

Spolekompensering i distribusjonsnettet med hensyn på sikkerhet og funksjonalitet

Yvonne Thi Nguyen
Johannes Silde
Hans Christian Randem

Bachelor i Elkraft
Innlevert: Mai 2019
Hovedveileder: Tor Arne Folkestad

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elektroniske systemer

Oppgavens tittel: Spolekompensering i distribusjonsnettet med hensyn på sikkerhet og funksjonalitet	Dato: 20.05.2019		
	Antall sider: 138		
	Antall vedlegg: 7		
Masteroppgave:	Bacheloroppgave	X	
Navn: Yvonne Thi Nguyen, Johannes Silde, Hans Christian Randem			
Veileder: Tor Arne Folkestad			
Eksterne veiledere: Jan Erik Engen, Trond Ellingsen			
<p>Formålet med oppgaven er å kartlegge utfordringer ved bruk av sentralkompensering på store distribusjonsnett, samt å undersøke i hvilken grad distribuerte spoler kan løse disse utfordringene. Resultatene skal brukes til å forme en endelig anbefaling for bruk av distribuerte spoler.</p> <p>For å løse oppgaven brukes eksisterende litteratur, sammen med fagfolk og simuleringer i Matlab Simulink. Det finnes lite litteratur om distribuerte spoler. Dette har gjort bruken av fagfolk viktig. For simuleringene brukes distribusjonsnettet i Trysil som utgangspunkt. Dette er et stort nett som brukes til å generalisere en anbefaling.</p> <p>Gjennom rapporten undersøkes viktige parametre som kompenseringsgrad, feillokasjon, oscillasjoner ved bortfall av feil og høye egenbidrag. Av disse er hovedutfordringen for sentralkompensering høye egenbidrag. Resultatene fra simuleringene viser at distribuerte spoler som et supplement til sentralspolen løser denne utfordringen.</p> <p>Som en generell anbefaling bør distribuerte spoler plasseres for å redusere feillokasjonens betydning. Dette gjøres ved en plassering mot enden av kabelstrekkeket. For valg av antall distribuerte spoler bør dette enten gjøres basert på ønsket egenbidrag på den aktuelle avgangen, eller basert på ønsket avlastning av sentralspolen.</p>			

Stikkord:

Sentral/Distribuert kompensering
Egenbidrag
Feillokasjons betydning
Jordfeilvern



Yvonne Thi Nguyen



Johannes Silde



Hans Christian Randem

Abstract

The purpose of this assignment is to analyze the different challenges surrounding central compensation in large distribution networks. Distributed coil compensation will be evaluated as a solution for the challenges. From the results there will be formed a recommendation for distributed coil compensation in the distribution network.

Existing literature, professionals and simulations through Matlab Simulink have been used to solve the assignment. There is not much published literature on distributed coil compensation, which made the use of professionals even more important. The simulations are based on the distribution network in Trysil, where a large distribution network is situated, making it possible to create a generalized recommendation.

Through this report, parameters like compensation degree, fault location, post-fault oscillations and high residual current will be examined and evaluated. The main challenge for central compensation showed to be high current contribution. Following, the results from simulations demonstrated that distributed coil compensation solves the challenges surrounding central compensation.

The general recommendation is implementing distributed coil compensation in the distribution network to lower the effects of fault location. This is done by placing the distributed coil at the end of the transmission line. The number of distributed coils are depending on desired relief of the central coil, or desired residual current on a selected transmission line.

Forord

Bacheloroppgaven ”Spolekompensering i distribusjonsnettet med hensyn på sikkerhet og funksjonalitet” er skrevet av tre uteksaminerende studenter ved studiet elektroingeniør med fordypning i elkraft ved NTNU i Gjøvik.

Bacheloroppgaven er tildelt av Eidsiva Nett. Oppgaven appellerte umiddelbart til oss. Både fordi temaet er en faglig og praktisk utfordring for flere netteiere og -forvaltere i Norge, og fordi temaet er faglig komplisert. Litteraturen knyttet til distribuerte spoler er begrenset. Dette har ytterligere bidratt til å vekke vår forskende interesse for oppgaven. For modellering av nettet ved feilsituasjoner brukes det matematiske verktøyet symmetriske komponenter. For å forstå de tekniske beskrivelsene i rapporten bedre anbefales det at leseren gjør seg kjent med dette verktøyet.

Oppstartsdato for oppgaven var 02.01.19. Skriveprosessen ble startet tidlig, samtidig var vi bevisste på å vektlegge strukturerte søk etter tilgjengelig litteratur. Vurdert i etterkant burde arbeidet med innsamling av informasjon og data vært gitt enda større fokus i startfasen. Vi har fått et betydelig faglig utbytte gjennom arbeidet med oppgaven, og vi har tilegnet oss spisskompetanse i spolekompensering. Arbeidet med oppgaven har vært omfattende, krevende, lærerikt og kjekt.

Vi ønsker å takke ABB som har vært vår viktigste eksterne faglige ressurs i arbeidet med oppgaven. En spesiell takk til Ari Wahlroos som har delt sin kunnskap om oscilleringer ved bortfall av feil, og admittansvern. Vi ønsker videre å takke vår oppdragsgiver Eidsiva AS for tilgang til interne data og for god veiledning fra Jan Erik Engen og Trond Ellingsen. Til slutt vil vi rette en stor takk til vår interne veileder ved NTNU i Gjøvik, Tor Arne Folkestad. Han har vist stort engasjement for bacheloroppgaven.

Innholdsfortegnelse

Figurliste	xii
Tabelliste	xiv
Begreper i rapporten	xvi
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	2
1.3 Avgrensninger	2
1.4 Etske Utfordringer	3
1.5 Rapportens oppbygging	3
2 Teori	4
2.1 Forskrifter	4
2.2 Jording og berøringsspenninger	4
2.2.1 Praktisk jording	6
2.2.2 Global Jord	6
2.3 Jordstrømmer	8
2.4 Sentrale spoler	10
2.4.1 Resonans og spoleregulering	11
2.4.2 Kunstig nullpunkt	13
2.4.3 Kabellengde	13
2.4.4 Serieimpedans	16
2.5 Distribuerte spoler	17
2.5.1 Egenbidrag	19

2.5.2	Kabellengde	20
2.6	Jordfeilvern	21
2.6.1	Grunnprinsipper for jordfeilvern	22
2.6.2	Oscillasjoner ved bortfall av jordfeil	26
2.6.3	Retningsvern	29
2.6.4	Admittansvern	31
3	Metode	38
3.1	Litteratur	39
3.1.1	Validitet og reliabilitet	39
3.2	Simuleringer	40
3.2.1	Validitet og reliabilitet	41
3.3	Fagpersoner	41
4	Simuleringer	42
4.1	Simuleringsmodellen	42
4.1.1	Modellens oppbygning	42
4.1.2	Teknisk data for kabler	45
4.1.3	Validitet og reliabilitet	47
4.2	Sentralkompensering	50
4.2.1	Modellbeskrivelse	50
4.2.2	Nettparameters påvirkning	52
4.2.3	Feillokasjon	58
4.2.4	Nettets påvirkning av endret nettkonfigurasjon	67
4.2.5	Jordslutningsmotstand	76
4.2.6	Retningvern i Trysil	80
4.3	Distribuert kompensering	87
4.3.1	Modellbeskrivelse	88

4.3.2	Distribuerte spoler sin påvirkning på sentralspolen	92
4.3.3	Feillokasjon, plassering	94
4.3.4	Nettets påvirkning av endret nettkonfigurasjon	105
4.3.5	Retningsvern	112
5	Drøfting	118
5.1	Litterære funn	118
5.2	Sentralkompensering	120
5.2.1	Utfordringer og funksjonalitet	120
5.2.2	Dagens spolekompensering i Trysil	122
5.3	Distribuert kompensering	124
5.3.1	Avlastning av sentralspolen	125
5.3.2	Nullsystemspenning	125
5.3.3	Senket Egenbidrag	127
5.3.4	Anbefaling i Trysil	129
5.4	Videre arbeid	130
6	Konklusjon	132
	Litteraturliste	136
	Vedlegg	138
A	Kontaktpersoner	139
B	Elforsk	140
C	Teknisk blad for 24kV kabler	141
D	Anleggsinformasjon i Trysil	142
E	Møre trafo teknisk data	143
F	Simuleringsmodell	144
G	Verdier fra Netbas	149

Figurliste

1	Tillat berøringsspenning som en funksjon av potensialhevingens varighet	5
2	Dekkflate ved global, gjennomgående jord	7
3	Dekkflate ved globaljord, ved separate høy- og lavspent jordingsystem	8
4	Nettpresentasjon av kapasitiv strømflyt	9
5	Strømflyt ved jordslutning på et sentralkompensert nett	11
6	Jordslutning på enden av kabelen på et kort kabelstrek	15
7	Nullsystemsimpedansen til en linjestykke med økende lengde	15
8	De symmetriske systemene ved en jordslutning på et langt kabelstrek	16
9	Resistiv og kapasitiv strøm gjennom jordslutning ved ulike feillokasjoner	18
10	De symmetriske systemene ved en jordslutning på et langt kabelstrek med distribuerte spoler	21
11	Oscillasjoner ved bortfall av feil	26
12	Transient resistiv polaritetsendring ved bortfall av feil	28
13	Retningsvern karakteristikk for spolekompensert nett	30
14	Reststrømvektor i retningsvern ved økende jordslutningsmotstand	32
15	Admittansvektor ved økende jordslutningsmotstand	33
16	Multifrekvens admittansvern karakteristikk	35
17	Admittansberegninger ved en pulserende feil	36
18	Jordslutningsstrøm med tilhørende kapasitive-, induktive- og resistive bidrag	54
19	Jordslutningsstrøm med forsinket innkobling av parallellmotstanden	55
20	Jordslutningsstrøm som en funksjon av kabellengde	63
21	Jordslutningsstrøm ved feilinnstilt sentralspole	68
22	Oscillasjoner ved selvslukking av jordfeil uten parallellmotstand	69
23	Oscillasjoner ved selvslukking av jordfeil med parallellmotstand	69
24	Oscillasjoner ved bortkobling av jordsluttet avgang Fageråsen	71

25	Resistive oscillasjoner på Fageråsen ved bortfall av kortvarig jordfeil . . .	72
26	Resistive oscillasjoner på Fageråsen ved bortkobling av jordsluttet avgang Håvi	73
27	Vinkel til retningsvernet på Fageråsen ved utkobling av jordsluttet avgang Håvi	74
28	Strømforløp fra strømtransformator med høye harmoniske komponenter .	85
29	Jordslutningsstrøm ved feilinnstilt sentralspole, med bruk av distribuerte spoler	106
30	Resistive oscillasjoner på Fageråsen utstyrt med en distribuert spole ved bortfall av kortvarig jordfeil	107
31	Resistive oscillasjoner på Fageråsen utstyrt med en distribuert spole ved utkobling av jordsluttet avgang Håvi	108
32	Resistive oscillasjoner på Fageråsen utstyrt med fem distribuerte spoler ved utkobling av jordsluttet avgang Håvi	110

Tabelliste

1	Oversikt over begreper i rapporten	xvi
2	Teknisk data for kabler i simuleringene	47
3	Nullpunktsspenning og spolestrom ved normal drift	52
4	Jordslutningsstrom pa vektorform	56
5	Nullsystemspenning og jordslutningsstrom ved variabel feillokasjon	60
6	Nullpunktsspenning og jordslutningsstrom ved endret jordslutningsmotstand	77
7	Sensitivitet pa nettet uten tilkoblet parallellmotstand	78
8	Sensitivitet pa nettet med tilkoblet parallellmotstand	79
9	Simulerte verdier for retningsvern pa Fagerasen og Havi ved jordslutning pa overkompensert nett	81
10	Simulerte verdier for retningsvern pa Fagerasen og Havi ved jordslutning pa underkompensert nett	82
11	DFT av verdiene fra strumtransformatorene pa jordsluttet avgang Fagerasen	84
12	Induktive bidrag og resulterende jordslutningsstrom med og uten bruk av distribuerte spoler	92
13	Metallisk jordslutningsstrom pa vektorform, ved bruk av distribuerte spoler	93
14	Feillokasjon ved distribuerte spoler i resonans	96
15	Nullsystemspenning og jordslutningsstrom ved variabel feillokasjon. Bruk av anbefalt distribuert spole	97
16	Plassering av distribuerte spoler pa 25km lange kabelstrek	99
17	Plassering av distribuerte spoler pa 45km lange kabelstrek	100
18	Simulering av retningsvern ved bruk av distribuerte spoler, jordslutning pa Fagerasen	113

19	Simulering av retningsvern ved bruk av distribuerte spoler, jordslutning på Håvi	113
20	Simulering av retningsvern ved overkompensering av distribuerte spoler .	114
21	Sensitivitet på nettet overkompensering av distribuerte spoler	115
22	DFT av verdiene fra strømtransformatorene på jordsluttet avgang Fageråsen ved bruk av en distribuert spole	116

Begreper i rapporten

Tabell 1: Oversikt over begreper i rapporten

Begrep	Forklaring
Diskre Fourier Transform	Fouriertransformen gjør en tidsfunksjon om til en funksjon av vinkelfrekvens
Egenbidrag	Avgangens kapasitive lekkasjestrøm til jord
FEF	Forskrift om elektriske forsyningsanlegg
Jordslutningsstrøm	Strøm gjennom 1-polt kortslutning til jord
Jordpotensialhevning	Spenningen mellom jordingsystemet og referansejord
Kompenseringsgrad	Størrelsen på induktiv strøm i forhold til kapasitiv gjennom jordslutningen
Metallisk jordslutning	Motstandsløs jordslutning
Oscillasjonsfrekvens	Hyppigheten til svingningene
PI-modell	Modellering av kabelstrek med både shunt og serieimpedans
Polaritetsendring	Fortegnsendring av signal
Potensialstigning	Økt spenningsdifferansen mellom to punkt
Resonans	Tilsvarende induktive og kapasitive bidrag
Reststrøm	Differanse mellom strøm ut og inn i en avgang
Shuntimpedans	Impedansen mellom to potensial, typisk fase og jord
Susceptans	Den imaginære delen av admittans, altså den inverse størrelsen av reaktans
Symmetriske komponenter	Matematisk verktøy for modellering av asymmetriske nett. Resultat er tre symmetriske systemer omtalt som pluss-, minus- og nullsystemet
X/R	Forholdet mellom reaktans og resistans
Yn	Viklinger koblet i stjerne, med tilkobling i nullpunktet
Zn	Viklinger koblet i zig-zag, med tilkobling i nullpunktet

1 Innledning

Dette kapitlet skal gi en kort innføring i oppgaven. Først beskrives bakgrunnen for oppgaven, samt oppdragsgiver. Videre presenteres problemstillingen som rapporten skal besvare. For å begrense oppgavens omfang er det en beskrivelse av avgrensninger for oppgaven, samt en beskrivelse av etiske utfordringer. Dette er et viktig tema for å forstå grunnprinsippene for argumentasjonen. Til slutt blir det gitt en kort innføring i rapportens oppbygging.

1.1 Bakgrunn

Kraftnettets infrastruktur er delt inn i tre deler, Sentralnettet, Regionalnettet og distribusjonsnettet, hvor distribusjonsnettet er siste ledd før sluttbruker. Det norske distribusjonsnettet er i en omstillingsfase. Nettet har i mange år blitt utbygd med linjer, men grunnet estetiske og driftsmessige hensikter er utbyggingen i stor grad gått over til kabel. Dette øker levetiden og driftsikkerheten til distribusjonsnettet. Hovedutfordringen med den økende bruken av kabel er den økende kapasitive lekkasjestrømmen, og tilhørende jordslutningsstrømmen. Dette medfører utfordringer for dagens spolekompensering. Distribuert spolekompensering er derfor et aktuelt tema som forventes anvendt i store distribusjonsnett i tiden fremover. Dette er et fagfelt hvor norske nettforvaltere har lite erfaring og kompetanse, i tillegg er det få relevante forskningsartikler publisert om temaet.

Oppdragsgiver Eidsiva nett er ett av fem datterselskap i Eidsiva konsernet. Eidsiva nett eier og drifter regional- og distribusjons nettet i Hedemark og Oppland, og er en av de største aktørene for salg av energi i området. Eidsiva forsyner 163 000 kunder i et område på rundt 250 000 innbyggere. Det er derfor viktig for nettselskapet å investere i videreutvikling og fornyelse av kraftnettet. Eidsiva nett har nylig kjøpt sine første distribuerte spoler. Disse skal plasseres i de voksende hyttefeltene i Oppland og Hedemark.

1.2 Problemstilling

I dagens distribusjonsnett er det normalt med sentral spolekompensering for å kompensere for kapazitiv lekkasjestrøm ved jordfeil. Den økende bruken av kabel i nettet øker den kapasitive lekkasjestrømmen. Dette medfører utfordringer for store avganger og tilhørende egenbidrag, samt overbelastning av sentralspolen. En løsning på dette kan være bruk av distribuerte spoler.

Denne oppgaven har derfor som mål å kartlegge utfordringer ved bruk av sentralkompensering på store distribusjonsnett, samt å undersøke i hvilken grad distribuerte spoler kan løse disse utfordringene. Oppgaven omfatter også en grundig sikkerhetsvurdering av spolekompensering og undersøkelse av funksjonaliteten på spolene. Som et redskap for å besvare oppgaven er det gjort omfattende simuleringer på distribusjonsnettet i Trysil. Dette er gjort både ved dagens sentralkompensering, og ved en eventuell distribuert spolekonfigurasjon. Resultatet fra simuleringene brukes som et grunnlag til å forme en generell anbefaling for bruk av distribuerte spoler.

1.3 Avgrensninger

Det er gjort avgrensninger på rapportens omfang for å komme i mål med oppgaven. Økonomiske vurderinger er ikke med i rapporten. Dette for å senke arbeidsmengden, og for å fokusere på sikkerhet og funksjonalitet. Rapporten begrenses også kun til å gjelde for distribusjonsnett. For simuleringene i rapporten brukes distribusjonsnettet i Trysil som et utgangspunkt. Simuleringenes grunnlag er derfor geografisk avgrenset, men resultatene generaliseres for alle distribusjonsnett. Det gjøres også avgrensninger i simuleringssmodellen i MATLAB/Simulink, nødvendige forenklinger gjøres for å spare tid. Under simuleringer, og generelt i rapporten studeres kun 1-polt kortslutning til jord. Dette er den hyppigste, og dermed vanligste feilen som oppstår i distribusjonsnettet.

1.4 Etiske utfordringer

Ved drift av distribusjonsnettet er det flere etiske utfordringer å ta hensyn til. Det er derfor viktig å følge gjeldende krav og retningslinjer fra stat og direktorater. For avgjørelser av driftsmetoder vil det i flere tilfeller måtte velges mellom drift- eller personsikkerhet. Personsikkerhet i form av berøringspenning er høyt prioritert, og ved avgjørelser og anbefalinger gjøres det alltid valg for å opprettholde forskriftene. Gjennom rapporten tas valg for å sikre god personsikkerheten fremfor driftsikkerhet, men innenfor rimelighetens grenser.

Eidsiva har gitt tilgang til sine servere via Netbas. Her er det mye konfidensiell informasjon som må vernes. Det er derfor inngått en taushetsavtale med Eidsiva som sikrer at etiske rammer blir overholdt. Det er også utvekslet konfidensiell informasjon med ABB hvor taushetsavtale er undertegnet.

1.5 Rapportens oppbygging

For å danne en oversiktlig presentasjon av løsningen av oppgaven er rapporten delt inn i seks deler. Først gir innledningen en innføring i rapportens formål. Videre beskrives all relevant teori. Her presenteres de tekniske aspektene for å danne en grunnforståelse av resultatene fra den analytiske delen av rapporten. Metode kapitlet beskriver hvordan informasjon er innhentet, og hvordan forutsetningene for simuleringene. I simuleringskapitlet utføres nødvendige simuleringer for å løse oppgaven. Diskusjonskapitlet vurderer resultatene opp mot teori, og tolker resultatene inn mot en endelig konklusjon som besvarer problemstillingen.

2 Teori

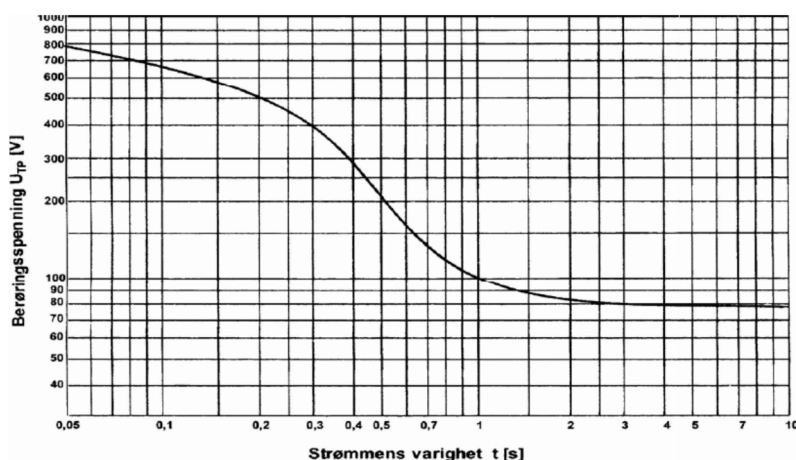
I dette kapitlet presenteres nødvendig teori for å skape et teknisk grunnlag for å forstå simuleringene og løsningen på oppgaven. Teorikapitlet for sentrale spoler er en innføring i emnet spolekompensering. Her beskrives spesifikke detaljer for sentralspoler, men også grunnprinsipper og funksjonalitet for både sentrale spoler og distribuerte spoler. Det finnes imidlertid lite spesifikk litteratur relatert til distribuerte spoler. Dette medfører utfordringer for den teoretiske beskrivelsen.

2.1 Forskrifter

For at et forsyningsanlegg skal driftes på en gunstig måte er det viktig å følge krav fra forskriftene. Dette vil sikre en person- og driftsikker drift, i tillegg til at materielle verdier ivaretas. De relevante forskriftene i rapporten er hentet fra ”Forskrift om elektriske forsyningsanlegg” [1], hvor nyeste versjon ble publisert i 2006. Denne versjonen har i forhold til tidligere versjoner et stor fokus på berøringsspenning. De relevante paragrafene er §4-2 for jordslutningsmotstander, §4-3 for utkoblingstid ved jordslutning og §4-11 for jordingssystem i høyspentnett. RENbladet vil også i stor grad benyttes gjennom rapporten. Dette er generelle retningslinjer og normer basert på forskriftene.

2.2 Jording og berøringsspenninger

For å drifte et distribusjonsnett på en forsvarlig måte er det viktig å bruke korrekt jordingssystem for å sikre person- og driftsikkerhet. Jordingssystemet leder jordslutningsstrømmer til jord, og avgjør dermed berøringsspenningen basert på tilhørende overgangsmotstand. Det er derfor viktig å ha et godt jordingssystem som forebygger berøringsspenningen ved økende jordslutningsstrøm fra økt bruk av kabel.



Figur 1: Tillatt berøringspenning som en funksjon av potensialhevingens varighet [2]

Kravene for berøringspenning er beskrevet i FEF [1], §4-11. Paragrafen ser på jordpotensialhevingen (U_E) i forhold til tillatt berøringspenning (U_{tp}). Figur 1 viser kravet for tillatt berøringspenning som en funksjon av potensialhevingens varighet.

Figur 1 kan både brukes til å hente ut tillatt berøringspenning basert på utkoblingstid, og til å hente ut tillatt utkoblingstid basert på berøringspenning. For nett hvor potensialhevingen ikke oppnår bunnverdien på 75V vil maksimal utkoblingstid ved jordslutning fra §4-3 [1] gjelde. Maksimal utkoblingstid ved jordslutning i distribusjonsnettet i Trysil er 10s. Basert på §4-11 [1] beregnes potensialhevingen med utgangspunkt i likning

$$U_E = Z_E * I_J \quad (1)$$

Hvor Z_E er overgangsmotstanden til jord og I_J er jordslutningsstrømmen. Disse størrelsene kan enten måles eller beregnes. Ved spolekompenserte nett er jordslutningsstrømmen lav. Kravet er dermed enklere å innfri.

2.2.1 Praktisk jording

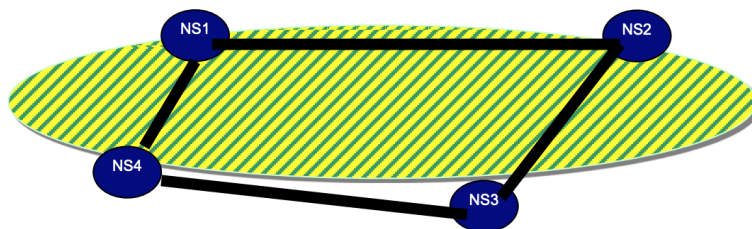
I dette underkapittelet beskrives det hvordan den praktiske utførelsen av jordingen av en spole bør gjøres, dette med utgangspunkt i anbefalinger fra RENbladet, og Eidsiva sine egne retningslinjer. For jordelektroder i transformatorstasjoner med distribuert spole tas det utgangspunkt i anbefalinger for impulsjord, siden det transiente forløpet til den induktive strøm fra spolen er hurtig, og større en den stabile verdien. Med dette som utgangspunkt bør transformatorstasjonen være kråkefotjordnet i godt jordsmon, med 4 stråler innen 25-30 meter fra spolen [3]. Jordelektroden skal ha et minste tverrsnitt på 25mm^2 kopper eller 50mm^2 stål [1]. RENbladet anbefaler et tverrsnitt på 50mm^2 for jordelektroder, ”der ikke annet er spesifisert” [4].

Jordingspunktet til spolen skal også tilkobles jordingssystemet med to separate jordlinjer, på to separate tilkoblingspunkt. Hvor hver av jordlinjene er dimensjonert for å drive spolestrømmen alene [2]. Dette er ment som en ekstra beskyttelse i tilfelle brudd eller feil på en av ledningene.

2.2.2 Global Jord

Global jord er en felles betegnelse for flere nærliggende jordingssystemer som er sammenkoblet for å skape et utbredt jordingssystem. Kravet for et utbredt jordingssystem er at potensialstigningen (U_E) holder seg under kravet gitt fra §4-11 [1] $U_E \leq 2U_{TP}$. Som vist i figur 1 vil konstant tillat berøringspenning (U_{TP}) være 75V. Hvis det er gjort korrigerende tiltak for berøringspenningen gjelder kravet $U_E \leq 4U_{TP}$. De korrigerende tiltakene er opplistet i §4-11 [1]. Ved et utbredt jordingssystem vil kravet for berøringspenning alltid være oppfylt, og det er dermed ikke nødvendig å beregne berøringspenningen [3]

Globalt nett kan utføres på to måter avhengig om jordingssystemet til høyspent- og lavspentnettet er sammenkoblet eller ikke. Sammenkoblet nett kalles gjennomgående jord.



Figur 2: Dekkflate ved global, gjennomgående jord [5]

For et nett med global gjennomgående jord kan dekkflaten til jordingssystemet beregnes som en sirkulærflate [5] vist i figur 2. Modellen forutsetter at jordelektrodene er jevnt fordelt over arealet.

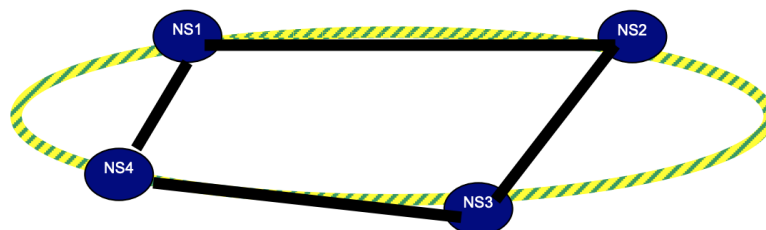
Overgangsmotstanden (R_G) kan for nett med global gjennomgående jord beregnes ved likning 2.

$$R_G = \frac{\rho}{4} * \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_T} \quad (2)$$

Hvor L_T er den totale lengden til jordlederen, A er arealet jordingssystemet dekker og ρ er den gjennomsnittlige jordresistiviteten for det gitte området. Potensialhevingen U_E kan videre beregnes ved likning 1.

For global jordingssystem hvor høyspent- og lavspennettets jordingssystem er separert, beregnes dekkflaten som omkretsen av en sirkel, hvor sirkelen representerer den sammenkoblede jordkabelen i høyspennett [5].

Som beskrevet i §4-11 vil utbredt jordingssystem oppfylle kravene for berøringsspenning. Det vil si at global jord med og uten gjennomgående jord innfrir kravet. Det er likevel gunstig med gjennomgående jord ettersom dette senker overgangsmotstanden betraktelig. For å avgjøre om det skal benyttes gjennomgående jord må berøringsspenningene i lavspennett beregnes og dokumenteres, for å så gjøre en vurdering i forhold til §4-11,



Figur 3: Dekkflate ved globaljord, ved separat høyspent og lavspent jordingssystem [5]

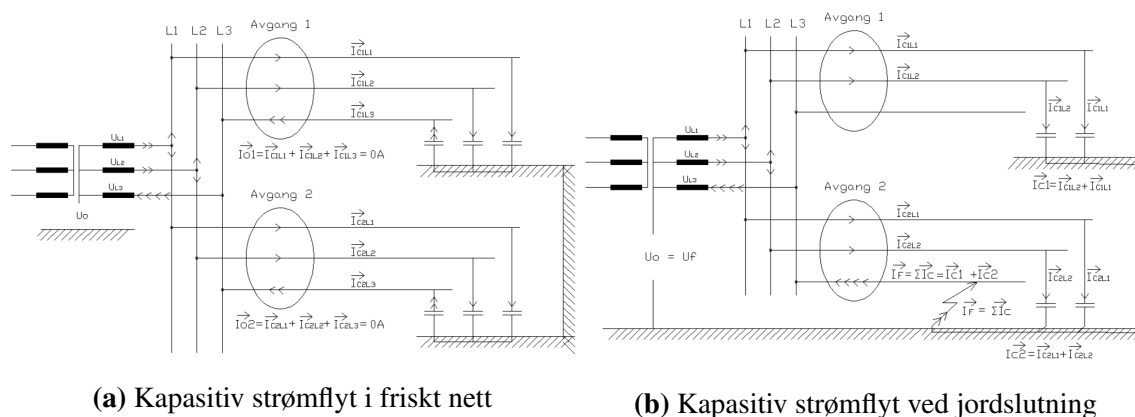
tabell 4-7 [5, 1]. Hvis høyspent- og lavspentnettet er sammenkoblet uten å oppfylle kravene vil farlige jordslutningsstrømmer fra høyspentnettet kunne gå helt ut til sluttbruker i lavspentnettet [1]. Dette medfører risiko for skade på mennesker og materielle verdier. For å regne ut overgangsmotstanden (R_S) i et globalt jordingssystem uten gjennomgående jord brukes likning 3. Hvor R er radiusen til den lukkede sirkelen, r er radiusen til jordlederen og ρ er den gjennomsnittlige jordresistiviteten for det aktuelle feltet.

$$R_S = \frac{\rho}{2 * \pi^2 * R} * \ln * \frac{8R}{r} \quad (3)$$

For globale jordsystemer kan det basert på likning 2 og 3 konkluderes med at en større dekkoverflate medfører en lavere overgangsmotstand til jord. Bruk av utbredt jordingssystem vil basert på §4-11 [1] innfri kravet for berøringsspenning. Dette kan også kontrolleres ved likning 1 for beregning av potensialheving, hvor overgangsmotstanden multipliseres med jordslutningsstrømmen.

2.3 Jordstrømmer

Kapittel 2.2 beskrev jordingssystemer og sammenhengende berøringspenninger. Videre skal det ses på hvordan jordstrømmen flyter i jordingssystemet, både i et friskt og et jordsluttet nett. Dette underkapitelet er ment som en innføring i problemene som er årsaken til at spolekompensering er normalt i distribusjonsnett. Kapasitiv strømflyt i et friskt nett er vanlig og ufarlig. En hver linje og kabel har en kapasitiv lekkasje til jord. Størrelsen på kapasitansen mellom fase og jord avgjøres av egenskapene til strekket. Kabelnett har



Figur 4: Nettpresentasjon av kapasitiv strømflyt [2]

en kapasitiv lekkasje som er 50 - 100 ganger større enn for luftlinje [2]. Dette skyldes hovedsakelig at det er liten avstand mellom leder og jordet kappe.

Figur 4 viser hvordan den kapasitive strømmen flyter i nettet. Den kapasitive lekkasjen er jevnt fordelt over hele strekket, men for fremstillinger modelleres den som en kondensator på enden av strekket. Figur 4a viser strømflyten i et friskt nett. Den kapasitive strømflyten foregår separat i avgangene og samme strøm flyter ut og inn i avgangen. Utfordringen med den kapasitive strømflyten oppstår først ved en jordslutning. Som vist i figur 4b vil den kapasitive lekkasjestrømmen ved en jordfeil strømme fra avgangene gjennom jordslutningen.

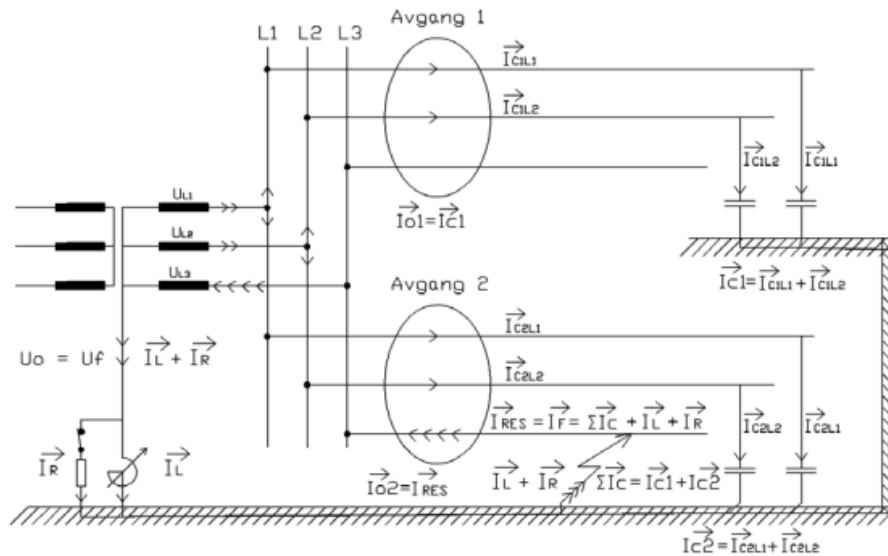
En av farene ved en jordslutning er dannelsen av lysbuer. Disse oppstår ved kortvarige jordslutninger. For 24kV system vil en korvarig jordslutning med drivstrøm mellom 10-35A slukke seg selv, mens for høyere drivstrømmer enn 35A vil lysbuen fortsette å brenne [6]. Hvis en lysbue ikke slukkes medfører det en strøm til jord, og dermed en berøringsspenning. Lysbue mellom fase og jord på luftlinjer oppstår hovedsakelig fra ytre påkjennelser på nettet. Eksempler på dette kan være en fugl, svakheter i isolatorer eller pendlende trær og busker ved vind, regn og snøvær [6].

Utfordringen ved høye kapasitive jordstrømmer ved en jordslutning er at ved en kortvarig feil i form av for eksempel en fugl, vil ikke lysbuen slukke selv om fuglen forsvinner, siden det er høy nok strøm til å drive lysbuen [6]. Feilstedet må bli spenningsløst for å slukke feilen. Dette svekker driftssikkerheten på nettet ettersom abonnenter unødvendig mister strømmen. En løsning på dette er å sende induktiv strøm gjennom jordslutningen for å utligne den kapasitive. Dette er grunnprinsippet for spolekompensering.

2.4 Sentrale spoler

Basert på grunnkunnskaper om utfordringer rundt høye kapasitive jordslutningsstrømmer fra kapittel 2.3 skal det i dette kapittelet beskrives konseptet om spolekompensering. Spolekompensering er et kjent og utbredt konsept ofte kalt Petersenspole eller jordslutningsspole. Gjennom rapporten betegnes denne som sentral- eller distribuert spole. Dette underkapittelet beskriver funksjonen til sentralspolen, samt sikkerhetsmessige utfordringer. Ettersom teori og utfordringer tilknyttet sentrale spoler er lignende som for distribuerte spoler er dette kapittelet ment som en felles innføring i emnet. I dagens distribusjonsnett er det normalt å installere justerbare sentralspoler i hovedtransformatorstasjonen. Spolen kobles mellom nullpunktet på transformatoren og jord, alternativt via kunstig nullpunkt og jord.

Figur 5 viser et jordsluttet nett med sentralspole. Strømmen gjennom jordslutningen er en sammensetning av kapasitiv, induktiv og resistiv strøm [2]. Avhengig av spolens innstilling vil spolens induktive bidrag dempe, fjerne eller overgå den kapasitive strømmen generert i nettet gjennom jordslutningen. Ved en spoleinnstilling tilsvarende resonans vil strømmen gjennom jordslutningen være rent resistiv, denne strømmen kommer fra resistiv lekkasje i nettet, og parallellmotstanden til spolen[6]. Sentralspoler er utstyrt med en parallellmotstand, hovedoppgaven til denne er å hjelpe jordfeilvernet å lokalisere feilen.



Figur 5: Strømflyt ved jordslutning på et sentralkompensert nett [2]

Oppgaven til spolen er å øke driftssikkerheten på nettet [6]. Dette gjøres ved å slukke lysbuer ved kortvarige jordslutninger uten at avgangen kobles ut. Spolen ligger hele tiden tilkoblet mellom nullpunktet på transformatoren og jord, men ved normal drift er spenningen over spolen lav [2]. Det vil si at det er først ved en jordslutning at sentralspølen spenningssettes med opptil fasespenning, avhengig av jordslutningsmotstanden. Ved en jordfeil vil det gå stor strøm gjennom spolen avhengig av innstilling. Spolen er ikke dimensjonert for å drive denne strømmen over lengre tid. Spolen er derfor utstyrt med termisk overvåking hvor overoppheting vil medføre utkobling av tilhørende transformator [2].

2.4.1 Resonans og spoleregulering

For å oppnå en så god kompensering som mulig må spolen innstilles riktig. Innstillingen av moderne sentralspøler gjøres via automatiske spoleregulatorer [2, 6]. For å finne riktig verdi prøver regulatoren alle verdiene på spolen. Under reguleringen måles og tegnes

spenningen over spolen som en funksjon av spolestrømmen. Dette kalles at resonanskurven til systemet tegnes. Ved et nett i resonans vil reaktansen på spolen tilsvare reaktansen til kapasitansene i nettet. Dette medfører en totalt høy reaktans, og dermed øker spenningen over spolen. Det er derfor ikke ønskelig å drifte nettet i resonans ettersom dette medfører høye spenninger i nullpunktet, og dermed kontinuerlig påkjennelse av isolasjon ved normal drift [2]. Dette er fordi skjevspenning generert av asymmetrien i nettet legges over sentralspolen[6].

For normale distribusjonsnett og tilhørende avganger med kapazitiv egenbidrag på under 40A per avgang anbefales det at nettet driftes overkompensert for å unngå at nettet kommer i resonans ved bortkobling av avganger. For nett med avganger med kapazitiv egenbidrag på over 40A anbefales nettet å driftes underkompensert for å sikre at tilhørende jordfeilvern detekterer feilen. Anbefalingen kommer fra RENbladet [2]. Ved inn eller utkobling av avganger vil den kapasitive lekkasjestrømmen i nettet forandres. Dette medfører at regulatoren må tegne en ny resonanskurve og innstille spolen på nytt [7]. Ved en feil i denne perioden vil ikke spolen være innstilt til å slukke eventuelle lysbuer, og det kan gå skadelige høye strømmer i jordslutningen.

Ved kraftig asymmetriske nett vil fremstillinger av resonanskurven by på problemer. Dette på grunn av skadelig høye spenninger over sentralspolen [6]. For nett med dette problemet kan det programmeres inn i regulatoren at den skal unngå resonansverdien. Regulatoren vil da estimere kurven basert på tillate målinger. Asymmetriske nett er konsekvens av for eksempel dårlig revolverte linjer [6]. Stor asymmetri kan kompenseres for ved å la parallellmotstanden ligge kontinuerlig innkoblet. Dette demper spenningsfallet over spolen ved normal drift [2]. På samme måte kan også svært symmetriske nett få en lav resonansspenning. Dette kan medføre utfordringer knyttet til innstilling av ønsket kompenseringsgrad. Det kan i disse tilfellene brukes spoleregulator med strøminjeksjon [2].

For at spolen skal få muligheten til å slukke eventuelle lysbuer ved en jordslutning bør parallellmotstanden være utkoblet. Hvis motstanden er kontinuerlig innkoblet ved normaldrift blir den utkoblet i 1-3 sekunder [6] ved jordslutning. Hvis feilen ikke er kortvarig legges motstanden inn igjen og avgangen frakobles av tilhørende jordfeilvern.

2.4.2 Kunstig nullpunkt

Det er mulig å etablere et kunstig nullpunkt for tilkobling av spolen [2, 6]. Metoden går ut på å bruke en egen transformator til å danne et nullpunkt. Denne transformatoren er dimensjonert for å drive strømmen til spolen ved en jordslutning. Transformatoren er Zn koblet. Dette gir en lavere nullsystemimpedans [6], og dermed en bedre spenningsfordeling over spolen ved jordslutning.

Det er en fordel at jordslutningsstrømmen ikke trenger å gå gjennom viklingene på krafttransformatoren. Dermed forsvinner muligheten for å overbelaste denne. Den største fordel er at spolen ikke blir utkoblet ved utfall av transformatoren, ved eventuell service og alternative forsyningsveier [2]. Ved utkobling av sentralspolen øker jordslutningsstrømmen betraktelig, avhengig av kapasitansen i nettet. Dette medfører nedsatt personsikkerhet grunnet økt berøringsspenning, og nedsatt driftsikkerhet da kortvarige feil og tilhørende lysbuer ikke vil slukkes.

2.4.3 Kabellengde

Dette delkapittelet beskriver hvorfor en lang kabel er forskjellig fra flere korte kabelstrekk med samme kapasitive lekkasjestrøm. I de fleste tilfeller er det uproblematisk å forenkle bidrag fra kabelstrekk til å være rent kapasitive. Dette gjelder ikke for lange kabler. For å forstå jordslutningsstrømmen som går i et spolekompensert nett og komponentene strømmen består av, modelleres et jordsluttet nett fra å være asymmetrisk til å være symmetrisk.

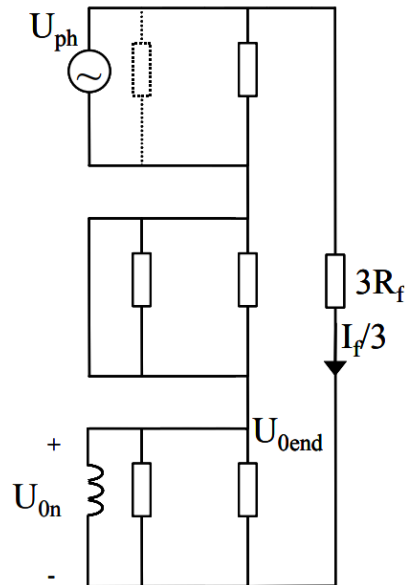
Dette gjøres ved det matematiske verktøyet symmetriske komponenter. Dette er beskrevet i referanse [8]. Artikkelen tar også for seg bruken av pi-modellen. Dette er en metode for modellering av kabelstrekk. Modellen tar både hensyn til serie og shuntimpedans.

For nettmodellering av feil på lange kabler brukes symmetriske komponenter og pi-modellen. Pluss- og minussystemets shuntimpedanse avgjøres av den kapasitive lekkasjen mellom fasene, mens serieimpedansen avgjøres av impedansen på linjen. Nullsystemets shuntimpedanse avgjøres av den kapasitive lekkasjen mellom fasene og jord, mens serieimpedansen er impedansen i sløyfen som feilstrømmen må gjennom. Denne er avhengig av kabeldimensjon, returvei og jordingssystem [8]. Lange kabelstrekk modelleres som flere pi-modeller i serie vist på figur 8.

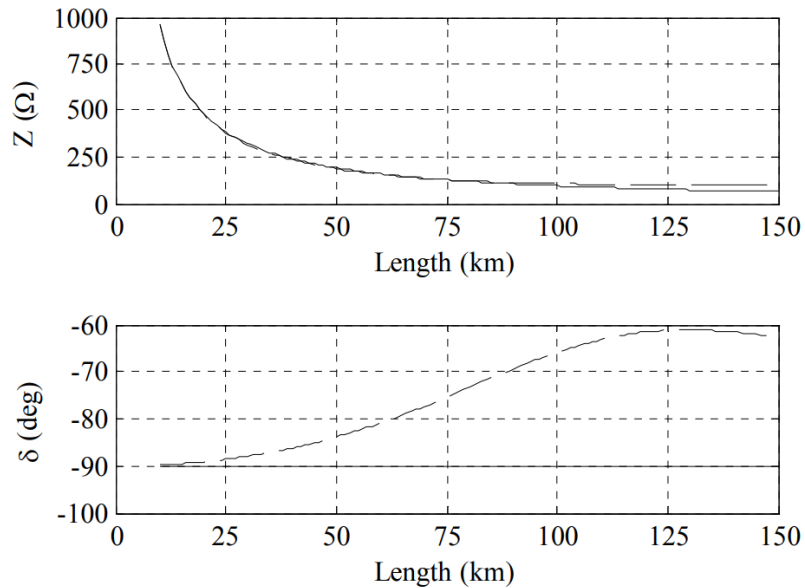
$$Z_{\pi shunt} = \frac{1}{j\omega C} \quad (4)$$

$$Z_{\pi serie} = R + j\omega L \quad (5)$$

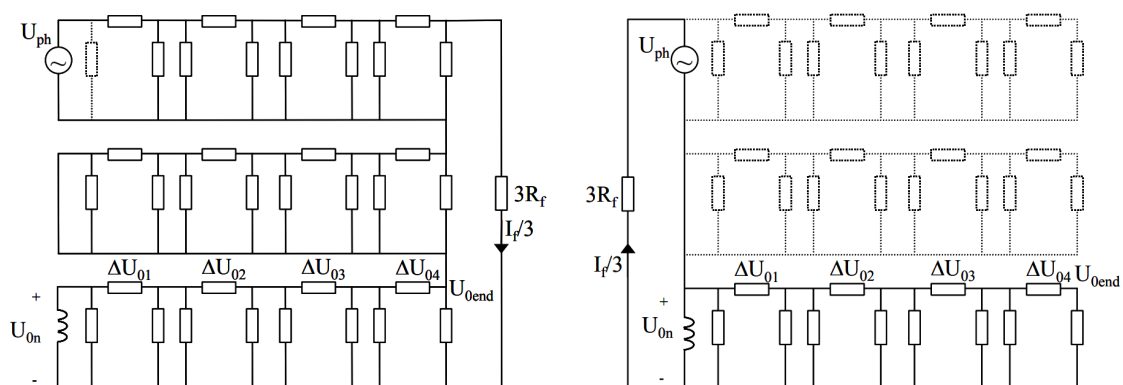
Ved korte kabelstrekk er shuntimpedansen så stor i forhold til serieimpedansen at den kan neglisjeres. Dette er vist i figur 6 hvor det er samme spenningsfordeling over hele nullsystemet, $U_{0n} = U_{0end}$. Dermed er kompenseringsgraden uavhengig av feillokasjon [8]. Ved en økende kabellengde øker kapasitansen til jord, og dermed minker shuntimpedansen, dette kan ses i ligning 4. En økende lengde vil også øke induktive og resistive tap fra serieimpedansen. På likning 5 kan det ses at serieimpedansen er proporsjonal med kabellengen. Ved en økende kabellengde vil altså shuntimpedansen minke og serieimpedansen øke, og på et punkt ikke lenger være neglisjerbar [8]. Figur 7 viser absoluttverdien og vinkelen på nullsystemsimpedansen målt fra samleskinnen på en avgang med økende kabellengde. Figuren viser at serieimpedansen allerede ved en kabellengde på 20km ikke lenger kan neglisjeres. Den stiplede linjen i figur 7 bruker pi-modellen, mens den rette linjen neglisjerer serieimpedansen.



Figur 6: Jordslutning på enden av kabelen på et kort kabelstreck [8]



Figur 7: Nullsystemsimpedansen til en linjestykke med økende lengde. Stiplet linje tar hensyn til serieimpedansen. Heltrukken linje er kun shuntimpedansen [8]



(a) Jordslutning på enden av kabelen på et langt kabelstrekk (b) Jordslutning på samleskinnen ved et langt kabelstrekk

Figur 8: De symmetriske systemene ved en jordslutning gjennom jordslutningsmotstanden R_f på et langt kabelstrekk. Stiplede komponenter er ubetydelige for resultatet. [8]

2.4.4 Serieimpedans

Det er flere utfordringer som oppstår når serieimpedansen ikke kan neglisjeres. Tradisjonelt sett er det vanlig å beregne at spenningen over sentralspolen er spenningsfordelingen mellom spolen og jordslutningsmotstanden. Serieimpedansen påvirker jordslutningsstrømmen og nullpunktsspenningen, og feillokasjonene er ikke lenger ubetydelig. I dette underkapittelet skal disse problemstillingene beskrives.

Figur 8 viser hvordan en metallisk jordslutning modelleres med de symmetriske systemene. Størrelsene i modellen er beskrevet i underkapittel 2.4.3. Forsyningsnettet forenkles til å være symmetrisk. Dermed er det kun det positive systemet som er spenningsforsyende. Systemmene sammenkobles ved en jordslutning via jordslutningsmotstanden R_f [8]. De symmetriske strømkomponentene er like store ved en jordslutning, og tilsvarer en tredjedel av jordslutningsstrømmen ($3I_1 = 3I_2 = 3I_0 = I_f$). Ved en omregning til det usymmetriske planet ville denne strømmen blitt tredoblet. Det er grunnen til at strømmen er modellert som en tredjedel av feilstømmen og at jordslutningsmotstanden er represen-

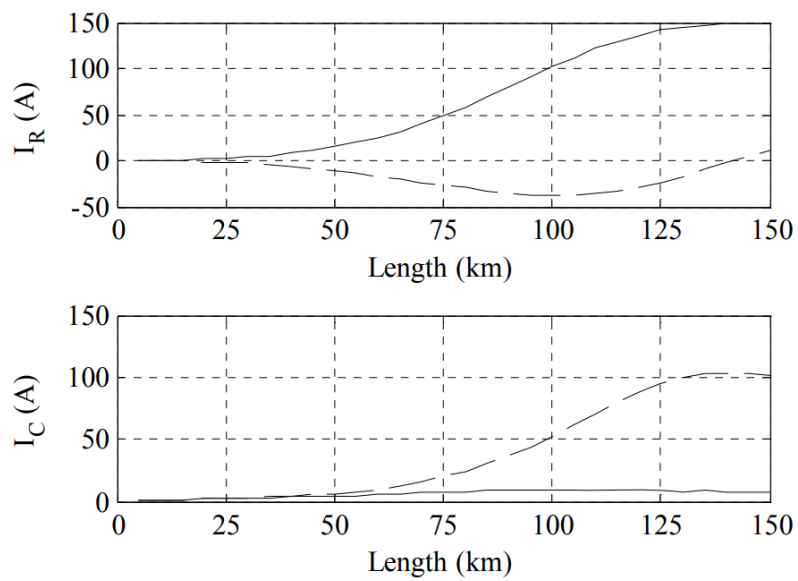
tert som $3R_f$. I modellen er nullsystemsimpedansen i spenningskilden neglisjert.

Basert på figur 8 kan det ses at ved lange kabelstrekk er ikke spenningsfordelingen lenger kun mellom jordslutningsmotstanden og spolen, men at det også er spenningsfall over serieimpedansene i pluss-, minus- og nullsystemet. Spenningen ut av plussystemet er gitt ved spenningsfordelingene over impedansene i plussystemet. Ved økende kabelstrekk vil spenningen ut synke. På samme måte vil også minussystemet generere et spenningsfall ved lange kabelstrekk [8]. Ved en jordslutning på samleskinnen vist på figur 8b vil ikke jordslutningsstrømmen gå gjennom pluss- og minussystemet. Tilhørende impedanser blir derfor ubetydelige. Det vil ved lange kabelstrekk være forskjell på nullsystemspenningen ved jordslutningen U_{0end} og nullsystemspenningen over sentralspolen U_{0n} . Dette skyldes serieimpedansen i nullsystemet, og er illustrert på figur 8. Spenningen over spolen, og dermed den induktive strømmen denne bidrar med er avhengig av hvor på kabelen feilen oppstår.

Figur 9 Viser hvordan kompenseringsgraden varierer ved endret feillokasjon. Figuren er hentet fra referanse [8], men artikkelen tar ikke for seg noen form for forklaring eller teoretisk utledning av resultatet. Figuren tas likevel med for å vise hvordan kompenseringsgraden varierer basert på feillokasjon. Dette temaet er grundigere beskrevet i kommende kapittel 4.2.3.

2.5 Distribuerte spoler

Som beskrevet i 2.4 er det likheter mellom teori og utfordringer for sentrale- og distribuerte spoler. Det induktive bidraget fra en distribuert spole kompenserer i samme grad for kapasitiv strøm gjennom en jordslutning som en sentralspole. Forskjellen er at distribuerte spoler er plassert ute i anlegget på avgangene til hovedtransformatoren. Distribuerte spoler leveres innebygd i fordelingstransformatorer med en fast induktans. Denne verdien



Figur 9: Ukompensert resistiv og kapasitiv strøm gjennom en jordslutning ved sentral spolekompensering. Solid linje er for feil ved samleskinnen mens stiptet linje er for feil på enden av kabelen. Spolen er instilt til en overkompensering på 5%, og resistive tap i spoler er 2%. Målingene er definert i forhold til U_{0n} [8]

tilsvarer ved en metallisk jordslutning en strøm 15A på et 24kV nett [2]. Det vil si at for å oppnå ønsket kompenseringsgrad er det fortsatt nødvendig med en justerbar sentralspole. Fordelingstransformatorene til distribuerte spoler er normalt Zn-koblet [2, 9]. Dette er en kobling som gir lav nullsystemsimpedanse, og dermed best spenningsfordeling over den distribuerte spolen. Tekniske data og tilhørende koblingsgruppe for en distribuert spole fra Møre Trafo er vist i vedlegg E.

Det er en termisk påkjenning for tilhørende fordelingstransformator å drive strømmen til den distribuerte spolen. Transformatoren er dimensjonert for å drifte denne strømmen i 5 minutter [2]. Ved en feil hvor en jordsluttet avgang ikke bortkobles i løpet av denne tiden vil trolig transformatoren ta fyr. Transformatorene kan derfor leveres med innebygde vern [2]. En normal oppfatning av de distribuerte spolene er at de kun utplasseres for å avlaste sentralspolen. Dette er bare en av flere fordeler. I dette underkapittelet er det teoretisk beskrevet hvilken effekt distribuerte spoler har på utfordringer som høyt egenbidrag og serieimpedans i nullsystemet.

2.5.1 Egenbidrag

En av utfordringene relatert til driftssikkerhet for nettet er avganger med høyt egenbidrag. Høye egenbidrag medfører utfordringer tilknyttet lokalisering av jordslutningen. Egenbidraget er størrelsen på den kapasitive lekkasjestrømmen, minus det induktive bidraget fra distribuerte spoler. For å senke det totale egenbidraget til en avgang kan det derfor brukes distribuerte spoler. Spolen bidrar sammen med sentralspolen til å slukke en eventuell lysbue. Hvis dette ikke lykkes bidrar den til å dempe egenbidraget til avgangen, og hjelper dermed tilhørende jordfeilvern å lokalisere feilen.

En normal tripsektor for et retningsvern er $\pm 80^\circ$ [2]. Basert på likninger fra referanse [7] fremstilles likning 6. Den viser hvilke faktorer som er avgjørende for vinkelen på

reststrømmen, målt av avgangens strømtransformatorer. I_E er egenbidraget til avgangen, I_{comp} er kompenseringsgraden til nettet hvor overkompensering legges inn positivt, og I_R er resistive tap i nettet fratrukket resistivt egenbidrag.

$$\phi = \arctan \frac{-(I_E + I_{comp})}{I_R} \quad (6)$$

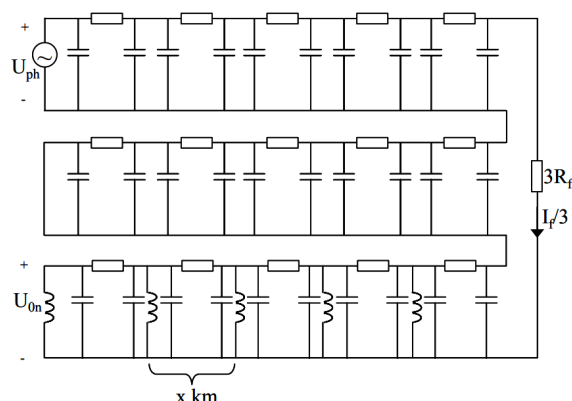
Likningen viser at ved å senke egenbidraget synker den målte vinkelen. Dette bidrar til bedre lokalisering av jordfeil. RENbladet [2] anbefaler å montere distribuerte spoler på avganger med egenbidrag høyere en 40A for å sikre utkobling ved en feil.

2.5.2 Kabellengde

Avganger med lange kabelstrekk og ulik kompenseringsgrad basert på feillokasjon er en av utfordringene for sentralkompenserte nett. Dette er beskrevet i underkapittel 2.4.3. Ved å plassere distribuerte spoler med jevne mellomrom på linjen vil problemet forhindres. Basert på figur 7 bør ikke lengden på kabler overstige 20km. Dette vil i noen tilfeller være praktisk utfordrende. Grunnen til at kabellengden ikke bør overstige 20km er at serieimpedansen ikke lenger er neglisjerbar i forhold til shuntimpedansen. En måte å løse dette problemet på er å øke shuntimpedansen [8], dette gjøres ved å montere distribuerte spoler. Ved å parallellkoble en induktiv og kapasitiv reaktans øker den totale reaktansen. Ved en størrelsesorden tilnærmet resonans vil parallellreaktansen være tilnærmet uendelig og serieimpedansen i nullsystemet kan neglisjeres [8].

Figur 10 viser de symmetriske systemene ved en jordslutning på enden av en kabel utstyrt med distribuerte spoler. For et nett i resonans vil spenning over alle shuntimpedanser i nullsystemet være den samme. Dermed er kompenseringsgrad uavhengig av feillokasjon.

Selv om feillokasjon er ubetydelig for nullsystemet, er fortsatt påvirkningen fra pluss- og minussystemet varierende [8]. Ved feil på enden av en lang kabel vil spenningsfallet i pluss- og minussystemet ha betydning for spenningen i nullsystemet, og dermed for



Figur 10: De symmetriske systemene ved en jordslutning gjennom jordslutningsmotstanden R_f på et langt kabelstrek utstyrt med distribuerte spoler med et mellomrom på x km [8]

jordslutningsstrømmen. Ved et nett i perfekt resonans vil ikke jordfeilstrømmen inneholde noen reaktiv komponent, kun resistiv. Et estimat for resistiv lekkasje for en spole er 2.5% [8]. Resulterende strøm gjennom jordslutningen er summen av resistive bidrag fra serieimpedanser, spoler og parallellmotstanden.

2.6 Jordfeilvern

Til nå er metoden for å fjerne kortvarige jordfeil i form av lysbuer beskrevet. Ved langvarige jordslutninger må tilhørende avgang frakobles nettet. Dette utføres ved at hver avgang på hovedtransformatoren utstyres med jordfeilvern. Det er viktig for driftssikkerheten på nettet at minst mulig del av nettet bortkobles, og at bortkobling kun skjer når det er nødvendig.

Forskrift for utkoblingstid av jordslutning på distribusjonsnett er beskrevet i §4-3 [1]. For spolekompenserte nett med både kabel- og luftstrek er kravet 10s. Hvis nettet ikke overholder berøringsspeningskravet er kravet for utkoblingstid strengere, definert i §4-11 [1]. Forskrift for sensitivitet på jordfeilvern er definert i §4-2 [1]. For nett med både kabel- og luftstrek er kravet 3000Ω .

I dette delkapitlet beskrives viktige faktorer og utfordringene for jordfeilbeskyttelse. Det vil også være en detaljert beskrivelse av hvordan jordfeilvern av typen retningsvern og admittansvern fungerer. Disse jordfeilvernene blir fokusert fordi retningsvern er det mest utbredte jordfeilvernet, og brukes i distribusjonsnettet i Trysil. Avanserte admittansvern er et relativt nytt produkt som har revolusjonert jordfeilbeskyttelse og vil i fremtiden trolig være regjerende.

2.6.1 Grunnprinsipper for jordfeilvern

For beregninger i jordfeilvern brukes nullsystemstrømmen I_0 og nullpunktspenningen U_0 . Det er viktig at målingene utføres korrekt og av nøyaktig utstyr. RENbladet [2] anbefaler å benytte kabelstrømstransformatorer. Disse bør ha måleklasse 0.5 eller bedre. Eksempler på anbefalte transformatorer er da 0.5S/5P10 1.0VA eller 0.2S/5P25 1.2VA [2]. RENbladet anbefaler også et omsetning på 100/1A for å minimere byrden. Dette temaet er grundig beskrevet i referansene [2, 7].

Jordfeilvern har normalt tre kriterier som må oppfylles før vernet kobler ut avgangen. Kriteriene er størrelsen på U_0 , I_0 og egne beregninger som vinkelen mellom strøm og spenning eller nullsystemsadmittans. Størrelsen på kriteriene avgjøres av egenskapene til nettet. Disse kriteriene må være oppfylt gjennom et innstilt tidsintervall før vernet slår ut.

U_0 kriteriet avgjøres av asymmetrien i nettet, altså spenningen over spolen ved normale tilstander. Kriteriet må være høyere enn dette [7]. I et svært symmetrisk nett vil resonanskurven som beskrevet i underkapittel 2.4.1 være flat. U_0 kriteriet kan derfor innstilles lavt, hvilket øker sensitiviteten på vernet. I_0 kriteriet avgjøres av størrelsen på den resistive

strømflyten i nettet. Denne kan avleses fra spoleregulatoren. Kriteriet må være lavere enn denne [7].

Det anbefales i RENbladet [2] å ha reservevern på samleskinnen. Hvis jordfeilvernet på den jordsluttede avgangen ikke detekterer feilen kobler dette vernet ut hele samleskinnen. Normal utførelse er U_0 vern. Disse har nullpunktsspenningen som eneste tripkriteriet. Det er viktig at samleskinnevernet har en tidsforsinkelse lengre enn den totale tidsforsinkelsen for jordfeilvern på avganger for å sikre selektivitet. Tidsforsinkelsen må også være kortere enn kravet fra forskriftene [1]. Det er spesielt viktig med samleskinnevern ved bruk av distribuerte spoler som ikke er utstyrt med egne vern [2].

Strømmåling

Strømverdien jordfeilvernet mottar er summen av strømmene fra fasene på avgangen. Ved et friskt nett er summen lik null ettersom all strøm som flyter ut i avgangen returnerer i samme avgang [2]. Ved en feil vil det oppstå en reststrøm. Det vil si at det går en annen strøm ut i avgangen enn det som kommer i retur. Vinkelen mellom reststrømmen og nullpunktsspenningen er en avgjørende faktor for jordfeilvern. Vinkelen avgjøres av komponentene i feilen. Ved et ukompensert nett vil strømmen være nærmest rent kapasitiv. For et spolekompensert nett vil strømmen være en kombinasjon av kapasitiv, induktiv og resistiv strøm. Egenbidraget til den jordsluttede avgangen går både ut og inn av avgangen, og registreres dermed ikke av jordfeilvernet [2, 7]. Dette betyr at det går en annen strøm gjennom lysbuen enn det jordfeilvernet måler. Differansen er egenbidraget på avgangen [7].

Både retningsvern og admittansvern er vektorbaserte. Det vil si at de bruker absoluttverdi og vinkel mellom strøm og spenning til å modellere dem som vektorer. For vektorene defineres positiv strømrretning på flere måter. RENbladet [2] definerer positiv retning mot

samleskinnen, med positiv nullpunktsspenningen som referanse. ABB bruker omvendt polaritet. Her defineres positiv retning mot linjen, men med negativ nullpunktsspenning som referanse. Argumentet til ABB er at denne polariteten gir riktig fortegn på produsert og forbrukt energi [9]. Begge polaritetene gir samme resultat, men ettersom ABB er ledende innen jordfeilbeskyttelse brukes ABB sine polariteter videre i rapporten.

Parallellmotstanden

Opgaven til parallellmotstanden er å hjelpe jordfeilvern å lokalisere feilen. For å komme lengre inn i tripsektoren på jordfeilvern i spolekompenserte nett, må deler av den målte strømmen være resistiv. Dette gjøres ved å koble en motstand i parallell med sentralspolen. Parallellmotstanden kobles til på en egen avgang på sentralspolen slik at spoleregulatoren kan koble den inn og ut ved feilsituasjoner [2, 6]. Denne avgangen har også lavere spenning enn på nettet [7]. Parallellmotstander leveres med en fastsatt motstand, hvor typisk motstand tilsvarer 10A ved en metallisk jordslutning referert til primærsiden [2]. For avganger med høye egenbidrag kan effekten på parallellmotstanden økes for å sikre at den målte strømmen kommer inn i tripsektoren på jordfeilvernet [2].

For dimensjonering av parallellmotstanden må sensitiviteten på jordfeilvernet tas i betraktning. Med en parallellmotstand med høy effekt vil den tilhørende motstanden senke den totale impedansen i nullsystemet, og dermed senke spenningen i nullpunktet ved jordfeil. Parallellmotstand med høy effekt vil altså bidra til å trekke den målte vinkelen inn i tripsektoren på vernet, men senke nullpunktsspenningen. Dermed svekkes sensitivitet på vernet i form av U_0 kriteriet.

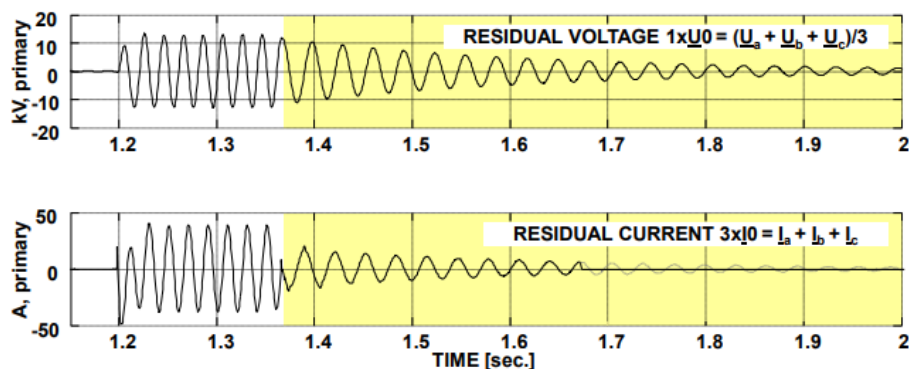
For å oppnå høy driftsikkerhet er det viktig at spoler i nettet slukker lysbuer. Parallellmotstanden må derfor ha en forsinket innkobling ved jordslutning. Dette kalles OFF-ON-OFF [10]. For å unngå overoppheting er parallellmotstanden kun innkoblet i et gitt tidsintervall.

Dette intervallet skal være tilstrekkelig for jordfeilvern å lokalisere feilen. Parallellmotstanden er ikke dimensjonert for å driftes med en jordslutning over lengre tid. Det er derfor en egen sikkerhetsfunksjon tilknyttet spoleregulatoren som bortkobler motstanden [2].

I nett som er svært asymmetriske anbefales det å drifte nettet med kontinuerlig innkoblet parallellmotstand. Dette senker kontinuerlig påkjennelse av isolasjon på høyspentmateriellet, ved å dempe nullpunktsspenning ved normal drift [2]. Ved kontinuerlig innkoblet parallellmotstand anbefales det å kortvarig koble motstanden ut ved en feil, dette kalles ON-OFF-ON. Dette for å senke jordslutningsstrømmen, og dermed hjelpe spoler med slukking av lysbuer ved kortvarige feil [7]. Selv om det anbefales å drifte nettet med kontinuerlig tilkoblet parallellmotstand vil det med logikken ON-OFF-ON være lengre tidsforsinkelse for utkobling ved en langvarig jordslutning avhengig av forsinkelsen før parallellmotstanden utkobles. Utkoblingen vil først skje etter at parallellmotstanden legges inn etter OFF perioden [10].

Over- og underkompensering

For å unngå resonans mellom spoler og kapasitanser i nettet er det vanlig å over - eller underkompensere nettet. Dette gjøres ved at bidraget fra sentralspolen stilles litt over eller litt under bidraget til kapasitansen i nettet. Fordelen med overkompensering er at faren for resonans ved bortkobling av deler av nettet forsvinner [2]. Fordelen med underkompensering er at reststrømvektoren kommer lenger inn i fjerde kvadrant som er ønskelig fra et jordfeilvern-perspektiv. Avganger med høyt egenbidrag trekkes kortere inn i fjerde kvadrant enn avganger med lavt egenbidrag. Dette kan ses på likning 6. Det kan også ses på likningen at ved en underkompensering vil vinkelen jordfeilvernet måler komme lengre inn i fjerde kvadrant enn ved overkompensering. Dette er argumentet RENbladet [2] bruker i sin anbefaling på å drifte distribusjonsnett underkompensert for nett med egenbidrag høyere enn 40A.



Figur 11: Oscillasjoner ved bortfall av feil. Jordslutningen oppstår etter 1.2s, og bortkobles etter 1.37s. Feilaktig utkobling av frisk avgang skjer etter 1.67s. [11]

2.6.2 Oscillasjoner ved bortfall av jordfeil

Oscillasjoner ved bortfall av jordfeil er en tilstand som oppstår på nettet når en jordfeil forsvinner. Det kan skje enten ved at jordfeilvernet på avgangen kobler ut, eller at spoler i nettet slukker feilen. Denne effekten anses i følge referanse [11] som hovedårsaken til feilutkobling av jordfeilvern på friske avganger. Størrelsen og varigheten på oscillasjonene avgjøres av egenskapene i nettet. Faktorer som spiller en stor rolle er total kapasitiv-, induktiv- og resistiv strøm [11, 12].

Ved en jordslutning i nettet heves nullsystemspenning, og det vil gå en reststrøm i alle avganger [2]. Når jordslutningen forsvinner dør nullsystemspenningen og reststrømmen gradvis ut. Denne prosessen er vist i figur 11, hvor det kan ses at svingingene dør ut ved oscillasjoner. Figuren viser også hvordan oscillasjonene har en annen frekvens enn frekvensen på nettet. Likning 7 viser at oscillasjonsfrekvensen avgjøres av total kapasitiv-, induktiv- og resistiv strøm [11, 12]. Ved å endre frekvensen endres også størrelsen på reaktansene, og dermed strømmen disse bidrar med.

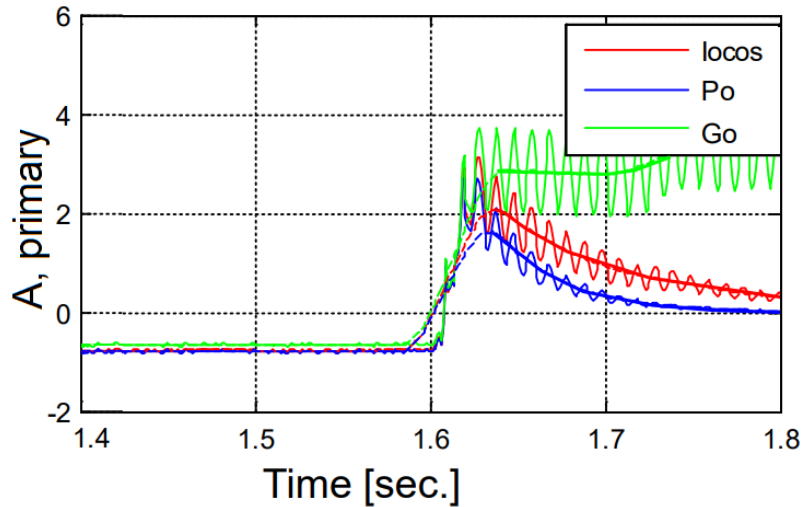
$$f_p = f_n \sqrt{\frac{I_L}{I_C} - \frac{I_R^2}{4I_C^2}} \quad (7)$$

Likning 7 viser at for normalt spolekompenserte nett hvor kapasitiv- og induktiv strøm er tilnærmet like vil etterfølgende oscillering ved selvslukking av en lysbue være tilnærmet nettfrekvens. For utkobling av jordsluttet avgang vil frekvensen være avhengig av utkoblet egenbidrag.

Feilutkobling av friske avganger er hovedsakelig en utfordring på nett som driftes veldig underkompensert [12], for eksempel kun med distribuerte spoler og ikke sentral spoler. Retningsvern i nett som dette bruker samme karakteristikk som retningsvern på isolerte nett. Disse tar hensyn til retningen på den reaktive strømmen, altså strømmen som ligger $\pm 90^\circ$ på nullpunktspenningen [2]. Grunnen til at oscillasjonene hovedsakelig er en utfordring for veldig underkompenserte nett er at oscillasjonsfrekvensen basert på likningen 7 vil bli veldig lav. Dette er vist i figur 11. Den lave frekvensen medfører at induktiv strøm øker og kapasitiv strøm minker. Dette kan føre til en kortvarig overkompensering [11, 12]. Dette oppfatter vernet som kapasitiv strøm i feil retning, og kan medføre feilutkobling.

For nett med både sentral og distribuerte spoler brukes vanligvis jordfeilvern som tar utgangspunkt i den resistive strømflyten [2]. Det vil dermed være ubetydelig for jordfeilvernet om nettet kortvarig endrer kompenseringsgrad. Utfordringen her foreligger hovedsakelig for store avganger, eventuelt også med utbredt distribuert kompensering [11]. Avganger som består av lange kabler har et høyt kapasitivt egenbidrag. På samme måte har avganger med flere distribuerte spoler et høyt induktivt egenbidrag. Under en jordfeil motvirker disse hverandre og danner et lavt egenbidrag. Dette gjelder ikke under oscillasjonene ved bortfall av feil.

Under en jordslutning spenningssettes nullsystemet, og resulterende strøm er med å lade opp kapasitanser og induktanser. Når feilen forsvinner utlader reaktansene en aktiv strøm [11]. Denne har retning mot samleskinnen, altså motsatt polaritet enn aktive tap på linjen.



Figur 12: Transient resistiv polaritetsendring ved bortfall av feil [11]

Dette er ikke et problem hvis de aktive tapene på linjen er høyere en utladet energi, men hvis avgangen har store reaktanser kan dette medføre en kortvarig polaritetsendring av den aktive strømmen. Dette er illustrert i figur 12 rett etter bortkoblingen av feilen ved tidspunkt 1.6s. Dette trekker reststrømsvektoren inn i fjerde kvadrant og i verstefall inn i tripsektoren på vernet. Hvilket kan medføre feilaktig utkobling av jordfeilvern på friske avganger. Feilutkobling skjer hovedsakelig ved intermitterende jordslutning hvor den aktive strømmen beveger seg inn og ut av tripsektoren på vernet [11].

$$I_{RE'} = \text{Real}(Y_0) * U_{PE} = I_{RTot} * \frac{|I_{CE}| + |I_{DS}|}{|I_C| + |I_L|} - I_{RE} \quad (8)$$

Likning 8 [11] viser middelverdien på den målte resistive strømmen $I_{RE'}$ i øyeblikket feilen forsvinner. I_{RE} , $|I_{CE}|$ og $|I_{DS}|$ er absoluttverdien til resistiv-, kapasitiv- og det induktive egenbidraget. $|I_C|$ og $|I_L|$ er absoluttverdien til kapasitiv- og induktiv strøm i hele nettet. Likningen viser at det er størst fare for transient polaritetsendring av den resistive strømflyten, på en avgang med høye egenbidrag og distribuerte spoler, på et nett med høye resistive bidrag [11].

En viktig faktor når det kommer til oscillasjoner ved bortfall av feil er demping. Resistive

bidrag i nettet avgjør varigheten på oscillasjonene [11, 12]. Ved høye resistive bidrag vil svingningene dø raskere ut. Høy demping senker også sjansen for feilaktig utkobling. Likning 9 [11, 12] viser hvordan tidskonstanten til svingningene beregnes. Svingningene har eksponentielt avtagende karakteristikk.

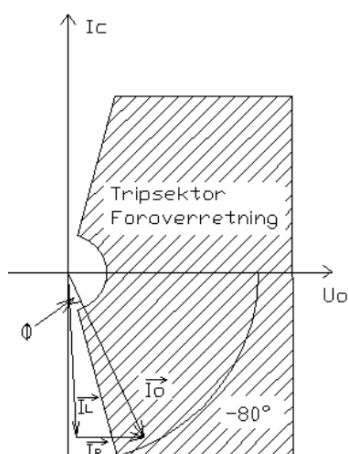
$$\tau_p = \frac{2I_C}{\omega_n I_R} \quad (9)$$

2.6.3 Retningsvern

Distribusjonsnett med spolekompensering driftes normalt med sektorbaserte retningsvern [2]. Dette gjelder også for Trysil. Retningsvernet er et relativt simpelt jordfeilvern som sjekker vinkelen mellom reststrøm og nullpunktsspenning mot programerte kriterier [2]. Kriteriene designes for å sikre utkobling ved feil, samt forhindre utkobling av friske avganger. Alle jordfeilvern tar utgangspunkt i retningen på strømmen, men det finnes forskjellige metodikker for å tolke resultatene.

For fremstilling av målte vektorer brukes XY-planet. X-aksen representerer den reelle delen av I_0 med $-U_0$ som referanse, mens Y-aksen representerer den imaginære delen av I_0 [7]. Basert på målingene fra spenning- og strømtransformatorene avgjør vernet retningen på strømmen. Ved en jordfeil måler friske avganger en reststrøm med en vinkel på omlag -90° avhengig av resistive tap i avgangen. Med utgangspunkt i ABB sine polariteter måles denne vinkelen fordi positiv strømrretning defineres av strømtransformatorene mot linja. Dette stemmer overens med strømmens retning, men roteres 180° ettersom $-U_0$ brukes som referanse. For friske avganger med høye resistive bidrag vil den resistive strømmen bidra til å trekke reststrøm-vektoren inn i tredje kvadrant, altså bort fra tripsektoren [7].

For jordsluttet avgang vil retningsvernet på et nett i resonans måle en reststrøm basert på resistive bidrag fra bakgrunnsnettet, minus egenbidraget [2]. Hvis avgangen har et høyt egenbidrag vil vinkelen på reststrømmen nærme seg -90° avhengig av resistive bidrag og



Figur 13: Retningsvern karakteristikk for spolekompensert nett [2]

kompenseringsgrad. Hvis nettet er underkompensert vil det flyte en kapazitiv strøm gjennom jordsluttet fasen fra linjen mot samleskinnen. Dette er negativ retning, men grunnet den negative referansen måles strømmen som positiv. Underkompenseringen flyter i motsatt retning av egenbidraget, og vil medføre at det måles en senket reaktiv strømflyt. Dette trekker reststrømmen mot den reelle aksens. Hvis nettet er overkompensert vil det flyte en induktiv strøm i jordslutning, hvilket er med på å trekke reststrømmen mot -90° [7]. Vinkelen retningsvernet beregner kan ses i likning 6.

Vinkelen på reststrømmen i den jordsluttede avgangen vil i de fleste tilfeller være nærst i fjerde kvadrant, avhengig av egenbidrag, kompenseringsgrad og parallellmotstand. Kompenseringsgraden og egenbidraget avgjør hvor på den imaginære aksens reststrømmen ligger, mens parallellmotstand og andre resistive bidrag fra nettverket avgjør hvor på den reelle aksens reststrømmen ligger [2]. Ved høye resistive bidrag vil reststrømsvektoren komme lengre inn på reellaksens og det vil være enklere å skille mellom feilaktig og frisk avgang [7].

Figur 13 viser tripsektoren til et typisk retningsvern. En anbefalt tripsektor er $\pm 80^\circ$, og

anbefalt sikkerhetsmargin på jordsluttet avgang er 5° [2]. Retningsvernet er avhengig av en resistiv komponent for å avgjøre om feilen er på den aktuelle avgangen. Vektoren på figuren er en sammensetning av resistive bidrag fra nettet og negativ kapasitiv strøm fra egenbidraget. Det holder ikke at vinkelen på retningsvernet måles innenfor tripssektoren. Alle tripkriteriene U_0 , I_0 og retningskriteriet [2] må være innfridd.

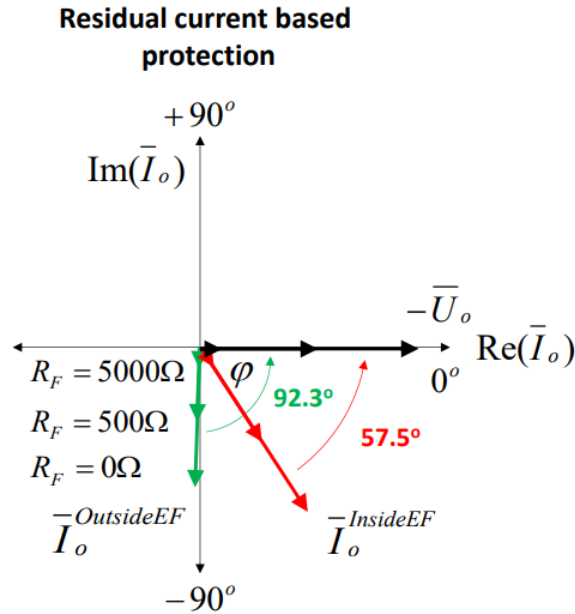
Retningsvern er utsatte for feilutkobling grunnet harmoniske og transiente jordfeilstømmer fra oscillasjoner ved bortfall av feil. Det anbefales derfor å drifte retningsvern med tilleggsmoduler som tar hensyn til dette [7].

Sensitivitet

Sensitiviteten på et retningsvern avgjøres av innstilte parameter U_0 og I_0 . Ved jordfeil avgjøres størrelsen på disse hovedsakelig av jordslutningsmotstanden, men også som beskrevet i underkapittel 2.4.3 av feillokasjon. Ved en høy jordslutningsmotstand vil store deler av fasespenningen legge seg over denne. Dermed blir potensialhevingen i nullpunkt og strømmen i nullsystemet begrenset. U_0 og I_0 parametrene innstilles som beskrevet i underkapittel 2.6.1 basert på nettets egenskaper. Kravet for sensitivitet er beskrevet i §4.2 [1]. Vernet skal minimum detektere høyohmige feil opp til 1000Ω for kabelnett, og 3000Ω for luft- og blandingsnett [2]. Figur 14 viser den lineære sammenhengen mellom amplituden på U_0 , I_0 og jordslutningsmotstanden. Det kan ses på figuren av når jordslutningsmotstanden øker, minker nullsystemsverdiene.

2.6.4 Admittansvern

Et annet jordfeilvern er admittansvernet. Dette vernet beregner admittansen mellom nullpunktet og jord på den aktuelle avgangen. Admittansen beregnes basert på nullpunkts-



Figur 14: Reststrømvektor i retningsvern ved økende jordslutningsmotstand, grønn måles på frisk avgang, rød på jordsluttet avgang, og sort er nullpunktsspenningen [7]

spenning og reststrøm vist i likning 10 [13].

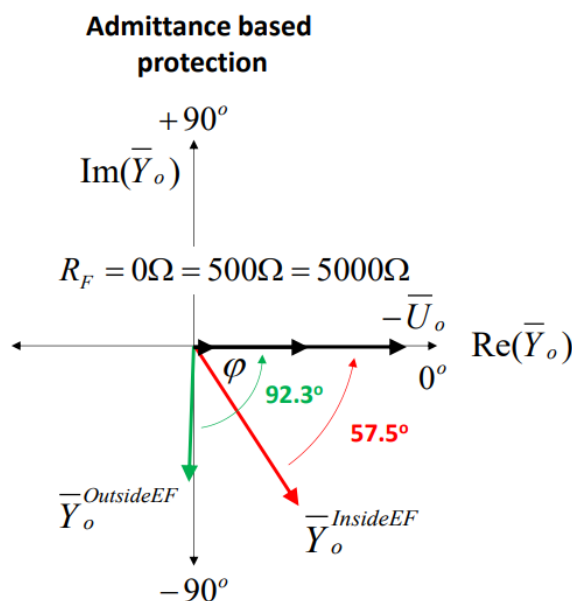
$$Y_0 = \frac{I_0}{-U_0} = G_0 + jS_0 \quad (10)$$

Admittansberegningen er forskjellige for hver avgang, hvor I_0 er den varierende faktoren. For avganger med høye kapasitive bidrag vil reststrømmen være stor, og medføre en høy admittans. For friske avganger vil I_0 være den strømmen egenbidraget trekker, mens for jordsluttet avgang avgjøres I_0 av egenbidrag og jordslutningsstrøm.

$$Y_0 = -Y_{EG} = -(Y_{CE} + Y_{DS}) = -([G_{CE} + G_{DS}] + j * [S_{CE} - S_{DS}]) \quad (11)$$

Likning 11 viser admittansen en frisk avgang, utstyrt med distribuerte spoler beregner under en pågående jordfeil [13]. $-Y_{EG}$ er admittans fra egenbidrag, Y_{CE} er admittans fra kapasitanser og Y_{DS} er admittans fra distribuerte spoler. Det negative fortegnet kommer av strømretningen vist i likning 10, definerte i underkapittel 2.6.1.

$$Y_0 = Y_{CB} + Y_L = [G_{CB} + G_L] + j * [S_{CT} - S_{CE} - S_L] \quad (12)$$



Figur 15: Admittansvektor ved økende jordslutningsmotstand, grønn måles på frisk avgang, rød på jordsluttet avgang, og sort er nullpunktsspenningen [7]

Likning 12 viser admittansen den jordsluttede avgangen beregner [13]. Y_{CB} er admittansen til bakgrunnsnettet og Y_L er admittansen fra spoler i bakgrunnsnettet. S_{CT} er den totale susceptansen fra kapasitansen til bakgrunnsnettet mens S_{CE} er susceptansen fra egenbidraget. Likningen viser at ved et nett i resonans vil den beregnede admittansen være summen av konduktansene fra bakgrunnsnettet og sentralspolen, minus susceptansen til egenbidraget.

Det unike med admittansvern er at jordslutningsmotstanden er ubetydelig for beregningene. Som beskrevet i underkapittel 2.6.3 er det lineær sammenheng mellom U_0 og I_0 ved ulike jordslutningsmotstander. Det betyr at vernet vil beregne samme admittans ved høyohmig og lavohmig jordslutning. Dette er illustrert i figur 15. Figuren viser at når jordslutningsmotstanden øker og spenningsvektoren $-U_0$ minker, påvirkes ikke admittansvektoren [7].

Utfordringene for admittansvern er de samme som for retningsvern. Det vil ved høye

egenbidrag og lave resistive bidrag bli liten forskjell på friske og jordsluttet avgang. Ver-net vil også være utsatt for feilaktig utkobling ved oscillasjoner etter feil. Det er konstruert spesifikke motoder for å utbedre disse svakhetene.

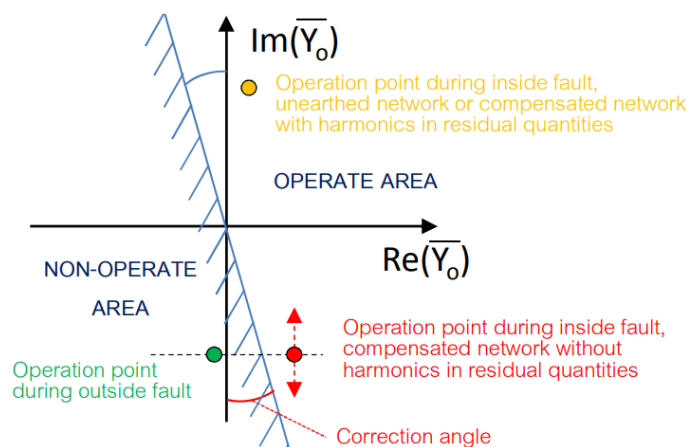
Multifrekvens admittans

Tradisjonelle jordfeilvern bruker nominell-frekvensen som utgangspunkt, og bruker kun målt strøm og spenning på denne frekvensen. En jordslutningsstrøm kan bestå av flere frekvenskomponenter. Ved å gjøre en diskre fourier transformasjon (DFT) av den målte nullpunktspenningen og reststrømmen kan også disse bidragene brukes [7, 14].

$$Y_{0sum} = Re[Y_0^1] + j * Im[Y_0^1 + \sum_{n=2}^m Y_0^n] \quad (13)$$

Likning 13 viser prinsippet for beregning ved multifrekvens admittans (MFA). Admittansen begernes ved å summere fremstilte verdier fra DFT med verdiene fra fundamental frekvensen, hvor n symboliserer harmonisk orden. En utfordring for tradisjonell jordfeilbeskyttelse i distribusjonsnettet er en økende tilstedeværelse av harmoniske komponenter [14]. Dette medfører at det totalt går en større strøm enn det som registreres av jordfeilvernet [7]. Spolene i nettet kompenserer kun for kapasitiv strøm på fundamental frekvensen. Harmoniske komponenter oppstår for eksempel av transformatorer eller spoler i metning, bruk av ulineære laster som kraftelektronikk eller jordfeiltyper som for eksempel impulerende jordfeil [14]. MFA vern bruker de harmoniske komponentene i de målte verdiene som et verktøy til å skille mellom friske og syke avganger [7, 14].

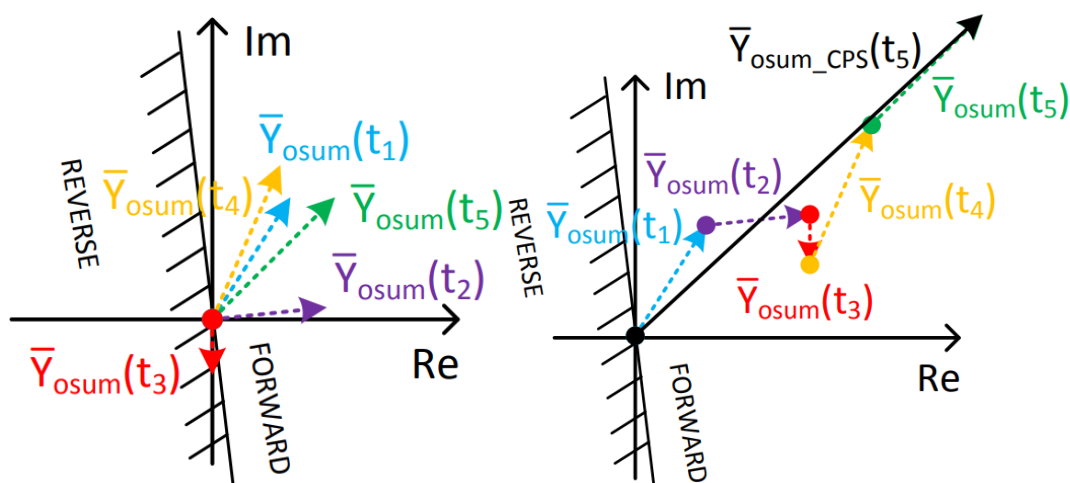
Bidrag fra kapasitanser og induktanser er direkte proporsjonale med frekvens. Strømmen fra kapasitanser øker, og strømmen fra induktanser minker. For målinger på harmoniske av høy orden vil strømmen være tilnærmet rent kapasitiv. Dette gir en god indikasjon på reststrømmens retning [7, 14]. Dette betyr at for nett med høye harmoniske komponenter er det ubetydelig for MFA hvilket egenbidrag avgangen har, og hvilken kompenseringsgrad nettet driftes med.



Figur 16: Multifrekvens admittansvern karakteristikk [14]

Karakteristikken til MFA-vern er vist i figur 16. Vinkelen mellom imaginæraksen og tripsektoren avgjøres basert på målesikkerhet fra strøm- og spenningstransformatorene [10]. En unik egenskap for MFA-vern er at samme karakteristikk brukes både for kompenserte og isolerte nett. Dette er illustrert på figur 16. Den gule prikken symboliserer en jordsluttet avgang i et isolert nett, eller i et kompensert nett med høye harmoniske komponenter. Den Røde prikken symboliserer en jordsluttet avgang på et kompensert nett uten harmoniske komponenter. Den grønne prikken illustrerer en frisk avgang [14]. Grunnen til at det måles samme vektor for isolert- og kompensert nett med harmoniske komponenter er som beskrevet, at målinger på harmoniske komponenter av høy orden kun måler den kapasitive strømmen.

Multifrekvens admittansvern løser problematikken med å skille mellom frisk og jordsluttet avgang. Svakheten med mulig feilutkobling ved oscillasjoner etter feil eksisterer fortsatt.



(a) Admittansberegninger med MFA

(b) Admittansberegninger med MFA og CPS

Figur 17: Admittansberegninger ved en pulserende feil [7]

Kumulativ vektor summasjon

For å løse den sistnevnte utfordring er det utviklet en teknikk kalt kumulativ vektorsummasjon, eller Cumulative Phasor Summing (CPS) fra litteraturen. Denne teknikken summerer den beregnede admittansverdien fra MFA-beregningen fra det tidspunktet U_0 kriteriet blir innfridd, til feilen forsvinner [7, 14].

$$Y_{0sum_{CPS}} = \sum_{i=t_{start}}^{t_{end}} Re[Y_0^1] + j \sum_{i=t_{start}}^{t_{end}} Im[Y_0^1 + \sum_{n=2}^m Y_0^n] \quad (14)$$

Likning 14 viser hvordan admittansverdien beregnes ved CPS. Med admittans som utgangspunkt vil jordslutningsmotstanden være ubetydelig. Med bruk av MFA vil det være stor forskjell på frisk og jordsluttet avgang. Med bruk av CPS vil ikke oscillasjoner ved bortfall av jordfeil være en utfordring, men et hjelpemiddel til å lokalisere feilen [7].

Figur 17a viser de beregnede admittansvektorene hvor det kun utføres en diskrete fourier analyse i et MFA-vern. Figur 17b viser hvordan CPS beregner en totalt vektor basert på MFA-kalkulasjonen. Karakteristikken på MFA- og CPS-vern er den samme, og er vist i figur 17.

Sensitiviteten på CPS-vern er definert av kriteriet U_0 . Summasjonen av de beregnede MFA-vektorene starter først når startkriteriet innfris [7, 14]. På samme måte som for rettingsvern må også kriteriet I_0 innfris, men for CPS-vern beregnes denne verdien basert på den beregnede admittansverien. Dette for at den skal være uavhengig av jordslutningsmotstanden.

$$Y_{0Stab}^1 = \frac{I_{0CPS}^1}{U_{0CPS}^1} \quad (15)$$

$$I_{0Stab}^1 = Y_{0Stab}^1 * U_{PE} = I_{0CosStab}^1 + j * I_{0SinStab}^1 \quad (16)$$

Formel 15 viser hvordan CPS brukes til å fremstille en stabil verdi for nullsystemsadmittansen. Dette gjennom den summerte verdien fra både reststrøm og nullpunktsspenning fra det tidspunktet startkriteriet U_0 ble innfridd [7, 14]. Ved å gange nullsystemsadmittansen med fasespenningen som vist i likning 16 fremstilles den strømmen som hadde gått hvis det hadde være en metallisk jordslutning. Denne strømmen er uavhengig av jordslutningsmotstanden og brukes som tripkriteriet sammen med den beregnede nullsystemsadmittansen fra likning 14. Grunnen til at både $I_{0CosStab}^1$ og $Y_{0sumCPS}$ brukes som utslagskriterier er for å ha en "belt and braces approach" [10]. For at vernet skal slå ut må altså ført startkriteriet U_0 innfris, og deretter både $Y_{0sumCPS}$ og $I_{0CosStab}^1$ kriterier innfris.

Som beskrevet i underkapittel 2.6.1 hentes den resistive strømmen fra spoleregulatoren. Denne verdien legges inn i admittansvernet som et parameter med en gitt sikkerhetsmargin. Vernet sammenlikner denne verdien med $I_{0CosStab}^1$ fra likning 16 for å avgjøre om avgangen er jordsluttet [7].

Jordslutningsmotstanden er ubetydelig for den beregnede strømmen. Sensitiviteten for CPS-vern er kun avhengig av et startkriteriet U_0 . For å finne verdien for startkriteriet U_0 avleses nullpunktsspenningen fra spoleregulatoren ved friske tilstander. Denne verdien legges inn som et parameter i admittansvernet med en gitt sikkerhetsmargin.

Et viktig parameter for at CPS-vern skal fungere optimalt er synkroniseringen med parallellmotstanden. Tripkriteriet $I_{0CosStab}^1$ beregnes basert på alle foregående verdier av I_0 og U_0 i form av I_{0CPS}^1 og U_{0CPS}^1 . Hvis CPS-vernet driftes uten forsinkelse etter at startkriteriet er oppnådd, og parallellmotstanden har en tidsforsinkelse, vil $I_{0CosStab}^1$ bruke lang tid på å bygge seg opp til den innstilte verdien [10]. Dette er fordi summen av foregående verdier for I_0 og U_0 vil forsinke prosessen. For å oppnå best mulig vernfunksjon og reaksjonstid bør denne forsinkelsen tilsvare forsinkelsen på parallellmotstanden. Det er også viktig at forsinkelsen mellom oppnådd tripkriteriet og selve utkoblingen er kortere enn den tiden parallellmotstanden ligger innkoblet for å sikre utkobling [10]. Alt i alt må tidsforsinkelsene være kortere enn kravene i forskriftene.

3 Metode

I dette kapittelet skal det redgjøres for hvilke metoder som er brukt for å innhente data. Troverdigheten til metodene brukt for å utarbeide teori- og simuleringskapittelet skal også vurderes. For å oppnå en oversiktlig presentasjon av metodene brukt gjennom arbeidet er metoden oppdelt.

Prosesen rundt simuleringene har vært omfattende. Det er brukt mye tid på å bygge en solid simuleringsmodell. Metoden for simuleringene er derfor oppdelt i simuleringskapitelet. Her forklares først hvordan simuleringsmodellen for distribusjonsnett i Trysil er oppbygget, samt forenklinger, svakheter og styrker. Videre beskrives metoden for å tilpasse modellen til sentral- og distribuertkompensering i hvert sitt kapittel. Her beskrives også tilhørende forutsetninger, forenklinger, svakheter og styrker.

For å skrive en valid og reliabel rapport må beregninger og resultater utføres med rea-

listiske forutsetninger, gjennom vitenskapelig holdbare kompetente metoder. Gjennom metodekapitlene vil det fortløpende gjøres vurderinger av metodens validitet og reliabilitet med graderingene lav, begrenset, middels, god og høy.

3.1 Litteratur

Det er gjort et betydelig arbeid for å finne vitenskapelig holdbar litteratur for å forstå og beskrive relevant teori. Blant brukte artikler er RENbladet som er respektert blant nettforvaltere. RENbladet er en rekke tekniske rapporter som gir generelle retningslinjer som samsvarer med norske forskrifter. RENbladet er derfor brukt som en viktig kilde til informasjon. Det er gjennom veileder utsendt lisens for bruk av RENbladet. Hoveddelen av brukt litteratur er tilsendt av veileder og oppdragsgiver, dette er fordi det er utfordrende å finne relevante artikler med internettsøk. All brukt litteratur er opplistet i litteraturlisten.

Distribuert spolekompensering er et tema med få publiserte artikler. Det er derfor knyttet kontakt med relevante eksterne bedrifter for informasjon, litteratur og artikler. Blant de kontaktede bedriftene har ABB vært veldig imøtekommende, og bidratt til store deler av litteraturen. ABB har tilsendt konfidensielle artikler med forbehold om at dokumentene slettes etter endt prosjektperiode. Det ble i denne anledning også inngått kontrakt om taushetserklæring mellom deltagere på gruppen og ABB. Det er gitt tillatelse til å omtale og beskrive litteraturen i rapporten. Dette kan være utfordrende for personer som ønsker å jobbe med tilsvarende prosjekt ved et senere tidspunkt. Det er derfor vedlagt kontaktinformasjon i vedlegg A. Dette kan brukes til å etterspørre nødvendige dokumenter.

3.1.1 Validitet og reliabilitet

All brukt litteratur er utarbeidet i norden. For beskrivelse av forskrifter og normer er det tatt utgangspunkt i norske utgivelser. Validiteten for brukt litteratur vurderes derfor som høy.

Litteraturen seg i mellom samsvarer godt, men det finnes unntak. Hovedsakelig gjelder det feillokasjonens betydning på lange kabelstrekk. Dette anses i enkelte artikler som teoretiske situasjoner. I noen tilfeller varierer også spenningsreferanse for jordfeilvern mellom enkelte artikler. Innen enkelte tema bidrar dette til noe redusert oversikt, men dette vurderes likevel som mindre betydelig for resultatet. Grunnet godt samsvar mellom artikler, med noen unntak, vurderes reliabilitet til litteraturen som god.

3.2 Simuleringer

For simuleringer er både Netbas, og Matlab Simulink brukt. For å hente inn nettdata fra distribusjonsnett i Trysil brukes Netbas. Det ble i denne anledning signert taushetserklæring med Eidsiva. Taushetserklæringen er nødvendig for at Eidsiva skal sikre sensitiv informasjon rundt nettet og tilhørende kunder.

Netbas tilbyr begrensede analysemuligheter. Jordfeilberegningene fra Netbas oppgir kun en absoluttverdi på strømmen. Det gis ingen indikasjon på jordslutningstrømmens komponenter. Netbas gir heller ikke tilgang til transiente forløp eller jordfeilvern-målinger. Netbas kvalifiserer derfor ikke for simuleringene som skal gjøres for å besvare problemstillingen. Netbas er derfor hovedsakelig brukt for forståelse av distribusjonsnettets oppbygning og tilhørende jordingssystemet. Viktige parametere som er hentet ut av Netbas er opplistet i vedlegg G.

Simulink har vist seg å være et godt kvalifisert simuleringsprogram. Det er konstruert en simuleringsmodell som gjenspeiler det aktuelle distribusjonsnett i Trysil. Innhentet data fra Netbas, sammen med relevant litteratur omhandlende kabeldata er implementert i simuleringsmodellen. Dette legger et godt grunnlag for reelle verdier. Forklaring av simuleringsmodellen med data er vist i vedlegg F. Simuleringsmodellen blir fortløpende brukt

til å sette teori på prøve for å danne en bedre forståelse av litteraturen.

3.2.1 Validitet og reliabilitet

Netbas gir tilgang til alle aktuelle komponenter for nettet. Ettersom Netbas er utviklet basert på norske standarder vurderes validitet som høy. Reliabiliteten avhenger av forbruker, kvalitet på innsatt nettdata, og oppdatering ved endringer på nettet er avgjørende. Reliabiliteten vurderes som god.

Simulink er et avansert og utbredt simuleringsprogram som har et stort bruksområdet. Kvaliteten på simuleringer begrenses av brukers kompetanse og erfaring i Simulink. Simulink anses å være godt kvalifisert til å utføre relevante og korrekte simuleringer, validiteten vurderes derfor som høy. Reliabiliteten avhenger på samme måte som for Netbas på bruker. Ved å utstyre modellen med korrekte parametre, og utføre simuleringer med korrekte forutsetninger oppgir simuleringene korrekte verdier. Reliabiliteten vurderes derfor også som høy.

3.3 Fagpersoner

Distribuert spolekompensering er nytt for nettførvaltere i Norge. For å diskutere faglige utfordringer er det derfor opprettet kontakt med flere eksterne fagpersoner med relevant kompetanse. Dette har vært en viktig resurs for å forstå litteraturen. Den viktigste fagpersonen har vært Ari Whalroos. Han er senior overingeniør i ABB sin vern avdeling i Finland. Ari har vært behjelpelig via e-post gjennom hele prosessen. Dette har bidratt til økt forståelse, spesielt i de mest kompliserte temaene som oscillasjoner ved bortfall av feil og admittansvern. Liste over kontaktede fagpersoner ligger i vedlegg A.

4 Simuleringer

Rapporten har gjennom kapittel 2 gitt en grundig beskrivelse av teori tilknyttet problemstillingen. I det videre arbeidet skal teorien brukes som et grunnlag for forståelse av resultater fra simuleringene. Først presenteres metoden brukt for å fremstille grunnmodellen for simuleringene med tilhørende svakheter og styrker. Simuleringene i dette kapitlet er todelt. Først gjøres simuleringer på distribusjonsnettet i Trysil slik det driftes i dag. Her vil funksjonaliteten til sentralspolen undersøkes. Det gjøres også en sikkerhetsmessig vurdering av nettet. Deretter gjøres det simuleringer ved bruk av distribuerte spoler. Her vil effekten de distribueres spolene har på nettet undersøkes. Resultatet skal brukes til å utarbeides en anbefaling for bruk av distribuerte spoler i Trysil, samt en anbefaling for generelt bruk av distribuerte spoler.

4.1 Simuleringsmodellen

I dette underkapitlet skal metoden for konstruksjonen av simuleringsmodellen beskrives. Det skal også argumenteres rundt valg av løsninger og forenklinger som er gjort. Til slutt gjøres det en endelig vurdering for resulterende validitet og reliabilitet for simuleringsmodellen.

4.1.1 Modellens oppbygning

Illustrasjon av den komplette simuleringsmodellen, og tilhørende beskrivelse finnes i vedlegg F. Hovedtransformatoren i modellen er en trefase spenningsforsyning innstilt med realistisk spenning, kortslutningseffekt og X/R forhold. Det velges spenningsforsyning fremfor transformator fordi de tre nevnte parameterne på spenningsforsyningen er tilgjengelige i Netbas, vist i vedlegg G. Dette i motsetning til de nødvendige parametrene til en transformator. Det vurderes derfor at spenningskilden representerer et mer realistisk bakgrunnsnettverk. Spenningskilden er koblet i Y_n for å hente ut nullpunktsspenningen til

sentralspolen. Fra spenningskilden forsetter strømmen til samleskinnen, og videre ut til avgangene via effektbrytere med strømtransformatorer.

Alle verdier på modellen inkludert verdier for kapasitivt egenbidrag, induktive bidrag og verdier fra retningsvern utføres av blokken "Fourier". Denne blokken oppgir toppverdien og vinkel ved fundamentalfrekvensen. Dette medfører at strømflyt og spenningsverdier er innstilt basert på toppverdi og ikke effektivverdi. Blokken brukes likevel fordi utstyr plassert i distribusjonsnett inkludert retningsvern bruker kun den målte verdien på fundamentalfrekvensen. Mer om dette i underkapittel 2.6.4. Blokken brukes også fordi den har egenskapen å presentere resultater som en vektor. Dette er ønskelig for forståelse og presentasjon av resultater fra simuleringene.

Alle avganger er utstyrt med strømtransformatorer. Disse beregner reststrømmen i avgangen ved å summere sammen strømbidraget fra hver fase. Det tas utgangspunkt i polaritetene til ABB definert i underkapittel 2.6.1 ved å ha positiv retning fra samleskinne mot linjen. Som beskrevet i underkapittel 2.6.1 er dette med utgangspunkt i negativ nullpunktspenning. Dette realiseres ved å legge en vinkelforskyvning i spenningskilden på 180° .

For modellering av avgangene i nettet er det kun de tre største avgangene som er modellert som egne avganger. Resterende fire avganger er summert sammen til en avgang. Dette for å begrense størrelsen på selve modellen, og for å senke arbeidsmengden rundt konstruksjonen av modellen. Grunnen til at det er ønskelig å modellere de største avgangene korrekt er at det er disse avgangene som er mest utsatt for feilfunksjon. Det vil også være avgangene med de mest kritiske verdiene, og avgangene med størst utslag ved endret nettkonfigurasjon. Avganger og tilhørende egenbidrag er vist i vedlegg G, hvor Fageråsen, Håvi og Jordet er modellert som egne avganger.

For å begrense arbeidet med modellen er de fire avgangene modellert til å bestå av to kabelstrekk hver. Hvert av kabelstrekene står for halvparten av den kapasitive lekkasjen til avgangen. Som det beskrives under er det kun tilgang på detaljert informasjon for to tversnitt. Kabelstrekene representerer derfor et tversnitt hver. For kabelmodelleringen brukes blokken ”Three-Phase PI Section Line”. Denne blokken setter kun opp en pi-modell, ikke flere. Dette gjør at spenningsfordelingen over denne ikke er realistisk ved lange kabelstrekk. Det finnes blokker som tar hensyn til dette, men disse øker simulerings-tiden i en så høy grad at den beskrevne blokken er valgt. Det er kun avgangene som er modellert med kabelstrekk, samleskinnen er modellet som ideell. Avgangene i modellen er innstilt med korrekt kapasitiv lekkasje. Dette gjøres ved at lengden på kabelstrekene i modellen tilpasses inntil korrekt egenbidrag registreres. Avgangene er modellert til kun å bestå av kabelstrekk, ingen linjer. Denne forenklingen er gjort for å spare tid.

For modellering av asymmetrien i nettet er det plassert en selvlaget asymmetri-blokk etter hvert kabelstrekk. Blokken består av en pi-modell per fase. Her holdes forholdet mellom parametrene konstante, men lengden på parametrene varieres. Dette for å danne realistisk asymmetri i nettet. Asymmetrien stilles ved å endre lengde på parametrene forskjellig på fasene til nullpunktet ved normal drift oppnår realistisk spenning. Asymmetrien i nettet er konstruert på denne måten ettersom ”Three-Phase PI Section Line” som brukes for å modellere kabelstrekket er symmetrisk.

Etter asymmetriblokken er det en fordelingstransformator med tilhørende last. Total last per avgang er innstilt til realistisk verdi, og fordeles på de to kabelstrekene. Fordelingstransformatoren brukes med standard innstillinger fra Simulink, der det eneste innstilte parameter er effekten. Dette for at transformatoren skal være i stand til å drifte tilhørende last. Lasten og fordelingstransformatorene er forenklet på denne måten for at omfanget på innsamling av informasjon og konstruksjon av modellen skal begrenses. Effekten på

avgangene er vist i vedlegg G

4.1.2 Teknisk data for kabler

I dette underkapittelet beskrives det hvordan de tekniske dataene for kablene i simuleringene er bestemt. For at simuleringene skal bli nøyaktige, modelleres kabelen som beskrevet i underkapittel 2.4.3 med serie- og shunt-impedanser i pluss-, minus- og nullsystem. Det er lite litteratur å finne angående serieimpedans i nullsystemet. Heller ingen av de kontaktede fagfolkene kunne redegjøre for dette.

Etter stormen Gudrun ble det gjort store forskningsprosjekter i Sverige omhandlende bruk av kabler i distribusjonsnett. Ett av resultatene er rapporten Elforsk [15]. Denne omtaler et fåtall av kabler og deres tilhørende nullsystemsverdier. Dette er den eneste dokumentasjonen som er å finne om temaet. Rapporten fra Elforsk presenterer nullsystemsimpedansene i en tabell. Denne er vist i vedlegg B. Eneste kabeltype som er beskrevet i tabellen er AXKJ, hvor denne er begrenset til tverrsnittene $95/25\text{mm}^2$ og $240/35\text{mm}^2$. Tallene for $95/25\text{mm}^2$ er oppgitt for både 12kV og 24kV, mens $240/35\text{mm}^2$ kun er oppgitt for 12kV.

Basert på opplysninger fra Netbas er den mest brukte kabelen i Trysil TSLF. De tekniske dataene for pluss- og minussystemet for TSLF stemmer i følge tekniske data fra Sintef [16] overens med verdiene fra AXKJ. Dette kan ses i C hentet fra Sintef [16] og i vedlegg B hentet fra Elforsk [15]. Det forutsettes derfor at verdier for TSLF stemmer overens med verdiene for AXKJ. For å modellere kablene så korrekt som mulig er det ønskelig å bruke de tverrsnittene det finnes utfyllende opplysninger om. Det forenkles derfor til at distribusjonsnett kun består av tverrsnittet $95/25\text{mm}^2$ og $240/35\text{mm}^2$ ettersom dette er de eneste tverrsnittene omtalt i Elforsk [15].

Som nevnt er dette $240/35\text{mm}^2$ kun omtalt for 12kV, men som vist i vedlegg B er det ikke

forskjell på nullsystemsimpedansene ved endret spenning. Serieimpedansen for pluss- og minussystemet samspiller for tversnittet $95/25\text{mm}^2$ i tabellene fra vedlegg C og B. Det forutsettes derfor tilsvarende sammenheng for $240/35\text{mm}^2$ om manglende verdier for 24kV. Disse hentes fra vedlegg C. Det er en liten desimalforskjell mellom kapasitansen på kablene i de to tabellene. Det velges å ta utgangspunkt i tallene fra Elforsk [15] for å oppretthode nøyaktig sammenheng mellom impedansene i pluss-, minus- og nullsystemet.

Det mest kritiske, og dermed viktigste strekket i simuleringsmodellen er det lengste. Dette strekket har høyest egenbidrag. Fageråsen har det lengste kabelstrekket på 11.8km. Strekket består av revolverte enledere av typen TSLF med tversnitt $240/35\text{mm}^2$ og $400/35\text{mm}^2$, men forenkles som beskrevet til kun å bestå av $240/35\text{mm}^2$.

For å få en realistisk modellering av kabelstrekket er det ønskelig med en så realistisk lengde som mulig. Ifølge tabellen fra Sintef [16] vist i vedlegg C har TSLE $400/35\text{mm}^2$ 1.25 ganger så høy kapazitiv lekkasje til jord sammenlignet med $240/35\text{mm}^2$. Ifølge vedlegg G utarbeidet fra Netbas består Fageråsens lengste strekk av 7.85km med $400/35\text{mm}^2$, og 2.95km med $240/35\text{mm}^2$. Det forenkles dermed til at den lengste avgangen i Trysil består av 12.763km med $240/35\text{mm}^2$. Beregningen er vist i likning 17.

$$L_{T_{240}} = L_{240} + 1,25L_{400} = 2,95 + 1,25 * 7,85 = 12,763\text{km} \quad (17)$$

Det tas utgangspunkt i tallene fra kabelen ”AXKJ95/25 uten jordlinje, med jordet skjerm i begge ender” fra tabellen i Elforsk [15]. Dette fordi denne ifølge Sintef [16] stemmer overens med tall for TSLE $3 \times 1 \times 95/25$ Al ved trekant-forlenging. Hvilket ifølge vedlegg G er den mest brukte kabeltypen og forlegingen. Kilometerverdien på kablene som brukes i simuleringen er presentert i tabell 2.

Tabell 2: Teknisk data for kabler i simuleringene

Kabeltype	R_1 [Ω/km]	X_1 [Ω/km]	C_1 [$\mu F/km$]	R_0 [Ω/km]	X_0 [Ω/km]	C_0 [$\mu F/km$]
TSLE 3x1x95Al/25	0.32	0.12	0.21	1.5	1.1	0.21
TSLE 3x1x240Al/35	0.125	0.11	0.29	1.2	0.8	0.29

4.1.3 Validitet og reliabilitet

I dette underkapittelet vurderes validiteten og reliabiliteten til grunnmodellen. Validiteten avgjøres basert på i hvor stor grad simuleringene gjengir virkeligheten. Reliabilitet avgjøres basert på i 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 for å tilsvare distribusjonsnettet i Trysil. Faktorer som styrker reliabiliteten er at alle relevante verdier kan hentes ut fra modellen. Ettersom Simulink er et matematisk verktøy avleses samme resultat ved gjentatte forsøk, gitt samme forutsetninger. Faktorer som svekker reliabiliteten er at ved endret nettkonfigurasjon kan brukerfeil som unøyaktige re-innstillinger av parametre medføre små avvik mellom verdiene. Grunnet den høye kapasiteten til Simulink, og den omfattende konstruksjonen av simuleringsmodellen vurderes reliabiliteten som god.

Validiteten avgjøres av i hvilke grad modellen gjenspeiler virkeligheten. Dette er avhengig av hver enkelt forenkling. Modelleringen av spenningskilden anses som et realistisk alternativ. Nullsystemsimpedansen til spenningskilden er ikke et innprogrammet parameter. Spenningsfordelingen mellom spenningskilden og sentralspolen er dermed ikke nødvendigvis realistisk. Mot slutten av arbeidet med simuleringsmodellen ble det påvist at det er brukt X/R-rate mellom sekundær- og tertiærviklingene på transformatoren, men ikke mellom primær- og tertiærviklingene. Dette svekker validiteten på simuleringene, men er likevel ikke et viktig parameter for resultat i motsetning til kortslutningsimpedansen. Spenningskilden er instilt med reelle verdier, men usikkerheten rundt nullsystemsimpe-

dansen, samt feilaktig X/R-rate medfører at validiteten vurderes som middels.

Alle verdier simuleres som toppverdier. Dette er likevel ikke problematisk ettersom dette er gjennomført for alle simuleringene. Dette resulterer imidlertid i at de simulerte verdiene i modellen avviker fra målinger i virkeligheten. At innstillinger av spenning og strømflyt i nettet gjøres basert på toppverdier medfører at validiteten rundt dette vurderes som middels.

Modelleringen av strømtransformatorene på nettet er reell. Det er usikkert om distribusjonsnettet i Trysil driftes med RENbladets- eller ABBs polaritet. Dette er ubetydelig for resultatet. Den eneste avvikskilden mellom strømverdiene i simuleringene og i virkeligheten, er at strømverdiene i simuleringene er ideelt fremstilt. Grunnet reell strømmåling vurderes validiteten som høy. Ved å forenkle nettet til å bestå av fire avgangner forsvinner muligheten til korrekte verdier på de resterende seks avgangene. Dette anses ikke som et problem ettersom det er verdier på de største avgangene som er kritiske og dermed interessante. Denne forenklingen gjør at modellen avviker fra virkeligheten, men påvirker ikke de relevante simuleringene, validiteten vurderes derfor som god.

Modelleringen av kabelstrekke er en kraftig forenkling av virkeligheten. Det at det kun er to kabelstrekke med hvert sitt tversnitt er ikke realistisk. Bruk av "Three-Phase PI Section Line" gir korrekte kapasitiv lekkasje for kabelstrekke ettersom alle tekniske data fylles inn i detalj. Spenningsfordelingen i modellen er ikke korrekt ved lange kabelstrekke hvor det er høye spenningsfall på stekket. Modellen forenkler også nettet til kun å bestå av kabler, hvor lengden på kabelstrekke stilles for å tilsvare den realistiske kapasitansen på nettet. Fordelen med denne metoden er altså at avgangene har realistisk kapasitiv lekkasje. Ulempen er at lengde og tversnitt på kabelstrekke ikke tilsvarer virkeligheten. Sammenhengen mellom kapasitiv lekkasje og serieimpedans på en kabel er

ikke den samme for forskjellige tversnitt. Dermed kan også dette forhold avvike mellom modellen og virkeligheten. Grunnet forenklingen med to kabelstrekk med to tversnitt, samt forenklet spenningsfordeling over kabelstrekket vurderes validiteten til begrenset.

Metoden for fremstilling av asymmetrien i nettet har fordelen med at denne kan innstilles til å oppnå realistisk asymmetri. Ulempen er at hele asymmetrien er plassert på enden av strekket isteden for å være jevnt fordelt over hele kabelstrekket som i virkeligheten. Modelleringen er forenklet for å spare arbeid. Metoden gir realistisk asymmetri i nettet, men en urealistisk fordeling. Validiteten vurderes derfor som middels. Modelleringen av last og fordelingstransformator i simuleringene er også kraftig forenkling fra virkeligheten. Lasten er forenklet til å være todelt og på enden av kabelstrekket, men med realistisk last. Validiteten vurderes som begrenset.

Grunnet mangelen på tidligere forskning er det gjort forenklinger for kabeltversnittene. Modellen er forenklet til kun å bestå av to tversnitt. Det tas utgangspunkt i teknisk data for kabeltypen "AXKJ", men kablen brukt i distribusjonsnettet i Trysil er TSLE. De tekniske dataene for disse kablene veldig like, hvilket gjør at dette er en realistisk forenkling. Ettersom modelleringen av det lengste strekket i Trysil er viktig for simuleringene, gjøres beregninger for at denne avgangen skal ha en så realistisk lengde som mulig. Grunnet begrenset utvalg av tversnitt er lengden på strekket matematisk fremstilt. Denne fremstillingen anses som realistisk. Grunnet godt samspill mellom de tekniske dataene på kablene, og realistisk fremstilling av det lengste strekket vurderes validiteten for tekniske data på kablen som god.

Gjennom underkapittelet er det gjort vurderinger for reliabilitet og validitet av simuleringsmodellen. Det er tydelig at grunnet begrenset tid og midler, samt noe manglende litteratur er det gjort en del forenklinger i modellen. Viktige parametre er likevel innstilt

til å tilsvare virkeligheten. Modellen er omfattende og gir en god gjenspeiling av det virkelige nettet. Grunnet forenklinger i modellen vurderes den totale validiteten som middles, men grunnet muligheten for simulering av alle relevante verdier vurderes reliabiliteten som god.

4.2 Sentralkompensering

Dette underkapittelet presenterer og analyserer resultater fra egne simuleringer i Simulink. Simuleringene presenterer nettet slik det driftes i dag, det vil si sentralkompensert. Resultatene fra simuleringene skal brukes til å finne og undersøke de største utfordringene ved sentralkompensering. Gjennom kapittelet vil funksjonaliteten til sentralspolen undersøkes. Dette inkluderer også hvordan innstillinger på nettet påvirker viktige parametre. For valg av hvilke simuleringer som presenteres prioriteres de simuleringene som vurderes til å ha en betydning for sikkerhet og funksjonalitet på nettet. Ved simuleringene på jordslutninger er jordslutningen metallisk, og kompenseringsgraden 5A overkompensert hvis ikke annet er oppgitt. Feillokasjon oppgis fortløpende.

4.2.1 Modellbeskrivelse

I dette underkapittelet skal metoden for oppbygging og innstilling fra grunnmodellen, til det sentralkompenserte nettet i Trysil beskrives. Metoden for oppbygging av grunnmodellen for simuleringene er beskrevet i underkapittel 4.1. Tilpassing av modellen til nettet slik det driftes i dag går hovedsakelig ut på å tilpasse parametrene i modellen korrekt. Dette gjøres basert på opplysninger fra både vedlegg D og vedlegg G.

For å realisere en overkompensering på 5A tilpasses spolen til det registreres en induktiv strøm på 344A. Dette fordi kapasitive bidrag i følge vedlegg D er på 339A. Som beskrevet i kapittel 4.1 utføres simuleringene basert på toppverdier på fundamentalfrekvensen. Kapittelet beskriver også at det er usikkerhet rundt nullsystemsimpedansen til spennings-

kilden. Dette kan resultere i at sentralspolen er innstilt med en annen induktans enn i virkeligheten ved samme kompenseringsgrad. Et alternativ er å tilkoble sentralspolen til en egen jordingstransformator. Disse har veldig lav nullsystemsimpedans, og dermed bedre spenningsfordeling over sentralspolen. Ettersom nullsystemsimpedansen til hovedtransformatoren i distribusjonsnett i Trysil er ukjent, anses dette som unødvendig. Det at induktansen kan avvike fra virkeligheten anses ikke som en utfordring. Det er det induktive strømbidraget som er viktig for simuleringene. Dette innstilles til å stemme med virkelige verdier.

For modellering av resistive tap i sentralspolen kobles en motstand i parallell med spolen. Denne motstanden tilpasses til å tilsvare 2.5% av bidragene fra sentralspolen. Som beskrevet i underkapittel 2.5.2 er dette et estimat for resistive tap i spoler. Parallellmotstanden er som beskrevet i underkapittel 2.6.1 tilkoblet en egen avgang på sentralspolen som gir denne muligheten til å koble denne inne og ut. I simuleringene realiseres parallellmotstanden ved å koble nok en motstand i parallell med sentralspolen, men med en tilhørende bryter i serie. Dette medfører at spenningen over motstanden er høyere enn i virkeligheten, men den dimensjoneres for å tilsvare 10A på primærsiden. Dette gjøres på grunn av begrensninger i Simulink. Forenklingen er ubetydelig ettersom primærverdien for strømmen er den samme, og styringslogikken ivaretas ved bryteren. Asymmetrien i nettet tilpasses som beskrevet i underkapittel 4.1 ved en egen asymmetriblokk. Tilpasningen i simuleringsmodellen gjøres ved et friskt nett med en overkompensering på 5A og bortkoblet parallellmotstand.

Validitet og reliabilitet

Tilpasningen av grunnmodellen til dagens drift er reell. Det er gjort få, og ubetydelige forenklinger. Det at induktansen på spolen kan avvike fra reelle verdier grunnet usikkerheten rundt nullsystemsimpedansen på spenningskilden er ubetydelig for resultatene. Modelle-

Tabell 3: Nullpunktsspenning og spolestrøm ved normal drift

Konfig. \ Abs.	U_0 [V]	I_{Spole} [A]
Resonans	1156	23.66
5A overkompensering	989	20.55
5A overkompensering, med parallellmotstand	549	11.4

ringen av resistive tap i spolen, og parallellmotstanden er også utført på en reell måte. Ettersom nettet innstilles for å tilsvare virkeligheten vurderes validiteten for modellens tilpasning til sentral kompensering som høy. Modellen inneholder alle avgjørende komponenter og målingsutstyr for å gjengi pålitelige verdier. Ettersom dette er et dataprogram vil samme verdi oppnås ved samme simuleringer flere ganger, reliabiliteten vurderes derfor også som høy.

4.2.2 Nettparameters påvirkning

I dette underkapittelet skal det studeres hvordan nettparametre som kompenseringsgrad, parallellmotstand og resonans påvirker nullpunktsspenningen og jordslutningsstrømmen i nettet. Dette for å få en bedre forståelse for hvordan disse parametrene bør innstilles.

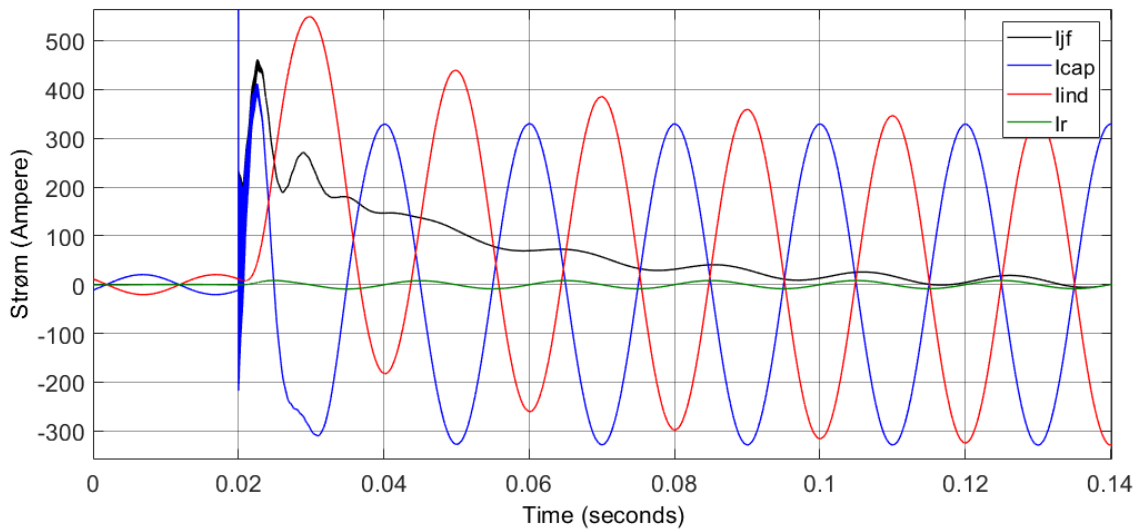
Nullpunktsspenning

Kontinuerlig strøm gjennom spolen avgjøres av spenningen i nullpunktet. Ved normale drift avgjøres denne spenningen av asymmetrien i nettet. Basert på underkapittel 2.5.2 er de resistive tapene i en spole 2.5%. Dette bidrar til å dempe nullpunktsspenningen. Tabell 3 viser nullpunktsspenningen og resulterende strøm gjennom spolen ved et friskt nett ved forskjellige nettinnstillinger.

Simuleringene viser at nullpunktsspenningen øker ved resonans. Dette skyldes som beskrevet i underkapittel 2.4.3 at ved resonans tilsvarer parallellkoblingen mellom spolen og kapasitansen i nettet en uendelig impedans. Resistive tap i parallellkoblingen demper impedansen. Bortkoblingen av parallellmotstanden øker derfor spenningen. Dette ved av skjevspenning generert av asymmetrien i nettet i større grad legge seg i nullpunktet. Ved å neglisjere de resistive tapene i spolen stiger nullpunktsspenningen ytterligere til den verdien asymmetrien i nettet tillatter, med toppverdi i fasespenningen, avhengig av nullsystemsimpedansen til spenningsforsyningen. Ved å neglisjere de resistive tapene i spolen stiger nullpunktsspenningen ved resonans til 7400V. Ved videre å neglisjere lasten stiger nullpunktsspenningen ved resonans til 8360V. Dette er ikke reelle situasjoner, men viser hvilke parametre som er avgjørende for nullpunktsspenningen ved normal drift.

De resistive bidragene senker altså nullpunktsspenningen ved normal drift. Dette er illustrert i tabell 3 hvor nullpunktsspenningen synker ved innkoblet parallellmotstand. Basert på vedlegg G tilsvarer kompenseringsgraden i Trysil 5A overkompensering. Basert på tabell 3 vil kontinuerlig innkoblet parallellmotstand senke nullpunktsspenningen, og dermed strømmen gjennom spolen. Som beskrevet i kapittel 2.6 er dette grunnen til at RENbladet [2] anbefaler kontinuerlig innkoblet parallellmotstand ved asymmetriske nett.

Simuleringene viser at den avgjørende faktoren for nullpunktsspenningen ved normal drift er asymmetrien i nettet. Ved et perfekt symmetrisk nett vil nullpunktsspenningen ved normale tilstander være konstant lik null. Utfordringen med høy asymmetri og resulterende nullpunktsspenning er som beskrevet i underkapittel 2.6 økt påkjennelse på isolasjon. Som vist i tabell 3 medfører også nullpunktsspenningen en kontinuerlig strøm, og dermed tap i spolen. Tabellen viser at tiltak for å senke nullpunktsspenningen er å drifte nettet så langt fra resonans som mulig, og drifte nettet med kontinuerlig innkoblet parallellmotstand. Som beskrevet i underkapittel 2.4.1 bør nett ved veldig høy asymmetri



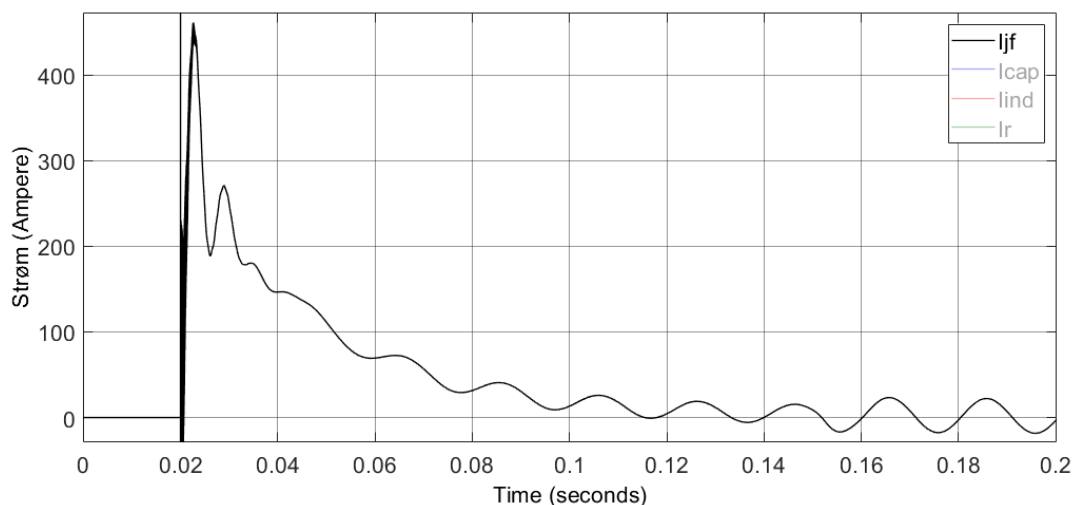
Figur 18: Jordslutningsstrøm (I_{jf}) på enden av Fageråsens lengste strekk med tilhørende kapasitive- (I_{cap}), induktive- (I_{ind}) og resistive bidrag (I_r). Feilen inntreffer etter 0.02s

utbedres ved for eksempel revolvering.

Jordslutningsstrøm

Som beskrevet i kapittel 2.4 er funksjonen til sentralspolen å kompensere for kapasitiv strøm i nettet. For simuleringer videre i dette underkapittelet oppstår jordslutningen på enden av Fageråsens lengste strekk. Dette er en avgang med store resistive bidrag hvilket er med å dempe det transiente forløpet. Dette er ønskelig for illustrasjonene. Figur 18 viser den kapasitive-, induktive-, resistive- og resulterende strømmen gjennom jordslutningen ved en jordslutning. På figuren oppstår jordslutningen etter 0.02s, hvilket er perioden på signalet. Dette tidspunktet er tilnærmet strømmens nullgjennomgang. Dette resulterer i penere kurver. Andre jordslutningstidspunkt og lokasjoner resulterer i samme stabile verdi, men ved et annet forløp.

Figur 18 viser hvordan den induktive og kapasitive strømmen er i motfase og motvirker hverandre. Den resulterende jordslutningsstrømmen er summen av de tre bidragene



Figur 19: Jordslutningsstrøm på enden av Fageråsens lengste strekk, med forsinket innkoblet parallellmotstand. Feilen inntreffer etter 0.02s, og parallellmotstanden kobles inn etter 0.15s

i nettet. Figuren viser at den stabile verdien på jordslutningsstrømmen, og den resistive strømmen er lignende. Dette skyldes at kapasitive og induktive bidrag slukker hverandre. Grunnen til at de ikke er identiske er overkompenseringen. Denne kan ses ved at den induktive strømmen er litt høyere enn den kapasitive.

Figur 19 tilhører samme simulering som figur 18. Etter 0.15s kobles parallellmotstanden inn og øker den resistive komponenten i jordslutningsstrømmen med 10A. Dette er illustrert for å vise hvordan størrelsen på jordslutningsstrømmen øker ved innkobling av motstanden. Selv om nettet er 5A overkompensert er største delen av jordslutningsstrømmen resistiv. Dette kommer fra tap i spolen og i nettet, eventuelt også parallellmotstanden. Det er gunstig å presentere reststrømmen som en vektor i det imaginære planet. Dette er beskrevet i kapittel 2.6. På denne måten fås et bedre inntrykk av størrelsen på strømmen, samt komponentene den er sammensatt av.

Tabell 4 viser strømmen gjennom en jordslutning på samleskinnen ved et nett i resonans,

Tabell 4: Jordslutningsstrøm på vektorform. Feilen er på samleskinnen

Konfig. \ Verdi	Absoluttverdi[A]	Vinkel[°]
Resonans	10.38	0.40
5A overkompensering	11.62	-25.63
5A overkompensering, med parallellmotstand	20.93	-14.00

5A overkompensert og 5A overkompensert med innkoblet parallellmotstand. De to sistnevnte situasjonene tilsvarende simuleringen i figur 19, men for å generalisere situasjon mer er feilen på samleskinnen. Tabellen viser at det ikke er særlig påvirkning i absoluttverdien på jordstrømmen ved overgangen fra et nett i resonans til 5A overkompensert. Dette skyldes at den resistive strømmen fra sentralspolen og bakgrunnsnettet er såpass stor at 5A induktiv strøm gir lite utslag ved vektorsummasjonen. Vinkelen på jordslutningsstrømmen blir derimot i større grad påvirket. Dette er ubetydelig for jordslutningen, men viser at den består av en induktiv komponent.

Som beskrevet i underkapittel 2.3 er det viktig at jordslutningsstrømmen ikke overstiger 35A for at lysbuer skal slukke. Tabell 4 viser at ved å tilkoble parallellmotstanden til et allerede overkompensert nett øker amplituden på signalet betraktelig. Det er derfor generelt sett viktig å bruke forsinkelse på parallellmotstanden, eventuell ON-OFF-ON logikken ved kontinuerlig tilkobling for å sikre selvslukking av kortvarige jordfeil, selv om dette ikke er en utfordring for Trysil med en strøm på 20.93A. Innkobling av parallellmotstanden senker også vinkelen på strømmen. Dette er fordi den nå i større grad består av resistiv strøm.

Basert på vedlegg G driftes nettet i Trysil med global, og tildels gjennomgående jord.

Det kan derfor forutsettes en lav overgangsmotstand. Tabell 4 viser at det ved en kortvarig jordfeil vil gå en jordslutningsstrøm på 11.62A. På samme måte vil det gå en jordslutningsstrøm på 20.93A ved innkoblet parallellmotstand. Tallverdi for overgangsmotstanden i Trysil er ukjent, men basert på de lave jordslutningsstrømmene er trolig berøringspenningen veldig lav.

Oppsummering

For å senke kontinuerlig påkjenning av isolasjon, og tap i sentralspolen er det ønskelig å drifte nettet med en så lav nullpunktsspenning som mulig. Nullpunktsspenningen ved normale tilstander oppstår som en konsekvens av asymmetrien i nettet. Faktorer som senker nullpunktsspenningen er resistiv demping og over- eller underkompensering. Det anbefales derfor å drifte nettet med kontinuerlig innkoblet parallellmotstand, og ved over- eller underkompensering.

Store distribusjonsnett som Trysil har høye resistive tap. En kompenseringsgrad på $\pm 5A$ gir dermed lite utslag på jordslutningsstrømmen, og påvirker dermed berøringspenningen lite. Innkoblet parallellmotstand vil derimot øke jordslutningsstrømmen betraktelig. Det anbefales derfor å bruke ON-OFF-ON logikken for å sikre selvslukking av lysbuer ved kortvarige feil. Ved høy asymmetri bør dette utbedres ved for eksempel revolvering. Berøringspenningen på distribusjonsnettet i Trysil er trolig veldig lav ettersom nettet driftes med globalt jordingssystem, og har lav jordslutningsstrøm.

Drøfting

Simuleringene stemmer godt overens med teorien. Asymmetrien avgjør nullpunktsspenningen, og ved å drifte nettet i resonans øker som beskrevet i underkapittel 2.4.1 spenningen i nullpunktet. Simuleringene viser at fra et driftsmessig perspektiv bør nettet driftes med kontinuerlig innkoblet parallellmotstand, og med en høy kompenseringsgrad. Dette senker kontinuerlig påkjenning av isolasjon, og tap i spolen. Fra et driftsmessig perspektiv

begrenses kompenseringsgraden av maksimal jordslutningsstrøm på 35A. Fra et person-sikkerhet perspektiv bør jordslutningsstrømmen være så lav som mulig for å begrense berøringsspenningen. Det anbefales derfor å begrense jordslutningsstrømmen ved å drifte nettet med en begrenset kompenseringsgrad, og styre parallellmotstanden med ON-OFF-ON logikken.

De transiente forløpene i dette underkapittelet er ment som en illustrasjon på komponentene til en jordslutningsstrøm. Figurene er presentert for å vise hvordan kapasitiv og induktiv strøm motvirker hverandre. Dette er grunnkonseptet for spolekompensering beskrevet i underkapittel 2.4. Figurene er også presentert for å vise hvordan den resistive strømmen påvirker jordslutningsstrømmen med og uten parallellmotstand. Figurene kan ikke brukes som en generalisering av transiente forløp ettersom simuleringene er gjort med den konfigurasjonen som gir det korteste forløpet, med innkoblet parallellmotstand og på enden av Fageråsens lengste strekk.

Simuleringene viser at ved en jordslutning på samleskinnen, uten tilkoblet parallellmotstand, vil forløpet bruke lengre en 2s til å dø ut. Dette er lengre enn jordfeilvernets forsinkelse, og skyldes et likestrøms bidrag som bruker lang tid på å dø ut. Denne strømmen registreres ikke fordi retningsvern kun bruker målinger relatert til fundamentalfrekvensen. Hvis denne simuleringen hadde vært reelle, ville ikke kortvarige jordfeil slukke feil på smaleskinnen. Det er logisk av forløpet er lengre før kabelstrekket, enn etter grunnnet demping i kablene. I simuleringene er samleskinnen modellert som ideell. Det gjøres derfor ikke videre kommentarer på dette grunnet usikkerhet rundt avgjørende parameter.

4.2.3 Feillokasjon

I dette underkapittelet skal påvirkningen av feillokasjon undersøkes, med hensyn på jordslutningsstrøm og differanse i nullsystemspenningen. Dette er et omstridt tema hvor lit-

teratur oppgir forskjellige beskrivelser på feillokasjonens betydning. Med utgangspunkt i presentert teori i underkapittel 2.4.3 og 2.4.4 vil kabelstekk lengre enn 20km påvirke spenningsfordelingen i nullsystemet. Dette resulterer i en jordslutningsstrøm avhengig av feillokasjon. Det vil gjennom underkapittelet gjøres simuleringer på dette for nettet i Trysil. Det gjøres også simuleringer ved ekstreme situasjoner for å undersøke forhold ved lange kabelstrekk.

Nullsystemspenning og nullpunktsspenning er uttrykk som brukes mye om hverandre. Artikler som skriver at feillokasjon er ubetydelig påstår med det at nullsystemspenningen er den samme over hele kabelstrekket uavhengig av kabellengde. Figur 8a demonstrerer forskjellen på spenningene. U_{0n} er nullsystemspenningen ved hovedtransformatoren, altså spenningen i nullpunktet over sentralspolen. U_{0end} er nullsystemspenningen ved feillokasjonen.

Det gjøres simuleringer på distribusjonsnettet i Trysil for å undersøke feillokasjonens betydning. Simuleringen er vist i tabell 5 hvor det lengste strekket på Fageråsen er strekket med variabel lengde. Under simuleringene er resten av nettet uforandret. Sentralspolen tilpasses fortløpende for å holde en konstant overkompensering på 5A for jordslutning på samleskinnen. For å undersøke påvirkningen av serieimpedans i nullsystemet hentes det ut relevante verdier ved jordslutning på samleskinnen og på enden av kabelstrekket.

For simuleringene på så lange kabelstrekk som dette er det gunstig å bruke komponenten "Distributed Parameters Line" fremfor "Three-Phase PI Section Line". Dette fordi førstnevnte setter opp flere pi-modeller i serie, mens sistnevnte kun setter opp en. Endringen resulterte i et lite avvik mellom presentert jordslutningsstrøm i dette underkapittelet og de andre. Det velges likevel å bruke denne komponenten for at resultatene i dette underkapittelet skal være gyldige for lange kabelstrekk.

Tabell 5: Nullsystemspenning og jordslutningsstrøm ved variabel feillokasjon. Bakgrunnsnettet holdes konstant, og simuleringer utføres på Fageråsens lengste strekk. Nettet holdes 5A overkompensert for samleskinnefeil.

L. [km]	Samleskinne			Enden av kabel		
	$ U_{0n} $ [kV]	$ U_{0end} $ [kV]	I_{jf} [A]	$ U_{0n} $ [kV]	$ U_{0end} $ [kV]	I_{jf} [A]
12.743	16.57	16.92	$11,93 \angle -27,0^\circ$	16.08	16.49	$11,50 \angle -26,6^\circ$
50	16.53	18.44	$42,36 \angle -6,7^\circ$	13.55	15.76	$31,93 \angle 1,6^\circ$
125	16.43	20.99	$462,3 \angle -0,6^\circ$	10.03	15.18	$233,9 \angle 59,8^\circ$
160	16.62	16.93	$546,3 \angle -0,5^\circ$	11.62	12.44	$382,9 \angle 89,88^\circ$
200	16.81	12.16	$481,1 \angle -0,6^\circ$	7.69	10.25	$308,3 \angle 114,9^\circ$

Tabell 5 viser resultatet fra simuleringen. Resultatet viser tydelig at feillokasjon har stor betydning ved lange kabelstrekk. Tabellen viser at for den faktiske situasjonen i Trysil, hvor det lengste strekket er på 12.743km er det begrenset, men merkbar forskjell ved endret feillokasjon. Dette ses på at vinkelen på strømmen stiger med $0,4^\circ$ for feil på enden av kabelen. Dette tyder på at bidraget fra spolen er noe mindre for denne konfigurasjonen. Dette er et resultat av potensialforskjeller i nullsystemet grunnet serieimpedansen.

Forklaringen på forskjellen mellom nullsystemspenningen før og etter kabelen er spenningsfallet i pluss- og minussystemet. Spenningsfallet i kablene senker spenningen over spolen og kapasitansen til nettet, hvilket senker den totale jordslutningsstrømmen. Simuleringen viser altså at for korte kabelstrekk som i Trysil har serieimpedansen i nullsystemet liten betydning, mens spenningsfallet i pluss- og minussystemet er tydeligere.

Simuleringen fra tabell 5 viser at for veldig lange kabelstrekk vil serieimpedansen i nullsystemet ha høy betydning. Dette kan ses på at vinkelen på jordslutningsstrømmen etter kabelstrekket er høyere en vinkelen før kabelen. Årsaken til dette er som demonstrert i

figur 8a at spenningen over kapasitansen ved feillokasjonen U_{0end} er høyere enn spenningen over sentralspolen U_{0n} . Dette medfører høyere kapasitiv strøm enn induktiv. Dermed påvirkes kompenseringsgraden ved endret feillokasjon. Det vil si at forholdet mellom kapasitiv og induktiv strøm er avhengig av hvor på kabelstrekket feilen skjer.

Et annet viktig resultat fra simuleringer er at den resistive strømmen er sterk påvirket av feillokasjon. Dette kan sees spesielt på de langste kabelstrekene i tabell 5. En forklaring på dette kan være spenningsfall i pluss- og minussystemet. Dette resulterer i lavere spenning i nullsystemet, og dermed lavere spenningsfall over serieimpedansen. Økende spenningsfall i pluss- og minussystemet kan også sees på tabellen ved at spenningen på enden av kabelen synker ved økende lengde.

Oppsummering

Feillokasjon har betydning for jordslutningsstrømmen. Spenningsdifferansen mellom U_{0n} og U_{0end} skyldes serieimpedansen i nullsystemet. Spenningsforskjellen mellom U_{0end} ved økende kabellengde skyldes serieimpedansen i pluss- og minussystemet. Spenningsdifferansen mellom U_{0n} og U_{0end} medfører at kompenseringsgraden er avhengig av feillokasjon. Dette resulterer i at sentralspoler på nett med veldig lange avganger ikke kan innstilles for samme kompensering for alle feillokasjoner.

Simuleringene viser at for nettet i Trysil hvor det lengste kabelstrekket er 12.743km vil feillokasjon ha begrenset betydning. Vinkeldifferansen på jordslutningsstrømmen tyder på at serieimpedansen i nullsystemet har liten betydning. Spenningsdifferansen for feil før og etter kabelstrekket tyder på at serieimpedansen i pluss- og minussystemet har noe mer betydning. Simuleringen viser at for kabelstrekk på 50km vil serieimpedansen i nullsystemet ha stor betydning for kompenseringsgraden og feilstrømmene. Jordslutningsstrømmen påvirkes av feillokasjon med en strømendring på 10.43A. Det kan derfor konkluderes

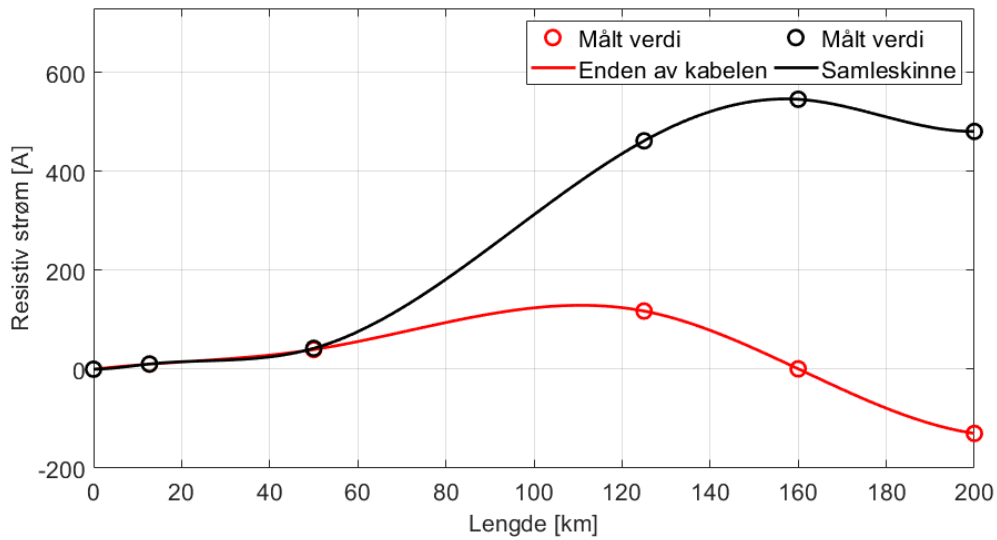
med at for reelle situasjoner med kabelstrek langt under 50km vil ikke feillokasjon være kritisk. Selv om kabelstrek på over 50km hovedsakelig er teoretiske situasjoner har dette underkapittelet kartlagt serieimpedansens påvirkning. Resultatene viser også at endret kompenseringsgrad ved lange kabelstrek er liten i forhold til de store økningene i de resistive bidragene.

Drøfting

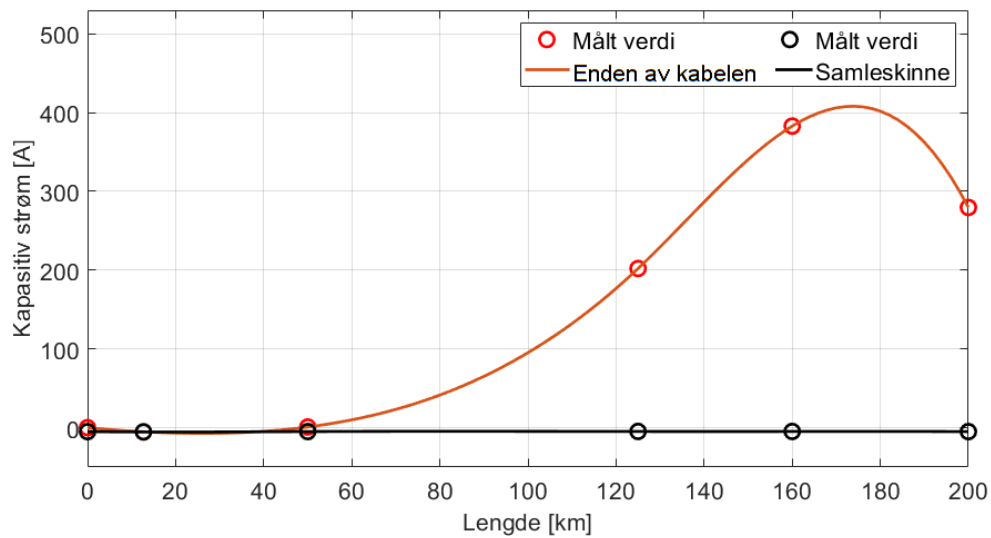
Nullsystemspenningen på samleskinnen er spenningen over spolen. Dette betyr at spenningsfallet over spenningskilden i nullsystemet ikke er medregnet. Samleskinnespenningen kan derfor være litt lavere enn den egentlige verdien. Det viktigste er forholdet mellom spenningene ved endrede feillokasjoner, dette forholdet er intakt.

Strømmen ved økende kabellengde kan være vanskelig å forutsi og forstå. Resultatene stemmer tildels overens med teorien beskrevet i underkapittel 2.4.4, men polaritetene er forskjellige. For sammenligning av resultatene tas det utgangspunkt i figur 9 fra teorigapittelet. For på best mulig måte å forstå resultatene og sammenhengen med teorien presenteres verdiene i tilsvarende format som i teorien i figur 20. Kommende beskrivelse av endret strømretning ved økende kabellengde gjøres basert på funn fra simuleringene, og er verken støttet, eller motsagt av litteratur.

Figur 20 viser at strømkurvene fra simuleringene er i samme kategori som kurvene fra figur 9 i teorien. Figuren fra teorien har motsatt strømpolaritet på den resistive strømmen ved feil på enden av kabelen, og den kapasitive strømflyten ved samleskinnefeil. Figur 9 fra teorien tar utgangspunkt i strømpolaritetene fra figur 8. Figur 8 viser at strømretningen bytter ved overgangen fra jordslutning på samleskinnen til jordslutning på enden av kabelen. Dette forklarer hvorfor den resistive strømkurven fra teorien er motsatt i forhold til simuleringene i dette underkapittelet. Med dette som utgangspunkt burde også den kapasitive



(a) Resistiv strømflyt som en funksjon av kabellengde



(b) Kapasitiv strømflyt som en funksjon av kabellengde

Figur 20: Jordslutningsstrøm som en funksjon av kabellengde, basert på tabell 5

tive kurven vært snudd. Simuleringene i dette underkapittelet bekrefter at strømretningen snur ved endret feillokasjon, gjennom at spenningen på enden av strekket er høyest for begge feillokasjonene. Dermed må U_{0end} være summen av U_{0n} og spenningsfall over serieimpedansene. Simuleringene viser at når kabelstrekene overstiger en lengde på 160km stemmer polaritetene vist i figur 8.

Teorien presenterer den kapasitive strømmen til å være positiv ved en samleskinne-jordslutning. Dette kan oppleves forvirrende, siden simuleringene i dette underkapittelet ved figur 20b viser at ved en konstant overkompensering på 5A vil den kapasitive strømflyten gjennom jordslutningen være -5A. Sannsynligvis er årsaken til den positive kapasitive strømmen i figur 9 at spenningsfallet over spolen er motsatt rettet i forhold til spenningsreferansen. Dette medfører at spenningsfallet over spolen måles som negativt, altså kapasitivt. Dette samsvarer likevel ikke med resultatene i dette underkapittelet.

Figur 9 fra teorien viser at den resistive strømmen er negativ for jordfeil på enden av jordslutningen. Dette er omvendt av resultatene fra simuleringene i dette underkapittelet. Figur 9 fra teorien tar utgangspunkt i 5% overkompensering, ikke 5A slik som simuleringene i dette underkapittelet. For forståelse og diskusjon rundt simuleringen fra figur 9 er både forfatter, og veileder til forfatter kontaktet. Ingen husket stoffet, og ville derfor ikke argumentere for sine resultater. Resultatene er heller ikke forklart i artikkelen [8].

Som en argumentasjon rundt egne simuleringer gis det en matematisk tolkning av resultatene med utgangspunkt i figur 8. Som beskrevet er polaritetene på denne figuren for lange kabelstrekk, og vil for simuleringene i dette kapittelet først gjelde for kabelstrekk lengre en 160km. Det tas utgangspunkt i motsatt polaritet i forhold til figurene, altså strømretningen frem til 160km. Først gis det en beskrivelse av feil på enden av kabelstrekket. Årsaken til at den resistive strømmen snur, og blir negativ, er fordi spenningsfallet over serieimpe-

dansene i nullsystemet overstiger spenningen U_{0end} . Dette kan bevises matematisk med likning 18, hvor ΔU_{0n} representerer spenningsfallet over den n 'te serieimpedansen i nullsystemet. Likningen tar utgangspunkt i KVL og at strømmen beveger seg fra pluss til minus gjennom referansen.

$$U_{0n} = U_{0end} - \Delta U_{01} - \Delta U_{02} - \dots - \Delta U_{0n} \quad (18)$$

Likning 18 viser at når spenningsfallet fra serieimpedansen stiger, synker U_{0n} . Det vil si at når spenningsfallene i nullsystemet overstiger U_{0end} vil spenningen U_{0n} , altså referansen for simuleringen bli negativ. Når referansen er negativ registreres strømmen som å flyte i motsatt retning. Dette medfører at polariteten definert i figur 8a vil stemme for så lange kabelstrek av spenningsfallet i nullsystemet overstiger spenningen på enden av strekket. For å undersøke for hvilken kabellengde spenningsfall over serieimpedansen i nullsystemet overstiger U_{0end} simuleres spenningen før og etter kabelstrekket, for deretter å undersøke om spenningsdifferansen overstiger U_{0end} . Spenningen på enden av strekket fremstilles med ideelt utstyr, mens spenningen U_{0n} er spenningen over spolen. For disse simuleringene gjøres det derfor simuleringer med ideelt utstyr for begge lokasjonene. For 160km simuleres en differanse på $9,53 \angle -70,14^\circ [kV]$, mens for 200km simuleres en differanse på $13,88 \angle -46,76^\circ [kV]$. Basert på verdiene for U_{0end} i tabell 5 kan det sees at for 160km er spenningsdifferansen mindre en U_{0end} , mens for 200km er den større.

En tilsvarende argumentasjon kan føres for samleskinne feil. Tabell 5 viser at U_{0n} er lavere enn U_{0end} , men snur etter en kabellengde på 200km. Dette tyder på at strømmen beveger seg fra minus til pluss gjennom spenningsreferansen. Dette fordi KVL i dette tilfellet tilsier at spenningen U_{0end} er summen av spenningsfall fra serieimpedansen og U_{0n} . Dette kan også være en forklaring på at U_{0end} oppnår en høyere spenning enn fasespenningen for 50- og 125km. U_{0n} vil ved denne polariteten være U_{0end} minus spenningsfall fra serieimpedansen. Det vil si at når spenningsfallet over serieimpedansen overstiger U_{0end} , blir referansen negativ. Etter dette registreres strømmen som negativ. For simuleringene

skjer dette liker etter 160km, dette kan ses på at U_{0n} overstiger U_{0end} for 200km i tabell 5. Forklaringen på dette kan være at strømretningen er snudd, og KVL tilsier at U_{0n} nå er lik summen av spenningsfall over serieimpedansen og U_{0end} .

Det kan ses på figur 20a at den resistive strømmen for feil på enden av kabelstrekket er null like etter 160km. I det område hvor spenningsfallet fra serieimpedansen i nullsystemet overstiger spenningen på enden av kabelstrekket. Det kan også ses på figuren at den resistive strømmen ved samleskinnefeil ved dette tidspunktet begynner å minke. På samme måte som den kapasitive strømmen ved feil på enden av kabelen i figur 20b begynner å minke. Dette tyder på at når kabellengden overstiger lengden som gir polaritetsendring i referansen registreres kapasitive og resistive bidrag som negative. Hvilket medfører at kurvene snur. Denne effekten kan også ses på kurvene fra teorien i figur 9.

En annen faktor som kan være med å påvirke resultatene er at serieimpedansen ikke er rent resistiv, men inneholder også en induktiv komponent. Det antas at den induktive komponenten bidrar til å avgjøre vinkelen på spenningsdifferansen over kabelstrekket. Simuleringene i dette underkapittelet er ikke gjort med eksakt samme forutsetninger som simuleringene i teorien. Simuleringene i dette underkapittelet er gjort med et bakgrunnsnett, last på avganger og med asymmetri på nettet. Figur 9 ble gjort på et nett bestående av en kabel uten last eller asymmetri. Dette er ikke faktorer som forklarer polaritetsforskjellene, men som kan bidra til å forklare hvorfor kurvene er forskjøvet i forhold til hverandre.

Kabelstekk over 50km i et distribusjonsnett er teoretisk, og vil veldig sjelden forekomme i virkeligheten. Det er likevel valgt å simulere kabelstekk opp til 200km kun for å vise effekten som forekommer når spenningsfallet over serieimpedansen i nullsystemet overstiger spenningen på enden av strekket. Simuleringene i dette underkapittelet har vist at selv for kabelstekk på 12.7km kan det registreres en liten forskjell ved endret feillokasjon.

Utsagnet fra RENbladet [2] om at feillokasjon er ubetydelig er dermed feil.

4.2.4 Nettets påvirkning av endret nettkonfigurasjon

I dette underkapittelet skal effekten av endret nettkonfigurasjon undersøkes. Det skal også gjøres simuleringer for bortfall av jordfeil, og utkobling av jordsluttede avganger. Dette gjøres for å studere kritiske sikkerhetsmessige situasjoner for distribusjonsnettet i Trysil.

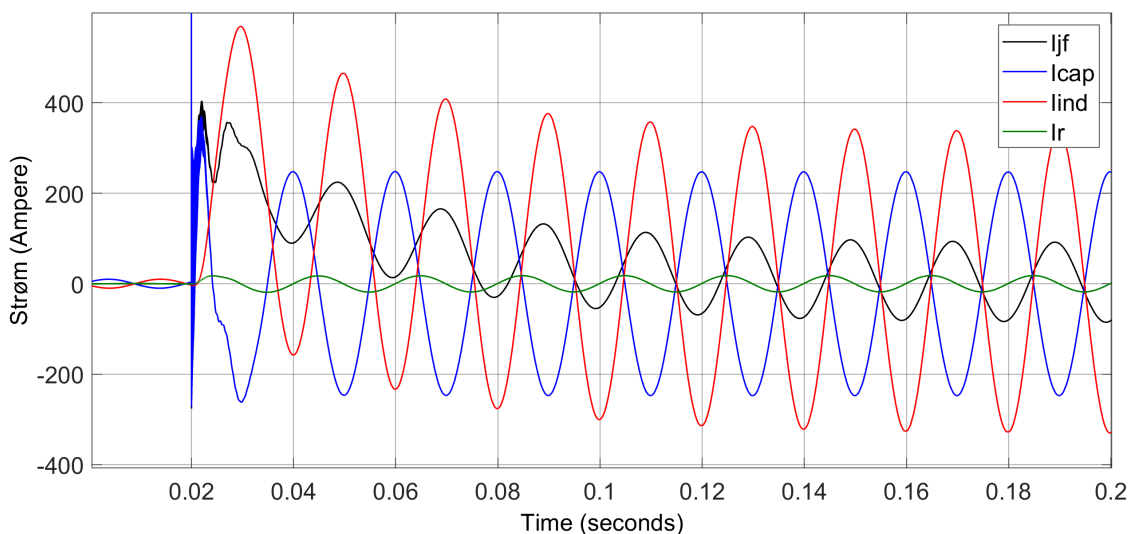
Feilstrømmer ved endret nettkonfigurasjon

Ved inn- og utkoblinger av avganger endres den kapasitive flyten i nettet. Som beskrevet i underkapittel 2.4.1 vil nettet ha redusert drifts- og personsikkerhet i perioden fra inn- eller utkoblinger av avganger, til sentralspolen er innstilt til gjeldende konfigurasjon. Dette på grunn av økt jordslutningsstrøm og tilhørende utfordringer med slukking av lysbuer og økt berøringspenninger. Dette er demonstrert i figur 21 hvor Fageråsen er bortkoblet, mens sentralspolen fortsatt er innstilt for å kompensere for normal konfigurasjon. For å få en oversiktlig presentasjon av forløpet utføres simuleringen med innkoblet parallellmotstand, og feillokasjonen er på enden av det ene kabelstrekket til Håvi.

Simuleringen fra figur 21 viser at jordslutningsstrømmen stabiliserer seg på rundt 90A. Dette stemmer overens med tabell 4 for nett med tilkoblet parallellmotstand. Ved å legge til egenbidraget til Fageråsen på 87A fås 94A. Den resulterende jordslutningsstrømmen er hovedsakelig induktiv. Dette kan sees både på at den induktive kurven i figuren er større enn den kapasitive, og at den resulterende jordslutningsstrømmen følger den induktive. Ved en jordslutningsstrøm over 35A vil ikke en eventuell lysbue slukkes og berøringspenningen øker. Det er derfor viktig å ha en automatisk spoleregulator som hurtig kan tilpasse induktansen på spolen.

Oscillasjoner etter bortfall av jordslutning

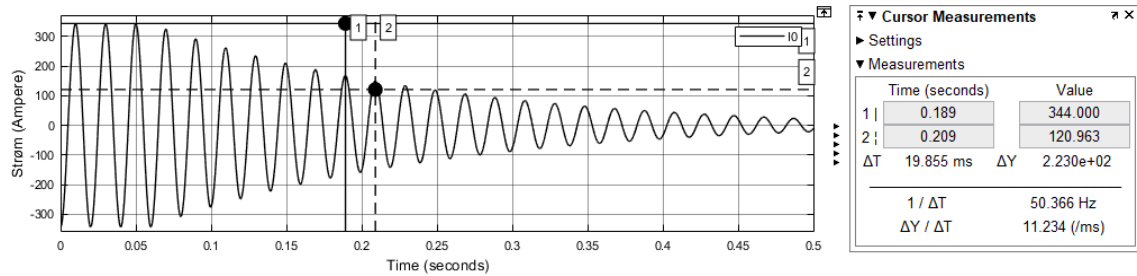
Etter en jordfeil vil spenningen og strømmen i nullsystemet gå tilbake til normale verdi-



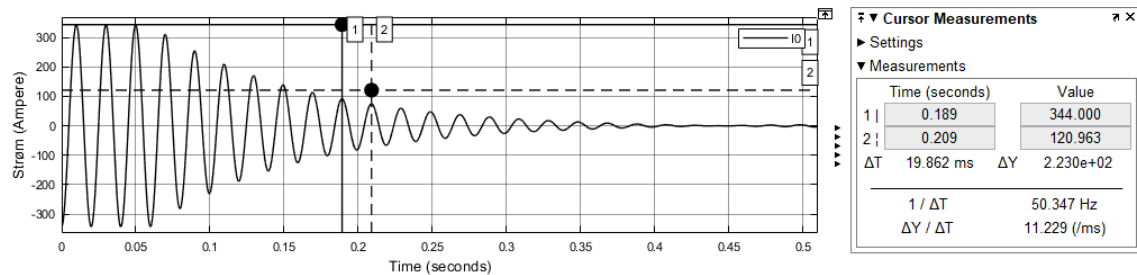
Figur 21: Jordslutningsstrøm på overkompensert nett. Feilen oppstår på enden av det ene kabelstrekket til Håvi etter 0.02s. Fageråsen er utkoblet, mens sentralspolen er innstilt for normal konfigurasjon

er. Dette skjer som beskrevet i underkapittel 2.6.2 gjennom oscillasjoner. En utfordring tilknyttet utkobling av jordsluttet avgang er at etterfølgende oscillasjoner vil ha en annen frekvens enn nettfrekvensen. Det gjøres derfor simuleringer for å undersøke oscillasjonene på distribusjonsnettet i Trysil.

For beregninger av forventet resultat brukes likning 7 for oscillasjonsfrekvens, og likning 9 for demping. En overkompensering på 5A og resistive bidrag på 10.48A medfører en svingfrekvens på 50.362Hz, og en tidskonstant på 0.206s. Resistivt bidrag hentes fra tabell 4 og er den reelle delen av jordslutningsstrømmen ved 5A overkompensering. Resultatet fra simuleringen er vist i figur 22 hvor det registreres en frekvens på 50.366Hz. Feilen forsvinner etter 0.06s, tidskonstanten er dermed utløpt etter 0.266s. I dette mellomrommet går strømverdien fra 344A til 121A, hvilket tilsvarer omlag 64.8%. Perfekte målinger hadde gitt 63,2% ($1 - e^{-1}$).



Figur 22: Oscillasjoner ved selvslukking av jordfeil uten innkoblet parallellmotstand, feilen forsvinner etter 0.06s.



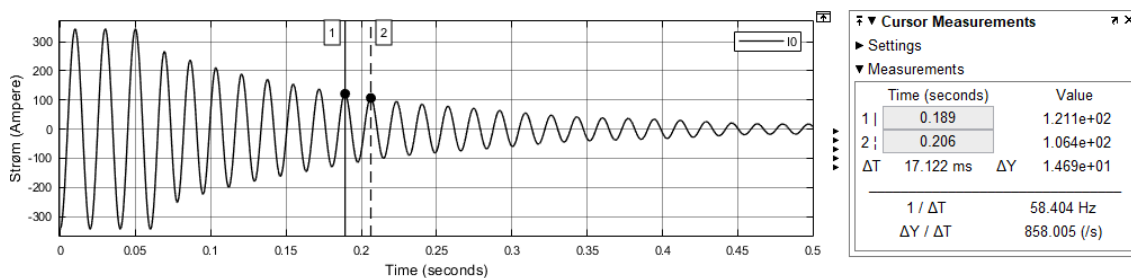
Figur 23: Oscillasjoner ved selvslukking av jordfeil med innkoblet parallellmotstand, feilen forsvinner etter 0.06s.

Figur 23 viser oscillasjonene med innkoblet parallellmotstand. Her registreres en svingfrekvens på 50.35Hz. Dette samsvarer med likning 7. Tidskonstanten er i følge likning 9 0.105s. Dette tilsvarer 0.165s på figuren. Det kan også sees at denne samsvarer.

Simuleringene viser at når en jordfeil forsvinner uten at avganger bortkobles, vil svingfrekvensen på etterfølgende oscillasjoner være tilnærmet nominellfrekvens. Kompenseringsgraden er avgjørende faktor for svingfrekvensen på nett ved høye kapasitive bidrag. Simuleringene viser at selv ved å doble resistive bidrag er det liten påvirkning på svingfrekvensen. Dette skyldes den høye kapasitive lekkasjen i nettet. Simuleringene viser også at det er gunstig for varigheten på svinging med høye resistive bidrag. Ettersom simuleringene i figur 22 tilsvarer verdiene i distribusjonsnettet i Trysil kan det konkluderes med at ved kortvarige lavohmige jordfeil vil det oppstå oscillasjoner med en frekvens på 50.366Hz som vil dø helt ut i løpet av 1.03s (5τ).

Ved en langvarig jordfeil hvor avganger må bortkobles vil svingfrekvensen på oscillasjonene overstige nettfrekvensen. Dette kan sees på likning 7. Figur 24 viser etterfølgende oscillasjoner i nullsystemstrømmen ved bortkobling av Fageråsen. Oscillasjonsfrekvensen er høyere enn nettfrekvensen grunnet overkompenseringen, og ville vært lavere ved underkompensering. Tidskonstanten blir også lavere ved utkobling av avganger ettersom den kapasitive lekkasjen minker. Økt frekvens medfører at induktiv strøm minker og kapasitiv strøm øker. Dette fordi reaktansene er proporsjonal med frekvensen. Endret reaktiv strømflyt er ikke et problem ved bruk av sektorvern med utgangspunkt i resistiv strøm, som på Trysil.

Frekvensen på svingningene ved bortkobling av Fageråsen registreres på figur 24 til



Figur 24: Etterfølgende oscillasjoner ved bortkobling av jordsluttet avgang Fageråsen, jordfeilen forsvinner etter 0.06s.

58.4Hz. Ved å bruke likning 7 fås uttrykket under.

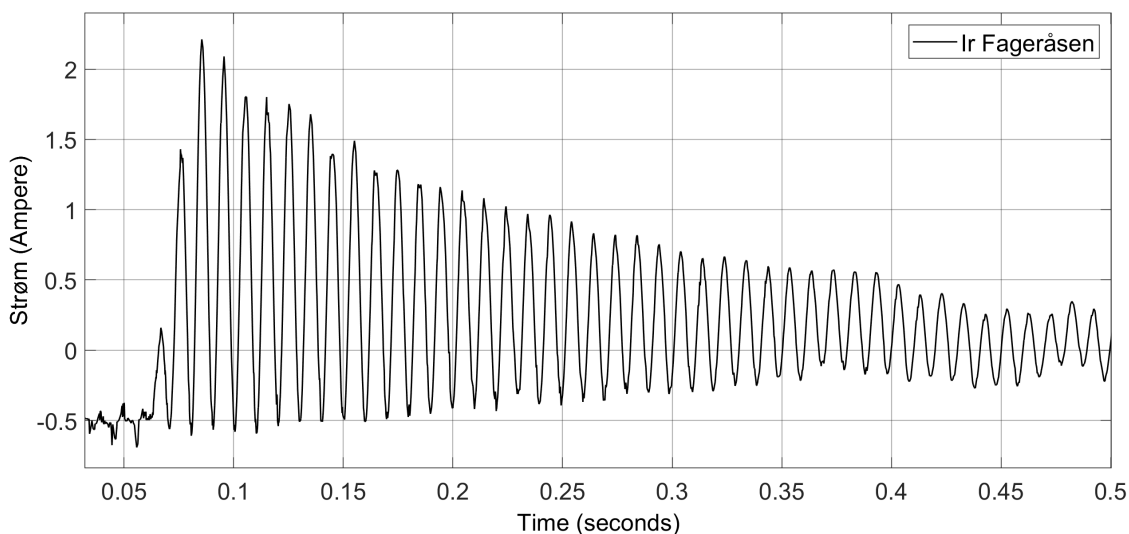
$$f_p = 50 \sqrt{\frac{344}{339 - 87} - \frac{10,48^2}{4(339 - 87)^2}} = 58,41 Hz$$

Dette er en reell situasjon som kan oppstå på nettet i Trysil. Ettersom jordfeilvernene i Trysil bruker den resistive strømflyten som utgangspunkt for feillokalisering, vil ikke en frekvensendring være av betydning.

Transient resistiv polaritetsendring

Som beskrevet i underkapittel 2.6.2 vil kapasitansene og induktansene i nettet lades opp under en jordfeil. Ved bortfall av feilen utlades dermed en aktiv effekt. Hvis ikke tilhørende linje forbruker denne effekten vil jordfeilvern på avgangen måle dette som aktiv strøm i feil retning. Dette kan medføre feilaktig utkobling. Avganger med høye kapasitive bidrag og distribuerte spoler er ekstra utsatt. Det gjøres derfor simuleringer på den største avgangen, Fageråsen. Likning 8 viser hvilke faktorer som er avgjørende for størrelsen på den transiente resistive strømflyten.

Beregningen under er basert på likning 8 og viser middelverdien for den resistive strømmen i øyeblikket feilen forsvinner. Dette er den teoretiske verdien retningsvernet på Fageråsen måler hver gang en kortvarig jordfeil på nettet forsvinner. Den totale resistive



Figur 25: Resistive oscillasjoner på Fageråsen ved bortfall av kortvarig samlesinne jordfeil utenfor avgangen. Parallellmotstand er ikke tilkoblet, og feilen forsvinner ved 0.06s

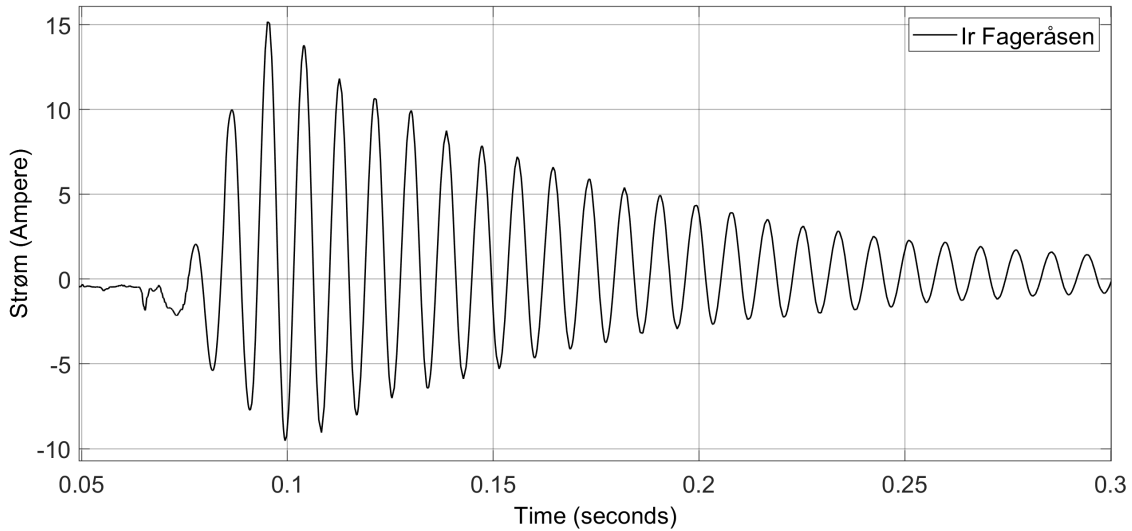
feilstrømmen ved en jordslutning hentes fra tabell 4, og den resistive strømmen fra Fageråsen hentes i simuleringene til å være 0.5A.

$$I_R = 10,48 * \frac{87}{344 + 339} - 0,5 = 1,335 - 0,5 = 0,835A$$

Den beregnede middelverdien på den resistive strømmen i øyeblikket feilen forsvinner er 0.835A. Simuleringen av situasjonen er vist i figur 25.

Figur 25 bekrefter at det vil være en transient polaritetsendring av den resistive strømflyten ved bortfall av jordfeil. Svingningene vist i figuren er de resistive svingningene rettingsvernet på Fageråsen måler hver gang en kortvarig jordfeil slukkes av spolene i nettet utenfor avgangen. Strømmen frem til feilen forsvinner ligger rundt -0.5A. Middelverdien i begynnelsen av forløpet ligger rundt den beregnede verdien på 0.835A.

Det mest kritiske tilfellet som kan inntreffe er i følge likning 8 når resistive tap i nettet er høye. Samtidig som summen av induktive og kapasitive bidrag er lave, og når egenbi-

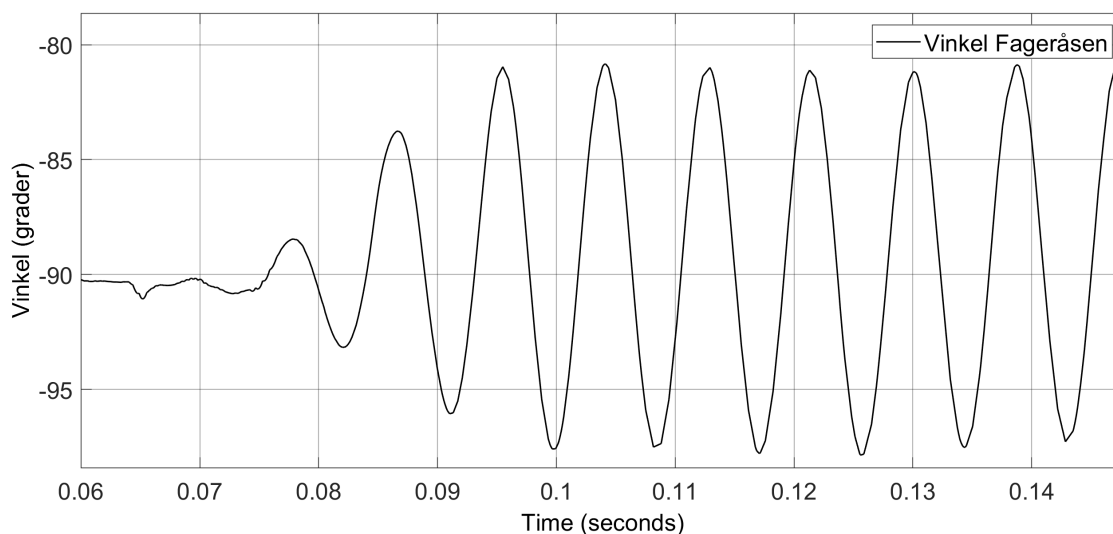


Figur 26: Resistive oscillasjoner på Fageråsen ved utkoblingkobling av jordsluttet avgang Håvi med tilkoblet parallellmotstand. Feilen forsvinner etter 0.06s

draget er høyt. For nettet i Trysil vil dette være ved langvarig jordfeil på den nest største avgangen Håvi, med etterfølgende avgangskobling med innkoblet parallellmotstand. I følge likning 8 vil utkoblingen av avgangen senke nevneren i brøken, mens innkoblet parallellmotstand vil øke telleren. Parallellmotstanden vil, basert på likning 9 føre til at svingningene dør raskere ut.

Middelverdien til den resistive strømmen på Fageråsen like etter utkobling av Håvi beregnes under med utgangspunkt i likning 8. De totale resistive tapene i nettet ved innkoblet parallellmotstand hentes fra tabell 4. Det induktive egenbidraget til Håvi er på 82A. Dette er basert på vedlegg G. Det resistive egenbidraget til Håvi hentes fra simuleringene, og er 0.36A.

$$I_R = (20,93 \cos -14,00 - 0,36) * \frac{87}{344 + 339 - 82} - 0,5 = 2,89 - 0,5 = 2,39A$$



Figur 27: Simulert vinkel til retningsvernet på Fageråsen ved utkobling av jordsluttet avgang Håvi. Parallellmotstanden er innkoblet parallellmotstand, og feilen forsvinner etter 0.06s

Figur 26 viser simuleringer. Dette er en reell situasjon som kan oppstå på nettet. Simuleringen viser at i dette tilfellet vil det være høye resistive svinginger i den friske avgangen. Middelerdien ved startøyeblikket ligger også omtrent på den beregnede verdien på 2.39A. Som beskrevet i underkapittel 2.6.2 kan disse oscillasjonene medføre risiko for feilutkoblinger. Det gjøres derfor simuleringer for hva vinkelen til retningsvernet på Fageråsen måler under denne situasjonen.

Figur 27 viser at vinkelen på sitt høyeste er like under -80° . Avgangen er dermed godt innenfor tripsektoren på retningsvernet innstilt til -87° vist i vedlegg D. Middelerdien på vinkelen ligger også tilsynelatende i området rundt -87° . Vedlegget viser at det er en forsinket utkobling på 2s. Det kan sees i figur 26 at svingningene dør ut lenge før dette. Det er derfor ikke fare for feilutkobling selv ved den mest kritiske situasjonen. Det blir også gjort simuleringer av jordslutning med gjentakende og intermitterende karakteristikk. Simuleringene viser at verdiene ved den situasjonen er mindre kritiske enn fremlagte simuleringer ettersom Håvi i det tilfellet er innkoblet.

Oppsummering

Distribusjonsnettene er sårbare like etter endret konfigurering av avganger. Når en avgang inn- eller utkobles vil spolens induktive strøm ikke være kalibrert tilsvarende den kapasitive lekkasjen i nettet. Dette medfører svekket drift- og personsikkerhet i mellomrommet mellom endret konfigurering og rekalkulert sentralspole, ved at kortvarige jordfeil og tilhørende lysbuer ikke vil slukkes, og berøringsspenning øker. Det er dermed viktig å drifte nettet med hurtig og automatisk spoleregulator.

Ved bortfall av en jordfeil vil verdiene i nullsystemet gå tilbake til normal tilstand gjennom oscillasjoner. Frekvens og varighet på oscillasjonene avgjøres av kapasitive, induktive og resistive bidrag i nettet. Etersom jordfeilvern i distribusjonsnettene i Trysil bruker den resistive strømflyten til å lokalisere jordslutningen vil ikke en transient frekvensendring medføre fare for feiloperasjon.

Transient resistiv polaritetsendring oppstår på friske avganger etter endt jordfeil. Størrelsen på resulterende resistiv oscilering avgjøres av egenbidrag, samt kapasitive, induktive, og resistive bidrag i nettet. Avganger med høye egenbidrag er mest utsatte. Simulering av den mest kritiske situasjonen viser at det tilhørende retningsvernet vil tolke målingene som at det er jordslutning på avgangen. Dette er likevel ikke et problem ettersom tidsforsinkelsen på retningsvernet oversiger varigheten på oscillasjonene.

Drøfting

Resultatene i dette delkapittelet stemmer veldig godt overens med teorien. At nettet har nedsatt drift- og personsikkerhet ved endret nettkonfigurering var forventet, og beskrevet i underkapittel 2.4.1. Gjennom dette delkapittelet er formlene fra teorikapittelet for oscillasjoner brukt for å estimere den simulerte verdien, for så å gjennomføre simuleringene. Resultatene samsvarer veldig godt med de teoretiske verdiene. Dette er et resultat som

styrker troverdigheten av simuleringsmodellen. Transient resistiv polaritetsendring kan medføre driftsmessige utfordringer for nett som driftes med lav tidsforsinkelse på jordfeilvern. Varighet på oscillasjoner bør derfor alltid kontrolleres før tidsforsinkelsen på jordfeilvern avgjøres. Dette kan by på utfordringer for nett med problemer med å innfri krav for berøringsspenning. I disse tilfellene bør avanserte admittansvern vurderes.

4.2.5 Jordslutningsmotstand

I dette underkapittelet skal jordslutningsmotstand sin påvirkning på nullpunktsspenning og jordslutningsstrøm undersøkes. Det er viktig at spolene i nettet er i stand til å kompensere for kapazitiv lekkasjestrøm uavhengig av jordslutningsmotstand. Eventuelt også at vern detekterer og frakobler jordsluttede avganger, både for høyohmig og lavohmig jordslutning.

Som beskrevet i kapittel 2.4 vil en metallisk jordslutning kunne heve nullpunktsspenningen til fasespenning. For ikke-neglisjerbar jordslutningsmotstand vil nullpunktsspenningen være spenningsfordelingen mellom nullsystemsimpedansen og jordslutningsmotstanden. Gjennom simuleringene er det også vist at andre faktorer som påvirker spenningsdelingen er nullsystemsimpedansen på hovedtransformatoren, serieimpedansen i nullsystemet og spenningsfall i pluss- og minussystemet.

For beregning videre i underkapittelet forenkles nullpunktsspenningen til å være spenningsfordelingen mellom nullsystemsimpedansen og jordslutningsmotstanden. Forenklingen gjøres fordi simuleringene utføres på korte kabelstrekk. Nullsystemsimpedansen kan estimeres ved å beregne parallellkoblingen mellom sentralspolen og kapasitansene i nettet. For eksakte beregninger skulle også nullsystemsimpedansen til spenningsforsyningen, eller transformatoren vært med i beregningen. Dette begrenser maksimal spolespenning og er grunnen til at spenningen over spolen ikke oppnår fasespenning.

Tabell 6: Nullpunktsspenning og jordslutningsstrøm ved endret jordslutningsmotstand. Parallellmotstanden er utkoblet, og feilen er på samleskinnen

Jsm.[Ω]	Verdi			
	Brg. $ U_0 $ [kV]	$ U_0 $ [kV]	$ I_{jf} $ [A]	$\angle I_{jf}$ [$^\circ$]
0	-	16.57	11.62	-25.63
1000	9.78	9.87	7.2	-24.88
1439.5	8.29	8.27	6.15	-24.7
2000	6.94	6.79	5.17	-24.2

$$Z_0 = R_L || Z_L || Z_C = \frac{1}{\frac{1}{1925,7} + \frac{1}{i2\pi 50 * 0,1533} + \frac{1}{-i2\pi 50 * 0,15551}} = 1665 \angle 30,17^\circ \quad (19)$$

$$R_0 = 1665 \cos 30,17 = 1439,5\Omega \quad (20)$$

Likning 19 viser estimert verdi for nullsystemsimpedansen. R_L representerer resistive tap i spolen tilsvarende 2.5% av spolens bidrag. Verdien for Z_L er beregnet basert på en spolestrøm på 344A, mens Z_C er beregnet basert på en kapasitiv lekkasje på 339A. Likning 20 viser tilhørende reell motstandsverdi på nullsystemsimpedansen. Ved å bruke en jordslutningsmotstand tilsvarende den reelle delen av nullsystems-motstanden kan spenningsdelingen undersøkes. Ved et nett i resonans ville de reaktive komponentene i likning 19 nullet hverandre ut. Foruten aktive tap hadde dette medført en uendelig høy impedans.

Tabell 6 viser beregnet og simulert nullpunktsspenning, og jordslutningsstrøm ved forskjellige jordslutningsmotstander. For den beregnede verdien brukes spenningsdeling, som med utgangspunkt i maksimal spenning er 16.57kV. Som tidligere beskrevet kan spolespenningen komme helt opp til fasespenningen. Begrensende faktor er nullsystemsimpedansen til spenningskilden. Simuleringen viser at spenningsfallet over denne er $1393V_{top}$ ($22\sqrt{\frac{2}{3}} - 16,57 = 1,393kV$)

Tabell 7: Sensitivitet på nettet ved dagens drift uten tilkoblet parallellmotstand. Jordslutningen er på enden av Fageråsens lengste strekk.

Jordslutningsmotstand [Ω]	$ U_0 $ [kV]	$ I_{jf} $ [A]	$ Vern_{Fager} $ [A]	$\angle Vern_{Fager}$ [grader]
8240	1800	1.79	10.07	-81.00

Simuleringen bekrefter utregningen av nullsystemsimpedansen, ved at nullpunktsspenningen halveres ved den beregnede jordslutningsmotstanden fra likning 20. En annen observasjon er at spenningsdelingen kun stemmer med nøyaktighet ved halveringsverdien. Tabell 6 viser at ved å øke jordslutningsmotstanden over denne verdien fås høyere spenning enn forventet, og ved å minke jordslutningsmotstanden fås lavere spenning enn forventet. Det er dermed ikke en helt lineær sammenheng i spenningsfordelingen.

Simuleringene i tabell 6 viser at den kapasitive lekkasjestrømmen kompenseres for, uavhengig av jordslutningsmotstandene. Dette kan sees ved at vinkelen til jordslutningsstrømmen i tabell 6 er lite påvirket av jordslutningsmotstanden. Dette skyldes som illustrert på figur 6 at spenningen over kapasitansene er den samme som spenningen over spolen.

Som beskrevet i kapittel 2.6 avgjøres sensitiviteten for jordfeilvern av den høyeste jordslutningsmotstanden som detekteres. Ønsket sensitivitet legges inn i jordfeilvernet som et parameter i form av en grense for nullpunktsspenning og reststrøm. Basert på opplysninger fra Eidsiva i vedlegg D er jordfeilvernene i Trysil innstilt til en nullpunktsspenning på 10%, altså $U_0 = 22000\sqrt{\frac{2}{3}} * 0,1 = 1796V$, og en strøm på $2\angle \pm 87^\circ A$. Det gjøres simuleringer for å kontrollere sensitiviteten på Trysil. Disse utføres på det mest kritiske punktet, på enden av Fageråsens lengste strekk. Sensitiviteten ellers i nettet vil alltid være høyere enn denne.

Tabell 8: Sensitivitet på nettet ved dagens drift med tilkoblet parallellmotstand. Jordslutningen er på enden av Fageråsens lengste strekk.

Jordslutningsmotstand [Ω]	$ U_0 $ [kV]	$ I_{jf} $ [A]	$ Vern_{Fager} $ [A]	$\angle Vern_{Fager}$ [°]
5250	1800	2.79	10.22	-75.1

Simuleringen i tabell 7 og 8 viser sensitiviteten til jordfeilvernene før og etter parallellmotstanden legges inn. Før parallellmotstanden legges inn detekteres en jordslutningsmotstand på 8240Ω , mens etter senkes sensitiviteten til 5250Ω . Dette skyldes at parallellmotstanden senker den totale impedansen i nullsystemet. Dette svekker spenningsfordelingen mellom nullsystemsimpedansen og jordslutningsmotstanden.

Simuleringene viser at feilen detekteres før parallellmotstanden kobles inn. Ettersom parallellmotstanden har en tidsforsinkelse lengre enn retningsvernene vil sensitiviteten på nettet være 8350Ω . Hvis retningsvernene hadde vært avhengige av parallellmotstanden hadde sensitiviteten på nettet vært 5330Ω . Kravet for sensitivitet er som beskrevet i kapittel 2.6 på 3000Ω .

Oppsummering

For korte kabelstrekk som i Trysil kan spenningen over spolen ved en jordslutning forenkles til å være spenningsfordelingen mellom nullsystemsimpedansen og jordslutningsmotstanden. Dette underkapittelet beregner og verifiserer at nullsystemsimpedansen i Trysil er $1665\angle 30,17^\circ$. Denne verdien er viktig for å forstå spolespenningen ved jordfeil. Resultatet fra simuleringene viser også at spolene i nettet kompensere for den kapasitive lekkasjestrømmen uavhengig av jordslutningsmotstand. Sensitiviteten i Trysil finnes ved simuleringer til å detektere jordfeil opp til 8350Ω .

Drøfting

Simuleringene viser at for kabelstrekk så korte som i Trysil kan spenningen over spolen beregnes ved spenningsfordelingen mellom nullsystemsimpedansen og jordslutningsmotstanden. Dette samsvarer med teorien for serieimpedansen sin påvirkning ved korte kabelstrekk, beskrevet i underkapittel 2.4.3. Simuleringene for sensitivitet viser at vinkelen i liten grad blir høyere ved økt jordslutningsmotstand. Årsaken til dette er ikke undersøkt videre innenfor oppgavens rammer.

Retningsvernene detekterer feilen allerede før parallellmotstanden kobles inn. I tillegg er tidsforsinkelsen på parallellmotstanden lenger enn forsinkelsen på vernene. Dette medfører at feilen utkobles allerede før parallellmotstanden kobles inn. Etersom dette er tilfellet for den største avgangen i Trysil, vil det også være tilfelle for de resterende avgangene. Fra et personsikkerhetsperspektiv er det gunstig at vern kobler ut feilen før parallellmotstanden kobles inn. Slik unngås både den økte jordslutningsstrømmen og berøringsspenningen. Det er altså gunstig for både sensitiviteten på nettet, og for sikkerheten på nettet at feilen bortkobles før parallellmotstanden legges inn. Det kan imidlertid diskuteres om nettet driftes for sensitivt, da en jordfeil tilsvarende 1.79A vil resultere i avgangsutkobling.

4.2.6 Retningvern i Trysil

I dette underkapittelet skal verdiene til retningsvernene i Trysil simuleres. Som beskrevet i kapittel 2.6.3 er en normal tripsektor for retningsvern $\pm 80^\circ$. I Trysil driftes vern basert på vedlegg D med en tripsektor på $\pm 87^\circ$. Gjennom underkapittelet gjøres det simuleringer for å undersøke om den høye tripsektoren er problematisk.

Beregning av vinkelen til retningsvernet på jordsluttet avgang er vist i likningen under. Denne er hentet fra likning 6. Fra vedlegg G driftes nettet i Trysil med en overkompen-

Tabell 9: Simulerte verdier for retningsvern på Fageråsen og Håvi. Nettet er 5A overkompensert

Konfig. Avgang	Samleskinne uten pm	Samleskinne med pm	Enden av kabel uten pm	Enden av kabel med pm
Fageråsen	92,6∠ - 83,73	94,3∠ - 77,80	90,0∠ - 83,79	91,1∠ - 77,76
Håvi	82,1∠ - 90,20	82,0∠ - 90,21	79,6∠ - 90,24	79,3∠ - 90,20

sering på 5A. Likningen viser at dette er en faktor som trekker den målte reststrømvektoren bort fra tripsektoren. En annen avgjørende faktor er egenbidraget til avgangen. Fageråsen er avgangen med det høyeste egenbidraget, og dermed avgangen som måler den laveste vinkelen. Det gjøres derfor simuleringer for å studere verdiene retningsvernet på denne avgangen gjør ved forskjellige jordfeil. Det gjøres også simuleringer på den nest største avgangen Håvi, for å undersøke verdiene til en stor frisk avgang.

$$\phi = \arctan \frac{-(I_E + I_{comp})}{I_R}$$

Tabell 9 viser at det ikke er særlig grad av påvirkning på vinkelen til strømmen ved endret feillokasjon. Det betyr at de mest utsatte retningsvernene i Trysil detekterer jordfeil uavhengig av feillokasjonen på avgangen. Som beskrevet i delkapittel 4.2.5 vil ikke jordslutningsmotstanden ha betydning for vinkelen på jordfeilstrømmen. Det betyr også at vinkelen til retningsvern er uavhengig av jordslutningsmotstand. Tabell 9 viser en tydelig gunstig effekt for vinkelen ved innkoblet parallellmotstand. Resultatet fra simuleringene viser at strømvektoren til Håvi ligger stabilt langs den negative imaginæraksen, og er dermed ikke i faresonen for feilutkobling. Strømverdien synker litt ved overgangen fra feil før og etter kabelstekket. Dette skyldes som beskrevet i underkapittel 4.2.3 spenningsfall i pluss- og minussystemet.

Tabell 10: Simulerte verdier for retningsvern på Fageråsen og Håvi. Nettet er 5A underkompensert.

Konfig. Avgang	Samleskinne uten pm	Samleskinne med pm	Enden av kabel uten pm	Enden av kabel med pm
Fageråsen	82,5∠ – 83,20	84,3∠ – 76,48	80,4∠ – 83,16	81,8∠ – 76,52
Håvi	82,1∠ – 90,25	82,1∠ – 90,18	80,0∠ – 90,24	79,5∠ – 90,24

Simuleringer på de mest kritiske avgangene vist i tabell 9, viser at retningsvernene lokaliserer feilen allerede før parallellmotstanden innkobles. RENbladet [2] anbefaler at vektoren kommer 5° inn i tripsektoren. For Trysil tilsvarer det $\pm 82^\circ$. Resultatene viser at de mest kritiske avgangene Fageråsen registrerer er en vinkel på $-77,8^\circ$ ved innkoblet parallellmotstand, og $-83,73^\circ$ uten. Det vil si at for innkoblet parallellmotstand er det en sikkerhetsmargin på $9,2^\circ$, mens for utkoblet parallellmotstand er det en sikkerhetsmargin på $3,3^\circ$. En tripsektor på $\pm 87^\circ$ gir en sikkerhetsmargin på 3° for friske avganger. Tripsektoren er avgjort basert på personsikkerhet. Dette ved at feilen skal utkobles før parallellmotstanden. Det er derfor valgt en tripsektor hvor sikkerhetsmarginen for feilaktig avgangen tilsvarer sikkerhetsmarginen for frisk avgang.

Som beskrevet i kapittel 2.6 skriver RENbladet at det er normalt og gunstig med en tripsektor på $\pm 80^\circ$. Dette sammen med en underkompensering. Det undersøkes derfor hvilken effekt det vil ha for verdiene til retningsvernene i Trysil å drifte nettet med en underkompensering på 5A.

Resultatet fra simuleringen er vist i tabell 10. Simuleringen viser at forbedringspotensialet er lavere enn forventet. Underkompenseringen gir ikke særlig utslag på vinkelen. Med utgangspunkt i likning 6 er avgjørende faktorer resistiv strøm, kompenseringsgrad

og engangsbidrag. Årsaken til at utslaget er så lavt er at egenbidraget på avgangen er høyt. For å oppnå ønsket effekt vil en enda høyere underkompensering være nødvendig. Dette medfører en høyere jordslutningsstrøm, og dermed senket personsikkerhet gjennom økte berøringsspenninger.

I underkapittel 2.6.4 beskrives multifrekvens admittansvern. Dette er et jordfeilvern som bruker de harmoniske komponentene i feilstrømmen til å skille mellom frisk og jordsluttet avgang. Det gjøres derfor simuleringer for å undersøke om disse vernene kan ha en gunstig effekt. Dette gjøres ved å undersøke om det er harmoniske komponenter i feilstrømmene.

Harmoniske komponenter

For å undersøke de harmoniske komponentene gjøres det simuleringer for verdiene til retningsvernene. Videre utføres det en Diskret Fourier Transform (DFT) av verdiene til vernene. Det utføres simuleringer før og etter den lengste avgangen på Fageråsen for å undersøke effekten som kabelen har på de harmoniske komponentene. Simuleringene viser at lasten på lavspent side er avgjørende for de harmoniske komponentene. Det gjøres derfor simuleringer med og uten tilkoblet last. Tabell 11 viser nettkonfigurasjon og feillokasjon, samt tilhørende harmoniske komponenter registrert av strømtransformatorene på Fageråsen. Tallene er oppgitt i prosent, hvor 100% tilsvarer bidraget til fundamentalfrekvensen.

Tabell 11 viser at det i stor grad er flere harmoniske komponenter til stede i verdiene fra strømtransformatorene til den jordsluttede avgangen. Tabellen viser at det er størst grad av harmoniske komponenter til stede ved jordslutning på enden av kabelen. For jordslutning på samleskinnen ved normal drift, altså med last, er det liten grad av harmoniske komponenter. De harmoniske komponentene er hovedsakelig representert under det transiente

Tabell 11: Diskre Fourier Transform av verdiene fra strømtransformatorene på jordsluttet avgang Fageråsen. Simuleringene gjøres ved forskjellige feillokasjoner og nettkonfigurasjoner. For analysen oppstår feilen etter 0.02s, og tallene hentes ut etter 0.04s. Parallellmotstanden er ikke tilkoblet

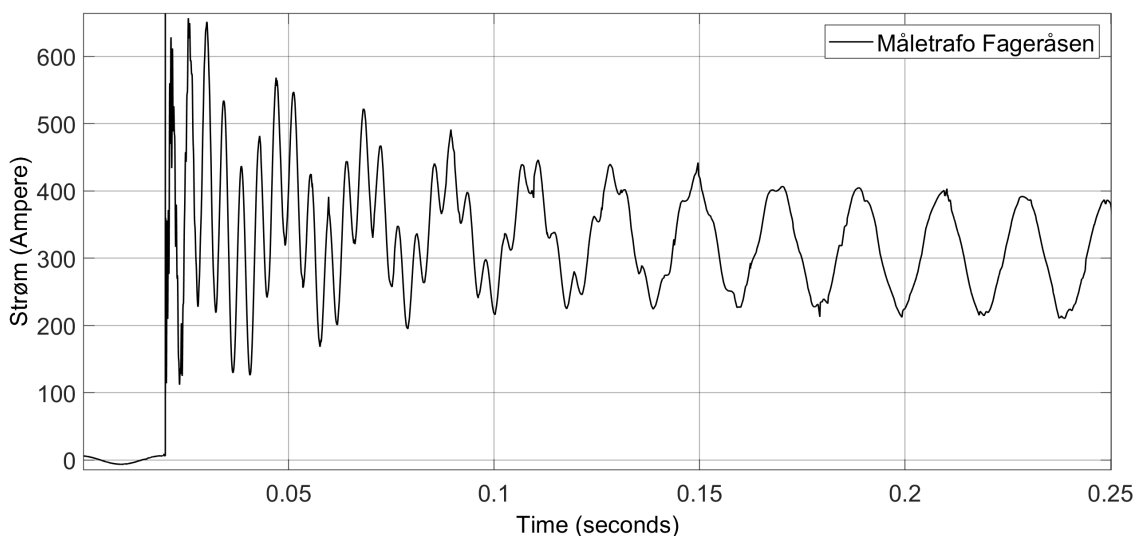
Frekvens/ Harmonisk orden	Samleskinne Uten last [%]	Samleskinne Med last [%]	Etter Fageråsens lengste strekk [%]
50Hz, (Fnd)	100	100	100
100Hz, (h2)	9.42	1.71	13.39
150Hz, (h3)	16.19	0.72	8.51
200Hz, (h4)	41.27	0.63	6.58
250Hz, (h5)	114.91	0.80	6.02
300Hz, (h6)	27.04	1.09	4.68

forløpet i det feilen oppstår.

Tabell 11 viser at ved en jordslutning på samleskinnen uten last tilkoblet etter fordelingstransformatoren er det veldig store harmoniske bidrag. Figur 28 viser strømforløpet ved denne konfigurasjonen. Figuren viser tydelig at de harmoniske komponentene gradvis dør ut. En DFT ved et senere tidspunkt består i veldig liten grad av harmoniske komponenter.

Som beskrevet i underkapittel 2.6.4 er det 5. harmoniske som i høyeste grad er representert. Dette kan sees direkte på figur 28 på hvordan signalet svinger 5 ganger mellom hver periode. Det kan også ses på prosentene i tabell 11. Tabellen viser at dette kun gjelder for samleskinnejordslutning uten last. Det kan derfor ikke bekreftes at det er en generell regel at 5. harmoniske alltid er størst.

Simuleringene viser også at frekvenskomponentene er avhengige av impedansen på spen-



Figur 28: Strømførløp fra strømtransformatorene på Fageråsen ved en samleskinne jordslutning uten tilkoblet last. Feilen oppstår etter 0.02s

ningskilden. Ved å øke kortlutningsverdien, altså ved å minke impedansen, vil de harmoniske komponentene kun være tilstede under en halv periode. Ved å senke kortlutningsverdien øker de harmoniske komponentene, spesielt 2. komponent.

Det ble også gjort simuleringer med periodiske jordslutninger. Dette medførte økte bidrag fra harmoniske komponenter, men ga ikke større utslag enn presentert resultat fra jordslutning på samleskinnen uten last.

Oppsummering

Gjennom dette underkapittelet er verdiene til retningsvernet på den mest utsatte avgangen Fageråsen undersøkt. Simuleringene viser at retningsvernet på Fageråsen registrerer, og kobler ut en jordfeil før innkobling av parallellmotstanden. Dette skjer fordi tidsforsinkelsen på parallellmotstanden er på 2.5s, mens forsinkelsen på retningsvernet er 2s. For å oppnå dette driftes nettet i Trysil med en tripsektor på $\pm 87^\circ$. Dette medfører en veldig lav sikkerhetsmargin mellom tripsektor og friske avganger. Det er også gjort simuleringer for å undersøke effekten av RENbladets anbefaling om å underkompensere nettet. Simuleringer

gene viser at en lav underkompensering på 5A har veldig liten effekt på store avganger som Fageråsen.

Det gjøres også simuleringer tilknyttet harmoniske komponenter. Dette gjøres for å undersøke om de beskrevne MFA vernene fra underkapittel 2.6.4 vil ha nødvendig grunnlag. Det gjøres derfor en DFT av strømmen på jordsluttet avgang. Resultatene viser at gjennom et transient forløp ved feilstart vil det være stor grad av harmoniske komponenter.

Drøfting

Resultatene fra underkapittelet stemmer godt overens med teorien fra underkapittel 2.6. Friske avganger registrerer ved jordfeil en vektor som ligger lags negativ imaginærakse, men litt inn mot fjerde kvadrant avhengig av resistivt egenbidrag. jordsluttet avgang trekkes inn i 4. kvadrant avhengig av resistive bidrag på nettet. Simuleringene på Trysil viser at retningsvernene detekterer og kobler ut feilen allerede før parallellmotstanden legges inn. Etersom dette er tilfelle for den største avgangen i Trysil vil det også gjelde for resterende avganger. En konsekvens av dette er at sikkerhetsmargin mellom friske avganger og tripsektoren blir lav. Eidsiva har med dette valgt personsikkerhet fremfor driftsikkerhet.

Målesikkerhet er også en faktor som kan ha innvirkning på måleresultatene og skape ytterligere utfordringer med den lave sikkerhetsmarginen. Det er derfor spesielt viktig i dette tilfellet å ha nøyaktig måleutstyr. Tidligere simuleringer i kapittelet i underkapittel 4.3.4 viser at oscillasjoner etter bortfall av feil ikke er en utfordring, selv ved den lave sikkerhetsmarginen.

Som beskrevet i underkapittel 2.6.3 anbefaler RENbladet en tripsektor på $\pm 80^\circ$, og en sikkerhetsmargin på jordsluttet avgang på 5° . RENbladet anbefaler også å drifte nettet underkompensert. Simuleringene i dette underkapittelet viser at dette har en gunstig ef-

fekt, men ved en begrenset kompenseringsgrad har det veldig lite utslag på store avganger som i Trysil. Distribusjonsnett i Trysil er langt fra anbefalingene til RENbladet. Selv om simuleringene viser at retningsvern i Trysil vil detektere og koble ut feil på riktig måte, driftes nettet på kanten. Nettet driftes med små sikkerhetsmarginer, og langt fra anbefalte verdier.

Som beskrevet i underkapittel 2.6.4 vil MFA-, og CPS-vern starte beregningene etter en viss tidsforsinkelse etter innfridd startkriteriet U_0 . Simuleringene i figur 28 viser at de harmoniske komponentene raskt dør ut, hvilket kan tyde på at hoveddelen av harmoniske komponenter har død ut når beregningen starter. Figuren viser også at det er en høy likestrømslinje på strømverdiene. Denne registreres ikke av retningsvern som kun tar utgangspunkt i fundamentalfrekvensen. Likestrømslinjen, og usikkerheten rundt denne er omtalt i drøftingen i underkapittel 4.2.2.

Harmoniske komponenter oppstår som beskrevet i underkapittel 2.6.4 for eksempel av transformatorer i metning, ulineære laster og kraftelektronikk. I hvor stor grad dette er til stede i distribusjonsnett i Trysil er ikke kartlagt. Som beskrevet i kapittelet 3 er simuleringsmodellen forenklet til kun å bestå av to kabelstrekk på hver avgang med hver sin transformator og tilhørende last. Denne gjenspeiler den faktiske lasten på avgangen, men ikke konfigurasjon. Det konkluderes derfor med at simuleringer rundt de harmoniske komponentene har lav troverdighet. Simuleringene er kun ment som en pekepinne på hvordan harmoniske komponenter på nettet kan se ut.

4.3 Distribuert kompensering

I dette kapittelet skal det gjøres simuleringer ved bruk av distribuerte spoler. Simuleringene gjøres med utgangspunkt i distribusjonsnett i Trysil. Det skal først gjøres avgjørelser for oppsett av modellen. For så gjennom simuleringene å analysere spolens påvirkning

på relevante parametre. Som beskrevet i underkapittel 2.5 er tre viktige egenskaper for distribuerte spoler avlastning av sentralspolen, demping av feillokasjons betydning, og senket egenbidrag. Med dette som utgangspunkt skal distribuerte spoler sin påvirkning på nettet, samt evne til å løse utfordringer med sentralkompensering undersøkes. Det gjøres også simuleringer for å kontrollere om det kan være ulemper tilknyttet høyt bruk av distribuerte spoler. Det er valgt å presentere resultatene fra simuleringer som vurderes til å være sikkerhetsmessig relevante. Simuleringer rundt nullpunktsspenning ved normal drift, og jordslutningsmotstand er tema som undersøker funksjonaliteten på spolene. Disse vil ikke studeres i detalj i dette kapitlet. I likhet med forrige kapittel er jordslutninger metalliske på et nett med en 5A overkompensering, hvis annet ikke er oppgitt.

4.3.1 Modellbeskrivelse

I dette underkapitlet skal metoden for oppbygging og innstilling fra grunnmodellen, til et distribuert spolekonsert nett beskrives. Metoden for oppbygging av grunnmodellen for simuleringene er beskrevet i underkapittel 4.1.

For valg av antall distribuerte spoler i simuleringen tas det utgangspunkt i anbefalinger fra RENbladet [2]. Som beskrevet i underkapittel 4.2.4 driftes nettet i Trysil i dag med en tripsektor konstruert for å detektere og koble ut en jordfeil før parallellmotstanden legges inn. Dette gjøres for å unngå den økte berøringsspenningen ved innkoblet parallellmotstand. Denne konfigurasjonen frarådes av RENbladet [2]. Dette på grunn av senket driftsikkerhet grunnet forskjellige utkoblingstider for jordfeilvern. Dette er et problem nettet i Trysil unngår ved den store tripsektoren. RENbladets anbefaling er som beskrevet i underkapittel 2.6.3 å drifte nettet med en tripsektor på $\pm 80^\circ$, og med en sikkerhetsmargin på 5° på jordsluttet avgang.

RENbladet vurderer med denne anbefalingen at den økte berøringsspenningen ved inn-

kobling av parallellmotstanden ikke er en utfordring så lenge forskrift for berøringspenning opprettholdes. Basert på vedlegg G er Trysil utstyrt med global, og tildels gjennomgående jord. Overgangsmotstanden er derfor lav, og en potensialheving skal være uproblematisk. Det velges derfor å bruke RENbladets anbefaling. Dette resulterer i at antall distribuerte spoler velges med utgangspunkt i å oppnå en vinkel på -75° ved innkoblet parallellmotstand. Beregningen under er basert på likning 6 i kapittel 2.5.

$$\phi = \arctan \frac{-(I_E + I_{comp})}{I_R}, -75^\circ = \arctan \frac{-(I_E + 5)}{20,93 \cos -14^\circ + 87 \cos -90,28^\circ}, I_E = 69,2A$$

Beregningen viser hvilket egenbidrag Fageråsen må ha for å måle en vektor på -75° ved innkoblet parallellmotstand. I_R er hentet fra tabell 4 og det resistive egenbidraget til Fageråsen er hentet fra simuleringene. Egenbidraget er negativt fordi dette beveger seg fra samleskinnen mot linjen. Den resistive strømmen fra bakgrunnsnett er positiv fordi denne beveger seg fra jordfeilen mot samleskinnen, mens den resistive komponenten av egenbidraget beveger seg fra samleskinnen mot linjen. Strømtransformatorene måler positiv retning mot linjen, men med negativ referanse. Strømpolaritetene er definert i underkapittel 2.6.1.

Beregningen viser altså at for nettet i Trysil hvor det er $20,93 \cos -14 = 20,31A$ resistive bidrag, vil et egenbidrag på 69.2A tilfredsstille anbefalingen fra RENbladet [2]. Som beskrevet i underkapittel 2.6.1 anbefaler RENbladet også et maksimalt egenbidrag på 40A ($\arctan \frac{40}{10} = 75,96^\circ$. RENbladet tar med dette utgangspunkt i at det kun er parallellmotstanden som har resistive bidrag. Beregningen til RENbladet er veldig forenklet, ved at de velger å se bort fra både kompenseringsgrad, resistive bidrag fra sentralspolen, resistive bidrag i nettet og det resistive egenbidraget. Det velges derfor å se bort fra RENbladets anbefaling for egenbidrag. Beregningene er veldig forenklete, og ugyldige for store nett med resistive tap som Trysil.

Videre gjøres det avgjørelser for antall spoler basert på egenbidraget på avgangene i Try-

sil. Som beskrevet i underkapittel 2.5 har en distribuert spole en fast verdi tilsvarende 15A ved en metallisk jordslutning. Egenbidraget på Fageråsen er 87A basert på vedlegg G, en distribuert spole senker dette til 72A hvilket er 2.8A høyere enn beregningen. Det monteres likevel bare en distribuert spole på Fageråsen. Dette fordi RENbadets egen anbefaling resulterer i $75,96^\circ$, og for ikke å overdrive en anbefaling da Eidsiva i dag drifter nettet med en tripsektor på $\pm 87^\circ$. Det monteres også en distribuert spole på Håvi ettersom dette basert på vedlegg G er den eneste andre avgangen med egenbidrag høyere enn den beregnede verdien på 69.2A. Spolene plasseres i utgangspunktet på enden av det tilhørende lengste strekket gjennom hele kapittelet, med mindre annet er beskrevet. Dette gjøres fordi hele kabelstrekket er modellert med en blokk. Selv om egenbidraget er beregnet med utgangspunkt i de resistive tapene på Fageråsen, vil verdien til Håvi ha et mindre strengt krav ettersom denne avgangen har lavere resistive tap.

For valg av komponenter til oppbygningen av simuleringsmodellen for distribuerte spoler tas det avgjørelser for at simuleringene skal tilsvare virkeligheten i størst mulig grad. Teknisk data for Møretrafo sine distribuerte spoler er vist i vedlegg E. Transformatorer med innebygd spole er normalt Zn-koblet på høyspentsiden. Dette fordi denne koblingsgruppen gir lav nullsystemsimpedans. I Simulink er det ikke mulig å velge koblingsgruppen Zn for fordelingstransformatorer. For simuleringene brukes derfor komponenten "Grounding Transformer". Dette tilsvarer bruk av kunstig nullpunkt, beskrevet i underkapittel 2.4.2. Denne lager et nullpunkt via en zigzag-kobling, altså en Zn-kobling. Denne komponenten er ikke en fordelingstransformator, men en ren jordingstransformator. "Grounding Transformer" velges likevel fremfor en fordelingstransformator med Yn-kobling fordi simuleringene viser at denne fordelingstransformatoren har høyere nullsystemsimpedans og dermed dårligere, og mer feilaktig spenningsfordeling over spolen. Bruk av "Grounding Transformer" viser at nullpunktsspenningen er høy, med en lav vinkel, hvilket gir god resultater.

For valg av innstilling på de distribuerte spolene tas det valg for at spolene skal tilsvare virkeligheten, samtidig som at de skal samspille med verdiene i simuleringen. Ettersom målingsutstyret i simuleringene tar utgangspunkt i toppverdier beregnes induktansen til spolen med utgangspunkt i toppverdien på spenningen.

$$L_{DtSp} = \frac{U_{0n}}{I_{DtSp} * \omega} = \frac{16,57kV}{15 * 2\pi * 50} = 3,5163H \quad (21)$$

Likning 21 viser induktansen benyttet for de distribuerte spolene i simuleringen. Spenningen er hentet fra tabell 6. Det tas utgangspunkt i spenningen ved hovedtransformatoren for å generalisere induktansen. Induktans er ikke oppgitt fra leverandør, her oppgis kun bidraget på 15A. Ved behov for høyere størrelser brukes flere distribuerte spoler med hver sin "Grounding Transformer" for å oppnå et jevnt resultat, ettersom spenningen over spolen endres ved endret induktans.

Validitet og reliabilitet

Det er gjort valg for antall distribuerte spoler basert på driftsikkerhet, altså å senke egenbidraget. Dette resulterer også i avlastning av sentralspolen. Ved valg av transformator er utgangspunktet å oppnå så realistiske resultater som mulig. Transformatoren er likevel ikke en fordelingstransformator. utfordringer rundt overbelastning ved langvarig jordfeil vil dermed ikke være realistisk. Dette er likevel ikke aktuelt å simulere. De distribuerte spolene konstrueres også for å tilsvare 15A, hvilket er en realistisk verdi. Grunnet realistisk argumentering for valg av antall spoler, korrekt spenningsfordeling og koblingsgruppe for transformator, og riktig strømverdi for spolen anses simuleringsmodellen for distribuerte spoler til å ha høy validitet. Ettersom det konstrueres en modul som tilsvarende en distribuert spole, med tilhørende transformator, vil denne også ved høyt bruk ha samme spenningsfordeling, og dermed samme induktive bidrag. Reliabiliteten vurderes derfor også som høy.

Tabell 12: Induktive bidrag og resulterende jordslutningsstrøm med og uten bruk av distribuerte spoler. Spolene plasseres på samleskinnen og på enden av det lengste kabelstrekket. Jordslutningen skjer på samleskinnen.

Strøm[A] konfig.	S.spole	D.spole Fagerå.	D.spole Håvi	Jordslutning
Uten DS	$344,0\angle -89,96^\circ$	0	0	$11,6\angle -25,47^\circ$
DS sm.	$314,1\angle -89,98^\circ$	$14,95\angle -89,98^\circ$	$14,95\angle -89,98^\circ$	$11,6\angle -25,74^\circ$
DS enden	$313,8\angle -89,96^\circ$	$14,99\angle -90,23^\circ$	$14,97\angle -90,08^\circ$	$11,3\angle -25,74^\circ$

4.3.2 Distribuerte spoler sin påvirkning på sentralspolen

I dette underkapittelet skal det gjøres simuleringer for å undersøke i hvilken grad de distribuerte spolene er i stand til å avlaste sentralspolen. Det gjøres ved å se på sammenhengen mellom distribuerte spoler, kompenseringsgraden og strømmen gjennom jordslutningen. Det skal også gjøres simuleringer for å undersøke i hvilken grad plasseringen av de distribuerte spolene påvirker tilhørende induktive bidrag.

Simuleringen i tabell 12 viser de induktive bidragene fra de tre spolene i modellen og resulterende jordslutningsstrøm. Strømmen fra de distribuerte spolene er resultatet mellom beregnet induktans fra likning 21 og nullpunktsspenningen i jordingstransformatoren. Sentralspolen innstilles fortløpende for en overkompensering på 5A. Overgangen fra sentralkompensering, til bruk av distribuerte spoler ved samleskinne er minimal. Amplituden på strømmen er akkurat den samme, og summen av de induktive bidragene tilsvarer den induktive strømmen til sentralspolen ved sentralkompensering. Dette viser at for hver ampere de distribuerte spolene bidrar med, kan sentralspolen bidra med en mindre.

For overgangen fra distribuert kompensering på samleskinnen til enden av kabelstrekket viser simuleringen at den totale kapasitive lekkasjen på nettet synker med 0.2A. Dette er

Tabell 13: Metallisk jordslutningsstrøm på vektorform, ved bruk av distribuerte spoler

Konfig. \ Verdi	Absoluttverdi[A]	Vinkel[°]
Resonans	10.0	-0.02
5A overkompensering	11.30	-25.74
5A overkompensering, med parallellmotstand	20.60	-13.63

grunnen til at summen av de induktive bidragene på nederste rad er 343.8 og ikke 344A. Den resulterende strømmen gjennom jordslutningen er ved denne konfigurasjonen noe mindre enn for de andre. Det gjøres derfor videre simuleringer for å kontrollere om den resistive strømflyten har minket. Simuleringene i tabell 12 tar for seg den lengste plasseringsforskjellen det er mulig å ha på distribusjonsnettet i Trysil. De minimale forskjellene ved endret plassering tyder på at for nett med kort strekk som Trysil er plasseringen av spolene av mindre betydning. Tabellen viser også at de distribuerte spolene ved begge tilfellene har den ønskede effekten med å avlaste sentralspolen.

For å undersøke endringen i den resistive strømflyten gjøres det tilsvarende simulering som i tabell 4. Jordslutningsstrømmen simuleres ved resonans, 5A overkompensert og 5A overkompensert med innkoblet parallellmotstand. Simuleringene gjøres ved distribuert kompensering på enden av kabelstrekene på Fageråsen og Håvi.

Resultatet fra tabell 13 viser at den resistive strømflyten er tilnærmet uendret, men med en liten differanse. Denne er omtrent 0.3A lavere enn fra simuleringene med ren sentralkompensering fra tabell 4. Ettersom differansen på jordslutningsstrømmen vist i tabell 12 kun gjelder for spolekompensering på enden av kabelen, kan resultatet tyde på dempet resistivt bidrag fra serieimpedansen i nullsystemet.

Oppsummering

Gjennom underkapittelet er det gjort simuleringer for å undersøke hvordan de distribuerte spolene avlaster sentralspolen. Det er også undersøkt hvordan plasseringen av de distribuerte spolene påvirker de induktive bidragene til spolene. Simuleringene viser at en ampere fra en distribuerte spole tilsvarer en ampere av sentralspolen. Samtidig viser simuleringene at plasseringen av de distribuerte spolene har liten betydning. Det ble påvist en liten resistiv demping ved plassering på enden av linjen.

Drøfting

Distribuerte spoler avlaster sentralspolen uavhengig av plassering. Som beskrevet i underkapittel 2.4.3 vil spenningsfordelingen i nullsystemet være den samme ved korte kabelstrekk. Simuleringer samsvarer med teorien. Resultatet fra simuleringene viser at den totale kapasitive lekkasjen minker ved endret plassering. Dette er ikke forventet. Simuleringene viser at spenningen i enden av kabelstrekket minker ved en spoleplassering på enden av kabelstrekket. Dette er grundigere beskrevet i underkapittel 4.3.3. Det er forventet at vinkelen på feilstrømmen er den samme ved distribuert kompensering på samleskinnen som ved ren sentralkompensering. Det er en liten differanse. Denne kan skyldes unøyaktig innstilling på sentralspolen. Det er en liten resistiv differanse i strømmene, og denne er ikke forventet. Dette kan tyde på at de distribuerte spolene kompenserer for resistive tap på serieimpedansen i nullsystemet. Det kan også skyldes at spenningen i nullsystemet er noe lavere.

4.3.3 Feillokasjon, plassering

I dette underkapittelet skal distribuerte spolers innvirkning på nullsystemsimpedansen kartlegges. I underkapittel 4.2.3 ble det gjort simuleringer for å undersøke serieimpedansen i nullsystemet. Samt pluss- og minussystemet sin påvirkning ved økende kabel-lengde. Det ble konkludert med at for kabelstrekk opp mot 50km vil serieimpedansen i de

symmetriske systemene ha stor betydning for kompenseringsgrad og størrelsen på jord-slutningsstrømmen.

For simuleringer i dette underkapittelet monteres det distribuerte spoler med tilsvarende resonans for hver 10.km med kabel. Dette gjøres for å undersøke om det er mulig å fjerne spenningsfall fra serieimpedansen i nullsystemet ved å øke shuntimpedansen. Metoden er beskrevet i underkapittel 2.5.2. For simuleringene brukes det på samme måte som i kapittel 4.2.3 komponenten "Distributed Parameters Line" isteden for "Three-Phase PI Section Line". Som beskrevet i underkapittel 4.1 setter komponenten "Three-Phase PI Section Line" kun opp en pi-modell. Dette resulterer i feilaktige resultater ved lange kabelstrekk. Fordelen er at denne resulterer i kortere simuleringstid. Ved å endre kabelmodellering i simuleringene oppstår det små avvik mellom verdiene i dette underkapittelet og i de resterende.

For å realisere resonans hver 10.km seriekobles det 10km lange kabelstrekk hvor det i hver overgangene monteres distribuerte spoler. For simuleringer på det faktiske nettet i Trysil deles strekket på 12.743km i to. Det monteres distribuerte spoler tilsvarende resonans i oppdelingen. Ved å montere distribuerte spoler i resonans med tilhørende kapasitans vil disse tilsvare en uendelig stor reaktans. Modellen tar hensyn til resistive tap i spolene. Dette i tillegg til små avvik i resonansinnstillingen medfører at shuntimpedansen ikke tilsvare en uendelig reaktans, men en stor impedans.

Simuleringene i tabell 14 viser tydelig at teorien rundt kompensering for spenningsfall fra serieimpedansene i nullsystemet stemmer. Dette fordi vinkelen på feilstrømmer er den eksakt samme ved begge feillokasjonene. Det kan dermed konkluderes at distribuerte spoler i resonans med tilhørende linjestrekk, ved 10km mellomrom er i stand til å utelukke spenningsfallene fra serieimpedansen i nullsystemet. Den beskrevne virkemåten til de dis-

Tabell 14: Nullsystemspenning og jordslutningsstrøm ved variabel feillokasjon hvor hver 10. kilometer med kabel er i resonans med tilhørende distribuerte spoler

L. [km]	Samleskinne			Enden av kabel		
	$ U_{0n} [kV]$	$ U_{0end} [kV]$	$I_{jf} [A]$	$ U_{0n} [kV]$	$ U_{0end} [kV]$	$I_{jf} [A]$
12.743	16.62	16.83	$11,65 \angle -25,0^\circ$	16.22	16.49	$11,34 \angle -25,0^\circ$
50	16.73	16.84	$16,41 \angle -18,1^\circ$	15.34	15.79	$15,0 \angle -18,1^\circ$
125	16.90	16.51	$25,35 \angle -11,6^\circ$	14.10	14.95	$21,49 \angle -11,6^\circ$

tribuerte spolene i resonans med tilhørende kapasitans er demonstrert i figur 10. En annen viktig observasjon er at jordslutningsstrømmen, selv for jordslutning ved samleskinne, er mye lavere ved denne konfigurasjonen. Dette kan sees ved å sammenligne resultatet med tabell 5 for sentralkompensering. Dette tyder på at de høye resistive strømmene i tabell 5 er et resultat av spenningsfall fra serieimpedansen i nullsystemet.

Som beskrevet i kapittel 2.5 kompenserer de distribuerte spolene ikke for tapene i pluss- og minussystemet. Dette kan sees i tabell 14 ved at spenningen i nullsystemet synker ved feil på enden av linjen. Dette er illustrert i figur 8a. Ved en feillokasjon på enden av linjen vil impedansene i pluss- og minussystemet danne spenningsfall som senker spenningen i nullsystemet. Simuleringen viser at så lenge serieimpedansen i nullsystemet kompenseres for, vil spenningsfallet i pluss- og minussystemet ha liten betydning. Det er spenningsfordelingen i nullsystemet som er avgjørende for kompenseringsgraden.

For simuleringene i dette underkapittelet ble det først, ved en feil, også innsatt distribuerte spoler på enden av linjen. Dette medførte at vinkelen på jordfeilstrømmen var lavere, altså mer induktiv ved feil på enden av linjen enn på samleskinnen. Ved å montere spoler på enden av linjen får denne lokasjonen ha en høyere kompenseringsgrad enn på resten av linjen. Spolene på enden kompenserer kun for forankoblede linjer, og ikke fra begge ret-

Tabell 15: Nullsystemspenning og jordslutningsstrøm med variabel feillokasjon. Sammenligning mellom dagens situasjon, og anbefalt bruk av distribuerte spoler

Konfig.	Samleskinne			Enden av kabel		
	$ U_{0n} [kV]$	$ U_{0end} [kV]$	$I_{jf}[A]$	$ U_{0n} [kV]$	$ U_{0end} [kV]$	$I_{jf}[A]$
Uten DS	16.57	16.92	$11,93\angle -27,0^\circ$	16.08	16.49	$11,50\angle -26,6^\circ$
Med DS	16.59	16.87	$11,46\angle -26,2^\circ$	16.15	16.49	$11,12\angle -26,0^\circ$

ninger som resten av spolene. Dette er nok grunnen til at spenningen på enden av linjen for et kabelstrek på 125km er lavere enn de andre to ved en jordslutning på samleskinne. Fordi de siste distribuerte spolene har et kabelstrek på 10km på den ene siden, og 5km på den andre. For eksakte simuleringer rundt dette skulle strekket vært 120 eller 130km, men strekket ble beholdt på 125km. Dette for bedre nøyaktighet ved sammenligning med tidligere simuleringer rundt feillokasjon.

I underkapittel 4.2.3 ble det bevist at serieimpedansen i nullsystemet har høy betydning for kompenseringsgraden ved endret feillokasjon. I dette underkapittelet er det bevist at serieimpedansen kan kompenseres for ved stor bruk av distribuerte spoler. Dette gir samme kompenseringsgrad for alle feillokasjoner. Dette resultatet samsvarer med teorien, men vil sjelden forekomme i praksis. Det gjøres derfor simuleringer for å avgjøre en anbefaling for plassering av et fåtall distribuerte spoler. Det gjøres ved å kontrollere om bruk av to distribuerte spoler i Trysil på avgangene Fageråsen og Håvi har innvirkning på feilstrømmene. Simuleringene utføres på samme måte som tidligere på Fageråsen, ettersom denne avgangen inneholder det lengste strekket.

Resultatet fra simuleringen i tabell 15 viser at allerede ved bruk av kun en distribuert spo-

le senkes påvirkningen til serieimpedansen i nullsystemet. Tabellen viser at påvirkningen til serieimpedansen i nullsystemet ved dagens drift av distribusjonsnett i Trysil er veldig lav, men at det er en liten differanse mellom vinklene på feilstrømmene ved endret feillokasjon. Denne vinkeldifferansen minker ved bruk av den distribuerte spolen. Dette tyder på at påvirkningen fra serieimpedansen i nullsystemet minker ved innsatt spole, og dermed at kompenseringsgraden er jevnere over hele strekket. Dette kan også sees ved at differansen mellom spenningene i nullsystemet minker.

Spoleplassering ved lange kabelstrekk

Simuleringene viser at distribuerte spoler i resonans med tilhørende kapasitans er i stand til å neglisjere serieimpedansen i nullsystemet totalt. Selv ved bruk av kun en distribuert spole på enden av et kabelstrekk på 12.743km vil påvirkningen av serieimpedansen i nullsystemet dempes. For å danne en mer generell forståelse for gunstig plassering av distribuerte spoler gjøres det videre simulering på en avgang som kun består av ett kabelstrekk på 25km. Dette er et langt, men realistisk kabelstrekk. Som beskrevet i underkapittel 2.4.3 vil serieimpedansen i nullsystemet først ha særlig påvirkning etter 20km.

Det gjøres simuleringer for å undersøke hvor på kabelstrekket det er gunstig å plassere distribuerte spoler. Som vist i tabell 14 er resonans optimalt for kompensering av serieimpedansen i nullsystemet. Dette vil nok ikke være et realistisk valg for kraftselskap med hensyn på kostnader. Simuleringene viser at kabelstrekket på 25km har et kapazitivt egenbidrag på 118A, og et resistivt egenbidrag på 3A. De resistive tapene i nettet er på 23.7A. Disse tallene gir i følge likning 6 et anbefalt egenbidrag på 72.3A. Det brukes dermed tre distribuerte spoler. Disse senker egenbidraget til 73A. Videre gjøres det simuleringer med tre distribuerte spoler på denne avgangen for å avgjøre hvor det er mest gunstige å plassere disse.

Tabell 16: Nullsystemspenning og jordslutningsstrøm med variabel feillokasjon, og variabel plassering av tre distribuerte spoler. Simuleringene utføres på en avgang bestående av kun et kabelstrekk på 25km. Kabelstrekket er delt i tre seksjoner, hver på 8.33km. Tallene i konfigurasjonen symboliserer lokasjon og antall spoler i forhold til de tre kabelseksjonene

Konfig.	Samleskinne			Enden av kabel		
	$ U_{0n} [kV]$	$ U_{0end} [kV]$	$I_{jf}[A]$	$ U_{0n} [kV]$	$ U_{0end} [kV]$	$I_{jf}[A]$
3000	16.78	17.40	$14,6\angle -20,1^\circ$	15.65	16.39	$13,29\angle -18,1^\circ$
0111	16.78	17.19	$12,66\angle -23,4^\circ$	15.86	16.39	$11,86\angle -22,3^\circ$
0021	16.78	17.15	$12,57\angle -23,9^\circ$	15.90	16.39	$11,83\angle -23,0^\circ$
0012	16.78	17.12	$12,59\angle -23,8^\circ$	15.93	16.39	$11,90\angle -23,1^\circ$
0003	16.78	17.08	$12,66\angle -23,4^\circ$	15.96	16.39	$11,98\angle -22,8^\circ$

Resultatet fra simuleringen er vist i tabell 16. Den øverste raden i tabellen representerer de tre distribuerte spolene plassert ved samleskinne, men etter retningsvernet på avgangen. Denne konfigurasjonen tilsvarer ren sentralkompensering, med unntak av egenbidraget på avgangen. Resultatene viser at når de distribuerte spolene nærmer seg enden av kabelstrekket minker betydningen av feillokasjonen. Lav differanse mellom vinklene på jordslutningsstrømmen, og lav differanse mellom nullsystemspenningene ved endret feillokasjon tyder på lavt spenningsfall i nullsystemet. Dette er den ønskede effekten ved plassering av spolene. Det er også ønskelig med lav jordslutningsstrøm. Tabell 16 viser at for kabelstrekk under 25km vil optimal kompensering oppstå ved plassering av de distribuerte spolene på enden av strekket. For å undersøke om dette kan angis som en generell anbefaling gjøres det tilsvarende simuleringer for kabelstrekk på 45km. Valg av distribuerte spoler gjøres på samme måte med utgangspunkt i en tripsektor på $\pm 80^\circ$. Dette resulterer i ni distribuerte spoler.

For beskrivelse av resultatene fra simuleringen vist i tabell 17 brukes konfigurasjonsnummerering. Ønskelig effekt for plasseringen er som beskrevet liten differanse mellom

Tabell 17: Nullsystemspenning og jordslutningsstrøm med variabel feillokasjon, og variabel plassering av ni distribuerte spoler. Simuleringene utføres på en avgang bestående av kun ett kabelstrek på 45km. Kabelstrekket er delt i tre seksjoner, hver på 15km. Tallene i konfigurasjonen symboliserer lokasjon og antall spoler i forhold til de tre kabelseksjonene

Konfig.	Samleskinne			Enden av kabel		
	$ U_{0n} [kV]$	$ U_{0end} [kV]$	$I_{jf}[A]$	$ U_{0n} [kV]$	$ U_{0end} [kV]$	$I_{jf}[A]$
9000	16.82	18.32	$31,52\angle - 8,9^\circ$	14.27	16.01	$25,03\angle - 2,3^\circ$
0900	16.83	17.74	$20,01\angle - 14,8^\circ$	14.87	16.02	$17,12\angle - 10,9^\circ$
0090	16.83	17.18	$16,09\angle - 18,1^\circ$	15.40	16.03	$14,72\angle - 16,9^\circ$
0009	16.83	16.60	$18,81\angle - 15,0^\circ$	15.87	16.01	$18,32\angle - 16,1^\circ$
0450	16.83	17.44	$16,24\angle - 18,6^\circ$	15.18	16.03	$14,36\angle - 16,2^\circ$
0333	16.83	17.19	$15,51\angle - 18,9^\circ$	15.41	16.03	$14,20\angle - 17,6^\circ$
0234	16.83	17.06	$15,61\angle - 19,1^\circ$	15.52	16.03	$14,5\angle - 18,4^\circ$
0225	16.83	17.00	$15,95\angle - 18,5^\circ$	15.57	16.02	$14,85\angle - 18,1^\circ$
0126	16.83	16.87	$16,47\angle - 17,9^\circ$	15.68	16.02	$15,60\angle - 18,0^\circ$
0063	16.83	16.93	$15,88\angle - 17,7^\circ$	15.57	16.03	$14,70\angle - 18,4^\circ$

jordslutningsvinkel, liten differanse mellom nullsystemspenningen og lav jordslutningsstrøm. Disse tre indikatorene tyder på lav innvirkning av serieimpedansen i nullsystemet. De optimale målene basert på disse indikatorene oppstår ikke ved samme plassering, resultatene er dermed ikke entydige. Den laveste jordslutningsstrømmen oppstår ved den jevne fordelingen 0333. Den minste vinkeldifferansen oppstår ved tyngde mot slutten på strekket ved 0126. Mens den laveste differansen i nullsystemspenning oppstår ved full tyngde på slutten av strekket 0009.

Simuleringene viser at for plasseringen 0009 avtar nullsystemspenningen gradvis ved endret feillokasjon. Jordslutningsstrømmen derimot simuleres mellom kabelseksjon 1 og 2 til å være $18,07 \angle -14,04^\circ A$. Dette er lavere enn strømmen både før og etter kabelstrekket. Dermed er ikke strømmen gradvis avtakende. Simuleringene i tabell 17 viser også at for denne konfigurasjonen øker jordslutningsstrømmen og vinkelen minker. Dette tyder på økt resistive spenningsfall fra serieimpedansen i nullsystemet, mens den lave spenningsforskjellen mellom U_{0n} og U_{0end} tyder på at dette spenningsfallet er lavt.

Tabell 17 viser at når alle de distribuerte spolene er samlet på enden av kabelstrekket vil en jordslutning på enden av kabelen ha en lavere vinkel enn for samleskinnen. Dette gjelder for plasseringer som har en veldig tyngde mot slutten av strekket, og skyldes overkompenseringen de distribuerte spolene medfører. Denne vinkel-minkingen oppstår ikke ved de andre konfigurasjonene, selv ved feillokasjon på plasseringen til spolene ved plassering 0900 og 0090. Dette er nok fordi disse plasseres mellom to kabelstrekk, og ikke på enden av et.

For simuleringene stilles sentralspolen fortløpende for å tilsvare en overkompensering på 5A. Grunnen til at denne ikke er konstant er at den kapasitive lekkasjen fra kabelstrekket minker ved endret plassering av spolene. En forklaring på dette kan være at U_{0end}

minker for samleskinnefeil ved overgangen fra 9000 til 0009. Lavere spenning i nullsystemet gir resulterende lavere strøm, både fra induktanser og kapasitanser. For plassering 9000 og samleskinne jordslutning registrerer retningsvernet med innkoblet parallellmotstand en vinkel på $-77,2^\circ$. Samtidig som det kapasitive egenbidraget er på 219.8A, og induktivt egenbidrag er på 151.6A. For plassering 0009 simuleres en vinkel på $-76,4^\circ$, et kapasitivt egenbidrag på 209.5A, og et induktivt egenbidrag på 148A. Vinkeldifferansene viser at det kapasitive egenbidraget synker i større grad enn det induktive bidraget i nettet. Dette skyldes nok at spenningen over sentralspolen ikke påvirkes av plassering for samleskinnefeil. Ettersom dette er plasseringene med høyeste og laveste U_{0end} vil resterende plasseringer ligge mellom disse verdiene.

Oppsummering

Dette underkapittelet har vist at ved bruk av distribuerte spoler tilsvarende resonans for hver 10. kilometer vil serieimpedansen i nullsystemet være ubetydelig. Dermed vil kompenseringsgraden være den samme over hele kabelen uavhengig av feillokasjon. Spenningsfallet i pluss- og minussystemet er fortsatt tilstede, men dette vil kun senke jordslutningsverdiene, ikke påvirke kompenseringsgraden. Simuleringene viser også at ved å kompensere for serieimpedansen i nullsystemet vil også jordslutningsstrømmen være lav.

Det gjøres også simuleringer for å undersøke om anbefalingen for bruk av en distribuert spole på Fageråsen vil påvirke målingene ved endret feillokasjon. Simuleringene viser at selv ved bruk av kun en distribuert spole kan det sees en liten, men gunstig effekt av at betydningen til serieimpedansen i nullsystemet dempes.

Det er også gjort omfattende simuleringer rundt plassering av distribuerte spoler på lange kabelstrekk. For simuleringene er utgangspunktet for antall spoler en tripsektor på $\pm 80^\circ$ med en sikkerhetsmargin på 5° . For kabelstrekk opp til 25km vil plassering av all distribu-

ert kompensering på enden av kabelen gi den beste spenningsfordelingen i nullsystemet. For kabelstrekk opp til 45km er ikke resultatene entydige. Simuleringene viser at en fordeling av spoler på hele strekket, men med en betydelig tyngde mot enden av kabelstrekket, gir best resultater.

Drøfting

Simuleringene for kabelstrekk i resonans stemmer godt overens med teorien fra underkappittel 2.5.2. Ved et nett i perfekt resonans vil nullsystemesspenningen være den samme over hele strekket. Dette er ikke tilfellet for de presenterte resultatene. Dette skyldes hovedsakelig nullsystemsimpedansen på spenningskilden til sentralspolen. Målingene på enden av strekket gjøres med ideelt utstyr. Målemetoden er vist i punkt 25 i vedlegg F. Ved å bruke tilsvarende prinsipp for nullsystemspenningen på samleskinnen med ideelt utstyr for konfigurasjonen i tabell 15, med bruk av distribuerte spoler og feillokasjon på enden av kabelen simuleres en spenning på 16.41kV. Dette tyder på at spenningsfordelingen i nullsystemet er bedre enn de presenterte resultatene. De presenterte resultatene er den faktiske spenningen over sentralspolen, og ikke summen av spenningen over spenningskilden og sentralspolen. Ved perfekt resonans, og måling uavhengig av nullsystemsimpedansen på spenningskilden ville spenningene vært identiske. Det at vinklene på jordslutningsstrømmen er identiske, selv ved små avvik i spenningene tyder på at serieimpedansen i nullsystemet kan neglisjeres selv ved tilnærmet resonans.

For simuleringer rundt plassering av distribuerte spoler vil anbefalingen tilknyttet kabelstrekk opp til 25km være den mest realistiske. Det vil sjelden forekomme avganger med kabelstrekk lengre en dette. Det vil altså i de aller fleste tilfeller anbefales å plassere distribuerte spoler på enden av kabelstrekket. Resultatene ved denne plasseringen viser at dette ikke er plasseringen med lavet jordslutningsstrøm, men med den minste differanse på jordslutningsvinkel og nullsystemspenning. Det er dermed den plasseringen med jev-

nest kompenseringsgrad.

Resultatene for plassering av spoler på et 45km langt kabelstrekk er ikke forventet. Basert på presentert teori i underkapittel 2.5.2 skulle plasseringen 0450 være optimal. Denne plasseringen gir greie resultater, men langt fra de beste. Dette kan skyldes at teorien rundt plassering kun tar for seg spoler tilsvarende resonans. Det er ønskelig med lav differanse mellom jordslutningsvinklene, liten differanse mellom nullsystemspenningen og lav jordslutningsstrøm. De beste resultatene for disse tre inntreffer ikke ved samme plassering. Liten innvirkningen av serieimpedansen i nullsystemet gir liten differanse i nullsystemspenningen. Dette gir resulterende lav jordslutningsstrøm og jevn kompenseringsgrad. Disse verdiene er derfor forventet å inntreffe ved samme konfigurasjon. Resultatene viser at forventede sammenhenger ikke er tilstede, men at differansen er liten og at flere av plasseringene er gode.

Ved jordslutning på samleskinnen med innkoblet parallellmotstand simuleres en vinkel på $-77,2^\circ$ i retningsvernet tilhørende kabelstrekket på 45km. Dette betyr at det er valgt for få distribuerte spoler for å oppnå utgangspunktet på -75° . Det ble beregnet antall distribuerte spoler basert på resistiv strømflyt før spolene ble innsatt. Dette er ikke en utfordring ved bruk av få spoler, men ved høy bruk vil dette tilsynelatende ha utslag. Dette er fordi resistive tap i sentralspolen tildels flyttes til avgangen, og er dermed en del av egenbidraget som ikke registreres av vernet. Ved tilfeller hvor det skal monteres en stor mengde distribuerte spoler må dette tas i betraktning.

Resultat for plassering av distribuerte spoler ved kabelstrekk opp til 45km er ikke entydig. Det er gjort simuleringer for veldig mange plasseringer. Ettersom resultatet ikke er som forventet, er det presentert målinger for mange av plasseringene. Ettersom de beste resultatene inntreffer ved forskjellig plassering kan det ikke gis en spesifikk anbefaling.

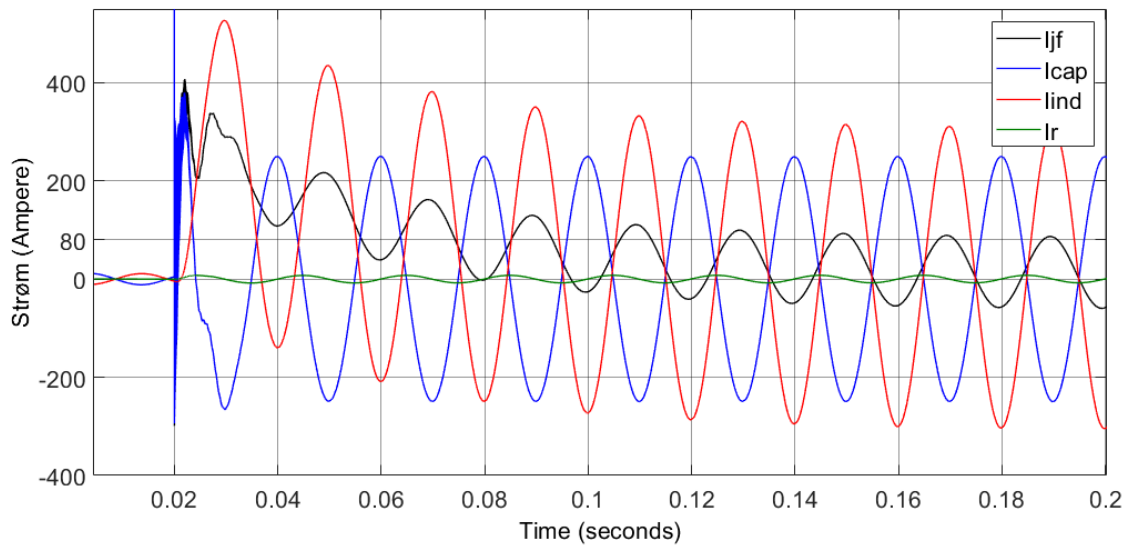
Resultatene viser at ved en for stor tyngde på enden av kabelstrekket, som 0009, 0126 og 0063 vil vinkelen være høyere ved jordslutning på enden av strekket enn på samle-skinnen. Dette gir uønskede og uforutsigbare målinger ettersom simuleringene viser at jordslutningsstrømmen på midten av strekket ikke ligger mellom intervallet til strømmen før eller etter kabelstrekket.

En endelig anbefaling av plassering til distribuerte spoler for kabelstrekk mellom 25- og 45km er at spolene skal fordeles over hele kabelstrekket, men med en betydelig tyngde mot slutten. Dette er en anbefaling som for simuleringene ville resultert i 0234, 0225 og 0126. Disse plasseringene har alt i alt best verdier med lav jordslutningsstrøm, liten vinkeldifferanse og liten spenningsdifferanse.

4.3.4 Nettets påvirkning av endret nettkonfigurasjon

I dette underkapittelet skal det undersøkes hvordan distribuerte spoler påvirker strømflyten ved bortfall av avganger og jordslutninger. Dette er en av de sikkerhetsmessige utfordringene for spolekompenserte nett. I underkapittel 4.2.4 ble det simulert en jordslutning på enden av Håvi sitt lengste strekk med innkoblet parallellmotstand hvor Fageråsen var bortkoblet. Dette ble gjort for å bevise at nettet er i en kritisk tilstand i mellomrommet mellom endret nettkonfigurasjon og re-instilt sentralspole. Videre i dette underkapittelet skal samme simuleringer gjøres for å undersøke hvordan de distribuerte spolene påvirker strømkurvene.

Resultatet fra simuleringen er vist i figur 29. Figuren viser at feilstrømmen er senket tilsvarende verdien på den distribuerte spolen. Dette er fordi spolen senker det totale egenbidraget på avgangen. Dermed oppstår det en mindre differanse mellom jordslutningsstrømmen ved innkoblet og utkoblet avgang. Det kan sees på figuren at strømmen stabiliseres på rundt 80A. Dette kan beregnes fra jordslutningsstrømmen fra tabell 13 pluss egenbi-

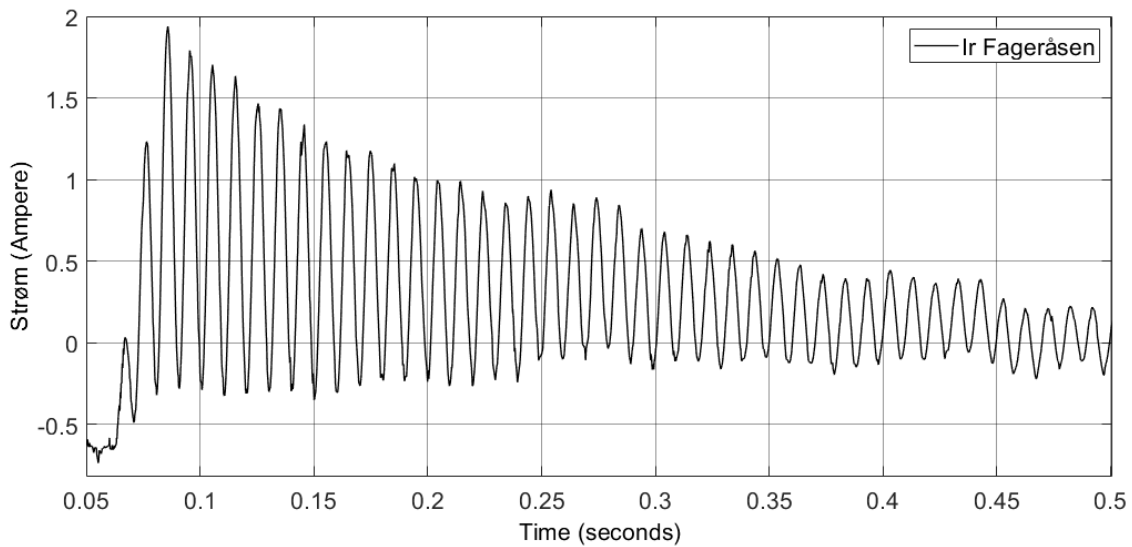


Figur 29: Jordslutningsstrøm ved bruk av distribuerte spoler. Feilen oppstår på enden av det ene kabelstrekket på Håvi etter 0.02s. Fageråsen er utkoblet, mens sentralspolen er instilt for normal konfigurasjon. Parallellmotstanden er innkoblet

draget på avgangen. Dette gir $20,6\angle -13,63^\circ + (87 - 15)\angle -90 = 79,4\angle -75,4^\circ$, og dette stemmer godt med figur 29.

Oscillasjoner ved bortfall av feil

Som beskrevet i underkapittel 2.6.2 vil det etter en jordslutning være etterfølgende oscillasjoner. Dette vil si at nullsystemsverdiene går fra feilaktige til normale gjennom svingninger. Hvordan disse oscillasjonene ser ut, og tilhørende frekvensen på dagens nett er vist i underkapittel 4.2.4. Frekvensen på oscillasjonene vil ved distribuerte spoler være den samme som sentralkompenserte nett ved slukking av lysbue. Ved avgangutkobling med distribuert spole vil frekvensen på etterfølgende svingninger være mindre avvikende fra nettfrekvensen ettersom det utkoblede egenbidraget er lavere. Det gjøres derfor ikke simuleringer på dette i underkapittelet. Et annet viktig tema for oscillasjoner ved bortfall av feil er transient polaritetsendring av resistiv strøm. Som beskrevet i underkapittel 2.6.2 er avganger med distribuerte spoler ekstra utsatt for denne typen oscillasjoner. Det gjøres



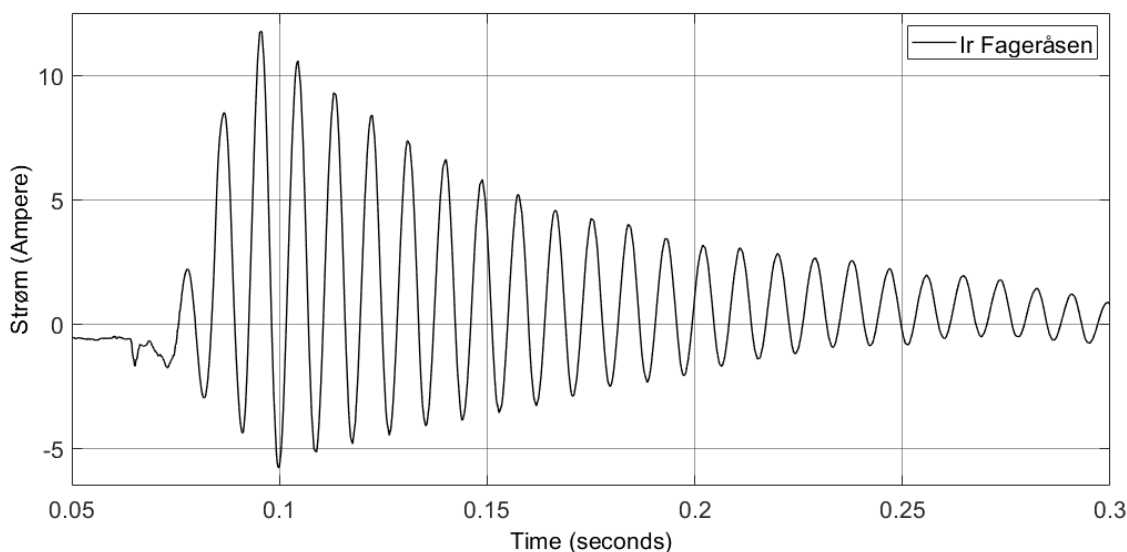
Figur 30: Resistive oscillasjoner på Fageråsen utstyrt med en distribuert spole ved bortfall av kortvarig jordfeil på samleskinnen. Parallellmotstanden er ikke tilkoblet, feilen forsvinner ved 0.06s

derfor simuleringer for å undersøke dette.

Middelverdien på den resistive strømmen registrert på Fageråsen i øyeblikket en kortvarig feil slukkes er beregnet under. Beregning er basert på likning 8. De resistive bidragene på nettet er hentet fra tabell 13, mens det resistive egenbidraget på Fageråsen er hentet fra simuleringene. Denne kan også ses i begynnelsen av forløpet på figur 30 før feilen forsvinner.

$$I_R = 11,30 \cos -25,74 * \frac{87 + 15}{344 + 339} - 0,63 = 0,903A$$

Figur 30 viser at den transiente resistive strømmen samsvarer med den beregnede verdien. Figuren viser også at den distribuerte spolen på Fageråsen øker middelverdien på strømmen. Dette kan sees på figur 25 hvor den beregnede middelverdien er 0.835A. Økningen



Figur 31: Resistive oscillasjoner på Fageråsen utstyrt med en distribuert spole ved utkobling av jordsluttet avgang Håvi. Håvi er utstyrt med en distribuert spole. Parallellmotstanden er innkoblet, feilen forsvinner ved 0.06s

er lav. Det gjøres videre simuleringer for det kritiske tilfellet hvor jordsluttet avgang Håvi bortkobles med tilkoblet parallellmotstand. Beregningen for dette tilfellet er vist under. Totale resistive bidrag er hentet fra tabell 13. Det resistive egenbidraget til Håvi er 0.62A, og det resistive egenbidraget til Fageråsen er 0.63A, begge hentet fra simuleringene.

$$I_R = (20,6 \cos(-13,63) - 0,62) * \frac{87 + 15}{344 + 339 - 82} - 0,63 = 2,66A$$

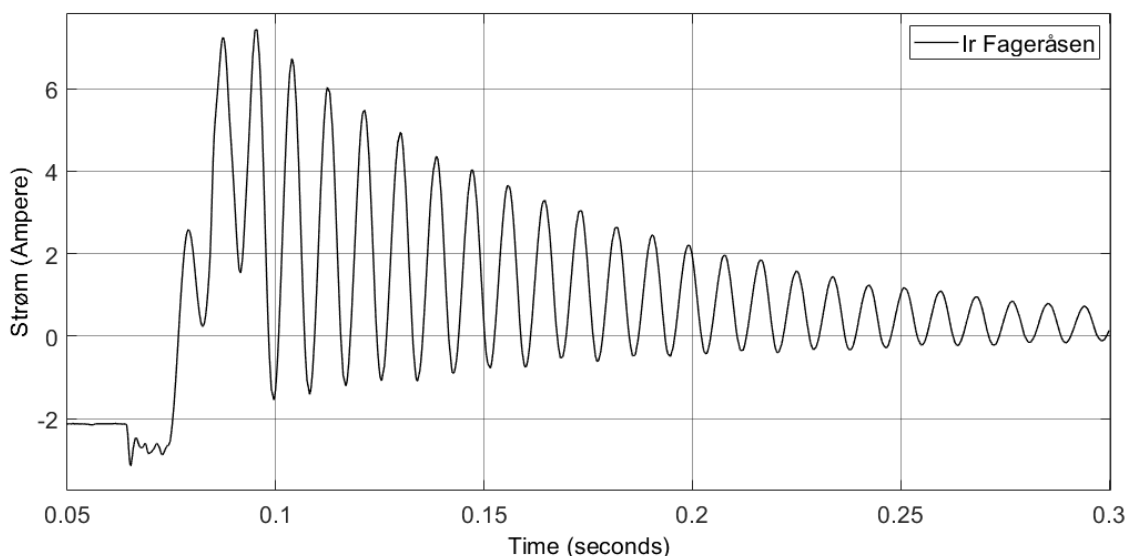
Simuleringen vist i figur 31 viser at middelverdien på den transiente positive resistive strømmen stemmer med beregning. Denne verdien er også høyere enn verdien uten distribuerte spoler fra figur 26. Beregningen over viser at ettersom Håvi har en distribuert spoler er de resistive bidragene på denne avgangen større enn tidligere. Dette senker middelverdien på den resistive strømmen. Med den nye kunnskapen om at distribuerte spoler øker størrelsen på den transiente positive resistive strømmen gjøres det simuleringer for å

undersøke om økt antall av distribuerte spoler kan øke faren for feilutkobling.

Den verst tenkelige situasjonen er når Fageråsen er den eneste avgangen med distribuerte spoler, og at denne har så mange distribuerte spoler som mulig. Det lages derfor en simuleringsmodell hvor det er fem distribuerte spoler på Fageråsen. Dette er antallet egenbidraget på avgangen tåler før avgangen blir overkompensert. Feilen bortkobles fra Håvi, med tilkoblet parallellmotstand. Ettersom montering av distribuerte spoler har vist seg å medføre en liten endring i den resistive strømflyen hentes det ut nye tall på jordslutningsstrøm ved den nye nettkonfigurasjonen. Simuleringene viser en jordslutning på $20,85 \angle -14,8^\circ$, og et egenbidrag på $12,32 \angle 80^\circ$ på Fageråsen. Det er lite forandring på jordslutningsstrømmen, men det resistive egenbidraget på Fageråsen har økt betraktelig. Egenbidraget til Håvi uten distribuert spole simuleres til 0.36A. Beregningen er basert på likning 8.

$$I_R = (20,85 \cos -14,8 - 0,36) * \frac{87 + 15 * 5}{344 + 339 - 82} - 12,32 \cos 80 = 3,2A$$

Simuleringen i figur 32 viser et annet forløp enn tidligere. Etter et par perioder er svingningene tilbake til det normale. Det kan derfor være vanskelig å lese av middelverdien, men det kan ses at strømmen veksler rundt området på den beregnede verdien på 3.2A. Selv ved et ekstremt tilfelle hvor Fageråsen har fem distribuerte spoler og de andre avgangene i nettet er foruten spoler, er den transiente resistive strømmen aldri en trussel. Årsaken til dette kan sees i likning 8. Ved å øke nevneren i brøken ved distribuerte spoler, økes også subtrahenden grunnet resistive tap i spolene. Det er ingen tvil om at ved høye strømmer som denne på 3.2A måler retningsvernet på Fageråsen feilaktig at avgangen er jordsluttet. Dette er likevel ikke et problem ettersom svingningene raskt dør ut. Ettersom disse svingningene på samme måte som tidligere dør ut lenge før utløpt tidsforsinkelsen på vernet på 2s fra vedlegg D, gjøres det ikke videre simuleringer rundt dette.



Figur 32: Resistive oscillasjoner på Fageråsen utstyrt med fem distribuerte spoler ved utkobling av jordsluttet avgang Håvi. Parallellmotstanden er innkoblet, feilen forsvinner ved 0.06s

Simuleringene viser at retningsvernet på Fageråsen registrerer den transiente polaritetsendringen som at det er jordfeil på avgangen. I andre tilfeller kan dette medføre feilfunksjon hvis forløpet på polaritetsendringen varer lenger enn tidsforsinkelsen på jordfeilvernet. Som beskrevet i underkapittel 2.6.2 dør svingningene ut med en tidskonstant vist i likning 9. Det bør derfor alltid kontrolleres at tidsforsinkelsen til retningsvernet overstiger den tiden det tar før svingningene dør ut, hvilket er 5*tidskonstanten ($e^{-\frac{5\tau}{\tau}}$). Beregningen under er basert på likning 9, og tabell 13. Beregningen viser minste tidsforsinkelse retningsvern i Trysil må ha ved bruk av anbefalt spolekonfigurasjon for å overgå varigheten på de resistive svingningene.

$$T_F = 5\tau_p = 5 * \frac{2I_C}{\omega I_R} = 5 \frac{2 * 339}{2\pi * 50 * 11,3 \cos -25,74} = 1,06s$$

Det er flere faktorer som spiller inn for at vernet skal feilaktig koble ut. Den resistive strømmen må være høy nok til at den sammen med den reaktive strømflyten kommer

inn i tripsektoren på vernet. I tillegg må nullsystemspenningen, og strømmen gjennom vernet være høyere enn programerte kriterier. Dette betyr at det ikke er garantert at vernet vil feilaktig koble ut med en tidsforsinkelse lavere enn 1.06s, men ved en tidsforsinkelse høyere en denne vil feilfunksjon unngås.

Oppsummering

Ved bortfall av avgang med distribuert spole vil det i forhold til avgang uten spole, være mindre differanse mellom den resulterende og ønsket kompenseringsgrad. Dette gir et mindre sårbart nett ved endret nettkonfigurasjon. Ved bruk av distribuerte spoler øker den transiente polaritetsendringen på friske avganger ved bortfall av jordfeil. Denne økningen er såpass liten, og dør ut så raskt at selv ved simuleringer rundt de verst tenkelige scenariene vil det ikke være fare for feilutkobling ved bruk av lange tidsforsinkelser. I underkapittelet presenteres en metode for utregning av tidsforsinkelse på retningsvernet for å unngå feilutkobling av jordfeilvern. Det anbefales å alltid benytte denne metoden ved innstilling, eller kontroll av tidsforsinkelse på jordfeilvern.

Drøfting

At distribuerte spoler bidrar til en mindre differanse mellom ønsket kompenseringsgrad og faktisk kompenseringsgrad ved bortfall av avganger er forventet. Som beskrevet i teorien i kapittel 2.5 er dette grunnet det senkede egenbidraget. Det er også beskrevet i teorien i underkapittel 2.6.2 at distribuerte spoler øker den transiente polaritetsendingen. Simuleringene i dette underkapittelet har bekreftet dette, men også vist at forskjellen er liten. Dette på grunn av det økte resistive egenbidraget på avganger med distribuerte spoler. Dette anses som et viktig funn ettersom transient polaritetsendring av resistiv strømflyt i følge underkapittel 2.6.2 anses som en stor kilde for feilfunksjon av jordfeilvern. Funnene i dette underkapittelet har vist at det er fare for feilfunksjon, men at ved bruk av tidsforsinkelser som overstiger det transiente forløpet på nettet vil dette ikke være et problem.

Den beskrevde metoden for å unngå feilfunksjon av jordfeilvern ved transient polaritetsendring er en matematisk beregning basert på en likning 9. Beregningen gir et strengt krav med tanke på at målt amplitude på strøm- og spenningsvektoren basert på simuleringene allerede er lavere enn tripkravet ved dette tidspunktet. Denne tidsforsinkelsen sikrer at den resistive polaritetsendringen har dødd ut. Dette er derfor en streng, men sikker anbefaling. For nett uten utbredt jordingssystem kan det være utfordrende med lange tidsforsinkelser. I disse tilfellene kan avanserte admittansvern med CPS-funksjon vurderes.

4.3.5 Retningsvern

I dette underkapittelet skal det undersøkes hvordan distribuerte spoler påvirker verdiene til retningsvernene i nettet. I metoden i underkapittel 4.3.1 ble det avgjort antall distribuerte spoler med utgangspunkt i at jordfeilvern skal kunne driftes med den anbefalte tripsektoren på $\pm 80^\circ$. Gjennom underkapittelet skal det kontrolleres at spolene innfrir anbefalingen.

Det utføres simuleringer med samme forutsetninger som for simuleringene i underkapittel 4.2.6. Det gjøres simuleringer for å undersøke hva retningsvernene måler, både før og etter innkobling av parallellmotstanden. Resultatet fra simuleringen er vist i tabell 18. Tabellen viser at retningsvernet på Fageråsen registrerer en vinkel på $-75,82^\circ$ med innkoblet parallellmotstand. Det er altså en differanse på $0,82^\circ$. Som beskrevet i 4.3.1 ble det valgt en spole på denne avgangen i stedet for to. Differansen er derfor forventet. En gunstig effekt ved bruk av distribuerte spoler er at de resistive bidragene fra den distribuerte spolen trekker vektoren på friske avganger bort fra tripsektoren. Dette kan sees på de simulerte verdiene til Håvi. Simuleringer på dagens nett fra tabell 9 viser at vektoren på Håvi har en vinkel på $-90,2^\circ$, mens ved en tilkoblet distribuert spole er vinkelen på $-90,5^\circ$. Det er for et driftsikkerhetsperspektiv gunstig med stor sikkerhetsmargin. Det utføres tilsvarende simuleringer for jordfeil på Håvi for å undersøke om denne kommer

Tabell 18: Simulering av retningsvern på Fageråsen og Håvi, hver med en distribuert spole. Jordslutningen oppstår på Fageråsen

Konfig. / Avgang	Samleskinne uten pm [A]	Samleskinne med pm [A]	Enden av kabel uten pm [A]	Enden av kabel med pm [A]
Fageråsen	$77,4\angle - 82,9^\circ$	$79,3\angle - 75,82^\circ$	$75,4\angle - 82,92^\circ$	$76,9\angle - 75,78^\circ$
Håvi	$67,1\angle - 90,50^\circ$	$67,0\angle - 90,50^\circ$	$65,3\angle - 90,56^\circ$	$65,1\angle - 90,48^\circ$

Tabell 19: Simulering av retningsvern på Fageråsen og Håvi, hver med en distribuert spole. Jordslutning oppstår på Håvi

Konfig. / Avgang	Samleskinne uten pm [A]	Samleskinne med pm [A]	Enden av kabel uten pm [A]	Enden av kabel med pm [A]
Håvi	$72,6\angle - 82,44^\circ$	$74,5\angle - 74,88^\circ$	$71,3\angle - 82,35^\circ$	$73,1\angle - 74,89^\circ$
Fageråsen	$71,9\angle - 90,45^\circ$	$71,9\angle - 90,44^\circ$	$70,5\angle - 90,48^\circ$	$70,2\angle - 90,42^\circ$

innenfor anbefalingen på -75° .

Simuleringene i tabell 19 viser at Håvi er innenfor anbefalingen til RENbladet. Denne er beskrevet i underkapittel 2.6.3, og er på $\pm 80^\circ$, med en sikkerhets margin på 5° . Fageråsen er basert på tabell 18 på grensen, men det vurderes som unødvendig å montere enda en distribuert spole ettersom avviket er lite. Det kan sees på tabellene at Håvi trekkes lengre bort fra tripsektoren ved feil på Fageråsen, enn det Fageråsen gjøres ved feil på Håvi. Årsaken til dette er den samme som at Håvi kommer lengre inn i fjerde kvadrant ved feil, at har Håvi har lavere egenbidrag enn Fageråsen.

Fra et sikkerhetsperspektiv ser det på resultatet ut som at distribuerte spoler kun har positiv innvirkning. Det gjøres derfor simuleringer hvor Fageråsen og Håvi er overkompensert med distribuerte spoler for å undersøke om dette kan ha en uønsket effekt. Simuleringer

Tabell 20: Simulerte verdier for retningsvern på Fageråsen og Håvi. Hver overkompensert med distribuerte spoler. Simulering utføres på en nett med 5A overkompensering. Jordslutningen oppstår på Fageråsen

Konfig. \ Avgang	Samleskinne uten pm [A]	Samleskinne med pm [A]	Enden av kabel uten pm [A]	Enden av kabel med pm [A]
Fageråsen	14,6∠59,54°	21,5∠35,85°	14,4∠59,52°	21,1∠35,87°
Håvi	8,04∠109,7°	8,04∠109,6°	7,9∠109,5°	7,84∠109,7°

er vist i tabell 20. Ved å overkompensere avgangene vil strømvektorene ikke lengre være i tredje og fjerde kvadrant, men i første og andre. Det er montert syv spoler på Fageråsen, og seks på Håvi. Dette er antallet som skal til for at strømvektoren skal ligge i første kvadrant og ikke fjerde i forbindelse med en feil. For å simulere vektorer i første- og andre kvadrant må overkompenseringen til de distribuerte spolene overstige overkompenseringen på nettet. Ettersom overkompenseringen på avgangen er begrenset er den reaktive delen av strømmen liten. Den resistive delen gir dermed større utslag på vinkelen. Dette resulterer i at vinkelen til feilstrømmen nærmer seg X-aksen i større grad ved denne konfigurasjonen, enn tidligere.

Simuleringer i tabell 20 viser at det ikke er problematisk å montere distribuerte spoler tilsvarende overkompensering på avganger. Forutsatt at det brukes sektorbaserte retningsvern. Simuleringene viser at det kun er gunstig med begrenset overkompensering på avganger. Det medfører et lavere reaktivt egenbidrag og høyere resistivt egenbidrag. Dette hjelper med å skille mellom jordsluttet og frisk avgang. Det vil ikke være mulig å overkompensere alle avganger i denne grad. Det ville medført en økt jordslutningsstrøm, grunnet en økt total kompenseringsgrad. Simuleringene viser at det er få utfordringer knyttet til høy bruk av distribuerte spoler, med mindre bruken blir så høy at egenbidraget overstiger det potensielle kapasitive egenbidraget, eller at sentralspolen ikke kan innstilles til å

Tabell 21: Sensitivitet på nettet overkompensering av distribuerte spoler. Jordslutningen er på enden av Fageråsens lengste strekk ved tilkoblet parallellmotstand

Jordslutningsmotstand [Ω]	$ U_0 $ [kV]	$ I_{jf} $ [A]	$ Vern_{Fager} $ [A]	$\angle Vern_{Fager}$ [$^\circ$]
5175	1800	2.84	2.78	32.75
5250	1771	2.81	2.74	32.70

skape ønsket kompenseringsgrad.

Sensitivitet

Som vist i tabell 20 er amplituden på vektoren til retningsvernene nå lavere enn tidligere. Dette er fordi de distribuerte spolene kompenserer for egenbidraget. Dette kan by på utfordringer tilknyttet sensitiviteten på vernene. Basert på vedlegg D er størrelsen på strømkriteriet til retningsvernene 2A, og nullpunktsspenningen 1796V. Det ble i underkapittel 4.2.5 funnet at sensitiviteten på nettet i Trysil i dag er todelt, med innkoblet parallellmotstand 5250 Ω . For å undersøke om sensitiviteten på nettet er svekket ved høyt bruk av distribuerte spoler grunnet lavere reaktiv strømflyt gjøres det simuleringer hvor det innføres jordslutningsmotstander.

Resultatet fra simuleringene er vist i tabell 21. Resultatet viser at retningsvernene er korrekt innstilt til kun å være avhengig av resistiv strømflyt. Avgjørende faktor for sensitiviteten er derfor fortsatt nullpunktsspenningen. Simuleringen viser at ved denne spolekonfigurasjonen er sensitiviteten i nettet svekket fra 5250 Ω til 5175 Ω . Dette er en ubetydelig forandring, som er godt innenfor kravet på 3000 Ω , beskrevet i kapittel 2.6.

Harmoniske Komponenter

I underkapittel 4.2.6 er det vist at det er høy grad av harmoniske komponenter til stede ved forskjellige jordfeil. Det ble også beskrevet i underkapittel 2.6.4 at harmoniske kom-

Tabell 22: Diskre Fourier Transform av verdiene fra strømtransformatorene på jordsluttet avgang Fageråsen. Simuleringene gjøres ved forskjellige feillokasjoner og nettkonfigurasjoner ved bruk av en distribuert spole på både Fageråsen og Håvi. For analysen oppstår feilen etter 0.02s, og tallene hentes ut etter 0.04s. Parallellmotstanden er ikke tilkoblet

Frekvens/ Harmonisk orden	Samleskinne Uten last [%]	Samleskinne Med last [%]	Etter Fageråsens lengste strekk [%]
50Hz, (Fnd)	100	100	100
100Hz, (h2)	11.31	1.87	14.99
150Hz, (h3)	17.55	0.37	10.43
200Hz, (h4)	43.92	1.18	7.05
250Hz, (h5)	112.30	1.14	5.71
300Hz, (h6)	26.52	0.98	5.01

ponenter forekommer blant annet ved spoler i metning. Det gjøres derfor simuleringer for å undersøke om de harmoniske komponentene er påvirket etter innsatt distribuert spole på Fageråsen og Håvi. Simuleringene vist i tabell 22 utføres som tidligere. Det oppstår jordslutningen etter 0.02s, og DFT utføres etter 0.04s.

Tabell 22 viser resultatet fra simuleringen. De harmoniske komponentene er lite påvirket i forhold til ren sentralkompensering i tabell 11, men det er en liten økning.

Oppsummering

I dette underkapittelet er det bekreftet at ved bruk av en distribuert spole på Fageråsen og en på Håvi, vil hele nettet i Trysil kunne driftes med tripsektor på $\pm 80^\circ$. Det er kun gjort simuleringer på disse avgangene ettersom dette er de to største, og dermed begrensede. Det ble også gjort simuleringer for å undersøke om det finnes utfordringer ved høyt bruk av distribuerte spoler. Simuleringene viser at så lenge spolene ikke brukes i en så stor grad

at egenbidraget på avgangen øker, eller at sentralspolen ikke lenger kan stilles til ønsket kompenseringsgrad, vil det kun være gunstig for tilhørende jordfeilvern med bruk av distribuerte spoler.

Sensitiviteten på nettet har i dette underkapittelet blitt testet ved den kritiske tilstanden når den reaktive strømmen registrert av retningsvernet er på et minimum. Resultatet viste at den begrensende faktoren fortsatt var nullpunktsspenningen. Det ble i simuleringen påvist at sensitiviteten til vernet på avgangen med en overkompensering av distribuerte spoler er svekket med 75Ω . Dette anses som ubetydelig. Det er også gjort simuleringer på harmoniske komponenter ved bruk av anbefalt konfigurasjon på to distribuerte spoler. Simuleringene viser at dette kun medfører en liten forskjell, men at det likevel registreres en liten økning.

Drøfting

Simuleringene samsvare med teorien i underkapittel 2.5.1. Bruk av distribuerte spoler senker egenbidraget på avgangen. Ved å installere en distribuert spole på Fageråsen vil retningsvernet registrere en vinkel på $-75,82^\circ$, og ikke den anbefalte vinkelen på -75° fra RENbladet. Det er likevel ikke valgt å bruke flere enn en distribuerte spoler for å komme innenfor anbefalingen. Dette skyldes at Trysil i dag drifter nettet veldig langt fra anbefalingene, uten at de opplever utfordringer med dette. Det vil dermed være en overdrivelse å anbefale å montere enda en spole grunnet en vinkeldifferanse på $0,82^\circ$. Det er også valgt å se bort fra anbefalingen til RENbladet på et egenbidrag på 40A. Dette er fordi anbefalingen tar utgangspunkt i at det kun er parallellmotstanden som har resistive tap. Det at RENbladet gjør til dels grove forenklinger som dette kan også brukes som et argument for å ta enkelte av anbefalingene deres med ”en klype salt”.

Simuleringene viser at det ikke er utfordringer tilknyttet høyt bruk av distribuerte spo-

ler. Dette er positivt og støtter opp en endelig anbefaling om bruk av distribuerte spoler. At spenningskriteriet vil være en avgjørende faktor for sensitiviteten uavhengig av reaktivt egenbidrag er fordi dette kriteriet innstilles basert på resistiv strømflyt som beskrevet i underkapittel 2.6.1. Simuleringene viser dermed at retningsvernet er innstilt riktig.

Som beskrevet i drøftingen i underkapittel 4.2.6 er troverdigheten rundt simuleringene for harmoniske komponenter lav. Dette skyldes forenklingene i simuleringsmodellen. Resultatene er likevel presentert for å gi en pekepinne på hvordan tallene kan være, og for å vise at det er en liten økning ved bruk av distribuerte spoler.

5 Drøfting

Gjennom dette kapittelet skal resultatene oppsummeres og tolkes. Resultatene er hovedsakelig fra simuleringskapittelet, men det er også relevante funn fra teorikapittelet. For å være med å forme en endelig konklusjon vil dette kapittelet sortere relevante funn, og argumentere for hvilke resultater som stiller sterkest.

5.1 Litterære funn

Hovedoppgaven til teorikapittelet i rapporten er å danne nødvendig grunnlaget for forståelsen av simuleringer og resultater. Teorikapittelet tar også for seg de fordelaktige løsningene kunstig nullpunkt og admittansvern. Disse er ikke en del del av simuleringene, men er likevel presentert fordi dette anses som gode løsninger som kan gi økt sikkerhet ved spolekompensering.

En metode for økt sikkerhet presentert i teorien er kunstig nullpunkt. Som beskrevet i underkapittel 2.4.2 er dette en alternativ metode å tilkoble sentralspolen til nettet på. Kunstig nullpunkt realiseres ved å tilkoble en jordingstransformator til samleskinnen på

nettet. Kunstig nullpunkt har fordelene at den høye induktive strømmen ikke går gjennom viklingene på hovedtransformatoren, og at ved utkobling av hovedtransformatoren påvirkes ikke sentralspolen. Ved utkobling av sentralspolen vil det være en periode med senket person- og driftssikkerhet.

Løsningen med kunstig nullpunkt kan anses som en kostbar løsning, men bør vurderes. Spesielt for nett med eldre overbelastede hovedtransformatorer, for å unngå utkobling ved service og overbelastning ved jordfeil. Utkobling av sentralspolen kan også medføre et strengere krav for jordfeilbeskyttelse, ettersom jordslutningsstrømmen øker betraktelig. Parallellmotstanden vil heller ikke lenger hjelpe jordfeilvern å lokalisere feilen, hvilket kan gjøre jordfeildeteksjon utfordrende. Vern må derfor tilpasses ved utfall.

En annen metode for økt sikkerhet på nettet, presentert i teorikapittelet er admittansvern. Avanserte admittansvern er beskrevet i underkapittel 2.6.4. Jordfeilvernet har den unike egenskapen å skille mellom frisk og jordsluttet avgang, uavhengig av kompenseringsgrad og egenbidrag. Dette er imidlertid avhengig av at målingene vernet mottar inneholder en stor grad av harmoniske komponenter. Det er gjort simuleringer rundt dette i underkapittel 4.2.6 og 4.3.5, men troverdigheten av disse simuleringene anses som lav. Ved vurdering av investering bør det derfor gjøres måling på nett for å undersøke dette. For nett hvor denne effekten fungerer optimalt vil ikke problemstillinger knyttet til høyt egenbidrag være en utfordring for feildeteksjon. En annen fordel er at avanserte admittansvern driftes med samme utslagskarakteristikk for isolerte og spolekompenserte nett. Dette betyr at ved utfall av sentralspolen trenger ikke vernet å tilpasses. Avanserte admittansvern summerer også sammen alle målte verdier fra et valgt tidspunkt. Dette eliminerer faren for feilaktig utkobling ved oscillasjoner etter bortfall av feil.

Admittansvern er et godt alternativ for nett hvor det er utfordringer med å skille mel-

lom frisk og jordsluttet avgang, eventuelt utfordringer med oscillasjoner ved bortfall av feil. Det finnes imidlertid tilfeller hvor retningsvern vil utføre jobben like bra. Et eksempel på dette er på små nett med global jord. Her vil det være stor forskjell på jordsluttet og frisk avgang grunnet små egenbidrag, samt at tidsforsinkelsen på retningsvernet kan stilles til å være lengre en varigheten på oscillasjonene. Dette fordi utkoblingskravet for nett med globaljord er 10s, som hentet fra underkapittel 2.1. For nettet i Trysil er det ifølge underkapittel 4.2.4 ikke en utfordring med oscillasjoner ved bortfall av feil grunnet global jord, men det er en utfordring med å skille på jordsluttet og frisk avgang. Hvis det er harmoniske komponenter til stede på nettet i Trysil kan derfor admittansvern være et alternativ.

5.2 Sentralkompensering

I dette underkapittelet skal resultatene rundt sentral kompensering drøftes. Simuleringene har vist at sentral kompensering er en funksjonell teknikk for å senke jordslutningsstrømmen. I dette underkapittelet skal bruken av sentral kompensering, med tilhørende styrker og svakheter drøftes. Videre skal spolekompenseringen i dagens Trysil drøftes.

5.2.1 Utfordringer og funksjonalitet

Funksjonen til spolekompensering er å senke jordslutningsstrømmen på nettet. Dette gir økt personsikkerhet ved senket berøringsspenning, og økt driftsikkerhet ved at kortvarige jordfeil og tilhørende lysbuer slukkes. Gjennom simuleringene er det vist at den induktive strømmen fra sentralspolen er i motfase med kapazitiv strøm fra nettet. Dette er grunnprinsippet for spolekompensering og demping av jordslutningsstrøm.

En viktig egenskap til sentralspolen er justerbar kompenseringsgrad. Dette gir mulighet for å tilpasse sentralspolens bidrag basert på kapazitiv lekkasje i nettet. Simuleringene viser at ved å drifte sentralspolen i resonans med kapasitansene i nettet er jordslutnings-

strømmen lavest, og avgjøres av resistive bidrag i nettet. Ulempen er at spenningen over spolen ved normal drift øker. Dette medfører kontinuerlig påkjenning på isolasjon, tap og senket sensitivitet på jordfeilvern.

Spenningen over spolen ved normaldrift oppstår grunnet asymmetrien i nettet. For å senke spenningen over spolen ved normal drift bør derfor nettet som beskrevet i underkapittel 4.2.2 driftes over- eller underkompensert, med kontinuerlig innkoblet parallellmotstand. Begge disse faktorene medfører redusert personsikkerhet grunnet økt jordslutningsstrøm og økt berøringsspenning. Kompenseringsgraden må derfor begrenses, og parallellmotstanden må benytte ON-OFF-ON logikken. Ved å senke spenningen over spolen ved normal drift kan U_0 kriteriet stilles lavere, hvilket øker sensitiviteten til jordfeilvern.

En svakhet ved sentralkompensering er at hele induktansen er plassert i begynnelsen av strekket. Ved lange kabelstrekk vil dette medføre at kompenseringsgraden er ulik for forskjellige feillokasjoner. Simuleringene i underkapittel 4.2.3 viser at for kabelstrekk på 12.743km vil kompenseringsgraden ha liten påvirkning av feillokasjon. For kabelstrekk med en lengde på 50km vil betydningen være større. Kabelstrekk opp mot 50km forekommer veldig sjelden. Kompenseringsgrad avhengig av feillokasjon er derfor ikke en veldig stor utfordring, men en ting å tenke på når kabellengden øker. Simuleringene viser også at de resistive bidragene ved så lange kabellengder som 50km overstiger 35A. Selvslukking av lysbuer vil derfor også være en utfordring ved lange kabelstrekk.

Den største utfordringen med sentralkompensering er avganger med høyt egenbidrag. Dette medfører flere utfordringer. Ved bortfall av en avgang med et høy kapasitivt egenbidrag vil nettet som beskrevet i underkapittel 4.3.4 bli kraftig overkompensert. Dette resulterer i en periode med redusert driftsikkerhet, ettersom kortvarige jordslutninger og tilhørende lysbuer ikke vil slukkes. Dette er ikke en veldig stor utfordring ettersom spolen

innstilles til riktig induktans av spoleregulatoren, men en viktig kommentar ettersom dette ikke skjer momentant. En annen utfordring tilknyttet høyt egenbidrag er oscillasjoner ved bortfall av feil. Dette er grundig beskrevet i underkapittel 4.3.4. Utkobling av jordsluttede avganger med høye egenbidrag medfører at frekvensen på oscillasjonene i større grad avviker fra nettfrekvensen. På samme måte vil også den transiente resistive polaritetsendringen øke. Dette er utfordringer som kan medføre feilaktig utkobling av jordfeilvern. Det er derfor viktig å innstille jordfeilvern til å ha en lengre tidsforsinkelse enn oscillasjonenes varighet. Likning 9 viser beregning for tidskonstanten til svingningene.

Høye egenbidrag medfører også utfordringer for retningsvernene på nettet. Høye egenbidrag trekker målingene til retningsvernet på jordsluttet avgang bort fra tripsektoren, og er dermed med å redusere driftsikkerheten på nettet. Uten distribuerte spoler må høyt egenbidrag enten løses med en utvidet tripsektor, økt effekt på parallellmotstanden eller bruk av admittansvern for nett med harmoniske komponenter. Utvidet tripsektor senker driftsikkerheten ved at sikkerhetsmarginen mellom friske avganger og tripsektoren minker. Økt effekt på parallellmotstanden senker personsikkerheten ved at berøringsspenningen øker. Ved bruk av avanserte admittansvern på nett med harmoniske komponenter vil vernet være i stand til å skille mellom jordsluttet og frisk avgang uavhengig av egenbidrag. Det beste alternativet for høye egenbidrag, er å senke egenbidraget ved bruk av distribuerte spoler. Av de ovennevnte tre alternativene driftes distribusjonsnettet i Trysil med utvidet tripsektor.

5.2.2 Dagens spolekompensering i Trysil

Distribusjonsnettet i Trysil driftes i dag med ren sentralkompensering. Det er gjennom simuleringene gjort en grundig kartlegging, og en sikkerhetsmessig vurdering av verdiene på nettet. Basert på simuleringene fra kapittel 4.2.4 skal det i dette underkapittelet drøftes styrker og svakheter med hvordan Trysil driftes idag.

Fra underkapittel 4.2.2 kan det sees at det ved normal drift ligger en relativt høy spenning over spolen. Målingene ved normal drift er på $989V_{top}$, og $20,55A_{top}$ hvilket gir et resulterende tap på $10,16[kW]$. Strømflyten er ikke en utfordring for berøringsspenningen, ettersom at det er en tilsvarende kapazitiv strømflyt, men medfører tap i spolen. Spenningen kommer fra asymmetrien i nettet. Nettet driftes med en lav kompenseringsgrad på 5A og uten tilkoblet parallellmotstand. Det er derfor liten demping på spenningen. Det anbefales ikke å øke kompenseringsgraden ettersom dette øker berøringsspenningen, men det anbefales å drifte nettet med kontinuerlig innkoblet parallellmotstand med bruk av ON-OFF-ON logikken. Dette vil senke tap, og isolasjonspåkjennelse ved normal drift.

Simuleringene i underkapittel 4.2.6 viser at endret kompenseringsgrad ved ulike feillokasjoner ikke en utfordring for nettet i Trysil. Dette stemmer også overens med teorien fra underkapittel 2.4.3 som beskriver at feillokasjon først er betydelig etter 20km. Som beskrevet i underkapittel 4.1.2 er det lengste strekket i Trysil modellert til å være 12.763km. I virkeligheten er strekket enda kortere med en lengde på 10.8km. Dette kan medføre at det virkelige nettet påvirkes i enda mindre grad av feillokasjon enn i simuleringene.

Etterfølgende oscillasjoner ved bortfall av feil for distribusjonsnettet i Trysil er grundig kartlagt. Resultatene fra simuleringene i underkapittel 4.3.4 viser at den matematiske beregningen av forløpet stemmer veldig godt med simuleringene. Dette styrker troverdigheten for simuleringsmodellen. Simuleringene viser at hver gang en feil forsvinner vil det være oscillering i nullsystemsverdiene. Simuleringene viser også at det ved bortfall av feil er en høy transient polaritetsendring i den resistive strømmen. Denne resulterer i at retningsvern på friske avganger i en kort periode registrerer avgangen som jordsluttet. Ettersom tidsforsinkelsen på retningsvernene er innstilt til 2s, og varigheten på oscillasjonene er 1.03s vil det aldri være fare for feilutkobling grunnet oscilleringene. Selv ved de

mest kritiske situasjonene.

Sensitiviteten på retningsvernene i Trysil er i underkapittel 4.2.5 simulert til å være 8240Ω . Sensitiviteten er så høy fordi retningsvern kobler ut en jordslutning før parallellmotstanden kobles inn. Dette vil medføre at jordslutninger tilsvarende $1.79A$ kobler ut avgangen. Det kan derfor diskuteres om nettet er for sensitivt. Distribusjonsnettet i Trysil driftes i dag med retningsvern innstilt med en tripsektor på $\pm 87^\circ$. Dette er for å detektere og bortkoble jordslutninger før parallellmotstanden innkobles. Dette viser at Eidsiva har valgt å ivareta personsikkerheten foran driftsikkerheten. Ved en jordslutning på avgangen med det høyeste egenbidraget, Fageråsen, registreres av vinkel på $-83,73^\circ$. Ved samme situasjon registrerer retningsvernet på en frisk avgang en vinkel på omtrent -90° . tripsektoren er dermed valgt for å gi samme sikkerhetsmargin for disse to avgangene.

For å sikre en stor sikkerhetsmargin mellom friske avganger og tripsektoren anbefaler RENbladet en tripsektor på $\pm 80^\circ$. En tripsektor på $\pm 87^\circ$ anses derfor som risikabel. Løsninger på dette er å dele opp de største avgangene, Dette kan gjøres ved bruk av admittansvern, beskrevet i underkapittel 5.1, eller ved bruk av distribuerte spoler. Det beste alternativet er å senke egenbidraget på de største avgangene. Dette vil også løse problematikken med oscillering og kraftig overkompensering ved utkobling av avganger. Det vil trolig være utfordrende å dele opp avganger. Distribuerte spoler er derfor det beste alternativet.

5.3 Distribuert kompensering

I dette underkapittelet skal resultatene rundt distribuert kompensering drøftes. Det er tre hovedargumenter for bruk av distribuerte spoler. Disse er avlastning av sentralspolen, dempet påvirkning av serieimpedansen i nullsystemet og senket egenbidrag på avganger. Disse tre argumentene er kartlagt i simuleringene, og resultatene rundt disse skal oppsummeres

og drøftes. Til slutt gis det en endelig anbefalingen for distribuerte spoler på distribusjonsnettet i Trysil.

5.3.1 Avlastning av sentralspolen

For distribusjonsnett som gradvis bygges større kan det være en utfordring tilknyttet overbelastning av sentralspolen. Distribuerte spoler sine egenskaper til å avlaste sentralspolen er derfor viktig. Resultatet fra simuleringene viser at en ampere fra en distribuert spole, er en ampere av sentralspolen. De distribuerte spolene kan dermed brukes til å avlaste sentralspolen. Det induktive bidraget til spolene kan variere noe, avhengig av plassering på lange kabelstrekk. Simuleringene fra underkapittel 4.3.2 viser at et kabelstrekk på 12.763km gir en differansen på 0.04A for plassering før og etter strekket. Dette er små ubetydelige avvik som spoleregulatoren i sentralspolen tar seg av.

Simuleringene viser også at det ikke finnes drifts- eller sikkerhetsmessige utfordringer tilknyttet høy bruk av distribuerte spoler. Det er derfor mulighet for å avlaste sentralspolen i høy grad. De eneste begrensningene for antall distribuerte spoler er en overkompensering som medfører at sentralspolen ikke lengre kan innstilles til ønsket kompenseringsgrad, eller et så høyt antall at det totale egenbidraget på avgangen overstiger det opprinnelige egenbidraget.

5.3.2 Nullsystemspenning

Kompensering for spenningsfall fra serieimpedansen i nullsystemet er det viktigste argumentet for plassering av distribuerte spoler. Gjennom simuleringskapittelet er det gjort omfattende simuleringer rundt dette temaet. Det er gjennomført simuleringer for å undersøke om distribuerte spoler i resonans med tilhørende kapasitanser er i stand til å neglisjere serieimpedansen i nullsystemet, slik teorien i underkapittel 2.5.2 tilsier. Resultatet fra simuleringen samsvarer med teorien og viser at den optimale plasseringen av

distribuerte spoler er jevnt fordelt med en dimensjonering tilsvarende resonans. Denne konfigurasjonen åpner muligheten for å ha ekstreme kabellengder. Simuleringene viser at kompenseringsgraden til et kabelstrekk på 125km er upåvirket av feillokasjon.

For tilfeller hvor det skal monteres et mindretall av distribuerte spoler på et langt kabelstrekk, er plassering med å avgjøre dempingen av spenningsfall fra serieimpedansen i nullsystemet. Simuleringene viser at feillokasjon på kabelstrekk under 12.743km har liten, men likevel noe betydning. Simuleringene viser også at for kabelstrekk opp til 25km er den beste plasseringen av de distribuerte spolene på enden av kabelstrekket.

Det er ikke funnet noen direkte teori rundt plassering av distribuerte spoler, med unntak av plassering ved resonans. For resonans bør spolene fordeles over hele kabelstrekket. Det ville derfor være naturlig å anta dette som en generell anbefaling. Dette samsvarer ikke med simuleringene hvor plassering mot enden av kabelstrekket er mest gunstig. For avganger med flere kabelstrekk bør spolene fordeles på enden av de lengste strekkene. Simuleringene viser også at ved å plassere distribuerte spole på enden av kabelstrekket synker nullsystemspenningen i dette punktet. Dette medfører en senket kapazitiv lekkasje på kabelstrekket.

For kabelstrekk mellom 25- og 45km vil en total kompensering på enden av kabelstrekket medføre en høyere kompenseringsgrad ved feil på enden av kabelstrekket, enn på samleskinnen. Simuleringene gir ikke forventede resultater. Målingene for lav jordslutningsstrøm, liten differanse mellom jordslutningsvinkel og liten differanse mellom nullsystemsspenningen inntreffer ved forskjellige konfigurasjoner. En annen viktig observasjon er at grunnet senket spenning i enden av kabelstrekket medfører kompensering på enden av kabelstrekket en lavere kapazitiv lekkasjestrøm, hvilket senker egenbidraget ytterligere. Anbefaling av plassering for distribuerte spoler på kabelstrekk mellom 25- og 45km

er at spolene skal fordeles over hele kabelstrekket, men med en betraktelig tyngde mot slutten av kabelstrekket.

5.3.3 Senket Egenbidrag

En utfordring som oppstår ved lange kabelstrekk, og store avganger er høye egenbidrag. Som beskrevet i kapittel 2.6 medfører dette utfordringer tilknyttet deteksjon av jordsluttet avgang. Ved å montere distribuerte spoler på store avganger senkes egenbidraget tilsvarende den induktive strømmen på spolen. Dette øker driftsikkerheten på nettet ved at tilhørende retningsvern kan innstilles til en sikker tripsektor. Dette gir en større sikkerhetsmargin mellom friske avganger og tripsektoren.

For valg av antall distribuerte spoler med utgangspunkt i å senke egenbidraget anbefales det å ta utgangspunkt i likning 6 vist under. Denne likningen beregner det maksimale egenbidraget avgangen kan ha, med utgangspunkt i ønsket vinkel, resistive bidrag på nettet, resistivt egenbidrag og kompenseringsgrad. Basert på det beregnede egenbidraget og det faktiske egenbidraget kan det velges antall distribuerte spoler.

RENbladet anbefaler en tripsektor på $\pm 80^\circ$ med en sikkerhetsmargin på 5° . Dette bør velges som utgangspunkt for beregningene. Det bør videre tas utgangspunkt i vinkelen -75° , hvor resistive strømmer måles med innkoblet parallellmotstand. Dette for å sikre overholdt sikkerhetsmargin. Det kan også kontrolleres om det måles en vinkel lavere enn -80° uten parallellmotstanden. Dette er ikke ønskelig, ettersom det kan medføre forskjellig utløsertid.

$$\phi = \arctan \frac{-(I_E + I_{comp})}{I_R}, I_E = \tan \phi * I_R - I_{comp}$$

For beregning av egenbidraget settes en overkompensering inn som positiv, og underkompensering som negativ. Med utgangspunkt i RENbladets anbefaling settes ϕ til å være -75° . Det resistive bidraget skal ikke inneholde det resistive egenbidraget på avgangen.

Den presenterte anbefalingen medfører at feilen bortkobles etter at parallellmotstanden innkobles. Dette medfører en økt berøringsspenning, og en redusert personsikkerhet. Dette er vurdert av RENbladet [2] til å være uproblematisk. Det er derfor valgt å følge anbefalingen. Det er også mulig å ta utgangspunkt i at feilen skal bortkobles før parallellmotstanden legges inn. Dette hadde gitt veldig strenge krav, spesielt hvis tripsektor-anbefalingen skal brukes. Ettersom RENbladet er et respektert forlag i Norge ville det være unaturlig å ta utgangspunkt i at tilhørende anbefalinger gir farlige resultater.

Simuleringene viser at det ikke er noen sikkerhetsmessige utfordringer tilknyttet høyt bruk av distribuerte spoler, annet enn faren for å detektere feilen før parallellmotstanden legges inn. For konfigurasjoner hvor kabelstrek kompenseres tilsvarende resonans vil dette være en utfordring. Ved høyt bruk av distribuerte spoler bør også sensitiviteten på jordfeilvern undersøkes ettersom amplituden på den målte strømvektoren minker ved utbredt distribuert kompensering.

En sikkerhetsmessig utfordring for nett med spolekompensering er oscillasjoner ved bortfall av jordfeil. Ved bruk av retningsvern som bruker resistiv strømflyt er frekvensendringen på oscillasjonene uproblematisk, men transient polaritetsendring av resistiv strømflyt kan ved feilinnstillinger medføre feilutkobling. Simuleringer med distribuerte spoler viser at bruk av distribuerte spoler øker denne effekt, men i liten grad. I underkapittel 4.3.4 presenteres en metode for å beregne minste tidsforsinkelse for jordfeilvern. Denne metoden fremstiller krav mye strengere enn nødvendig, men sikrer at feilfunksjon ikke forekommer.

Simuleringene viser at hovedutfordringen for store distribusjonsnett er høye egenbidrag. Dette vil i de aller fleste tilfeller være et problem før spenningsfordelingen i nullsystemet.

Det er derfor ikke nødvendig å montere distribuerte spoler før egenbidrag på en avgang er utfordrende. Når dette inntreffer er avhengig av størrelsen på nettet, og resulterende resistive tap. RENbladet anbefaler å montere distribuerte spole på avganger som overstiger 40A. For nettet i Trysil vil en avgangen med et egenbidrag på 40A, ved innkoblet parallellmotstand, måle en vinkel på $-65,9^\circ$. Beregningen er vist under med utgangspunkt i likning 6, tabell 4 og estimert resistivt egenbidrag.

$$\phi = \arctan \frac{-(40 + 5)}{20,93 \cos(-14) - 0,2} = -65,9^\circ$$

Den generelle anbefalingen om å montere distribuerte spoler på avganger med egenbidrag høyere enn 40A er derfor ugyldig for store nett. For store nett som Trysil anbefales det som beregnet i metoden i underkapittel 4.3.1 å montere distribuerte spoler for egenbidrag over 69.2A. For vurderingen på når det bør monteres distribuerte spoler må den resistive strømflyten måles, dette gjøres ved spoleregulatoren, for deretter å bruke denne verdien i likning 6.

5.3.4 Anbefaling i Trysil

For valg av antall distribuerte spoler i Trysil tas det som beskrevet i underkapittel 4.3.1 utgangspunkt i ønsket tripsektor. tripsektoren er basert på RENbladets anbefaling på $\pm 80^\circ$ med en sikkerhetsmargin på 5° . Basert på disse tallene er det beregnet et maksimalt egenbidrag på 69.2A. For å realisere dette anbefales det å plassere en distribuerte spole på Fageråsen og en på Håvi. Som beskrevet for plassering av spolene anbefales det å plassere spolene på enden av det lengste kabelstrekket for å dempe påvirkningen av serieimpedansen i nullsystemet i høyest mulig grad. Simuleringene viser at ved denne konfigurasjonen kan sentralspolen stilles ned fra 344A til 313.8A, altså en avlastning på 30.2A.

Simuleringene viser at dette vil medføre at hele nettet kan driftes med den anbefalte tripsektoren på $\pm 80^\circ$. Målingene på Fageråsen viser at denne kun har en sikkerhetsmargin på

4,18°. Det er likevel ikke valgt å anbefale enda en distribuert spole for å unngå urealistiske forslag og overdrivelser. Metoden for valg av antall distribuerte spoler tar utgangspunkt i at en feil bortkobles etter at parallellmotstanden innkobles. Det kan argumenteres for at feilen bør bortkobles før dette. Med et utgangspunkt i en tripsektor på $\pm 80^\circ$ ville dette resultert i en helt annen distribuert spole konfigurasjon. Det er valgt å følge RENbladets anbefalinger. Dette resulterer også i en gjennomførbar løsning med totalt to distribuerte spoler.

Forsinkelsen på retningsvernene i Trysil er innstilt til 2s. Simuleringene viser at ved en innstilling over 1.06s er vernene ikke utsatt for feilfunksjon som en følge av transient polaritetsendring av den resistive strømflyten. Det anbefales å instille retningsvernene til en tripsektor på $\pm 80^\circ$, og tilpasse tidsforsinkelsene for vern og parallellmotstanden for den nye konfigurasjonen. Den totale tidsforsinkelsen må overstige 1.06s.

5.4 Videre arbeid

Resultatene i rapporten baseres på teoretiske beskrivelser og simuleringer. For videre arbeid rundt distribuerte spoler anbefales det å gjøre praktiske målinger i nett. Relevante målinger kan være spenningene i nullsystemet, strøm gjennom spolene og målinger fra jordfeilvern. Disse målingene kan brukes til å undersøke spenningsfall i nullsystemet og sammenhengen mellom induktive bidrag fra de distribuerte spolene og målingene i jordfeilvernene. Dette er viktige tema som er grundig kartlagt i simuleringene, og som også må testes i praksis.

Et forslag til videre arbeid er også kartlegging av serieimpedansen i nullsystemet. Dette er et tema som fremdeles ikke er matematisk modellert. Ved en bedre forståelse av serieimpedansen i nullsystemet kan også feillokasjonen sin påvirkning av kabelstrek kartlegges grundigere. Det er i rapporten beskrevet en mulig forklaring på polaritetsendringen av

strømflyten ved lange kabelstrekk. Dette er også en teori som kan undersøkes videre. Videre arbeid med serieimpedansen i nullsystemet bør også ta for seg den induktive delen. Påvirkningen til denne er i liten grad undersøkt i denne rapporten, selv om den er tilstede i simuleringene. Et interessant tema kan være om spenningsfall fra denne vil være med å kompensere for den kapasitive strømmen i likhet med strømmen fra spolene.

6 Konklusjon

Det er gjennom rapporten kartlagt utfordringer ved sentralkompensering på store distribusjonsnett og i hvilken grad distribuerte spoler kan løse disse utfordringene. Det er også gjort en grundig kartlegging av distribusjonsnettet i Trysil, hvor fokuset har vært sikkerhet og funksjonalitet. Resultatene brukes til å danne en generell anbefaling for bruk av distribuerte spoler.

Resultatet fra simuleringene viser at sentralkompensering fungerer godt til kompensering av kapazitiv lekkasjestrøm. Gjennom rapporten er viktige tema som spenning ved normal drift, kompenseringsgrad, feillokasjon, oscillasjoner og høye egenbidrag kartlagt. Av disse er høye egenbidrag hovedutfordringen. Ved høye egenbidrag vil det også kunne oppstå utfordringer med betydning av feillokasjon, og oscillasjoner ved bortfall av feil. For lange kabelstrek opp mot 50km vil det være høye resistive bidrag, og feillokasjon vil ha betydning for kompenseringsgrad og jordstrømmens størrelse. Dette medfører uforutsigbar strøm gjennom jordslutningen.

Den største utfordringen med høye egenbidrag er feillokalisering. Ved bruk av retningsvern medfører høye egenbidrag at tripsektoren på vernene må utvides, eller at effekten på parallellmotstanden må økes. Ingen av disse er gode alternativer, men beste løsning er utvidelse av tripsektor for å redusere driftsikkerheten fremfor personsikkerheten. Et alternativ er å bruke multifrekvens admittansvern. Dette vil løse problematikken med lokalisering av feil, men denne løsningen er avhengig av at feilstrømmen inneholder høye bidrag fra harmoniske komponenter.

Resultatet fra simuleringene viser at distribuerte spoler er i stand til å løse problematikken rundt både feillokasjon og høye egenbidrag. De distribuerte spolene kan ikke erstatte

sentralspolen, men brukes som et supplement. Sentralspolens evne til å tilpasse det induktive bidraget basert på aktuell kapasitiv lekkasje er viktig. Resultatet viser at ved bruk av distribuerte spoler på et langt kabelstrek vil problematikken med feillokasjon forbedres. Variabel kompenseringsgrad og høye resistive tap dempes eller fjernes, avhengig av konfigurasjon.

Resultatene viser også at ved å montere en distribuert spole med et induktivt bidrag senkes egenbidraget på avgangen tilsvarende bidraget. På denne måten bidrar distribuerte spoler til å hjelpe retningsvern med å lokalisere jordfeilen. Hovedutfordringen ved sentralkompenserte nett er som beskrevet høye egenbidrag. Det vil derfor være unødvendig å bruke distribuerte spoler i distribusjonsnett med små egenbidrag. Det kan ikke gjøres en generell anbefaling på hvilket egenbidrag en distribuert spole bør monteres på etter som resistive tap i nettet er avgjørende. Anbefalingene må gjøres basert på vinkelen målt av retningsvernet. Det anbefales å montere distribuerte spoler på avganger som måler en vinkel lavere enn -75° ved jordslutning med innkoblet parallellmotstand.

For nett med spolekompensering vil det ved bortfall av jordfeil oppstå oscillasjoner i nullsystemsverdiene. Avganger med høye egenbidrag er ekstra utsatt. Dette kan medføre fare for feilutkobling av friske avganger. Det bør derfor alltid kontrolleres hvor lenge disse svingningene varer før valg av utkoblingstid på retningsvern. Tidskonstanten for forløpet er vist i likningen 22.

$$\tau = \frac{2I_C}{\omega_n I_R} \quad (22)$$

Varigheten for svingningene er fem ganger tidskonstanten. Det anbefales derfor at forsinkelsen på retningsvern innstilles fem ganger lengre enn beregningen fra likning 22 for å sikre mot feilutkobling. For nett med utfordringer tilknyttet lang utkoblingstid kan det benyttes avanserte admittansvern som unngår feiltolkning av målinger under oscillasjonene.

De viktigste egenskapene til distribuerte spoler er avlastning av sentralspolen, dempning av feillokasjon sin betydning og senket egenbidrag. Det legges derfor fokus på disse for anbefaling av plassering og antall distribuerte spoler. Avlastning av sentralspolen, og senket egenbidrag oppnås uavhengig av plassering. Valg av plassering bør derfor gjøres for i størst mulig grad å dempe feillokasjonens betydning. Dersom motivasjonen for bruk av distribuerte spoler er å avlaste sentralspolen, velges antall basert på ønsket avlastning. Dersom motivasjonen er senket egenbidrag kan antall spoler beregnes basert på vinkelen til den aktuelle avgangen ved jordslutning. Det er uproblematisk med høyt bruk av distribuerte spoler, så lenge sentralspolen kan innstilles til ønsket kompenseringsgrad, og det totale egenbidraget til avganger ikke overstiger det kapasitive bidraget.

For i høyest mulig grad å dempe feillokasjonens betydning må spenningsfallene over serieimpedansene i nullsystemet dempes. Dette gjøres gjennom å øke shuntimpedansen i nullsystemet ved å koble en induktiv reaktans i parallell med den kapasitive reaktansen. Dette gir en jevnere spenningsfordeling i nullsystemet, og dermed en kompenseringsgrad som i mindre grad er avhengig av feillokasjon. Basert på resultatene i rapporten anbefales det at all distribuert kompensering plasseres på enden av det aktuelle kabelstrekket. Dette gjelder for de aller fleste kabelstrekk, og er gyldig for kabelstrekk opp til 25km. For kabelstrekk mellom 25- og 45km vil all kompensering på enden av strekket medføre en høyere kompenseringsgrad på enden av strekket enn i begynnelsen. For denne lengdene anbefales det derfor at de distribuerte spolene fordeles utover kabelstrekket, men med en betydelig tyngde mot slutten.

For valg av antall distribuerte spoler med formål å senke egenbidraget, anbefales det å ta utgangspunkt i retningsvernets målinger. RENbladets anbefaling bør følges, med en tripsektor på $\pm 80^\circ$, og med en sikkerhetsmargin på 5° for målt vinkel på jordsluttet avgang. Med dette som utgangspunkt beregnes det maksimale egenbidraget avgang kan ha

for å innfri anbefalingen. Beregningen er vist i likning 23

$$I_E = \tan\phi * I_R - I_{comp} \quad (23)$$

Det anbefales å bruke vinkelen -75° , hvor I_R måles ved innkoblet parallellmotstand. Basert på differansen mellom beregnet og reellt egenbidrag avgjøres antall distribuerte spoler.

Ved å følge anbefalingen for tidsforsinkelsen for retningsvern forsvinner faren for feilutkobling grunnet oscilleringer i nullsystemsverdiene. Ved å følge anbefalingen for plassering og antall distribuerte spoler, oppnås et drift- og personsikkert nett. Dette sikrer en funksjonell spolekompensering hvor lysbuer slukkes, og feillokasjon sin betydning dempes. Dette sikrer også at jordfeil detekteres og bortkobles av tilhørende jordfeilvern med gode sikkerhetsmarginer.

Litteraturliste

- [1] Norge Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap Energibedriftenes landsforening Norsk elektronisk komite. «Forskrift om elektriske forsyningsanlegg: med veiledning». I: (2006).
- [2] RenBlad. «Stasjonsanlegg - Retningslinjer for spolejordet distribusjonsnett». I: 7505 (2018).
- [3] Jan Erik Engen mfl. «Jording i Eidsiva Nett». I: (2013).
- [4] RenBlad. «0,23-24kV - Jordingssystem og overspenningsvern - Utførelse». I: 8011 (2016).
- [5] RenBlad. «Distribusjonsnett - Jordingssystem - Global Jord». I: 8009 (2013).
- [6] Geir Torbergesen. «Jordslutningsspoler, kompensering og regulering ved jordfeil». I: ()
- [7] Ari Wahlroos og Janne Altonen. «Compensated neutral networks and multi-frequency admittance protection». I: (2017).
- [8] Anna Guldbrand. *Earth faults in extensive cable networks: electrical distribution systems*. Department of measurement technology og industrial electrical engineering, 2009.
- [9] Ari Wahlroos. «Taking earth-fault protection to the next level». I: (2017).
- [10] «Multi-frequency admittance protection, Considerations of parallel resistor logic». Technical Note. 2017.
- [11] S Zubic mfl. «Managing post-fault oscillation phenomenon in compensated MV-networks». I: (2016).

- [12] Ari Wahlroos, Janne Altonen og Hanna-Mari Pekkala. «Post-fault oscillation phenomenon in compensated MV-networks challenges earth-fault protection». I: *CIGRE conference, Lyon*. 2015.
- [13] Ari Wahlroos, Janne Altonen og ABB Oy Distribution Automation-Finland. «Compensated networks and admittance based earth-fault protection». I: *Kaunas University of Technology and Aalto University organized seminar on Methods and techniques for earth fault detection, indication and location, Espoo, Finland*. 2011.
- [14] Ari Wahlroos mfl. «Application of novel cumulative phasor sum measurement for earth-fault protection in compensated MV-networks». I: (2013).
- [15] Niklas Stråth og Henric Elfving. *Nätkonsekvenser vid kablifiering av luftledningsnät*. Elforsk, 2006.
- [16] SINTEF. «Planleggingsbok for kraftnett - Tekniske data». I: (2010).

Vedlegg

A	Kontaktpersoner	139
B	Elforsk	140
C	Teknisk blad for 24kV kabler	141
D	Anleggsinformasjon i Trysil	142
E	Møre trafo teknisk data	143
F	Simuleringsmodell	144
G	Verdier fra Netbas	149

A Kontaktpersoner

Navn	Firma	Rolle	Telefon	Mail	Bidrag
Ari Wahlroos	ABB	Senior Overingeniør	+358503345214	ari.wahlroos@fi.abb.com	Litteratur og bistand gjennom hele prosessen med sin fagkompetanse
Arne Wolden	ABB	Salg, Relevern	90984479	arnde.wolden@no.abb.com	Litteratur
Ole Ludvig Solnør	ABB	Salg Distribusjons- transformatorer	91179444	ole-ludvig.solnor@no.abb.com	Litteratur
Anders Dalseg	Eidsiva Nett	Planingeniør	95981252	anders.dalseg@eidsivaenergi.no	Kursholder for Netbas
Jan Erik Engen	Eidsiva Nett	Planingeniør	95981253	jan-erik.engen@eidsiva.no	Litteratur, ekstern veileder
Sidsel Trætteberg	Eidsiva Nett	Prosjektingeniør	95981738	sidsel.traetteberg@eidsiva.no	Litteratur
Trond Ellingsen	Eidsiva Nett	Fagansvarlig Regionalnett	95981329	trond.ellingsen@eidsiva.no	Literatur, ekstern veileder
Tor Arne Folkestad	NTNU	Veileder	61135267	tor.folkestad@ntnu.no	Literatur, intern veileder

B 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 längsgående 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

C 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 [μ F/km]	C _j [μ F/km]	I _{th} [A]	I _k 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

D Anleggsinformasjon i Trysil

Konklusjon.

Test OK. Jordfeil retningsfunksjon på nye linjevern type Siemens 7SJ80 kan anses ferdig prøvd og OK.

Etter testen ble alle intielle tiltak (se lista over) tilbakestilt til normal drift. Forsinkelse på innkopling av parallellmotstand R (switch-on delay) ble stilt tilbake til på 2.5 sek.

Avlest på spoleregulator.

Følgende ble avlest på jordspoleregulatoren:

$$I_{res} = 370 \text{ A}$$

$$I_w = 109.9 \text{ A (ohmsk bidrag fra nett og spole) !!!}^{1)}$$

$$U_{res} = 5.5 \% (6.0 \text{ V})$$

$$k = 1.7 \% (\text{usymmetri, svært unormalt høy})^{1)}$$

$$d = 0.29 (\text{demping, 29\%}) !!!^{1)}$$

Resonanskurven er veldig flat rundt toppen.

¹⁾ Disse verdiene er fullstendig unormale. En så stor demping med tilhørende ohmsk strøm er minst 5 ganger aktuelle verdier fra andre anlegg. Ifbm. skarp test over så ser vi jo at Ohmsk strøm på feilbefengt avgang er målt til 165 mA (dvs. primært 16,5 A) før parallellmotstand R går inn. Selv om egetbidraget ikke måles da, så stemmer jo ikke dette med verdiene på spoleregulatoren. Verdiene på spoleregulatoren er fortsatt helt urealistiske (selv om vi registrerer at resonanskurven er usedvanlig flat). Stadig uavklart hva dette skyldes (se også kommentar over fra idriftsetting av avg. Fageråsen 7/11-2013)

Verninnstillinger.

Reléplan fra Jacobsen Elektro har blitt implementert i de nye vernene. Disse har i motsetning til de gamle 7SJ62 vernene valgmulighet mellom $\cos\phi$ prinsipp eller sektorprinsipp (U_0/I_0 - ϕ measurement). Sistnevnte er valgt:

Adr. 130 Sens. Gnd Fault Dir. Char.	V_0/I_0 ϕ measurement
Adr. 3101 Sens. Gnd Fault	ON
Adr. 3109 64-1 VGND:	11.0 V (10%) (Kriterium for utkopling på kun U_0 , dette benyttes ikke)
Adr. 3111 T DELAY PICKUP	00 sek. (tidsforsinkelse for melding (start))
Adr. 3112 64-1 DELAY	00 sek. (tidsforsinkelse for utløsning (Hvis utkopling på kun U_0 benyttes))
Adr. 3117 50 Ns-1 PICKUP	20 mA (strømkriteret)
Adr. 3118 50 Ns-1 DELAY	2.0 sek (tidsforsinkelse for trip)
Adr. 3153 50 Ns-1 Vmin	11.0 V (10%) (spenningskriteriet)
Adr. 3154 50 Ns-1 Phi	0 grader (vinkel ϕ (mellom U_0 og I_0) for senterlinje av utløsesektor)
Adr. 3155 50 Ns-1 Delta Phi	87 grader (utløsesektors utbredelse til begge sider av senterlinja)

Kriteriet for spenning U_0 satt i adr. 3153 og for strøm I_0 satt i adr. 3117 må være tilfredstilt; i tillegg til vinkelkriteriet satt i adr. 3154 (vinkel for senterlinje av utløsesektor) og 3155 (vinkel for utløsesektors utbredelse på begge sider av senterlinja).

E Møre trafo teknisk data



Kabelnett-Transformatorer med innebygget Jordslutningsreaktor - Petersen Spole, P-spole



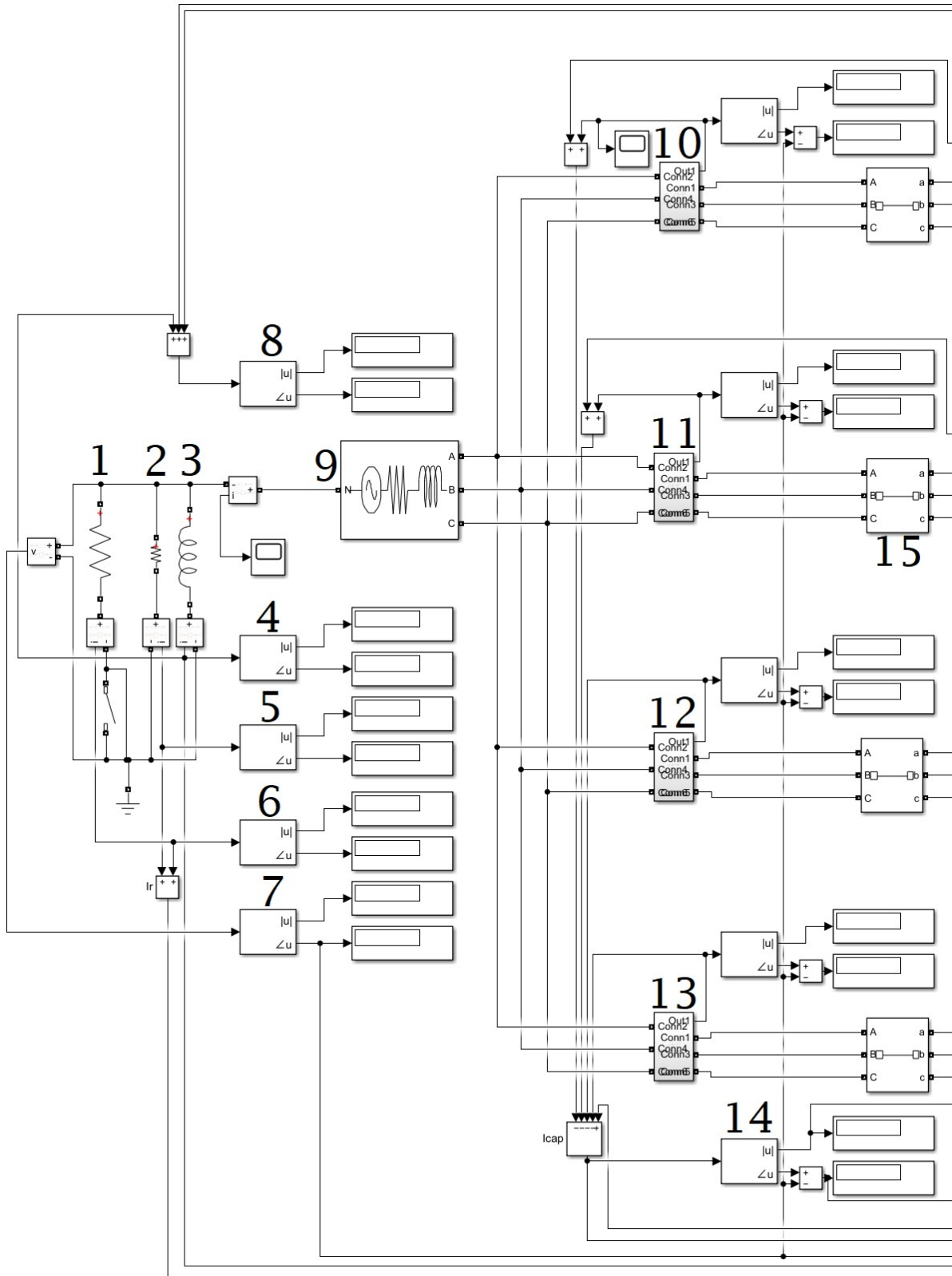
15A P-spole og 100kVA Transformator
22000+-2x2,5% /420 V ZNzn0

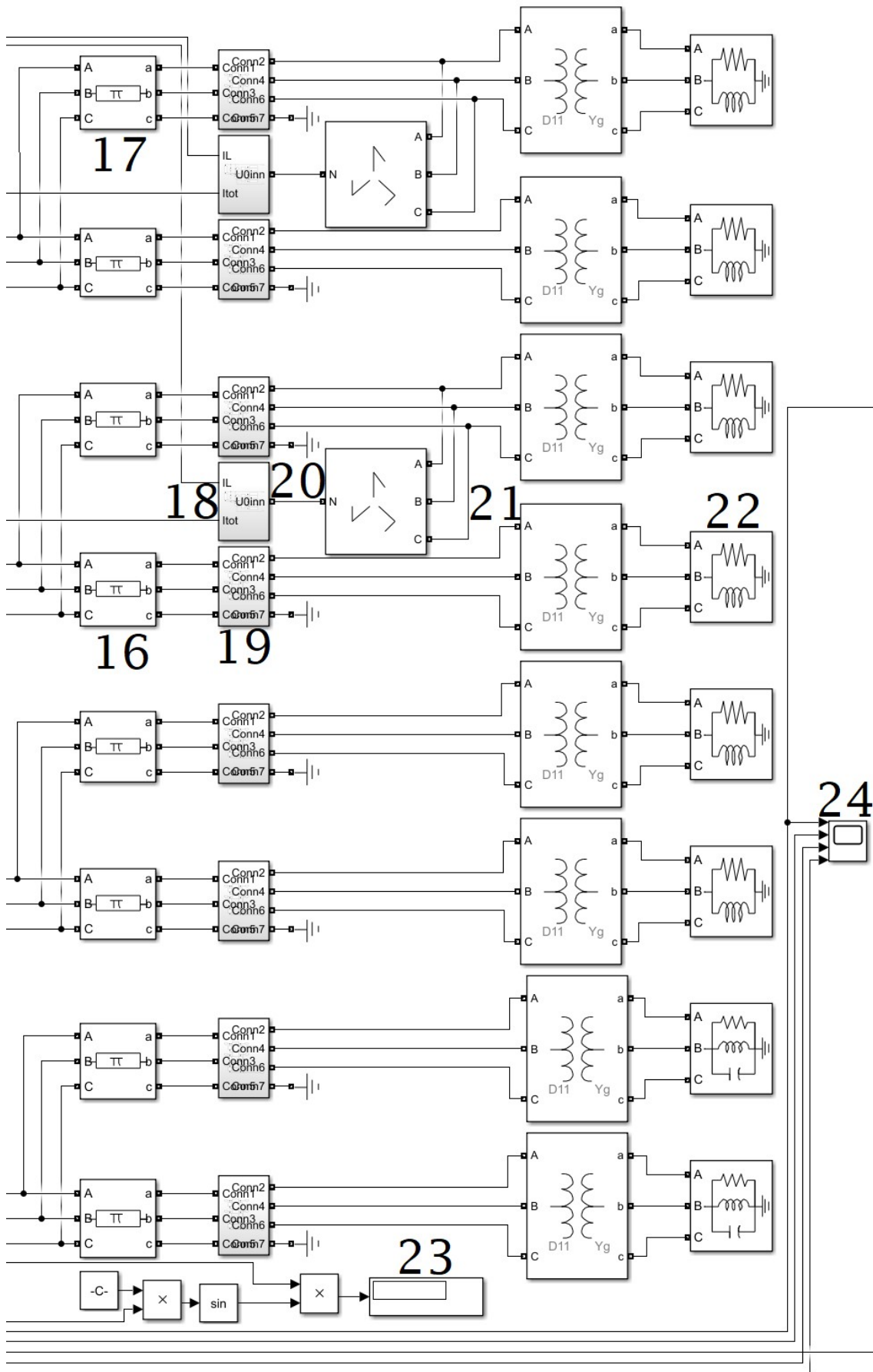
HS-sikringer og Oljeboks med 6 stk plug-in
Magnex med 3-polt bryting ved feil

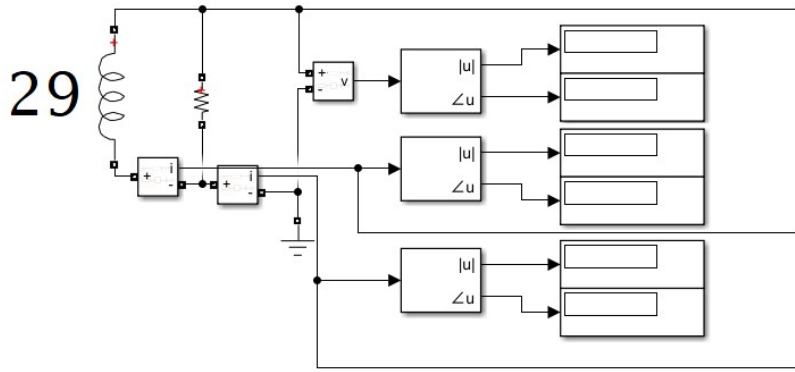
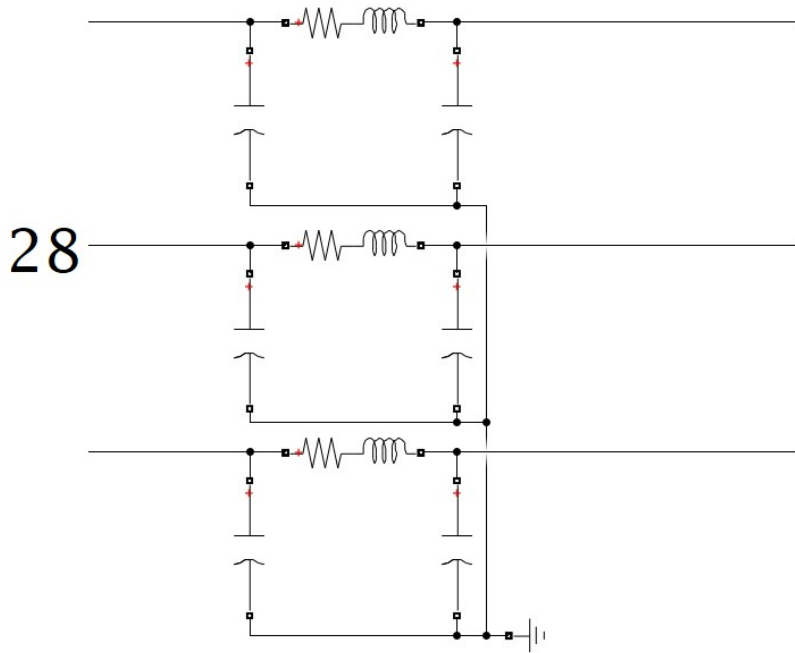
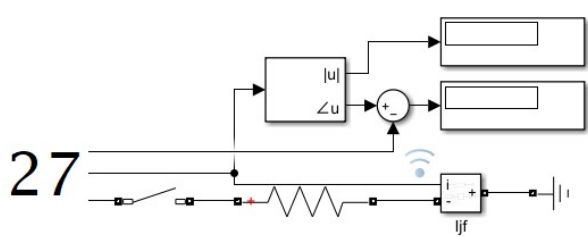
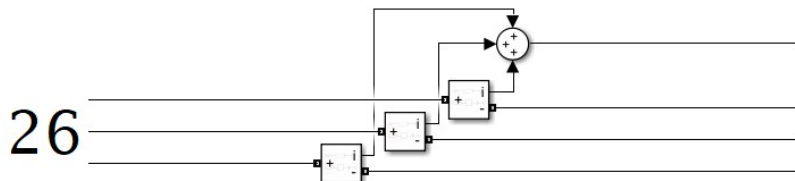
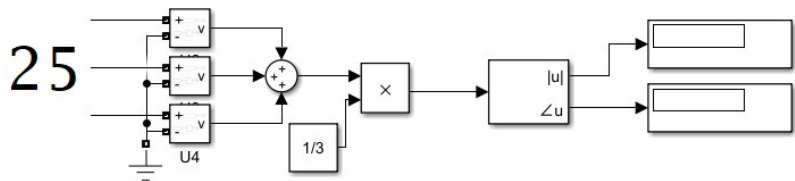
Egeneffekt	31,7	63,5	95,3	127	191	216	kVAR	S	Uf x Ix
Systemspenning	11	11	11	22	22	22	kV	Um	
Reaktorspenning	6,35	6,35	6,35	12,7	12,7	12,7	kV	Uf	Um / V3
Hovedstrøm	5	10	15	10	15	17	A	Ix	
Reaktans	1273	635	423	1270	847	747	ohm	Xtot	Uf/Ix
Induktans	4051	2021	1348	4043	2695	2377	mH	Ltot	Xtot/2/PI/f
R transf + R reaktor	20,6	10,86	5,15	19,38	17,11	16,84	Ohm	75°C	Rf / 3 + R r
R/X	1,62	1,72	1,22	1,53	2,02	2,26	%	Rf	typ. 100kVA

Reaktor Type	kV	Amp.	Reaktor Vikledata	Transformator ZNzn0 Type	kVA	R/X %	zt %	Tap Po	Pk	Dimensjoner mm			Total kg	olje kg	olje Liter
OER5248	22	15	VD27352	OTM3557	50	2,30	2,3	210	900	1120	920	1710	1335	442	502
OER5248	22	15	VD27352	OTM3557	100	2,00	3,5	210	1820	1120	920	1710	1450	442	502
Reaktor + 3polt .utkob. + HS- sikr.															
Magnex	E06	ELSP	50M61 15,5	OTM3557	50	2,30	2,3	210	900	1120	920	1710	1350	452	514
Magnex	E10	ELSP	50M61 15,5	OTM3557	100	2,00	3,5	210	1800	1120	920	1710	1465	452	514
Reaktor + 3polt .utkob. + HS- sikr.															
OER3245	11	10	VD27358	OTM3557	50	1,96	2,3	210	920	1120	920	1710	1100	455	517
OER3245	11	10	VD27358	OTM3557	100	1,70	3,3	210	1730	1120	920	1710	1258	455	517
Reaktor + 3polt .utkob. + HS- sikr.															
Magnex	E10	ELSP	50M61 8,3	OTM3557	50	1,96	2,3	210	920	1120	920	1710	1169	465	528
Magnex	E18	ELSP	80M71 8,3	OTM3557	100	1,70	3,3	210	1730	1120	920	1710	1273	465	528

F Simuleringsmodell







1. Parallellmotstand og tilhørende bryter
2. Resistive tap i sentralspolen
3. Sentralspolen
4. Strømmåling på sentralspolen. Denne blokken avgir amplitude og vinkel på nominellfrekvensen.
5. Strømmåling på resistive tap i sentralspolen
6. Strømmåling på parallellmotstanden
7. Spenningsmåling i nullpunktet på spenningskilden
8. Strømmåling på totale induktive bidrag
9. Spenningskilden
10. Strømtransformator på Fageråsen
11. Strømtransformator på Håvi
12. Strømtransformator på Jordet
13. Strømtransformator på resterende avganger
14. Strømmåling på totale bidrag fra nettet
15. Effektbryter
16. Kabelstrek på Håvi
17. Fageråsens lengste kabelstrek
18. Blokk for distribuert spole

19. Blokk for asymmetri
20. Jordingstransformator
21. Fordelingstransformator
22. Last på lavspentsiden av transformatoren
23. Totale kapasitive bidrag i nettet
24. Oscilloskop for fremvisning av strømflyt.
25. System brukt for måling av nullsystemsspenning
26. Innmat i strømtransformator blokk
27. System for jordslutning med tilhørende bryter og jordslutningsmotstand.
28. Innmat i asymmetri blokk
29. Innmat i distribuert spole blokk

G Verdier fra Netbas

Avgangsinformasjon

Verdi Avgang	Aktiv effekt [MW]	Reaktiv effekt [MVA _r]	Egenbidrag [A]
Innbygda Vest	1.280	0.262	7
Innbygda Øst	7.335	1.436	37
Trysil Sentrum	10.029	2.288	41
Turistsenteret	5.544	1.346	19
Kondensatorbatteri	0.000	-3.715	0.000
ST-TRYS	0.013	0.003	0.000
Sum små avganger	24.221	1.620	104
Fageråsen	10.322	1.834	87
Håvi	10.296	1.618	82
Jordet	5.378	0.558	66

Trysil lengste strekk på avgangen Fageråsen

Kabelbeskrivelse	Lengde [km]	Total lengde [km]	Radial
TSLF 3X1X400 AL	7.84953041	10.79964472	Fageråsen
TSLF 3X1X240 AL	2.95011431		

Kompenseringsgrad og parallellmotstand

Parallellmotstand	Kompenseringsgrad
Basert på oppslag i hovedtransformatoren i Netbas er tidsforsinkelsen på 2s. Basert på informasjon fra Eidsiva er denne dimensjonert for 10A.	Basert på oppslag i hovedtransformatoren i Netbas er nettet 5A overkompensert

Verdier fra hovedtransformator

Kortslutningsytelse [MVA]	X/R-rate
220	23.07

Jordingssystem i Trysil

Global jord
For å undersøke jordingssystemet i Trysil brukes funksjonen "Kontroller jordelektrode". Denne gir en grafisk presentasjon av jordingssystemet, og viser at Trysil driftes med Global jord. Basert på informasjon fra Eidsiva driftes nettet og tildels med gjennomgående jord.