



Høgskulen på Vestlandet

Bacheloroppgave

ELE350

Predefinert informasjon

Startdato:	08-05-2023 09:00 CEST	Termin:	2023 VÅR
Sluttdato:	22-05-2023 14:00 CEST	Vurderingsform:	Norsk 6-trinns skala (A-F)
Eksamensform:	Bacheloroppgave		
Flowkode:	203 ELE350 1 O 2023 VÅR		
Intern sensor:	Eirik Haustveit		

Deltaker

Navn:	John Wilhelm Ulversøy Johnsen
Kandidatnr.:	248
HVL-id:	587869@hvl.no

Informasjon fra deltaker

Egenerklæring *: Ja
**Inneholder besvarelsen
konfidensielt
materiale?:** Nei
**Jeg bekrefter at jeg har
registrert
oppgavetittelen på
norsk og engelsk i
StudentWeb og vet at
denne vil stå på
vitnemålet mitt *:** Ja

Gruppe

Gruppenavn: B023EB-57
Gruppenummer: 50
**Andre medlemmer i
gruppen:** Geir Grønlien, Einar By

Jeg godkjenner avtalen om publisering av bacheloroppgaven min *

Ja

Er bacheloroppgaven skrevet som del av et større forskningsprosjekt ved HVL? *

Nei



Høgskulen
på Vestlandet

ELE350 Bacheloroppgave
Modellering og analyse av drift
med jordfeil i undervanns
kraftsystem

Einar By
Geir Grønlien
John Wilhelm Ulversøy Johnsen

22.mai 2023

Dokumentkontroll

<i>Rapportens tittel:</i> Modellering og analyse av drift med jordfeil i undervanns kraftsystem	<i>Dato:</i> 22.05.2023
	<i>Rapportnummer:</i> 57
<i>Forfattere:</i> Einar By Geir Grønlien John Willhelm Ulversøy Johnsen	<i>Studieretning:</i> Elkraftteknikk
	<i>Antall sider:</i> 128
<i>Høgskolens veileder:</i> Eirik Haustveit	<i>Gradering:</i> Åpen

Oppdragsgiver: OneSubsea	Oppdragsgivers referanse BO23EB-57
Oppdragsgivers kontaktperson Ola Høydal Helle	

Revisjon	Dato	Status	Utført av
1	08.05.23	Revisjon av struktur	GG
2	10.05.23	Revisjon av struktur	GG
3	22.05.23	Revidert for levering	GG

Forord

Denne bacheloroppgaven er utarbeidet i forbindelse med faget *ELE350 Bacheloroppgave*, som er et avsluttende emne ved bachelorutdanningen i elkraftteknikk på Høgskulen på Vestlandet. Oppgaven er basert på forprosjektoppgaven utarbeidet i samme fag og er skrevet for OneSubsea. Den er løst som et gruppeprosjekt [1] og har innebært faglig fordypping innen kraftsystemanalyse, motordrift, kabelteori og beregningsmetoden symmetriske komponenter. Oppgaven har blitt løst på en ingeniørfaglig metode med bruk av teoretiske beregninger, simuleringsverktøy og laboratoriumsarbeid.

Vi ønsker å takke internveileder Eirik Haustveit og veileder i OneSubsea Ola Høydal Helle for veiledning, forslag og diskusjoner gjennom hele semesteret. Takk til Lars Manger Ekroll for hjelp på elkraftlaboratoriet.

Vi ønsker også å takke familie og venner som har vært støttende gjennom hele bachelorutdanningen.

Høgskulen på Vestlandet, Bergen.

21. mai 2023

Einar By

Geir Grønlien

John Willhelm Ulversøy Johnsen

Sammendrag

Feil på havbunnsinstallasjoner i petroliumsindustrien er tidkrevende og kostbare å reparere. Det er derfor ønskelig å kunne opprettholde produksjonen dersom feilen ikke påvirker sikkerheten eller fører til skade på utstyret. Dersom full produksjon ikke er mulig er det ønskelig å kunne fortsette med redusert drift frem til utstyret kan repareres. Denne oppgaven studerer konsekvensene dersom en strømførende fase utilsiktet kortsluttes til jord i et kraftsystem med som leverer strøm til en undersjøisk trefase asynkronmotor. Kraftsystemet er isolert fra jord og feilstrømmer begrenses derfor av den kapasitive impedansen mellom kabel og jord. Oppgaven argumenterer for en ekvivalentmodell av systemet. For å kunne analysere det ubalanserte kraftsystemet som oppstår ved en jordfeil, blir modellen transformert til symmetriske sekvensmodeller. Matematiske beregninger og simuleringer er utført for å analysere strøm- og spenninger, samt deres karakteristikk ved forskjellige kabellengder og frekvenser. Et laboratorieforsøk er gjennomført for å verifisere den elektrotekniske teorien oppgaven baserer seg på. Det er utarbeidet et grafisk brukergrensesnitt for simuleringsmodellen i Simulink.

Summary

Faults on subsea oil and gas installations is time consuming and expensive to repair. It is desirable to maintain operation as long as the fault does not affect safety or cause damage to equipment. If it is not possible to operate at full capacity it is desirable to continue production with a reduced capacity until the fault can be repaired. This thesis is studying the consequences of a single phase to ground fault on a subsea power installation powering an three phase asynchronous motor. The power system is operating with an isolated neutral point, therefore the potential fault current is limited by the capacitance between the cable and ground. The thesis is arguing for an equivalent modell for the system. When the system is exposed to a ground fault and the loads become unsymmetrical, the method of symmetrical components is applied to analyse the system. Mathematical calculations and simulations is performed to analyse voltages and currents at different cable-lengths and frequencies. Laboratory experiments has been carried out to verify the electro technical theory in wich the thesis is based upon. A graphical user interface (GUI) is developed for the simulationmodell in simulink.

Innhold

1	Innledning	2
1.1	Bakgrunn	2
1.2	Problemstilling	2
1.3	Sammenliknede tilfeller	2
1.4	Oppdragsgiver	3
1.5	Organisering av rapporten	3
2	Høyspenningssystemer i petroleumsindustrien	4
2.1	Energiforsyningen	4
2.2	Drift av undersjøiske våtgasskompressorer og pumper	4
3	Energiteknikk	7
3.1	Høyspenningskabler	7
3.1.1	Høyspenningskabelens oppbygning	7
3.1.2	Kabelisolasjon	7
3.1.3	Elektrostatikk i kabler	9
3.1.4	Kabelens induktivitet	11
3.1.5	Kabelens elektriske parametere	12
3.1.6	Skjermjording	14
3.1.7	Styrekabel	15
3.2	Transformator	16
3.2.1	Formål	16
3.2.2	Ideell transformator	17
3.2.3	Ekvivalentmodell	18
3.2.4	Trefasetransformator	18
3.3	Asynkronmotor	20
3.3.1	Ekvivalentmodell motor	21
3.3.2	Undersjøisk motor	21
3.4	Elektriske motordrifter	22
3.5	Frekvensomformer	23
3.6	Kortslutning og jordfeil	25
3.6.1	Trefasekortslutning i trefasesystem	25
3.6.2	Tofasekortslutning i trefasesystem	25
3.6.3	En fase til jord-kortslutning i trefasesystem	25

3.6.4	Jordsystem	26
3.6.5	Isolasjonsklasser	28
4	Systemmodellering	30
4.1	Thevenins teorem	30
4.2	Symmetriske komponenter	30
4.2.1	Introduksjon til symmetriske komponenter	30
4.2.2	Oppbygging av sekvensnettverkene	34
4.3	Matematisk modellering	38
4.3.1	Introduksjon til feilanalyse ved bruk av matriser	38
4.3.2	Feilanalyse av kraftsystemet	40
4.4	Implementering i Matlab	42
4.4.1	Introduksjon til matlab-skript	43
4.4.2	Resultater av modellen	43
5	Simulering	48
5.1	Matlab og Simulink	48
5.2	Simuleringsmodell	48
5.2.1	Kortslutningsblokk	49
5.2.2	Måleblokk	49
5.2.3	Kabelmodell	50
5.2.4	Motormodell	52
5.3	Systemparametre	53
5.4	Simuleringsresultater	54
5.4.1	Resultat 5km kabel ved 77 Hz	54
5.4.2	Resultat 10km kabel ved 77 Hz	55
5.4.3	Resultat 20km kabel ved 77 Hz	56
5.4.4	Resultat 30km kabel ved 77 Hz	57
5.4.5	Resultat 10km kabel ved 65 Hz	58
5.4.6	Resultat 10km kabel ved 50 Hz	59
5.4.7	Resultat 10km kabel ved 35 Hz	60
5.4.8	Fourieranalyse av strøm og motorturtall	61
6	Laboratorieoppgave	62
6.1	Formål	62
6.2	Sikkerhet	62
6.3	Oppsett	62
6.3.1	Kabelmodell	63
6.3.2	Målinger	67
6.4	Laboratoriumresultater	67
6.4.1	Måling ved 70hz	68
6.4.2	Måling ved 65hz	69

6.4.3	Måling ved 50hz	71
6.4.4	Måling ved 35hz	72
6.4.5	Sammenlikning av feilstrøm ved forskjellige frekvenser	74
7	Diskusjon	75
7.1	Resultat av matematisk modell	75
7.2	Resultat av simulering	76
7.3	Resultat av laboratorieforsøk	76
7.4	Forslag til videre utredning	77
8	Konklusjon	79
9	Referanser, figurer og tabeller	81
	Referanser	81
	Liste over figurer	83
	Liste over tabeller	87
A	Forkortelser og ordforklaringer	88
	Forkortelser	88
	Ordlister	88
B	Utstyrliste	90
C	Tekniske tegninger av laboratoriumoppkobling	92
C.1	AutoCAD	92
C.2	Tegninger	92
D	Brukerdokumentasjon av fasejordsim	96
D.1	Introduksjon	96
D.2	Installasjon og start	96
D.3	Inndata	97
D.3.1	Utdata	98
D.3.2	Kjente feil	99
E	Kildekode	100
E.1	Fourieranalyse med Matlab	100
E.2	Symmetriske komponenter i Matlab	102
E.3	Jordfeilsimulator	112
E.4	Jordfeilsimulator GUI	119

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Gass og olje er blant de største energikildene og spiller en avgjørende rolle i den globale energimiksen. De er essensielle ved produksjon av elektrisitet, oppvarming, ved industriell produksjon og i transportsektoren. Mange store olje- og gassfelt har vært i drift i opptil flere tiår og nærmer seg nå sin forventede levetid. Behovet for petroleumproduktene er fortsatt stort og en står da ovenfor to valg: finne flere nye reservoarer eller optimalisere utvinningen av allerede eksisterende brønner. Av miljømessige hensyn, økonomisk lønnsomhet og med hensyn til en effektiv ressursforvaltning er det ønskelig å utnytte eksisterende brønner optimalt.

1.2 Problemstilling

For å kunne utvinne mest mulig av hydrokarbonene fra et undergrunnsreservoar brukes det pumper og kompressorer. Disse maskinene pumper en blanding av olje, gass, vann og sand til prosessinstallasjoner på land eller på en nærliggende plattform. Ved slik *offshore* utvinning er det ofte mest energieffektivt å plassere disse maskinene på havbunnen over reservoaret og drifte dem med elektriske motorer. Det vanligste er å bruke trefase asynkronmotorer forsynt med strøm via høyspenningskabler fra en nærliggende plattform eller land. Systemet som skal undersøkes består av en frekvensomformer plassert på en installasjon over havnivå. Denne er koblet til en styrekabel, undersjøisk koblingspunkt og asynkronmotor på havbunnen. Hvis det oppstår en jordfeil på et punkt mellom tilknytningspunktet ved frekvensomformeren og asynkronmotoren er dette tid- og ressurskrevende å reparere. Det vil derfor være fordelaktig om pumping fra reservoaret kan fortsette frem til en reparasjon er mulig. Gruppen skal ved hjelp av matematiske beregninger, simuleringer og laboratoriearbeid undersøke hvordan en slik jordfeil vil påvirke fasespenningene i systemet og beregne jordfeilstrømmene. Resultatene fra disse undersøkelsene skal brukes til å vurdere om drift av systemet med jordfeil er tilrådelig.

1.3 Sammenliknede tilfeller

Flere av parameterne som antas å ha størst betydning for resultatet av feilstrømanalysene er allerede bestemt av oppgaven, eksempelvis jordsystemet, kabelkonfigurasjonene og

nominell spenning. Det antas at driftsfrekvens og kabellengde også vil ha betydning for problemet. For å danne et vurderingsgrunnlag av disse hypotesene vil studien derfor se på et spekter av forventede driftsfrekvenser og kabellengder som kan forventes i bruk. Disse vist i tabell 1.1.

Spenning	Frekvens	Kabellengde
10 kV	35 Hz	5000 m
	50 Hz	10000 m
	65 Hz	20000 m
	77 Hz	30000 m

Tabell 1.1: Tabell med spenning, frekvens og kabellengder

1.4 Oppdragsgiver

OneSubsea er et underselskap av *SLB* (tidligere *Schlumberger*) som har spesialisert seg på levering av undersjøiske installasjoner. Historisk har dette spesielt vært produkter rettet mot olje- og gassnæringen, men også andre undersjøiske installasjoner i forbindelse med overgangen til produksjon av fornybar energi. Den norske avdelingen var tidligere kjent som bergensfirmaet *FRAMO Eningeering*, før det ble kjøpt opp av *SLB*.

1.5 Organisering av rapporten

Opgaven gir først en overordnet beskrivelse av systemet som skal analyseres, for å deretter å beskrive enkeltkomponentenes funksjon og elektrotekniske teori. Systemet er analysert med tre metoder: en matematisk tilnærming, simulering og et laboratoriumsforøk. En beskrivelse av modellene og presentasjon av resultatene er beskrevet henholdsvis i kapittel 4, 5 og 6. Deretter følger en diskusjon av resultatene og avsluttende konklusjon. Matlab-script, tekniske tegninger og brukerdokumentasjonen for simuleringsmodellen er lagt til som vedlegg.

I kapitler som omhandler elektroteknikk følges IEC 60050 [2] ved mindre noe annet er oppgitt. Store bokstaver brukes for effektivverdier og små bokstaver for øyeblikksverdier. Enheter er oppgitt i hakeparenteser for å skille dem fra symboler. Eksemepvis er $[H]$ = Henry og H = magnetisk feltstyrke.

2 Høyspenningssystemer i petroleumsindustrien

2.1 Energiforsyningen

Petroleumsindustrien forbruker betydelige mengder energi for å utvinne olje og gass. Tradisjonelt sett har gassdrevne turbiner på plattformer i nærheten av der utvinningen foregår vært energikilden. Strømforsyningen er da i øydrift og dermed isolert fra de nasjonale kraftnettverkene. Diverse prosessutstyr og pumper har i tillegg til strømgeneratorer har vært mekanisk drevet av gassturbinene. Av både tekniske og miljømessige årsaker har det siden midten av 90-tallet vært en trend at utstyr og pumper også har blitt elektrifisert. En konsekvens av dette er at behovet for elektrisk kraft har økt betraktelig. Det nødvendig gjør også et mer komplekst elektrisk kraftsystem som kan levere kraft på et bredt spekter av spenningsnivå og frekvenser, både med likestrøm og vekselstrøm. Transformatorer og bryterutstyr plasseres både over og under havflaten. Elektrifisering av kompressorer gjør også at disse kan plasseres på havbunnen med lange kraftkabler, typisk opp til 40km fra plattformen. Flere gass- og oljefelt er i dag også forsynt med strøm fra land og på norsk sokkel gjelder dette omtrent halvparten av petroleumsproduksjonen [3].

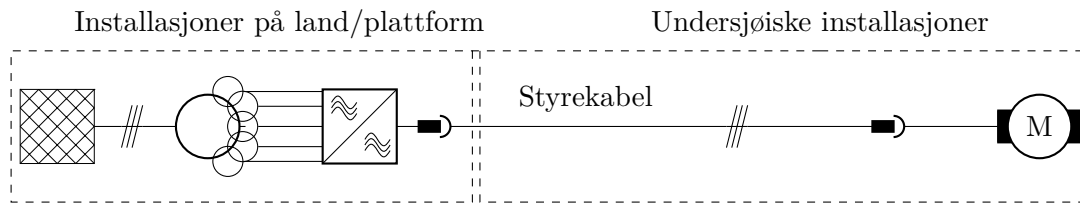
2.2 Drift av undersjøiske våtgasskompressorer og pumper

Etterhvert som hydrokarboner hentes opp fra reservoaret vil normalt sett overtrykket i en brønn synke. Tilsvarende vil også den naturlige gassflyten fra brønnen til overflaten minke, før den på et tidspunkt blir så lav at videre utvinning ikke er lønnsomt og brønnen avsluttes. Kompressorer og pumper brukes til å forlenge brønnens levetid enten ved å pumpe opp gass og væske, eller å injiserte gass og vann i brønnen for å øke reservoartrykket. OneSubsea leverer undervanns våtgasskompressorer og pumper som plasseres på havbunnen i nærheten av brønnen, og drives av en eller to asynkronmotorer. Dette utstyret yter med en effekt på opp til 6-8 MW og det er forventet at de i fremtiden vil kunne bli enda større. Asynkronmotorene driftes av en frekvensomformer plassert på en plattform, eller på land, og forsynes via en undersjøisk kraftkabel. Avhengig av pumpens størrelse og avstand fra frekvensomformeren kan hele driftsystemet også bestå av flere transformatorer og brytere for å sikre at riktig spenning og frekvens blir levert til asynkronmotorene. Ettersom det er store ulikheter i hvert enkelt prosjekts behov, kan det være betydelige

variasjoner i hvordan systemene er konfigurert, men på et overordnet nivå er det tre ulike hovedkonfigurasjoner som vist i figur 2.1, 2.2 og 2.3.

Direkte drift av motor

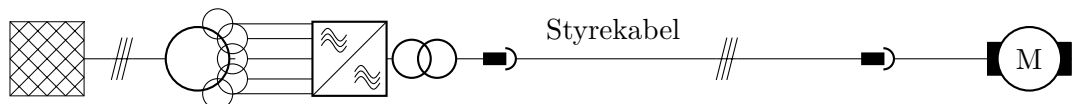
Den enkleste og rimeligste konfigurasjonen består av en frekvensomformer med tilhørende inntakstransformator, som drifter den undersjøiske asynkronmotoren direkte. Denne kan brukes ved korte kabellengder der frekvensomformerens uttaksspenning er høy nok til å kompensere for spenningsfallet i kabelen. Styrekabelen termineres i et koblingspunkt over vannflaten ved frekvensomformereren og i et undersjøisk koblingspunkt ved motoren.



Figur 2.1: VSD drifter motor direkte

Drift med transformator etter frekvensomformer

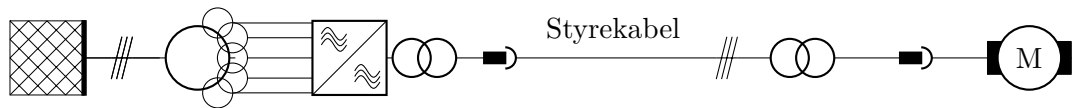
Ved lengre kabellengder blir spenningsfallet så høyt at frekvensomformereren ikke kan levere nominell motorspenning. Dette fører til en suboptimal motordrift og betydelige elektriske tap i overføringen. Derfor plasseres det i slike tilfeller en transformator på omformerens uttakside som opptransformerer spenningen.



Figur 2.2: Spenning fra VSD opptransformeres

Drift med høy overføringsspenning

Det elektriske effekttapet i kabelen øker med kvadratet av strømmen. Ved de lengste kabellengdene er det derfor ønskelig å overføre effekten på et høyere spenningsnivå enn motorens nominelle spenning. Det er dermed nødvendig med både en opptransformering etter frekvensomformereren og en nedtransformering før motoren. I disse tilfellene plasseres det en undersjøisk transformator på havbunnen i nærheten av motoren. I forhold til prosjektene med konfigurasjoner som i figur 2.1 og 2.2 har prosjekter med lange kabler og undersjøisk nedtransformering en betydelig høyere investeringskostnad.



Figur 2.3: Overføringsspenningen reduseres til motorspenning ved bruk av undersjøisk transformator

3 Energiteknikk

3.1 Høyspenningskabler

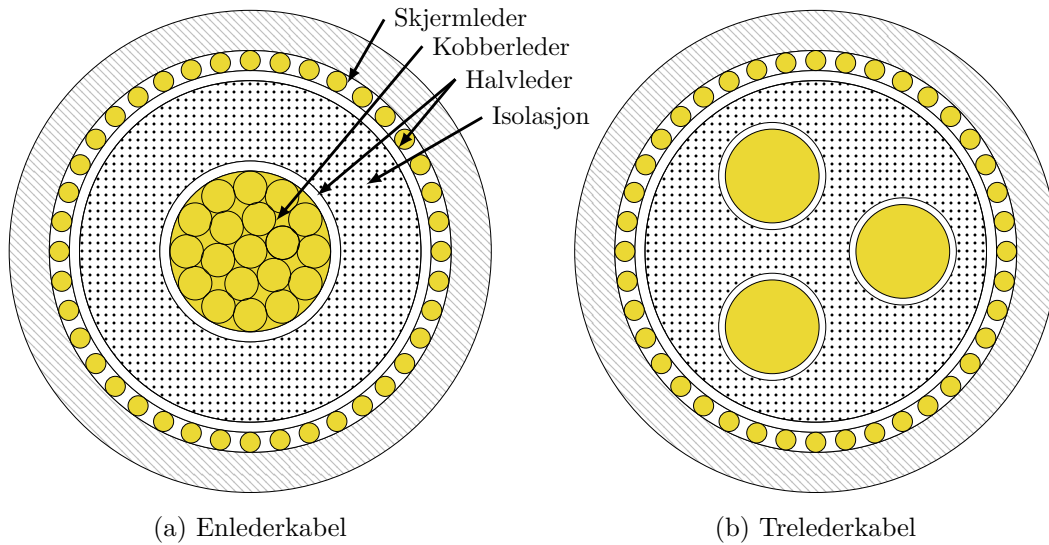
Høyspenningskabler brukes til å overføre energi fra generatorer, via strømmnettverk og til forbrukere. De kan være fra noen meter til flere hundre kilometer lange, og i variabel grad plasseres over- eller under bakken, eller under vann. Bruksområdet er med andre ord bredt og i så måte finnes det mange forskjellige kabeltyper. I systemet denne oppgaven undersøker er kablene for det meste plassert på havbunnen. Undersjøiske kabler må konstrueres for å tåle store mekaniske påkjenninger og som andre kraftkabler også inneha sterk elektrisk holdfasthet og isolasjonsevne mot jord, vann og andre ledere. Isolasjonsmaterialene som brukes må også velges på en slik måte at det sikrer en jevn fordeling av det interne elektriske feltet og lave dielektriske tap [4]. Kablene kan være enleder- eller flerlederkabler avhengig av bruksområde og praktiske betraktninger.

3.1.1 Høyspenningskabelens oppbygning

Kabler har en lagvis oppbygging rundt lederen(e), der hvert lag har en egen funksjon. Figur 3.1a viser en typisk oppbygging av en enleder kraftkabel. Kjernen består av en flertrådet, snodd leder. Utenpå legges det lagvis et dielektrisk materiale, isolasjonsmateriale, dielektrisk materiale, skjermleder, armeringslag og ytterkappe. Flerlederkabler (figur 3.1b) har typisk samme oppbygging som enlederkabler, men det varierer om lederne har individuelle lederskjermer eller en felles konsentrisk lederskjem. I kabler brukt av OneSubsea er lederen vanligvis laget av kobber, i motsetning til luftledere i høyspenningsnettet som vanligvis er laget av aluminium. Kobber er et dyrere materiale, men metallens lavere spesifikke elektriske motstand gjør at det kan brukes et mindre ledertverrsnitt for en gitt strømkapasitet. Påfølgende konsekvens er at mindre isolasjonsmateriale, stålskjem og armering er nødvendig og at dette påvirker kabelens totale diameter nok til at det blir lite hensiktsmessig å bruke aluminiumsledere. Ledertverrsnitt brukt til undersjøiske installasjoner i petroleumsindustrien er typisk i størrelsene $95mm^2$ til $240mm^2$, men det produseres også kabler med tverrsnitt over $1200mm^2$ [5].

3.1.2 Kabelisolasjon

Kabelens isolasjonslag består av flere lag med papir- eller plastmaterialer, der sistnevnte nå er mest vanlig. Papirisolasjon er i nye kabler stort sett kun anvendt der de aller høyeste



Figur 3.1: Tverrsnitt av enleder- og trelederkabel

spenningsnivåene er nødvendig [4]. Moderne kraftkabler brukt av OneSubsea er isolert med tverrbunden polyetylen, XLPE. Tverrbinding er en prosess som innebærer å modifisere plastens egenskaper ved hjelp av stråling eller tilsetning av peroksid [5] [6]. Den største elektrotekniske fordelen med dette er at det forbedrer materialets termiske holdbarhet, og det tåler dermed bedre oppvarmingen som følge av elektrisk effektutslipp i kabelen. For å skape et jevnt elektrisk felt blir den innerste og ytterste delen av XLPE-isolasjonen innblandet med karbon, noe som gir materialet halvlederegenskaper i disse sjiktene. Det mellomste laget forblir ren XLPE isolasjon. Alle de tre lagene med isolasjonsmateriale legges rundt lederen samtidig ved bruk av en trippel ekstruderingsprosess [4]. Ekstrudering vil si at plastisk isolasjonsmateriale presses sammen med lederen gjennom en dyse. Dette sikrer en homogen og tett isolering. Integrert i denne prosessen skjer også tverrbindingen, slik at isolasjonsmaterialet får de ønskede egenskapene nevnt ovenfor. Tykkelsen til isolasjonen, omgivelsetemperaturen og isolasjonsmaterialet avgjør i stor grad hvor stor spenning en kabel tåler. Dersom den elektriske feltstyrken blir sterkere enn isolasjonsmaterialets elektriske holdfasthet vil det oppstå et elektrisk gjennomslag til jord eller andre ledere. [4].

På utsiden av isolasjonen legges det ofte en konsentrisk ledende skjerm, som vanligvis er jordet i en eller begge ender av kabelen. Denne er laget av kobber- eller aluminiumstråder tvunnet rundt det ytre halvledermaterialet. Det totale tverrsnittet av skjermlederen må være stort nok til å kunne lede eventuelle jordfeilstømmer, men et økt tverrsnitt vil potensielt også føre til større induksjonsstrømmer som blir induert av kabelens elektromagnetiske felt.

De ytterste lagene fungerer primært som kabelens beskyttelse mot mekaniske påkjenninger og består gjerne av en stålarmring og en ytterkappe i plastmateriale. Konstruksjonen av armeringen og ytterkappen er avhengig av hvilke mekaniske påkjenninger kabelen skal eksponeres for, men den påvirker også kabelens elektriske egenskaper i form av isolasjons-

egenskaper og at metallisk armering vil kunne lede strøm.

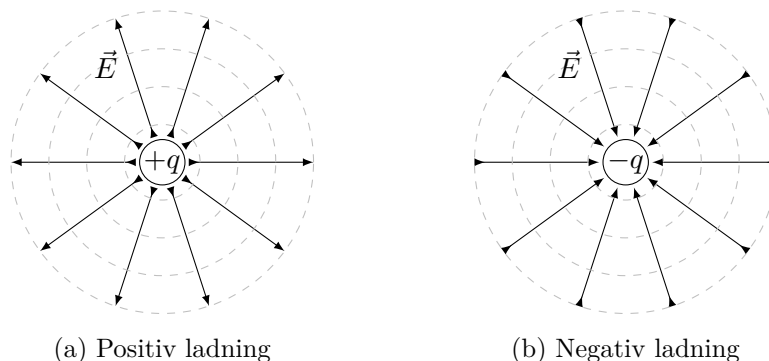
3.1.3 Elektrostatikk i kabler

Coloumbs lov viser at det utvikles krefter mellom to ladninger q_a og q_b som er proporsjonal med størrelsen på ladningene og omvendt proporsjonal av distansen mellom dem kvadrert. Dette er vist i formel 3.2. ϵ_0 er den elektriske konstanten, som tilsvarer permittiviteten i vakuum.

$$\epsilon_0 = 8.86 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2} \quad (3.1)$$

$$F_{ab} = \frac{q_a \cdot q_b}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r_{ab}^2} \quad (3.2)$$

Områder der elektriske krefter virker på ladninger er definert som elektriske felt. Den elektriske feltstyrken \vec{E} er uttrykt som kraft F per landing q , og enheten er $\frac{N}{C} = \frac{V}{m}$.



Figur 3.2: Elektriske feltlinjer

Figur 3.2 visualiserer det elektriske feltet som radielle linjer ut fra en positiv ladning og inn mot en negativ ladning. Antall linjer er lik for begge ladningene, men det er tettere mellom linjene og høyere elektrisk feltstyrke nært ladningene. Dette er vist med de striplete ekvipotensialsirklene i figuren. Spenningsforskjellen mellom to punkter a og b i feltet \vec{E} kan finnes ved å integrere det elektriske feltet langs en linje mellom de to punktene.

$$U_{ab} = \int_{r_a}^{r_b} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r} \quad (3.3)$$

Vi kan bestemme den elektriske feltstyrken i en isolasjon med formel 3.4 som utledet i [4], der r er et valgt punkt i isolasjonen mellom r_a og r_b , figur 3.3. En viktig observasjon her er at det elektriske feltet er størst når $r = r_a$, altså ved lederens overflate. Isolasjonsmaterialene som ble omtalt i seksjon 3.1.2 er bare isolerende opp til en viss elektrisk feltstyrke før det ioniseres, bryter sammen og det oppstår et elektrisk gjennomslag, eksempelvis i form av en lysbue [7].

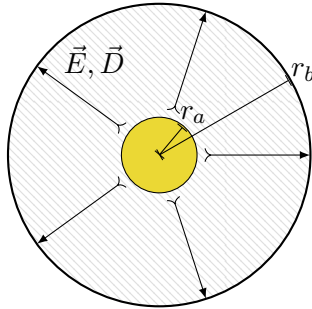
$$E = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{r_b}{r_a}} \quad \text{der} \quad r_a < r < r_b \quad (3.4)$$

Formelen 3.4 viser korelasjonen mellom den maksimale feltstyrken et isolasjonsmateriale tåler og tilsvarende høyeste spenning.

Den elektriske flukstettheten D beskriver den totale elektriske ladningen Q per arealenheter over en tenkt kule og kan skrives som formel 3.6, der ε er det dielektriske mediumets permittivitet.

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \quad (3.5)$$

$$D = \varepsilon \cdot E \quad (3.6)$$



Figur 3.3: Leder med radius r_a isolasjon med ytre radius r_b

Kapasitans

Kapasitansen C er forholdet mellom total elektrisk ladning og potensialforskjellen i et dielektrisk medium. Enheten er oppgitt i Farad [F] og kan uttrykkes matematisk som

$$C = \frac{Q}{U} \quad (3.7)$$

For å finne kapasitansen i det mediumet som påtrykkes spenning, i dette tilfellet en kabelisolasjon, kan Gauss lov anvendes. Gauss lov for dielektriske medium sier at et lukket flateintegral for den elektriske flukstettheten $\vec{E} \cdot \varepsilon_r$ vil omslutte

$$\oint \varepsilon_r \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\varepsilon_0} \quad (3.8)$$

For en koaksial kabel med leder i midten og et homogent isolasjonslag rundt vil arealet av flateintegralet være avhengig av isolasjonens omkrets og kabelens lengde ℓ . Gauss lov kan dermed skrives som formel 3.9. Endeflatene sees bort fra ettersom disse står normalt ut fra feltet, og skalarproduktet for disse dermed vil bli null.

$$\oint \varepsilon_r \vec{E} \cdot d\vec{A} = \varepsilon_r E \cdot 2\pi r \ell \quad (3.9)$$

Ved å slå sammen formel 3.8 og 3.9 kan det vises at den elektriske feltstyrken kan beskrives

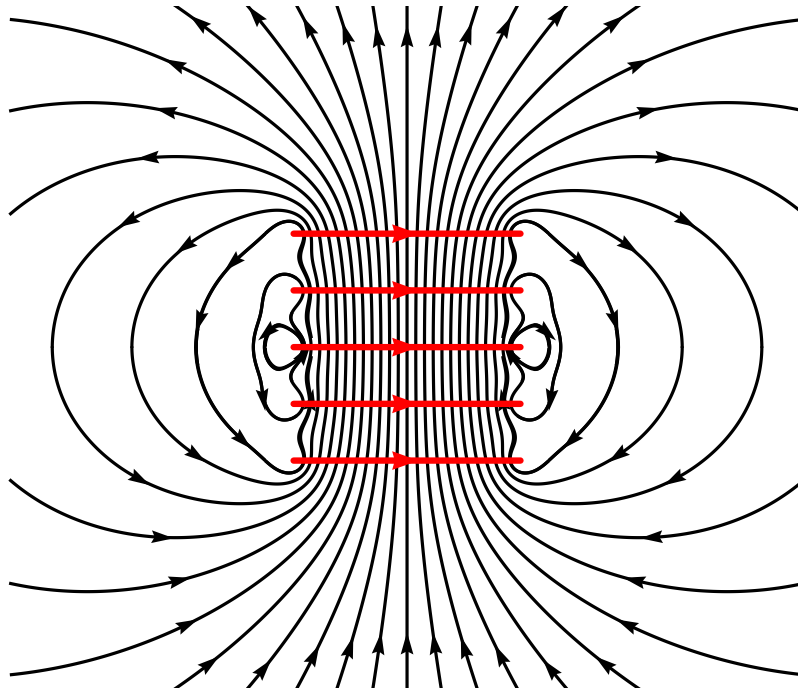
$$E = \frac{Q}{\varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot 2\pi r \ell} \quad (3.10)$$

Potensialforskjellen U_{ab} i figur 3.3 kan igjen finnes ved å integrere det elektriske feltet, som vist i formel 3.3. Kapasitansen for en kabel kan dermed bestemmes med formel 3.11.

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot 2\pi \ell}{\log \frac{r_b}{r_a}} \quad (3.11)$$

3.1.4 Kabelens induktivitet

Magnetfelt og flukstetthet



Figur 3.4: Magnetfelt rundt i en spole

Når elektrisk strøm flyter gjennom en leder dannes det et konsentrisk magnetfelt rundt lederen, i proporsjonal størrelse til strømmen. Den magnetiske *feltstyrken* H er størst ved lederens ytterkant og reduseres derfra med motsatt proporsjonalitet av avstanden fra lederen. Den magnetiske *flukstettheten* B er produktet av feltstyrken og permeabilitetkonstanten (ε_0) og kan dermed uttrykkes som i formel 3.12 [4]

$$B = \varepsilon_0 \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad r \geq r_a \quad [T], Tesla \quad (3.12)$$

der r_a er lederens radius og r er en distanse fra midten av lederen.

Dersom lederen er laget av et ikke magnetisk materiale som f.eks. kobber eller aluminium er magnetfeltet, og flukstettheten, økende med radiusen av lederen r_a [8]

$$B = \varepsilon_0 \cdot \frac{I \cdot r}{2 \cdot \pi \cdot r_a^2} \quad r_a > r \quad [T], Tesla \quad (3.13)$$

Konsekvensen av formlene 3.12 og 3.13 er at det dannede magnetfeltet i lederen både omfatter lederen selv og potensielt andre ledere i nærheten. Dersom to strømførende ledere plasseres i nærheten av hverandre kan vi ved hjelp av prinsippet om superposisjon beregne det totale magnetfeltet.

Magnetisk fluks og induktans

Den magnetiske fluksen Φ er et produkt av den magnetiske flukstettheten og et tenkt areal den går gjennom. Magnetisk fluks oppgis i enheten Weber [Wb].

Dersom det flyter strøm gjennom en spole vil det dannes et magnetfelt gjennom spolen. Dette er illustrert i figur 3.4. Dersom strømmen endres vil magnetfeltet også endre seg proporsjonalt. Av Faradays induksjonslov vil det da induseres en motspenning e over spolen proporsjonal med endringsraten. Den induserte spenningen kan beskrives ved å multiplisere en konstant L med den dervierte av strømmen I med hensyn til tid, og L er spolens induktans.

$$e = -L \cdot \frac{di}{dt} \quad [V] \quad (3.14)$$

Av Lenz' lov er e en motindusert spenning som motvirker strømendringen og fortegnet til induktansen er derfor negativ i formel 3.16. En induktans i seg selv kan ikke være negativ. Ettersom det er en proporsjonalitet mellom [7]:

$$\Phi \propto B \propto H \propto I \quad (3.15)$$

vil L ikke være avhengig av strømmen i seg selv. Den vil derimot være en konstant som beskriver hvordan spolen er utformet geometrisk og av hvilke materialer. Den defineres også ut fra forholdet mellom den totale magnetiske fluksen Ψ og strømstyrken.

$$L = \frac{\Psi}{I} \quad [H] \quad (3.16)$$

Der den totale fluksen Ψ er summen av fluksen Φ i alle spolens viklinger.

3.1.5 Kabelens elektriske parametere

Resistans i leder

Materiale	Motstand $\rho_{20^\circ C}$	Temperaturkoeffisient α_{20}
Kobberleder	$1.72410^{-8}[\Omega m]$	$0.0039 \frac{\Omega m}{\text{deg } C}$

Tabell 3.1: Elektriske egenskaper for kobber [9]

I likestrømsystemer er impedansen i kabler primært resistive. I kobber og aluminiumsledere øker motstanden proporsjonalt med lengden av kabelen, motsatt proporsjonal av tverrsnittet og økende ved høyere temperatur. Formel 3.17 angir likestrømsmotstanden ved $20^\circ C$, og denne korrigeres til aktuell temperatur med formel 3.18.

$$R_{DC,20^\circ C} = \frac{\rho_{20^\circ C} \cdot \ell}{A} \quad (3.17)$$

$$R_{DC,T} = R_{DC,20^\circ C} \cdot (1 + \alpha_{20}(T - 20)) \quad (3.18)$$

$R_{DC,20^{\circ}C}$	= Likestrømsmotstand ved $20^{\circ}C$ [Ω]
$R_{DC,T}$	= Likestrømsmotstand ved temperatur T [Ω]
$\rho_{20^{\circ}C}$	= Motstand i [Ωm]
α_{20}	= Temperaturkoeffisient [Ωm]
ℓ	= Lederlengde [m]
A	= Ledertverrsnitt [m^2]

I vekselstrømsystemer vil elektronene ha en tendens til å bli presset ut mot ytterkanten av lederen. Denne strømfortrengningen gjør at strømtettheten er høyere ved lederens ytre deler enn indre, og fører til et lavere effektivt ledertverrsnitt. Strømfortrengningen øker med økende frekvens og dermed øker den resistive impedansen i kabelen tilsvarende. Denne effekten er mer signifikant for kabler med store ledertverrsnitt. Tilsvarende blir også resistansen påvirket av elektronflyt i andre nærliggende ledere, og denne effekten kalles for næreffekten. Matematisk kan vekselstrømsmotstanden for en gitt frekvens R_{AC} vises som i formel 3.19, der y_s og y_p er bestemt av frekvensen og kabelens konstruksjon [9].

$$R_{AC,f} = R_{DC}(1 + y_s + y_p) \quad (3.19)$$

y_s = Faktor bestemt av strømfortrengningen

y_p = Faktor bestemt av næreffekten

Induktive kabelparametere

Vekselstrømsystemer fører også til at kabelen får induktive og kapasitive egenskaper. Den konstante endringen av strømretningen vil føre til at magnetfeltet rundt lederen kontinuerlig er i endring. Dette magnetfeltet vil påvirke lederens egne elektriske egenskaper og denne påvirkningen kalles selvinduktans. Av Faradays induksjonslov vil feltet også føre til at det dannes motelektriske felt i andre nærliggende strømledende materialer og det er dermed en gjensidig induktans mellom dem. Ved beregninger av kabelparametre vil induktansen derfor være påvirket av andre ledere, skjermledere og eventuelt metallisk armering i kabelen. Det må derfor foretas en omfattende beregning for hvert enkelt kabelsystem. Det har tidligere i kapitlet blitt vist at induktansen kan oppgis i en verdi som er uavhengig av strøm og spenning, med enheten Henry. Den induktive reaktansen kan kalkuleres for en kabel ved at vinkelfrekvensen $\omega = 2\pi f$ multiplisert med en induktans L oppgitt per meter kabellengde, dette er vist i formlene 3.20 og 3.21.

$$x_L = 2\pi f L \cdot 10^{-3} \quad \left[\frac{\Omega}{km} \right] \quad (3.20)$$

$$X_L = x_L \cdot \ell \quad [\Omega] \quad (3.21)$$

Kapasitive kabelparametere

Som vist i seksjon 3.1.3 vil både den totale ladningen Q og kapasitansen C en kabel innehar være proporsjonal med kabellengden. Derfor er det vanlig at kapasitans oppgis i Farad per meter. Formel 3.11 kan derfor skrives om til en kapasitans per meter kabel.

$$c = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot 2\pi}{\log \frac{r_b}{r_a}} \left[\frac{F}{m} \right] \quad (3.22)$$

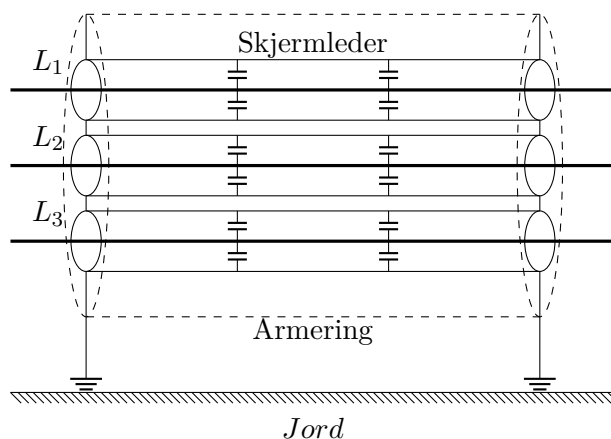
Den totale kapasitive reaktansen kan kalkuleres for en kabel ved at den inverse vinkel-frekvensen $\omega = 2\pi f$ multipliseres med den inverse kapasitansen C oppgitt per meter kabellengde ℓ , dette er vist i formlene 3.23 og 3.24.

$$x_C = \frac{1}{2\pi f C \cdot 10^{-3}} \left[\frac{\Omega}{km} \right] \quad (3.23)$$

$$X_C = x_C \cdot \ell \quad [\Omega] \quad (3.24)$$

3.1.6 Skjermjording

Skjermlederne er i denne oppgaven jordet og sammenkoblet i begge ender av kabelen. Dette fører til at induerte strømmer fra nærliggende kraftledere kan flyte i skjermen, men sikrer også en sammenhengende returvei for feilstrømmer. I et system isolert fra jord er det kabelens kapasitans som er den primære returveien fra skjermlederen til fasene. [10]. Kabelens metalliske armering er også jordet i begge ender, og til tross for den lavere konduktiviteten fungerer denne også som en returvei for feilstrømmer, i parallell med jord og sjøvann. Dette er vist i figur 3.5, der faselederne, skjermlederne, armeringen og jordingen er illustrert.



Figur 3.5: Utsnitt av kabel, med skjermledere jordet i begge ender

I kabler som illustrert i figur 3.5 gjør den ytre metallarmeringen at beregninger av parallelle returveier for feilstrøm gjennom f.eks. sjøvann eller jord/sjøbunn kan neglisjeres dersom

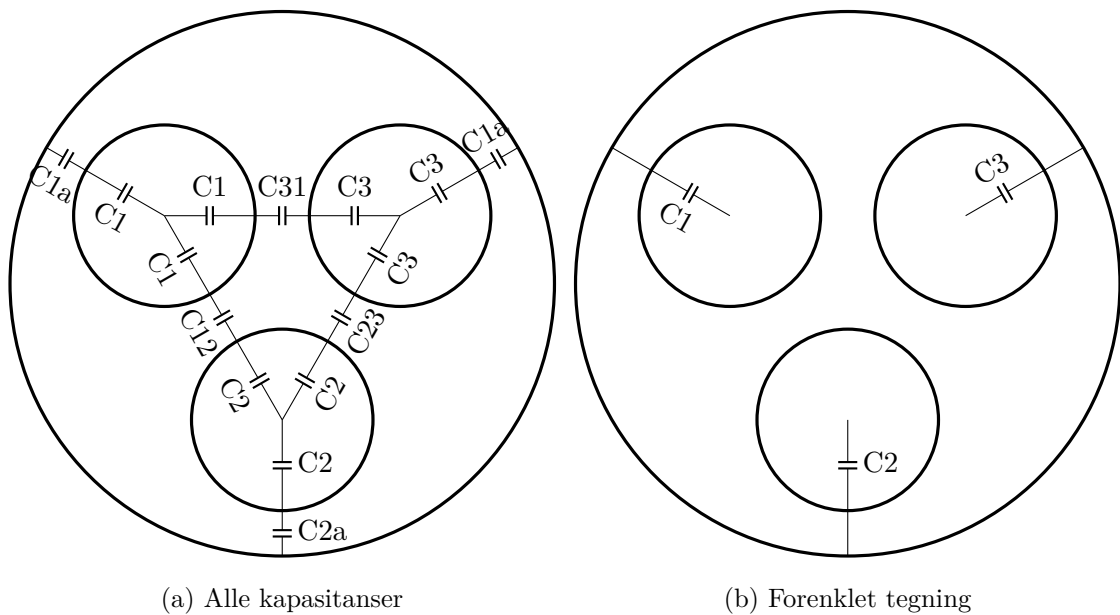
armeringen er av en viss tykkelse. Tykkelsen bestemmes av de induserte elektromagnetiske bølgenes evne til å trenge inn i armeringen, skinndybden δ [10]

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu_r \cdot \mu_0}} \quad (3.25)$$

Materiale	Motstand $\rho_{20^\circ C}$	Temperaturkoeffisient α_{20}	μ_r
Armering	$1.38 \cdot 10^{-8} [\Omega m]$	$0.0040 \frac{\Omega m}{\text{deg } C}$	1000

Tabell 3.2: Elektriske egenskaper for kobber [9]

Det elektriske feltet mellom ledere, skjermer, armering og jord vil føre til kapazitiv interaksjon mellom dem. I en typisk trelederkabel, tilsvarende den som er vist i figur 3.1b, er faselederne forlagt i en trekant. På grunn av symmetrien vil det ikke virke noen kapasitans mellom faselederne i en slik forlegning [10]. Skjermlederne og armeringen er også sammenkoblet og jordet i begge ender av kabelen. Kortslutningen av disse gjør at hver fases kapasitans kan forenkles til å være lik kapasitansen mellom faselederen og skjermlederen. Dette er vist i figur 3.6b .



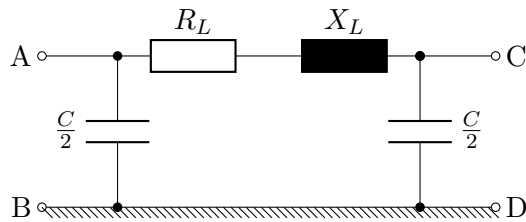
Figur 3.6

3.1.7 Styrekabel

De undersjøiske motorene forsynes via spesiallagde styrekabler, kalt umbilical på engelsk. Dette er bred betegnelse på kabler som gjerne brukes til å kontrollere undervannsinstallasjonene. De innehar ofte flere ledere for kommunikasjon, forsyning til lavspenningsystemer, høyspenningssystemer og rør for hydraulisk kraftforsyning. Avhengig av design kan de være tørre eller våte. Sistnevnte betyr at vann vil trenge inn gjennom ytterkappen og

armeringen til kabelen. I slike kabler er det dermed kritisk at de innebygde lederne har egen beskyttelse mot videre vanninntrengning. Kabelimpedansene diskutert i 3.1.5 er også gyldige for slike kabler, men ved nøyaktige utregninger må det tas hensyn til de andre innebygde systemene.

I denne oppgaven er en våt styrekabel forenklet til et system med tre enlederkabler med individuelle konsentriske skjermledere og plassert i trekantforlegning. Dette er vist i figur 3.1b. Forenklingen av returstrøm i jord og kapasitansene blir lik som beskrevet i seksjon 3.1.6. Ved matematiske beregninger kan styrekabelen representeres på lik måte som en konvensjonell kraftkabel, med to halvdeler av kabelkapasitansen fordelt på hver side av kabelens serieimpedans, figur 3.7.



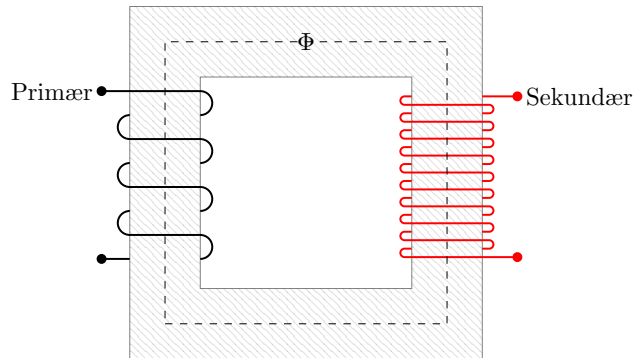
Figur 3.7: Ekvivalentmodell av kraftkabel

3.2 Transformator

3.2.1 Formål

Hovedformålet med en transformator er vanligvis å opp- eller nedtransformere spenningsnivået ved overføring av effekt. For eksempel transformeres spenningen opp før lange transmisjonslinjer for å redusere effekttapet i overføringen. Deretter nedtransformeres spenningen til forbrukerens ønskede spenningsnivå. En transformator skaper også et galvanisk skille mellom primær- og sekundærviklingene. Dermed må all elektrisk energi overføres via elektromagnetisme og en konsekvens er at jordsløyfer med jordfeilstrøm kan brytes [4]. I industrielle systemer utføres også transformatorens faseviklinger i bestemte konfigurasjoner for å oppnå ønskede faseforskyvninger tilpasset eksempelvis en frekvensomformer.

3.2.2 Ideell transformator



Figur 3.8: Enfase transformatorjern

En transformator er bygd opp av to galvanisk isolerte ledere viklet rundt en felles jernkjerne. Figur 3.8 viser en prinsipp tegning for transformering av én fase. En påtrykt vekselspanning på primærsiden fører til en vekselstrøm i primærviklingen, som igjen skaper et vekslende magnetfelt i jernkjernen. Av Lenz' lov vil endringen av magnetfeltet i jernkjernen induisere en motspenning i sekundærviklingen lik

$$e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.26)$$

Når den magnetiske fluksen er lik for begge viklingene vil:

$$N_1 \frac{d\Phi}{dt} = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.27)$$

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.28)$$

I en ideell transformator er det ingen effekttap og derav må effekten levert inn på primærsiden P_1 være lik effekten som blir levert på sekundærsiden P_2 . Den ideelle transformatoren uten tap vil da gi forholdet:

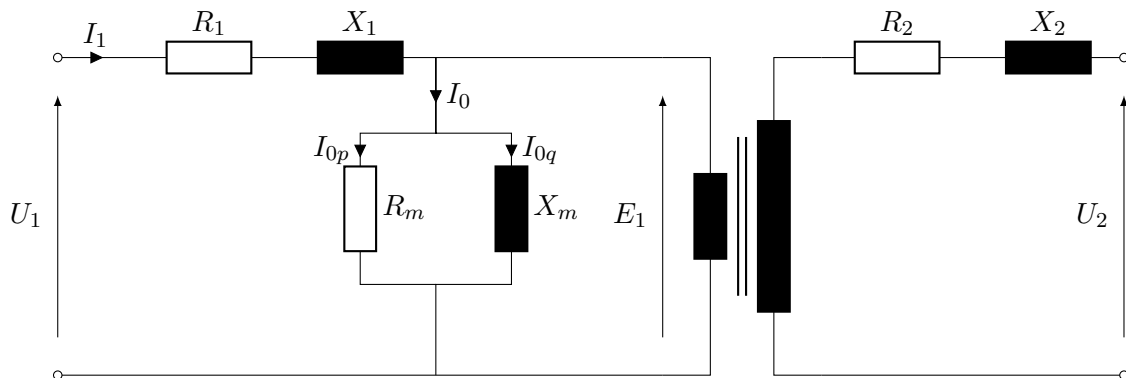
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.29)$$

Der:

- e_1 = Indusert spenning i primærvikling
- e_2 = Indusert spenning i sekundærvikling
- N_1 = Antall viklinger i primærspolen
- N_2 = Antall viklinger i sekundærspolen
- $\frac{d\Phi}{dt}$ = Endring av magnetisk fluks
- U_1 = RMS-spenning over primærspolen
- U_2 = RMS-spenning over sekundærspolen

3.2.3 Ekvivalentmodell

I en virkelig transformator vil det være et effekttap. Ettersom den ikke har bevegelige deler med friksjonstap er virkningsgraden for en typisk transformator brukt i kraftsystemer omtrent 97%-99% [11]. Det er både resistive og induktive tap. De resistive effekttapene kommer primært av ledermotstanden i kobberviklingene, både på primær og sekundærsiden av transformatoren. I ekvivalentmodellen for transformatoren (figur 3.9) representeres derfor kobbertapene som resistansene R_1 og R_2 . Strømmen i spolen magnetiserer transformatorjernet, men noe av den magnetiske fluksen vil også skape felt utenfor jernet. Dette vil indusere reaktive strømmer i systemet og disse kan representeres som induktanser i ekvivalentskjemaet, kalt lekkreaktanser X_1 og X_2 . Magnetiseringstapene er representert av en resistiv og en induktiv impedans i parallell. R_m er tapet i transformatorjernet og X_m representerer tapet som kommer av magnetfeltet [10][11]. Transformatorparameterne blir målt av fabrikanten og blir spesifisert i transformatorens dokumentasjon.

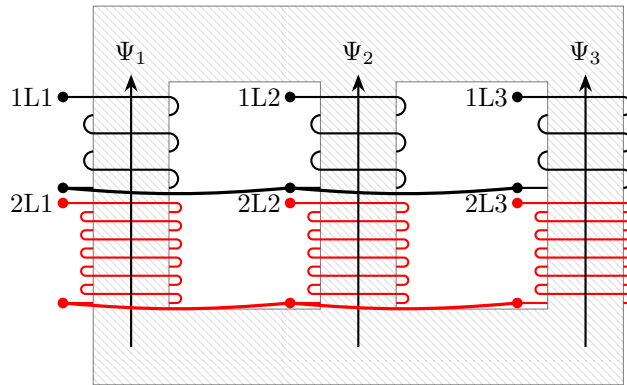


Figur 3.9: Ekvivalentskjema for transformator

3.2.4 Trefasetransformator

Konstruksjon

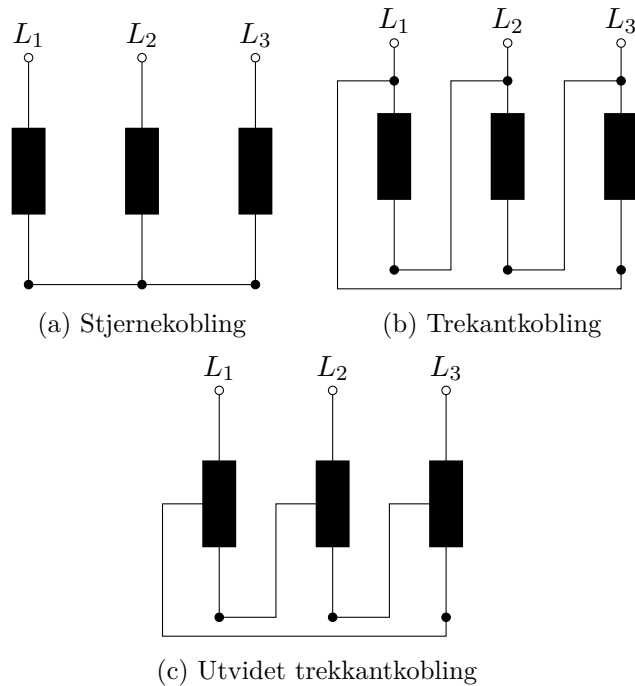
En trefasetransformator fungerer prinsipielt på samme måte som en enfasetransformator. Den kan bestå av separate jernkjerner, en for hver fase, tilsvarende som i figur 3.8. For transformatorer brukt i kraftsystem er det vanlig at alle fasene bruker den samme jernkjernen, men med et jernbein hver. I figur 3.10 er det vist en prinsippskisse av en trefasetransformator.



Figur 3.10: Transformatorjern for trefase

Transformatorkoblinger

I figur 3.10 er det synlig at bunnen av viklingene er sammenkoblet både for primær- og sekundærviklingene. Dette er en stjernekobling og de tre fasene deler et felles nøytralpunkt. I figur 3.11a er samme kobling vist skjematisk. Dersom det er ønskelig kan nøytralpunktet i stjernekoblingen kobles til jord. I en transformator der både primær og sekundærside er stjernekoblet vil strømmer og spenninger på begge sider være i fase, eller med 180° forskyving (motsatt polaritet) dersom det ene viklingssettet er invertert. Alternativt til stjernekobling kan transformatorviklingene også kobles i trekant. Der er bunnen av en vikling koblet til toppen av den neste, slik som kretsskjemaet i figur 3.11b viser. Det er ingen nøytralpunkt i denne koblingen og den kan derav ikke kobles til jord. Krav til faseforskyvning kan avgjøre hvilken transformatorkobling som velges. Frekvensomformerer i systemet som oppgaven analyserer krever en transformator med flere sekundærviklinger der det er 12° forskyvning mellom hver vikling. For å oppnå dette brukes det en spesiell transformatorkobling kalt *utvidet trekant*. Et koblingsskjema for denne er vist i figur 3.11c.



Figur 3.11: Transformatorkoblinger

3.3 Asynkronmotor

Asynkronmotoren er en vekselstrømmotor som arbeider etter induksjonsprinsippet. Den kalles derfor ofte for en induksjonsmotor. Motoren består av to hovedkomponenter, en rotor og en stator. Statoren har viklinger som er plassert 120° i forhold til hverandre. Rotoren består av stablede, laminerte jernblikk og elektrisk ledende staver som er kortsluttet i hver ende [11]. Fra statorviklingene produseres et magnetisk felt som roterer synkront med frekvensen til den tilførte spenningen. Det roterende feltet kutter rotorstavene og det blir induisert en strøm i stavene. Strømmen i hver av stavene produserer et roterende magnetfelt som samhandler med det roterende statorfeltet og det utvikles dreiemoment i rotoren som får den til å rotere [12]. Etterhvert som rotorturtallet øker vil ikke statorfeltet kutte gjennom rotorstavene like hyppig og dermed reduseres frekvensen i rotorkretsen [11]. Rotorturtallet vil øke mot, men aldri nå hastigheten til det roterende magnetfeltet i stator, derav navnet asynkron. Differansen mellom rotorens turtall n_r og magnetfeltets turtall n_s kalles sakketturtallet og beskrives ved:

$$n_{SL} = n_s - n_r \quad (3.30)$$

Forholdet mellom turtallene blir kalt slip s :

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3.31)$$

Med mekanisk belastning koblet til akslingen, roterer rotoren med et turtall som avviker fra dreiefeltets turtall, Avviket mellom rotors og dreiefeltets turtall øker med den mekaniske

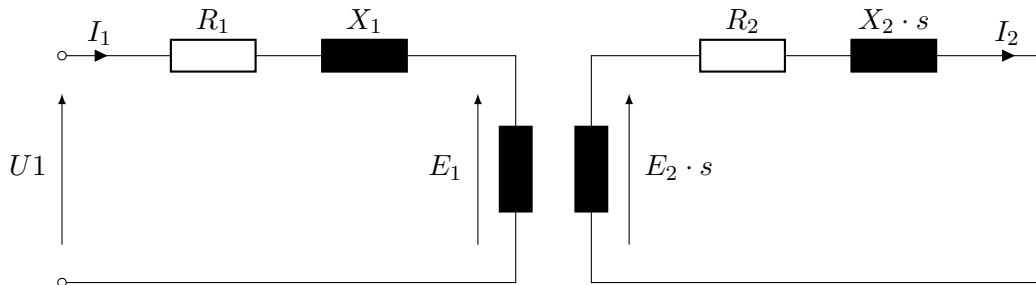
belastningen. Turtallet til statorfeltet kan beskrives ved:

$$n_s = \frac{f \cdot 60}{P} \quad (3.32)$$

Der f er nettfrekvensen og P er statorviklingens polpartall.

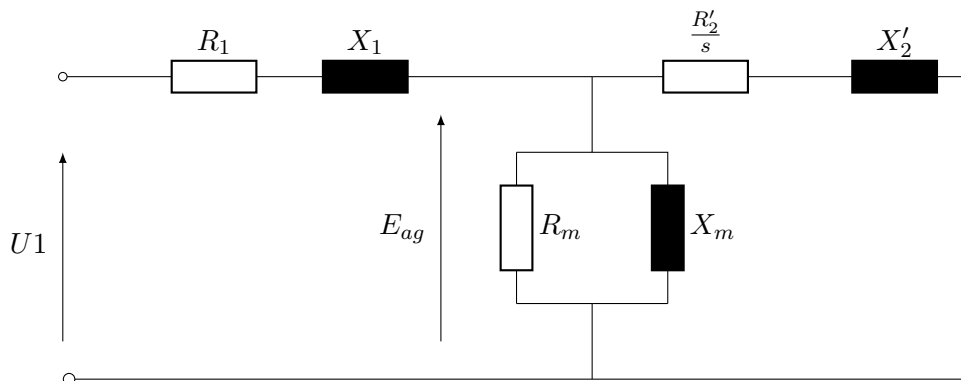
3.3.1 Ekvivalentmodell motor

Asynkronmotoren sin ekvivalentkrets er lik en transformator med sekundærsiden kortsluttet. Statoren er representert med motstanden R_1 , lekkreaktansen X_1 og den induserte spenningen E_1 . Rotoren består av motstanden R_2 og lekkreaktansen $X_2 \cdot s$. Lekkreaktansen og den induserte spenningen i rotor E_2 er avhengig av rotorfrekvensen og vil derfor reduseres etterhvert som sakketurallet minsker.



Figur 3.12: Ekvivalent med skille mellom stator- og rotorkrets

For å sammenlikne stator og rotorkretsen kan ekvivalentskjemaet forenkles ved å regne impedansene om til samme spenningsnivå. Dette er vist i figur 3.13. Tilsvarende som for transformatoren er R_m og X_m magnetiseringstapet.



Figur 3.13: Ekvivalentskjema for asynkronmotor

3.3.2 Undersjøisk motor

Ettersom motoren i denne oppgaven er plassert på havbunnen, er den utformet på en måte som skiller seg noe fra en konvensjonell asynkronmotor. For å unngå vanninntrengning er motoren væskefylt med et overtrykk i forhold til omgivelsene. Som et resultat av dette

kreves en glatt rotor for å minimere friksjonstap. Væsken har høyere permeabilitet μ enn luft og det blir derfor høyere dielektriske tap i luftgapet, som er fylt med olje. Det mest signifikante tapet av effekt i motoren oppstår som følge av den interne friksjonen i væsken. Dette gjør at motoren trenger mer kjøling. [13]

3.4 Elektriske motordrifter

På grunn av de lange avstandene mellom frekvensomformer og motor, benyttes åpen sløyfe-kontroll av motoren. En vanlig metode for styring av hastigheten og momentet til en asynkronmotor er å holde luftgapsfluksen konstant ved variabel last og turtall [11]. Luftgapsfluksen holdes konstant under variabel hastighet ved å redusere induisert spenning proporsjonalt med frekvensen. Et resultat av dette er også at maksimalmomentet T_{max} vil holdes konstant hvis spenning og frekvens reguleres i samme forhold. Dette gjelder ved frekvenser lik eller lavere enn merkefrekvens [11].

Luftgapsfluksen ϕ_{ag} roterer med synkron hastighet. Dette fører til en motvirkende emf over hver av statorviklingene, ofte kalt luftgapsspenningen E_{ag} . Fra *Faraday's* lov har vi at

$$e_{ag} = N_s \frac{d\phi_{ag}}{dt} \quad (3.33)$$

der N_s er antallet viklinger per fase i stator. Påvirkningen av resistansen i magnetiseringskretsen er liten nok til å neglisjeres [14]. Viklingene er konstruert slik at luftgapsfluksen er tilnærmet sinusformet. $\phi_{ag}(t) = \phi_{ag} \sin(\omega t)$. Dette satt inn i formel 3.33 blir da

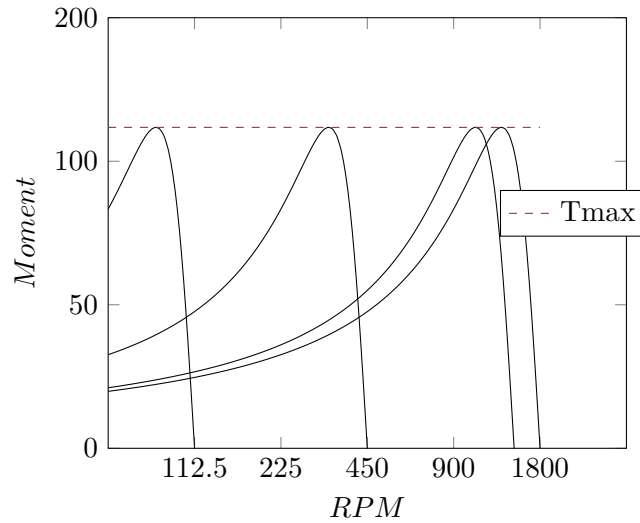
$$e_{ag} = N_s \omega_{ag} \phi_{ag} \cos(\omega t) \quad (3.34)$$

RMS verdien blir $E_{ag} = \frac{N_s \omega \phi_{ag}}{\sqrt{2}}$

Ved nominell drift er $U1 \approx E_{ag}$ [14] som en konsekvens av dette må forholdet mellom spenningen og frekvensen holdes likt dersom luftgapsfluksen skal holdes konstant. Dette er vist i formel 3.35.

$$\phi_{ag} \approx \frac{\sqrt{2}}{2\pi N_s} \cdot \frac{U1}{f} \quad (3.35)$$

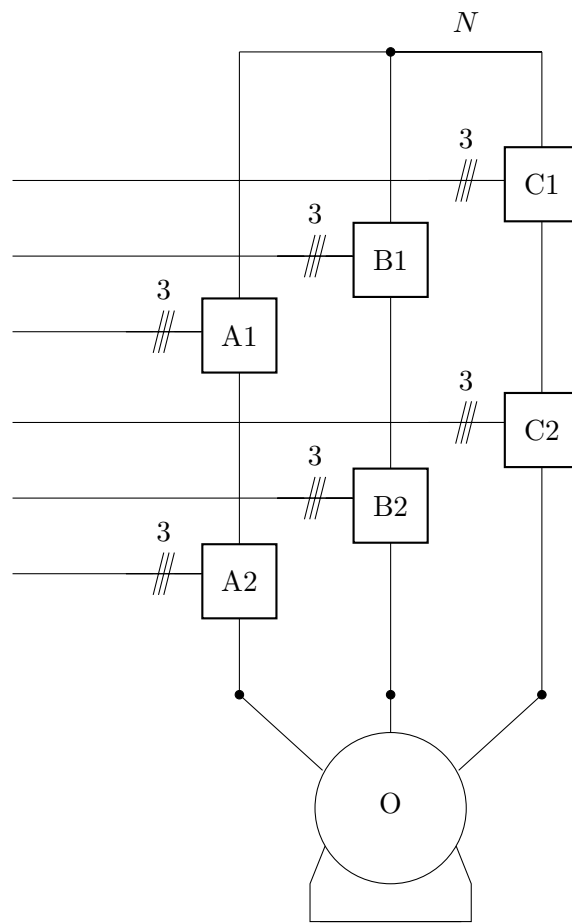
Det er viktig at linjespenningene er symmetriske ved drift av asynkronmotoren. Usymmetriske spenninger fører til vibrasjoner i motoren, stor temperaturøkning og forhøyet ubalanse i mellom strømfasene [15].



Figur 3.14: Moment-turtall karakteristik ved konstant U/f forhold

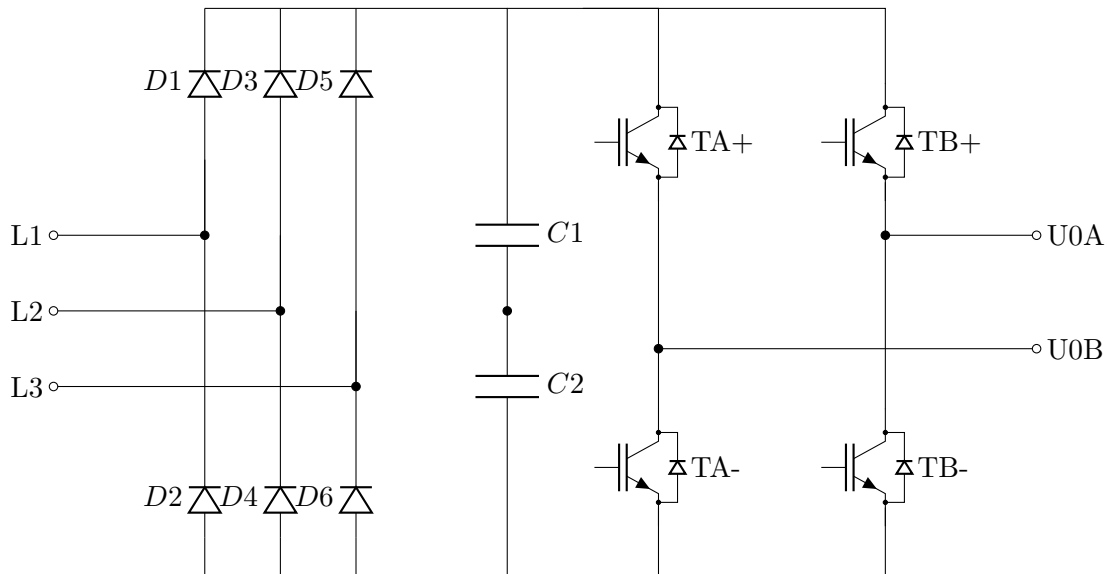
3.5 Frekvensomformer

Ulike varianter av spenningsomformere benyttes i mange applikasjoner innenfor elkraft-fagfeltet i dag. Noen av disse applikasjonene er høyspent DC overføringer (HVDC), moderne overføringssystem som *flexible alternating current transmission systems* (FACTS) og motorkontroll. Frekvensomformerer som benyttes i dette systemet er en multi-level seriekoblet h-bro omformer. Denne består av fem såkalte *celler* som er koblet i serie, der hver celle inneholder en fullbro-omformer, vist i figur 3.16. Frekvensomformerer benytter IGBT-halvlederelementer. IGBT-er kan brukes med spenninger på opp til 3kV og med en brytefrekvens på opp til 100kHz [14]. Cellene i denne frekvensomformerer er koblet i serie. Det gjør at spenningen blir fordelt slik at den totale spenningen kan overstige 3kV. Prinsippet er vist i figur 3.15. Cellene i frekvensomformerer bygger til sammen en trappetrinn-sinus som leverer en spenning på 11kV og opererer med en brytefrekvens på 6,1kHz. Dette gjør at frekvensomformerer skaper et harmonisk innhold på under 3% [16].



Motor

Figur 3.15: Prinsippskisse av frekvensomformer med to celler per fase



Figur 3.16: En enkelt celle i omformeren

3.6 Kortslutning og jordfeil

Kortslutning er en utilsiktet ledende forbindelse mellom en fase og jord, mellom flere faser eller mellom flere faser og jord. Hvis kortslutningen danner en lukket krets med lav impedans vil det oppstå en mye større strøm enn det systemet er dimensjonert for ved nominell drift. Alle kraftsystemer må derfor beskyttes av brytere eller sikringer som kan bryte denne strømmen. Ettersom en kortslutning typisk fører til en umiddelbar høy transientstrøm må systemet også dimensjoneres for å tåle disse strømmene i en kort periode før brytere og sikringer løser ut.

3.6.1 Trefasekortslutning i trefasesystem

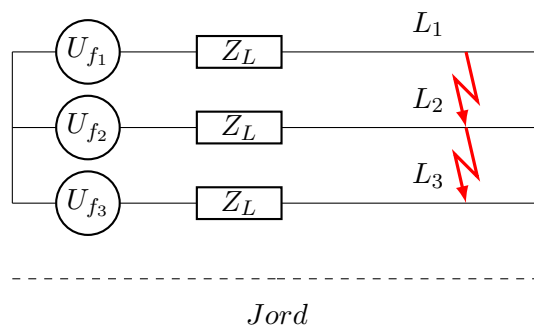
Ved en trefaset kortslutning (figur 3.17) vil alle tre strømlederne være i kontakt med hverandre. Uansett jordingsystem vil dette føre til en stor kortslutningsstrøm. Ettersom alle lederne er påvirket likt av feilen vil dette være en symmetrisk feil der $I_{L1} = I_{L2} = I_{L3}$. En variant av denne feilen er også at alle tre fasene er kortsluttet til jord.

3.6.2 Tofasekortslutning i trefasesystem

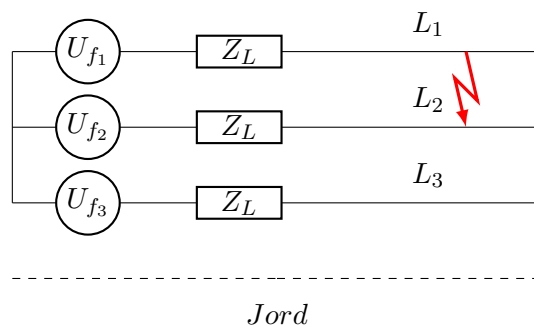
Tofaset kortslutning (figur 3.18) vil si at to av fasene er i kontakt med hverandre. Dette vil føre til en ubalanse i spenninger og fasestrømmer, med store strømmer i de to kortsluttede fasene. En variant av denne feilen er også at begge fasene er kortsluttet til jord.

3.6.3 En fase til jord-kortslutning i trefasesystem

Fase til jord kortslutning (figur 3.19) er den mest vanlige jordfeilen i kraftsystem. Dette fører til ubalanserte fasespenninger. Størrelsen på kortslutningsstrømmen er i hovedsak

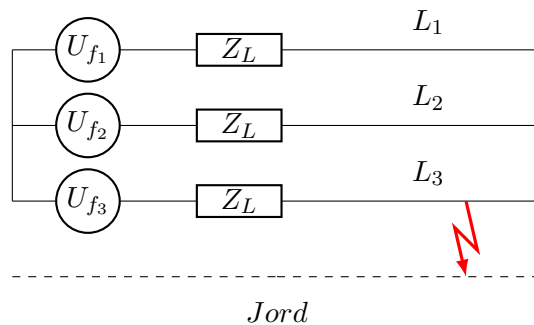


Figur 3.17: Trefasekortslutning



Figur 3.18: Trefasekortslutning

bestemt av jordsystemet, kabelens kapasitans og driftsfrekvensen [8]. I resten av oppgaven vil jordfeil referere til denne typen feil.



Figur 3.19: Trefasekortslutning

3.6.4 Jordsystem

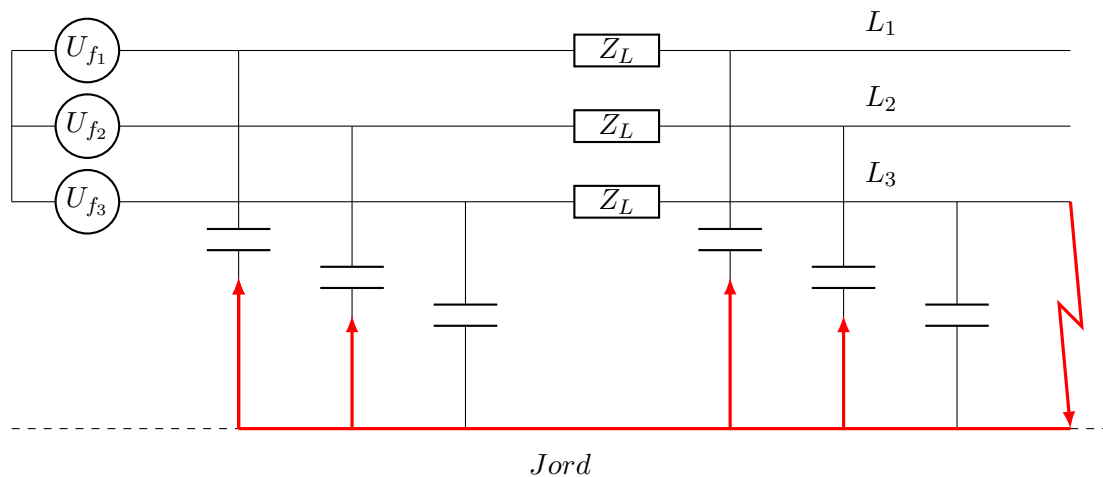
Prinsipielt kan nøytralpunkter i et kraftsystem jordes på flere måter:

1. Direkte jording
2. Jording med resistiv motstand
3. Jording med induktiv impedans

4. Isolert nøytralpunkt

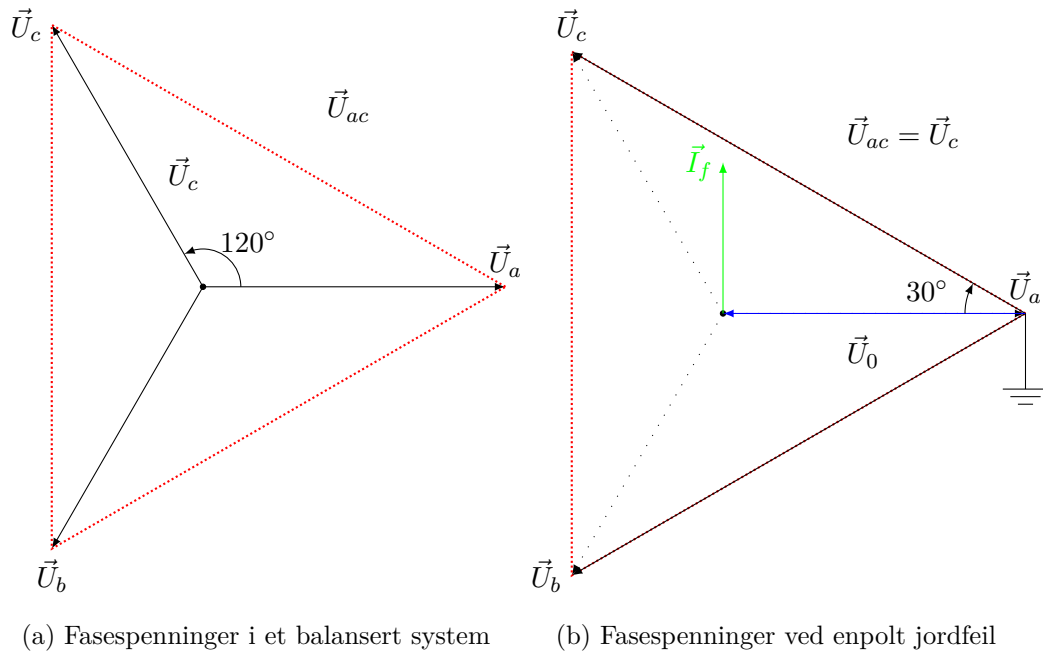
Hvilken jording som blir valgt i et kraftsystem er avgjørende for størrelsen på feilstrømmer og overspenninger hvis det oppstår en jordfeil, og de ulike metodene har alle fordeler og ulemper. En direkte jording av nøytralpunktet vil for eksempel føre til store jordstrømmer som med enkelthet kan oppdages av et kortslutningsvern.

Kraftsystemet denne oppgaven er basert på er isolert fra jord. Det betyr at nøytralpunktene i transformatoren og asynkronmotoren ikke har en designert kobling mot jord og er derfor teknisk sett ujordet. Dette kalles også for et flytende nøytralpunkt. Alle kraftsystem, isolert eller ikke, har en kobling mot jord gjennom de naturlige kapasitansene. Størrelsen på reaktansen mellom faselederne og jord spiller en sentral rolle ved jordfeil da de vil være proporsjonale med feilstrømmen [17]. Dersom det oppstår en enpolt jordfeil i dette systemet vil returstrømmen møte en høy returimpedans til fasene uten feil. Returstrømmen vil derfor være lav sammenliknet med en jordfeil i et system med direkte jordede nøytralpunkt. Dette er vist i figur 3.20.



Figur 3.20: Enpolt jordfeil i et isolert system

Ved enpolt jordfeil blir nøytralpunktet kraftig forskjøvet, men linjespenningene vil være tilnærmet uforandret. Dersom jordfeilen ikke har en overgangs impedans ($Z_f = 0$) vil nøytralpunktet i figur 3.21a flytte seg til jordpotensiale og den feilede fasens spenningsnivå vil bli lik 0 V [17]. Dette er illustrert i figur 3.21b. Nullpunktets forskyving (\vec{U}_0) vil i denne situasjonen bli lik fasespenningen før feilen oppsto. Det vil da bygge seg opp en spenning over de kapasitive koblingene mellom nøytralpunktet og fasene uten feil, noe som vil gi en teoretisk ren kapasitiv feilstrøm. Forflytningen av nullpunktet gjør at fasespenningene i fasene uten feil vil øke med $\sqrt{3}$ og bli tilsvarende linjespenningen [18].



Figur 3.21: Grafisk fremstilling av fasespenninger med og uten enpolt jordfeil i et isolert system [19]

3.6.5 Isolasjonsklasser

I følge [20] skal merkespenningen til kabler være tilpasset driftsforholdene i det systemet kablet blir brukt. Dersom et system forventes å operere med jordfeil må det dimensjoneres for dette. Kraftsystemer deles inn i tre kategorier, med forskjellige krav til isolasjon:

- Kategori A:
Denne kategorien omfatter de systemene som, ved en jordfeil, kobler ut innen ett minutt.
- Kategori B:
Denne kategorien omfatter de systemene som driftes med en jordfeil i korte perioder. En periode på 8 timer tolereres i følge [20]. Den totale driftstiden med jordfeil i løpet av et år skal ikke overskride 125 timer.
- Kategori C:
Denne kategorien gjelder alle systemer som ikke faller under kategori A eller B.

Den nominelle spenningen U_n som anbefales i [20], i forhold til den høyeste systemspenningen som utstyret kan komme til å driftes med er:

Høyeste systemspenning[kV]	U_n kategori A og B[kV]	U_n kategori C[kV]
7,2	3,6	6
12	6	8,7
17,5	8,7	12
24	12	18
36	18	-

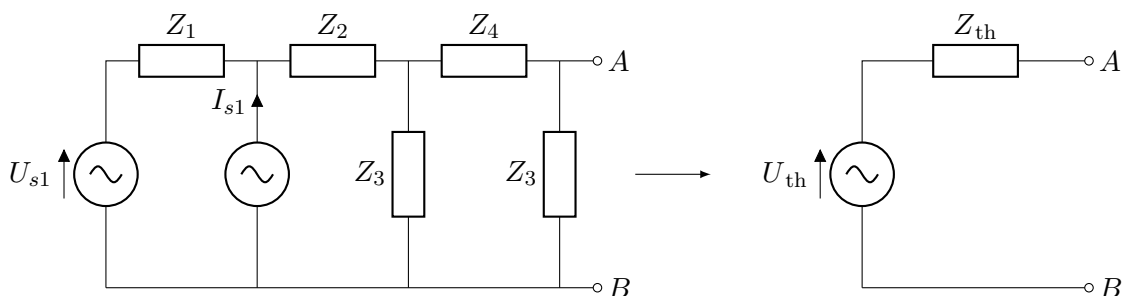
Tabell 3.3: Anbefalte spenningsnivå for de ulike isolasjonsklassene, hentet fra [20]

Et viktig aspekt er at i systemer som opereres med langvarig jordfeil vil dette føre til ekstra slitasje på isolasjonen og en redusert levetid på kabelen. Dersom det forventes at systemet skal driftes med jordfeil relativt ofte, anbefales det i henhold til [20], å klassifisere systemet etter kategori C.

4 Systemmodellering

4.1 Thevenins teorem

Thevenins teorem benyttes i kretsteknikk for å forenkle komplekse kretser slik at utregninger blir mer håndterlige. I følge Thevenins teorem kan en hver lineær elektrisk krets som inneholder impedanser, spenningskilder og strømkilder forenkles til en ekvivalentkrets med spenningskilde U_{th} og impedans Z_{th} i serie. Komponenten som kobles mellom terminalene A og B i figur 4.1 vil se Z_{th} i serie med U_{th} . Den ekvivalente spenningskilden U_{th} er spenningen mellom A og B uten belastning. Den ekvivalente impedansen Z_{th} er impedansen sett fra terminalene A og B dersom spenningskildene representeres som en kortslutning og strømkildene representeres som et brudd i kretsen. I noen tilfeller vil også kretser uten strøm- eller spenningskilder forenkles til en enkelt impedans og disse blir også omtalt som Thevenin-ekvivalenter i denne oppgaven.



Figur 4.1: Thevenin ekvivalent

4.2 Symmetriske komponenter

4.2.1 Introduksjon til symmetriske komponenter

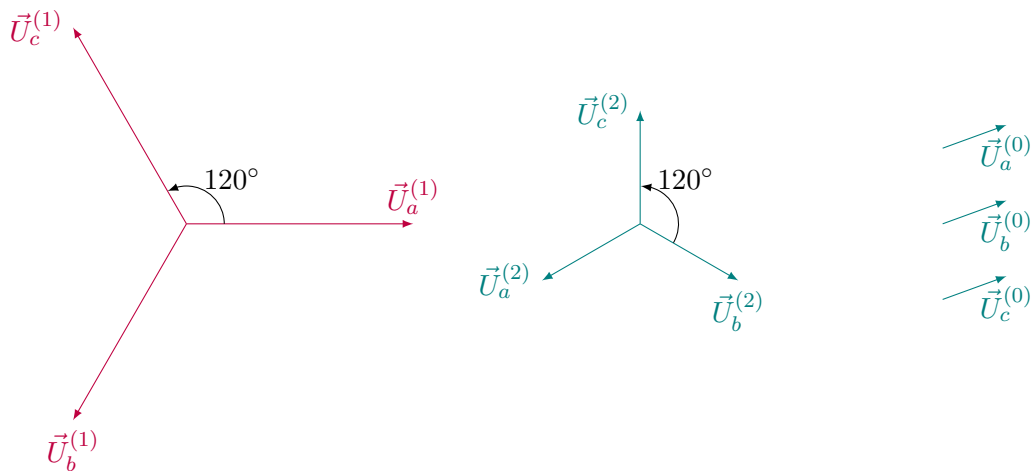
Problemstillingen dreier seg om å analysere systemets respons dersom en enkelt fase får jordfeil. Dette fører til at fasene belastes ulikt, derav får vi en ubalanse mellom spenningsvektorene og den tradisjonelle enfase-ekvivalenttilnærmingen vil ikke lenger være gyldig. Slike feil defineres som usymmetriske feil og det vil være hensiktsmessig å ta i bruk beregningsmetoden *symmetriske komponenter*. Dette er en matematiske fremgangsmåte som brukes for å kunne beskrive et hvert tilfelle av et trefase vektorsystem, både balansert

og ubalansert. Spennings- eller strømvektorene dekomponeres til tre ulike, symmetriske sekvenssystem av vektorer som kalles pluss-, minus- og null-systemet. Disse er vist i figur 4.2.

Plussystemet inneholder tre faser som er lik i størrelse, men forskjøvet 120° i forhold til hverandre. Systemet har faserekkefølge a, b, c. Positiv dreieretning er definert til å være mot klokken.

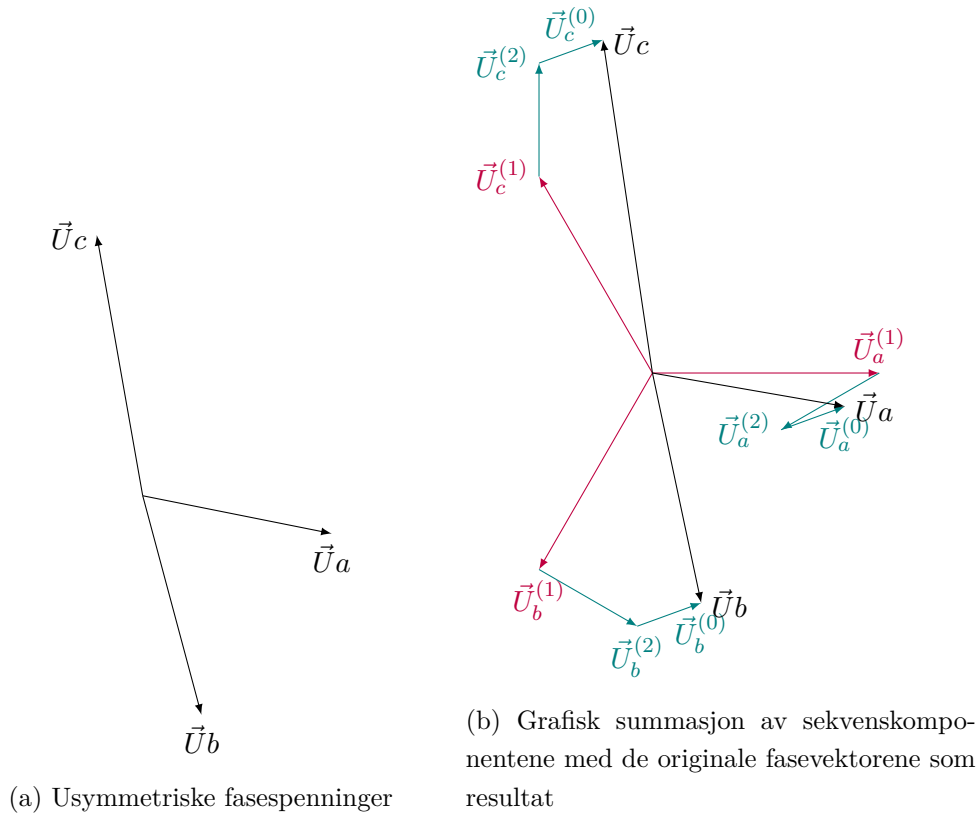
Minussystemet inneholder også tre faser som er lik i størrelse, 120° forskjøvet i forhold til hverandre, men systemet har faserekkefølge a, c, b.

Nullsystemet inneholder tre faser som er lik i størrelse og som ligger i fase med hverandre.



Figur 4.2: Vektorsystemene

De originale, usymmetriske fasevektorene benevnes henholdsvis som fase a, b og c. Vektorer fra de tre symmetriske systemene kalles sekvenskomponenter og for å skille systemene markeres sekvenskomponentene oppe til høyre med henholdsvis (1) for de positive, (2) for de negative og (0) for null-sekvenskomponentene. Dette er markert i figur 4.2. Ved å vektorielt summere sekvenskomponentene fra hvert system, tilhørende samme fase, får vi den originale fasevektoren som resultat. Dette er vist i figur 4.3.



Figur 4.3: Grafisk fremstilling av usymmetrisk trefasesystem representert av sekvenskomponenter

Av figur 4.3b kan følgende uttrykk settes opp:

$$U_a = U_a^{(1)} + U_a^{(2)} + U_a^{(0)} \quad (4.1)$$

$$U_b = U_b^{(1)} + U_b^{(2)} + U_b^{(0)} \quad (4.2)$$

$$U_c = U_c^{(1)} + U_c^{(2)} + U_c^{(0)} \quad (4.3)$$

For å redusere antall ukjente i uttrykkene (4.1, 4.2, 4.3) uttrykkes sekvenskomponentene til b og c fasen ved hjelp av fase a og en vinkeloperator $\alpha = 1 \angle 120^\circ$.

$$U_a = U_a^{(0)} + U_a^{(1)} + U_a^{(2)} \quad (4.4)$$

$$U_b = U_a^{(0)} + \alpha^2 U_a^{(1)} + \alpha U_a^{(2)} \quad (4.5)$$

$$U_c = U_a^{(0)} + \alpha U_a^{(1)} + \alpha^2 U_a^{(2)} \quad (4.6)$$

For å kunne gjøre beregninger mer effektivt settes uttrykkene i system ved hjelp av matriser. Matrisen for vinkeloperator α blir heretter referert til som A-matrisen.

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a^{(0)} \\ U_a^{(1)} \\ U_a^{(2)} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} U_a^{(0)} \\ U_a^{(1)} \\ U_a^{(2)} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Ved å snu på uttrykk 4.7 kan sekvenskomponentene uttrykkes som

$$\begin{bmatrix} U_a^{(0)} \\ U_a^{(1)} \\ U_a^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Av matrisen kan derfor sekvenskomponentene beskrives med følgende likninger

$$U_a^{(0)} = \frac{1}{3} \times (U_a + U_b + U_c) \quad (4.9)$$

$$U_a^{(1)} = \frac{1}{3} \times (U_a + \alpha U_b + \alpha^2 U_c) \quad (4.10)$$

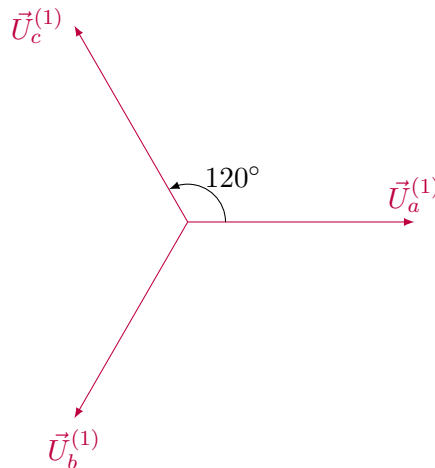
$$U_a^{(2)} = \frac{1}{3} \times (U_a + \alpha^2 U_b + \alpha U_c) \quad (4.11)$$

Denne sammenhengen er også gjeldene for strømmene i systemet. Det ville gitt følgende likning:

$$\begin{bmatrix} I_a^{(0)} \\ I_a^{(1)} \\ I_a^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Eksempel

Det kan illustreres med et regneeksempel at et balansert system ikke inneholder negative- eller nullsekvenskomponenter.



Figur 4.4: Balansert vektorsystem

Figur 4.4 viser en skisse av et balansert vektorsystem. Sekvenskomponentene identifiseres på følgende måte:

Nullsekvenskomponenten:

$$U_a^{(0)} = \frac{1}{3} \times (U_a + U_b + U_c)$$

$$U_a^{(0)} = \frac{1}{3} \times (U_a + \alpha^2 U_a + \alpha U_a)$$

$$U_a^{(0)} = \frac{1}{3} \times U_a(1 + \alpha^2 + \alpha)$$

$$U_a^{(0)} = \frac{1}{3} \times U_a(0) = 0$$

Den positive sekvenskomponenten:

$$U_a^{(1)} = \frac{1}{3} \times (U_a + \alpha U_b + \alpha^2 U_c)$$

$$U_a^{(1)} = \frac{1}{3} \times (U_a + \alpha^3 U_a + \alpha^3 U_a)$$

$$U_a^{(1)} = \frac{1}{3} \times U_a(1 + \alpha^3 + \alpha^3)$$

$$U_a^{(1)} = \frac{1}{3} \times U_a(1 + 1 + 1) = U_a$$

Den negative sekvenskomponenten:

$$U_a^{(2)} = \frac{1}{3} \times (U_a + \alpha^2 U_b + \alpha U_c)$$

$$U_a^{(2)} = \frac{1}{3} \times (U_a + \alpha^4 U_a + \alpha^2 U_a)$$

$$U_a^{(2)} = \frac{1}{3} \times U_a(1 + \alpha^4 + \alpha^2)$$

$$U_a^{(2)} = \frac{1}{3} \times U_a(1 + \alpha + \alpha^2)$$

$$U_a^{(2)} = \frac{1}{3} \times U_a(0) = 0$$

Resultatet viser som forventet at $U_a^{(0)} = U_a^{(2)} = 0$.

Det grunnleggende konseptet med *symmetriske komponenter* er at vi kan dekomponere et system av ubalanserte vektorer til tre balanserte vektorsystem med mål om å forenkle vår analyse av usymmetriske feil på et trefase kraftsystem [8].

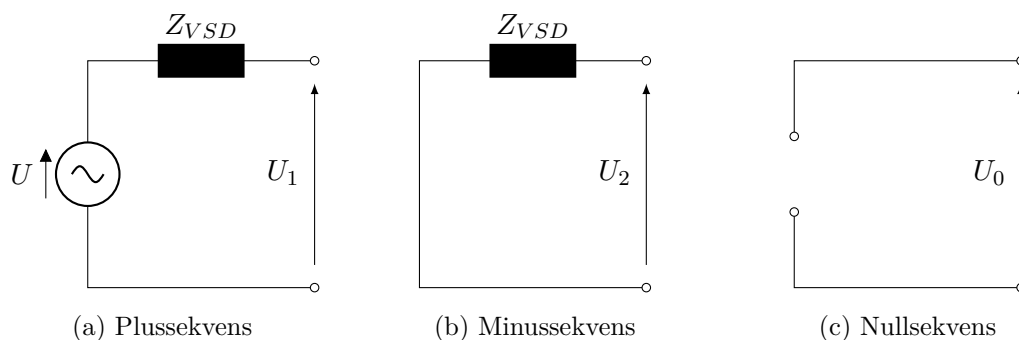
4.2.2 Oppbygging av sekvensnettverkene

Overordnet fremgangsmåte for oppbygging av sekvensnettverkene

Hver komponent i et kraftsystem kan representeres av et sett med sekvensnettverk. Hvordan disse representeres kan deles inn i fire hovedkategorier: ikke-roterende laster, linjer/kabler, roterende maskiner og transformatorer [8]. Sekvensnettverkene til hver komponent som kraftsystemet er bygd opp av kobles sammen til tre individuelle sekvensnettverk. Disse er i utgangspunktet tre separate nettverk som ikke er koblet sammen. Dersom det skulle oppstå jordfeil på en fase, vil sekvensnettverkene bli koblet sammen og denne sammenkoblingen vil skje i feilstedet.

Inntakstransformator og frekvensomformer

Høyspenningsnettet på platformen forsyner systemets inntakstransformator og frekvensomformer, som beskrevet i kapittel 2.2. Stjerne-trekant-konfigurasjonen på transformatoren gjør at denne er isolert fra jord. Det antas videre at frekvensomformerens bidrag til kortslutningsstrømmer primært er avhengig av hvordan den er kontrollert. Frekvensomformerens bruk av OneSubsea avgir en balansert konstant trefase vekselspenning i forhold til ønsket frekvens og har en beskyttelsesmekanisme mot overstrøm per fase. Frekvensomformerens har et flytende nøytralt punkt i likestrømsleddet i kraftcellene. Fabrikanten oppgir i dokumentasjonen at frekvensomformerens jording er omtrent $3M\Omega$ og eventuelle nullsekvensstrømmer er derfor neglisjerbare. Så lenge jordfeilen ikke fører til at overstrømsbeskyttelsen aktiveres modelleres derfor frekvensomformerens som en spenningskilde og liten impedans i positiv-sekvensen og kun impedansen i negativ-sekvensen. [10]. Frekvensomformerens dokumentasjon oppgir ikke interne impedanser, men det vil være konservativt å neglisjere disse fra både pluss- og minus-sekvensene. For fremtidig kompatibilitet er nettverkene modellert med en impedans på 0.001Ω .



Figur 4.5: Ekvivalentkrets for frekvensomformer

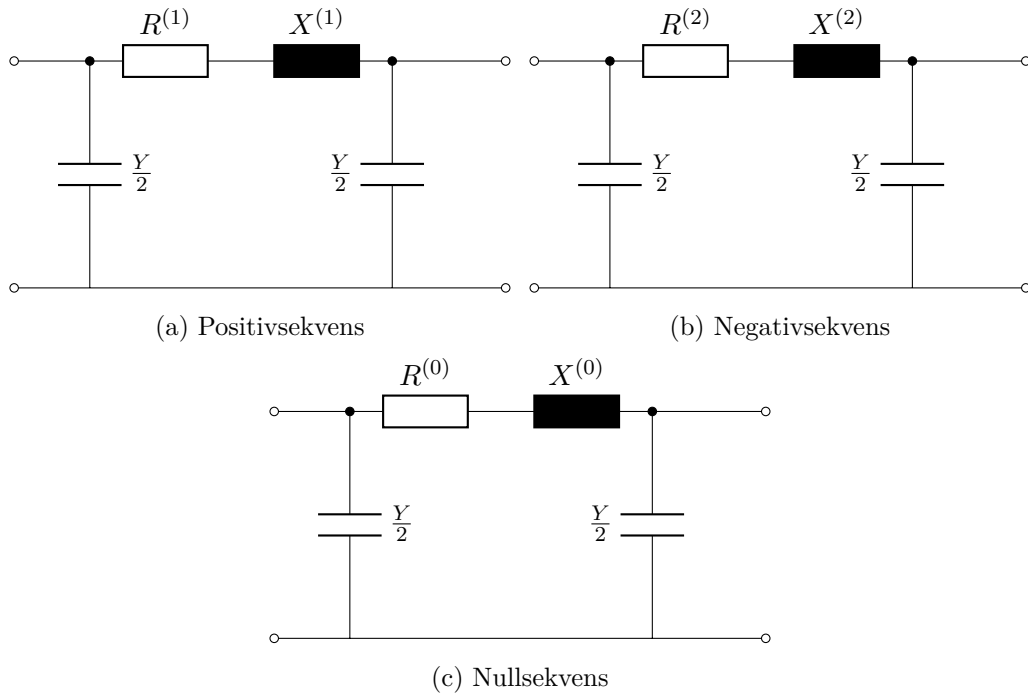
Filter

Ved enkelte installasjoner plasseres det et lavpass-filter ved utgangen av frekvensomformerens for å redusere overharmoniske spenninger. Filteret består av en serieinduktans per fase og tre kondensatorer stjernekoblet mellom fasene. Filterets induktans- og kapasitansverdier tilpasset til hvert enkelt prosjekt. Etersom kondensatorene er isolert fra jord vil disse representere en åpen krets i nullsekvensen. Den åpne nullsekvensen og symmetriske utformingen av filteret gjør at det blir neglisjerbart og utenfor denne oppgavens omfang. Filteret er derfor ikke modellert i kortslutningsmodellene.

Kabel

Kabelen kan modelleres som tre individuelt skjermede enlederkabler lagt i en trekantforlegning, med metallskjermene sammenkoblet og jordet i begge ender av kablene. Dette fører til at den kapasitive impedansen mellom kablene er minimal og at det kun er ka-

pasistansen mellom skjerm og leder som kan lede strøm i nullsekvensen. Pluss-, minus- og nullsekvensekvivalentene modelleres som en vanlig kabel, men serieimpedansen i nullsekvensen er normalt ulik pluss- og minusimpedansene. De kapasitive reaktansene er like for alle tre systemene [10].



Figur 4.6: Ekvivalentkrets for kabel

Motor

Ekvivalentmodellen for det positive sekvenssystemet kan for en asynkronmotor modelleres som beskrevet i kapittel 3.3.1, med motorimpedansparametere oppgitt av fabrikanten. Minussekvensen kan videre modelleres lik som positivsekvensen [21], men for minussekvensen er sakking annerledes fordi magnetfeltet og rotoren roterer i motsatt retning [10]. Mer korrekt, fasesekvensene er motsatt av hverandre. Ved å omskrive formel 3.31 i formel 4.13 og deretter bruke insetningsmetoden i formel 4.14b kan vi sammenlikne positiv og negativ sakking. Formel 4.14c viser dermed at sakking (s) i den positive sekvensen kan erstattes med $(2 - s)$ i den negative sekvenskvivalenten.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (4.13a)$$

$$s = 1 - \frac{n}{n_s} \quad (4.13b)$$

$$\frac{n}{n_s} = 1 - s \quad (4.13c)$$

$$s_{minus} = \frac{n_s - (-n)}{n_s} \quad (4.14a)$$

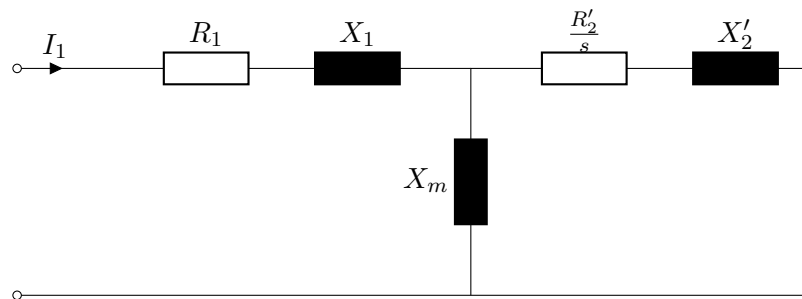
$$s_{minus} = 1 + \frac{n}{n_s} \quad (4.14b)$$

$$s_{minus} = 1 + (1 - s) = 2 - s \quad (4.14c)$$

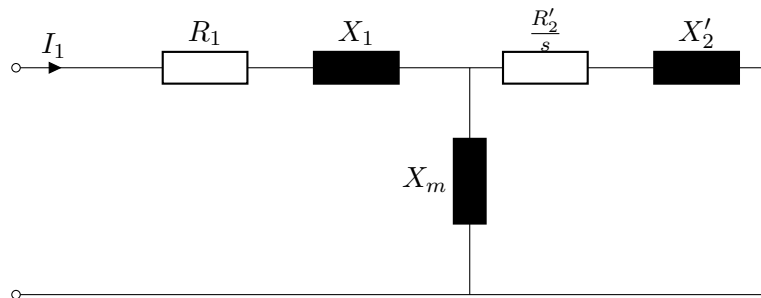
Der:

- s = Sakking i plussekvens
- s_{minus} = Sakking i negativsekvens
- n_s = Magnetfeltes hastighet, synkronrotasjon
- n = motorhastighet

Asynkronmotoren er ikke jordet i nøytralt punktet og nullsekvensen modelleres derfor som en åpen krets.



(a) Plussekvens



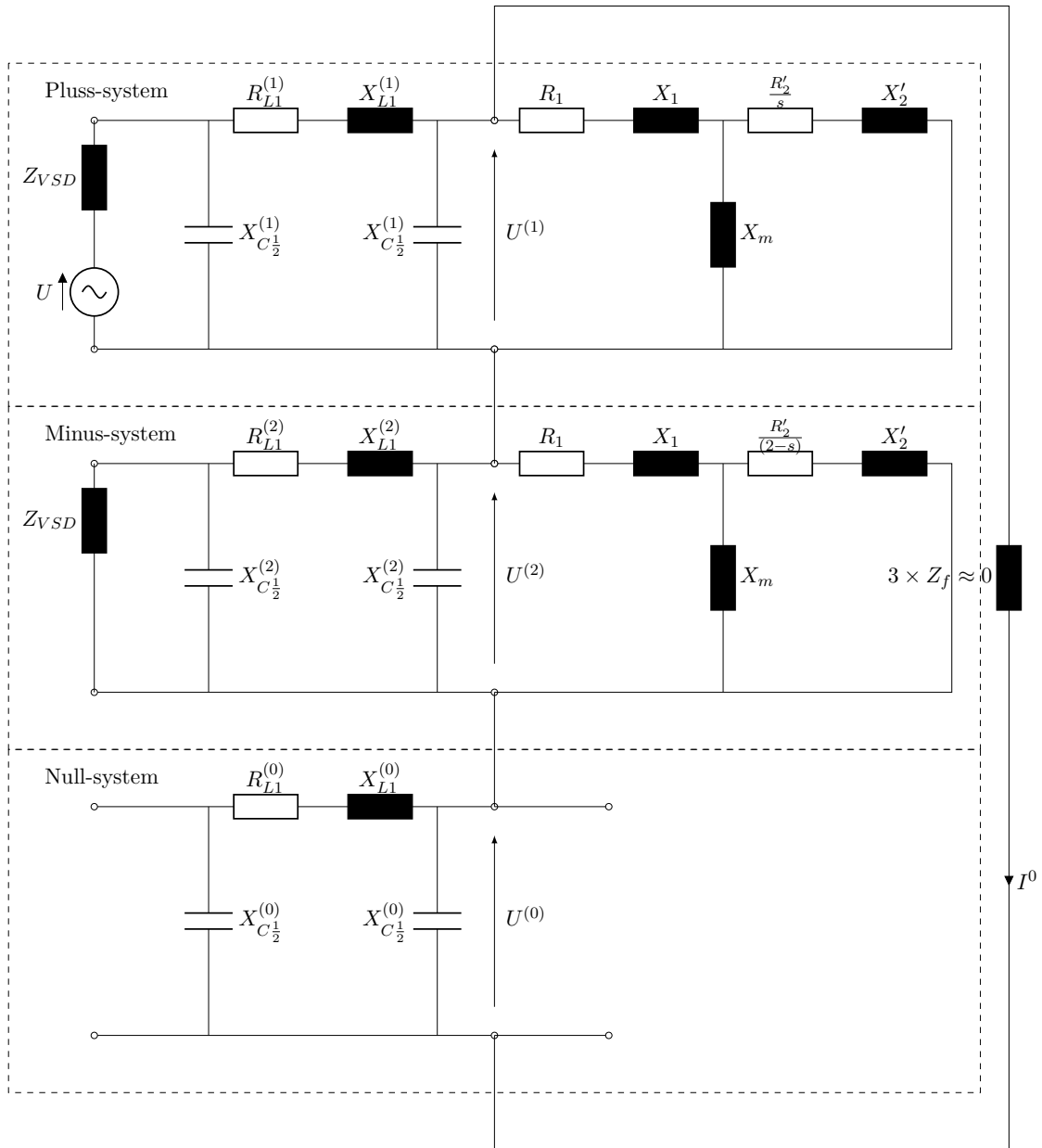
(b) Minussekvens

Figur 4.7: Ekvivalentkrets for asynkronmotor

Fullstendig sekvensnettverk

I foregående avsnitt ble enfaseekvivalentene av frekvensomformerer, kabelen og motoren presentert. Det ble vist at de kan brytes ned til positiv-, negativ- og nullsekvenskvivalenter. For statiske komponenter som kabler er pluss- og minusekvivalentene identiske, mens impedansverdiene i nullsekvensen ikke nødvendigvis er lik. For de dynamiske komponentene asynkronmotor og frekvensomformer er ekvivalentene forskjellige i alle tre systemene. [22] Komponentekvivalentene kan videre settes sammen til å danne de tre separate sekvensnettverkene og generelt sett vil sekvensnettverksimpedansene $Z^{(1)}$, $Z^{(2)}$ og $Z^{(0)}$ ha ulike verdier. Ved jordfeil kobles nettverkene sammen i feilpunktet. I figur 4.8 er dette vist

med en frekvensomformer, kabel og asynkronmotor. Jordfeilen er i enden av kabelen og nettverkene er koblet sammen i feilstedet. Z_f er hverken en del av positiv-, negativ- eller nullsystemet, men er med i figur 4.8 for å representere feilstedimpedansen.



Figur 4.8: Fullstendig sekvensnettverk

4.3 Matematisk modellering

4.3.1 Introduksjon til feilanalyse ved bruk av matriser

Når de fullstendige sekvensnettverkene for alle sekvensene er bygd opp identifiseres og nummereres alle knutepunktene i nettverket som kobler sammen to eller flere grener, heretter kalt noder. Nodene blir videre brukt til å sette opp en admittansmatrise for

systemet.

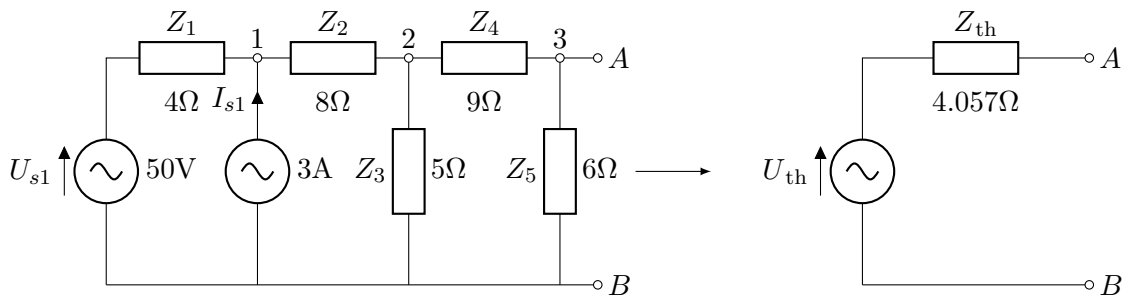
$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} \\ y_{41} & y_{42} & y_{43} & y_{44} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Figur 4.15 viser en generell 4x4 admittansmatrise. Elementene i matrisen deles inn i diagonale og ikke-diagonale element. De diagonale elementene er summen av admittanser koblet til den representative noden og de ikke-diagonale elementene er den negative verdien til admittansen som befinner seg mellom de to respektive nodene. For eksempel vil elementet i posisjon y_{12} være den negative verdien av admittansen mellom node 1 og 2. Impedansmatrisen kan finnes ved å invertere admittansmatrisen.

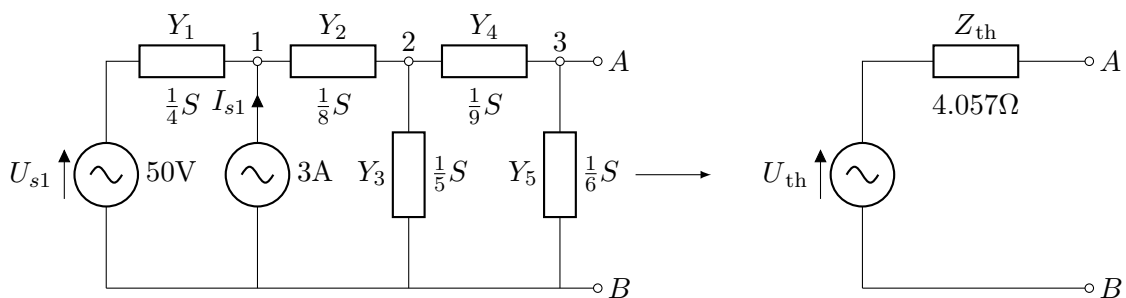
$$Z = Y^{-1} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} & z_{14} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} & z_{24} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} & z_{34} \\ z_{41} & z_{42} & z_{43} & z_{44} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

De diagonale elementene i impedansmatrisen tilsvarer *theveninimpedansen* av systemet sett fra de respektive nodene. Eksempelvis er impedansen i posisjon Z_{33} tilsvarende *theveninimpedansen* til systemet sett fra node 3.

Eksempel



For å løse talleksempelen ved hjelp av matriser er første steg å bygge admittansmatrisen. Impedansene i systemet inverteres for å finne admittansene og resulterer i følgende krets:



For å finne første element i matrisen y_{11} , summeres alle admittansene tilknyttet node 1. Dette gir $\frac{1}{4}S + \frac{1}{8}S = \frac{3}{8}S$. Samme prosedyre følges for alle de diagonale elementene, henholdsvis y_{22} og y_{33} . Admittansverdien til de ikke-diagonale elementene er den negative summen av admittanser som befinner seg mellom de to respektive nodene. Eksempelvis verdien i posisjon y_{12} vil da være $-\frac{1}{8}S$.

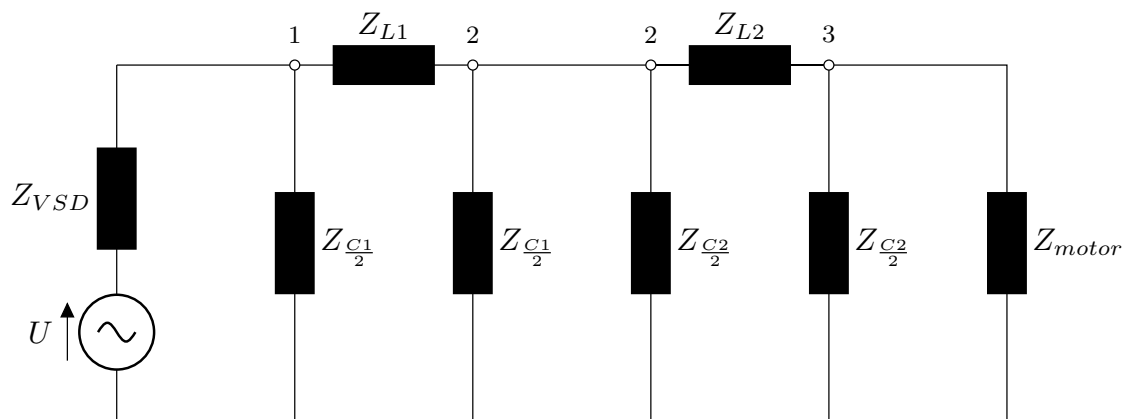
$$Y = \begin{bmatrix} \frac{3}{8} & -\frac{1}{8} & 0 \\ -\frac{1}{8} & \frac{157}{360} & -\frac{1}{9} \\ 0 & -\frac{1}{9} & \frac{5}{18} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$Z = Y^{-1} = \begin{bmatrix} 2.9841 & 0.9524 & 0.3810 \\ 0.9524 & 2.8571 & 1.1429 \\ 0.3810 & 1.1429 & 4.0571 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Systemet sett fra terminalene A og B, som tilsvarer å se systemet fra node 3, viser at det diagonale elementet Z_{33} i matrisen er den ekvivalente theveninimpedansen. Detaljert matematisk redegjørelse er gitt av [22].

4.3.2 Feilanalyse av kraftsystemet

For å kunne utføre beregninger ved feil på kabelen er admittansmatrisen for kraftsystemet implementert med to pi-ledd. Ekvivalentmodellen for det positive systemet er vist i figur 4.9. Feilanalysen i denne seksjonen beregner feilstrømmer og spenninger ved jordfeil i node 3.



Figur 4.9: Positivt sekvenssystem med to pi-ledd

Admittansmatrisen for pluss-, minus og nullsystemet

Det skal ikke utføres noen målinger i asynkronmotoren. Asynkronmotorekvivalenten har derfor blitt forenklet til en enkelt impedansverdi, Z_{motor} som funksjon av s (saking).

$$Z_{motor}^{(1)} = R_1 + X_1 + \frac{1}{\frac{1}{X_M} + \frac{1}{\frac{R_2}{s} + X_2}} \quad (4.19a)$$

Av figur 4.8, men med to pi-ledd som i figur 4.9 kan admittansmatrisene settes opp

$$Y^{(1)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_{VSD}} + \frac{1}{Z_{C_1}} + \frac{1}{Z_{L1}} & -\frac{1}{Z_{L1}} & 0 \\ -\frac{1}{Z_{L1}} & \frac{1}{Z_{L1}} + \frac{1}{Z_{C_1}} + \frac{1}{Z_{C_2}} + \frac{1}{Z_{L2}} & -\frac{1}{Z_{L2}} \\ 0 & -\frac{1}{Z_{L2}} & \frac{1}{Z_{L2}} + \frac{1}{Z_{C_2}} + \frac{1}{Z_{motor}} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

$$Y^{(2)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_{VSD}} + \frac{1}{Z_{C_1}} + \frac{1}{Z_{L1}} & -\frac{1}{Z_{L1}} & 0 \\ -\frac{1}{Z_{L1}} & \frac{1}{Z_{L1}} + \frac{1}{Z_{C_1}} + \frac{1}{Z_{C_2}} + \frac{1}{Z_{L2}} & -\frac{1}{Z_{L2}} \\ 0 & -\frac{1}{Z_{L2}} & \frac{1}{Z_{L2}} + \frac{1}{Z_{C_2}} + \frac{1}{Z_{motor}} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$Y^{(0)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_{C_1}} + \frac{1}{Z_{L1}} & -\frac{1}{Z_{L1}} & 0 \\ -\frac{1}{Z_{L1}} & \frac{1}{Z_{L1}} + \frac{1}{Z_{C_1}} + \frac{1}{Z_{C_2}} + \frac{1}{Z_{L2}} & -\frac{1}{Z_{L2}} \\ 0 & -\frac{1}{Z_{L2}} & \frac{1}{Z_{L2}} + \frac{1}{Z_{C_2}} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Matrisen inverteres

$$Z_{3 \times 3}^{(1)} = Y^{(1)-1} \quad Z_{3 \times 3}^{(2)} = Y^{(2)-1} \quad Z_{3 \times 3}^{(0)} = Y^{(0)-1} \quad (4.23)$$

Dersom det oppstår en direkte kortslutning mellom fase a og jord med overgangsmotstand $Z_f = \infty$, har vi følgende situasjon i feilstedet:

$$I_{fa} = X \quad I_{fb} = 0 \quad I_{fc} = 0 \quad (4.24)$$

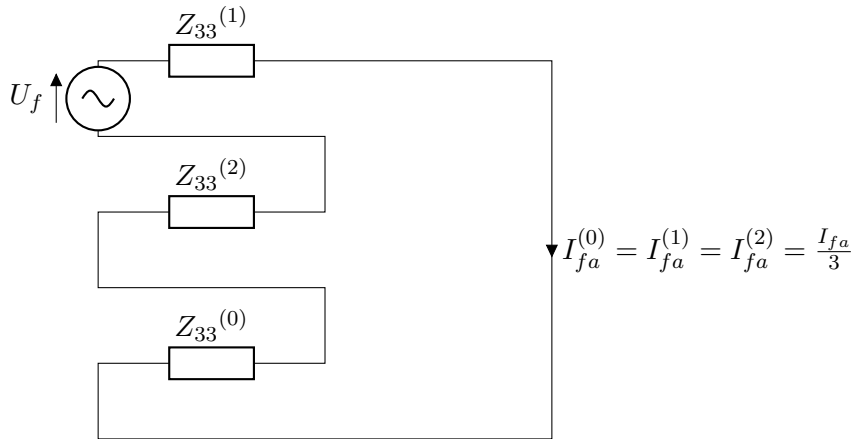
I henhold til tidligere gjennomgått teori gir dette følgende sammenheng:

$$\begin{bmatrix} I_{fa}^{(0)} \\ I_{fa}^{(1)} \\ I_{fa}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{fa} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

Av matrisene 4.25 kan strømmene i sekvensnettverkene finnes

$$I_{fa}^{(0)} = I_{fa}^{(1)} = I_{fa}^{(2)} = \frac{I_{fa}}{3} \quad (4.26)$$

Theveninekvivalentene for sekvensnettverkene lages ved å bruke impedansene i posisjon Z_{33} fra impedansmatrisene.



Figur 4.10: Sammenkobling av theveninekvivalentene for sekvensnettverkene

Siden de sekvensielle bidragene til den totale feilstrømmen er lik i alle sekvenser kan total feilstrøm i fasen med jordfeil uttrykkes på følgende måte:

$$I_{fa} = 3 \times I_{fa}^{(0)} = 3 \times \frac{U_f}{Z_{33}^{(1)} + Z_{33}^{(2)} + Z_{33}^{(0)}} \quad (4.27)$$

Sekvenskomponentene til fasen med jordfeil er

$$U_{3a}^{(0)} = -Z_{33}^{(0)} \times I_{fa}^{(0)} \quad (4.28)$$

$$U_{3a}^{(1)} = U_{fa} - Z_{33}^{(1)} \times I_{fa}^{(1)} \quad (4.29)$$

$$U_{3a}^{(2)} = -Z_{33}^{(2)} \times I_{fa}^{(2)} \quad (4.30)$$

Symmetrien i symmetriske komponenter gjør at fasespenningene for fasene uten feil kan beregnes

$$\begin{bmatrix} U_{3a} \\ U_{3b} \\ U_{3c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{3a}^{(0)} \\ U_{3a}^{(1)} \\ U_{3a}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

4.4 Implementering i Matlab

Matlab er et matematikkprogramm som ble utviklet på slutten av 1970-tallet [23]. Matlab brukes blant annet til numerisk beregning, analyse og visualisering av data. Matlab har sitt eget scriptspråk som er baser på C [24]. Programmet har et grafisk brukergrensesnitt (GUI) for å lage og manipulere figurer og diagrammer. Programmet kan også integreres med andre programmeringsspråk og eksterne verktøy.

4.4.1 Introduksjon til matlab-skript

Beregningmetoden symmetriske komponenter er implementert i et matlab-skript ved å bruke admittans- og impedansmatrisene. Skriptet fasejordsym.m er satt opp i henhold til figur 4.9 med en ideell kilde, to pi-ledd og motor som last. Skriptet trenger følgende inngangsverdier: tilført spenning, frekvens, lengde på kabel, motorparametre og linjeparаметre for både positiv og nullsystemet.

Først beregnes motorekvivalent for pluss og minussystemet i henhold til 4.19a. Deretter beregnes matriseelementene for alle sekvenser som videre settes opp i admittansmatriser. Skriptet beregner spenning i alle nodene før systemet er påvirket av jordfeil. Dette gjennomføres ved hjelp av nodeadmittans-metoden som er utledet i [22]. I denne metoden løses et sett med lineære likninger ved bruk av den innebygde matlab-funksjonen *linsolv* [25]. Som beskrevet i avsnitt 4.3.1 identifiserer skriptet impedansmatrisen ved å invertere admittansmatrisen. Når jordfeil inntreffer hentes theveninimpedansen sett fra feilstedet ut av impedansmatrisen og settes inn i formel 4.27 sammen med spenningen i feilstedet før feilen inntraff. De ikke-diagonale elementene brukes sammen med feilstrømmen til å identifisere spenninger i nodene som ikke er direkte påvirket av jordfeil. Fremgangsmåten er detaljert utledet i [22]. Skriptet beregner RMS-verdier med vinkler for feilstrøm og fasespenninger i alle nodene som vist på figur 4.9 når jordfeil oppstår i node 3. Skriptet lager en grafisk fremstilling av fase- og linjespenninger i feilstedet ved hjelp av matlabfunksjonen *compass* [26].

4.4.2 Resultater av modellen

Inngangsverdier fra tabell 4.11 gir følgende resultater.

	5 km	10 km	20 km	30 km
35 Hz	6.561∠89.565° A	12.833∠89.075° A	24.692∠87.944° A	34.390∠81.013° A
50 Hz	9.340∠89.160° A	18.227∠88.238° A	35.030∠86.156° A	50.152∠80.291° A
65 Hz	12.101∠88.771° A	23.567∠87.434° A	45.268∠84.418° A	66.573∠79.535° A
77 Hz	14.296∠88.468° A	27.802∠86.803° A	53.406∠83.037° A	80.208∠78.906° A

Tabell 4.1: Feilstrøm ved varierende frekvens og kabellengde

	5 km		
	U_a	U_b	U_c
35 Hz	0 V	9753.687∠−150.421° V	9755.994∠149.594° V
50 Hz	0 V	9715.419∠−150.814° V	9718.612∠149.216° V
65 Hz	0 V	9678.908∠−151.191° V	9682.953∠148.857° V
77 Hz	0 V	9649.963∠−151.485° V	9654.688∠148.580° V

Tabell 4.2: Fasespenning i feilstedet ved kabellengde 5 km

5 km			
	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}
35 Hz	9753.687∠29.579°V	9752.626∠−90.401°V	9755.994∠149.594°V
50 Hz	9715.419∠29.186°V	9712.694∠−90.783°V	9718.612∠149.216°V
65 Hz	9678.908∠28.809°V	9673.942∠−91.146°V	9682.953∠148.857°V
77 Hz	9649.963∠28.515°V	9642.831∠−91.428°V	9654.688∠148.580°V

Tabell 4.3: Linjespenning i feilstedet ved kabellengde 5 km

10 km			
	U_a	U_b	U_c
35 Hz	0 V	9522.922∠−150.870°V	9530.841∠149.189°V
50 Hz	0 V	9453.934∠−151.657°V	9464.438∠148.454°V
65 Hz	0 V	9389.713∠−152.412°V	9402.559∠147.763°V
77 Hz	0 V	9339.823∠−153.001°V	9354.462∠147.234°V

Tabell 4.4: Fasespenning i feilstedet ved kabellengde 10 km

10 km			
	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}
35 Hz	9522.922∠29.130°V	9518.419∠−90.799°V	9530.841∠149.189°V
50 Hz	9453.934∠28.343°V	9443.328∠−91.546°V	9464.438∠148.454°V
65 Hz	9389.713∠27.588°V	9371.260∠−92.256°V	9402.559∠147.763°V
77 Hz	9339.823∠26.999°V	9314.028∠−92.806°V	9354.462∠147.234°V

Tabell 4.5: Linjespenning i feilstedet ved kabellengde 10 km

20 km			
	U_a	U_b	U_c
35 Hz	0 V	9103.276∠−151.836°V	9127.178∠148.385°V
50 Hz	0 V	8991.546∠−153.411°V	9021.596∠146.983°V
65 Hz	0 V	8892.670∠−154.922°V	8928.133∠145.676°V
77 Hz	0 V	8819.032∠−156.102°V	8858.755∠144.679°V

Tabell 4.6: Fasespenning i feilstedet ved kabellengde 20 km

20 km			
	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}
35 Hz	9103.276∠28.164°V	9084.797∠− 91.595°V	9127.179∠148.385°V
50 Hz	8991.546∠26.589°V	8952.921∠− 93.048°V	9021.596∠146.983°V
65 Hz	8892.669∠25.078°V	8829.761∠− 94.423°V	8928.132∠145.676°V
77 Hz	8819.032∠23.898°V	8734.411∠− 95.485°V	8858.755∠144.679°V

Tabell 4.7: Linjespenning i feilstedet ved kabellengde 20 km

30 km			
	U_a	U_b	U_c
35 Hz	0 V	8733.003∠− 152.881°V	8774.995∠147.582°V
50 Hz	0 V	8597.550∠− 155.251°V	8649.402∠145.543°V
65 Hz	0 V	8483.969∠− 157.537°V	8545.443∠143.640°V
77 Hz	0 V	8403.088∠− 159.340°V	8473.190∠142.175°V

Tabell 4.8: Fasespenning i feilstedet ved kabellengde 30 km

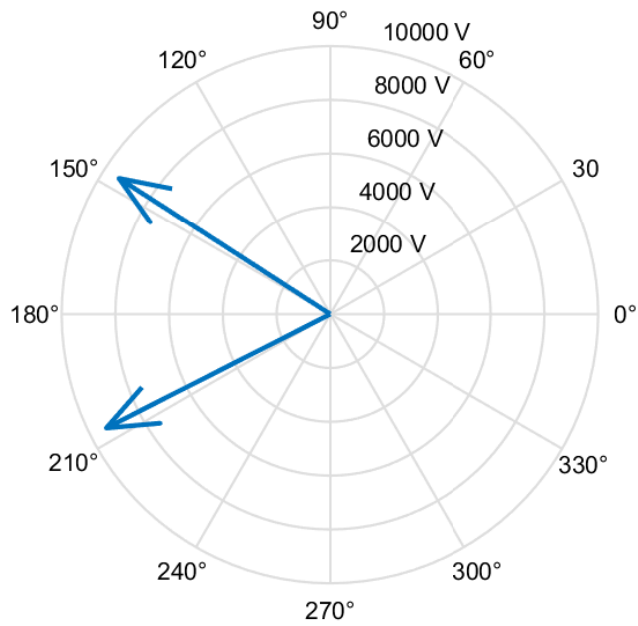
30 km			
	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}
35 Hz	8733.003∠27.119°V	8692.798∠− 92.410°V	8774.995∠147.582°V
50 Hz	8597.550∠24.749°V	8519.848∠− 94.551°V	8649.402∠145.543°V
65 Hz	8483.969∠22.463°V	8362.924∠− 96.582°V	8545.443∠143.640°V
77 Hz	8403.088∠20.660°V	8244.417∠− 98.158°V	8473.190∠142.175°V

Tabell 4.9: Linjespenning i feilstedet ved kabellengde 30 km

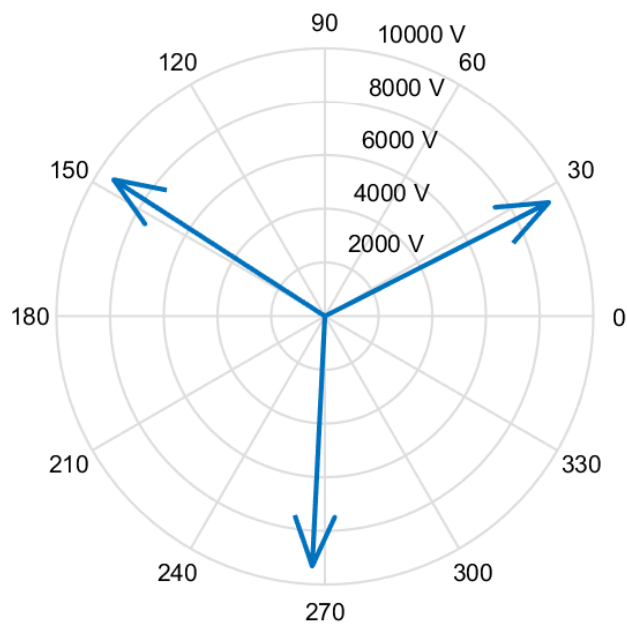
10 km			
	$Z_{33}^{(0)}$	$Z_{33}^{(1)}$	$Z_{33}^{(2)}$
50 Hz	2.23 − j899.39Ω	0.80 + j1.05Ω	1.14 + j0.13Ω
	899.39∠− 89.86°Ω	1.32∠52.48°Ω	1.158∠60.32°Ω

Tabell 4.10: Sekvensimpedanser sett fra feilstedet ved 50Hz og kabellengde 10 km.

Verdiene i tabell 4.10 er hentet ut fra impedansmatrisen som beskrevet i kapittel 4, avsnitt 4.3.1.



Figur 4.11: Fasevektorer i feilstedet ved frekvens 50 Hz og kabellengde 10 km.



Figur 4.12: Linjespenning i feilstedet ved frekvens 50 Hz og kabellengde 10 km.

Følgende inngangsverdier er gitt fra bruker for å beregne resultatene i tabell 4.1, 4.2, 4.3,

4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 og figur 4.11 og 4.12.

Parameter	Beskrivelse	Enhet	Verdi
R_1	Resistans i statorvikling	Ω	0,1721
X_1	Induktiv reaktans i statorvikling	Ω	3,672
R_2	Resistans i rotor	Ω	0,1187
X_2	Induktiv reaktans i rotorvikling	Ω	2,212
X_m	Magnetiseringsreaktans	Ω	83,50
S	Sakketurtall i rotor	%	0,575
U	Nominell spenning	V	10 kV
f	Nominell frekvens	Hz	[35 50 65 77]
l	Kabellengde	m	[5 10 20 30]
Z_{Lp}	Linjeparametre for +/- systemet pr. km	Ω	0.082 + 174.0199e-3j
Z_{L0}	Linjeparametre for 0-systemet pr. km	Ω	0.711 + 1.1611j
C	Kapasitans pr. km	F	0.353e-6

Tabell 4.11: Inngangsverdier

5 Simulering

5.1 Matlab og Simulink

Som en del forprosjektet til oppgaven ble det gjort en studie av hvilket simuleringsverktøy som skulle anvendes. I forbindelse med dette ble det sett nærmere på tre programmer: MATLAB, ATPDraw og PowerFactory.

Systemet er modellert og simulert i Simulink for å analysere spenninger og feilstrøm. Simulink er en Matlab-basert programvare for simulering, modellering og analyse av dynamiske systemer ved hjelp av et grafisk brukergrensesnitt og blokkdiagram.

Ved bestemmelse av simuleringsprogram ble det sett nærmere på tre programmer: MATLAB, ATPDraw og PowerFactory [27].

PowerFactory ble nevnt som et eksempel på simuleringsverktøy i bestillingen fra OneSubsea. Programvaren har innebygde funksjoner for simulering og analysering av forskjellige typer feil som kan oppstå i kraftsystemer [28], og det er derfor et relevant alternativ. *hvl* har ikke lisens til programmet, men gruppen fikk tilsendt en demoversjon for utprøving [27].

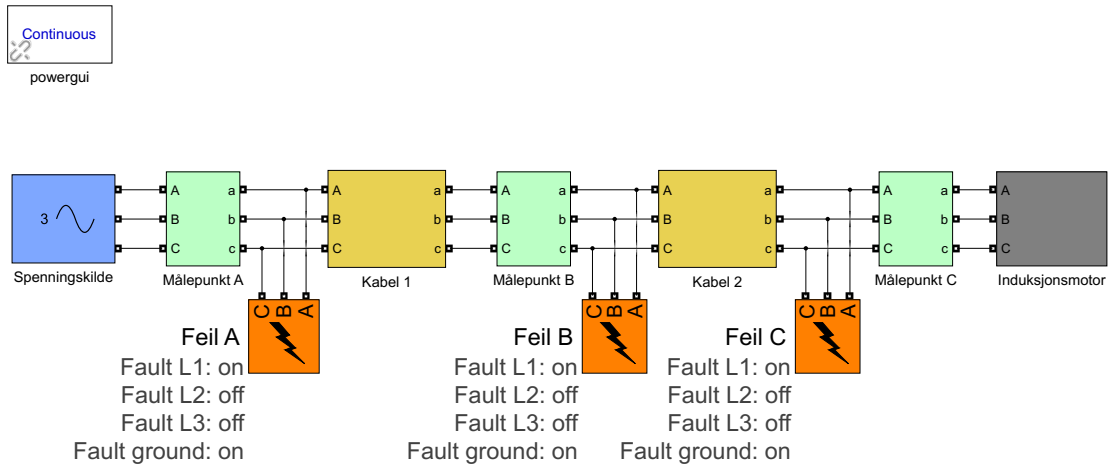
ATP er et universelt program for digital simulering av elektromagnetiske transiente fenomen [29]. ATPDraw er videre et grafisk grensesnitt til denne programvaren. ATPDraw er, i motsetning til MATLAB og PowerFactory, gratis.

Gruppen har ingen erfaring med verken PowerFactory eller ATPDraw fra før måtte derfor satt av tid til å lære programvaren. MATLAB med Simulink kan gjøre avanserte matematiske operasjoner, og sistnevnte program utvider funksjonaliteten med grafisk modellering av dynamiske kraftsystemer. Det ble konkludert med at Matlab med Simulink ville være tilfredsstillende for de forsøkene som skulle gjennomføres, og det ble også lagt mye vekt på at dette var den eneste programvarepakken gruppen hadde praktisk erfaring med. [27].

5.2 Simuleringsmodell

Simuleringsmodellen i `fasejordsim_simulink.slx` simulerer jordfeil i et kraftsystem tilsvarende det denne oppgaven studerer. Det er satt sammen av en trefase spenningskilde, to kabelmodeller og en motormodell i seriekobling. I tillegg er det plassert tre blokker som kan simulere kortslutning mellom spenningsfasene og jord. Sammen med måleblokker for spenning og strøm er disse plassert før, mellom og etter kabelmodellene, som illustrert i figur 5.1. Simuleringen i simulink må startes fra Matlab-skriptet `fasejordsim.m` og pa-

rametre til modellen blir overført fra dette skriptet. Simuleringsresultatene blir lagret i diskrete filer. Detaljert brukermanual finnes i tillegg D.



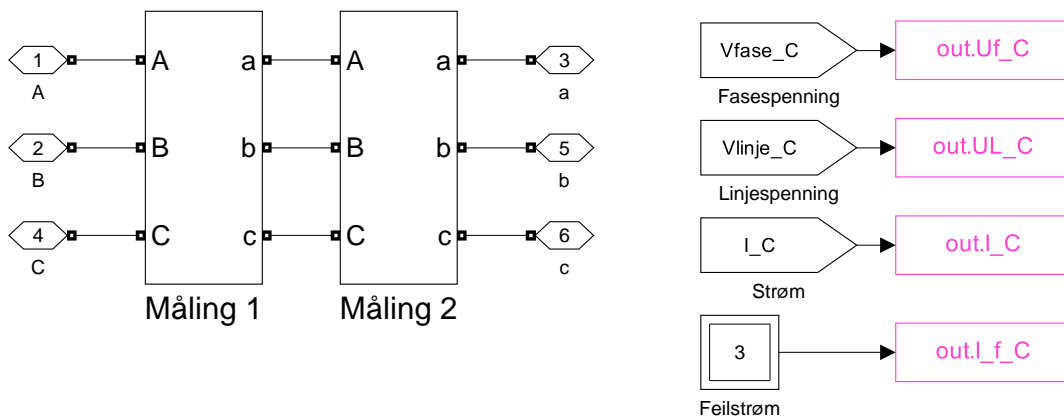
Figur 5.1: Simulinkmodell: fasejordsim_simulink.slx

5.2.1 Kortslutningsblokk

Three-Phase Fault er en blokk fra *Specialized power systems*-biblioteket. Den kontrollerer tre brytere som kan kortslutte hver enkelt fase til jord, enten kontinuerlig eller etter forhåndsdefinerte tider, og måle strømmen fra fase til jord. Det er plassert tre blokker av denne typen, merket *Feil A*, *Feil B* og *Feil C* i figur 5.1.

5.2.2 Måleblokk

Måleblokkene er subsystem bestående av to *Three-Phase V-I Measurement*-blokker fra biblioteket og tre dataloggere som lagrer måledata til Matlab-variabler. Sammenkoblingen er vist i 5.2. *Måling 1* måler fasespenninger og strøm. *Måling 2* måler linjespenninger. I tillegg er det et multimeter sammenkoblet med en datalogger som lagrer dataene fra kortslutningsboks målingene. De tre måleblokkene er merket *Målepunkt A*, *B* og *C* i systemmodellen.



Figur 5.2: Måleblokk

Måledataene som blir lagret er:

- Fasespenning, linjespenning og strøm ved spenningskilden.
- Fasespenning, linjespenning og strøm på et definert punkt på kabelen.
- Fasespenning, linjespenning og strøm ved lasten (motorklemmer).
- Strøm fra fase til jord i boksene *Feil A*, *Feil B* og *Feil C*.
- RMS-verdier av fase- og linjespenning, samt RMS feilstrøm.

5.2.3 Kabelmodell

Det er plassert to kabelmodell-blokkere i serie for å kunne utføre målinger på et predefinert punkt langs kabelen. Simulink har flere forskjellige innebygde linjemodeller som kan brukes til simulering av kraftkabelen. I denne oppgaven har to av dem blitt vurdert: *Distributen Parameters* og *PI-section*.

Three-Phase PI Section Line

PI-section, eller *pi-ledd* på norsk, er en modell som er svært vanlig å bruke på modellering av mellomlange linjer. Den er forklart i kapittel 3.1. Modellen har sitt utgangspunkt i telegrafligningen [30], som deler overføringen opp i uendelig mange små ledd med kabelimpedanser. Pi-leddmodellen estimerer dette med en modell der impedansene er konsentrert til et ledd. *Three-Phase PI Section Line* er en modell som bruker denne metoden til å modellere alle tre spenningsfasene. Denne er tilstrekkelig nøyaktig for kortere og mellomlange kabler ved kraftfrekvenser. For å øke nøyaktigheten til modellen er det mulig å plassere flere pi-ledd i serie. En tilnæringsmåte som kan brukes for å finne hvor mange pi-ledd som er nødvendig [31] for en simulering er:

$$N = 8 \cdot lengde \cdot f_{maks} \cdot \sqrt{(l * c)} \quad (5.1)$$

Der

- N = Antall pi-ledd
- $lengde$ = Kabelens lengde [km]
- f_{maks} = Høyeste frekvens som ska analyseres [Hz]
- l = Kabelinduktans [$\frac{H}{km}$]
- c = Kabelkapasitans [$\frac{F}{km}$]

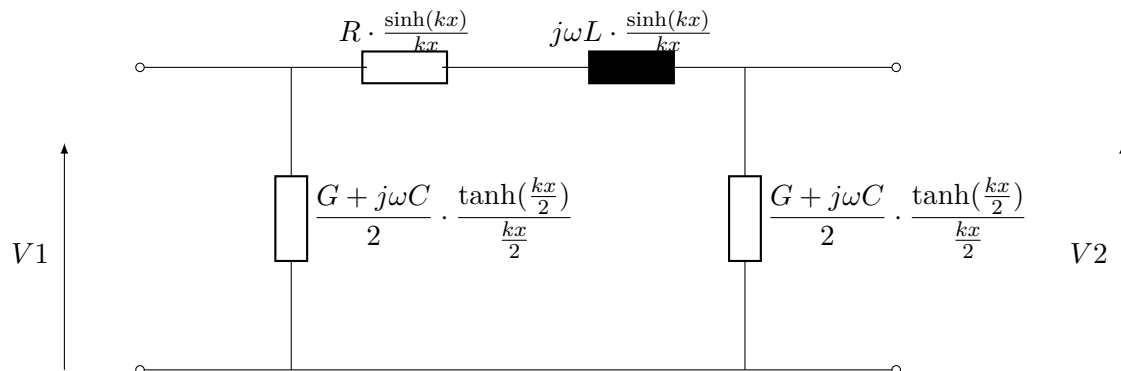
Simulink-blokkens inndata er resistans-, induktans- og kapasitansparametre for pluss- og nullsekvensene. For lengre linjer utfører også modellen en korreksjon ved bruk av hyperbolske funksjoner for å øke simuleringsnøyaktigheten. [31]

$$U(x) = U1 \cdot \cosh(kx) - Z0 \cdot I1 \cdot \sinh(kx) \quad (5.2)$$

$$I(x) = I1 \cdot \cosh(kx) - \frac{U1}{Z0} \cdot \sinh(kx) \quad (5.3)$$

Der $Z0$ er den karakteristiske impedansen gitt ved $Z0 = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}$ [30], $k = \sqrt{(R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C)}$, og G er konduktans.

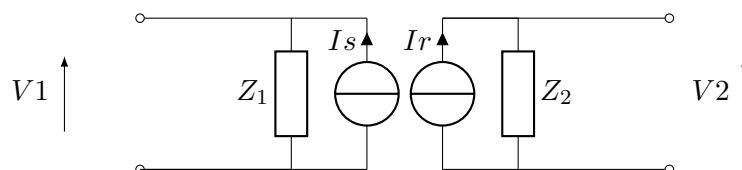
Ligningene uttrykt i en π -ekvivalent krets blir da



Figur 5.3: Pi-ekvivalent med hyperbolske korreksjoner

Distributed parameters

Distributed parameters-modellen er basert på *Bergenons traveling wave method* som brukes av Elektromagnetic transient program (EMTP) [32]. Kabelmodellen tar høyde for at strøm- og spenningsbølgen bruker tid på å nå fram til lasten. Den tar også høyde for at kabelparametrene er jevnt fordelt langs hele overføringen. Bølgefarten i modellen er bestemt ved $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ og tiden bølgen bruker på å nå lasten bestemmes ved $\tau = \frac{d}{v}$, der d er lengden på overføringen, L og C er per unit verdier av induktans og kapasitans.



Figur 5.4: Ekvivalent brukt i Simulink-blokken: *Distributed parameters*

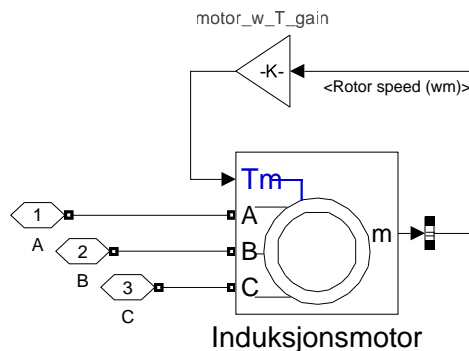
For en tapsfri overføring, kan spenningene i overføringen beskrives som

$$V1(t) - Z_1 \cdot i_s = V2(t - \tau) + Z_2 \cdot i_r(t - \tau) \quad (5.4)$$

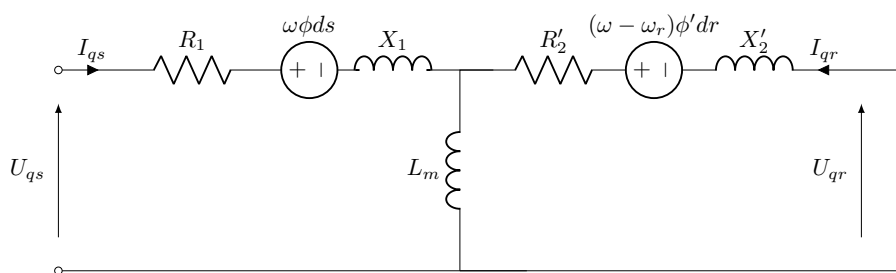
Kabel i simuleringsmodellen

Fordelen med *Distributed parameters*-modellen er at den tar hensyn til reelle bølgefenomener som opptrer ved høye frekvenser og lange avstander [32]. Denne oppgaven fokuserer på kabler under 50km og med frekvenser under 77Hz. Det antas derfor å være tilstrekkelig med *PI-section*-modellen [33]. Av formel 5.1 er det bare nødvendig med ett ledd, men den fullstendige modeller bruker to ledd for å kunne utføre målinger over hele kabellengden.

5.2.4 Motormodell



Figur 5.5: Motorblokk i Simulink



Figur 5.6: Motormodell i Simulink [34]

Motormodellen i simulink er modellert basert på teorien som er presentert i 3.3. I tillegg er den modellert i et dq-system. I dq-systemet blir strømmen dekomponert i en statorstrømkomponent og en feltstrømkomponent som står 90° på hverandre [11]. Detaljer rundt oppbygningen av motorblokken er utenfor rekkevidde til denne oppgaven. Detaljert info finnes i [34]. Motoren er koblet i stjerne med isolert nøytralpunkt. For å få motoren til å trekke rett belastning, er mekanisk turtall-signal ut i fra motoren multiplisert med en

faktor på $\frac{T_m}{\omega m}$ og matet inn på moment-inngangen på motoren, som vist i figur 5.5.

$$Te - Tm = \frac{d\omega m}{dt} \cdot J \quad (5.5)$$

Te = Elektomagnetisk moment

Tm = Mekanisk moment

ω = Vinkelhastighet

J = Tregghetsmoment

5.3 Systemparametre

OneSubsea har supplert parametrene til kabel og motor. Parametrene som er brukt i simuleringen er oppgitt i tabell 5.1 og 5.2.

Parameter	Beskrivelse	Enhet	Verdi ved 77Hz og 30°C
R_L	Resistans i kabel	Ω/km	0,086
X_L	Induktiv reaktans i kabel	Ω/km	0,172
$R^{(0)}$	Nullsekvens resistans	Ω/km	0,935
$X^{(0)}$	Nullsekvens reaktans	Ω/km	0,809
C	Kapasitans	F/m	0,353

Tabell 5.1: Kabelparametre

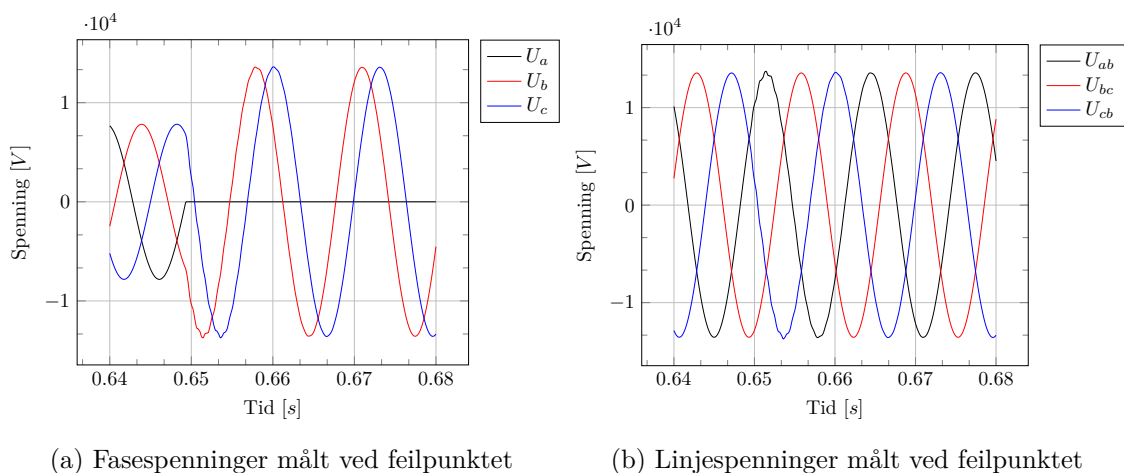
Parameter	Beskrivelse	Enhet	Verdi ved 77Hz 100°C
R_1	Resistans i statorvikling	Ω	0,1721
X_1	Induktiv reaktans i statorvikling	Ω	3,672
R_2	Resistans i rotor	Ω	0,1187
X_2	Induktiv reaktans i rotorvikling	Ω	2,212
X_m	Magnetiseringsreaktans	Ω	83,50
S	Sakketurtall i rotor	%	0,575
PF	Effektfaktor	Pu	0,89
f	Nominell frekvens	Hz	77
U	Nominell spenning	V	10 kV
I	Nominell strøm	A	273
P_2	Nominell effekt	kW	3450
P_v	Viskøse effekttap	kW	593
T_s	Nominelt moment	Nm	7171
J	totalt tregghetsmoment	$Kg \cdot m^2$	9,26
Nm	Nominelt mekanisk turtall	rpm	4593
R_{add}	Jerntap i stator	Ω	1700

Tabell 5.2: Motorparametre

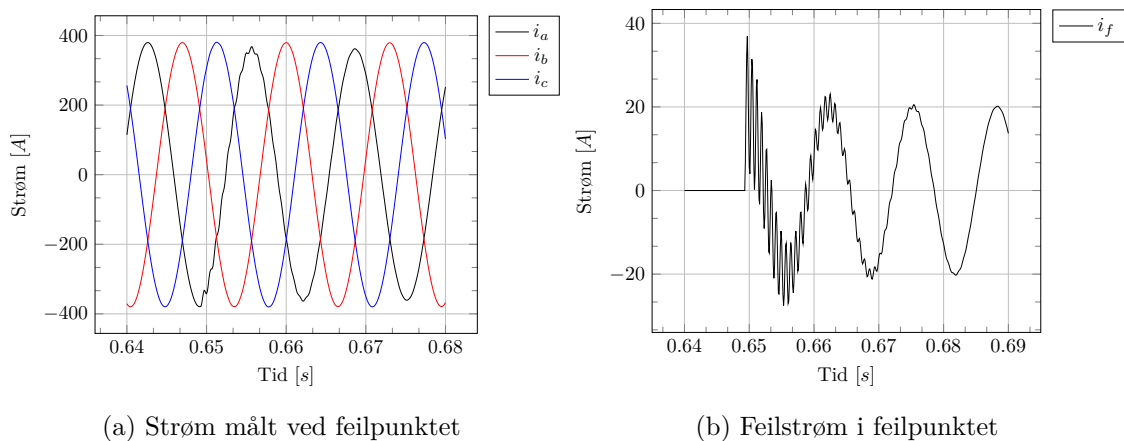
5.4 Simuleringsresultater

Simuleringsmodellen kan konfigureres til å simulere kortslutningstrømmer og systemspenninger ved ulike frekvenser og kabellengder. Et utvalg av simuleringsresultatene er presentert i dette kapitlet. Ved alle simuleringene er utgangsspenningen på spenningskilden $10kV$. Feil C blir koblet inn etter $t = 0.649s$ (50 sykluser ved 77 Hz) og målingene utføres i målepunkt C, som vist i 5.1. Simuleringen stopper etter 100 sykluser. Disse tallene er valgt etter eksperimentelt å ha undersøkt når transiente svingninger er dempet.

5.4.1 Resultat 5km kabel ved 77 Hz

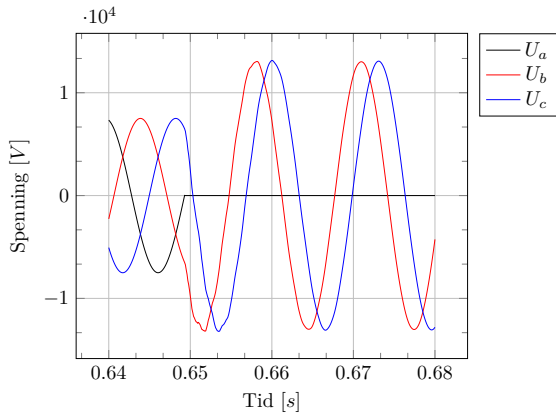


Figur 5.7: Spenningsmålinger, 5km kabel ved 77 Hz

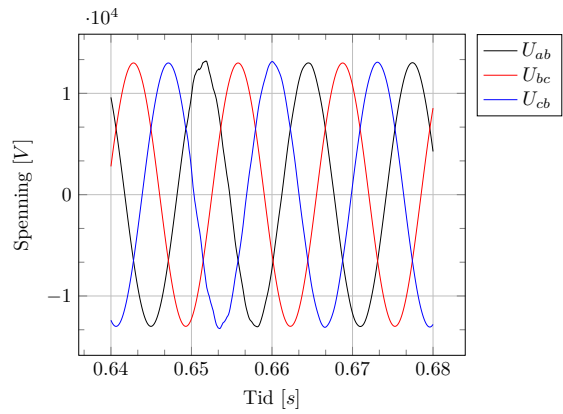


Figur 5.8: Strømmålinger, 5km kabel ved 77 Hz

5.4.2 Resultat 10km kabel ved 77 Hz

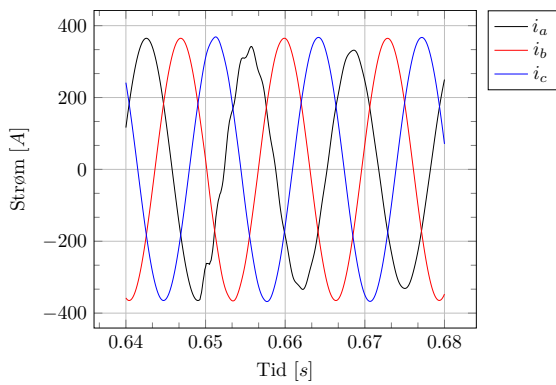


(a) Fasespenninger målt ved feilpunktet

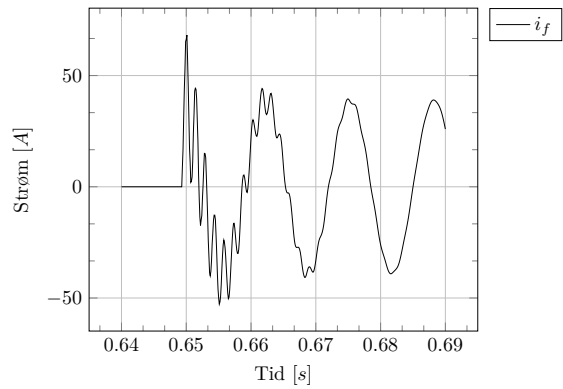


(b) Linjespenninger målt ved feilpunktet

Figur 5.9: Spenningsmålinger, 10km kabel ved 77 Hz



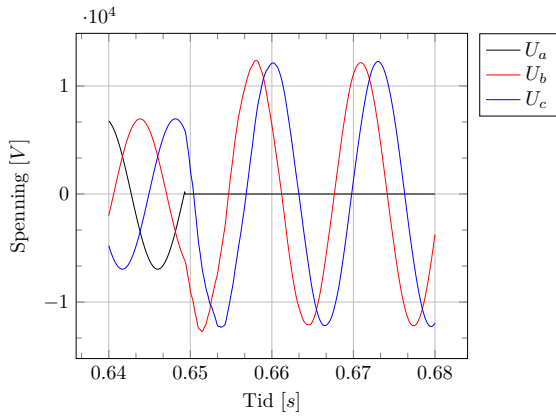
(a) Strøm målt ved feilpunktet



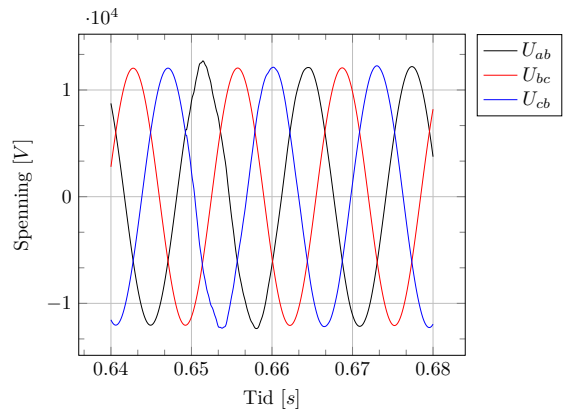
(b) Feilstrøm i feilpunktet

Figur 5.10: Strømmålinger, 10km kabel ved 77 Hz

5.4.3 Resultat 20km kabel ved 77 Hz

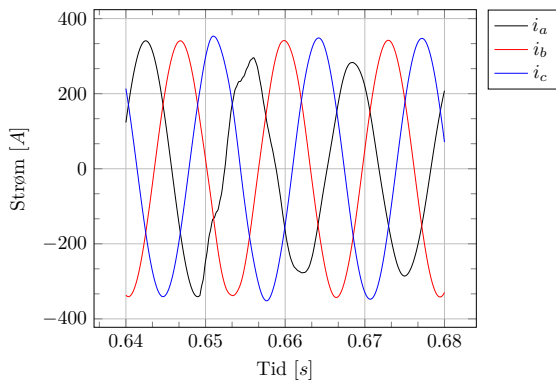


(a) Fasespenninger målt ved feilpunktet

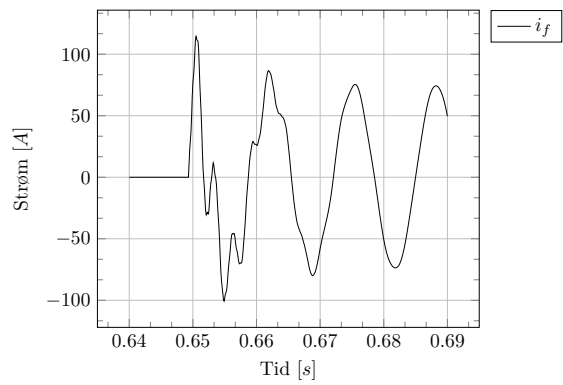


(b) Linjespenninger målt ved feilpunktet

Figur 5.11: Spenningsmålinger, 20km kabel ved 77 Hz



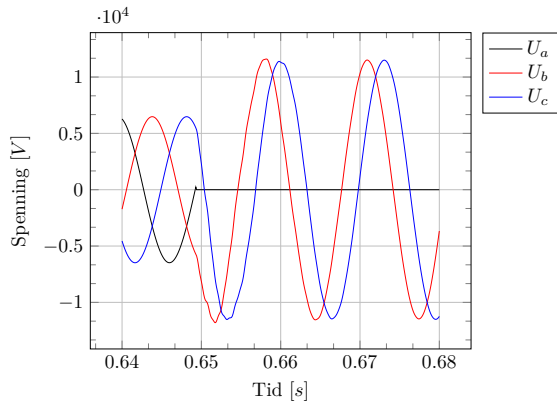
(a) Strøm målt ved feilpunktet



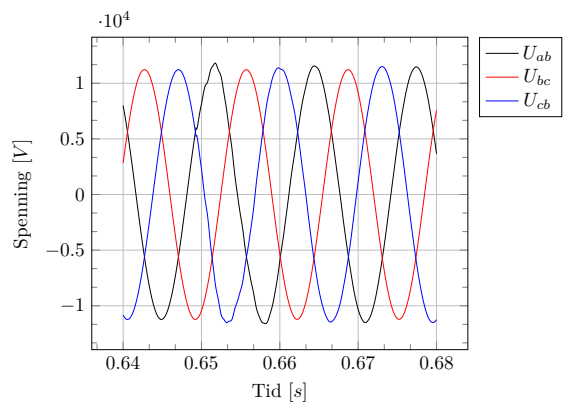
(b) Feilstrøm i feilpunktet

Figur 5.12: Strømmålinger, 20km kabel ved 77 Hz

5.4.4 Resultat 30km kabel ved 77 Hz

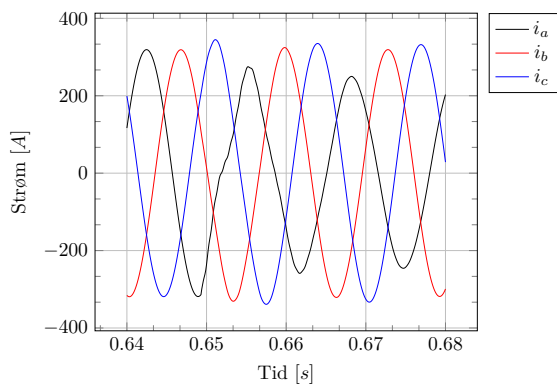


(a) Fasespenninger målt ved feilpunktet

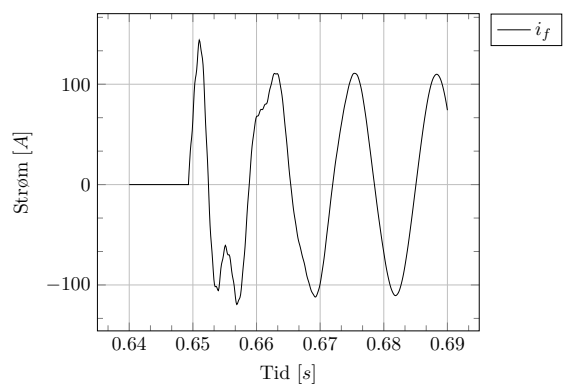


(b) Linjespenninger målt ved feilpunktet

Figur 5.13: Spenningsmålinger, 30km kabel ved 77 Hz



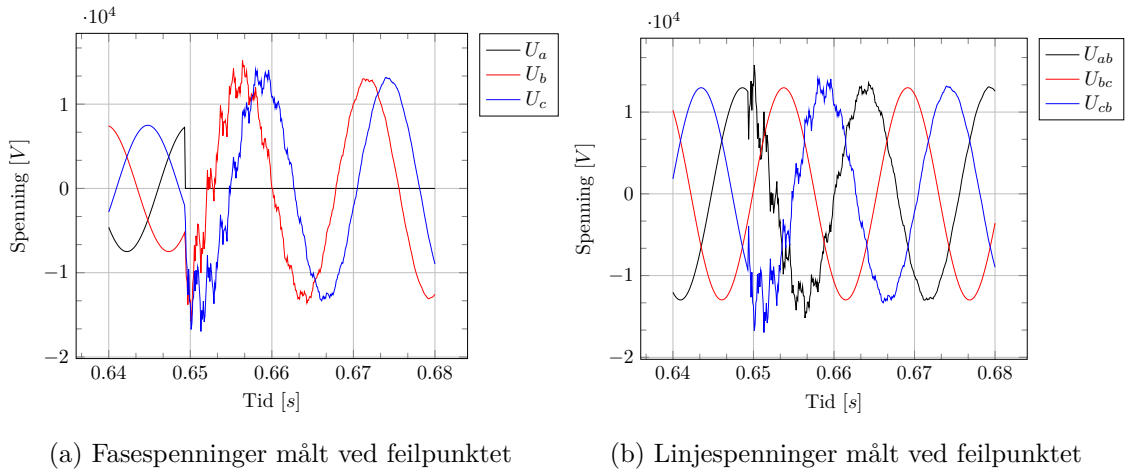
(a) Strøm målt ved feilpunktet



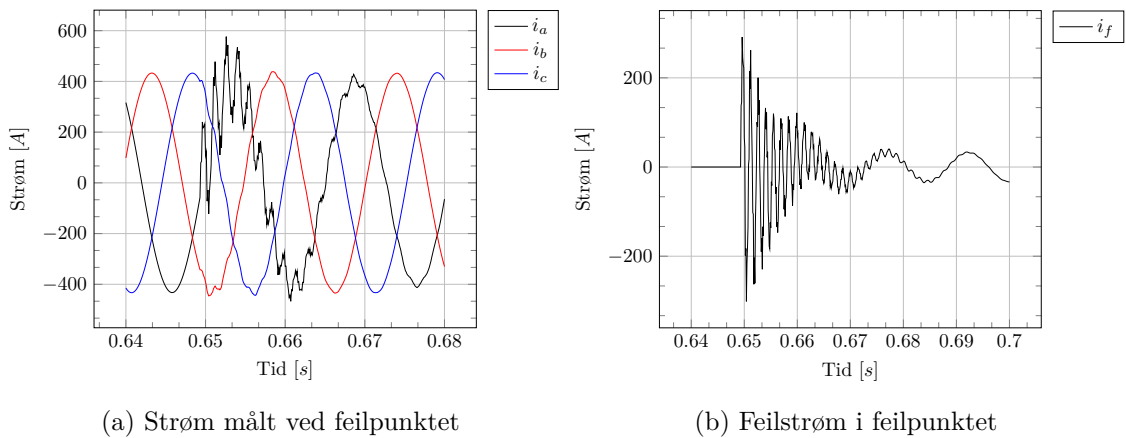
(b) Feilstrøm i feilpunktet

Figur 5.14: Strømmålinger, 30km kabel ved 77 Hz

5.4.5 Resultat 10km kabel ved 65 Hz

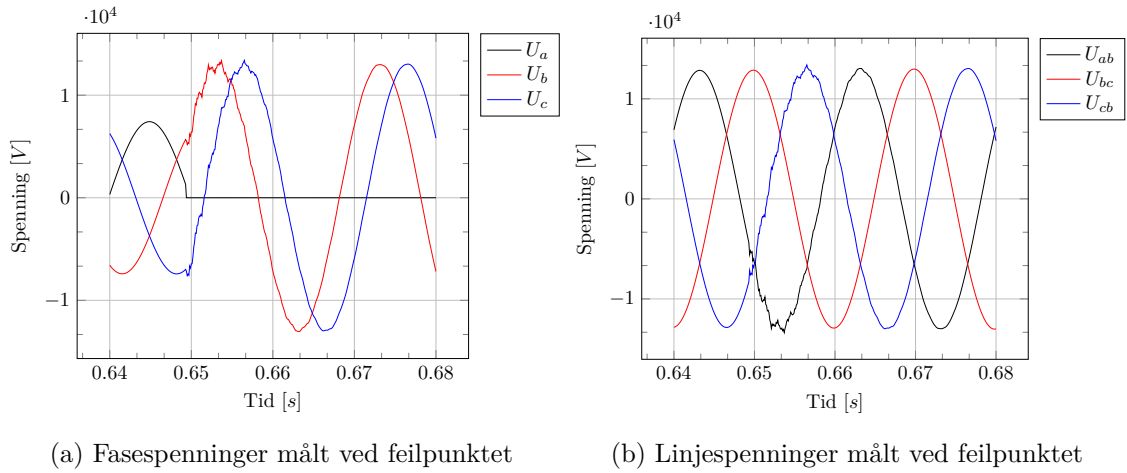


Figur 5.15: Spenningsmålinger, 5km kabel ved 77 Hz

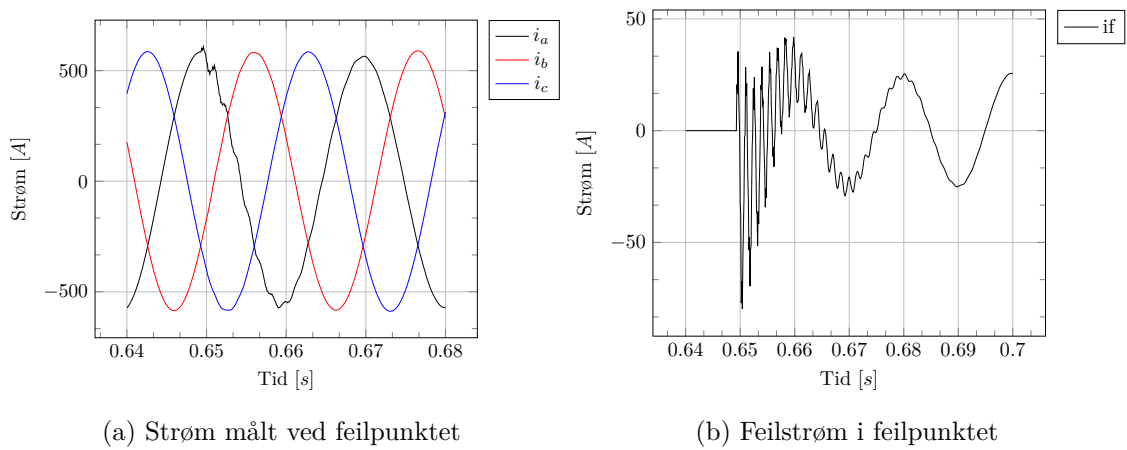


Figur 5.16: Strømmålinger, 10km kabel ved 65 Hz

5.4.6 Resultat 10km kabel ved 50 Hz

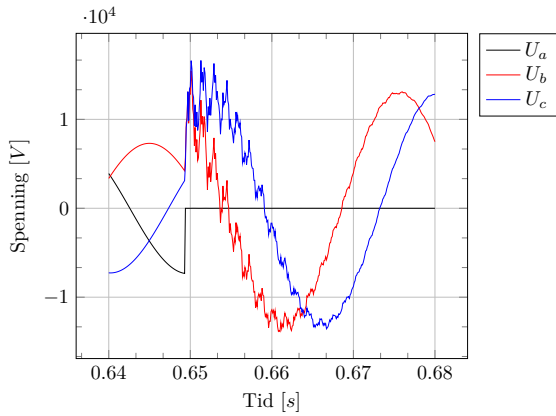


Figur 5.17: Spenningsmålinger, 10km kabel ved 50 Hz

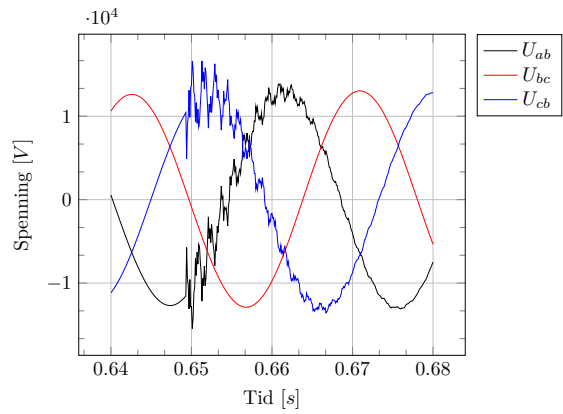


Figur 5.18: Strømmålinger, 10km kabel ved 50 Hz

5.4.7 Resultat 10km kabel ved 35 Hz

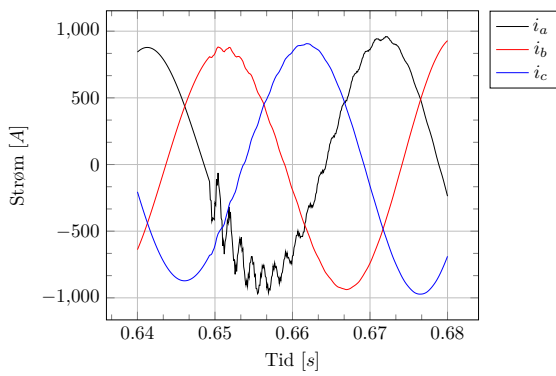


(a) Fasespenninger målt ved feilpunktet

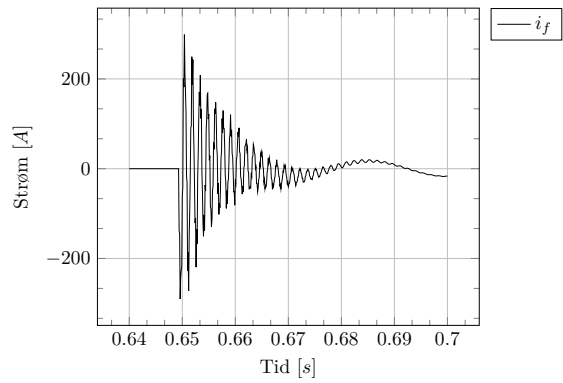


(b) Linjespenninger målt ved feilpunktet

Figur 5.19: Spenningsmålinger, 10km kabel ved 35 Hz



(a) Strøm målt ved feilpunktet

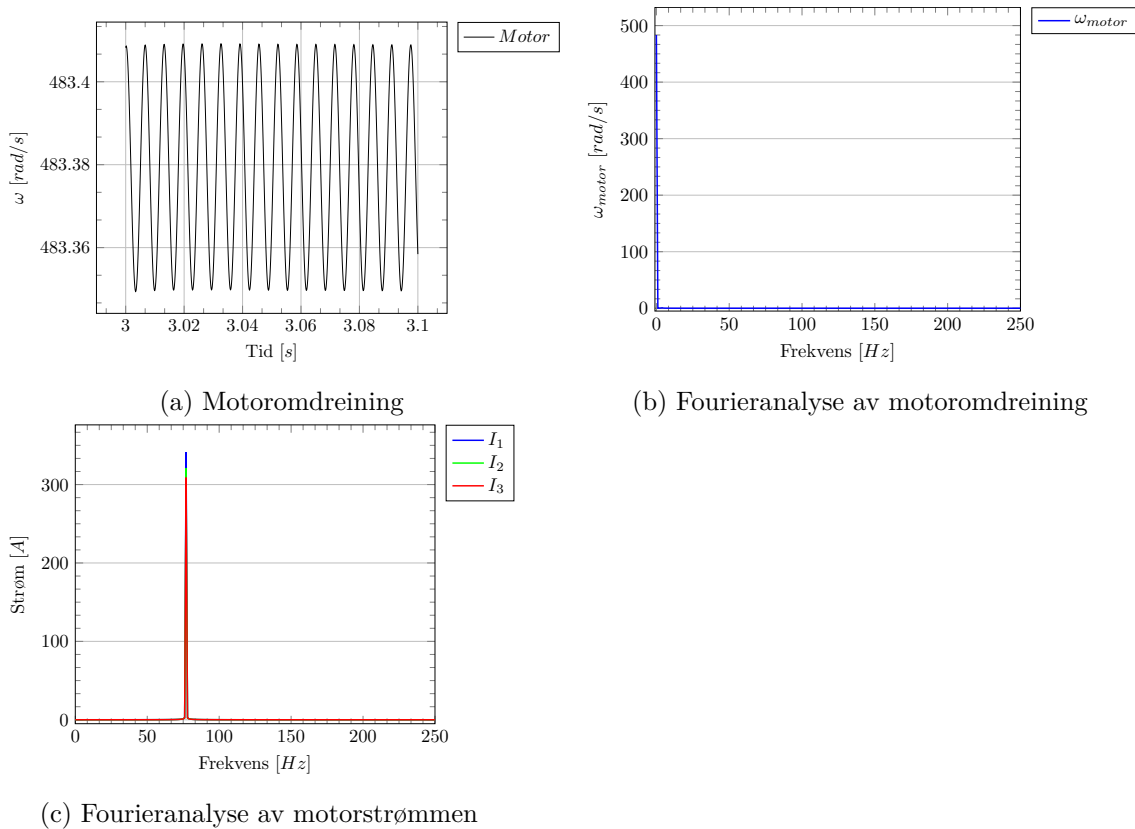


(b) Feilstrøm i feilpunktet

Figur 5.20: Strømmålinger, 10km kabel ved 35 Hz

5.4.8 Fourieranalyse av strøm og motorturtall

For å kunne vurdere asymmetrien i strømmålingene i 5.4.4 ble det foretatt en måling av motorturtallet ved 77 Hz med 30km kabellengde. Det ble videre gjort en fourieranalyse av motorturtall og motorstrømmen ved samme forhold. Fourieranalysen ble gjort med matlab, og skriptet er lagt til som vedlegg E.1. Legg merke til at både x- og y-aksene på figur 5.21a er korte.



Figur 5.21

6 Laboratorieoppgave

6.1 Formål

For å verifisere teoretiske beregninger og datasimuleringene har gruppen utført et eksperiment på elkraftlaboratoriet på Høgskulen på Vestlandet. Eksperimentet skal bekrefte hypotesen om at et trefase kraftsystem isolert fra jord vil opprettholde fasespenningene ved en fase-til-jord kortslutning, og at linjespenningen samtidig vil øke til en verdi noe større enn linjespenningen. Selv ved fase-til-jord kortslutning skal en asynkronmotor kunne driftes. Systemet er forenklet til en trefaselinje med kun kapasitiv rekatans mellom leder og skjerm, samt synkrongenerator og transformator som spenningskilde og asynkronmotor som last.

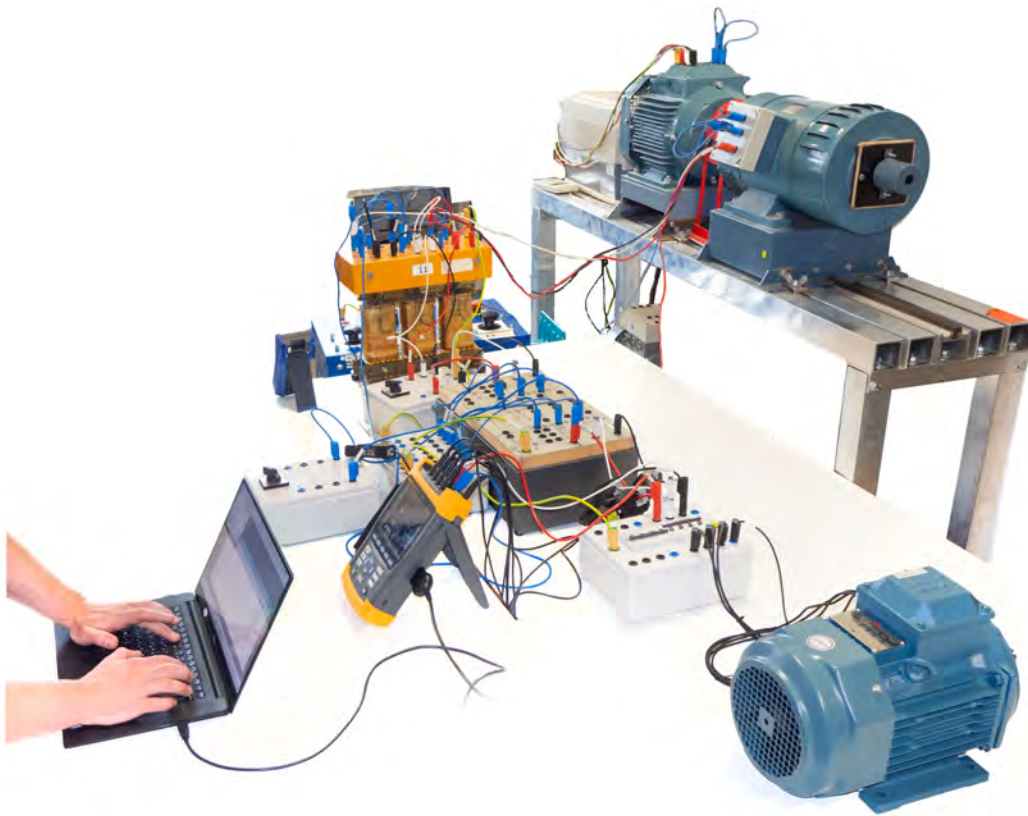
6.2 Sikkerhet

Berøring av strømførende komponenter kan medføre stor fare for mennesker, dyr og utstyr. Gruppens deltakere har fått innføring i HVLs reglement for høyspenningslaboratoriumet, av labingeniør Lars. Kabelmodellen har to tilkoblinger til jord, en for å beskytte mot berøringsspenninger ved en utilsiktet jordfeil og en som skal simulere jord for labtekniske formål. Simulert jord ble koblet til et koblingsbrett via en bryter slik at det enkelt kunne kobles en kontrollert jordfeil inn og ut. Beskyttelsesjord ble koblet mellom potensielt ledende deler og byggets jordsystem. På denne måten kan en jordfeil simuleres uten å løse ut jordfeilvern eller å risikere farlige berøringsspenninger. Både nøytralpunktet til transformatoren og lastmotoren er isolert fra jord.

6.3 Oppsett

Laboratorieoppsettet er satt opp slik at en asynkronmotor i generatordrift fungerer som spenningskilde for en kabelmodell og asynkronmotor som last. Et detaljert koblingskjema for oppkoblingen er lagt ved i vedlegg C. Utstyret som er brukt er listet opp i B. Som diskutert i kapittel 4.2.2 har frekvensomformerer som er brukt i prosjektet en karakteristikk som likner på en synkrongenerator. Frekvensen kan varieres etter ønske og den produserer en sinuskurve med lite harmonisk innhold. Det ble derfor bestemt å benytte en synkronmotor som spenningskilde i oppsettet. En frekvensomformer driver en asynkronmotor med variabelt turtall. Asynkronmotoren er mekanisk koblet til en synkronmotor

som drives i generatordrift. Transformatoren ble benyttet for å ha et galvanisk skille til forsyningen. Både nøytralpunktet til transformatoren og lastmotoren er isolert fra jord. Transformatoren forsyner en linjemodell og en asynkronmotor.



Figur 6.1: Oppkoblingen av laboratoriumsforøket

6.3.1 Kabelmodell

Målet med forøket var å sette opp en modell som kunne representere parametrene til en 20 km lang umbilical med de komponentene som er tilgjengelig på elkraftlaboratoriet ved Høyskolen på Vestlandet. Kabelparameter for den type kabel OSS ønsker at gruppen baserer oppgaven på er listet opp i tabell under.

Elkraftlaboratoriet har flere linjemodeller som alle representerer en 136km lang høyspentlinje. For å vurdere om linjemodellene kunne brukes som en del av et system for å representere ønsket kabelmodell var det nødvendig å innhente målinger av hvilke induktanser, resistanser og kapasitanser som linjemodellene er bygd opp av. Etter å ha gjennomført

Parameter	Verdi/km	Verdi for 20 km
R [Ω]	0,082 Ω	1,61868 Ω
L [H]	0,356507 mH	7,04 mH
C [F]	0,353 μ F	6,97 μ F

Tabell 6.1: Ønskede modell-verdier

Komponent	Måleverdi	Snitt
R1 [Ω]	1,61 Ω	$\bar{R} = 1,62 \Omega$
R2 [Ω]	1,56 Ω	
R3 [Ω]	1,70 Ω	
L1 [H]	7,97 mH	$\bar{L} = 7,99 \text{ mH}$
L2 [H]	7,88 mH	
L3 [H]	8,13 mH	
1C12 [μ F]	3,56 μ F	$\bar{C} = 3,61 \mu\text{F}$
1C23 [μ F]	3,65 μ F	
1C31 [μ F]	3,66 μ F	
2C12 [μ F]	3,55 μ F	
2C23 [μ F]	3,65 μ F	
2C31 [μ F]	3,6 μ F	

Tabell 6.2: Måleresultater

funksjonstest og målinger av alle linjemodellene tilgjengelig ble det besluttet at gruppen tar i bruk en utvalgt linjemodell som kobles på en slik måte at parametrene kommer nærmest mulig ovennevnte parameter. Måleresultatene er presentert i tabell 6.3.1.

Basert på disse målingene tilsvarende linjemodellens parametre, hver for seg, følgende kabel-lengde:

$$Lengde = \frac{\bar{R}_{modell}}{R_{parameter}} = \frac{1,62\Omega}{0,082\Omega} = 19,77km \quad (6.1)$$

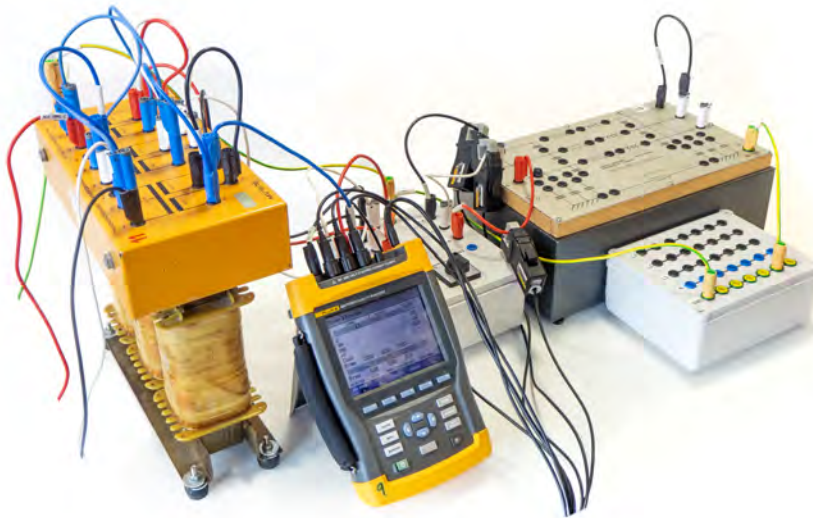
$$Lengde = \frac{\bar{L}_{modell}}{L_{parameter}} = \frac{7,99mH}{0,3565mH} = 22,42km \quad (6.2)$$

$$Lengde = \frac{\bar{C}_{modell}}{C_{parameter}} = \frac{7,22\mu F}{0,353\mu F} = 20,46km \quad (6.3)$$

Målestørrelse	L1	L2	L3
U [V]	19,04 V	18,79 V	18,95 V
I [A]	5,114 A	5,096 A	5,045 A
P [W]	44,75 W	43,89 W	44,363 W

Tabell 6.3: Kortslutningstest

Måling av modellens impedanser



Figur 6.2: Måling av modellens impedanser

Det var ikke mulig å verifisere måleinstrumentets fabrikant og modellnummer for målingene i tabell . For å verifisere at målingene er innenfor en akseptabel feilmargin ble det derfor utført en kortslutningstest og tomgangstest av den aktuelle linjemodellen. Ved kortslutningstest kortslettet gruppen linjemodellen i enden, justerte spenningen rolig opp til strømmen nådde linjemodellens øvre grense på tilnærmet 5A. Kortslutningstesten ga følgende resultater:

De målte verdiene ble brukt i videre beregninger for å identifisere induktans- og resistansverdier i linjemodellen på følgende måte:

$$Z_{L1} = \frac{U_k}{I_k} = \frac{19,04V}{5,114A} = 3,723\Omega \quad (6.4)$$

$$Z_{L2} = \frac{U_k}{I_k} = \frac{18,79V}{5,096A} = 3,687\Omega \quad (6.5)$$

$$Z_{L3} = \frac{U_k}{I_k} = \frac{18,95V}{5,045A} = 3,756\Omega \quad (6.6)$$

$$R_{L1} = \frac{P}{I_k^2} = \frac{44,75W}{5,114^2 A} = 1,711\Omega \quad (6.7)$$

$$R_{L2} = \frac{P}{I_k^2} = \frac{43,89W}{5,096^2 A} = 1,690\Omega \quad (6.8)$$

$$R_{L3} = \frac{P}{I_k^2} = \frac{44,365W}{5,045^2 A} = 1,743\Omega \quad (6.9)$$

$$X_{L1} = \sqrt{Z_{L1}^2 - R_{L1}^2} = \sqrt{3,723^2\Omega - 1,711^2\Omega} = 3,307\Omega \quad (6.10)$$

$$X_{L2} = \sqrt{Z_{L2}^2 - R_{L2}^2} = \sqrt{3,687^2\Omega - 1,690^2\Omega} = 3,277\Omega \quad (6.11)$$

$$X_{L3} = \sqrt{Z_{L3}^2 - R_{L3}^2} = \sqrt{3,756^2\Omega - 1,743^2\Omega} = 3,327\Omega \quad (6.12)$$

$$L_1 = \frac{X_{L1}}{2 \times \pi \times f} = \frac{3,307\Omega}{2 \times \pi \times 50} = 10,527mH \quad (6.13)$$

$$L_2 = \frac{X_{L2}}{2 \times \pi \times f} = \frac{3,277\Omega}{2 \times \pi \times 50} = 10,431mH \quad (6.14)$$

$$L_3 = \frac{X_{L3}}{2 \times \pi \times f} = \frac{3,327\Omega}{2 \times \pi \times 50} = 10,590mH \quad (6.15)$$

For å finne verdiene til kapasitansen C i linjemodellen ble det utført en tomgangstest. Kapasitiv strøm ble målt ved når tilført spenning per. fase ble satt til 120V. Resultatene er vist i tabell 6.4

Enhet	I_{1C12}	I_{1C23}	I_{1C31}	I_{2C12}	I_{2C23}	I_{2C31}
I [A]	0,145 A	0,149 A	0,149 A	0,144 A	0,149 A	0,145 A

Tabell 6.4: Strømmåling

$$\bar{I}_c = 0,147A$$

$$\bar{C} = \frac{\bar{I}_c}{2 \times \pi \times f \times U_f} = \frac{0,147A}{2 \times \pi \times 50 \times 120V} = 3,899\mu F \quad (6.16)$$

Valg av kabelmodell

Verdiene fra første måling samsvarer godt med verdier fra kortslutningstest og tomgangstest. Det største avviket som ble identifisert var målingen av den induktive komponenten av linjemodellen der direkte måling på komponent viste $\bar{L} = 7,99mH$ og kortslutningstest viste $\bar{L} = 10,516mH$. Det vurderes at avviket i induktansverdien ikke vil ha innvirkning på det primære formålet med eksperimentet og er derfor i denne sammenheng av liten betydning. Resultatene fra første måling som ansees som nært nok ønskede verdier og gruppen beslutter derfor å gå videre med dette oppsettet som vår endelige kabelmodell.

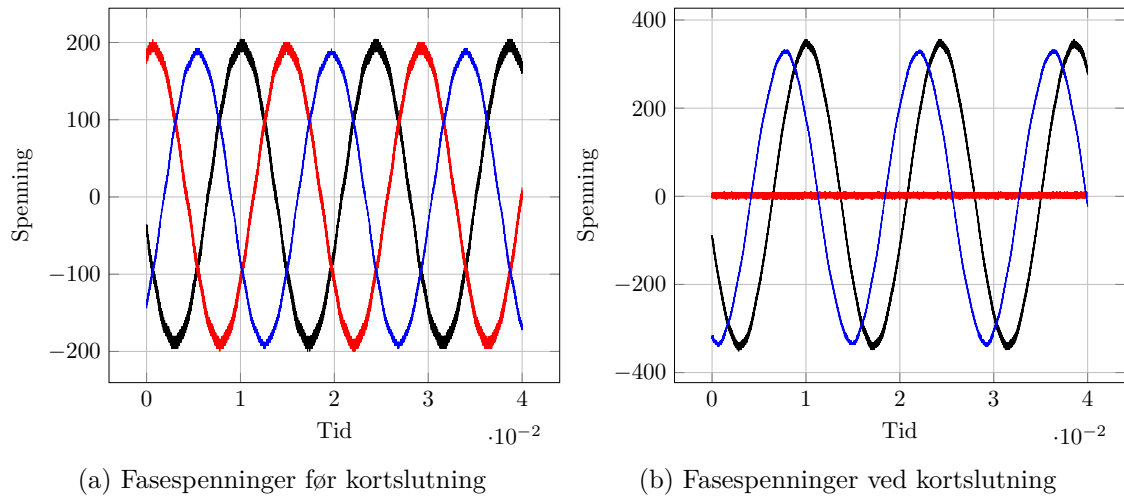
6.3.2 Målinger

Det ble målt fase- og linjespenninger ved lasten, samt jordfeil- og laststrøm. Fasespenningene ble målt mellom fase og den simulerte kabelskjermen. Jordfeilen ble lagt inn via en bryter mellom linjemodellen og den simulerte kabelskjermen, slik at feilen enkelt kunne legges inn og ut. Fasespenningen ble holdt konstant med en toppverdi på 200V ut i fra kilden. Tegninger av oppkobling og målepunkter ligger ved i C.2. Instrumenter og utstyr som ble brukt i laboratorieforsøket kan finnes i B.

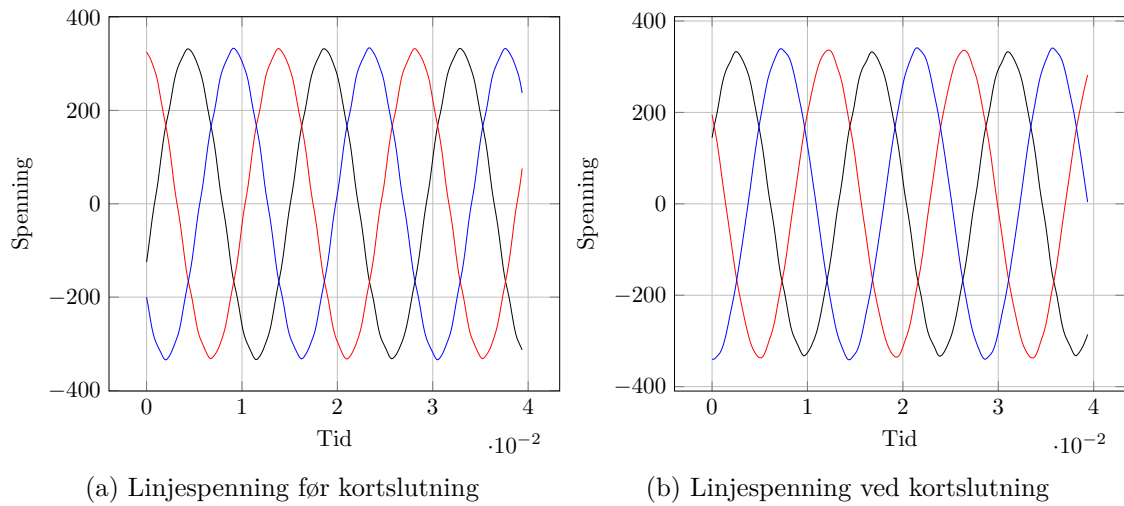
6.4 Laboratoriumresultater

Laboratoriumsresultatene er presentert i dette kapitlet. Måleresultatene har noen klare fellestrekk, som at fasespenningen, på fasen med jordfeil, blir null volt. Fasespenningen på de to fasene uten jordfeil øker. Linjespenningen ved lasten ser, ut i fra grafene, tilsynelatende uendret med og uten jordfeilen. Laststrømmen blir noe usymmetrisk ved jordfeil, amplituden til i_a blir større enn i de to andre fasene. Dette er mest synlig ved de to høyeste frekvensene som vist i figur 6.5b. Strømmålingene ved 35Hz er noe forvrengt som en kan se i figur 6.14b.

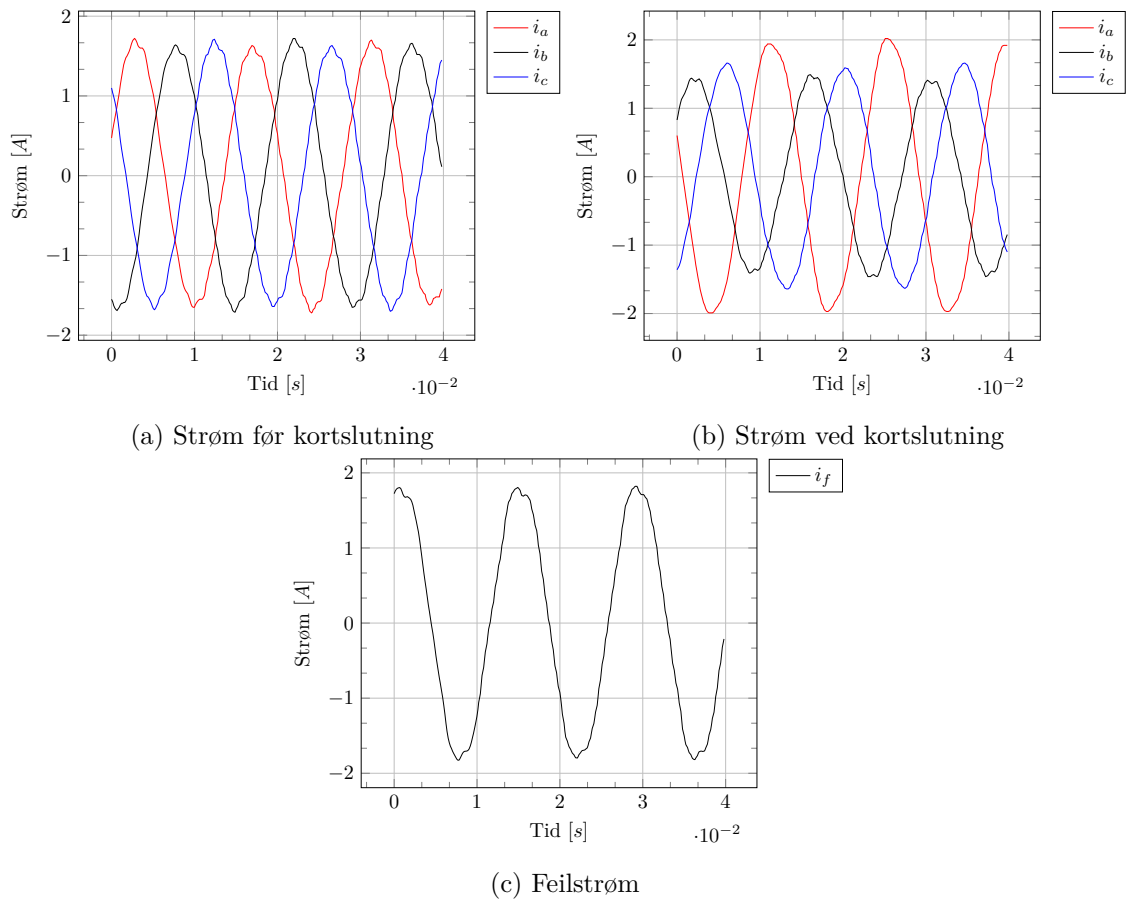
6.4.1 Måling ved 70hz



Figur 6.3: Måling av fasespenning ved 70Hz

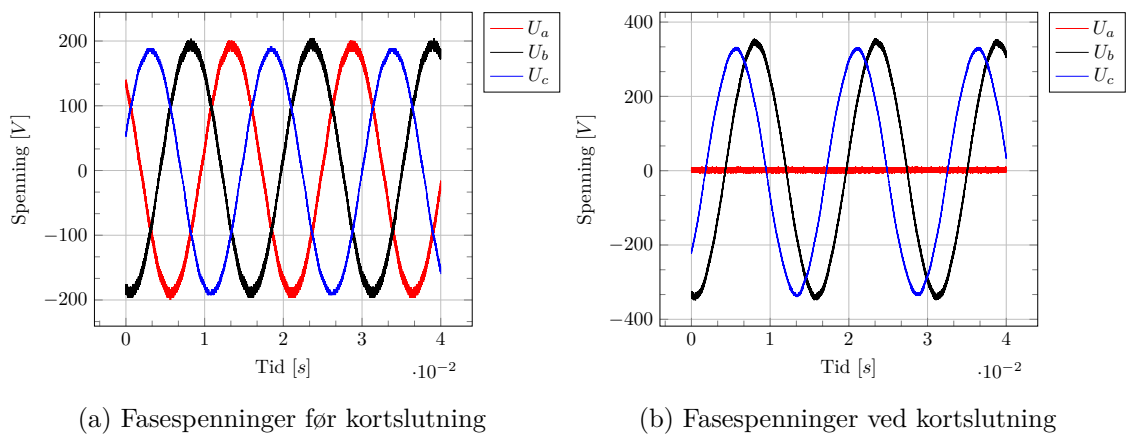


Figur 6.4: Måling av linjespenning ved 70Hz

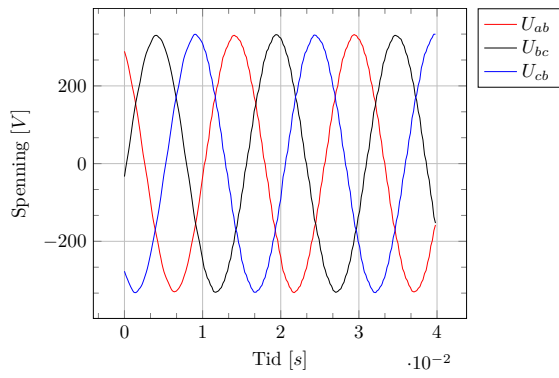


Figur 6.5: Måling av strøm ved 70Hz

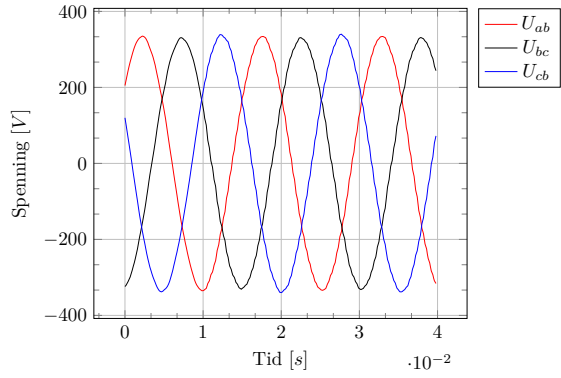
6.4.2 Måling ved 65hz



Figur 6.6: Måling av fasespenninger ved 60Hz

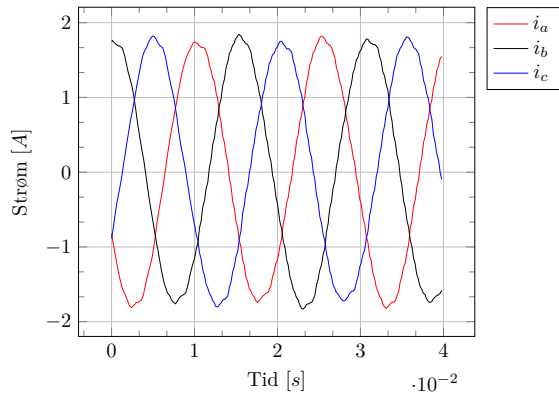


(a) Linjespenning før kortslutning

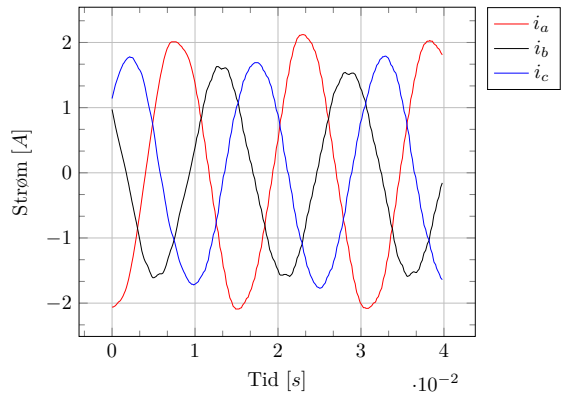


(b) Linjespenning ved kortslutning

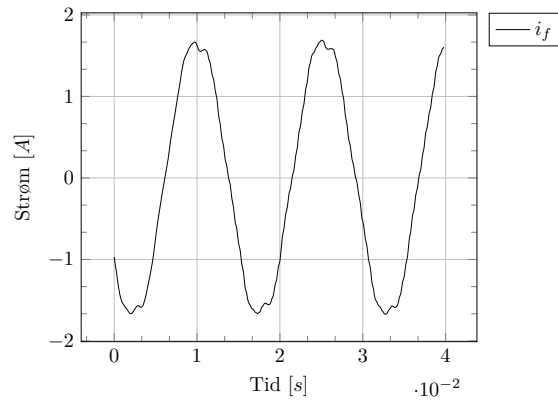
Figur 6.7: Måling av linjespenninger ved 65Hz



(a) Strøm før kortslutning



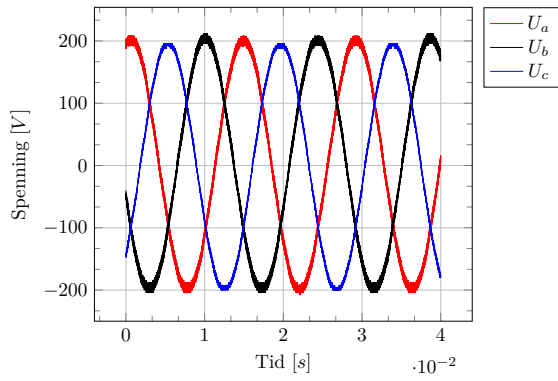
(b) Strøm ved kortslutning



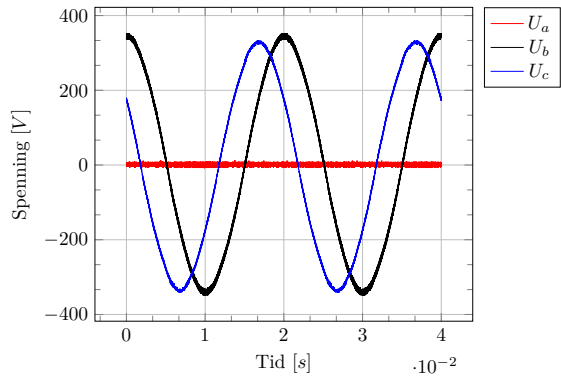
(c) Feilstrøm ved kortslutning

Figur 6.8: Måling av strøm ved 65Hz

6.4.3 Måling ved 50hz

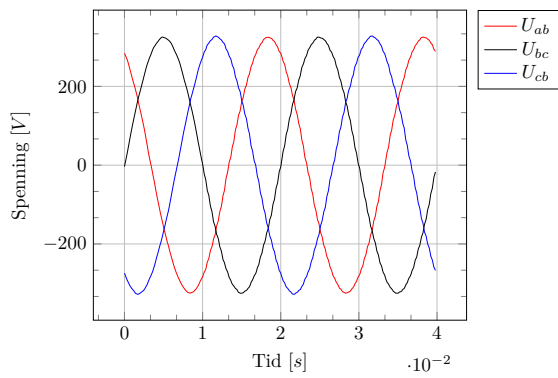


(a) Fasespenninger før kortslutning

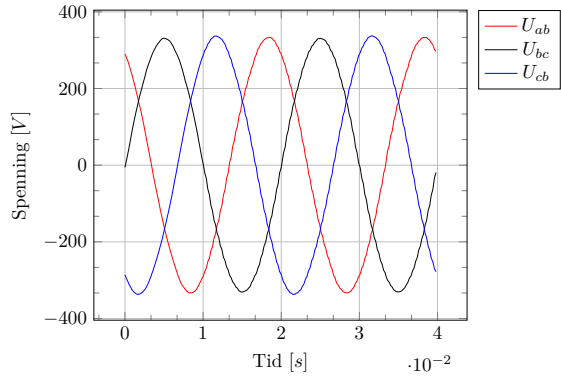


(b) Fasespenninger ved kortslutning

Figur 6.9: Måling av fasespenninger ved 50Hz

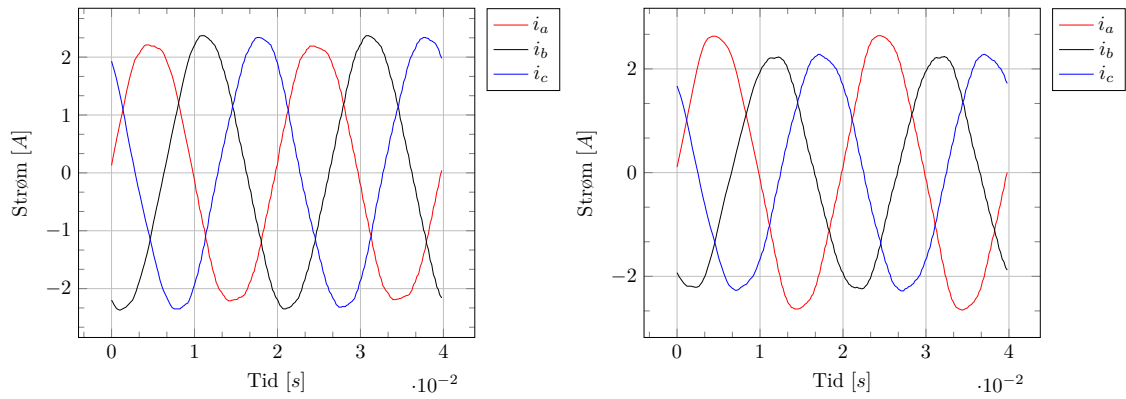


(a) Linjespenning før kortslutning



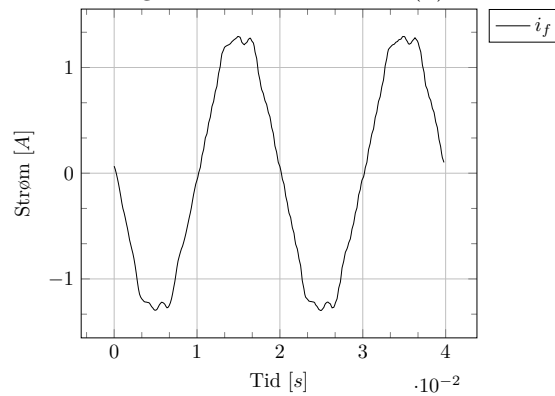
(b) Linjespenning ved kortslutning

Figur 6.10: Måling av linjespenning ved 50Hz



(a) Strøm før kortslutning

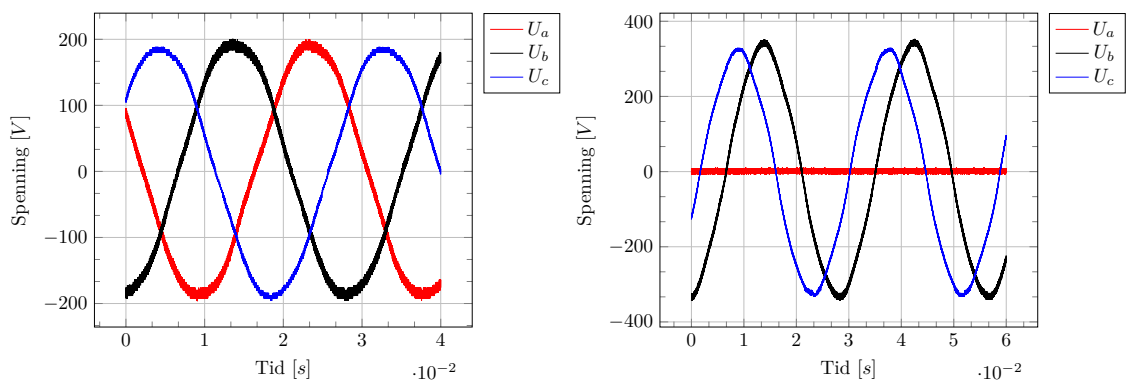
(b) Strøm ved kortslutning



(c) Feilstrøm ved kortslutning

Figur 6.11: Måling av strøm ved 50Hz

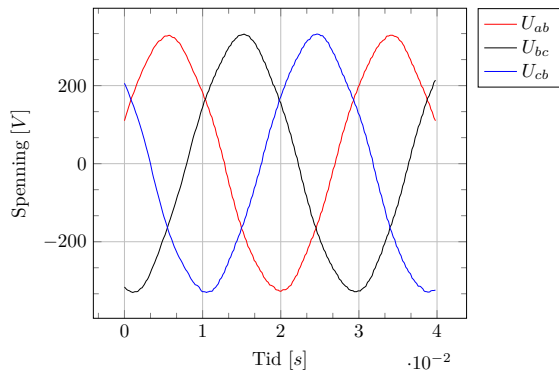
6.4.4 Måling ved 35hz



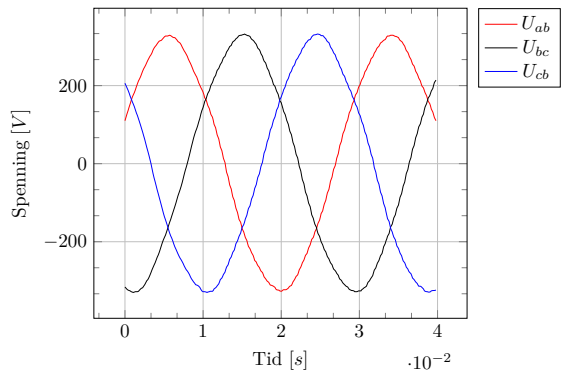
(a) Fasespenninger før kortslutning

(b) Fasespenninger ved kortslutning

Figur 6.12: Måling av fasespenninger ved 35Hz

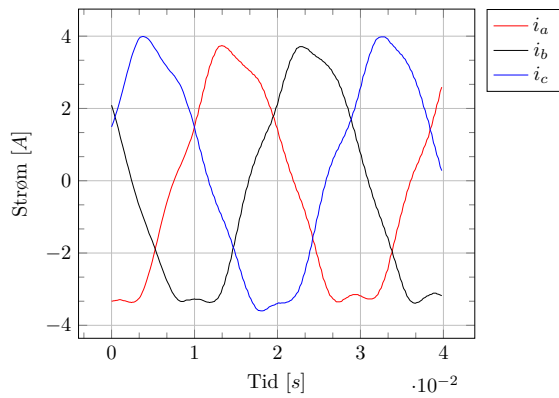


(a) Linjespenning før kortslutning

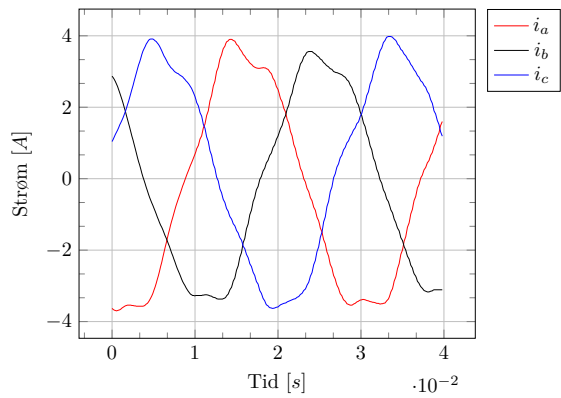


(b) Linjespenning ved kortslutning

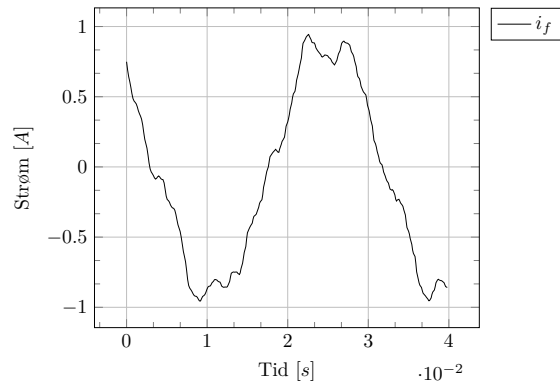
Figur 6.13: Måling av linjespenninger ved 35Hz



(a) Strøm før kortslutning



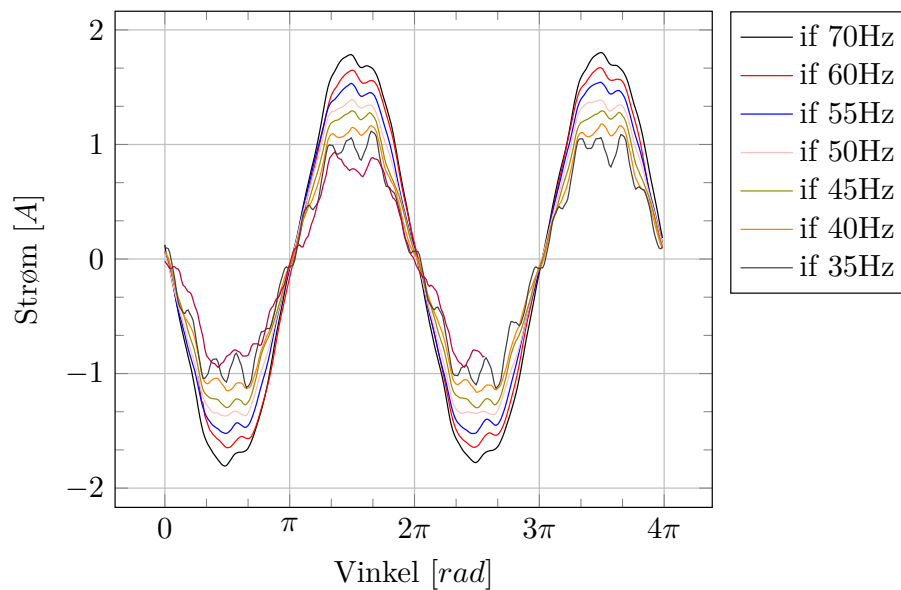
(b) Strøm ved kortslutning



(c) Feilstrøm ved kortslutning

Figur 6.14: Måling av strøm ved 35Hz

6.4.5 Sammenlikning av feilstrøm ved forskjellige frekvenser



Figur 6.15: Feilstrømmen med frekvenser fra 35 til 70hz

7 Diskusjon

7.1 Resultat av matematisk modell

Den matematiske tilnærmingen til problemstillingen baserer seg på beregningsmetoden *symmetriske komponenter* som krever at det bygges en ekvivalent for hver komponent i alle tre sekvenser. I denne prosessen er det foretatt noen forenklinger som kan påvirke nøyaktigheten av resultatet. Den viktigste påvirkningen er valg av impedansverdier. Nøyaktige impedansverdier for systemet har vært utfordrende å få tak i, spesielt for frekvensomformerer og de negative sekvensverdiene for asynkronmotoren. Beregningene på de aktuelle kabellengdene og frekvensene viser dog at den totale nullsekvensimpedansen er vesentlig større enn impedansene for det positive- og negative systemet. Til eksempel viser resultat presentert i tabell 4.10 at nullsekvensimpedansen ved en driftsfrekvens på 50 Hz og en kabellengde på 10 km er mer enn 500 ganger større enn impedansene for det positive og negative systemet. Av figur 4.8 kan man se at hverken frekvensomformerens eller motorens impedans påvirker den allerede dominerende nullsekvensimpedansen. Kabelens nullsekvensimpedansverdier som er brukt i beregningene er oppgitt i Henry per kilometer, men er opprinnelig beregnet for en kabel på 3.9 km. Det er sannsynlig at dette induktive bidraget ikke er nøyaktig for lengre kabler [17].

Den beregnede feilstrømmen i tabell 4.1 er prosentvis lav sammenlignet med nominelt strømtrekk og har en tilnærmet ren kapasitiv vinkel. Dette tyder på at strømmen returner til systemet via kapasitansene i kabelen. Resultatene i tabell 4.1 belyser også at feilstrømmen øker med økt driftsfrekvens og kabellengde. Etersom kabelens kapasitans er omvendt proporsjonal med økende frekvens er denne økningen i feilstrøm å forvente. Når kabellengden økes stiger den totale kapasitansverdien for kabelen og vil gi samme effekt som økning i frekvens [17].

Resultat av beregninger utført ved 50 Hz på en 10 km lang kabel som er presentert i tabell 4.4 viser at spenningen til fase a med jordfeil reduseres til 0 V, noe som fører til en spenningsøkning i fase b og c til å bli tilnærmet lik linjespenning. Ved samme feilsituasjon viser de matematiske beregningene presentert i tabell 4.5 at linjespenningene er nærmest uforandret. Disse resultatene kan sammenlignes med måleresultater beskrevet i kapittel 6, avsnitt 6.4.3 hvor systemets fysiske og matematiske respons er sammenfallende. Resultatene understøttes av teori om isolerte jordingssystem beskrevet i avsnitt 3.6.4 og stemmer overens med Anna Guldbland sitt forskningsprosjekt fra 2009[17].

7.2 Resultat av simulering

I Matlab-modellen simuleres motordriften mer nøyaktig og det resulterende spenningsfallet over kabelmodellene er derfor simulert. Det er noen forenklinger i modellen som påvirker nøyaktigheten av resultatet negativt. Frekvensomformerer er modellert som en enkel tre-fase spenningskilde med lav impedansverdi. Dette lager en unaturlig ren sinus-kurve med lite overharmonisk innhold. En realistisk impedansverdi for frekvensomformerer var ikke mulig å oppdrive, men modellen er utformet slik at en nøyaktig verdi kan brukes dersom den blir målt i det virkelige systemet ved en seinere anledning. For å sikre konservative resultater ble det valgt en impedansverdi på 0.001Ω . Kabelmodellene er som forklart i 5.2.3 oppbygd av to pi-ledd og nøyaktigheten er avhengig av simuleringens inngangsverdier. I simuleringsresultatene er disse basert på per-kilometer-parametre oppgitt av OneSubsea og som omtalt i 7.1 er disse i utgangspunktet kalkulert for en kabel på 3.9km. Økende lederresistivitet på grunn av strømfortrengning er heller ikke modellert og kabelens resistanser er basert på verdier oppgitt for 50Hz. Motorparameterne er oppgitt av motorfabrikanten, men last-modellen er delvis forenklet til å være en lineært økende last med turtallet.

Resultatene fra simuleringene sammenfaller med de grunnleggende prinsippene fra den matematiske tilnærmingen 7.1. Ved hjelp av måleblokkene kan feilstrømmen måles direkte i feilpunktet og den viser seg å være relativt lav i forhold til laststrømmen. Fasespenningene for fasene uten direkte jordfeil øker med en faktor $\sqrt{3}$ og den kortsluttede fasen forblir nært jordpotensiale. Simuleringsresultatene for linjespenningene og linjestrømmene viser at de forblir symmetriske og tilnærmet uendret i verdi før og etter kortslutningen for kabelen på 5km. Ved de lengre kabellengdene blir det en økende signifikant asymmetri i linjespenningene og fasestrømmene ved nominell driftsfrekvens på 77Hz. I figur 5.13b kan amplitudeforskjellene til fasespenningene ved en 30km kabel måles til omtrent 2.8% forskjell. Dette er tydelig i figur 5.8a at linjestrømmene også er usymmetriske. Det ble derfor en måling av motorturtall i denne konfigurasjonen, samt en fourieranalyse av de samme målingene. Resultatene er publisert i figur 5.21c og 5.21b. Analysen av linjestrømmen viser at strømfasene har identisk grunnharmonisk på 77Hz, men med en amplitudeforskjell mellom høyeste og laveste fase på omtrent 10%. Det er ingen signifikante overharmoniske i frekvensspektre opp til 200 Hz. Etter kortslutningen oppstår det et lite rippeturtall for motoren (figur 5.21a), men som fourieranalysen i figur 5.21b viser er denne svært lav i forhold til gjennomsnittsturtallet.

Feilstrømmene øker ved økende driftsfrekvens og kabelens lengde, av samme årsak som for den matematiske utregningen 7.1.

7.3 Resultat av laborieforsøk

Laboratoriumsforsøket brukte en linjemodell som er konstruert for undervisningsformål, og kretsene er derfor av praktiske årsaker bygget av impedans-komponenter istedenfor faktiske kabler. Dette er en velprøvd metode som også OneSubsea bruker i sin fullska-

la laboratoriumsmodell ved selskapets anlegg på Horsøy. Etter å ha utført målinger av impedansene på modellen ble den koblet for å parametermessig likne mest mulig på en 20km kabel, men det var ikke mulig å lage en nøyaktig kopi med det utstyret som var tilgjengelig på laboratoriet. Asynkronmotoren trakk også mindre strøm enn ønskelig, fordi den ble driftet uten last, og dette påvirker både spenningsfall over kabelmodellen og feilstrøm relativt til laststrømmen.

Laboratorieforsøket bekreftet likevel flere viktige forutsetninger fra systemmodelleringen. Ved kortslutning av en fase til jord økte fasespenningene til tilnærmet linjespenning, og linjespenningene forble symmetrisk og størrelsesmessig inntakte. Forsøket viste også at jordfeilstrømmen var proporsjonalt økende med driftsfrekvensen, selv om linjespenningen ble holdt konstant. Jordfeilstrømmen var som forventet tilnærmet rent kapasitiv, da eneste returvei var gjennom den kapasitive koblingen mellom fasene og jord. Måleresultatene fra laboratorieforsøk sammenfaller godt med resultater fra matematisk modell i seksjon 7.1 og simulering seksjon 7.2.

7.4 Forslag til videre utredning

I denne oppgaven ble laboratoriumsforøket gjennomført med én kabelmodell, og strøm og spenninger ble målt ved kabelens endepunkter. En utvidelse av forøket vil være å bruke to kabelmodeller, slik at målinger og fase til jord kortslutning også kan foretas på et simulert midtpunkt på kabelen. Det var ingen hørbar eller synlig forskjell på motorens turtall under forøkene, men det kunne med fordel ha blitt foretatt nøyaktige målinger av motorens turtall. Laboratoriumsforøket bekreftet at vekselstrøm kan returnere til syste-

met via kapasitive elementer. For å vise kraftkabelens kapasitans må det utføres et forøk på en kraftkabel med samme konfigurasjon som oppgaven studerer. Det hadde også vært ønskelig å senke denne i et saltvannbasseng for å kunne foreta målinger av returstrømmer utenfor skjermlederen. Det antas at overharmoniske spenninger og strømmer vil påvirke

kortslutningskarakteristikken til systemet. I en videre utredning av problemstillingen kan også disse inkluderes i beregningene. Modellen bruker impedansverdier oppgitt av One-

Subsea, som kun er korrekt for 3.9km, men ifølge [17] er unøyaktig for andre lengder. Impedanser kan kalkuleres i UFIELD, som er en programvare spesielt utviklet for modellering av undersjøiske styrekabler. [35]. Mer nøyaktige impedansenverdier kan kalkuleres og brukes i simuleringsverktøyet. Strømfortrengning er ikke simulert i pi-seksjonene i Si-

mulink eller tatt med i beregningene i den matematiske modellen. Denne økte motstanden

kan simuleres ved å legge til parallelle resistans- og induktans- i serie med serieimpedansen i pi-modellen. Det er ikke tatt hensyn til sjøvanns korroderende egenskaper i denne

oppgaven. Det hadde vært ønskelig å vite om dette vil påvirke drift med jordfeil.

8 Konklusjon

Oppgaven har undersøkt om en trefase asynkronmotor kan driftes med en fase kortsluttet til jord, i et undersjøisk kraftsystem brukt i petroleumsindustrien. Et typisk kraftsystem der nøytralpunktene er isolert fra jord har blitt modellert og simulert i flere ulike konfigurasjoner av kabellengde og driftsfrekvens. Det har også blitt gjort laboratoriumsforøk på en nedskalert modell av systemet. Oppgaven har fokusert på at feilen oppstår på det undersjøiske koblingspunktet ved motoren.

Metodene som har blitt brukt til å utføre beregningene og simuleringene av systemet gir konsistente resultater innenfor de begrensningene som er diskutert i kapittel 7. Beregningsmetoden brukt i den matematiske modellen stemmer også med antakelsene fra elektroteorien. Det viser at symmetriske komponenter er et godt verktøy til å beregne strømmer og spenninger i ubalanserte systemer, og er egnet til å beregne stasjonære kortslutningsstrømmer. Selv om resultatene ikke gir nøyaktige tallverdier for et aktuelt system kan de vurderes som omtrentlige verdier i en tidlig prosjekteringsfase.

Den store forskjellen mellom impedansverdiene til sekvenssystemet som er belyst i avsnitt 7.1 fører til at den sterkt dominerende nullsekvensimpedansen har størst innflytelse på feilstrømmen. Ujordede kraftsystemer vil av den grunn ha en prosentmessig liten feilstrøm ved enfase jordfeil sammenlignet med nominell driftsstrøm.

Feilstrømmene er sterkt kapasitive på grunn av de kapasitive reaktansene i returveien tilbake fra jord til fasene uten jordfeil. Resultatene fra simuleringene, de matematiske utregningene og laboratoriumsforøket viser konsistent at feilstrømmen øker nærmest proporsjonalt med driftsfrekvensen i systemet. Tilsvarende viser utregningene og simuleringene at feilstrømmen også øker proporsjonalt med kabellengden. Med hensyn til feilstrøm må dermed kablens skjermledere dimensjoneres for å kunne lede strøm tilsvarende feilstrømmen ved kabelens lengde og høyeste driftsfrekvens, dersom motoren skal kunne driftes kontinuerlig med jordfeil på en fase. For kabellengdene denne oppgaven har analysert, 5 km til 30 km, og ved høyeste driftsfrekvens 77Hz har største feilstrøm økt fra $14.296 \angle 88.468^\circ A$ til $80.208 \angle 78.906^\circ A$.

Den kortsluttede fasen har ikke uventet en konstant spenning nært null. Dette fører til ubalanserte fasespenninger, og fasene uten feil øker med en faktor av omtrent $\sqrt{3}$. Spenningen mellom jord og fasene uten jordfeil blir dermed tilnærmet det samme som linjespenningen før feilen inntraff. Dette betyr at spenningen over isolasjonen i kabelen og asynkronmotoren også har økt med $\sqrt{3}$. Dette øker kravene til isolasjonsholdfasthet.

Ved korte kabler er linjespenningene nærmest uendret, men ved kombinasjonen av lengre

kabellengder og frekvenser nær nominell driftsfrekvens viser simuleringen at linjespenningene blir økende usymmetriske. Dette kan føre til skadelig oppvarming i motorviklingene og kan redusere motorens levetid.

Dersom motoren skal kunne driftes med jordfeil på en fase bør følgende kriterier være oppfylt: Motor og kabel bør tåle den potensiell spenningsøkning som kan oppstå mellom fase og jord i henhold til [20]. Kabelen bør tåle feilstrømmen som vil gå i kabelens skjermleder. Det bør opprettholdes symmetri i både spenning- og laststrøm. Dersom en ikke klarer å ivareta kriteriene bør turtallet reduseres til akseptable strøm- og spenningsnivå.

Matlab med Simulink har blitt brukt til å gjennomføre simuleringene av systemet. Programfilene som ble utarbeidet både for å utføre simuleringene og de matematiske beregningene kan brukes i fremtidige prosjekter for å gjøre estimat av feilstrøm og spenning en kabel må dimensjoneres for. Via et grafisk brukergrensesnitt kan inngangsverdier i form av kabel- og motorparametre angis manuelt og programmet kan produsere resultater for de kabellengder og frekvenser det ønskes simulert.

9 Referanser, figurer og tabeller

Referanser

- [1] H. Westhagen, *Prosjektarbeid: utviklings- og endringskompetanse*, 6. utg. Oslo: Gyldendal akademisk, 2008, 352 s., ISBN: 978-82-05-38361-6. adresse: <https://www.nb.no/search?q=oaiid:%22oai:nb.bibsys.no:990825443954702202%22&mediatype=b%C3%B8ker> (sjekket 20.01.2023).
- [2] I. E. Commission. «IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary.» (), adresse: <https://www.electropedia.org/> (sjekket 15.04.2023).
- [3] Norge Oljedirektoratet, *KraftFraLand: til norsk sokkel : rapport 2020*, i samarbeid med R. Goa. Stavanger: Oljedirektoratet, 2020, ISBN: 978-82-7257-313-2. adresse: <https://www.nb.no/search?q=oaiid:%22oai:nb.bibsys.no:999920086367902202%22&mediatype=b%C3%B8ker> (sjekket 28.02.2023).
- [4] L. Sivertsen, *Høyspenningssystemer*, 1. utgave. Bergen: Fagbokforlaget, 2020, ISBN: 978-82-450-3353-3.
- [5] T. Worzyk, *Submarine Power Cables: Design, Installation, Repair, Environmental Aspects* (Power Systems), 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009, ISSN: 1612-1287, ISBN: 978-3-642-01269-3. DOI: 10.1007/978-3-642-01270-9.
- [6] S. Ore og A. Stori, *polyetylen*, i *Store norske leksikon*, 24. jan. 2023. adresse: <http://snl.no/polyetylen> (sjekket 08.03.2023).
- [7] J. Skaar, *Elektromagnetisme*, 28. aug. 2017. adresse: <https://www.mn.uio.no/fysikk/personer/vit/johask/elektromagnetisme.pdf> (sjekket 17.04.2023).
- [8] J. D. Glover, T. Overbye og M. S. Sarma, *Power System Analysis and Design, SI Edition*, 6th edition. Boston, MA: Cengage Learning, 7. jul. 2016, 864 s., ISBN: 978-1-305-63618-7.
- [9] G. Moore, «Electric Cables Handbook (3rd Edition),» Publisher: John Wiley & Sons, ISSN: 978-0-632-04075-9. adresse: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpECHE000F/electric-cables-handbook/electric-cables-handbook>.
- [10] N. Tleis, *Power Systems Modelling and Fault Analysis: Theory and Practice*. San Diego, CA, USA: Elsevier Science, 2019, ISBN: 978-0-12-815117-4. DOI: 10.1016/C2017-0-02262-0.

- [11] L. Sivertsen, *Elektriske maskiner*, 1. utg. Bergen: Fagbokforlaget, 2019, ISBN: 978-82-450-3296-3.
- [12] N. Mohan, *Electric machines and drives: a first course*. Hoboken, N.J: Wiley, 2012, XI, 276, ISBN: 978-1-118-07481-7.
- [13] E. Thibaut, E. Meyer og P.-J. Bibet, «Use of liquid filled motor for subsea pump applications,» i *PCIC Europe 2010*, ISSN: 2151-7665, jun. 2010, s. 1–8.
- [14] T. Undeland, N. Mohan og W. Robbins, *Power Electronics*, 3. utgave. USA, 2003, ISBN: 978-0-471-22693-2.
- [15] ABB. «Unbalanced voltage supply: The damaging effects on three phase induction motors and rectifiers.» (), adresse: [https://library.e.abb.com/public/0c4186f3e7354f6982124decf92742d8/AVC-20%20white%20paper%20\(low%20res\).pdf](https://library.e.abb.com/public/0c4186f3e7354f6982124decf92742d8/AVC-20%20white%20paper%20(low%20res).pdf) (sjekket 22.05.2023).
- [16] «Silcovert TH speed drive solution | Nidec Industrial Solutions.» (), adresse: <https://www.nidec-industrial.com/products/medium-high-voltage-drives/silcovert-th/> (sjekket 21.05.2023).
- [17] A. Guldbland, *Earth Faults in Extensive Cable Networks*, 2009. adresse: <https://www.iea.lth.se/publications/Theses/LTH-IEA-1057.pdf> (sjekket 10.03.2023).
- [18] A. L. Fredriksen, «Earth fault protection in isolated and compensated power distribution systems,» Accepted: 2016-08-29T14:00:22Z Publication Title: 122, Master thesis, NTNU, 2016. adresse: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2402539> (sjekket 10.05.2023).
- [19] A. Guldbland, *System earthing*, 2006. adresse: <https://www.iea.lth.se/publications/Reports/LTH-IEA-7216.pdf>. (sjekket 20.05.2023).
- [20] I. E. Commission, *IEC 60502-2*, 9. feb. 2021. adresse: <https://www.iec.ch/homepage>.
- [21] J. C. Das, *Understanding symmetrical components for power system modeling* (IEEE press series on power engineering). Hoboken, New Jersey: John Wiley og Sons, Inc. : IEEE Press, 2017, ISBN: 978-1-119-22688-8.
- [22] J. J. Grainger, W. D. Stevenson og G. W. Chang, *Power system analysis*, International ed. New York: McGrawHill Education, 2016, XII, 590, ISBN: 978-1-259-00835-1.
- [23] «The origins of MATLAB.» (), adresse: <https://ch.mathworks.com/company/newsletters/articles/the-origins-of-matlab.html> (sjekket 22.05.2023).
- [24] «MATLAB - MathWorks.» (), adresse: <https://ch.mathworks.com/products/matlab.html> (sjekket 19.05.2023).
- [25] «Solve linear system of equations - MATLAB linsolve - MathWorks Nordic.» (), adresse: <https://se.mathworks.com/help/matlab/ref/linsolve.html> (sjekket 19.05.2023).

- [26] «Arrows emanating from origin - MATLAB compass - MathWorks Nordic.» (), adresse: <https://se.mathworks.com/help/matlab/ref/compass.html> (sjekket 19.05.2023).
- [27] G. Grønlien, E. By og J. W. Johnsen, «Forprosjekt bacheloroppgave,» ph.d.-avh., Høgskulen på Vestlandet.
- [28] «PowerFactory - DlgSILENT.» (), adresse: <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html> (sjekket 18.05.2023).
- [29] «About ATP.» (), adresse: <https://www.eeug.org/index.php/about-eeug/about-atp> (sjekket 31.01.2023).
- [30] O. V. Thorsen og M. Dalva, *Høyspenningsteknikk*, 2. utg. Oslo: Univ.forl., 1982, 333 s., Accession Number: 998320055414702202 Publication Title: Norbok Source: NO-TrBIB, ISBN: 978-82-00-28597-7. adresse: https://urn.nb.no/URN:NBN:no-nb_digibok_2016061708102 (sjekket 06.03.2023).
- [31] Mathworks. «Implement transmission line or cable with lumped parameters - Simulink - MathWorks Nordic,» MathWorks. (1. mai 2023), adresse: <https://se.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/pisectionline.html> (sjekket 04.05.2023).
- [32] H. Dommel, «Techniques for analyzing electromagnetic transients,» *IEEE Computer Applications in Power*, årg. 10, nr. 3, s. 18–21, jul. 1997, Conference Name: IEEE Computer Applications in Power, ISSN: 1558-4151. DOI: 10.1109/67.595285.
- [33] T. Dyrstad, *Elektroteknisk ledningsberegning*, 2. utg. Oslo: Universitetsforl., 1988, 230 s., Accession Number: 998821057444702202 Publication Title: Norbok Source: NO-OsNB, ISBN: 978-82-00-35314-0. adresse: https://urn.nb.no/URN:NBN:no-nb_digibok_2013032106131 (sjekket 06.03.2023).
- [34] «Model dynamics of three-phase asynchronous machine, also known as induction machine, in SI or pu units - Simulink - MathWorks Switzerland.» (), adresse: <https://ch.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/asynchronousmachine.html> (sjekket 01.05.2023).
- [35] B. Gustavsen, A. Bruaset, J. J. Bremnes og A. Hassel, «A Finite-Element Approach for Calculating Electrical Parameters of Umbilical Cables,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, årg. 24, nr. 4, s. 2375–2384, okt. 2009, ISSN: 1937-4208. DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2028481.

Figurer

2.1	VSD drifter motor direkte	5
2.2	Spenning fra VSD opptransformeres	5
2.3	Overføringsspenningen reduseres til motorspenning ved bruk av undersjøisk transformator	6
3.1	Tverrsnitt av enleder- og trelederkabel	8
3.2	Elektriske feltlinjer	9
3.3	Leder med radius r_a isolasjon med ytre radius r_b	10
3.4	Magnetfelt rundt i en spole	11
3.5	Utsnitt av kabel, med skjermledere jordet i begge ender	14
3.6	15
3.7	Ekvivalentmodell av kraftkabel	16
3.8	Enfase transformatorjern	17
3.9	Ekvivalentskjema for transformator	18
3.10	Transformatorjern for trefase	19
3.11	Transformator-klobinger	20
3.12	Ekvivalent med skille mellom stator- og rotorkrets	21
3.13	Ekvivalentskjema for asynkronmotor	21
3.14	Moment-turtall karakteristikk ved konstant U/f forhold	23
3.15	Prinsippskisse av frekvensomformer med to celler per fase	24
3.16	En enkelt celle i omformeren	25
3.17	Trefasekortslutning	26
3.18	Trefasekortslutning	26
3.19	Trefasekortslutning	26
3.20	Enpolt jordfeil i et isolert system	27
3.21	Grafisk fremstilling av fasespenninger med og uten enpolt jordfeil i et isolert system [19]	28
4.1	Thevenin ekvivalent	30
4.2	Vektorsystemene	31
4.3	Grafisk fremstilling av usymmetrisk trefasesystem representert av sekvenskomponenter	32
4.4	Balansert vektorsystem	33
4.5	Ekvivalentkrets for frekvensomformer	35

4.6	Ekvivalentkrets for kabel	36
4.7	Ekvivalentkrets for asynkronmotor	37
4.8	Fullstendig sekvensnettverk	38
4.9	Positivt sekvenssystem med to pi-ledd	40
4.10	Sammenkobling av theveninekvivalentene for sekvensnettverkene	42
4.11	Fasevektorer i feilstedet ved frekvens 50 Hz og kabellengde 10 km.	46
4.12	Linjespenning i feilstedet ved frekvens 50 Hz og kabellengde 10 km.	46
5.1	Simulinkmodell: <code>fasejordsim_simulink.slx</code>	49
5.2	Måleblokk	50
5.3	Pi-ekvivalent med hyperbolske korreksjoner	51
5.4	Ekvivalent brukt i Simulink-blokken: <i>Distributed parameters</i>	51
5.5	Motorblokk i Simulink	52
5.6	Motormodell i Simulink [34]	52
5.7	Spenningsmålinger, 5km kabel ved 77 Hz	54
5.8	Strømmålinger, 5km kabel ved 77 Hz	54
5.9	Spenningsmålinger, 10km kabel ved 77 Hz	55
5.10	Strømmålinger, 10km kabel ved 77 Hz	55
5.11	Spenningsmålinger, 20km kabel ved 77 Hz	56
5.12	Strømmålinger, 20km kabel ved 77 Hz	56
5.13	Spenningsmålinger, 30km kabel ved 77 Hz	57
5.14	Strømmålinger, 30km kabel ved 77 Hz	57
5.15	Spenningsmålinger, 5km kabel ved 77 Hz	58
5.16	Strømmålinger, 10km kabel ved 65 Hz	58
5.17	Spenningsmålinger, 10km kabel ved 50 Hz	59
5.18	Strømmålinger, 10km kabel ved 50 Hz	59
5.19	Spenningsmålinger, 10km kabel ved 35 Hz	60
5.20	Strømmålinger, 10km kabel ved 35 Hz	60
5.21	61
6.1	Oppkoblingen av laboratoriumsforøket	63
6.2	Måling av modellens impedanser	65
6.3	Måling av fasespenning ved 70Hz	68
6.4	Måling av linjespenning ved 70Hz	68
6.5	Måling av strøm ved 70Hz	69
6.6	Måling av fasespenninger ved 60Hz	69
6.7	Måling av linjespenninger ved 65Hz	70
6.8	Måling av strøm ved 65Hz	70
6.9	Måling av fasespenninger ved 50Hz	71
6.10	Måling av linjespenning ved 50Hz	71
6.11	Måling av strøm ved 50Hz	72
6.12	Måling av fasespenninger ved 35Hz	72

6.13	Måling av linjespenninger ved 35Hz	73
6.14	Måling av strøm ved 35Hz	73
6.15	Feilstrømmen med frekvenser fra 35 til 70hz	74
B.1	Utstyr	91
D.1	Startside	96
D.2	Startside	98
D.3	Startside	98

Tabeller

1.1	Tabell med spenning, frekvens og kabellengder	3
3.1	Elektriske egenskaper for kobber [9]	12
3.2	Elektriske egenskaper for kobber [9]	15
3.3	Anbefalte spenningsnivå for de ulike isolasjonsklassene, hentet fra [20]	29
4.1	Feilstrøm ved varierende frekvens og kabellengde	43
4.2	Fasespenning i feilstedet ved kabellengde 5 km	43
4.3	Linjespenning i feilstedet ved kabellengde 5 km	44
4.4	Fasespenning i feilstedet ved kabellengde 10 km	44
4.5	Linjespenning i feilstedet ved kabellengde 10 km	44
4.6	Fasespenning i feilstedet ved kabellengde 20 km	44
4.7	Linjespenning i feilstedet ved kabellengde 20 km	45
4.8	Fasespenning i feilstedet ved kabellengde 30 km	45
4.9	Linjespenning i feilstedet ved kabellengde 30 km	45
4.10	Sekvensimpedanser sett fra feilstedet ved 50Hz og kabellengde 10 km.	45
4.11	Inngangsverdier	47
5.1	Kabelparametre	53
5.2	Motorparametre	53
6.1	Ønskede modell-verdier	64
6.2	Måleresultater	64
6.3	Kortslutningstest	65
6.4	Strømmåling	66
D.1	Forklaring til inndata	97

A Forkortelser og ordforklaringer

Forkortelser

IGBT Insulated gate bipolar transistor.

RMS Root Mean Square.

XLPE tverrbundet polyetylen.

Ordliste

ATP Er en programvare for simulering av transiente elektromagnetiske fenomen.

ATPDraw Er et grafisk brukergrensesnitt for ATP.

dielektrisk materiale Er et elektrisk isolerende stoff som kan polariseres hvis det plasseres i et elektrisk felt. Brukes eksempelvis i kondensatorer..

flertrådet En leder bestående av flere tråder, i motsetning til entrådet ledere som består av én metalltråd. Trådene er vanligvis snodd eller tvinnet..

kompressor En maskin øker trykket i en fluid med den hensikt å transportere fluiden..

konsentrisk Med felles midtpunkt i sentrum av en sirkel. .

MATLAB (Matrix Laboratory) er et avansert matematikkprogram med eget skript-språk. .

offshore En betegnelse brukt i petroleumsindustrien om noe som er til havs, langt fra land..

overstrømbeskyttelse Automatisk beskyttelse mot overbelastning.

peroksider En kjemisk forbindelse av oksider med to sammenhengende oksygenatomer..

PowerFactory Er en programvare for å analysere kraftsystem .

pumpe Anretning til å øke trykket i f.eks. en beholder eller rør.

reservoar Område under grunnen der det befinner seg hydrokarboner.

Simulink Er et program basert og integrert med Matlab som med et grafisk brukergrensesnitt kan analysere dynamiske system .

strømfortrengning Intern elektromagnetisk effekt som øker den reelle resistive motstanden i en kabel med økende frekvens.

virkningsgrad Er et på mål på hvor mye av den leverte effekten til en maskin som blir utnyttet..

våtgasskompressor Kompressor som kan pumpe en blanding av gass og væske.

øydrift Drift av kraftnett isolert fra andre sentralnett.

B Utstysrliste

Referanse	Fabrikant	Modell	Nummer
1	Fluke	430	HVL 13
2	Fluke	430	HVL 12
3	Oscilloskop	JW	5426
4	Terco	MV1420	HVL 10
5	Terco	MV1972	HVL 11
6	Electrotechnische Werkstätten	DG2416	34027
7	ABB	ACS800	1071003899
8	ABB	M3AA132M 4	HVL 09
9	Hioki	DT4282	HVL



(a) Transformator fra lab



(b) Strømkilde



(c) Motor



(d) MV1420



(e) Synkronmotor og omformer



(f) Fluke-måleinstrument

Figur B.1: Utstyr

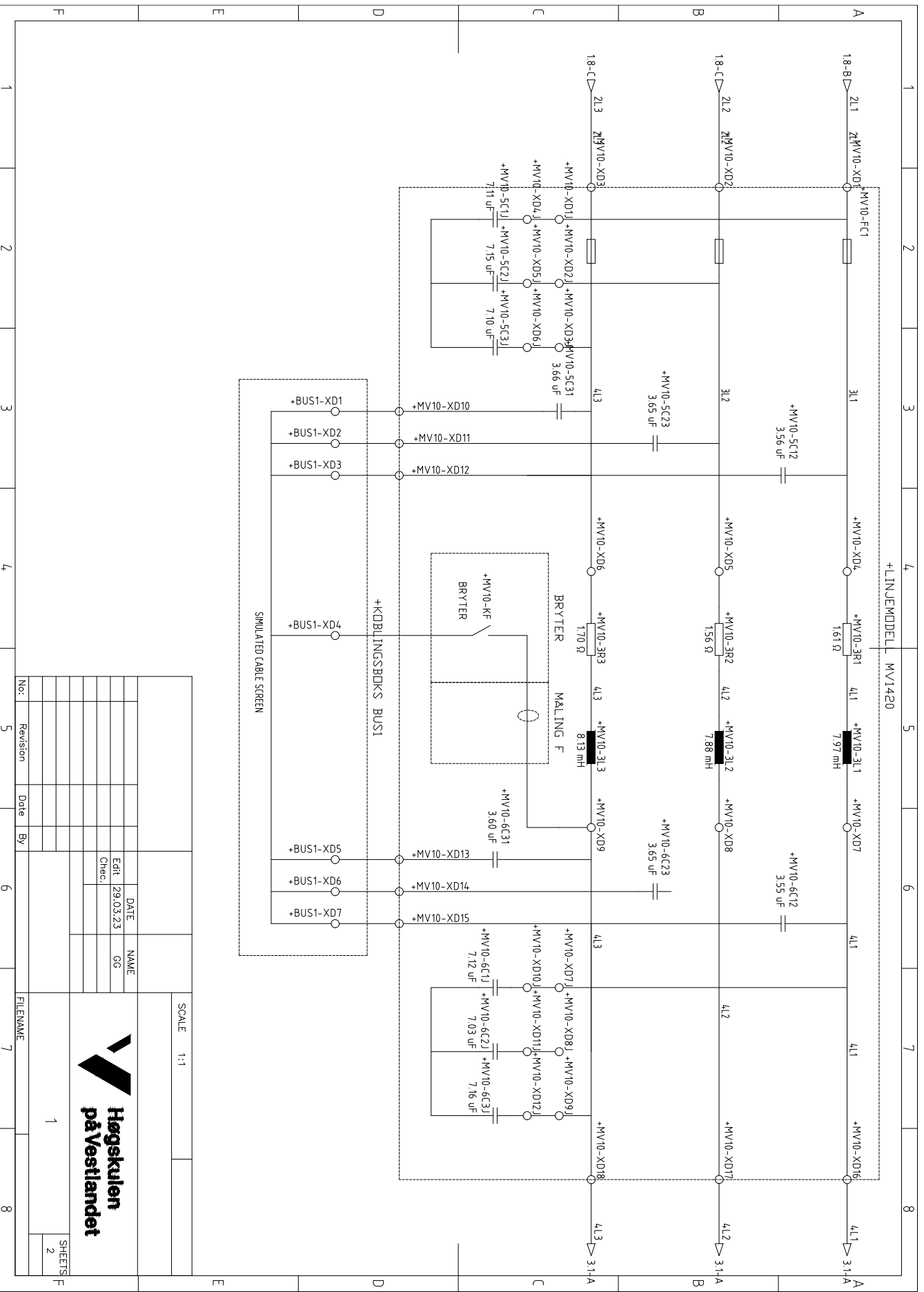
C Tekniske tegninger av laboratoriumoppkobling

C.1 AutoCAD

Vedlagte tekniske tegninger er tegnet i AutoCAD Electrical 2022. AutoCAD Electrical er en spesialisert versjon av det tekniske tegneprogrammet AutoCAD og er utviklet av Autodesk. Programvaren kan brukes til å tegne, redigere og dokumentere elektriske systemer. Den skiller seg fra vanlig AutoCAD ved at den også innehar spesifikke verktøy og symbolbibliotek som er tilpasset elektroingeniørfaget.

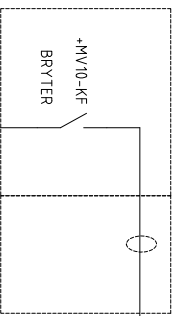
C.2 Tegninger

Som en del av planleggingen før laboratoriumsforøket ble det tegnet et koblingskjema. Det strekker seg over tre ark (sheets").



+LINJEMODELL MV1420

SIMULATED CABLE SCREEN

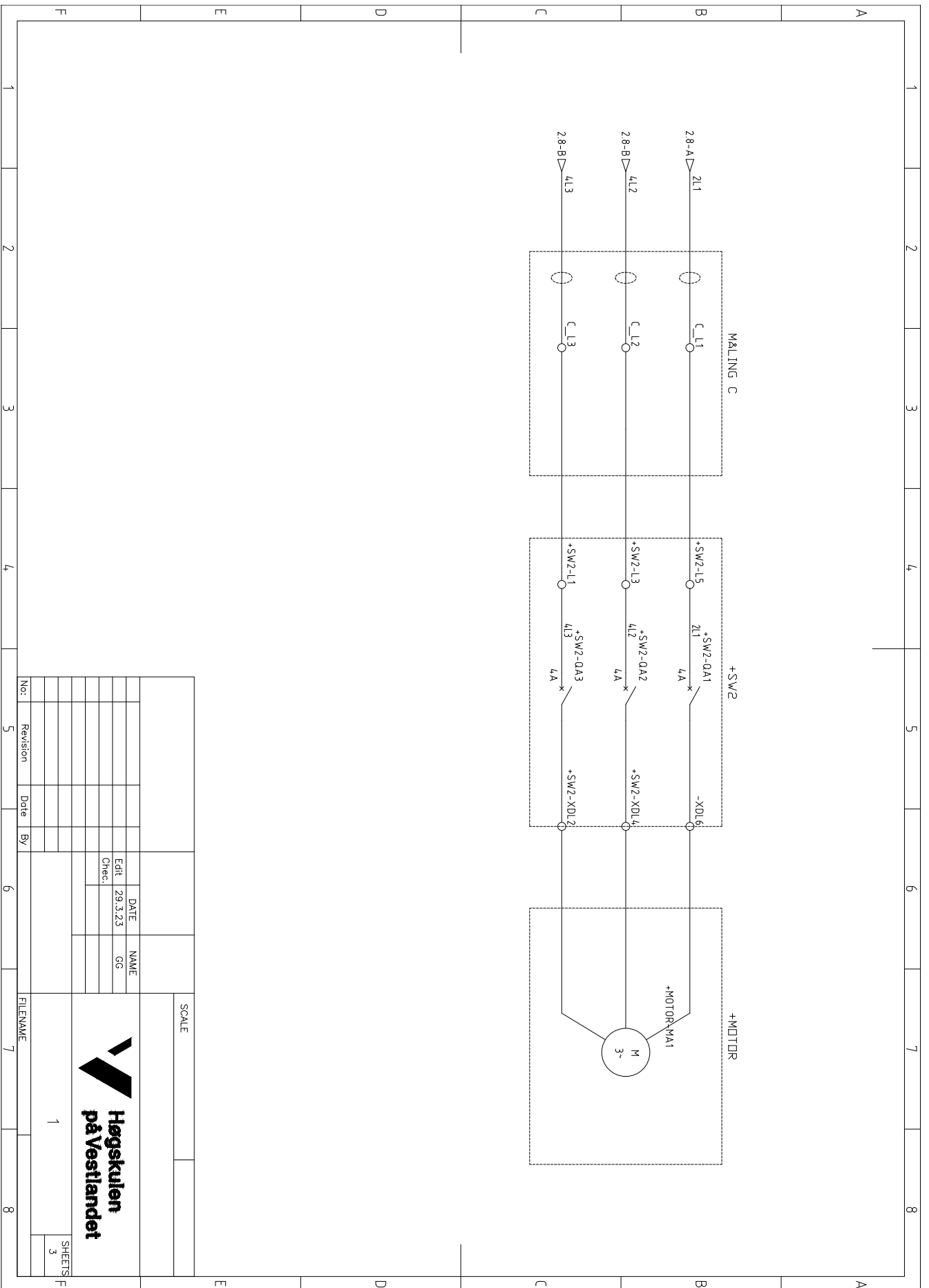


DATE	NAME	SCALE	1:1
29.03.23	GG		
Check			
Edit			

No:	Revision	Date	By	FILENAME

1	2
---	---

SHEETS



No:	Revision	Date	By	FILENAME
	5			

DATE	NAME
29.3.23	GG
	Chac.

SCALE	
Høgskulen på Vestlandet	
1	
SHEETS	
3	

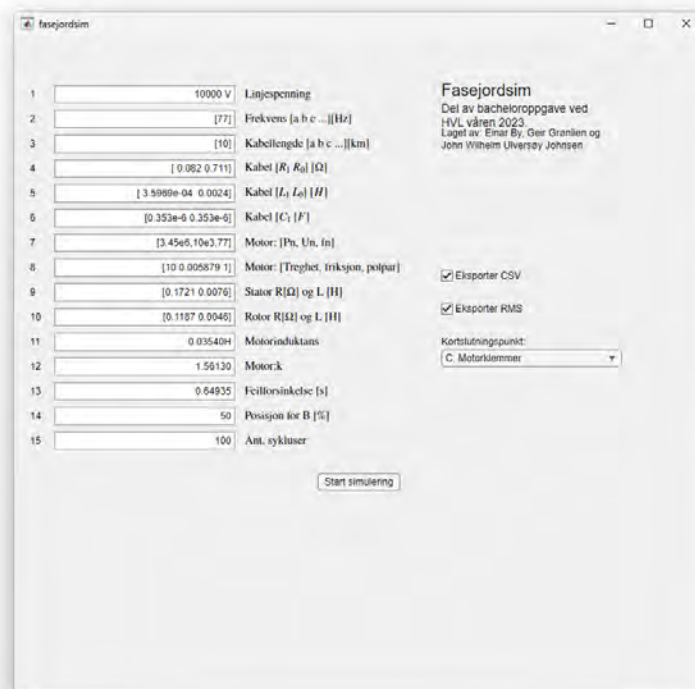
D Brukerdokumentasjon av fasejordsim

D.1 Introduksjon

For å kunne simulere et kraftsystem som beskrevet i denne oppgaven har det blitt laget et grafisk brukergrensesnitt til simuleringsmodellen.

D.2 Installasjon og start

Plasser mappen `fasejordsim3` med alt innhold til en valgfri mappe på datamaskinen. Start simulering ved å åpne `fasejordsim.m` i Matlab og trykk på **Run** for å åpne det grafiske brukergrensesnittet.



Figur D.1: Startside

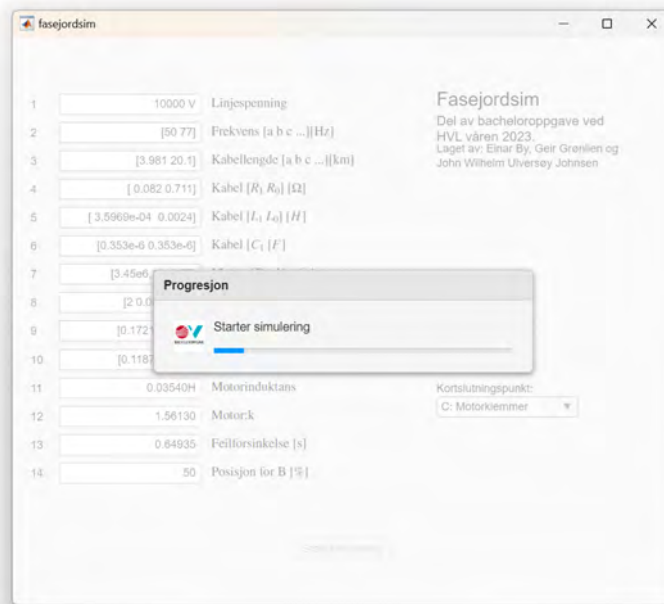
D.3 Inndata

I brukergrensesnittet må brukeren manuelt sette inn systemparametere. I felt 2-10 må parameterne stå mellom hakeparentesene. I felt 2 og 3 kan brukeren velge å simulere flere frekvenser og kabellengder ved å skille verdiene med mellomrom. Tabell D.1 beskriver parameterne i felt 1-15.

Felt	Forklaring	Enhet
1	Linjespenning	V
2	Frekvens: Flere frekvenser kan velges.	Hz
3	Kabellengde: Flere kabellengder kan velges.	m
4	Resistiv kabelimpedans	Ω
5	Kabelinduktans	H
6	Kabelkapasitans	F
7	Motorparametre: $P_n U_n f_n$	W, V, Hz
8	Motorparametre: Tregghet, friksjon og polpar	
9	Motorparametre: Statormotstand	Ω og H
10	Motorparametre: Rotormotstand	Ω og H
11	Motorparametre: Magnetiseringsinduktans	H
12	Motorparametre: Linjær lastkonstant	
13	Tidspunkt for feilinnkobling	s
14	Posisjon for punkt B	V
15	Antall sykluser av grunnfrekvens (2) som skal simuleres	V

Tabell D.1: Forklaring til inndata

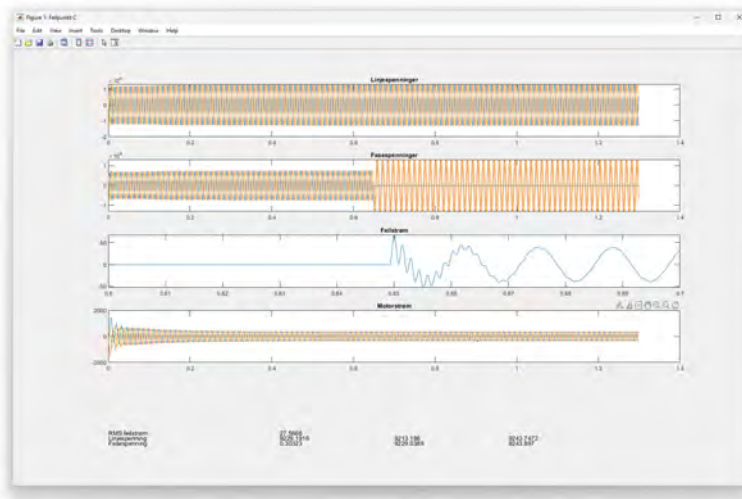
Dersom det er ønskelig å eksportere målingene til filer må **Eksporter CSV** velges. Datafilene er beskrevet i seksjon D.3.1. **Eksporter RMS**-valget viser RMS-data for målingene i resultatvinduet. Det kan velges hvor fase til jord-kortslutningen skal innkobles i **Kortslutningspunkt**. Trykk på **Start simulering** når ønskede parametre er satt. Simuleringen vil da starte, vist i figur D.3



Figur D.2: Startside

D.3.1 Utdata

Resultatene vil grafisk vises i et nytt figurvindu. Den produserte Matlab-variabelen **data** inneholder alle måleresultatene.



Figur D.3: Startside

Dersom det er valgt å lagre simuleringresultatene vil disse bli eksportert til en csv-fil i mappen **Resultat**, som er plassert sammen med matlab-filen. Filene blir sortert i undermappene A, B og C etter hvor målingene er gjort. Filnavnet beskriver datainnholdet og er

i følgende format:

```
sim(målepunkt)_(måling)_k(kortslutningspunkt)_(kabel lengde)m_(B posisjon)pct_( $U_n$ )V_(f)hz.csv
```

Eksempel:

Filnavn: .../fasejordsim3/resultat/A/sim_C_I_f_kC_10000m_b50pct_10000V_77hz.csv

- Måledata fra målepunkt A
- Kortslutning i punkt C
- Måleresultat for feilstrømmen I_f .
- Kabellengde 10000m
- B-punktet er plassert ved 50 % av kabelens lengde, målt fra startenden.
- Spenningskilden U_n er på 10000V
- Spenningskilden sin frekvens er på 77Hz

D.3.2 Kjente feil

Simulerings svakheter er diskutert i kapittel 7. Dette programmet er ikke robust konstruert fra et programmeringsperspektiv og det er mulig å have i situasjoner der det slutter å fungere korrekt. Det anbefales at Matlab startes på nytt dersom dette oppstår. Kjente programfeil er:

- Programmet må startes ved å åpne fasejord.m.
- "Change folder" må velges dersom Matlab spør om det når skriptet kjøres.
- Ikke alle måledata vises i resultat-vinduet. Bruk **data**-variabelen for å studere alle resultatene.
- RMS eksporteres ikke til fil.

E Kildekode

E.1 Fourieranalyse med Matlab

```
1 %Fourieranalyse:
2 %filnavn: fourier.m
3 %Versjon 1.2
4 %DEL AV HVL BACHELOROPPGAVE V2023 B023EB-57
5 %Basert pa Matlab hjelpefiler
6 %https://se.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html
7
8 %Inndata
9 T          = 1e-4;          % Samplingperiode
10 f0        = 77;           % Grunnfrekvens
11 nSykluser = 100;          % Analyse maksfrekvens
12 spekter   = [0,200];      % Min, maks-frekvenser
13 dataVar   = data.motor_n;  % Datasett
14 tidKol    = 1;            % Kolonne for tid
15 verdiKol  = 2;            % Kolonne for verdier
16 lagreData = true;         % Lagre data true/false
17 filnavn   = 'fft_analyse.csv' % Filnavn for lagring
18
19
20 %PROGRAMSTART-----
21 Fs        = 1/T;          % Samplingfrekvens
22 %Kalkulerer punkter for n-syklyser
23 nPunkter  = round(nSykluser*1/f0*Fs);
24 %Tiddata forkortet til siste nSykluser
25 t         = dataVar(end-nPunkter:end,tidKol);
26 %Amplitude forkortet til siste nSykluser
27 y         = dataVar(end-nPunkter:end,verdiKol);
28 L         = length(t);
29 %Lag frekvensmatrise
30 f         = Fs*(0:(L/2))/L;
```

```

31 %Sett min/maks f for plot av fourieranalyse
32 fmin      = round(spekter(1,1)*((nSykluser)/77)+1);
33 fmaks     = round(spekter(1,2)*((nSykluser)/77)+1);
34 %Fourieranalyse for ensidig spektrum
35 Y         = fft(y);
36 P2        = abs(Y/L);
37 P1        = P2(1:L/2+1);
38 P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
39 %Sla sammen fourier f med amp
40 fftResultat = [transpose(f), P1];
41 % Plot grafer
42 figure('Name','Grafer');
43 hold on;
44 subplot(2, 1, 1);
45 plot(t,y);
46 title("Inndata");
47 xlabel('Tid (s)');
48 ylabel('Amplitude');
49 subplot(2, 1, 2);
50 plot(fftResultat(1:fmaks,1),fftResultat(1:fmaks,2), '
      LineWidth',2) ;
51 title("FFT-analyse");
52 xlabel("f [Hz]");
53 ylabel("Amplitude");
54 hold off;
55
56 %Lagre data
57 if lagreData
58     writematrix(fftResultat,filnavn)
59 end
60
61 %Rydd opp i variabler
62 clearvars T Fs f0 nSykluser dataVar ...
63 fmin fmaks filnavn lagreData y t P1 P2 ...
64 f L Y spekter verdiKol tidKol nPunkter;

```

E.2 Symmetriske komponenter i Matlab

```
1 %Kortslutningsberegning med symmetriske komponenter:
2 %filnavn: fasejordsym_r4.m
3 %Versjon 1.4
4 %DEL AV HVL BACHELOROPPGAVE V2023 B023EB-57
5
6 clc;clear all;
7
8 U          = 10e3/sqrt(3);          % Tilfort spenning
9 s          = 0.00575;              % Slip [%]
10 l         = 20;                   % Lengde [km]
11 f         = 77;                   % Frekvens [Hz]
12
13 Linje1_andel = 0.5;                % Variabel laget for
    fremtidig utvidelse. Pr. na 0.5.
14 Linje2_andel = 1-Linje1_andel;    % Variabel laget for
    fremtidig utvidelse. Pr. na 0.5.
15
16
17 % VSD
18 Z_vsd      = 0.001;
19
20 % Linje
21 C          = 0.353e-6;            %Kapasitans pr. km [F]
22
23 if f == 25
24     z_L_p = 0.079 + 0.056i        % Linjeparametre for +/-
        systemet (R + jX)
25     z_L_0 = 0.377 + 0.566i;      % Linjeparametre for 0-
        systemet (R + jX)
26 elseif f == 35
27     z_L_p = 0.0802 + 0.0788i;
28     z_L_0 = 0.5106 + 0.6388i;
29 elseif f == 50
30     z_L_p = 0.082 + 0.113i;
31     z_L_0 = 0.711 + 0.748i;
32 elseif f == 60
33     z_L_p = 0.083 + 0.135i;
34     z_L_0 = 0.808 + 0.777i;
35 elseif f == 65
```

```

36     z_L_p = 0.084 + 0.146i;
37     z_L_0 = 0.845 + 0.786i;
38 elseif f == 77
39     z_L_p = 0.086 + 0.172i;
40     z_L_0 = 0.935 + 0.809i;
41 else
42     disp('Ukjent frekvens.')
43 end
44
45
46 Z_L_1_p      = z_L_p*1*Linje1_andel;           % Linjeparametre
         for +/- systemet - PI-ledd 1 (R + jX)
47 Z_L_1_0      = z_L_0*1*Linje1_andel;           % Linjeparametre
         for 0-systemet - PI-ledd 1 (R + jX)
48 Z_L_2_p      = z_L_p*1*Linje2_andel;           % Linjeparametre
         for +/- systemet - PI-ledd 2 (R + jX)
49 Z_L_2_0      = z_L_0*1*Linje2_andel;           % Linjeparametre
         for 0-systemet - PI-ledd 2 (R + jX)
50 Z_C_1        = 1/(j*(C*1/4)*2*pi*f);           % Kapasitans - PI
         -ledd 1
51 Z_C_2        = 1/(j*(C*1/4)*2*pi*f);           % Kapasitans - PI
         -ledd 2
52
53 % Motor
54 R_IM_1        = 0.1721;                         % Resistans i
         statorvikling [ohm]
55 X_IM_1        = 3.672j;                         % Induktiv
         reaktans i statorvikling [ohm]
56 X_IM_m        = 83.5j;                          %
         Magnetiseringsreaktans [ohm]
57 R_IM_2        = 0.1187;                         % Resistans i
         rotorvikling [ohm]
58 X_IM_2        = 2.212j;                         % Induktiv
         reaktans i rotorvikling [ohm]
59
60
61 % Motorekvivalent
62 Z_motor_p = R_IM_1 + X_IM_1 + (1 / (1/(X_IM_m) + 1/((R_IM_2/s
         ) + X_IM_2))))); % Motorekvivalent for plussystemet [ohm
         ]
63 Z_motor_n = R_IM_1 + X_IM_1 + (1 / (1/X_IM_m + 1/((R_IM_2/(2-

```

```

        s)) + X_IM_2))))); % Motorekvivalent for minussystemet [
        ohm]
64
65 % Elementer for positiv sekvens
66 yp11 = 1/Z_vsd + 1/Z_C_1 + 1/Z_L_1_p;
67 yp12 = - (1/Z_L_1_p);
68 yp13 = - (0);
69 yp21 = - (1/Z_L_1_p);
70 yp22 = 1/Z_L_1_p + 1/Z_C_1 + 1/Z_C_2 + 1/Z_L_2_p;
71 yp23 = - (1/Z_L_2_p);
72 yp31 = - (0);
73 yp32 = - (1/(Z_L_2_p));
74 yp33 = 1/Z_L_2_p + 1/Z_C_2 + 1/Z_motor_p;
75
76 % Elementer for negativ sekvens
77 yn11 = yp11;
78 yn12 = yp12;
79 yn13 = yp13;
80 yn21 = yp21;
81 yn22 = yp22;
82 yn23 = yp23;
83 yn31 = yp31;
84 yn32 = yp32;
85 yn33 = 1/Z_L_2_p + 1/Z_C_2 + 1/Z_motor_n;
86
87 % Elementer for nullsekvens
88 y011 = 1/Z_C_1 + 1/Z_L_1_0;
89 y012 = - (1/Z_L_1_0);
90 y013 = - (0);
91 y021 = - (1/Z_L_1_0);
92 y022 = 1/Z_L_1_0 + 1/Z_C_1 + 1/Z_C_2 + 1/(Z_L_2_0);
93 y023 = - (1/(Z_L_2_0));
94 y031 = - (0);
95 y032 = - (1/(Z_L_2_0));
96 y033 = 1/(Z_L_2_0) + 1/(Z_C_2);
97
98
99 % Oppsett matriser
100 Y_p = [yp11 yp12 yp13; yp21 yp22 yp23; yp31 yp32 yp33];
101 Y_n = [yn11 yn12 yn13; yn21 yn22 yn23; yn31 yn32 yn33];
102 Y_0 = [y011 y012 y013; y021 y022 y023; y031 y032 y033];

```



```

103
104
105
106 I_transformation = U/Z_vsd; %
      Kildetransformasjon
107 I = [I_transformation; 0; 0];
108 U = linsolve(Y_p,I); %
      Spenninger i nodene for feil
109
110 % Feilanalyse symkomp
111
112 Z_p = inv(Y_p);
113 Z_n = inv(Y_n);
114 Z_0 = inv(Y_0);
115
116
117 I_f=(3*U(3,1))/(Z_p(3,3)+Z_n(3,3)+Z_0(3,3));
118 I_0=I_f/3;
119
120
121 % A-matrise
122 A =[1 1 1;
123     1 1*exp(j*deg2rad(240)) 1*exp(j*deg2rad(120));
124     1 1*exp(j*deg2rad(120)) 1*exp(j*deg2rad(240))];
125
126 U3a_0 = - Z_0(3,3) * I_0; %
      Nullsystemets fase-jord spenning i node 3 nar feilen
      ligger i node 3.
127 U3a_1 = U(3,1) - Z_p(3,3) * I_0; %
      Plussystemets fase-jord spenning i node 3 nar feilen
      ligger i node 3.
128 U3a_2 = - Z_n(3,3) * I_0; %
      Minussystemets fase-jord spenning i node 3 nar feilen
      ligger i node 3.
129
130 U2a_0 = - Z_0(2,3) * I_0; %
      Nullsystemets fase-jord spenning i node 2 nar feilen
      ligger i node 3.
131 U2a_1 = U(2,1) - Z_p(2,3) * I_0; %
      Plussystemets fase-jord spenning i node 2 nar feilen
      ligger i node 3.

```

```

132 U2a_2 = - Z_n(2,3) * I_0; %
      Minussystemets fase-jord spenning i node 2 nar feilen
      ligger i node 3.
133
134 U1a_0 = - Z_0(1,3) * I_0; %
      Nullsystemets fase-jord spenning i node 1 nar feilen
      ligger i node 3.
135 U1a_1 = U(1,1) - Z_p(1,3) * I_0; %
      Plussystemets fase-jord spenning i node 1 nar feilen
      ligger i node 3.
136 U1a_2 = - Z_n(1,3) * I_0; %
      Minussystemets fase-jord spenning i node 1 nar feilen
      ligger i node 3.
137
138 U3abc = A * [U3a_0; U3a_1; U3a_2]; % U3abc =
      Matrise for fase-jord spenning i node 3.
139 U2abc = A * [U2a_0; U2a_1; U2a_2]; % U2abc =
      Matrise for fase-jord spenning i node 2.
140 U1abc = A * [U1a_0; U1a_1; U1a_2]; % U1abc =
      Matrise for fase-jord spenning i node 1.
141
142
143
144 % Linjespenninger node 1
145 U1ABC = [U1abc(1,1)-U1abc(2,1); % U1ABC =
      Matrise for linjespenninger i node 1.
146          U1abc(2,1)-U1abc(3,1);
147          U1abc(3,1)-U1abc(1,1)];
148
149 % Linjespenninger node 2
150 U2ABC = [U2abc(1,1)-U2abc(2,1); % U2ABC =
      Matrise for linjespenninger i node 2.
151          U2abc(2,1)-U2abc(3,1);
152          U2abc(3,1)-U2abc(1,1)];
153
154 % Linjespenninger node 3
155 U3ABC = [U3abc(1,1)-U3abc(2,1); % U3ABC =
      Matrise for linjespenninger i node 3.
156          U3abc(2,1)-U3abc(3,1);
157          U3abc(3,1)-U3abc(1,1)];
158

```

```

159
160 % Presenterer resultater
161
162 % Spenninger i nodene og strøm i motor for feil
163 [U1theta, U1mag] = cart2pol(real(U(1,1)),imag(U(1,1)));
164 [U2theta, U2mag] = cart2pol(real(U(2,1)),imag(U(2,1)));
165 [U3theta, U3mag] = cart2pol(real(U(3,1)),imag(U(3,1)));
166 Im = U(3,1)/Z_motor_p;
167 [Imtheta, Immag] = cart2pol(real(Im(1,1)),imag(Im(1,1)));
168
169
170 % Fasespenninger node 1 ved feil i node 3
171 [Uf1_1theta, Uf1_1mag] = cart2pol(real(U1abc(1,1)),imag(U1abc
    (1,1)));
172 [Uf2_1theta, Uf2_1mag] = cart2pol(real(U1abc(2,1)),imag(U1abc
    (2,1)));
173 [Uf3_1theta, Uf3_1mag] = cart2pol(real(U1abc(3,1)),imag(U1abc
    (3,1)));
174
175 % Linjespenninger node 1 ved feil i node 3
176 [U12_1theta, U12_1mag] = cart2pol(real(U1ABC(1,1)),imag(U1ABC
    (1,1)));
177 [U23_1theta, U23_1mag] = cart2pol(real(U1ABC(2,1)),imag(U1ABC
    (2,1)));
178 [U31_1theta, U31_1mag] = cart2pol(real(U1ABC(3,1)),imag(U1ABC
    (3,1)));
179
180
181 % Fasespenninger node 2 ved feil i node 3
182 [Uf1_2theta, Uf1_2mag] = cart2pol(real(U2abc(1,1)),imag(U2abc
    (1,1)));
183 [Uf2_2theta, Uf2_2mag] = cart2pol(real(U2abc(2,1)),imag(U2abc
    (2,1)));
184 [Uf3_2theta, Uf3_2mag] = cart2pol(real(U2abc(3,1)),imag(U2abc
    (3,1)));
185
186 % Linjespenninger node 2 ved feil i node 3
187 [U12_2theta, U12_2mag] = cart2pol(real(U2ABC(1,1)),imag(U2ABC
    (1,1)));
188 [U23_2theta, U23_2mag] = cart2pol(real(U2ABC(2,1)),imag(U2ABC
    (2,1)));

```

```

189 [U31_2theta, U31_2mag] = cart2pol(real(U2ABC(3,1)), imag(U2ABC
      (3,1)));
190
191
192 % Fasespenninger node 3 ved feil i node 3
193 [Uf1_3theta, Uf1_3mag] = cart2pol(real(U3abc(1,1)), imag(U3abc
      (1,1)));
194 [Uf2_3theta, Uf2_3mag] = cart2pol(real(U3abc(2,1)), imag(U3abc
      (2,1)));
195 [Uf3_3theta, Uf3_3mag] = cart2pol(real(U3abc(3,1)), imag(U3abc
      (3,1)));
196
197 % Linjespenninger node 3 ved feil i node 3
198 [U12_3theta, U12_3mag] = cart2pol(real(U3ABC(1,1)), imag(U3ABC
      (1,1)));
199 [U23_3theta, U23_3mag] = cart2pol(real(U3ABC(2,1)), imag(U3ABC
      (2,1)));
200 [U31_3theta, U31_3mag] = cart2pol(real(U3ABC(3,1)), imag(U3ABC
      (3,1)));
201
202
203 % Utskrift
204 fprintf('Fasespenning fase 1 for feil\n')
205 fprintf('
      -----\n')
206 display(['Uf1 node 1 = ', num2str(U1mag), char(8736), num2str(
      rad2deg(U1theta))])
207 display(['Uf1 node 2 = ', num2str(U2mag), char(8736), num2str(
      rad2deg(U2theta))])
208 display(['Uf1 node 3 = ', num2str(U3mag), char(8736), num2str(
      rad2deg(U3theta))])
209 display(['I_motor = ', num2str(Immag), char(8736), num2str(
      rad2deg(Imtheta))])
210
211 fprintf('\n\n Ved enpolt jordfeil i node 3 \n
      -----\n')
212 [Iftheta, Ifmag] = cart2pol(real(I_f(1,1)), imag(I_f(1,1)));
213 fprintf('If = %f %s %f\n', Ifmag, char(8736), rad2deg(Iftheta
      ));

```

```

214
215
216 fprintf('\n Fasespenninger node 1\n
    -----\n
    n')
217 display(['Uf1 = ', num2str(Uf1_1mag), char(8736), num2str(
    rad2deg(Uf1_1theta))])
218 display(['Uf2 = ', num2str(Uf2_1mag), char(8736), num2str(
    rad2deg(Uf2_1theta))])
219 display(['Uf3 = ', num2str(Uf3_1mag), char(8736), num2str(
    rad2deg(Uf3_1theta))])
220
221 fprintf('\n Linjespenninger node 1\n
    -----\n
    n')
222 display(['U12 = ', num2str(U12_1mag), char(8736), num2str(
    rad2deg(U12_1theta))])
223 display(['U23 = ', num2str(U23_1mag), char(8736), num2str(
    rad2deg(U23_1theta))])
224 display(['U31 = ', num2str(U31_1mag), char(8736), num2str(
    rad2deg(U31_1theta))])
225
226
227 fprintf('\n Fasespenninger node 2\n
    -----\n
    n')
228 display(['Uf1 = ', num2str(Uf1_2mag), char(8736), num2str(
    rad2deg(Uf1_2theta))])
229 display(['Uf2 = ', num2str(Uf2_2mag), char(8736), num2str(
    rad2deg(Uf2_2theta))])
230 display(['Uf3 = ', num2str(Uf3_2mag), char(8736), num2str(
    rad2deg(Uf3_2theta))])
231
232 fprintf('\n Linjespenninger node 2\n
    -----\n
    n')
233 display(['U12 = ', num2str(U12_2mag), char(8736), num2str(
    rad2deg(U12_2theta))])
234 display(['U23 = ', num2str(U23_2mag), char(8736), num2str(
    rad2deg(U23_2theta))])
235 display(['U31 = ', num2str(U31_2mag), char(8736), num2str(

```

```

        rad2deg(U31_2theta))])
236
237
238 fprintf('\n Fasespenninger node 3\n
        -----\
        n')
239 display(['Uf1 = ', num2str(Uf1_3mag), char(8736), num2str(
        rad2deg(Uf1_3theta))])
240 display(['Uf2 = ', num2str(Uf2_3mag), char(8736), num2str(
        rad2deg(Uf2_3theta))])
241 display(['Uf3 = ', num2str(Uf3_3mag), char(8736), num2str(
        rad2deg(Uf3_3theta))])
242
243 fprintf('\n Linjespenninger node 3\n
        -----\
        n')
244 display(['U12 = ', num2str(U12_3mag), char(8736), num2str(
        rad2deg(U12_3theta))])
245 display(['U23 = ', num2str(U23_3mag), char(8736), num2str(
        rad2deg(U23_3theta))])
246 display(['U31 = ', num2str(U31_3mag), char(8736), num2str(
        rad2deg(U31_3theta))])
247
248
249
250 % Utskrift av fasevektorer i node 3
251 figure;
252 v2 = compass(U3abc(2,1));
253 hold on
254 v3 = compass(U3abc(3,1));
255 v1 = compass(U3abc(1,1));
256
257 % Utskrift av linjespenninger i node 3
258 figure;
259 v12 = compass(U3ABC(1,1));
260 hold on
261 v23 = compass(U3ABC(2,1));
262 v31 = compass(U3ABC(3,1));
263
264
265 % Sekvensimpedans sett fra feilstedet

```

```

266
267 fprintf('\n\n Sekvensimpedanser sett fra node 3\n
      -----\n
      n')
268
269 display(['Z0 = ', num2str(abs(Z_0(3,3))), char(8736), num2str(
      rad2deg(angle(Z_0(3,3))))])
270 display(['Z1 = ', num2str(abs(Z_p(3,3))), char(8736), num2str(
      rad2deg(angle(Z_p(3,3))))])
271 display(['Z2 = ', num2str(abs(Z_n(3,3))), char(8736), num2str(
      rad2deg(angle(Z_n(3,3))))])

```

E.3 Jordfeilsimulator

```
1 % Fasejordsim
2 % Filnavn: Fasejordsim.m
3 % Tilhørende filer: fasejordsim_gui.m, fasejordsim.slx
4 % Versjon 1.3
5 % DEL AV HVL BACHELOROPPGAVE V2023, B023EB-57
6 % Se brukerdokumentasjon i hovedoppgaven
7
8 clc; clear;
9
10 %BRUKERPARAMETRE%
11 %Modell og simuleringsparametre
12 simparm.sampleRate = 1e-4; %[1/s] (1e-4 er standard)
13
14 %Last data fra GUI
15 [guiInndata, guihandle] = fasejordsim_gui;
16 [simparm, prograrm, motor, kabel] = lastData(guiInndata,
    simparm);
17 %Sett opp progresjonsmaler
18 progresjon = uiprogresdlg(guihandle, 'Title', 'Progresjon', ...
19     'Message', 'Starter simulering', 'Icon', 'grafikk/hvlsubsea.
    png');
20 progresjon.Value = 0.10;
21 antallSteg = size(guiInndata.f,2)*size(guiInndata.1,2); %n
    simuleringer
22 progPerSteg = 0.9/antallSteg; % pct
    pr sim
23
24 %Fjern evt. 0 i kabellengde
25 kabel.linjeLengde = removeZero(kabel.linjeLengde );
26 i=1; %Teller for kabeliterasjoner
27 j=1; %Teller for frevenser
28 for f = simparm.f %Ga gjennom alle
    frekvenser
29 for l = kabel.linjeLengde %Ga gjennom alle
    lengder
30
31 %Konfigurerer feilkildene og malepunkt B
32 kabel.kabel1 = kabel.Bposisjon/100; %Andel kabel del 1
33 kabel.kabel2 = 1-kabel.kabel1; %Andel kabel del 2
```



```

34  simparm.tA=guiInndata.nsyklus/f + 1;      %Tid etter
      simuleringssslutt
35  simparm.tB=guiInndata.nsyklus/f + 1;      %Tid etter
      simuleringssslutt
36  simparm.tC=guiInndata.nsyklus/f + 1;      %Tid etter
      simuleringssslutt
37
38  %Aktiver feilpunkt
39  switch simparm.feilpunkt
40      case 'A'
41          simparm.tA=simparm.tFeil;
42      case 'B'
43          simparm.tB=simparm.tFeil;
44      case 'C'
45          simparm.tC=simparm.tFeil;
46      otherwise
47          %disp('Ingen kortslutningsfeil');
48  end
49
50
51  %Kjorer simulering
52  simuleringsdata = sim('fasejordsim_simulink.slx');
53
54  %Dekomponer data til array for CSV-eksport
55  [data.A_UL, data.A_Uf, data.A_I, data.A_I_f, ...
56      data.B_UL, data.B_Uf, data.B_I, data.B_I_f, ...
57      data.C_UL, data.C_Uf, data.C_I, data.C_I_f, data.motor_n]
58      ...
59      = kombinerTidData(simuleringsdata);
60
61  if progparm.lagreAnalyse == true;
62      %Eksporter data. Filnavn: sim[malepunkt]_[maling]_k[
63          kortslutningspunkt]_[kabel lengde]m_[plassering av B i
64          % av total]pct_[U_n]V_[frekvens]hz.csv
65      filString = simparm.feilpunkt+"_"+ l*1000 +"m_b"+ kabel.
66          kabel1*100 +"pct_"+simparm.Un+"V_" + f + "hz.csv";
67      lagCSV(data, filString);
68  end
69
70  if progparm.lagreRMS == true
71      %RMS-utregninger

```

```

68     simparm.periode = round(1/f * 1/simparm.sampleRate);
69     simparm.rmsPeriodes = 20;
70     data.RMS.B_UL(i,1) = 1;
71     data.RMS.B_UL(i,2) = rms(data.C_UL(end-simparm.rmsPeriodes
        *simparm.periode:end,2));
72     data.RMS.B_UL(i,3) = rms(data.C_UL(end-simparm.rmsPeriodes
        *simparm.periode:end,3));
73     data.RMS.B_UL(i,4) = rms(data.C_UL(end-simparm.rmsPeriodes
        *simparm.periode:end,4));
74     data.RMS.B_Uf(i,1) = 1;
75     data.RMS.B_Uf(i,2) = rms(data.C_Uf(end-simparm.rmsPeriodes
        *simparm.periode:end,2));
76     data.RMS.B_Uf(i,3) = rms(data.C_Uf(end-simparm.rmsPeriodes
        *simparm.periode:end,3));
77     data.RMS.B_Uf(i,4) = rms(data.C_Uf(end-simparm.rmsPeriodes
        *simparm.periode:end,4));
78     data.RMS.B_I_f(i,1) = 1;
79     data.RMS.B_I_f(i,2) = rms(data.C_I_f(end-simparm.
        rmsPeriodes*simparm.periode:end,2));
80     data.RMS.B_I_f(i,3) = rms(data.C_I_f(end-simparm.
        rmsPeriodes*simparm.periode:end,3));
81     data.RMS.B_I_f(i,4) = rms(data.C_I_f(end-simparm.
        rmsPeriodes*simparm.periode:end,4));
82 end
83
84 i=i+1; %Antall iterasjoner i l = linjelengde
85 progresjon.Message = 'Simulering pagar...';
86 progresjon.Value = progresjon.Value+progPerSteg;
87 end
88
89 j=j+1;
90 end
91
92
93
94 %%%
95
96 message = {'Simulering ferdig!','Resultatene er lagret i "
        Resultatater"-mappen og Matlab-variablen "simuleringsdata".
        '};
97 uialert(guihandle,message,'Ferdig',...

```

```

98 'Icon','success','CloseFcn', @(h,e)lukkProgram(guihandle));
99 close(progresjon);
100
101
102 plotData(data, progparm.lagreRMS);
103 clearvars -except data;      %Rydd ubrukte variabler
104
105
106 %Lager tabeller med tid og data
107 function [A_UL, A_Uf, A_I, A_I_f ,B_UL, B_Uf, B_I, B_I_f ,
          C_UL, C_Uf, C_I, C_I_f, motor_n] = kombinerTidData(data)
108     %Punkt A
109     A_UL    = [data.UL_A.time, data.UL_A.signals.values];
110     A_Uf    = [data.Uf_A.time, data.Uf_A.signals.values];
111     A_I     = [data.I_A.time, data.I_A.signals.values];
112     A_I_f   = [data.I_f_A.time, data.I_f_A.signals.values];
113     %Punkt B
114     B_UL    = [data.UL_B.time, data.UL_B.signals.values];
115     B_Uf    = [data.Uf_B.time, data.Uf_B.signals.values];
116     B_I     = [data.I_B.time, data.I_B.signals.values];
117     B_I_f   = [data.I_f_B.time, data.I_f_B.signals.values];
118
119     %Punkt C
120     C_UL    = [data.UL_C.time, data.UL_C.signals.values];
121     C_Uf    = [data.Uf_C.time, data.Uf_C.signals.values];
122     C_I     = [data.I_C.time, data.I_C.signals.values];
123     C_I_f   = [data.I_f_C.time, data.I_f_C.signals.values];
124
125     %Motor
126     motor_n = [data.motor_n.time, data.motor_n.signals.
                values];
127 end
128
129 %Funksjon som lager CSV av inndata
130 function lagCSV(innData,filNavn)
131     %fullstendige mapper
132     filMappe = fileparts(mfilename('fullpath'));
133     %A
134     writematrix(innData.A_UL,(filMappe+"\resultat\A\
                sim_A_UL_k"+filNavn));
135     writematrix(innData.A_Uf,(filMappe+"\resultat\A\

```

```

        sim_A_Uf_k"+filNavn));
136 writematrix(innData.A_I,(filMappe+"\resultat\A\sim_A_I_k
    "+filNavn));
137 writematrix(innData.A_I_f,(filMappe+"\resultat\A\
    sim_A_I_f_k"+filNavn));
138 %B
139 writematrix(innData.B_UL,(filMappe+"\resultat\B\
    sim_B_UL_k"+filNavn));
140 writematrix(innData.B_Uf,(filMappe+"\resultat\B\
    sim_B_Uf_k"+filNavn));
141 writematrix(innData.B_I,(filMappe+"\resultat\B\sim_B_I_k
    "+filNavn));
142 writematrix(innData.B_I_f,(filMappe+"\resultat\B\
    sim_B_I_f_k"+filNavn));
143 %C
144 writematrix(innData.C_UL,(filMappe+"\resultat\C\
    sim_C_UL_k"+filNavn));
145 writematrix(innData.C_Uf,(filMappe+"\resultat\C\
    sim_C_Uf_k"+filNavn));
146 writematrix(innData.C_I,(filMappe+"\resultat\C\sim_C_I_k
    "+filNavn));
147 writematrix(innData.C_I_f,(filMappe+"\resultat\C\
    sim_C_I_f_k"+filNavn));
148 %Motor
149 writematrix(innData.C_I_f,(filMappe+"\resultat\C\
    sim_motor_n"+filNavn));
150 end
151
152 %Funksjon som fjerner 0 fra et array
153 function resultat = removeZero(A)
154     i = find(A == 0);
155     A(i) = [];
156     resultat = A;
157 end
158
159 %GUI
160 function [s,p,m,k] = lastData(inn, simparm)
161     s=simparm;
162     % p=progparm;
163     % m=motor;
164     % k=kabel;

```

```

165     %Simparm
166     s.Un = inn.un;
167     s.feilpunkt = inn.kortslutning;
168     s.tFeil = inn.tk;
169     s.f = inn.f;
170     s.sykluser = inn.nsyklus;
171
172     %Progparm
173     p.lagreAnalyse = inn.csv;
174     p.lagreRMS = inn.rms;
175
176     %Motor
177     m.motor_p1 = inn.p1;
178     m.motor_p2 = inn.p2;
179     m.stator = inn.ms;
180     m.rotor = inn.mr;
181     m.Lm = inn.ml;
182     m.motor_w_T_gain = inn.mk;
183
184     %Kabel
185     k.linjeLengde = inn.l;
186     k.r_l = inn.lr;
187     k.x_l = inn.ll;
188     k.c_l = inn.lc;
189     k.Bposisjon = inn.bpos;
190 end
191
192 %Lukker GUI
193 function lukkProgram(fig)
194     close(fig);
195 end
196
197 function plotData(data, RMS)
198 %Funksjon som plotter data i punkt C
199 graf = figure('Name', 'Feilpunkt C');
200 graf.WindowState = 'Maximized';
201 % Plot 1
202 subplot(5, 1, 1);
203 plot(data.C_UL(:,1),data.C_UL(:,2:4));
204 title('Linjespenninger');
205

```

```

206 % Plot 2
207 subplot(5, 1, 2);
208 plot(data.C_Uf(:,1),data.C_Uf(:,2:4));
209 title('Fasespenninger');
210
211 % Plot 3
212 subplot(5, 1, 3);
213 plot(data.C_I_f(:,1),data.C_I_f(:,4));
214 title('Feilstrom');
215 xlim([0.6, 0.7]);
216
217 % Plot 4
218 subplot(5, 1, 4);
219 plot(data.C_I(:,1),data.C_I(:,2:4));
220 title('Motorstrom');
221 %xlim([0.6, 0.7]);
222
223 % Plot 5 (FOR RMS VERDIER)
224 if(RMS)
225 subplot(5, 1, 5);
226 text(0,0.1,"RMS feilstrom:");
227 text(0.3,0.1, num2str(data.RMS.B_I_f(1,4)));
228 text(0.0,0, "Linjespenning");
229 text(0.3,0.0, num2str(data.RMS.B_UL(1,2)));
230 text(0.5,0.0, num2str(data.RMS.B_UL(1,3)));
231 text(0.7,0.0, num2str(data.RMS.B_UL(1,4)));
232 text(0.0,-0.1, "Fasespenning");
233 text(0.3,-0.1, num2str(data.RMS.B_Uf(1,2)));
234 text(0.5,-0.1, num2str(data.RMS.B_Uf(1,3)));
235 text(0.7,-0.1, num2str(data.RMS.B_Uf(1,4)));
236
237 set(gca, 'Visible', 'off'); %Skjuler plot
238 %annotation('textbox', [0.2, 0.2, 0.2, 0.1], 'String', 'Info
      ', 'EdgeColor','red'); %Fremtidig bruk
239 title('RMS-verdier');
240 end
241 end

```

E.4 Jordfeilsimulator GUI

```
1 %!!!!ADVARSEL: PROGRAM KJoRES FRA fasejordsim.m!!!!
2 % Grafisk brukergrensesnitt for fasejordsim
3 % Filnavn: fasejordsim_gui.m
4 % Tilhørende filer: fasejordsim.m, fasejordsim.slx
5 % GUI tilpasset Fasejordsim versjon 1.3
6 % DEL AV HVL BACHELOROPPGAVE V2023, B023EB-57
7 % Se brukerdokumentasjon i hovedoppgaven
8
9 function [utData, guiVindu] = fasejordsim_gui
10     % Lag grensesnitt
11     guiVindu = uifigure('Name', 'fasejordsim');
12     guiVindu.Position = [100 100 700 600];
13     tittel = uilabel(guiVindu,"Position",[450 520 150 32]);
14     tittel.Text = "Fasejordsim";
15     tittel.FontSize = 20;
16     tittel2 = uilabel(guiVindu,"Position",[450 490 200 32]);
17     tittel2.Text = "Del av bacheloroppgave ved HVL varen
18         2023.";
19     tittel2.FontSize = 14;
20     tittel2.WordWrap = "on";
21     tittel3 = uilabel(guiVindu,"Position",[450 460 200 32]);
22     tittel3.Text = "Laget av: Einar By, Geir Gronlien og John
23         Wilhelm Ulversoy Johnsen ";
24     tittel3.WordWrap = "on";
25     tittel3.FontSize = 12;
26
27     %Numeriske innverdier
28     innNavn = {'Linjespenning', 'Frekvens [a b c ...][Hz]', '
29         Kabellengde [a b c ...][km]', 'Kabel  $[R_1 \ R_0]$   $[\Omega]$ ', 'Kabel  $[L_1 \ L_0]$   $[H]$ ', 'Kabel  $[C_1]$ 
30          $[F]$ ', 'Motor:  $[P_n \ U_n \ f_n]$  ', 'Motor: [Treghet,
31         friksjon, polpar]', 'Stator  $R[\Omega]$  og  $L [H]$ ', '
32         Rotor  $R[\Omega]$  og  $L [H]$ ', 'Motorinduktans', 'Motor:
33          $k$ ', 'Feilforsinkelse [s]', 'Posisjon for B  $[\%]$ ', 'Ant.
34         sykluser'};
35     innStandardTall = {10e3
36         ,77,3,4,5,6,7,8,9,1,0.0354,1.5613,50/77,50,100};
37     innStandardTekst = {"", "[77]", "[10]", "[ 0.082 0.711]", "[
38         3.5969e-04 0.0024]", "[0.353e-6 0.353e-6]", "[3.45e6,10
```



```

150 22], 'Items', kortslutningTekst, 'ItemsData',
    kortslutningVerdi, 'Value', kortslutningVerdi(3));
52
53 %OK-knapp
54 startKnapp = uibutton(guiVindu, 'push', 'Text', 'Start
    simulering', 'Position', [300 50 100 22]);
55
56 %Knappefunksjon
57 startKnapp.ButtonPushedFcn = @(src, evt) uiresume(
    guiVindu);
58 uiwait(guiVindu); %Vent pa svar
59
60 utData.un = innVindu{1}.Value;
61 utData.f = str2num(innVindu{2}.Value);
62 utData.l = str2num(innVindu{3}.Value);
63 utData.lr = str2num(innVindu{4}.Value);
64 utData.ll = str2num(innVindu{5}.Value);
65 utData.lc = str2num(innVindu{6}.Value);
66 utData.p1 = str2num(innVindu{7}.Value);
67 utData.p2 = str2num(innVindu{8}.Value);
68 utData.ms = str2num(innVindu{9}.Value);
69 utData.mr = str2num(innVindu{10}.Value);
70 utData.tk = innVindu{13}.Value;
71 utData.ml = innVindu{11}.Value;
72 utData.mk = innVindu{12}.Value;
73 utData.csv = eksporterCSV.Value;
74 utData.rms = kalkulerRMS.Value;
75 utData.kortslutning = kortslutning.Value;
76 utData.bpos = innVindu{14}.Value;
77 utData.nsyklus = innVindu{15}.Value;
78
79 set(startKnapp, 'Enable', 'off');
80 end

```