

Trond Thormodsen Skjøren
Kim Andre Rowe-Karlsen
Remi-Andre Nygård

Utfordringer i Luostejok kraftlags distribusjonsnett ved omkobling fra kompensert til isolert nett

Bacheloroppgave i ingeniørfag - Elkraft

Veileder: Ian Norheim

Mai 2021

Trond Thormodsen Skjøren
Kim Andre Rowe-Karlsen
Remi-Andre Nygård

Utfordringer i Luostejok kraftlags distribusjonsnett ved omkobling fra kompensert til isolert nett

Bacheloroppgave i ingeniørfag - Elkraft
Veileder: Ian Norheim
Mai 2021

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



Kunnskap for en bedre verden

Oppgavens tittel:	Dato: 19.05.2021		
Utfordringer i Luostejok kraftlags distribusjonsnett ved omkobling fra kompensert til isolert nett	Antall sider: 57		
	Antall vedlegg: 12		
	Masteroppgave:	Bacheloroppgave	X
Navn: Trond Thormodsen Skjøren, Remi-Andre Nygård og Kim Andre Rowe-Karlsen			
Veileder: Ian Norheim			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/ veiledere: Ari Wahlroos (ABB), Erik Nordskog (Norpec), Odd Egil Solheim (Luostejok Kraftlag) og Tokhir Gafurov (Digpro)			

Sammendrag:

Hovedoppgaven er gjennomført i samarbeid med Luostejok Kraftlag Nett AS. Det essensielle i rapporten er å undersøke hva som skjer når et område går fra å være forsynt fra et spolejordet nett og over til å være forsynt fra et isolert nett. Det innebærer å utforme en rapport til oppdragsgiver med simuleringer og beregninger for en overgang fra et spolekompensert nett til et isolert nett.

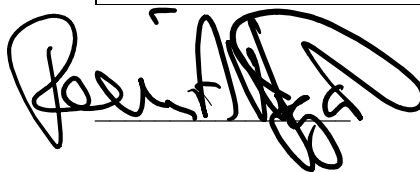
Rapporten tar for seg forskjellige simuleringsmodeller fra det isolerte nettet mot området som skal forsynes. Det undersøkes også berøringsspenninger og kapasitive jordfeilstømmer ved at området forsynes fra det isolerte distribusjonsnettet. Problemstillingen ble løst ved hjelp av eksisterende litteratur og eksterne ressurser som bidro med relevant litteratur og informasjon. Programmene Digpro og Simulink i Matlab ble benyttet. Førstnevnte for å hente ut informasjon om distribusjonsnettet og Simulink for alle simuleringene.

Rapporten gir leseren et innblikk i relevant teori rundt spoler, kapasitive jordfeilstømmer og litt innsikt i relevern. Resultatene fra simuleringene viser at spolekompensering har en stor innvirkning på nettet. Beregninger som ble utført antyder at berøringsspenningene blir for høye.

Generell anbefaling ut ifra denne rapporten foreslår en utredning for å installere en sentralspole i det isolerte nettet. Berøringsspenninger vil også kunne bli for høye ved at det isolerte nettet ikke er kompensert. Prosjektoppgaven fant resultater og beregninger som tilsier at relevernplanen for det isolerte nettet bør revideres av oppdragsgiver.

Stikkord:

Spolekompensering, kapasitans, isolert nett
Jordfeilstømmer, releverninnstillinger
Digpro, Matlab, Simulink

 Trond Thormodsen Skjøren

Remi-Andre Nygård

Trond Thormodsen Skjøren



Kim Andre Rowe-Karlsen

Abstract

The purpose of this report is to investigate issues regarding inductive coils installed in the distribution grid. The distribution grid is a high-voltage grid ranging from 132/22kV and 66/22kV in this assignment. The project members in association with the employer wanted to find out more about a distribution grid where it is possible to supply the same area with two different distribution grids. The other distribution grid is an insulated grid and is not compensated. The report will investigate and analyse through different simulation scenarios the effect of compensation and also capacitive earth-fault currents, when there is an outage and the insulated grid switches in.

The methods that were used to solve the bachelor thesis is Digpro, a program where the employer have all their information about the distribution grid. The project used Digpro to find relevant and good data about capacitive equivalents in the grid, especially where there is a lot of cables in the ground. All the data from Digpro was used in Matlab/Simulink to simulate different scenarios and analyse different methods of coil compensation, earth grounding, capacitive earth-fault currents and then provide a suggestion for the employer.

Other methods consist of finding reliable literature. There were some difficulties finding trustworthy and precise literature when talking about distributed coil compensation. With good research others follow. This project took good advantage of others having the same issues years before this project. So, the counsellor for this project from NTNU Gjøvik, Ian Norheim, gave us good tips where to find reliable professionals within the subject.

The results from the simplified simulation models suggests that there is necessary to compensate the distribution network. The capacitive earth-fault currents are above recommended value and therefore several measures should be implemented. If the non-compensated transformer supplies an area where it normally is a compensated transformer, then the relays should be adjusted accordingly. The arc suppression coil should be automatic adjustable and installed on the busbar in transformer South through an artificial neutral point.

Forord

Denne bacheloroppgaven er utarbeidet av tre nettstudenter som studerer elektroingeniør med fordypning elkraft ved NTNU Gjøvik. Bacheloroppgavens tittel er «*Utfordringer i Luostejok kraftlags distribusjonsnett ved omkobling fra kompensert til isolert nett*».

Opgaven ble tildelt gjennom Luostejok Kraftlag Nett AS hvor oppdragsgiver ønsket å se på en aktuell problemstilling i distribusjonsnettet sitt. Opgaven er interessant for dets relevans for utdanningen. Problemstillingen er samfunnsaktuell fordi det benyttes mer kabler i distribusjonsnettet enn tidligere. Opgaven har fokusert på hvilke konsekvenser det får for relevernplaner, berøringsspenninger og kapasitive jordfeilstømmer når et område forsynes fra en annen trafo enn normalt.

Det er en økende problemstilling og som tidligere ikke har vært like relevant. Derfor eksisterer det begrenset med litteratur som omhandler distribuerte spoler og hva som skjer når man går fra et spolejordet nett til et isolert nett. Det ble utarbeidet en forenklet simuleringsmodell i Matlab ved hjelp av Simulink modulen. Her ble det laget flere simuleringsmodeller for å innhente data rundt problemstillingen og delmålene. For å innhente data for distribusjonsnettet ble programmet Digpro benyttet.

Gjennom denne oppgaven har vi tilegnet oss god spisskompetanse om spolekompensering og hvordan man kan kompensere et isolert nett i ettertid. Arbeidet med oppgaven har foregått for det meste digitalt siden det er store fysiske avstander mellom studentene. Det har gitt oss et lærerikt utbytte ved bruk av digitale verktøy for å kommunisere og arbeide i lag som et team gjennom en digital plattform.

Vi ønsker å rette en stor takk til Ari Wahlroos i ABB, som har gitt oss god kunnskap om spolekompenserte distribusjonsnett. Erik Nordskog i Norpec som har gitt oss innføring i hvordan man utarbeider gode relevernplaner. Vi ønsker å takke vår oppdragsgiver Luostejok Kraftlag Nett AS og Odd Egil Solheim for en interessant og lærerik oppgave. Vi ønsker å takke for bistanden som de har gitt oss underveis ved å dele informasjon og gi tilgang til deres systemer. Tokhir Gafurov og Digpro for deres webinar kurs som de holdt for oss og oppdragsgiver vedrørende forståelse og bruk av programmet Digpro. Helt til slutt ønsker vi å takke Ian Norheim ved NTNU Gjøvik for god veiledning gjennom bacheloroppgaven.

Innholdsfortegnelse

Abstract	V
Forord	VII
Figurliste.....	XII
Tabelliste	XIII
Begreper i Rapporten	XIV
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling.....	2
1.3 Avgrensninger	3
1.4 Etiske utfordringer.....	3
1.5 Rapportens oppbygning.....	4
2 Beskrivelse av forsyningen inn til REKT	5
2.1 Transformator Nord.....	6
2.2 Transformator Sør.....	6
2.3 REKT-område	6
3 Teori	7
3.1 Spoler.....	7
3.1.1 Sentralspole	8
3.1.2 Distribuert spole	9
3.1.3 Parallellmotstand ved bruk av spoler	11
3.2 Forskrifter og regelverk	12
3.2.1 Regelverk jordfeil i forsyningsanlegg FEF-06.....	12
3.2.2 Forskriftens krav til berøringsspenninger	14
3.2.3 KILE-ordningen	15
3.3 Jordfeil og berøringsspenninger	15
3.3.1 Jordfeil i høyspenningsnett.....	15
3.3.2 Ladestrømmer.....	16
3.3.3 Ladestrøm blir jordfeilstrøm	17
3.3.4 Usymmetristrøm I_0	19
3.3.5 Egenbidrag I_{EB}	19
3.3.6 Jordstrømmer isolert nullpunkt	19
3.3.7 Jordstrømmer spolejordet nett.....	21

3.3.8	Berøringsspenninger.....	22
3.4	Relevn.....	24
3.4.1	Jordfeilvern.....	24
3.4.2	Overstrøms- og jordfeilvern.....	25
3.5	Kapasitans i isolertnett og kabelnett.....	27
3.5.1	Kapasitans i isolert nett.....	27
3.5.2	Kapasitans i kabelnett.....	28
3.5.3	Kapasitans i blandet nett.....	29
3.6	Jordingssystemer.....	30
4	Metode.....	31
4.1	Litteratur.....	31
4.1.1	Validitet og reliabilitet.....	32
4.2	Beregninger og simuleringer.....	32
4.2.1	Validitet og reliabilitet.....	33
4.3	Eksterne ressurser i form av fagpersoner.....	33
5	Simuleringer.....	34
5.1	Simuleringsmodellen.....	34
5.1.1	Modellens oppbygning.....	34
5.1.2	Tekniske data for kabler.....	36
5.1.3	Validitet og reliabilitet.....	38
5.2	Uten kompensering.....	38
5.2.1	Simulering uten kompensering.....	38
5.3	Sentralkompensering med kunstig nullpunkt.....	39
5.3.1	Plassering og konfigurasjon av sentralspolen.....	40
5.3.2	Spoleverdier til sentralspolen.....	41
5.4	Sentralkompensering tilkoblet transformator.....	42
5.4.1	Plassering og konfigurasjon av sentralspolen.....	43
5.4.2	Spoleverdier til sentralspolen.....	44
5.5	Beregninger av berøringsspenning og releplan.....	46
6	Drøfting.....	47
6.1	Behov for spolekompensering innad i REKT?.....	47
6.2	Spolekompensering ved trafo Sør.....	48
6.3	Relevninnstillinger.....	50

6.4	Kapasitive jordfeilstømmer	51
6.5	Validitet og reliabilitet av resultater	51
7	Konklusjon	53
	Litteraturliste	55
	Vedlegg	58
	Vedlegg A: Eksterne fagpersoner og kontakter	59
	Vedlegg B: Teknisk blad for 24kV kabler	60
	Vedlegg C: Elforsk.....	60
	Vedlegg D: Linear tilnærming av kabel.....	61
	Vedlegg E: Egenbidrag med alle avganger	61
	Vedlegg F: Innstillinger Trafo Sør	62
	Vedlegg G: Simulinkdiagram av trafo Sør uten kompensering	62
	Vedlegg H: Simulink diagram av transformator sør med spole via kunstig nullpunkt.....	63
	Vedlegg I: Simulinkdiagram av trafo Sør med sentralspole	64
	Vedlegg J: Kabler og linje sett fra trafo sør	65
	Vedlegg K: Relevnstillinger Jordfeil Trafo Sør Avgang Rekt:.....	66
	Vedlegg L: Grunnleggende teori om parallellresonans.....	67

Figurliste

Figur 1: Forenklet enlinjeskjema over området	5
Figur 2: Sentralspole og parallellmotstand [20]	9
Figur 3: Distribuert spole med feil utenfor avgang [21]	10
Figur 4: Distribuert spole med feil på avgang [21]	10
Figur 5: Tillatt berøringspenning U _{TP} §4-11 Jordingssystem FEF-06 [9]	14
Figur 6: Ladestrømmer i friskt isolert nett [10]	17
Figur 7: Jordstrøm pr km kabel som funksjon av kabeltverrsnitt [10]	18
Figur 8: Jordfeilstømmer i nett med isolert nullpunkt [10]	19
Figur 9: Jordfeilstøm i nett med spolejordet nullpunkt [10]	21
Figur 10: Illustrasjon berøringspenning [22].	22
Figur 11: Topologi over området	25
Figur 12: Viser to forskjellige karakteristikker for ett rele [5]	26
Figur 13: Isolert nøytralpunkt [17]	28
Figur 14 Koblingsskjemaet for blokken "Three-Phase PI Section Line" i MATLAB [15]	35
Figur 15: Viser «Three-Phase Fault» modulen i simuleringsmodellen	36
Figur 16: Viser selve den lineære tilnærmingen av kabalen.	37
Figur 17: Utklipp fra oscilloskopet fra MATLAB simulering uten spolekompensering	39
Figur 18: Viser et utsnitt av vedlegg H og plassering av spolen	40
Figur 19: Utklipp fra oscilloskopet fra MATLAB simulering med spole kompensering	41
Figur 20: Viser en-fase jordfeil med 3A overkompensering	42
Figur 21: Utdrag fra vedlegg I. Plassering av sentralspolen	43
Figur 22: Utklipp fra oscilloskopet simulering sentralspole kompensering	44
Figur 23: Viser en-fase jordfeilstøm med 2-3A overkompensering	45

Tabelliste

Tabell 1: Oversikt over begreper i rapporten	XIV
Tabell 2 Krav til utkoblingstider for jordfeil i FEF (06)[9]	13
Tabell 3: Systemjording i ulike system[17]	30
Tabell 4: Viser lineær tilnærming av kabelen	37
Tabell 5: Viser verdiene til sentral spolen.....	44

Begreper i Rapporten

Tabell 1: Oversikt over begreper i rapporten

Begrep	Forklaring
Underkompensering	Spolestrømmen er satt til å være mindre enn den totale kapasitive strømmen i distribusjonsnett.
Overkompensering	Spolestrømmen er større enn den totale kapasitive strømmen i distribusjonsnett.
Spolekompensering Kompensering	Øke det induktive bidraget til kretsen, for å utjevne det kapasitive bidraget fra kablene.
Ladestrøm	Kapasitive lekkasjestrøm til jord
Sentralspole	Spole koblet til transformatorens nullpunkt eller et kunstig nullpunkt på samleskinnen.
Distribuert kompensering Distribuert spole	Spole koblet i ett kunstig nullpunkt ute i distribusjonsnett
X/R	Forholdet mellom reaktansen og resistansen
Yn	Viklinger tilkoblet i stjerne, med kobling i nullpunktet
Egenbidrag	Kabelens kapasitive ladestrøm til jord
Resonans	Når induktive og kapasitive bidrag er lik
PI-Modell	Kabelstrekk modellering som et punkt
FEF-06	Forskrift om elektriske forsyningsanlegg
1-pol kortslutning	Kortslutning mellom en fase og jord.
Jordstrøm	Strøm gjennom 1 polt kortslutning mellom fase og jord

1 Innledning

Innledningen vil gi en kortfattet innføring i oppgaven. Bakgrunnen og oppdragsgiver for oppgaven blir presentert under første delkapittel. Deretter kommer problemstillingen som rapporten skal besvare. Omfanget av rapporten og avgrensninger som er foretatt blir presentert under delkapittel 1.3. De etiske utfordringene som var relevante for rapporten og arbeidet som ble utført blir nevnt her. Til slutt kommer en kort innføring i rapportens oppbygning.

1.1 Bakgrunn

Bakgrunnen for rapporten er at oppdragsgiveren Luostejok Kraftlag Nett AS ønsker å se på utfordringer knyttet til distribusjonsnettet når det oppstår en omkobling fra et spolejordet nett til et isolert nett. På bakgrunn av dette er det ønskelig å sjekke om jordfeilstømmene er innenfor anbefalte verdier hvis det isolerte nettet forsyner ett kabelrikt område, og om det er behov for spolekompensering og andre verninnstillinger.

På grunn av samfunnskritisk institusjon er rapporten nødt til å klassifisere området og forsyningen under andre navn. Derfor er området heretter kalt REKT (Remi, Kim og Trond). Forsyningen fra nord som er spolejordet, er heretter kalt transformator Nord, mens forsyningen i sør som er et isolert nett blir kalt for transformator Sør.

I en normal situasjon blir området "REKT" forsynt fra transformator Nord. Ved en feil på transformatoren eller linjen til REKT, må REKT forsynes fra transformator Sør. REKT er ett kabelrikt område med offentlig virksomhet og boligområde. Offentlig virksomhet medfører høye kilekostnader.

1.2 Problemstilling

Fremtidens distribusjonsnett blir mer og mer kabelrik, og det tradisjonelle luftstrekket forsvinner mange steder. Dette medfører andre problemstillinger enn tidligere. Deriblant utfordringer med kapasitive jordfeilstømmer ved jordfeil.

Denne oppgaven har som formål å se på utfordringen på eksisterende distribusjonsnett ved en eventuell omkobling slik at REKT blir forsynt fra trafo Sør i stedet for trafo Nord. Det er behov for å se på dagens løsning om den tilfredsstillende kravene til jordfeilstømmer ved en slik omkobling.

Problemstillingen ble som følgende:

“Formålet med denne oppgaven er å se hvilke innvirkninger det får på REKT når man går fra å være tilkoblet spolejordet nett og over til isolert nett ved en eventuell omkobling”.

For å belyse utfordringene bedre ble det også utformet en del delmål som skal supplere problemstillingen. Delmålene er følgende:

- 1 Er det behov for spolekompensering innad i REKT?
- 2 Undersøke behovet for spolekompensering ved innmating fra trafo Sør hvor det er et isolert nett.
- 3 Vil omkoblingen ha innvirkning på relevern innstillingene i REKT?
- 4 Kan kapasitive jordfeilstømmene overstige anbefalte verdier med tanke på selvslukking av lysbue når trafo Sør forsyner REKT?

1.3 Avgrensninger

Omfanget av oppgaven må begrenses slik at det blir overkommelig å finne et resultat. Derfor er blant annet økonomiske beregninger og vurderinger ikke tatt med i rapporten. Rapporten setter søkelys på sikkerhet og funksjonalitet fra trafo Sør mot REKT.

Under utredning av problemet ble det oppdaget at problemet med Trafo Nord mot REKT er godt dekket i eksisterende rele plan. Det blir derfor ikke videre arbeidet med i denne rapporten. For å avgrense omfanget av relevansinnstillinger tar oppgaven kun for seg utløsetider ved jordfeil og berøringsspenninger. Valgene som er gjort i forhold til avgrensninger i oppgaven begrunnes med relevanse for problemstillingen.

I simuleringene er det brukt 1-polt kortslutning mot jord siden dette er den vanligste feilårsaken. Det simuleres også over et geografisk begrenset område for å få ned arbeidsmengden. Avganger på transformator Nord og Sør som ikke forsyner REKT, blir i denne rapporten forenklet til å kun bestå av en avgang med riktig kapasitans.

For beregninger er det gjort forenklinger ved å si at det kun er en kabeltype for hele linjestrekket. Referert til Renblad 7505 ble det kun simulert bruk av sentralpole siden det frarådes å montere distribuert spole uten sentralpole [10].

1.4 Etiske utfordringer

Det er viktig å følge gjeldende lovverk og normer uten at det går på kompromiss med sikkerhet og funksjonalitet. Fra rapportens ståsted er det prioritert sikkerhet før driftsfunksjonalitet. Rapporten etterstreber en etisk middelvei mellom personsikkerhet og driftssikkerhet, hvor personsikkerhet veier tyngst i denne rapporten.

Luostejok Kraftlag Nett AS har tiltrodd en del sensitiv informasjon og det er prosjektgruppens ansvar å verne om denne informasjonen. Prosjektgruppen har forpliktet seg til å følge oppdragsgiverens etiske retningslinjer.

Prosjektgruppen har ikke lagt føringer for om det bør legges kabler eller om det skal foretrekkes luftstrekk. Luftstrekk medfører at det må kappes trær under luftlinjene for å sikre

forsyningssikkerheten. Kabler i bakken er forbundet med graving og vil deretter ikke være synlig i naturen når det gror igjen. Ulemper med kabler i bakken kan være at det ikke er vedlikeholdsvennlig. En feil i bakken kan medføre større inngripen enn det er for et luftstrek. Et luftstrek er synlig for inspeksjon og vedlikehold.

For å imøtekomme økonomiske livskostnadsberegninger opp mot miljømessige aspekter det medfører å installere og drifte et distribusjonsnett bør dette vurderes av oppdragsgiver. Det er for tids- og ressurskrevende for at prosjektgruppen rekker å ferdigstille en fullverdig livskostnadsanalyse opp mot miljømessige konsekvenser.

1.5 Rapportens oppbygning

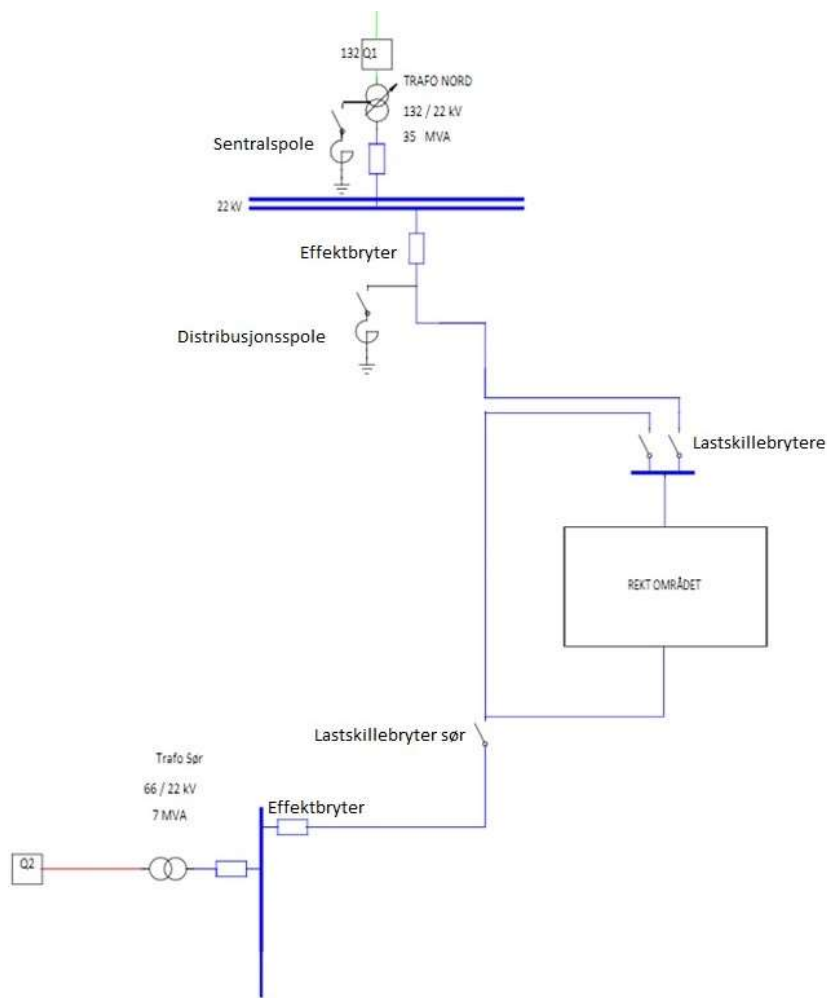
Rapportens oppbygning er delt inn i 7 kapitler som vil ta leseren igjennom rapporten på en slik måte at det er oversiktlig og lettforståelig.

- 1) Omhandler beskrivelse av problemstilling og delmål. Bakgrunn for oppgaven fra oppdragsgiver er også gitt her.
- 2) Beskriver topologien over distribusjonsnettet og de rammene som er gitt for å overholde anonymitetskravet for området mellom oppdragsgiver, prosjektgruppen og den berørte part som ikke kan omtales ved navn.
- 3) Består av nødvendig teori for at problemstillingen og delmålene skal bli belyst.
- 4) Beskriver metoden som er benyttet for å løse problemstillingen. Det blir opplyst om validitet og reliabilitet for all innhentet informasjon og bruken av denne.
- 5) Presenterer resultatene av alle simuleringer og beregningene som er utført.
- 6) Består av en diskusjonsdel hvor resultatene drøftes opp mot den aktuelle problemstillingen og delmålene. Der drøftes tiltak som foreslås for å forbedre dagens driftssituasjon og ivareta personsikkerheten.
- 7) Viser konklusjonen av hele rapporten. Det innebærer at alle resultater, simuleringer og beregninger er drøftet opp mot aktuell teori og etiske aspekter. Til slutt står det kortfattet hva prosjektgruppen har kommet frem til og anbefaler videre for oppdragsgiver.

2 Beskrivelse av forsyningen inn til REKT

Som tidligere nevnt under etiske utfordringer er det samfunnsmessige sikkerhetsaspekter rapporten må ta hensyn til under presentasjonen av beskrivelsen av distribusjonsnett og området REKT. Luostejok Kraftlag Nett AS forsyner et område som ikke kan navngis. Derfor er området kalt opp etter fornavnene til prosjektgrupped medlemmene. Forkortet blir navnene Remi, Kim og Trond døpt om til områdenavnet REKT.

Figur 1 viser en oversikt over det aktuelle nettet. Transformator Nord blir forsynt av et 132kV nett kontrollert av Statnett, som transformerer spenningen ned til 22kV. Ved transformator Sør leverer Luostejok kraftlag 66kV, og transformerer ned til 22kV.



Figur 1: Forenklet enlinjeskjema over området

2.1 Transformator Nord

Transformatoren kan ikke navngis i detalj, derfor har rapporten for enkelthetsskyld kalt transformatorene nord etter den geografiske plasseringen i forhold til REKT området. Dette er for å gjøre det enklere å illustrere i et enlinjeskjema hva som er hvor når resultatene presenteres og hva det er som blir drøftet videre i rapporten.

Transformator Nord er som tidligere nevnt 132/22kV og har en ytelse på 35MVA. Det er installert en sentralspole på 17-170A som er automatisk regulerbar, og en manuell regulerbar spole på 30-70A på avgangen mot REKT. Det er flere avganger fra denne transformatoren, som summeres i en avgang i simuleringene.

Ved normalt koblingsbilde forsyner transformator Nord flere kabelrike områder og har høye kapasitive ladestrømmer.

2.2 Transformator Sør

Samme vilkår gjelder for transformator Sør som for transformator Nord. Trafo Sør er 66/22kV og har en ytelse på 7MVA. Trafo Sør forsyner normalt sett områder som ikke er like kabelrike som for trafo Nord. utfordringer når transformator Sør er innkoblet mot REKT blir gjennomgått videre utover i denne rapporten.

Transformator Sør har per i dag ingen distribuert spole eller sentralisert spole i sin transformatorrets, og er et isolert distribusjonsnett.

2.3 REKT-område

Området forsynes normalt fra transformator Nord. På avgangen fra trafo Nord er det en distribuert spole mot område REKT. Dette skyldes at REKT er et veldig kabelrikt område.

Som tidligere nevnt i rapporten er det begrenset med informasjon rapporten kan omhandle når det gjelder dette området siden det er samfunnsmessig kritisk infrastruktur. En forenkling av området kan illustreres som vist på figur 1 ovenfor.

3 Teori

Teorikapittelet omhandler essensiell teori som er nødvendig for å løse problemstillingen.

I hovedsak beskriver teorikapitlene en grunnleggende innføring i spoler, spolekompensering og forskjellene mellom spolejordet nett og isolert nett. De to metodene for spolekompensering som blir presentert i rapporten er sentraliserte og distribuerte spoler.

Det vil bli presentert relevante krav og forskrifter som setter føringer for anbefalte verdier for jordfeilstømmer. Herunder kommer informasjon om jording, jordstrømmer og berøringsspenninger. Programmene som er benyttet for å uthente informasjon om distribusjonsnett og utførte simuleringer presenteres i dette kapitlet.

Teori om spoler og kondensatorer i parallell anses som grunnleggende kunnskap for personer med elektrobakgrunn. Ved behov se vedlegg L.

3.1 Spoler

Petersen spole (Arc suppression coil) er brukt til å kompensere for kapasitive jordfeilstømmer. Det blir mer vanlig å benytte spolekompensering som tiltak for å redusere kapasitive jordfeilstømmer i distribusjonsnett. De vanligste kombinasjonene er sentralspole eller sentralspole med distribuerte spoler på avgangene.

I en ideell situasjon er kompenseringen 100% hvor den totale kapasitive jordfeilstømmen blir kompensert. Men i virkeligheten lar det seg ikke gjøre fordi man kan få resonans. Ifølge RENblad 7505 kan det medføre høye fasespenninger hvis man ikke har kontroll på usymmetrien i nettet ved resonans [10].

Ved distribuerte spoler holder man allikevel kompenseringen godt under 100% for å forhindre at man overkompenserer ved inn/utkoblinger og dermed får varierende kapasitans i nettet. Ekstern lastmotstand benyttes ofte for å øke den resistive jordfeilstømmen til et nivå hvor utgående vern klarer å detekttere feilen. Lastmotstanden installeres i parallell med Petersen spolen. Av sikkerhetsmessige årsaker benyttes ofte gjennomsnittsstrøm trafoer for lastmotstanden [2].

Spoler har også resistiv lekkasje. Et godt estimat på den resistive lekkasjen er 2.5 % av spolens strøm [18].

Spoleverdien bestemmes etter ohms lov [19]:

$$U_{0n} = I * Z \rightarrow \text{der } Z = L * \omega = L * 2 * \pi * f \rightarrow L = \frac{U_{0n}}{I * 2 * \pi * f} \quad (1)$$

Der U_{0n} er spenningen over spolen, og I er strømmen igjennom spolen (kapasitive egenbidrag + eventuell overkompensering). Siden det er vekselstrøm må man ta hensyn til frekvensen f når man beregner ut spolens induktans.

3.1.1 Sentralspole

En sentralisert spole er tilkoblet nøytralpunktet på transformatoren eller plassert et annet sted via egnede jordingstransformatorer. En sentralisert spole dekker de kapasitive strømmene på avgangene, og bør være automatisk regulerbar ved inn/utkobling av avganger slik at man ikke under- eller overkompenserer distribusjonsnettet mer enn tiltenkt.

Underkompensering vil si at spolestrømmen er satt til å være mindre enn den totale kapasitive strømmen i distribusjonsnettet. Det medfører at en eventuell gjenværende feilstrom ved feilstedet er kapasitiv.

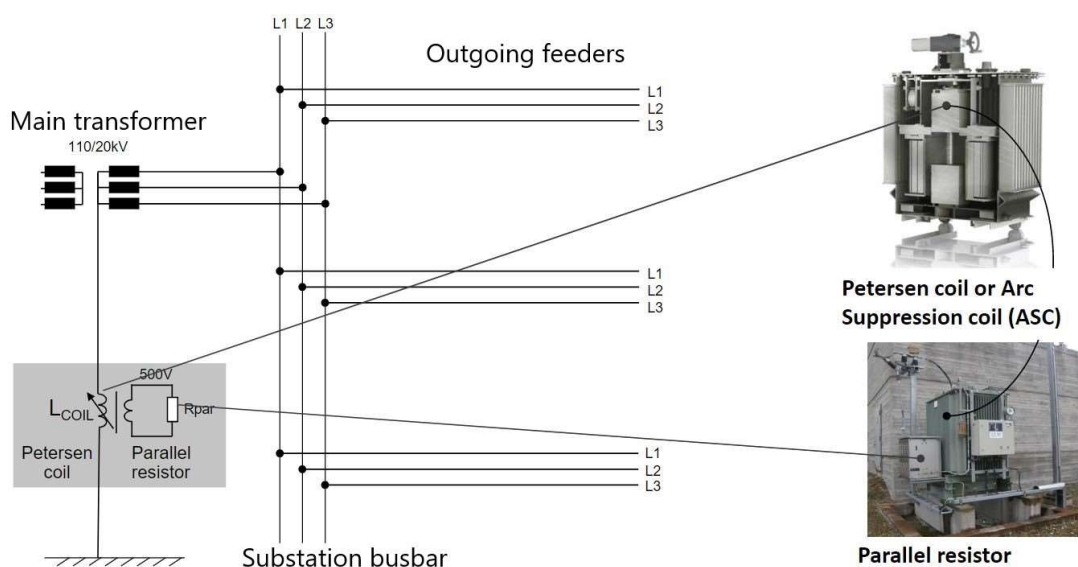
Overkompensering medfører at spolestrømmen er større enn den totale kapasitive strømmen i distribusjonsnettet. Gjenværende feilstrom i feilstedet vil da være induktiv.

Ifølge ABB og Ari Wahlroos sitt webinar er det typisk at sentralspolen er 2-3A overkompensert i Europa. Spolen vil ikke ha innvirkning på harmoniske eller resistive feil. Den vil kun kompensere på systemets grunnfrekvens, i dette tilfellet i oppgaven vil det si 50Hz. Den induktive strømmen i spolen begrenser den kapasitive jordfeilstrommen til 95-97% [12].

Ved å benytte spolekompensering får man fordeler med at overslag selvslukker, bedre sikkerhet og forsyningskvalitet [10].

Det medfører også at man får en del utfordringer ved jordfeilvern som må være dedikerte til kompenserte distribusjonsnett. Feil i kabelnett har ofte intermittent karakteristikk som krever dedikert funksjonalitet til jordfeilvernet. For å sikre rett utkobling bruker man en motstand i parallell med sentralspolen. Den kobles på sekundærviklingene. Typisk verdi for motstanden er 5-10A i nordiske land [12].

Se figur 2 nedenfor for å få oversikt over et standard sentralspolekompensert distribusjonsnett. Det er også mulig å koble sentralspolen via et kunstig nullpunkt og oppnå samme funksjon som å direktekoble det til transformatorens nøytralpunkt.

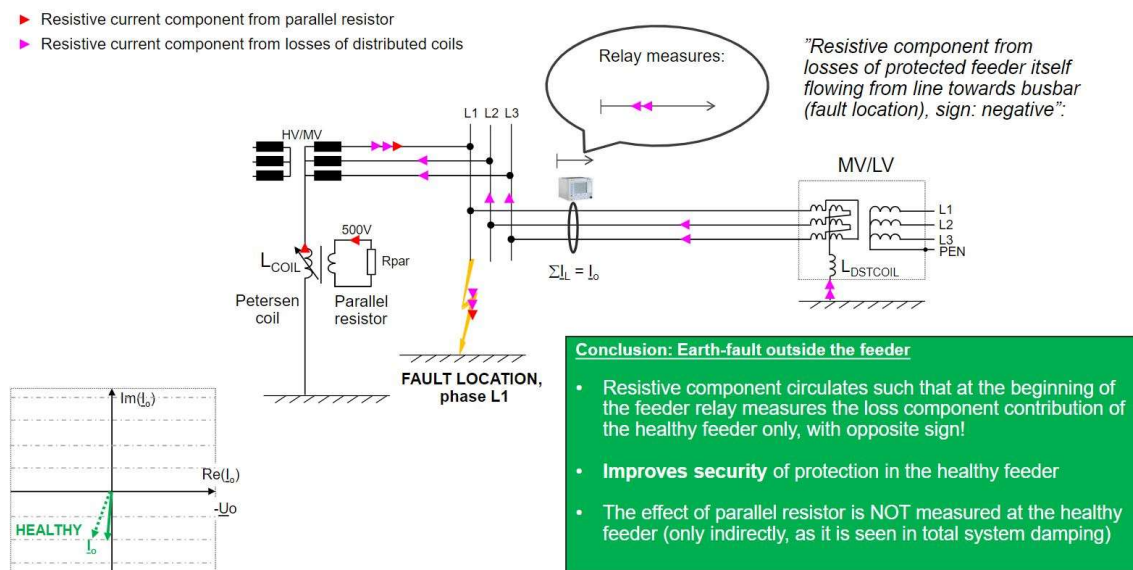


Figur 2: Sentralspole og parallellmotstand [20]

3.1.2 Distribuert spole

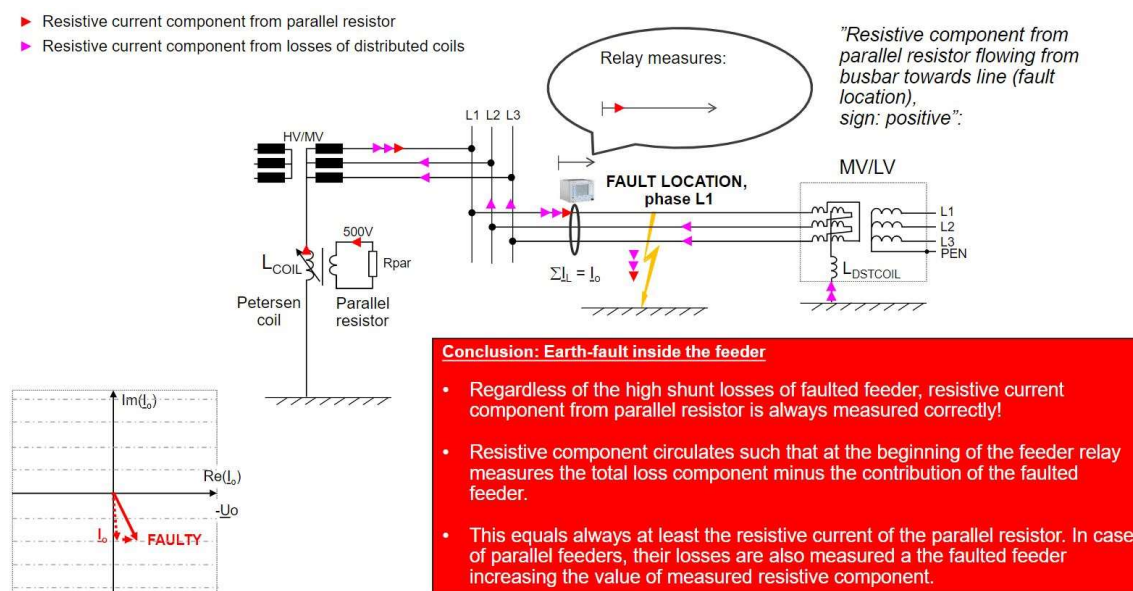
Distribuerte spoler på avganger med stort egenbidrag er nødvendige for å avlaste nøytralpunktet i transformatoren. Det er viktig at distribuerte spoler ikke overkompenserer på avgangen. Det bør unngås induktive strømmer på avgangen ved jordfeil. Derfor bør den distribuerte spolen være mindre enn det avgangen klarer å generere av kapasitive jordfeilstrømmer. Sentralspolen bør justere seg raskt ved inn/utkobling av avganger for å ivareta funksjonaliteten til jordfeilvernene og dermed beskyttelsen i nettet. I henhold til RENblad 7505 frarådes det å benytte distribuert spole uten å ha installert en sentralspole foran i distribusjonsnettet.

For å illustrere hvordan et distribusjonsnett kan se ut med en distribuert spole se figur 3 og figur 4.



Figur 3: Distribuert spole med feil utenfor avgang [21]

Bildet ovenfor viser feilstømmer hvor det er montert en distribuert spole, en sentralspole og parallellmotstand og feilen har oppstått utenfor avgangen. Bildet nedenfor har samme koblingsbilde, men her har feilen oppstått på avgangen hvor det er montert distribuert spole.



Figur 4: Distribuert spole med feil på avgang [21]

3.1.3 Parallellmotstand ved bruk av spoler

Fra et webinar som Ari Wahlroos holdt gjennom ABB ble det sagt at moderne kabler har gode isolerende materialer. Dette medfører at det blir mindre naturlig demping i kablene ettersom at den resistive komponenten reduseres. Det gir da en større tidskonstant ved oscilleringer etter jordfeil. Det tar lengre tid for distribusjonsnettet leges. Dette gjør også at oscilleringene kan skape problemer for jordfeilvernene på friske avganger.

Ved å øke den resistive komponenten i distribusjonsnettet med en parallellmotstand gir det bedre målenøyaktighet og kan forhindre uønsket utkobling. Parallellmotstanden kobles normalt inn/ut etter beskjed fra spolens regulator. Vanlig prinsipp er ifølge Erik Nordskog å dimensjonere parallellmotstanden for å tåle 100% jordfeilspenning i 90 sekunder. Hvis den termiske kapasiteten for parallellmotstanden overstiger kapasiteten, vil spolens regulator sperre for innkobling av motstanden til den er klar igjen. Norpec og Erik Nordskog nevner at det er flere ulike måter å benytte parallellmotstanden på:

Ett alternativ er å ha parallellmotstanden inne kontinuerlig. Dette alternativet brukes gjerne der man har usymmetriske nett som gir høy U_0 – spenning ved resonans. Ved AUS arbeid anbefales det at parallellmotstanden ligger inne kontinuerlig.

Ett annet alternativ er at parallellmotstanden kobles inn ved jordfeil. Det innebærer at ved normaltilstand er motstanden koblet ut. Hvis en jordfeil inntreffer legges motstanden tidsforsinket inn. Jordfeilvernet bør ha lengre utløsetid enn innkoblingstiden til parallellmotstanden. Som Ari Wahlroos har nevnt i sitt webinar har man erfart at distribusjonsspoler i et distribusjonsnett kan føre til at friske avganger tripper etter at en korrekt utkobling av jordfeilrammet avgang har funnet sted. Dette fenomenet kalles for post-oscillation.

3.2 Forskrifter og regelverk

Dette underkapittelet omhandler forskriftene og regelverk som er relevant for jordfeil og berøringsspenninger i elektriske forsyningsanlegg. Dette for å sikre liv, helse og materielle verdier.

3.2.1 Regelverk jordfeil i forsyningsanlegg FEF-06

Drift av forsyningsanlegg er regulert av forskrift for elektriske forsyningsanlegg (FEF-06) [9], Denne forskriften setter krav til at elektriske anlegg skal prosjekteres, utføres, driftes og vedlikeholdes slik at de sikkert ivaretar den funksjon de er tiltenkt uten å fremby fare for liv, helse og materielle verdier.

Definisjonen for jordfeilstrom i forskriften §1-5:

” Jordfeilstrom: strøm som går fra faseleder til jord eller jordede deler på feilstedet.

For enpolet jordfeil er dette:

- i system med isolert nøytralt punkt den kapasitive jordfeilstrommen I_C*
- i spolejordede system den resterende jordfeilstrommen I_{Res}*
- i system med lavimpedansjording kortslutningsstrømmen, fase til jord I''_{kl} ”*

Ved jordfeil setter forskriften [9] følgende krav:

” § 4-2. Isolasjon

Anleggets isolasjonsnivå skal være tilpasset driftsspenningen og anleggets utførelse slik at pålitelig drift sikres. Isolasjonsavstander skal være tilpasset isolasjonsnivå.

Anlegg skal overvåkes slik at isolasjonsfeil blir detektert og frakoblet.”

” I veiledningen til forskriften [11] sier den mer utdypende:

Isolerte og spolejordede kabel- og luftnett med spenning mindre eller lik 24 kV skal ha en minimum overgangsmotstand mot jord. Underskrides denne grensen, skal driftspersonalet varsles automatisk, alternativt kan anlegget utkoples.

Grensene er:

1.1 For kabelnett: minimum 1000 ohm

1.2 For luftnett og blandet nett: minimum 3000 ohm.”

” § 4-3. Tiltak ved isolasjonsfeil i høyspenningsnett

Topolet jordfeil og kortslutning skal koples ut hurtig og automatisk.

Enpolet jordfeil skal utkoples hurtigst mulig og innen følgende tider. Tidene inkluderer ikke eventuelle gjeninnkoplinger:

Tabell 2 Krav til utkoblingstider for jordfeil i FEF (06)[9]

Direktejordet Nett	8 Sek
Motstandsjordet Nett	30 Sek
Isolert og Spolejordet Nett:	
Luftnett og blandet kabel/luft-nett med tilknyttet distribusjonstransformator	10 Sek
Luftnett og blandet kabel/luft-nett uten tilknyttet distribusjonstransformator	120 Min
Industrinett med luftnett og blandet kabel/luft-nett	120 Min
Kabelnett (uten luftledning) med global jording	240 Min

Nett skal overvåkes kontinuerlig, og klarering for bortkopling av jordfeilen igangsettes umiddelbart.”

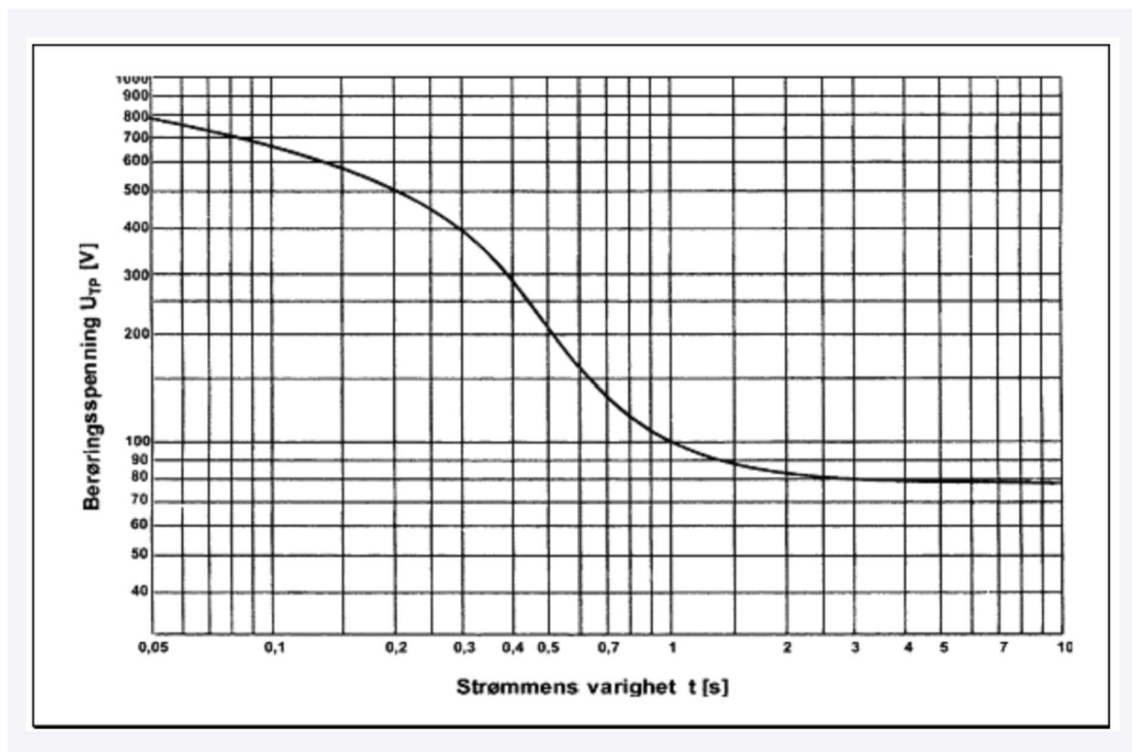
Forskriften sier: §4-11. Jordingssystem

” Jordingssystem skal være tilpasset det elektriske anlegget og være dimensjonert og utført slik at det vedd feilsituasjoner i det elektriske anlegget ikke oppstår fare for liv, helse og materielle verdier, i eller utenfor selve anleggene.”

Distribusjonsnettet denne rapporten omhandler er ett luftnett og blandet kabel / luft-nett med tilknyttet distribusjonstrafo. For et blandet nett kan man se i tabell 1 at forskriftens krav til utløsetid er 10 sekunder ved jordfeil.

3.2.2 Forskriftens krav til berøringspenninger

Ved jordfeil i nettet, vil det oppstå berøringspenninger. Det er satt grenseverdier i veiledning for forskriften FEF-06 [11]. Disse verdiene kan leses ut fra figur 5:



Figur 5: Tillatt berøringspenning U_{Tp} §4-11 Jordingsystem FEF-06 [9]

Figur 5 viser hvilke berøringspenninger og utkoblingstider som gjelder for å overholde forskriftens krav.

” Tillatt berøringspenning U_{Tp} i figur 5 ansees være overholdt dersom en av følgende forutsetninger er oppfylt [11]:

- Jordingsanlegget er en del av et utbredt jordingsystem
- Jordpotensialhevingen U_E ved jordfeil skal ikke overstige 2 ganger tillatt berøringspenning
- Jordpotensialhevingen U_E ved jordfeil skal ikke overstige 4 ganger tillatt berøringspenning samtidig som tiltak beskrevet under avsnittet "Tiltak for å redusere berøringspenning" skal være iverksatt.

Dersom disse forutsetningene ikke er oppfylt, skal den reelle berøringspenningen U_T beregnes eller måles. Den reelle berøringspenningen U_T skal ikke overstige den tillatte berøringspenningen U_{Tp} . Ved beregning av den reelle berøringspenningen U_T kan tilleggsresistanser i henhold til HD 637 S1 bilag C benyttes.”

3.2.3 KILE-ordningen

Ifølge NVEs historie og innføring av «*KILE-ordningen*» [3] innførte norske myndigheter i 2001 en ordning kalt KILE-Ordningen (Kostnader ved Ikke Levert Energi). Denne ordningen ble innført for å motivere nettselskapene til å bygge, vedlikeholde og drifte kraftnettet med en samfunnsøkonomisk optimal leveringspålitelighet.

Ordningen gir en inntektsreduksjon i nettselskapenes inntektsrammer, om nettkunder opplever avbrudd i strømforsyningen.

KILE kostnadene blir beregnet utfra nettkundenes ulemper ved avbrudd ved ikke levert energi.

Nettkundene er delt inn i ulike kundegrupper hvor det ut fra individuelle kostnadsfunksjoner blir beregnet KILE beløp der noe av beregningsgrunnlaget er etter varighet av avbrudd, tidspunkt når avbrudd inntreffer og om avbruddet er varslet eller ikke.

Denne ordningen er hjemlet og regulert i «*Forskrift om kontroll av nettvirksomhet*» og «*Forskrift om leveringskvalitet*» se referanse [23] og [24].

3.3 Jordfeil og berøringsspenninger

Jordfeil og berøringsspenning kan medføre fare for liv, helse og materielle verdier. Derfor er det nødvendig å forhindre at dette oppstår. Dette kapitlet gir en liten innføring i hva jordfeil, berøringsspenninger og ladestrømmer er. Dette for å danne et grunnlag i samråd med forskriften for å se utfordringene oppdragsgiveren har ved innkobling av et kabelrikt område inn på et isolert distribusjonsnett.

3.3.1 Jordfeil i høyspenningsnett

I høyspenningsnett vil det ved ca. 25A jordfeilstrøm oppstå utfordringer ved at forbigående jordfeil vil skape lysbuer som ikke vil slukke, Dette igjen vil gi mange unødvendige utkoblinger på jordfeil. [10]

En økende trend er at kabel anlegg erstatter luftlinjer og nye anlegg blir bygd som kabelanlegg i distribusjonsnettet. En konsekvens av dette er at jordfeilstømmene i nettet øker betraktelig.

Kabel skaper 50-100 ganger jordfeilstrom pr lengdeenhet sammenlignet med luftlinjer.

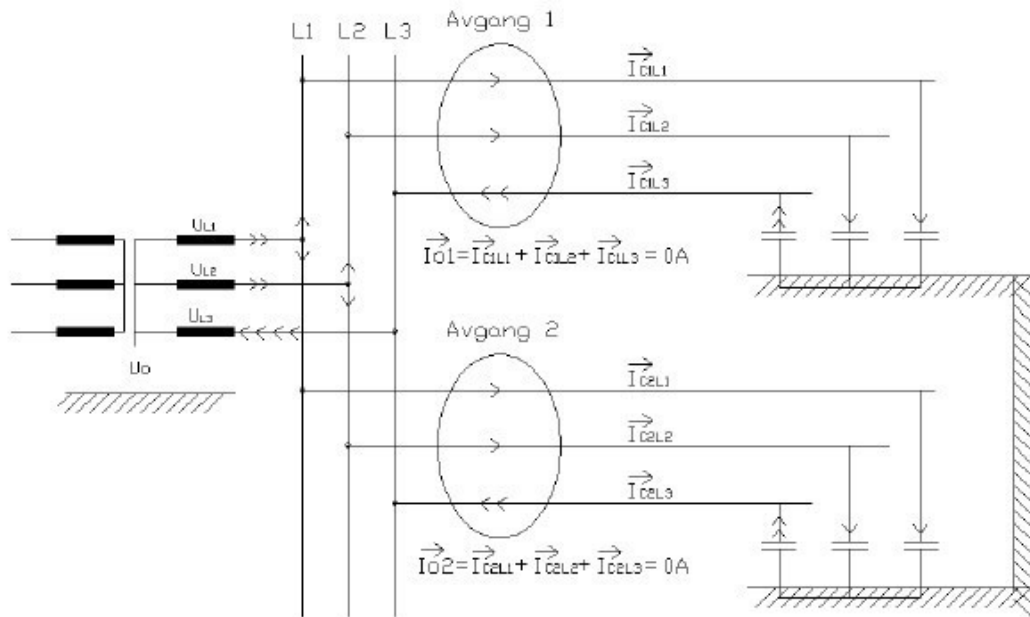
Som følge av økte jordfeilstømmer blir forskriftskravet om maksimale berøringspenninger vanskelig å holde.

Viktige begrep i forhold til jordfeil er ladestrømmer, Jordfeilstømmer, usymmetrstrøm I_0 og Egenbidrag I_{EB} . Dette vil nå bli forklart litt nærmere eller se RENblad 7505 [10].

3.3.2 Ladestrømmer

Ladestrømmer blir begrenset i det nettet som henger sammen galvanisk og nettets kapasitans mot jord bestemmer størrelsen. Dette kalles også tomgangstrømmer og drives av driftsspenningen. [10]

Om nettet er spolejordet eller isolert, vil strømflyten være den samme i nullpunktet, Se figur 1 som viser ett friskt isolert nett. Figuren viser hvordan man kan se nettets kapasitans mot jord.



Figur 6: Ladestrømmer i friskt isolert nett [10].

3.3.3 Ladestrøm blir jordfeilstrom

Ved jordfeil vil fase med feil få jordpotensial, mens friske faser sin fase jord spenning vil øke med $\sqrt{3}$.

Ladestømmene på faser uten feil vil også som følge av spennings økningen, øke med $\sqrt{3}$. Når dette skjer endres også navnet til jordfeilstrom. Det kan oppstå jordfeilstømmer med berøringspenninger som er farlige. [10]

Den kapasitive jordfeilstømmen I_c for luftlinje kan beregnes ifølge RENblad 7505 etter denne formelen:

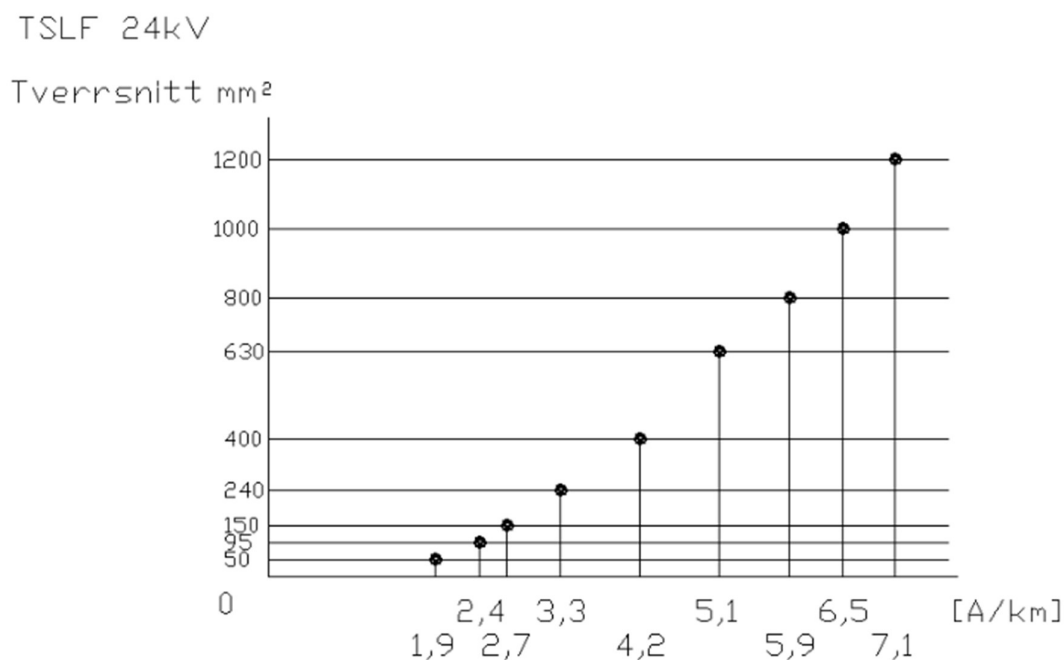
$$I_c = \frac{U_n * l}{300} \quad (2)$$

U_n = Linjespenning i kV

l = Linjelengde i km

Siden jordfeilstøm i kabel er betydelig større enn i luftlinjer, vil ikke denne formelen være tilstrekkelig.

Her vil jordfeilstømmene være sterkt berørt av hvilket ledertverrsnitt som blir brukt. Figur 7 viser jordstrøm som funksjon av kabeltverrsnitt på PEX isolert 24kV TSLF kabel. [10]



Figur 7: Jordstrøm pr km kabel som funksjon av kabeltverrsnitt [10].

Felles for kabelnett og luftnett er at jordfeilstømmene summeres i feil stedet og flyter tilbake til nullpunktet i transformatoren gjennom fasen som har feil.

Kapasitansen i fasene bidrar med sin egen jordfeilstøm I_c .

Uansett hvor i nettet feilen oppstår vil jordfeilstømmen I_f være like stor.

3.3.4 Usymmetristrøm I_0

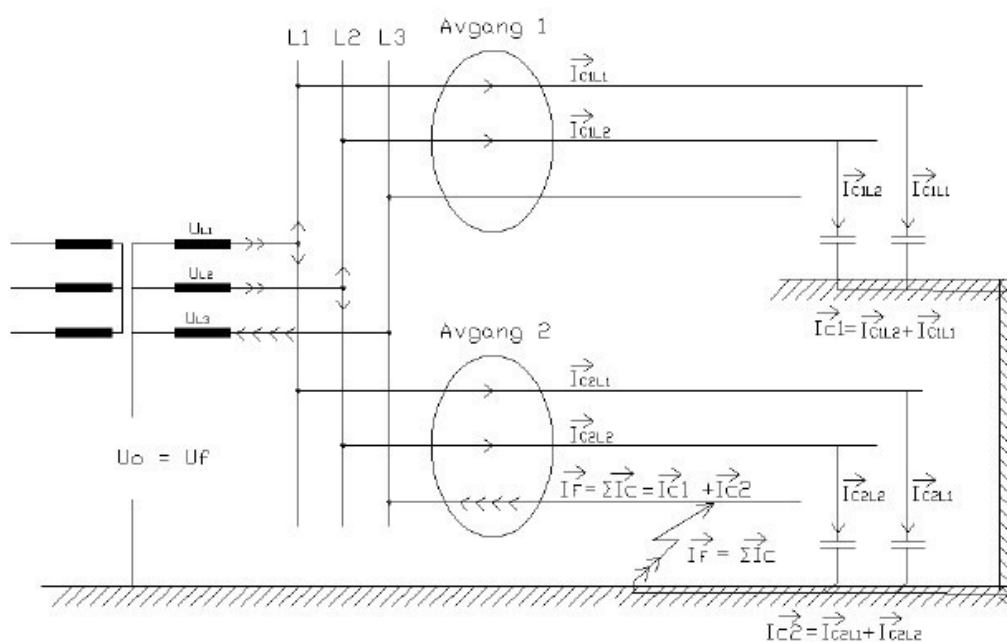
Ved jordfeil i høyspentnett vil det på alle avganger flyte usymmetriske strømmer. Friske faser vil generere strøm ut fra trafoside og returstrøm til trafo vil gå gjennom den fasen som har jordfeil. [10]

3.3.5 Egenbidrag I_{EB}

Dette er egenbidraget avgangen har. I figur 8 og figur 9 vil egenbidraget være den kapasitive jordfeilstømmen I_c som en spesifikk avgang skaper [10].

For å finne dette egenbidraget kan det gjøres målinger eller beregnes i ett nettinformasjonssystem (NIS). Det forutsettes ved beregning at nettdata er korrekt lagt inn i NIS systemet.

3.3.6 Jordstrømmer isolert nullpunkt



Figur 8: Jordfeilstømmer i nett med isolert nullpunkt [10].

Isolerte nett har ikke nullpunktet i transformatoren koblet til jordpotensial, men fremdeles vil det være kapasitiv potensialforskjell mellom faser og jord. Denne kondensatoreffekten kalles

ladestrøm. Ved jordfeil vil energien lades ut gjennom feilstedet og det blir en sluttet krets. Figur 8 viser hvordan jordfeilstrømmene vil gå i nettet ved jordfeil mellom en fase og jord.

I følge RENblad 7505 [10] og NORPEC Rapport NP-RP04-20.028 [17] vil Jordfeilstømmen I_F vil bli summen av alle egenbidragene i kretsen I_c . Formelen blir:

$$I_F = \sum I_c = 3I_0 = \frac{3 * U_f}{Z_0 + 3 * R_f} \quad (3)$$

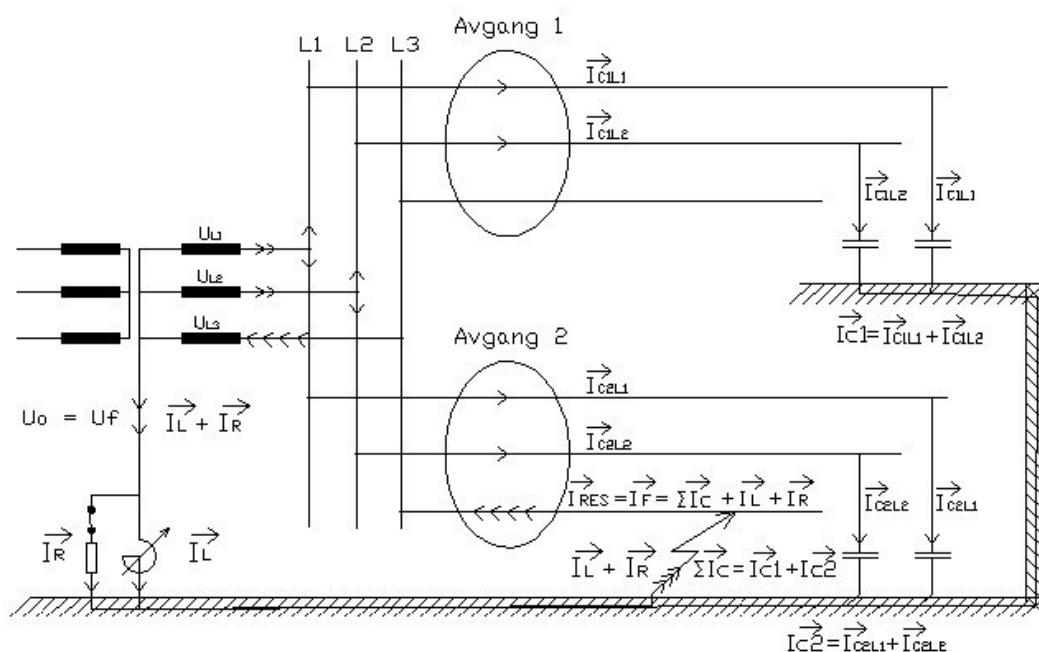
$$Z_0 = \frac{1}{\omega C_{j,total}} = X_{Cj,total} \quad (4)$$

Formelen for jordfeilspenningen U_0 blir ifølge NORPEC Rapport NP-RP04-20.028 [17]:

$$U_0 = U_f * \frac{Z_0}{Z_0 + 3 * R_f} \quad (5)$$

I disse formlene er R_f motstanden mellom feil sted og jord.

3.3.7 Jordstrømmer spolejordet nett



Figur 9: Jordfeilstrom i nett med spolejordet nullpunkt [10].

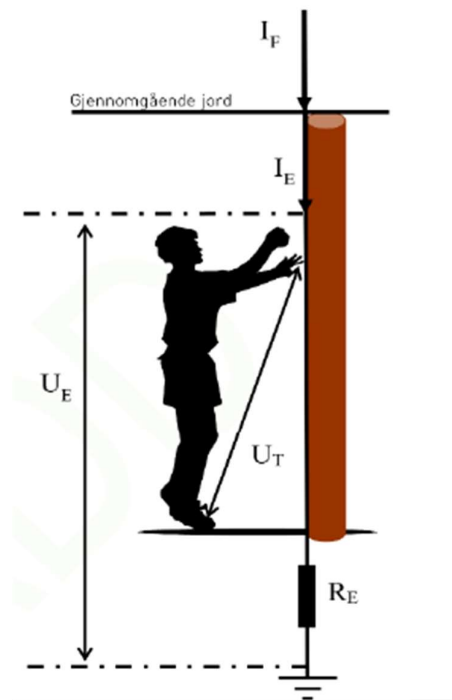
Figur 9 viser jordfeilstømmer i nett med spolejordet nullpunkt. Når nettet er uten jordfeil, vil jordspolen ikke ha spenning. Når det oppstår jordfeil, vil jordspolen bli spenningsatt. Når dette skjer, vil det gå en induktiv strøm fra spolen gjennom jord til feilstedet og komme tilbake gjennom faseleder med feil tilbake til nullpunktet.

I figur 9 er spolen koblet inn i transformatorens nullpunkt. Spolen kan også tilknyttes nettet via kunstige nullpunkt. Spolestrømmen I_L er 90grader i motfase med de kapasitive strømmene, og vil dermed motvirke og redusere jordfeilstømmen I_C . Resterende jordfeilstøm vil være induktiv eller kapasitiv avhengig av kompenseringsgraden som blir valgt. Ved korrekt kompensering av nettet vil jordfeilstømmen ikke overstige anbefalt verdi og lysbuen vil selvslukke [10].

Spolejordet nett har en mer kompleks beregning for strøm i feilstedet, Ukompensert strøm I_{res} er lik feilstømmen som er summen av I_C , den induktive strømmen I_L og den ohmske strømmen I_R som kommer fra parallellmotstand som settes i spolekretsen [10] Formelen blir:

$$I_{RES} = I_F = \sum I_C + I_L + I_R \quad (6)$$

3.3.8 Berøringsspenninger



Figur 10: Illustrasjon berøringspenning [22].

Figur 10 viser sentrale begreper om jordfeilstømmer og berøringspenninger, i tillegg beskriver RENblad 8010 flere begreper som også tas med:

U_E er potensialheving mellom feilstedet og sann jord som er når ledningsevnen er så god at potensialforskjeller ikke oppstår.

U_{Tp} er tillatt berøringspenning.

U_T er berøringspenning.

I_E er strømmen til jord via jordingsanlegget.

I_F er jordfeilstøm.

I_C er kapazitiv jordfeilstøm.

R_E er resistans til jord.

Z_E er impedansen for det sammenkoblede jordingssystemet til jord.

r er reduksjonsfaktor.

I_N er strøm gjennom transformatorens nøytralpunkt.

Ved jordfeil vil det samtidig oppstå berøringspenninger. Teoretisk kan denne potensialhevingen beregnes med følgende formel [9], [10] og [22]:

$$U_E = I_E * Z_E \tag{7}$$

Anlegget denne studentoppgaven omhandler har ikke gjennomgående jord og vil ifølge RENblad 8010 for system uten gjennomgående jord vil $I_E=I_c=I_F$ [22].

3.4 Relevern

Relevern er et omfattende teorikapittel å sette seg inn i. Derfor blir det bare fokusert på det mest relevante i forhold til oppgaven. Det viktigste for et kompensert distribusjonsnett er at jordfeilvernene på avgangene er tilpasset forholdene. Det medfører blant annet at det stilles strengere krav til målenøyaktighet på jordfeilvern hvor det er mye kabler på avgangene kontra luftstrekk. Et luftstrekk som er kompensert kan leges ved at lysbuen selvslukker. En kabel med overslag vil ha en permanent skade i isolasjonen, og feilen vil derfor vedvare til bryteren slår ut. Hvis jordfeilvernet ikke klarer å detektere det som kalles for restriking/intermittent jordfeil hvor isolasjonen i kabelen punktvis brytes ned, risikerer man at det utvikler seg til en større feil. I verste fall blir feilen til slutt så stor at det blir 2polt eller 3p kortslutning og kan ta ned større deler av distribusjonsnettet.

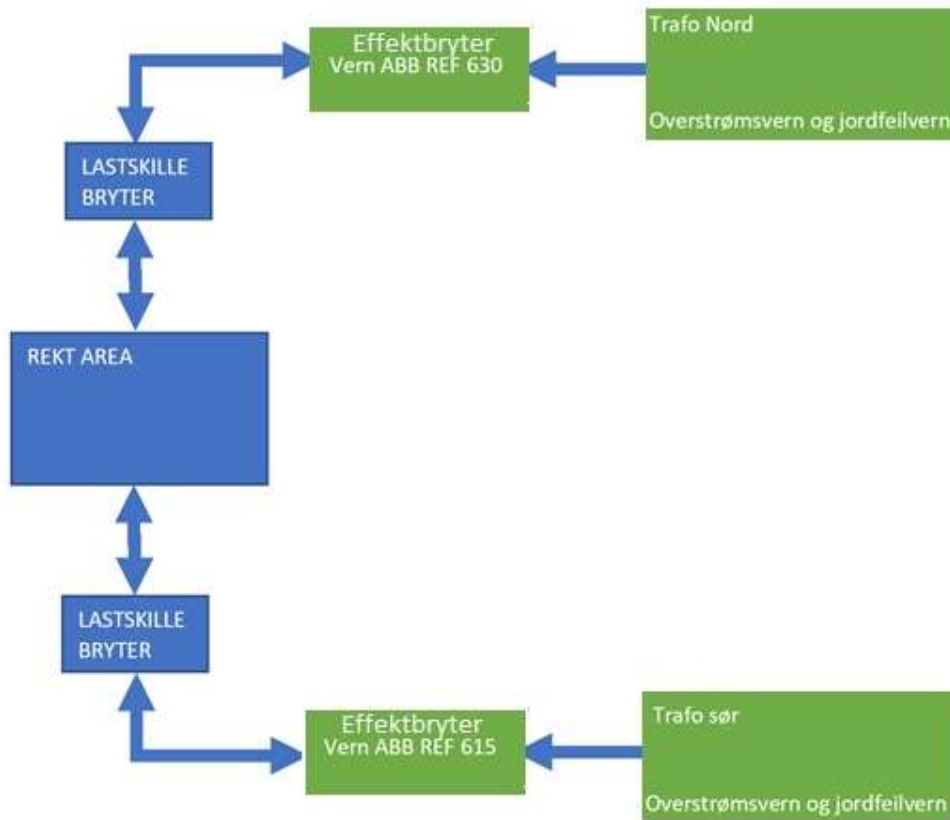
3.4.1 Jordfeilvern

Rele brukes til å begrense eller hindre skade på elektriske utstyr som trafostasjoner og industri eller hus installasjoner. The institute of electrical electronic engineers (IEEE) definerer et rele som “an electric device that is designed to respond to input conditions in a prescribed manner and, after specified conditions are met, to cause contact operation or similar abrupt change in associated electric control circuits.”[4]

Ved en stor jordfeil antas det at overgangsmotstanden mot jord $R_f=0\text{ohm}$. Da vil U_o , som er nøytralpunktsspenningen være lik systemets fase-jord spenning. For 20kV nett vil dette være i størrelsesorden 11,5kV.

For kompenserte distribusjonsnett er det kritisk med nøyaktige målinger for at jordfeilvernene skal reagere slik de burde. Derfor anbefaler ABB at det benyttes kabelkjerne strømtransformatorer CT for å måle reststrømmene I_o .

På høyspenningsnivå bruker man allerede overstrøms- og jordfeilvern og lastskille brytere i området. Trafostasjonene har overstrømsvern og jordfeilvern. I tillegg er det effektbrytere på avgangene mot REKT. Det er installert lastskillebryter på begge sider av området. Linjen mellom trafoen er på 22kV. Se figur 11 for oversiktsbilde.



Figur 11: Topologi over området

3.4.2 Overstrøms- og jordfeilvern

Overstrøms- og jordfeilvern

Skal beskytte mot mulige farlige effekter av overstrøm i ett høyspenningsnett. Der høye strømmer kan oppstå ved feilsituasjoner. Dette er en av de eldste og enkleste formene for vern.

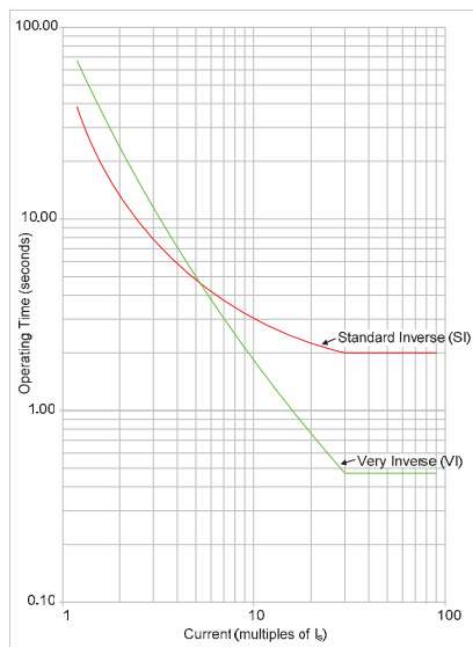
Overstrømsvern brukes ofte på radiale nettverk. Der effekten flyter i en retning. For mer komplisert nett bør man bruke andre former for beskyttelse.

Virkemåte:

Overstrøms- og jordefeilvern releet har en måletrafo som måler strømmen på linjen, og sender videre signal til en bryter som kan koble ut linjen hvis den oppdager en bestemt strøm over en gitt tidsperiode.

Innstillinger av overstrøms- og jordfeilvern:

For å kunne bruke ett overstrøms- og jordfeilvern må man velge tid/strøm karakteristikk for releet. Dette tar utgangspunkt i nettverkets merkestrøm, og kan tillatte overstrøm i mindre perioder.



Figur 12: Viser to forskjellige karakteristikk for ett rele [5]

Figur 12 viser ett eksempel på en slik karakteristikk, med to forskjellige karakteristikk VI og SI. Der VI slår raskere ut på høye strømmer enn SI. Hvis releet (VI) måler en strøm på 30 x merkestrøm vil den utløses innen 0,50 sekund.

Overstrøms- og jordfeilvern på den aktuelle linjen

På den aktuelle linjen er det to overstrøm- og jordfeilsvern. Refererer til figur 11 for plassering av vern. Trafo Nord har ABB REF 630, og trafo Sør har ABB REF 615.

Lastbryter er en bryter som i åpen stilling oppfyller de krav til isolasjonsnivå som stilles til en skillebryter. Ref. NEK 400:2014 (208.11). Denne typen bryter skal tåle inn- og utkobling av påregnelige laststrømmer, den er imidlertid ikke i stand til å bryte kortslutningsstrømmer. Til bryting av alle påregnelige strømmer, inkludert kortslutningsstrøm benyttes effektbryter. Det kan være krav til at en lastskillebryter skal kunne legges inn mot kortslutning. [6]

Effektbryter er en bryter som er dimensjonert for å slutte, føre og bryte normale belastningsstrømmer og påregnelige kortslutningsstrømmer. Denne typen brytere står som regel i sammenheng med relevern som skal detektere tilstander der den hurtig skal koble ut strømmen.

3.5 Kapasitans i isolertnett og kabelnett

Kapasitansen i luftstrekk er vesentlig mindre enn for kabler forlagt i bakken. Dette kapitlet vil ta for seg forskjellene mellom disse to distribusjonsnettene. Det vil fremkomme hvordan man kan beregne de kapasitive strømmene enten det er isolertnett eller kabelnett.

3.5.1 Kapasitans i isolert nett

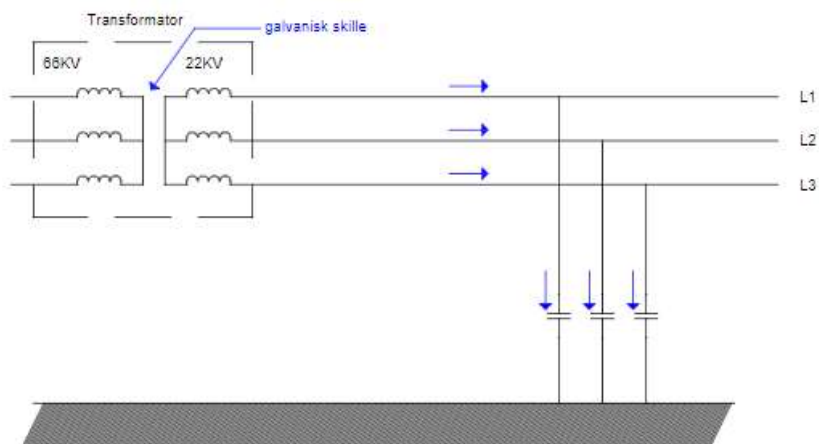
I et rent luftnett er kapasitansene til jord små. De ligger på omtrent 5nF/ km. Ved en direkte jordslutning i et isolert nett blir formelen for jord:

$$I_j \approx 3 * \omega * C_0 * U_f * I_j * j \approx 3 * \omega * C_0 * U_f * j \quad (8)$$

Ved metallisk jordslutning er $R_f=0\Omega$ og dermed utelatt fra formelen.

På en utstrekning på 10 km utgjør dette en jordfeilstrom på 0,6A i et 22 kV nett og 0,3A på et 11 kV nett. Problemet med rene luftnett som ikke er revolterte, er ulik kapasitiv avledning til jord lager en spenning over transformatorens nøytralepunkt. Dette gjør at vernets U_0 innstilling ikke kan stilles for lavt, noe som gjør det vanskelig å detektere høyohmige feil. [7]

Et isolert nøytralepunkt illustreres best ved å henvise til figur 13 nedenfor.



Figur 13: Isolert nøytralpunkt [17]

Som vist i figur 17 så ser man at nøytralpunktet i det isolerte nettet ikke har fysisk tilkobling til jord. Allikevel oppstår det en kobling mot jord via kapasitive strømmer grunnet kondensatoreffekt mellom spenningsførende deler og jord. Det kan også oppstå en resistiv forbindelse mellom spenningsførende deler og jord grunnet dårlig isolasjon, fuktighet, saltbelegg på isolatorer og lignende.

3.5.2 Kapasitans i kabelnett

Et kabelnett karakteriseres ved store kapasitanser til jord. Som en rimelig verdi kan en sette $0,3\mu\text{F}/\text{km}$ for 22 kV kabelnett nett.

$$I_j \approx 3 * \omega * C_0 * U_f * I_j * j \approx 3 * \omega * C_0 * U_f * j \quad (9)$$

Om et kabelnett har en utstrekning på 10 km betyr dette en strøm på 35,59 A i et 22kV nett.

Dette er ca. 60 ganger større enn for tilsvarende jordslutning i luftnett. Dette kan føre til problemer

med å overholde forskriftenes krav om berøringspenning. Kabelnett har liten usymmetri noe som muliggjør en lav U_0 innstilling av jordfeilvernet slik at høyohmige feil kan detekteres. [7]

3.5.3 Kapasitans i blandet nett

Er det både kabel og linje i nettet kan det by på problemer. Det kan oppstå store jordfeilstømmer som kan føre til høye berøringsspenninger og ved kapazitiv usymmetri gjør det vanskelig å stille lav U_0 spenning. Dette begrenser vernets følsomhet til å detektere jordfeil med stor feilmotstand. [7]

3.6 Jordingsystemer

Erik Nordskog ved Norpec forteller at ved planlegging av et sikkert distribusjonsnett er det flere metoder for å ivareta sikkerheten. Deriblant er det ulike typer systemjordinger man kan velge mellom. Valg av systemjording pleier å være i forhold til nettets spenning. Se tabell 2 nedenfor for referanseverdier til de ulike jordingssystemene. De ulike jordingssystemene vurderes ut ifra systemspenning, kapasitive jordfeilstømmer og egenskapene til jordfeilvernet.

Tabell 3: Systemjording i ulike system[17]

Systemjording	Aktuelle nett
Isolert nøytralpunkt	11/22kV distribusjonsnett 230V IT-nett
Spolejordet	11/22kV distribusjonsnett
Spole uten Ro	66/132kV transmisjonsnett
Høyohmig jordet	Generator nøytralpunkt Industri
Direkte jordet	420/300kV transmisjonsnett
Lavohmig jordet	132kV transmisjonsnett med store jordfeilstømmer 400V TN-nett

4 Metode

Metodevalgene som er brukt for å løse oppgaven og for å komme frem til en konklusjon på rapporten redegjøres her. Det innebærer at det sies noe om innhenting av informasjon og data. Validiteten og reliabiliteten for informasjonen som er brukt blir presisert i eget underkapittel.

Dernest vil neste underkapittel si noe om prosessen og fremgangsmåten rundt simuleringene og beregningene som har blitt utført. Programmene som er blitt benyttet blir belyst med deres sterke og svake sider. Det belyses også hvilke forutsetninger og avgrensninger som er lagt til grunn for resultatene.

For at rapporten skal kunne gis en vitenskapelig verdi og nytte for oppdragsgiver er det viktig at det kommer tydelig og klart frem hvordan denne rapporten eventuelt kan gjenskapes av andre for vitenskapelig forskning eller kontroll. Derfor er det viktig at metodevalgene er grundig analysert og gjennomgått slik at rapportens validitet og reliabilitet er så høy som mulig.

Prosjektgruppen har valgt å benytte en skala på både validitet og reliabilitet som strekker seg fra lav, begrenset, middels, god og høy.

4.1 Litteratur

Det var til tider utfordrende å finne relevant litteratur, da spesielt om distribuerte spoler. For leserne av dette dokumentet henvises det til vedlegg A for tips og råd for kontaktpersoner som kan være nyttige. Det ble hentet en del fra internett og digitale fagbøker. Prosjektet har kun referert og brukt kilder som ble ansett til å være av god kvalitet og pålitelig. For å ivareta en god kildekritikk ble det vektlagt sider som ble oppdatert jevnlig og hvor forfatter er synliggjort med navn og er søkbar. Nettsiden må fremstå som seriøs og ha et sikkert nettsertifikat før man går inn på siden. Ved siden av faglitteratur ble det benyttet webinar fra ABB sin læringsportal. Det ble tilsendt prosjektgruppen dokumenter av stor betydning fra fagpersoner som har tidligere erfaringer og jobber med fagområdet til daglig.

4.1.1 Validitet og reliabilitet

Gjennom flere samlinger via Teamsplattformen har prosjektgruppen diskutert og jevnlig vurdert all data som ble innhentet. I og med at den informasjonen som ble innhentet ble kontrollert opp mot tilsvarende litterære verk, hvor det ble funnet liten eller ingen variasjon mot hverandre anses validitet og reliabilitet som høy. Mye av fagstoffet anses allerede som en etablert gjengs sannhet innad i fagmiljøet. Det ble tatt stikkprøver på kilder som i utgangspunktet kunne virke usikre opp mot tilsvarende litteratur og fagpersoner. Dette ble utført for å gjøre troverdigheten i rapporten så høy som mulig.

4.2 Beregninger og simuleringer

Programmene som ble brukt for å hente ut kapasitive jordfeilstømmer, impedanser og andre nyttige verdier fra distribusjonsnettene heter Digpro. Dette er programmet som oppdragsgiver bruker i sitt daglige virke. Digpro ble etablert i 1989 og er Nordens ledende leverandør av systemet sitt for telekom og elektriske kraftdistribusjonssegmenter. [1] Dette innebærer at programmet Digpro er velkjent innad i kraftleverandørmiljøet og anses som et troverdig system for å hente ut informasjon om distribusjonsnettene rapporten skal undersøke.

Simuleringer og beregningsverdier ble utført med Matlab og Simulink. MATLAB er et matematisk simuleringsprogram med et eget scriptspråk basert på programmeringsspråket C. Utviklingen begynte på slutten av 1970-tallet. Matlab ble benyttet under studietiden og er et vel anerkjent program med mange bruksområder. Simulink er et tilleggsprogram i MATLAB. Det er et grafisk programmeringsmiljø for modellering, simulering og analyse av dynamiske systemer.

4.2.1 Validitet og reliabilitet

For at Digpro skal fungere som forventet er man avhengige av at korrekt informasjon er lagt inn i systemet. Under simuleringen kom det noen feilmeldinger når det skulle hentes ut datasett for linjestrekket. Prosjektgruppen fikk korrigert noe av dette, dog var det noen feil i programmet med tillagte verdier. På bakgrunn av avgrensningen som ble gjort har rapporten klart å holde kvaliteten på datasettet høyt ved å avgrense bort områder som ikke er relevante for rapporten og problemstillingen.

Når det gjelder Matlab/Simulink er validiteten og reliabiliteten avhengig av verdiene som ble innhentet fra Digpro og oppsettet av selve simuleringsmodellen. Her ble det brukt mye tid på simuleringsmodellen for å forsikre seg om at det ble riktige simuleringer som ble foretatt. For etterkontroll av selve simuleringsmodellen ble resultatene prøvd opp mot aktuell teori i kapittel 3 og forventede verdier ut ifra Digpro. Prosjektgruppen anser derfor simuleringsmodellen og beregninger gjort i henhold til uthentet informasjon klassifisert som høy validitet og reliabilitet.

4.3 Eksterne ressurser i form av fagpersoner

Det ble benyttet flere eksterne fagpersoner som bistod i prosjektet for å sikre at metodene i rapporten tilsvarer forventet grad av ingeniørfaglig utførelse og kvalitet. Deriblant ble det avholdt et kurs for prosjektgruppen og oppdragsgiver i regi av Digpro sin representant. Se mer om kontaktinformasjon for benyttete fagpersoner i vedlegg A.

Norpec (tidligere Jacobsen Elektro) har tidligere samarbeidet med oppdragsgiver, og var også derfor villige til å gi sin bistand med tidligere prosjektert relevernplan og teknisk informasjon som var relevant for den delen av distribusjonsnettet som rapporten undersøker.

Via veilederen for hovedoppgaven (Ian Norheim) ble det foreslått å ta kontakt med ABB. På ABB ble Ari Wahlroos kontaktet siden vedkommende er en stor ressurs innenfor fagområdet.

Alle eksterne nettverk og kontaktpersoner som ble benyttet har lang erfaring og er anerkjente for arbeidet sitt i bransjen. Det anses derfor som høy validitet og reliabilitet å benytte seg av disse ressursene.

5 Simuleringer

I kapittel 3 «Teori» gis det en gjennomgang av teorien tilknyttet problemstillingen. Denne teorien er viktig for å gi en forståelse av simuleringen og resultatene.

I dette kapitlet gjennomgås simuleringsmodellen. For å kunne simulere eventuelle forbedringer i området er det konstruert 3 simuleringsmodeller.

Modellene er designet for situasjoner der REKT blir omkoblet fra transformator Nord til Sør

- Modell 1 (vedlegg G) er uten spolekompensering.
- Modell 2 (vedlegg H) er med spolekompensert ved kunstig nullpunkt på samleskinne til transformator Sør.
- Modell 3 (vedlegg I) er med spolekompensering på nullpunktet til transformatoren Sør.

5.1 Simuleringsmodellen

I dette underkapitlet skal metoden for konstruksjon av simuleringsmodellen beskrives. Det blir også argumentert for valg av løsninger og eventuelle forenklinger som er gjort.

Avslutningsvis gjøres en vurdering av resulterende validitet og reliabilitet for simuleringsmodellene.

5.1.1 Modellens oppbygning

Ett skjermbilde av MATLAB kretsene finnes i vedlegg G, H og I. Til sammenligning ligger det ett linjediagram over området i vedlegg J.

Spenningskilden (22kV) er innstilt etter innstillingene gitt i vedlegg F som er hentet fra merkeskiltet på transformatoren, resten er standard innstillinger fra MATLAB.

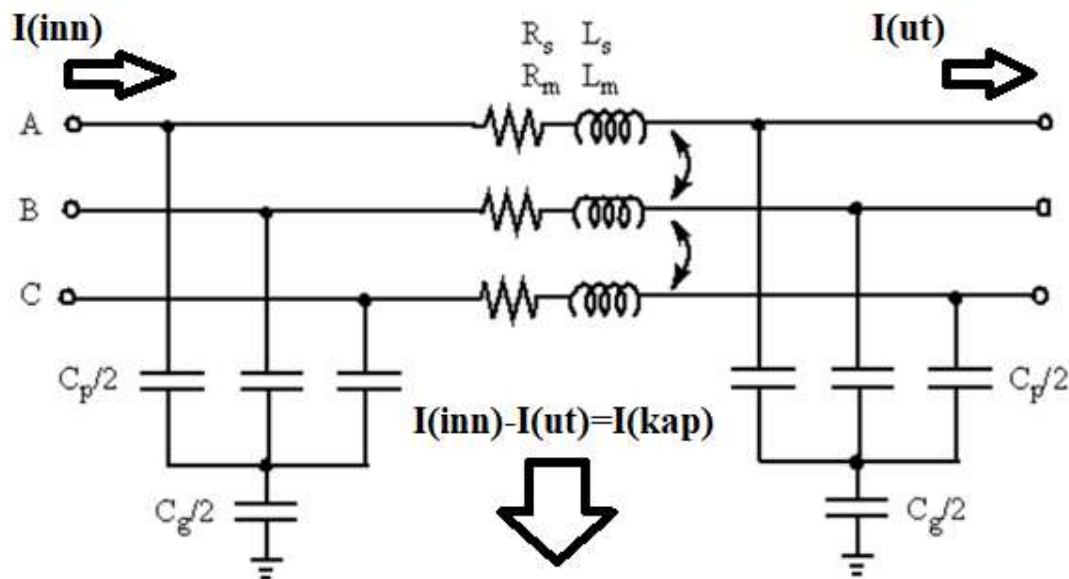
Spenningskilden i vedlegg G og H er ikke jordet fordi nettet er isolert. Dette gjenspeiler nettets oppbygning per i dag. Vedlegg I viser kretsen med en sentralspole koblet inn på nullpunktet til spenningskilden i en Yn-kobling.

Lastene på slutten av avgangene med kabelstrekene har blitt satt til svært små verdier. Dette har blitt gjort for å få svært små kortslutningsstrømmer som resultat av lasten. Da lasten ikke har noe innvirkning på de kapasitive jordfeilstømmer.

For å begrense oppgaven har alle avgangene før REKT blitt modellert til å bestå av ett kabelstrek «Avganger Kabel» som Three-Phase PI Section Line. Kablene i REKT området har blitt modellert som en avgang. For å oppnå samme kapasitive jordfeilstømmer som i Digpro, måtte kabellengdene tilpasses i PI-modellen.

Alle verdier blir hentet ut fra «BUS» som skal representerer samleskinner. Der strøm og spenninger blir målt, og levert til oscilloskop som visualiserer de gitte spenninger eller strømmene. Samleskinnene er ideelle, og har ingen innvirkning på kretsen.

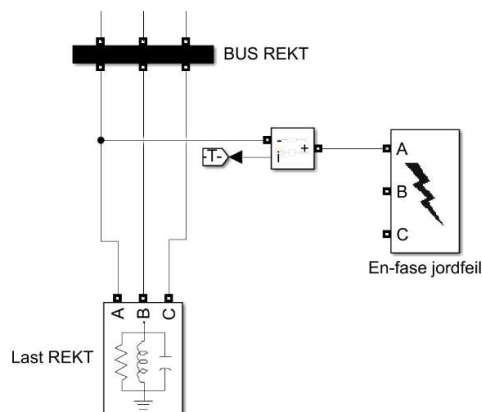
For å beregne verdiene for kapasitive egenbidrag (ladestrømmen) måles alle strømmene inn i kabelnettet «I(inn)», for så å trekke fra strømmen ut av kabelnettet «I(ut)». Differansen blir strømmen som går i kondensatoren til jord «I(kap)» som vist på figur 14.



Figur 14 Koblingsskjemaet for blokken "Three-Phase PI Section Line" i MATLAB [15]

For å oppnå 1-polt feil til jord brukes blokken «Three-Phase Fault» i Matlab. Denne blokken er kun koblet til fase A som i figur 15. Blokken er innstilt til å skape en feil på fase A mot jord ved 0,25 sekunder og avsluttes etter 0,58 sekunder for å vise hvordan en feil over tid vil

påvirke simuleringen. Videre er blokken innstilt med standard innstillinger fra Matlab. Figur 14 viser også at modulen består av en pi-modell, og ikke flere. Dette gjør at spenningsfordelingen over den, ikke er realistisk over lange kabelstrekk.



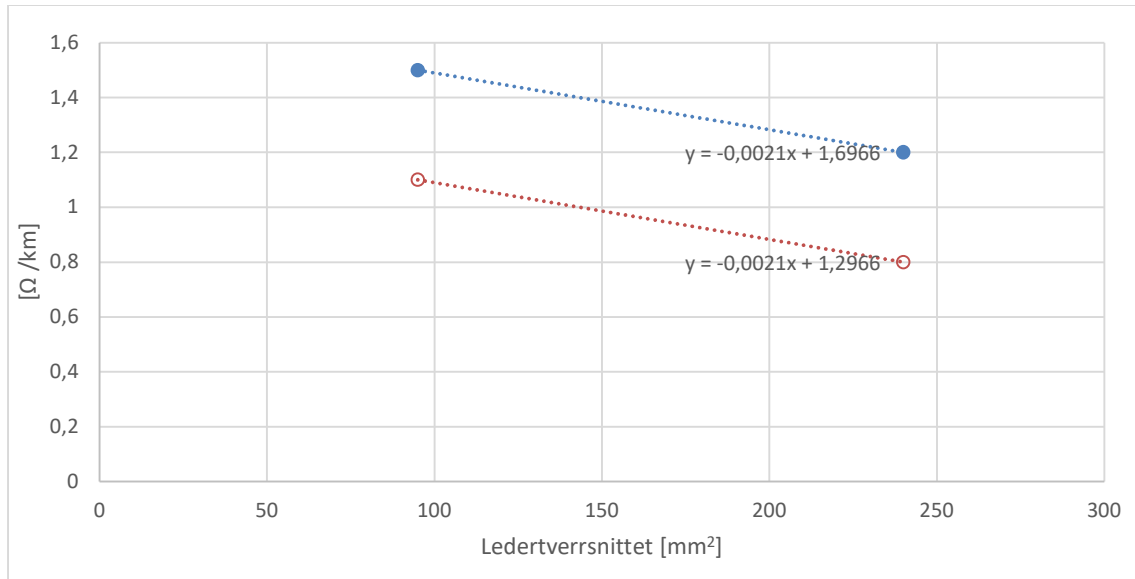
Figur 15: Viser «Three-Phase Fault» modulen i simuleringsmodellen

I simuleringsmodellene 2 og 3 er det koblet inn en motstand i parallell med spolen for å simulere tapene i spolen. Som beskrevet i teori kapittelet er denne estimert til å være på 2.5 % av spolestrømmen (markert som parallell motstand i simuleringen).

5.1.2 Tekniske data for kabler

I dette underkapittelet beskrives de tekniske dataene for kablene som ble brukt i simuleringen. For å oppnå en pålitelig modell blir kablene simulert som “Three-Phase PI Section Line”. Denne blokken inneholder pluss og nullsystem impedansen. Som er viktig for å få et realistisk system.

Kabelen som er mest av er TSLE 3x1x50AL 50/16 mm². Verdiene til pluss systemet til kabelen finnes i vedlegg B. Verdiene til null systemet var svært vanskelig å finne. Siden det finnes svært lite litteratur på dette området. Etter stormen Gudrun 8 januar 2005 utarbeidet Elforsk en rapport for å indentifisere tekniske problemstillinger ved ombygging fra luftstrekk til kabler. I denne rapporten ble noen få type høyspenningskabler kartlagt [13]. Ved hjelp av verdiene fra rapportene [13][14] og den lineære tilnærmingen i vedlegg D, gir dette en tilnærming for kabelverdier.



Figur 16: Viser selve den lineære tilnærmingen av kablene.

Figur 16 viser selve modellen for den lineære tilnærmingen av kablene. De to punktene er R_0 og X_0 verdiene til kablene med tverrsnitt 95 og 240 mm^2 i vedlegg C. Der X-aksen er ledertverrsnittet [mm^2] og Y-aksen [Ω/km] for blå (R_0), rød (X_0). X_1 og X_0 i henry er utregnet med ohms lov med impedanser.

I tabell 3 finnes verdiene for kabelmodellen. Der R_1 , X_1 , C_1 er hentet fra vedlegg D og R_0 , X_0 er hentet fra den lineære tilnærmingen i figur 3. C_0 er valgt samme som C_1 , som er vanlig for kabler TXSE/TSLE [15].

Tabell 4: Viser lineær tilnærming av kablene

Ledertverrsnitt	R_1 [Ω/km]	X_1 [Ω/km]	X_1 [mH/km]	C_1 [$\mu\text{F}/\text{km}$]	R_0 [Ω/km]	X_0 [Ω/km]	X_0 [mH/km]	C_0 [$\mu\text{F}/\text{km}$]
50 mm^2 (modell)	0,641	0,14	0,45	0,16	1,6	1,2	3,8	0,16

Det er mange mindre kabelstrekk i området. En oversikt over alle kabler og linjer sett fra transformator Sør finnes i vedlegg J.

5.1.3 Validitet og reliabilitet

I dette underkapittelet vurderes validiteten og reliabiliteten til grunnmodellen. Validiteten avgjøres basert på hvilken grad simuleringen gjengir virkeligheten. Reliabilitet avgjøres basert på hvilken grad simuleringsmodellen er i stand til å beregne de relevante verdiene.

Reliabilitet er den samme for hele grunnmodellen, og er ikke avhengig av hver enkelt forenkling. Modellen er konstruert til å tilsvare distribusjonsnettet i området. Ved at alle verdier kan hentes ut fra modellen, og at Simulink kan utlevere samme resultat ved gjentatte forsøk, gitt samme innstillinger. Negative faktorer som kan svekke reliabiliteten er at ved å endre innstillingene mange ganger kan avvik eller feil innstilling legges inn i modellen ved brukerfeil.

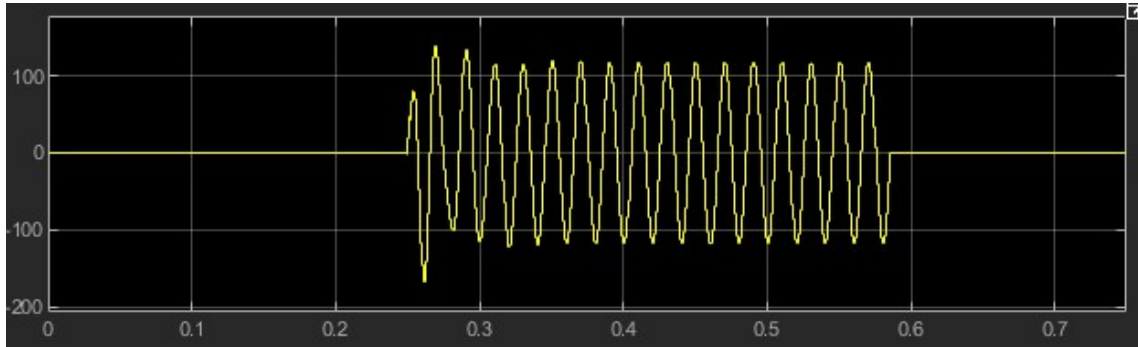
Validiteten er avhengig av hver enkelt forenkling. Naturlig nok er svært mye av modellen forenklet. En av de største forenklingene er tilnærmingen av kablene. Den lineære tilnærmingen kan være betydelig unøyaktig med tanke på null-impedans verdiene. Kapasitansen til jord er å anse som nøyaktig og hentet direkte ut fra Sintef sin «Planleggingsbok for kraftnett - Tekniske data» [14].

5.2 Uten kompensering

I dette kapittelet er det utført simuleringer uten bruk av spolekompensering. For så å analysere simuleringene.

5.2.1 Simulering uten kompensering

Simuleringen for nettet uten kompensering finnes i vedlegg G. Dette er når REKT er omkoblet fra transformator Nord til Sør uten spolekompensering.



Figur 17: Utklipp fra oscilloskopet fra MATLAB simulering uten spolekompensering

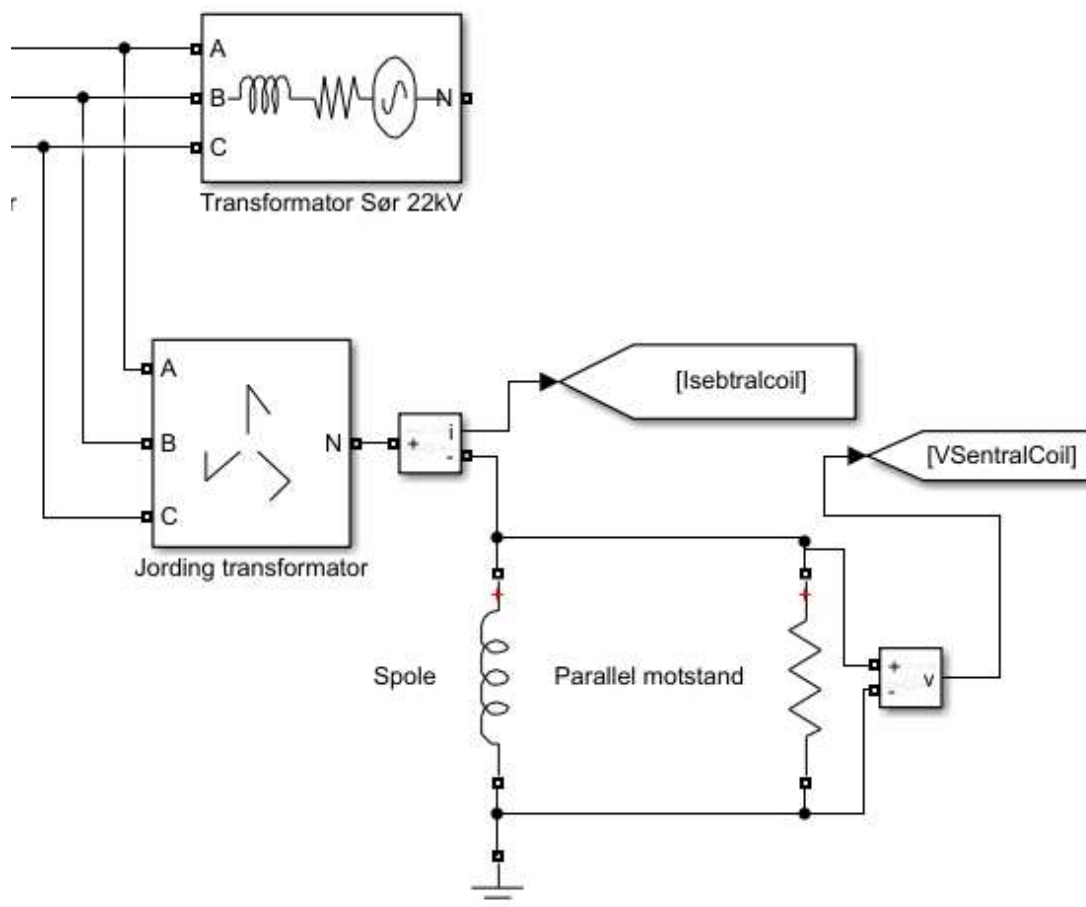
Som man kan se fra figur 17 vil simuleringer uten kompensering gi høye jordfeilstømmer. Dette vil gi like høye strømmer som egenbidragene i nettet. Altså en toppverdi opp mot 118A.

5.3 Sentralkompensering med kunstig nullpunkt

I dette kapittelet er det utført simuleringer ved bruk av sentralkompensering med kunstig nullpunkt. Først så gjennomgås plasseringen av spolen. For så å analysere simuleringene.

5.3.1 Plassering og konfigurasjon av sentralspolen

Spolen kan plasseres rett etter transformator Sør slik som i vedlegg H som et kunstig nullpunkt. Figur 18 viser en illustrasjon av plasseringen av spolen, dette er en forenkling av vedlegg H.



Figur 18: Viser et utsnitt av vedlegg H og plassering av spolen

Konfigurasjon av spolen er «Jording transformator» som er koblet til alle fasene, med en spole og en parallellmotstand koblet til nullpunktet til jordingstransformatoren for å simulere tapene i spolen.

5.3.2 Spoleverdier til sentralspolen

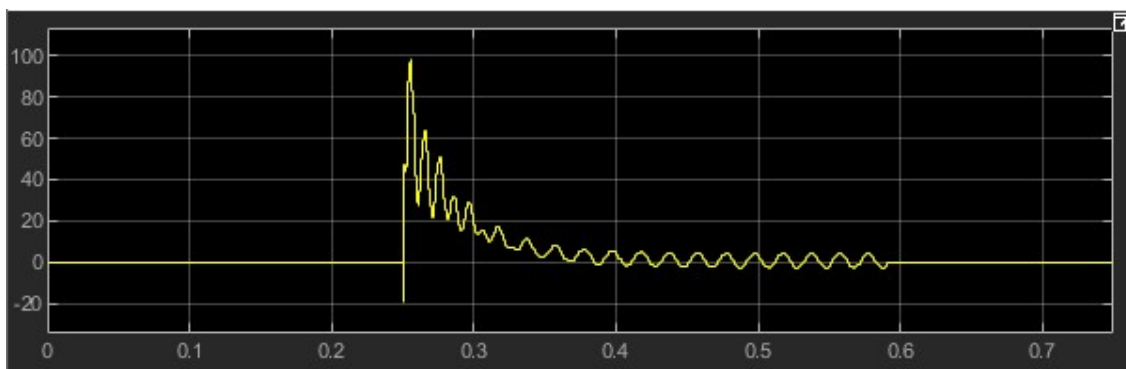
Valg av verdi for spolen ble gjort etter formel 1. Spenningen U_{0n} er målt mellom nøytralpunktet på jordingstransformatoren og jord. Det er lagt inn jordfeil i REKT for å måle U_{0n} spenningen. Strømmen er egenbidraget i hele nettet.

$$L = \frac{U_{0n}}{I * \omega} = \frac{18,03kV}{83,21A * 2 * \pi * 50Hz} = 0,6886 H \quad (10)$$

Innstillingene uten REKT innkoblet blir:

$$L = \frac{U_{0n}}{I * \omega} = \frac{18,03kV}{26,73A * 2 * \pi * 50Hz} = 2,147 H \quad (11)$$

Dette vil gi forskjellige innstillinger ved innkobling av REKT og uten at REKT er innkoblet.



Figur 19: Utklipp fra oscilloskopet fra MATLAB simulering med spole kompensering

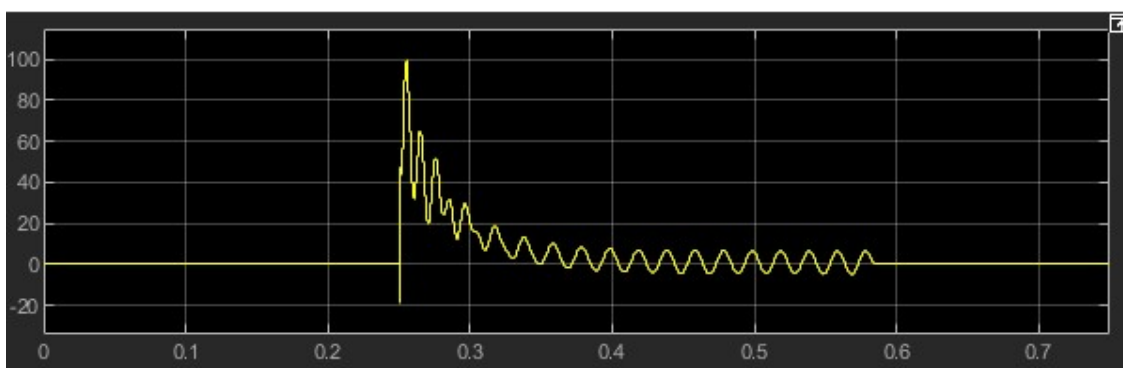
Figur 17 viser et utklipp fra oscilloskopet uten kompensering hvor toppverdien er på 118 A, mens figur 19 med kompensering er strømmen ned mot 4,2 A. Dette viser en klar forbedring ved kompensering.

Optimale innstillinger på sentralspolen er overkompensert med 2-3 A. Grunnen til at man ønsker overkompensering er at man vil unngå at den kapasitive og induktive strømmen er like stor. Dette kan resultere i resonans.

$$L = \frac{U_{0n}}{I * \omega} = \frac{18,03kV}{(83,21A + 3A) * 2 * \pi * 50Hz} = 0.666 H \quad (12)$$

For å oppnå 3A overkompensering må spoleverdien senkes med

$$L(\text{endring}) = 0.6657H - 0.6886H = -0.0229 \quad (13)$$



Figur 20: Viser en-fase jordfeil med 3A overkompensering

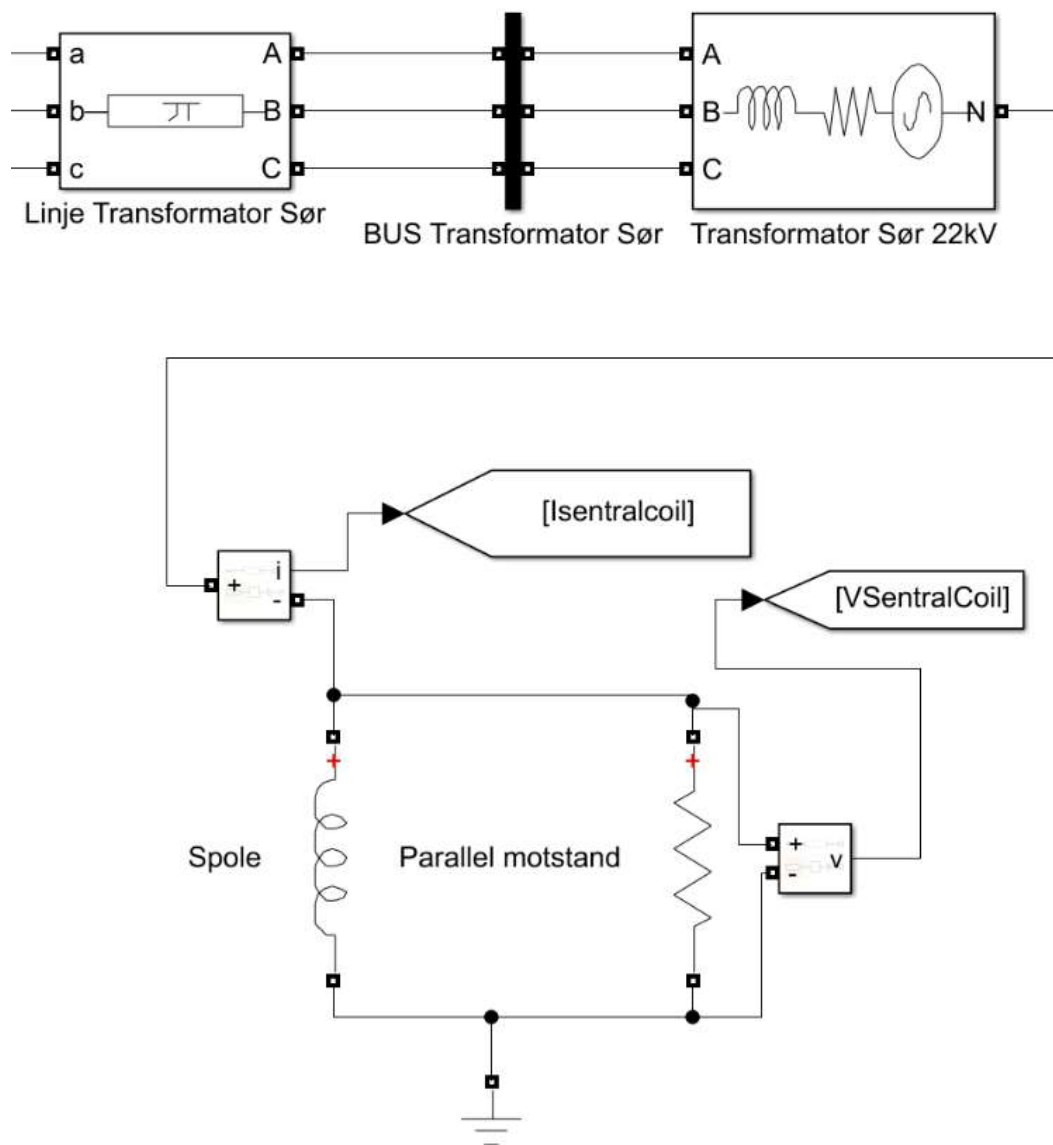
Figur 20 viser bidraget fra spolen ved jordfeil. I dette tilfellet er spolen overkompensert med 3A i forhold til de kapasitive jordfeilstømmene i nettet. Feilstrømmen i figur 20 har en toppverdi på 7,2A. Dette er en økning fra figur 19, og viser at spolen har et induktivt bidrag på jordfeilstømmen ved overkompensering.

5.4 Sentralkompensering tilkoblet transformator

I dette kapitlet er det gjort simuleringer ved bruk av sentralkompensering. Først så gjennomgås grunnen for plasseringen av spolen. For så å analysere simuleringene.

5.4.1 Plassering og konfigurasjon av sentralspolen

Sentralspolen er plassert i nullpunktet til spenningskilden. Med «Grounding Transformer» som er koblet til alle fasene, med en spole og en parallell motstand koblet til nullpunktet til jordingstransformatoren. Dette er illustrert i figur 21, en detaljert fremstilling finnes i vedlegg I.



Figur 21: Utdrag fra vedlegg I. Plassering av sentralspolen

5.4.2 Spoleverdier til sentralspolen

Valg av verdi for spolen ble gjort etter formel 1. Spenningen U_0 i formel 1 er målt mellom nullpunktet på transformatoren og jord. Jordfeil i REKT området ligger nå inne i simuleringsmodellen. Strømmen er egenbidraget i hele nettet. Legg merke til at U_{0n} i formel 14-16 er forskjellig fra formel 10-12. Dette er fordi spenningen er forskjellig når den blir målt ved nullpunktet til transformator Sør enn spenningen ved jordingstransformatoren.

$$L = \frac{U_{0n}}{I * \omega} = \frac{19,12kV}{83,21A * 2 * \pi * 50Hz} = 0.731 H \quad (14)$$

Innstillingene uten REKT innkoblet blir:

$$L = \frac{U_{0n}}{I * \omega} = \frac{19,12kV}{26,73A * 2 * \pi * 50Hz} = 2,2769 H \quad (15)$$

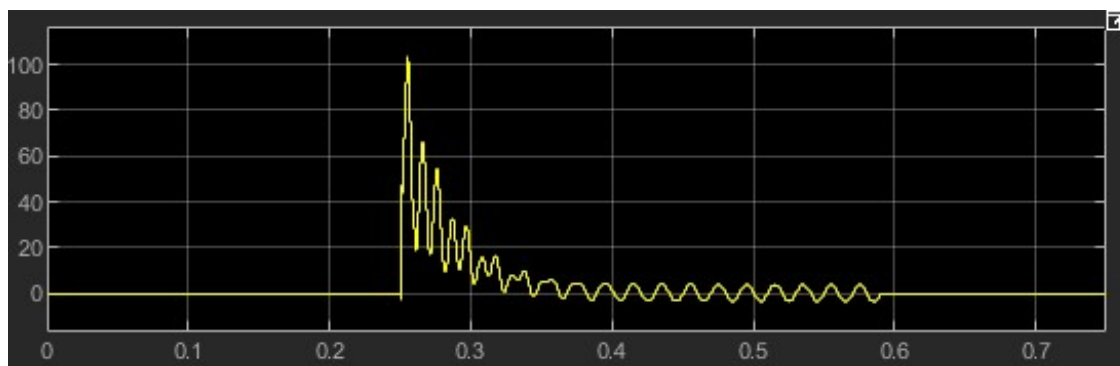
Dette vil gi forskjellige innstillinger ved innkobling av REKT og uten at REKT er innkoblet.

Tabell 5: Viser verdiene til sentral spolen

	Induktans
Induktans sentral spole med REKT innkoblet	0.635 H

For å oppnå minst mulig kortslutningsstrøm ved jordfeil måtte induktansverdien justeres.

Denne verdien er gitt i tabell 4, og er en endring av utregning 14.



Figur 22: Utklipp fra oscilloskopet simulering sentralspole kompensering

I figur 22 er spolen og motstanden koblet direkte til nøytralpunktet på transformator Sør. I dette tilfellet er det en toppverdi på resterende jordfeilstrom på 3,67A.

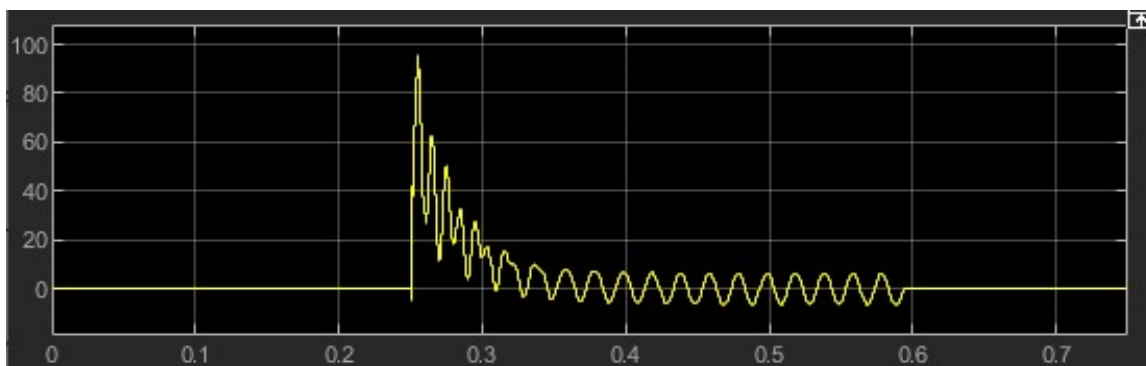
Optimale innstillinger på sentralspolen er overkompensert med 2-3 A. Grunnen til at man ønsker overkompensering er at man vil unngå at den kapasitive og induktive strømmen er like stor. Dette kan resultere i resonans.

$$L = \frac{U_{0n}}{I * \omega} = \frac{19,12kV}{(83,21A + 3A) * 2 * \pi * 50Hz} = 0.706 H \quad (16)$$

For å oppnå 3A ønsket overkompensering må spoleverdien senkes med

$$L(\text{endring}) = 0.706 - 0.731 H = -0.025 \quad (17)$$

Spoleverdien måtte endres litt for å oppnå 2-3A. Den virkelige verdien blir: 0,67H



Figur 23: Viser en-fase jordfeilstrom med 2-3A overkompensering

I dette tilfellet er spolen overkompensert med 3A i forhold til de kapasitive jordfeilstømmene i nettet. Feilstrommen i figur 23 har en toppverdi på 6,4A. Dette er en økning fra figur 22, og viser at spolen har et induktivt bidrag på jordfeilstrommen ved overkompensering.

5.5 Beregninger av berøringspenning og releplan

Ved å ta utgangspunkt i relevante formler og figurer i kapittel 3, vil man kunne gjøre enkle beregninger for berøringspenninger. Ser man på eksisterende reléplan i vedlegg K, vil man kunne se om eksisterende utløsetider på relévern vil løse ut innenfor verdier som forskrift og regelverk setter. Dette kapitlet viser utregning for trafo SØR om REKT området kobles inn.

Ved dagens utløse tider for jordfeilvernet i releplan for vernet på avgangen fra trafo SØR til REKT (0.5s) vil dette sette krav til berøringspenning U_{tp} på ca. 200V, ref. figur 5.

Beregninger utført i releplan tilsier at jordfeilstrømbidraget totalt fra alle avganger er på 20A.

For at kravet til maksimal jordpotensialheving $U_E < 2 \cdot U_{tp}$ skal tilfredsstilles vil maksimal jordplatemåling være på $2 \cdot 200 / 20A = 20$ ohm.

Om REKT området kobles inn på Trafo Sør vil jordstrøms bidraget etter beregninger i DIGPRO være 83.2 A.

Ved å benytte formel (7) blir potensialhevingen U_E : $83,2 \text{ A} \cdot 20 \text{ Ohm} = 1664 \text{ Volt}$. Dette vil igjen gi en berøringspenning U_{tp} på $1664 / 2 = 832 \text{ volt}$.

Referert til figur 5 i kapittel 3.3.2, vil man ikke kunne oppnå maksimal tillatt berøringspenning med $U_E < 2 \cdot U_{tp}$. Alternativt kan man tilfredsstille forskriften ved å få ned jordstrømmen i feilstedet, lavere jordplateresistans eller ved $U_E < 4 \cdot U_{tp}$ om det utføres tiltak som beskrevet i forskrift for elektriske forsyningsanlegg med veiledning. Ref. [9] og [10].

Det er ikke funnet noen dokumenterte jordplatemålinger på trafo Sør. Det innebærer at i denne rapporten tas det forbehold om at releplanen er rett satt opp, og jordplatemotstanden settes til 20 Ohm.

Jordfeilstrømmen og impedansen mot jord vil ha betydning for hvilke løsninger det velges for å holde berøringspenninger innenfor forskriftens krav. Ref. [9].

6 Drøfting

Formålet med denne oppgaven er å finne ut hvilke konsekvenser det får for området REKT ved en overgang fra spolejordet nett til isolert nett. Det har vist seg gjennom arbeidet med denne rapporten at det er flere konsekvenser som må drøftes. Drøftingen av resultatene kommer til å foregå i flere underkapitler hvor de er presentert i rekkefølge etter hvert enkelt delmål.

6.1 Behov for spolekompensering innad i REKT?

Ved normalt koblingsbilde forsynes REKT fra transformator Nord, hvor det er installert en spole på transformatorens nøytralpunkt og en spole på avgangen mot REKT via et kunstig nullpunkt.

I området REKT er det mange avganger og det er et veldig kabelrikt område som strekker seg over et større areal. Vedlegg E viser egenbidraget fra alle avganger fra trafo Sør inkludert avgang mot REKT. Verdiene som er beregnet i Digpro viser at REKT har et høyt egenbidrag. Simuleringene utført i kapittel 5 kommer frem til samme resultat, ~~om~~ at det vil være fornuftig å spolekompensere REKT for å senke jordslutningsstrøm for økt personsikkerhet og driftssikkerhet.

Ved normalt tilstand er REKT spolekompensert via den distribuerte spole på avgangen fra trafo Nord. Kobler man ut effektbryteren i trafo Nord vil REKT fortsatt være spolekompensert via den samme spolen om man kobler inn trafo Sør.

Oppstår det situasjoner hvor man må koble ut lastskillebryter Nord, vil REKT miste kompenseringen og det oppstår store kapasitive ladestrømmer.

Dette fører til fare for personsikkerheten ref. kapittel 5.5. Med de teoretisk beregnede berøringspenningene som kan oppstå vil man måtte gjøre tiltak. Et av tiltakene kunne ha vært å få utkoblingstider på vern til et nivå som er innenfor forskrift der det er mulig. Andre tiltak henvises til forskrift og RENblad 7505 [9,10,11].

Setter man en distribuert spole i REKT vil man enten måtte flytte eksisterende spole fra avgang i trafo Nord til REKT, eller man kan lage et koblingsbilde som er slik at når REKT er forsynt via Trafo Nord vil spolekompensering i REKT være frakoblet. Denne kobles bare inn om trafo Sør skal forsyne REKT. Det vil gi mindre kontroll for oppdragsgiver over anlegget hvilke kapasitive jordfeilstømmer de har å forholde seg til under hvert koblingsbilde. Det vil kreve flere relevernplaner enn strengt tatt nødvendig.

RENblad 7505 [10] anbefaler ikke å ha en distribuert spole uten at det er installert en sentralspole. Det anbefales derfor ikke å benytte spolekompensering innad i REKT.

6.2 Spolekompensering ved trafo Sør

Normalt koblingsbilde for trafo Sør er at den ikke forsyner REKT. Prosjektgruppen fikk tilgang til eksisterende releplan for trafo Sør og avgang mot REKT (se vedlegg K, det er et utdrag av releplanen). Ved gjennomgang av releplan for Trafo Sør og avgang mot REKT er det ikke prosjektert at REKT er tilkoblet trafo Sør. Det anbefales at hele releplanen får en full gjennomgang før man vurderer å koble inn REKT via Trafo Sør.

Det ble utarbeidet 3 ulike simuleringsmodeller for å se hva som skjer når trafo Sør forsyner området REKT. Den første simuleringsmodellen tar for seg jordfeilstømmene ved ukompensert nett. De andre 2 tester virkningene ved at spolen monteres direkte på transformatorens nøytralpunkt eller gjennom kunstig nullpunkt.

Gjennom simuleringsmodellene fant vi data som tilsier at det anbefales å montere en sentralspole ved trafo Sør. Vi ser at teorien som vi har funnet stemmer godt overens med måleresultatene våre. Det er liten forskjell mellom å tilkoble spolen direkte til transformatorens nøytralpunkt eller gjennom et kunstig nullpunkt. Det vil være gunstig å koble spolen via et kunstig nullpunkt på grunn av plass og plassering. Slik at det blir mer tilgjengelig for service på både transformator og spole. Prosjektgruppen har ikke utredet transformatorens merkedata om den er kapabel for å tåle de høye jordfeilstømmene som kan oppstå i nøytralpunktet om spolen tilkobles dette.

Siden trafo Sør ikke er spolekompensert øker berøringsspenningene når området REKT tilegnes trafo Sør. Overgangsmotstanden til jord er tilnærmet konstant uavhengig om REKT

er tilkoblet eller ikke. Det vil da si at de kapasitive jordfeilstømmene øker. Ut ifra beregninger som ble gjort for å sjekke berøringsspenningene opp mot kravene antydes det at utløsetiden må justeres ned. Fra figur 5 ser vi at utløsetiden må ned på minimumsnivå. Eksisterende relevern kan ikke justeres ned til dette nivået. Dermed anbefales det at det gjøres andre tiltak for å begrense faren ved forhøyet berøringsspenning. Vi anbefaler at oppdragsgiver ser nærmere på og validerer våre resultater vedrørende endringer i relevernplaner.

Hvis det monteres spole for å kompensere i trafo Sør, så anbefaler vi en spole via et kunstig nøytralt punkt direkte på samleskinnen i trafo Sør. Den bør være automatisk regulerbar siden REKT normalt ikke ligger inne mot trafo Sør. Dette gir oppdragsgiver muligheten for å utvide distribusjonsnett med kabler i fremtiden. Det er et eksisterende anlegg som er i drift og det vil kreve god planlegging hvis en slik operasjon skal utføres. Prosjektgruppen argumenterer for at det vil være fordelaktig å se på en oppgradering av distribusjonsnett med spolekompensering allerede nå.

De kapasitive jordfeilstømmene ble redusert betraktelig av spolen. Vi fikk også oscilleringer i etterkant av feilen. Disse oscilleringene kan medføre at friske avganger tripper. Hvis det monteres en sentralpole bør det gjøres en uavhengig vurdering om det eksisterende oppsettet av jordfeilvern vil være tilfredsstillende for at en eventuell feil ikke tripper en frisk avgang.

Det finnes andre løsninger enn spolekompensering for å forhindre høye kapasitive strømmer som ikke slukker en eventuell lysbue. Det kan for eksempel monteres gjennomgående systemjording gjennom hele distribusjonsnett. Dette alternativet har vi utelatt som en løsning fordi kostnadene blir for store. Dette vil være mest relevant ved design av helt nye distribusjonsnett. Det finnes andre tiltak som å finne andre jordfeilvern, lage nye relevernplaner og gjøre tiltak ute i anlegget. Men på generell basis er dette bare å utsette problemet med kapasitive jordfeilstømmer som øker ved økt bruk av kabler.

6.3 Releverninnstillinger

Hvis trafo Sør forsyner REKT får det konsekvenser for berøringsspenningene i distribusjonsnettet. Grunnen til at vi anbefaler en endring av innstillingene, er at våre resultater og beregninger tilsier at berøringsspenningen vil være for høy ved at REKT kobles over mot trafo Sør. For å ivareta personsikkerheten må utkoblingstiden justeres ned. I dette tilfellet er berøringsspenningen så høy at vernet ikke kan stilles til å løse ut raskt nok. For å tilfredsstille kravene i forskriften [9,11] må det gjøres tiltak.

Så lenge det ikke monteres spolekompensering bør man se på andre tiltak for å ivareta personsikkerheten. Det kan for eksempel være å få en bedre overgangsmotstand mot jord. Isolerende matter ved arbeid på/nær ved spenningsatte anlegg. Dette gir på sikt et anlegg som krever mer planlegging ved arbeid ute i felt for å forhindre høye berøringsspenninger. Dette vil medføre mer vedlikehold på jordingsledere og elektroder for å sikre god overgangsmotstand.

Alle releverninnstillinger ble ikke tatt med i denne rapporten. Til dels skyldes det at en del av innstillingene ikke er helt relevante for oppgaven, og at det ikke foreligger jordplatemålinger for transformator Sør. Det ble ikke sett på kortslutningsstrømmer i denne rapporten siden det ikke var en del av problemstillingen. Det anbefales allikevel at relevernplanen oppdateres med tanke på at det finnes en god del lange kabelstrekke som kan påvirke kortslutningsstrømmene i enden av området REKT.

Det prosjektgruppen har kommet frem til er at innstillingene muligens ikke er gode nok ved innkobling av REKT mot trafo Sør, og dermed burde sjekkes ut nærmere av spesialister som fokuserer på relevern.

6.4 Kapasitive jordfeilstømmer

I RENblad 7505 står det «Når jordstrømmen i et distribusjonsnett overstiger ca. 25A blir leveringskvaliteten dårlig fordi lysbuen som oppstår ved forbigående feil ikke slukker. Dette fører til at forbigående feil må klareres av effektbryter i trafostasjonen. Fenomenet kjennetegnes av mange utkoblinger på jordfeil, med påfølgende''vellykket'' gjeninnkobling.»

Tar vi i betraktning vedlegg E ser vi at egenbidraget for REKT overgår de verdier RENblad beskriver, vil det i dette tilfellet være betydelig fare for at lysbuer ikke vil slukke om REKT kobles inn på det isolerte nettet fra trafo Sør.

De kapasitive jordfeilstømmene steg betraktelig når REKT ble koblet inn mot trafo Sør. Dette var som forventet og det oppgaven skulle sjekke vedrørende dette er om det er fare for at lysbuer ikke selvslukker. Med verdiene vi hentet ut fra Digpro så vi tydelig at det blir kapasitive jordfeilstømmer over de anbefalte verdiene hvor en lysbue forventes å selvslukke. Det medfører at det er en økt fare for at lysbuer blir stående hvis det ikke gjøres tiltak. Tiltakene er drøftet gjennom kapitlene 6.1- 6.3. Slik vi ser det er det enklest og mest økonomisk å vurdere en utredning og installasjon av en sentralspole for trafo Sør.

6.5 Validitet og reliabilitet av resultater

Digpro er et nettinformasjonsystem som er mye brukt i Sverige. I Norge er det noen nettselskaper som har tatt denne i bruk. Validiteten ansees som høy siden det er et anerkjent program for nettberegning i Norden.

Ved simuleringer i Digpro, viser det seg at det er mangelfullt med data som er lagt inn. Det er blant annet mangel på transformatordata og usikkerhet med kabeldata (Ref. Odd Egil Solheim). Det er heller ikke utført referanseberegninger av hele nettet i nyere tid. Disse manglene gjør at reliabilitet anses som moderat på Digpro beregninger utført i denne rapporten.

Matlab med Simulink er et mye brukt program for simuleringer og har et stort bruksområde. Siden denne programvaren er anerkjent blant annet hos NTNU anses validiteten som høy. Simuleringer utført i Simulink er avhengig av brukerens erfaringer og kjennskap til

programmet. Ved gode forutsetninger og rette parametere som legges inn vurderes reliabiliteten som god.

Vi erfarte tidlig at det var en del utfordringer med både Digpro og Simulink. Det var en del informasjon knyttet til Digpro som virket ufullstendige eller som ikke var ført inn fra før. Det løste vi ved å ha en tett dialog med oppdragsgiver og Digpro. Ved gjensidig samarbeid fant vi de nødvendige dataene for å fullføre simuleringsmodellen. Allikevel så vi oss nødt til å begrense oppgaven og gjorde en del forenklinger i simuleringsmodellen for å forsikre oss om at validiteten og reliabiliteten av våre resultater ble så høye som mulig. Med bakgrunn i de tiltakene som ble gjort underveis opp mot informasjonen fra programmet Digpro, så anser vi sluttdataene som av god kvalitet og pålitelige.

Når det gjelder Matlab og Simulinkmodulen ble det funnet relevant teori og litteratur for å støtte opp om de dataene vi fikk ut av simuleringsmodellen. Vi erfarte tidlig i prosjektet at det måtte gjøres flere endringer og en del prøving og feiling for å få simuleringsmodellen til å fungere som forventet ut ifra teori. Her vil det kunne være en del mulige feilkilder siden det ble en del endringer av innstillingene i programmet underveis. Sluttresultatene har vi prøvd å validere opp mot eksisterende relevant litteratur. Verdiene og resultatene som vi har fått ved simuleringer i Simulink anser vi til å være av høy validitet og god reliabilitet. Det har vært utfordrende å finne kontaktpersoner og ressurser som kunne bistå oss med arbeidet i utformingen av simuleringsmodellene. Ved å ha jevne statusmøter hvor vi har diskutert resultatene av simuleringene har vi tiltro til at dataene som er hentet ut er tilstrekkelig for å svare på problemstillingen i bacheloroppgaven.

Alt av faglitteratur, kontaktpersoner og ressurser som ble brukt i teoridelen har vært kvalitetssikret og diskutert i plenum på teamsmøter innad i prosjektgruppen. Teoridelen vil da kunne benyttes som et godt referansepunkt for validering av de resultatene vi har fått fra simuleringsmodellene og Digpro. De eksterne ressursene som ble benyttet er anerkjente kompetente personer innenfor sitt fagområde. De har flere års erfaring innen sitt fagfelt. Dette medfører at vi anser at faglitteratur og eksterne ressurser har høy validitet og reliabilitet.

7 Konklusjon

Gjennom denne rapporten er det kartlagt hvilke utfordringer som oppstår ved overgang fra et spolejordet nett til et isolert nett. Resultatene i rapporten danner et godt grunnlag for hva som anbefales for oppdragsgiver hvis REKT skal kunne tilkobles trafo Sør.

Under arbeid med nettanalyser i nettinformasjonsystemet Digpro, viser det seg at en del systemparametere er ufullstendige og bør bearbeides. Ved nettanalyser advarer programmet om mangelfulle data, og komponenter som bør integreres bedre i distribusjonsnettet. For å kunne bruke dette programmet med det potensialet det har for nettanalyser, så anbefales det å bruke ressurser for å kartlegge problemene og utbedre data som er lagt inn i programmet. Videre anbefales det at alle nye prosjekter, endringer og utvidelser føres inn systematisk slik at det blir enklere i ettertid å ha full oversikt over alle systemparametere i distribusjonsnettet.

Ut ifra resultater i kapittel 5 og drøftinger i kapittel 6, så er det et behov for å kompensere området REKT. Derimot anbefales det ikke å montere spolekompensering innad i området REKT. Det mest fordelaktige vil være å starte en utredning for installasjon av en sentralspole på samleskinnen i trafo Sør via et kunstig nullpunkt. Det bør foretas en ny gjennomgang av relevernplan før idriftsettelse av anlegget etter at spolen og parallellmotstanden er montert.

Resultatene fra kapittel 5 viser at det har stor effekt å installere en spole for å få ned jordfeilstømmene. Simuleringer utført i Simulink viser at å plassere sentralkompensering på trafo Sør, så vil man få kontroll på kapasitive jordfeilstømmer. Dette vil medføre at berøringspenninger vil bli lave nok til at driftssikkerheten opprettholdes ved at man ikke får stående lysbuer som ikke vil slukke ved jordfeil. Personssikkerheten vil også være innenfor forskriften, ved at berøringspenninger vil holde seg på et slikt nivå at man kan regulere dette med utkoblingstider i relevern.

I relevernplanen for trafo Sør er det ikke prosjektert at REKT skal være innkoblet. Om oppdragsgiver vil ha denne koblingsmuligheten anbefales det å få revidert relevernplanen. Det bør undersøkes om deler av de kabelrike områdene må kobles fra hvis REKT skal forsynes fra det isolerte nettet. Beregninger og simuleringer som ble utført viser at de kapasitive jordfeilstømmene er høye ved REKT innkoblet mot trafo Sør. De kapasitive jordfeilstømmene overskrider anbefalte verdier i simuleringsmodellene. Verdiene som ble

hentet ut fra Digpro viser det samme dersom REKT kobles inn mot trafo Sør. Det medfører økt berøringsspenning som krever tiltak i releplan. I henhold til resultatene er berøringsspenningen så høy at vernet ikke kan stilles til å løse ut raskt nok. Derfor bør det vurderes å bedre overgangsmotstanden og gjøre tiltak på et eventuelt arbeidssted for å sikre at arbeiderne ikke kan bli utsatt for en høy berøringsspenning. Det kan bli stående lysbuer som ikke slukker dersom det ikke gjøres tiltak.

Uavhengig av om det isolerte nettet kompenseres med en spole eller ikke, anbefales det at releverninnstillingene revideres av et spesialisert firma for dette. Denne bacheloroppgaven har ikke tatt for seg alle releverninnstillinger som er mulige for det vernet som eksisterer per i dag. Det kreves mer spisskompetanse og innhenting av data for å gi en komplett og fullverdig relevernanalyse.

Etter prosjektslutt har oppdragsgiver gjennomgått denne rapporten og skal ta kontakt med Norpec for gjennomgang av releplan for koblingsmuligheter fra trafo Sør. I tillegg skal mulighetene for spolekompensering vurderes.

Litteraturliste

- [1] Digpro. About Digpro [Internett]. Stockholm. [Hentet 19.03.2021] Tilgjengelig fra: <https://digpro.com/about/>
- [2] Csanyi.E. Where do we use arc suppression coil(Petersen coil). Nova Pazova: EEP; 2016 [Hentet 21.03.2021]. Tilgjengelig fra: <https://electrical-engineering-portal.com/arc-suppression-coil-petersen-coil>
- [3] NVE. Innføring av «KILE-ordningen» [Internett]. Oslo: NVE;11.06.2015 [Oppdatert 31.10.2019; hentet 02.05.2021]. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/om-nve/vassdrags-og-energihistorie/nves-historie/2001-innforing-av-kile-ordningen/>
- [4] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Standard C37.90-1978. IEEE Standard for relays and relay systems associated with electric power apparatus [Internett]. Manhattan: IEEE; 1976 [Hentet 25.03.2021]. Tilgjengelig fra: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7444075>
- [5] Grid.A. Network protection & automation guide. Edition May 2011. Alstrom Grid; 2011.
- [6] Bane Nor. Definisjon:Lastskillebryter [Internett]. Oslo: Bane Nor; 09.02.2015 [Oppdatert 01.12.2015; hentet 01.04.2021]. Tilgjengelig fra: <https://trv.banenor.no/wiki/Definisjon:Lastskillebryter>
- [7] Delbekk.G. Jordslutningsvern i høgspente (opptil 24kV) fordelingsnett [avhandling]. Trondheim: NTNU; 2003.
- [8] Særen.M, Giset.M. Sommerprosjekt Systemjording [avhandling] Oslo: NVE; 2017
- [9] Forskrift om elektriske forsyningsanlegg. Oslo: Justis- og beredskapsdepartementet; 28.12.2005. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2005-12-20-1626>
- [10] Retningslinjer for systemjording med spole for 12-24kV nett. RENblad. 2020;7505(1.2):31-4

- [11] Forskrift om elektriske forsyningsanlegg med veiledning. FEF. 2006; FEF 2006:99-9
Tilgjengelig fra:
<https://www.dsb.no/lover/elektriske-anlegg-og-elektrisk-utstyr/veiledning-til-forskrift/veiledning-til-forskrift-om-elektriske-forsyningsanlegg/Print/>
- [12] Wahlroos.A., Altonen.J. Compensated networks and directional earth-fault protection. ABB webinar. Vaasa: ABB; 21 juni 2016
- [13] Stråth N, Elfving H. Nätkonsekvenser vid kablfiering av luftledningsnät. Stockholm: Elforsk; 2006.
- [14] SINTEF. «Planleggingsbok for kraftnett - Tekniske data». I: (2010).
- [15] Mathworks. Matlab Three-Phase PI Section Line [Internett]. Mathworks; [hentet 1. april 2021]. Tilgjengelig fra:
<https://se.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/threephasepisectionline.html>
- [16] Nordskog E. 2019.1095_Luostejok trafostasjon_ 22kV_ avgang Lakselv. Lier: Jacobsen Elektro; 25.11.2019. Releplan nummer 2019.1095.
- [17] Nordskog E. Jordfeilsbehandling. Lier: Norpec; 25.08.2020. NP-RP04-20.028
- [18] Guldbrand A. Earth faults in extensive cable networks; electrical distribution systems. Lund: Lund University; 2009
- [19] Grøn Ø. Ohms lov [Internett]. Oslo: Store Norske Leksikon; 14.02.2009 [Oppdatert 25.11.2019; hentet 18.04.2021]. Tilgjengelig fra: https://snl.no/Ohms_lov
- [20] Wahlroos A. Earth fault seminar 2018, Taking earth-fault protection to the next level EF-doc1. Vaasa: ABB; 2018.
- [21] Wahlroos A. Earth fault seminar 2018, Taking earth-fault protection to the next level, EF_doc3. Vaasa: ABB; 2018
- [22] RENblad 8010 versjon 3.6 – Prosjektering av jordingsanlegg.

[23] Forskrift om kontroll av nettvirksomhet. Oslo: Olje og energidepartementet; 01.04.1999.

Tilgjengelig fra:

<https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/1999-03-11-302/>

[24] Forskrift om leveringskvalitet i kraftsystemet. Oslo: Olje og energidepartementet:

01.01.2005, 01.01.2006, 01.01.2007. Tilgjengelig fra:

<https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-11-30-1557>

[25] Lindem T., Spildrejorde KØ., Elvegård M. Laboratorieøvelse NR 8 [Internett]. Oslo:

UIO; desember 2014 [Hentet 16.05.2021] Tilgjengelig fra:

https://www.uio.no/studier/emner/matnat/fys/FYS1210/v16/lab/lab8_resonans.pdf

Vedlegg

A	Eksterne fagpersoner og kontakter	59
B	Teknisk blad for 24kV kabler	60
C	Elforsk	60
D	Lineær tilnærming av kabel	61
E	Egenbidrag med alle avganger	61
F	Innstillinger trafo Sør	62
G	Simulinkdiagram av trafo Sør	62
H	Simulinkdiagram av transformator med spole rett etter trafo Sør	63
I	Simulinkdiagram av trafo Sør med sentralspole	64
J	Kabler og linje sett fra trafo Sør	65
K	Relevninnstillinger jordfeil trafo Sør	66
L	Grunnleggende teori om parallellresonans	67

Vedlegg A: Eksterne fagpersoner og kontakter

Navn	Firma	Epostadresse
Ari Wahlroos	ABB, Vaasa, Finland	ari.wahlroos@fi.abb.com
Erik Nordskag	Norpec, Lierstranda, Norge	Erik.nordskag@norpec.no
Tokhir Gafurov	Digpro, Stockholm, Sverige	tokhir.gafurov@digpro.se

Vedlegg B: Teknisk blad for 24kV kabler

4.13 24 kV TXSE/TSLE (enleder i jord, tett forlegning)

Type	R [Ω/km]	X [Ω/km]	C _d [μF/km]	C _j [μF/km]	I _{ph} [A]	I _s 1 s [kA]
TXSE/TSLE 3x1x25 Al / 16	1,200	0,15	0,14	0,14	130	2,3
TXSE/TSLE 3x1x50 Al / 16	0,641	0,14	0,16	0,16	185	4,5
TXSE/TSLE 3x1x95 Al / 25	0,320	0,12	0,20	0,20	275	8,6
TXSE/TSLE 3x1x150 Al / 25	0,206	0,12	0,23	0,23	355	13,5
TXSE/TSLE 3x1x240 Al / 35	0,125	0,11	0,28	0,28	455	21,6
TXSE/TSLE 3x1x400 Al / 35	0,078	0,10	0,35	0,35	600	36,0
TXSE/TSLE 3x1x630 Al / 50	0,047	0,09	0,43	0,43	745	56,7
TXSE/TSLE 3x1x800 Al / -	0,037	0,09	0,50	0,50	850	72,0
TXSE/TSLE 3x1x1000 Al / -	0,029	0,09	0,55	0,55	930	90,0
TXSE/TSLE 3x1x1200 Al / -	0,025	0,09	0,60	0,60	1000	108,0
TXSE/TSLE 3x1x1600 Al / -	0,019	0,09	0,68	0,68	1110	144,0
TXSE/TSLE 3x1x2000 Al / -	0,015	0,08	0,75	0,75	1190	180,0
TXSE/TSLE 3x1x25 / 16 Cu	0,727	0,24	0,14	0,14	185	3,5
TXSE/TSLE 3x1x50 / 16 Cu	0,387	0,21	0,16	0,16	260	7,0
TXSE/TSLE 3x1x95 / 25 Cu	0,193	0,20	0,20	0,20	370	13,3
TXSE/TSLE 3x1x150 / 25 Cu	0,124	0,19	0,23	0,23	455	21,0
TXSE/TSLE 3x1x240 / 35 Cu	0,075	0,18	0,28	0,28	570	33,6
TXSE/TSLE 3x1x400 / 35 Cu	0,047	0,17	0,35	0,35	695	56,0
TXSE/TSLE 3x1x630 / 50 Cu	0,028	0,16	0,43	0,43	825	88,2

[14]

Vedlegg C: Elforsk

A.17 Kabeldata

Kabel/ledningstyp	R ₁ ohm/km	X ₁ ohm/km	C ₁ μF/km	R ₀ ohm/km	X ₀ ohm/km	C ₀ μF/km
AXKJ 95/25 utan jordlina, jordad i båda ändrar	0,32	0,097	0,33	1,5	1,1	0,33
AXKJ 95/16 utan jordlina, jordad i båda ändrar	0,32	0,097	0,33	1,4	1,6	0,33
AXKJ 95/25 utan jordlina, öppen skärmkrets	0,32	0,097	0,33	0,47	2,4	0,33
AXKJ 3x1x95/25 utan jordlina, jordad i båda ändrar	0,32	0,097	0,33	1,1	0,4	0,33
AXKJ 95/25, 24 kV utan jordlina, jordad i båda ändrar	0,32	0,12	0,21	1,5	1,1	0,21
AXKJ 240/35 utan jordlina, jordad i båda ändrar	0,125	0,085	0,45	1,2	0,8	0,45
FeAl 62	0,52	0,42	0,0099	0,67	2,0	0,0043
FeAl 62 med långsgående jordlina	0,52	0,42	0,0099	0,92	1,3	0,0048
FeAl BLX 62	0,52	0,37	0,011	0,67	2,1	0,0039

Tabell A-5 Kabeldata

[15]

Vedlegg D: Linear tilnærming av kabel

Ledertverrsnitt [mm ²]	R1 [Ω/km]	X1 [Ω/km]	X1 [mH/km]	C1 [μF/km]	R0 [Ω/km]	X0 [Ω/km]	X0 [mH/km]	C0 [μF/km]
240 mm ² (Vedlegg C)	0,125	0,085	0,27	0,45	1,2	0,8	2,55	0,45
95 mm ² (Vedlegg C)	0,32	0,12	0,38	0,21	1,5	1,1	3,50	0,21
50 mm ²					1,6	1,2	3,80	
50 mm ² (Vedlegg B)	0,64	0,14	0,45	0,16				
50 mm ² (modell)	0,64	0,14	0,45	0,16	1,6	1,2	3,82	0,16

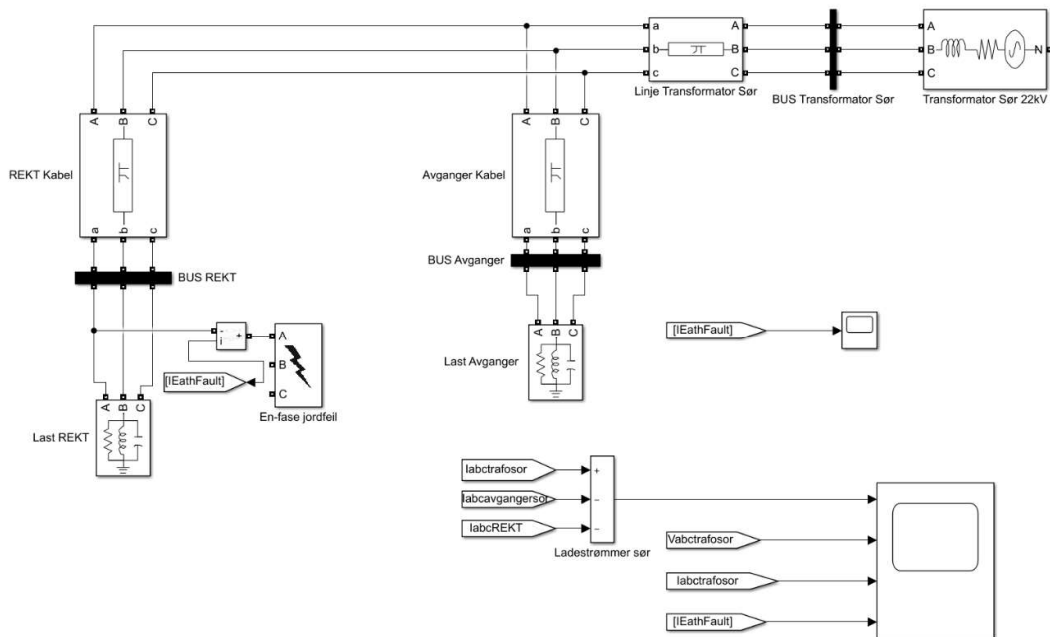
Vedlegg E: Egenbidrag med alle avganger

Transformator	Med REKT innkoblet	Uten REKT innkoblet
Nord (at 22kV RMS – Fase til fase)	119,76 A (169,4 A toppverdi)	63,28 A (89,49 A toppverdi)
Sør (at 22kV RMS – Fase til fase)	83,21 A (117,68 A toppverdi)	26,73 A (37,8 A toppverdi)

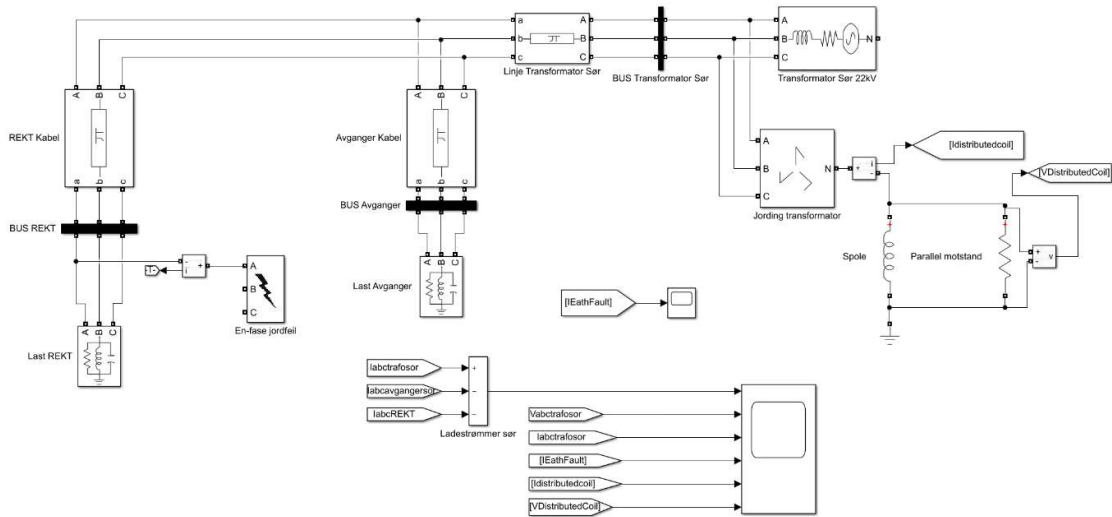
Vedlegg F: Innstillinger Trafo Sør

Transformator Sør			
Kortslutningsytelse [MVA]	X/R-rate	EK (%)	ER (%)
7	7	6,57	0,557

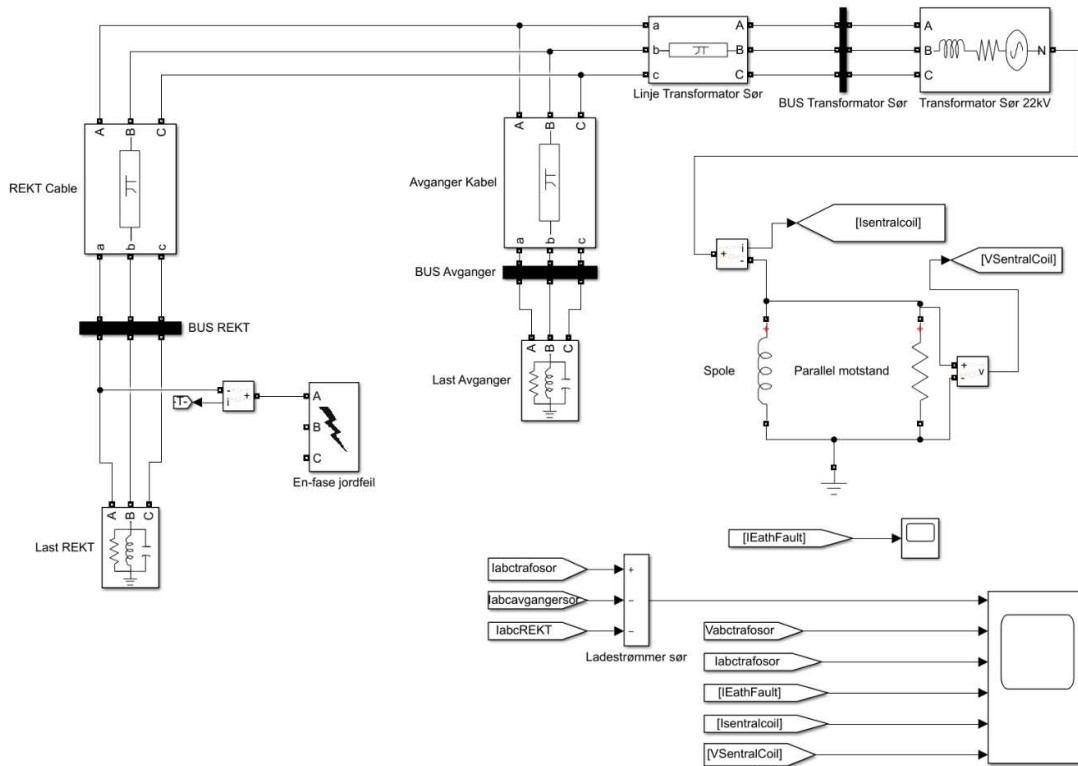
Vedlegg G: Simulinkdiagram av trafo Sør uten kompensering



Vedlegg H: Simulink diagram av transformator sør med spole via kunstig nullpunkt



Vedlegg I: Simulinkdiagram av trafo Sør med sentralspole



Vedlegg K: Relevernstillinger Jordfeil Trafo Sør Avgang

Rekt:

Linjevern			
Fabrikant - modell	:	ABB - REF 615	
Plassert / tilkoplet	:	Trafo Sør / 22 kV avgang REKT Ut/inn	
Utløsefunksjoner	:	effektbryter	
Rogowski sensor CT/VT			
Sensor (Ip/Us)	:	80 A / 150 mV	KEVCY80
Strømtrafo (Iop/Ios)	:	100 / 1 A	Kolma 06 D1
Spenningstrafo(Up/Us)	:	22 / 0.0022 kV	KEVCY 22 kV
(Sheet rev. 23)			
Relebeskrivelse	Funksjonsverdier	Kommentarer	
In Rogow.Sensor:100..300	150 mV	Bestillingskode: HBFLDAAHNGC4BAA21G	
Ion : 0.2 / 1 / 5 A	1 A	3.00 mV/Hz	
Un Sensor:0.1..440	22 kV prim	Division ratio=1:10000	
Frequency : 50 / 60	50 Hz	Systemspenning, Unp: 22 kV prim	
		Metallisk jordfeil, 3Uonp: 38.11 kV prim	

Iø> Non group Settings (DEFLPDEF1:1)

Reset Delay Time: 20 ms

Minimum operate current I min Op: 0.5 A prim, 0.005A sek, 0.005*Ion

Minimum operate voltage U0min Op: 0.01*Un

Sensor ønsket innstilling 1.73%3Uonp, 3U0> 0.66kV prim

Io signal sel: Measured I0, Pol signal sel: Calculated U0, Pol Quantity: Zero seq volt

Setting Group 1:

I0>: 1A prim, 0.01A sek, 0.01*Ion Stilles til å detektere 3kOhm motstand til jord.

Start value multiplier: P. V mult: 1

Operate delay time: 500ms

Directional mode: Forward

Voltage Start value U0>: 0.087*Un

Sensor Ønsket innstilling 15%3Uonp, 3U0> 5.72kV prim

RESUDUAL OVERVOLTAGE PROTECTION

Reset Delay Time: 20 ms

U0 Signal Sel: Calculated U0

Setting Group 1:

Starting Value U0>: 0.227*Un

Sensor Ønsket innstilling 15%3Uonp, 3U0> 5.72kV prim

Operate Delay time: 1500ms

Vedlegg L: Grunnleggende teori om parallellresonans

Når spole (L) og kondensator (C) kobles i parallell vil det for en bestemt frekvens oppstå resonans når reaktansene X_C og X_L er like store:

$$X_C = X_L$$

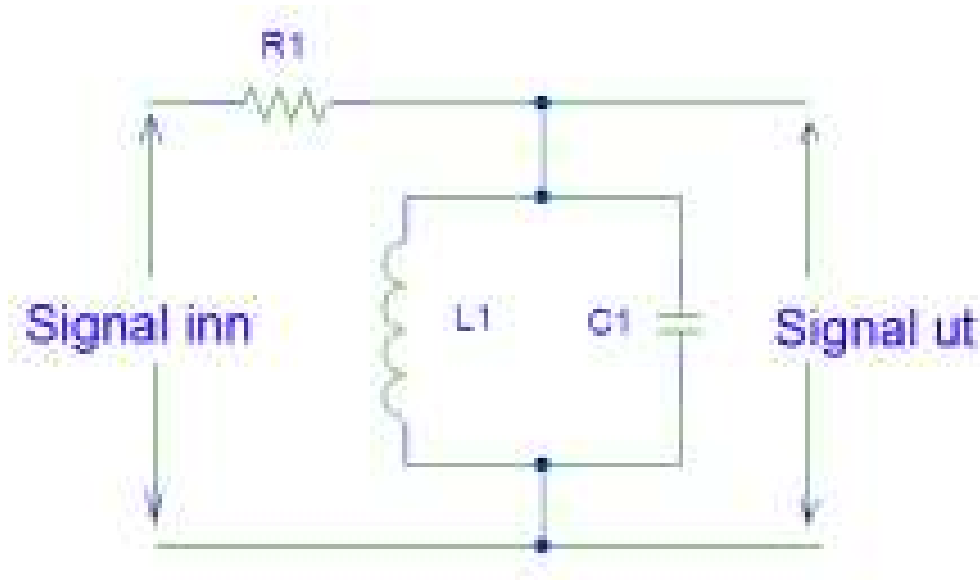
Hvor:

$$X_C = \frac{1}{2\pi * f * C}$$

$$X_L = 2 * \pi * f * L$$

Impedansen Z blir stor ved parallellkobling:

$$Z = \frac{X_L * X_C}{X_L + X_C} \cong \frac{X_{LC}^2}{R}$$



For utdypning om emnet kan det leses mer på UIO; «Generell teori om resonans» [25].

