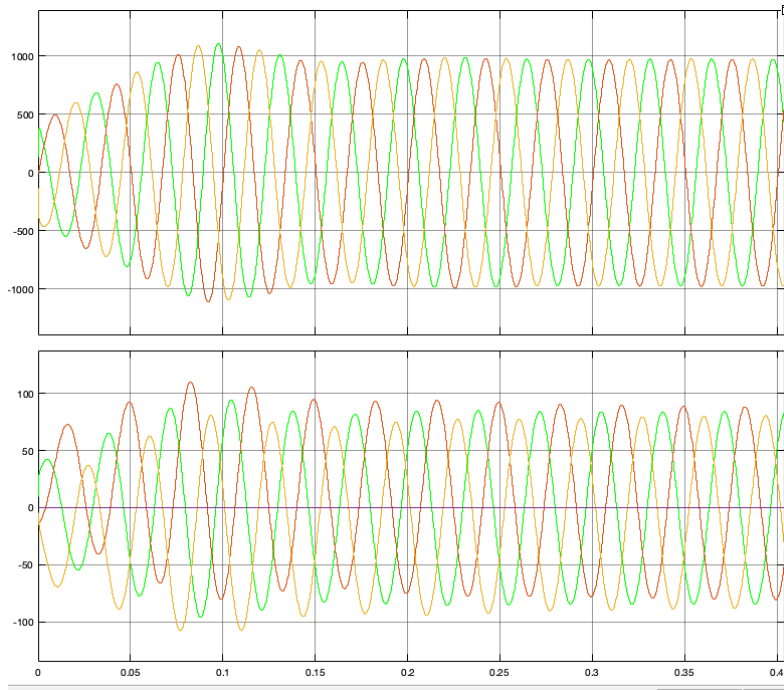


Figur 4.3: AC-generatorer er modellert med *Synchronous Machine pu Standard*-blokk og *Excitation System*-blokk.

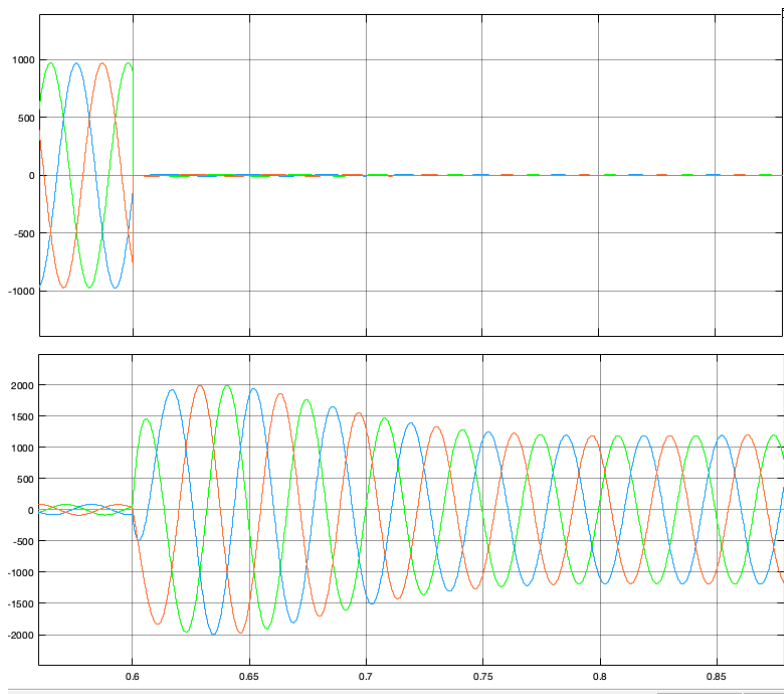
konstant inn for å styre magnetiseringen og mekanisk kraft inn til synkronmaskinen. Etter forsøk med å simulere på den måten viste det seg at dette skapte ustabiliteter i simuleringen, det ble da besluttet å sette inn en spenningsregulator i modellen til å holde spenningen stabil, og endre den mekaniske inngangen til inngang for konstant fart. Figur 4.3 viser modellen for generatoren og spenningsregulatoren. Ettersom det ikke var mulig å finne verdiene på generatorene som var ført opp i design spesifikasjonen ble det benyttet en annen generator fra [43], verdiene for simuleringen er vist i tabell 4.4. Denne generatoren er noe større en den som er montert, men det skal ikke påvirke simuleringene ettersom kortslutningsbidraget fra batteri og kondensatorer er mye større.

Under simuleringene ble det oppdaget noen unormaliteter med modellen av generatoren, blant annet at spenningen ikke beveger seg som en ren sinus i starten. Dette kommer av at modellen for generator trenger ca. 0.3s på å stabilisere seg og simuleringene som er kjørt er ferdig på 20ms. Ettersom bidraget fra generatorsiden er lite og kommer sent i forhold til kondensatorene og batteriene på DC-siden ble det besluttet at resultatet allikevel var tilfredsstillende for denne oppgaven.

Figur 4.3 viser modellen for generatoren og spenningsregulatoren. Ettersom det ikke var mulig å finne verdiene på generatorene som var ført opp i design spesifikasjonen ble det benyttet en annen[43] litt større generator. Dette skal heller ikke her påvirke simuleringene ettersom kortslutningsbidraget fra batteri og kondensatorer er mye større.



Figur 4.4: Oppstart av en generator



Figur 4.5: Kortslutningsforløp på en generator

## Hovedtavle

Generatorene er koblet på hovedtavlen som er på 690V AC, her fordeles også kraft ut til resterende forbrukere i skipet. Ut fra [8] er det beregnet et forbruk på skipet under drift på 300kW. Et forbruk på 300kW høres unaturlig høyt ut for et skip denne størrelsen, her er det mest sannsynlig lagt inn en buffer for å kunne drifte elektriske kraner. I simuleringen er skipslasten satt til 100kW for alle simuleringene, 100kW er en antagelse av hvor stor lasten faktisk vil være under drift.

## Trafo

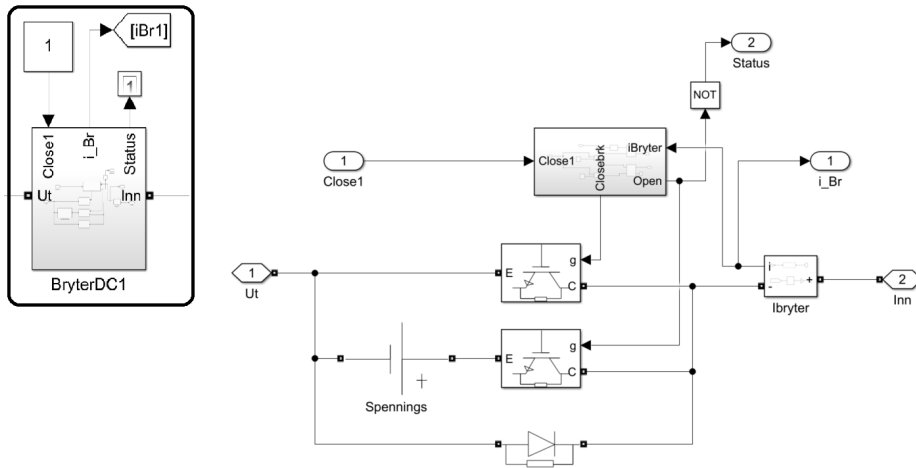
Merkeverdier	T4 og T5		T4 og T5
Tilsynelatende effekt [kVA]	630 kVA	Tap uten last [W]	1040W
Spenning primer[V]	690V	Spenning sekunder [V]	571V/783V
Frekvens [Hz]	60Hz	X12 [pu]	0,0524
$R_1$ [%]	0,683%	$R_2$ [%]	0,148%

Tabell 4.2: Oppgitte verdier for trafo hentet fra[44].

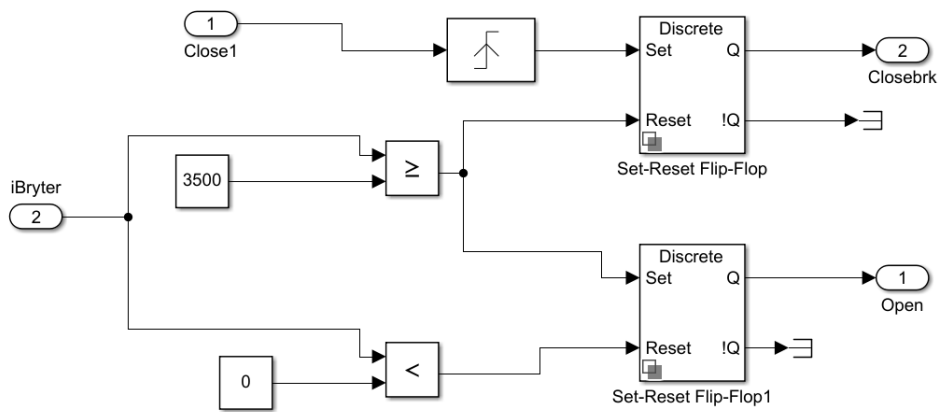
Tabell 4.2 viser verdiene som er benyttet i trafoen til modellen. Dette er ikke den modellen som er montert om bord på skipet, men en tilsvarende fra en annen leverandør. Ettersom modellen blir kjørt uten aktiv likeretter viser tabell 4.2 to sekundærspenninger, 571V for utladede batterier på 800V og 783V for oppladede batterier på 1100V.

### 4.1.2 Halvledervernblokk

Halvledervernet består av en halvledervernkrets og styringslogikk som vist i figur 4.6 og figur 4.7. Modellen er bygget opp som beskrevet i avsnitt 3.4.3. Styringslogikken lukker halvledervernet og sjekker om strømmen fra strømsensor *iBryter* er over @3500A@. Halvledervernkretsen består av en IGBT som står i parallell med en motspenningskrets og diode. Motspenningskretsen består av en IGBT og ideell spenningskilde i serie. Spenningskilden er satt til @1500V@. Hvis strømmen er over @3500A@ så blir det uten tidforsinkelse satt et høyt signal på inngangen til IGBTen i motspenningskretsen. Samtidig så slås hoved IGBTen av. Strømmen går da gjennom IGBTen i motspenningskretsen til strømmen har passert 0A. Dioden leder strømmen fra omformer til DC tavlen. Dersom halvledervern er montert i begge polene så er halvledervernet montert likt. Det vil si IGBTene i begge polene og diodene har tilsvarende retning. IGBT og diode forover spenning  $V_f$  er henholdsvis 1V og 0.8V.



Figur 4.6: Modell av halvledervern.



Figur 4.7: Styringslogikk for modell av halvledervern

### 4.1.3 Sikringsblokk

For å modellere de elektriske egenskapene til en smeltesikring ble det valgt en metode som benytter akkumulert energi i sikringen for å avgjøre smeltetidspunktet. Karakteristikken for energi og tid ble generert i Matlab basert på strøm - tid karakteristikken for den aktuelle sikringen og sammenhengen mellom Energi og strøm. (4.1). I modellen blir akkumulert energi i sikringen kontinuerlig sammenlignet med grensen fra karakteristikken, og dersom energien overskrider dette nivået vil en bryter åpnes for å simulere at sikringen smelter.[45][46]

$$E_{kar} = I_{kar}^2 \cdot t_{kar} \quad (4.1)$$

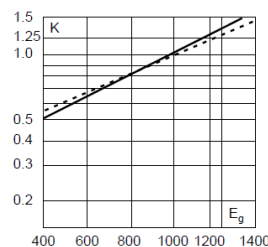
I samme øyeblikk kobles en annen krets inn, som simulerer egenskapene til en lysbue. Her ligger en resistans i serie med en variabel kondensator der kapasitansen bestemmes av feilstrømmen i smelteøyeblikket. Her ble sammenhengen for utladningsforløpet i en RC-krets benyttet (4.2). Beregningen av motstanden kan sees i figur 4.10, nede til høyre på figuren kan man se spenningen, målt rett før feilen inntreffer, deles på strømmen i det lysbuekretsen legges inn, resultatet blir resistansen sett fra sikringen. Den beste referansen som er funnet på hvor lenge en lysbue varer [32] oppgir at den kan vare opp til 10ms. Med det som utgangspunkt deles 2ms på resistansen som resulterer i kapasitansen (3.5). Denne metoden viser gode resultater på mindre modeller, men når det legges inn flere induktanser i kretsen påvirker dette resultatet. Resultatet ble allikevel akseptert ettersom dette skjønnsmessig ligner mer på et lysbueforløp.

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4.2)$$

I modellen er hensikten med dette å begrense strømendringen ved smeltebruddet, slik at spenningstopper som oppstår pga. reaktansen i kretsen ligning (3.1), holdes lave.

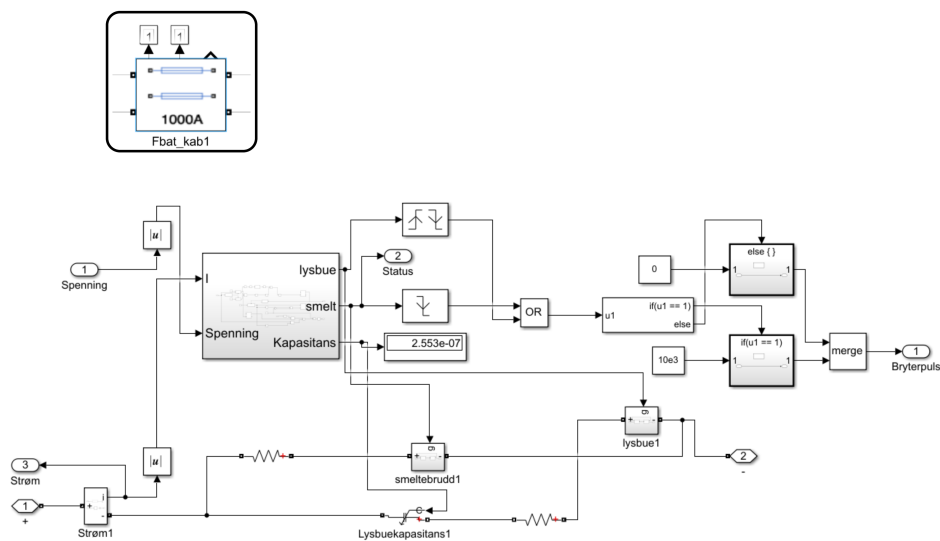
#### Total Clearing I<sup>2</sup>t

The total clearing I<sup>2</sup>t at rated voltage and at power factor of 15% are given in the electrical characteristics. For other voltages, the clearing I<sup>2</sup>t is found by multiplying by correction factor, K, given as a function of applied working voltage, E<sub>g</sub>, (RMS).



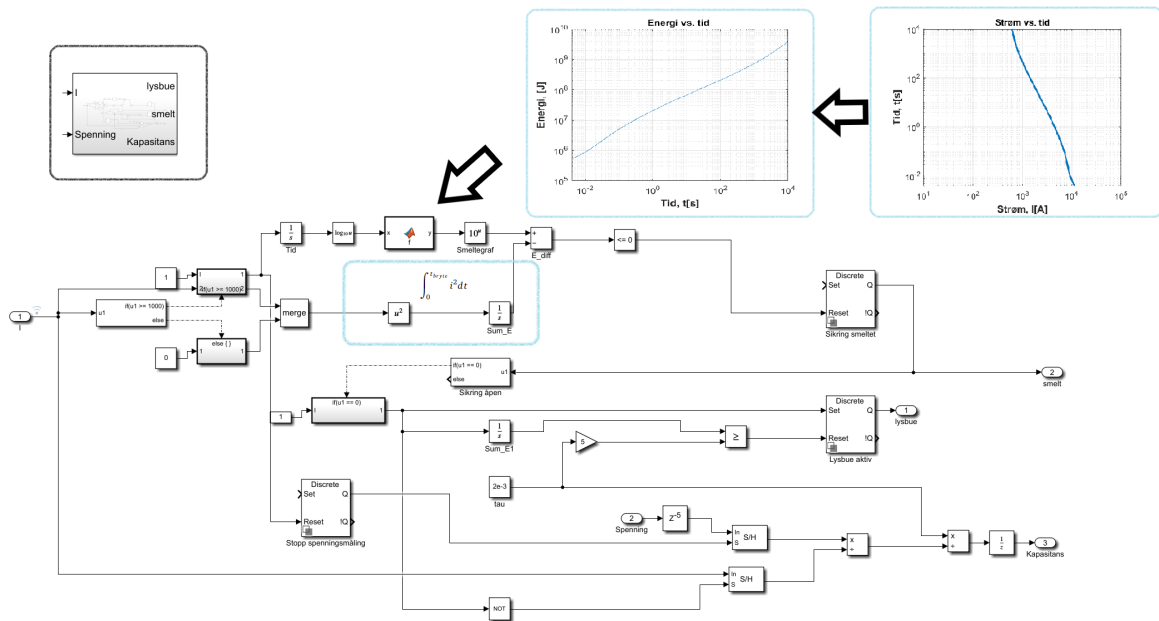
Figur 4.8: Nedratifisering av I<sup>2</sup>t-verdi ved andre spenninger enn nominell.[32]

I databladet for 1000A-sikringen er det oppgitt en nedratifisering av total gjennomsluppet energi dersom den aktuelle driftsspenningen er lavere enn en spenning på 1000V (figur 4.8). Vår modell baserte seg ikke på de oppgitte verdiene for total gjennomsluppet energi, men i stedet på en konvertering av strøm-tid karakteristikken ihht. [46]. Det finnes ingen tilsvarende oppgitte nedratifiseringsdata for strøm - tid ytelsen til sikringen ved ulike spenninger, og derfor har vi valgt å se bort fra denne effekten.



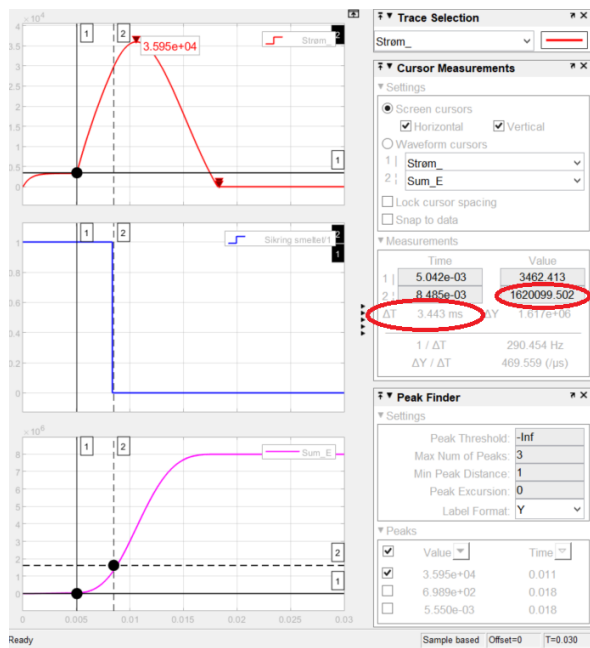
Figur 4.9: Sikringsmodell med to brytekretser kretser for smelte- og lysbueforløp.



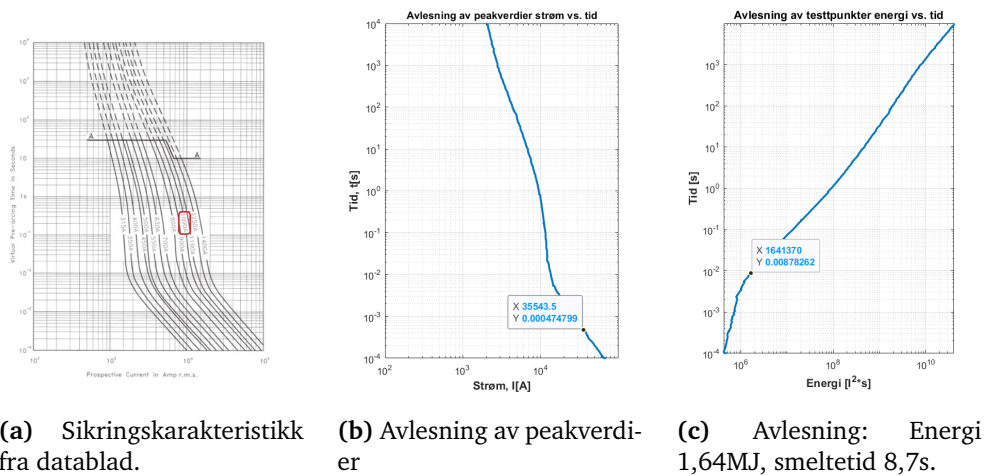


**Figur 4.10:** Sikringsmodell med logikk for styring av smelte- og lysbueforløp. Her gjøres et oppslag i energi - tid karakteristikken for sikringen.

Modellen ble testet gjennom å kjøre flere simuleringer av ulike feilstrømmer. Tidsforsinkelse og energinivåer ble avlest fra sikringsleverandørens karakteristikk som vist i figur 4.12c.

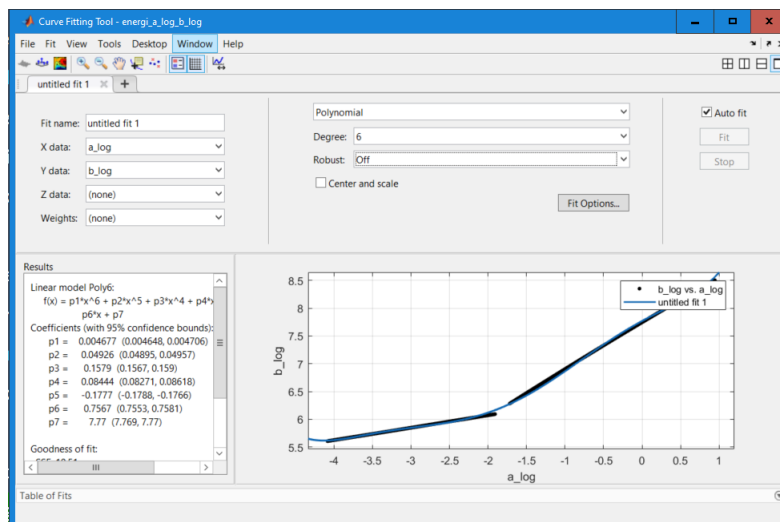


Figur 4.11: Testtilfelle av sikringsmodell med en peak-feilstrom på ca.36kA. Gjennomsluppet energi ved smelting var ca. 1,6 MJ og smeltetiden var 3,443ms.



Figur 4.12: Avlesning for testtilfelle

Tid - strømkararakteristikken ble lastet inn i Matlab fra en bildefil med diagrammet fra leverandørens datablad. Deretter ble denne karakteristikk linearisert i *Curve-fitting* -applikasjonen i Matlab slik at man fikk en kontinuerlig funksjon med tidsverdier for alle mulige strømmer. Det ble valgt et sjettedegrads polynom som tilnæringsmetode i denne prosessen. Gjennom å prøve ulike metoder ved hjelp av det grafiske verktøyet var det tydelig at dette ga det beste resultatet av alle tilnærmingene som var tilgjengelig. Dette var også metoden som ble brukt i [45]. På grunn av begrensninger med denne metoden, spesielt ved diskontinuiteter i kurver, lot det seg ikke gjøre å linearisere hele kurven i en operasjon. Derfor ble kurven oppstykket i to segmenter som sammen dannet en god tilnærming. Allikevel ble det et avvik rundt brytningspunktet mellom disse segmentene. Dette kan forklare forskjellen mellom tidsforsinkelsene (3,4 ms vs. 8,7 ms) i figur 4.11 og figur 4.12c.

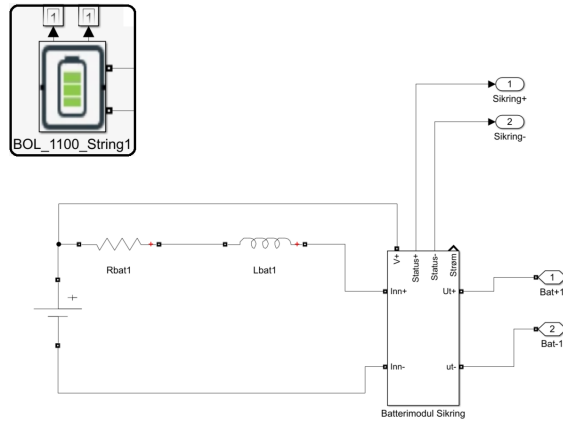


**Figur 4.13:** Prosessen med å linearisere sikringskarakteristikken innebar en tilnærming for å få en kontinuerlig funksjon som kunne brukes i Simulink.

#### 4.1.4 Batteriblokk

Batterimodellen ble utformet på basis av reelle data om oppbyggingen av batteribanken, som beskrives i avsnitt 3.3.2. Indre motstand og induktans både internt i batteribanken og i tilkoblingskablene er hensyntatt. Internt i hver batteriblokk ligger også en 500A sikring som har til hensikt å beskytte andre moduler dersom en feil skulle oppstå i en enkelt modul. Spenning, R og L parametre endres i henhold til ladetilstand og hvorvidt batteriene er helt nye (BOL), eller ved slutten av levetiden (EOL). Tabell 4.3 viser bidraget fra hver enkelt batteristreng. Kablene mellom batteriet og DC tavlen er av typen  $1 \times 95 \text{ mm}^2$  og har en oppgitt verdi på  $0.206 \text{ ohm/km}$  med en lengde på 12 meter. To batteristrenger er koblet sammen på batteri siden og fire stk. kabler går fra to batteri strenger til DC tavlen, totalt

16 kabler.  $R_{kabel}$  er oppgitt av oppdragsgiver til  $1.24\text{m}\ \Omega$  og  $L_{kabel}$  til  $2.5\mu\text{H}$ .



**Figur 4.14:** Batterimodell med DC-spenningskilde, ekvivalent R og L og batterimodulsikring på 500A.

Spenning	Strøm	$\tau$ (L/R)	R [ $\Omega$ ]	L [H]
1100V	14.9kA	0.16ms	0.073825503	1.181208e-05
800V	6.4kA	0.1ms	0.125	1.25e-05

**Tabell 4.3:** Batteriparametere.

#### 4.1.5 DC Tavle

Reelle verdier er brukt i simuleringen, men oppgis ikke her pga. opphavsrettigheter. Se [33].

#### 4.1.6 Induksjonsmaskiner

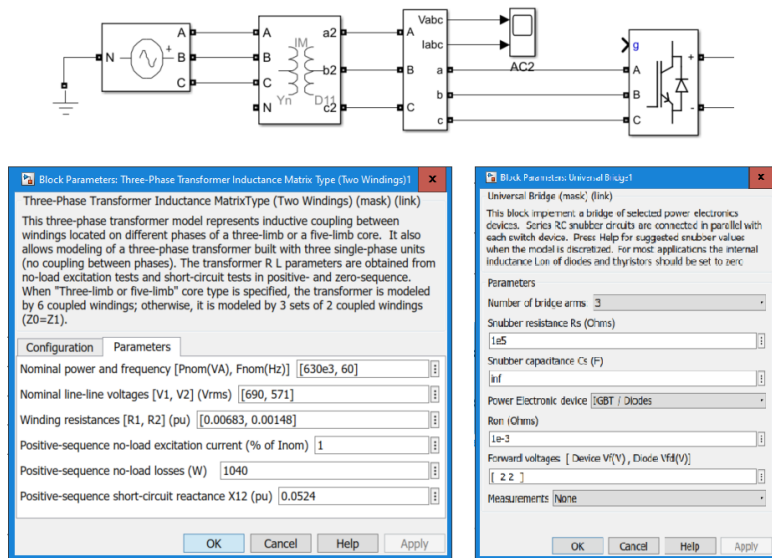
Tabell 4.4 viser de viktigste verdiene for akselgenerator/motor og Baugthruuster motor. Siden ikke kortslutnings verdiene for motorene ikke er tilgjengelig så har disse blitt hente fra IEC61363 avsnitt 6.3.3 General data for Large motors".

Merkeverdier	Akselgenerator/motor	Baugthrustermotor	Generator
Aktiv effekt [kW]	800	300	119
Spenning [V]	600	600	590
Strøm [A]	929	317	138
Frekvens [Hz]	40	50	60
Speed [rpm]	1194	1484	1800
Dreiemoment [Nm]	6397	1930	-
Effektfaktor $\cos\phi$	0.86	0.82	0,85
Efficiency [%]	96.4	94.6	
Antall polerpar	2	2	2
$T''_d$	28,42 ms	28,42 ms	12ms
$T_{dc}$	17,55 ms	17,55 ms	42ms
R/X	0,367	0,367	
$R_{stator}/R_{rotor}$	1,6	1,6	

**Tabell 4.4:** Verdiene for roterende maskiner i anlegget. [47] [48] [43]

#### 4.1.7 Landstrøm

Det er gjort en forenkling av simuleringen av landstrømsanlegget vist i figur 4.15. Her kan man se landstrømmen bestå av en ideell strømkilde, en trafo og en omformer. Siden havner har forskjellige størrelser på generatorer/trafoer for forsyning av landstrøm til skip ble det besluttet å simulere den som en ideell kilde. Trafoen som er benyttet er samme som ble benyttet til AC-nettet T4.



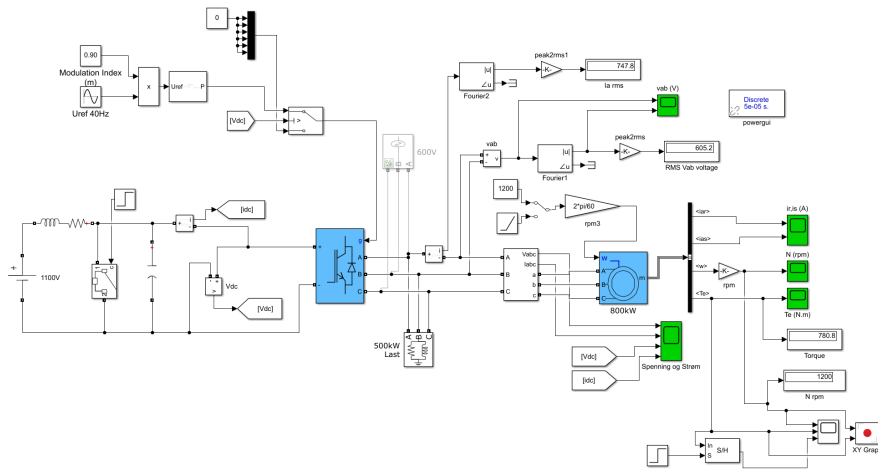
**Figur 4.15:** Landstrømstilkoblingen er modellert som en ideell trefasekilde, en trefasetransformator-blokk og en *Universal Bridge* IGBT-blokk som er brukt uten gate styring.

#### 4.1.8 AC Motor og omformer blokk

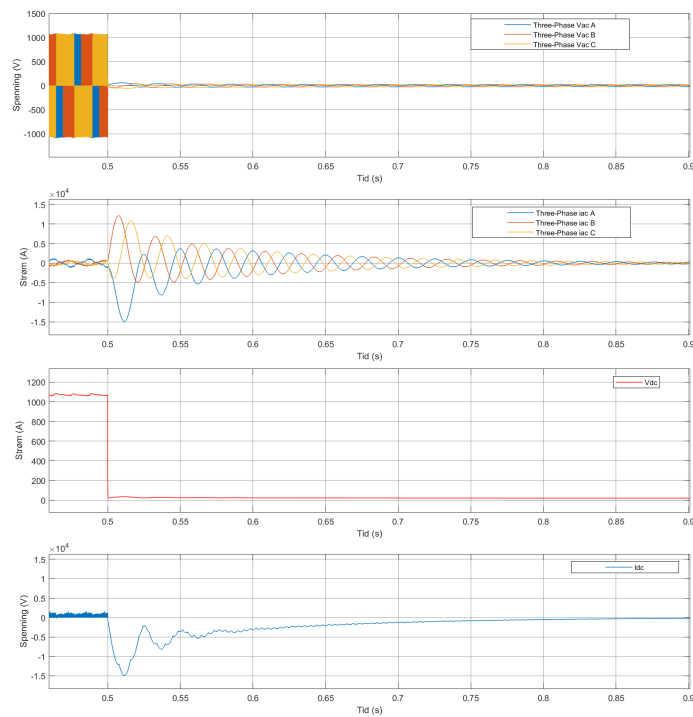
Som nevnt tidligere så ble ikke motorene brukt i kortslutningssimuleringene på grunn av at vi fikk utfordringer med simuleringstiden. Figur 4.16 viser motor og omformer modellen. Modellen består av en spenningskilde på 1100V, filter kondensator og DC-link induktans og motstand. Omformerer er en to nivå trefase spenningskildeomformer (VSC). VSC omformerer er styrt av et pulsbreddemodulert kontrollsignal. Det ligger også en deteksjon på om DC spenningen har falt under 710V. Viss den har gjort det så stoppes omformer svitsjingen umiddelbart. Motoren er en standard asynkron matlab motor blokk som er satt opp i henhold til tabell 4.4. Simuleringsresultatet for akselgenerator/motor maskinen kan sees i figur 4.17. Den nederste kurven viser kortslutningbidraget fra maskinen på DC-linken ( $I_{dc}$ ).

Spenningen (første harmonisk) ut av omformerer er gitt av [9]:

$$U_{ab} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \cdot U_{dc} \cdot M \quad (4.3)$$



**Figur 4.16:** AC-motorene i modellen består av en *Asynchronous Machine*-blokk samt tilhørende firekvadrantomformer og filter for tilkobling til DC-samleskinnen.



**Figur 4.17:** Akselgenerator/motoren kortslutning simuleringer.

## 4.2 Kriterier for vellykket simulering

Med vellykket simulering menes en simulering der systemet oppfyller kravene satt av DNV[16] altså:

- Systemet skal tåle de kortslutningstrømmene som oppstår i kortslutningsforløpet. For dette anlegget betyr det at peak-strømmen må være under  $220kA$ , og kortslutningstrømmen kan maks være  $100kA$  i  $1s$ [49].
- Systemet skal være selektivt.
- Systemet skal opprettholde spenningen slik at omformerne klarer å holde seg i drift. Grensen for dette er  $710V$ . [39]



## Kapittel 5

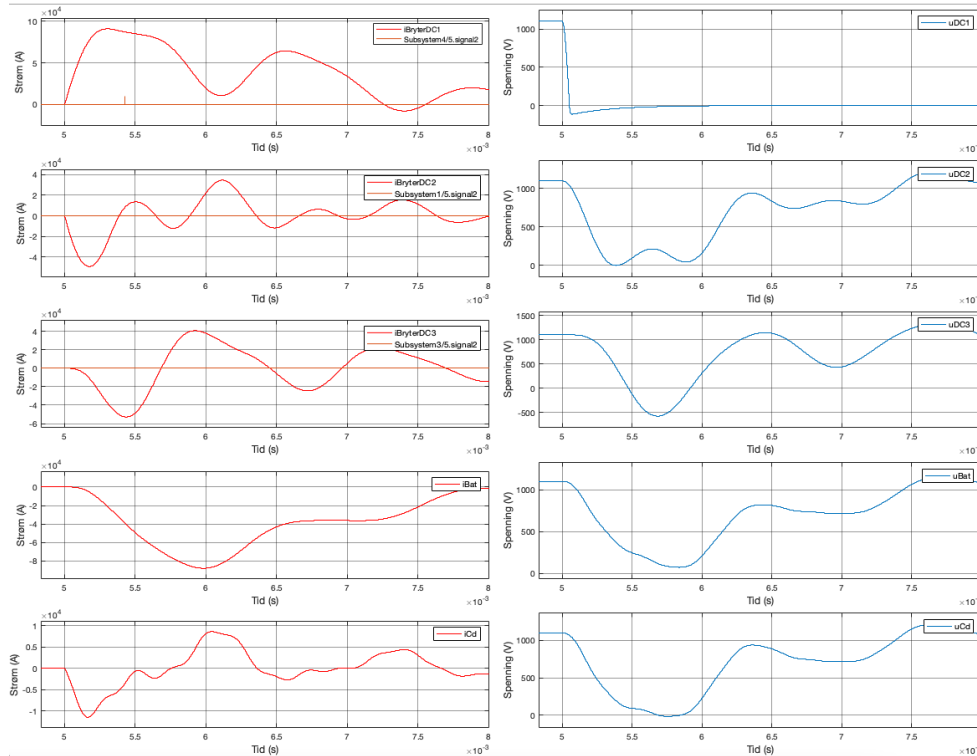
# Simulerings resultat

De viktigste simuleringsresultatene er presentert i dette kapitlet. Med tre forskjellige modeller, to forskjellige batterier og 6 forskjellige feillokasjoner er det totalt gjennomført 36 simuleringer som finnes i vedlegg ???. I denne rapporten finnes et utdrag av de viktigste simuleringene som får frem resultatet. Kortslutning i Omformer Akselgen. / Motor [F2] og Omformer Baug thruster [F3] er ikke representert i dette kapitlet da simuleringresultatet er identisk med omformer Generator / Landstrøm [F1]. Kun litt forskjell i strømbidrag. Navngiving av vern og sikringer fra DC tavlen til batteri er satt opp parvis. Det vil si at for eksempel med sikring12 så menes sikringringen som går fra DC tavlen til batteri streng 1 og 2. Dette skyldes at batteri strengene er koblet sammen to og to.

## 5.1 Sikringer

### 5.1.1 Kortslutning i omformer Generator / Landstrøm [F1]

Batterispennning 1100V og BOL batterier



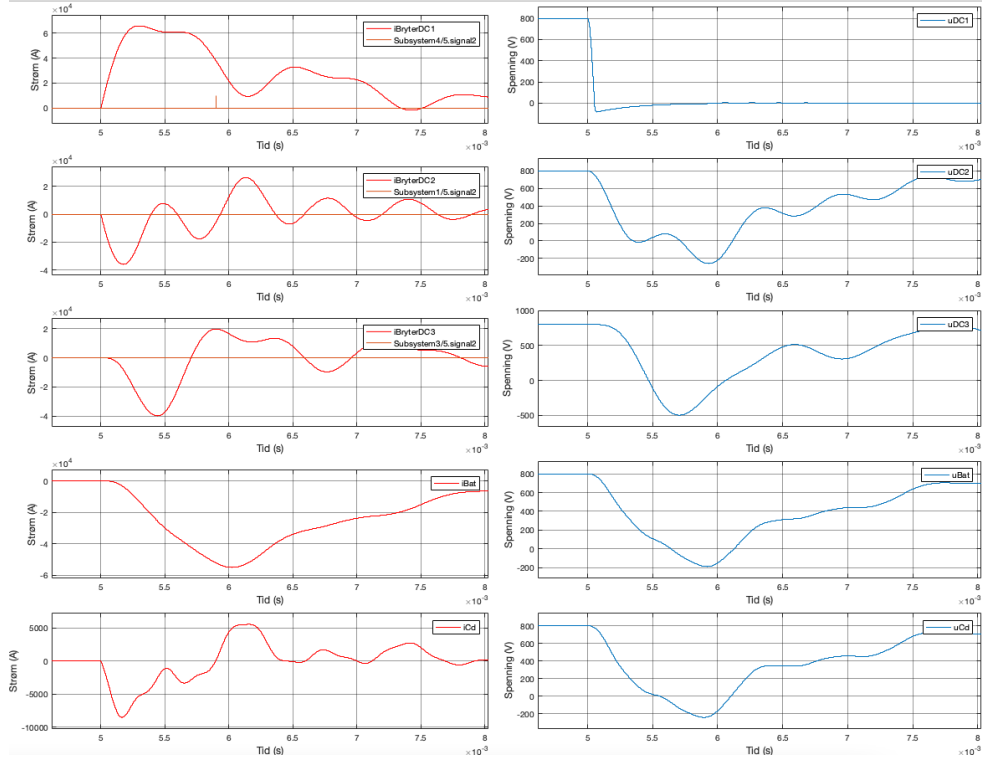
**Figur 5.1:** Kortslutning i omformer Generator / Landstrøm ved 1100V og BOL batterier, modell med sikringer

Målepunkt	Utløsetid ( $t_{vern}$ ) [ms]	Spennning [Min]	Tilstand vern	Kommentar
	0.427			
	Strøm ( $i_{maks}$ ) [A]			
Vern Generator / Landstrøm [F1]	90 770	-113	Utløst	
Vern Akselgen. / Motor [F2]	-49 160	0	Intakt	
Vern Baug thruster [F3]	-52 810	-569	Intakt	
Vern DC Tavle til batteri	-87 770	74	Intakt	Totalstrøm til/fra alle batteri
Batteri streng 1 [F6]	-10 850	-247	Intakt	
Kondensator (Cd)	-11 460	-20	Intakt	

**Tabell 5.1:** Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.1

Kommentar: Kun sikringen nærmest feilen utløst, spenningen ved alle omformerne er lavere enn grenseverdien, ingen strøm høyere en mekanisk grenseverdi

Batterispennning 800V og EOL batterier



Figur 5.2: Kortslutning i omformer Generator / Landstrøm ved 1100V og EOL batterier, modell med sikringer

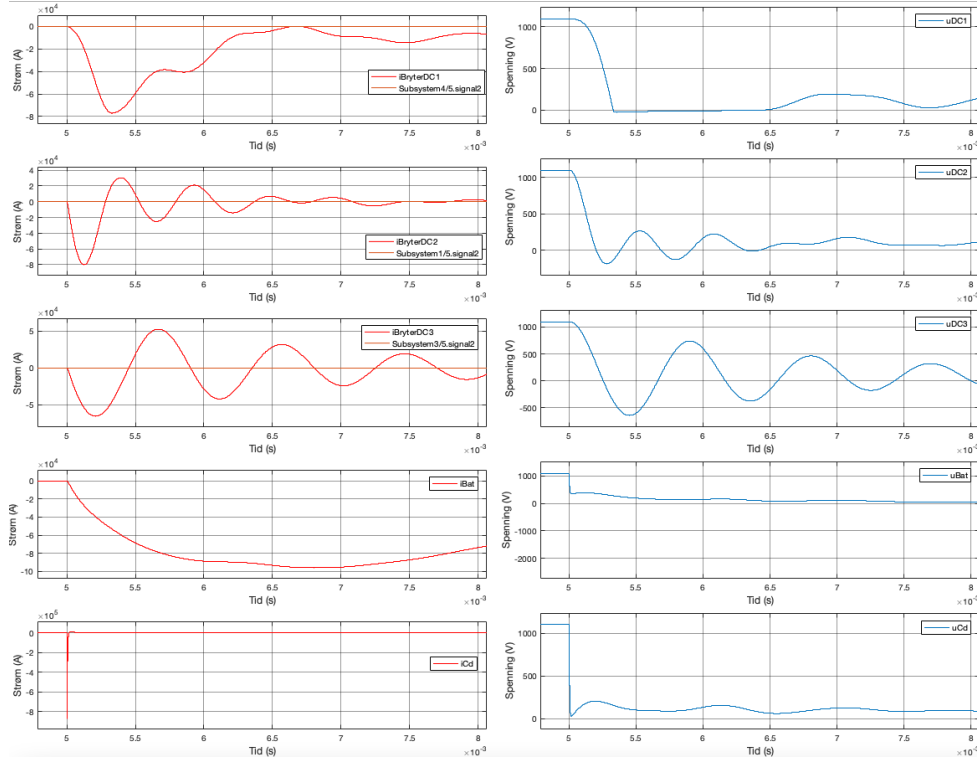
Målepunkt	Utløsetid ( $t_{vern}$ ) [ms]	Strøm ( $i_{maks}$ ) [A]	Spennning [Min]	Tilstand vern	Kommentar
	0.904				
Vern Generator / Landstrøm [F1]		65 760	-83	Utløst	
Vern Akselgen. / Motor [F2]		-35 890	-259	Intakt	
Vern Baug thruster [F3]		-39 890	-496	Intakt	
Vern DC Tavle til batteri		-55 070	-191	Intakt	Totalstrøm til/fra alle batteri
Batteri streng 1 [F6]		-6 841	-88	Intakt	
Kondensator (Cd)		-8 389	-238	Intakt	

Tabell 5.2: Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.2

Kommentar: Kun sikringen nærmest feilen utløst, spenningen ved alle omformerne er lavere enn grenseverdien, ingen strøm høyere en mekanisk grenseverdi

### 5.1.2 Kortslutning i DC tavle [F4]

#### Batterispennning 1100V og BOL batterier



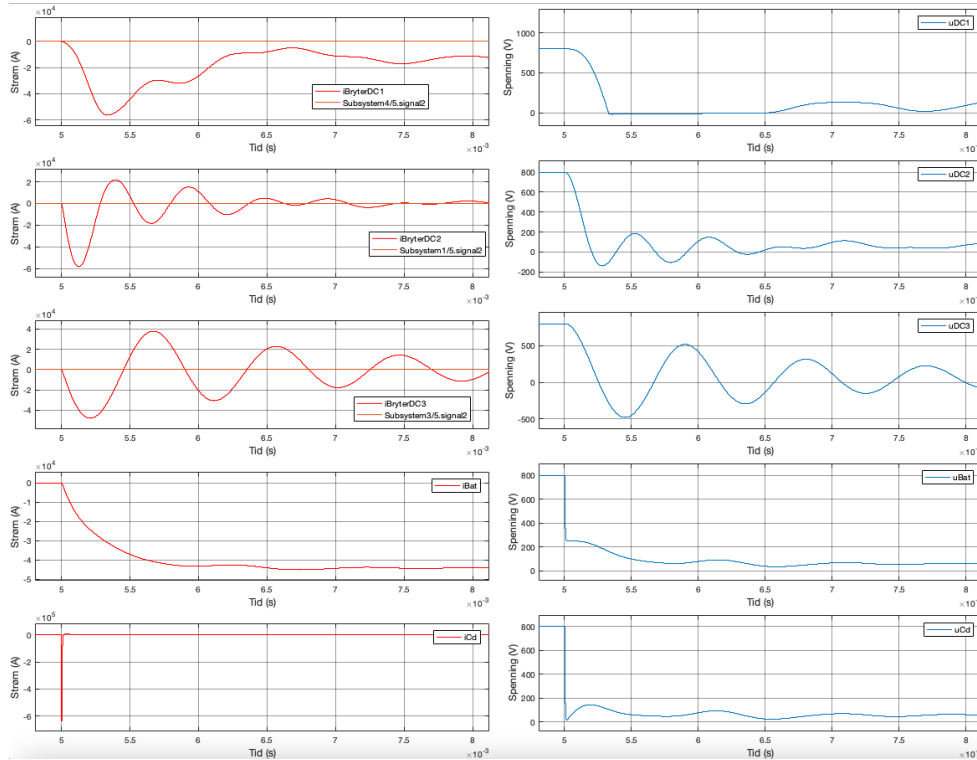
Figur 5.3: Kortslutning i DC tavle ved 1100V og BOL, modell med sikringer

Målepunkt	Utløsetid ( $t_{F_{Bat,ab1}}$ ) [ms]	Utløsetid ( $t_{iDC1}$ ) [ms]	Tilstand vern	Kommentar
	Strøm ( $i_{maks}$ ) [A]	Spennning [Min]		
Vern Generator / Landstrøm [F1]	2,01	2145	Utløst	
Vern Akselgen. / Motor [F2]	-76 880	-27	Intakt	
Vern Baug thruster [F3]	-79 900	-184	Intakt	
Vern Baug thruster [F3]	-65 560	-645	Intakt	
Vern DC Tavle til batteri	-95 910	74	Utløst	Totalstrøm til/fra alle batteri
Batteri streng 1 [F6]	-11 970	-233	Intakt	
Kondensator (Cd)	-869 500	13	Intakt	Kondensator tømt på 15us

Tabell 5.3: Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.3

Kommentar: Sikring til DC1 ryker etter 2,1s. Anlegget virker selektivt, strøm innenfor godkjent verdi og spennig under grenseverdien. Alle omformere blir lagt ut.

Batterispennning 800V og EOL batterier



Figur 5.4: Kortslutning i DC tavle ved 800V og EOL, modell med sikringer

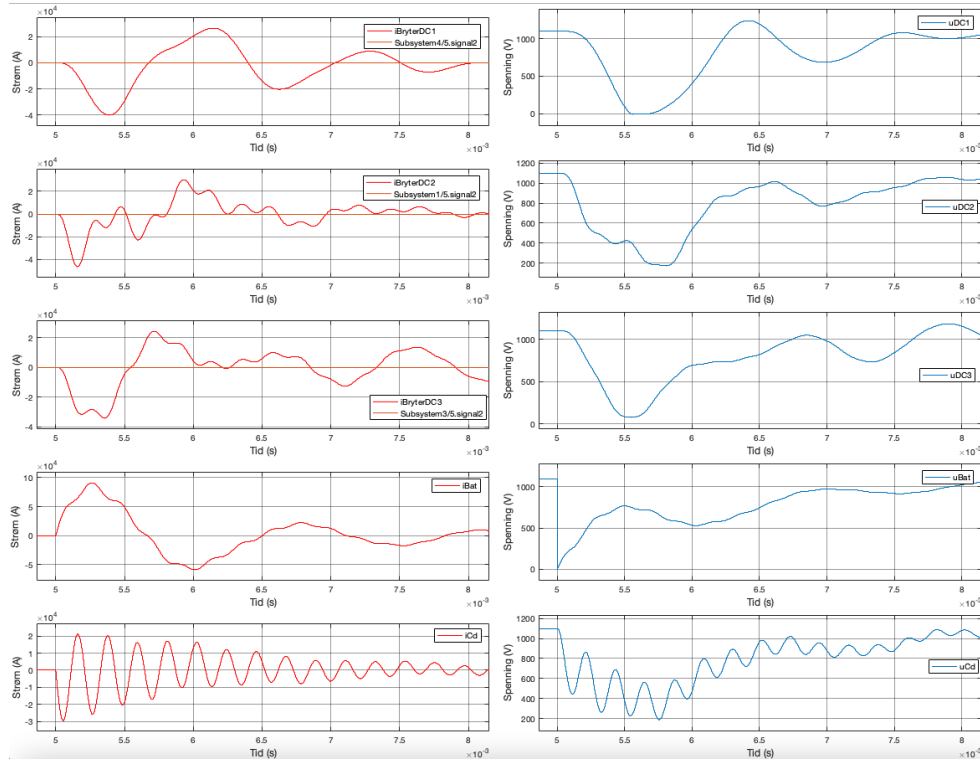
Målepunkt	Utløsetid ( $t_{FBatLy,ab}$ ) [ms]	Lysbuetid $t_l$			Kommentar
	12,853	9,792	Strøm ( $i_{maks}$ ) [A]	Spennning [Min]	
Vern Generator / Landstrøm [F1]	-56 244	-20			Utløst
Vern Akselgen. / Motor [F2]	-58 315	-130			Intakt
Vern Baug thruster [F3]	-47 900	-477			Intakt
Vern DC Tavle til batteri	-55 070	16			Utløst
Batteri streng 1 [F6]	-5 618	96			Intakt
Kondensator (Cd)	-632 500	25			Intakt

Tabell 5.4: Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.4

Kommentar: Strøm innenfor godkjent verdi, anlegget virker selektivt spennning under grenseverdi. Alle omformere blir lagt ut.

### 5.1.3 Kortslutning i Batteri tilkobling [F5]

#### Batterispennning 1100V og BOL batterier



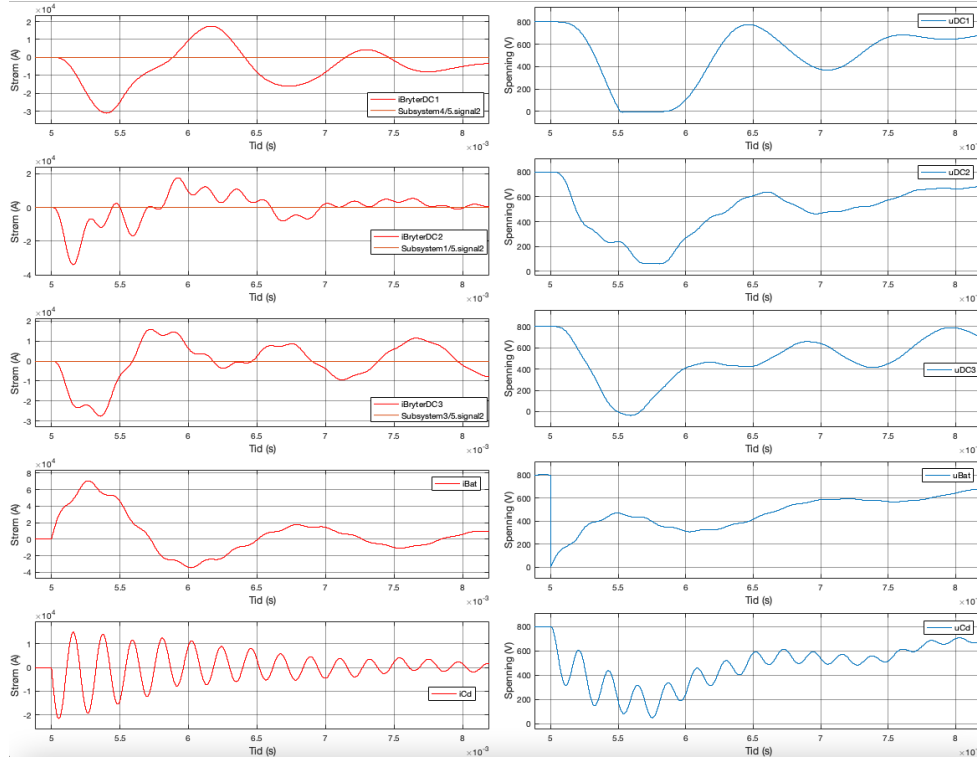
Figur 5.5: Kortslutning i Batteri tilkobling 1100V og BOL, modell med sikringer

Målepunkt	Utløsetid ( $t_{F_{bat,ab1}}$ ) [ms]	Utløsetid ( $t_{F_{bat}}$ ) [ms]	Tilstand vern	Kommentar
	Strøm ( $i_{maks}$ ) [A]	Spenning [Min]		
Vern Generator / Landstrøm [F1]	0.133	13,820	Intakt	
Vern Akselgen. / Motor [F2]	-40 000	0	Intakt	
Vern Akselgen. / Motor [F2]	-46 000	179	Intakt	
Vern Baug thruster [F3]	-34 000	78	Intakt	
Vern DC Tavle til batteri	90 000	24	Utløst	Totalstrøm til/fra alle batteri
Batteri streng 1 [F6]	-13 500	0	Utløst	14ms
Kondensator (Cd)	-29 340	189	Intakt	Kondensator tømt på 15us

Tabell 5.5: Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.5

Kommentar: Sikringene på hver side av feilen er utløst, strømmene er forstatt innenfor godkjente verdier, spenningen faller under grenseverdiene slik at omformerne legger seg ut.

Batterispennning 800V og EOL batterier



Figur 5.6: Kortslutning i Batteri tilkobling ved 800V og EOL, modell med sikringer

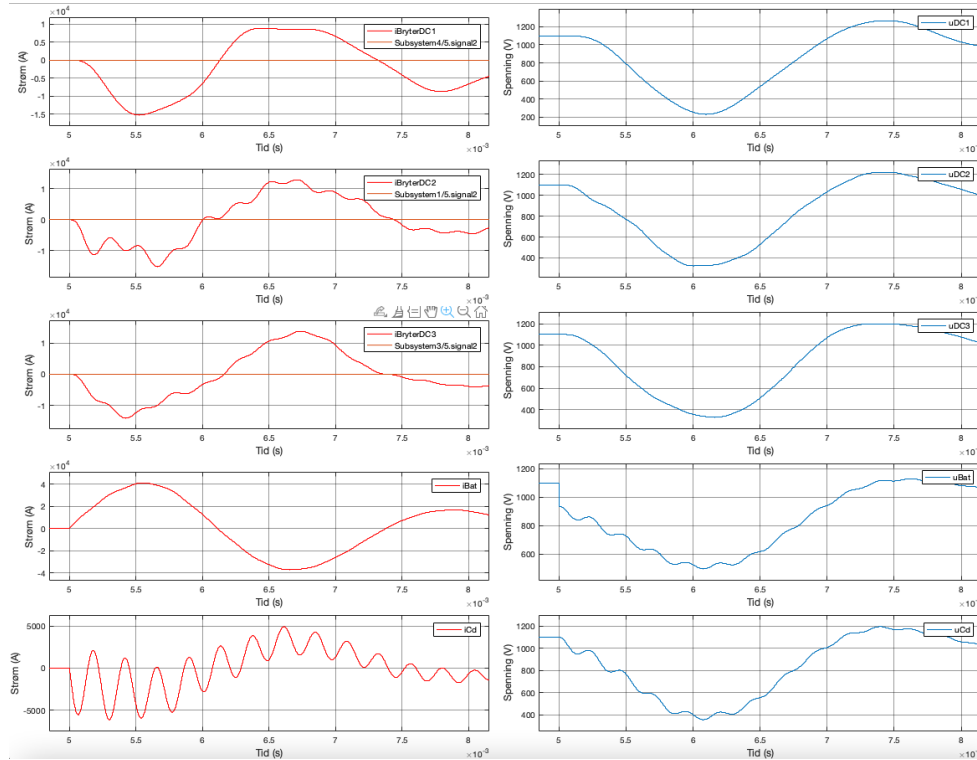
Målepunkt	Utløsetid ( $t_{F_{bat,abel}}$ ) [ms]	Utløsetid ( $t_{F_{bat}}$ )	Tilstand vern	Kommentar
	Strøm ( $i_{maks}$ ) [A]	Spennning [Min]		
Vern Generator / Landstrøm [F1]	0.186	257	intakt	
Vern Akselgen. / Motor [F2]	-31 150	59	Intakt	
Vern Baug thruster [F3]	-27 470	-35	Intakt	
Vern DC Tavle til batteri	70 670	25	Utløst	Totalstrøm til/fra alle batteri
Batteri streng 1 [F6]	60 320	42	Utløst	
Kondensator (Cd)	-21 390	57	Intakt	

Tabell 5.6: Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.6

Kommentar: Sikringene på hver side av feilen er utløst, strømmene er forstatt innenfor godkjente verdier, spenningen fallur under grenseverdiene slik at omformerne legger seg ut.

### 5.1.4 Kortslutning i Batteri streng 1 [F6]

Batterispennning 1100V og BOL batterier



Figur 5.7: Kortslutning i Batteri streng 1 ved 1100V og BOL, modell med sikringer

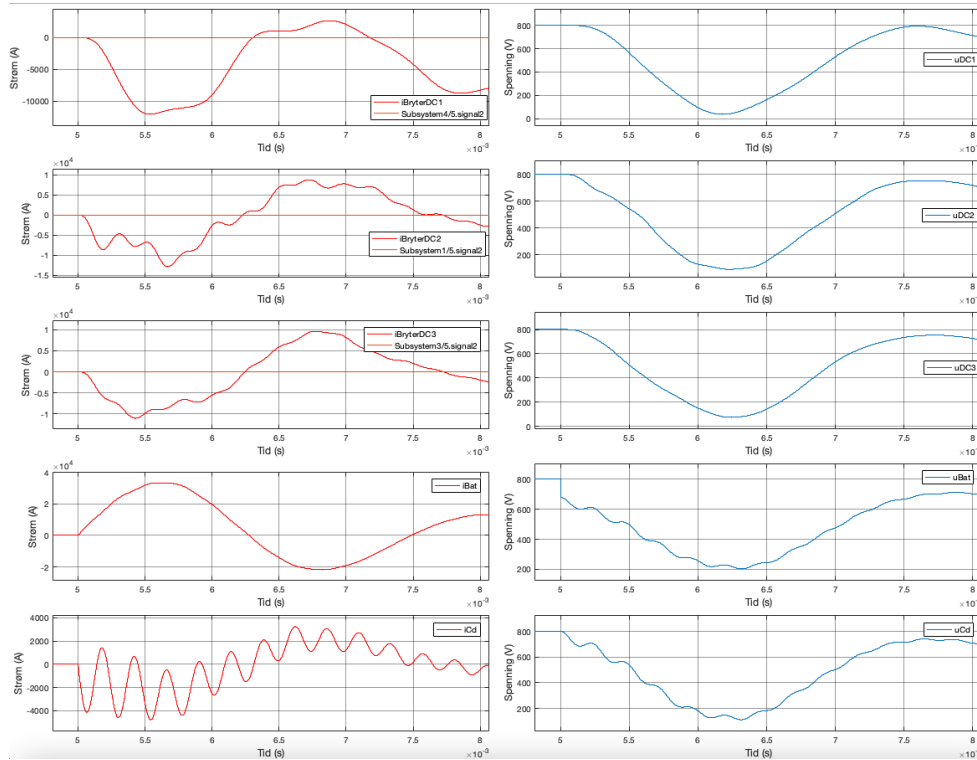
Målepunkt	Utløsetid ( $t_{F_{bat,abel}}$ ) [ms]	Utløsetid ( $t_{F_{bat}}$ ) [ms]			
	0,462	11,802	Spennning [Min]	Tilstand vern	
Vern Generator / Landstrøm [F1]	Strøm ( $i_{maks}$ ) [A]	-15 310	232	Intakt	Kommentar
Vern Akselgen. / Motor [F2]	-15 090	325	Intakt		
Vern Baug thruster [F3]	-14 110	330	Intakt		
Vern DC Tavle til batteri	41 240	497	Utløst	Totalstrøm til/fra alle batteri	
Batteri streng 1 [F6]	14 440	0	Utløst		
Kondensator (Cd)	-61 380	359	Intakt		

Tabell 5.7: Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.7

Kommentar: Samme konklusjon som i feil F5, men litt mer dempet. Strøm innenfor godkjente verdier, sikringer rundt feilen lagt ut og spenning under grenseverdien. Alle omformere lagt ut.



Batterispennning 800V og EOL batterier



Figur 5.8: Kortslutning i Batteri streng 1 ved 800V og EOL, modell med sikringer

Målepunkt	Utløsetid ( $t_{F_{bat,abel}}$ ) [ms]	Utløsetid ( $t_{F_{bat}}$ )	Tilstand vern	Kommentar
	0,623	201,522		
	Strøm ( $i_{maks}$ ) [A]	Spennning [Min]		
Vern Generator / Landstrøm [F1]	-12 030	38	Intakt	
Vern Akselgen. / Motor [F2]	-12 800	92	Intakt	
Vern Baug thruster [F3]	-11 020	73	Intakt	
Vern DC Tavle til batteri	33 480	201	Utløst	Totalstrøm til/fra alle batteri
Batteri streng 1 [F6]	6 266	12	Utløst	
Kondensator (Cd)	-4 757	111	Intakt	

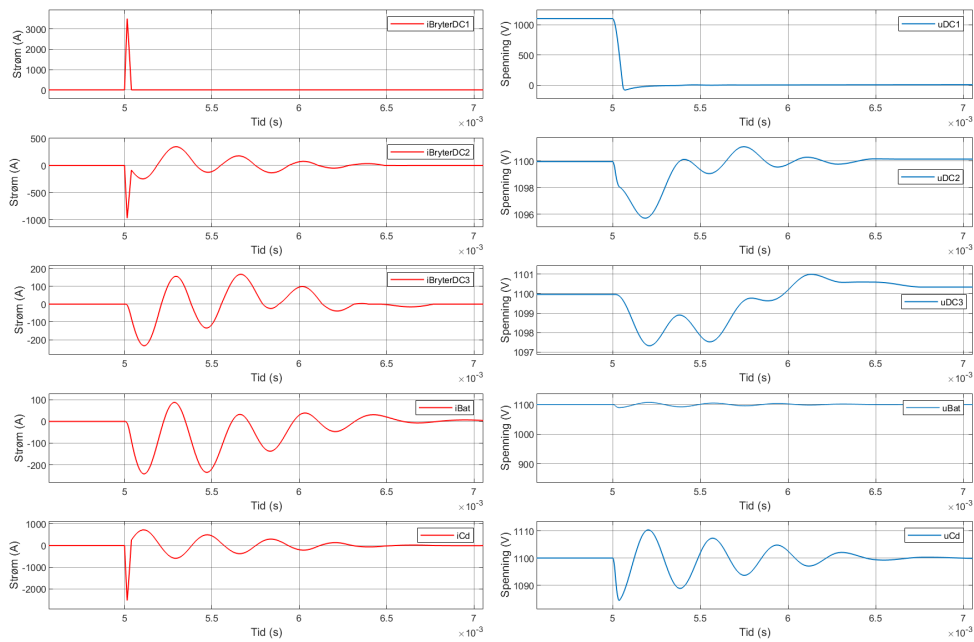
Tabell 5.8: Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.8

Kommentar: Sikringene på hver side av feilen er utløst, strømmene er forstatt innenfor godkjente verdier, spenningen faller under grenseverdiene slik at omformerne legger seg ut.

## 5.2 Halvledervern og sikringer til batteri

### 5.2.1 Kortslutning i omformer Generator / Landstrøm [F1]

Batterispennning 1100V og BOL batterier



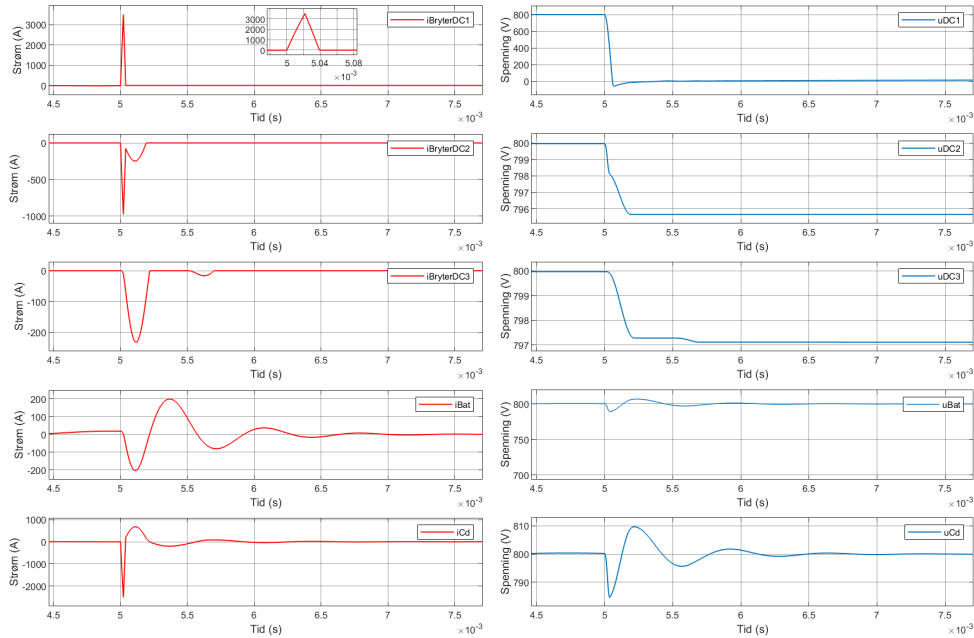
Figur 5.9: Kortslutning i omformer Generator / Landstrøm ved 1100V og BOL

Målepunkt	Utløsetid ( $t_{vern}$ ) [ms]			Tilstand vern	Kommentar
	0.00152	0			
	Strøm ( $i_{maks}$ ) [A]	Spennning [Min]			
Vern Generator / Landstrøm [F1]	3514	-87		Utløst	
Vern Akselgen. / Motor [F2]	-972	1096		Intakt	
Vern Baug thruster [F3]	0	1097		Intakt	
Batteri tilkobling DC tavle	0	1091		-	Totalstrøm til/fra alle batteri
Batteri streng 1	-	-		Intakt	
Vern Batteri (12,34,56,78) DC Tavle	-	-		Intakt	
Kondensator (Cd)	-2527	1084		-	

Tabell 5.9: Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.9

Kommentar: Halvledervernet nærmest kortslutning løser ut. Spenningsvariasjoner på maks 10-15V. Andre deler av DC-tavlen ikke berørt av feil. Spenningen stabil etter ca. 2ms.

Batterispennning 800V og EOL batterier



Figur 5.10: Kortslutning i omformer Generator / Landstrøm ved 800V og EOL

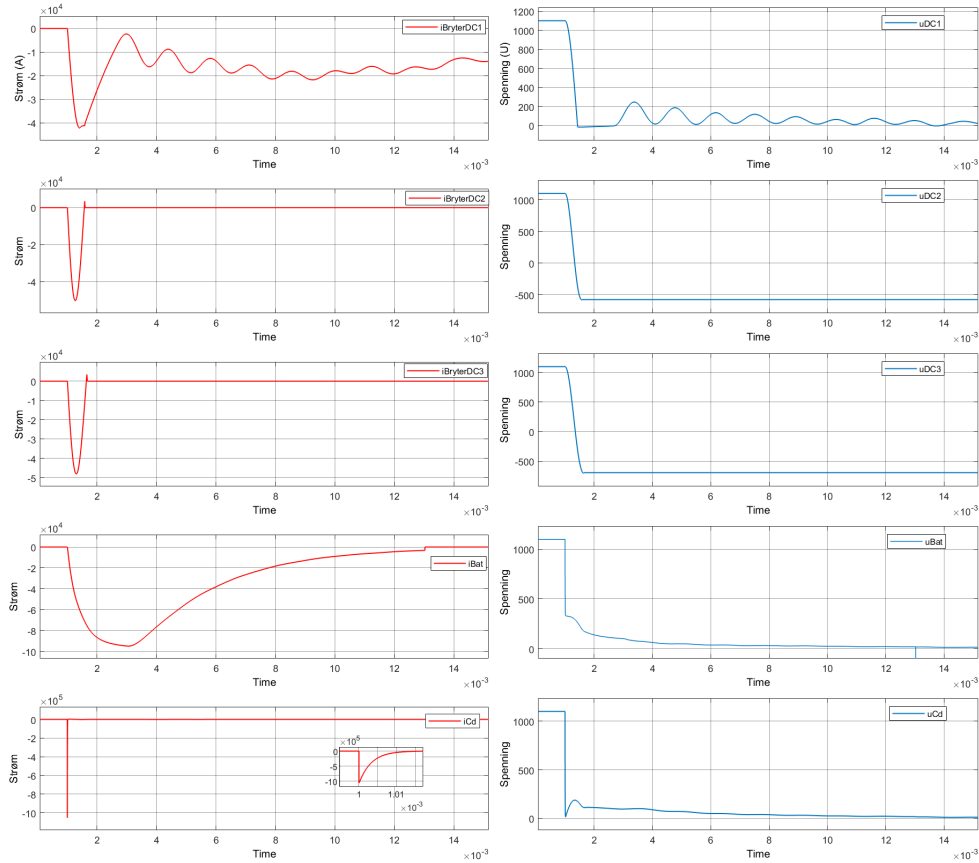
Målepunkt	Utløstid ( $t_{vern}$ ) [ms]			Kommentar
	0.00152	0		
	Strøm ( $i_{maks}$ ) [A]	Spennning [Min]	Tilstand vern	
Vern Generator / Landstrøm [DC1]	3507	-56	Utløst	
Vern Akselgen. / Motor [DC2]	-980	796	Intakt	
Vern Baug thruster [DC2]	0	797	Intakt	
Batteri tilkobling DC tavle	0	789	-	Totalstrøm til/fra alle batteri
Batteri streng 1	-	-	Intakt	
Vern Batteri (12,34,56,78) DC Tavle	-	-	Intakt	
Kondensator (Cd)	-2515	785	-	

Tabell 5.10: Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.10

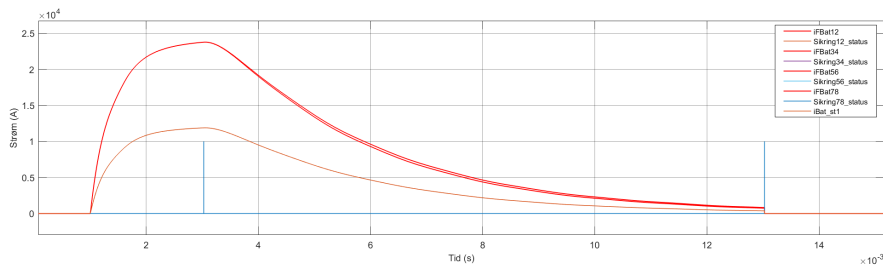
Kommentar: Har likt forløp som for BOL simuleringen. Tar litt kortere tid før spenningen stabiliserer seg. 1 ms.

### 5.2.2 Kortslutning i DC tavle [F4]

#### Batterispenning 1100V og BOL batterier



Figur 5.11: Kortslutning i DC tavle ved 1100V og BOL



Figur 5.12: Strømmåling i sikrings batteri 1 og batteri sikring(12)

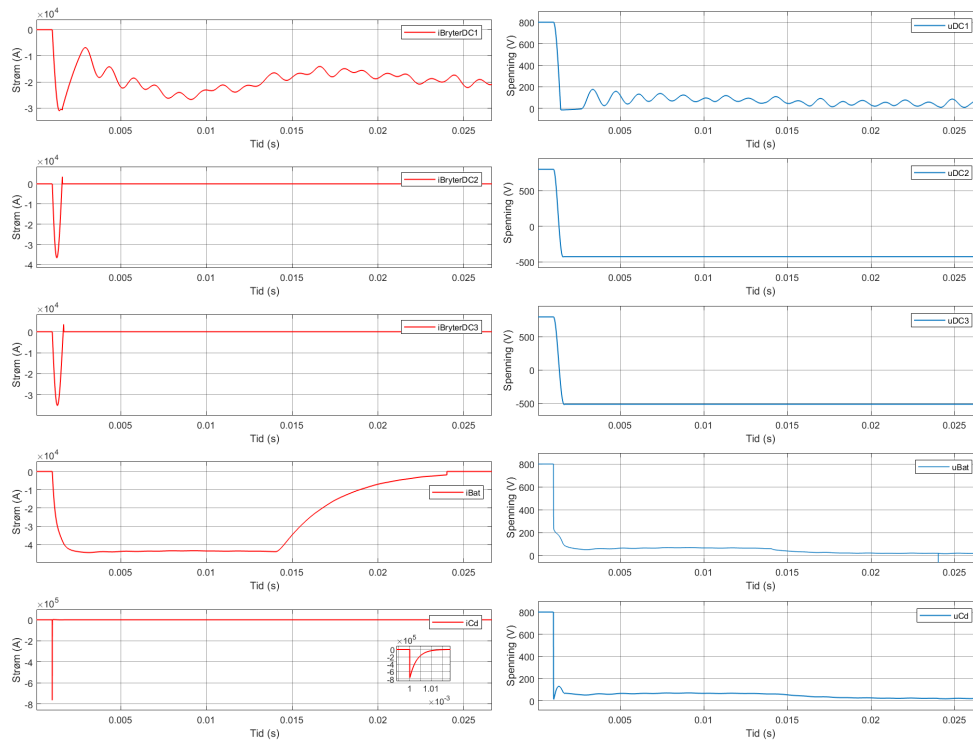
Kommentar: Sikringen fra omformeren til batteri smelter (Sikring12), sikring i batteri streng 1 fortsatt intakt. Kondensatorene i omformerne lades ut via dioden i halvledervernet. Spenningen faller til null. Når kondensatoren i omformeren er

Målepunkt	Utløsetid ( $t_{vern1}$ ) [ms]	Strøm maks ( $i_{maks}$ ) [A]	Spenning [Min]	Tilstand vern	Kommentar
	2.032				
Vern Generator / Landstrøm [DC1]	-41650	0	0	Intakt	
Vern Akselgen. / Motor [DC2]	-50170	-510	-510	Intakt	
Vern Baug thruster [DC3]	-48050	-530	-530	Intakt	
Batteri tilkobling DC tavle	-95040	0	0	-	Totalstrøm til/fra alle batteri
Batteri 1	-11880	-	-	Intakt	
Vern Batteri (12,34,56,78) DC Tavle	-23760	-	-	Utløst	
Kondensator (Cd)	-1053000	0	0	-	Utladetid $5\tau = 16.08 \mu s$

Tabell 5.11: Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.11 og 5.12

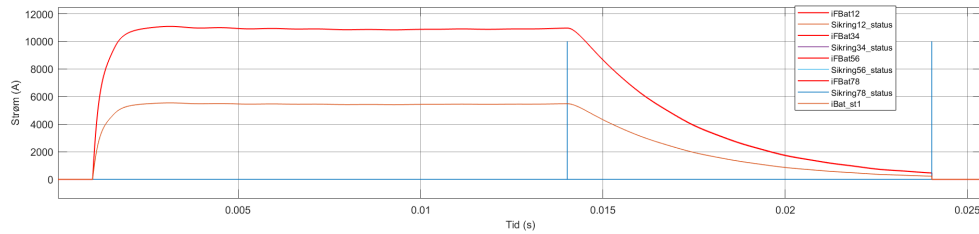
utladet begynner kondensatorene å lades som gjør at halvledervernet legger ut i DC2 og DC3. Strøm kurven for DC1 viser bidraget som kommer fra AC-tavlen.

### Batterispenning 800V og EOL batterier



Figur 5.13: Kortslutning i DC tavle ved 800V og EOL

Kommentar: Har likt forløp som for BOL simuleringen. Sikringen bruker lenger tid på å legge ut.



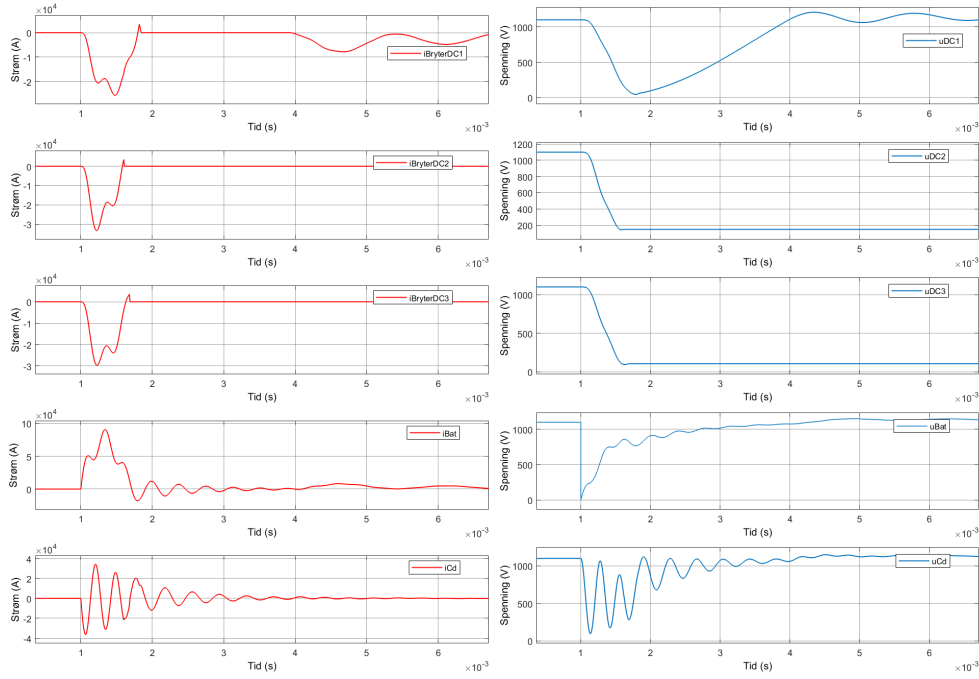
Figur 5.14: Strømmåling i sikrings batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen.

Målepunkt	Utløsetid ( $t_{vern1}$ ) [ms]	Utløsetid ( $t_{vern2}$ ) [ms]	Tilstand vern	Kommentar
	Strøm maks ( $i_{maks}$ ) [A]	Spenning [Min]		
Vern Generator / Landstrøm [DC1]	14.02	0	Intakt	
Vern Akselgen. / Motor [DC2]	-31000	-0	Intakt	
Vern Baug thruster [DC3]	-36660	-427	Intakt	
Batteri tilkobling DC tavle	-34910	-500	Intakt	
Batteri 1	-44310	0	-	Totalstrøm til/fra alle batteri
Vern Batteri (12,34,56,78) DC Tavle	-5540	-	Intakt	
Kondensator (Cd)	-11080	-	Utløst	
	-76560	0	-	Utladetid $5\tau = 16.08 \mu s$

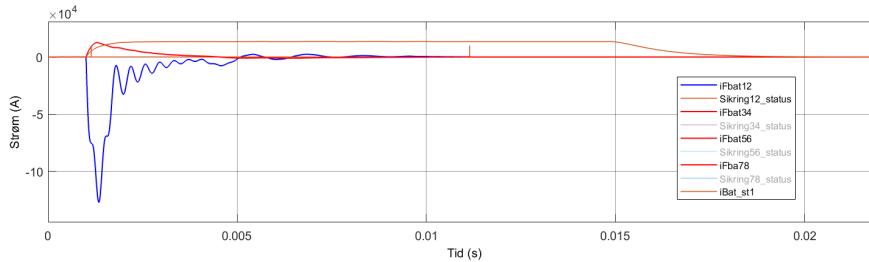
Tabell 5.12: Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.13 og 5.14

### 5.2.3 Kortslutning i Batteri tilkobling [F5]

#### Batterispennning 1100V og BOL batterier



Figur 5.15: Kortslutning i Batteri tilkobling ved 1100V og BOL



Figur 5.16: Strømmåling i sikrings batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen

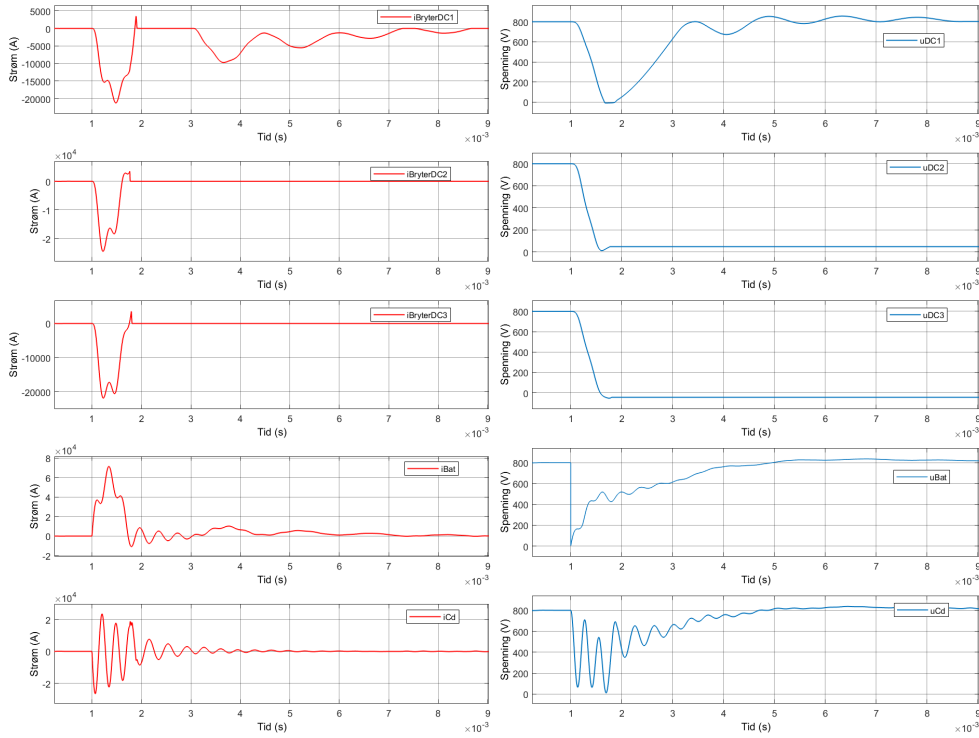
Kommentar: Batteri sikringen i streng 1 og 2 løser ut, samt sikring12 i DC tavle. Sikring12 løser ut umiddelbart, men strømmen øker etter at sikringen har smeltet til 127kA før strømmen avtar til null. Spenningen faller til null på alle målepunkter. Alle omformerne vil stoppe. Halvledervertet i DC1,DC2 og DC3 legger ut når kondensatorene begynner å lade seg opp, men det ville ikke ha skjedd i realiteten på grunn av underspenning stoppen på omformerne.

Målepunkt	Utløsetid ( $t_{vern1}$ ) [ms]	Utløsetid ( $t_{vern2}$ ) [ms]	Tilstand vern	Kommentar
	Strøm maks ( $i_{maks}$ ) [A]	Spenning [Min]		
Vern Generator / Landstrøm [DC1]	0.138	13.942	Intakt	
Vern Akselgen. / Motor [DC2]	-25370	46	Intakt	
Vern Baug thruster [DC3]	-32930	150	Intakt	
Batteri tilkobling DC tavle	-29860	107	Intakt	
Batteri 1	89880	0	-	Totalstrøm til/fra alle batteri
Vern Batteri 12 DC Tavle	-13420	-	Utløst	
Vern Batteri (34,56,78) DC Tavle	126900	-	Utløst	Strøm ved utløst tidpunkt 75kA
Kondensator (Gd)	-	-	Intakt	
	-35510	119	-	s

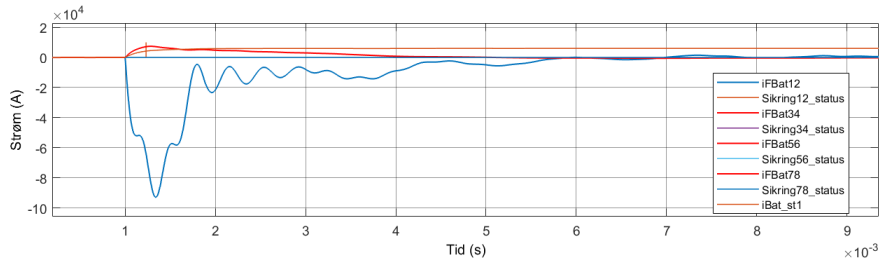
**Tabell 5.13:** Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.15 og 5.16



**Batterispennning 800V og EOL batterier**



**Figur 5.17: Kortslutning i Batteri tilkobling ved 800V og EOL**



**Figur 5.18: Strømmåling i sikrings batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen**

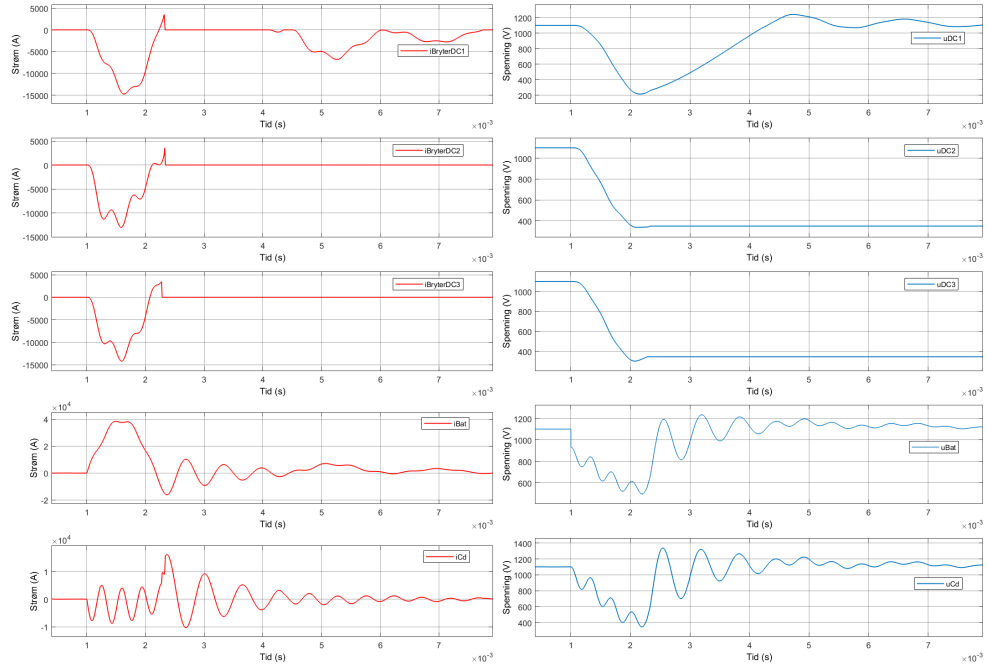
Kommentar: Har likt kortslutningsforløp som simuleringene med BOL batteri. Men noe lavere kortslutningsstrøm og desto lengre utløsetid.

Målepunkt	Utløsetid ( $t_{vern1}$ ) [ms]	Utløsetid ( $t_{vern2}$ ) [ms]	Tilstand vern	Kommentar
	0.232	864.1		
	Strøm maks ( $I_{maks}$ ) [A]	Spenning [Min]		
Vern Generator / Landstrøm [DC1]	-21200	0	Intakt	
Vern Akselgen. / Motor [DC2]	-24450	0	Intakt	
Vern Baug thruster [DC3]	-21880	-10	Intakt	
Batteri tilkobling DC tavle	71330	0	-	Totalstrøm til/fra alle batteri
Batteri 1	-5600	-	Utløst	
Vern Batteri 12 DC Tavle	92850	-	Utløst	Strøm ved utløst tidpunkt 64.5kA
Vern Batteri (34,56,78) DC Tavle	-	-	Intakt	
Kondensator (Cd)	-26420	0	-	s

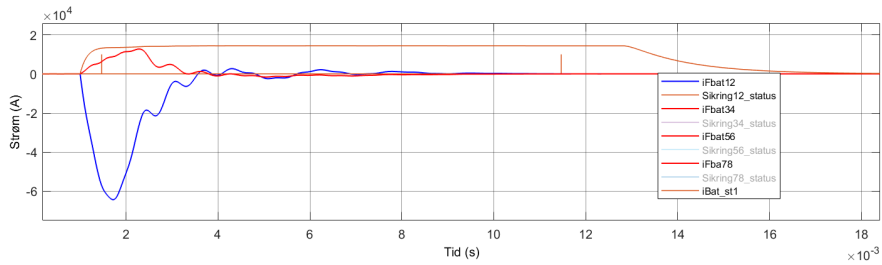
**Tabell 5.14:** Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.17 og 5.18

### 5.2.4 Kortslutning i Batteri streng 1 [F6]

#### Batterispennning 1100V og BOL batterier



Figur 5.19: Kortslutning i Batteri streng 1 ved 1100V og BOL



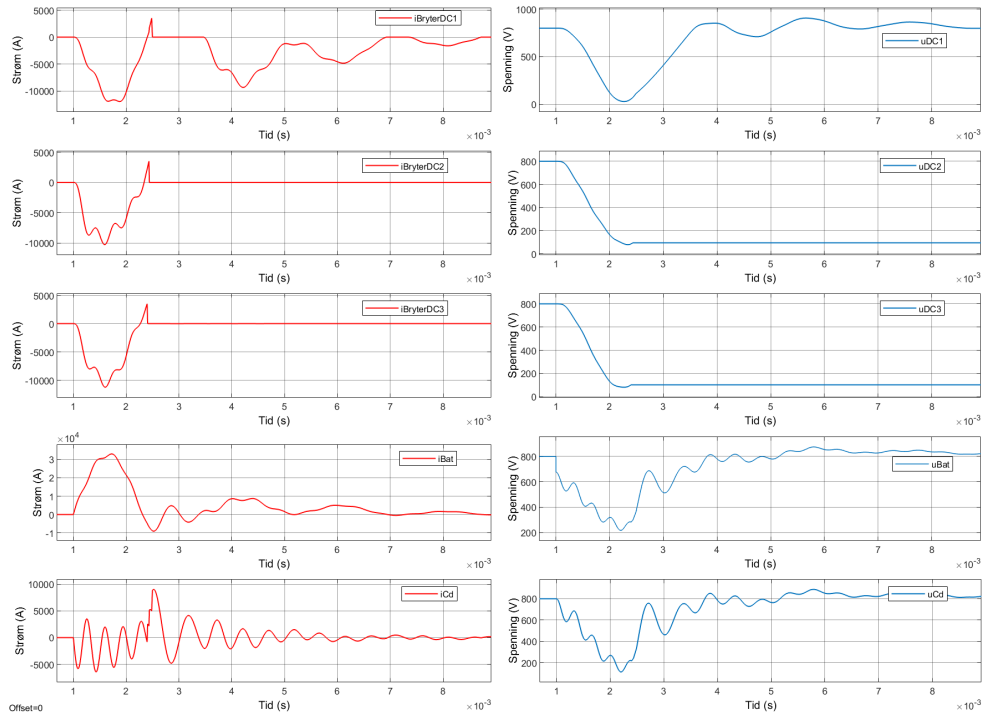
Figur 5.20: Strømmåling i sikrings batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen

Kommentar: Batterisikringen i streng 1 og 2 løser ut, samt sikring12 i DC tavle. Spenningen faller til rundt 200 - 400V.

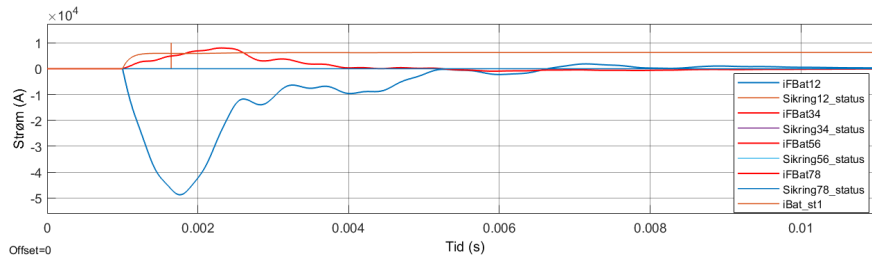
Målepunkt	Utlosetid ( $t_{vern1}$ ) [ms]	textbfUtlosetid ( $t_{vern2}$ ) [ms]	Tilstand vern	Kommentar
	0.466	11.90		
	Strøm maks ( $i_{maks}$ ) [A]	Spenning [Min]		
Vern Generator / Landstrøm [DC1]	-14740	217	Intakt	
Vern Akselgen. / Motor [DC2]	-12990	340	Intakt	
Vern Baug thruster [DC3]	-14160	302	Intakt	
Batteri tilkobling DC tavle	-37630	344	-	Totalstrøm til/fra alle batteri
Batteri 1	-14380	-	Utløst	
Vern Batteri 12 DC Tavle	64300	-	Utløst	Strøm ved utløst tidpunkt 56.6kA
Vern Batteri (34,56,78) DC Tavle	-12720	-	Intakt	
Kondensator (Cd)	-7770	348	-	Strømmen kommer opp i 15kA under oppladning av Cd.

Tabell 5.15: Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.19 og 5.20

**Batterispennning 800V og EOL batterier**



**Figur 5.21:** Kortslutning i DC tavle ved 800V og EOL



**Figur 5.22:** Strømmåling i sikrings batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen

Kommentar: Har likt kortslutningsforløp som simuleringene med BOL batteri. Men noe lavere kortslutningsstrøm og desto lengre utløsetid.

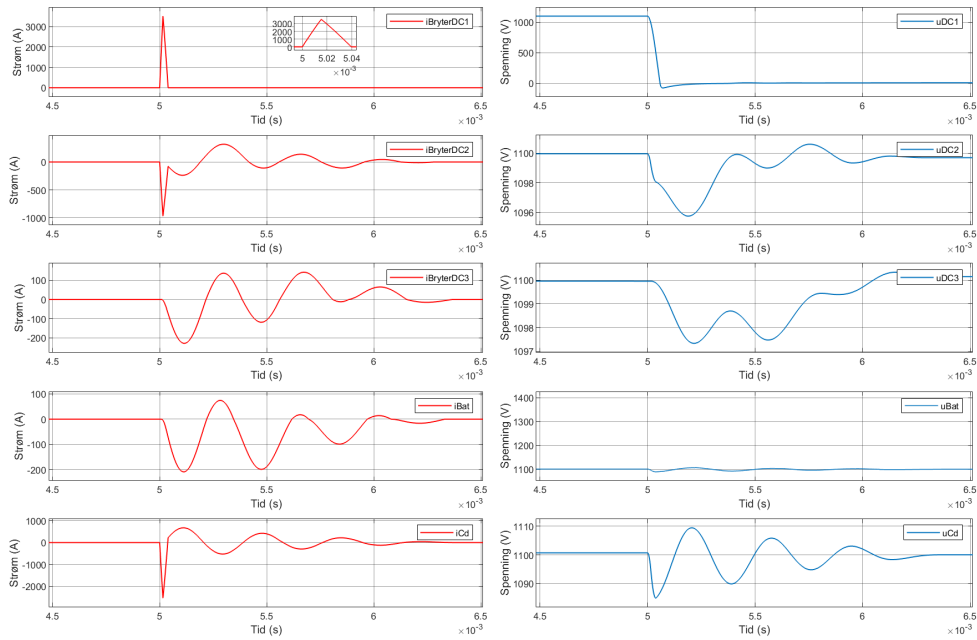
Målepunkt	Utløsetid ( $t_{vern1}$ ) [ms]	Utløsetid ( $t_{vern2}$ ) [ms]		Kommentar
	0.650	864.1		
	Strøm maks ( $i_{maks}$ ) [A]	Spenning [Min]	Tilstand vern	
Vern Generator / Landstrøm [DC1]	-11810	30	Intakt	
Vern Akselgen. / Motor [DC2]	-10280	78	Intakt	
Vern Baug thruster [DC3]	-11230	81	Intakt	
Batteri tilkobling DC tavle	-32980	217	-	Totalstrøm til/fra alle batteri
Batteri 1	-5898	-	Utløst	
Vern Batteri 12 DC Tavle	48750	-	Utløst	Strøm ved utløst tidpunkt 46.7kA
Vern Batteri (34,56,78) DC Tavle	-8012	-	Intakt	
Kondensator (Cd)	-5830	113	-	

**Tabell 5.16:** Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.21 og 5.22

### 5.3 Halvledervern

#### 5.3.1 Kortslutning i omformer Generator / Landstrøm [F1]

Batterispennning 1100V og BOL batterier



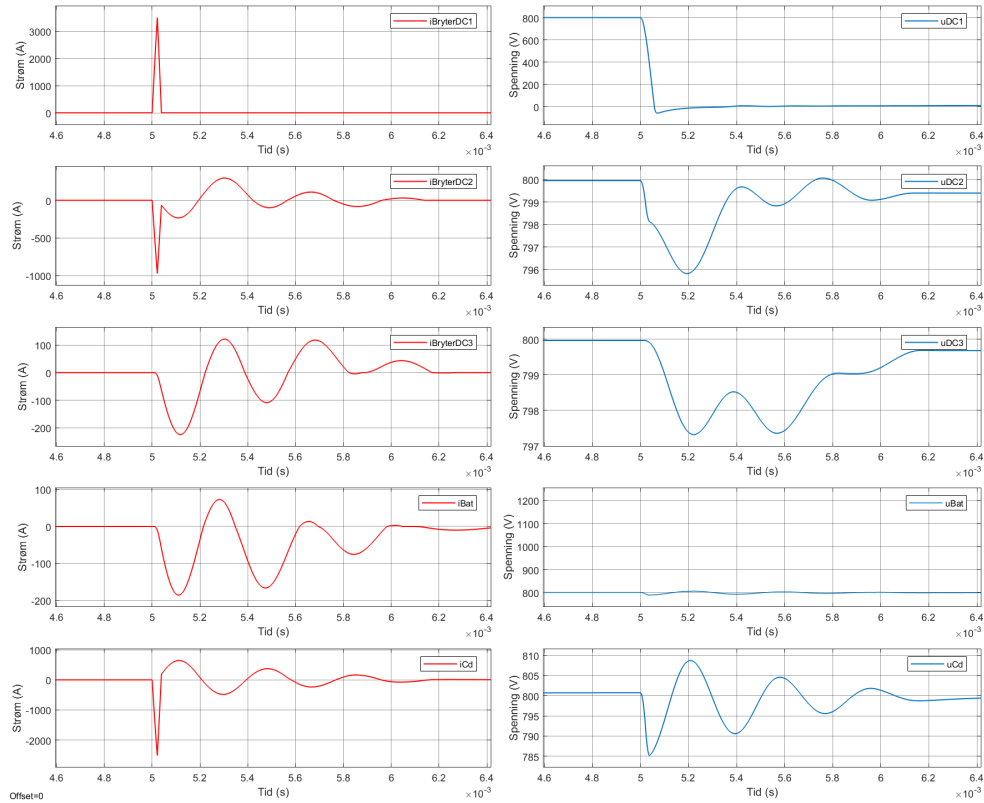
Figur 5.23: Kortslutning i omformer Generator / Landstrøm ved 1100V og BOL

Målepunkt	Utløsetid ( $t_{vern}$ ) [ms]		Tilstand vern	Kommentar
	Strøm ( $i_{maks}$ ) [A]	Spennning [Min]		
Vern Generator / Landstrøm [F1]	3516	-78	Utløst	
Vern Akselgen. / Motor [F2]	-969	1096	Intakt	
Vern Baug thruster [F3]	0	1097	Intakt	
Batteri tilkobling DC tavle	0	1089	-	Totalstrøm til/fra alle batteri
Batteri streng 1	-	-	Intakt	
Vern Batteri (12,34,56,78) DC Tavle	-	-	Intakt	
Kondensator (Cd)	-2538	1084	-	

Tabell 5.17: Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.23

Kommentar: Halvledervernet nærmest feilen løser ut. Maks spenningsfall er 10-15V.

Batterispennning 800V og EOL batterier



Figur 5.24: Kortslutning i omformer Generator / Landstrøm ved 800V og EOL

Målepunkt	Utløsetid ( $t_{vern}$ ) [ms]	0		Kommentar
	Strøm ( $i_{maks}$ ) [A]	Spennning [Min]	Tilstand vern	
Vern Generator / Landstrøm [DC1]	0.00152	3507	-56	Utløst
Vern Akselgen. / Motor [DC2]		-980	796	Intakt
Vern Baug thruster [DC2]		0	797	Intakt
Batteri tilkobling DC tavle		0	789	-
Batteri streng 1		-	-	Intakt
Vern Batteri (12,34,56,78) DC Tavle		-	-	Intakt
Kondensator (Cd)		-2515	785	-

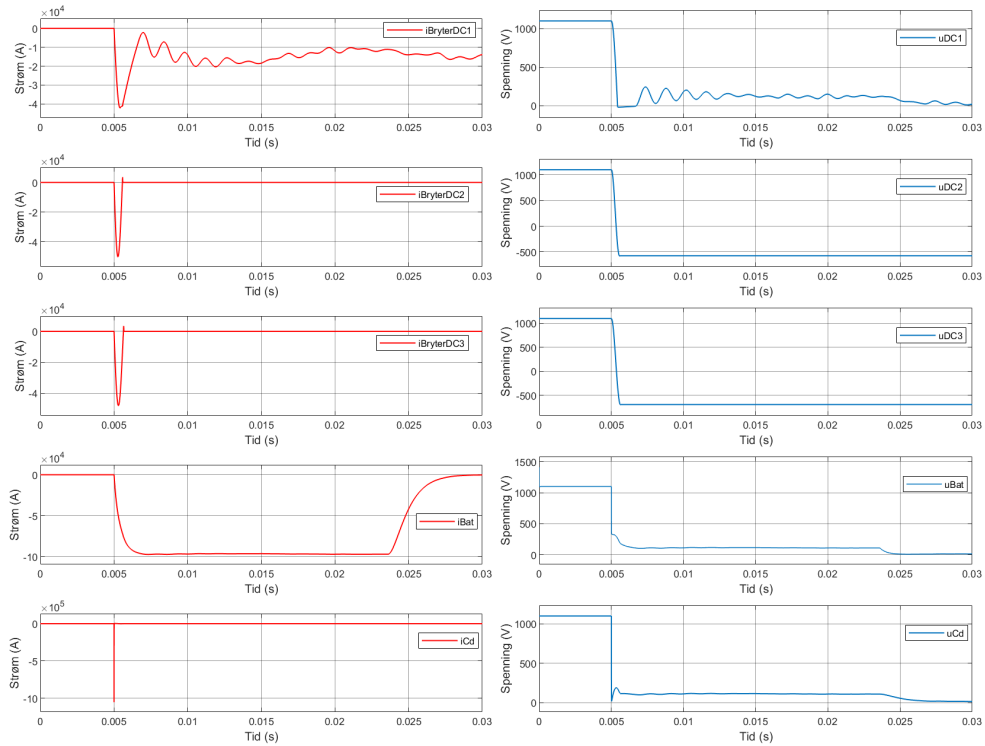
Tabell 5.18: Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.24

Kommentar: Likt kortslutningsforløp som for BOL-simuleringen.

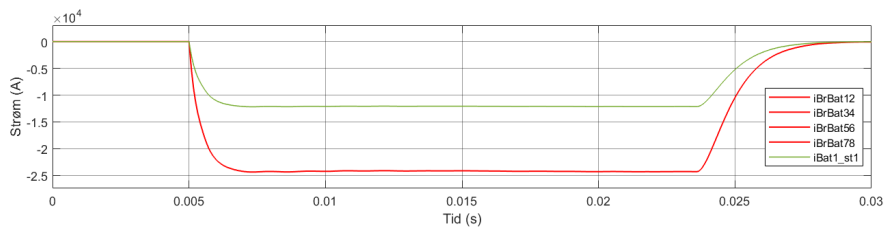


### 5.3.2 Kortslutning i DC tavle [F4]

#### Batterispennning 1100V og BOL batterier



Figur 5.25: Kortslutning i DC tavle ved 1100V og BOL



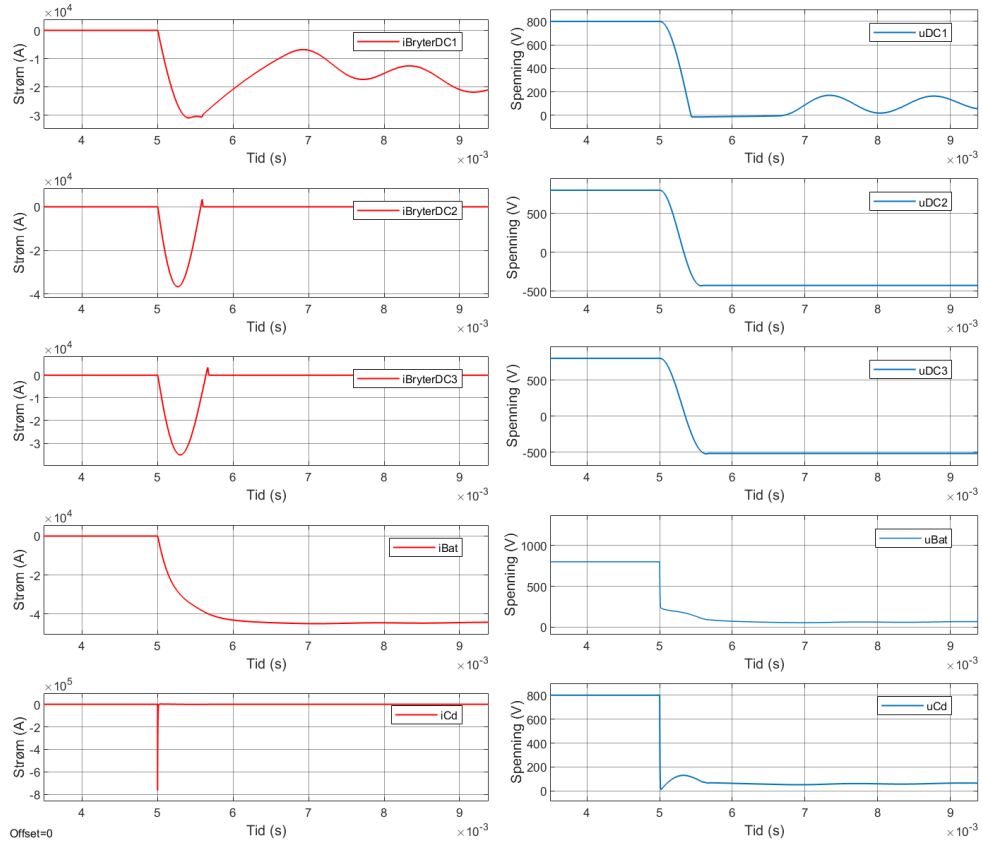
Figur 5.26: Strømmåling i sikring batteri 1 og sikring12 som står i DC-tavlen

Kommentar: Høy kortslutningsstrøm. Omformer-kondensatorene og kondensator Cd lades ut. Batteri streng sikringen løser ut. Spenningen faller til 0V.

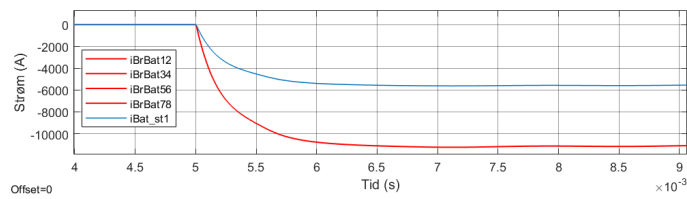
Målepunkt	Utløsetid ( $t_{vern}$ ) [ms]			Kommentar
	Strøm maks ( $i_{maks}$ ) [A]	Spenning [Min]	Tilstand vern	
	18.64	0		
Vern Generator / Landstrøm [DC1]	-42180	0	Intakt	
Vern Akselgen. / Motor [DC2]	-50190	-500	Intakt	
Vern Baug thruster [DC3]	-48050	-500	Intakt	
Batteri tilkobling DC tavle	-97040	0	-	Totalstrøm til/fra alle batteri
Batteri 1	-12112	-	Utløst	
Vern Batteri (12,34,56,78) DC Tavle	-24228	-	Intakt	
Kondensator (Cd)	-1053000	0	-	

**Tabell 5.19:** Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.25 og 5.26

**Batterispennning 800V og EOL batterier**



**Figur 5.27:** Kortslutning i DC tavle ved 800V og EOL



**Figur 5.28:** Strømmåling i sikrings batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen

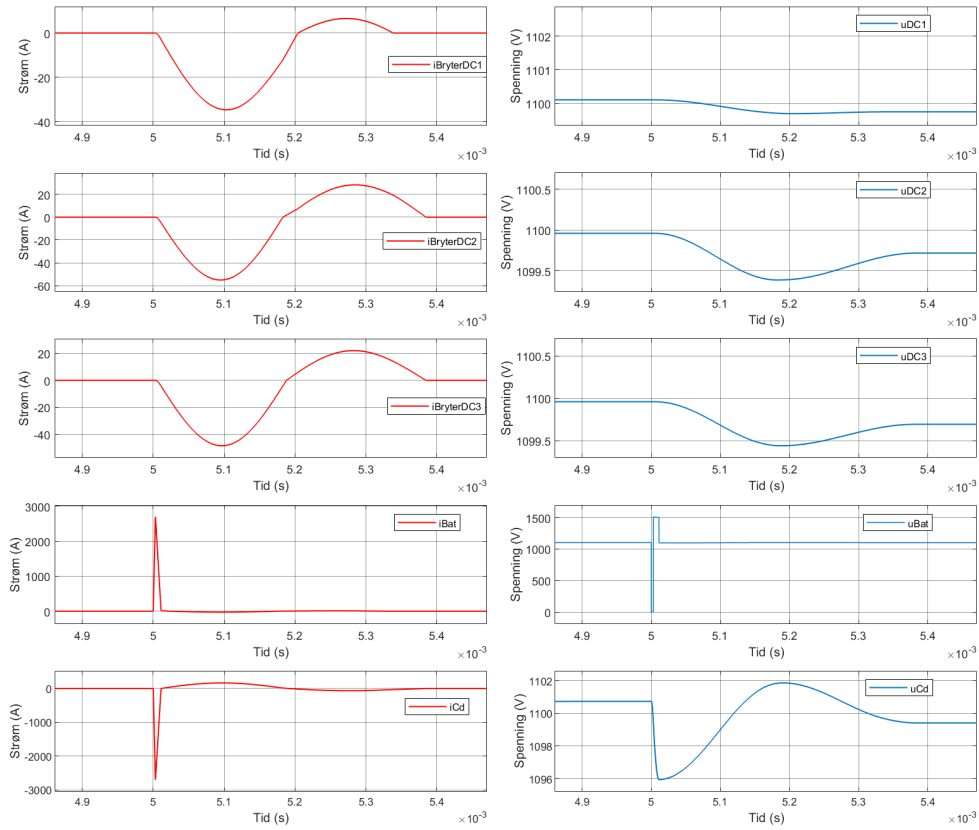
Kommentar: Kortslutningsforløpet er likt som for BOL. Noe lavere kortslutningstrømmer.

Målepunkt	Utløsetid ( $t_{vern}$ ) [ms]			Kommentar
	Strøm maks ( $i_{maks}$ ) [A]	Spenning [Min]	Tilstand vern	
	1280	0		
Vern Generator / Landstrøm [DC1]	-30830	0	Intakt	
Vern Akselgen. / Motor [DC2]	-36650	-500	Intakt	
Vern Baug thruster [DC3]	-35140	-500	Intakt	
Batteri tilkobling DC tavle	-44950	0	-	Totalstrøm til/fra alle batteri
Batteri 1	-5581	-	Utløst	
Vern Batteri (12,34,56,78) DC Tavle	-11160	-	Intakt	
Kondensator (Cd)	-766300	0	-	

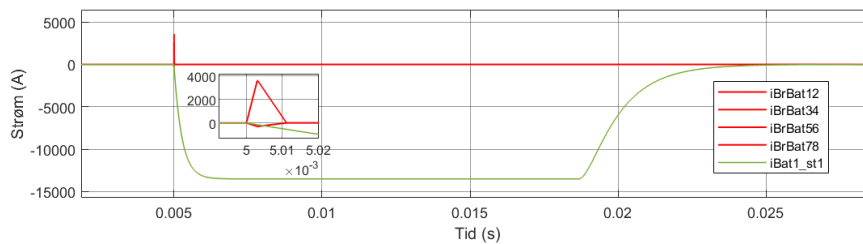
**Tabell 5.20:** Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.27 og 5.28

### 5.3.3 Kortslutning i Batteri tilkobling [F5]

#### Batterispennning 1100V og BOL batterier



Figur 5.29: Kortslutning i Batteri tilkobling 1100V og BOL



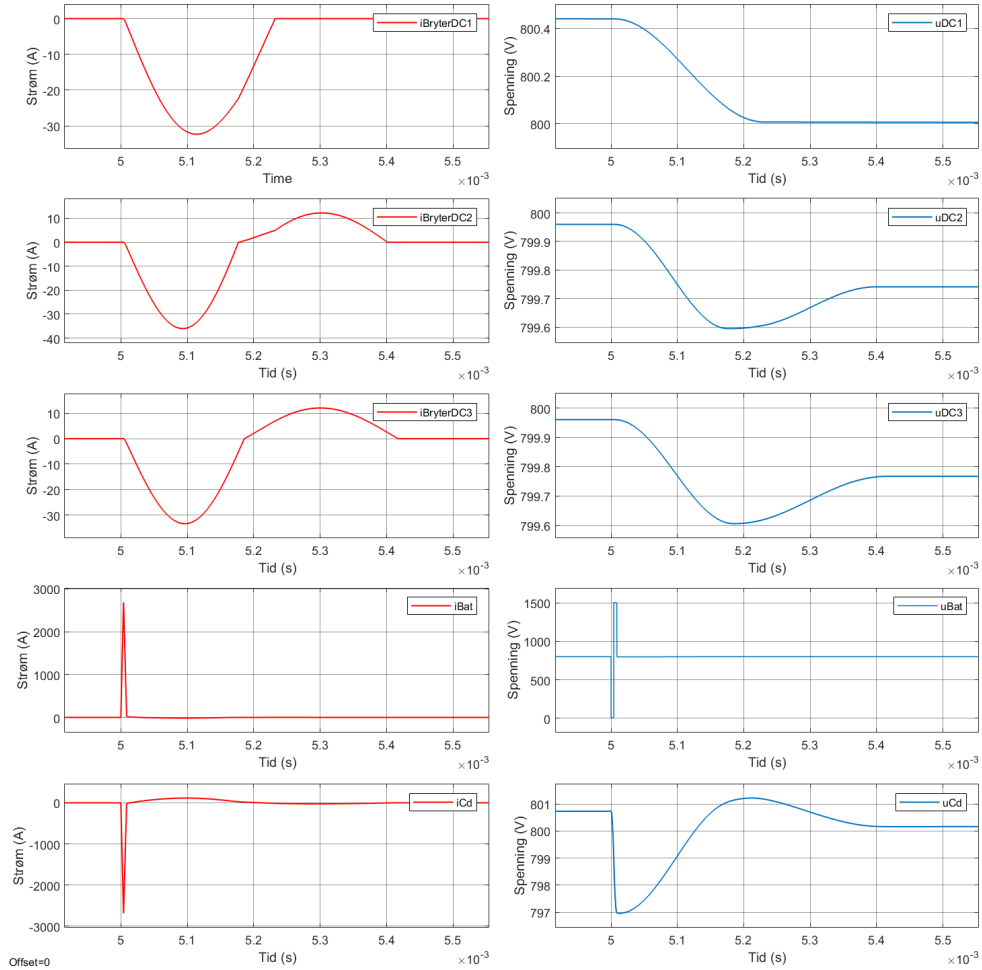
Figur 5.30: Strømmåling i sikrings batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen

Kommentar: Halvledervern i DC-tavlen til batteri streng 1 og 2 kobler ut umiddelbart. Spenningen på omformerne faller maks 1-2V. Batteri streng sikringen løser ut.

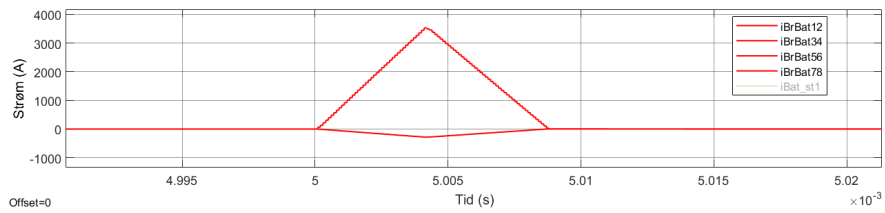
Målepunkt	Utløsetid1 ( $t_{vern1}$ ) [ms]	Utløsetid2 ( $t_{vern2}$ ) [ms]	Tilstand vern	Kommentar
	Strøm maks ( $i_{maks}$ ) [A]	Spenning [Min]		
	0.00152	13.69		
Vern Generator / Landstrøm [DC1]	0	1099.5	Intakt	
Vern Akselgen. / Motor [DC2]	0	1099.5	Intakt	
Vern Baug thruster [DC3]	0	1099.5	Intakt	
Batteri tilkobling DC tavle	-2653	0	-	Totalstrøm til/fra alle batteri.
Batteri 1	-13500	-	Utløst	
Vern Batteri (12,34,56,78) DC Tavle	-3572	-	Utløst	
Kondensator (Cd)	-2653	1096	-	

**Tabell 5.21:** Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.29 og 5.30

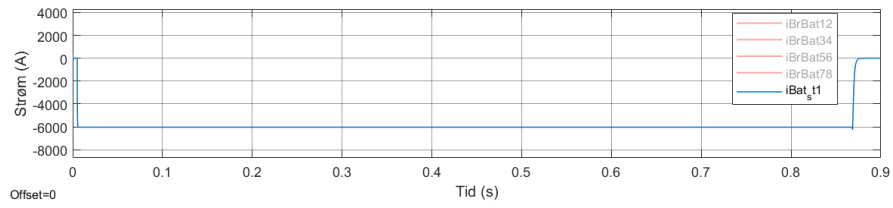
**Batterispennning 800V og EOL batterier**



**Figur 5.31: Kortslutning i Batteri tilkobling ved 800V og EOL**



**Figur 5.32: Strømmåling i sikrings batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen**



**Figur 5.33:** Strømmåling i sikring batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen

Målepunkt	Utløsetid1 ( $t_{vern1}$ ) [ms]	Utløsetid2 ( $t_{vern2}$ ) [ms]	Tilstand vern	Kommentar
	Strøm maks ( $i_{maks}$ ) [A]	Spenning [Min]		
Vern Generator / Landstrøm [DC1]	0	800	Intakt	
Vern Akselgen. / Motor [DC2]	0	799	Intakt	
Vern Baug thruster [DC3]	0	799	Intakt	
Batteri tilkobling DC tavle	-2684	0	-	Totalstrøm til/fra alle batteri.
Batteri 1	-6032	-	Utløst	
Vern Batteri 12 DC Tavle	3532	-	Utløst	
Vern Batteri (34,56,78) DC Tavle	-283	-	Intakt	
Kondensator (Cd)	-2684	797	-	

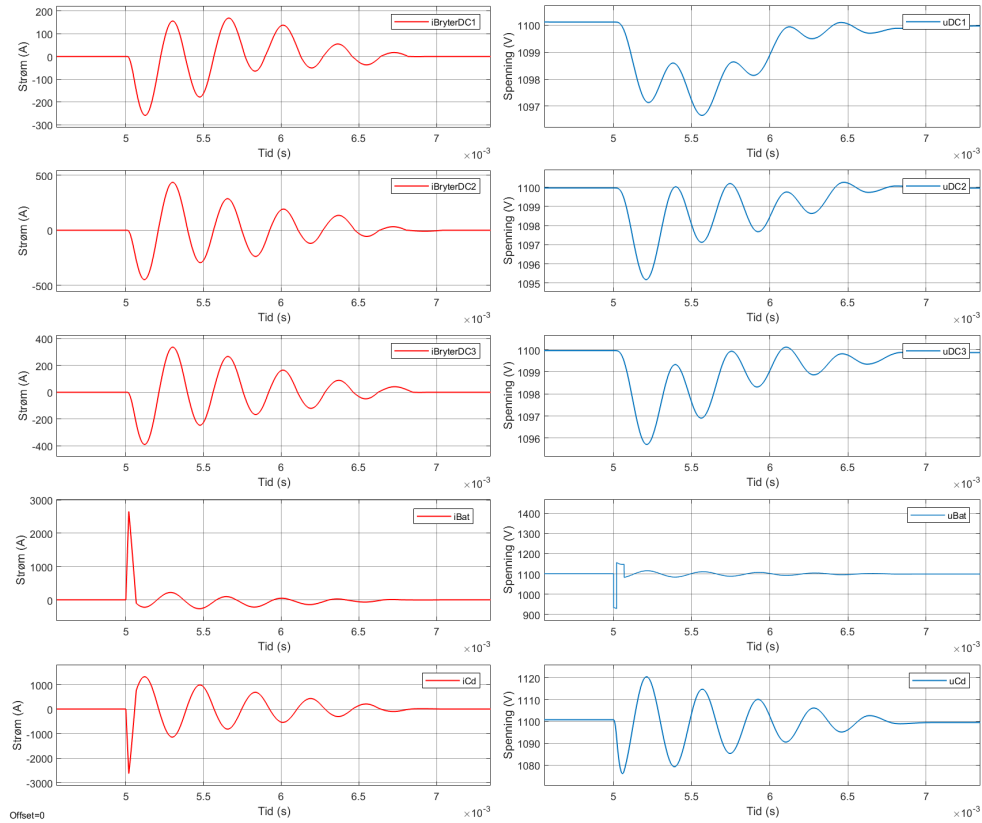
**Tabell 5.22:** Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.31, 5.32 og 5.33

Kommentar: Likt kortlutningsforløp som for BOL.

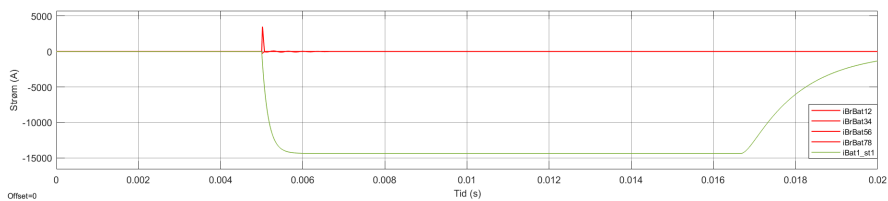


### 5.3.4 Kortslutning i Batteri streng 1 [F6]

#### Batterispennning 1100V og BOL batterier



Figur 5.34: Kortslutning i Batteristreng 1 ved 1100V og BOL



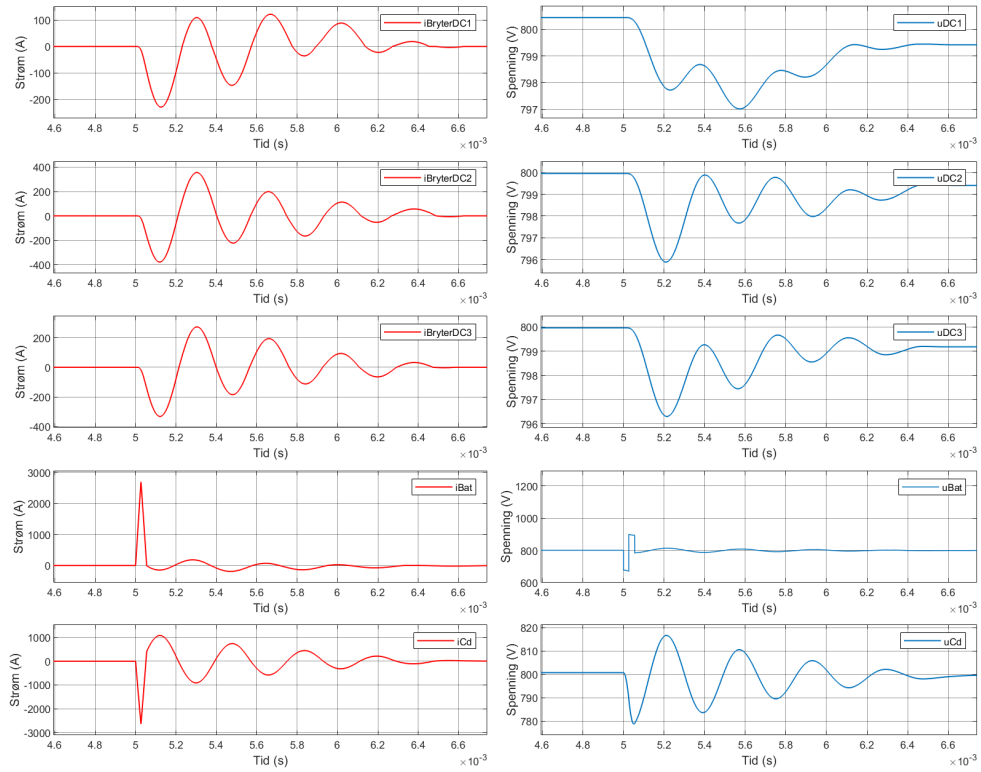
Figur 5.35: Strømmåling i sikring batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen

Kommentar: Halvledervern som er koblet mot batteri 1 og 2 løste ut umiddelbart. Omformerer kondensatorene batteri begynner å lade opp kondensatoren Cd og spenningen uCd svinger en ca +/-20 volt. Strømmen i DC1, DC2, DC3 svinger ved oppladning av kondensator Cd.

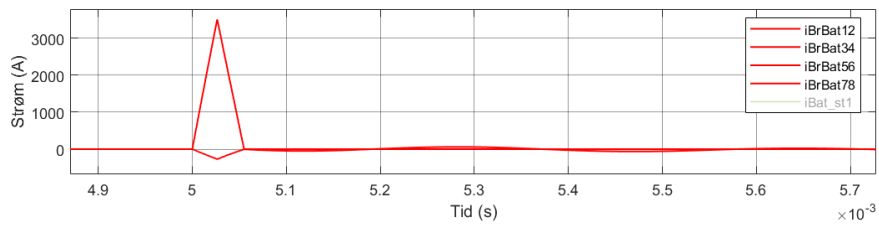
Målepunkt	Utløsetid1 ( $t_{vern1}$ ) [ms]	Utløsetid2 ( $t_{vern2}$ ) [ms]	Tilstand vern	Kommentar
	Strøm maks ( $i_{maks}$ ) [A]	Spenning [Min]		
	0.00191	11.64		
Vern Generator / Landstrøm [DC1]	0	1096.5	Intakt	
Vern Akselgen. / Motor [DC2]	0	1096.5	Intakt	
Vern Baug thruster [DC3]	0	1096	Intakt	
Batteri tilkobling DC tavle	2556	932	-	Totalstrøm til/fra alle batteri.
Batteri 1	-13500	-	Utløst	
Vern Batteri 12 DC Tavle	3572	-	Utløst	
Vern Batteri (34,56,78) DC Tavle	-272	-	Intakt	
Kondensator (Cd)	-2556	1076	-	

**Tabell 5.23:** Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.34 og 5.35

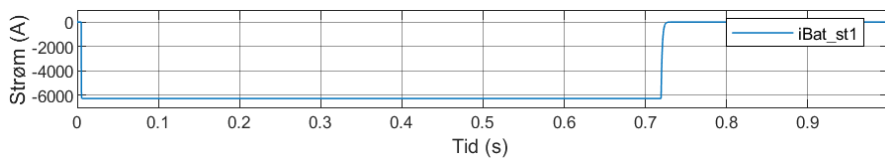
**Batterispennning 800V og EOL batterier**



**Figur 5.36:** Kortslutning i Batteri streng 1 ved 800V og EOL



**Figur 5.37:** Strømmåling i sikrings batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen



**Figur 5.38:** Strømmåling i sikrings batteri 1 og sikring12 som står i DC tavlen

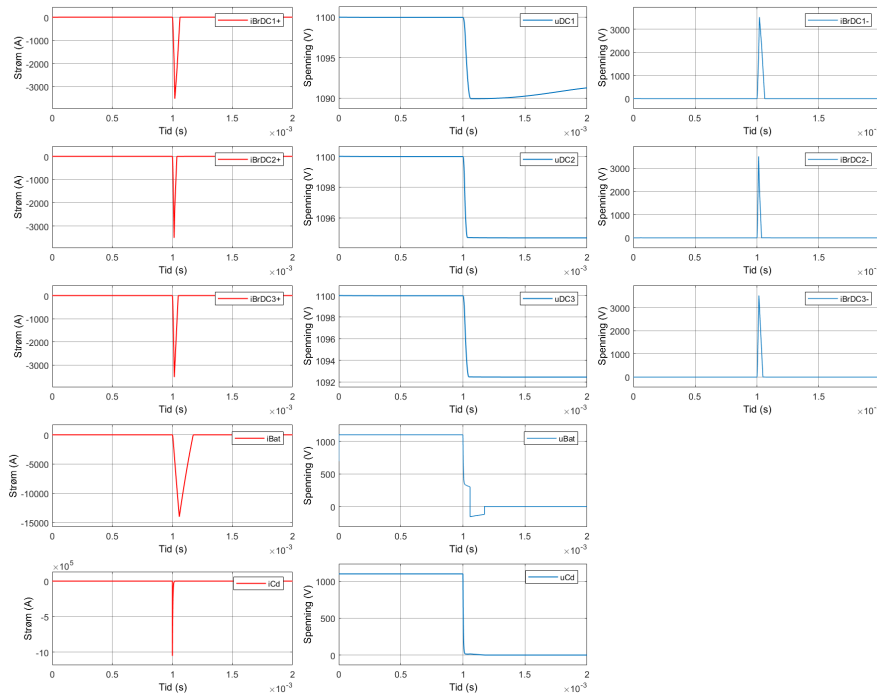
Kommentar: Likt kortslutningsforløp som for BOL.

Målepunkt	Utløsetid1 ( $t_{vern1}$ ) [ms]	Utløsetid2 ( $t_{vern2}$ ) [ms]	Tilstand vern	Kommentar
	Strøm maks ( $i_{maks}$ ) [A]	Spenning [Min]		
Vern Generator / Landstrøm [DC1]	0	797	Intakt	
Vern Akselgen. / Motor [DC2]	0	796	Intakt	
Vern Baug thruster [DC3]	0	796	Intakt	
Batteri tilkobling DC tavle	-2697	676	-	Totalstrøm til/fra alle batteri.
Batteri 1	-6266	-	Utløst	
Vern Batteri 12 DC Tavle	3513	-	Utløst	
Vern Batteri (34,56,78) DC Tavle	-271	-	Intakt	
Kondensator (Cd)	-2667	780	-	

**Tabell 5.24:** Avleste verdier for simuleringen vist i figur 5.36, 5.37 og 5.38

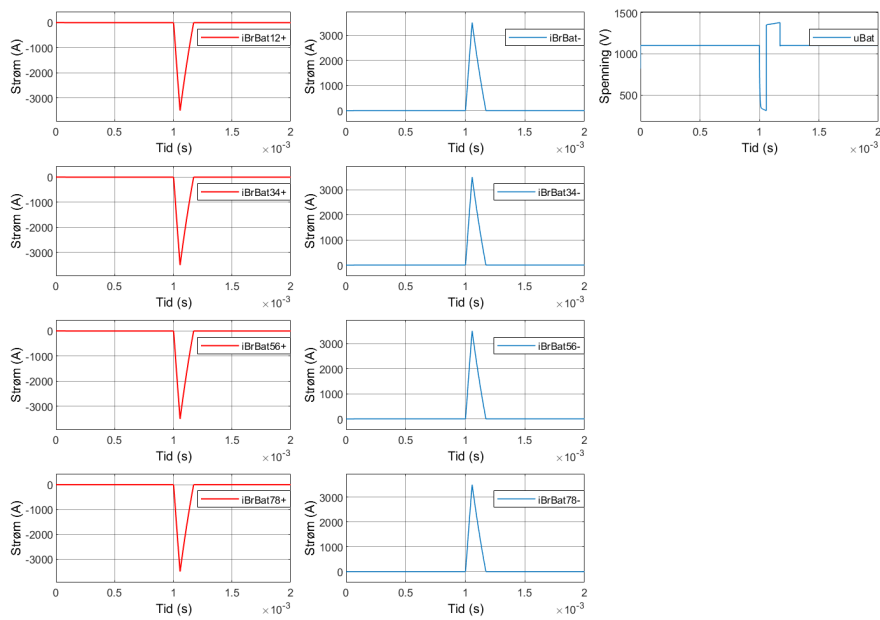
## 5.4 Halvledervern i pluss og minus

### 5.4.1 Kortslutning i DC tavle [F4]



Figur 5.39: Strøm og spenning halvledervern til omformerne

Kommentar: Alle halvledervernene i minuspolen løser ut. Strømmen går gjennom friløpsdioden i øvre vern og gjennom IGBT i nedre halvledervern. IGBTen i nedre vern bryter strømmen. Enn kan ser at spenningen på DC-linkene kune faller 5-10V.



Figur 5.40: Strøm og spenning i halvledervern til batteri

## Kapittel 6

# Diskusjon, konklusjon og videre arbeid

### 6.1 Diskusjon

#### 6.1.1 Simuleringsresultat

Simuleringsresultatene ble presentert i kapittel 5. Det ble definerte seks forskjellige feillokasjoner, hvorav fire av dem ble presentert med tre forskjellige modeller og to batterier. Totalt ble det presentert 24 simuleringer ble presentert. Kortslutningen ble simulert ved en bryter med en motstand på  $1\text{m}\Omega$ .

#### Simulering sikring

Først ble det utført simulering med kun sikringer. Første kortslutning er i omformer til AC hovedtavle og Landstrøm, feillokasjon F1. Strøm i sikringen til omformer kan sees i figur 5.1 for simulering med BOL batterier og figur 5.2 for simulering med EOL batterier. I simuleringen med BOL batterier kan man se strømmen på over 90kA. For simulering med EOL batterier ser man strømmen på 65kA. Disse strømmene er innenfor den elektromekaniske beskyttelsen som tavlen er godkjent for [49]. Videre ser man at sikringen løser ut etter 0,904ms, etter sikringen løser ut ser man bidraget fra den simulerte lysbuen. Anlegget er også selektivt ettersom den eneste sikringen som løser ut er den som er nærmest feilen. Utfordringen med disse strømmene er at spenningen ikke opprettholdes over grensen på 710V, det betyr at selv om anlegget er selektivt opprettholdes ikke drift av omformerne.

De to neste feilene som er simulert er feillokasjon 2 og 3, disse er feil på omformere til fremdriftsmotoren og omformeren til baugthrusteren, disse feilene er lik feilen på omformeren og er derfor ikke tatt med i utdraget i kapittel 5.

Kortslutningen på DC-tavlen er vist i figur 5.3 for BOL og figur 5.4 for EOL. Ved kortslutning på DC-tavlen ser man at alle kondensatorer lader seg ut mot kortslutning og fører til store strømmen, spesielt kondensatoren på hovedtavlen som fører til en strøm på 870kA i det feilen legger inn. Ved kortslutning i DC

tavlen, feillokasjon F4, så løser alle åtte 1000A sikringer fra DC tavlen til batteri ut etter 0.427ms ved BOL og 0.904ms ved EOL. Dette viser at en kortslutning på DC-tavlen er en feilsituasjon som uansett medfører driftsstans på alle deler av DC-anlegget.

For feil F5 og F6 er det mye likt, sikringen til batterikablene løser ut mellom 0,13 til 0,65ms avhengig av om det er BOL eller EOL batterier og om feilen ligger på fordelingssiden eller batterisiden. For feil F5 kan man se at sikringene til BOL batteriene legger ut etter 13ms mens dersom man har EOL batterier legger ikke sikringen ut før etter 257ms. Dersom feilen ligger på batterisiden (F6) kan man se en ekstra demping ettersom det er ekstra induktans i kablene. Denne ekstra induktansen og motstanden som kommer av kablene er med på å begrense kortslutningstrømmene. Selv om anlegget fortsatt ser selektivt ut kan man se at spenningen også her faller under grenseverdien som medfører at omformerne legger seg ut.

Ut fra alle simuleringene som nå er gjennomgått ser man at utfordringene med bruk av sikringer ligger i at spenningen faller under grenseverdien og systemet ikke klarer å beholde den friske delen av anlegget inne. Selv om det i simuleringene ser ut til å være selektivt klarer ikke anlegget å holde driften

### Simulering halvledervern

Resultatene fra simuleringene med halvledervern viser at strømmen bryters momentant ved strømmer over 3500A ved feil på omformer eller batteri/batterikabel. De andre kretsene påvirkes lite av kortslutningen. Spenningen varierer kun noen volt på DC tavlen og det er lave kortslutningsstrømmer. Halvledervernet bryter strømmen etter ca. 2-4 mikrosekunder og klarer kortslutningstrømmen etter ca. 4-6 $\mu$ s. Samme resultat for alle omformerne som er beskyttet med halvledervern, samt også for batteriet når halvledervern er benyttet til å beskytte anlegget mot kortslutning på batteri eller batterikablene. Ved kortslutning på en av batteristrengene eller batterikablene/tilkobling til DC tavle med sikringer som vern og halvledervern til omformerne så er resultatene like som for simuleringene med kun sikringer. Sikringen løster ut, men spenningen faller under tillatt spenningsgrense og alle omformerne stopper. Siden halvledervernet kun er montert i en fase beskytter det kun mot feil som oppstår på komponentene som står etter halvledervernet. Altså ut fra DC tavlen. Resultatet av kortslutning på DC tavlen [F4] viser dette. Strømmen ledes gjennom halvledervern dioden til kortslutningen. Selv om type diode ikke er kjent så er det å anta at dioden ikke vil tåle denne strømmen og at dioden vil brenne/brytesamme. Som vist i resultatene i avsnitt 5.4 så kan dette løses ved å montere et halvledervern i begge fasene.

#### 6.1.2 Feilkilder

I vurderingen av hvor nøyaktig modellen er i stand til å simulere en reell feilsituasjon var det spesielt to hensyn som ble førende:



1. Vi fokuserte på kortslutningsstrømmer og ikke termiske overbelastninger. Det hadde betydning for varigheten av simulasjonene som ble veldig begrenset (i området ms).
2. At vern vi skulle vurdere utelukkende satt i DC-anlegget gjorde at mange svingningene som oppsto i strømmene på grunn av induksjonsmaskinene på AC-siden ble relativt mye tregere enn kortslutningsbidraget fra komponentene i DC-anlegget. Dermed var disse effektene ikke relevante fordi sikringene eller halvledervern allerede hadde løst ut lenge før disse svingningene gjorde seg gjeldende.

### Forenklinger

I prosessen med å utlede den sammensatte ekvivalentkretsen som vist i figur 4.1 ble det gjort flere forenklinger som kan ha påvirket resultatet:

- For smeltesikringene var det kun effekttap ved nominell strøm som var oppgitt. Sikringens resistans under normale forhold ble regnet ut ved hjelp av dette tallet, men på grunn av egenskapene til materialet i sikringselementet vil sannsynligvis resistansen til sikringen øke betydelig i perioden fra en feilstrøm inntreffer til sikringselementet er smeltet. Vår forenklede modell tar ikke hensyn til denne effekten, som vil ha en positiv virkning med tanke på begrensning av gjennomsluppet energi.
- Bidraget fra landstrømmen valgte vi å forenkle til en AC-kilde og en transformator. Denne vurderte vi til å ha liten påvirkning på simulasjonen, samt at landstrømskilden er ukjent og dermed ikke kan spesifiseres nærmere.
- Det er heller ikke tatt med LC-filter og AC-kabler da det ble vurdert til å ha marginal påvirkning inn mot DC-anlegget.

### Simulink modell

- Lysbueprosessen er antatt å følge en ideell inverskurve avhengig av strømmen i smelteøyeblikket, som beskrevet nærmere i avsnitt 4.1.3. Dette er en tilpasning som gir et skjønnsmessig akseptabelt resultat for total bryter-tid ved ulike kortslutningsstrømmer i vår sikringsmodell, men kan være en betydelig feilkilde dersom man skulle sammenligne ulike typer smeltesikringer opp mot hverandre. I vårt tilfelle sammenligner vi primært halvledersikringer med smeltesikringer, og her er det allerede en stor differanse i total brytetid, (i størrelsesorden hundre ganger raskere utløsning). Da blir smeltetiden til sikringen relativt mye viktigere enn lysbuetiden, og derfor anses forenklingen som akseptabel i vårt tilfelle.
- I sikringsmodellen benyttes grafiske tilnærminger for å implementere sikringskarakteristikken inn i modellen. Lineariseringen og ekstrapoleringen her utgjør en feilkilde fordi kortslutningsstrømmene i simulasjonen i enkelte simuleringsscener overskrider den høyeste kortslutningsstrømmen som er definert i karakteristikken. I enkelte deler, spesielt rundt knekkpunktet for

1000A-sikringen kan det være noe usikkerhet i tidsavlesningen pga. segmentvis linearisering. Denne usikkerheten anslås å ligge i størrelsesorden 5 – 20ms basert på testene av modellen.

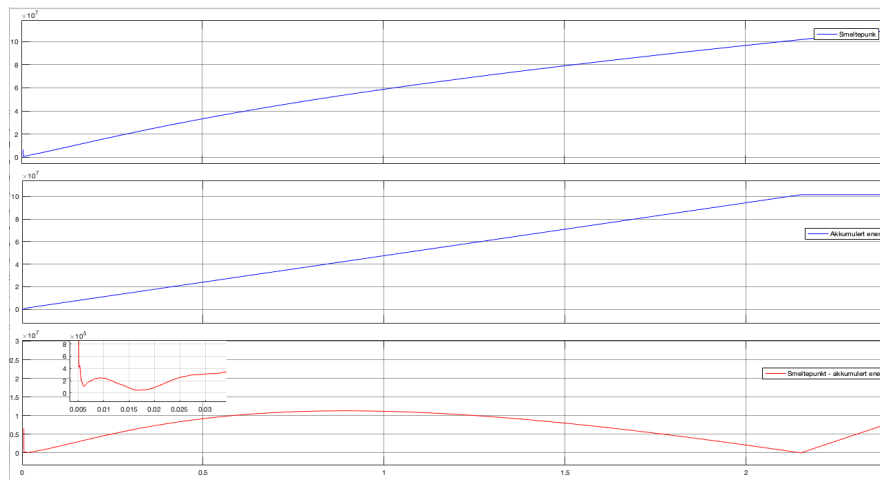
- Metoden med akkumulert energi for å bestemme smeltetid i sikringen tar ikke hensyn til eventuell økt temperatur i sikringselementet grunnet laststrømmer før feilen inntreffer. Det er heller ikke tatt hensyn til at økte omgivelsestemperaturer vil kunne gi en prematur utløsning av sikringen. For de korte simulasjonsperiodene og vårt fokus i oppgaven anser vi at å se bort fra temperaturer er akseptabelt.
- Sikringen har i realiteten et dødbånd der innenfor det området skal sikringen ryke. I modellen er dette ikke tatt hensyn til og kan medføre at kretsen ikke er selektiv.
- Modellen simulerer en ideell krets der motstander og induktanser plasseres som komponenter, i realiteten vil disse være spredd utover kabler og skinner og det vil alltid være en motstand og en induktans mellom komponenter. Dette vil påvirke simuleringen med å dempe noen svingninger og begrense noen strømmer, spesielt de fra kondensatoren (iCD) i feil F4.
- Firekvadrantomformeren ble modellert som en likeretter. På grunn av at hensikten kun var å se på vernegenskaper, og ikke reaksjonen til reguleringsystemet ved en feil ble det antatt at dette var en akseptabel forenkling.
- Nedratifisering av total gjennomsluppet energi for sikringer ved en lavere driftsspenning er ikke hensyntatt i modellen fordi den baserte seg på en konvertering av strøm-tid karakteristikken istedenfor grensene for gjennomsluppet energi i sikringen. Dette kan potensielt være en betydelig feilkilde. (figur 4.8).

### Mulig feil i simuleringen av sikringen

En ting modellen ikke tar hensyn til er temperaturen i sikringen som følge av den gjennomsluppede energien. Figur 6.1 viser øverst den nødvendige energien for at sikringen skal løse ut, i midten vises den energien som har gått igjennom sikringen og nederst vises differansen mellom disse, simuleringen som er gjort er feil F4 med BOL batterier. Her kan man se hvor nært sikringen er ved å ryke i starten av kortslutningen, men når kortslutningstrømmen avtar og når stabil tilstand så skal det mer til før sikringen løser ut. Sammenligner man verdiene i tabell 5.3 og tabell 5.4 ser man at sikringen med BOL batterier, den som vises i figur 6.1, bruker mye lengre tid på å løse ut en EOL batteriene, dette fordi den initielle kortslutningstrømmen med EOL batterier var stor nok til å løse ut sikringen i startfasen.

#### 6.1.3 Økonomi

Dersom løsningen med sikringer er god nok er det vanskelig å kunne argumentere for å benytte et halvledervern som trolig er mye dyrere enn konvensjonelle høyhastighetssikringer. Selv om anlegg med halvledervern gir lavere kortslutningsstrømmen er tavlen dimensjonert for å tåle kortslutningsstrømmene som



Figur 6.1: Akkumulert energi og smeltepunkt for 1000A sikring

kan oppstå ved bruk av høyhastighetssikringer. En kortslutning i omformer som er beskyttet av sikringer vil påføre betydelig skade på omformerne og mulig andre omformere. En fordel med halvledervern er at konsekvensen i form av skade på omformere og DC tavlen ved en feil er mye lavere enn med sikringer. Kostanden ved kortslutning og nedetid er å anta mindre for halvledervern enn for sikringer.

Dersom løsningen med sikringer ikke er god nok og kravet til selektivitet kommer av at generatorene er for små finnes det to løsninger; enten benytte halvledervern som klarer å opprettholde spenningen igjennom en kortslutning, eller bytte til større generatorer avsnitt 2.4. Prismessig er det vanskelig å si hvilken løsning som er billigst ettersom et halvledervern bare skal monteres, mens en større generator kan føre med seg økte kostnader på vedlikehold.

## 6.2 Oppsummering og konklusjon

Gjennom å vurdere sikringer opp mot halvledervern som vern av DC-anlegget i et hybridskip skulle denne oppgaven gi svar på om vernene fungerer tilfredsstillende med hensyn på selektivitet og kortslutningsstrømmer og ta stilling til hvilken løsning som er best.

Systemets oppbygging og virkemåte er beskrevet og relatert til relevant teori. Spesielt vektlagt er kortslutninger i DC-anlegg og funksjonen til de to ulike vern-typene vi tar for oss i oppgaven; smeltesikringer og halvledervern.

I det store og hele er dimensjoneringen av anlegget gitt av oppdragsgiver. Størrelser på komponenter har blitt satt direkte inn i modellen der det har vært mulig, og der parameterene har vært vanskelig å bestemme utifra dokumentasjonen, har komponentstørrelser blitt estimert på andre måter.

En modell av alle deler av anlegget ble laget i Simulink for å simulere strømmer og spenninger i ulike deler av kretsen under et kortslutningsforløp.

Fokuset for simuleringene er varige feil på ulike deler av DC-anlegget simulert over kort tid. Dette har vi gjort for et utvalg av caser med tanke på å avgjøre hva som fungerer og hvor godt det fungerer i ulike situasjoner. Blant annet har vi med forskjellen på kortslutningsbidraget fra batteribanken med BOL batterier, kontra EOL batterier. Det store spørsmålet er hvorvidt vernutløsningen skjer på en måte som gjør at driften kan opprettholdes uavbrutt på andre deler av anlegget enn den feilbefengte delen, om selektiviteten er opprettholdt.

Gjennom denne rapporten er det kommet frem til følgende konklusjon:

- Bruk av hurtige smeltesikringer kan gi et selektivt anlegg, men er avhengig av tolkning av DNV regelverk. Dette kommer blant annet an på om DC tavlen er betraktet som essensiell og om den forsyner essensielle forbrukere. Se avsnitt 2.4.
- Bruk av hurtige smeltesikringer gir høye kortslutningstrømmer, men disse er innenfor merke-kortslutningstrøm for DC tavlen.
- Ved bruk av hurtige smeltesikringer i anlegget klarer ikke omformerne å opprettholde spenningen gjennom et kortslutningsforløp.
- Bruk av halvledervern gi en bedre beskyttelse, raskere utløsning av vern, en lavere kortslutningsstrøm og drift av omformerne vil opprettholdes igjennom kortslutningsforløpet.
- Bruk av halvledervern med kun en IGBT og diode beskytter ikke mot feil på DC tavlen. Diodene vil bryte sammen på grunn av kortslutningstrømmen.
- Bruk av halvledervern til omformere og sikringer til batteriet gir ingen bedre selektivitet en med kun sikringer til hele anlegget. Dette skyldes at spenning vil falle under grenseverdi på 710V ved en feil på batteriet eller batterikablene. Drift av omformerene vil ikke kunne opprettholdes.
- Bruk av halvledervern i både pluss- og minuspol vil gi beskyttelse mot feil på omformerne, batteri og i DC-tavlen. Altså i begge retninger.

### 6.3 Videre arbeid

Gjennom arbeid med simuleringen og rapporten er det oppdaget flere punkter som bør undersøkes videre for en eventuelt forbedring av modellen:

- Simuleringene må verifiseres gjennom lab og kortslutningstester for å kunne gi en endelig konklusjon.
- Optimalisere og forbedre simuleringsmodell med hensyn på tid og feilkilder.
- Videreutvikle modelleringen av lysbueprosessen i en smeltesikring og muligens sammenligne simuleringer med reelle kortslutningstester av sikringer.
- Undersøke hvordan nedratifisering av gjennomsluppet energi i smeltesikringer påvirker resultatet.
- Undersøke om caser der strømmen er nær grensen til sikringsbrudd vil løst ut dersom modellen tok hensyn til temperatur
- Jobbe med standardisering for kortslutningsberegninger i DC-anlegg på skip.

- Jobbe videre med å finne en kost-effektiv løsning, men sikker beskyttelse av DC-anlegg og omformere i det marine markedet.
- Undersøke mulighetene for å opprettholde spenningen på DC-tavle gjennom å sette inn en induktans [24].

# Bibliografi

- [1] «Shipping industry is pressured to cut pollution caused by merchant fleet,» des. 2021. adresse: <https://www.npr.org/2021/12/01/1060382176/shipping-industry-is-pressured-to-cut-pollution-caused-by-merchant-fleet?t=1652376864283>.
- [2] Wärtsilä. «Om Wärtsilä i Norge.» (2022), adresse: <https://www.wartsila.com/nor/om-oss> (sjekket 30.03.2022).
- [3] «Energy Efficiency Measures.» (2019), adresse: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx>.
- [4] «STUDY ON ELECTRICAL ENERGY STORAGE FOR SHIPS,» mai 2020. adresse: <http://www.emsa.europa.eu/newsroom/latest-news/item/3895-study-on-electrical-energy-storage-for-ships.html>.
- [5] Wärtsilä. «Wärtsilä hybrid propulsion solution for three newbuild eco-friendly bulk carriers.» (2020), adresse: <https://www.wartsila.com/marine/customer-segments/references/merchant/misje-eco-bulk> (sjekket 30.03.2022).
- [6] F. Rabbevåg. «Bulkskip.» (2020), adresse: <https://snl.no/bulkskip> (sjekket 08.05.2022).
- [7] Lovdata. «Lov om skipssikkerhet (skipssikkerhetsloven).» ().
- [8] Wärtsilä, «Electrical Load Analysis, ikke publisert,» nov. 2020.
- [9] R. Nilsen, «Electric drives compendium TET4120,» 2018.
- [10] W. P. R. Ned Mohan Tore M. Undeland, *Power Electronics*, 3. utg. New Jersey, United States: John Wiley & Sons, Inc., 2018.
- [11] Wärtsilä, *General, Functional requirement and operational philosophy*, Wärtsilä, 2021.
- [12] C. Houle, *Integrator Manual - Orca Energy Storage Systems 1007768 RevN, ikke publisert*, Rev.N, Corvus Energy.
- [13] Wärtsilä, «Lithium ion nmc ocv-soc, ikke publisert,» 2018.
- [14] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, International Edition. Mc Graw Hill Education, 2012, ISBN: 9780071086172.

- [15] «RULES FOR CLASSIFICATION Ships, Part 4 Systems and components Chapter 8 Electrical installations Edition July 2021,» jul. 2021. adresse: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/RU-SHIP/2021-07/DNV-RU-SHIP-Pt6Ch2.pdf>.
- [16] «RULES FOR CLASSIFICATION Ships, Part 4 Systems and components Chapter 8 Electrical installations Edition July 2021,» jul. 2021. adresse: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/RU-SHIP/2021-07/DNV-RU-SHIP-Pt4Ch8.pdf>.
- [17] Alstom, *Network protection and automation guide*, Mai 2011. Alstom Grid, 2011.
- [18] H. Lia, *Elektrisitetstare*, 2. utg. NTNU, 2009.
- [19] R. L. Boylestad, *Introductory Circuit Analysis*, 10. utg. New Jersey, United States: Pearson Education Limited, 2017, ISBN: 0-13-048433-4.
- [20] J. Machowski, Z. Lubosny, J. W. Bialek og J. R. Bumby, *Power System Dynamics: Stability and Control 3rd Edition*, 3. utg. Wiley, 2020, ISBN: 978-1-119-52636-0.
- [21] T. T. / J. I. Marvik, «Induction machine - transient model,» 2008.
- [22] Wärtsilä, *Transformer, Data sheet, CD0250-100091271-E-DS-868-0100*, ikke publisert, Wärtsilä, 2021.
- [23] D. Tomislav, W. Pat og B. Frede, *DC Distribution Systems and Microgrids*. Ser. IET Energy Engineering Vol. 115. The Institution of Engineering og Technology, 2018, ISBN: 9781785613821. adresse: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=2000712&site=ehost-live>.
- [24] S. Kim, S.-N. Kim og D. Dujic, «Extending Protection Selectivity in DC Shipboard Power Systems by Means of Additional Bus Capacitance,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, årg. 67, nr. 5, s. 3673–3683, 2020. DOI: 10.1109/TIE.2019.2916371.
- [25] M. R. Kaveh Niayesh, *Power Switching Components, Theory, Applications and Future Trends*. Springer Nature, 2017, ISBN: 978-3-319-51459-8.
- [26] F. Liu, W. Liu, X. Zha, H. Yang og K. Feng, «Solid-State Circuit Breaker Snubber Design for Transient Overvoltage Suppression at Bus Fault Interruption in Low-Voltage DC Microgrid,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, årg. 32, nr. 4, s. 3007–3021, 2017. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2574751.
- [27] B. Li og J. He, *Protection Principle and Technology of the VSC-Based DC Grid*. Springer, 2020.
- [28] J. Schlabbach, *Short-circuit Currents*, 1. utg. London, United Kingdom: The Institution of Electrical Engineers, 2005.
- [29] Eaton, «Bussmann Application Guide 10507,» 2016.

- [30] A. Wright og C. Christopoulos, *Electrical Power System Protection*, 1. utg. New Jersey, United States: SPRINGER-SCIENCE+BUSINESS MEDIA, B.V., 1993.
- [31] H. K. Høidalen, «TET4215 Overcurrent Protection Lecture Slide,» 2021.
- [32] Eaton, «BUSSMANN SERIES FULL LINE CATALOG,» 2015.
- [33] Wärtsilä, «Misje - Omformer og system parameter, Konfidensiell,» 2021.
- [34] Yaskawa. «Electronic DC Breaker (EDCB).» (2022), adresse: [https://www.yaskawa.eu.com/products/environmental-energy/productdetail/product/electronic-dc-breaker-edcb\\_10305](https://www.yaskawa.eu.com/products/environmental-energy/productdetail/product/electronic-dc-breaker-edcb_10305) (sjekket 08.05.2022).
- [35] ABB. «Ultra-fast high current DC breaker innovates marine applications and beyond.» (2019), adresse: <https://new.abb.com/news/detail/26578/ultra-fast-high-current-dc-breaker-innovates-marine-applications-and-beyond> (sjekket 08.05.2022).
- [36] Infineon, «The five key questions to design a drives inverter,»
- [37] L. Qi, P. Cairoli, Z. Pan, C. Tschida, Z. Wang, V. R. Ramanan, L. Raciti og A. Antoniazzi, «Solid-State Circuit Breaker Protection for DC Shipboard Power Systems: Breaker Design, Protection Scheme, Validation Testing,» *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, årg. 56, nr. 2, s. 952–960, 2020.
- [38] T. Rogne, «Electronic dc circuit breaker,» US20110025400A1, nov. 2011. adresse: <https://patents.google.com/patent/US20110025400A1/>.
- [39] Yaskawa, «Hybrid System Hybrid Drive, Functional Description - Ikke publisert,» 2021.
- [40] Yaskawa, «Misje - DC Hub Short-circuit simulations- Ikke publisert,» tekn. rapp., 2021.
- [41] MathWorks. «Specialized Power Systems.» (2021), adresse: [https://se.mathworks.com/help/releases/R2021b/physmod/sps/specialized-power-systems.html?s\\_tid=doc\\_srchttitle](https://se.mathworks.com/help/releases/R2021b/physmod/sps/specialized-power-systems.html?s_tid=doc_srchttitle) (sjekket 04.05.2022).
- [42] H. Wang, «Simulation of three-phase short circuit electromagnetic transient process of synchronous generator,» *Vibroengineering PROCEDIA*, årg. 35, s. 33–38, nov. 2020. DOI: 10.21595/vp.2020.21800. adresse: <https://doi.org/10.21595/vp.2020.21800>.
- [43] S. alternators. «UCM274F - Winding 25 Technical Data Sheet.» (2022), adresse: [https://www.stamford-avk.com/sites/stamfordavk/files/UCM274F-25-TD-EN\\_Rev\\_A.pdf](https://www.stamford-avk.com/sites/stamfordavk/files/UCM274F-25-TD-EN_Rev_A.pdf) (sjekket 04.05.2022).
- [44] Noratel, «Certificate for 3 Phase Type Transformer,» 2013.
- [45] L. Q. Dan Li, «Energy based Fuse Modeling and Simulation,» 2003.
- [46] T. et.al., «Data Analysis and Optimal Specification of Fuse Model for Fault Study in Power Systems,» 2016.



- [47] IEC, «Electrical installations of ships and mobile and fixed offshore units, IEC61363,» 1998.
- [48] Wärtsilä, *Motor Datasheet, CD0250-100091271-E-DS-651-0101*, ikke publisert, Wärtsilä, 2021.
- [49] «Technical System Catalogue VX25 Ri4Power,» adresse: [https://www.rittal.com/%2Fimf%2Fnone%2F5\\_5508%2FRittal\\_Technical\\_System\\_Catalogue\\_VX25\\_Ri4Power\\_5\\_5508%2F&usg=A0vVaw3z5nol-DJB5t8WtNI2twWK](https://www.rittal.com/%2Fimf%2Fnone%2F5_5508%2FRittal_Technical_System_Catalogue_VX25_Ri4Power_5_5508%2F&usg=A0vVaw3z5nol-DJB5t8WtNI2twWK).

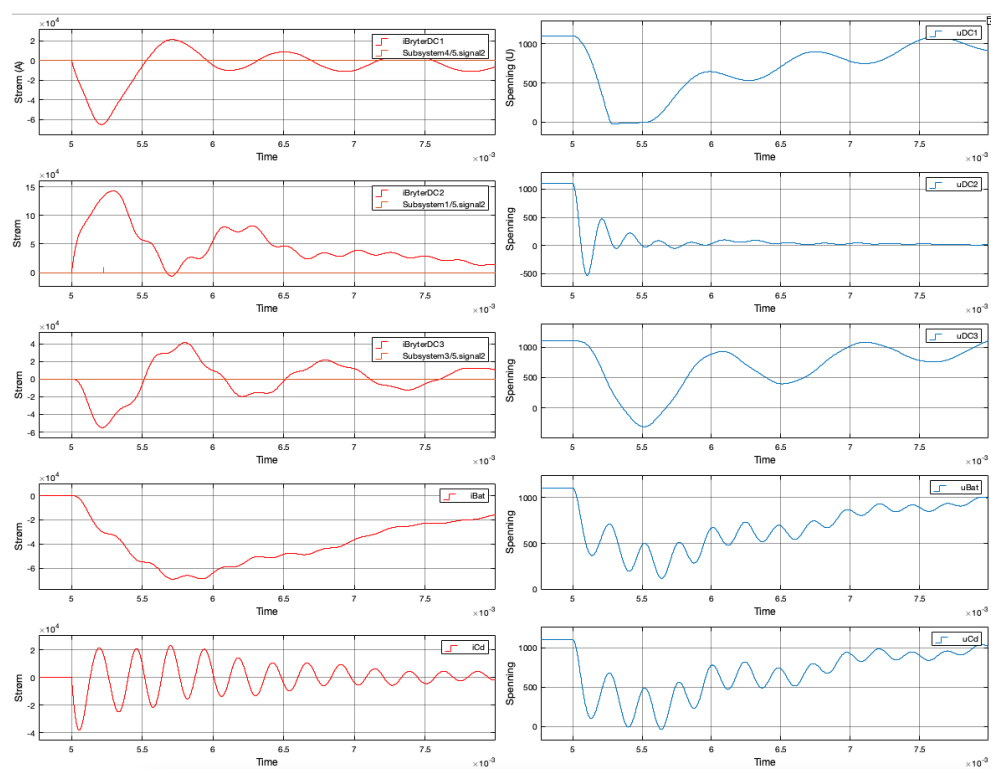
# Vedlegg A

## Ekstra simuleringer

### A.1 Sikringer

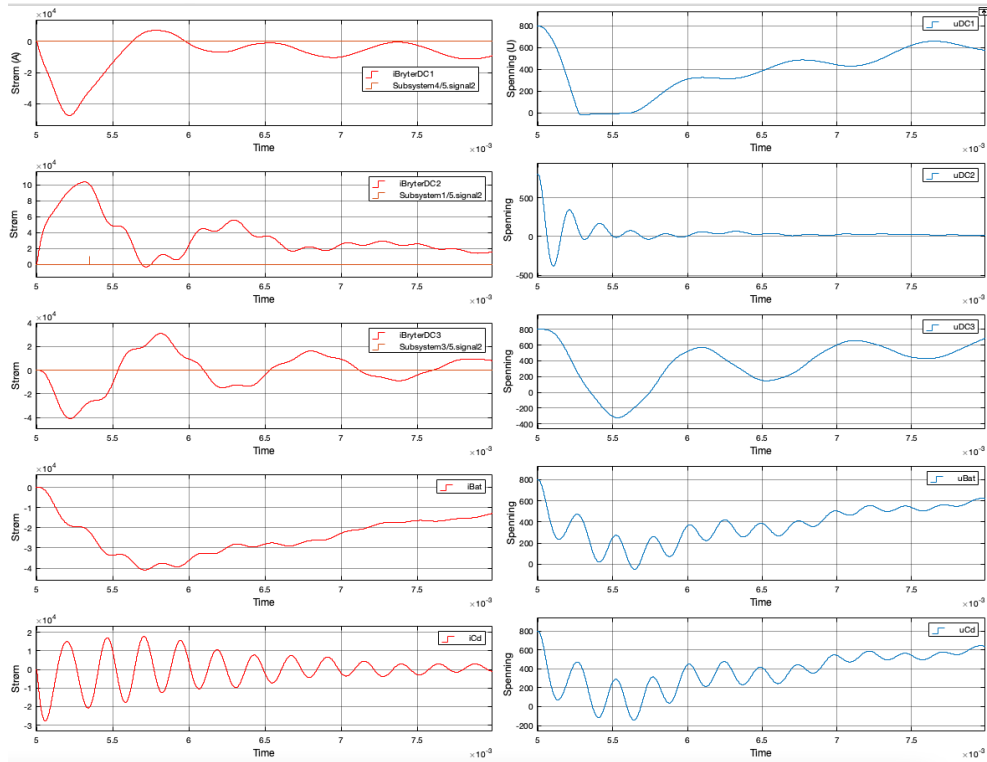
#### A.1.1 Kortslutning i omformer akselgenerator/motor [F2]

Batterispennning 1100V og BOL batterier



**Figur A.1:** Kortslutning i omformer akselgenerator/motor [F2] ved 1100V og BOL batterier, modell med sikringer

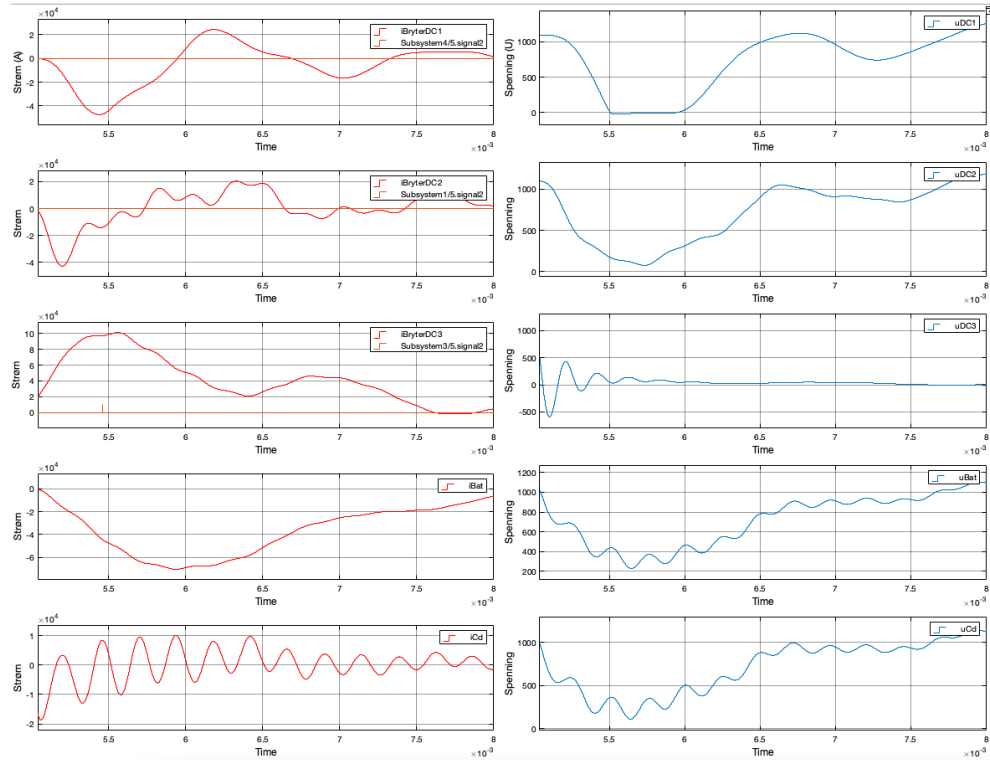
### Batterispennning 800V og EOL batterier



**Figur A.2:** Kortslutning i omformer akselgenerator/motor [F2] ved 800V og EOL batterier, modell med sikringer

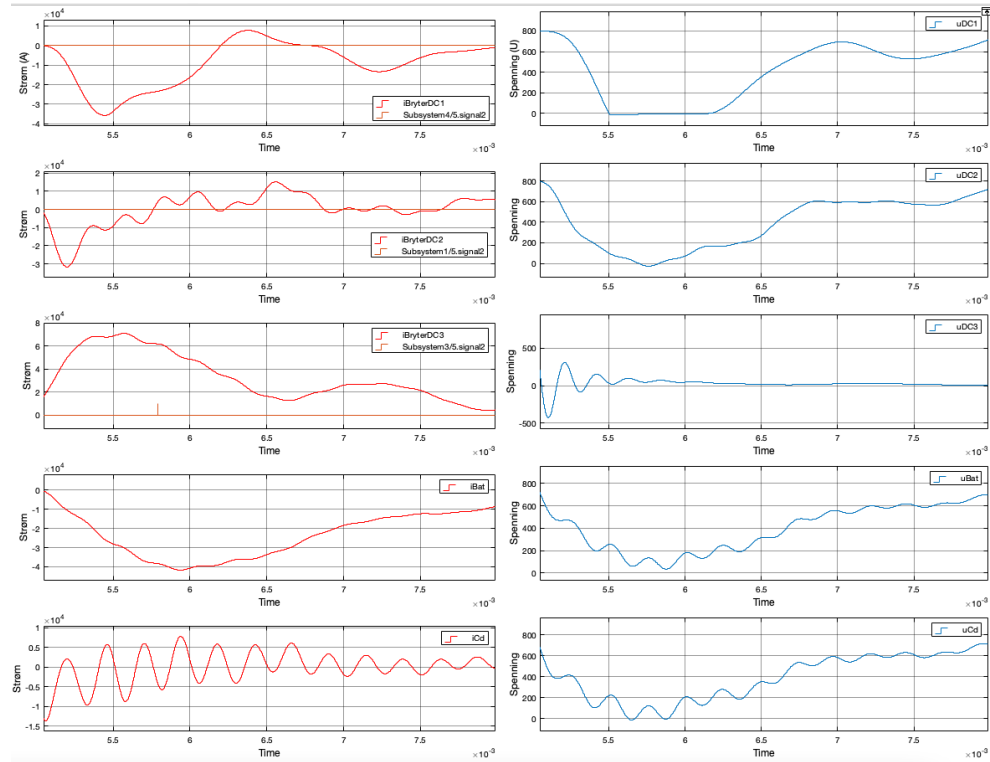
### A.1.2 Kortslutning i omformer baugthruster [F3]

Batterispennning 1100V og BOL batterier



**Figur A.3:** Kortslutning i omformer baugthruster [F3] ved 1100V og BOL batterier, modell med sikringer

### Batterispennning 800V og EOL batterier

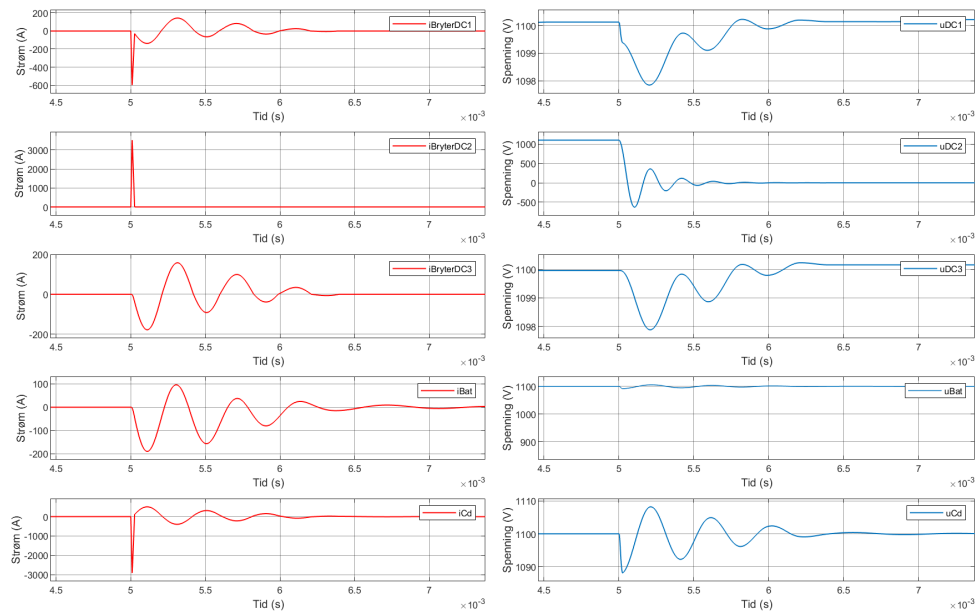


**Figur A.4:** Kortslutning i omformer baugthruer [F2] ved 800V og EOL batterier, modell med sikringer

## A.2 Halvledervern og sikringer til batteri

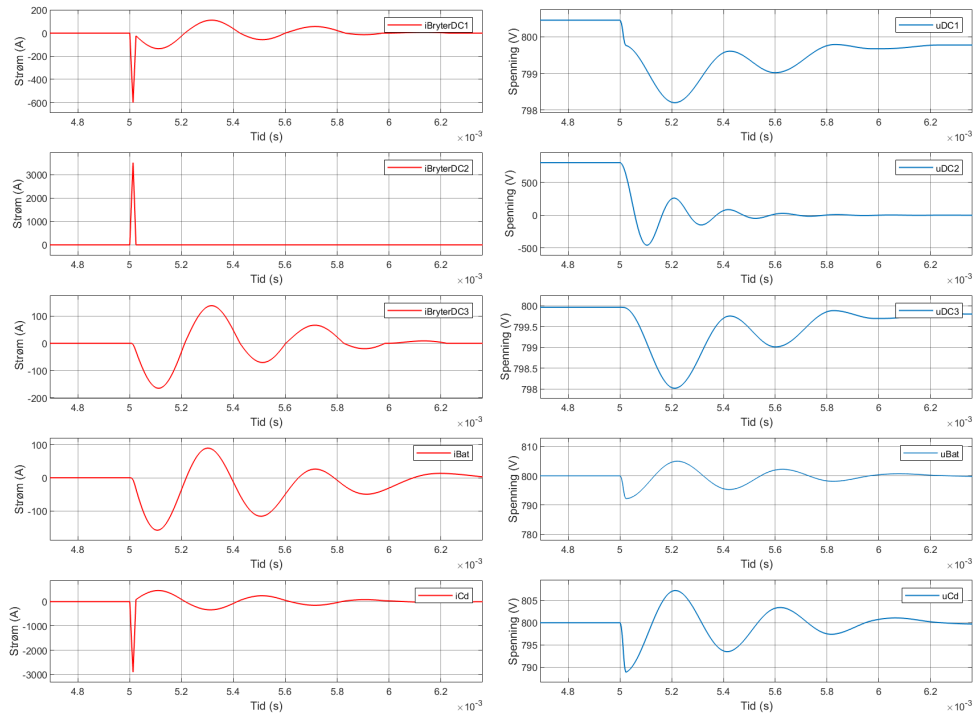
### A.2.1 Kortslutning i omformer akselgenerator/motor [F2]

Batterispennning 1100V og BOL batterier



Figur A.5: Kortslutning i omformer akselgenerator/motor ved 1100V og BOL

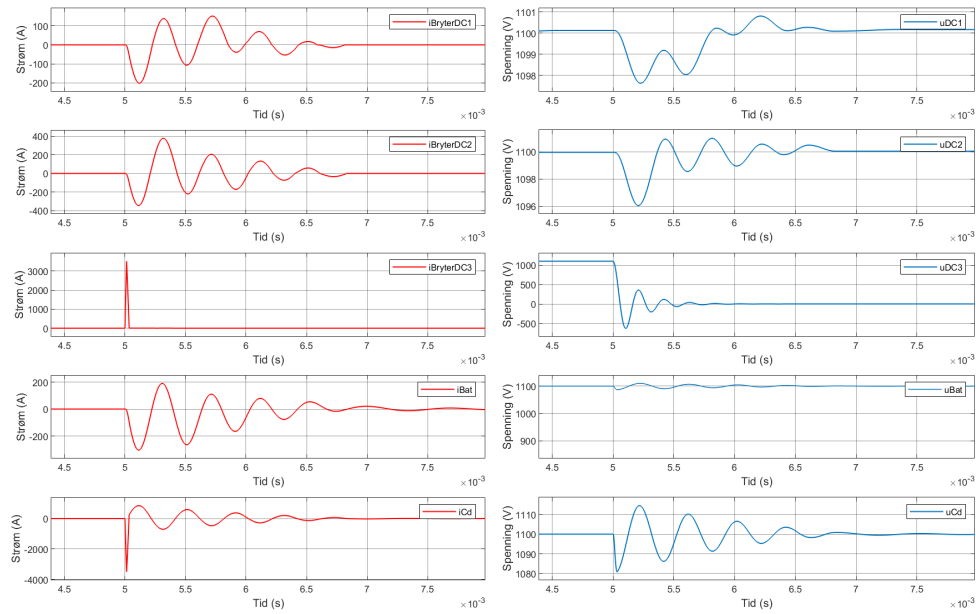
**Batterispennning 800V og EOL batterier**



**Figur A.6:** Kortslutning i omformer akselgenerator/motor ved 800V og EOL

## A.2.2 Kortslutning i omformer baug thruster [F3]

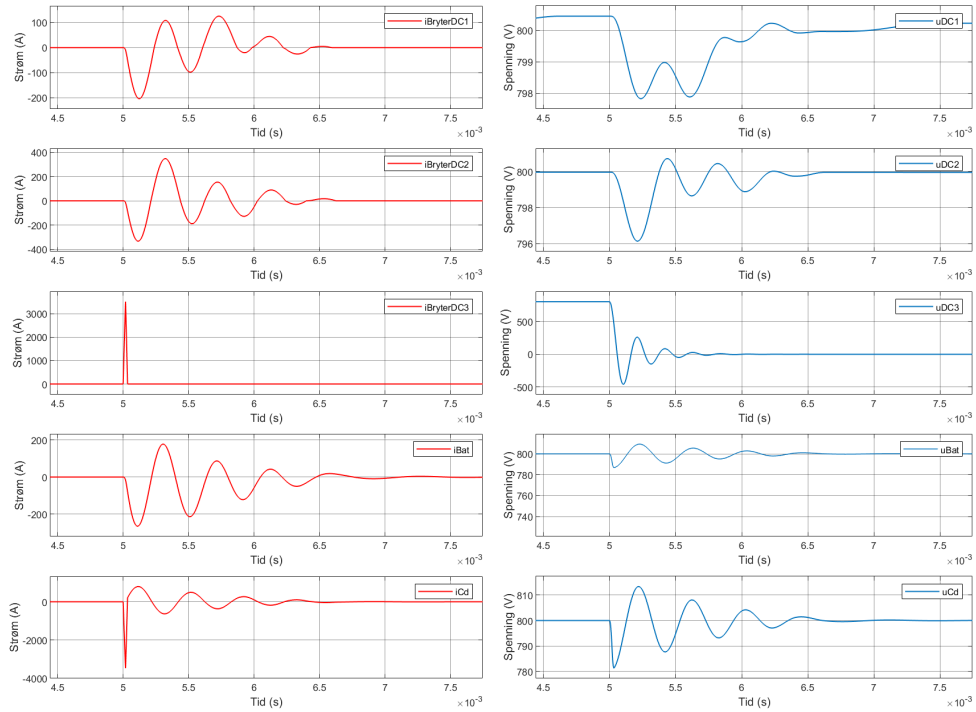
### Batterispenning 1100V og BOL batterier



Figur A.7: Kortslutning i omformer baug thruster ved 1100V og BOL



**Batterispennning 800V og EOL batterier**

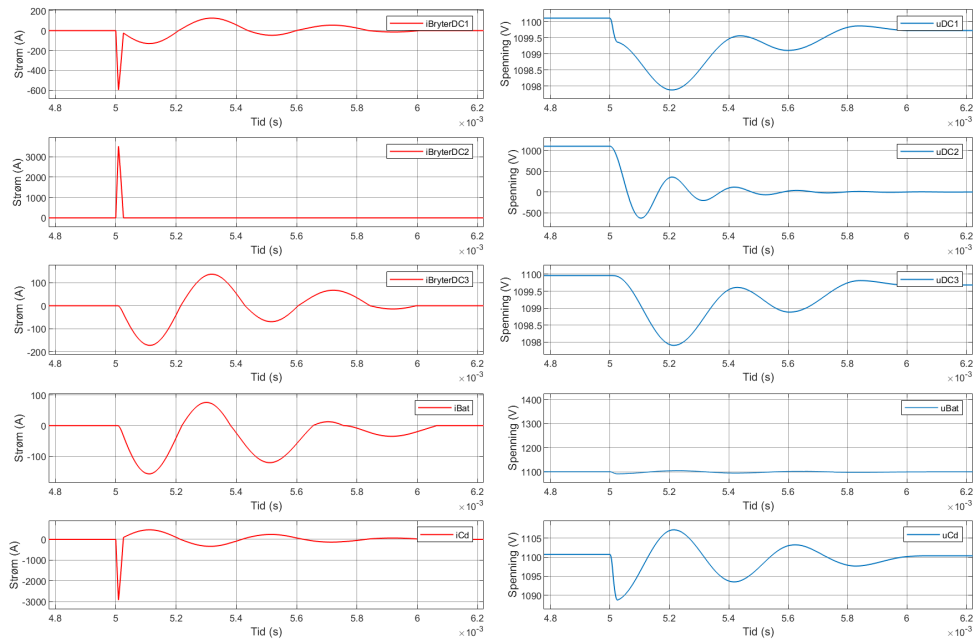


**Figur A.8:** Kortslutning i omformer baugthruer ved 800V og EOL

### A.3 Halvledervern

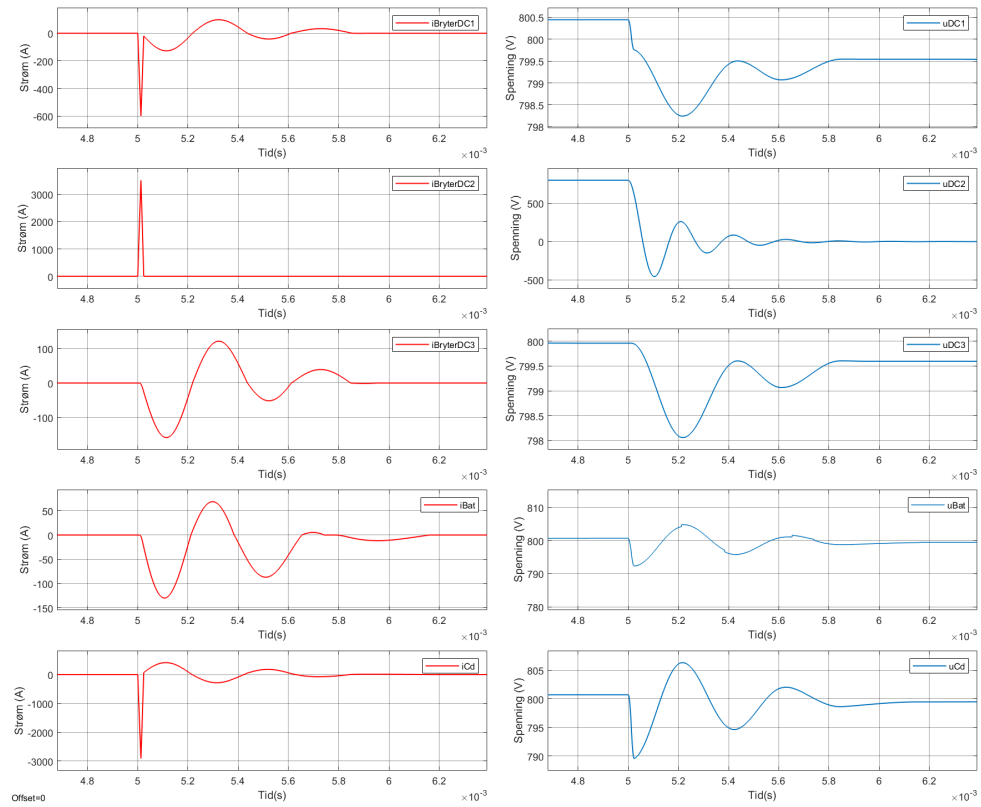
#### A.3.1 Kortslutning i omformer akselgenerator/motor [F2]

Batterispennning 1100V og BOL batterier



Figur A.9: Kortslutning i omformer akselgenerator/motor ved 1100V og BOL

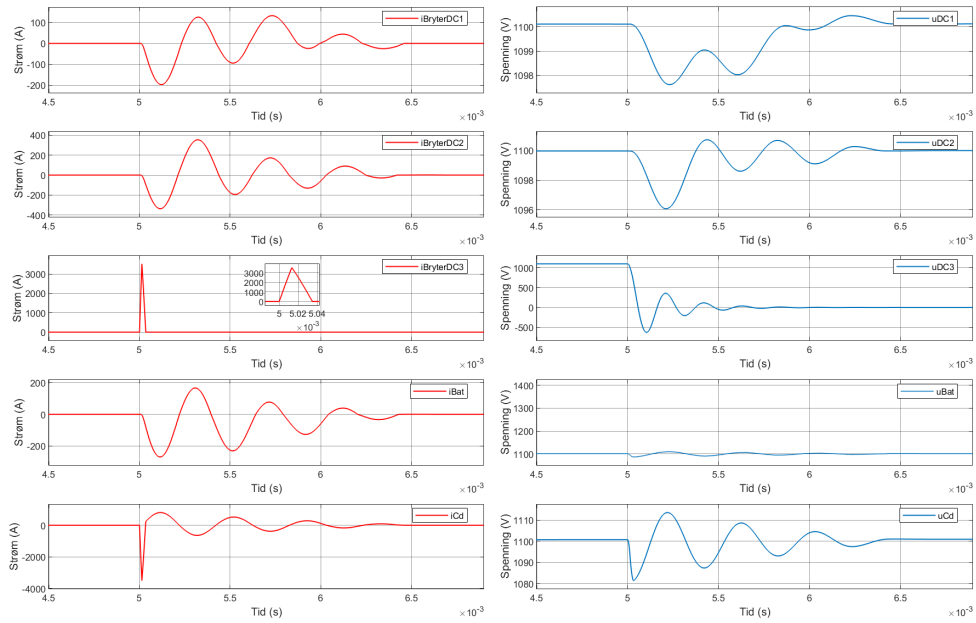
**Batterispennning 800V og EOL batterier**



**Figur A.10:** Kortslutning i omformer akselgenerator/motor ved 800V og EOL

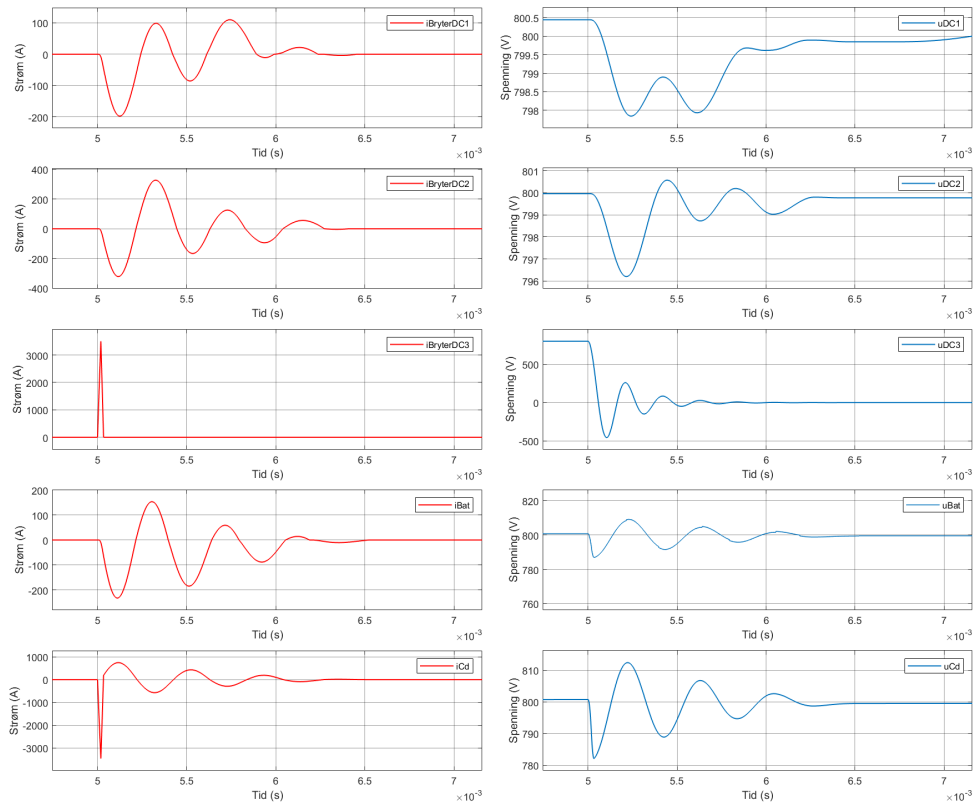
### A.3.2 Kortslutning i omformer baug thruster [F3]

Batterispenning 1100V og BOL batterier



Figur A.11: Kortslutning i omformer baugthruster ved 1100V og BOL

**Batterispennning 800V og EOL batterier**



**Figur A.12: Kortslutning i omformer baugthruer ved 800V og EOL**

