



Forsuaret

Bacheloroppgave

OPG3301

Predefinert informasjon

Startdato:	05-12-2022 09:00 CET	Termin:	2022 HØST
Sluttdato:	19-12-2022 08:00 CET	Vurderingsform:	Norsk 6-trinns skala (A-F)
Eksamensform:	Oppgave		
Flowkode:	1627 OPG3301 1 O 2022 HØST SKSK		
Intern sensor:	Arild Sæbø		

Deltaker

Naun:	Jostein Nyheim Øien
Kandidatnr.:	
FHS-id:	jooien@mil.no

Gruppe

Gruppenavn:	Elias Heimark & Jostein Øien
Gruppenummer:	2
Andre medlemmer i gruppen:	Elias Lyslo Heimark



Sjøkrigsskolen

Bacheloroppgave

Likestrømsfordeling på krigsskip – muligheter og utfordringer

– Er DC-ZEDS fremtidens løsning? –

av

Elias Heimark & Jostein Øien

Levert som en del av kravet til graden:

BACHELOR I MILITÆRE STUDIER MED FORDYPNING I ELEKTRO OG
AUTOMASJON

Antall ord: 13 439

Innlevert: Desember 2022

Godkjent for offentlig publisering

Publiseringsavtale

En avtale om elektronisk publisering av bachelor/prosjektoppgave

Kadettene har opphavsrett til oppgaven, inkludert rettighetene til å publisere den.

Alle oppgaver som oppfyller kravene til publisering vil bli registrert og publisert i Bibsys Brage når kadetten(ene) har godkjent publisering.

Opgaver som er graderte eller begrenset av en inngått avtale vil ikke bli publisert.

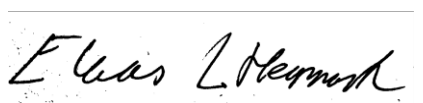
Vi gir herved Sjøkrigsskolen rett til å gjøre denne oppgaven tilgjengelig elektronisk, gratis og uten kostnader	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nei
Finnes det en avtale om forsinket eller kun intern publisering? (Utfyllende opplysninger må fylles ut)	<input type="checkbox"/> Ja	<input checked="" type="checkbox"/> Nei
Hvis ja: kan oppgaven publiseres elektronisk når embargoperioden utløper?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Plagiaterklæring

Vi erklærer herved at oppgaven er vårt eget arbeid og med bruk av riktig kildehenvisning. Vi har ikke nyttet annen hjelp enn det som er beskrevet i oppgaven.

Vi er klar over at brudd på dette vil føre til avvisning av oppgaven.

Dato: 17 – 12 – 2022



Kadett navn



Kadett navn

Forord

På grunn av utdanningsreformen og ny ordning for militært tilsatte er vi i det siste elektro- og automasjonskullet som graduerer fra Sjøkrigsskolen, enn så lenge. Vi er takknemlige for å få være det siste kullet, men samtidig synes vi det er synd at Sjøforsvaret ikke lenger skal få Sjøkrigsskoleutdannede elektroingeniører ut på fartøy og videre opp i systemet. Bacheloren vi skriver nå er i stor grad en undersøkende bachelor for mulige konsepter å benytte seg av i kommende fregattprosjekter. Vi håper å kunne ta med oss lærdommen fra denne bacheloroppgaven videre inn i Forsvaret for å bidra til en stadig lærende organisasjon. Samtidig er vi spent på utviklingen innenfor elektroseksjonen i Sjøforsvaret. Spesielt nå når "alt" blir elektrifisert.

Takk til Arild Sæbø for veiledning, tips og innspill til oppgaven.

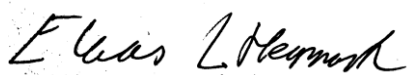
Takk til FMA-MARKAP som har vært vårt bindeledd med Marinen og fagkyndig personell i Sjøforsvaret. FMA har også hjulpet oss med faglig kompetanse og å sette opp intervjuer med de riktige folkene. En særlig takk for å ha invitert oss med på faglig fredag med ABB som foreleser.

Takk til ABB som har vært behjelpelig rundt spørsmål og henvendelser, faglig kompetanse, idéer, skisser og data rundt DC.

Takk til behjelpelig og kompetent personell som har vært med på intervjuer og hjulpet oss med å forstå styrker og utfordringer i Nansen-klassens fordelingssystem.

Takk til våre familier for støtte under skriving av oppgaven.

Bergen, Sjøkrigsskolen, 17-12-2022



Kadett navn



Kadett navn

Oppgaveformulering og problemstilling

Inspirasjon for oppgaven kom fra FMA MARKAP kapasiteter som etterspurte fordeler og ulemper ved et standard vs. sonebasert elektrisk fordelingssystem i forbindelse med 'battle damage control'. Valget ble tatt for å studere DC-ZEDS fremfor AC-ZEDS, og ikke konsentrere hele oppgaven rundt damage control. Dette for å kunne skrive om flere aspekter av elektrisk distribusjon og for å kunne fordype oss i det vi ser på som fremtidsrettet teknologi. Derfra kom problemstillingen vår:

Kan likestrøms sonebasert elektrisk fordelingsdesign (DC-ZEDS) forbedre elektrisk kraftdistribusjon på KNM-fartøy?

Sammendrag

Denne oppgaven har gjort en studie av elektrisk distribusjon på krigsskip. Hensikten var å undersøke om DC-ZEDS er et design som kan forbedre elektrisk distribusjon på fremtidige fartøy i KNM, av fregatt-størrelse. Dette ble gjort ved å sammenligne AC-ringnettet på Nansen-klassen med et DC-ZEDS-design, dimensjonert for samme fartøysklassen. Fokuset var på et installert anlegg fremfor anskaffelse og integrering.

Gjennom en kombinasjon av dokumentstudier, intervjuer, beregninger og skisseringer er det forsøkt å danne et bilde av dagens system og et DC-ZEDS for å kunne besvare oppgavens problemstilling. Punktene hvor de to designene har blitt vurdert er generell robusthet og driftssikkerhet, ytelse i skadesituasjoner, driftsøkonomi og vedlikeholdsøkonomi.

For driftssikkerhet ble AC-ringnett vurdert noe gunstigere enn DC-ZEDS, grunnet mindre avhengighet av kraftelektronikk. DC-ZEDS har likevel aspekter innenfor driftssikkerhet som vurderes gunstigere. Disse er mindre harmoniske forstyrrelser, bedre spenningskvalitet, mindre reaktiv effekt, lettere innfasing av generatorer, samt enklere deteksjon av jordfeil. I skadesituasjoner vurderes DC-ZEDS som et potensielt sterkere design grunnet økt redundans. Dette fordrer dog sofistikert og robust styring og overvåking som utvikles for systemet. Det kan også være hensiktsmessig å fjerne batteribankene fra DC-ZEDS, grunnet brannfaren dette medfører i skadesituasjoner, og manglende behov for peakshaving på fregatt. For driftsøkonomi og vedlikeholdsøkonomi ble det identifisert indikatorer på at DC-ZEDS kan være en billigere løsning enn AC-ringnett. Drivstofføkonomien til generatorene vil bli forbedret, men grunnet usikkerhet om tap i dagens AC-ringnett og usikkerhet rundt hva spesifikt vedlikehold koster, var det ikke mulig å konstatere med sikkerhet at vedlikeholdsøkonomi og tap vil forbedres.

Opgaven konkluderer med at DC-ZEDS kan forbedre den elektriske distribusjonen på fremtidige fartøy i KNM, men at løsningen har utfordringer som må adresseres videre før implementering. Noen modifikasjoner bør også vurderes i foreslått design.

Ordforklaring og forkortelser

Forkortelse	Betydning
AC	Alternating current (Vekselstrøm)
ACSB	Tavle for vekselstrøm (alternating current switchboard)
BDC	Battle Damage Control
BDR	Battle Damage Repair
Black ship	En tilstand hvor fartøyet er uten strømforsyning, enten midlertidig eller over lengre tid.
Bus-tie	En bus-tie breaker er en type effektbryter som kobler sammen/fra hovedtavleseksjoner. At en bus-tie-bryter er lukket betyr at den er sammenkoblet (IMO, 2017).
CODAG	Combined Diesel and Gas turbine. Fremdriftssystemet består av dieselmotor(er) og gassturbin(er) som kan driftes både isolert og sammen.
CODLAG	Combined Dieselelectric and Gas turbine. Fremdriftssystemet består av elektrisk(e) motor(er) med generatorstrømtilførsel og gassturbin(er) som kan driftes både isolert og sammen
DC	Direct current (Likestrøm)
DCSB	Tavle for likestrøm (direct current switchboard)
Effektbryter	En effektbryter er en generell betegnelse på utstyr som kobler sammen/fra to deler av en krets. Den er designet for å automatisk bryte kobling under unormale forhold, og tilsvarer en "breaker" på engelsk
Farad	Avledet SI-enhet for måling av elektrisk kapasitans, symbol [F]
FSDG	Fixed Speed Diesel Generator. Dieselgenerator med konstant turtall
HOS	Haakonsvern orlogstasjon (marinebase)
HVAC	Heating, Ventilation and Air Condition
IC	Input circuit

FMA	Forsvarsmateriell (Organisasjon som anskaffer og forvalter materiell i Forsvaret)
IPMS	Integrated Platform Management System. Styringsystem for norske marinefartøy
kA	Kilo Ampere (1000 Ampere, hvor Ampere er SI-enheten for strøm)
KNM	Kongelige Norske Marine
kW	Kilo Watt (1000 Watt, hvor Watt er SI-enheten for effekt)
Lysbue (arcflash)	Elektrisitet som beveger seg i et medium som regnes som isolerende, eksempelvis luft
ms	millisekund
OGC	Off-Grid Converter
PLS	Programmerbar Logisk Styring
RPM	Revolutions Per Minute. Antall omdreininger noe har i løpet av ett minutt
Selektivitet	Selektivitet er at sikringen eller vernet nærmest en feil skal løse ut, og på den måten forblir friske deler av anlegget operativt selv etter en feil
SFOC	Specific Fuel Oil Consumption (Spesifikt drivstofforbruk)
VSDG	Variable Speed Diesel Generator. Diesलगenerator med variabelt turtall
ZEDS	Zonal Electrical Distribution System (Sonebasert elektrisk distribusjons system)

Innholdsfortegnelse

Forord.....	2
Oppgaveformulering og problemstilling	3
Sammendrag.....	4
Ordforklaring og forkortelser.....	5
Innholdsfortegnelse	7
Figurliste.....	10
1 Innledning	11
1.1 Bakgrunn.....	11
1.2 Mål	12
1.3 Avgrensninger og spesifiseringer	13
1.4 Struktur og oppbygging.....	14
1.5 Metode	14
2 Teori	16
2.1 Generatorer.....	16
2.2 Hovedtavler og lastsentre	16
2.3 Sikringer og brytere	17
2.4 Kraftelektronikk	19
2.4.1 Likeretter	19
2.4.2 Vekselretter	21
2.4.3 Frekvensomformer	22
2.4.4 DC/DC-omformer	22
2.4.5 Input Circuit.....	23
2.5 Jordfeil.....	23
2.6 Harmoniske forstyrrelser	23
2.7 Redundans og separasjon	24
3 AC-distribusjon på Nansen-klassen	25
3.1 Generatorene.....	25
3.2 Hovedtavler og lastsentre	26
3.3 Overordnet kontrollsystem	26
4 DC-ZEDS.....	27
4.1 Konseptutvikling	27
4.1.2 Overordnet design	28

4.2	Generatorene.....	29
4.3	Spenning på nettet	30
4.4	Sone.....	30
4.5	Energilagring	31
4.6	Overordnet kontrollsystem	32
5	Analyse og sammenligning.....	34
5.1	Driftssikkerhet	34
5.1.1	Robusthet	35
5.1.2	Brukerkompetanse	36
5.1.3	Personellsikkerhet	36
5.1.4	Harmoniske forstyrrelser og spenningskvalitet.....	40
5.2	Battle damage control	41
5.2.1	Lysbuefare og beskyttelsesutstyr.....	41
5.2.2	Sammenligning av redundans	44
5.2.3	Kontroll og overvåking	44
5.2.4	Energilagring og BDC.....	45
5.2.5	BDR - Skadereparasjon.....	47
5.3	Driftsøkonomi.....	48
5.3.1	Utgangspunkt for sammenligning.....	49
5.3.2	Sammenligning 1.....	50
5.3.3	Sammenligning 2.....	51
5.3.4	Energilagring og økonomi	52
5.3.5	Energitap i fordeling	52
5.4	Vedlikeholdsøkonomi	55
5.4.1	Vedlikehold av generatorer.....	55
5.4.2	Bytte av brytere	56
5.4.3	Vedlikehold av kraftelektronikk	56
6	Drøfting	58
6.1	Generelle fordeler.....	58
6.2	Komponentforskjeller	59
6.3	Batteribanker	60
6.4	Økonomi	60
6.5	Jordfeil.....	61

6.6 Lysbuefare og beskyttelsesutstyr	61
6.7 Redundans, Battle Damage Control og Repair	61
7 Konklusjon	63
Anbefaling til videre arbeid	64
Referanser	65
Vedlegg	68

Figurliste

Figur 1: Symbol for sikring	Figur 2: Symbol for bryter	18
Figur 3: Trefase diodebro likeretter med induktiv kraftkilde og kapasitiv last (Vannier, 2007)		19
Figur 4: Illustrasjon av spenning inn og ut av en likeretter (LastMinuteEngineers.com)		20
Figur 5: Fullbølgelikeretter med kondensatorglattung (AspenCore).....		21
Figur 6: Trefase vekselretter (Electrical Technology, 2021)		21
Figur 7: Frekvensomformer (Electrical Technology, 2021)		22
Figur 8: Oppkoblingskrets for “Step-up” (a) og “step-down” (b)		22
Figur 9: Input Circuit (ABB et al., n.d.).....		23
Figur 10: Typisk fordeling på marinefartøy (Sæbø, 2021)		25
Figur 11: Overordnet design over et DC-ZEDS med elektrisk fremdrift (Sulligoi et al., 2020)		27
Figur 12: Konseptuelt DC-ZEDS for fregatt.		29
Figur 13: Sone 1 i DC-ZEDS.....		30
Figur 14: Analyse av LTO-batteri (ABB, 2022, 129).....		32
Figur 15: Oversikt over et kontrollsystem (kontroll av en likeretter) (Sulligoi et al., 2020).....		33
Figur 16: Generell sammenligning mellom AC- og DC-grid (Jerohin, 2021)		34
Figur 17: Utklipp av design for DC-ZEDS for Nansen-klassen: DC-tavle 1		37
Figur 18: Simulert kortslutning på hoved bus-bar på DCSB.....		38
Figur 19: Illustrerende bilde for nivåer av beskyttelsesutstyr (Sherwood Protective Apparel, n.d.)...42		
Figur 20: ABBs matrise for beskyttelsesutstyr under arbeid med elektrisk anlegg (ABB, personlig kommunikasjon, 02.12.2022).		43
Figur 21: LTO-batteri (ABB, 2022, 108).....		46
Figur 22: Sammenligning av SFOC basert på lastprosent mellom VSDG og FSDG (Prenc et al., 2016, 89)		49
Figur 23: Eksempel på en generators drivstofforbruk (Kim et al., 2018, 2).....		50
Figur 24: Sammenligning mellom SFOC for variable speed- og fixed speed dieselgeneratorer fra MTU (Habermaas & Thurner, 2020)		51
Figur 25: Potensiell energitap ved hvert steg i en elektrisk drivlinje (Johannesen & Heine, 2021)....		52
Figur 26: Varmetap i DCSB 2 (Vedlegg 2)		54
Figur 27: Tap i DC-ZEDS (Vedlegg 7)		54
Figur 28: Preventivt vedlikehold for DC feeder units (ABB, 2021).....		57

1 Innledning

Fra 2006 til 2011 ble Nansen-klassen satt i tjeneste. Syv år etter den siste ble operativ forliste F313 Helge Ingstad. Konstruksjonssvakheter ble oppdaget etter forliset, og det pågår fremdeles arbeid med å utbedre feil og mangler. For å nå teknologiske fremskritt må man tenke nytt og ikke være redd for å feile. En måte å gjøre dette på er å se etter nye løsninger for elektrisk fordeling, og det er dette denne oppgaven vil gjøre.

1.1 Bakgrunn

“In war there is no second prize for the runner-up” - Omar Bradley

Dette sitat belyser i stor grad bakgrunnen for denne oppgaven. Når krigsskip designes er det viktig å oppnå så mange fordeler som mulig for å gi forutsetninger for å være best og vinne striden. En måte å oppnå dette kan være å implementere nye teknologier og nye designfilosofier for å bedre stridsdyktighet.

Moderne krigsskip er komplekse plattformer med stort behov for elektrisk kraft. De tre hovedkriteriene til et operativt krigsskip: float, move and fight, er i varierende grad knyttet til elektrisitet. Har skroget opplevd skade brukes gjerne elektriske lensepumper for å holde sjøvannet ute av fartøyet og holde det flytende. Navigasjonssystemer om bord krever elektrisitet. Det samme gjør våpensystemene som gjør et krigsfartøy i stand til å levere kampkraft. Systemer som ikke er direkte knyttet til krigføring, men som likevel er viktige, er også i stor grad avhengig av elektrisitet. Eksempler på slike systemer kan være HVAC, oppvarming av vann, drift av byssen, og lys. Det er derfor viktig at fordelingssystemer på moderne krigsskip kan levere effekt til mange forbrukere, selv når skip og fordelingssystemet tar skade fra fiendtlige våpensystemer. Dermed er det ønskelig å optimalisere elektriske fordelingssystemer på fartøyer for å kunne sikre høyest mulig grad av driftssikkerhet i fred, krise og krig.

Videre begynner flere av fartøyene i KNM å nå midten av sine livsløp, noe som betyr at planer for å erstatte disse fartøysklassene bør utarbeides. Da er det naturlig å forsøke implementering av nye teknologier og konsepter for tekniske systemer for å øke driftssikkerhet, overlevelsessevne og kampkraft. Selv om AC-fordeling på fartøy lenge har vært normen, har DC-distribusjon i nyere tid blitt aktuelt og skapt interesse. Moderne utviklinger i både kraftelektronikk og energilagring, samt økt fokus på energieffektiv drift er noen drivende faktorer for denne interessen. Flere NATO-nasjoner studerer nå muligheten for å implementere DC-fordeling på nye krigsskip, og en ny klasse av tyske fregatter skal konstrueres med DC-fordeling (Buitelaar, 2022).

Av disse grunnene ønsker vi i denne oppgaven å studere hvorvidt en ny filosofi for fordeling av elektrisitet på marinefartøy vil være hensiktsmessig på fremtidige fartøy i KNM, eller om dette vil skape flere utfordringer enn fordeler.

1.2 Mål

Målet med oppgaven er å utforske muligheter for å forbedre elektrisk fordeling på fremtidige fregatter. Hensikten er å presentere et veiledende design for å belyse hvilke fordeler som kan oppnås ved å anvende DC-ZEDS, samt hvilke utfordringer dette også bringer.

Oppgaven har som tilleggsmål å være en hjelp for de som skal designe fremtidige fartøy til KNM, i sin vurdering om DC-ZEDS er en designfilosofi som det bør videreutvikles og benyttes. Ønsket produkt er en oppgave som kan brukes til inngangsverdier og informasjon for kraftdistribusjon på fremtidige prosjekter i Marinen.

Spesifikke delmål for oppgaven er:

- Kartlegge de økonomiske forskjellene mellom FSDG i dagens AC-distribusjon og VSDG i DC-ZEDS-forslag
- Studere og vurdere grad av redundans og separasjon i de to alternative fordelingene
- Studere og vurdere ytelsen til de to systemene i skade-scenario
- Sammenligne kortslutningsstrømmer, og hva dette har å si for de to løsningene
- Utvikle et forslag til DC-ZEDS-design for fregatt

1.3 Avgrensninger og spesifiseringer

Elektrisk fordeling vil bli betraktet isolert fra andre skipssystemer som fremdriftsmaskineri og våpensystemer. Samtidig sees det bort fra muligheten for akselgenerator, elektrisk fremdrift og elektromagnetisk og elektronisk signatur.

Oppgaven tar utgangspunkt i et DC-grid forsynt av 3-fase 6-puls diodebroer, samt et størrelses- og effektbehov tilsvarende Nansen-klassen. En antakelse som blir gjort i denne oppgaven, er at forskjellene mellom forskjellige elektriske distribusjonssystem vil ha mer innvirkning på skip av størrelse med Nansen-klassen, enn eksempelvis Skjold-klassen.

Oppgaven skal i hovedsak sammenligne egenskaper, fordeler og ulemper med et ferdig installert anlegg. Konseptutvikling og skisse av systemet vil bli brukt som et utgangspunkt, men enkelte egenskaper oppgaven beskriver, vil også gjelde for DC-fordeling generelt, ikke kun DC-ZEDS.

Det meste av data som omhandler AC-fordeling er hentet fra Marinen, og mye som omhandler DC-fordeling er hentet fra ABB. Oppgaven kan således være farget av svar og informasjon innhentet i dialog med ABB. Samtidig er Nansen-klassen fremdeles operative skrog, og enkelte aspekter kan derfor ikke beskrives i et UGRADERT dokument.

Oppgavens mål er ikke å utrede muligheten eller forslag for å etterinstallere DC-ZEDS på eksisterende fartøy av Nansen-klassen. Hensikten med oppgaven er å vurdere DC-ZEDS for fremtidige fartøysklasser, hvor Nansen-klassen brukes som et eksempelskrog.

Når drivstofforbruk omtales, gjelder dette kun for generatorer, ikke for fremdrift.

1.4 Struktur og oppbygging

Oppgaven er delt inn i syv segmenter: Første segment er en innledning som inkluderer bakgrunn, mål, avgrensninger og metode. Andre segment redegjør for relevant teori som skal brukes i oppgaven. Tredje og fjerde segment beskriver henholdsvis dagens AC-fordeling på Nansen-klassen og DC-ZEDS som konsept, inkludert designet som ble laget for denne oppgaven. Videre i segment fem analyseres data og viktige faktorer for de to typene fordeling, før dette blir drøftet videre i segment seks. Oppgaven avslutter med en konklusjon i segment syv.

1.5 Metode

I denne oppgaven anvendes vitenskapelig metode for å svare på problemstillingen. Analysen krever innhenting av data fra forskjellige kilder, og på forskjellige måter. Det vil samles inn relevant, eksisterende data, foretas intervjuer, gjøres beregninger og designes skisser basert på informasjonen som innhentes.

Den første komponenten i oppgavens metode er litteraturstudie. Dette vil foregå via analyse av forskjellige artikler, tidsskrifter og dokumenter som omhandler fordelingssystem på fartøy, og er en form for kvalitativ datainnsamling hvor data i hovedsak er formatert som tekst (Grønmo, 2020).

Parallelt med litteraturstudie vil det bli foretatt intervjuer og diskusjoner med personer som innehar relevant erfaring og kunnskap rundt elektriske fordelingssystem. Dette vil bli gjennomført kvalitativt og anonymt. Intervjuformen denne oppgaven benytter seg av er formelle intervjuer som består av en rekke forhåndsbestemte spørsmål, mens det fremdeles åpnes for naturlige digresjoner og oppfølgingsspørsmål. Noe informasjonsinnhenting skjer mindre formelt, via e-post og personlige møter. Behovet for personlig kommunikasjon forekom grunnet avdekking av ytterligere momenter og problemstillinger sent i prosjektløpet.

For å sammenligne teoretisk ytelse på et nytt DC-ZEDS-system og det eksisterende systemet på Nansen-klassen vil det bli utført beregninger basert på innhentet data. Tall for Nansen-klassen er hovedsakelig hentet fra FMA og Marinen. For DC-ZEDS vil mye av dataen basere seg på tilgjengelige forskningsartikler, samt informasjon og analyser gjort av ABB.

Siste komponent i metoden er utvikling av tegninger. Disse vil være av DC-ZEDS, og lages for å gi et grunnlag for sammenligning med eksisterende AC-fordeling. Skissene er ikke tenkt som hovedproduktet i oppgaven eller som endelig anbefaling for elektrisk fordeling.

2 Teori

I denne delen av oppgaven fremlegges relevant teori. Kriteriet for at informasjon blir vurdert som relevant er at informasjonen er nødvendig for å kunne diskutere tematikken i oppgaven eller at informasjonen øker leserens evne til å trekke ut informasjon fra analyse og drøfting. Teorien vil først bestå av viktige komponenter i maritim elektrisk distribusjon, deretter viktige konsepter og faktorer i kraftdistribusjon.

2.1 Generatorer

Generatorer er komponenter som anvender et drivstoff for å produsere elektrisitet. I denne oppgaven er ikke virkemåten til generatorer relevant. Generortypene i denne oppgaven er VSDG og FSDG. Førstnevnte kan driftes på et spekter av turtall. Sistnevnte er låst til et bestemt turtall for å kunne levere strøm med en bestemt frekvens.

2.2 Hovedtavler og lastsentre

En hovedtavle kan beskrives som en samling av paneler og innretninger som skal dirigere og sammenkoble effekten fra generatorer eller andre energikilder til skipets forbrukere. Dette skjer som regel gjennom flere underfordelinger, kjent som lastsentre. Komponentene som inngår i en tavle er brytere, sikringer, kraftelektronikk og bus-bars. Sistnevnte er uisolerte metalleder som leder strøm, og er der man tar ut effekt fra tavlen. Tavler inneholder som regel kontrollsystemer for å automatisk overvåke og justere effektflyt i anlegget.

Et lastsenter er en tavle som mottar effekt fra hovedtavlen, og videre distribuerer denne til forbrukere. Lastsentre blir dermed en form for underfordeling. Hensikten med lastsentre er å sørge for sikker distribusjon til forbrukere, slik at forbrukere ikke trekker mer effekt enn systemet er dimensjonert for og for å hindre skade på forbrukere. I tillegg skal de også kutte kostnader i forbindelse med lange kabler. Dersom alle forbrukere skulle hatt sin egen kabel fra hovedtavlene ville det blitt lange kabelstrekk. Lastsentre gjør det også enklere å overvåke effektflyt til forbrukere, grunnet at brytere, vern og sikringer til forbrukere blir samlet på ett sted.

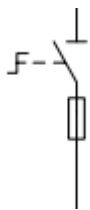
2.3 Sikringer og brytere

Sikringer, eller 'fuses', er sikkerhetstiltak som installeres i elektriske fordelinger. De er enkle i konstruksjon. Konseptet er en leder som er designet for å smelte ved en gitt strøm. Dermed brytes kretsen når lederen smelter og kretsen beskyttes dermed mot høye strømmen. Sikringen inneholder gjerne sand eller gass som skal forhindre lysbue når kontakten i sikringen brytes. Fordelen med slike komponenter er at de er enkle og ofte billige. En svakhet er at de må byttes hver gang de løses ut.

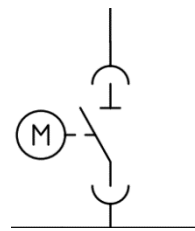
Brytere i et elektrisk system tjener flere funksjoner. De brukes til å bryte en krets dersom strøm eller effekt gjennom bryteren overgår et bestemt sikkerhetsnivå. Videre brukes de til å omdirigere eller stanse strøm til forbrukere. Brytere i likestrømsfordelinger og vekselstrømsfordelinger deler likheter, men er også ulike på noen områder. I begge tilfeller finnes det tre hovedvarianter: magnetiske brytere, termiske brytere og termisk-magnetiske brytere. Forskjellene mellom disse tre typene er ikke relevant for denne oppgaven. Det som er relevant, er de forskjellige slukkemetodene i brytere.

For å åpne en krets er det ikke nok å bryte kontakten. Selv ved brutt kontakt kan det oppstå en lysbue eller 'arc'. Dette vil si at strøm beveger seg mellom de to kontaktene i luft. Denne lysbuen må slukkes for at kretsen skal åpnes fullstendig. Dette er enklere å gjøre i en AC-krets. Vekselspanning er formet som sinuskurve, som vil si at strøm blir null ampere to ganger hver syklus. Når spenningen er lik null volt mellom kontaktene utnyttes dette for å enkelt kunne slukke lysbuen. Dette gjør at AC-brytere kan bruke 'Current zero method' for å slukke lysbuen. Når strøm mellom kontaktene i bryteren går mot null, økes dielektrisk styrke i mediet i mellomrommet. Dette forhindrer at buen gjenoppstår. Øking av dielektrisk styrke kan oppnås ved å omgjøre ioniserte molekyler, de som gjør det mulig for strøm å bevege seg i luftgapet, til nøytrale molekyler. Eventuelt er det mulig å fjerne de ioniserte molekylene og erstatte disse med nøytrale molekyler. Metodene for å oppnå dette er som følger. Tvinge olje eller gass mellom kontaktene. Kjøling av mediet mellom kontaktene. Øke avstanden mellom kontaktene. Øke trykket i slukkekommeret for å oppnå nøytralisering av ioner. (StudyElectrical.com, 2014)

Metoden som ble beskrevet over fungerer ikke i en DC-krets. Likestrøm holder konstant verdi i en retning. *“DC arcs are considered the most difficult to extinguish because the continuous DC supply causes current to flow constantly and with great stability across a much wider gap than an AC supply of equal voltage, often shown in metrics such as peak value and RMS.”* (Roderick, 2021). Spenning når ikke 0 slik som i en AC-krets. DC-brytere må derfor anvende ‘High Resistance Method’. Metoden innebærer å øke motstanden slik at strømmen i lysbuen blir så liten at den slukker. Mye energi går tapt i lysbuen når denne metoden anvendes. Det er en av grunnene til at den tas lite i bruk for AC-kretser. Måter DC-brytere kan øke motstanden på er ved å øke avstanden mellom kontaktene for å forlenge lysbuen, kjøle ned lysbuen, eksempelvis med hjelp av gass, splitte lysbuen ved å føre inn plater mellom kontaktene eller ved å tvinge lysbuen gjennom en tynnere åpning (StudyElectrical.com, 2014).



Figur 1: Symbol for sikring



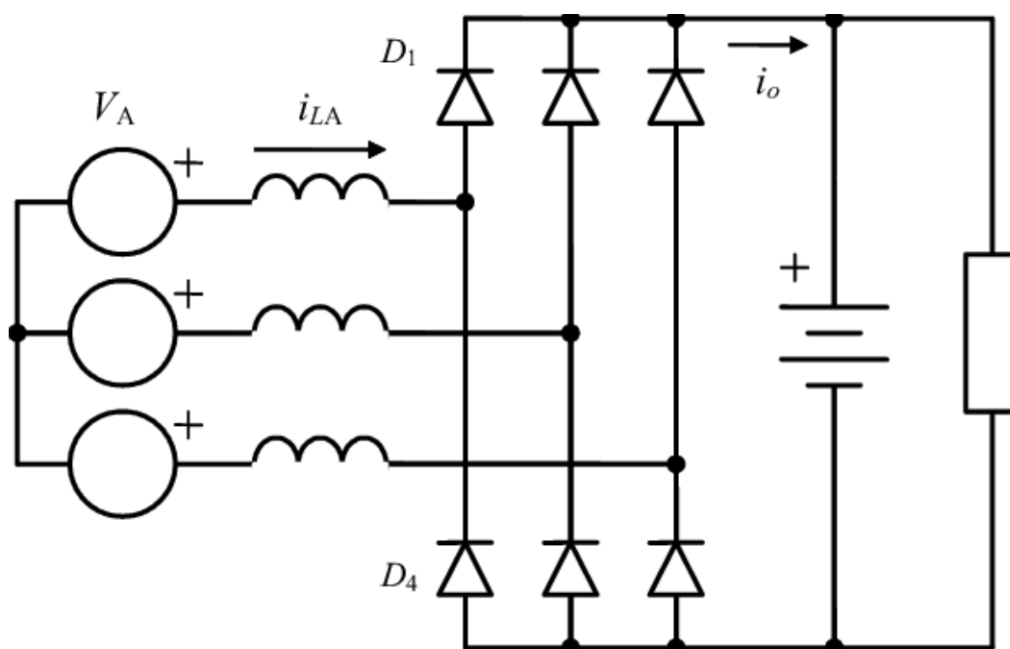
Figur 2: Symbol for bryter

2.4 Kraftelektronikk

Funksjonen til kraftelektronikk er å prosessere og kontrollere flyten av elektrisk energi ved å forsyne spenning og strøm på den måten som er optimalisert for lasten (Mohan et al., 1995, 3). Allerede i 1995 skrev de at kraftelektronikk hadde vært gjennom en enorm vekst, og de predikerte at over 50% av elektrisk utstyr i USA kom til å bli forsynt gjennom kraftelektronikk. Enda lenger frem i tid skriver Blaabjerg og Round at 70% av all elektrisk energi blir prosessert av kraftelektronikk (Blaabjerg & Round, 2021).

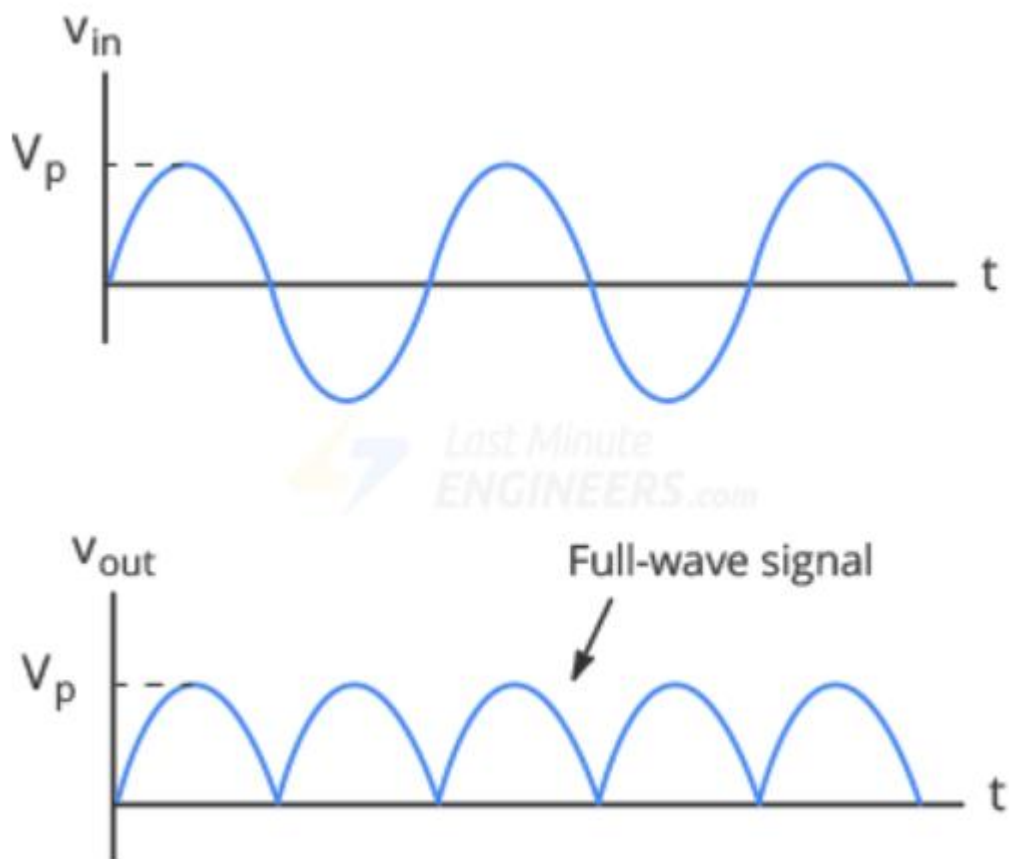
2.4.1 Likeretter

Likeretteren, eller AC/DC-omformereren, har som funksjon å konvertere en oscillerende strøm som går i to retninger om til en strøm som beveger seg i en retning med konstant verdi. Altså, konvertere AC til DC. Dette skjer ved hjelp av en diodebro, eller tyristorbro, og en kondensator.

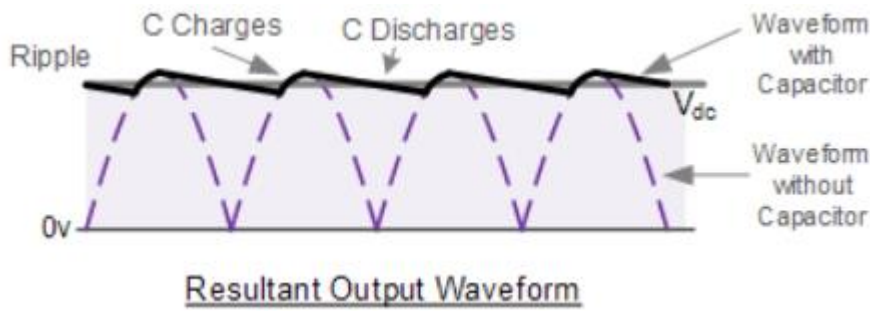


Figur 3: Trefase diodebro likeretter med induktiv kraftkilde og kapasitiv last (Vannier, 2007)

Dioder er komponenter hvor strømmen kun kan bevege seg i en retning gjennom dem. Vekselstrøm beveger seg i to retninger, men kun en bevegelsesretning blir ledet av dioder. Denne resulterende likestrømmen blir ikke jevn, ettersom strømmen som passerer gjennom diodene er toppene av tre vekselstrømmer. Figur 4 illustrerer spenningen inn og ut av dioden, og tilsvarer strømmen som kommer inn og ut av dioden ved resistiv last. En kondensator gir likestrømmen tilnærmet konstant verdi. Ved å lade opp og ut kan den fylle ut gapene som oppstår i likestrømmen ut av diodene, illustrert i figur 5 (Gundvaldsen & Rosvold, 2019).



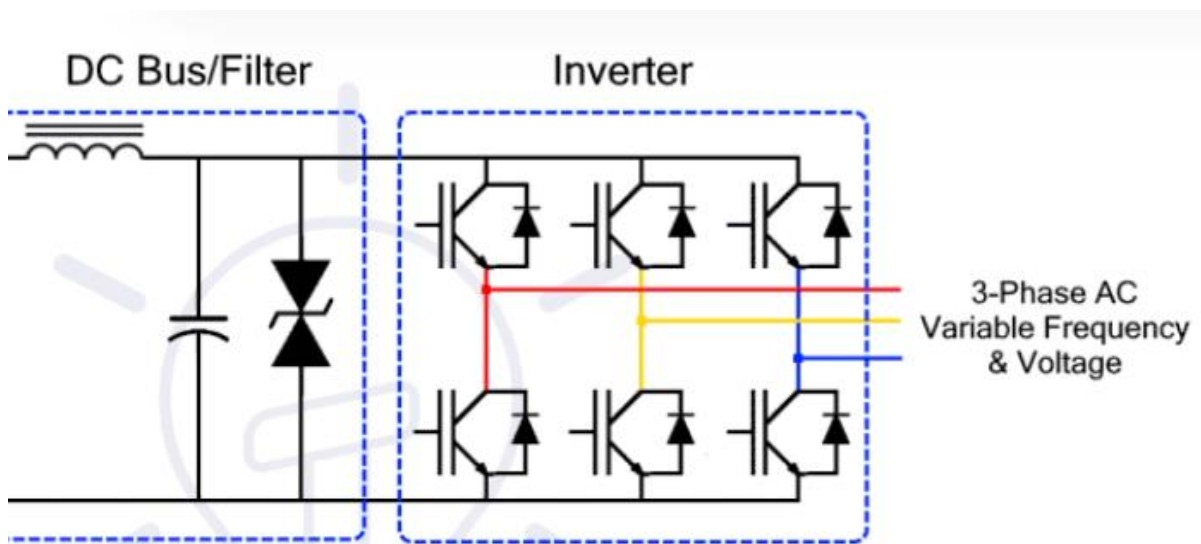
Figur 4: Illustrasjon av spenning inn og ut av en likeretter (*LastMinuteEngineers.com*)



Figur 5: Fullbølgeretter med kondensatorglatting (*AspenCore*)

Figuren over viser hvordan en kondensator bidrar til en jevnere strøm over lasten. Den grå linjen viser ønsket verdi for likespenning. Den svarte bølgen viser at kondensatoren lades opp når spenningen er høyere enn ønsket verdi, og lades ut når spenningen går under ønsket verdi.

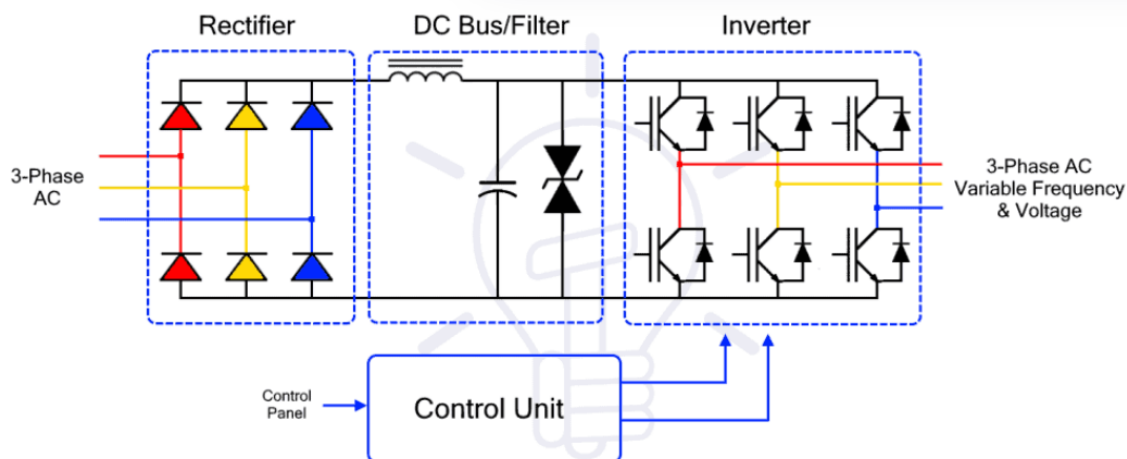
2.4.2 Vekselretter



Figur 6: Trefase vekselretter (*Electrical Technology, 2021*)

En vekselretter brukes for å konvertere likestrøm til vekselstrøm med kontrollerbar frekvens og verdi. Første komponent som utgjør en vekselretter, er en kondensator. Denne kalles gjerne filterkapasitans og er til stede for å sørge for jevn tilførsel av likestrøm til benene i vekselretteren. I en trefase likeretter er det tre ben. Benene er koblet i parallell, og hvert ben er bygd opp av to brytere i serie. Ved å åpne og lukke bryterne i en bestemt sekvens og i bestemte intervall, noe som kalles for PWM (Pulse Width Modulation), kontrolleres retning, verdi og fase på en måte som for lasten oppleves som trefase vekselspenning (Evans, *The Basics of Power Inverters Explained*, 2020).

2.4.3 Frekvensomformer

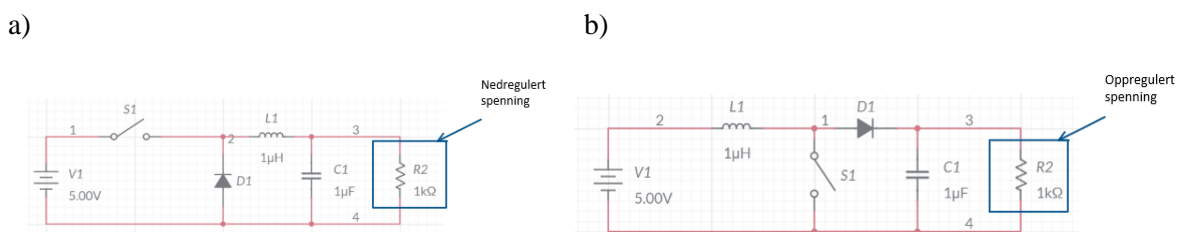


Figur 7: Frekvensomformer (Electrical Technology, 2021)

En frekvensomformer er en komponent innen kraftelektronikk som anvendes for å regulere frekvens og spenning fra en vekselspenningsforsyning til en vekselspenningsforbruker. Denne komponenten anvender først konseptet for en likeretter og deretter vekselrettes strømmen igjen. (Evans, 2020).

2.4.4 DC/DC-omformer

DC-DC-omforming går ut på å regulere ned eller opp en DC-spenning. I sin enkleste utgave finnes 'step-down'- og 'step-up'-omformere. 'Step-down'-omformeren produserer lavere gjennomsnittlig spenning ut enn inn av omformeren, og 'step-up'-omformeren gjør det motsatte.



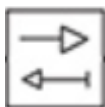
Figur 8: Oppkoblingskrets for "Step-up" (a) og "step-down" (b)

Den nedtransformerende omformeren får inn konstant likespenning, og gir ut en likespenning over lasten R2 som er *mindre* enn inngangsverdien.

Den opptransformerende omformeren får spenning inn gjennom inngangen, og likespenningen over lasten R2 blir *større* enn inngangsverdien.

2.4.5 Input Circuit

En Input Circuit er ABB sin egendesignede modul, og er en del av beskyttelsen av maritim DC-grid. Det er denne som skiller mellom hva som er ‘on-grid’ og ‘off-grid’. Mesteparten av tiden lar den effekt flyte fritt fram og tilbake gjennom seg. Ved et plutselig fall i DC-spenning vil IC blokkere returstrøm fra feilstedet til den friske delen av nettet. Slik sikres selektivitet i vernene og rask gjenoppretting av systemet til normal drift (ABB et al., n.d.). Figur 9 viser skjematisk symbol for IC.



Figur 9: Input Circuit (ABB et al., n.d.)

2.5 Jordfeil

Jordfeil er noe som oppstår i de fleste maritime kraftdistribusjoner. Dette fenomenet kan beskrives som strøm som beveger seg en uplanlagt vei til jord. I en bacheloroppgave om jordfeil på Nansen-klassen defineres jordfeil basert på regelverk fra DNV og NRAR som “... enhver svekkelse i isolasjonsmotstand som fører til en feilstrøm på over 30mA er å betrakte som en jordfeil” (Berthling & Thomassen, 2018, 25). Jordfeil forekommer i begge typer fordelingsdesign, og kan medføre skade på personell og materiell.

2.6 Harmoniske forstyrrelser

Harmoniske forstyrrelser er definert som innholdet i et elektronisk signal med frekvens som er et multiplum av systemets fundamentale frekvens (Zhang, 2019, 7). Disse forstyrrelsene oppstår som harmoniske strømmen og spenninger, og skapes av ulineære laster tilkoblet strømmettet. Harmonisk forvrenging er en forurensing i elektriske anlegg som fører til problemer hvis summen av de harmoniske strømmene overstiger et bestemt nivå (ABB, 2011, 8). Disse forvrengningene kan føre til økte temperaturer i ledere og annet utstyr. For å få en forståelse rundt hva en ulineær last er, så er dette en last som ikke har samme bølgeform som forsyningsspenningen. Det er mange slike laster om bord på et fartøy, og mengden harmonisk forvrenging de ulineære lastene påfører nettet er delvis avhengig av størrelsen på lasten. Krafterelektronikk er også en årsak til harmoniske forstyrrelser, og ‘dårligere’ krafterelektronikk vil påvirke nettet mer enn ‘bedre’ krafterelektronikk. Et eksempel på dette er at en 12-puls diodebro er bedre enn en 6-puls diodebro, da den gir dobbelt så mange topper på samme tid som en 6-puls, og dermed mer jevn utgangsspenning- og strøm.

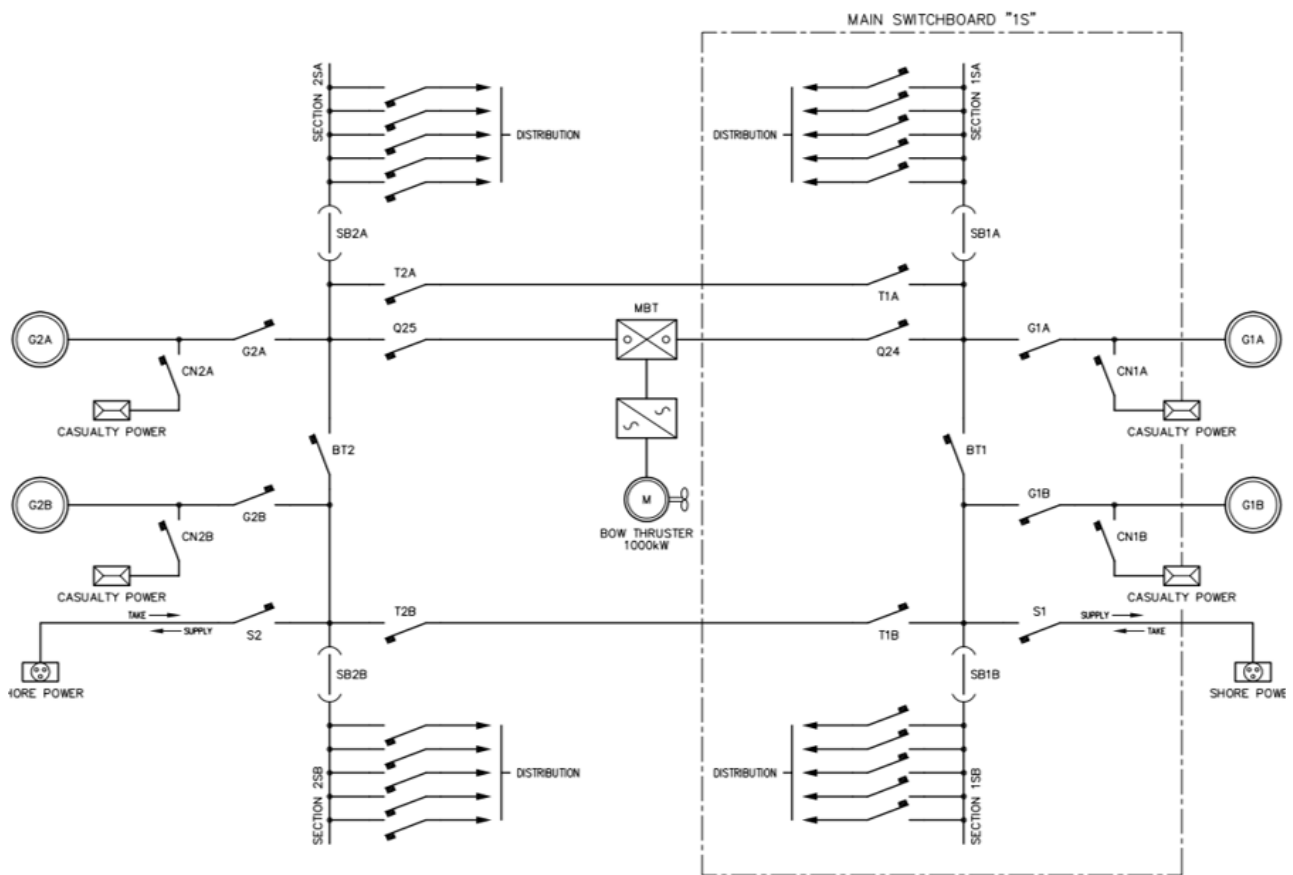
2.7 Redundans og separasjon

Redundans er en duplisering av kritiske komponenter eller funksjoner i et system, for å øke stabiliteten, påliteligheten og driftssikkerheten i systemet.

Separasjon betyr at viktige systemer bør plasseres langt fra hverandre. Ved å spre disse objektene langs skips, tverrskips og på forskjellige plan sørger man for at en treffer har mindre sannsynlighet for å sette fartøyet ut av spill. Det er viktig å sørge for separasjon av dublerede komponenter som skal gi hverandre redundans.

3 AC-distribusjon på Nansen-klassen

AC-distribusjon på Nansen består av fire generatorer som forsyner to hovedtavler. Disse er koblet sammen i ringnett, og forsyner åtte lastsentre. På figur 10 vises en typisk fordeling på marinefartøy, som ligner den på Nansen-klassen. Lastsentre er ikke illustrert, men blir forsynt av ‘distribution’-forgreiningene fra ‘Main Switchboard’.



Figur 10: Typisk fordeling på marinefartøy (Sæbø, 2021)

3.1 Generatorene

Strømproduksjon består av 4 MTU 396 Serie 12V 1250kVA/1000kW dieselgeneratorer som produserer merkespenning på 440V. Disse leverer vekselstrøm og må derfor drives med et fast turtall for å kunne levere skipets driftsfrekvens på 60Hz. Generatorene er 4-polte og må dermed kjøres med turtallet, n:

$$n = \frac{f * 60}{\text{polpar}} = \frac{60 * 60}{2} = 1800 \text{ rpm} \tag{3.1}$$

3.2 Hovedtavler og lastsentre

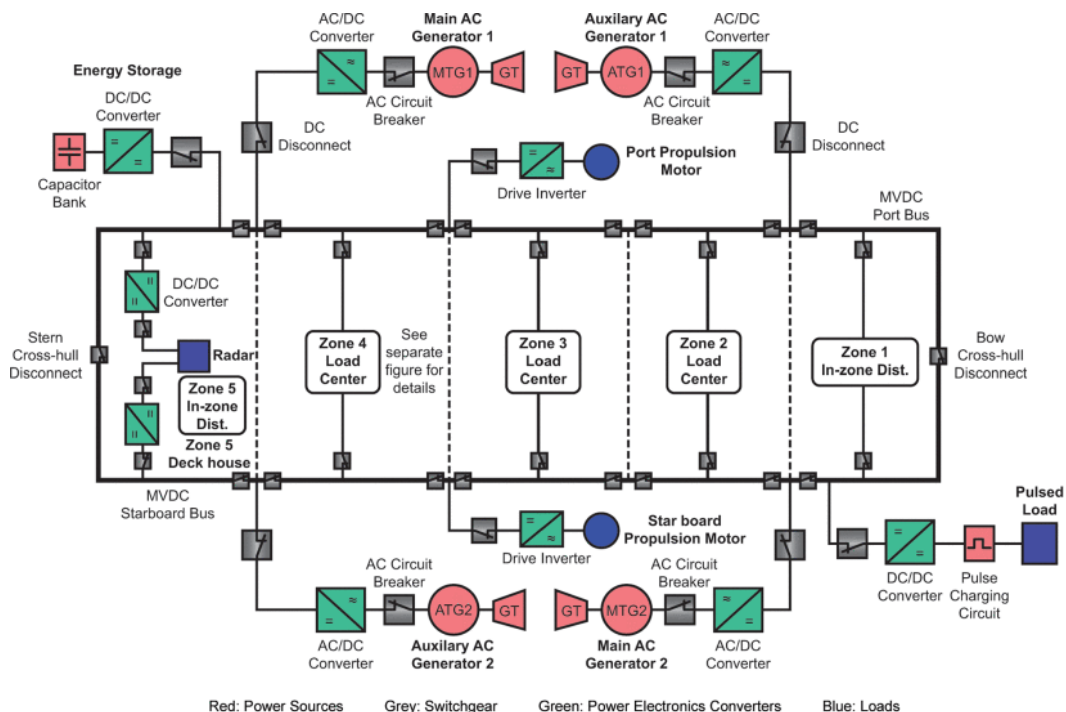
Hovedtavlene på Nansen-klassen får spenning levert direkte fra generatorene. Tavlene er også ‘splittet’, det vil si at de er oppdelt i to soner hver, og de fire sonene er knyttet til en generator hver. Med alle fire generatorer koblet til hver sin separate tavlesone, gjør det at ingen enkelt forbruker- eller komponentsvikt kan skape en fullstendig shutdown av kraftforsyning. Tavlene er koblet sammen av fire bus-tie-brytere i en ringkonfigurasjon, slik som systemet i figur 10. Nødtilførsel av strøm er tilgjengelig via nødkontakter- og kabler, som kan trekkes etter behov. Disse er eksemplifisert som ‘casualty power’ i figur 10. Hovedtavlene har mulighet for tilkobling til landstrøm. Alle brytere i hovedtavlene er motoriserte og kan fjernstyres fra IPMS, samt styres manuelt. Effekt distribueres fra hovedtavlene til lastsentrene. Thruster forsynes direkte fra hovedtavlene.

3.3 Overordnet kontrollsystem

Grunnet at systemet er gradert, er det vanskelig å hente ut informasjon og illustrere virkemåte i en ugradert oppgave. Beskrivelsen av systemet blir derfor kun av de mest grunnleggende aspektene. Oppgavene til kontrollsystemet for elektrisk kraftdistribusjon er å overvåke feil, analysere effektbehov, fase inn generatorer og tavler på nettet og å styre brytere og vendere. Dette styres i dag av IPMS, og styres oftest automatisk, men det er også mulig å styre det manuelt. I intervjuer ble det sagt at «*automasjonen i systemet er god*» (Intervjuobjekt -, intervju 1). Videre ble det sagt av samme intervjuobjekt at kontroll- og overvåkningssystemet også har god redundans. Alle fiberoverføringer har redundans. Det samme gjelder for ‘interfacer’.

4 DC-ZEDS

Overordnet konsept for DC-ZEDS er et fordelingsnett hvor alle leverandører er koblet på samme hoved-grid. Hoved-grid er utformet som en ring. Sonene blir i dette tilfellet forsynt med effekt fra to motstående sider i ringen, men det er flere mulige måter å designe en slik fordeling. Figur 11 illustrerer konsept for DC-ZEDS som er utgangspunktet for denne oppgaven.



Figur 11: Overordnet design over et DC-ZEDS med elektrisk fremdrift (Sulligoi et al., 2020)

4.1 Konseptutvikling

Høsten 2022 holdt ABB foredrag på HOS om DC-fordeling på marinefartøyer, hvor de ble introdusert for denne oppgaven. Dialogen med ABB fortsatte under utvikling av oppgaven, og dette resulterte i avgjørelsen om å videreutvikle det grunnleggende konseptet for DC-ZEDS til et spesifikt DC-ZEDS for fregatt, med Nansen-klassen som referanseskrog.

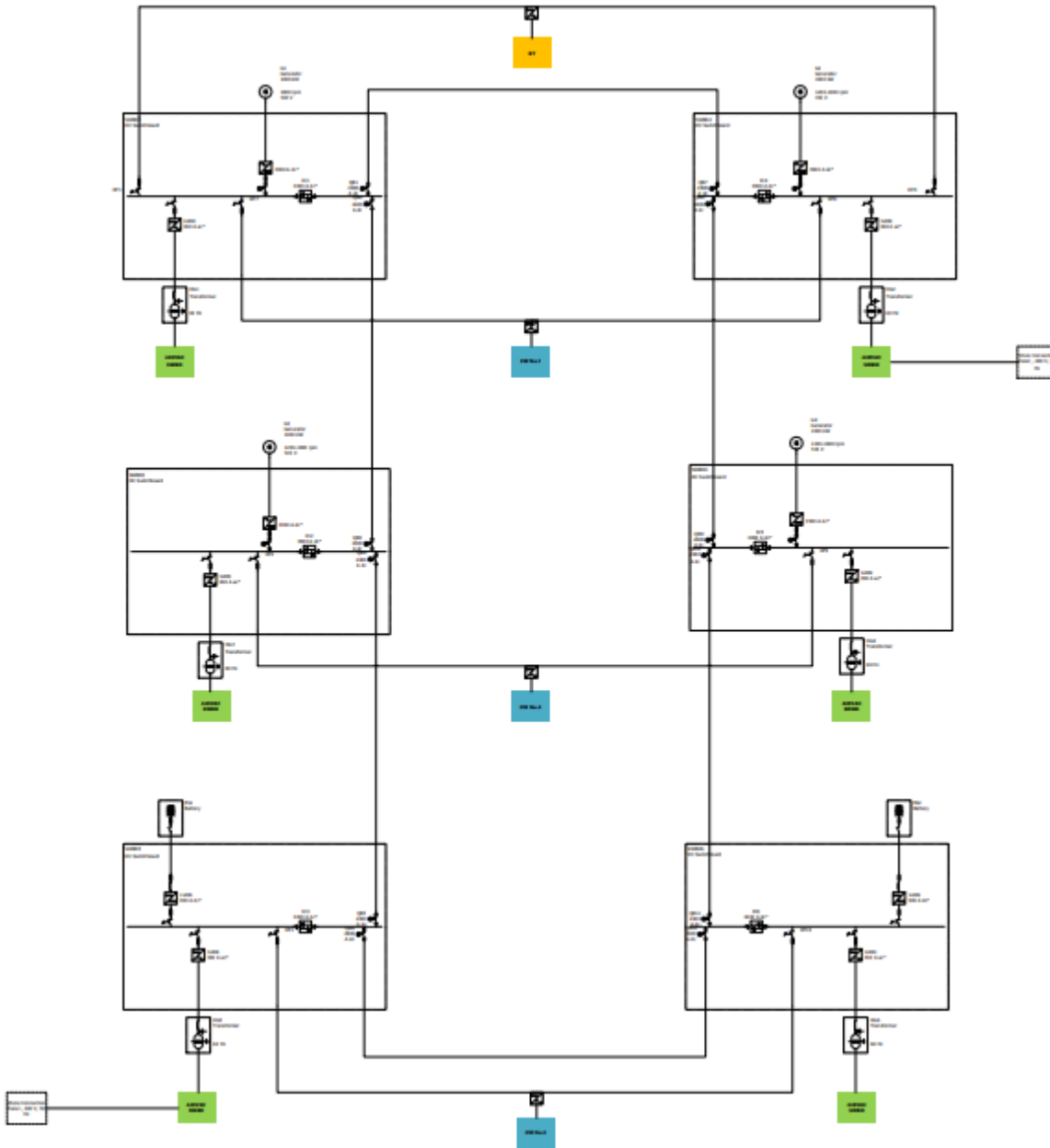
Under design av oppgavens konsept for DC-ZEDS var det flere faktorer som måtte tas hensyn til. På grunn av praktiske årsaker mente ABB (Personlig kommunikasjon, 25. oktober 2022) at å plassere DCSB i midten av ringen, med tilkobling til ringnettet på begge sider, ikke var en god løsning. Dette kunne gi høyere kortslutningsstrømmer. Videre ble nødvendige kriterier for systemet kartlagt: Den første faktoren måtte være systemets evne til å levere like mye effekt som dagens AC-fordeling. Den andre faktoren ble at alle DCSB skulle være autonome, og dermed ha sin egen forsyning med enten batteri eller generator. Deretter ble den tredje faktoren at store ulineære laster skal kobles rett på DCSB, da dette minimerer harmoniske forstyrrelser på AC-siden av nettet. Eksempler på slike laster er baugthruster og 'chill water'. Flere viktige faktorer som måtte tas hensyn til var også:

- Spredning av komponenter for *separasjon*.
- Dobling av komponenter for *redundans*.
- Feil i én sone skal ikke gå ut over resten av fordelingen.
- Kostnadsbesparelser i form av mengden komponenter.

Et utkast ble først skissert for hånd (vedlegg 1). Deretter begynte sparring med ABB for å forbedre det initiale designet. Endelig versjon av design er vedlagt i vedlegg 2. Denne ble tegnet i Visio av ABB, hvor de brukte sin eksisterende software til å beregne kortslutningsstrømmer, tap i fordelingen, vekt av anlegget og estimert pris.

4.1.2 Overordnet design

Foreslått DC-ZEDS består av seks soner koblet i ring. Hver sone kan opereres isolert fra resten av skipsnettet. Fire av sonene er koblet direkte på et generatorsett, og de to andre har egen forsyning fra batteribanker. Sone tre og sone seks har energilagring i form av batteribank. Energilagring gir mulighet for peak shaving og senker sannsynligheten for 'black ship'. Designet består av seks større, frittstående DCSBs, fremfor to hovedtavler og åtte lastsentre. Systemet får effekt fra VSDGs. Vekselstrømmen levert fra generatoren blir likerettet. Fra likeretteren flyter elektrisk effekt ut til DCSBs, videre ut i ringen, og til AC-fordelingene. Fordelingen kan sees under, i figur 12, og i vedlegg 2. Blå firkanter er 'chill water', grønne firkanter er AC-underfordelinger (lastsentre), og gul firkant er baugthruster.



Figur 12: Konseptuelt DC-ZEDS for fregatt.

4.2 Generatorene

I samtale med ABB (Personlig kommunikasjon, 25. oktober 2022) mener de at en generator tilsvarende MTU396 vil være en med variabelt turtall fra 1200 til 1800 RPM, som leverer merkeeffekt på 1000 kW og ha merkespenning på 720 V AC. ABB kunne ikke levere data på en spesifikk generator. Det vil være 4 generatorer, som i Nansen-klassen AC-fordeling, for å levere samme mengden effekt.

4.3 Spenning på nettet

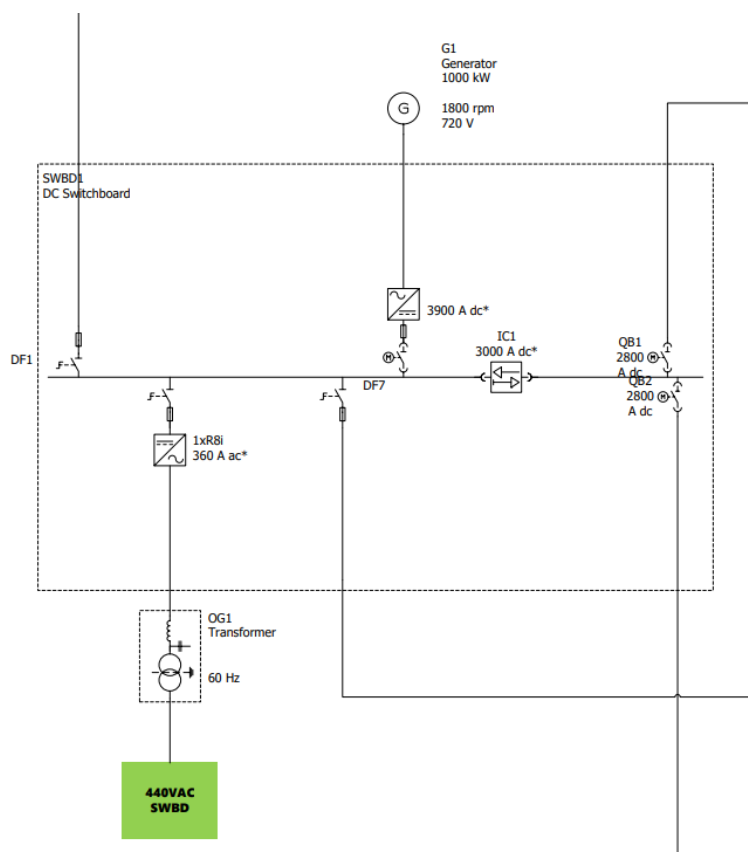
Den maksimale utgangsspenningen til en trefase 6-puls diodelikeretter bestemmes av formelen:

$$U_{dio} = U_N * 1,35 = 720V * 1,35 = 972V \text{ DC} \quad (4.1)$$

Ifølge ABB vil spenningen i ringen bli det samme som i DC-tavlene, og denne vil normalt ligge mellom 950 og 1050 VDC. Verdien varierer, og blir påvirket av batteritilkobling og øvrig spenningskoordinering (ABB, Personlig kommunikasjon, 08.11.2022).

4.4 Sone

En sone i ZEDS kan defineres som “a logical and physical grouping of generation, storage or consumption assets arranged in a common neighborhood” (Tironi et al., 2016). Det er flere måter å designe en sone. Hva hver sone inneholder avhenger av behovet til den respektive plattformen systemet installeres på. I figur 13, ser man en sone i oppgavens forslag til DC-ZEDS.



Figur 13: Sone 1 i DC-ZEDS

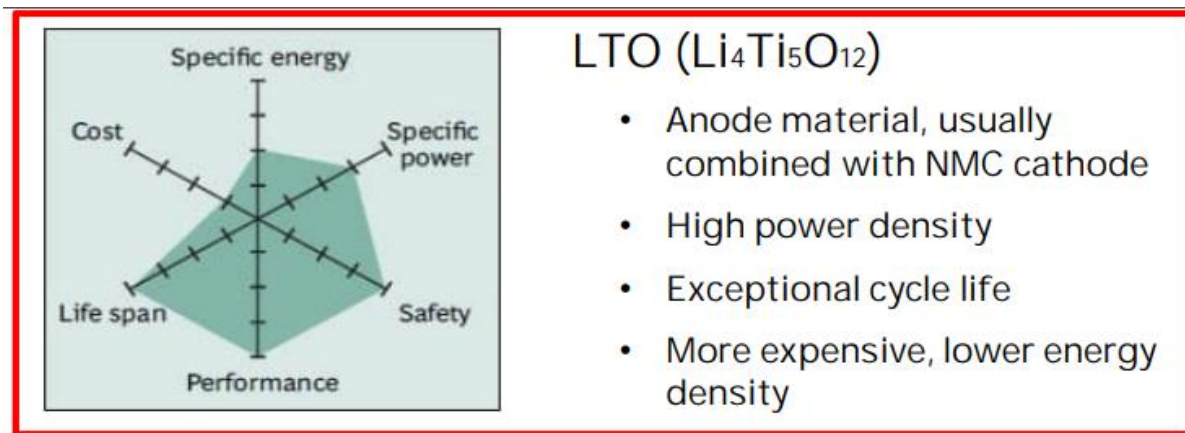
De seks sonene inneholder ett DCSB og ett ACSB. ACSBs blir forsynt fra DCSBs via en vekselretter og en transformator og er tiltenkt hotellast. Fire av sonene inneholder generator, to inneholder batteribank. ACSBs skal kunne kobles sammen på tvers av soner. Dette for å sikre at hotellast tilknyttet sone 1 fortsatt kan fungere selv om spenningsforsyningen i den sonen ikke fungerer eller er påslått. DCSBs skal forsyne likestrømslast og systemets store AC-forbrukere via egne vekselrettere. Store, viktige forbrukere er forsynt fra to soner for å skape redundans. I tegningen finnes baugthruster og 'chill water' som eksempler på slike. I hver sone er det IC som sørger for at feil i form av kortslutning ikke forplanter seg via ringen til andre soner, eller fra 'off-grid' til 'on-grid'.

4.5 Energilagring

I oppgavens design av DC-ZEDS er det inkludert energilagring. Dette er i form av en batteribank. Noen av fordelene energilagring tilbyr er muligheten for peak shaving, å operere med null utslipp i korte perioder, og mindre sannsynlighet for blackout. Peakshaving vil si at når effektbehovet på den elektriske fordelingen blir høyere enn vanlig i korte perioder kan batteribanken forsyne denne effekten. Batteribanken lades opp igjen når effektbehovet er mindre enn normalt. Dette eliminerer behovet for å starte opp enda en generator eller endre turtall og last på den allerede oppkoblede generatoren. Slik kan drivstoff spares og generatorsett skånes (ABB, 2022, 42).

Energilagring kan enten være en enkelt kilde koblet på ringen, som i figur 11, eller være flere mindre batteribanker som er tilkoblet spesifikke lastsentre. Tilkoblingen skjer via en bryter for å kunne koble inn og ut energilagringssystemet og en DC/DC-omformer for å gå fra spenningsnivået i batteribanken til spenningsnivået i nettet. Det er også sikring mellom DCSB og batteribanker for å beskytte mot feil. I foreslått design er to batteribanker koblet direkte til DCSB i sone tre og seks. Dermed har alle seks soner en energikilde som er uavhengig av intakt ring.

Batteriener som anvendes er i hovedsak litium-ion-batteri. Det er flere typer litium-ion-batteri, med forskjellige kjemisk design, å velge mellom når energilagring skal installeres på skip. Kriterier for valget av disse er: pris, levetid, ytelse, sikkerhet og effekt-kapasitet. En type som er aktuell å anvende er LTO. Analyse av denne typen batteri sees i figur 14.



Figur 14: Analyse av LTO-batteri (ABB, 2022, 129)

4.6 Overordnet kontrollsystem

Som nevnt i Avgrensninger går ikke oppgaven i dybden på kontrollsystem, logikk og programmering for elektrisk distribusjon. Likevel sees det på som nødvendig å gi en kort, overordnet beskrivelse av kontrollsystemet for DC-ZEDS. Dette fordi kontrollsystemet kan ha noe å si for driftssikkerhet og systemets ytelse i skadesituasjoner. Oppgavene til et styresystem for DC-ZEDS er å koordinere kraftelektronikken i systemet, styre brytere, overvåke feil og analysere effektbehov. Det er flere måter å gjøre dette. Videre vil en slik metode skildres.

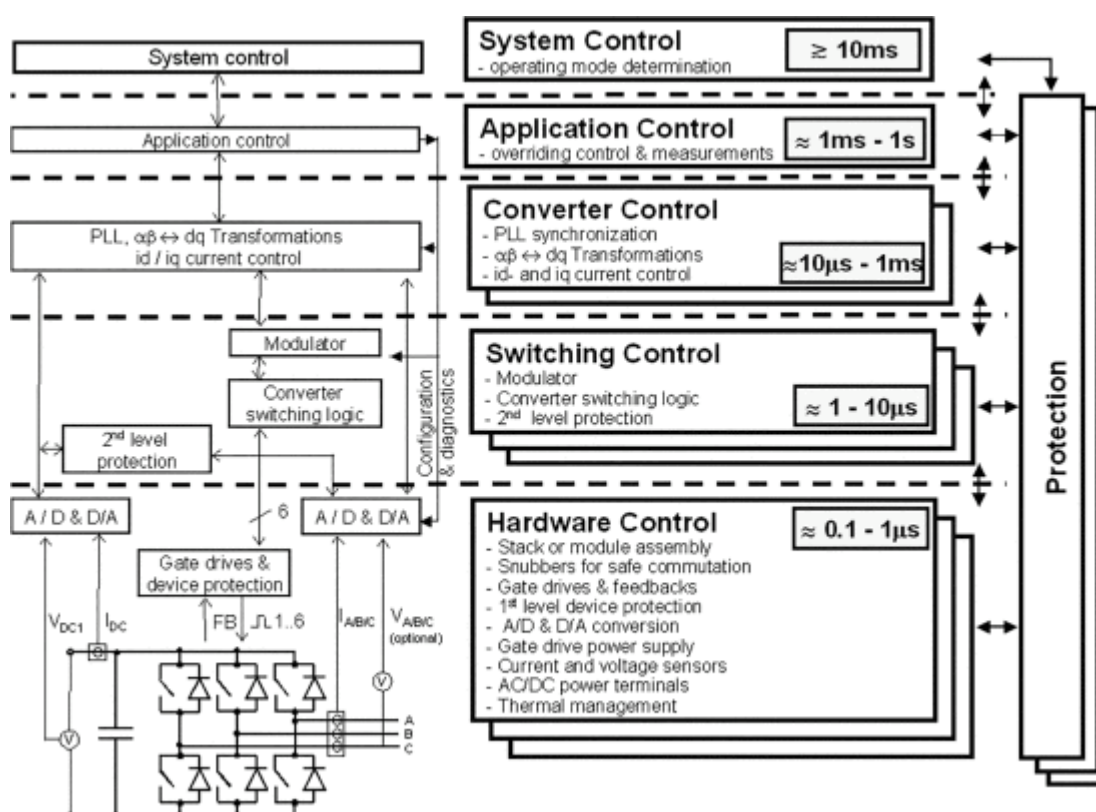
En struktur som kan anvendes er en kontrollsyklus i 5 lag. Lag 1 omtales som systemkontroll-lag, og skal bestemme operasjonsmodus. Dette innebærer kraftbehov og analyse av systemets integritet. Laget mottar status informasjon om anlegget og sender ut setting-signaler. Kommunikasjon med andre lag skjer via av fiberoptikk og logikk.

Lag 2 omtales som applikasjonskontroll-lag. Hovedoppgaven er å styre omformer-kontrollagene. Dette laget inneholder referansesignal-kontroller og likespenningskontroller. Lag 2 mottar målinger fra underliggende lag og bruker referansesignal-kontroller til å lage en referansestrøm. Likespenningskontroller er i hovedsak en PI-regulator, som brukes for å regulere DC-bus.

Tredje lag kalles 'converter control layer'. Her er hovedoppgaven kontroll av feedback. Laget filtrerer strømmålinger og spenningsmålinger. Her foregår også strømregulering for omformere ved å spore referanse strømmen i applikasjonskontroll-laget.

Videre i hierarkiet er “Switching control layer” eller 4. laget. Dette laget er et brukergrensesnitt mellom kontrollsystemet og hardwaren. Med hardwaren menes regulerbare komponenter i den elektriske fordelingen som brukes til å justere eller om dirigere effektforsyning i systemet. Dette innebærer kraftelektronikk, brytere og vern. I dette laget kan systemet diagnostiseres og logikk for brytere styres.

Femte og siste lag er ‘Hardware control layer’. Her foregår direkte overvåking av kraftelektronikk, vern og brytere. Det sørges også for trygg kommutering i kraftelektronikk samt grenser for di/dt og dv/dt (Sulligoi et al., 2020).



Figur 15: Oversikt over et kontrollsystem (kontroll av en likeretter) (Sulligoi et al., 2020)

Oppsummert er styringen i DC-ZEDS relativt kompleks, hvor flere lag kommuniserer med hverandre for å etablere tilstanden til systemet for å kunne regulere tidligere nevnte faktorer i kraftfordelingen.

5 Analyse og sammenligning

I en masteroppgave fra 2021 ble det presentert en generell sammenligning mellom AC-fordeling og DC-fordeling (Jerohin). Dette er en overordnet analyse, men den generelle sammenligningen kan gi en indikasjon på hva som forventes av de to fordelingene. Sammenligningen er oversatt og presentert i figur 16.

	KONSTANT FREKVENS AC-GRID	DC-GRID
SYNKRONISERING	Spenning, frekvens og fasevinkel	Spenning
REAKTIV EFFEKT	Økt dimensjonering av komponenter	Ikke påvirket
HARMONISKE FORSTYRRELSER	Må tas hensyn til	Ikke påvirket
SPENNINGSREGULERING	Transformatorer	Kraftelektronikk
ALTERNATIVE DC ENERGIKILDER	Kraftelektronikk + Transformator	Kraftelektronikk
KAPASITET FOR KORTSLUTNINGSSTRØMMER	Bra nivå	Begrenset grunnet kraftelektronikk
INNKJØPSKOSTNADER	Lavere	Høyere
DRIFTSKOSTNADER	Høyere	Lavere

Figur 16: Generell sammenligning mellom AC- og DC-grid (Jerohin, 2021)

Generelle faktorer kan indikere hva de ulike fordelingene kan gi, men det finnes andre faktorer enn disse som er viktig å ta hensyn til på et fartøy i KNM. Denne seksjonen vil derfor knytte sammen teori og innsamlet data i en analyse for å sammenligne driftssikkerhet, robusthet mot krigsskader, og drifts- og vedlikeholdsøkonomi.

5.1 Driftssikkerhet

Driftssikkerhet er en sentral faktor for tekniske installasjoner på krigsskip. Faktoren vil bli betraktet fra to synspunkt. Fordelingenes robusthet og brukervennlighet, samt personellsikkerhet. Ved å optimalisere driftssikkerhet på fartøy kan personskader forhindres, teknisk tilgjengelighet forbedres, og sannsynligheten øker for at fartøyet presterer som forventet.

5.1.1 Robusthet

Robusthet har betydning for hvor driftssikkert et system er, med hensyn på et fartøys tekniske tilgjengelighet, altså hvor stort tidsrom et fartøy er i stand til å driftes. Denne seksjonen vil ta for seg feilkilder for komponenter i de to respektive fordelingene. Robusthet blir vurdert for et fullstendig anlegg som ikke er blitt påført ytre skader. Robusthet for skadet anlegg omtales i kapittel 5.2.

I eksisterende AC-fordeling på Nansen-klassen er komponentfeil tilsynelatende ikke en stor utfordring. Dette ble avdekket i intervjuer. Når spurt om hvilke komponenter i kraftfordelingen som må vedlikeholdes eller byttes ut oftest var svaret «Det er i hovedsak rutinemessig vedlikehold av komponenter, lite utbytting. Delene som oftest må byttes er knyttet til automasjon. Omformere i tavler må byttes ut med intervall på 1 til 2 år» (Intervjuobjekt 1, intervju 1). Komponenter i selve kraftfordelingen krever altså lite utbytting og lite korrektivt vedlikehold, noe som tyder på robusthet i fordelingen.

Intervjuer, samt personlig kommunikasjon med ABB, indikerer at forskjellen mellom bryterne i AC-fordeling og DC-fordeling ikke nødvendigvis vil bli en merkbar utfordring. I intervju ble det spurt om hvilke deler av kraftfordelingen mannskapet har mulighet til å utbedre ved skader eller defekter. «Utbedringer mannskapet kan gjøre er å bytte brytere, både i tavler og i fordelingen» (Intervjuobjekt 1, Intervju 1). Dette viser at feil i brytere er noe som forekommer, også på AC, og er noe besetningen kan håndtere, samt at det er noen reservedeler på fartøyene. ABB mener også at selskapets DC-brytere er av samme funksjonelle standard som AC-brytere. Selskapet har et kommersielt motivert ønske om å sette sine produkter i best mulig lys, men deres utsagn regnes som troverdige, grunnet at selskapets renommé kan skades dersom de ikke fører transparent markedsføring. I tillegg er ikke beskyttelsesfilosofien i DC-ZEDS basert eksklusivt på brytere, men det anvendes også sikringer og IC. Sikringer kan respondere fortere på kortslutninger enn tradisjonelle brytere, noe som kan være positivt for driftssikkerhet. I innledningen ble det nevnt at Tyskland har vedtatt et nytt fregattprosjekt som skal anvende en likestrømsbasert fordeling fra ABB, noe som gir troverdighet til selskapet og deres produkter. Det er derfor lite trolig at brytere vil by på store problemer i DC-ZEDS, men noe usikkerhet er det enda rundt feilrate og kostnader. Dette vil bli beskrevet videre i 5.4.2.

DC-ZEDS er i større grad avhengig av kraftelektronikk enn AC-ringnett. I dette designet må all effekt omformes minst en gang før den når forbruker. Kraftelektronikk er i sin natur ømfintlig. «The large number of fragile elements in power electronics systems includes semiconductors, capacitors, magnetics, controllers, sensors and auxiliary devices. The failure of a single part causes downtime and maintenance cost» (Falck et al., 2018, 24). Om bord på fartøy kan relevante faktorer for svikt i slike komponenter være vibrasjoner, fukt, varme, støv og elektromagnetisk interferens. Sjokk-tester, gjennomført av ABB og NAMMO, er blitt gjort for modulene som inngår i en DC-fordeling (ABB, 2022). Disse ga tilsynelatende positive resultater, noe som kan senke usikkerheten rundt robustheten for disse komponentene. Utviklingen innenfor kraftelektronikk kommet langt, men det kan likevel potensielt gjøre DC-ZEDS mer utsatt for driftsfeil enn AC-ringnett.

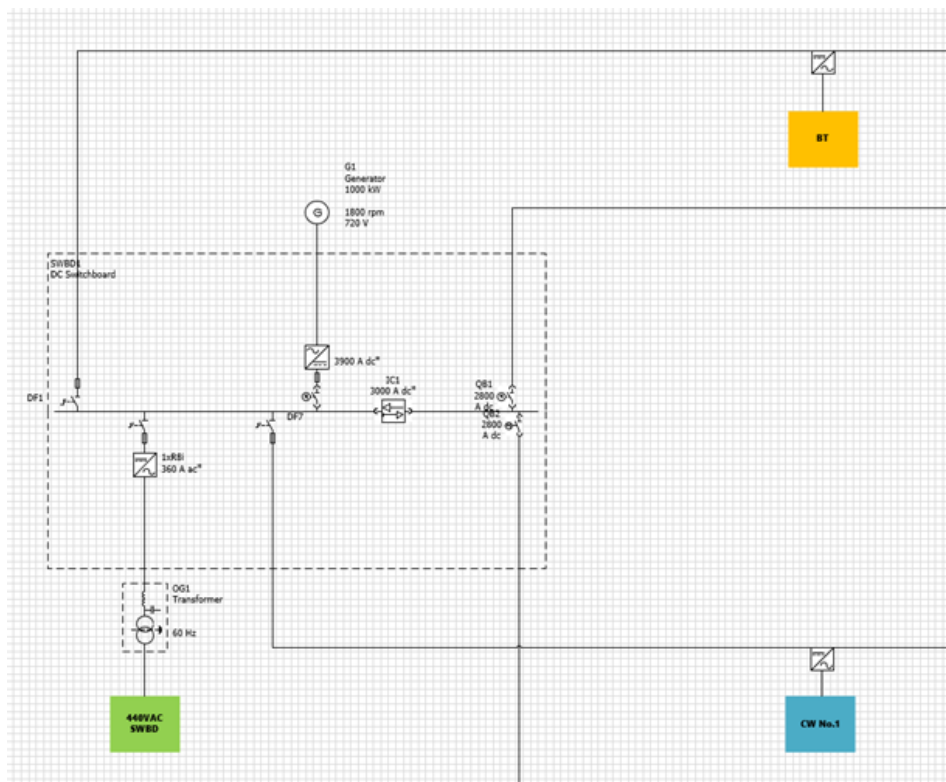
5.1.2 Brukerkompetanse

Et annet aspekt som er relevant ved implementering av DC-ZEDS er økt kompetansekrav hos besetningen. Herunder, kompetansekrav rundt kraftelektronikk. I intervju kommer det frem at det i skrivende stund er få slike komponenter i AC-fordelingen på Nansen-klassen: «Man har høye startstrømmer på sjøvannspumper uten frekvensomformer. 2 av de har f.omf., 3 av de har ikke» (Intervjuobjekt 3, Intervju 2). «Baugthruer har frekvensstyrt oppstart som reduserer høy startstrøm. Etter oppstart er den ikke frekvensdrevet» (Intervjuobjekt 1, Intervju 1). Videre ble det sagt at «Kraftelektronikk er ikke noe alle operatører er kjent med i dag, så implementering av dette vil kreve mer opplæring for operatører» (Intervjuobjekt 1, Intervju 1). Dette kan indikere at implementering av DC-ZEDS kan være utfordrende for KNM, slik besetningene er strukturert i 2022. Dersom DC-ZEDS skal implementeres på fremtidige fartøy i KNM er det trolig hensiktsmessig å endre rekruttering og utdanning slik at operatørene som skal betjene fartøyene har forutsetninger for å forstå, operere og vedlikeholde den omfattende kraftelektronikken i DC-ZEDS.

5.1.3 Personellsikkerhet

Arbeid med elektrisk kraftfordeling medfører risiko for operatøren. Sikkerhet i de to fordelingene er en viktig faktor i forbindelse med drift, spesielt i fredstid. Faremomentene som vil bli dekket i denne seksjonen er kortslutningsstrømmer og jordfeil.

ABB gjennomførte kortslutningsanalyse for foreslått DC-ZEDS-design i programmet ANSYS Twin Builder. Analysen er sammenfattet med forklaringer i vedlegg 3. Hoveddelen av systemet som ble simulert var sone 1, med tilkobling til baugthrunder og 'chill water 1'. Seksjonene er visualisert på figur 17. Oppsummert var komponentene 2xR8i på selve linken, 2xR8i på baugthrunder-drive og 1xR8i på CW 1. R8i-modulene er omformere. Ved tidligere målinger og simuleringer av ABB, fant de ut at én R8i-modul bidrar med ca. 70 kA til peak kortslutningsstrøm.



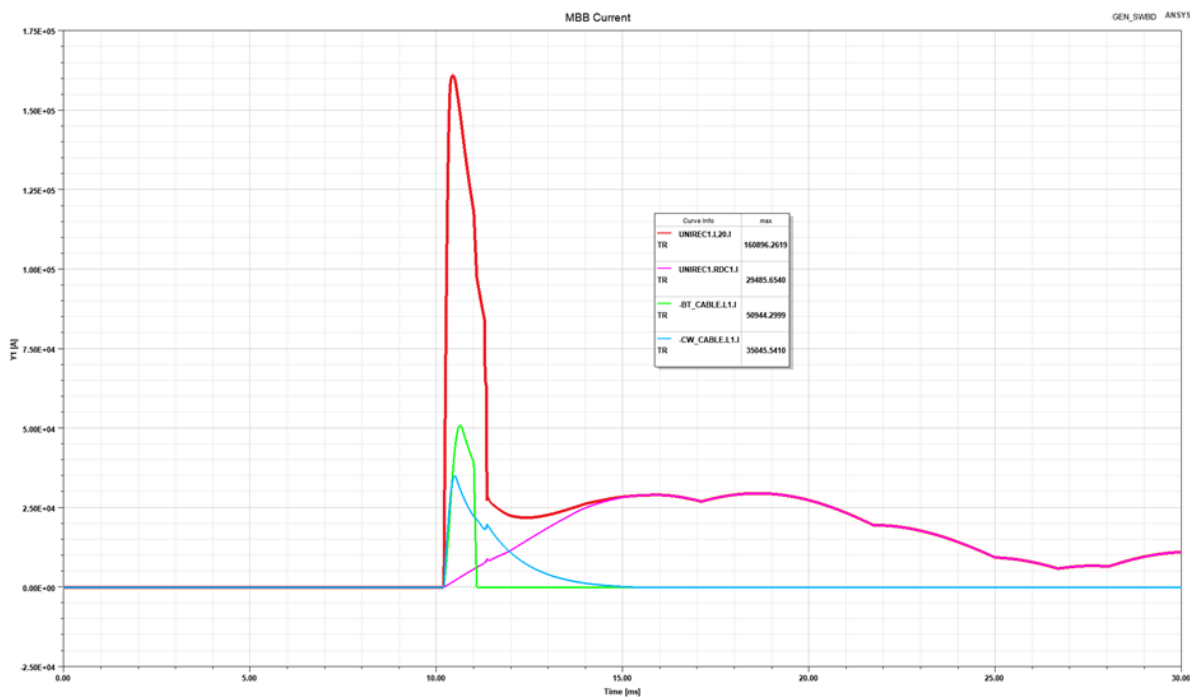
Figur 17: Utklipp av design for DC-ZEDS for Nansen-klassen: DC-tavle 1

Kortslutningsmessig er et DC-system sammensatt av en lang linje med kondensatorer i parallell.

Energien, E , som er lagret i skinnen er avhengig av kondensatorens størrelse, C , og spenningen, U , i DC-skinnen:

$$E = \frac{1}{2} * C * U_{DC}^2 \quad (5.1)$$

På figur 18 kan man se en ‘worst case’-kortslutning i DCSB, med en høy peak kortslutningsstrøm på 161 kA. Denne toppstrømmen er uavhengig av om generator er koblet til eller ikke, samt uavhengig av andre generatorers tilkobling til nettet, grunnet IC som beskytter hver tavle mot resten av nettet. Peak kortslutningsstrøm kommer derimot fra kondensatorene i omformerne i DCSB, samt bidrag fra omformerne til baugthruer og ‘chill water’. ABB forteller at dette er et absolutt ‘worst case’, og sier videre at dersom man antar at baugthruer og ‘chill water’ er direktekoblet, stjerne-delta eller med softstarter, så vil kortslutningsstrømmen fra to R8i OGC være maksimalt 140 kA, kanskje nærmere 100 kA, pga. impedans mellom feil og kilder (Personlig kommunikasjon, 02.12.2022). Feilstrømmen etter den første peaken består kun av generatorbidraget. Da er generatorens høyeste feilstrøm rett under 30 kA.



Figur 18: Simulert kortslutning på hoved bus-bar på DCSB.

Den røde linjen på figur 18 viser feilstrøm gjennom samleskinner i DC-link. Den første peaken kommer av tilkoblede R8i-moduler på DC-link, baugthruer og ‘chill water’, henholdsvis blå og grønn line. Deretter er feilstrømmen kun bestående av generatorbidraget (rosa linje). Dette bildet illustrer også forskjellen i hurtighet mellom kortslutningsstrøm fra kondensatorene i omformerene og fra generator (ABB, personlig kommunikasjon, 28.11.2022).

Kortslutningsberegninger og lysbueberegninger for Nansen-klassens AC-fordeling er BEGRENSET og etter føring fra FMA inkluderes ikke disse i oppgaven. Strømmene er dog i samme størrelsesorden som DC-ZEDS, og dermed nok til at verneutstyr må benyttes under bevegelse og opphold i spenningsatte tavlerom. Dette blir videre belyst i seksjon 5.2.1.

I analysen av jordfeil ble dokumenter om DC-fordeling sammenliknet med intervjuene som ble gjort angående elektrisk fordeling på Nansen-klassen. Dette for å avdekke hvilke utfordringer jordfeil skaper på Nansen-klassen i skrivende stund og hvilke aspekter av DC-ZEDS som skiller seg fra AC-ringnett.

Gjennom intervjuene som ble gjennomført om AC-fordeling på fregatt, kom det frem at jordfeil på Nansen-klassen ikke er et svart-hvitt tema. De oppstår relativt ofte, men har sjeldent blitt så store at de har vært til skade for utstyr eller personell. Når spurt om hvor stort problem jordfeil er om bord i dag var svaret "Lite, jordfeil oppdages før de blir farlige. Jordfeil kan muligens skade utstyr, men dette har ikke skjedd ofte." (Intervjuobjekt 1, Intervju 1). Dette indikerer at selv om jordfeil oppstår, så er de praktiske konsekvensene av dette minimale. Videre kommer det frem at jordfeil hovedsakelig oppstår mellom lastsenter og forbrukere, ikke mellom generatorer, hovedtavler og lastsentre. Når spurt om hvorvidt DC-ZEDS vil endre omfanget av jordfeil, svarte respondenten: «Tviler på at det vil påvirke så mye i selve fordelingssystemet. Problemet ligger stort sett hos forbrukerne. Kan ikke huske å ha vært ute for jordfeil på fordelingene mellom hovedtavler og lastsentre, altså før det går ned til forbrukere» (Intervjuobjekt 3, Intervju 2). Disse observasjonene peker mot at eksisterende AC-fordeling har jordfeilproblemer, men at disse er håndterbare for mannskapet og at jordfeil i systemet hovedsakelig oppstår i utstyret, ikke selve hovedfordelingen. Det er likevel verdt å studere hvilke forskjeller DC-ZEDS kan ha for jordfeil og omfanget av disse. Selv om problemet på Nansen-klassen vurderes til å ha lite konsekvenser er det likevel noe som brukes tid på å utbedre og noe som har potensiale til å forårsake skade.

I oppgavens forslag til DC-ZEDS er det transformator mellom hvert ACSB og DCSB.

Transformatorer fungerer som galvanisk skille, som betyr at jordfeil ikke forplantes fra ACSB til sonen. Mellom DCSB, sone og ring er dette ikke galvanisk skille. Verken IC eller kraftelektronikk vil eliminere jordfeil. Dette betyr at jordfeil som oppstår i DC-last eller store forbrukere, forsynt av egne likerettere, kan forplante seg ut av sonen. I eksisterende fordeling på Nansen-klassen er det ikke transformator mellom hovedtavler og lastsentre. Derfor er det større sannsynlighet for at jordfeil forplanter seg i fordelingen i AC-ringnettet på Nansen-klassen.

Det er kjent at kraftelektronikk ikke fjerner jordfeil, slik som en transformator gjør. Likevel kan kraftelektronikk også være en styrke i forbindelse med jordfeil. Eksempelvis kan vekselrettere, med sine ømfintlige delkomponenter, detektere feilstrømmer med lav verdi. «DC ground faults can be prevented using transformer-less (non-isolated) inverters, which 1) have sensitive electronics that can sense a fault as low as 300 mA and 2) do not have a grounded conductor, thus reducing the possibility of unintended current to ground» (FLUKE, n.d.). Det er flere indikasjoner på at jordfeil kan oppdages lettere i DC-ZEDS enn i eksisterende fordeling på Nansen-klassen. Dette grunnet tilstedeværelsen av lekkapasitans i AC-fordeling. I intervju kommer det frem at verdien for lekkapasitans kan være alt fra 40-80 microfarad på Nansen-klassen, avhengig av tavlekonfigurasjonen. Normalnivået for lignende AC-fordelinger er på mellom 1 og 10 microfarad. “Lekkapasitansen gjør at jordfeilstrømmene blir større før de oppdages av overvåkingen” (Intervjuobjekt 1, Intervju 1). I DC-ZEDS er ikke dette tilfellet, noe som kan gjøre det lettere for overvåking å oppdage jordfeil tidligere.

5.1.4 Harmoniske forstyrrelser og spenningskvalitet

I en AC-fordeling må frekvens, spenning og fasevinkel overvåkes og reguleres for å sikre effektstabilitet. I DC-fordelinger er det ingen reaktiv effekt eller frekvens, og det er derfor kun nødvendig å måle og regulere spenning for å sikre effektstabilitet. I praksis kan dette gi fordeler som at operatører ikke trenger å «fase» inn generatorer eller tavler på skipsnett. Dette skaper enkelhet.

En annen fordel DC-ZEDS oppnår er elimineringen av harmonisk forvrengning på hovedfordelingen. Dermed kan store, ulineære laster kobles på ringen eller DSCB, uten at dette har konsekvenser for spenningskvaliteten. Harmoniske forstyrrelser kan fremdeles eksistere på fartøyet, men lenger ute i fordelingen, på AC-siden. Når spenningen blir vekselrettet til ACSB er det igjen mulig å få spenningsforstyrrelser. Det kobles generelt ikke store forbrukere på disse underfordelingene, men summen av mange små kan likevel gi merkbare forvrengninger og forstyrrelser. Dette kan motvirkes med installasjon av filtre på omformere.

Personell i Marinen merker ingen problemer med harmoniske forstyrrelser om bord. I intervju med dem ble det sagt at harmoniske forstyrrelser ikke er merkbart for operatøren (Intervjuobjekt 1, Intervju 1). Dette kan skyldes at harmoniske forstyrrelser ikke er noe som blir målt kontinuerlig, og at det blir motvirket av filtre.

5.2 Battle damage control

“The essence of war is violence”- John Fisher.

For alle skip er skader og havari en fare. Derfor er det noe som bør vurderes når skip designes og konstrueres. Dette er særlig viktig for krigsskip. Som navnet tilsier skal krigsskip designes for bruk i væpnet konflikt, noe som tilsier større fare for skader, og må derfor kunne håndtere kravene dette medbringer.

5.2.1 Lysbuefare og beskyttelsesutstyr

Battle damage control innebærer operasjoner og reparasjoner i tavler. Høye kortslutningsstrømmer i en tavle medfører påbud av verneutstyr når man arbeider der. Dette kan være en utfordring for BDR. I intervju med personell i Marinen kommer det fram at:

Høy kortslutningseffekt, gjør at arbeid i tavlerom under skadesituasjoner må foregå iført sikkerhetsutstyr, noe som er ubekvent og kan gjøre at ting tar lengre tid. Sikkerhetsutstyr må også anvendes i alle tavlerom om det ligger mer enn en generator på tavlen. Arc-flash sensorer kan senke kravet til personlig beskyttelsesutstyr, men disse er det nå bruksforbud på. (Intervjuobjekt 1, Intervju 1)

Nøyaktig hvor høye kortslutningsstrømmene i tavlene er kan ikke avsløres i denne oppgaven, men de ligger rundt ‘worst case’-strømmene til DC-ZEDS, altså 160kA. Dette gjør arbeid i tavlerom og i lastsentre ubekvent og tungvint. Tid er også noe som potensielt ofres grunnet beskyttelsesutstyr. Operatøren må bruke tid på å kle seg opp og selve arbeidet som skal utføres kan bli mindre effektivt. Dette kan være en negativ side med dagens løsning. Det kan settes inn kurante arc-flash-sensorer for å senke kravet om personlig verneutstyr. Hvorvidt dette er en god nok løsning på problemet er uvisst. Gitt at fregattene generelt seiler med to generatorer tilkoblet, vil dette bety at det alltid må benyttes verneutstyr i tavlerom i sjøgående tilstand.

Beskyttelsesutstyr finnes i flere kategorier. Disse kan sees på figur 19, og bestemmes av lysbueenergien under en kortslutning. Figuren illustrerer at ved høy lysbueenergi kreves omfattende sikkerhetsutstyr, og at dette kan både ta lang tid å kle på seg, samt at det kan være ubekvemt å jobbe i.

PPE CATEGORY 1	PPE CATEGORY 2	PPE CATEGORY 3	PPE CATEGORY 4
<p>Minimum Arc Rating of 4 cal/cm²</p>  <p>Arc Rated Clothing:</p> <ul style="list-style-type: none"> • AR long-sleeve shirt and pants, or AR coverall • AR face shield, or AR flash suit hood • AR jacket, parka, rainwear, or hard hat liner (as needed) <p>Protective Equipment:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hard hat • Safety glasses or safety goggles • Hearing protection (with inserts) • Heavy-duty leather gloves • Leather footwear (as needed) 	<p>Minimum Arc Rating of 8 cal/cm²</p>  <p>Arc Rated Clothing:</p> <ul style="list-style-type: none"> • AR long-sleeve shirt and pants, or AR coverall • AR flash suit hood, or AR face shield and AR balaclava • AR jacket, parka, rainwear, or hard hat liner (as needed) <p>Protective Equipment:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hard hat • Safety glasses or safety goggles • Hearing protection (with inserts) • Heavy-duty leather gloves • Leather footwear 	<p>Minimum Arc Rating of 25 cal/cm²</p>  <p>Arc Rated Clothing:</p> <ul style="list-style-type: none"> • As required: AR long-sleeve shirt, AR pants, AR coverall, AR flash suit jacket, and/or AR flash suit pants • AR flash suit hood • AR gloves • AR jacket, parka, rainwear, or hard hat liner (as needed) <p>Protective Equipment:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hard hat • Safety glasses or safety goggles • Hearing protection (with inserts) • Leather footwear (as needed) 	<p>Minimum Arc Rating of 40 cal/cm²</p>  <p>Arc Rated Clothing:</p> <ul style="list-style-type: none"> • As required: AR long-sleeve shirt, AR pants, AR coverall, AR flash suit jacket, and/or AR flash suit pants • AR flash suit hood • AR gloves • AR jacket, parka, rainwear, or hard hat liner (as needed) <p>Protective Equipment:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hard hat • Safety glasses or safety goggles • Hearing protection (with inserts) • Leather footwear (as needed)

Figur 19: Illustrerende bilde for nivåer av beskyttelsesutstyr (Sherwood Protective Apparel, n.d.)

I oppgavens DC-ZEDS er det under ‘worst case’-tilfeller tilsvarende høye kortslutningsstrømmer som Nansen-klassens, mens spenningen er ca. 1000V. Dette medfører en oppkledning etter kolonne D i figur 20 ovenfor, noe som tilsvarer PPE kategori 2 i figur 19. Operatøren må bruke tid på å kle seg opp, slik som i dagens AC-fordeling. Dette gjelder for trygg, prosedyrebasert operering av spenningsatte tavler. Som det står i matrisen ovenfor skal man ikke koble opp, installere noe, sette noe sammen eller ta fra hverandre noe mens tavlen er spenningsatt dersom det ikke er teknisk nødvendig. Ekstra trening skal gjennomføres før man kan gjøre slikt arbeid, og dette er gjerne noe man øver på i Sjøforsvaret. Akkurat hvilken oppkledning som kreves under disse situasjonene gir ikke matrisen føringer på, annet enn at det må bli bestemt på forhånd av autorisert personell. At dette vil medføre PPE4-bekledningen fra figur 19, er en antagelse.

ABB Electrical Safety Matrix							
Specifications		A	B	C	D	E	F
Voltage: valid for AC and DC		<30V and	>30 ... 415V and	>30V ... 415V and	>415V...<1000V or	≥1 kV ... 57 kv or	≥7 KV ≤ 40 KV
Upstream overcurrent breaker (device)		≤16 A and	≤16 A and	>16 A ... ≤63 A or	>63 A or	>200 A or	n / a
Short circuit current		Ics ≤1 KA	Ics ≤1 KA	Ics >1 KA	Ics >7 KA	Ics >15 KA	n / a
HAZARD LEVEL	ACTIVITIES				Column D ¹ Clothing Combination ATPV ≤25cal/cm ²	Column E ² Clothing Combination ATPV ≤40cal/cm ²	Column F ³ Clothing Combination ATPV >40cal/cm ²
LIVE WORKING	Connecting, installing, assembling & dismantling, maintaining, greasing, covering & cleaning	These works may not be executed unless they are technically necessary. When required, additional training and level of competence, a specific operating instruction and special equipment (not covered by this standard) are necessary. Needs pre-approval and authorization by the LBU Manager					
PROCEDURES TO ACHIEVE SAFE WORKING	<ul style="list-style-type: none"> Switch off switchgear /distribution Identify equipment to be worked on; isolate and lock off & tag test circuits are dead apply earthing and short circuiting. protect against other live parts switch on switchgear /distribution Removing or inserting fuse cartridges which are not protected against direct contact. Examination works Diagnostic measurements	***Outerwear: Long-Sleeved Shirt: [ATPV (Arc Thermal Protective Value) rating of ≥8cal/cm ²] [PPE Category 2 (NFPA 70E) or Class 1 (IEC)] ***Outerwear: Trousers: [ATPV rating of ≥8cal/cm ²] [PPE Category 2 (NFPA 70E) or Class 1 (IEC)] PPE: Safety Glasses, Arc-Rated or Leather Gloves where required	Outerwear: Long-Sleeved Shirt: [ATPV rating of ≥8cal/cm ²] [PPE Category 2 (NFPA 70E) or Class 1 (IEC)] Outerwear: Trousers: [ATPV rating of ≥8cal/cm ²] [PPE Category 2 (NFPA 70E) or Class 1 (IEC)] PPE: Safety Glasses, [Voltage-Rated Helmet and Visor minimum (8cal/cm ²) and Balaclava or Neck Protector: ARC/FR minimum where required]. Electrical Gloves Class 00 = 500v and Leather Over-glove	Outerwear: Long-Sleeved Shirt or Jacket: [ATPV rating of ≥8cal/cm ²] [PPE Category 2 (NFPA 70E) or Class 1 (IEC)] Outerwear: Trousers: [ATPV rating of ≥8cal/cm ²] [PPE Category 2 (NFPA 70E) or Class 1 (IEC)] Balaclava or Neck Protector: ATPV rating of ≥8cal/cm ² PPE: Safety Glasses, Voltage-Rated Helmet and Visor minimum ATPV 8cal/cm ² , Ear Defenders, ARC Visor minimum (8cal/cm ²), Electrical Gloves Class 00 = 500v and Leather Over-glove	Underwear: ¹ Long-Sleeved Shirt: [ATPV rating of ≥8cal/cm ²] [PPE Category 2 (NFPA 70E) or Class 1 (IEC)] Trousers: [ATPV rating of ≥8cal/cm ²] [PPE Category 2 (NFPA 70E) or Class 1 (IEC)] Outerwear: Coveralls: [ATPV rating of ≥8cal/cm ²] [PPE Category 2 (NFPA 70E) or Class 1 (IEC)] Neck Protector or Flash Hood: ATPV rating of ≥25cal/cm ² PPE: Safety Glasses, [Voltage-Rated Helmet and Visor ATPV ≥25cal/cm ² or Above Flash Hood ATPV ≥25cal/cm ²], Ear Defenders, Electrical Gloves Class 0 = 1,000V and Leather Over-glove	Underwear: ² Long-Sleeved Shirt: [ATPV rating of ≥8cal/cm ²] [PPE Category 2 (NFPA 70E) or Class 1 (IEC)] Trousers: [ATPV rating of ≥8cal/cm ²] [PPE Category 2 (NFPA 70E) or Class 1 (IEC)] Outerwear: Coveralls: [ATPV rating of ≥25cal/cm ²] [PPE Category 3 (NFPA 70E) or Class 2 (IEC)] Neck Protector or Flash Hood: ATPV rating of ≥40cal/cm ² PPE: Safety Glasses, (Voltage-Rated Helmet and Visor ATPV ≥25cal/cm ² and Balaclava) or (Above Flash Hood ATPV ≥40cal/cm ²), Ear Defenders, Electrical Gloves Class 1 = 7,500v and Leather Over-glove	Underwear: ³ Long-Sleeved Shirt: [ATPV rating of ≥8cal/cm ²] [PPE Category 2 (NFPA 70E) or Class 1 (IEC)] Trousers: [ATPV rating of ≥8cal/cm ²] [PPE Category 2 (NFPA 70E) or Class 1 (IEC)] Outerwear: Switching Suit: [ATPV rating of ≥40cal/cm ²] [PPE Category 4 (NFPA 70E)] or [Class 2 (IEC)] Neck Protector or Flash Hood: ATPV rating of ≥40cal/cm ² PPE: Safety Glasses, (Voltage-Rated Helmet and Visor ATPV ≥40cal/cm ² or (Above Flash Hood ATPV ≥40cal/cm ²), Ear Defenders, and Arc-rated Gloves ATPV ≥40cal/cm ²
*WORKING NEAR EXPOSED LIVE PARTS	e.g. Work on equipment where other uninsulated parts are "LIVE" in the working area						
WORKING IN "DEAD" CONDITION OR WITHOUT ARC FLASH HAZARD	e.g. work on equipment where there is no electrical risk, where the electrical supply has been physically isolated and where there will be no intervention on the electrical installation	Outerwear - ABB's Minimum Standard: Long-Sleeved Shirt and Trousers or Coveralls, ATPV rating of ≥8cal/cm ² (PPE Category 2 NFPA 70E) or (Class 1 (IEC)) ***NOTE: When working at a greenfield site, without any exposure to arc-flash hazards as determined by the risk assessment, then the minimum arc-flash PPE is NOT required					

Figur 20: ABBs matrise for beskyttelsesutstyr under arbeid med elektrisk anlegg (ABB, personlig kommunikasjon, 02.12.2022).

5.2.2 Sammenligning av redundans

Den første forskjellen i redundans er antall tavler og lastsentre. I Nansen-klassens AC-fordeling må all effekt via en av to hovedtavler før effekten når lastsentre og forbrukere. Dette er en redundant konfigurasjon, ettersom hovedtavlen er dublert. I tillegg kan hovedtavlene splittes i to separate deler hver. Dette gir fire uavhengige tavledeler som hver blir forsynt av en generator. Likevel, effekt blir kun distribuert fra to fysiske rom. Dersom begge hovedtavlene skulle bli skadet eller ødelagt vil fartøyet være uten elektrisk kraftforsyning, noe som vil hemme fartøyets evne til å overleve, manøvrere og føre krig. I DC-ZEDS er ikke dette tilfellet. Her må ikke effekten via to hovedtavler, men leveres fra generatorene i fire av seks uavhengige soner. Dermed kan 3 av disse sonene være skadet eller ødelagt og skipet kan fremdeles ha 1MW tilgjengelig, samt eventuell energi i batteribank. I denne forstand er det altså økt redundans ved implementering av DC-ZEDS.

Dersom DC-ZEDS skal konstrueres er det gunstig å, så langt det lar seg gjøre, gjenskape redundans for kontroll og styring med redundans i selve kraftfordelingen. Avhengigheten DC-ZEDS har av kontroll og styring blir beskrevet i 5.2.3. Dersom redundans i styringssystemet kun er to sentrale prosesseringsenheter eller hjerner kan fremdeles skade på to komponenter skape store problemer for elektrisk distribusjon. Da blir gapet i redundans mellom DC-ZEDS og AC-ringnett mindre enn det potensielt kan være. Utvikling av software for kontroll og overvåking bør derfor vektlegge gjennomgående god redundans. Et separat styresystem for å drifte hver av de fire sonene med 'in-zone' generator, isolert fra ringen, bør også implementeres. Da vil mulighetene DC-ZEDS gir utnyttes best mulig.

5.2.3 Kontroll og overvåking

«However, this complicated power architecture that requires much more sophisticated control and coordination strategies, which needs to be carefully evaluated during early-stage design» (Kim et al., 2018, 3). Her kommer det frem at en utfordring ved DC-ZEDS er kontroll og overvåking av kraftfordelingen. Dette inntrykket forsterkes i personlig kommunikasjon med ABB hvor det kommer frem at en AC-fordeling har større mulighet til å driftes om styresystemet er skadet eller ødelagt. Grunnlaget for økt kompleksitet i DC-ZEDS er at kraftelektronikk må koordineres.

I intervjuene som ble gjennomført blir det fremstilt at automasjonen i AC-ringnettet på Nansen-klassen, altså kontroll og overvåking, er tilfredsstillende og fungerer som tiltenkt. Videre er det også mulighet for å drifte den elektriske fordelingen om automasjonssystemet er skadet. «Om IPMS er ute av spill kan systemet styres lokalt/manuelt» (Intervjuobjekt 2, Intervju 1). Når spurt om det oppleves utfordringer med PMS var svaret «Noen utfordringer med PMS i forbindelse med landstrøm. Altså kun til kai» (Intervjuobjekt 1, Intervju 1). Det er altså indikatorer som peker mot at kraftfordeling i DC-ZEDS er mer avhengig av intakt styresystem enn Nansen-klassen AC-fordeling. Det er heller ikke noen åpenbare feil og mangler for styring av AC-ringnett. Dette kan bety at styresystemet i DC-ZEDS er en sårbarhet i en skadesituasjon

5.2.4 Energilagring og BDC

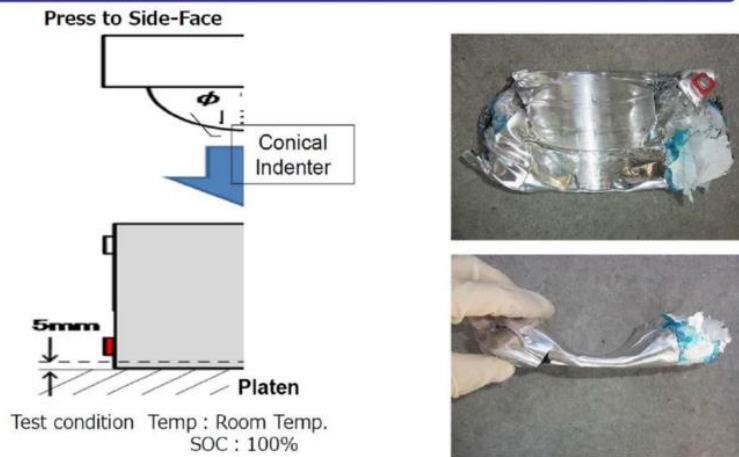
I design for DC-ZEDS som blir fremmet er to av sonene koblet til batteribank som består av litium-ion-batterier. Fordelene med dette er beskrevet i punkt 4.5, men implementering av denne teknologien kan også by på utfordringer. En fare knyttet til bruk av denne typen batterier er ‘thermal runaway’, en prosess hvor en skade på batteriet eller påføring av ytre varme gjør at batteriet begynner å utvikle varme på en ukontrollerbar måte som kan føre til selvantennning. Batteriene er også ømfintlig for fukt og vibrasjoner. «The close vicinity of water and ambient humidity are some of the challenges that are unique to the management of lithium-ion batteries on ships, together with the saline environment and occurring vibrations» (Gardner, 2018). Fukt kan bære salter og mineraler som kan reagere med litium og forårsake gassutvikling og skade på batteriene. Vibrasjoner kan forårsake skader på batteriene som igjen kan føre til ‘thermal runaway’. Denne faren er ikke til stede i dagens AC-fordeling, som ikke anvender energilagring i kraftdistribusjonen. I sistnevnte system er det kun mindre batterier, ikke av typen litium-ion, som forsyner UPS og automasjon.

Utfordringene knyttet til energilagring i DC-ZEDS kan mitigeres via valg av batteritype, konstruksjonstiltak og sikkerhetstiltak. Batteritypen ABB har foreslått for denne typen system er LTO-batterier som ble beskrevet i punkt 4.5. En styrke denne type batteri innehar er at de kan gjennomgå stor ytre skade eller kompresjon, uten at dette forårsaker selvantennning. Figur 21 viser en slik battericelle etter fullstendig kompresjon.

LTO battery

Technology & Safety features

No fire and no explosion occurs even when fully crushed



©ABB
October 13, 2022 | Slide 108

ABB

Figur 21: LTO-batteri (ABB, 2022, 108)

At batteriene ikke selvantenner betyr ikke at faremomentet knyttet til dem er eliminert. I skadesituasjoner på krigsskip er brannfaren stor. Dette er naturlig når de fleste maritime stridsmidler er eksplosive. Selv hvis batteriene ikke selvantenner er det fare for at eksterne årsaker antenner batteriene. Når batteriene først er antent, er de vanskelige å slukke. I teknisk dokumentasjon, levert av ABB, er det oppgitt at batteriene risikerer 'thermal runaway' om de oppnår en temperatur på over 180 grader Celsius. Dette er ikke en usannsynlig temperatur for batteriene å bli utsatt for dersom de blir eksponert for brann. Batteriene må altså plasseres i en mest mulig skjermet seksjon av skipet og robuste slukkemetoder må implementeres i tilknytning med energilagring. Ved implementering av DC-ZEDS må brannfare, EX-fare og plassbehov veies opp mot de tidligere nevnte fordelene ved energilagring for å vurdere om det er hensiktsmessig for det aktuelle prosjektet å ha batteribank eller ikke, grunnet faremomentene de kan skape.

5.2.5 BDR - Skadereparasjon

Evnen til å utføre skadereparasjoner under operasjoner er en fordel for krigsskip. Det øker evnen til å fortsette striden, selv med treffere i skipet. Skadet skip vil aldri være ideelt, men om anlegg og installasjoner er mulig for mannskapet å reparere, kan skadeomfang begrenses. Det er heller ikke sikkert at et skip i et krigsscenario har mulighet til å foreta verkstedsopphold.

Fra intervju som er blitt referert til tidligere, kommer det frem at det ikke er mange komponenter i kraftfordelingen på Nansens AC-ringnett som kan repareres av mannskapet ved skader. I hovedsak har operatører mulighet til å bytte ut brytere og anvende nødkabling. Nødkabling har vært en utfordring på AC-fordelingen, grunnet manglende sikkerhet ved innkobling. Dette er i skrivende stund blitt utbedret på flere av fartøyene. Dersom lastsentre, hovedtavler, generatorer eller lignende tar treffere er ikke mannskapet i stand til å reparere disse. Dette betyr at mindre skader på fordelingen kan håndteres, men større treffere mot lastsenter, tavler eller generatorer krever verkstedsopphold.

Hvordan muligheten for skadereparasjon vil være på et tilsvarende fartøy med DC-ZEDS er vanskelig å si med nøyaktighet. Under oppgaven har det ikke vært tilgang på slike skip og det ble ikke bygd modeller, men basert på litteratur og informasjon levert av ABB er det mulig å danne et relativt godt bilde av mulighetene for BDR. Likheter i BDR mellom AC-ringnett og DC-ZEDS er mulighetene for å erstatte brytere. Ifølge ABB (Personlig kommunikasjon, 25. oktober 2022), vil redundansen på et slikt DC-ZEDS være såpass bra at nødkabling er overflødig. Dette er en utslagsgivende faktor for at nødkablingen ikke er inkludert i oppgavens design for DC-ZEDS. Det antas at fartøyene vil seile med reservebrytere, slik som Nansen-klassen. Hovedforskjellen ligger igjen i kraftelektronikk. Skulle kraftelektronikk bli skadet eller ødelagt er det trolig noe operatøren i liten grad vil kunne reparere. Dette kan motvirkes med modulbaserte komponenter. Altså at om en komponent har lettere skader kan deler av komponenten lett byttes ut, i stedet for å bytte ut hele komponenten. Modulbaserte, lett utskiftbare komponenter gjør det lettere for operatører å gjøre en enkel reparasjon av utstyr, da man kan bytte komponent og sende den skadde på verksted. Dette vil dog kun fungere på spesifikke komponentskader og en modulbasert løsning vil trolig kreve ekstra vekt og lagringsplass om bord, hvilket allerede er mangelvare på krigsskip. Det er altså indikasjoner på at økt kompleksitet i DC-ZEDS betyr flere typer komponenter som kan skades i krigssituasjoner. Dette betyr at for å kunne utføre samme nivå av BDR i DC-ZEDS, som er mulig i AC-ringnett, må flere typer og større volum av reservedeler lagres om bord.

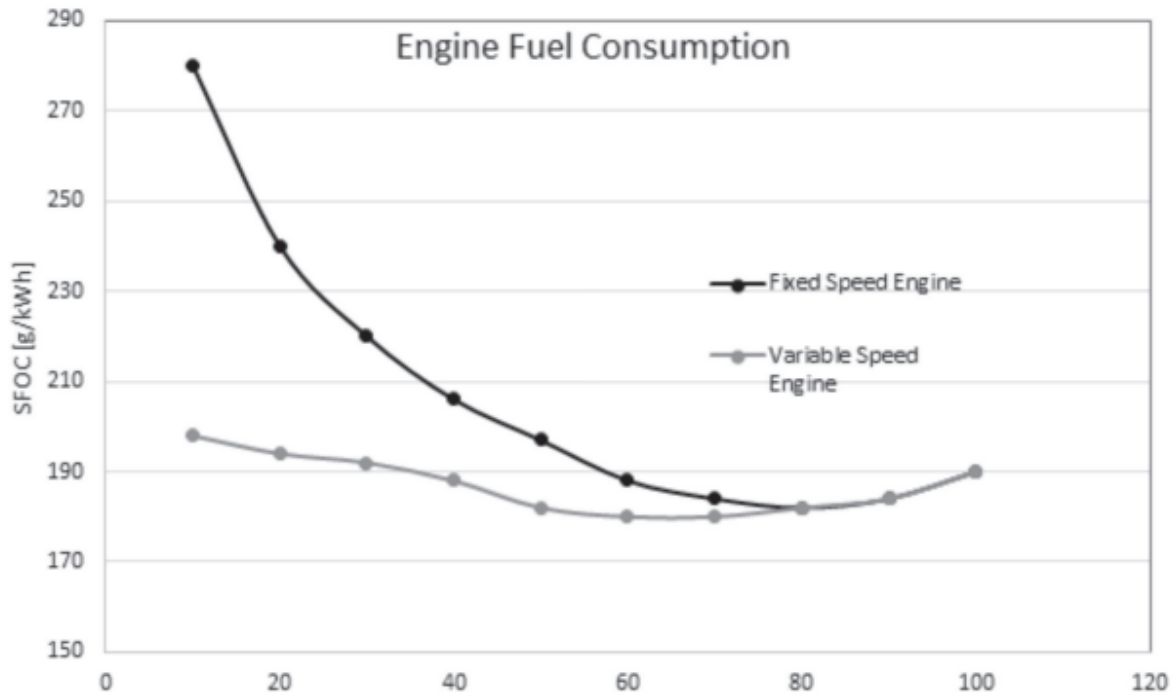
5.3 Driftsøkonomi

Driftsøkonomi er en viktig faktor for krigsskip. Penger spart oversettes til penger som kan brukes på mer ammunisjon, mer øving eller disponeres til andre avdelinger. Drivstoffbesparelser betyr også mindre utslipp av klimagasser og ett steg nærmere det grønne skiftet. Skiftet er allerede i gang i maritime sektor, med dielelektriske passasjerfartøyer med opptil 20% drivstoffbesparelser sammenlignet med tradisjonelle fremdriftssystemer (ABB, n.d.). Forsvarets fokus bør være på stridsevne fremfor miljøvern, men det er trolig at også denne organisasjonen opplever forventninger om å bli mer miljøvennlig i sin virksomhet i tiden fremover. I tillegg vil drivstoffbesparelser bety at et fartøy kan operere lenger uten bunkring.

Forbrenningsmotorer har varierende SFOC ved forskjellige driftsforhold. Hovedfaktorene i drivstofforbruk er last, og hvilket turtall dieselmotoren går på. Når frekvensen, og dermed også turtallet på generatoren, i en AC-fordeling er låst, vil det kun være lasten som styrer drivstofforbruket. Særlig ved lav last betyr dette dårlig verdi for SFOC. I en DC-fordeling kan generatorer kjøres med varierende turtall grunnet at de ikke er låst til 60Hz, og har dermed et bredere spekter med kjøremuligheter. Dette betyr mindre variasjoner i SFOC mellom høy og lav last (Kim et al., 2018, 2).

ABB mener at VSDG supplert med batteribank kan gi en drivstoffbesparelse på 15% (ABB, 2022, 98). Dette er basert på en NATO CODLAG fregattstudie, og er kun delvis sammenlignbart med Nansen-klassen. Siden Nansen-klassen har en CODAG-løsning, og ikke en CODLAG-løsning, er ikke estimatet på 15% besparelser direkte overførbart. I de to neste seksjonene vil det derfor presenteres beregninger for drivstoffbesparelse som er gjennomført spesifikt for Nansen-klassen.

Det har blitt gjort omfattende undersøkelser på drivstofforbruk for VSDG, kontra FSDG. Det kommer frem at SFOC varierer mer for en FSDG. Dette er fordi med en forhåndsinnstilt RPM har den et optimalt lastforhold som er opp mot 100%, gjerne 80% og høyere. En VSDG oppnår derimot gode SFOC-verdier i et større driftsområde. Dette illustreres i figur 22. Beregninger for denne figuren viser at ved ca. 35% last kan man spare omtrent 10% drivstoff. Fra 80% last er det tilsynelatende liten forskjell i SFOC.



Figur 22: Sammenligning av SFOC basert på lastprosent mellom VSDG og FSDG (Prenc et al., 2016, 89)

5.3.1 Utgangspunkt for sammenligning

Fra personell i Marinen (Personlig kommunikasjon, 27. oktober 2022) kom det fram informasjon om lastforholdene til Nansen-klassens generatorer. Det er generelt to forhold som trekker drivstoff over tid. Den ene er ved transitt, og den andre er med generator til kai. I sjøen går fregattene med to generatorer i drift. Da går en generator med ca. 55% last, mens den andre går med ca. 75% last. En operativ fregatt seiler i snitt 3500 timer i året. Til kai er én generator tilkoblet med ca. 75% last, i om lag 6 uker i året, hvilket tilsvarer 1008 timer.

I generatorens manual kom det fram spesifikt drivstofforbruk ved kontinuerlig stabil drift. Denne gjelder bare dersom drivstoffet samsvarer med “MTU Fluids and Lubricants Specification A001061” (MTU, n.d.). Verken drivstoffanalyser av generatorene eller generatormanualen var mulig å oppdrive i sin helhet, men fra personell i Marinen (Personlig kommunikasjon, 27. oktober 2022) ble det tilsendt et utklipp fra generatormanualen hvor det kommer fram at spesifikt drivstofforbruk er på 213 g/kWh, med en øvre grense på 224 g/kWh, under konstant belastning. Det regnes med at dette er en gjennomsnittlig SFOC for generatorene, men disse verdiene sees bort fra fordi dette vil gi et misvisende sammenligningsgrunnlag mot en VSDG. Dette fordi 213 g/kWh er en snittverdi, og som sett på figur 22 endrer en FSDG sin SFOC etter lastforhold. Ifølge håndboken skal drivstoffet også ha en tetthet på 820-860 kg/m³. Dette stemmer overens med bransjestandarden for marin gassolje med maksimum tetthet på 860 kg/m³ (Drivkraft Norge, 2021).

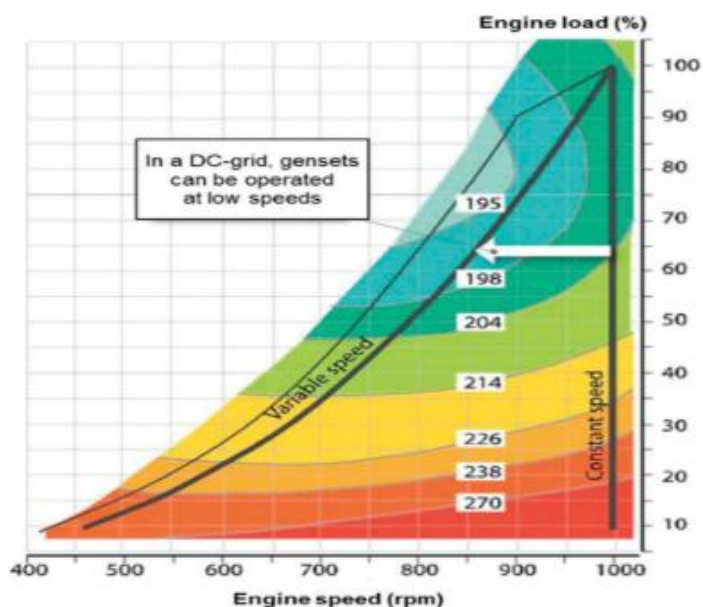
For å kunne regne på og sammenligne de to generatortypene må man ha samme utgangspunkt. Ut fra informasjonen framlagt om de respektive generatorene er dette forbeholdene som er tatt for beregningene:

- Drivstoffet som benyttes har tetthet på 860 kg/m^3
- En antatt drivstoffpris på 8 kr/L
- 2 generatorer i drift på hhv. 55% og 75% i 3500 timer per år i forbindelse med seilas
- 1 generator tilkoblet med 75% last i 1008 timer per år i forbindelse med kaiopphold

I de to neste seksjonene vil oppgaven ta for seg to forskjellige grafer som illustrerer SFOC til en VSDG, sammenliknet med en FSDG.

5.3.2 Sammenligning 1

Bildet under viser spesifikk brennverdi for de to typene diesलगenerator. Grafen gjelder for en VSDG med turtall 400-1000 RPM, og en FSDG med turtall 1000 RPM. De blå fargene indikerer optimal SFOC, og de røde fargene indikerer dårligst SFOC. Ved å lese av grafen kan man se at besparelser ved 30% last er ca. 20 g/kWh, ved 50% ca. 10 g/kWh, og ved 80% bare 5 g/kWh. Fra dette kan man se at de største besparelsene vil skje ved lav last.

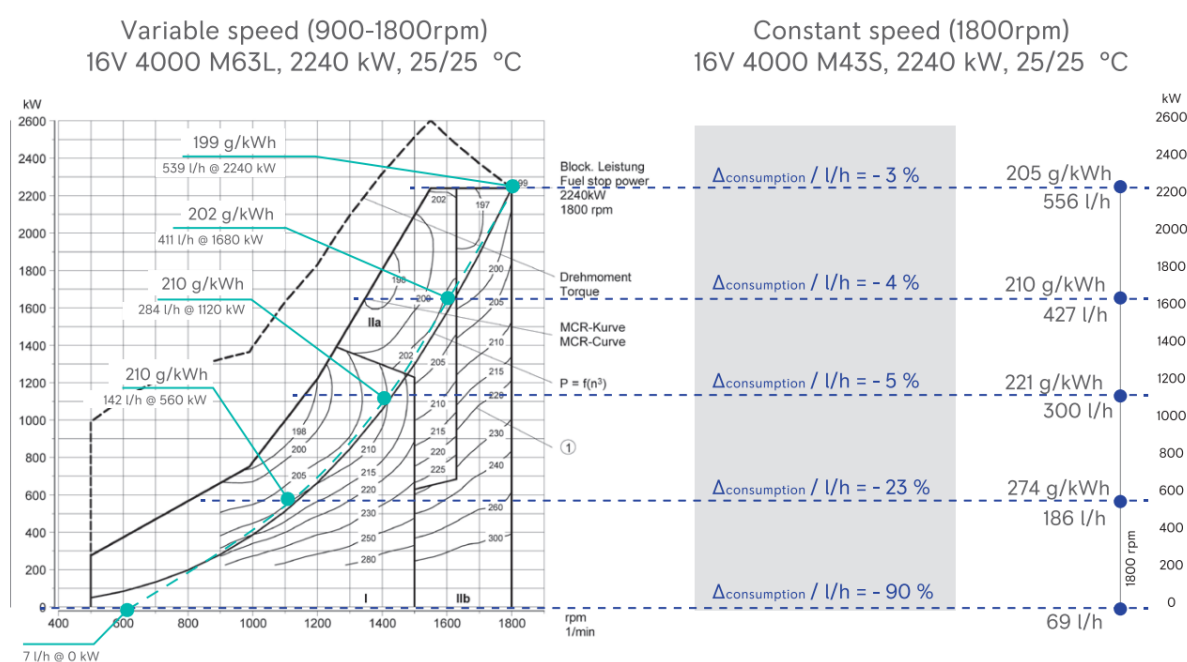


Figur 23: Eksempel på en generators drivstofforbruk (Kim et al., 2018, 2)

Med utgangspunkt i figur 23 kan man foreta generelle beregninger for en 1000 kW dieselgenerator. Disse beregningene viser at en gjennomsnittlig fregatt vil spare 435 000 kr per år i drivstoffkostnader på generatorene, hvilket er en kostnadsbesparelse på 4,3%. Beregningene kan sees i vedlegg 4.

En annen situasjon som kan trekkes fram er en 'klart skip'-situasjon. I dette tilfellet samtlige (4) generatorer på ca. 25% last (Intervju 1, Intervjuobjekt 2). Ved dette lastforholdet kommer oppgaven fram til en omtrentlig besparelse på 9,4% med en VSDG (Vedlegg 4).

5.3.3 Sammenligning 2



Figur 24: Sammenligning mellom SFOC for variable speed- og fixed speed dieselgeneratorer fra MTU (Habermaas & Thurner, 2020)

Denne grafen går ut fra en FSDG på 1800 RPM, og en VSDG med turtallsområde fra 900-1800 RPM. Generatorene er på 2240 kW, altså litt over dobbelt så kraftige som dagens MTU 396 på Nansen-klassen. Her er det allerede tegnet inn i grafen hvor mange prosent drivstoff det er mulig å spare med VSDG. Ved 75% last er dette 4%, og ved 50% er dette 5%.

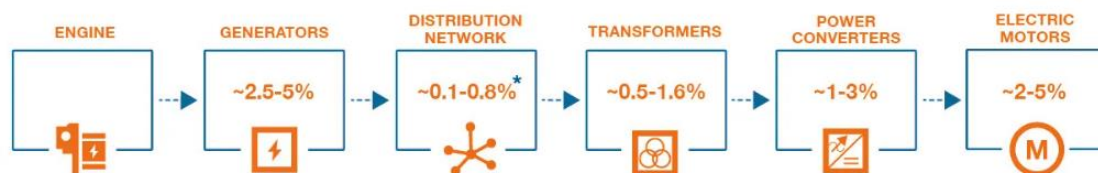
Med samme beregningsmetode som i sammenligning 1 estimeres besparelser på 490 000 kr per år per fregatt, hvilket er en prosentuell besparelse på 4,6%. For et 'klart skip'-scenario viser beregningene i denne sammenligningen en prosentuell besparelse på 23,4%.

5.3.4 Energilagring og økonomi

Batteribanker er ikke kun nyttig for å øke driftssikkerheten til fartøyet dersom det skulle oppstå problemer med fordelingssystemet eller generatorer, men de kan også bidra til drivstoffbesparelser. Dette er en av drivkreftene bak implementering av DC-fordeling på fartøy, hvor batteribanker er enklere å implementere enn i en AC-fordeling. Besparelsene kommer via 'peak shaving'. I intervju ble det spurt om fregattene ofte opplever 'peak-behov' for effekt. Her ble det avdekket at dette hovedsakelig forekommer ved bruk av baugthruster, som brukes til og fra kai, og i trange farvann (Intervjuobjekt 1, Intervju 1). 'Peak-behovene' er altså forutsigbare. Batterier kan lades opp når generatorer kjører med høy last og dermed god SFOC, og kobles til nettet når baugthruster skal brukes. Peakshaving er drivstoffbesparende fordi man slipper å starte en generator og kjøre denne på lav last, eksempelvis 30 %, og høy SFOC. Dette er trolig lite anvendbart på fregatt hvor peakene hovedsakelig forekommer grunnet bruk av baugthruster. Denne har merkelast på 1000 kW, altså, det samme som 100 % last for en generator. Dermed vil generatoren, som illustrert i figur 23, ha relativt god SFOC. Dette tyder altså på at energilagring ikke vil gi store besparelser på fartøy som Nansen-klassen.

5.3.5 Energitap i fordeling

Så langt i 5.3 har energisparing via implementering av VSDG for å forbedre SFOC blitt omtalt. Dette er ikke den eneste faktoren i elektrisk fordeling som påvirker hvor stor del av energi fra drivstoff som når forbrukere. Videre vil oppgaven ta for seg effekttap i elektriske komponenter i fordeling på Nansen-klassen fregatt og i DC-ZEDS. Først i form av en generell sammenligning mellom DC-fordeling og AC-fordeling, deretter en spesifikk sammenligning basert på tilgjengelig data. Sistnevnte vil ikke bli en fullstendig utredning av tap i de to respektive systemene, men heller en tilnærming basert på de største kjente tapene i systemet. Illustrasjon av effekttap i fordeling er å se på figur 25.



Figur 25: Potensiell energitap ved hvert steg i en elektrisk drivlinje (Johannesen & Heine, 2021)

En av drivkreftene bak implementering av DC-fordeling på skip er at konseptet lover mindre effekttap. Det er flere grunner til dette. Et viktig moment er at i DC-distribuering er det ikke reaktiv effekt, slik som finnes i AC. Dette betyr lavere strøm for å levere samme effekt ved samme spenning. Formelen for energitap i en overføring er:

$$P = I^2 * R \quad (5.1)$$

Lavere strøm ved samme motstand tilsier dermed lavere effekttap. For at motstanden skal være lik må kabellengden i de to systemene være tilnærmet like. At AC opptrer i frekvens gjør også at denne typen fordeling kan oppleve 'skin effect'. «The DC cable distribution does not experience skin effect problems like the AC transmission, because the frequency of the DC grid is 0 Hz» (Prenc et al., 2016, 90). 'Skin effect' er et fenomen hvor elektronene beveger seg mot eller på overflaten i stedet for i hele lederens tverrsnitt. Dette fører til at samme lengde og tverrsnitt av ledning gir høyere motstand dersom den fører AC. Dette kan lede til økt effekttap i AC-fordelinger. Disse fordelene blir ikke like utslagsgivende når det tas i betraktning at effekttap over kraftelektronikk ligger på rundt 2%. Strømmen i en DC-fordeling må omformes to ganger før den kan anvendes av de fleste forbrukere, noe som tilsvarer to ganger 2% effekttap.

Et annet aspekt ved DC-fordeling som kan senke tap er frekvensomformere, beskrevet i 2.4.2. Disse består som kjent av en likeretterdel og en vekselretterdel. Ved å eliminere likeretterdelen på en VFD vil det oppleves mindre effekttap, men som det kommer frem i Intervju 2, er det få frekvensdrevne motorer på Nansen-klassen i skrivende stund. Dette kan være en indikator på at denne forskjellen mellom AC-fordeling og DC-fordeling ikke vil være utslagsgivende for effekttap ved implementering av DC-ZEDS.

I vedlegg 2 er det oppgitt tap for tavlene i DC-ZEDS. For å regne ut tap i prosent for systemet er noen forenklinger og antagelser gjort. All effekt fra DCSB antas å måtte omformes før den når forbruker. Tap i kabler er ikke medregnet. Energi som går tapt i kjøling i tavlene regnes som det eneste tapet for komponentene i tavlene. Tap over omformere regnes som 2%, og tap over transformatorer regnes som 1%. Beregninger er vedlagt i vedlegg 7. I forenklete beregninger for DC-ZEDS ligger tap på rundt 7,4%.

Det lyktes ikke å gjennomføre målinger eller beregninger for tap på Nansen-klassen under utvikling av oppgaven. Dette ville blitt gjort ved å gjennomføre målinger av strøm og spenning i lastsentre, beregne effekt i hvert lastsenter fra disse målingene og sammenligne disse med effekten som ble levert av generatorene. Dette ville gitt et bilde av hvor mye effekt som går tapt i distribusjonen. Formel for effekt inn i lastsentre er:

$$P = \sqrt{3} * I * U * \cos\varphi \quad (5.2)$$

Via dokumentstudier kom det heller ikke frem en normalverdi for tap i AC-distribusjon på skip. Derfor vil ikke tap i fordelingene bli vurdert i drøfting og konklusjon, men vil bli inkludert som forslag til videre forskning.

Technical Summary		SWBD2	
Cooling Data Total Internal Water flow ¹⁾ : 88 l/min External Water flow ²⁾ : 467 l/min Nominal conditions: ¹⁾ 120 kPa, Antifrogen® L 25%, 40°C ²⁾ 36°C (Nominal Inlet Temperature) Extrenal coolant pressure loss: 150 kPa		Weight and Heat Dissipation Data Total Weight: 3526 kg Heat Dissipation into Air: 0,89 kW Heat Dissipation into Coolant: 18,36 kW	

Figur 26: Varmetap i DCSB 2 (Vedlegg 2)

Last Gen kW	DCSB Last	ACSB Last	DC last - tap	AC last - tap	Tap kW	Tap %
4000	40 %	60 %	1472,36533	2231,0842	296,550476	7,4137619
4000	60 %	40 %	2208,54799	1487,38946	304,062544	7,6015636
4000	30 %	70 %	1104,274	2602,93156	292,794442	7,31986105
4000	20 %	80 %	736,182664	2974,77893	289,038408	7,2259602
					Snitt	7,39028669

Figur 27: Tap i DC-ZEDS (Vedlegg 6)

5.4 Vedlikeholdsøkonomi

Vedlikeholdsøkonomi er noe som bør tas høyde for når nye fartøysklasser vurderes. Hensikten med vedlikehold er å «Opprettholde materiell stridsevne til lavest mulig kostnad» (Kilhus, 2020). Dette er viktig for å sikre, så langt det lar seg gjøre, at materialet fungerer når det kreves. Vedlikeholdsbehov påvirker hvor dyrt det er å drifte en klasse, eksempelvis hvor ofte en komponent må byttes ut og hvor dyr denne komponenten er. Vedlikeholdsbehov er en faktor for teknisk tilgjengelighet. Flere dager til kai eller i dokk gir færre dager på sjøen og dermed færre dager til trening, øving og operasjoner. Selv om teknisk tilgjengelighet er interessant å ta for seg, er det i hovedsak de økonomiske utgiftene knyttet til vedlikehold denne seksjonen vil ta for seg. På samme måte som i driftsøkonomi, kan det være forskjeller mellom hvilke økonomiske utfordringer som møter DC-ZEDS og AC-ringnett. Den første forskjellen som vil bli omtalt er forskjellen på generatorvedlikehold i de to systemene.

5.4.1 Vedlikehold av generatorer

I intervjuene som ble gjennomført kom det frem at den største økonomiske utgiften forbundet med vedlikehold av AC-ringnett trolig er vedlikehold og overhaling av generatorer. «Tungt vedlikehold av generatorer er trolig den største utgiften for dette systemet» (Intervjuobjekt 1, Intervju 1). Det er derfor interessant å undersøke om vedlikeholdsbehovet for generatorer påvirkes av hvorvidt levering av effekt skjer ved konstant turtall eller ved varierende turtall, via en likeretter.

I kommunikasjon med ABB og via litteraturstudie er det kommet frem at en fordel med DC-fordeling på fartøy er lavere vedlikeholdsbehov for generatorer. Det har dog vært vanskelig å finne informasjon eller utføre beregninger om hvor mye som spares i vedlikeholdskostnader for generatorer som leverer til DC-fordeling med varierende turtall, kontra de som leverer til AC-fordeling med låst turtall. I flere kilder oppgis det at vedlikeholdskostnader reduseres når generatorsett kan drives med variabelt turtall. Eksempelvis: «Reduced wear and tear on engines (up to 40% depending on engine)» (ABB, 2022, 41). Her er 'engines' forbrenningsmotorene som driver generatorene. Hva 40% redusert slitasje betyr spesifikt og hvordan dette vil påvirke vedlikeholdsintervaller, kom ikke frem i kommunikasjon med selskapet. Det er altså i denne oppgaven ikke noe definitivt svar på hvilke besparelser for generatorer som muliggjøres av implementering av DC-ZEDS, men det er indikasjoner på at noen besparelser vil forekomme. Mindre slitasje gir potensiale for å øke vedlikeholdsintervall.

5.4.2 Bytte av brytere

Et område hvor vedlikehold av DC-anlegg kan være dyrere enn vedlikehold av AC-anlegg, er brytere. Forskjellen mellom disse bryterne er beskrevet i 2.3. Disse forskjellene, samt at brytere for DC-kraftdistribusjon er mindre utbredt enn brytere for AC-kraftdistribusjon, gjør at DC-brytere er dyrere. Bryting av kontakt i bryteren må også skje raskere enn i en AC-bryter. Dette kan trolig lede til mer mekanisk stress for DC-brytere, noe som kan redusere levetid. «DC circuit breakers do exist to some extent but are more complex, larger and more expensive than the comparable AC circuit breakers» (Prenc, Cuculic, & Baumgartner, 2016). Det er altså indikasjoner på at brytere er en større utgift i et DC-anlegg. Denne oppgaven lyktes ikke med å finne et estimat for denne prisforskjellen. Feilrate på de respektive bryterne, pris på bryterne og antall brytere i de forskjellige anleggene er variabler som ikke ble avdekket under oppgaven.

5.4.3 Vedlikehold av kraftelektronikk

Et annet vedlikeholdsområde som skiller DC-ZEDS fra AC-ringnett er kraftelektronikk. Som nevnt tidligere er det få komponenter av denne typen i AC-fordelingen på Nansen-klassen. Dette er altså et område hvor det sannsynligvis blir dyrere å vedlikeholde DC-ZEDS. I likhet med de andre vedlikeholdsutgiftene har det vist seg vanskelig å komme frem til noe estimat på hva denne prisen vil være. I figur 28 er de forskjellige vedlikeholdsmomentene som må utføres med ulike tidsintervall. Data er for en enkelt likeretter mellom generator og DCSB. R betyr at delen må byttes ut, I betyr at delen må inspiseres, P betyr testing av ytelse for delen. Dette er preventivt vedlikehold som skal sørge for at komponenten ikke opplever uplanlagt nedetid.

Recommended annual actions by the user	
Connections and environment	
Quality of supply voltage	P
Spare parts	
Spare parts	I
Inspections by user	
Tightness of terminals	I
Dustiness, corrosion and temperature	I
Cooling liquid pipe connections	I
Coolant antifreeze concentration	P

Recommended every 2nd year actions by the user	
Inspection of coolant quality	P

	Years from start-up						
	3	6	9	12	15	18	21
Coolant							
Coolant draining and refill		R		R		R	
Cabinet fans and fan control board							
Cooling fans 230 VAC 50/60Hz			R			R	
Cooling fans 115 VAC 50/60Hz		R		R		R	
Common							
BSFC Cabinet side charging control board				R			
Aging							
Cabinet auxiliary power supplies				R			
Buffer module 24VDC +F276 Ride through function		R		R		R	

Figur 28: Preventivt vedlikehold for DC feeder units (ABB, 2021)

Noen momenter som kan dras ut fra denne tabellen er at flere underkomponenter av likeretteren må byttes ut i løpet av skipets livssyklus. Dette er kun for en likeretter i en sone. Det er en slik i hver sone, samt likerettere og annen kraftelektronikk. Dermed er det tydelig at for DC-ZEDS blir utbytte av komponenter til kraftomforming en større utgiftspost enn i AC-ringnett.

6 Drøfting

Denne delen av oppgaven vil drøfte de analyserte faktorene. For å kunne vurdere hvorvidt DC-ZEDS er en forbedring, sammenlignet med Nansen-klassens AC-ringnett, må fordeler og ulemper vektas mot hverandre. Videre vil det bli gjort vurderinger på hvor utslagsgivende fordelene og ulempene er ved de respektive designene. Grunnet at oppgaven tar for seg kraftfordeling på krigsskip, vektas fordeler som er utslagsgivende i krigssituasjoner høyt i denne vurderingen.

6.1 Generelle fordeler

Generelt er det flest fordeler med en DC-fordeling. Synkronisering av generatorer er enklere når det eneste å ta hensyn til er systemspenningen, ikke frekvens og fasevinkel. Til tross for at synkronisering blir lettere, sees ikke dette på som en stor fordel fordi. Systemet for innfasing i dagens AC-fordeling fungerer adekvat og kan gjøres manuelt om automasjonen svikter. Videre eksisterer det ikke reaktiv effekt i DC, som medfører at komponenter ikke trenger å dimensjoneres opp for å ta hensyn til denne. Dette er heller ikke av stor betydning i et krigsscenario, men en mindre fordel med hensyn på plassbruk. Harmoniske forstyrrelser er noe som heller ikke eksisterer i DC. Dersom de store forbrukerne som baugthruster og 'chill water' blir forsynt rett fra DC-hovedtavlene vil de største harmoniske forstyrrelsene som eksisterer i dagens system bli eliminert. Hvor store harmoniske forstyrrelser som faktisk eksisterer om bord er uvisst, og det kan være verdt å undersøke videre hvorvidt dette er et uoppdaget problem. Dette vil fortrinnsvis gi en liten forbedring til driften, men vil ikke tilføye noe i et krigsscenario. Til slutt er innkjøps- og driftskostnader. Innkjøpskostnadene blir angivelig høyere, men driftskostnadene blir lavere. Mulighetene for økonomiske besparelser kan dermed forekomme over tid.

6.2 Komponentforskjeller

Fordelen AC-ringnett har grunnet mindre avhengighet av kraftelektronikk, vurderes som lite utslagsgivende. Dette grunnet at en DC-fordeling allerede er planlagt implementert på tyske fregatter. På bakgrunn av dette og tidligere nevnte sjokktester, virker det som at teknologien er moden for militære applikasjoner. Utdanning og kompetanse rundt kraftelektronikk vil trolig heller ikke være en stor utfordring. Ett alternativ er å implementere en praksis hvor leverandør av systemet gjennomfører alt komplekst vedlikehold av kraftelektronikk, for å unngå å omstrukturere for kompetanseøkning. Et annet alternativ er å innføre nye kurs for utdanning av elektropersonell, samt en større andel av besetningen kan gjennomgå utdanning på bachelornivå eller teknisk fagskolenivå. Her vurderes sistnevnte alternativ som det gunstigste, da alternativ 1 ikke tar høyde for vedlikehold av uforutsette feil og BDR. En omlegging til DC-ZEDS kan altså tyde på en forhøyet kostnad ved utdanning og opplæring. Det vil trolig ta flere år fra et design er vedtatt til de ferdige fartøyene skal fases inn. Denne tiden kan utnyttes til å starte proaktiv kompetansebygging i KNM. En annen løsning på kompetanseproblemer kan være modulbasert kraftelektronikk. Back-up-moduler av komponentene kan lagres om bord, eller på Sjøforsvarets verksteder, slik at deler kan byttes uten at produsenten involveres. Dette er lett å gjøre og krever lite opplæring. Derimot kan reservedeler for modulbaserte systemer ta mye lagringsplass, noe som kan være ugunstig på et krigsskip. Oppsummert er det trolig håndterbare utfordringer knyttet til kraftelektronikk, men de må likevel adresseres før implementering.

Videre vurderes også fordelen AC-ringnett opplever rundt brytere som liten. Dette grunnet at bruken av sikringer kombinert med brytere og IC skal gi DC-ZEDS adekvat sikkerhet. Det er likevel et usikkerhetsmoment rundt prisen på DC-brytere, kontra AC-brytere. Dette vil sannsynligvis ikke gi en stor økonomisk ulempe når det største volumet av brytere er på AC-siden eller 'off grid'. Mulig redusert generatorvedlikehold og mindre drivstofforbruk vil trolig gjøre bryterprisen mindre utslagsgivende.

6.3 Batteribanker

Batteribanker medbringer risiko for å gjøre vondt verre i et krigsscenario. At dagens AC-fordeling nesten ikke har batterier vurderes derfor som positivt. Dette veies opp mot fordelene av å ha lagret energi som kan kobles på nettet ved 'black ship' eller ved redusert generatorkapasitet. I DC-ZEDS kan batteribanken være en større ulempe enn fordel. Selv ved treffere er det lite sannsynlig at 'black ship' forekommer. Ved klart skip vil alle generatorene være koblet på, og de fire sonene med "in-zone"-generator er koblet av ringen. Dette betyr at en treffer i en sone ikke vil påvirke spenningskvalitet eller forsyning i de andre, autonome sonene. Dette senker sjansen for 'black ship'. På grunn av dette regnes det som en styrke i krigssituasjoner å ikke ha større batteribanker om bord. Det kan derfor være hensiktsmessig å fjerne batteribankene fra designet.

6.4 Økonomi

De driftsøkonomiske fordelene som oppleves med DC-ZEDS er tilsynelatende ikke store, med et estimat på 5 % besparelser under transitt. Dette tallet ligger på rundt 20 % ved klart skip. Under transitt vil dette gi en omtrentlig besparelse på 435-490 000 kr per år per fregatt. Dette betyr at ved bruk av VSDGer på fem fregatter, over en periode på 30 år, kan Sjøforsvaret spare mellom 65 og 73 millioner kroner (vedlegg 4 & 5). Dette er et omtrentlig estimat, og varierer basert på drivstoffpris, og tar ikke hensyn til avvik i drift for de fire fregattene. Dette må sees i lys av innkjøpskostnadene til DC-ZEDS. Prisen på DC-tavlene som er designet i denne oppgaven ligger henholdsvis på 3,45 og 2,97 millioner kroner per tavle (ABB, Personlig kommunikasjon, 29.11.2022), totalt 19,74 millioner kroner for 6 DC-tavler. Dette er uten å regne med prisen for generatorene eller batteripakkene. Innkjøp av AC-ringnett vil være billigere, grunnet færre tavler og mindre kraftelektronikk. Derfor er det usikkert om driftsbesparelsene veier opp for dyrere innkjøp.

Peakshaving er vurdert til å gi lite besparelser for en fregatt med lastprofil tilsvarende Nansen-klassen, grunnet de få uplanlagte effekttoppene fregattene har. Besparelsene ved klart skip kan være en større fordel enn det fremstår som. Fregattene seiler lite med klart skip i fredstid, men dette kan endres ved en tilspisset sikkerhetspolitisk situasjon eller i et krigsscenario. Besparelser rundt klart skip har altså mulighet for å bli en større fordel under krise og krig enn i fredstid. I tillegg kan drivstoffbesparelser føre til økt utholdenhet for fartøyet. Oppsummert vurderes ikke den driftsøkonomiske fordelene med DC-ZEDS som stor, men heller ikke neglisjerbar, grunnet at noen besparelser forekommer og at disse kan bli større ved tilspisset, sikkerhetspolitisk situasjon.

Når det kom til vedlikeholdsøkonomi klarte ikke oppgaven å finne tall på eventuelle besparelser. Det er dermed vanskelig å trekke konklusjoner om hvorvidt økt vedlikeholdsbehov grunnet kraftelektronikk gir høyere kostnader, eller om mer skånsom drift av generatorsett fører til billigere vedlikehold. Av denne grunnen vil ikke vedlikeholdsøkonomi vektes tungt i drøftingen av de to designene.

6.5 Jordfeil

At jordfeil har mulighet for å bli oppdaget tidligere og kan isoleres i ACSB i hver sone er aspekter som er positive for DC-ZEDS, men den praktiske virkningen vurderes som liten. Jordfeil i Nansens AC-ringnett fremstilles som håndterbare i intervjuer. DC-ZEDS blir da, spesifikt for jordfeil, en forbedring av noe som ikke nødvendigvis trenger forbedring. I tillegg er transformatorene, som muliggjør isolering av jordfeil, en kilde for effekttap og ekstra vekt i fordelingen. Jordfeil kan fremdeles oppstå i DC-ZEDS, noe som vil si at forbedringen med å endre fordelingsdesign trolig ikke vil være stor. Aspektene rundt jordfeil vurderes altså som en svak fordel ved DC-ZEDS, men det er langt ifra det sterkeste argumentet for implementering, da forbedringen igjen kommer med noen ulemper.

6.6 Lysbuefare og beskyttelsesutstyr

Kortslutningssimuleringer viser at oppgavens DC-ZEDS har høye kortslutningsstrømmer. Det er avklart at opphold i spenningsatte tavlerom krever beskyttelsesutstyr i henhold til matrisen i figur 20. På den ene siden er det mulig å senke disse kortslutningsstrømmene ved å bruke 'soft starter' på baugthruster og/eller 'chill water', mens det på den andre siden vil være såpass høye kortslutningsstrømmer at en tyngre bekledning blir nødvendig uansett. Nansen-klassen kunne muligens unngått mengden bekledning i tavlerom ved hjelp av 'arc flash'-sensorer, men siden det er brukerforbud på disse, fungerer dette ikke i praksis. Alt dette tatt i betraktning gjør at det i DC-ZEDS vil måtte benyttes *minimum* samme personlige beskyttelsesbekledning som i dagens AC-fordeling, og vil ikke føre til en forbedring.

6.7 Redundans, Battle Damage Control & Repair

Økt redundans i DC-ZEDS er noe som trolig er en markant fordel. Dobling av antallet fysiske seksjoner i skipet som må ødelegges for å legge skipet spenningsløst, er noe som kan øke overlevelsesevnen til skipet betraktelig. Dette kan også dempe utfordringen med kraftelektronikk og BDR. Økt redundans kan gjøre behovet for BDR mindre. Dette vil også gjøre utfordringen med

beskyttelsesutstyr mindre i DC-ZEDS, grunnet at behovet for tavleoperasjoner under BDC er mindre sannsynlig. Man kan selvfølgelig diskutere hvor sannsynlig det er at begge hovedtavlene på Nansenklassen blir slått ut, eller hvor mye skip det er igjen å forsyne med effekt hvis dette skjer. Disse spørsmålene kan det være gunstig å gjøre egne studier på, men i rammene av denne oppgaven vil økt redundans bli sett på som en relevant styrke. Logikken, 'det er bedre å ha, men ikke trenge' enn 'å trenge, men ikke ha', kan anvendes her. God redundans kan være avgjørende i en krigssituasjon, og av denne grunnen vil økt redundans i DC-ZEDS betraktes som en substansiell forbedring. Behovet for flere reservedeler under BDR er en ulempe som ikke kan neglisjeres, men kan være mindre utslagsgivende.

Enkelhet i automasjon og mulighet for manuell operering er fordeler for AC-ringnett som kan være signifikant, særlig i skadesituasjoner. Skal DC-ZEDS implementeres bør denne svakheten erkjennes og det bør etterstrebtes å designe automasjon med god redundans, grunnet DC-ZEDS sin avhengighet av styring og overvåking.

7 Konklusjon

DC-ZEDS er bedre enn dagens AC-fordeling på flere områder. Frekvens og fasevinkel trenger ikke tas høyde for ved generatordrift- og innfasing. Samtidig vil drivstoffkostnader gå ned med minst 5 % ved bruk av VSDG, som kan føre til substansielle besparelser over tid. VSDG har også lavere vedlikeholdskostnader, men hvor store besparelser dette gir er usikkert. Videre gir også DC en eliminering av harmoniske forstyrrelser 'on grid'. Det vil være høyere grad av redundans i selve kraftfordelingen, grunnet fire autonome, adskilte soner med 'in-zone' generator, og to adskilte soner med 'in-zone' batteriforsyning, samt at systemet vil forbli selektivt. Dette kan oversettes til bedre overlevelsessevne i skadesituasjoner, dersom automasjon og overvåkning designes med tilsvarende redundans.

Dagens AC-fordeling har fremdeles noen fordeler over DC-ZEDS. AC er mindre avhengig av kraftelektronikk, komponenter som kan være en svakhet for driftssikkerhet og robusthet. Det er også trolig at disse komponentene krever mer eller annerledes opplæring av besetning for at operatører skal kunne operere og vedlikeholde systemene. Kraftelektronikk er også noe som kan kreve BDR og derfor bør reservedeler lagres på fartøyene. Disse komponentene kan samtidig skape vedlikeholdskostnader. AC-brytere er billigere, tar mindre plass og har mulig lavere feilrate. AC-fordelingen er også mindre avhengig av automasjon, og har bedre muligheter for manuell operering enn DC-ZEDS. Dette kan betraktes som en styrke i skadesituasjoner. Jordfeilovervåkingssystemet virker tilsynelatende godt nok på Nansen-klassens AC-ringnett, og jordfeil er tilsynelatende ikke et stort problem om bord. AC-ringnett er fri for risikoene som forbindes med batteribank i DC-ZEDS, samtidig som oppgaven vurderer at batteribanker i DC-ZEDS ikke vil være den beste løsningen. Faktorene driftssikkerhet og personellsikkerhet har i begge fordelingene sammenlignbare kortslutningsstrømmer og begge krever beskyttelsesutstyr for å kunne arbeide i tavlerom.

Basert på analyse og drøfting konkluderer oppgaven med at DC-ZEDS vil gi flere fordeler enn ulemper til fordelingssystemet, og at dette systemet dermed kan være en forbedring av den elektriske fordelingen om bord på en fregatt på størrelse med Nansen-klassen. De største faktorene som ledet til denne konklusjonen er økt redundans og mulighet for forbedret driftsøkonomi. Det er likevel noen utfordringer ved DC-ZEDS som må utforskes videre før et slikt system kan implementeres.

Anbefaling til videre arbeid

- Studere elektrisk fremdrift med et DC-ZEDS som forsyner både fremdrift og resten av fartøyet. Eksempler på fremdriftsmotorer er Azipod.
- Gjøre en studie som sammenligner AC-ZEDS med DC-ZEDS for å undersøke om AC-ZEDS kan tilby bedre 'battle damage control', mindre tap og billigere installasjon enn DC-versjonen.
- Sammenligne DC-ZEDS med andre design for DC-fordeling. For eksempel en standard DC-fordeling, som ligner med på dagens AC-fordeling.
- Konstruere fysisk modell av DC-ZEDS og gjennomføre mer omfattende tester av hvordan dette systemet presterer.
- Studere elektromagnetiske signaturforskjeller mellom AC-fordeling og DC-fordeling.
- Undersøke totale drivstoffbesparelser ved bruk av en DC-fordeling med elektrisk fremdriftslinje og akselgenerator.
- Sammenlikne innkjøpspriser for DC-ZEDS, AC-ringnett og AC-ZEDS.
- Studere hvorvidt DC-ZEDS tilfredsstillt krav (DNV, RAR, etc.)
- Utrede fullstendig vedlikeholdsbehov og kostnader for DC-ZEDS og AC-ringnett.

Referanser

- ABB. (2011, Desember 03). 6 Technical Guide, Guide to Harmonics with AC Drives. ABB. Retrieved oktober 31, 2022, from https://library.e.abb.com/public/8fe58b29dbbe7965c125795b002c63e2/NO_Technical_guide_No.6_REVC.pdf
- ABB. (2021, November 29). *ABB Library*. Retrieved from https://library.e.abb.com/public/1533f22413ce451a9b70302877f1323c/EN_ACS880-7107LC_HW_B_A4.pdf
- ABB. (2022, Oktober 13). ABB Coast Guard and Navy FMA.
- ABB. (n.d.). *Norwegian Breakaway - Marine References*. Retrieved November 1, 2022, from ABB: <https://new.abb.com/marine/marine-references/norwegian-breakaway>
- AspenCore. (n.d.). *Full Wave Rectifier and Bridge Rectifier Theory*. Retrieved November 16, 2022, from Electronics Tutorials: https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_6.html
- Berthling, F., & Thomassen, P. (2018). Jordfeilovervåking på Nansen-klasse fregatter. Sjøkrigsskolen.
- Blaabjerg, F., & Round, S. (2021, August 26). *Power Electronics: Revolutionizing the world's future energy systems*. Retrieved November 9, 2022, from Hitachi Energy: <https://www.hitachienergy.com/ch/de/news/perspectives/2021/08/power-electronics-revolutionizing-the-world-s-future-energy-systems>
- Buitelaar, H. (2022, May 9). *Damen Naval to employ DC-grid power generation and distribution system on board of German Navy F126 frigates*. Retrieved November 2, 2022, from Damen: <https://www.damen.com/insights-center/news/damen-naval-to-employ-dc-grid-power-generation-and-distribution-system>
- Drivkraft Norge. (2021, Februar). *Norsk bransjestandard for drivstoff og fyringsprodukter Revidert februar 2021*. Retrieved November 9, 2022, from Drivkraft Norge: <https://www.drivkraftnorge.no/siteassets/dokumenter--filer/diverse-dokumenter/rev-bransjestandard-februar-2021.pdf>
- Electrical Technology. (2021). *VFD (Variable Frequency Drive) - Working, Types & Applications*. Retrieved November 17, 2022, from Electrical Technology: <https://www.electricaltechnology.org/2021/11/vfd-variable-frequency-drive.html>
- Evans, P. (2020, April 25). *The Basics of Power Inverters Explained*. Retrieved October 31, 2022, from The Engineering Mindset: <https://theengineeringmindset.com/power-inverters-explained/>
- Evans, P. (2020, April 25). *Variable Frequency Drives Explained - VFD Basics IGBT inverter*. Retrieved October 31, 2022, from The Engineering Mindset: <https://theengineeringmindset.com/variable-frequency-drives-explained/>
- Falck, J., Felgemacher, C., Rojko, A., Liserre, M., & Zacharias, P. (2018, Juni). Reliability of Power Electronic Systems: An Industry Perspective. *IEEE Industrial Electronics Magazine, Volume 2*(no. 2), 24-35. Retrieved Oktober 2022
- FLUKE. (n.d.). *The hidden hazards of ground faults in PV systems*. Retrieved November 21, 2022, from Fluke Corporation: <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/grounding/dc-ground-faults-pv-systems>

- Gardner, E. (2018, Mai 30). *Ship Techonology*. Retrieved from Analysis: <https://www.ship-technology.com/analysis/lithium-ion-batteries-new-safety-issue-ships/>
- Grønmo, S. (2020, November 3). *kvalitativ metode – Store norske leksikon*. Retrieved October 28, 2022, from Store norske leksikon: https://snl.no/kvalitativ_metode
- Grønmo, S. (2021, November 7). *kvantitativ metode – Store norske leksikon*. Retrieved November 1, 2022, from Store norske leksikon: https://snl.no/kvantitativ_metode
- Gundvaldsen, I., & Rosvold, K. (2019, August 27). *likeretter – Store norske leksikon*. Retrieved October 31, 2022, from Store norske leksikon: <https://snl.no/likeretter>
- Habermaas, J., & Thurner, J. (2020, June 25). *Variable Speed Generator Sets Offer Advantages for Commercial Ships*. Retrieved November 28, 2022, from mtu Solutions: <https://www.mtu-solutions.com/cn/en/technical-articles/2020/variable-speed-generator-sets-offer-advantages-for-commercial-sh.html>
- Jerohin, A. (2021, Desember 3). DC vs. Variable Frequency AC - a Grid Comparison for a Marine Modular Energy System. Yrkehögskolan NOVA. Retrieved November 24, 2022, from https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/512572/Jerohin_Aleksi.pdf?sequence=2
- Johannesen, P., & Heine, U. (2021, November 17). *Dispelling the myth of high losses in modern electrically enhanced propulsion systems*. Retrieved from Webområde for Wartsila: <https://www.wartsila.com/insights/article/dispelling-the-myth-of-high-losses-in-modern-electrically-enhanced-propulsion-systems>
- Kilhus, G. (2020). Vedlikehold av marinefartøy i Sjøforsvaret. Bergen.
- Kim, K., Park, K., Roh, G., & Chun, K. (2018). DC-grid system for ships: a study of benefits and technical considerations. In *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs and Shipping* (pp. 2:1, 1-12). Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST) og Korean Society of Marine Environment and Safety (KOSOMES). Retrieved from tandfonline.com
- LastMinuteEngineers.com. (n.d.). *The Full-Wave Rectifier - Last Minute Engineers*. Retrieved November 16, 2022, from Last Minute Engineers -: <https://lastminuteengineers.com/the-full-wave-rectifier/>
- Mohan, N., Undeland, T., & Robbins, W. P. (1995). *Power Electronics: Converters, Application, and design* (2nd edition ed.). John Wiley & Sons, INC.
- MTU. (n.d.). *Fluids and Lubricants Specifications*. Retrieved October 28, 2022, from mtu Solutions: https://www.mtu-solutions.com/content/dam/mtu/download/technical-info/betriebsstoffvorschrift_en/A001061_40E.pdf/_jcr_content/renditions/original./A001061_40E.pdf
- Norge: Institutt for elkraftteknikk. Retrieved September 2022, from ntnuopen.ntnu.no: <http://hdl.handle.net/11250/257477>
- Prenc, R., Cuculic, A., & Baumgartner, I. (2016). Advantages of using a DC power system on board ship. (52), 83-97. Retrieved November 18, 2022, from <https://hrcak.srce.hr/file/251458>
- Roderick, A. (2021, March 5). *AC and DC Circuit Breakers for Overcurrent Protection - Technical Articles*. Retrieved October 28, 2022, from EE Power: <https://eepower.com/technical-articles/ac-and-dc-circuit-breakers-for-overcurrent-protection/#>
- Sherwood Protective Apparel. (n.d.). *Arc Flash Category*. Retrieved December 1, 2022, from Sherwood Protective Apparel: <https://sherwoodsafety.com/arc-flash-category/>

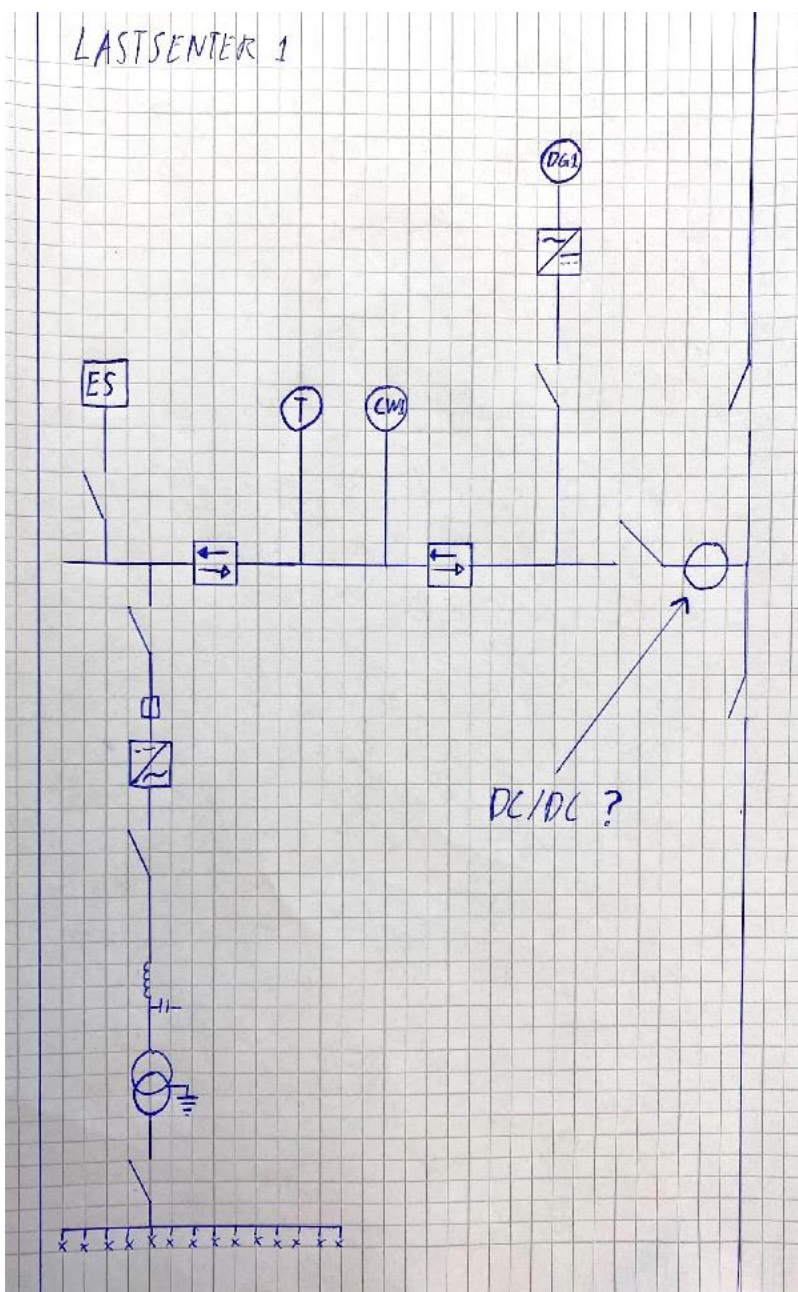
- StudyElectrical.com. (2014, May 23). *Methods of Arc Extinction in Circuit Breaker*. Retrieved October 31, 2022, from Study Electrical: <https://studyelectrical.com/2014/05/principles-and-methods-of-arc.html>
- Sulligoi, G., Bosich, D., Vicenzutti, A., & Khersonsky, Y. (2020, Juni 1). *Design of Zonal Electrical Distribution Systems for Ships and Oil Platforms: Control Systems and Protections*. Retrieved November 1, 2022, from ieeexplore: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9104848&tag=1>
- Sæbø, A. (2021). Fordelingsanlegg og elektriske tavler. Retrieved November 07, 2022, from OneNote.
- Tironi, E., Corti, M., & Ubezio, G. (2016, Februar 25). *Zonal Electrical Distribution Systems in Large Ships: Topology and Control*. Retrieved November 2, 2022, from ieeexplore: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7415252&tag=1>
- Vannier, J. C. (2007, Juni). *Fig. 3. Three-phase bridge diode rectifier with a high inductive...* Retrieved November 16, 2022, from ResearchGate: https://www.researchgate.net/figure/Three-phase-bridge-diode-rectifier-with-a-high-inductive-electrical-power-source-and-a_fig1_4261250
- Zhang, B. (2019). Smart Grid On-line Impedance Identification. NTNU. Retrieved november 02, 2022, from <http://hdl.handle.net/11250/2625694>

Vedlegg

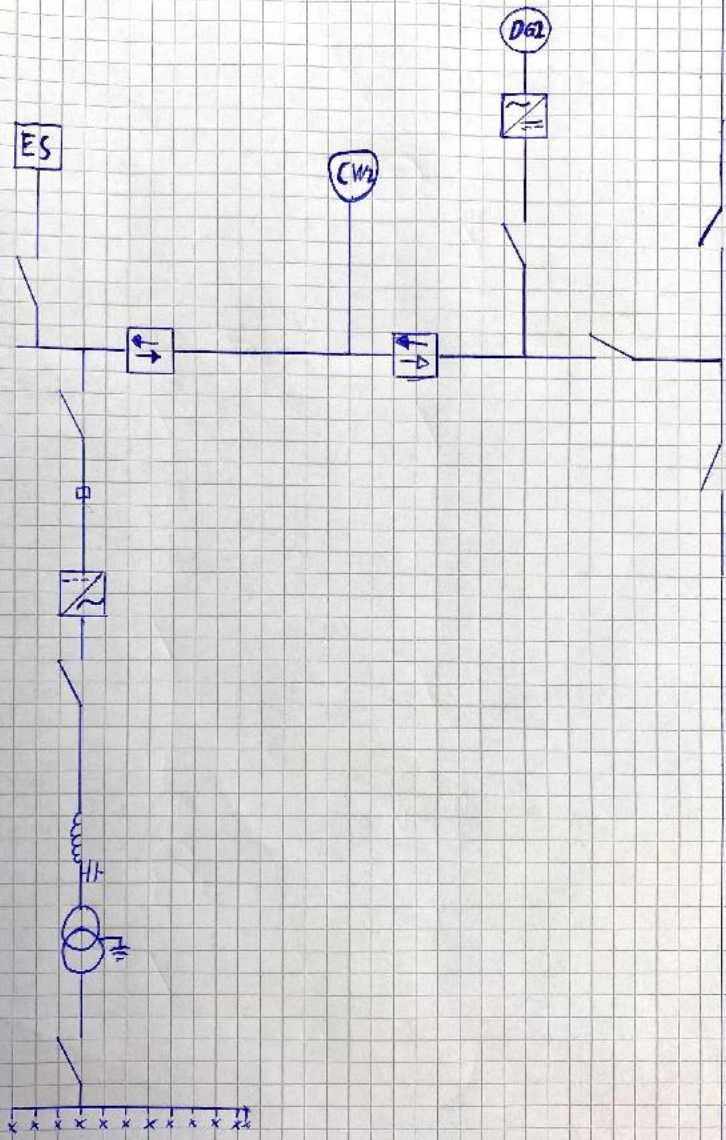
Innholdsfortegnelse

Vedlegg 1 – Håndtegnning av DC-ZEDS	69
Vedlegg 2 – ABB programtegnning av DC-ZEDS med tavlerom	76
Vedlegg 3 – Simulering i ANSYS TwinBuilder	82
Vedlegg 4 – Generelle drivstoffberegninger 1	109
Vedlegg 5 – Generelle drivstoffberegninger 2	109
Vedlegg 6 – Tap i DC-ZEDS	109
Vedlegg 7 – Intervju 1.....	110
Vedlegg 8 – Intervju 2.....	114

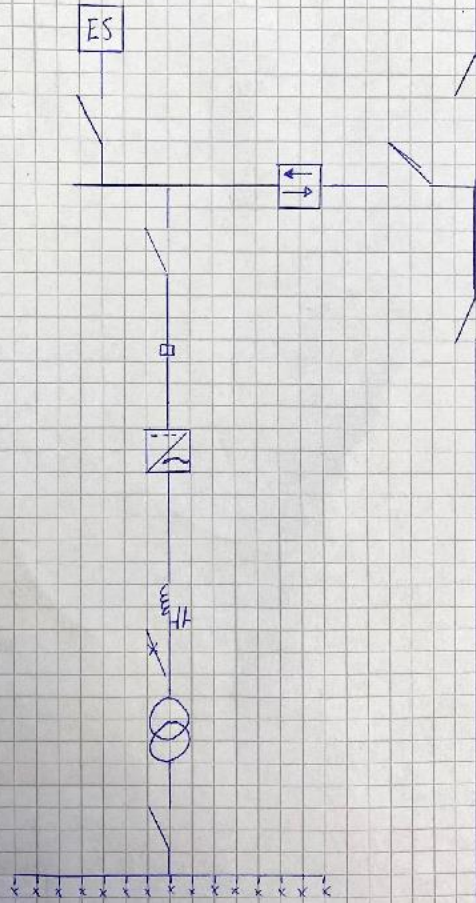
Vedlegg 1 – Håndtegning av DC-ZEDS



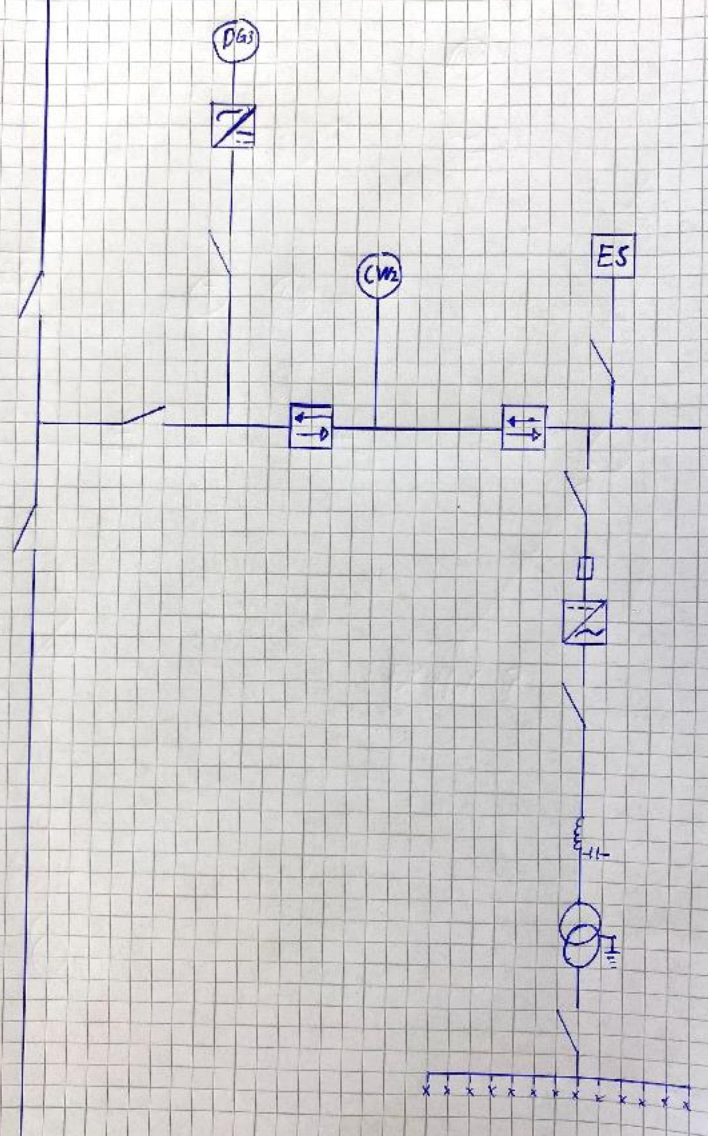
LAST CENTER 2



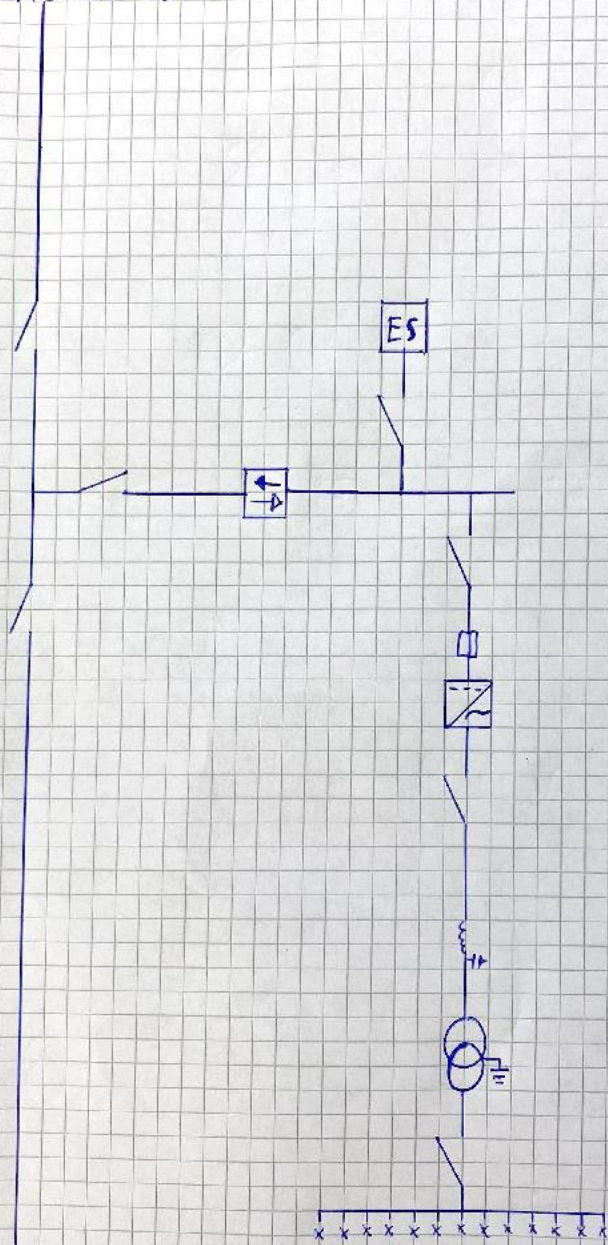
LAST SENTER 3



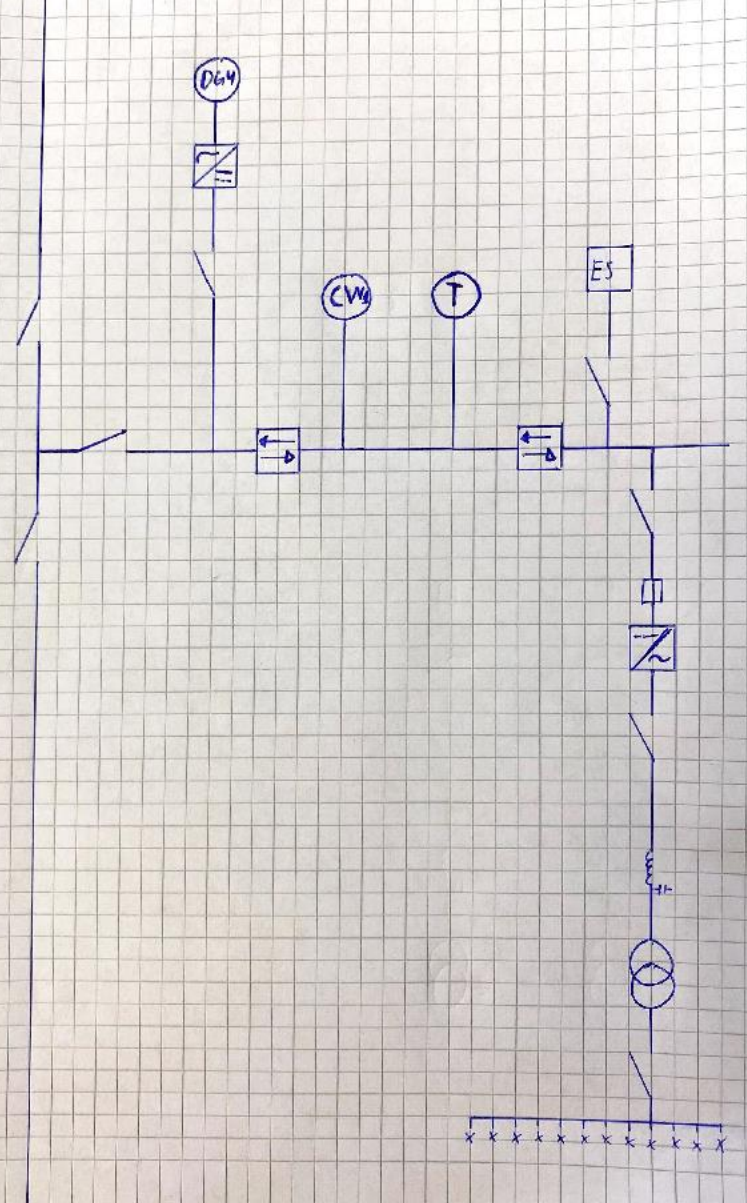
LASTSENTEUR 4



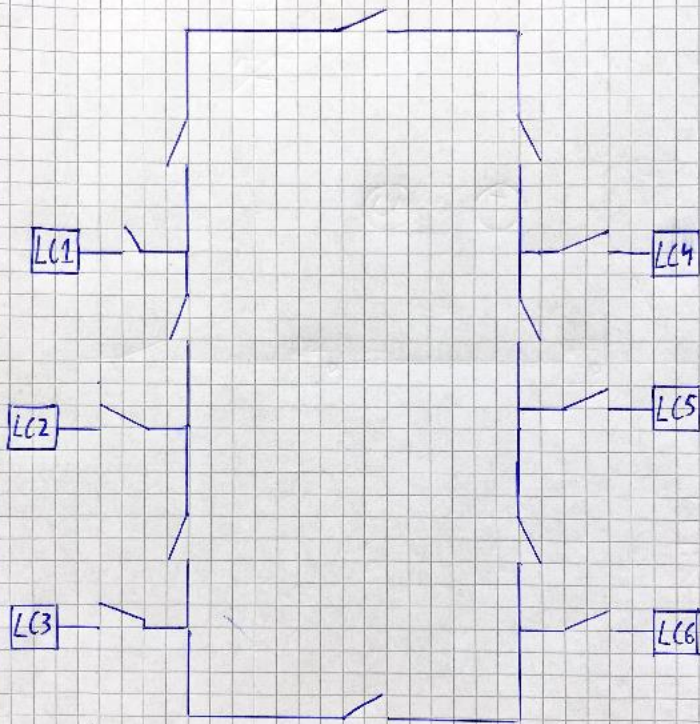
LASTSENER 5



LASTSENER 6

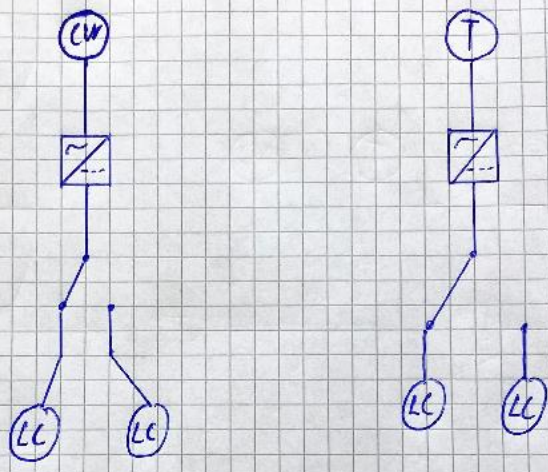


OVER ORDNET DESIGN

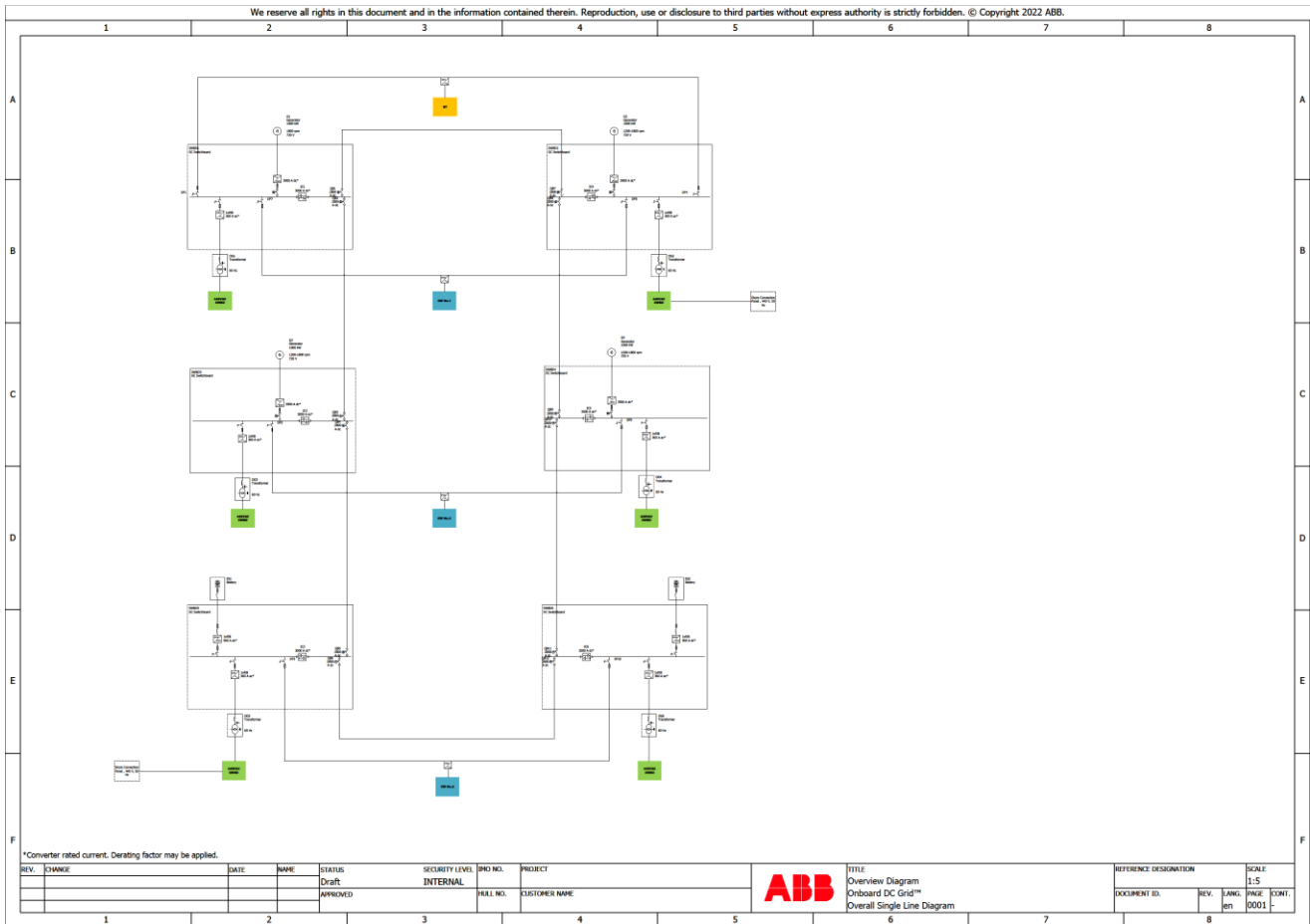


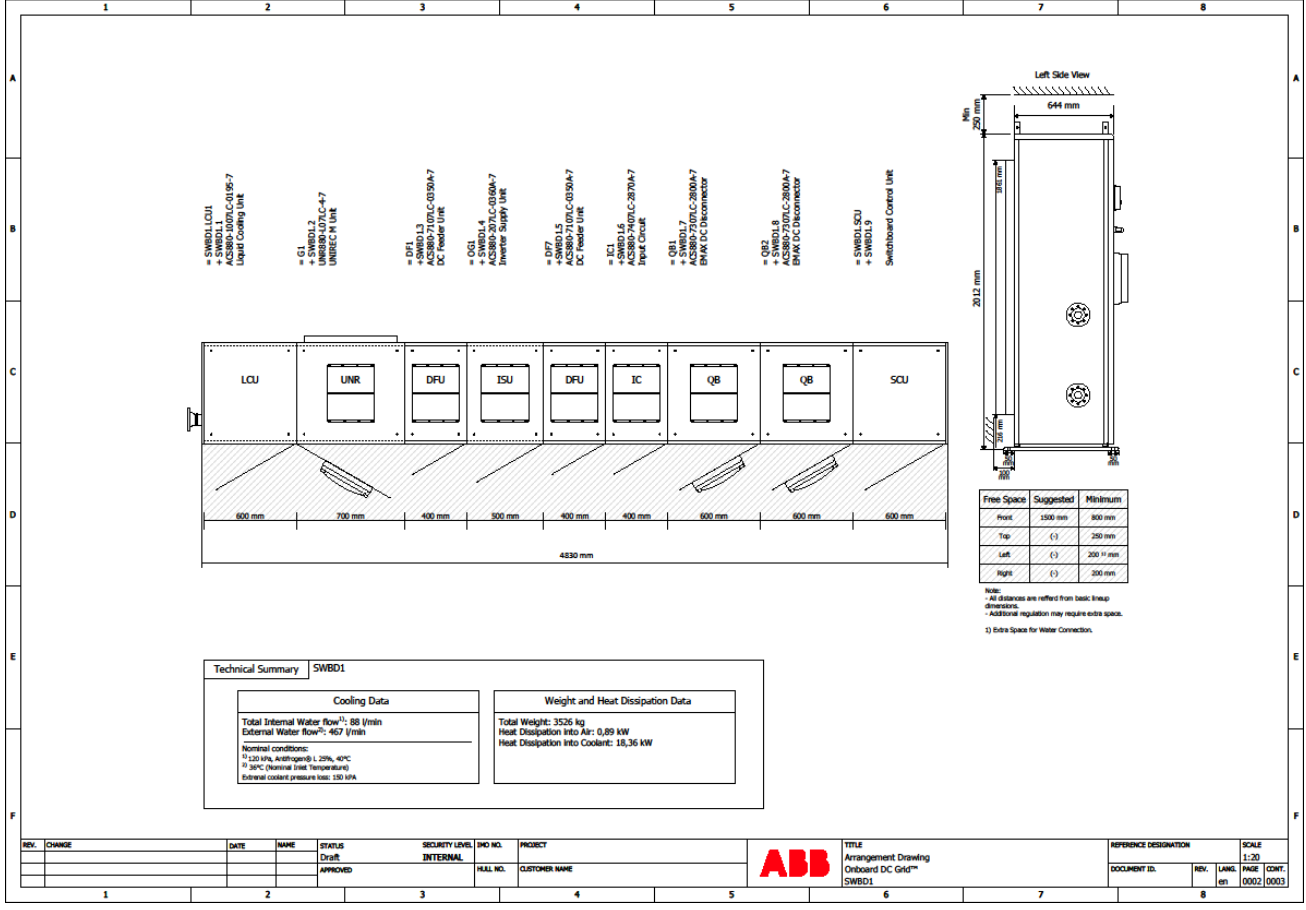
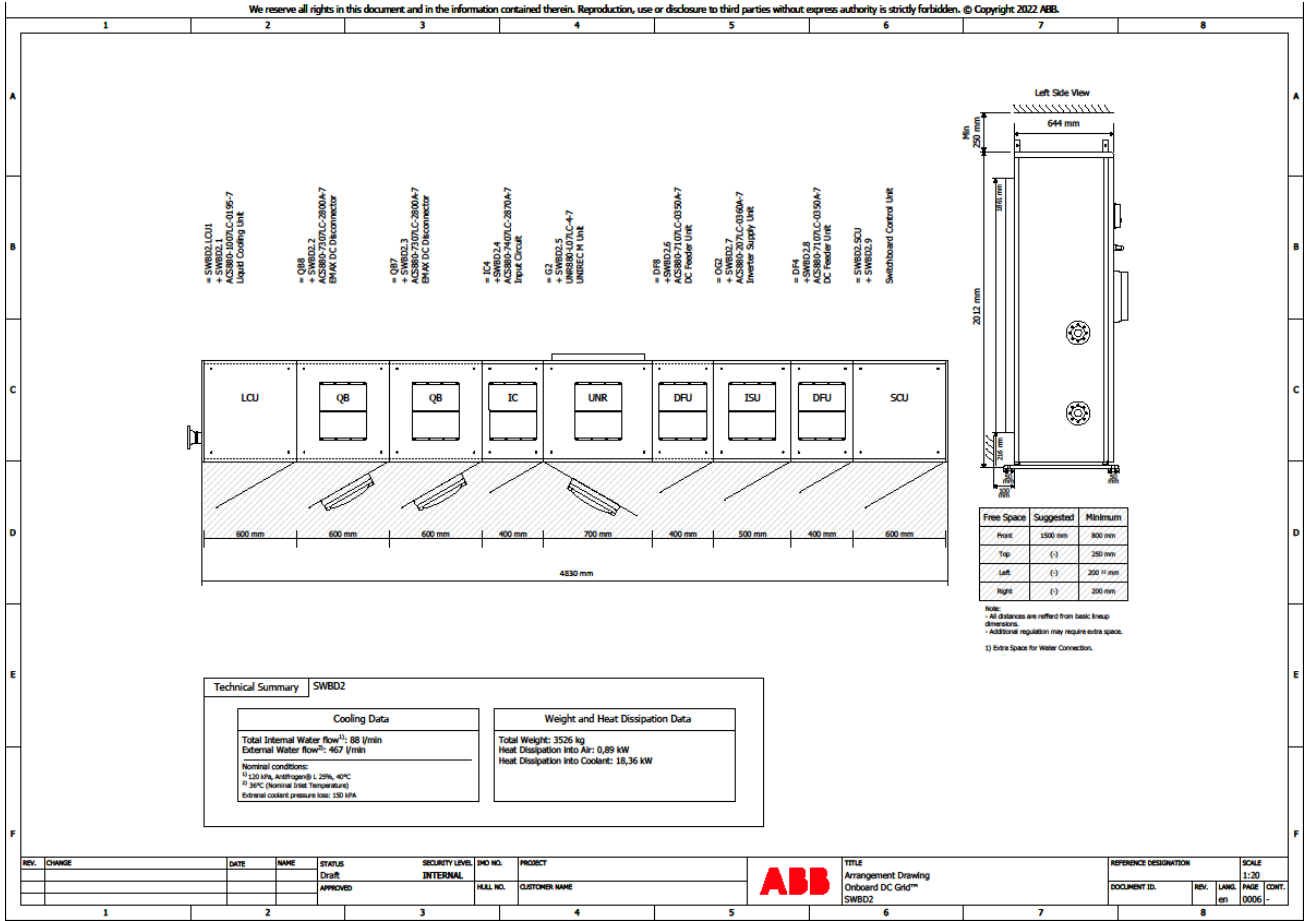
CW TILKOBLING

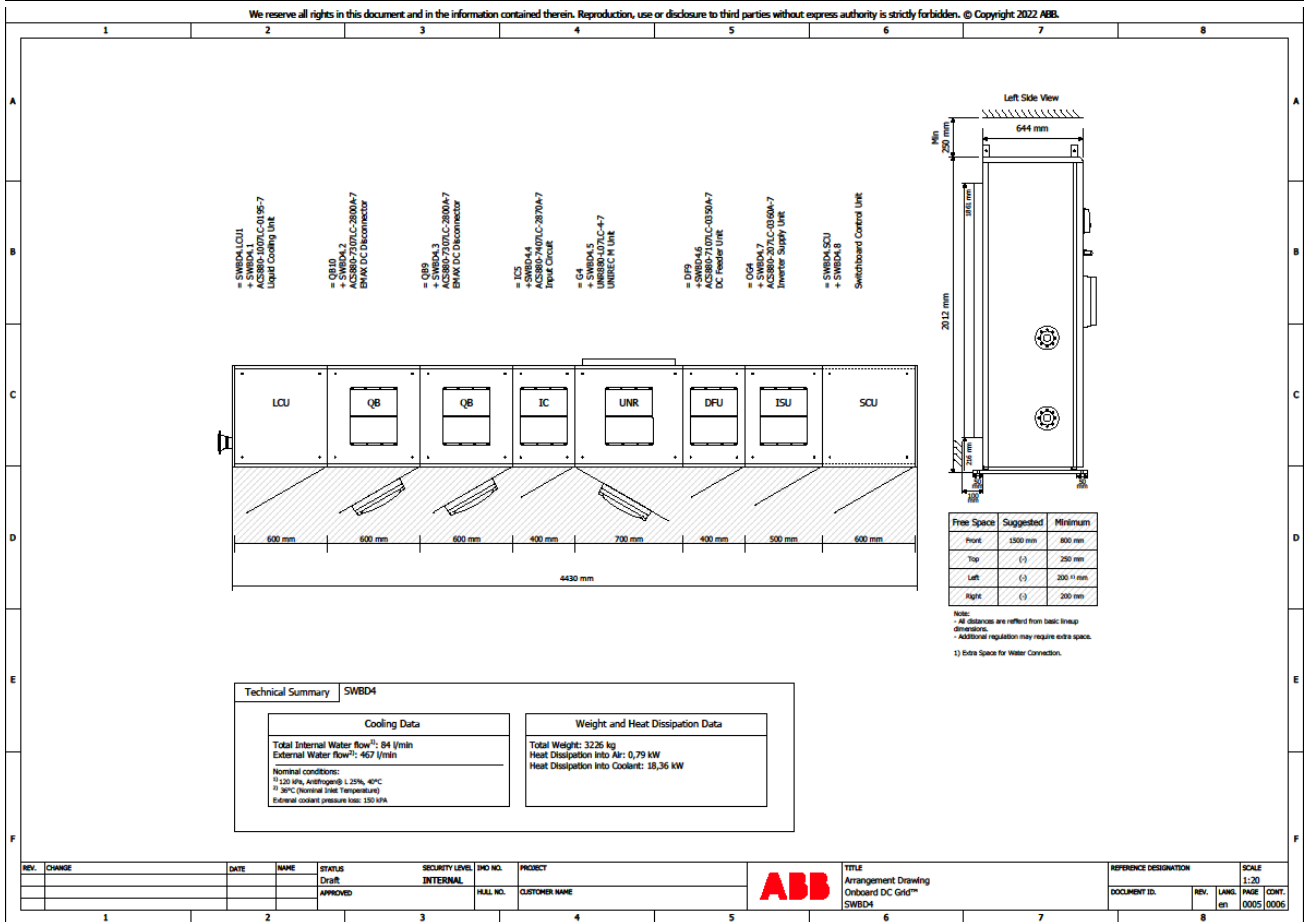
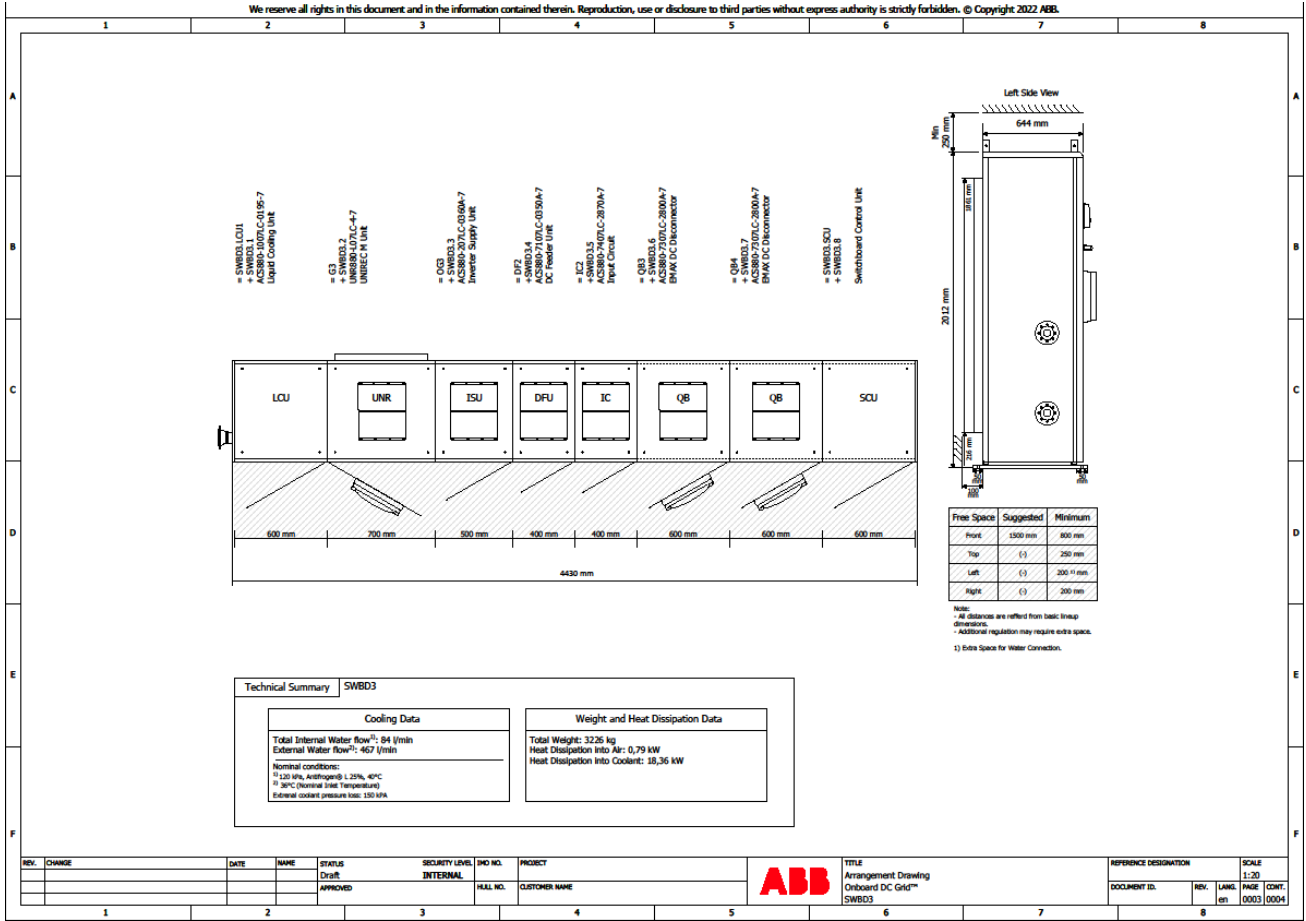
THRUSTER TILKOBLING

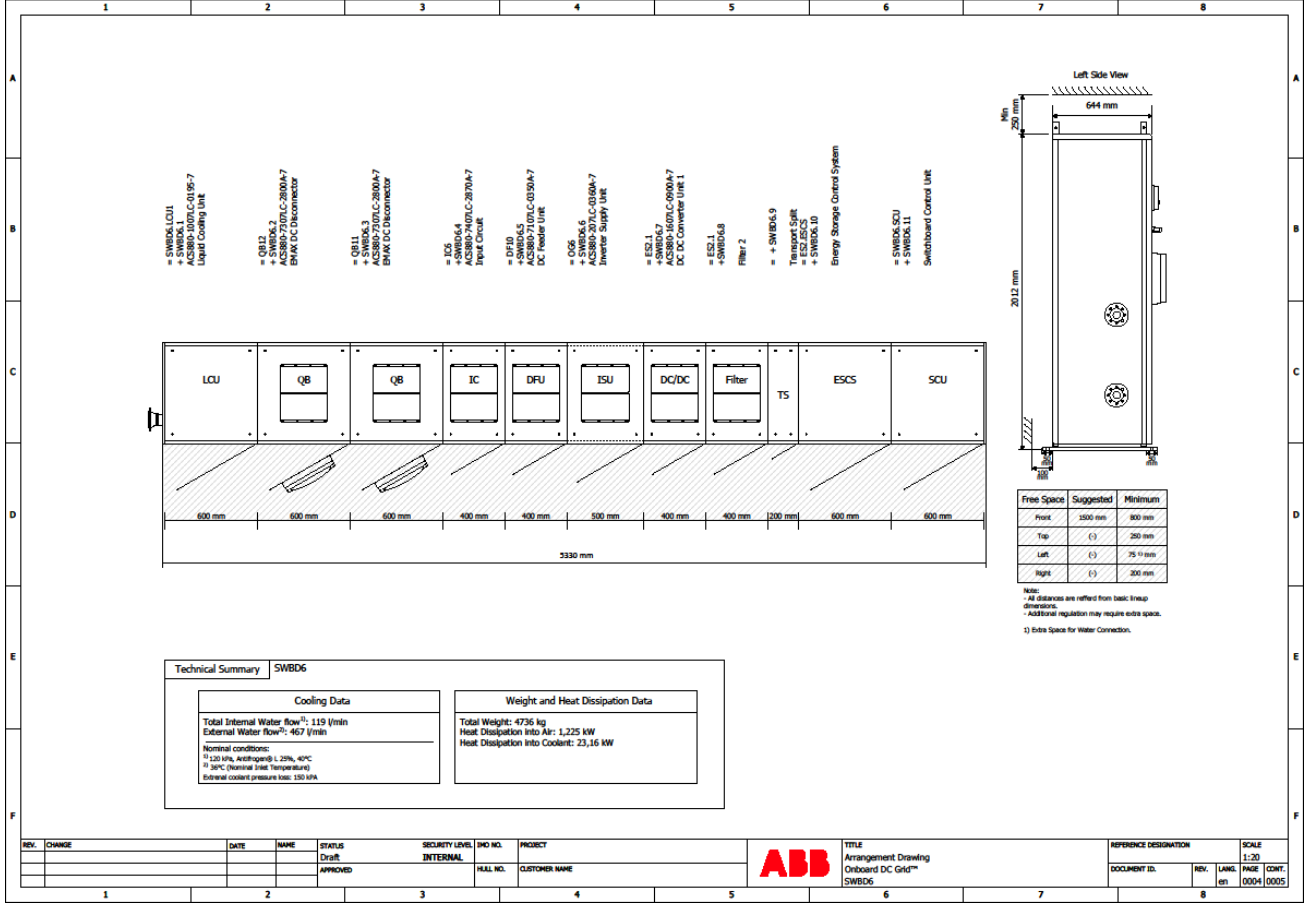
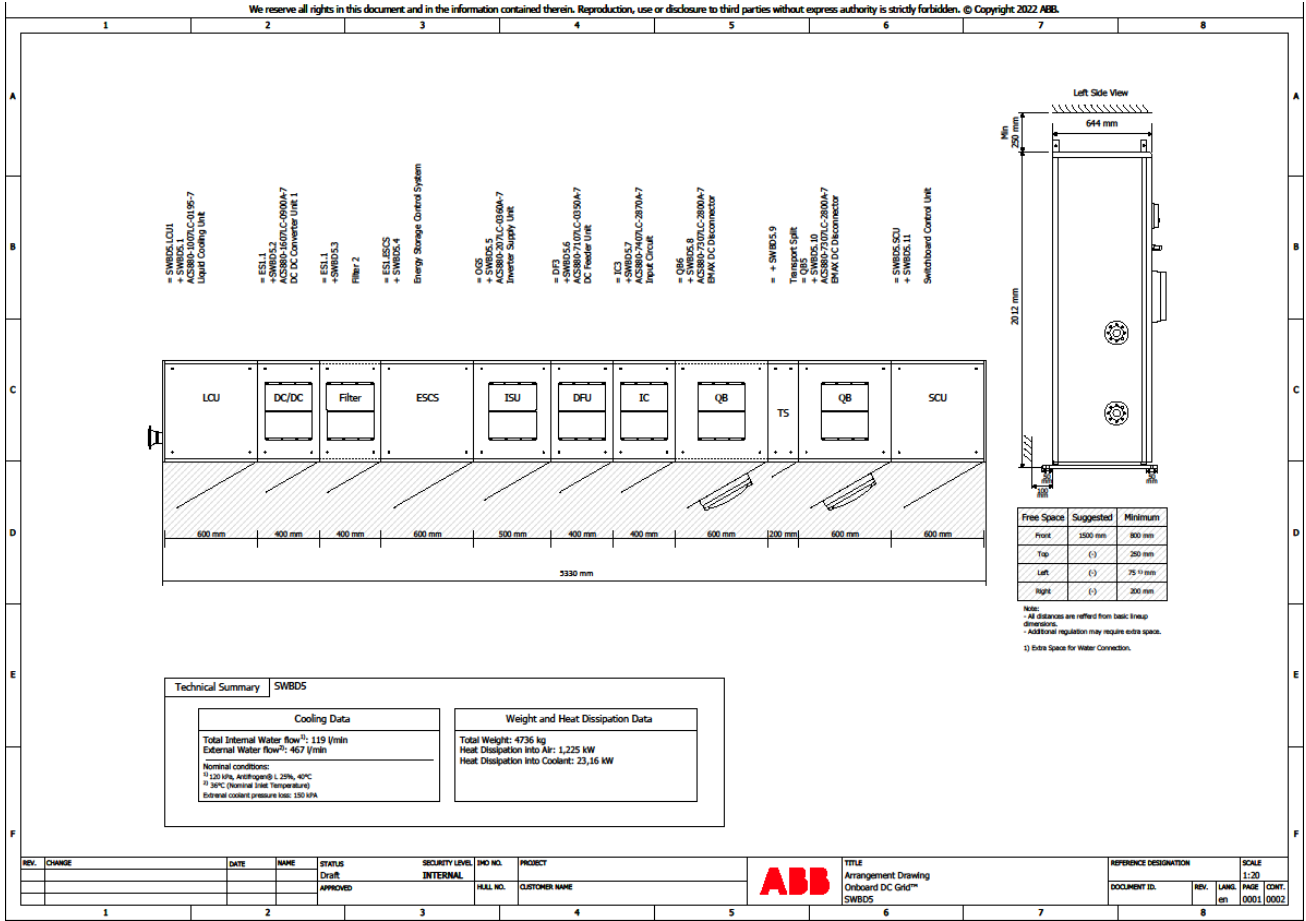


Vedlegg 2 - ABB sin programtegning av DC-ZEDS med tavlerom









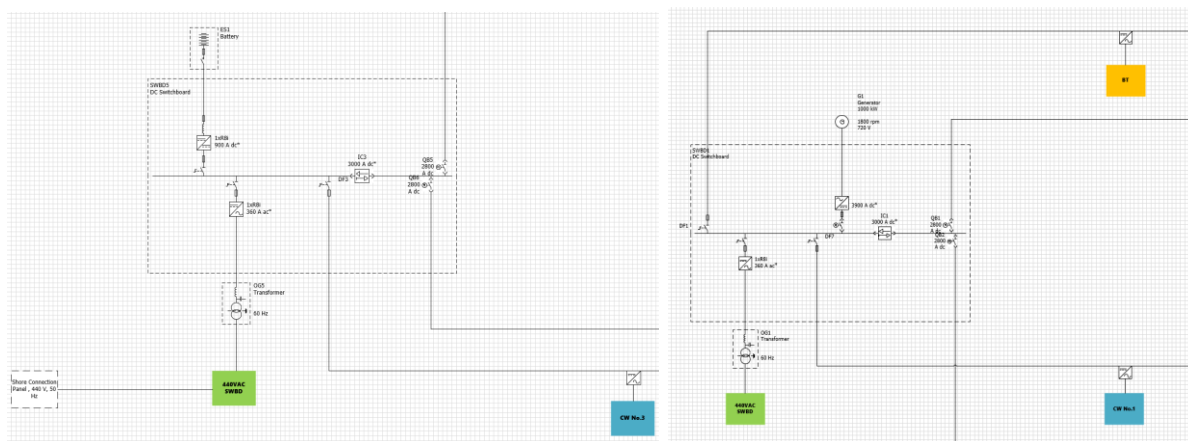
Vedlegg 3 – Simuleringer i ANSYS TwinBuilder

Dette vedlegget er satt sammen av 4 deler:

1. Infoskriv om studiet
2. Selektivitetsstudie
3. 'Worst case'-kortslutningsstudie i DC-hovedtavle 1
4. Kortslutningsstudie av VSDG

Simuleringene er i sin helhet gjennomført av ABB, hvor vi har fått bruksrett på disse. Kommentarer og forklaringer på simuleringene er også gjort av ABB.

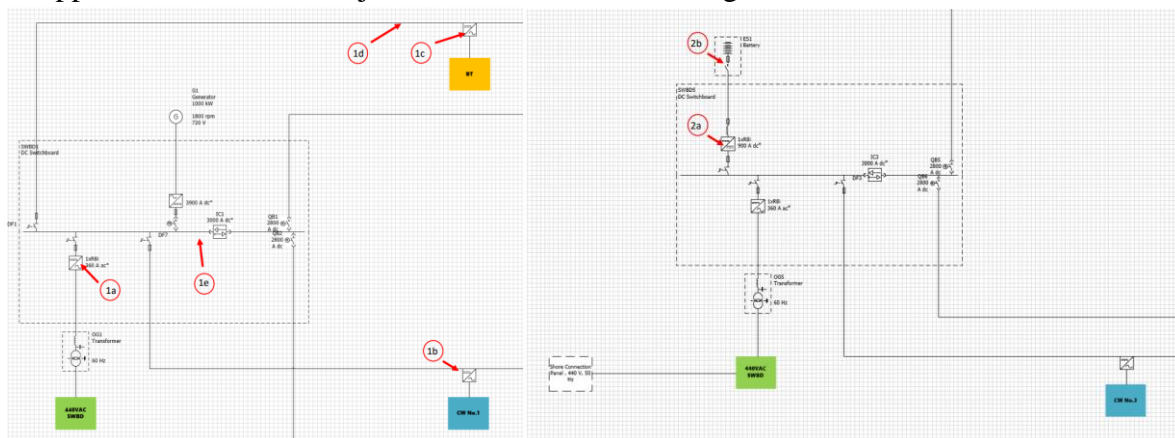
Del 1: Informasjon om studiet



Bildene over viser hvilke deler av systemet som har blitt testet. Bildet over til venstre viser en DC-hovedtavle med forsyning av en ESS. Bildet over til høyre viser en DC-hovedtavle med forsyning av en Variable Speed Diesel Generator. Spesifikasjoner for ESS og generator finnes lenger nede i denne infodelen.

Feilsteder i simuleringene

Det ble gjort en rekke med simuleringer på forskjellige steder i fordelingen for å sjekke at selektivitet er opprettholdt, samt for å sjekke maksimale kortslutningsstrømmer.



Feilscenarier:

1. Feil på Generator-tavle

- a. R8i-modul i off-grid converter
 - i. For å vise at modulsikringen ryker*
 - b. Nedstrøms DC-feeder mot CW no.1
 - i. For å vise at DC-feeder sikringen ryker*
 - c. R8i-modul i bow thruster drive
 - i. For å vise at modulsikringen ryker*
 - d. Kabel mellom DC-feeder og bow thruster drive
 - i. For å vise at DC-feeder sikringen til bow thruster drive ryker*
 - e. Kortslutning på hovedbusbarer i DC-linken (kortslutning mellom + og – i DC-link tavlen)
 - i. For å vise maximal kortslutningstrøm ved en slik worst-case feil.*
2. Feil på ESS-tavle
- a. Feil med ESS systemet.
 - i. DCDC omformer
 - 1. For å vise at modul og output sikring ryker*
 - ii. Intern batterifeil
 - 1. For å vise at intern batterisikring for batteri med feil ryker*
 - b. Gjøres for BOL og EOL forhold.
 - i. For å vise at systemet er selektivt selv ved worst-case forhold mtp selektivitet.*

Forklaring på bilder:

Fuse Indikator:

Hvor nærme en sikring er fra å nå pre-arc (når den brenner opp)
Når den 100% så opererer den og skiller feilen ut.

Fuse current:

Strømmen som går igjennom hver og en sikring.

Sikringene til modulene på DC-linken ligger mellom + og - skinnen på noe som kalles for CBB (Common Bus Bar).

Det er denne strømmen som går igjennom hver omformer.

Cable currents:

Et samleplot for å vise strøm gjennom kabler. Brukes til å se om kabler er dimensjonert riktig med tanke på peak kortslutningsstrøm og tåleevnen til kableen.

Generator current:

Viser strømmen fra tilkoblet generator (gjennom en likeretter) til DC-linken.

3-fase strømmen fra generator blir gjort om til 2-fase DC over en thyristor likeretter bro.

Systemdata:

Feilen skjer etter 10ms

DC spenning = 975 V DC

Generator DC-link

- 1 stk Generator-Likeretter
- 1 stk offgrid converter med 2xR8i power modules
- 2 stk DC-feeders
- 1 stk Input Circuit

ESS DC-link

- 1stk offgrid converter med 2 x R8i power modules
- 1st DCDC converter for ESS med 1xR8i power modules
- 1 stk DC-feeder
- 1 stk Input Circuit

NB: Off-grid converteren måtte bli gjort større enn det som er på SLD. Dette er fordi man må ha et visst antall omformere (og en del mF i kondensatorer) for at systemet skal bli selektivt. Minimum antall er 2 omformere med R8i-enheter.

Kabeldata:

0.195mohm/m

0.246uH/m

90 meter kabel til BT DRIVE – 10 x 4x95mm²

40 meter kabel til CW – 10 x4x95mm²

10 meter kabel fra generator til likeretter 12x3x95mm²

ESS

700 - 900 V

62kWh, fordelt på 4 stringer

2 x 4x95mm²

10 meter kabler

Samme kabelparametre som ellers i systemet.

BOL DCIR = 60 mOhm

EOL DCIR = 140 mOhm

Generator data:

Rpm:1200 – 1800 RPM

Ik2p: >34kA

IK: 3,3*In

In: 1604

U: 450V

Xd: 285%

Xd':22,6

Xd'':10,9

Kabel: 12*3*95mm²

Lengde: 10 meter

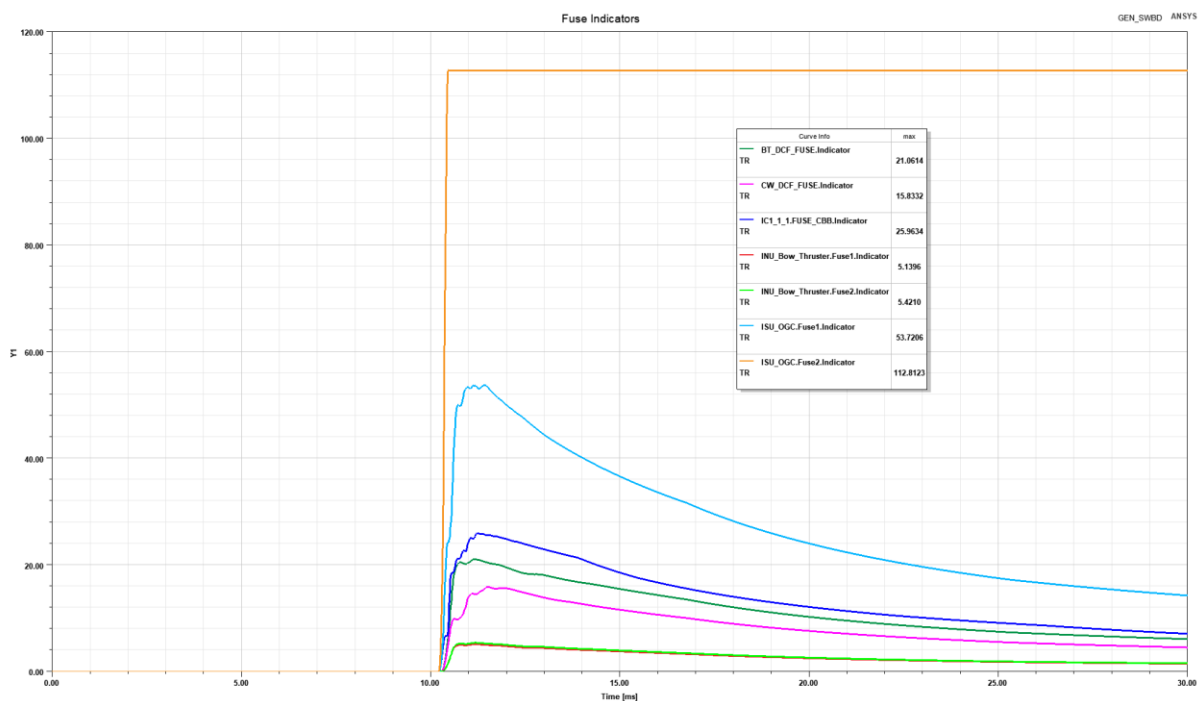
Del 2: Selektivetsstudie

I denne delen ble det undersøkt om selektivitet i systemet blir opprettholdt. Her vises feilsteder 1a-d, samt 2a-b.

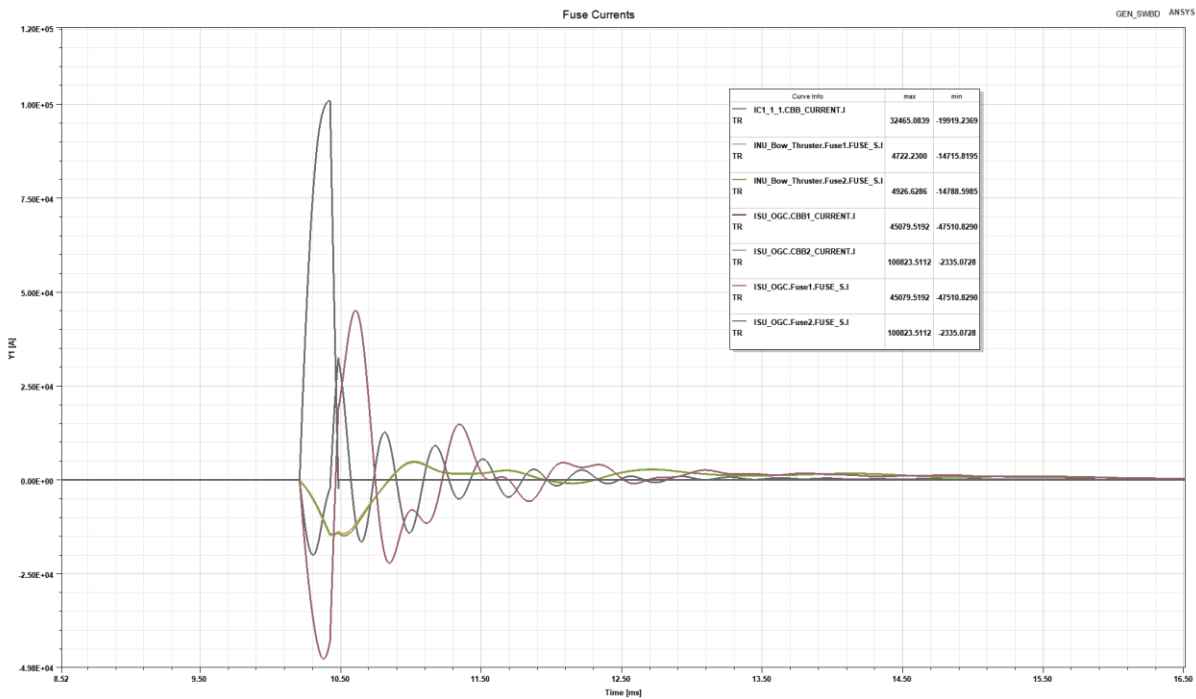
GENERATOR HOVEDTAVLER

Feilsted 1a: Feil på R8i-modul (power module) for Off-Grid omformer.

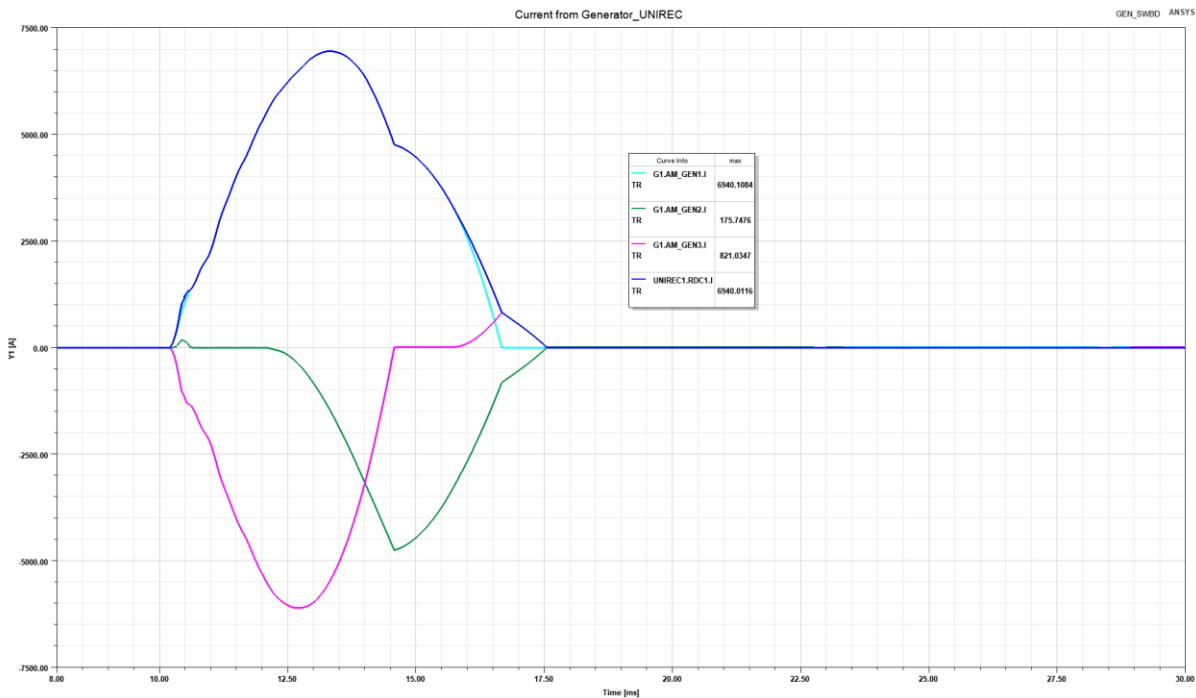
- Mål: Vise at modulsikringen for R8i-modul med kortslutningsfeil opererer og skiller feilen fra resten av systemet.



Figur 1: sikringsindikatorer for systemet. R8i-modulen med feil skiller ut fra systemet ved at sikringen (ISU_OGC.Fuse2) opererer etter 0.5 ms. Ingen andre sikringer opererer, systemet er selektivt.

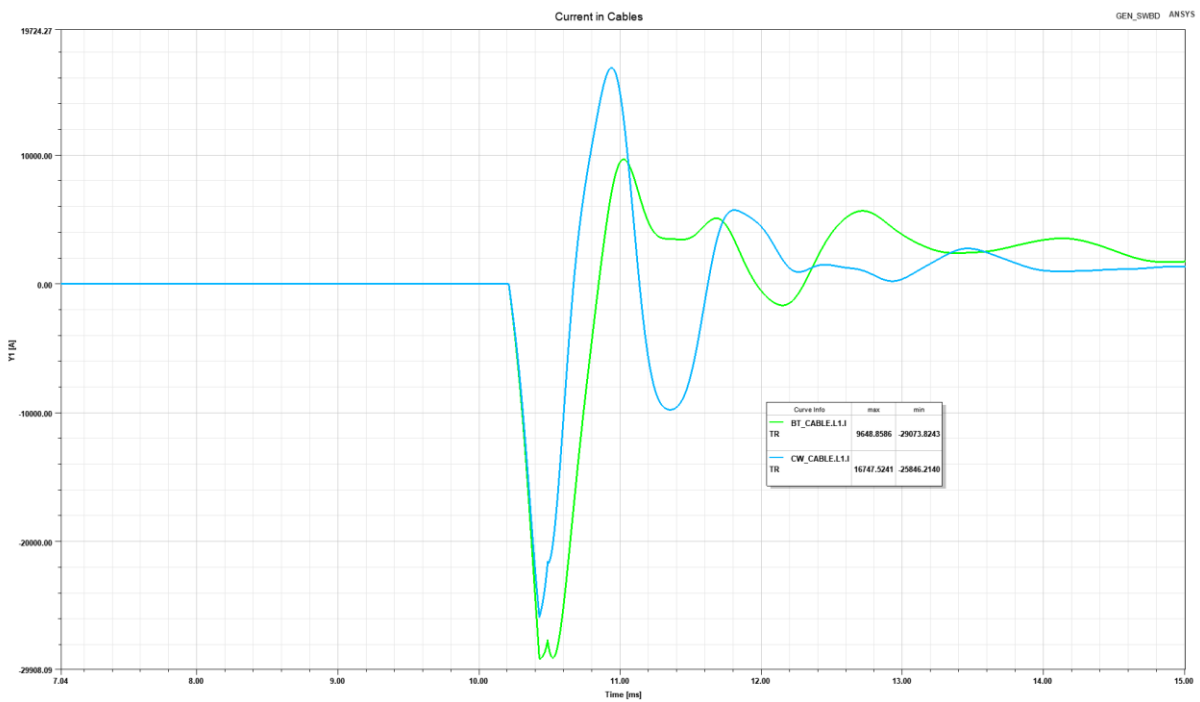


Figur 2: Strømmen som går igjennom sikringene til de tilkoblede modulene. Maksimal strøm gjennom modul med feil er 100,8 kA. Oscillering i strøm kommer på grunn av inn og utlading av kondensatorer i omformerne.

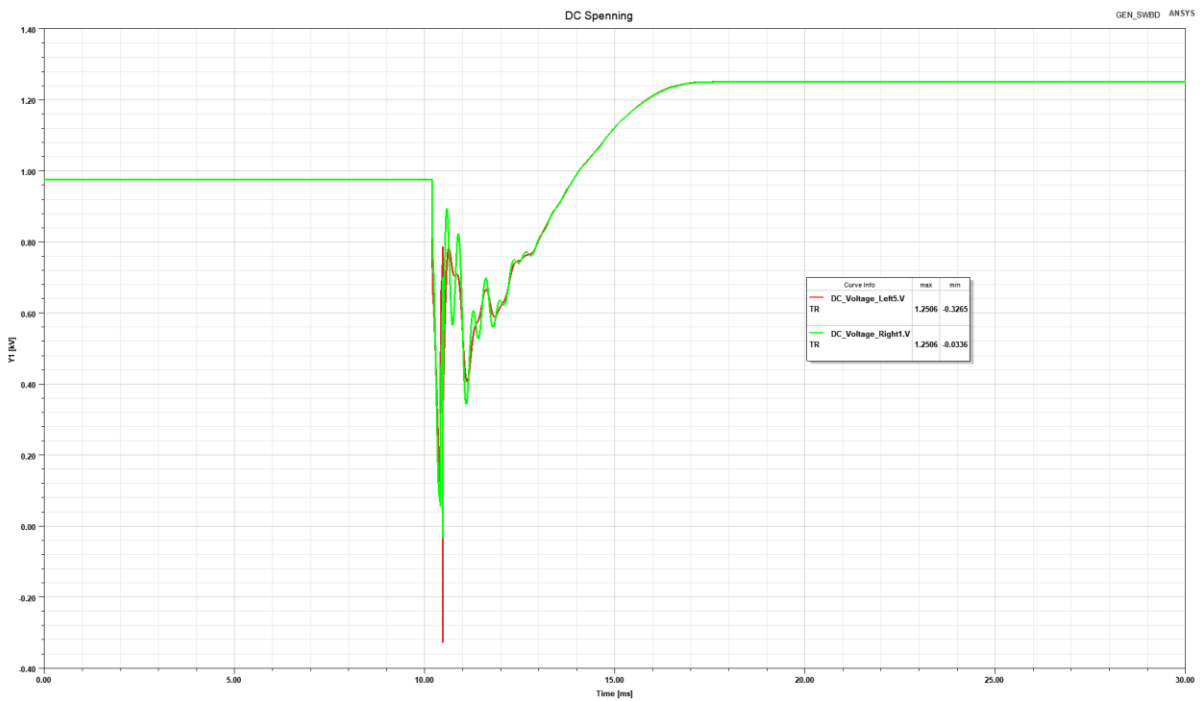


Figur 3: Strøm fra Generator/Rectifier ved nevnte feil. Den peaker på 6,9 kA. Siden feilen skiller så fort ut (0,5 ms) så rekker ikke generatorene å bidra med så mye kortslutningsstrøm, da de bruker lengre tid på å nå sin peak. (se forskjell mellom denne figuren og den for kortslutning på generator-terminaler evt DC-side av generator-likereetter).

Blå linje (UNIREC1.RDC1) er strøm ut ifra likeretteren.
Rosa, grønn og blå linjer er fasestrømmen til generatoren.



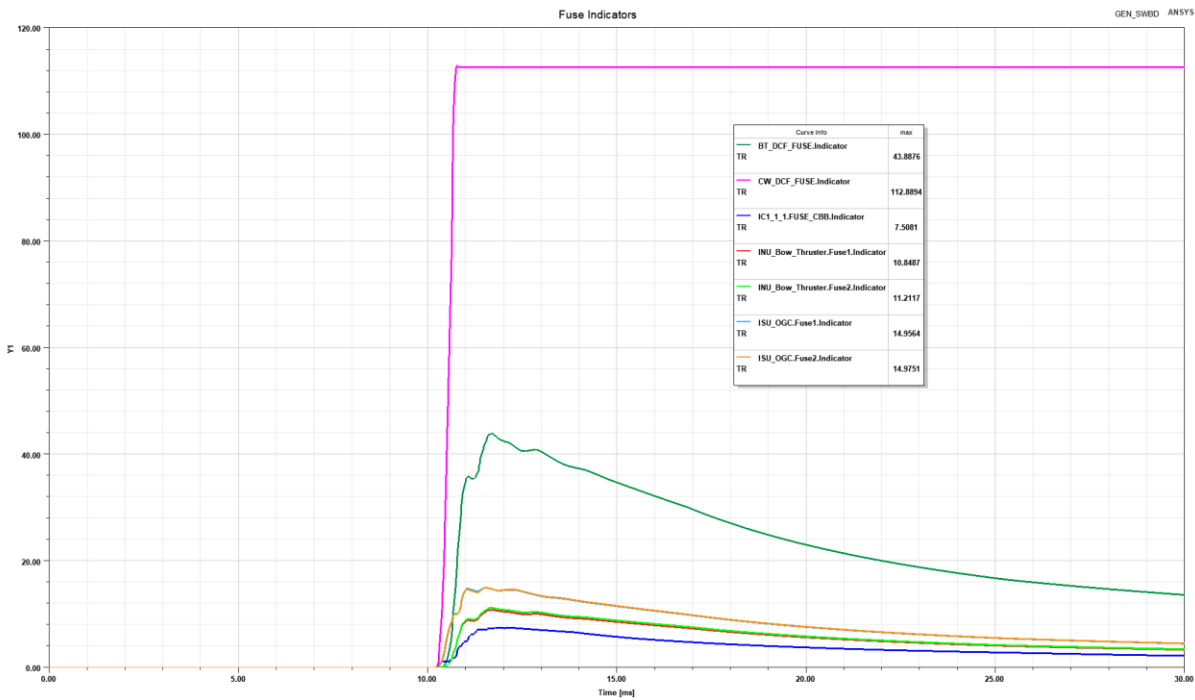
Figur 4: Strøm gjennom kabler til bow thruster og CW. Negativ strøm er strøm med retning tilbake til DC-linken.



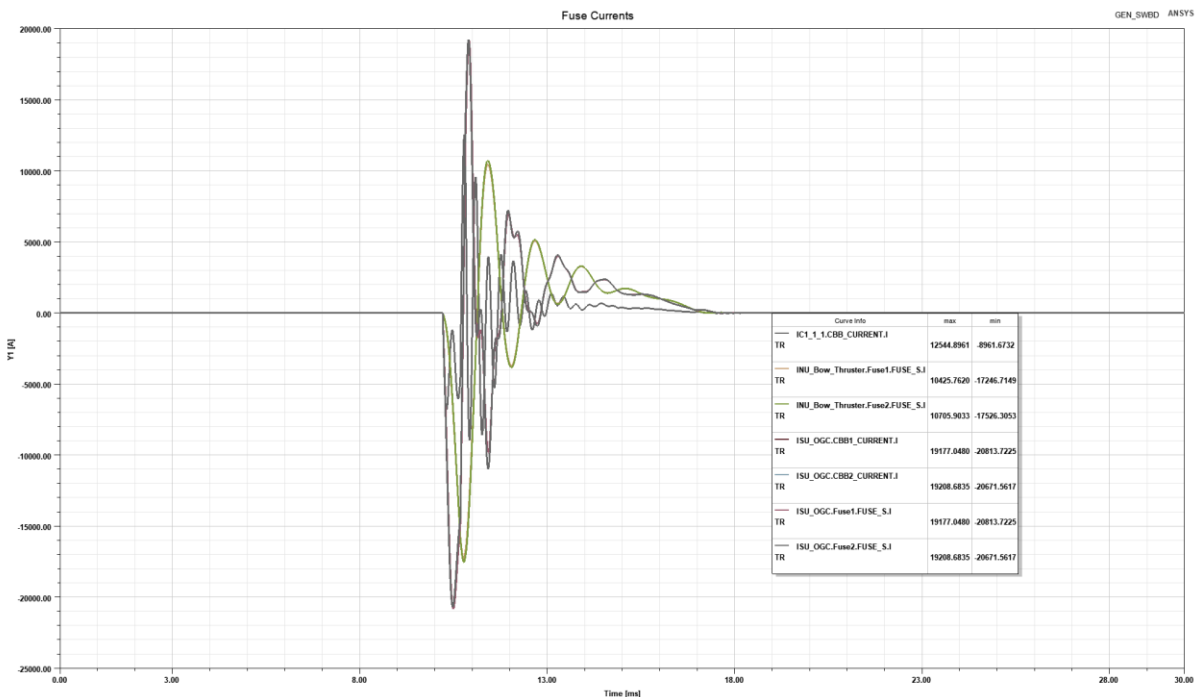
Figur 5: DC-spenningen ved feil på R8i-modul i Off-grid converter. Grunnen til at den øker igjen etter feilen er på grunn av at analyseprogrammet ikke tar med regulering av generator. Kun brukt for illustrasjon av spenning.

Feilsted 1b: Kortslutning nedstrøms DC-Feeder til CW

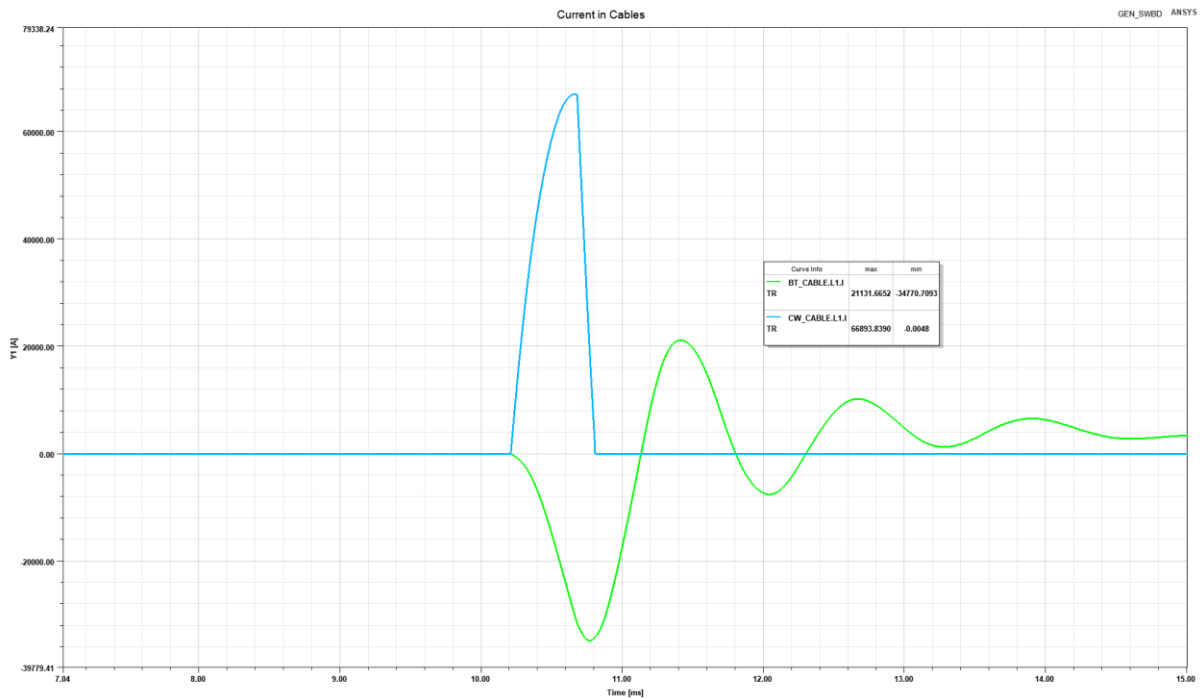
- Mål: Vise at sikringen for DC-feederen opererer og skiller CW no.1 fra resten av systemet.



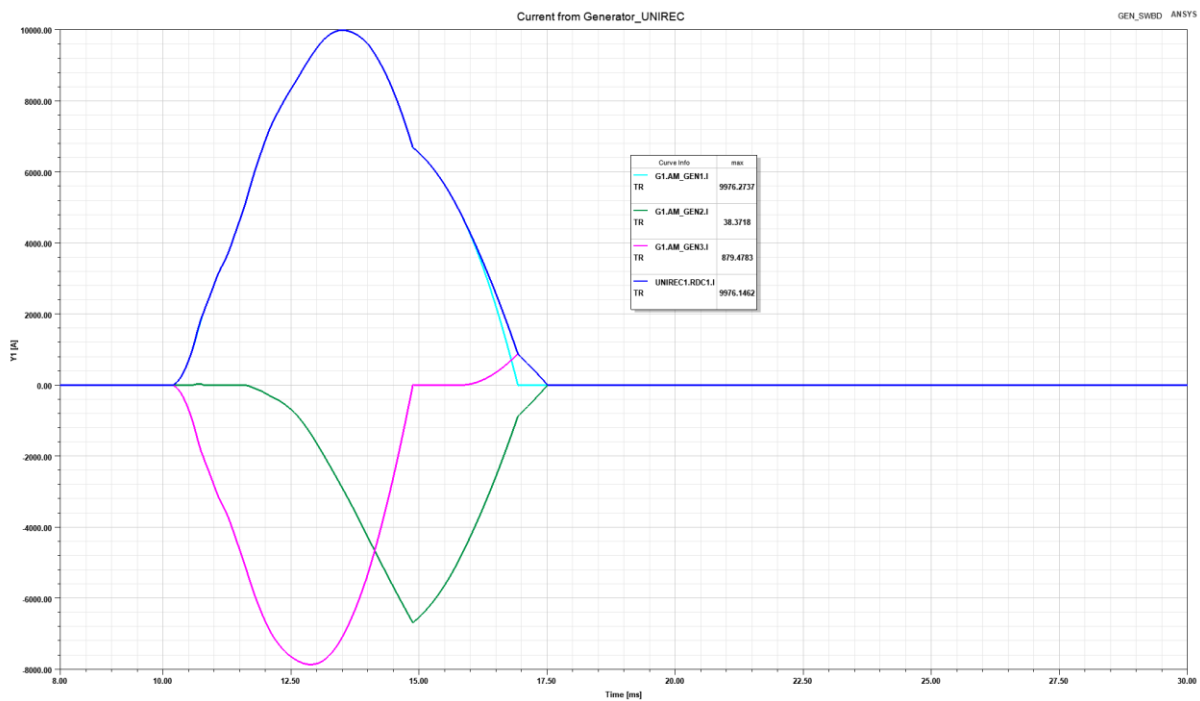
Figur 6: Kortslutning nedstrøm DC-feeder til CW. Sikringen til DC-feederen opererer etter 0,64 ms og skiller feederen fra resten av DC-linken. Ingen andre sikringer opererer. Grønn linje: Sikringen som beskytter feederen til bow thruster går opp til 43 % fordi bow thruster driven ($2xR8i = 2 \times 9 \text{ mF}$ kondensatorer) utlades og sender mye strøm gjennom kabelen til DC-linken.



Figur 7: Strøm gjennom modulsikringene til tilkoblede enheter på DC-linken. For strømmen som går gjennom DC-feeder sikringene, se figuren som viser kabelstrøm (neste plot).



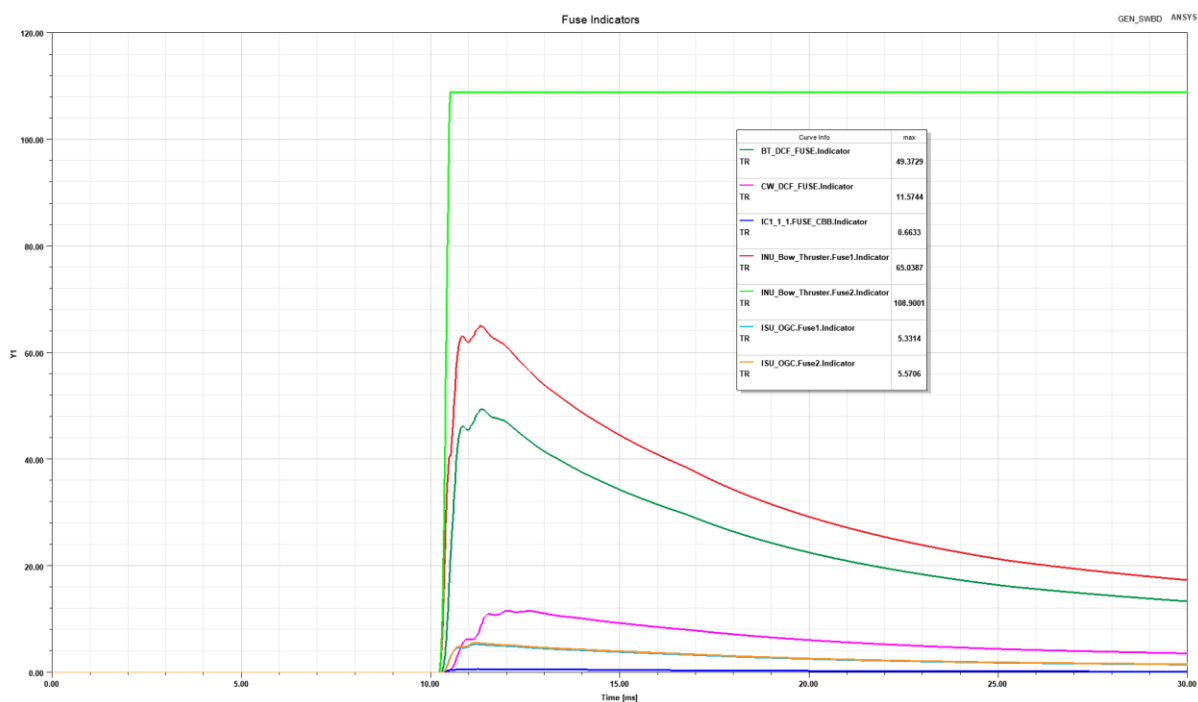
Figur 8: Kabelstrøm ved feil nedstrøms feeder til CW no.1. Peak strøm i kabelen til CW er 67 kA. Peak strøm i kabelen til bow thrusteren er 34,8 kA. Negativ strøm er strøm som går til DC-linken.



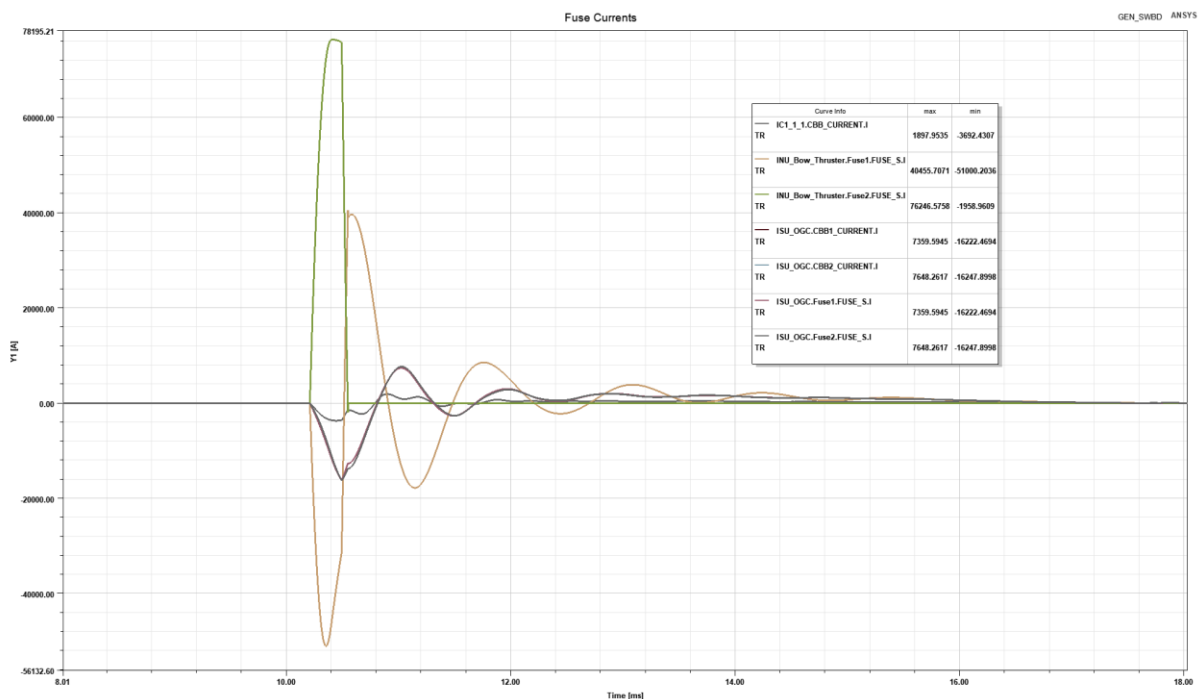
Figur 9: Strøm fra generator-likereetter til DC-linken for feil nedstrøms feeder til CW no.1. Merk at peak kortslutningsbidrag fra generator er høyere her enn ved forrige case. Dette er på grunn av at sikringen til DC-feederen bruker lengre tid på å operere.

Feilsted 1c: Kortslutning på omformer til bow thruster

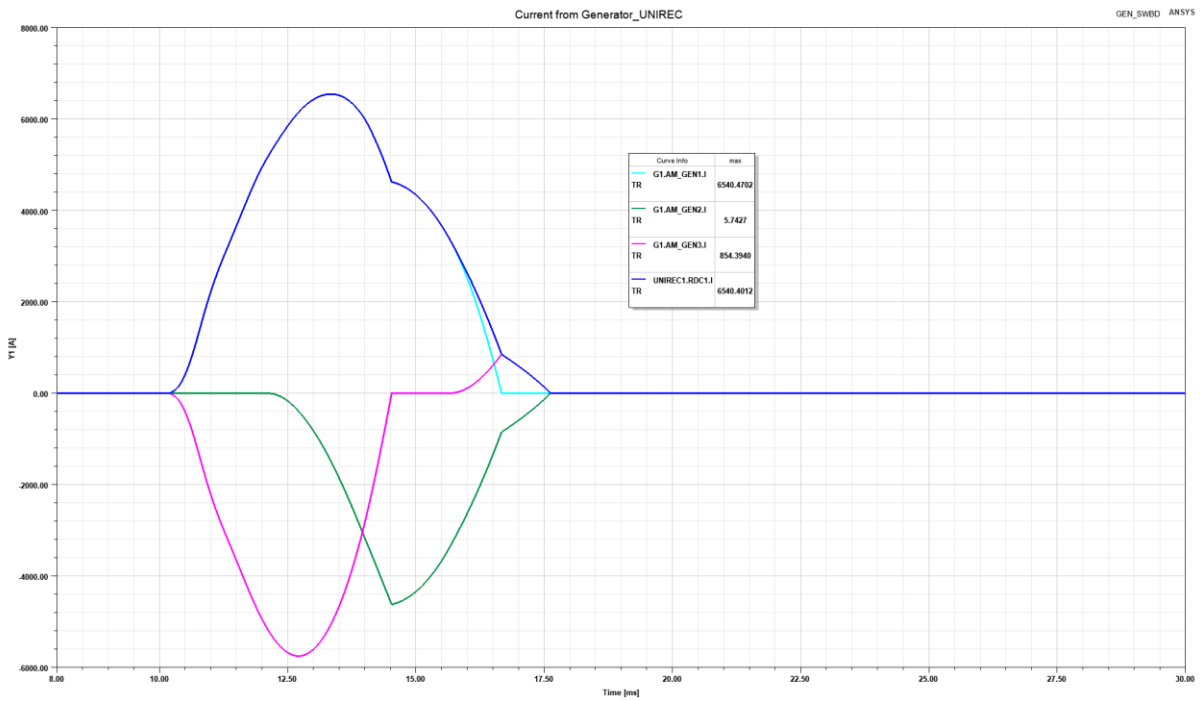
- Mål: Vise at modulsikring til bow thruster modul operer og skiller modul med feil ut fra systemet.



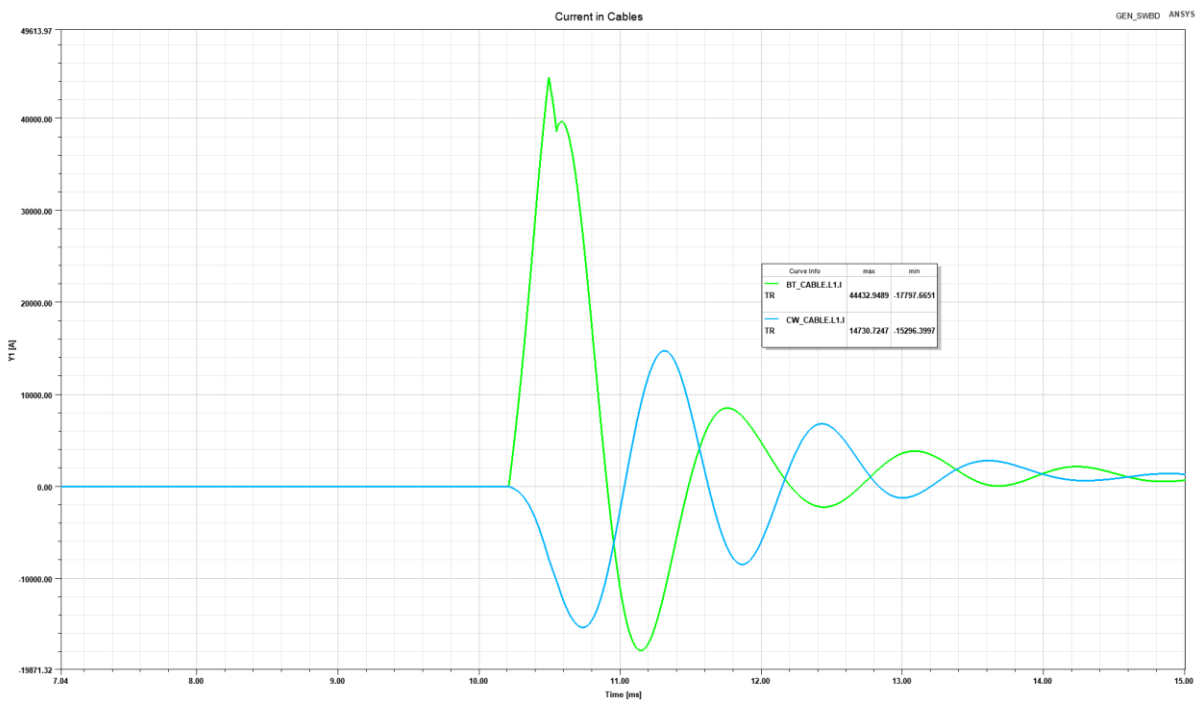
Figur 10: Sikringen til bow thruster R8i-modul ryker etter 0,5 ms. Bare R8i-modul med kortslutningsfeil operer og skiller ut feilen fra systemet.



Figur 11: Strømmen gjennom hver modul (og modulsikring). Peak strøm gjennom faulty modul er 76,3 kA.



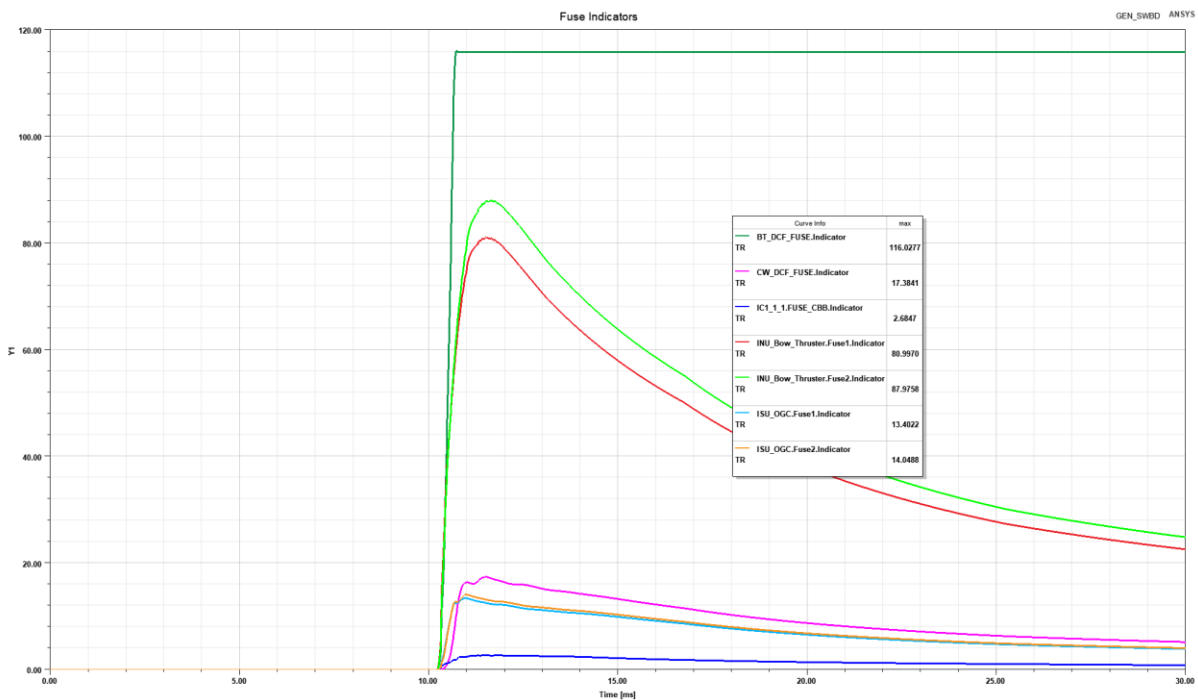
Figur 12: Kortslutningsstrøm fra generator-likerefter ved feil på bow thruster.



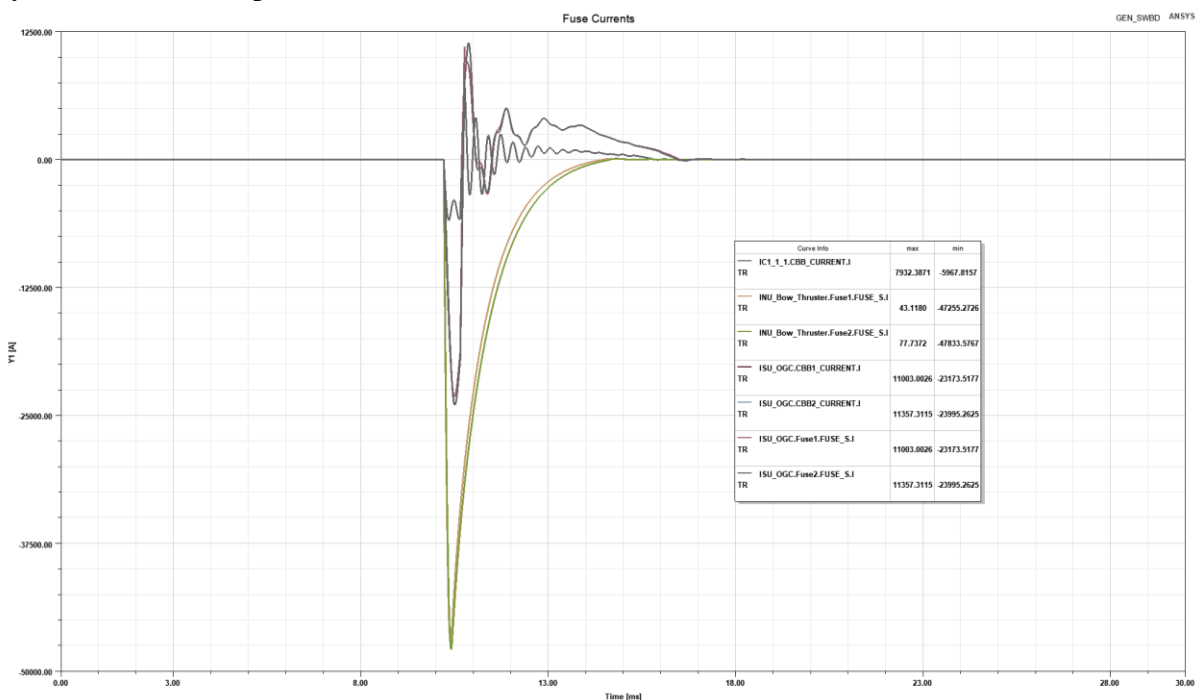
Figur 13: Strøm i kabler til/fra bow thruster og CW no.1. Negativ strøm er strøm til DC-link.

Feilsted 1d: Kortslutning nedstrøms DC-feeder til Bow Thruster (kabelterminering til bow thruster)

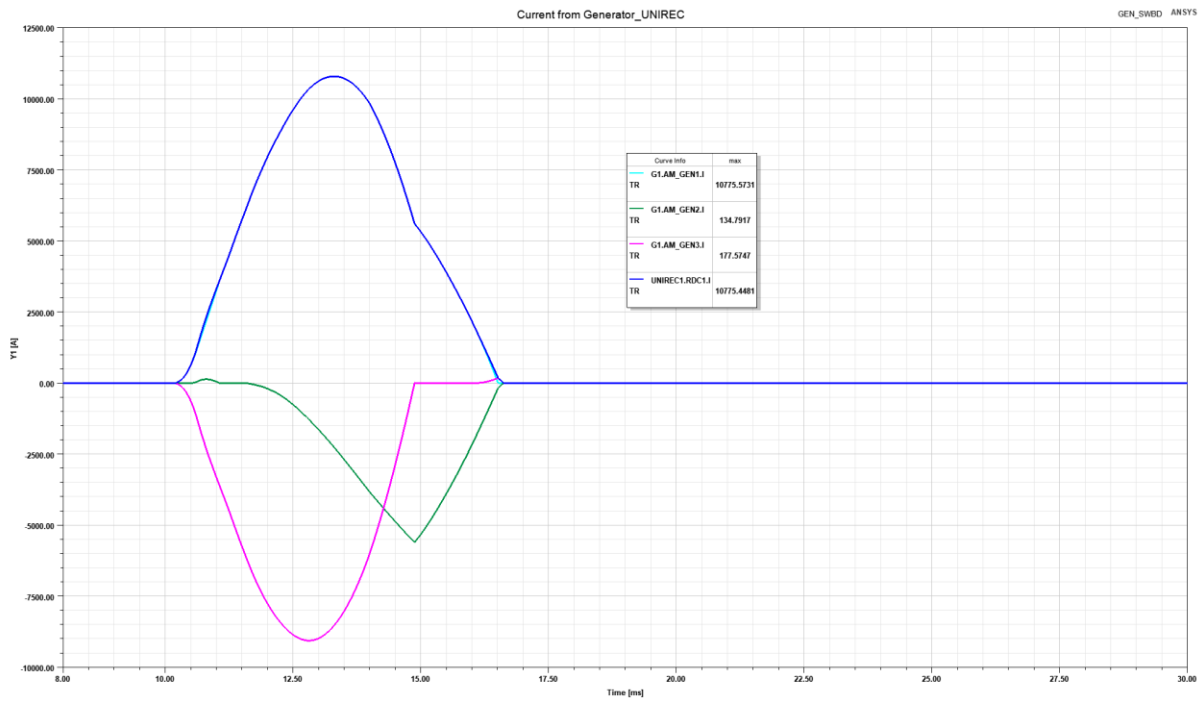
- Mål: Vise at DC-feeder sikring operer og skiller feeder til bow thruster fra resten av systemet.



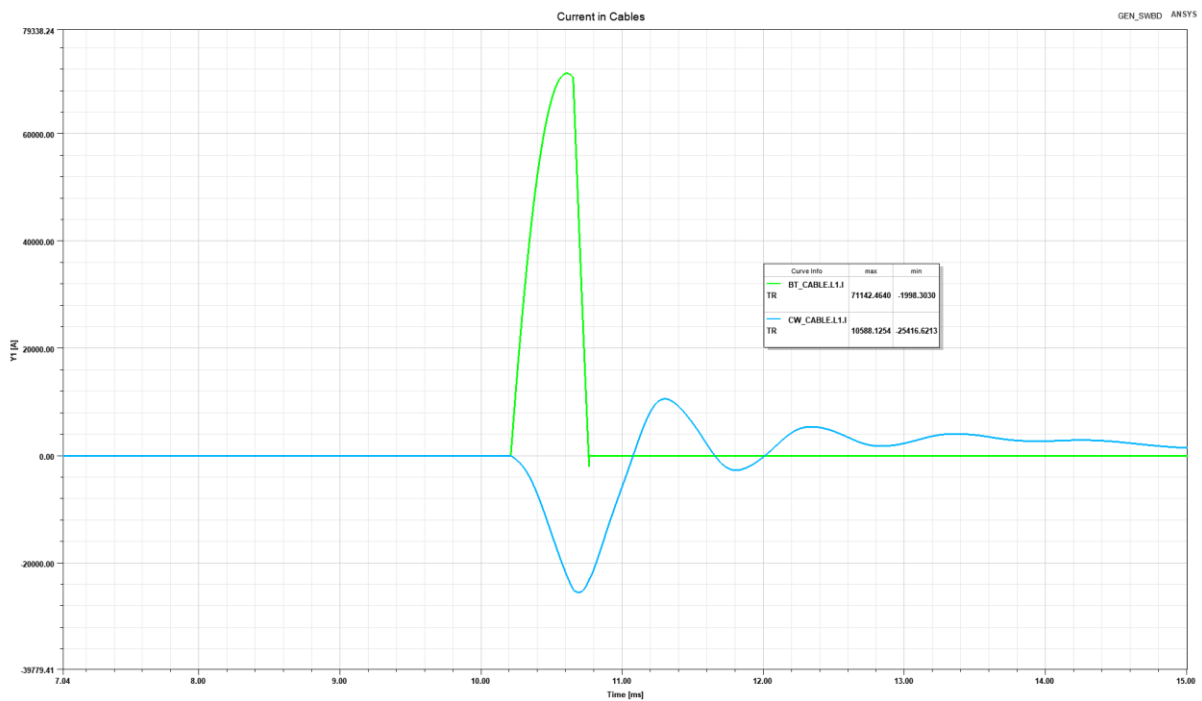
Figur 14: sikringsindikatorer for feil på kabelterminering ned mot bow thruster drive. Sikringen til DC-feederen operer etter 0,6 ms. Sikringene til R8i-modulene til bow thruster driven (INU_Bow_Thruster.Fuse 1 & 2) kommer ganske nærme pre-arc (100% indikator) og vil trenge å byttes, om de ikke opererer.



Figur 15: Strøm gjennom sikringene i utstyr tilkoblet DC-linken.



Figur 16: Kortslutningsbidrag fra generator-likerefter på DC-link.



Figur 17: Strøm i kabler ut ifra DC-link. BT_CABLE.L1.I er strømmen som går igjennom sikringen til DC-feeder til Bow thruster drive.

ESS SWBDs

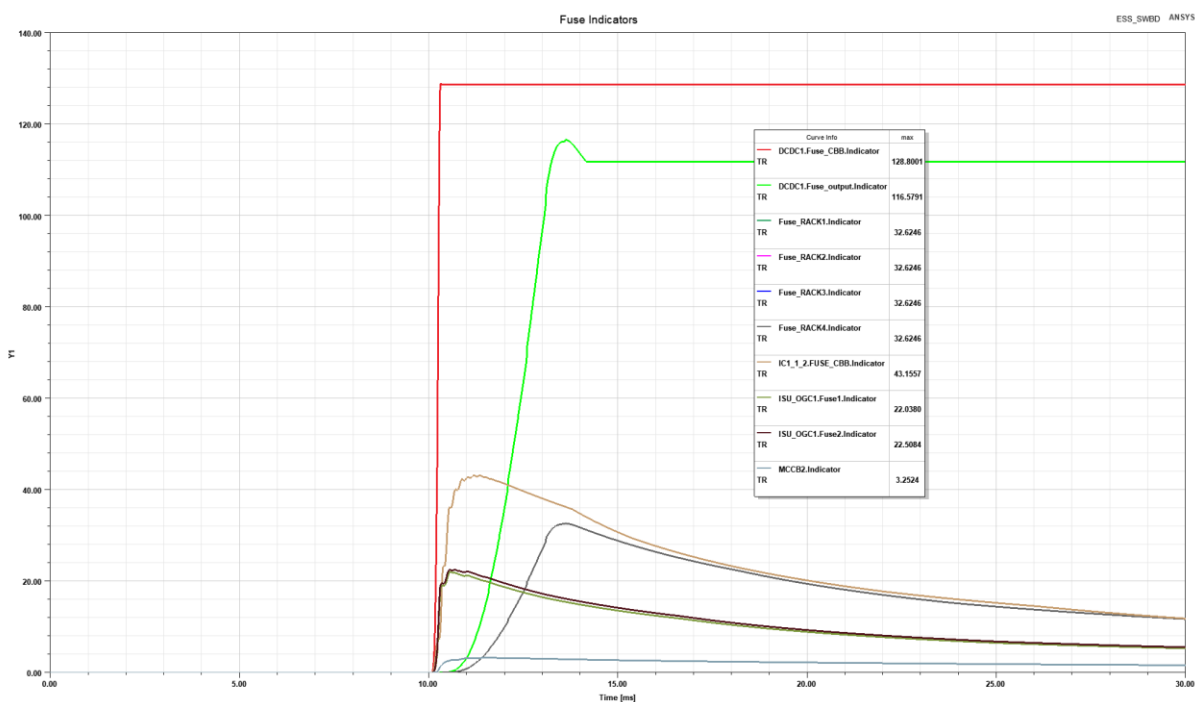
Denne er delt opp i sub-caser:

Max. case A: Beginning of Life (BOL) verdier for batteriene. Det vil si at batteriene er ved starten av sin levetid (laveste DCIR, intern resistans) og at spenningen ved sin maksimale operasjonsverdi.

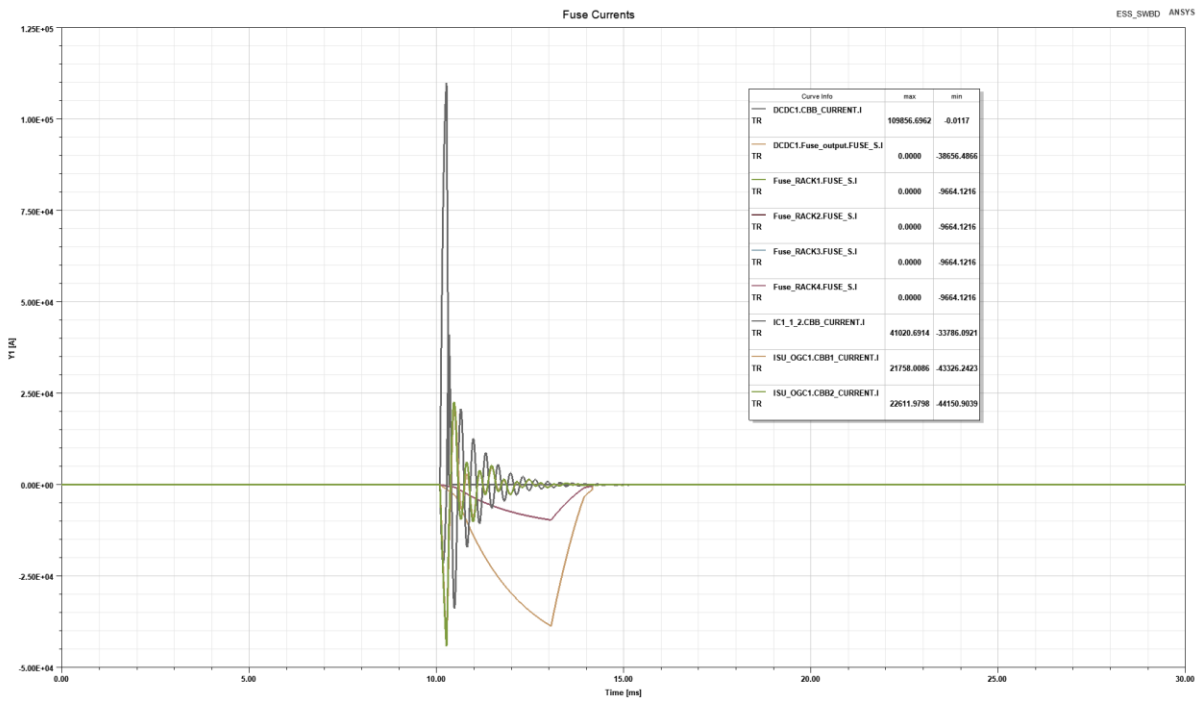
Min. case B: End of Life (EOL) verdier for batteriene. Det vil at batteriene er ved slutten av sin levetid (høyeste DCIR, intern resistans) og at spenningen er ved den laveste operasjonsverdien.

Sub-case A gir verst mulige kortslutningsstrømmer, mens sub-case B gir verste mulige forhold for selektivitet i systemet. *Målet er å vise at systemet er selektivt selv ved sub-case B.*

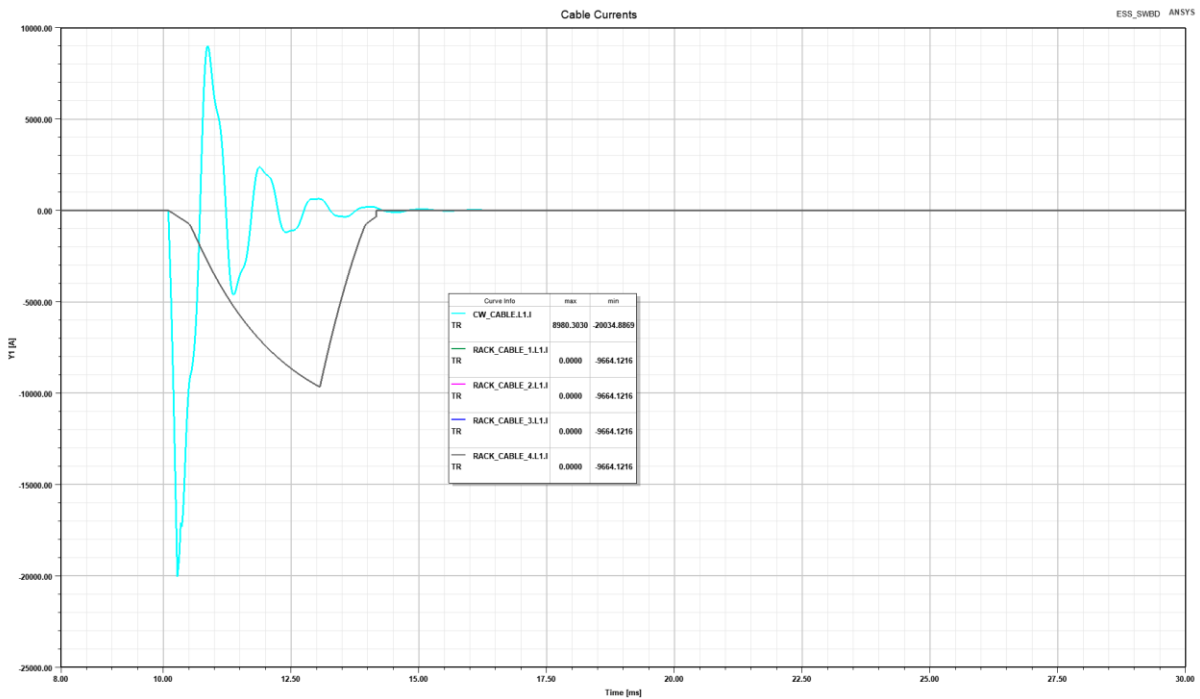
Feilsted 2a: Case A: Feil i DCDC omformer - BOL



Figur 19: Sikringsindikatorer for feil i R8i-modul på DCDC omformer. Sikringen til R8i-modulen ryker etter 0.24 ms og skiller DCDC-omformeren fra resten av DC-linken. Etter 3ms ryker også utgangssikringen til DCDC-omformeren, noe som skiller den fra batteri-stringene også. Dette viser at systemet er selektivt.

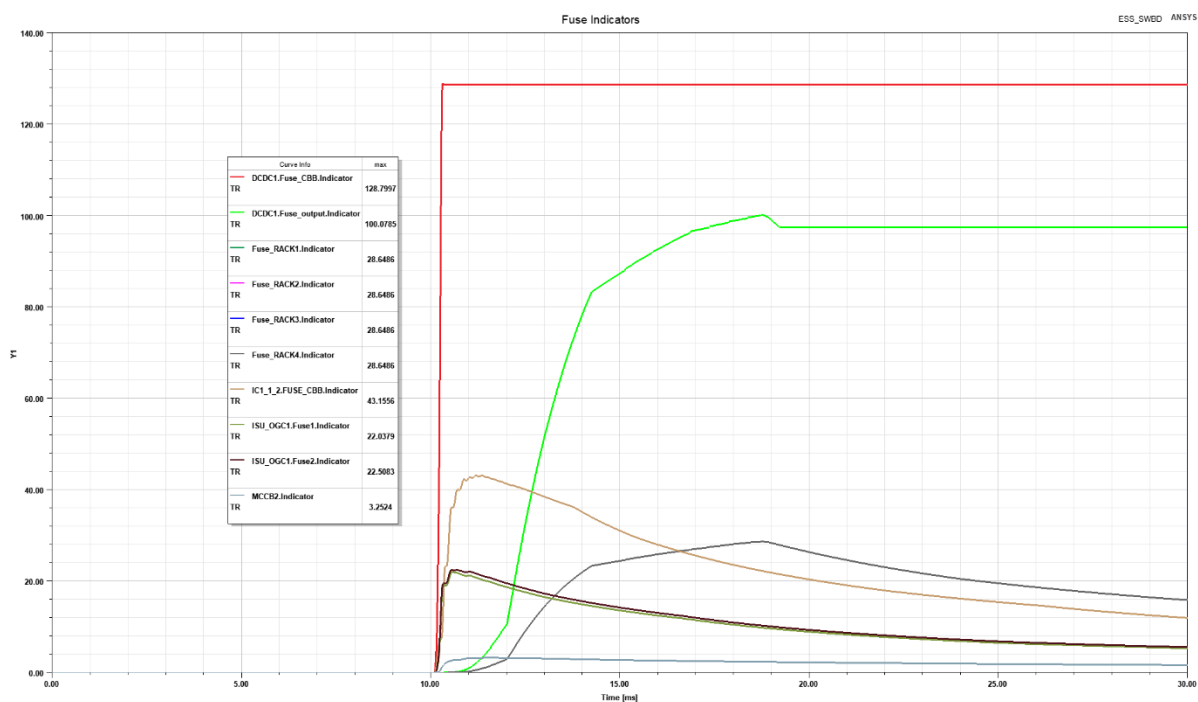


Figur 20: Sikringsstrømmer.

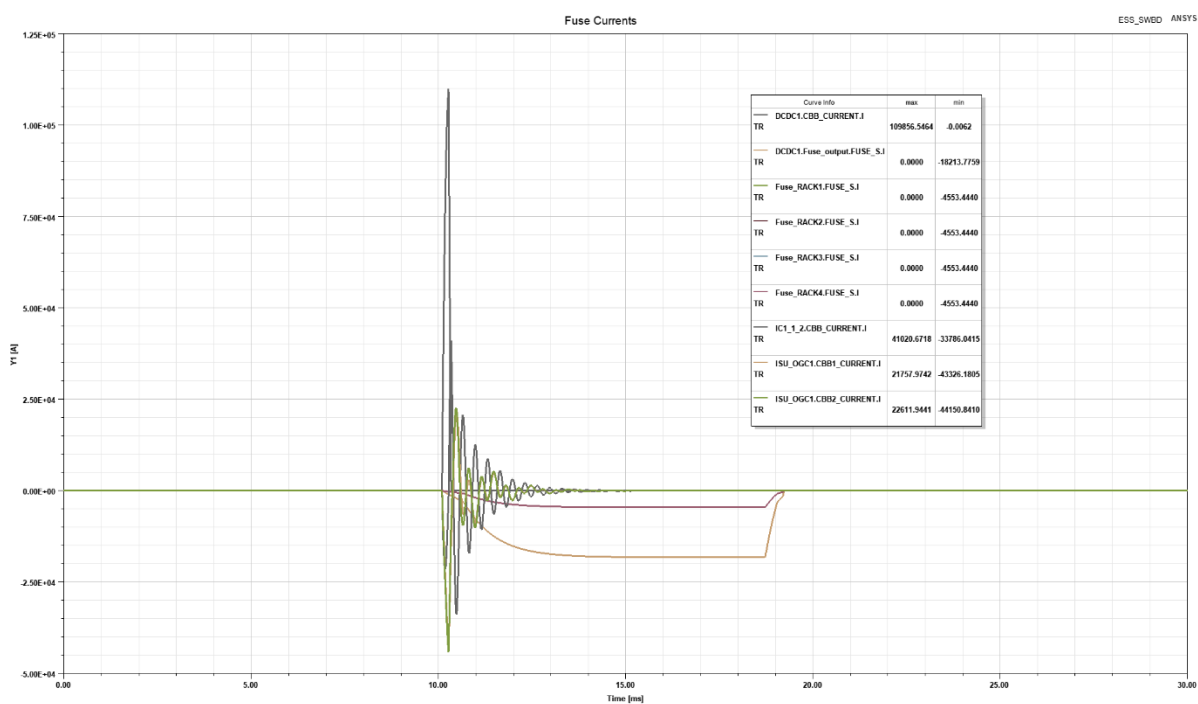


Figur 21: Kabelstrømmer. RACK_CABLE_x.L1.I viser batteristrømmen fra de 4 tilkoblede batteristringene. De peaker på 9,7 kA etter 3 ms (når output fuse opererer). Totalt bidrag fra batteristrings til DCDC er $4 \times 9,7 \text{ kA} = 38,8 \text{ kA}$.

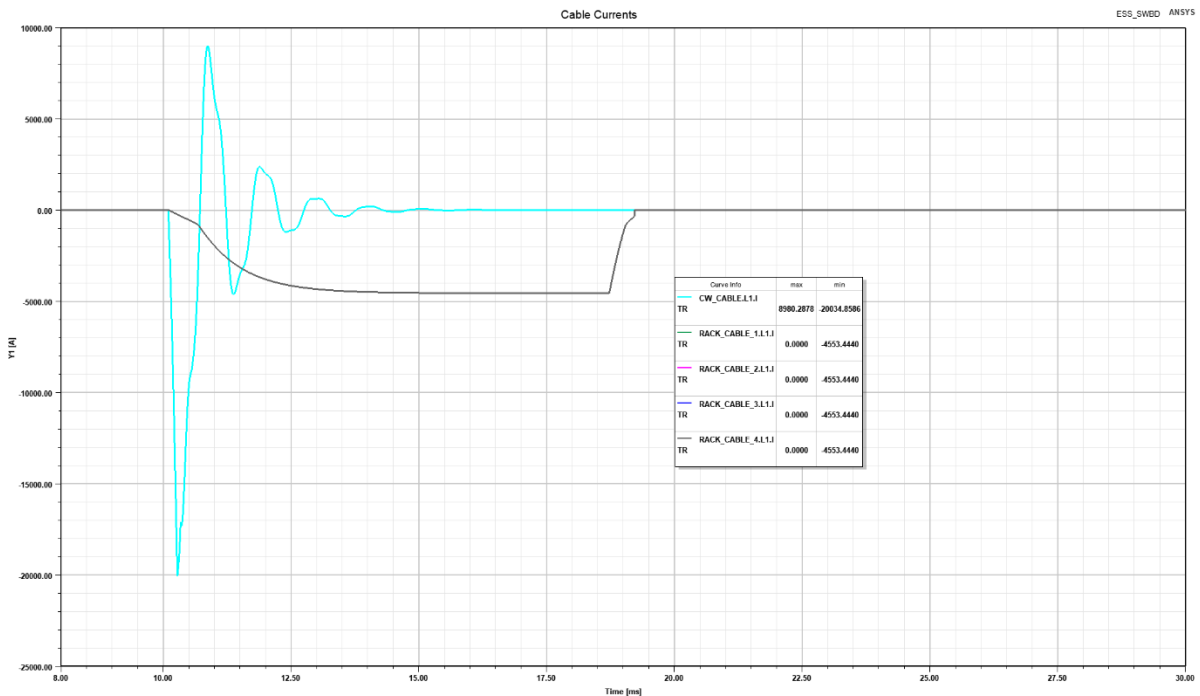
Feilsted 2a: Case B: Feil i DCDC omformer – EOL



Figur 22: Sikringsindikatorer for feil i R8i-modul på DCDC omformer. Sikringen til R8i-modulen ryker etter 0.24 ms og skiller DCDC-omformeren fra resten av DC-linken. Etter 8,75 ms ryker også utgangssikringen til DCDC-omformeren, noe som skiller den fra batteri-stringene også. Dette viser at systemet er selektivt.

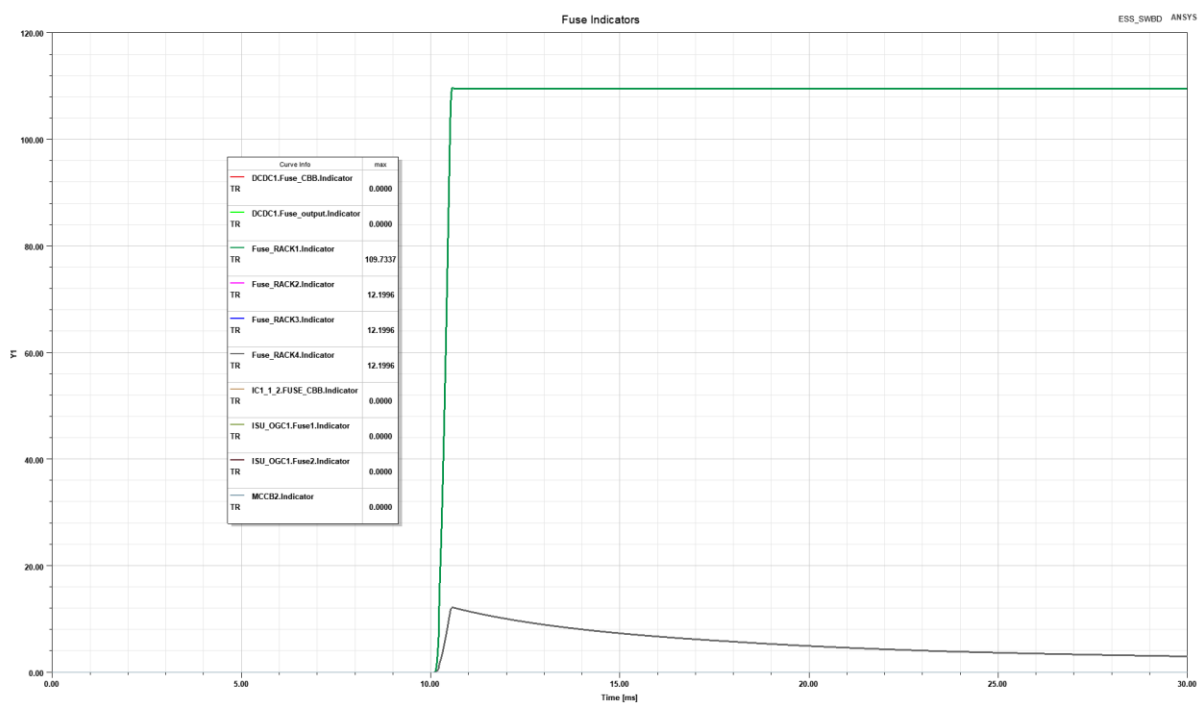


Figur 23: Sikringsstrømmer. Merk at batteristrømmen varer over lengre tid nå siden output sikring opererer saktere for minimums-case B.

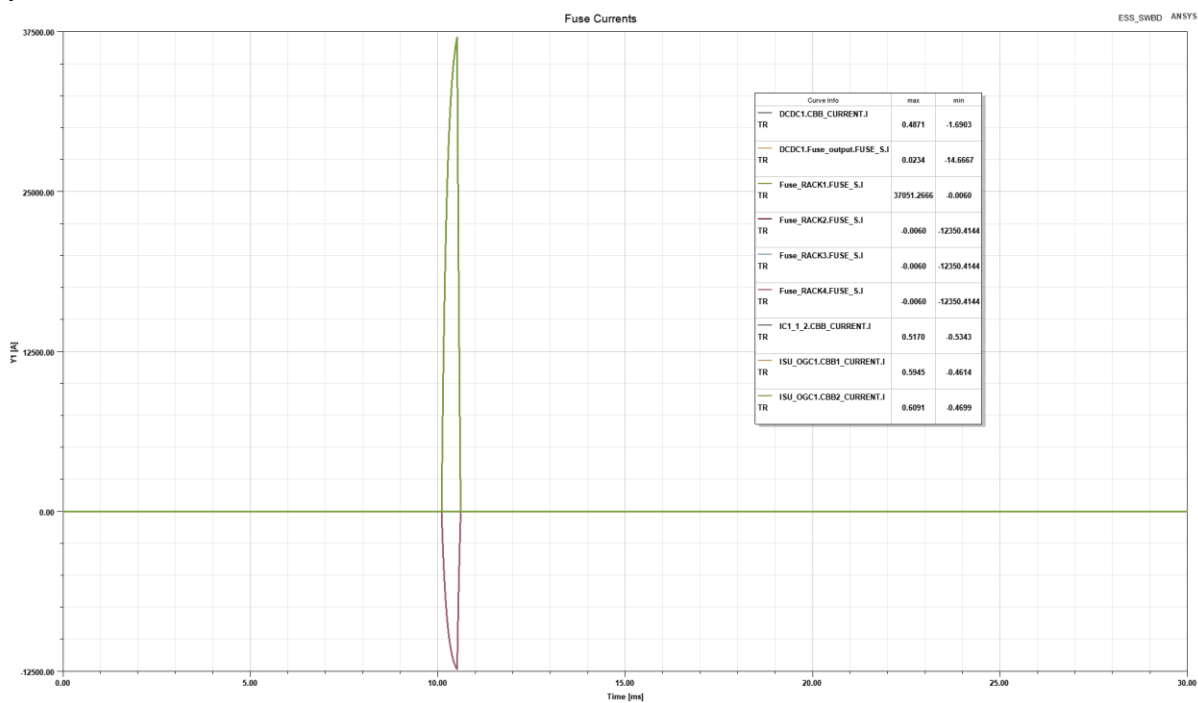


Figur 24: Kabelstrømmer. RACK_CABLE_x.L1.I viser batteristrømmen fra de 4 tilkoblede batteristringene. De peaker på 4,6 kA etter 8,75 ms (når output fuse opererer). Totalt bidrag fra batteristrings til DCDC er $4 \times 4,6 \text{ kA} = 18,4 \text{ kA}$. Merk at strømmen fra batteri-stringene er lavere ved minimumscase B (lavere spenning og høyere DCIR på batteriene). Det er dette som gjør at output sikringen i Figur 22 bruker lengre tid på å operere kontra Case 1a.

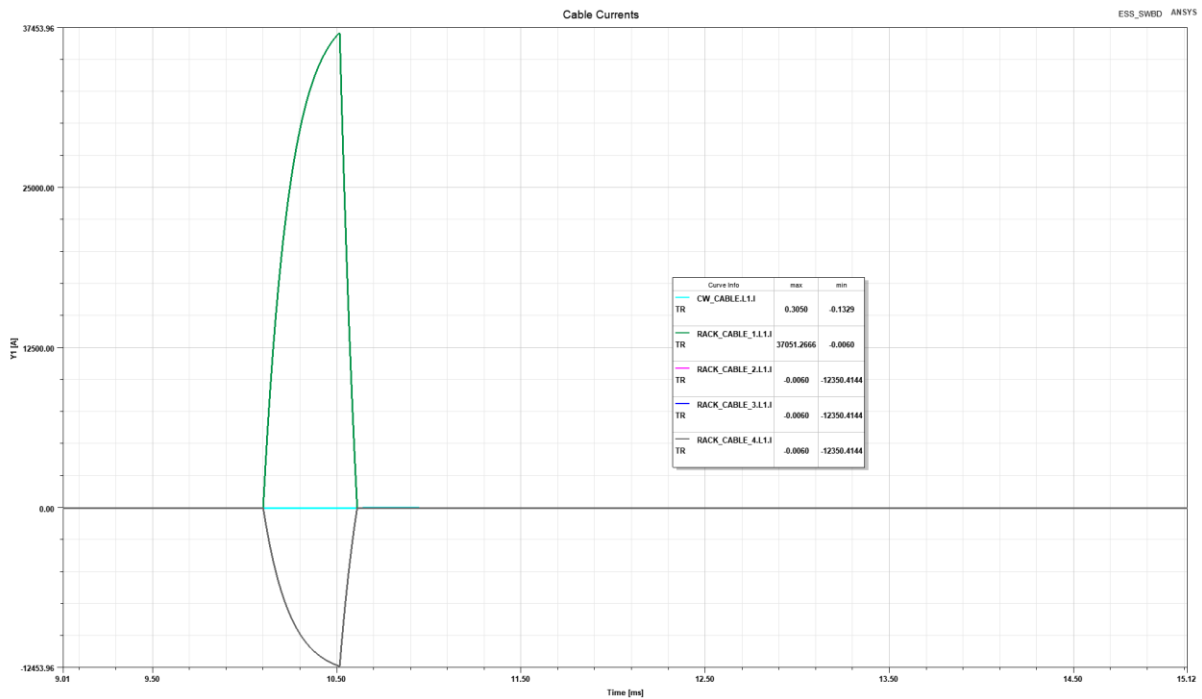
Feilsted 2b: Case A: Intern feil i en batteri-string - BOL



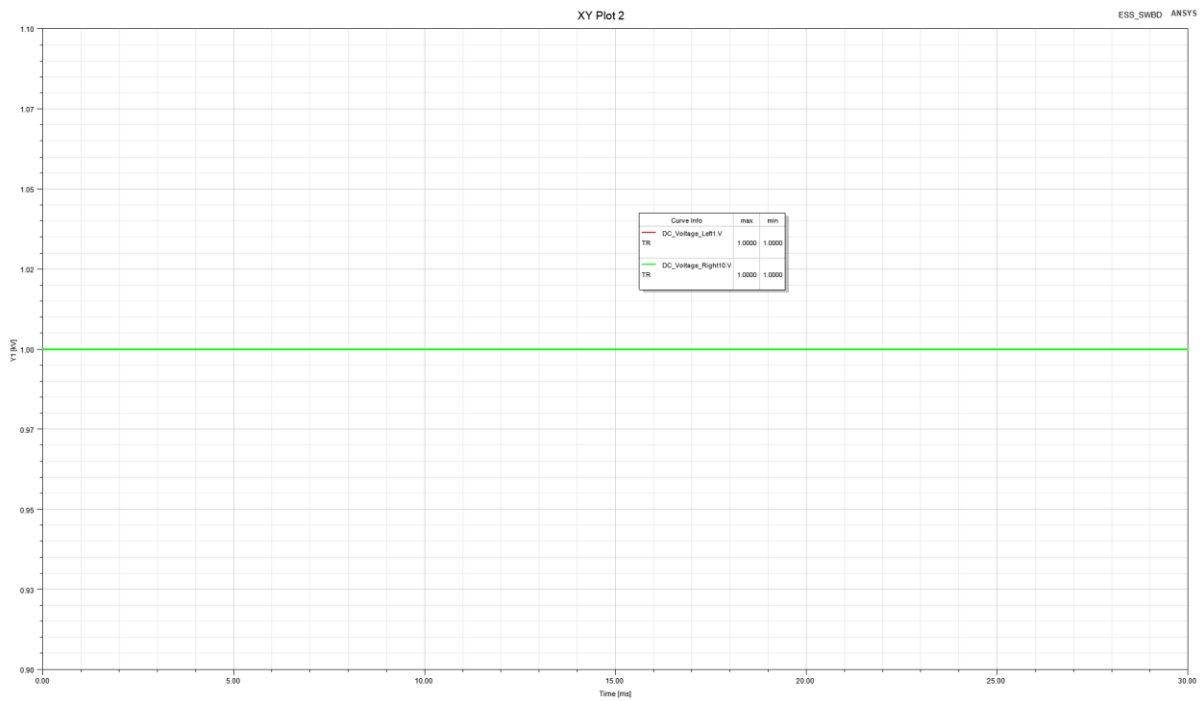
Figur 25: Batterisikringen til batteristring med intern feil ryker etter 0,48 ms. Ingen andre sikringer ryker.



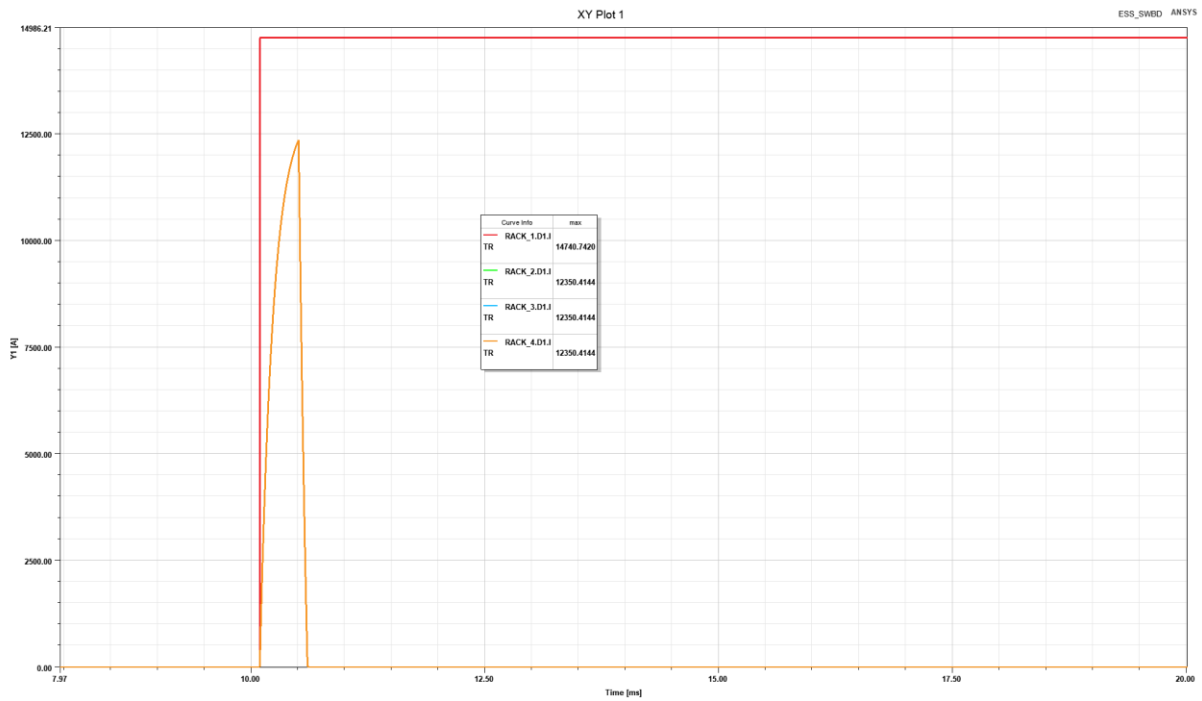
Figur 26: Sikringsstrømmen. Peak 37 kA for sikringen som opererer.



Figur 27: Kabelstrøm ved intern feil på en batteristring. Man kan se at en feil i en batteristring ikke påvirker resten av DC-linken (lyseblå linje er strømmen i CW kabelen). Peak strøm i kabel til batteristring med feil er 37 kA.

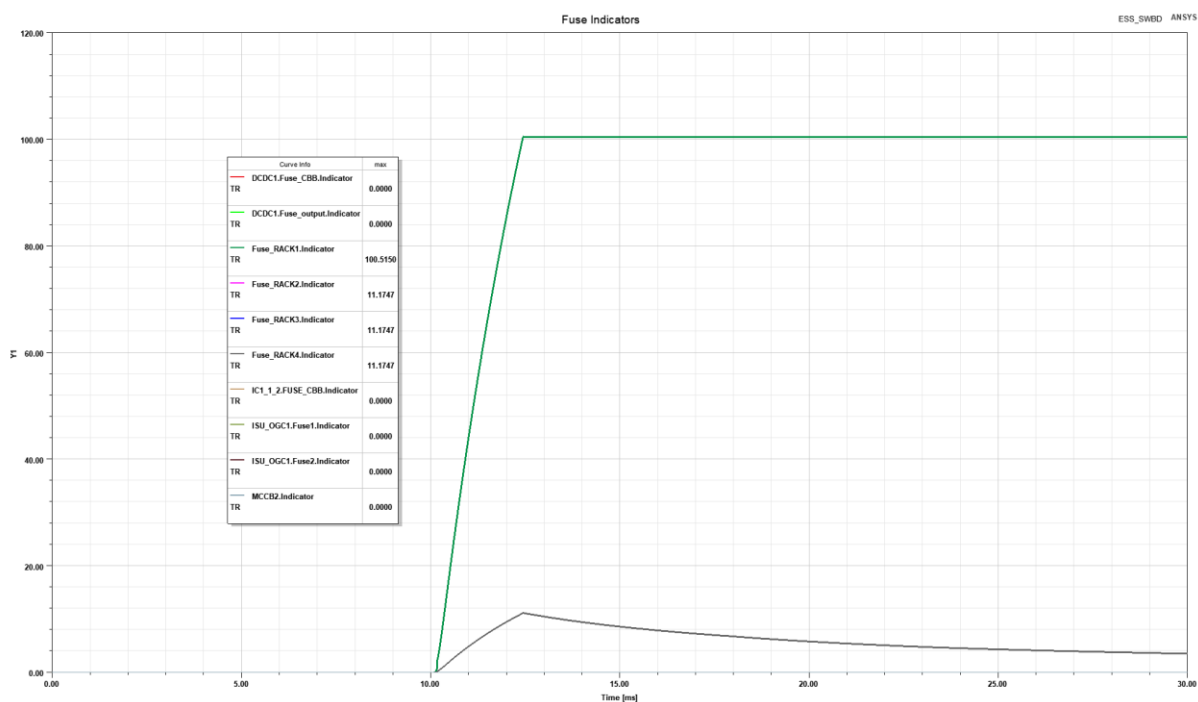


Figur 28: DC-spenning ved feil på en batteristring. Resten av systemet påvirkes ikke av en intern feil på en batteristring (Foruten å miste kapasiteten til den stringen).

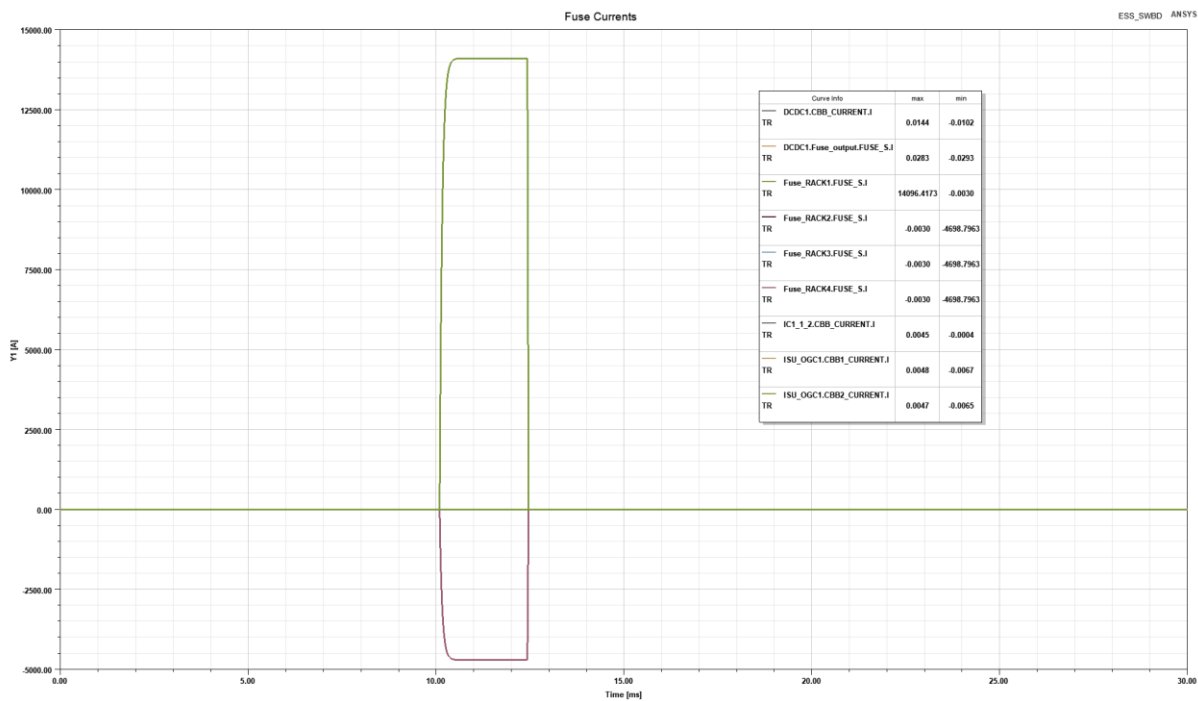


Figur 29: Kortslutningsstrøm fra hver batteristring. Batteristring med intern feil leverer full kortslutningsstrøm på 14,7 kA, mens de andre leverer en noe redusert strøm på grunn av impedansen i kablene mellom de batteristringene og feilen.

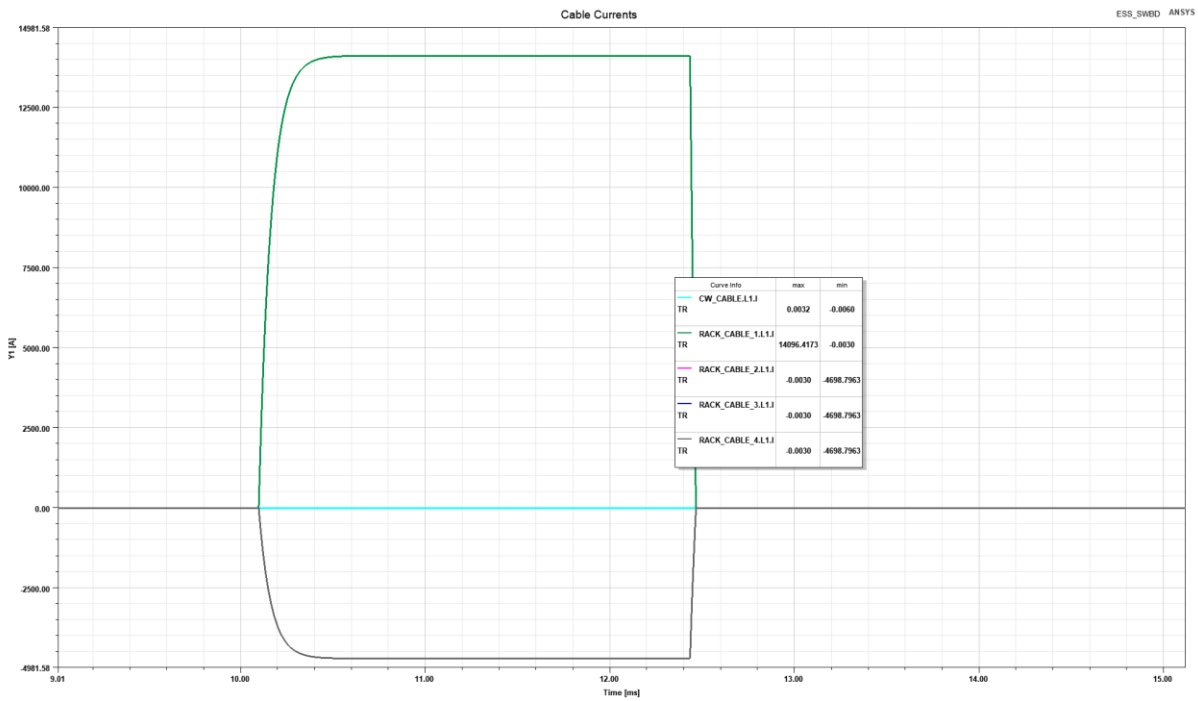
Feilsted 2b: Case B: Intern feil i en batteri-string - EOL



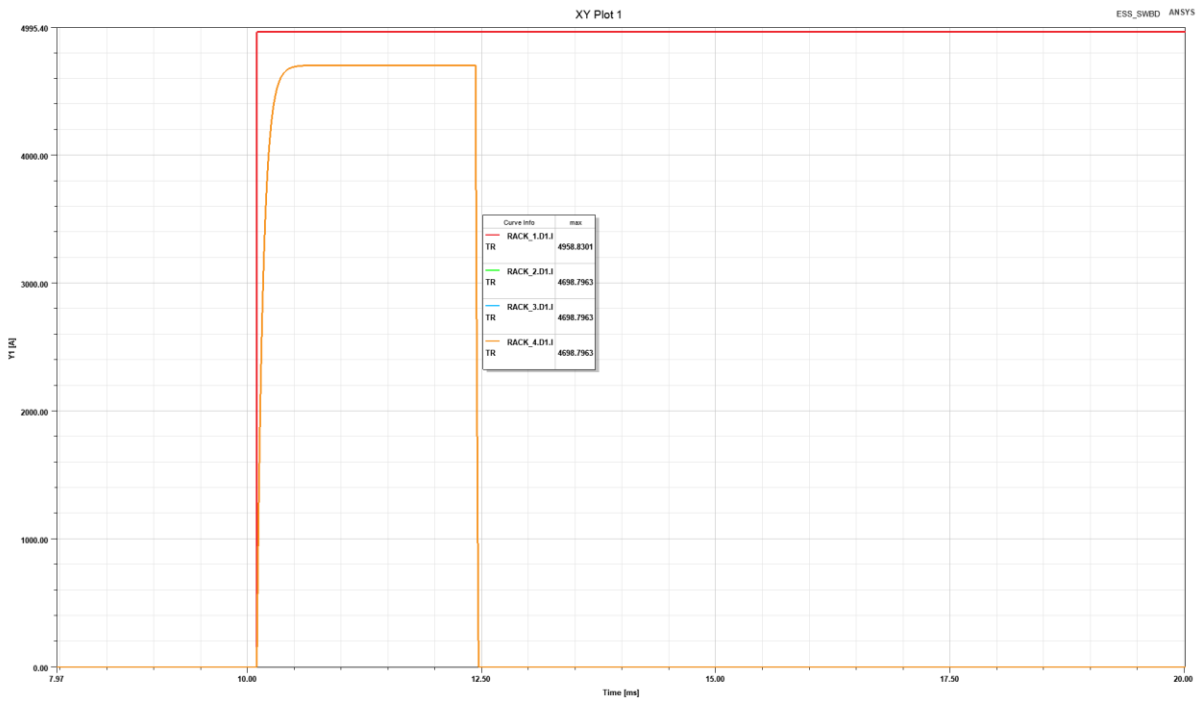
Figur 30: Batterisikringen til batteristring med intern feil ryker etter 2,4 ms. Ingen andre sikringer ryker.



Figur 31: Sikringsstrømmen. Peak 14,1 kA for sikringen som opererer. Merk at det er mye mindre kortslutningsstrøm ved denne casen enn ved case A.



Figur 32: Kabelstrøm

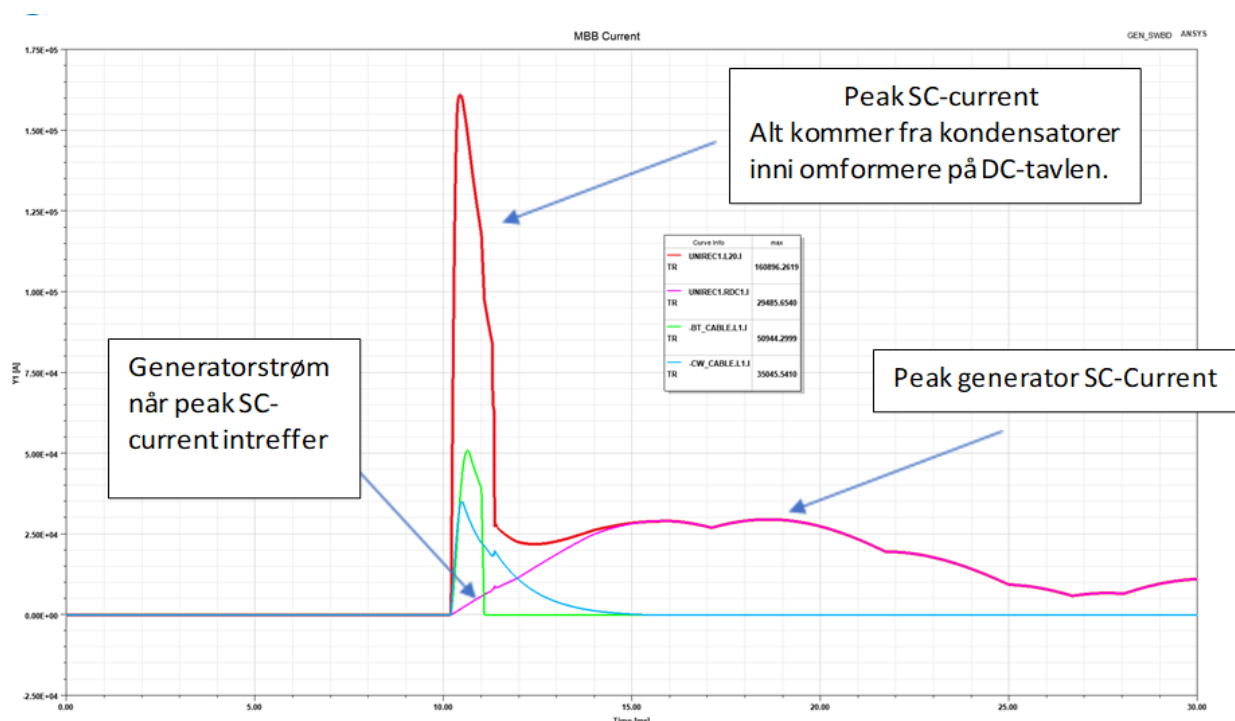


Figur 33: Batteristrøm. Merk mye lavere strøm fra batteristringer i denne casen enn ved case A.

Del 3: Maksimale kortslutningsstrømmer

Feilsted 1e: Kortslutning på hoved busbars på DC-link. (mellom + og – skinnene)

- Mål: Vise at maksimal kortslutningsstrøm gjennom skinnene i tavlen. I prosjekter gjør man dette for å sjekke at strømmen ikke er mer enn hva skinnene tåler av mekanisk stress.
- Mål 2: Vise at sikringer kan eller ikke kan operere. Uansett vil hele tavlen trenge reparasjon etter en slik hendelse.



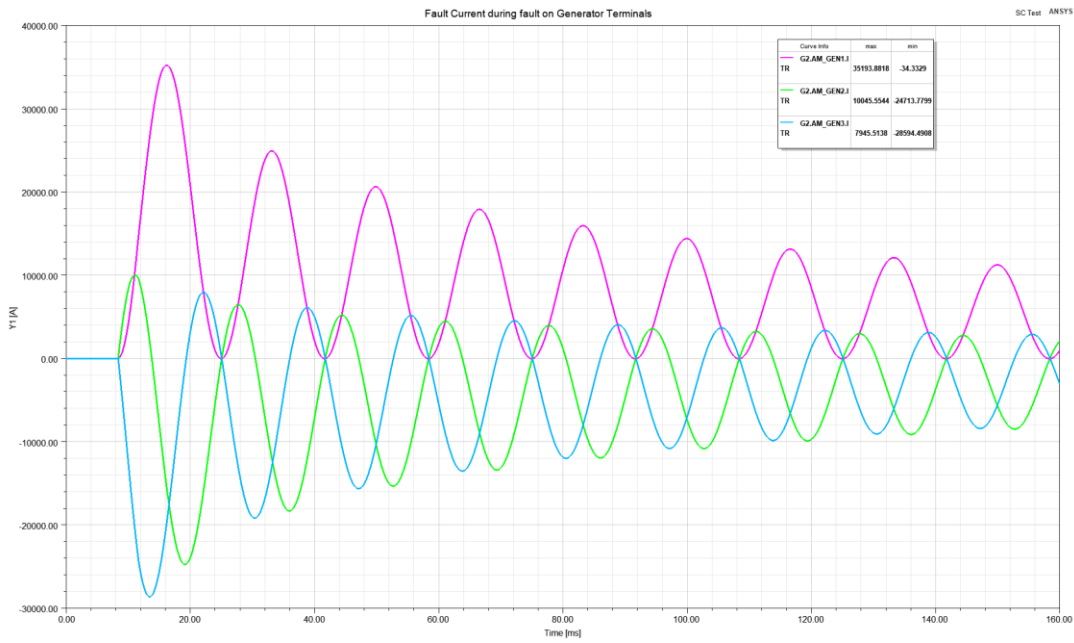
Figur 18: Rød linje – strøm gjennom samleskinner for DC-linken til feilen. Den første peaken kommer av tilkoblede R8i-moduler på DC-linken + fra bow thruster og CW no.1 (blå og grønn linje). Deretter er feilstrømmen kun bestående av generatorbidraget (rosa linje). Dette bildet illustrer også forskjellen i raskheten å kortslutningsstrøm fra kondensatorer (i omformerene) og fra generator.

Del 4: Kortslutningsanalyse av generator

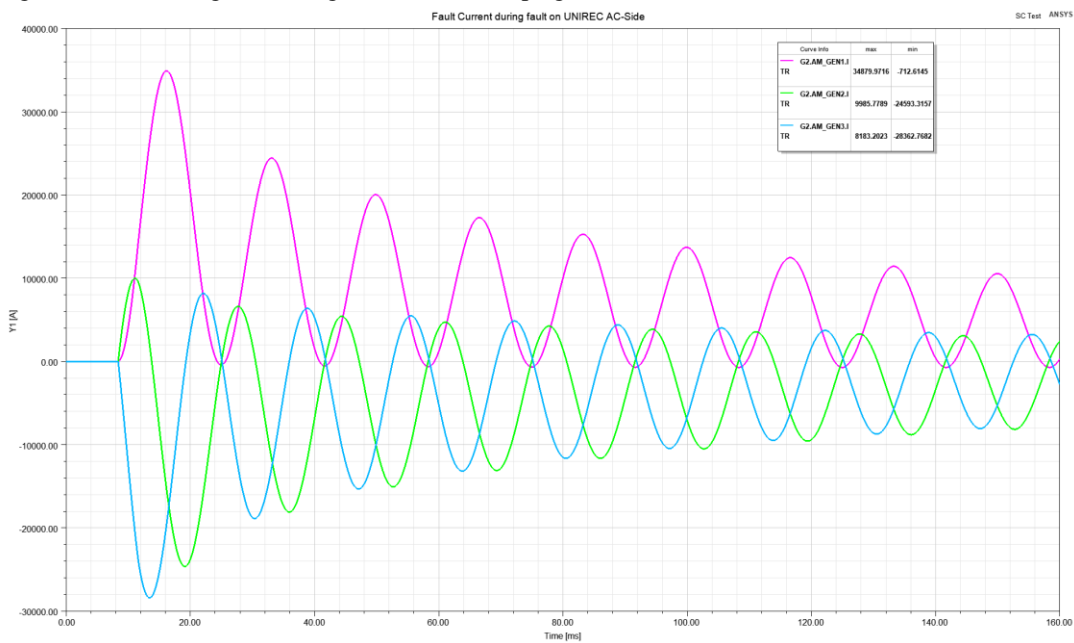
Generator-Likeretter Kortslutningsberegninger

Operation mode	Generator terminals	End of Cable (10m)	Rectifier DC-side
1800 RPM, 60 Hz	35,2 kA	34,9 kA	30,4 kA
1200 RPM, 40 Hz	48,3 kA	47,7 kA	39,7 kA

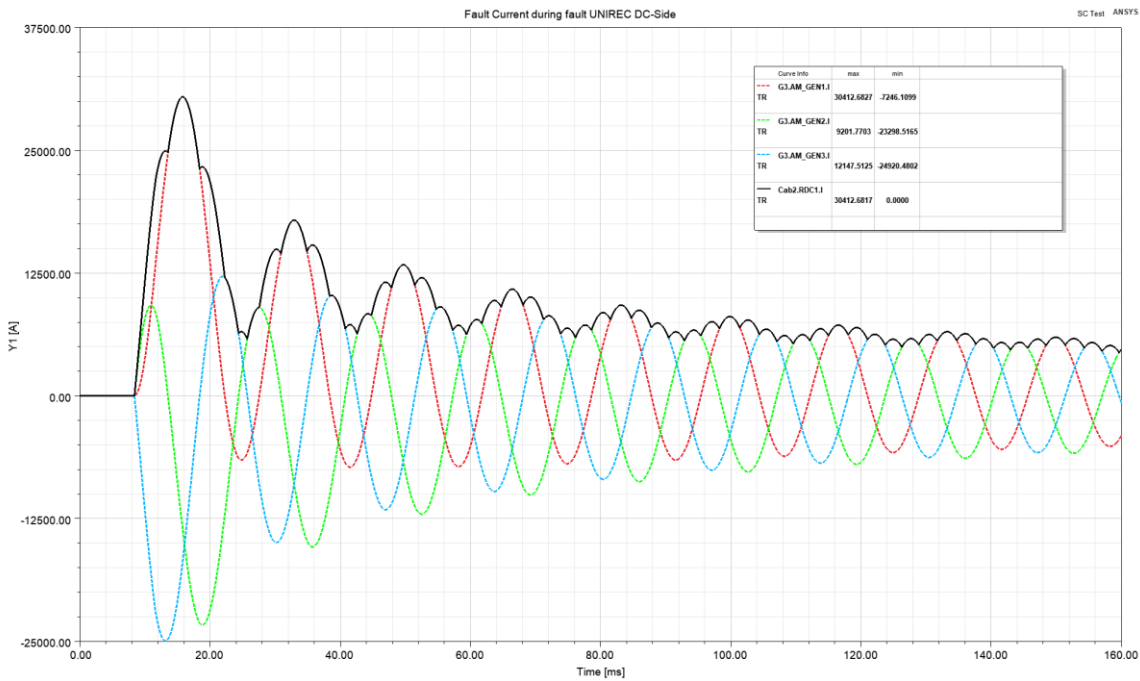
1800 RPM



Figur 1: Kortslutningstrøm fra generator ved feil på generator terminaler. Peak strøm er 35,2 kA.

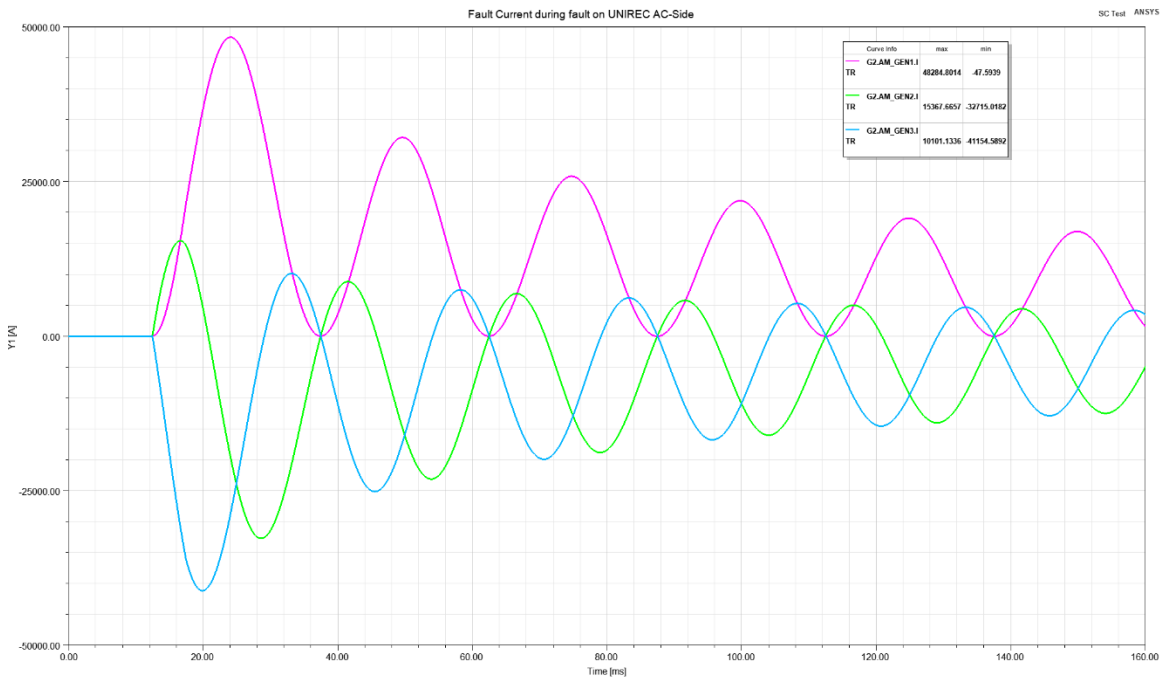


Figur 2: Kortslutningstrøm fra generator ved feil på ende av kabel. Peak strøm er 34,9 kA.

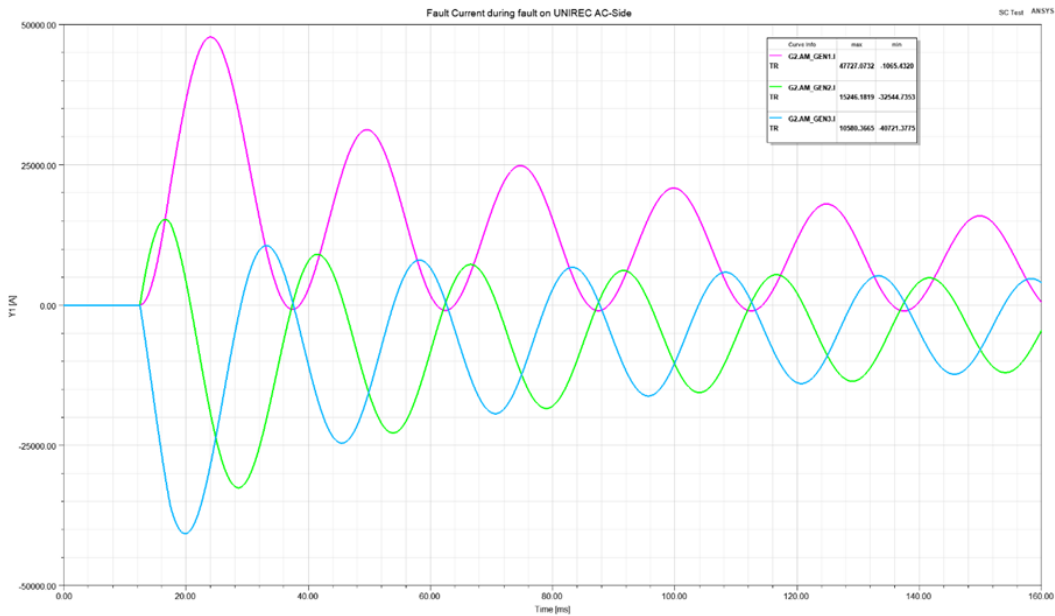


Figur 3: Kortslutningstrøm fra generator ved feil på DC-siden av likeretter. Peak strøm er 30,4 kA.

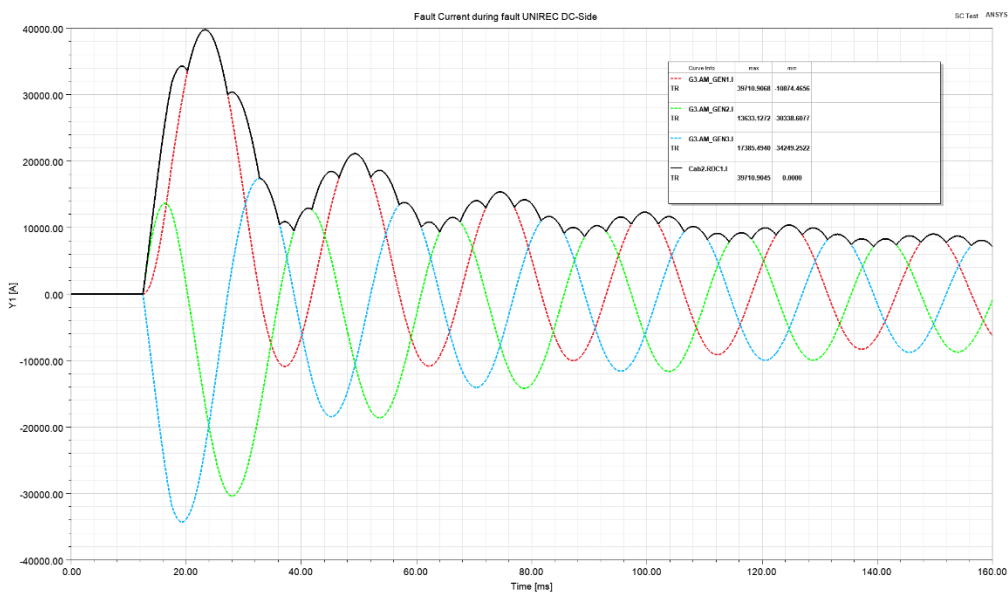
1200 RPM



Figur 4: Kortslutningstrøm fra generator ved feil på generator terminaler. Peak strøm er 48,3 kA.



Figur 5: Kortslutningstrøm fra generator ved feil på ende av kabel. Peak strøm er 47,7 kA.



Figur 6: Kortslutningstrøm fra generator ved feil på DC-siden av likeretter. Peak strøm er 39,7 kA.

Generator-Likeretter Kortslutningsbetraktninger

The Generator-Rectifier is a thyristor-controlled rectifier that connects the variable speed generator to the DC-Grid.

The protective function of the thyristor-rectifier is to limit or block a fault current such that downstream breakers can open. Limiting or blocking of current is done by increasing the firing angle of the thyristors.

The thyristor bridge is able to block AC current at zero-crossings of the generator current and consequentially the DC current being supplied from the rectifier. This may first happen after approximately two time periods of the fault current, due to the DC-part of the short-circuit current.

During normal operation, the Generator-Rectifier is controlled as a diode rectifier, with a firing angle of ~ 5 degrees. Figure 2 shows that, when the Generator-Rectifier is operated as a diode rectifier, the fault currents drawn from the generator are equivalent to that of a normal 3 phase short-circuit.

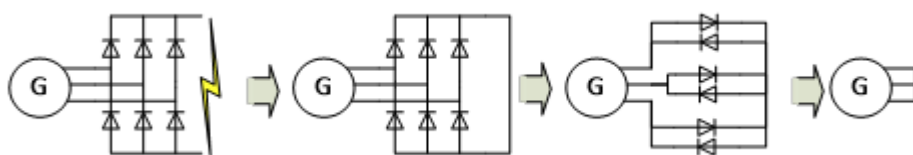


Figure 2: Equivalent circuit of generator-rectifier during a bolted 3-phase short-circuit fault.

Figure 3 shows an example of the currents that would result in the case of a bolted fault on the secondary side of the rectifier. The solid line shows the current DC-current flowing on the secondary side of the rectifier, and the dashed lines show the phase currents drawn from the generator.

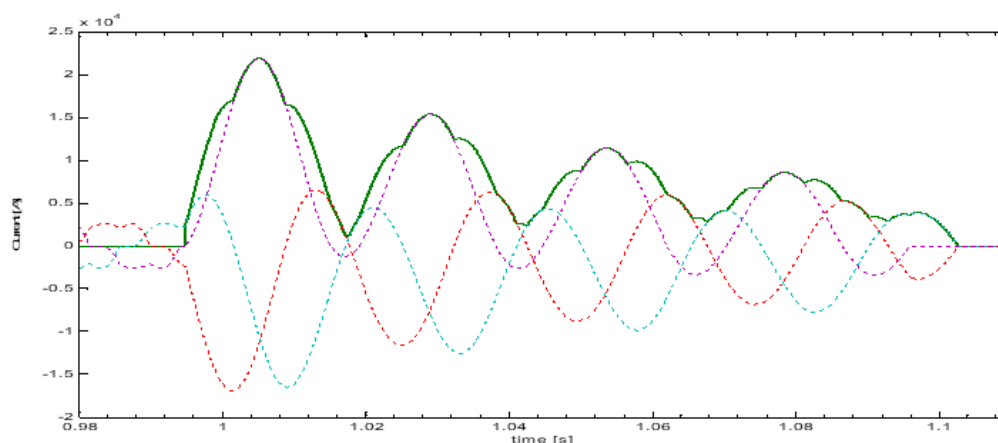
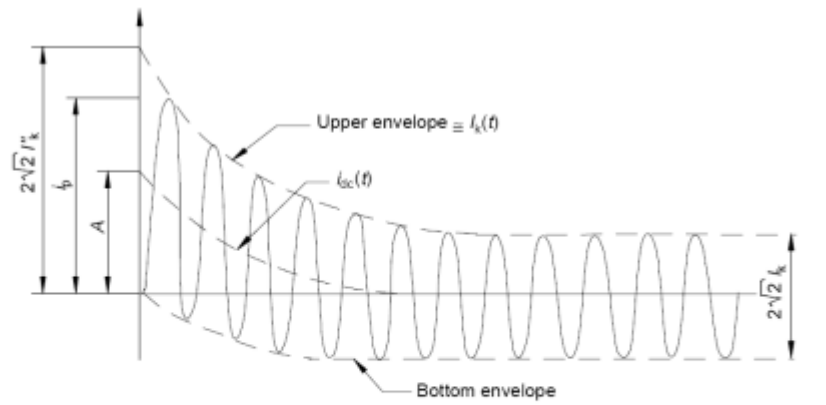


Figure 3: DC-current output of a thyristor-rectifier for a generator, during a bolted 3-phase fault on the DC-side.

Looking at Figure 3, it can be seen that phase 1 defines the upper envelope defined by IEC61363 in Figure 4 below.



- I''_k initial symmetrical short-circuit current
- i_p peak short-circuit current
- I_k steady-state short-circuit current
- i_{dc} decaying (aperiodic) component of short-circuit current
- A initial value of the aperiodic component

Figure 4: IEC61363 definition of generator short-circuit current.

Vedlegg 4 – Generelle drivstoffberegninger 1

		Data for marin gassolje og brukstid på generatorer				Avlesning fra diagram			
Formel for g/kWh til L/h er: $Q = \frac{q \cdot P}{\rho}$ q = spesifikt drivstofforbruk, P = effekt, ρ = tetthet til diesel	$Q = \frac{q \cdot P}{\rho}$	Tetthet diesel, ρ =	860	kg/m ³	Last	FSDG [g/kWh]	VSDG [g/kWh]		
		Tid gen til kai per år (6 uker) =	1008	h	75 %	201	196		
		Tid gen seiling per år =	3500	h	55 %	209	198		
		Pris for marin gassolje =	8	kr	25 %	245	222		
		Last	Last i effekt, P [kW]	Dieselforbruk, Q [L/h]	Antall timer i drift per år [h/y]	Antall liter per år per fregatt [L/y]	Kostnad per år [kr/y]	Besparelse [%]	Besparelse (5 fregatter over 30 år) [kr]
FSDG	Seiling 55% x 1 gen	550	128,5	3500	449 913	kr 3 599 302	---	---	
	Seiling 75% x 1 gen	750	182,3	3500	637 936	kr 5 103 488	---	---	
	Kailligge 75% x 1 gen	750	182,3	1008	183 726	kr 1 469 805	---	---	
	Seiling 25% x 4 gen	250	284,9	---	---	---	---	---	
FSDG total	N/A	---	---	---	1 271 574	kr 10 172 595	---	---	
VSDG	Seiling 55% x 1 gen	550	125,3	3500	438 721	kr 3 509 767	---	---	
	Seiling 75% x 1 gen	750	172,7	3500	604 360	kr 4 834 884	---	---	
	Kailligge 75% x 1 gen	750	172,7	1008	174 056	kr 1 392 447	---	---	
Generell VSDG 1000kW	Seiling 25% x 4 gen	250	258,1	---	---	---	---	---	
VSDG total	N/A	---	---	---	1 217 137	kr 9 737 098	---	---	
Besparelse ved bruk av VSDG per fregatt under lengre perioder	N/A	---	---	---	-54437,21	-kr 435 498	-4,28 %	-kr 65 324 651	
Besparelse under klart skip	Seiling 25% x 4 gen	250	26,7	---	---	---	-9,39 %	---	

Vedlegg 5 – Generelle drivstoffberegninger 2

		Data for marin gassolje og brukstid på generatorer				Avlesning fra diagram			
Formel for g/kWh til L/h er: $Q = \frac{q \cdot P}{\rho}$ q = spesifikt drivstofforbruk, P = effekt, ρ = tetthet til diesel	$Q = \frac{q \cdot P}{\rho}$	Tetthet diesel, ρ =	860	kg/m ³	Last	FSDG [g/kWh]	VSDG [g/kWh]		
		Tid gen til kai per år (6 uker) =	1008	h	75 %	210	202		
		Tid gen seiling per år =	3500	h	55 %	220	209		
		Pris for marin gassolje =	8	kr	25 %	274	210		
		Last	Last i effekt, P [kW]	Dieselforbruk, Q [L/h]	Antall timer i drift per år [h/y]	Antall liter per år per fregatt [L/y]	Kostnad per år [kr/y]	Besparelse [%]	Besparelse (5 fregatter over 30 år) [kr]
FSDG	Seiling 55% x 1 gen	550	134,3	3500	470 958	kr 3 760 465	---	---	
	Seiling 75% x 1 gen	750	191,9	3500	671 512	kr 5 372 093	---	---	
	Kailligge 75% x 1 gen	750	191,9	1008	193 395	kr 1 547 163	---	---	
	Seiling 25% x 4 gen	250	318,6	---	---	---	---	---	
FSDG total	N/A	---	---	---	1 334 965	kr 10 679 721	---	---	
VSDG	Seiling 55% x 1 gen	550	129,2	3500	452 151	kr 3 617 209	---	---	
	Seiling 75% x 1 gen	750	182,3	3500	637 936	kr 5 103 488	---	---	
	Kailligge 75% x 1 gen	750	182,3	1008	183 726	kr 1 469 805	---	---	
Generell VSDG 1000kW	Seiling 25% x 4 gen	250	244,2	---	---	---	---	---	
VSDG total	N/A	---	---	---	1 273 813	kr 10 190 502	---	---	
Besparelse ved bruk av VSDG per fregatt under lengre perioder	N/A	---	---	---	-61152,33	-kr 489 219	-4,58 %	-kr 73 382 791	
Besparelse under klart skip	Seiling 25% x 4 gen	250	74,4	---	---	---	-23,16 %	---	

Vedlegg 6 – Tapsanalyse

Kilde tap	Tap %	Tap kW	Last Gen kW	DCSB Last	ACSB Last	DC last - tap	AC last - tap	Tap kW	Tap %
Likeretter	2		4000	40 %	60 %	1472,3653	2231,0842	296,55048	7,4137619
Kjøling		38.95 (4 soner) 44.083 (2 soner)	4000	60 %	40 %	2208,548	1487,3895	304,06254	7,6015636
Vekselretter	2		4000	30 %	70 %	1104,274	2602,9316	292,79444	7,3198611
Trafo	1,5		4000	20 %	80 %	736,18266	2974,7789	289,03841	7,2259602
								Snitt	7,3902867
Tap før DCSB last		Tap før ACSB last							
Likeretter		Likeretter							
Kjøling		Kjøling							
Omformer før forbruker		Vekselretter							
		Trafo							
<p>Forklaring $(F5 - (38,95 \cdot 4) - (44,083 \cdot 2)) \cdot 0,4 \cdot 0,98$ All effekt, minus tap i tavlene, ganget med andel som tas ut i enten ACSB eller DCSB. Deretter ganges tap over transformator eller vekselretter. Dette tap trekkes fra total effekt levert for å finne taps prosent</p>									

Vedlegg 7 – Intervju 1

- = intervjuobjekt 1
- + = intervjuobjekt 2

Generelle spørsmål

- I hvilken grad er systemets redundans tilstrekkelig?
-Redundans oppleves god i eksisterende fordeling.
- Er det noen krav fra maritime aktører som kan gjøre implementering av ZEDS utfordrede?
DNV navy, RAR (Krav til generatorer og lastforsyning).
-Blankt
- Erfaringer med nødkabling om bord?
-Ja, har brukt nødkabling på øvelse. To skrog har nytt, tryggere systemet. Dette fungerer.
- Generelle fordeler og ulemper med 2 hovedtavler?
-To hovedtavler gir redundans. ZEDS kan tilsynelatende gi høyere redundans, men i utgangspunktet er redundansen i eksisterende AC-fordeling tilstrekkelig.
- Hvordan synes du at lastsentrene fungerer i dag?
- Generelle fordeler og ulemper med 4 til 6 enkeltstående lastsentre?

Battle Damage Control/Havari

- Hva er kravene til overlevelsessevne til et fartøy på fregatt størrelse. Antall treffere, andel av last sentre operative.
-Blankt
- Hvilke utfordringer oppleves under havari eller krigsskader ved det eksisterende fordelingssystemet på fartøyene?
-Høy kortslutningseffekt, gjør at arbeid i tavlerom under skadesituasjoner må foregå iført sikkerhetsutstyr, noe som er ubekvemt og kan gjøre at ting tar lengre tid. Sikkerhetsutstyr må også anvendes i alle tavlerom om det ligger mer enn en generator på tavlen. Arc-flash sensorer kan senke kravet til personlig beskyttelsesutstyr, men disse er det nå brukerforbud på.
- Hvilke styrker har det nåværende fordelingssystemet i forhold til havari eller krigsskader?
-Systemet er ikke høyspent, dette muliggjør arbeid under spenning som er en fordel og under slike situasjoner. Det er også mulig at personell feil under operering av systemet er mindre utslagsgivende enn om systemet var høyspent. Dette er en fordel, grunnet at skadesituasjoner er preget av høyt tempo.
 - Tror du en annen konfigurasjon på sonene og lastsentrene ville økt driftssikkerhet mtp. BDC/Havari?
- Hva er i dag “worst-case” scenario for det elektriske fordelingssystemet?
(BEGRENSET?)
-Problematisk at selektivitet ikke er god nok. Skader og feil kan forplante seg i fordelingen og kan skape større feil

- Hvilke erfaringer med systemet ble gjort under havariet av KNM Helge Ingstad i 2018? Hvilke aspekter av systemet leverte tilfredsstillende, forholdene tatt i betraktning. Hvilke aspekter leverte ikke som forventet?
-Blankt
- Hvilke fordeler kan potensielt oppnås med et DC-ZEDS system under et krigs/havari scenario?
-Blankt
- Hvilke ulemper kan potensielt oppstå med et DC-ZEDS system under et krigs/havari scenario?
- Under et havari eller under håndtering av krigsskade, hvilke av disse er høyest verdsatt i et fordelingsystem? Enkelhet, Redundans, Maksimal effekt levering, last-shedding (automatisert?). Er det noen av disse punktene som utelukker hverandre. Eksempelvis automatisert last-shedding motvirker enkelhet.
Redundans er viktigst, god opplæring gjør enkelhet mindre viktig en redundans og maksimal lastforsyning.
- Hvilke konstruksjonstiltak kan gjøres for å sikre den elektriske fordelingen og kan noen av disse tiltakene utelukkes ved overgang til DC- ZEDS.
Hovedsakelig redundans og selektivitet.
- Hva betyr det å drifte med åpen ring og lukket ring, og hva medfører de to driftsforholdene?
 - Hvordan kan dette eventuelt bli bedre ved bruk av et DC-ZEDS
- Hvilke deler av fordelingen har mannskapet i dag mulighet til å utbedre om skipet skulle bli skadet. Eksempelvis, PMS, brytere etc. Er det reservedeler om bord?
-Utbedringer mannskapet kan gjøre er å bytte brytere, både i tavler og i fordelingen. Mannskapet kan anvende nødkabler. Om IMPS er ute av spill kan systemet styres lokalt/manuelt. Om styring og overvåking av elektrisk kraftfordeling skades er ikke dette noe mannskapet har mulighet til å utbedre. Men kontroll og overvåkningssystem har god redundans, dette er også koblet i ringnett og alle interfacer er dobbelt opp av på skipet.
- Hvilke utfordringer møtes når skipet skal spenningssettes etter Black ship scenario. Er det trolig at disse utfordringene vil bedres eller verres av en DC-fordeling.
-Automasjonen rundt black ship fungerer bra. Innfasing fungerer veldig bra. Det tar bare 10-15 sekunder å kjøre opp en generator og fase denne inn.

+Prosessen består av at tavlene er koblet fra hverandre, generatorer legges inn på tavler, så fases tavlene inn.

Økonomi

- Under hvilke lastforhold foregår normal drift? (prosent av maks kapasitet)
-Normalt kjøres 2 generatorer på 50-60 prosent av last i transitt. I vintertid går dette tallet opp til ca. 60-70 prosent.

- Hvor mye av tiden kjører generatorene på de forskjellige lastprosentene 25, 50, 75 og 100 i snitt, hvis du kunne gitt et overslag? (Er det for eksempel snakk om 80% av tiden på 50% belastning?)
 - +Til og fra kai kjøres 3 generatorer på «lav» last.
 - Klart skip, 4 generatorer på 25 prosent last.
 - I kai uten landstrøm, 1 generator kjøres på 70 prosent last.
 - Generatorer kjøres sjeldent i 100 prosent over tid.
 - Hva er de største forbrukerne?
 - Blankt
- I hvilke situasjoner er effektbehovet høyere eller lavere enn normalen på 50%-60% per generator med 2 generatorer i drift?
- Hva er de største vedlikeholdsutgiftene i forbindelse med det elektriske systemet?
 - +Vanskelig å svare på
 - Det er generelt lav kostnad for vedlikehold av kraftfordelingen
 - Tungt vedlikehold av generatorer er trolig den største utgiften for dette systemet.
- Er det ofte peak-behov for effekt?
 - +Chill water plant kan gi peak effektbehov
 - I sjøen er det sjeldent peaklast
 - Baugthruster gir peak
 - +Peak shaving er ikke et stort behov i operativ drift.
 - Eventuelt hvilke løsninger tror du kunne blitt implementert for å hjelpe med dette? (ESS Energy Storage System)
- Har fregattene en generator i drift når de ligger på landstrøm?
 - I så fall; hvorfor?

Kompleksitet/brukervennlighet

- Hvilke deler av dagens fordelingssystem er for komplekse?
 - Automasjonen i fordelingssystemet er kompleks. Operatører har ikke tilgang til tavle PLSer
 - +Redundans øker kompleksitet, men opptrente operatører har gode forutsetninger for å forstå og bruke systemet.
 - + Ved samlet tavle ligger kapasitans nivået på 70-80 micro fahrad og ved splittet tavle er man på 40-50 micro fahrad. Jo høyere lekkapasitans vil jordfeilstømmene bli høyere ved jordfeil og berøring mellom fase-jord fordi overgangs motstanden vil bli redusert med «fiktive strømveier» mellom fasene gjennom nøytralpunktet til generatoren. Disse verdiene er vesentlig høyere enn andre installasjoner der normalviået ligger mellom 1-10 micro fahrad ref. Bender)
 - Lekkapasitansen gjør at jordefeilstømmene blir større før de oppdages av overvåkingen.
- Er det noen aspekter av DC-ZEDS som trolig vil øke kompleksiteten for operatøren?
 - Blankt.
- Er det noen aspekter av DC-ZEDS som trolig vil senke kompleksiteten for operatøren?

-Blankt

- Er det i dag utfordringer med PMS systemet? I så fall hvilke
-Noen utfordringer med PMS i forbindelse med landstrøm. Altså kun til kai.
- I hvilke omfang er i dag jordfeil et problem. Hvilke praktiske konsekvenser har dette?
- Lite, jordfeil oppdages før de blir farlige. Jordfeil kan potensielt skade utstyr, men dette har ikke skjedd ofte.
+ Jordfeil problematikk kan ofte misforståes pga manglende innsikt i målemetoder og oppleves ikke som et stort problem om bord.
- Kan implementering av DC-ZEDS øke eller minske omfanget av jordfeil? Er systemet avhengig av avansert og komplisert programvare?
+ Strømmen i jordfeil kan bli mindre i DC-ZEDS når det ikke er lekkapasitans til stede.
- Med mindre lekkapasitans kan jordfeil tidligere, selv om dette ikke nødvendigvis har stor praktisk virkning.
+ potensielt mindre berøringsstrøm.
- Er graden av automasjon i dagens system tilfredsstillende?
- Automasjonen i systemet er god.
- Vil mengden komponenter i DC-ZEDS, særlig kraftelektronikken, være utfordrende for operatører ombord.
- Kraftelektronikk er ikke noe alle operatører er kjent med i dag, så implementering av dette vil kreve mer opplæring for operatører.
- Er harmonisk forvrengning/forstyrrelser et merkbart problem med dagens AC-fordeling på Nansenklasse fregatt?
- Dette er ikke merkbart for operatøren.
- Hvilke komponenter i kraftfordelingen er det mest utfordringer med og hvilke deler må vedlikeholdes eller byttes ut oftest.
- Det er i hovedsak rutinemessig vedlikehold av komponenter, lite utbytting. Delene som oftest må byttes er knyttet til automasjon. Omformere i tavler må byttes ut med intervall på 1 til 2 år.
- Er det i dag mange kraftelektroniske komponenter i systemet. Frekvensomformere, DC-DC, AC-DC, DC-AC, etc.
- Baugthruster har frekvensstyrt oppstart som reduserer høy startstrøm. Etter oppstart er den ikke frekvensdrevet.
- Hvilke forbrukere er i dag DC og hvilke forbrukere er AC. Omtrentlig prosentfordeling?
+ Ca 70/30 forhold mellom AC/DC
- 24V fordelingen er en veldig lav prosent av lasten.

Vedlegg 8 – Intervju 2

Dette intervjuet inneholdt étt intervjuobjekt, som blir omtalt som intervjuobjekt 3 i oppgaven. Spørsmål er markert med helfarget, svart punkt. Svar er markert med hvitt punkt med svart ring rundt, samt med kursiv. Bare kursiv benyttes et par steder.

Generelle spørsmål

- I hvilken grad er systemets redundans tilstrekkelig?
 - *Hovedfordelingssystemet er tilstrekkelig redundant, med ringkobling og hvert lastsenter har tilkobling fra begge hovedtavlene. Problemet kommer etter lastsentrene, når en del forbrukere har lastsenterets redundans som sin redundans. Dette vil si at dersom lastsenteret blir slått ut, vil ikke forbrukerne ha en annen strømtilkobling.*
- Erfaringer med nødkabling om bord?
 - *Fått ny nødkabling som er lettere og tynnere. Plugg-basert, fungerer bra som det er i dag. Et minus med det er at nødkabler fra hovedtavlen fungerer kun med generator i drift. Så hvis man er på landstrøm fungerer ikke nødkablene, men dette blir ikke sett på et problem sånn sett siden man regner båten som trygg hvis den ligger til kai på landstrøm.*
- Generelle fordeler og ulemper med 2 hovedtavler?
 - *Koblet i ring, og skal i utgangspunktet fungere helt utmerket med redundans.*
- Generelle fordeler og ulemper med 4 til 6 enkeltstående lastsentre?
 - *Redundans på en annen måte, her vil alt holde seg så lenge det er en generator på. Man kan få brudd stort sett overalt, og systemet vil stort sett holde seg. Det vil være mange muligheter. Muligens mer robust. I tillegg vil nødkablingsmuligheter mellom lastsentrene gjøre systemet veldig robust.*
- Generell kommentar?
 - *Det er store kortslutningsstrømmer i hovedtavlene, hvilket medfører strenge krav beskyttelsesutstyr når man er i samme rom som spenningssatte tavler.*

Battle Damage Control/Havari

- Hvilke utfordringer oppleves under havari eller krigsskader ved det eksisterende fordelingsystemet på fartøyene?
 - *Elendig soneselektivitet. En smell i en underfordeling kan ta ut et helt lastsenter eller verre. Et eksempel her er hendelsen hvor KNM THEY fikk en trosse i baugthrusteren. Overbelastningen gikk gjennom tre soner med selektivitet før den slo ut hele generatoren og la skipet dødt. En løsning på dette kan være så enkelt som bedre vern og mer presise og frekvent oppdaterte innstillinger på vernene.*
- Hvilke styrker har det nåværende fordelingsystemet i forhold til havari eller krigsskader? Og tror du en annen konfigurasjon på sonene og lastsentrene ville økt driftssikkerhet mtp. BDC/Havari?
 - *Ideen er at man har redundans til enhver tid. Styrken er at båten er bygd opp for å kunne splittes. Hovedtavlene kan splittes i to deler, slik at hver generator kan gå inn i hver sin hovedtavle, og deretter videre ut.*

- Hva er i dag “worst-case” scenario for det elektriske fordelingsystemet?
 - *Miste forbrukerne. I utgangspunktet skal man klare å drifte det man trenger med halvparten av systemet i bruk: 1 Hovedtavle + 2 generatorer. Dvs. at systemet er i utgangspunktet dimensjonert til å kunne håndtere 2x maksimal belastning.*
 - *Det verste er nok å få en treffer rett i hovedtavle 1, det vil føre til lengst oppstartingstid fordi den tilfører strøm.*
 - *Dersom dette skulle skje, kan man få en strømdipp på utstyret som gjør at alt må restartes. Dette kan fint ta 20 minutter å gjøre, og kan gå ut over viktige forbrukere.*
- Hvilke erfaringer med systemet ble gjort under havariet av KNM Helge Ingstad i 2018? Hvilke aspekter av systemet leverte tilfredsstillende, forholdene tatt i betraktning. Hvilke aspekter leverte ikke som forventet?
 - *Generatorene kjørte lenge, og personellet fikk det aller meste til å fungere.*
 - *Ingen spesiell kommentar annet enn det.*
- Hvilke fordeler kan potensielt oppnås med et DC-ZEDS system under et krigs/havari scenario?
 - *I utgangspunktet mener intervjuobjektet at dette oppsettet gjør samme jobben som AC-systemet gjør i dag, teoretisk sett.*
 - *Ellers mener vedkommende at man i teorien, ved DC-ZEDS, vil slippe nedetid ved et semi-black-ship, fordi man ligger med to tilførsler til enhver tid.*
- Hvilke ulemper kan potensielt oppstå med et DC-ZEDS system under et krigs/havari scenario?
 - *Ingen spesiell kommentar her. Vanskelig å uttale seg om.*
- Under et havari eller under håndtering av krigsskade, hvilke av disse er høyest verdsatt i et fordelingsystem? Enkelhet, Redundans, Maksimal effekt levering, last-shedding (automatisert?). Er det noen av disse punktene som utelukker hverandre. Eksempelvis automatisert last-shedding motvirker enkelhet.
 - *Redundans er viktigst.*
 - *I dag er systemet overdimensjonert når det kommer til effektlevering, så maksimal effektlevering betyr ikke så mye.*
 - *Automatisk shedding finnes i dag, og kicker inn på 100 eller 110% og den kaster da all uviktig last (2 «uviktige» lasttilførsler, ganske lite der egentlig).*
 - *Veldig enkelt system som skal fungere uansett, og gjør i prinsippet ikke så veldig mye, da de uviktige lastene ikke er så mange og utgjør ikke mer enn 10-15% av total last til en generator.*
- Hvilke konstruksjonstiltak kan gjøres for å sikre den elektriske fordelingen og kan noen av disse tiltakene utelukkes ved overgang til DC- ZEDS.
 - *Alle lastsentrene har tilkobling fra to forskjellige veier. Ville vært mye likt.*
 - *Kunne vært en nødgenerator som er tilkoblet bare de viktigste forbrukerne, sånn som på Maud. Det kunne vært gjort, men det er tar mye plass.*
 - *Å ha en slik nødgenerator «er genialt».*
- Hvilke deler av fordelingen har mannskapet i dag mulighet til å utbedre om skipet skulle bli skadet. Eksempelvis, PMS, brytere etc. Er det reservedeler om bord?

- *Har brytere, PLS og vern i backup. Til daglig seiler man med lite ekstra av slik utstyr, med mindre man deployerer. Det skal være backup av hvert eneste PLS-program om bord.*
- Hvilke utfordringer møtes når skipet skal spenningssettes etter Black ship scenario. Er det trolig at disse utfordringene vil bedres eller verres av en DC-fordeling.
 - *Ikke noe spesielt problem til vanlig å kjøre opp igjen. Det hender at våpenelektronikk ryker. Idet man får black-ship-dippen kan spenningen bli så høy at elektronikken ryker/kretskort brenner seg. Dette er dyre ting, og et slikt problem er mulig at bedres med DC-ZEDS, men objektet kan ikke si dette sikkert.*
 - *UPS (Uninterruptable power supply) hender at ikke kobler seg til. Noen av de (IPMSene) kan nette ned. Kan være slitasje i bryterne/venderne.*

Økonomi

- Under hvilke lastforhold foregår normal drift? (prosent av maks kapasitet)
 - *2 generatorer, splittet tavle 50-60% last.*
- Hvor mye av tiden kjører generatorene på de forskjellige lastprosentene 25, 50, 75 og 100 i snitt, hvis du kunne gitt et overslag?
 - *Vedkommende vil tippe på at under klart skip vil man ligge på 25-30% med 4 gen i drift.*
 - *Transitt er minst halvparten av tiden. 80% av tiden ligger man mellom 50 og 75% på 2 generatorer.*
 - *Ca. 5% av tiden på 100%.*
- I hvilke situasjoner er effektbehovet høyere eller lavere enn normalen på 50%-60% per generator med 2 generatorer i drift?
 - *Klart skip skal alt være klart, og man ligger med alle generatorene inne.*
 - *Fortøyning med baugthruster (alle situasjoner med baugthrusteren på beredskap).*
- Hva er de største vedlikeholdsutgiftene i forbindelse med det elektriske systemet?
 - *Generatorene: oljeskift, lagerbytte, overhaling.*
 - *Arbeidstimer til de ansatte på generatorsettene.*
 - *Bytte brytere.*
 - *Fuelforbruk til generatorene.*
- Er det ofte peak-behov for effekt? Eventuelt hvilke løsninger tror du kunne blitt implementert for å hjelpe med dette? (ESS, Energy Storage System)
 - *Man har høye startstrømmer på sjøvannspumper uten frekvensomformer. 2 av de har f.omf., 3 av de har ikke.*
 - *Dette blir ikke sett på som et problem, da man i verste fall kobler inn en generator til en liten stund hvis man i det hele tatt trenger.*
- Har fregattene en generator i drift når de ligger på landstrøm? I så fall; hvorfor?
 - *Til kai: testing, feil på anlegg, blackship*
- Generell kommentar?
 - *Drivstofforbruk på en generator på 150L/h vanligvis*
 - *Drivstofforbruk på en generator på 250L/h opp mot 100%*
 - *Klart skip ligger man på synkron lastfordeling på ca. 30% på alle generatorer.*

Kompleksitet/brukervennlighet

- Hvilke deler av dagens fordelingssystem er for komplekse?
 - *Kommentaren er at enkelte ting er for primitive.*
 - *Enkelte brytere er for kompleks, og krever veldig nøyaktig justering.*
 - *Både mekaniske vendere og automatiske vendere. Veldig sjeldent at de fungerer optimalt, og man får en dipp, og dermed oppkjøringstid. Batteribakup kunne vært en løsning. Nødkabling kan også hjelpe.*
- Er det noen aspekter av DC-ZEDS som trolig vil øke kompleksiteten for operatøren?
 - *Kraftelektronikken. Det mangler kompetanse i besetningene til å håndtere dette. Det kan også kreves at komponenter står på lager til å byttes.*
 - *Dersom man ikke har ekstra komponenter liggende, kan det være vanskeligere å bytte ting.*
 - *De fleste elektrikere som jobber om bord er utdannet huselektriker, og kraftelektronikk for skip er noe de fleste ikke har bakgrunnskunnskap med.*
- Er det noen aspekter av DC-ZEDS som trolig vil senke kompleksiteten for operatøren?
 - *Synkroniseringsbiten. Mer sømløst sammenkoblet.*
 - *Dersom alt kan styres fra IPMS vil det meste bare kunne bli en tilvenningssak, og det vil være mye det samme. Man slippe å synkronisere tavlene, men dette gjøres stort sett automatisk og tar generelt sett ikke mer tid enn noen sekunder.*
- Er det i dag utfordringer med PMS systemet? I så fall hvilke
 - *Litt. Det er 2, og det er ikke alltid den ene tar over for den andre.*
 - *PLS som henger på tar ikke alltid over heller. Samlet tavle for eksempel. Da er det ikke sikkert masteren og slaven klarer å bytte rolle.*
- I hvilke omfang er i dag jordfeil et problem. Hvilke praktiske konsekvenser har dette?
 - *Mye kunstig lave verdier på tavlene på grunn av dårlige filter som lekker.*
 - *Bender-systemet er dårlig på å filtrere vekk jordfeil.*
 - *I virkeligheten er systemet ganske greit egentlig. Jordfeilene ligger stort sett på utstyret (forbrukerne).*
 - *Man vet ikke helt hvordan man skal forholde seg til varsler fra bender-systemet på grunn av avleste verdier på displayet som kan se ut som at man har jordfeil, mens det i realiteten er greit. Man kan gå seg blind på jordfeil som egentlig ikke finnes.*
- Kan implementering av DC-ZEDS øke eller minske omfanget av jordfeil? Er systemet avhengig av avansert og komplisert programvare?
 - *Tviler på at det vil påvirke så mye i selve fordelingssystemet. Problemet ligger stort sett hos forbrukerne. Kan ikke huske å ha vært ute for jordfeil på fordelingene mellom hovedtavler og lastsentre, altså før det går ned til forbrukere.*
 - *Mer kraftelektronikk vil trolig gi lavere verdier, og dermed flere falske feil på systemet.*
- Er graden av automasjon i dagens system tilfredsstillende?
 - *Automasjonsgraden er tilfredsstillende. Iallfall i forhold til Maud. Med for mye automasjon kan man ikke operere ting like lett manuelt. Folk må ha litt fysisk fealing på systemet.*

- Vil mengden komponenter i DC-ZEDS, særlig kraftelektronikken, være utfordrende for operatører ombord.
 - *«Jeg tror det». Ikke ved normal drift når alt fungerer, men ved feil. Modulbasert kunne vært en fin løsning, der man bare kan bytte moduler og sende modulene på reparasjon. Når ting blir for komplisert kan ikke besetningen gjøre så mye arbeid selv. Viktig med hyllevarer som ikke er på vei til å bli utfaset med det første, «ukurans». Utprøvd utstyr.*
 - *Ting som er lagd utelukkende for fregattprosjektet har veldig få personer med kompetanse på akkurat det utstyret, slik at det blir vanskelig å fikse og få service.*
 - *Investeringer i ting som fungerer, er utprøvd, ferdig og klart er bra. Ikke utsette og sende ting på service, og få inn nye produkter som er sinnssykt dyre fordi at de er spesiallaget.*

- Er harmonisk forvrengning/forstyrrelser et merkbart problem med dagens AC-fordeling på Nansen-klasse fregatt?
 - *Kan ikke komme på noe spesielt.*

- Hvilke komponenter i kraftfordelingen er det mest utfordringer med og hvilke deler må vedlikeholdes eller byttes ut oftest.
 - *Brytere byttes ut oftest. Begynner å bli gammelt og vanskelig å få tak i brytere som passer.*
 - *PLSer er et issue.*
 - *Tavlene gjøres det også stadig arbeid på.*

- Er det i dag mange kraftelektroniske komponenter i systemet. Frekvensomformere, DC-DC, AC-DC, DC-AC, etc.
 - *5 likerettere på 24V ute i underfordelingene. Litt DC-DC nede på det samme.*
 - *Det begynner å bli mer og mer frekvensstyrte motorer.*
 - *Baugthrusteren med frekvensomformer som kobler seg av når thrusteren er i gang.*
 - *Sjøvannsumpene som nevnt over.*
 - *Generelt veldig lite. Sikkert mer kraftelektronikk når det kommer til våpenteknisk elektronikk. Signalbehandling.*

- Hvilke forbrukere er i dag DC og hvilke forbrukere er AC. Omtrentlig prosentfordeling?
 - *Stort sett våpensystemer og 24VDC-nettverket. Ganske spredt. Veldig lite DC, spesielt når det kommer til effektbruk.*
 - *Stort sett AC som blir brukt.*