

Manzoor Hussain Ali Zade
Mhamed Daw-Alnour Abdalla Bnat
Yuriy Haugstad

Utfordring med spolejordet nett

Spolekompensering av distribusjonsnett

Bacheloroppgave i Elkraft
Veileder: Tor Arne Folkestad
Medveileder: Espen Sørli
Mai 2021



Fakultet for informasjonsteknologi og elektroteknikk
Institutt for elektroniske systemer

Manzoor Hussain Ali Zade
Mhamed Daw-Alnour Abdalla Bnat
Yuriy Haugstad

Utfordring med spolejordet nett

Spolekompensering av distribusjonsnett

Bacheloroppgave i Elkraft
Veileder: Tor Arne Folkestad
Medveileder: Espen Sørli
Mai 2021

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for informasjonsteknologi og elektroteknikk
Institutt for elektroniske systemer



NTNU

Kunnskap for en bedre verden

Oppgavens tittel: Utfordringer med spolejordet nett	Dato: 20.05.21
	Antall sider: 30
	Antall vedlegg: 16
	Bacheloroppgave <input checked="" type="checkbox"/>
Navn: Manzoor Hussain Ali Zade, Mhamed Bnat & Yuriy Haugstad	
Veileder: Tor Arne Folkestad	
Eventuelle eksterne faglige kontakter/ veiledere: Espen Sørli & Magne Hålimoen Valdres Energi Nett	

Sammendrag:

Formålet med prosjektet er å undersøke og utføre analyser av jordfeilstrømmer i 22 kV blandet distribusjonsnett som består av høyspentkabler og luftlinjer. Distribusjonsnettet kompenseres av sentrale og distribuerte spoler. Plassering av ekstra distribuerte spoler i distribusjonsnettet er evaluert til å være en god løsning for å redusere jordfeilstrømmer og sikre et feilfritt system i nettet. Basert på resultater og analysere av enlinjeskjema vil det anbefales for plassering av distribuerte spoler i nettet i tillegg til de eksisterende.

Den vitenskapelige litteraturen, publiserte artikler og informasjon gitt av veileder, oppdragsgiveren og bedrifter har blitt brukt under prosjektet som grunnlag for en løsning. Manglende tilgang for Netbas og nettdata til nettsystemet pga. smitteverntiltak som ble iverksatt av myndighetene, umuliggjorde utføring av noen form for simulering hos oppdragsgiver. Alle beregninger og målinger ble gjort for hånd. Resultater er brukt som en del av grunnlaget for forslag til plassering av distribuerte spoler i nettet.

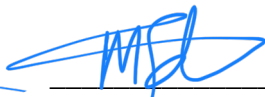
Rapporten konkluderes med anbefaling for plassering av distribuerte spoler i nettet for kompensering av jordfeilstrømmer i distribusjonsnettet. Det anbefales og byttet to av de 15A distribuerte spoler i blå sonen og heller bruke de to 15 A i den grønne sonen der det er planlagt for framtidig reinvestering av nettet. Distribuerte spolene vil holde nettverket overkompensert og ta seg av påløpende feil.

Stikkord:

Jordfeilstrømmer
Distribuerte spoler
Plassering av distribuert spoler
Vern



Manzoor H. Ali Zade



Mhamed Bnat



Yuriy Haugstad

Abstract

The purpose of the project is to research and analyze the ground fault currents in 22 kV distribution power network with mixed layout of power transmission that consists of ground and overhead lines. Distribution network is compensated by central and distributed coils. The placement of additional distributed coils in distribution network is evaluated to be a good solution to reduce the amount of ground fault currents in the networks and secure the safe and uninterrupted operation of the system. Based on the results and analysis of the single line diagram there will be formed a recommendation for the placement of additional distributed coils in the power network.

The scientific literature, published articles, provided paper literature, and information by project supervisor together with professional contacts from Glitre Energi AS and Valdres Energi AS, have been used in the project research as the basis for the solution. The lack of access to Netbas and extended amount of live data from distribution network due to restrictions imposed by the government to limit the contact and spread of ongoing pandemic, the ability to perform simulations at the power station were not possible. All the measurements and calculations were done by hand. The results were used as part of the basis to assist the placement of distributed coils within the network.

The paragraphs about arc suppression coils, ground fault protection and high voltage cables are described in the theory part of the report and were used as part of the solution basis for the project. During the research it was discovered that the placement distance of distributed coils from the centralized coil together with the distance between distributed coils play a big role in how high voltage protection relay behave. This information was used to decide an appropriate placement of additional distributed coils within the network.

The report concludes with the recommendation for placement of distributed coils to compensate for the ground fault currents in the 22 kV distribution network. It is recommended to displace two of the distributed coils to the area with high amount of overhead power lines. The area is the subject for future reinvestment of distribution network with ground cables. The presence of distributed coils will keep the network overcompensated and take care of accruing ground faults.

Forord

Denne bacheloroppgaven er skrevet som avsluttende del av det treårige bachelorprogrammet for elektroingeniørstudiet ved NTNU i Gjøvik. Oppgaven er utført i samarbeid med Valdres Energi Nett AS. Arbeidet ble påbegynt den 12. januar 2021 og ble levert 19. mai 2021. Det har vært utfordrende å jobbe med denne oppgaven under covid-19 pandemien, men med god hjelp fra veileder, Valdres Energi Nett AS og Glitre Energi Nett AS, ble det noe lettere å gjennomføre prosjektet.

Først vil vi gjerne rette en stor takk til vår veileder Tor Arne Folkestad for faglig hjelp og støtte under hele prosjektet. Han har alltid vært tilgjengelig og vist stort engasjement for oppgaven.

En spesiell takk til Kristin Wang og Olav Stensli fra Glitre Energi Nett AS som har delt deres kunnskap med oss om spolejordet nett og gitt relevant litteratur for prosjektet. Til slutt vil prosjektgruppen rette en stor takk til Espen Sørli og Valdres Energi Nett AS for en spennende og utfordrende oppgave, samt god kommunikasjon med raske tilbakemeldinger.

Innholdsfortegnelse

Abstract	iii
Forord	v
Figur liste.....	viii
Tabell Liste.....	ix
Formel liste.....	x
1. Innledning.....	1
1.1. Litt om Oppdragsgiver	1
1.2. Problemstilling	1
1.3. Avgrensning	2
1.4. Oppbygging av rapporten	2
2. Teori	3
2.1. Fordelingssystemer i distribusjonsnettet	3
2.1.1. Høyspentsystem i distribusjonsnettet	3
2.1.2. Feiltyper i Høyspentsystem i distribusjonsnettet.....	4
2.1.3. Luftlinje	4
2.2. Høyspenningsskabler-Historikk.....	6
2.2.1. Høyspentkabler.....	6
2.2.2. Bruk av høyspentkabel i Norge	7
2.3. Petersen spole	8
2.3.1. Sentrale spoler	9
2.3.1.1. Spenningsheving på friske faser.....	9
2.3.1.2. Resonans.....	9
2.3.1.3. Kunstig nullpunkt	10
2.3.1.4. Kompenseringsgrad.....	10
2.3.2. Distribuerte spoler	11
2.3.2.1. Egenbidrag.....	11
2.3.2.2. Plassering av distribuerte spoler	12
2.3.3. Fordeler og ulemper med spolejording.....	12
2.4. Jordfeilvern.....	13
2.4.1. Måling av jordfeilvern	13
2.5. Øvrige forhold	14
2.5.1. Reserve jordfeilvern	14
2.5.2. Vern av sentralt plasserte jordspoler	14
2.5.3. Spole skal festes til fundamentet	14

2.5.4.	Luftnett og kabler bør splittes.....	15
2.5.5.	Anbefalte maksimale nivåer for jordfeilstrom.....	15
2.6.	Parallellmotstand	15
2.6.1.	Demping av resonanskurve	16
3.	Metoder	17
3.1.	Litteraturstudie	17
3.2.	Bransje/fagfolk	18
4.	Resultat	19
4.1.	Nett systemet i Valdres.....	19
4.2.	Metode for fastsettelse.....	19
4.3.	Grunnlag for den valgte losning for problemstillingen	20
4.4.	Utrekninger for jordfeilstrom	20
4.5.	Utrekning av Kabel lengder.....	24
5.	Diskusjon.....	26
5.1.	Litteraturstudiet	26
5.1.1.	Utfordringer med innsamling av litteratur.....	27
5.2.	Spolekompensering	28
5.2.1.	Distribuert spolekompensering.....	28
5.3.	Resultat.....	28
5.4	Naturpavirkning.....	29
5.5	Vurdering av eget arbeid	29
6.	Konklusjon	30
	Referanse	1
	Vedlegg	3
A.	Kontaktpersoner	3
B.	Møretrafo databladet	4
C.	Historikk rundt kabelanlegg	5
D.	Litteratur Jordfeilstrommens storrelse.....	7
1.	Parallellmotstand	11
E.	Teknisk blad for 24kV kabler.....	14
F.	Enlinje skjema	15
G.	Utkoblingstid	16

Figur liste

Figur 1: Nettstasjoner i høyspenning distribusjonsnett[3]	3
Figur 2: Belyser de feiltypene i systemet[3]	4
Figur 3: Tabell viser ulike spenningsnivå for høyspent kabler[5]	6
Figur 4: Spolejordet nett med forenklet enpolet jordfeil med spole [11].....	8
Figur 5: Resonanskurve[14]	10
Figur 6: kompenserings grad i prosent[18]	11
Figur 7: Måling av nullstrøm og nullspining[20].....	13
Figur 8: Isolert nett[20]	14
Figur 9: Jordslutningsspole av dykkjern type for 22/rot3 kV, 10-100 A, 2 timers drift og utstyrt med parallellmotstanden er sylindren til høyre for styreskapet vedlegg [1]	16
Figur 10:Demping av asymmetri ved hjelp av parallell motstand vedlegg [1]	17
Figur 11: Kablers bidrag til jordfeilstrømmer vedlegg [D].....	20

Tabell Liste

Tabell 1: Fordeler og ulemper med luftlinjer[5]	5
Tabell 2: Fordeler og ulemper med kabler[5]	8

Formel liste

Formel 1: Jordfeilstømmer i kabel.....	21
Formel 2: Samlende jordfeilstømmen i undergrunnkabler og luftlinjer	21
Formel 3: Jordfeilstømmer i feil stedet	21
Formel 4: Maksimal spolestrømmen.....	24
Formel 5: Finner lengde på kabler	24

1. Innledning

I denne delen av rapporten skal det gis en kort beskrivelse av prosjektet. Her blir det beskrevet litt om bakgrunnen for prosjektet, problemstillinger, avgrensning, etiske utfordringer, og helt til slutt skal det tas med hvordan prosjektet er bygd opp.

1.1. Litt om Oppdragsgiver

Nettsystem i Norge er delt i to nivåer, transmisjonsnett og distribusjonsnett. Problemet i dette prosjektet omhandler delen av nettsystemet som kalles for distribusjonsnett. Oppdraget er gitt av Valdres Energi Nett AS. Dette nettselskapet er et energikonsern med ca. 33 ansatte, og er det største nettselskapet i Valdres. Nettselskapet har nettkonsesjon i eierkommune Nord-Aurdal, Øystre Slidre og Vestre Slidre og har ansvaret for drift og utvikling av kraftnettet, samt levering av nettjenester til kundene i forsyningsområdet på 2336 km². 759 km av nett består av 22 kV høyspentnett og 1814 km er lavspenningsnett med totalt 1052 nettstasjoner[1].

1.2. Problemstilling

Problemstillingen går ut på Valdres Energi Nett drifter et spolejordet nett som har fungert bra frem til nå, men de har begynt å merke at etter hvert som de legger mer og mer av nettet ned i kabel klarer de ikke å kompensere med de sentrale Petersen spolene som er i bruk pr i dag.

For å ha et så driftssikkert nett som mulig ønsker de å legge høyspentlinje ned i kabel. Dermed må det gjøres tiltak med tanke på jordstrømmene, (kabel genererer mellom 50-100 ganger mer jordfeilstrøm per lengdeenhet enn linje). Dersom de ikke har tilstrekkelig med kapasitet i spolene vil det ikke kunne slokke lysbuer som oppstår ved induserte spenninger i nettet.

Når man benytter flere distribuerte spoler kan vern på avgangen oppføre seg annerledes og man kan ikke sikre at de kobler ut som beskrevet i releplanen.

Derfor ønsker Valdres Energi Nett at bachelorgruppa kommer med forslag på hvilke tiltak som trengs for å komme til den beste løsningen for nett i dag og hvilke momenter som må tas i betraktning når nettselskapet skal legge fram strategi for fremtidig utbygging/reinvestering av nettet.

1.3. Avgrensning

Prosjektgruppa har måttet gjøre avgrensninger av prosjektet med tanke på at Covid-19 og smittevern reglene. Det var det planlagt å bruke Netbas og Simulink som verktøy, men dette gikk dessverre ikke etter planen siden oppdragsgiver kunne ikke gi tilgang til distansert bruk av Netbas. Bachelorgruppa i samråd med oppdragsgiver har planlagt å ta turen til Valdres for å utføre en rekke oppgaver og hente ut relevante nettdata for prosjektet. Dessverre måtte turen avlyses pga. nye nasjonale smitteverntiltak.

Dette ble løst ved at oppdragsgiver foreslo å lage noe forenklet kart av nettanlegget. Et enlinjeskjema ble tilsendt prosjektgruppen gjennom elektroniske kommunikasjonskanaler. Dette påførte gruppen 2 ukers forsinkelse for oppstart av prosjektet. Det oversendte data hadde ikke tilstrekkelig informasjon/nettdata på størrelser, plassering av spoler og hvordan forsyning av nett ser ut per dags dato. Dette tok lang tid før bachelorgruppa fikk tak i alt den relevante informasjonen. Dette førte til forsinkelser i prosjektarbeid med flere uker.

Den forenklete versjonen av nettskjema som ble tilsendt av Valdres Energi Nett AS kan man se i vedlegg (F)

På grunn av mangel for Netbas tilgang, ble det bestemt av gruppen å utføre alle nødvendige beregninger for hånd. Som konsekvens, har gruppen besluttet i samråd med veileder at prosjektet blir mer avgrenset enn først planlagt for å kunne klare å utføre prosjektet innen de angitte tidsrammer. Den ytterligere avgrensningen er at det skal tas mindre hensyn til framtidig utbygging/reinvestering av nettet. Dette er gjort for å tilpasse arbeidsmengde de tidsrammene som er gitt og sørge for at oppgaven blir ikke altfor stor. Prosjektet vil fokusere mest mulig på tiltak som kan iverksettes for å håndtere økende jordstrømmer i forbindelse med erstatning av luftlinjer til kabelnett.

1.4. Oppbygging av rapporten

For å skape størst mulig oversikt, deles rapporten inni 6 kapitler. Kapittel èn inneholder innledning som tar for seg bakgrunn for prosjektet, problemstilling, avgrensning og oppbygging av rapporten. Kapittel to omhandler teori som skal inneholde alle de relevante teorier rundt prosjektet. Kapittel tre metoder som beskriver hvor og hvordan de forskjellige informasjonene er innhentet. Kapittel fire resultat som er den mest krevende delen av rapporten, kapitalen vil inneholde beregninger som vil bli beregnet for hånd. Kapittel fem inneholder diskusjonen til

gruppa der gruppa vurderer resultater opp mot teori og helt til slutt en endelig konklusjon kapitel seks.

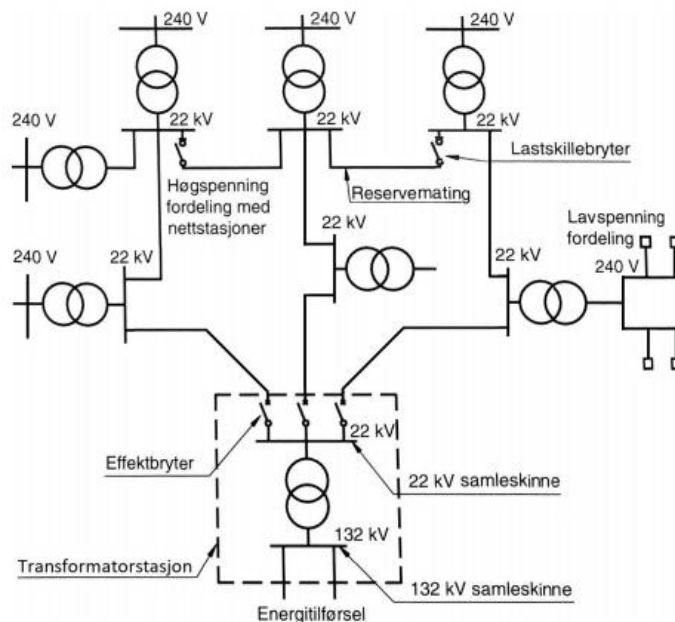
2. Teori

2.1. Fordelingssystemer i distribusjonsnett

Distribusjonsnett er et nettsystem som overfører elektrisk energi fra sentralnettet frem til forbrukeren. Spenningsnivået for nettet som betraktes i prosjektet er 22 kV distribusjonsnett med lavspenning på 400 V eller 230 V [2]. vist i (Figur 1).

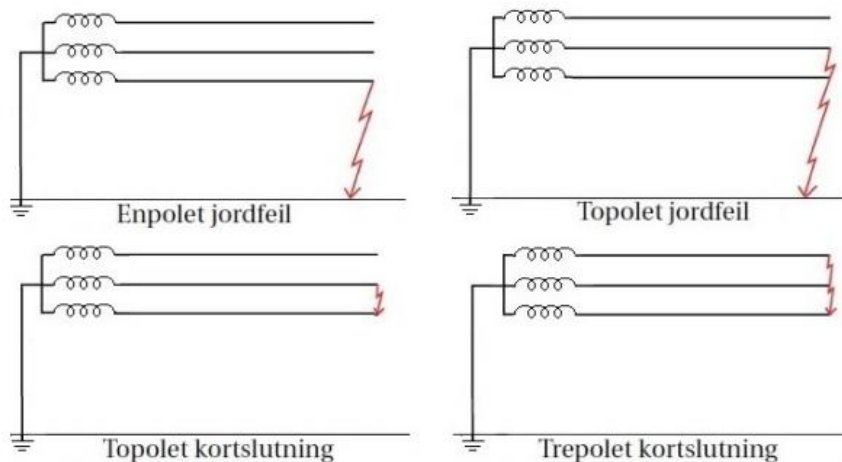
2.1.1. Høyspenningssystem i distribusjonsnett

I nettransformatorer skal spenningen transformeres gradvis ned til lavere spenningsnivå og deretter distribueres til forbrukere. Når det kommer til utforming, er distribusjonsnett utformet som et radielt nett i drift og for deler av nettet er det en redundans ved reserveforsyningsveier. Dette betyr at det ikke driftes som maskenett (avganger forsynes fra en bestemt side)[3]. Hver nettstasjon har mange avgreninger, og i de avgreningene plasseres vanligvis lastskiller eller effektbrytere, som gir muligheter for å dele opp nettet, og forsyne nettet ved hjelp av andre forsyningsalternativer.



Figur 1: Nettstasjoner i høyspenning distribusjonsnett[3]

I trefase kraftsystem kan det oppstå flere forskjellige typer feil[3]. Feilen som oppstår i overføringslinjer, kan det klassifiseres grovt som symmetriske og usymmetriske feil. Et eksempel på symmetriske feil er trefaset kortslutning hvor alle fasene er kortsluttet til hverandre og ofte til jord. Usymmetriske feil oppstår kun når en eller to faser kortsluttes mot jord. Figur 2 illustrerer de feiltypene i systemet[3].



Figur 2: Belyser de feiltypene i systemet[3]

2.1.2. Feiltyper i Høyspentsystem i distribusjonsnett

Vanligvis får komponenter i strømmettet nedsatt funksjonsevne etter lang tid i drift, og dette kan forårsake forstyrrelser i systemet. Når isolasjonsmaterialet mellom to spenningsførende deler bryter sammen, vil det føre til en kortslutning på linjen, noe som skaper en lav impedans. Konsekvensene av dette kan føre til store ødeleggelses i komponenter. Brudd i strømtilførselen kan variere mellom lange og korte perioder før kortslutningsområdet blir reparert og strømmettet kan settes tilbake i drift.

2.1.3. Luftlinje

Luftlinje er en ledning som frakter store mengder av elektrisitet mellom kraft- og nettstasjoner, eller understasjoner. Distribusjonen til forbrukere skjer gjennom 22 kV høyspentlinjer og lavspenninglinjer med spenning som transformert ned til 400 V eller 230V[2].

Vanligvis når nye linjer blir installert, skal det benyttes belagte linjer med et tynt isolasjonssjikt. Dette gjøres for å beskytte fugler mot elektrisk støt når de lander på luftkabel. Isolasjonssjikt øker andelen av forbigående feil og reduserer brudd i linjen[4].

Når det gjelder miljø, er det noen tiltak som må tas hensyn til dersom luftlinje skal fornyes, og de tiltakene vil føre til utvidelse av tverrsnittet for en belagt linje, slik det ikke blir varmegang siden linjen er isolert. For å kunne bygge en strømlinje må det lages anleggsveier for transport av materiell og tunge anleggsmaskiner som vil brukes i prosessen. Dette vil føre til betydelige spor i terrenget og hogging skog i de områdene hvor anleggsmaskiner skal fraktes[4].

Når det gjelder forsyningssikkerhet, en luftlinje er utsatt for mange ytre faktorer som vær, vind, ising, trefall lynnedslag i tillegg til kortslutninger som kan oppstå pga. fugler. Ved vedlikehold av linjen i skråterreng må man ta hensyn til trefall på linje, spesielt med tanke på bredden av ryddegata i terrenget. Det er veldig krevende å holde en linje vedlikeholdt i forbindelse med hyppige og kraftigere uvær. Dette fører til at stadig flere linjer erstattes med jordkabel.

Når det gjelder økonomi, er det en del kostnader forbundet med utbygging som man må ta hensyn til. For eksempel, master, liner, fundamenter, armaturer, maskiner, materiell og transport. Dessuten må man også ta hensyn til overføringskapasiteten når det kommer til antall liner til hver fase, driftsspenning og tverrsnittet for linene[4].

Tabell 1: Fordeler og ulemper med luftlinjer[4]

Fordeler	Ulemper
Enkel å finne feilen	Må kontrollere hvert år
Kort reparasjonstid	Høye bygge kostnader og prosjektering
Lett å finne avstand mellom linjer i nærheten	Utsatt for vær, fugl og trefall
Enklere å krysse over elv og fjellsider	Skadelig for nature

2.2. Høyspenningkabler-Historikk

På 1880-tallet ble det produsert de første kablene. På denne tiden ble kablene isolert med impregnert jute, og det ble brukt forholdvis i lav driftsspenning. Kabler med 33 kV, ble introdusert i 1915, men den type kabel hadde feil som ingen kunne forklare. Etter hvert ble en ny type kabel utviklet som stod under oljetrykk for impregnering. Det var mulig å bruke enda høyere driftsspenning fordi impregneringen var tyntflytende olje. I dag finnes det kabler som er dimensjonert for spenninger opptil 525 kV, og det er også mulig å lage oljetrykkskabler med papirisolasjon for spenninger opptil 750 kV[5].

Kabler med isolasjon av polyetylen for lav spenning, ble lansert i 1940, og 20 år senere kom de første PEX-isolerte kablene. I 1968 ble de første PEX-kabler tatt i bruk for 12 kV, 24 kV og 77 kV spenningsnivå. Senere i 1976, ble PEX-kabler brukt for 145 kV nett. Første PEX-kabler, dimensjonert for 300 kV, kom i 1980. Per dags dato er kablene mer utviklet, og det kan fås spenninger på opptil 500 kV når kabler med plastisolasjon benyttes[5].

2.2.1. Høyspentkabler

Det finnes ulike typer kabel, men kabeltype som er i fokus i denne rapporten er høyspentkabel. En høyspentkabel er en elektrisk kabel som er designet til å tåle spenninger som er over 1 kV. Det blir det satt store krav for å produsere kabler, når det gjelder materialvalg og produksjonsprosess av høyspentkabler. Ulike typer kabler blir produsert med ulikt spenningsnivå[5]. Tabellen under vises spenningsnivåer for de ulike type kabler.

	1 kV	7,2	12	24	36	52	72	145	300	420	525kV
PVC	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
EPR	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Masse	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
PEX	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Olje	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

Figur 3: Tabell viser ulike spenningsnivå for høyspent kabler[5]

Definisjon av Figur 3

- PVC-kabler har spenningsnivå mellom 1 og 3 kV.

- *EPR-kabler har spenningsnivå opptil 12 kV.*
- *Massekabler har spenningsnivå opptil 24 kV.*
- *PEX-kabler brukes for hele spenningsområde mellom 1kV og 400 kV.*
- *Oljetrykkskabler har spenningsnivå fra 36 kV opptil 525 kV[5].*

2.2.2. Bruk av høyspentkabel i Norge

På slutten av 1800-tallet ble elektrisitet innført i Norge og verden. I begynnelsen var de fleste elektriske anlegg bedriftsinterne og produksjon av elektrisitet innenfor begrenset geografisk områder, men etter hvert ble det mulig å overføre kraft på lave spenningsnivåer fra 1 til 10 kV[6].

I 1914 i forbindelse med Solbergfossledningen fra Glommakraftverkene ble det første forslaget om bruk av kabler i Norge introdusert[7].

På 50-tallet ble tatt en beslutning om vilkår i forbindelse med ledning Strinda-Lilleby. Denne beslutningen handlet om at kommunene kunne kreve kabel med tanke på bebyggelse, hvis det ble teknisk og økonomisk forsvarlig i fremtiden[7].

I begynnelsen av 1980-tallet ble 132 kV kabler benyttet i distribusjonsnettet i de fleste av de største byene. Når det gjelder miljø, den største faren med graving av høyspentkabel er installasjon av nye høyspentkabler. I tillegg kan kabelgrøfta bli berørt av jordras som vil føre til ødeleggelse av kabler som ligger i bakken. I kraftledningsproduksjon vil dette anses som en skade for miljøet, men miljøulemper kan reduseres om det er foretatt nødvendige tiltak for å forhindre unødvendige skader på omgivelser.

Når det gjelder forsyningssikkerhet, gravemaskiner utgjør en trussel for uavbrutt krafttilførsel, særlig når gravearbeid utføres i nærheten av høyspentlinjer. Nettselskapet ansvarlige for drift i området må kontaktes før arbeid med graving nær luftlinje kan starte[7].

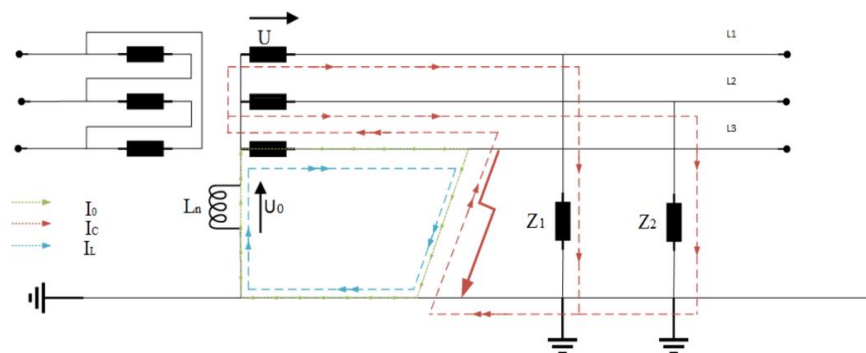
Når det kommer til økonomi, er det kostnadskomponenter som man bør ta hensyn til. Det gjelder utlegging, graving, utstyr, montasje, overvåkingsutstyr og klammer. Kostnadskomponentene avhengige av lengde på kabelen og arealet som skal dekkes. Det kan variere fra et anlegg til et annet, avhengig av krav til overføringskapasitet og grøfteutgifter. Høyspentkabel påfører høyere kostnad enn linjenettet når det gjelder vedlikehold og oppussing, til tross for at man slipper skogrydding og årlig kontroll. Kabler og linjenettet har nesten identiske levetidskostnader, men bruk av kabel er en mer fornuftig alternativ med tanke på lav miljøbelastning og større driftssikkerhet.

Tabell 2: Fordeler og ulemper med kabler[4]

Fordeler	Ulemper
Har en høy driftssikkerhet	Ikke lett å finne feilen
Enkelt å prosjektere	Lengre reparasjonstid
Enkelt å etablere	Trussel ved gravearbeid
Enkelt å flytte på i fremtid om det trenges	

2.3. Petersen spole

Petersen spole eller ofte kalt for jordslutningsspole er en reaktor som ofte lages uten jernkjerne i midten. En så kalt spole med luft gap. Jordslutningsspole tilkobles mellom nullpunktet på transformatoren og jord. Spolen ble først utviklet av Waldemar Petersen i 1916 [8][9]. Hovedfunksjonen til jordslutningsspole er å redusere jordfeilstørrer i nettet ved kompensasjon av den kapasitive størrer. Den induktive størrer til spole kan redusere, kansellere eller overgå den kapasitive størrer avhengig av hvordan jordslutningsspole er innstilt. Det finnes tre ulike typer av jordslutningsspole. Med fast bidrag, manuell justering og automatisk justering av bidraget. Petersen spole reduserer jordfeilstørrer i nettet og bidrar til slukning av lysbuer[10]. (Figur 4) illustrerer trefaset transformator med delta-stjernerkobling, spole som er koblet til nullpunktet og jordfeil på en av polene.



Figur 4: Spolejordet nett med forenklet enpolet jordfeil med spole [11]

2.3.1. Sentrale spoler

Det er normal praksis å installere en stor sentral spole i hoved transformatorstasjonen, basert på informasjon som ble gitt fra Valdres Energi AS. Som det ble nevnt tidligere i kapittel 2.3, en slik spole bør ha stor nok kapasitet for å ta seg av jordfeilstrømmene i store områder av nettet.

Jordslutningspole skal sørge for sikker drift av nettet og at de fleste jordfeil kan bli håndtert uavbrutt. Som nevnt i kapittel 2.1, jordslutningsspole tilkobles mellom nullpunktet på transformatoren og jord. Reguleringen av sentral spole kan være enten trinnvis eller kontinuerlig. Grunnen til det er å kunne gi god kompensering i nettet ved forbigående jordfeilstrømmer, utkoblinger på avganger eller andre endringer i nettet [10] [12].

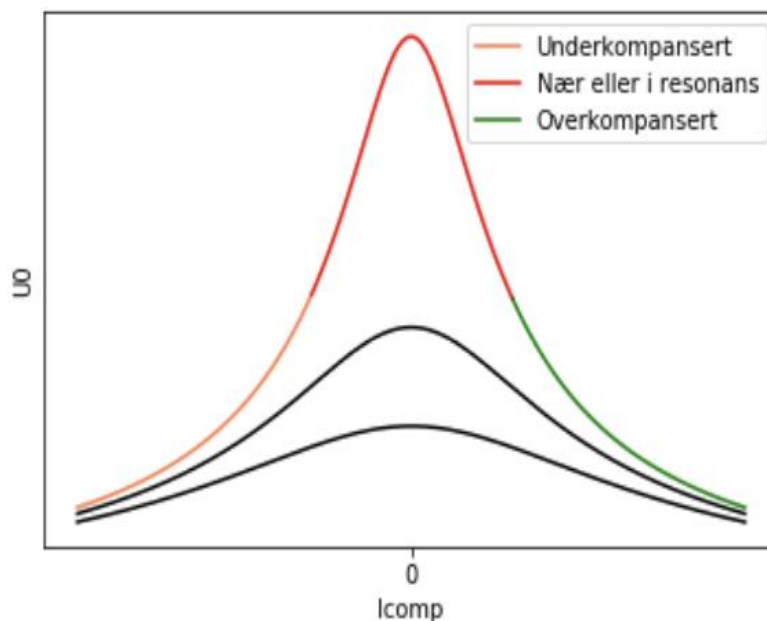
Ved enpolet jordfeil i spolejordet nett med blandet kabel-/luftnett, skal utkoblingen skje innen de angitte tidsrammer i vedlegg (G).

2.3.1.1. Spenningsheving på friske faser

Når det oppstår kortslutning på en av fasene i nettet, knyttes dette til jord gjennom en overgangsmotstand Z_1 som vist i Figur 4. Dette fører til endring av nullpunktspenningen i nettet. Dette fører til at spenningen på de friske fasene vil stige til linjespenningen. Overspenning av fasene fører til at komponenter i nettet blir betydelig svekket. Fasespenningen vil stige over de friske faser over hele nettet som følge av kortslutning på en av fasene i en trefase nett. Dette i sin tur vil føre til større forekomst av feil over nettutstrekningen[13].

2.3.1.2. Resonans

Ufullstendig revolvering og forskjell på fasene fører til ujevn kapasitans mot jord i trefaset nett. En slik forskjell mellom kapasitansene er også kalt for kapasitiv asymmetri. Økende differanse mellom kapasitansene fører til at kapasitiv asymmetri blir større og sammen med spole, fører det til økt spenning i nullpunktet i resonans. Når nettet er i resonans, reaktansene til kapasitansene og reaktans til spole fører til total høy strøm over sentral spolen, som ikke er ønskelig. Det i sin tur fører til store påkjenninger for isolasjonen og i verste fall havari av spole og transformator. Drift av spole i resonans med nettet kan også gi problemer med relévern og føre til unødvendige utkoblinger. Derfor er det viktig med riktig innstilling av spole for å kunne unngå drift av nettet i resonans. Figur 5 under illustrerer resonanskurve for ulike kompenseringsgrad spolejordet nett[12][13].



Figur 5: Resonanskurve[14]

2.3.1.3. Kunstig nullpunkt

Kunstig nullpunkt for spolen kan skapes ved å bruke egen dimensjonert Z_n -transformator. En slik transformator gir bedre spenningsfordeling over spolen ved forbigående jordfeil og føre til at nullsystemimpedansen blir lavere. Dette betyr at transformatoren blir ikke overbelastet og store jordslutningsstrømmer vil ikke gå gjennom viklingene til transformatoren. Spolen kan fortsatt holdes i drift når transformator blir utkoblet pga. vedlikehold eller søk av andre forsyningsveier. Kunstig nullpunkt hindrer utkobling av sentral spole som i sin tur ville ført til enorme jordslutnings-strømmer i systemet. Bortfall av sentral spole ville skapt dårlig person- og driftssikkerhet og ført til høyere berøringsspenning og at muligheter for lysbue demping blir borte [15][16].

2.3.1.4. Kompenseringsgrad

Fra anbefalingen i REN-blad[15] kommer det at distribusjonsnett med kapazitiv egenbidrag på avgangene over 40A anbefales underkompensert drift og for distribusjonsnett med kapazitiv egenbidrag på avgangene under 40A anbefales overkompensert drift [14][17]. Figur 6: kompenserings grad i prosent[18]Figur 6 viser kompenseringsgraden for drift av spolejordet nett.

Kompenseringsgrad	$\%_{comp}$
Kraftig overkompensert	10% \Rightarrow 100%
Overkompensert	5% \Rightarrow 10%
Resonans	-5% \Rightarrow 5%
Underkompensert	-10% \Rightarrow -5%
Kraftig underkompensert	-100% \Rightarrow -10%

Figur 6: kompenserings grad i prosent[18]

Overkompensert drift av distribuerte spoler som vanligvis har egenbidrag under 40A i et distribusjonsnett, hindrer at nettet går i resonans ved utkobling av avgangene og holder nullpunktspenningen over spole lavt. Underkompensert drift av store sentrale spoler sikter at tilhørende jordfeilvern oppdager feil i nettet [13].

2.3.2. Distribuerte spoler

Distribuerte spoler er mindre spoler som utplasseres ut i anlegget på avgangene til hovedtransformatoren og prinsippet er lik sentral spole, omtalt i kapittel 2.3.1. Utplussing av slike spoler er spesielt aktuelt i tilfeller når mye av kabel legges i jord og sentral spole har ikke lenger nok kapasitet for å kompensere for de store jordfeilstrømmene som oppstår i nettet. For 22kV distribusjonsnett brukes gjerne spoler på 10A og 15A. Slike spoler er fastmontert til Z_n -fordelingstransformatoren. Møre Trafo AS driver med produksjon og salg av slike transformatorer med P-spole. Spolen er satt med fast verdi uten mulighet for trimming siden all sentral spole sørger for automatisk finjustering mot resonans, vedlegg (B)

2.3.2.1. Egenbidrag

Distribuerte spoler hjelper sentrale spoler til å ta seg av jordfeilstrømmer i nettet. Egenbidraget er differansen mellom kapazitiv lekkasjestrøm og det induktive bidraget til spoler. Det kan være vanskelig å lokalisere jordfeilstrømmen på grunn av høyt egenbidrag i nettet, særlig når mer kabel legges i jord. Distribuerte spoler hjelper sentral spole til å dempe egenbidraget og lokalisere jordfeilen i nettet hvis lysbuen ikke slukkes av seg selv[12].

2.3.2.2. Plassering av distribuerte spoler

Plassering av distribuerte spoler forutsetter gode jordingsforhold. Det bør velges et sted i nettet hvor spolen vil dekke jordstrømmer best ved flytting på en annen avgang, utkoblinger tilknyttet vedlikehold eller utbygging. Riktig plassering av spoler er viktig siden de genererer wattmetrisk bidrag og strømflyt gjennom spolen ved forbigående jordfeil kan forvirre vern. Vernet kan da lese det som jordfeil i foroverretning og trygge unødvendig utkobling. Det kan tillates inntil 4-5 distribuerte spoler med egenbidrag på 15A per avgang når R/X er 2,5% (vedlegg B)

2.3.3. Fordeler og ulemper med spolejording

Det er vanlig for nettselskap i Norge å drive nettet kompensert ved hjelp av spoler for å redusere jordfeilstrømmene i høyspenningssystem. Spolejording byr på fordeler og ulemper avhengig av behov og hvordan høyspentnettet ser ut.

Det positive med spolejording er at det bidrar til å redusere jordfeilstrøm i systemet, og nettet kan drives med forbigående jordfeil uavbrutt og uten spenningsdipp. Dette er veldig positivt for et nettselskap sett fra et økonomisk perspektiv, for da påføres ikke energiselskapet store økonomiske tap pga. unødvendige utkoblinger på linja eller skader på anlegg. Spoler bidrar også, som ble nevnt tidligere, til å slukke lysbuer i enpolet jordfeil.

Det negative aspektet med spolejording er at det gjør arbeidet med lokalisering av jordfeil vanskeligere, samt plassering av spoler kan skape problemer for reléer og transiente jordfeil kan trigge distansevern og føre til unødvendige utkoblinger. Enpolet jordfeil kan føre til topolet jordfeil hvis lysbuen ikke slukkes i tide. Rett økonomisk kan det være kostbart for et nettselskap å bruke spoler i nettsystemet. Delvis fordi spoler er veldig kostbare og fordi det også stilles høyere krav til isolasjon pga. høye spenninger som oppstår ved jordfeil[13].

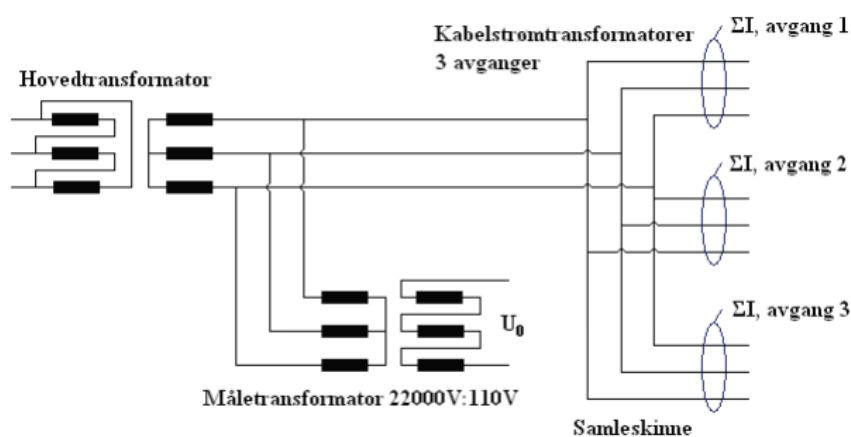
2.4. Jordfeilvern

Et jordfeilvern er en type bryter som sørger for større personsikkerhet og beskyttelse av dyr, linje eller kurs. Når jordfeilvernet oppdager en jordfeil i kursen, vil en strømtilførsel brytes av etter en viss tid. Vanligvis skjer jordfeil når strømledninger kommer i kontakt med jord. I distribusjonsnett, jordfeil er en av meste utbredte feilen på dette spenningsnivået. Derfor er jordfeilvern et viktig virkemiddel for å beskytte i nettet.

I luftlinjer oppstår mange jordfeil. Dette på grunn av ytre faktorer som vær, vind, ising trefall, lynnedslag og fugl. Ved å benytte kabel vil det føre til at nettet bli mindre utsatt for disse ytre faktorene. Kabling av distribusjonsnett er en framtidrettet løsning, men kabler i distribusjonsnett kan føre til økte jordfeilstrømmer og lengre vedlikehold av feil på kable[n] [19].

2.4.1. Måling av jordfeilvern

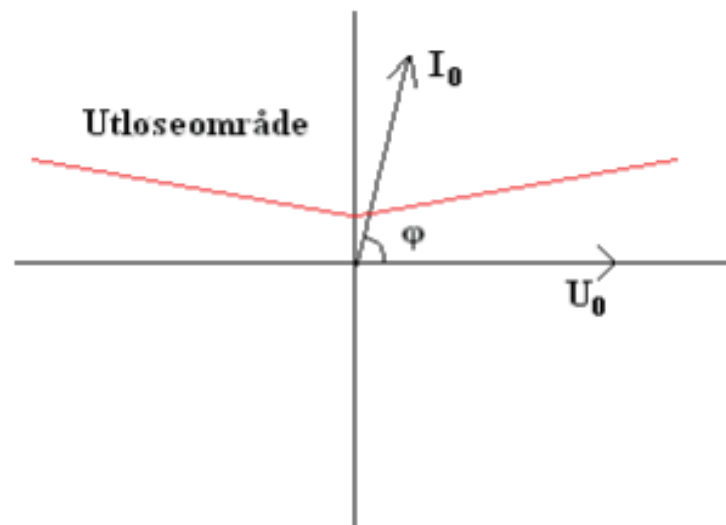
Jordfeilvernet måler vanligvis spenning I nullpunktet, U_0 og I_0 . I_0 måles ved å benytte en strømtransformator som vil måle summen av fasestrømmer på en avgang. Summen av fasestrømmer skal være lik null i et balansert nett uten feil. Ved måling av U_0 benyttes en såkalt åpen trekantvikling. Det betyr at det blir foretatt målinger av spenningen over de tre sekundærspolene som ligger i serie på transformatorens sekundærside [20].



Figur 7: Måling av nullstrøm og nullspining [20]

En fasevinkel mellom U_0 og I_0 bestemmer feilretningen på strømmen. Mens ved isolert nett, måles U_0 og $I_0 \sin \alpha$ som man ser i Figur 8. kan også se ut ifra viserdiagram, hvor langt strømvektoren går før vernet løses ut. Utløseområdet er indikert med rød linje over første og

andre kvadrant. Feilen vil ligge i foroverretning for vernet når α ligger mellom 0^* og 180^* og over utløseområdet og alt under det vil ligge i bakover retning[20].



Figur 8: Isolert nett[20]

2.5. Øvrige forhold

2.5.1. Reserve jordfeilvern

Når det gjelder 11-eller 22 kV samleskinne, anbefales det å ha U_0 -vern. Vernet skal detektere jordfeil iht. Forskriftskravet for gjeldende nett. Utkobling av matende transformator i blandet nett, kan forsinkes inntil 10 sekunder[21].

2.5.2. Vern av sentralt plasserte jordspoler

Termiske overvåkning er et krav i jordspolene. Kritiske høy temperatur, skal umiddelbart koble ut tilhørende transformator[21].

2.5.3. Spole skal festes til fundamentet

Spolen magnetiseres ved først jordfeil og det vil føre til at den begynner å vibrere, derfor skal den festes til underlaget slik at man unngår at den flytter på seg[21].

2.5.4. Luftnett og kabler bør splittes

Når det gjelder luftnett og kabelnett bør nettplanleggere ha som mål at luftnett og kabelnett skal forsynes fra forskjellige samleskinner og trafo. Dette kan være en god måte for å forbedre leveringskvalitet[21].

2.5.5. Anbefalte maksimale nivåer for jordfeilstøm

Anbefalt maksimalverdier for kapasitiv jordfeilstømmer i blandet nett:

- *For 12kV-nett krav at grensen ved 200 A[21].*
- *For 22kV-nett krav at grensen ved 300 A[21].*

Det blir behov for splitting av nettforsyningen over flere transformatorer når oppgitte grensene over, overkrides. Dette på grunn av at den ohmske strømmen blir for stor, og vil lede til at krav om maksimale berøringsspenninger kommer til å bli vanskelig å oppfylle. Jordfeilen vil føre til at overstrømsvern for trafo kobler ut på grunn av at i anbefalte maksimale grensen ikke blir overholdt[21].

2.6. Parallellmotstand

Nettet kan drives over- eller underkompensert avhengig av spolens kompenseringsgrad, vil den reaktive strømkomponenten dels være meget liten dels variere mellom å være induktiv og kapasitiv, vedlegg [1].

I et spolejordet nett, må den resistive strømmen i tillegg til kapasitive strømmen være en del av målegrunnlaget for lokalisering av jordfeil i nettet. En motstand kan da kobles inn parallelt med sentral spole og regulert med spolens regulator slik at den kan kobles inn når den naturlige resistive strømkomponenten nettet er for lav. Dette gir vernet bedre målegrunnlag for lokalisering av jordfeilstømmer i spolejordet nett. Motstanden er dimensjonert til å kobles inn i parallell med spolen med en forsinkelse på 1-3 sekunder for å gi spolen tidsrom til å slukke feilen før vernet kobles inn. Motstanden har driftsbegrensninger som tar hensyn på motstandens varmekapasitet. Normalt er den dimensjonert til å ha *driftstid på 90 sekunder, basert på en starttemperatur på 40 °C, vedlegg [1].* Vernets sensitivitet er også viktig og må tas i betraktning for dimensjonering av motstanden. Figur 9 under illustrerer innkoblet parallell motstand med jordslutningsspole.

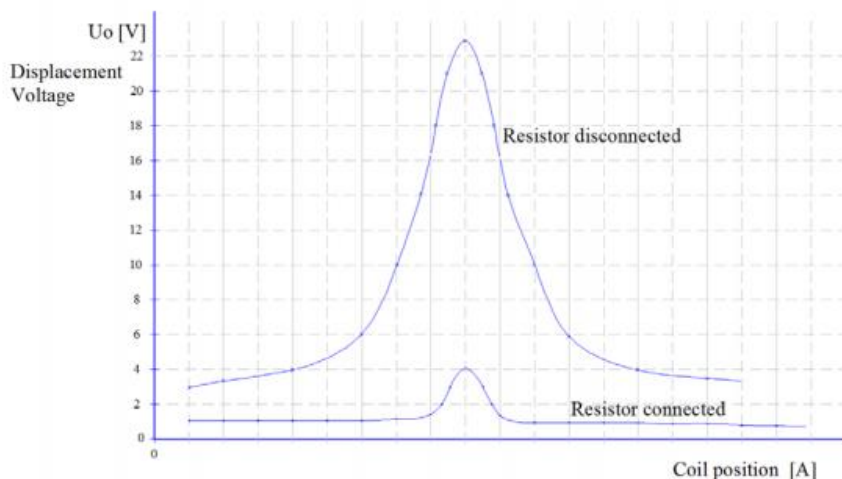


Figur 9: Jordslutningsspole av dykkjern type for 22/rot3 kV, 10-100 A, 2 timers drift og utstyrt med parallellmotstanden er sylindere til høyre for styreskapet vedlegg [1]

2.6.1. Demping av resonanskurve

Parallellmotstanden kan også benyttes til demping av resonans ved langvarig innkobling av motstanden i parallell med spolen. Denne motstanden utkobles ved jordfeil for å gjøre slukking av lysbue enklere før den kobles inn igjen etter 1-3 sekunder, for å forbedre målegrunnlaget for det retningsbestemte jordfeilvernet, vedlegg [1].

Ved jordfeil på en av fasene, bør man forsøke å gjenopprette fasesymmetrien ved hjelp av omfattende revolvering, vedlegg [1]. Figur 10 **Feil! Fant ikke referanse kilden.**, illustrerer resonanskurve før og etter demping ved hjelp av parallellmotstand.



Figur 10: Damping av asymmetri ved hjelp av parallell motstand vedlegg [1]

3. Metoder

I dette kapittelet skal det legges fram ulike metoder som ble brukt for innsamling av informasjon og data, relevant for prosjektet. Drøfting av metoder brukt for akkumulering av nødvendig kunnskap for teori- og resultatdelen, begrenset av problemstillingen. Metoden er oppdelt slik at den er presentert på en ryddig og oversiktlig måte for leseren.

Arbeidet med resultat har vært veldig krevende. Mye av tiden har blitt brukt på å finne riktige data for å kunne oppnå høy presisjon i resultatet. Det ble besluttet å ha et separat delkapittel som skal gå nærmere inn på metoder for resultat. I starten av resultatkapitlet beskrives det hvordan distribusjonsnettsystemet rundt Tisleia og Åbjøra er lagt opp, basert på enlinjeskjema gitt av Valdres Energi AS. Videre i resultatkapitlet beskrives metoden bak matematiske beregninger for jordfeilstømmer og kabelberegninger med hvert sitt delkapittel.

For at rapporten skal være mest mulig problemstillingsorientert, ble det utført arbeid for å sikre at formler benyttet i beregninger og beregningsresultat har vitenskapelig validitet og er basert på troverdige vitenskapelige kilder.

3.1. Litteraturstudie

For å kunne finne gode og relevante vitenskapelige kilder samt anskaffelse av bedre forståelse for spolekompensering og jordfeilstømmer i 22kV distribusjonsnett, ble litteraturstudie satt i

fokus. Sikre vitenskapelige kilder benyttet under prosjektet er bland annet artikler publisert av REN-bladet, ABB og Siemens. REN-bladet har mange ulike tekniske artikler og rapporter som oppfyller norske krav og spesifikasjoner. Ulempen med REN-bladet er at den er begrenset for offentlig bruk uten lisens. En del av faglitteratur ble oppgitt av veilederen for prosjektet. All faglitteratur og kilder ble samlet i en felles litteraturliste.

For å forsikre at faglitteratur og informasjon som ble funnet ved hjelp av nettsøk er troverdig, ble det sent ut e-poster til eksterne bedrifter som jobber med lignende problemstillinger og har kjennskap til spoler, spolejording og jordfeilstrømmer. Glitre Energi Nett AS har vært veldig hjelpsomme ved å besvare henvendelser og tilsende informasjon med artikler og tips som ble nyttig for prosjektet samt verifisering av akademisk grunnlag til utførte nettsøk.

3.2. Bransje/fagfolk

Diverse fagpersoner i bransjen har vært en viktig kilde for faglitteratur. De har vært veldig hjelpsomme i tolking av forskrifter, normer og standarder, samt stilte opp med kunnskap og kjennskap til ulike løsninger som benyttes i bransjen i dag.

Stort fokus har blitt rettet mot bedrifter som har erfaring med lignende problemstillinger og 22 kV spolejordet distribusjonsnett. Nøkkelfagfolk som bidro med hjelp under prosjektet var Glitre Energi Nett AS og oppdragsgiveren for prosjektet, Valdres Energi AS.

Prosjektveileder og universitetslektor ved institutt for elkraftteknikk, Tor Arne Folkestad har vært en viktig fagperson med mye kunnskap og innsikt. Prosjektveilederen stilte opp med viktig faglitteratur og tips i starten og underveis i prosjektet og gitt en rekke pekepinn for hvordan ulike problemstillinger kan løses.

4. Resultat

Det er gitt en grundig beskrivelse av teori som er rettet mot problemstillingen i teorikapittelet. Dette blir brukt for å forstå grunnlaget for resultat. I kapittelet under skal det presenteres litt om nettsystemet i Valdres og beskrivelse av metode. Deretter skal det skrives kort om grunnlag for problemstillingen. Til slutt skal utregninger for jordfeilstrømmer og kabellengde legges fram med beskrivelser.

4.1. Nett systemet i Valdres

Faslefoss kraftstasjon har en sentral spole med størst innmating i Valdres. Denne spolen er en selvregulerende med maksimalt bidrag på 200 A. Normalt driftes Faslefoss kraftstasjon for seg selv med muligheter for innkobling til Åbjøra kraftstasjonen ved endringer, feil eller vedlikehold av nettet på Tisleia avgangen. Det blir ikke rettet mye fokus rundt Faslefoss kraftstasjonen pga. avgrensninger utført tidligere i prosjektet. Åbjøra kraftstasjon har en sentral spole med maksimalt bidrag på 200 A. Dette er en selvregulerende spole, med 97 A spolestrøm på alle avgangene ved vanlig drift. Gruppen jobber med problemområdet på en av avgangene i Åbjøra kraftstasjon, kalt for Tisleia avgangen. Denne avgangen består av blandet nett mellom jordkabler og luftlinjer. Valdres energi har utplassert distribuerte spoler i nettet pga. økende mengde jordfeil. Økning av jordfeilstrøm skyldes stadig overgang fra luftlinje til kablet nett. Per dags dato, Tisleia-avgangen kompenseres ved hjelp av distribuerte spoler med samlet bidrag på 145 A. Tre av spolene har et bidrag på 15 A hver, og den fjerde spolen har manuelt justerbart bidrag på 10-100 A. Den er innstilt til 100A, per dags dato.

4.2. Metode for fastsettelse

Det var tiltenkt å bruke Netbas og Simulink for beregninger og innhenting av nødvendig nettdata for Tisleia avgangen. Valdres Energi AS kunne ikke gi Netbas tilgang for dette prosjektet, noe som førte til mangel for essensielle data som kunne brukes til å utføre datasimulasjoner og løsning av problemstillingen. Valdres Energi AS stilte opp med enlinjeskjema av avgrenset problemområdet sammen med relevante verdier for luftlinjer og kabler. Alle beregninger og analyse med relevante data og oppgitte verdier ble gjort for hånd uten digitale verktøy som Matlab og Simulink. En slik metodikk er en tidskrevende prosess.

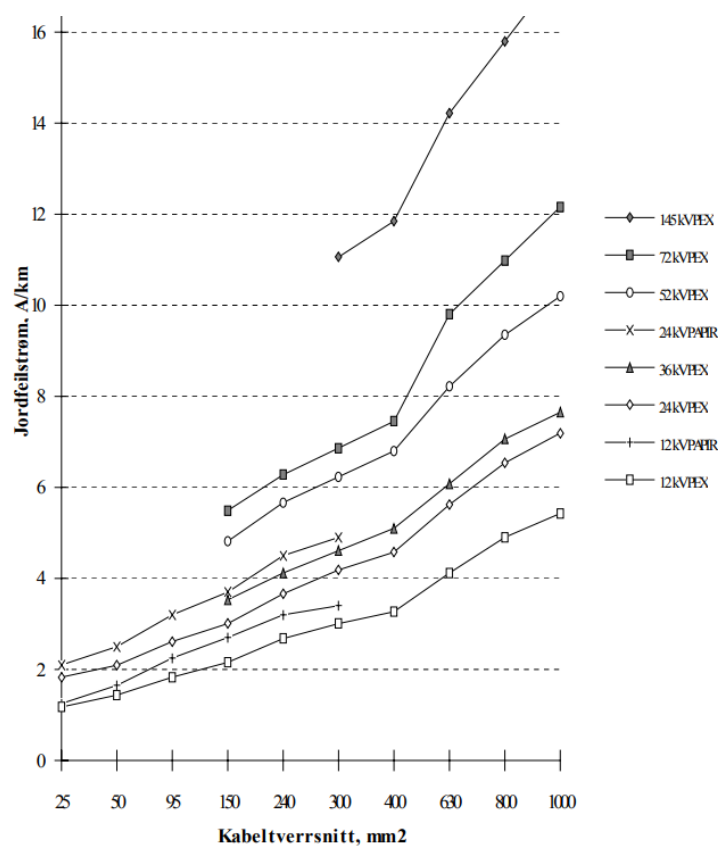
4.3. Grunnlag for den valgte løsning for problemstillingen

Det er mange grunner for at gruppemedlemmer har valgt å undersøke akkurat denne løsningen for problemstillingen som tar for seg jordfeilstømmer og kabellengder. Som nevnt tidligere i rapporten, mangel på bruk av programværet for å utføre prosjektet innen tidsfristen var den største grunn for at gruppemedlemmer gikk for den valgte problemstillingen. Det har vært samlet nok av data og litteratur for å starte med undersøkelser av jordfeilstømmer.

4.4. Utregninger for jordfeilstøm

Resultatene i prosjektet har blitt oppnådd ved hjelp av data og litteratur hentet fra internett og veileder, oppdragsgiver og andre bedrifter som har arbeidserfaring med lignende problemstillinger vedlegg (D). Valget av passende formler og verdier er blitt gjort etter nøye vurderinger for å unngå altfor store avvik i resultatet.

Når det kommer til utregninger av kabler og jordfeilstømmer, ble det antatt at alle de eksisterende kabler som er brukt i nettet per dags dato er plast isolert (24 kV PEX).



Figur 11: Kablers bidrag til jordfeilstømmer vedlegg [D]

Det er fem soner (rød, grønn, oransje, blå og gult) i enlinjeskjema (vedlegg F) med kabel data i hver sin sone. På bakgrunn av dette, bestemmer gruppa seg for å regne ut jordfeilstømmer i hver sin sone etter fagre slik at alle verdier kan oppsummeres til slutt for få den totale jordfeilstømmen i Tisleia avgangen.

I utregninger av jordfeilstømmer for luftlinjer ble det er antatt en gjennomgående jordleder, som utgjør et tillegg i utregningen med 8-10%. Grunnen er større sannsynlighet for en gjennomgående jordleder i dette nettsystem, siden det er mye luftlinjer igjen i nettet. Det ble foretatt antagelse om at feilmotstanden i feilstedet er lik 0. Jordfeilstørmverdien bør være størst mulig for å kunne velge riktig spolestørrelse for kompensering av nettet. Feilresistansen må kun tas med i beregninger når man tar hensyn til innstilling av vern.

Formel 1: Jordfeilstømmer i kabel

$$I_{cj} \frac{\text{Jordfeilbedrag på kabel pr meter}}{\text{km}} * \text{lengde på kabel} \quad (1)$$

Formel 2: Samlende jordfeilstømmen i høyspents kabler og luftlinjer

$$I_{cj} = \left(\frac{U * L_L * (1,08 \rightarrow 1,2)}{300} + I_{cjkabel} \right) * 1,1A \quad (2)$$

L_L er antall km luftlinje

Formel 3: Jordfeilstømmer i feil stedet

$$I_{cjf} = I_{cj} / \sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3} * I_{cj}}{U} * R_f \right)^2} \quad (3)$$

R_f = feilresistansen og U = nettets linjespenning

I den røde sonen kalt Faslefoss, ble jordfeilstømmen beregnet til en verdi på ca. 9,64 A. Denne verdien vil ikke ha noe å si for problemstillingen i Tisleia avgangen.

$$\frac{3A}{km} * 1,7km = 5,1A$$

$$\frac{2,5A}{km} * 1,72km = 4,25A$$

$$5,1A + 4,25A = 9,35A$$

$$I_{cj} = \left(\frac{22 * (1,77 + 2,48 + 0,76) * (1,08 \rightarrow 1,2)}{300} + 9,35 \right) * 1,1A = 10,721$$

Innvirkning på jordfeilstømmer i et isolertnett.

$$I_{cjj} = \frac{10,721}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3} * 10,721}{22} \right)^2}} = \mathbf{9,64A}$$

Beregninger for den grønne sonen omfatter jordfeilstømmer for linje og kabel. Disse verdiene ble lagt sammen for å finne den totale jordfeilstømmeren i nettområdet. Den totale jordfeilstømmeren i den grønne sonen ble beregnet til en verdi på ca. 12,36 A. Framgangsmåten for beregninger av jordfeilstømmer er tilsvarende for både oransje, blå og gul sone.

$$\frac{3A}{Km} * 5,37Km = 16,11A$$

$$\frac{2,5A}{Km} * 4,52Km = 11,3A$$

$$\frac{2,1A}{Km} * 9,3 = 19,53A$$

$$(16,11 + 11,3 + 19,53 = 46,94A)$$

$$I_{cj} = \left(\frac{22 * (1,04 + 27,3) * 1,08}{300} + 46,94 \right) * 1,1A = 54,103A$$

$$I_{cjj} = \frac{54,103A}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3} * 54,103A}{22} \right)^2}} = \mathbf{12,36A}$$

Beregninger for den oransje sonen gir jordfeilstøm på ca. 11,58 A

$$\frac{3,6A}{Km} * 1,2Km = 4,32A$$

$$\frac{2,5A}{Km} * 8,33Km = 20,825A$$

$$\frac{2,1A}{Km} * 2,06 = 4,326A$$

$$4,32+20,825+4,326= 29,471A$$

$$I_{cj} = \left(\frac{22 * 5,54 * 1,08}{300} + 29,471 \right) * 1,1 = 32,901A$$

$$I_{cjj} = \frac{32,901}{\sqrt{1} + \left(\frac{\sqrt{3} * 32,901}{22} \right)^2} = \mathbf{11,85A}$$

Beregninger for den blå sonen gir jordfeilstrom på ca. 12,48 A

$$\frac{3,6A}{Km} * 7,7Km = 27,72A$$

$$\frac{2,5A}{Km} * 12,99Km = 32,475A$$

$$\frac{0,17A}{Km} * 1,8Km = 0,306A$$

$$27,72+32,475+0,306= 60,50A*3=181.503A$$

$$I_{cj} = \left(\frac{22 * (3,45 + 8,13) * 1,08}{300} + 60,50 \right) * 1,1A = 67,56A$$

$$I_{cjj} = \frac{67,56}{\sqrt{1} + \left(\frac{\sqrt{3} * 67,56}{22} \right)^2} = \mathbf{12,48A}$$

Beregninger i den gule sonen gir jordfeilstrom på ca. 9,12 A

$$\frac{3,6A}{Km} * 0,11Km = 0,396A$$

$$\frac{3A}{Km} * 2,25Km = 6,75A$$

$$\frac{2,5A}{Km} * 0,85 = 2,125A$$

$$\frac{2,1A}{Km} * 0,94 = 1,974A$$

$$\frac{1,8A}{Km} * 0,18 = 2,125A$$

$$(0,396+6,75+2,125+1,974+2,125) = 11,515$$

$$I_{cj} = \left(\frac{22 * (1 + 1,05 + 0,66 + 0,41 + 2,01) * 1,08}{300} + 11,515 \right) * 1,1A = 13,113A$$

$$I_{cjj} = \frac{13,113A}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3} * 13,113A}{22} \right)^2}} = 9,12A$$

Summering av alle soner i Tisleia avgangen gir en total jordstrømverdi på ca. 45,81 A. Andre avganger ved Åbjøra kraftstasjon ble oppgitt av oppdragsgiveren til å ha en samlet verdi på ca. 51,19 A. Det totale spolebidraget i nettet er på rundt 345 A. Det resterende spolebidraget som kan benyttes til kompensering av nettet er på 248 A.

4.5. Utregning av Kabel lengder

I dette delkapittelet utføres beregninger som baserer seg på funnet jordfeilstømmer fra delkapittelet over. Her utføres beregninger for å finne ut hvor mye kabel oppdragsgiveren kan legge i jord før grensen til spolebidraget blir nådd og de eksisterende spoler i nettet vil ikke lenger være i stand til å kompensere for de kapasitive strømmer i nettet. Gruppen bruker det resterende spolebidraget ved Åbjøra kraftstasjonen for beregninger av kabellengder med forskjellige kabeltverrsnitt (240, 150, 95, 50 og 25 mm²). Informasjonen oppgitt i Figur 11 brukes i beregninger av jordfeilstømmer som kabler bidrar med. Dette er tatt i betraktning ved utregninger av maksimal spolestrøm under.

Formel 4: Maksimal spolestrømmen

$$\text{Jordfeilbidrag fra kabel} * \text{Lengde på kabel} = \text{Maksimal spolestrøm} \rightarrow \quad (4)$$

Formel 5: Finner lengde på kabler

$$\text{Lengde på kabel} = \frac{\text{Maksimal spolestrøm}}{\text{Jordfeilbidrag fra kabel}} \quad (5)$$

Velger PEX kabler med tverrsnitt 240 mm²

$$\frac{3,6A}{Km} * X = 248A \rightarrow \frac{248A}{3,6} = 68,88km$$

Velger PEX kabler med tverrsnitt 150 mm²

$$\frac{3A}{Km} * X = 248A \rightarrow \frac{248A}{3} = 82,66km$$

Velger PEX kabler med tverrsnitt 95 mm²

$$\frac{2,5A}{Km} * X = 248A \rightarrow \frac{248A}{2,5} = 99,2km$$

Velger PEX kabler med tverrsnitt 50 mm²

$$\frac{2,1A}{Km} * X = 248A \rightarrow \frac{248A}{2,1} = 118,09km$$

Velger PEX kabler med tverrsnitt 25 mm²

$$\frac{1,8A}{Km} * X = 248A \rightarrow \frac{248A}{1,8} = 137,77km$$

Beregninger over viser hvor mye kabel av de ulike tverrsnitt som kan legges i bakken før det totale spolebidraget ikke lenger vil være i stand til å kompensere for de kapasitive strømmer i nettet.

5. Diskusjon

I dette kapittelet skal det drøftes arbeid som ble utført i løpet av prosjektet, teoretiske funn som ble beskrevet i teorikapittelet og resultat basert på utregninger i resultatkapittelet. I tillegg skal det drøftes hvilken naturpåvirkning, kablet luftnett har på miljøet og hvorfor den valgte løsningen er et godt alternativ for bedriften.

5.1. Litteraturstudiet

En viktig del av arbeidet har vært å samle relevant informasjon og å danne bra nok kunnskap og forståelse for problemstillingen. Informasjon som ble funnet er oppgitt i teorikapittelet og er et grunnlag for videre arbeid med prosjektet.

Informasjonen om hva er en spole og hvordan den blir brukt i nettsystemet er beskrevet detaljert i teorikapittelet. Delkapittelet om Petersen spole omhandler relevant informasjon for prosjektet som sentraliserte og desentraliserte spoler, hva er deres bidrag i nettsystemet og kompensasjon av jordfeilstømmer. I teoridelen utforskes spoler og spolejording nærmere siden dette er noe som blir brukt av oppdragsgiveren for å kompensere for jordfeilstømmer i 22 kV distribusjonsnett. Det ble bestemt av gruppen å utforske en løsning med plassering av mindre spoler ut i nettet, siden dette er et blandet strømmnett med luftlinjer og kabler. Dette har vært en fornuftig problemstilling å utforske, basert på tidsrammer og ressurstilgang.

En viktig del av arbeidet har vært å samle relevant informasjon og å danne bra nok kunnskap og forståelse for problemstillingen. Informasjon som ble funnet er oppgitt i teorikapittelet og er et grunnlag for videre arbeid med prosjektet.

Informasjonen om hva er en spole og hvordan den blir brukt i nettsystemet er beskrevet detaljert i teorikapittelet. Delkapittelet om Petersen spole omhandler relevant informasjon for prosjektet som sentraliserte og desentraliserte spoler, hva er deres bidrag i nettsystemet og kompensasjon av jordfeilstømmer. I teoridelen utforskes spoler og spolejording nærmere siden dette er noe som blir brukt av oppdragsgiveren for å kompensere for jordfeilstømmer i 22 kV distribusjonsnett. Det ble bestemt av gruppen å utforske en løsning med plassering av mindre spoler ut i nettet, siden dette er et blandet strømmnett med luftlinjer og kabler. Dette har vært en fornuftig løsning å utforske, basert på tidsrammer og ressurstilgang.

Andre teoretiske funn som ble gjort under teorikapittelet omhandler fordelingsystemer i distribusjonsnett

En annet tema som omhandles i teorikapittelet var oppsamling av informasjon om jordfeilvern og hvordan de blir påvirket av distribuerte spoler.

Får å samle nødvendig informasjon ble sent ut flere e-poster til bedrifter som har erfaring med kablet nettarbeid, spolejording og blandet nett. Samtidig har gruppen vært i flittige samtaler med både veilederen og kontaktpersonen fra Valdres Energi AS. Det ble gjort får å få en bedre forståelse for problemet som selskapet ønsker å undersøke mulige løsninger på og for å få en bedre innsikt i hvordan nettet er i drift i dag og hvordan problemområdet ser ut. Valdres Energi stilte opp med informasjon om nettområde som gruppen kunne analysere og jobbe med. Enlinjeskjema levert av bedriften er en forenklet informasjon fra Netbas og illustrerer plasseringer av sentrale og distribuerte spoler med bidrag på avganger for hver området samt forenklet informasjon om kabel- og luftlinjeverdier som har vært nyttige for kalkulasjoner. Dette er beskrevet mer detaljert i resultatdelen. Denne informasjonen ble i hovedsak brukt til å finne ut jordfeilstrømmer i distribusjonsnett. Sammenlignet med kapasiteten til sentrale spoler hver for seg og kombinert med allerede utplasserte distribuerte spoler i nettet, kunne det fastlås problemområdet som muligens krever utbedringer. Enlinjeskjema ble også brukt til visuell analysering 22 kV distribusjonsnett i et avgrenset området og vurdering av mulig utplassering av distribusjonsspoler i nettet som kan hjelpe med å bedre situasjonen med forbigående jordfeil. En slik metodetilnærming for analyse kan ikke anses som sikker pga. mangel på Netbas tilgang og mulighet til å utføre simulasjoner av nettet med foreslåtte utbedringer. Utbedringsforslag for oppdragsgiveren er basert på teori og bør ikke anses som en sikker fungerende løsning uten nødvendige simulasjoner i nettet med sanne verdier.

5.1.1. utfordringer med innsamling av litteratur

Det har vært krevende å samle inn nødvendig informasjon for å bygge opp kunnskapsgrunnlaget nødvendig for kunne løse problemsstillingen. Det var ikke så lett å finne informasjon som omhandler problemet med kompensering av blandet nett. Informasjonen gitt av fagpersoner med erfaring i feltet har vært viktig for prosjektet. Det ble sent ut en mengde e-poster til ulike bedrifter som ble ansett til å ha tilstrekkelig kunnskap om temaet. Det eksterne selskapet som har vært til stor hjelp for prosjektet er Glitre Energi AS. De stilte opp med informasjon om distribuerte spoler, plassering og utfordringer relatert til de, samt en god mengde litteratur og utdrag fra REN-blad som kunne være til hjelp for prosjektet. Gruppen har også vært i god

kommunikasjon med kontaktpersonen fra Valdres Energi AS for å få mer utfyllende informasjon av enlinjeskjema for å kunne utføre nødvendige beregninger. Et heftet med formler og teori om hvordan for hånd beregninger kan utføres ble gitt av veilederen for prosjektet.

5.2. Spolekompensering

Opgaven til spolejordet distribusjonsnett er å kompensere for de kapasitive jordstrømmer i nettet. Spoler i nettet sørger for reduserte jordfeilstømmer, noe som gir bedre driftssikkerhet, og reduserer jordfeilstørrskader på utstyr. Valdres Energi AS bruker en stor sentral spole på hovedkraftstasjonen i Åbjøra. Sentral spolen har kapasitet på 200 A med 97 A ved normal drift og automatisk justering av kompenseringsgrad. Dette betyr at spolen blir justert avhengig av mengde jordfeilstømmer i nettet. En slik spole er designet for å overvåke nettet over lengre strekk. En annen sentral spole på 200A er plassert i Faslefossen kraftstasjon som har den største innmating av nettet med 140A ved normal drift. Som nevnt in resultatdelen, blir koblingen til Faslefossen kun benyttet ved endringer og vedlikehold i Tisleia avgangen.

5.2.1. Distribuert spolekompensering

Siden stadig mer av luftlinje legges i jord, blir jordfeilstørrmene betraktelig større. Det er gitt at 1 m jordkabel tilsvarer 100 m luftlinje, noe som betyr at jordfeilstørrmene i 1 m høyspentkabel er 100 ganger større enn i 1 m luftlinje. Kapasitive strømmer i nettet blir etter hvert altfor store for at en sentral spole skal kunne være i stand til å kompensere for jordfeil i nettet. For å avlaste sentral spole, har Valdres Energi utplassert tre 15 A distribuerte spoler på Tisleia avgangen i den blå sone vedlegg(F). Dette er en sone på Tisleia-avgangen med den største andelen av kabler.

Distribuerte spoler sammen med sentral spole, dekker behovet for kompenseringsbidraget per dags dato. Men utbyggingsplaner og stadig overgang fra luftlinje til jordkabel, er det behov for en løsning som vil muligens forhindre problemer med større jordfeilstørrmer i nettet. Siden tilgangen til Netbas var ikke til stedet, ble alle vurderinger med tanke på plassering av flere distribuerte spoler i nettet gjort på bakgrunn av akkumulert kunnskap, utførte beregninger og enlinjeskjema Vedlegg(F). Det siste avsnittet i vedlegget(B) ble viktig for plasseringsvurdering av flere distribuerte spoler i nettet.

5.3. Resultat

Gruppedeltagere har gjennomført for hånd beregninger av jordfeilstørrmer for å skape en bedre forståelse for kapasitive jordfeilstørrmer i hver enkel sone og det samlede kapasitive

strømbidraget i nettet. Utregnede verdier ble sendt til Valdes for sammenligning med verdier i Netbas og de har bekreftet at utførte håndkalkyler sammenfaller med beregnede verdier utført i programmet. Deretter ble det kapasitive bidraget sammenlignet med det induktive bidraget fra spoler. En slik sammenligning har gitt en pekepinn for hvor flere spoler kan plasseres i nettet

5.4 Naturpåvirkning

Høyspente kabler i bakken blir først og fremst brukt for å unngå feil på nettet, samt redusere forekomst av ulykker, og styrke sikkerheten for mennesker og dyreliv som oppholder seg i skog og mark. Dette kan imidlertid føre med seg en del utfordringer med hensyn til krav for god plass, og store inngrep i naturen som for eksempel ved sprenging av fjell, skogrydding for føringsveier (etc.). Selv når kabler er lagt ferdig og sporene skjules godt, kan varmen som genereres i kabler tørke ut jorda. I områder som har lite masse kan dette etterlate varige sår.

5.5 Vurdering av eget arbeid

Dette prosjektet er rammet av en del endringer i forhold til framdriftsplanen. Den største endringen er forbundet med mangel på direkte Netbas tilgang. Det førte til avvik i framdriftsplanen fordi gruppa ikke hadde alle de nødvendige verdiene og data for å kunne utføre simuleringer av nettområdet. Det var også tidskrevende å analysere enlinjeskjema og få svar fra oppdragsgiver på relaterte spørsmål.

Gruppen har vært produktiv med innsamling av informasjon om distribusjonsnett, spolejording, jordfeilvern og kabler. Det ble benyttet råd fra både oppdragsgiver og veileder for å avgrense prosjektet etter oppståtte avvik i framdriftsplanen. Gruppen bestemte seg raskt for en bestemt løsning med fokus på jordfeilstrømmer, spolejording og kabellengder. Oppdragsgiver, veileder og kontaktperson fra Glitre Energi har vært behjelpelige ved å besvare alle hendelser rundt prosjektet noe som hjalp til med bedre forståelse av problemstillingen. Alle beregninger for jordfeilstrømmer og kabellengde i nettet ble utført for hånd. Resultatet ble sendt videre til oppdragsgiver for sammenligning med sanne verdier i Netbas. Besvarelsen fra oppdragsgiver viste at beregnede verdier stemte godt med verdier i Netbas.

Bruk av Netbas og matematiske verktøy som Matlab og Simulink ville ført til bedre oversikt av endringer i nettet. Det hadde vært mulig hvis gruppen hadde fått tilgang til rele-planen, og undersøke hvordan de forskjellige vern på avgangene reagerer på ulike spolelokasjoner i nettet. Da kunne man fastslått en posisjon for distribuert spole med større

nøyaktighet. *“Begrensninger i antall distribuerte spoler pr. avgang. Siden spolen genererer et wattmetrisk bidrag på avgangen, vil enkelte vern kunne lese dette som en jordstrøm i foroverretning. Ved R/X forhold på 2,5% kan man tillate inntil 4-5x15 A spoler pr. avgang.”* vedlegg (B). Med hensyn på vedlegg (B), ble det anbefalt omplassering av spoler i konklusjonskapittelet. Omplassering av spoler er nødvendig for å kunne overholde anbefalingen for antall spoler per avgang, gitt av Møre Trafo AS

Det tas hensyn til punkt 2.5.5 som anbefaler maksimalverdi for kapasitiv jordfeilstrom i 22 kV-nett til å være 300 A. Åbjøra kraftstasjon har totalt bidrag på 345 A, fordelt over sentral spole som har et bidrag på 200 A og distribuerte spoler som har samlet bidrag på 145 A. Det totale bidraget kan føre til at økt ohmsk strøm vil gjøre det vanskelig å etterfølge kravet for den maksimale berøringspenningen. Dette problemet kan løses ved å splitte forsyningen av nettet på flere hovedtransformatorer.

6. Konklusjon

Resultatene fra kapitlet 4.5 viser at det er fortsatt muligheter for å legge en del kabler uten at jordfeilstrommer overstiger kompenseringskapasiteten til spoler i nettet. I tillegg så er det lange strekk med luftlinjer som kan legges i jord. Det gir nettselskapet utfordringer med plassering av distribuerte spoler for å opprettholde overkompensert drift av nettet. Enda en utfordring for nettselskap er ilegging av kabler i brått og utilgjengelig terreng. Dette fører til at det kan være krevende å transformere luftlinjer til kabler i distribusjonsnettet.

Basert på teori og resultater har det kommet fram til konklusjon og anbefaling at Valdres nett omplasserer distribuerte spoler i Merket Fellesstøl og Sørheimstøladn. Det anbefales å omplassere disse distribuerte spoler i et område med luftlinjer over lengre strekk. Forslaget er å plassere en av spolene i Furuset eller Beastølen. Den andre spolen kan plasseres i Nøsen med tanke på videre utbygging av nettet. Da har man fortsatt mulighet for å sette inn et ekstra spole ved senere utbygging. Avgangen på Åbjøra vil fortsatt beholde det anbefalte antallet spoler pr. avgang iht. vedlegg (B) fra møretrafo.

Referanse

- [1] «Om konsernet Valdres Energi - ValdresEnergi Nett - alltid til stede». <https://www.valdresenerginett.no/om-oss/> (åpnet mar. 28, 2021).
- [2] K. O. Hillestad, «Distribusjonsnett», s. 3–4, 2019.
- [3] E. H. Olsen, «Analyse av seksjoneringsmetodikker i høyspennings distribusjonsnett», s. 148, 2018, [Online]. Tilgjengelig på: https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2559317/18893_FULLTEXT.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [4] F. Sætre, «Kabel eller linje ?», s. 1–8, 2021.
- [5] «214711.pdf». s. 96, 2007.
- [6] «Meld. St. 14 (2011-2012)», bd. 14, 2012.
- [7] S. T. Eggan, «Policy for kabling Disposisjon», nr. april, 2008.
- [8] S. Test, «Peterson Coil Grounding», 2015, [Online]. Tilgjengelig på: <https://illustrationprize.com/no/469-peterson-coil-grounding.html>.
- [9] «(No Title)». [http://www.hvpower.co.nz/TechnicalLibrary/RE+DS/Petersen Coils Basic Principle and Application.pdf](http://www.hvpower.co.nz/TechnicalLibrary/RE+DS/Petersen%20Coils%20Basic%20Principle%20and%20Application.pdf) (åpnet apr. 29, 2021).
- [10] «(No Title)». https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/256697/350533_FULLTEXT01.pdf?sequence=2&isAllowed=y (åpnet apr. 29, 2021).
- [11] M. Saeren og M. Giset, «Norges Vassdrag-og Energidirektorat Sommerprosjekt Systemjording», 2017.
- [12] Y. T. Nguyen, J. Silde, og H. C. Randem, «Spolekompensering i distribusjonsnett med hensyn på sikkerhet og funksjonalitet».
- [13] M. Saeren og M. Giset, «Norges Vassdrag-og Energidirektorat Sommerprosjekt Systemjording», 2017.
- [14] M. Saeren og M. Giset, «Norges Vassdrag-og Energidirektorat Sommerprosjekt Systemjording», 2017.
- [15] E. Laurits Rossebø, «REN-Nytt». Åpnet: apr. 29, 2021. [Online]. Tilgjengelig på: www.ren.no.
- [16] Y. T. Nguyen, J. Silde, og H. C. Randem, «Spolekompensering i distribusjonsnett med

hensyn på sikkerhet og funksjonalitet».

- [17] Y. T. Nguyen, J. Silde, og H. C. Randem, «Spolekompensering i distribusjonsnettet med hensyn på sikkerhet og funksjonalitet».
- [18] K. Sørum og M. L. Kolhe, «Fremtidig systemjording av regionalnettet i Agder».
- [19] L. Martin, «Håndtering av endrede jordfeilegenskaper i 22kV distribusjonsnett - Med fokus på deteksjon og vern», s. 1–2, 2017.
- [20] M. Guldal, «Jordfeildeteksjon i spolejorda distribusjonsnett», s. 88, 2015.
- [21] R. E. N. As, «Stasjonsanlegg - Retningslinjer for spolejordet distribusjonsnett», *RENBLAD*, nr. 7505, s. 1–28, 2018.

Vedlegg

A. Kontaktpersoner

Navn	Firma	Rolle	Telefon	Mail	Bidrag
Kristin Wang	Glitre	Planlegger	97548892	Kristin.Wang@glitreenergi.no	Litteratur
Olav Stensli	Glitre	Avdelingsleder netteier	97592918	Olav.stensli@glitreenergi.no	Litteratur
Espen Sørli	Valdres Energi	prosjektingeniør	99287112	Espen.sorlie@valdresenergi.no	Litteratur, intern veileder
Tor Arne Folkestad	NTNU	Veileder	61135267	Tor.forlkestad@ntnu.no	Litteratur, intern veileder

Distribuert spolekompensering

Et nyttig element i spolejording av distribusjonsnett.



Roald Waage
Salgsansvarlig/Sales
Jacobsen Elektro AS

Elforsyningen legger mer av nettet i kabel. Ulempen er at jordfeilstømmen øker proporsjonalt med kabelens tverrsnitt og lengde.

Tverrsnitt mm ²	I _{cj} 22 kV A / Km	I _{cj} 11 kV A / Km	Q22/Q11 kVAr / Km
50	2,1	1,4	26,7 / 8,9
95	2,65	1,85	33,7 / 11,7
150	3,1	2,15	39,4 / 13,7
240	3,5	2,55	44,5 / 16,2

Tabell 1 Jordstrøm for 3-leder kabel.

Konsekvensen av jordstrømkningen er:

- Spolen som er plassert sentralt blir for liten
- Økningen kommer i det vesentlige på kun en av avgangene.
- Ofte ligger 50% av jordstrømmen på en avgang.

Disse tilfellene kan gi uheldige konsekvenser for jordfeil retningsvernet.

Ukompensert drift vil kunne gå ut over evnen til å detektere jordfeil med feilmotstand $\geq 3000\Omega$. Uo-spenningen er definisjonen for jordfeil. Denne vil bli redusert i takt med spolens kompenseringsgrad. Normal kompenseringsgrad er +5A.

Avgangens jordstrømsbidrag I_{cj} er bestemmende for sentralspolens parallellmotstand. Jo større I_{cj} dess større parallellmotstand i Ampere. Enkelt sagt så vil behovet være i størrelsesorden Arctan 10° (vinkel mellom I_o og -90°) av den største avgangens I_{cj}.

I _{cj} (A)	Arctan 10°	Motstand (A)
50	0,18	9,0
75	0,18	13,5
100	0,18	18,0
125	0,18	22,5

Tabell 2 Eksempel på økning av parallellmotstand



Krafttransformatorer med koblingsgruppe YNyn0 kan ofte være en begrensning for å installere større ytelse sentralt. Dette skyldes at magnetfeltet i transformatoren må finne seg vel utenfor jernkjernen. Installert spoleytelse bør derfor begrenses til 20-25% av transformatorens faseytelse.

Traføyttelse (MVA)	Spoleytelse kVAr	Spolestrøm 22kV	Spolestrøm 11kV
10	667-833	65	131
16	1066-1333	105	210
20	1333-1666	131	264
25	1666-2083	164	328

Tabell 3 Spoleytelse vs. Traføyttelse, koblingsgruppe YNyn0

Retningsbestemt jordfeilvern må ha 3 kriterier oppfylt for å gi utkobling ved jordfeil. Uo (jordfeildefinisjonen), I_o (min. 1,5A primært) samt at I_o må ligge i vernets utløsesektor (-80° for spolejordnet nett). Spolens parallellmotstand hjelper I_o inn i utløsesektor. Se tabell 2.

Nettets egendemping (wattmetriske bidrag) bestemmes av transformatorens nullfølgeimpedans (hvor X/R = 40 ikke er uvanlig), sentralspolens tap samt jordstrømmens mot-

stand i kabelens jordings skjerm. Har man gjennomgående jordleder lagt i grøfta sammen med kabelen, vil dennes nullfølgeimpedans avhenge av forlegningsmåte (flatt eller trekant) samt jordtrådens avstand fra kabelknippet. Altså øker det wattmetriske tapet med økende avstand til feilstedet. Det er et ønske å holde nettets naturlige demping på et anstendig nivå. Det «normale» er ca. 5% av totalt jordstrømbidrag.

Hvordan kan så distribuert kompensering bidra til å avhjelpe de tidligere skisserte problemstillinger?

Behov for øket spoleytelse vil kunne plasseres ute på avgangene og ikke sentralt.

Derved har man også unngått utfordringer med å overbelaste krafttransformatorens nullpunkt.

Store jordfeilsbidrag på enkeltavganger reduseres når det settes inn spoleytelse på disse.

Derved reduseres behovet for å øke ytelse på parallellmotstanden hos den sentralt plasserte spolen.

Nettet vil kunne forbi overkompensert og vernets tidligere innstillinger kan beholdes.

Da det nå finnes flere «forsyningspunkter» for spolestrømmen, vil sentralspolen levere mindre strøm og derved vil også det wattmetriske bidraget i systemet reduseres.

Hva inneholder komponenten for distribuert kompensering?

Fordelingstransformator hvor høyspenningsviklingen er ZN-koblet. Derved oppnår man amperevindingsbalanse og spolestrømmen fordeles med 1/3 på hver fase.

I samme oljefylte kasse plasseres spolen, som for et 22 kV nett gjerne er på 10A eller 15A. Det er ingen grunn til å levere spolene med trinning. Finjusteringen mot resonans tar sentralspolen seg av automatisk. Transformator-ytelsene er gjerne 100 eller 200 kVA og koblingsgruppen er gjerne ZNzn0 eller ZNyn11 +(d).

Hvordan bør spolen tilkobles jord?

Spolestrømmen føres til jord via isolert kabel. Jordingen skal være adskilt fra lavspentjord. I praksis betyr dette jordspyd.

Har man gjennomgående jord, kan spolestrømmen kobles til jordtråden utenfor nettstasjonen. Det forutsettes at høy- og lavspentjord er forskriftsmessig adskilt.

Hvor i nettet skal man plassere spolene?

Sentralspolen kan dekke 20-30A jordstrøm på hver avgang. En 160A sentralspole vil passe bra. Parallellmotstanden kan begrenses til 62,5 kW (4,9A) i et 22 kV nett. Distribueringen bør følge prinsippet om at spolene plasseres der det er gode jordingsforhold, i knutepunkt hvor spolen dekker kabelens jordstrøm ved overflytting på annen avgang eller bestemt av hvilken problemstilling som skal løses.

Begrensninger i antall distribuerte spoler pr. avgang?

Siden spolene genererer et wattmetrisk bidrag på avgangen, vil enkelte vern kunne lese dette som en jordstrøm i foroverretning. Ved R/X forhold på 2,5%, kan man tillate inntil 4-5x15A spoler pr. avgang.

C. Historikk rundt kabelanlegg

Er innhenta fra Blackboard kompendier høgspenningsteknikk.

Kapittel 3 Høgspenningskabler

Kabelanlegg – Historikk

De første kablene slik vi kjenner dem i dag ble produsert i 1880-årene. I begynnelsen ble de isolert med impregnert jute og det ble lenge brukt forholdsvis lav driftsspenning. I 1915 ble det introdusert kabler for 33 kV, men det medførte feil som ingen kunne forklare. Det ble senere utviklet en kabel som stod under oljetrykk. Impregneringen var tyntflytende olje og denne konstruksjonen gjorde det mulig å bruke enda høyere driftsspenning. I dag kan vi få kabler for spenninger opptil 525 kV, og det lar seg gjøre å lage oljetrykkskabler med papirisolasjon for spenninger opptil 750 kV. I 1940-årene ble det lansert kabler med isolasjon av polytylen for lave spenninger og i 1960-årene kom de første PEX-isolerte kablene. Den første PEX kabelen ble tatt i bruk i 1968, for spenningsnivå 12 og 24 kV. I 1971 ble PEX-kabler for spenninger opp til 72 kV tatt i bruk, og deretter fulgte i 1976 kabler på 145 kV. I 1980 kom de første PEX-kabler beregnet for 300 kV. I dag kan vi få kabler med plastisolasjon for spenninger på opptil 500 kV. PEX-kabler kan vi få for spenninger opptil 400 kV. Når dette kompendiet skrives har PEX kablene inntatt en svært stor del av markedet for høgspenningskabler og derfor blir de også sterkt vektlagt i dette kapitlet.

Høgspenningskabler - generelt

Høgspenningskabler er kabler for spenninger over 1 kV. Når vi kobler høyspenning til en kabel, blir det satt i sving store elektriske krefter. Derfor blir det stilt store krav til produksjonen, materialvalg og videre behandling av høgspenningskabler. Kablene blir produsert med forskjellige typer isolasjon til forskjellige spenningsnivåer. Tabellen under viser oss forholdet mellom isolasjonsmateriale og merkespenning.

	1 kV	7,2	12	24	36	52	72	145	300	420	525kV
PVC											
EPR											
Masse											
PEX											
Olje											

Tabell 3.1 Aktuelle spenningsnivå for forskjellig høgspenningskabler

Dersom vi vurderer bruken av isolasjonsmaterialer i forhold til den merkespenningen kabelen er konstruert for, finner vi følgende:

- PVC-kabler blir i Norge bare brukt for 1 og 3 kV.
- EPR-kabler blir i dag bare brukt for spenninger opptil 12 kV.
- Massekabler (papirisolerte blykabler) blir brukt for spenninger opptil 24 kV.
- PEX-kabler blir brukt for hele spenningsområdet fra 1 kV til og med 400 kV.
- Oljetrykkskabler blir brukt fra 36 kV opptil 525 kV.

PEX-isolert plastkabel

Da de PEX-isolerte kablene ble innført, gikk vi inn i en ny epoke for høyspenningskablene. Vi fikk en tørr og atskillig lettere kabel enn massekabelen (30-50 % lavere vekt).

Den lave vekten gjør kabelen enklere å legge ut, vi får større lengder på trommelen og større fleksibilitet ved prosjektering og trasevalg. For montørene er den største fordel kanskje at isolasjonen er tørr og ren og enkel å arbeide med.

Vi skal her ta for oss 2 typer PEX kabler som brukes i høyspenningsteknikken:

- PEX-isolert enlederkabel
- PEX-isolert tre lederkabel

Enlederkabelen, har et sjikt av halvledende materiale rundt lederen. Deretter kommer PEX-isolasjonen, og rundt den kommer det igjen et sjikt av halvledende materiale.

Trelederkabelen, her er tre enledere lagt sammen med fyllstrenger mellom og teip rundt. Ytterst har alle kablene en kobberskjerm og en PVC-kappe, se figurene på neste side.

D.Litteratur Jordfeilstørrrelse

Senioring. Geir Torbergsen, ABB AS Divisjon Kraft. Sendt av veileder

Jordslutningsspoler; kompensering og regulering ved jordfeil

Senioring. Geir Torbergsen, ABB AS Divisjon Kraft



ABB AS Divisjon Kraft



3.3 Jordfeilstømmens størrelse

Den direkte måten å finne nettets jordfeilstrom på er ganske enkelt å legge inn en enfase jordslutning og så måle strømmen i feilstedet. Det finnes i markedet også avanserte dataprogrammer for denne type beregninger.

For mindre og oversiktlige nett kan man manuelt beregne nettets samlede kapasitans mot jord. Her summeres bidragene fra de enkelte linjers og kablers kapasitanser mot jord. Nøyaktig utført viser disse beregningene seg ofte å stemme rimelig godt over ens med virkeligheten.

For luftlinjer kan følgende estimat benyttes:
$$I_{cj} = \frac{\text{km} \times \text{kV}}{300}$$

For linjer med en gjennomgående jordleder beregnes et tillegg på 8 - 10 %. Tilsvarende ved to jordledere, 15 - 20 %.

For kabler bør man helst benytte dokumentasjon fra den enkelte kabelprodusent og lese ut det kapitative bidraget for gjeldende kabelverrsnitt og spenningsnivå. Typiske jordstrømbidrag for kabler for 12 - 145 kV er antydnet i figur 3.3.

For å finne den samlede jordfeilstømmen i nettet kombineres ovennevnte basert på nettets nåværende (eventuelt fremtidige) sammensetning av kabel og luftlinje. I tillegg vil vi anbefale å legge til ytterligere 10 % for å ta hensyn til overkompensert innstilling av spolen.

Vi får da følgende formel:
$$I_{cj} = \left(\frac{U \times L_L \times (1,08 \rightarrow 1,2)}{300} + I_{cj\text{kabel}} \right) \times 1,1 \text{ (A)}$$
 der L_L er antall km luftlinje.

4.2 Hvilke jordfeilstømmer vil slukke av seg selv ?

For et 24 kV-nett kan man anta at ved en kapasitiv jordfeilstrom på under 10 A vil lysbuen kunne slukke av seg selv.

Ved strømmer mellom 10 og 35 A vil lysbuen brenne mere stabilt men man må kunne anta at den relativt raskt vil slukke av seg selv. Hurtig av-ionisering og avkjøling av feilstedet vil her være av avgjørende betydning.

Ved strømmer over 35 A må man regne med at lysbuen ikke vil slukke av seg selv.

4.3 Feilresistansens innvirkning på jordfeilstømmen i et isolert nett

Ved ikke-metallisk jordfeil vil overgangsmotstanden på feilstedet (feilresistansen) redusere jordfeilstømmens størrelse. Den aktuelle jordfeilstømmen kan utledes av uttrykket:

$$I_{\text{cjt}} = \frac{I_j}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3} \times I_j}{U} \times R_f \right)^2}}$$

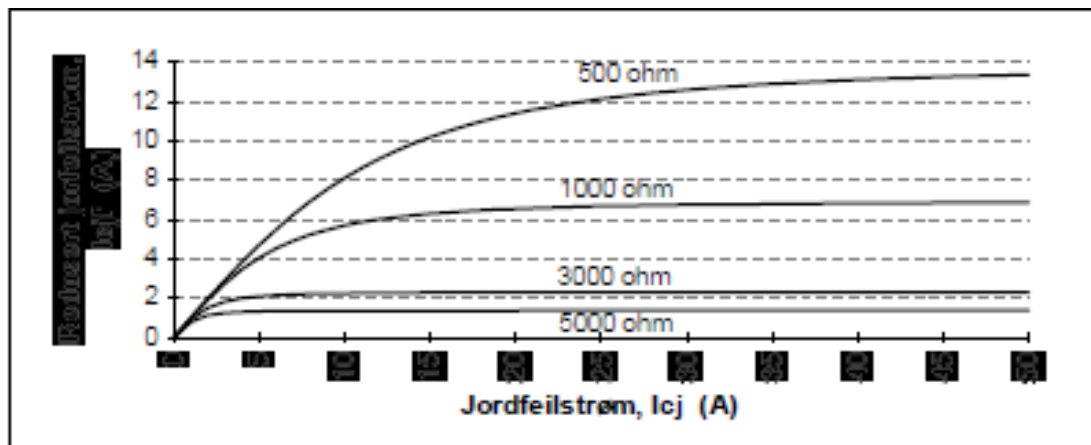
der

R_f = feilresistansen

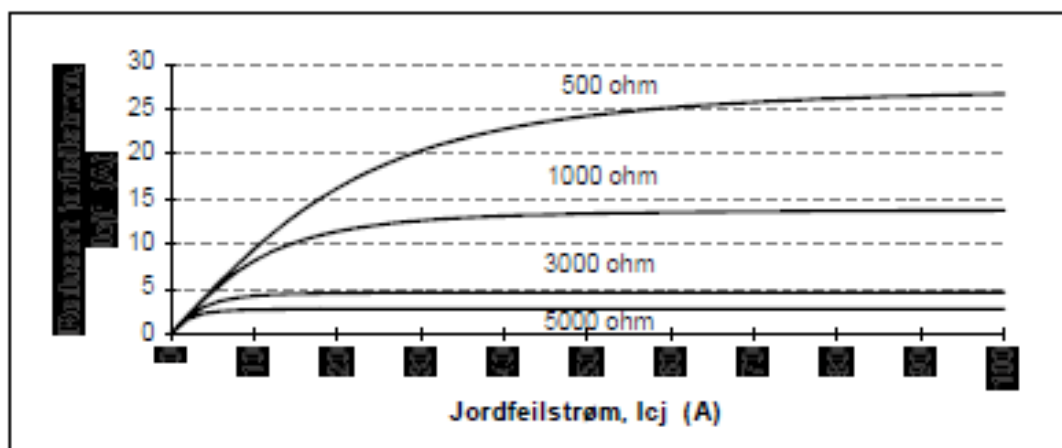
U = nettets linjespenning

Ved høyere overgangsmotstander ser vi at den reduserte jordfeilstømmen kan bli meget lav. Ifølge eksperter på relevern bør de lave strømmene ikke by på større problemer for dagens vern.

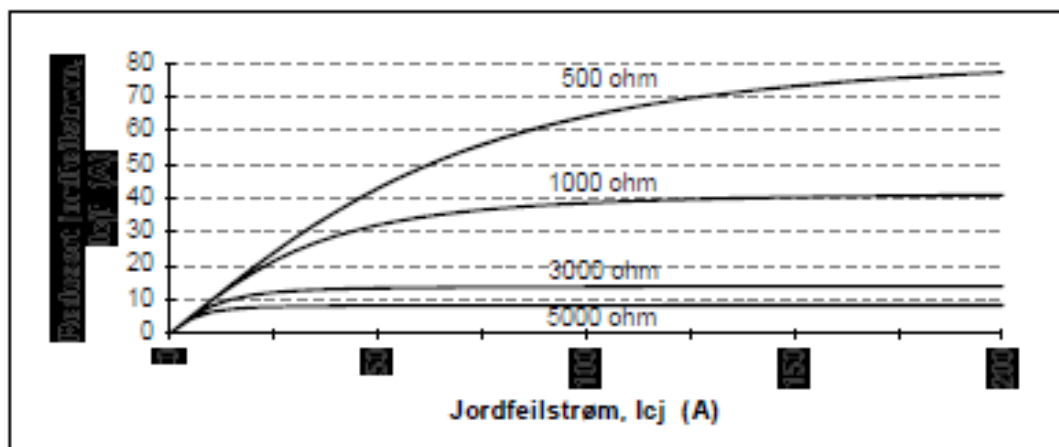
Uttrykt ved noen valgte feilresistanser gir dette følgende kurver:



Figur 4.1 Feilresistansens innvirkning på jordslutningsstrømmens størrelse ved 12 kV.



Figur 4.2 Feilresistansens innvirkning på jordslutningsstrømmens størrelse ved 24 kV.



Figur 4.3 Feilresistansens innvirkning på jordslutningsstrømmens størrelse ved 72 kV.

1. Parallellmotstand

5.1 Jordslutningsspøls virkemåte



Figur 5.1 Jordslutningsspole av dykkjernetype for $22/\sqrt{3}$ kV, 10 - 100 A, 2 timers drift og utstyrt med parallellmotstand. Parallellmotstanden er sylindren til høyre for styreskapet.

8.1 Utførelse av parallellmotstanden

Parallellmotstanden dimensjoneres normalt for en merkespenning på 500 V og kobles, ved nyere spoler, til nettet via en 500 V tilleggsvikling på jordslutningsspolen. Motstanden dimensjoneres normalt for en driftstid på 90 sekunder, basert på en starttemperatur på 40 °C og styres av en kontrollenhet som har til oppgave å overvåke at motstandens varmekapasitet ikke blir overskredet.

For eldre jordslutningsspoler kan en separat parallellmotstand med påbygget transformator kobles i parallell med spolen.

Parallellmotstanden kan ha flere funksjoner i et spolekompensert nett:

8.2 Parallellmotstand og retningsbestemt jordfeilvern

Det retningsbestemte jordfeilvernet benytter normalt den kapasitive komponenten av jordfeilstrommen som målegrunnlag for detektering av jordfeil. Ved overgang til spolekompensert nett er dette ikke lenger noe alternativ. Da nettet kan drives over- eller underkompensert avhengig av spolens kompenseringsgrad vil den reaktive strømkomponenten dels være meget liten dels variere mellom å være induktiv og kapasitiv.

Alternativet vil her være å benytte den resistive strømkomponenten. Avhengig av nettet vil denne være i størrelsesorden 0,5 - 15 % av den kapasitive komponenten. Dersom den naturlige resistive komponenten er for liten kan parallellmotstanden kobles inn for å forbedre målegrunnlaget for vernet.

Vanligvis kobles motstanden ved jordfeil inn noe forsinket, 1 - 3 sekunder, for å gi jordslutningsspolen en mulighet til å slukke feilen før vernet reagerer.

8.3 Hvor stor bør parallellmotstanden være ?

Ved dimensjonering av motstanden må først og fremst gjeldende forskrifter beaktes.

Velges en motstand som bidrar med mer enn 10 A kan det bli problematisk å detektere høyohmige jordfeil ($R \geq 3.000 \Omega$). En høyere resistiv strøm vil også bidra til å heve skrittspenningen på feilstedet. Samtidig vil en høy strøm også bidra positivt til å redusere transiente overspenninger ved intermitterende jordfeil.

Velges en for lav strøm vil det kunne oppstå problemer med jordfeilvernets følsomhet.

Det er altså faktorer som taler for parallellmotstand for høy strøm og faktorer som taler for lav strøm. Dersom strømtransformatorer for sumstrømkobling benyttes kan motstanden være dimensjonert for opptil 10 A. I nett med kun kabelstrømtransformatorer kan parallellmotstand for lavere strøm benyttes dersom dette gir god nok virkningsgrad for vernet.

De fleste parallellmotstander kan kobles om innen visse grenser. Imidlertid bør korrekt dimensjonering alltid planlegges før anskaffelse.

8.4 Parallellmotstand for demping av nettets resonanskurve

I tillegg til ovennevnte kan parallellmotstanden også benyttes til å innføre en større demping av nettets resonanskurve, kfr. formel i avsnitt 5.1. Motstanden vil da ligge innkoblet

kontinuerlig. Ved jordfeil vil motstanden kobles ut kortvarig for å redusere feilstrømmen og forenkle slukkingen av lysbuen. Etter 1 - 3 sekunder kobles motstanden inn igjen for å forbedre målegrunnlaget for det retningsbestemte jordfeilvernet.

Fortrinnsvis bør man imidlertid først søke å gjøre nettet mere symmetrisk, for eksempel ved mere utstrakt bruk av revolvering.

E. Teknisk blad for 24kV kabler

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

F. Enlinje skjema

Dette vedlegget er unntatt offentligheten, kopi av dette er levert til veileder Tor Arne Folkestad.

Ved interesse kontakt Tor Arne Folkestad.

G.Utkoblingstid

Sendt av Glitre Energi Nett AS

3.1.4 Krav til utkoblingstid/ Hvor lenge kan jordfeilen ligge inne

Her gjelder FEF 2006 for alle anlegg, også de som er bygget før 2006.

FEF 2006: §4-3 Tiltak ved isolasjonsfeil i høyspenningsnett

Topolet jordfeil og kortslutning skal kobles ut hurtig og automatisk.
Enpolet jordfeil skal utkobles hurtigst mulig og innen følgende tider. Tidene inkluderer ikke eventuelle gjeninnkoplinger:

- Direktejordet nett:	8 s
- Motstandsjordet nett:	30 s
- Isolert og spolejordet nett:	
- Luftnett og blandet kabel-/luftnett med tilknyttet distribusjonstransformator:	10 s
- Luftnett og blandet kabel-/luftnett uten tilknyttet distribusjonstransformator:	120 min
- Industrinett med luftnett og blandet kabel-/luftnett:	120 min
- Kabelnett (uten luftledning) med global jording:	240 min

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

For distribusjonsnettet gjelder ofte kravet om utkobling innen 10 s, men der det er rene kabelnett er kravet 240 min, dvs. 4 timer.

