

Morten Paulsen Særen

Analysering av Jordfeil i Spolejordet Regionalnett

Masteroppgave i Elektriske kraftsystemer
Veileder: Hans Kristian Høidalen
Juli 2019

Morten Paulsen Særen

Jordfeil i Spolejordet Regionalnett

Masteroppgave i Elektriske kraftsystemer
Veileder: Hans Kristian Høidalen
Juli 2019

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



Sammendrag

En forenklet modell av Nordnettet er etablert i programvaren ATP Draw. Modellen er designet for å analysere jordfeilstømmer, spenning og resonanskurve. Den er bygd opp slik at man selv kan stille inn spoleinnstillingene etter ønske. Modellen fungerer til sitt formål og man kan legge på konduktiv avledning. Modellen kan kjøre transiente grafiske analyser av både feilstrom i spoler og feilsted. Feilstrommen er blitt presenter for feil i alle regionene. På bakgrunn av disse feilene er det blitt sett på hvordan feilstrommen oppfører seg. Det er også sett på spolenes egenskaper før og etter feil.

Det er observert at spolene bruker lengre tid på å stabilisere spolebidraget for feil langt unna. I tillegg vil den transiente responsen ha høy amplitude. Den høye amplituden er avgjørende for hvordan feilstrommens utforming blir. Har man høyt spolebidrag i et område vil feilstrommen i feil langt unna dette område få lavt maksimum på impulsresponsen. Til gjengeld bruker også disse feilene lengre tid på å nå ønsket feilstrom.

I alle feilsituasjonene simulert vil feilstrommen i modellen kompenseres ned til et ønsket nivå. Det er ikke noen forskjell på hvor feilen er lokalisert. Strømmene i spolene nærmest feilen vil ha minst svingninger og stabilisere seg raskest for å gi bidrag. Når feilen er i et område med høy spoleytelse vil feilen raskt bli kompensert ned til ønsket nivå. Størrelsene på spolene vil være avgjørende for hvilken kurve man ønsker på feilstrommen. Det er ikke avgjørende med utformingen på kurven til feilstrommen, da denne strømmen vil kompenseres ned i alle feilstedene i nettet.

I feilstedet vil feilfasen ha null spenning mens de to friske fasene får en spenningsheving på $\sqrt{3}$. Ser man på ende til ende spenningen så vil feilfasen etablere en liten spenning, mens de to andre fasene fortsetter med en lik spenningsheving på ca. $\sqrt{3}$.

Det kan tyde på at konduktans bidrar med å øke feilstrommen med en reel del i feilstrommen. Det er absoluttverdien på den komplekse strømmen som avgjør hvor stor feilstrommen blir. Spoleinnstillingen kan være korrekt, men med økt reel del vil det ikke være mulig å oppnå ønsket verdi på feilstrommen. Det ble gjort funn av skjevfordelte faser der feilfasen fikk forhøyet spenningsnivå og den ene friske fasen fikk et minsket nivå.

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet for instituttet for elkraftteknikk ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet i samarbeid med Statnett SF. Oppgaven er bygd videre på prosjektoppgave skrevet høsten 2018.

Jeg ønsker å takke Hans K. Høidalen for hjelp og veiledning gjennom oppgaven og jeg vil også takke Anders Elvebakk i Statnett for hjelp og raske tilbakemeldinger. Jeg vil også takke Statnett for en interessant oppgave.

Innhold

Sammendrag	i
Forord	ii
Innholdsfortegnelse	iv
Liste av Tabeller	v
Liste av Figurer	viii
1 Introduksjon	1
2 Teori	3
2.1 Symmetriske komponenter	4
2.1.1 Grunnleggende transformasjon	4
2.1.2 Visere og visuell representasjon	5
2.1.3 Spenning, strøm og impedans	6
2.1.4 Oppbygging av dekomponerte systemer	7
2.1.5 Transformatorer i nullsystemet	8
2.2 Kompensert jording	9
2.2.1 Kapasitans	9
2.2.2 Induktans	10
2.2.3 Konduktans	11
2.2.4 Impedans	11
2.2.5 Petersons spole	12
2.2.6 Viserdiagram	14
2.2.7 Resonans	15
2.3 PI modell	19
3 Modellen	21
3.1 Nordnettet	21
3.2 Regioner og seksjoner	23
3.3 Regioner	25
3.3.1 Region 1	25
3.3.2 Region 2	25

3.3.3	Region 3	25
3.4	Variabler	26
3.5	Resonanskurve og feilstrøm	27
3.5.1	Feilbryter	28
4	Simuleringer av feilstrøm og ulike driftsituasjoner	31
4.1	Driftsbilde 1	31
4.1.1	Før feil	32
4.1.2	Etter feil	33
4.1.3	Variasjon i lokasjon av feil	35
4.2	Driftsituasjon 2	39
4.2.1	Jevn konduktiv last	39
4.2.2	Ujevn fordeling av konduktans	40
5	Diskusjon	43
5.1	Feilstrøm	43
5.2	Spolebidrag	44
5.3	Konduktans	44
6	Konklusjon	47
6.1	Modellen	47
6.2	Resultat	48
6.3	Konduktans	49
6.4	PSSE	49
	Bibliografi	51
	Appendiks	53

Tabeller

4.1	Lastbilde før feil i case 1.	32
4.2	Spoleinnstilling ved en gitt driftsituasjon	33

Figurer

2.1	Visuell representasjon av e ubalansert trefase spenning.	5
2.2	Sammenligning av viserene i de forskjellige dekomponerte systemene.	5
2.3	Dekomponerte delsystemer som Thevinin krets	7
2.4	Elektrisk system med ulike komponenter.	7
2.5	Nullsystemet til kretsen i figur 2.4.	8
2.6	Stjerne - Delta konfigurasjon i nullsystemet.	8
2.7	Illustrasjon av fordeling av kapasitans i et nett. Hentet fra [circuitglobe(2019)].	9
2.8	Viserdiagram for komplekse impedanser. Hentet fra [Wikipedia(2019)]	12
2.9	Illustrasjon av et spolejordet system.	12
2.10	Endringer i viserdiagram ved enfase jordfeil	15
2.11	Viserdiagram av feilstrømmen	15
2.12	Enkel RLC krets.[Mayergoyz and Lawson(1997)]	15
2.13	Illustrasjon av resonans og kompenseringsform. Hentet fra [Særen and Giset(2017)]	17
2.14	Pi-modellen illustrert.	19
3.1	Oversiktsbilde over nordnettet hentet fra NVE Atlas.	22
3.2	Oversiktsbilde av region 1 og 2 i modellen.	23
3.3	Oversiktsbilde av region 3 i modellen	24
3.4	Utklipp av variablene.	26
3.5	Sammenligning av resonanskurver med og uten konduktiv avledning.	27
3.6	Resonanskurve med forskjellige dempinge.	28
3.7	Feilstrømmen viser verifisering av modell.	29
4.1	Spolestrømmen før feil	32
4.2	Optimizerverkøyet regner ut resonanspunkt ved bruk av gradient method.	32
4.3	Spenning i Reg3.Bus3.	33
4.4	Spenning i Reg1.Bus1.	34
4.5	Spenning i Reg1.Bus1.	34
4.6	Spenning i Reg1.Bus1.	35
4.7	Strøm i autotrafo	35
4.8	Feilstrøm basert på forskjellig lokasjon.	36

4.9	RMS verdi av strømmen gjennom autospolen basert på lokasjonen av feilen.	36
4.10	RMS verdi av strømmen gjennom spolen i <i>Reg3.Bus3</i> basert på lokasjonen av feilen.	37
4.11	RMS verdi av strømmen gjennom spolen i <i>Reg2.Bus3</i> basert på lokasjonen av feilen.	37
4.12	Resonanskurven for systemet med konduktans	39
4.13	Feilstrøm med jevn konduktans og feil i <i>Reg1Bus5</i>	40
4.14	Strømmen gjennom spolen i <i>Reg1.Bus5</i> stabiliserer seg raskere med konduktans tilkopleet.	40
4.15	Feilstrømmen ved skjev konduktiv last.	41
4.16	Sammenlikning av spenningene i samme punkt med og uten konduktans involvert.	42
6.1	Ulike transformatorkonfigurasjoner	53
6.2	Feilstrøm med jevn konduktans i <i>Reg3.Bus3</i>	54
6.3	Feilstrøm med jevn konduktans i <i>Reg2.Bus3</i>	54

Kapittel 1

Introduksjon

Mye av regionalnettet i Norge drives som spolejordet. Dette reduserer feilstrømmene og minsker påvirkning på omkringliggende infrastruktur. I tillegg til dette er spolejording et verktøy som gjør at jordfeil med lysbuer slukker seg selv. Dette gjør at nettet kan driftes med feil i en fase.

Statnett drifter en del av transmisjonsnettet sitt i Nordnorge som et spolejordet regionalnett på 132kV. Dette nettet kalles for *Nordnettet* og strekker seg gjennom tre fylker; Nordland, Troms og Finnmark. Jordfeilstrømmene som oppstår må rapporteres inn til Telenor og benyttes til å bestemme tiltak som må gjøres i telenettet. Disse tiltakene må netteier bekoste og hvis feilaktige feilstrømmer rapporteres inn fører dette til økte kostnader.

Statnett benytter i dag PSSE for å gjøre analyser av jordfeilstrømmer, men opplever at data på spolene i nullpunktet og beregnede jordfeilstrømmer er unøyaktige. Den unøyaktigheten som Statnett opplever er nødvendig å oppklare da dette kan gjøre rapporteringer til Telenor riktig og optimale, slik at kostnadseffektive tiltak kan treffes. Det er også viktig å få på plass et beregningsverktøy som etterstiller ønsket om riktige jordfeilstrømmer da det skal gjøres endringer og utbedringer i nettet for fremtiden.

Spolejording er en driftsform som bruker en Petersons spole til å kompensere ned kapasitive feilstrømmer. Nettets utstrekning avgjør størrelsen på denne strømmen da den totale kapasitive avledningen summeres opp gjennom hele nettet. Spolene er distribuert ut i hele nettet der man som regel har en spole som er automatisk regulert. De øvrige spolene stilles inn til faste verdier. Ved praktisering av spolejording bruker man resonanskurver til å avgjøre bidraget til den automatisk regulerte spolen. Ut fra den avgjør man hvilket bidrag man ønsker for å oppnå ønsket jordfeilstrøm ved en feil. Hvis den kompenserte jordfeilstrømmen går nært null kan systemet havne i resonans. Dette kan medføre store skader på komponenter i nettet. Det er da veldig viktig å vite at man har korrekte verdier i beregningene sine slik at uønskede feilsituasjoner ikke oppstår. Blir jordfeilstrømmene for små, kan

det også være utfordringer for vernene å detektere feil.

Nordnettets topologi er veldig stort. Det er et av de største nettene i Norge som driftes som et regionalnett. Da er det viktig å ha kontroll på nettets verdier da dette er grunnlaget for å beregne kapasitiv avledning.

I denne oppgaven skal det gjøres analyser av jordfeilstømmer gjennom å etablere en forenklet modell av Nordnett i programvaren ATP Draw. Det skal beskrives teori om spolegjøring og forklare hvorfor og hvordan denne utføres. Videre skal det beregnes feilstømmer og jordstrømmer i faste og regulerte spoler både under feil og i normal drift. Resultatene skal sammenlignes med grenseverdier og forventede og erfaringsbaserte verdier.

Kapittel 2

Teori

All teori som er bundet opp mot denne masteroppgaven blir dekket i følgende kapittel. Hovedsakelig vil det bli presentert dyp teori om spolejording, men for å gjøre det trengs det ytterligere grunnleggende teori. I Norge karakteriserer vi strømmettet inn i 3 kategorier:

- **Distribusjonsnett 1kV-33kV** hovedsakelig for å forsyne sluttbruker med energi.
- **Regionalnett 33kV-132kV** Her forflyttes energi mellom regioner og større avstander for å og for å tilkoble større kraftanlegg.
- **Transmisjonsnett 132kV-420kV** Her koples hele nettet sammen og overfører energi mellom store avstander. Transmisjonsnettet hjelper til med å opprettholde stabilitet og sikkerhet. Store kraftverk koples også på dette nettet.

Den mest vanligste driftsmetoden i Norge er å drifte nettet kompensert. Det vil si at man bruker en spole for å kompensere ned jordfeilstrommen i nettet. På denne måten kan man minke jordfeilstrommen så mye at jordfeilen slukker seg selv. I praksis betyr det at man kan drifte nettet med feil som videre gir lave kostnader og gode driftsforhold.

Bakdelen med dette er at det finnes en viss grense på hvor stort et spolejordet nett kan være før det blir vanskelig å redusere feilstrommen. Denne grensen avhenger av topologi og geografisk lokalisjon, men settes ut fra hvor stor feilstrommen blir. Hvis feilstrommen ikke kan minskes mer enn ned til 70-80 Ampere er det kan jordfeilstrommen bli så stor at jordfeilen blir stående.[Gustavsen and Walseth(2002)]

2.1 Symmetriske komponenter

For å kunne analysere jordfeil og jordfeilstrømmer må en forstå det teoretiske grunnlaget for dekomponerte systemer. Et dekomponert system består av symmetriske komponenter og er en måte å representere et ubalansert sett av visere til tre uavhengige sett med visere. Det vil si to balanserte sett og et tredje sett med identiske visere. Visere er et komplekst tall representert som en sinusoidal funksjon med tidsavhengig amplitude (A), vinkelfrekvens (ω) og faseforskyvning (θ). Dette er en matematisk metode som ble introdusert i 1918 av Charles LeGeyt Fortescue [Fortescue(1918)]. Resten av teorien er hentet fra [Electrical(2019)].

2.1.1 Grunnleggende transformasjon

Et virkårlig sett med n visere har to dimensjoner, altså hver viser har en størrelse og en fasevinkel. Fortescue foreslo en transformasjon som også ga to dimensjoner, men som i tillegg hadde symmetri. I et trefase nett vil man altså ha 3 visere, som kan uttrykkes som:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{a,0} \\ V_{b,0} \\ V_{c,0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{a,1} \\ V_{b,1} \\ V_{c,1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{a,2} \\ V_{b,2} \\ V_{c,2} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Hvor V_a , V_b og V_c er sett med vilkårlige spennings visere.

$V_{a,0}$, $V_{b,0}$ og $V_{c,0}$, er sett med visere i null-systemet.

$V_{a,1}$, $V_{b,1}$ og $V_{c,1}$, er sett med visere i pluss-systemet.

$V_{a,2}$, $V_{b,2}$ og $V_{c,2}$, er sett med visere i minus-systemet.

Annoteringen 1 og 2 kan også omtales som henholdsvis det positive- eller negative systemet.

Videre antar man at det positive og det negative systemet er perfekt balansert, men motsatt i forhold til hverandre. Videre introduseres en operator som representerer en viser a som er en rotasjon på 120° eller $e^{j\frac{2\pi}{3}}$. Dermed kan det positive og det negative systemet representeres som:

$$V_1 = V_{a,1} = aV_{b,1} = a^2V_{c,1} \quad (2.2)$$

og

$$V_2 = V_{a,2} = a^2V_{b,2} = aV_{c,2} \quad (2.3)$$

Det negative systemet med visere skal være identiske, altså:

$$V_0 = V_{a,0} = V_{b,0} = V_{c,0} \quad (2.4)$$

Dermed kan disse settes inn i et nytt matrisesystem som drar nytten av at alle nye visere er balanserte og symmetrisk:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

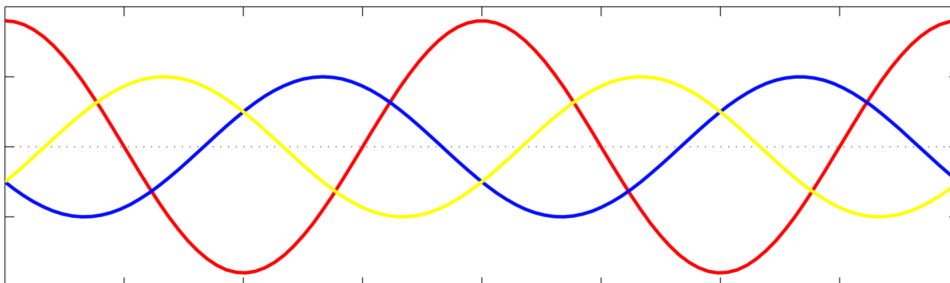
Den inverse av denne matrisen vil da gi

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

som da vil være de symmetriske komponentene i nettet.

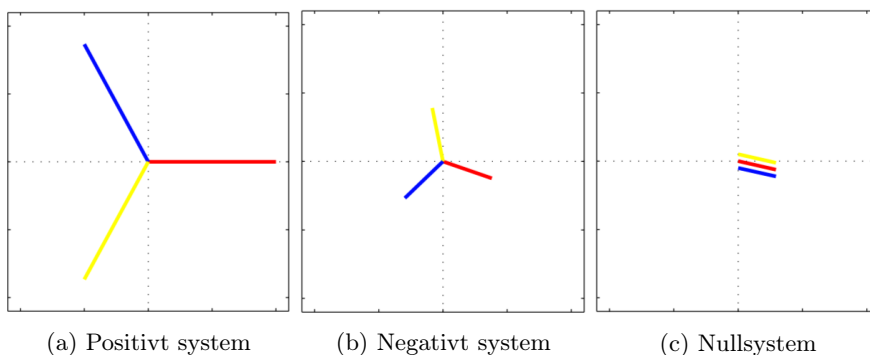
2.1.2 Visere og visuell representasjon

Hvis man antar et sett med ubalanserte visere i spenningsform som i figur 2.1



Figur 2.1: Visuell representasjon av e ubalansert trefase spenning.

vil de dekomponerte viserene være representert som:



Figur 2.2: Sammenligning av viserene i de forskjellige dekomponerte systemene.

I figur 2.2 ser man tydelig symmetrien i det positive og det negative systemet. Man kan også se at viserene i nullsystemet er identiske. Denne transformasjonen gjør det enklere å regne ut spenningene i et ubalansert nett, da man kun regner på balanserte system.

2.1.3 Spenning, strøm og impedans

For å forenkle formuleringen og skrivingen kan man definere matrisene med følgende notering: De originale ubalanserte viserne notert som V_{abc} .

$$V_{abc} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

De transformerte symmetriske viserne notert som V_{012} .

$$V_{012} = \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

Transformasjonsmatrisen notert:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

Dermed kan man, på matriseform, beskrive de symmetriske dekomponerte komponentene som

$$V_{abc} = AV_{012} \quad (2.7)$$

og

$$V_{012} = A^{-1}V_{abc} \quad (2.8)$$

Videre har da også strøm og impedans følgende forhold i symmetriske komponenter.

$$I_{012} = A^{-1}I_{abc} \quad (2.9)$$

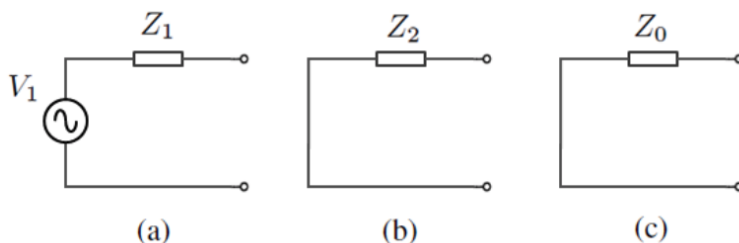
Impedansen vil være en 3X3 matrise med komponenter som selvimpedans og impedanser mellom faser/busser. I større systemer kan denne finnes ved å inversere Y-matrisen.

Forholdet blir da:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

2.1.4 Oppbygging av dekomponerte systemer

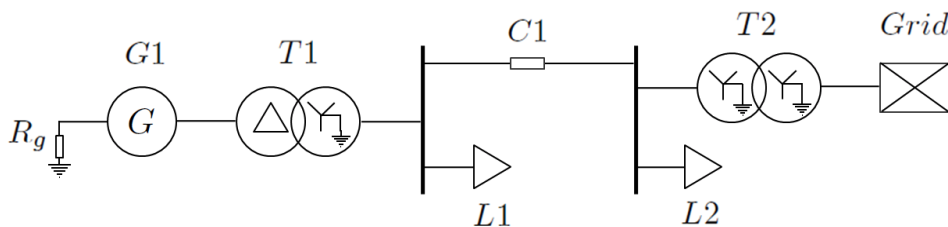
Ved å benytte seg av symmetriske komponentanalyse kan man dekomponere et elektrisk system i tre delsystemer. Disse er da uavhengige undersystemer som kun bruker størrelser i samme delsystem. Hvert av delnettene kan så uavhengig av hverandre, reduseres til en *Thevinin krets* eller en ekvivalent krets som vist i figur 2.3.



Figur 2.3: Dekomponerte delsystemer som Thevinin krets

Legg merke til at det er kun det positive systemet som har en spenningskilde. Dette er fordi at i et balansert nett finnes det ikke spenning i nullsystemet eller det negative systemet.

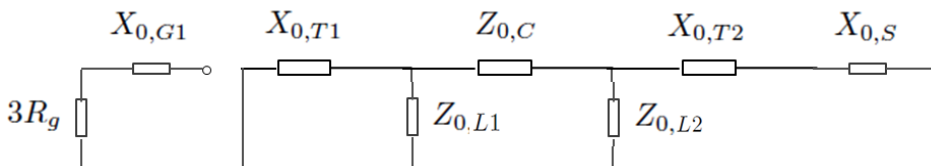
Siden det er kun nullsystemet som er interessant for denne oppgaven velges det å vise kun hvordan nullsystemet bygges opp. Hver komponent i nettet har en unik konstruksjon i nullsystemet. Nullsystemet bygges opp av impedanser og reaktanser for å lage en redusert thevinin krets. Videre tas det utgangspunkt i systemet i figur 2.4.



Figur 2.4: Elektrisk system med ulike komponenter.

Dette systemet vil da bli gjort om og satt sammen til en egen krets som beskriver nullsystemet. Ved å bruke koplingen til komponentene i nullsystemet kan man sette sammen til en ny topologi. For dette systemet vil nullsystemet se ut som i figur 2.5. Her ser vi at i nullsystemet har ikke reaktansen til generatoren en kopling med reaktansen til transformatoren. Dette er fordi at koplingsgruppene til transformatorene er avgjørende til hvordan strømmen flyter i nullsystemet. I figur 2.4 ser man at det er en delta-stjerne kopling der stjernesiden er koplet til

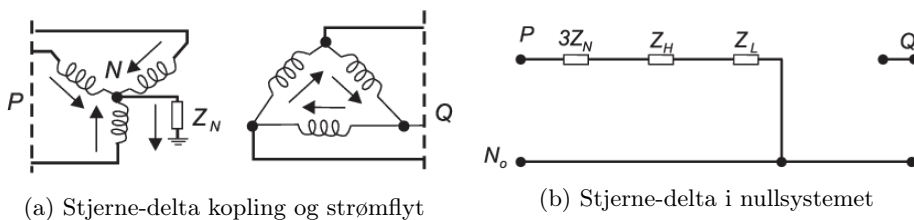
jord. En nærmere forklaring på dette vil bli forklart videre. Legg også merke til at motstanden som er koplet mellom generatoren og jord er 3 ganger verdien til motstanden. Dette blir også forklart videre.



Figur 2.5: Nullsystemet til kretsen i figur 2.4.

2.1.5 Transformatorer i nullsystemet

Transformatorer er en komponent som kan ha flere forskjellige konfigurasjoner avhengig av sitt formål. I en transformator er det tre forskjellige koplinger som hovedsaklig benyttes. Disse koplingene kalles for Delta-, Stjerne- og Tertiærkopling. I en deltakopling er fasene koplet sammen i ordenen slik at fasen er koplet i til begge endene av de andre fasene, som en trekant. I en stjernekopling er alle fasene koplet inn mot et felles punkt, *nøytralt punktet*. For å kunne kople jord til en transformator, trenger den en kopling som gir et nøytralt punkt. Med andre ord er det ikke mulig å ta ut et nøytralt punkt direkte ut av en deltakoplet side av transformatoren. En stjerne-delta kopling gir også en faseforskyvning på 30 grader.



Figur 2.6: Stjerne - Delta konfigurasjon i nullsystemet.

Ser man på stjerne-delta kopling som er vist i figur 2.6, kan en observere strømflyten på begge sidene av transformatoren. På stjernesiden ser man at strømmene flyter inn til ett punkt, for så å flyte ned i jord. Det betyr at strømmen som flyter ned i nøytralt punktet er 3 ganger strømmen i fasene og dette er årsaken til det blant annet ble, i kapittel 2.1.4, tre ganger motstanden i mellom generatoren og jord. Dette er også illustrert i (b) der man ser $3Z_N$. I nullsystemet vil ikke deltasiden gi en kopling til referansen i systemet. Dermed vil også strømmen i nullsystemet kun flyte i P-siden av systemet i dette tilfellet. Flere koplinger av transformatorer er vist i appendikset.

2.2 Kompensert jording

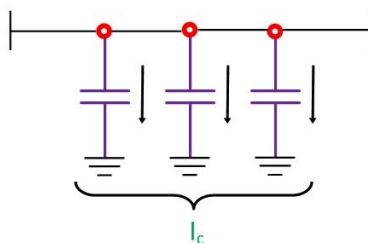
Nettet som det konsentreres om i denne oppgaven er et regionalnett på 132 kV spenning. Jordingsssystemet som benyttes i regionalnett og i Nordnettet er et kompensert jordingsssystem, som også kalles spolejording. Grunnen til at det blir kalt spolejording er fordi nullpunktet i systemet blir koplet til en spole og så videre til jord. Denne spolen kalles for en Petersons spole. Grunnen til at man praktiserer dette jordingsssystemet i hovedsak for å kompensere feilstrømmen i nettet til et så lavt nivå at man kan drifte nettet med feil. Følgende kapittel skal forklare dette nærmere og teorigrunnlaget er hentet fra [Von Meier(2006)] og [Willheim and Waters.(1956)].

2.2.1 Kapasitans

Ved benyttelse av Petersons spole er det grunnleggende å ha oversikt over ladeytelsen til komponentene i nettet. Ladeytelse kan beskrives som den kapasitive strømmen som lades opp på grunn av potesialet mellom lederen og jord. Sammenlignbart med en vanlig parallelplatekondesator vil da luftlinjen representere ene siden av platen og jord den andre.

Altså er geometrien og høyde til objektet viktig. For et trefase nett er da altså utformingen på linjen viktig å vite. Den kan være forskjellig fra nett til nett. De mest normale vil være flatt oppheng med tre ledere ved siden av hverandre, eller trekantoppheng, der avstanden mellom lederne er like lang.

Begrepet ladestrøm kan benyttes om strøm som er avhengig av kapasitansen i linjen. Jo lengre linjen er jo større kapasitans har linjen. Som vist i figur 2.7 er det illustrert hvordan kapasitansen fordeler seg per lengdeenhet. Dette gjelder for alle fasene i linjen. Derfor er det summen av all kapasitans som vil spille inn. Kapasitansen lades opp over tid og vil representere energipotensialet for linjen. Ved en fasefeil vil kapasitansen i nettet utlades gjennom luft.



Figur 2.7: Illustrasjon av fordeling av kapasitans i et nett. Hentet fra [circuitglobe(2019)].

Formelen for kapasitans er

$$C = \frac{q}{V} \quad (2.11)$$

hvor q er ladning per lengdeenhet og V er spenningspotensialet. Spenningen for en enkel leder med en uniform elektrisk ladning q i en høyde h over jord og med en diameter d kan bli representert ved

$$V_1 = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2h}{\frac{d}{2}} = \frac{q}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \ln \frac{4h}{d} \quad (2.12)$$

Siden spenningen på en kondensator er direkte proporsjonal med ladningen vil strømmen lede over spenningen og bygge opp ladning mellom fase og jord. I viserdiagram vil da altså reaktansen fra kondensatoren være negativ i på den imaginære aksene. Reaktansen til en kondensator kan beskrives som

$$X_c = -\frac{1}{\omega C} \quad (2.13)$$

som i parallel vil være

$$\sum_{i=1}^n C_i = C_1 + C_2 + C_3 \dots + C_n \quad (2.14)$$

og impedansen er da definert som

$$Z_c = jX_c \quad (2.15)$$

2.2.2 Induktans

Induktans eller induktivitet er en egenskap som oppstår når en leder danner en indusert elektromotivisk spenning når de utsettes for en varierende strøm. Disse komponentene er som regel spoler. I et kraftnett er denne egenskapen benyttet i transformatorene for å endre spenningsnivå. Det er selve endringen av strømmen som induserer spenningen mellom transformatorene. En reaktor(spole) vil lagre energi i magnetfeltet når en strøm påsettes. En spole er bygd opp av viklinger som via Faradays lov lager en fluks i et medium, enten luft eller en kjerne. Formelen for induktans L i en spole er gitt ved

$$L = \mu_0 N^2 \frac{A}{l} \quad (2.16)$$

Hvor L er induktans i *Henry*(H), μ_0 er permabilitet i luft, N er antall viklinger, A er arealet av seksjonen av spolen i meter og l er lengden av spolen i meter. Siden strømmen ikke kan endres momentant i en spole, vil spenningen lede over strømmen med 90° . Formelen for spenning i en spole er gitt ved

$$v_l(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (2.17)$$

der reaktansen til spolen vil i et viserdiagram ligge positivt på den imaginære aksene. Dette fører til at reaktansen er gitt ved

$$X_L = \omega L \quad (2.18)$$

Induktans i parallell vil være

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{L_i} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \dots + \frac{1}{L_n} \quad (2.19)$$

og impedansen kan skrives som

$$Z_l = jX_L \quad (2.20)$$

2.2.3 Konduktans

Elektrisk kondkonduktans er den inverse av elektrisk resistans. Der resistans er målet på motstanden strømmen møter er konduktans et mål på hvor lett strømmen passerer. Konduktans måles i *siemens* og har formelen

$$G = \frac{I}{V} = \frac{1}{R} \quad (2.21)$$

Som regel er resistansen gitt ved isolerende materiale i nettet, som er for det meste gitt av isolatorer. Disse er da også knyttet til jord slik at man vil ha en konduktans i parallel med kapasitansen i nettet. Størrelsen på denne er avgjørende for absoluttverdien på strømmen. Siden resistans og konduktans er reelle størrelser vil den påvirke den reelle delen av viserdiagrammet. Konduktansen er også påvirket av været og jordmotstand. Når det er regn vil dette påvirke impedansen i nettet gjennom våte isolatorer samtidig som forskjellen i jordsmonn er med på å variere motstanden basert på geografisk lokasjon [Flores(2009)].

2.2.4 Impedans

Både reaktans og resistans er en del av en kompleks impedans med formelen

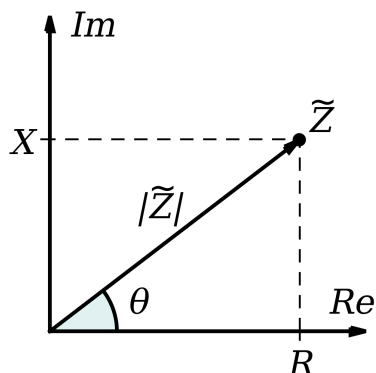
$$Z = R + jX \quad (2.22)$$

Der j er en imaginær enhet som er gitt ved $\sqrt{-1}$.

Når en krets inneholder både en kapasitans og en induktans i serie kan man uttrykke det som

$$X = X_L + X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C} \quad (2.23)$$

Dermed blir den imaginære delen av viserdiagrammet til impedansen en sum av kapasitans og induktans, som nuller hverandre ut. Dette er vist i figur 2.8.

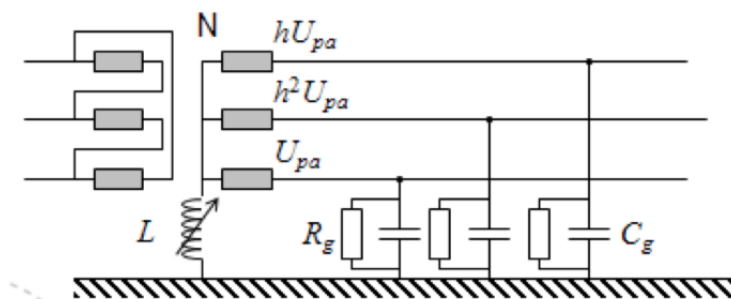


Figur 2.8: Viserdiagram for komplekse impedanser. Hentet fra [Wikipedia(2019)]

2.2.5 Petersons spole

En Petersons spole, også kalt kompenseringsspole eller jordstrømspole, er en reaktor med jernkjerne som er koplet mellom nøytralepunktet og jord. Spolen er designet slik at den kan stilles inn mot kapasitansen i nettet for å kompensere feilstrømmen når en fase-til-jord feil oppstår. Petersons spole gjør at lysbuefeil mellom fase og jord slukker seg selv. Spolen reduserer feilstrømmen til en veldig lav verdi slik at de friske fasene kan operere som normalt med en fase koplet til jord.[Ram and Vishwakarma(1995)]

Et spolejordet nett kan illustreres slik som i figur 2.9.



Figur 2.9: Illustrasjon av et spolejordet system.

Her ser man en trefase transformator koplet i en delta-stjernetkopling med en spole koplet til nullpunktet. For å illustrere kapasitansen og konduktansen i nettet er R_g og C_g satt i en parallellkopling til jord og hver an fasene er 120 grader faseforskyvet i forhold til hverandre.

De kapasitansene som er illustrert her, summeres opp jo større nettet er. I den

forbindelse kan en snakke om total kapasitans for en fase eller linje. Den totale kapasitansen summeres så opp i hele nettet og vil bidra til å regne ut systemets totale ladestrøm.

Spolen er så dimensjonert ut i fra hvor stor ladestrøm nettet bærer. Kapasitansen er bestemt av hvilken dimensjon fasen har og hvor stor spenning den har. Det vil være minimalt med induktans fra fasene, slik at impedansen fra linjen kan derfor representeres som rent kapasitivt. Impedansen kan da dekomponeres gjennom en kompleks-lineær transformasjon inn i det positive, negative og nullsystemet. Feilstrømmen, eller ladestrømmen uten spole tilknyttet kan da finnes ved følgende ligning:

$$I_f = 3I_0 = \frac{3U_p}{Z_+ + Z_- + Z_0 + R_f} \quad (2.24)$$

Hvor U_p er fasespenningen og C_{pg} er kapasitansen mellom fase og jord. Tallet 3 representerer alle tre fasene samlet. R_f er resistansen i kortslutningsmediet mellom fase og jord. Når man antar at kortslutningsmediet er luft, er resistansen så liten at man kan neglisjere den. Z_+ er den positive impedansen, Z_- er den negative impedansen og Z_0 er nullimpedansen.

Når systemet er friskt og symmetrisk vil $Z_+ = Z_-$ og vil bli gitt av systemets komponenter sett fra kilden. Dermed kan da nullimpedansen regnes ut ved hjelp av en parallellkopling:

$$Z_0 = 3Z_g || Z_{pg} || 3R_f \quad (2.25)$$

Hvor Z_g er impedansen mellom nøytralt punktet i transformatoren og jord. Dette vil være impedansen fra spolen. Z_{pg} er impedansen mellom fase og jord. Som nevnt tidligere neglisjeres R_f i og med at den ikke vil ha betydelig påvirkning på feilstrømmen. Videre vil også $Z_0 \gg Z_+, Z_-$ noe som forenkler ligning 2.24 ved at Z_+ og Z_- kan neglisjeres. Dermed kan Z_{pg} beskrives som

$$Z_{pg} \approx Z_c = \frac{1}{j\omega C_{pg}} \quad (2.26)$$

hvor C_{pg} er kapasitansen mellom fase og jord. Feilstrømmen kan da beskrives ved en kombinasjon mellom ilikning 2.24 og 2.26 som resulterer i

$$3I_0 \approx 3 \cdot j\omega U_p C_{pg} \quad (2.27)$$

Siden spolen nå er ekskludert vil da dette være feilstrømmen ved en direkte kopling mellom nøytralt punktet og jord. Siden den totale kapasitansen er veldig stor, resulterer også dette i en stor feilstrøm. Ved å kople til en spole mellom nøytralt punktet og jord, vil den induktive strømmen som induseres i spolen sette opp en strøm mot den kapasitive feilstrømmen. Om spolen dimensjoneres riktig kan

man begrense den feilstrømmen til ønsket nivå. Formålet med dette er å minke feilstrømmen så mye at det ikke er nok strøm til å danne kopling mellom leder og jord i luft. På den måten vil eventuelle lysbuer/koplinger mellom fase og jord slukke seg selv. Dette betyr i praksis at man kan drifte nettet uten frakoplinger, selv om man har en feil. En annen fordel med denne løsningen er å minke strømgjennomgang ved direkte kontakt. Det reduserer faremomenter som ellers kan oppstå.

Ved å introdusere spolen vil Z_{pg} endres fra å være totalt kapazitiv, til både kapazitiv og induktiv:

$$Z_{pg} = \frac{1}{\left(\frac{j}{\omega L_n} - j\omega C_{pg}\right)} \quad (2.28)$$

Der L_n er størrelsen på spolen. Videre kan feilstrømmen skrives som:

$$3I_0 \approx 3U_p \left(\frac{j}{\omega L_n} - j\omega C_{pg}\right) \quad (2.29)$$

Tar vi så med motstanden i koplingen mellom fase og jord blir da den endelige formelen

$$3I_0 = U_p \left(j \left(\frac{1}{\omega^2 L_n} - 3C_{pg}\right) + \frac{R_f}{3}\right) \quad (2.30)$$

Ut fra denne formelen kan en se at forholdet mellom kapasitans og induktans avgjør størrelsen på feilstrømmen. Ved å plassere spoler i nettet kan man altså dimensjonere disse til å bestemme feilstrømmen. Uavhengig av dette vil det fortsatt være en konduktiv komponent, R_f , som bidrar fra nettet og koplingsmediet. Det vil si at man aldri kan kompensere feilstrømmen til null. [Særen and Giset(2017)]

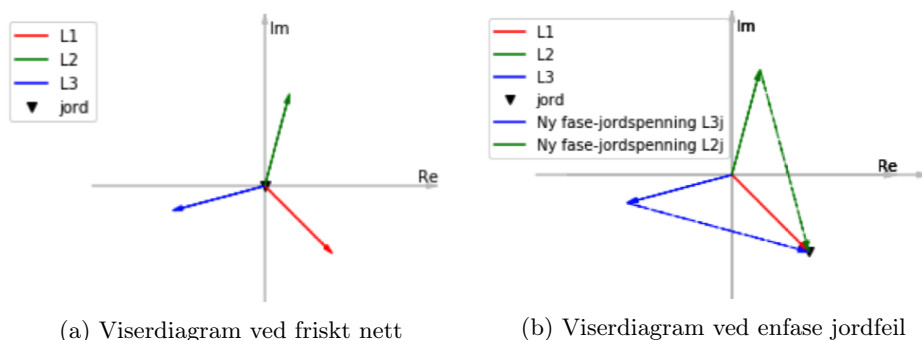
For å dimensjonere spolen kan man bruke likning 2.28.

$$L_n = \frac{1}{3\omega^2 C_{pg}} \quad (2.31)$$

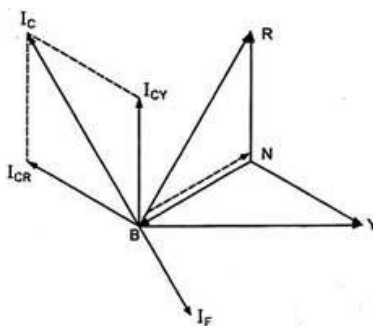
2.2.6 Viserdiagram

Det som skjer i viserdiagrammet er at nøytralt punktet flyttes fra midt mellom fasene til enden på feilfasen. Dette er illustrert i figur 2.10. Her ser man at spenningen i feilfasen blir null, da denne fasen kortsluttes. De to andre fasene vil da øke med $\sqrt{3}$ da referansepunktet flyttes til feilfasen.

Feilstrømmen i diagrammet vil ligge vinkelrett på fasen. Denne er da et resultat av summen mellom reaktansene, som da resulterer i hvilken retning den vil ha. Dette er illustrert i figur 2.11. Her ser man at I_F er motsatt rettet i forhold til I_C . Dette betyr da at nettet er overkompensert da I_L må være større enn I_C .



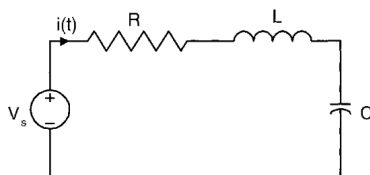
Figur 2.10: Endringer i viserdiagram ved enfase jordfeil



Figur 2.11: Viserdiagram av feilstømmen

2.2.7 Resonans

Når en feil oppstår i nettet vil kretsen som blir dannet mellom fase og nullpunktet bestå av en konduktans, en induktans og en resistans koplet i serie. Dette er vist i figur 2.12. Videre utregning er hentet fra [Mayergoyz and Lawson(1997)]



Figur 2.12: Enkel RLC krets.[Mayergoyz and Lawson(1997)]

Når vi studerer denne kretsen med vekselspenning vet vi at spenningskilden er

$$v_s(t) = V_p \cos(\omega t + \phi) \quad (2.32)$$

og er interessert i responsen av denne kretsen som en funksjon av frekvensen ω .

Strømmen $i(t)$ produsert av spenningen vil også være en sinusoidal funksjon:

$$i(t) = I_p \cos(\omega t + \phi_I) \quad (2.33)$$

der maksimal amplitude, I_p , og faseforskyvning, ϕ_I , av strømmen er avhengig av verdien på ω . Som vist tidligere vil forholdet mellom impedans, strøm og spenning kan man formulere faseforskyvningen som

$$\phi_I(\omega) = \phi - \phi(\omega), \quad \tan \phi(\omega) = \frac{X(\omega)}{R} \quad (2.34)$$

Man er interessert i å finne en bestemt frekvens ω_0 som gjør at vinkelen på impedansen er tilnærmet lik null. Matematisk er vi ute etter en verdi av ω_0 som tilfredsstiller

$$\phi(\omega_0) = 0 \quad (2.35)$$

som tidligere nevnt vil det være når induktansen og kapasitansen kansellerer hverandre ut

$$\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0 \longrightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.36)$$

Dermed, ved vinkelfrekvensen ω_0 , vil kretsen oppføre seg som om den kun inneholder en resistans. Som et resultat av dette vil den opprinnelige fasevinkelen til strømmen være lik den opprinnelige fasevinkelen til spenningen.

$$\phi_I(\omega_0) = \phi \quad (2.37)$$

Med andre ord vil da spenningen og strømmen være i fase. Dette fenomenet kalles resonans og vinkelfrekvensen ω_0 kalles resonansfrekvens. En krets som er i resonans inneholder en del interessante egenskaper. For det første vil impedansen i kretsen nå sitt absolutte minimum ved resonansfrekvens.

$$|Z(\omega_0)| = \min_{\omega} |Z(\omega)| = R \quad (2.38)$$

I en direkte konsekvens av likning 2.38 vil strømmens amplitude nå sitt maksimumsverdi ved resonansfrekvensen.

$$I_p(\omega_0) = \max_{\omega} I_p(\omega) = \frac{V_p}{R} \quad (2.39)$$

For det andre, vil spenningen rundt spolen og kondensatoren ha et interessant forhold i resonans. For å illustrere dette, kan man se på de følgende likningene for spenningene på disse komponentene:

$$\hat{V}_L(\omega_0) = j\omega_0 L \hat{I}(\omega_0) = \frac{j}{\omega_0} \hat{I}(\omega_0) = -\hat{V}_C(\omega_0) \quad (2.40)$$

Altså,

$$\hat{V}_L(\omega_0) = -\hat{V}_C(\omega_0) \quad (2.41)$$

Dette viser at ved resonans vil faseforskjellen mellom disse spenningene være 180° , mens verdien i toppunktet vil være den samme. Som et resultat av dette, vil summene av disse spenningene vær lik 0 i hvilket som helst tidspunkt. Dermed kan man konkludere med at spenningen over resistoren vil være lik spenningskilden

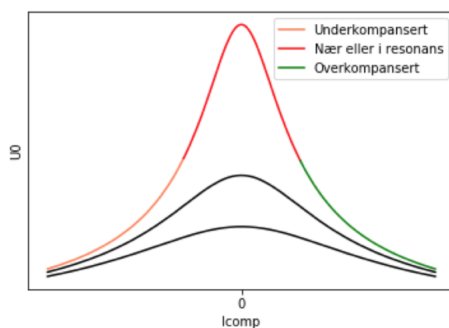
$$\hat{V}_R(\omega_0) = \hat{V}_S = R\hat{I}(\omega_0) \quad (2.42)$$

Dette fører til noen interessante konsekvenser. Hovedsakelig undersøker vi forholdet mellom toppunktene av spenningen over spolen og kondensatoren mot toppunktet til spenningskilden.

$$\frac{V_L(\omega_0)}{V_S} = \frac{V_C(\omega_0)}{V_s} = \frac{\omega_0 L I_p(\omega_0)}{R I_p(\omega_0)} = \frac{\omega_0 L}{R} \quad (2.43)$$

Dermed kommer vi frem til en overraskende konklusjon: hvis $\omega_0 L \gg R$, så vil $V_L(\omega_0) \gg V_S$. Med andre ord, *spenningen over kondensatoren og spolen kan inneholde toppunkter som er større enn spenningskilden i seg selv* [Mayergoyz and Lawson(1997)]. Denne spenningsforsterkelsen avhenger kun av verdiene i kretsen og frekvensen i spenningskilden. I et stort nett med veldig høye spenninger, vil det være viktig å ikke operere nettet i resonans da denne spenningsforhøyelsen vil skape overspenninger som kan bli veldig høye og kan være skadelig både for komponenter og mennesker.

Dette vil også føre til at nullsystemspenningen i nøytralt punktet på transformatoren vil stige ved resonans og det kan indusere strømmer i viklingene på transformatoren, noe som kan føre til at transformatoren får større spenning enn merkespenning, som igjen kan føre til metning eller skade på transformatoren via lekkstrømmer.



Figur 2.13: Illustrasjon av resonans og kompenseringsform. Hentet fra [Særen and Giset(2017)]

Resonanskurven er en kurve som er gitt av ladestrømmen i nettet. Den totale ladestrømmen bestemmer resonanspunktet og fordeler seg likt rundt dette. Resonanspunktet kan illustreres ved å se på nullsystemspenningen i nøytralt punktet.

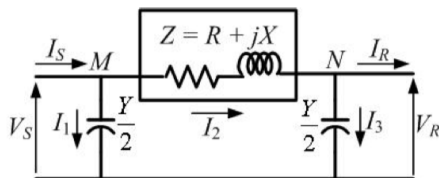
I likning 2.44, hentet fra [Meng et al.(2018)Meng, Weng, Tang, and Xu], ser man at dersom kapasitanen i nettet og induktansen fra spolen er like stor, går nevneren mot null. Dette gjør at U_0 spenningen går mot uendelig. Det er også et ledd til som er den konduktive avledningen. Denne er satt i systemet, men kan variere med geografien og topologien til nettet. Dette er beskrevet nærmere i kapittel 2.2.3.

$$U_0 = -\frac{j\omega(C_A E_A + C_B E_B + C_C E_C) + G_E E_A}{j\omega \sum C + \frac{3}{R} + \frac{1}{j\omega L_n}} \quad (2.44)$$

For å unngå å havne i resonans driftes nettet i det som kalles *overkompensert drift*. Dette betyr at spoleytelsen er større enn ladestrømmen. Ser man på figur 2.13 viser den grønne delen av kurven overkompensering. Det er en fin balanse mellom å ikke havne i resonans og å ha lav nok kompenseringsstrøm slik at feilen selvslukker. Slukningstester i Sørnettet har vist at for å få en sikker selvslukking innen 2 sekunder, måtte den reaktive komponenten i jordfeilen bli minimert til 75 A. [Gustavsen and Walseth(2002)]

2.3 PI modell

For å kunne modellere transmissjonslinjer må man se på egenskapene til en luftlinje og hvordan de opererer. En metode er "Pi-Modellen" som brukes en del i lastflyt analyser.



Figur 2.14: Pi-modellen illustrert.

I figur 2.14 er en linje illustrert med hensyn på Pi-modellen. Det som karakteriserer denne modellen er at man deler luftlinjen i to, der admittansen for linjen er delt i to like størrelser. Disse er da bundet sammen med en impedans for linjestykket. Ene siden er kalt S og den andre er kalt R . Ser man på knutepunktene M og N kan man anvende Kirchoffs strømlov og finne forholdet. [NPTEL(????)]

$$I_S = I_1 + I_2 = I_1 + I_3 + I_R = \frac{Y}{2}V_S + \frac{Y}{2}V_R + I_R \quad (2.45)$$

Der

$$V_S = ZI_2 + V_R = Z \left(V_R \frac{Y}{2} + I_R \right) + V_R = \left(\frac{YZ}{2} + 1 \right) V_R + ZI_R \quad (2.46)$$

Implementerer 2.46 i 2.45 og får

$$I_S = \frac{Y}{2} \left[\left(\frac{YZ}{2} + 1 \right) V_R + ZI_R \right] + \frac{Y}{2}V_R + I_R \quad (2.47)$$

$$I_S = Y \left(\frac{YZ}{4} + 1 \right) V_R + \left(\frac{YZ}{2} + 1 \right) I_R \quad (2.48)$$

Kapittel 3

Modellen

Denne masteroppgaven er underlagt taushetserklæring grunnet kraftsensitiv informasjon. Derfor vil ingen informasjon om komponenter eller geografisk plassering bli gjengitt. Det er derimot laget et vedlegg som blir sendt ut til bedriften med beskrivelse av data.

Modellen tar for seg hele Nordnett på regionalnett nivå. Det er gjort datainn-samling av alle linjekomponentene som inngår i nettet. For å få denne modellen til å bli så riktig som mulig, har det blitt tilpasset for å gjøre transiente beregninger og analyser av feilstrømmer ved bruk av spolejording.

3.1 Nordnett

Nordnett er et av de største 132kV nettene i Norge. Store deler av nettet er eid av Statnett SF og er regnet som en del av det norske Sentralnettet, som vanligvis er på 420kV. Nordnett strekker seg fra Ofotringen, nord for Narvik, og til grensen med Russland. Tidligere var dette nettet, Ofotringen og det som i dag heter Sørnett i Lofoten et eget nett. Dette ble da delt opp for å få bedre kontroll på blant annet jordfeil. Det er store avstander i dette nettet og krever en egen regionsentral slik at det ikke er kontrollert sammen med Sentralnettet.

Nordnett blir transformert ned fra 420kV til 132kV på to steder. Herfra blir det overført i et masket nett gjennom hele Troms og Finnmark. Her er det flere netteiere som Troms Kraft og Varangerkraft, men det er Statnett som opererer. Nordnett blir i likhet med Sørnett operert ved bruk av kompensert nullpunkt, via Petersons spoler. Siden nettet er så stort, vil ladestrømsbidraget bli veldig høyt. I Nordnett er total ladeytelse ca. 1700 A og total spoleytelse er ca. 2400 A [Jenssen(2019)]. I Sørnett er da ladestrømmen noe større grunnet flere kabler i nettet. I dette nettet er det også tilstrekkelig med spolekapasitet til å følge teorien, men Direktoratet for beredskap og sikkerhet har likevel konkludert med at Sørnett drives forskriftstridig. Dette er fordi de må drive nettet nært resonans.

[Gustavsen and Walseth(2002)]. I følge Statnett skal Nordnettet driftes med 50 A overkompensering. Nettet har ca 2000 km med transmisjonslinjer som gir det meste av det capacitive bidraget. Når nett ekspanderer vil det oppstå vanskeligheter med drift. Dette er allerede skjedd i regionen da Nord- og Sørnettet ble delt. Det er mye aktivitet i Nordnettet og planer om utbygging. Det er hensiktsmessig og ta høyde for symstemjording i tiden fremover da NVE har begynt å kreve utredning på systemjordingen i regionalnettene i Norge. Statnett har i senere tid begynt å oppleve uforklarlige feil i deres beregningsverktøy PSSE. Det er viktig å analysere hvorfor denne feilen oppstår og om det kan være andre faktorer enn utvidelse som er årsaken. Det skal sees på om spoleplasseringer kan være en faktor, eller nettets topologi kan være med å bidra til feilaktige strømmer.

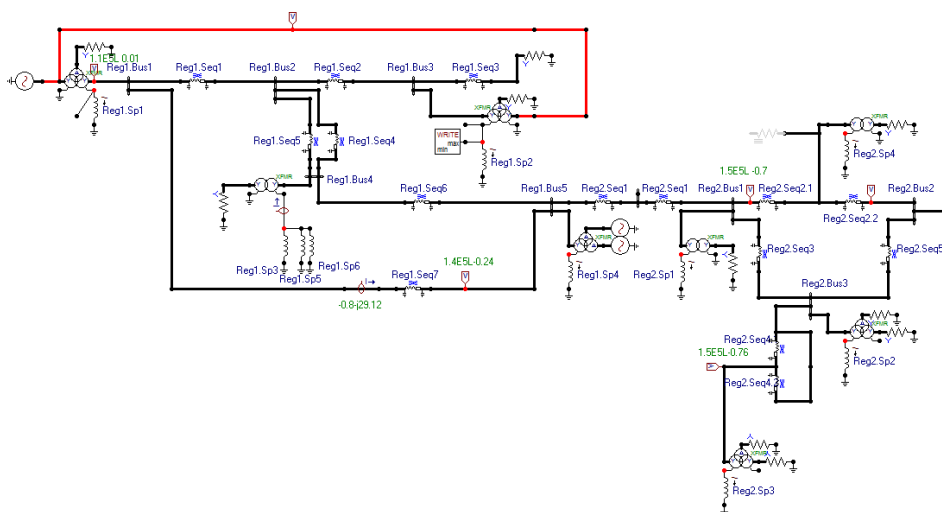


Figur 3.1: Oversiktsbilde over nordnettet hentet fra NVE Atlas.

Modellen er bygd opp ved å bryte ned Nordnettet inn i 3 regioner og 18 seksjoner. Dette er gjort på bakgrunn av linjedata, og for å implementere linjekapasitanser i ATP modellen. Det er veldig viktig at linjedataen på kapasitansene er korrekt. Siden kapasitansene for hver linje er gitt, er det er brukt Pi-ekvivalent linjer for å fordele kapasitansen jevnt over en viss distanse. Utgangspunktet for innstilling av spoler er et fiktivt driftsbilde satt sammen av Statnett.

3.2 Regioner og seksjoner

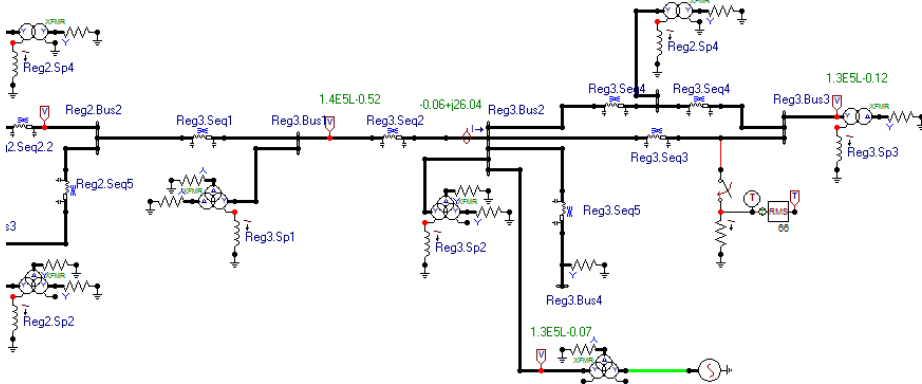
For å kunne benytte seg og endre i modellen er det viktig at man kan justere dataen effektivt slik at man ikke bruker for mye tid på å endre linjer, spolestrøm og koplinger. Dataene som kom fra Statnett var ikke satt inn i noe system, men et regneark der alle linjene, både luftlinjer og kabler, sine data var samlet. Store deler av jobben var å krysssjekke disse dataene opp mot enlinjeskjema for så å sette disse inn i et system. Dette ble gjort ved å samle opp dataene i et excelark der det videre ble inndelt i flere seksjoner i flere regioner.



Figur 3.2: Oversiktsbilde av region 1 og 2 i modellen.

En seksjon består da av flere kabler og linjer mellom to punkt. Data som tilhører en seksjon er da total lengde på kabel og total kapasitans, samt total kapasitans per kilometer. Alle spolene med maks ytelse i disse regionene ble så lagt inn ved siden for å sammenligne med total ladestrøm. Naturlige valg ble gjort for å inndele Nordnettet. Grensen mellom regionene ble satt basert på skjønn.

Det er flere muligheter å simulere en transmisjonslinje. ATP Draw har en komponent som heter LCC som skal illustrere en luftlinje. Denne komponenten kunne ikke brukes da det ikke ville vært tid til å hente inn data på alle luftstrekke for hele nettet. Med tanke på høyde over bakken, ledningstype o.l. ble dette utelukket. I stedet falt valget på en revolvert pi-modell. Denne modellen krever kapasitans, induktans og resistans i henholdsvis pluss- og nullsystemet. Modellen fordeler også kapasitansen per kilometer linje. På denne måten ble det lettere å forenkle modellen ved å samle opp flere linjesegment inn i en seksjon. Pi-modellen er forklart i teorikapittel 2.3.



Figur 3.3: Oversiktsbilde av region 3 i modellen

Spenningskildene i modellen er gitt ut fra hvilket spenningsnivå som det blir matet fra. Alle spenningskildene er gitt en frekvens på 50Hz og har spenningsnivåer på 420kV , 270kV og 7kV . Disse er koblet til ulike steder i modellen for å ha sikker spenningsbilde i modellen. Det er lagt på like store laster på sekundærsiden av hver transformator slik at det ikke skal være lastforskjeller i nettet.

Komponentene som er brukt i modellen er da:

- Seksjoner (Linjemodell)
- Transformatorer
- Spoler (Petersons spoler)
- Spenningskilde
- Bryter for Fase-jord feil.
- Last

3.3 Regioner

Dataene for regionene er kraftsensitiv informasjon og kan ikke presenteres her. Derfor blir det sendt som eksternt vedlegg til Statnett. I modellen er disse fordelt i seksjonene og i spolene.

3.3.1 Region 1

Region 1 består av 7 seksjoner med linjer som er koplet i et maskenett. Det er også tilkople 4 transformatorer og 6 spoler. Her er det også koplet til 3 spenningskilder der ene kilden er 420 kV og de to andre er 7 kV.

Her er det 6 spoler fordelt på 4 transformatorer. Her er det en transformator der det er koplet inn 3 spoler i parallel. Avstanden mellom disse spolene var relativt liten, slik at det var gunstigere i modellen å forenkle den slik at disse tre spolene blir koplet i parallel i ett punkt. Dette kan sees i figur 3.2. I region 1 er blir det transformert 420 ned til 130 i to punkter. I det ene punktet er det også en automatisk petersons spole, ved komponenten MAX/MIN.

3.3.2 Region 2

Region 2 består av 4 seksjoner der enkelte seksjoner er bitt delt opp i to for å skape et koplingspunkt halveis i linjene. Dette er en forenklet versjon der nøyaktig avstander mellom punktene ikke er vurdert som nødvendig. Spolene som er plassert i region 2 er plassert ut fra noen korrekte avstander og noen forenklede avstander. I Region 2 er det 4 petersons spoler.

3.3.3 Region 3

Region 3 består av 5 seksjoner, 5 transformatorer og 4 spoler. Seksjon 4 er delt i to for å få tilgang på et koplingspunkt. Her er det også en spenningskilde på 270 kV som blir transformert ned til 130 kV.

3.4 Variabler

ATP DRAW har funksjonaliteten til å lage variabler for modellene. Variablene er verdier med uttrykk som kan brukes i komponenter. Man kan også bruke andre variabler i uttrykkene. I modellen er det laget variabler for alle kompenseringsspoler slik at det er mulighet for å legge inn ønsket spoleytelse i hver spole. Variabelnavnene til spolene er systematisk navngitt etter hvilken region de er i med bokstaven *R*. I tillegg har hver spole blitt navngitt med *L* og et unikt tall. Spole 1 i region 1 har da variabelnavnet *R1L1*.

Spolene som blir brukt i Nordnettet har tre forskjellig merkespenning. Dermed er det laget forskjellige variabler for de tre merkespenningene som brukes. Variablen kalles *UOF(1, 2 eller 3)* for henholdsvis 132kV, 145 kV og 138 kV. *UOF* skal henvisne til formel 3.1

$$UOF = \frac{\text{Merkespenning}}{2\pi f \sqrt{3}} \cdot 1000 \quad (3.1)$$

som igjen kan brukes for å stille inn ønsket mH for spolene ved å dele på ønsket spoleytelse. Dette gjøres ved følgende likning:

$$R1L1 = \frac{UOF}{\text{Innstilt spoleytelse}} \quad (3.2)$$

I tillegg til disse er det laget en ekstra variabel for spolen som står i auto. Denne er laget med hensikten for å kunne endre variabelen til en bestemt verdi eller for å endre variabelen til et flersimulerende uttrykk. Dette gjøres for å lage resonanskurven. Formelen er:

$$CURR = KNT \cdot \text{steglengde} \quad (3.3)$$

Deretter settes antallet simuleringer til ønsket verdi og man kan lagre verdiene for hver simulering. Autospolen bruker *LVAR* som er en egen variabel. *LVAR* er lik formel 3.1 bortsett fra at den bruker *CURR* direkte i utregningen.

VARIABLES		#Sim: <input type="text" value="1"/>
NAME	EXPRESSION	
CURR	160.	
UOF1	((132e3)/(PI*100.*SQRT(3.)))*1000	
UOF2	((145e3)/(PI*100.*SQRT(3.)))*1000	
UOF3	((138e3)/(PI*100.*SQRT(3.)))*1000	
LVAR	((145000.)/(CURR*PI*100.*SQRT(3.)))*1000.	
R1L1	UOF2/166.	

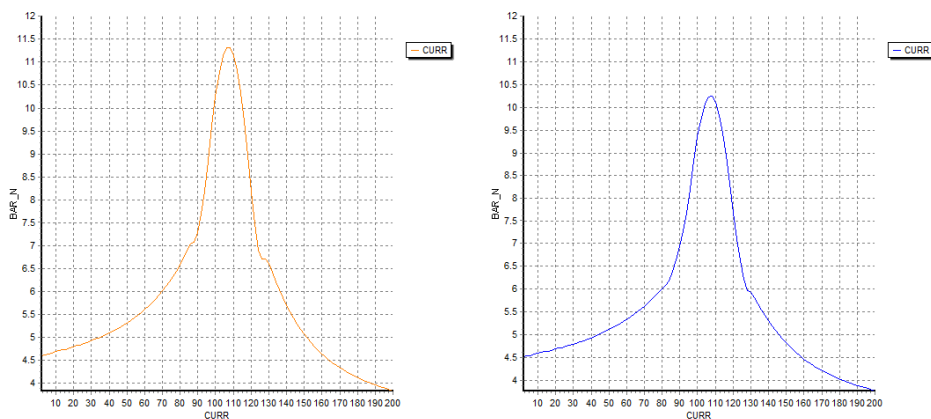
Figur 3.4: Utklipp av variablene.

3.5 Resonanskurve og feilstrøm

For å kunne sette kompenseringstrømmen i nettet er det essensielt å vite resonanspunktet. For å finne resonanspunktet må nettets resonanskurve utarbeides. For å gjøre dette brukes en komponent kalt MAX/MIN i nullpunktet til transformatoren som står i auto. Funksjonen til komponenten er å simulere et maksimumspunkt eller et minimumspunkt til en gitt variabel. Ved å sette en variabel for strømmen gjennom Petersenspolen kan komponenten plote punktvis strømmen gjennom spolen. Makspunktet i resonanskurven henviser til hvor mye spoleytelse autospolen må ha for å havne i resonans, m.a.o. for at feilstrømmen skal bli null.

Resonanskurvens utforming vil være avhengig av hvor stor motstand som ligger til jord. Som nevnt tidligere vil det være en resistans til jord gjennom isolatorene. Denne konduktiviteten vil bidra som et dempningsledd på resonanskurven. For å illustrere dette ble det koplet inn en motstand til jord med forskjellige resistanser. Motstanden må være relativt høy slik at det ikke bidrar som en kortslutning til jord.

Ser man på figur 3.5a vil man se det som karakteriserer en resonanskurve for nettmodellen uten tilkopledd konduktans. Her er det en bratt kurve med en høy topp. Videre i figur 3.5b ser man en liten demping når det er koplet til en resistans på 100000Ω . Dette vil da være en liten konduktans siden konduktansen er den inverse av resistansen. Konduktansen bidrar til å dempe toppen og gjøre kurven ”tykkere”.

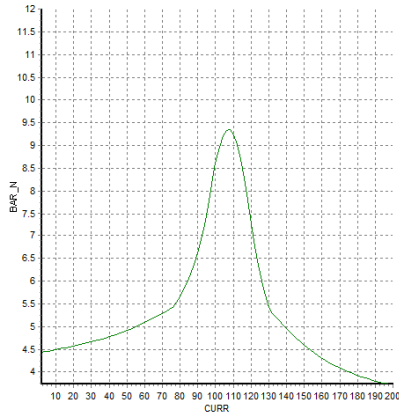
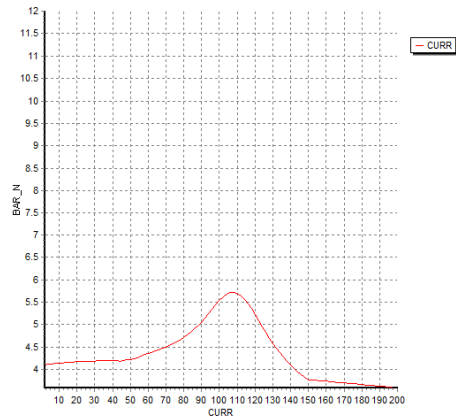


(a) Resonanskurve uten konduktiv avledning. (b) Resonanskurve med tilkopledd motstand til jord på 100000Ω .

Figur 3.5: Sammenligning av resonanskurver med og uten konduktiv avledning.

Videre er det gjort flere analyser av konduktivitetsens påvirkning på resonanskurven for å verifisere modellen. Siden L og C bestemmer resonansfrekvensen så skal ikke resonanspunktet i modellen endres ved å sette inn en konduktans. Den

skal kun bestemme dempingen, som i praksis vil si energitapet i systemet. Når vi da endrer resistansen til mindre verdier vil konduktansen øke, som vil være med på å dempe kurven ytterligere. I figur 3.6a ser man enda tydeligere demping i systemet og i figur 3.6b ser man at toppunktet til resonanskurven nesten er halvert av dempingen til konduktansen.

(a) Resonanskurve med 50000 Ω .(b) Resonanskurve med 10000 Ω .

Figur 3.6: Resonanskurve med forskjellige dempingen.

Kurvene bekrefter teorien om konduktiv avledning og resonanskurve. Man kan registrere at resonanspunktet ligger opp mot 110 A og er likt i alle grafene. Det er altså den konduktive avledningen som demper kurven og er med på å påvirke hvordan kurven oppfører seg. Det er ikke ønskelig å havne i resonans, da dette kan medføre store problemer for komponenter i nettet. Dermed legger man seg overkompensert slik at man kan kontrollere feilstrømmen til et ønskelig nivå. Hvis det er høy konduktiv avledning i nettet kan man komme nærmere resonanspunktet da den flater mer ut og blir 'tykkere'. Resonanskurven blir brukt i autojusterte spoler for å stille seg riktig inn i forhold til nettet.

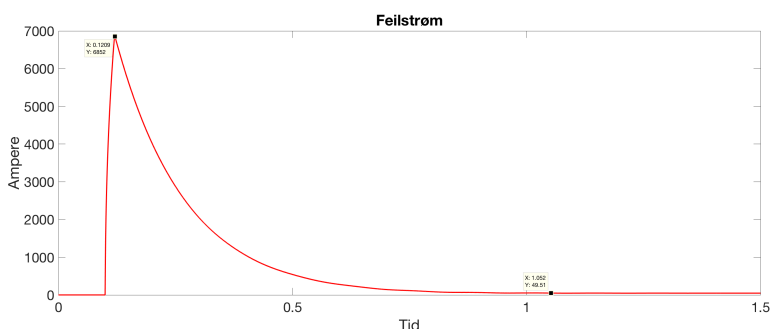
Videre skal modellen og resonanskurven kunne brukes til å bestemme hvor stor feilstrøm det skal være i nettet ved enfasert jordfeil. I praksis betyr dette at ved å endre variabelen *CURR* til en bestemt verdi, skal feilstrømmen bli differansen mellom verdien på *CURR* og verdien i resonanspunktet. Siden feilstrømmen har så høy frekvens, er det viktig at man ser på RMS verdien av feilstrømmen.

3.5.1 Feilbryter

I kretsen er det lagt inn en komponentgruppe som skal representere en enfase jordfeil. Denne komponenten består av flere forskjellige komponenter. Det mest grunnleggende er en enfase bryter som legges inn ved et gitt tidspunkt. Denne bryteren er

så koplet videre i en motstand med veldig lav verdi for å representere en eventuell direkte kopling mellom fasen og jord. Strømmen gjennom motstanden kan taes ut som verdier for feilstrømmen som går til jord. Denne strømmen blir utnyttet ved å kople til TACS komponenter for å hente ut RMS verdiene til strømmen. RMS verdien til feilstrømmen kan så plottes i et diagram og analyseres.

I figur 3.7 er bryteren koplet inn etter 0.1 sekunder. Her kan en tydelig se hvordan spolen sin kompenseringstrøm demper feilstrømmen. Til å begynne med er det enorm energi som utløses gjennom kapasitansen mot jord. Her er det en feilstrøm på nesten 7000A i det øyeblikket feilen skjer. Spolene som samarbeider med å kompensere feilstrømmen demper feilstrømmen i kretsen ved å lagre energi i spolene.



Figur 3.7: Feilstrømmen viser verifisering av modell.

I tiden 1.052 kan en også registrere en feilstrøm på 49.51 A som verifiserer teorien tidligere beskrevet. Feilen her er lagt til et av de punktene lengst vekk i fra autospolen. Selv med faste spoler i nettet, klarer max/min funksjonen å kalkulere seg frem til riktig resonanskurve, og etter en test med 50 A overkompensert, får vi riktig resultat.

Kapittel 4

Simuleringer av feilstrom og ulike driftsituasjoner

Problemstillingen som prøver å bli analysert er at Statnett opplever feile verdier på jordfeilstrommen da de kjører beregninger i PSSE. PSSE er et avansert verktøy som brukes mye internt i Statnett. Det er et verktøy som kan bruke storskala nett til å beregne lastflyt, transier og subtransienter. Når beregninger i enfase jordfeil kjøres er det avvik som er gjentakende og ikke konsistent. I følgende eksperiment skal modellen for Nordnettet som er etablert brukes til å undersøke om ulike feilsituasjoner gir en konstant feilstrom som ikke forandrer seg avhengig av driftsituasjon.

Statnett sin regionsentral har providert med en fiktiv driftsituasjon der spoleinstillingene er gitt. Om modellen i ATP DRAW fungerer kan det ligge til grunn at det er feil i datagrunnlag eller beregningsmetodikk i PSSE. For å finne ut av dette trenger man riktige datagrunnlag for nettet. Dette er som nevnt tidligere nøye validert i ATP og dobbeltsjekket opp mot enlinjeskjema. Data for dette vil bli levert som eget vedlegg da dette er kraftsensitiv informasjon.

4.1 Driftsbilde 1

Driftsbilde 1 er en modell med likt fordelte laster, slik at lastflyten skal være stabil. Nettet skal ha naturlig fordeling mellom aktiv og reaktiv effekt. I modellen er det satt ut to prober som måler dette i hver ende. Det er også fordelte spenningsprober på flesteparten av bussene for å kunne analysere spenningen både før og etter feil. Før feil skal det ikke flyte noe annet enn krypstrømmer i jord.

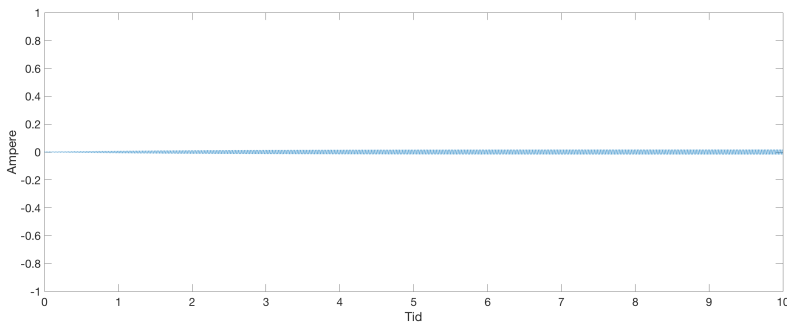
4.1.1 Før feil

Driftsbildet før feil viser følgende effektbilde:

	Reg1.Bus1	Reg1.Bus5	Reg2.Bus3	Reg3.Bus2
S[VAR]	-0.8 - j29.12	-0.77 + j3.49	0.097 + j9.905	-0.06 + j26.04

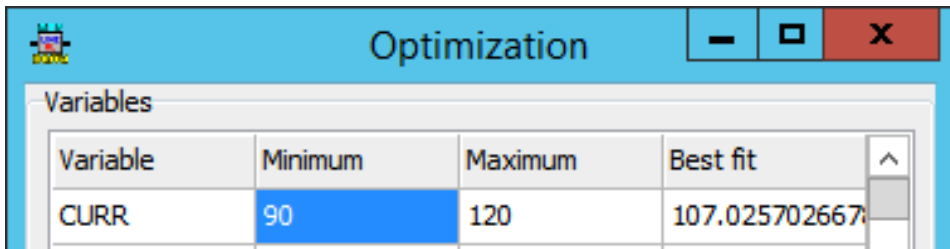
Tabell 4.1: Lastbilde før feil i case 1.

Figur 4.1 viser strømmen som går gjennom autospolen når nettet er friskt. Her kan en se den lille kryptstrømmen som vil gå i jord. Den er under 10 mA og relativ liten. Dette er bidrag fra konduktiv avledning i isolatorene og assymetri.



Figur 4.1: Spolestrømmen før feil

Ved å se på resonanskurven ble det så avgrenset et område for å bruke optimeren for å finne eksakt maksimumspunkt på resonanskurven. Innstillingene til spolene ble satt og koplingsbilde skulle da i henhold til en gitt driftsituasjon være at autospolen skulle gi et bidrag på 166 A ved 50 A overkompensering. Ved bruk av optimizer verktøyet ble det funnet et resonanspunkt ved 107.025703 A som vist i figur 4.2. Ved å legge på 50 Ampere på strømmen, slik at den ble 157.025703 A skal det gi en feilstrøm på 50 Ampere når feilen er stabil.



Figur 4.2: Optimizerverktøyet regner ut resonanspunkt ved bruk av gradient metode.

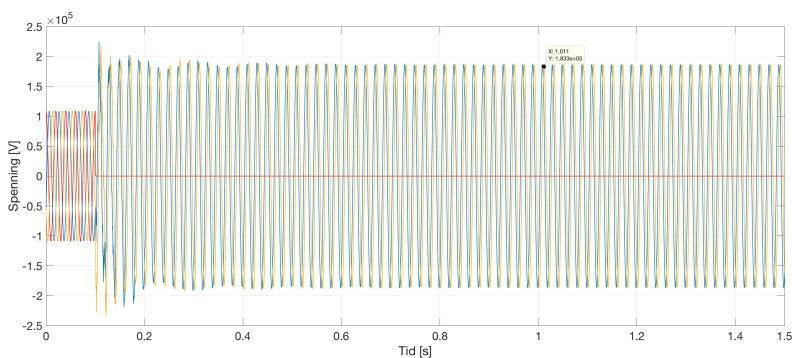
De øvrige innstillingene er satt i henhold til tabell 4.2

Spole	Innstilling
Reg1.spole1	166 A
Reg1.spole3	70 A
Reg1.spole4	120 A
Reg1.spole5	200 A
Reg1.spole6	200 A
Reg2.spole1	98 A
Reg2.spole2	94 A
Reg2.spole3	150 A
Reg2.spole4	118 A
Reg3.spole1	119 A
Reg3.spole2	252 A
Reg3.spole3	24 A
Reg3.spole4	24 A

Tabell 4.2: Spoleinnstilling ved en gitt driftsituasjon

4.1.2 Etter feil

Når en enfase jordfeil settes i fase A ved *Reg3.Bus3* vil spenningen i fase A gå til null mens spenningene i de friske fasene skal heves til linjespenning, som vist ved viserdiagrammet i figur 2.10. Ser man på spenningsbildet i figur 4.3 ser man dette fenomenet. Den røde grafen viser spenningen i fase A, mens fase B og C er henholdsvis blå og gul.



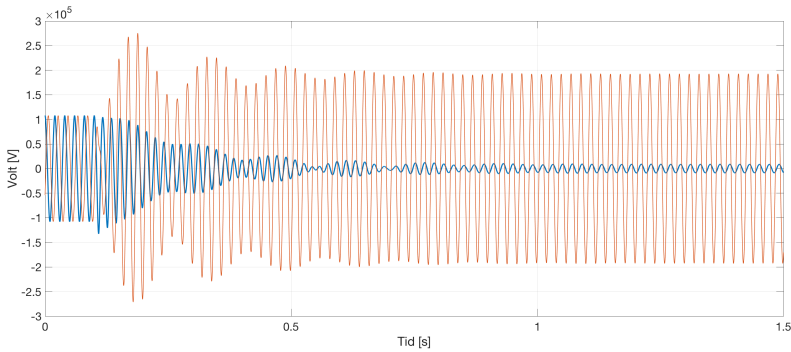
Figur 4.3: Spennning i Reg3.Bus3.

I figur 4.3 ser man amplituder på ca. 183 kV som da er en forhøyning av fase-jord

spenningen til linjespenningen.

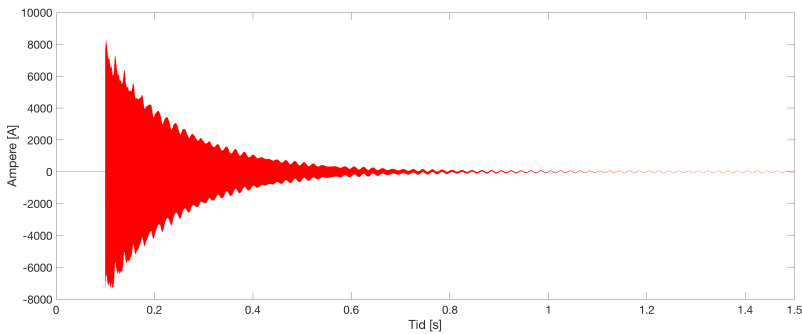
$$\frac{183kV}{130kV/\sqrt{3}} = 1.726 \approx \sqrt{3} \quad (4.1)$$

Når feilen påtrykkes på fase A i *Reg3.Bus3* vil den lokalt gå i null, men vil bli matet inn i andre steder i nettet. Det vil si at det vil være spenninger i fase A andre steder i nettet. Dette kan vises ved å se på den andre enden av nettet, i *Reg1.Bus1* der figur 4.4 viser dette hvor den blå grafen er fase A og den røde grafen er fase B.



Figur 4.4: Spenning i Reg1.Bus1.

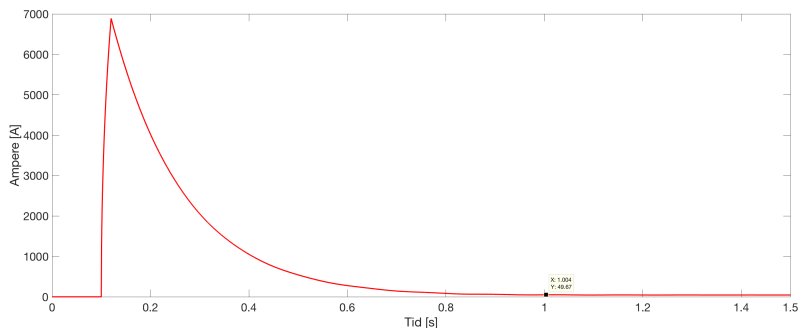
Feilstrømmen er i stedet vist i figur 4.5 og 4.6 der de er vist i respektivt som transient og som rms verdi. Med disse spoleverdien vil altså nettet sammensatt klare å begrense feilstrømmen i så stor grad at feilstrømmen blir kompensert ned til under 50 A.



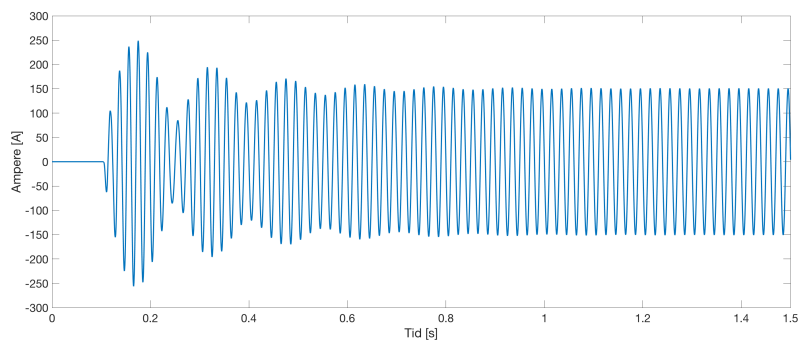
Figur 4.5: Spenning i Reg1.Bus1.

I figur 4.6 ser man på samme måte som i figur 3.7 at systemet klarer å kompensere ved riktig soleinnstilling. I tillegg kan man også legge merke til spolestrømmen gjennom autospolen ved å se på figur 4.7. Her kan man se transientene som i rms

verdi ville sett ut som en impulsrespons som demper seg inn. Dette er trolig grunnet varierende spenning i nullpunktet. Ser man på spenningen gjennom *Reg1.Bus1* i figur 4.4 ser man en lignende impulsrespons i fasespenningen.



Figur 4.6: Spenning i Reg1.Bus1.



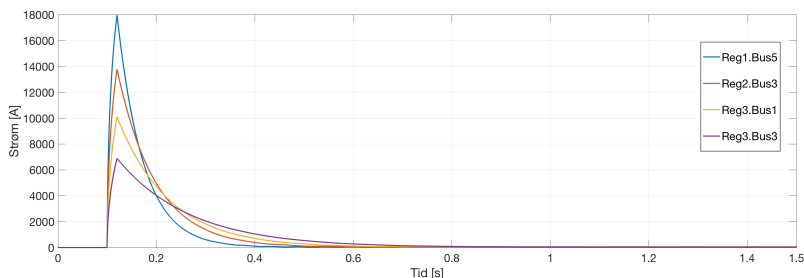
Figur 4.7: Strøm i autotrafo

4.1.3 Variasjon i lokasjon av feil

Med samme nettkonstruksjon skal det analyseres hvor vidt lokasjon av feilen er avgjørende for kompenseringen av feilstrømmen. Det skal testes i hver region for å se om det gjør utslag. Vi påfører feil i følgende busser:

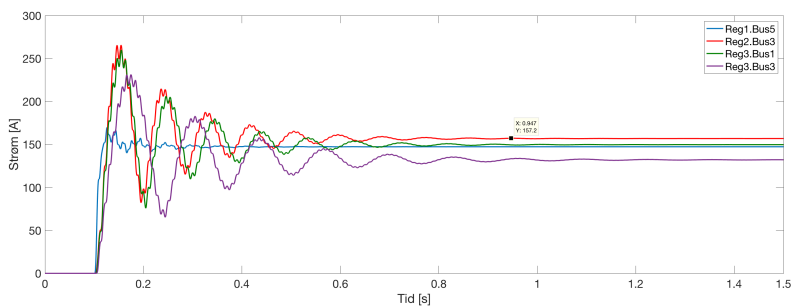
- Reg1.Bus5
- Reg2.Bus3
- Reg3.Bus1
- Reg3.Bus3

Ved å gjøre dette kan en se i figur 4.8 at strømmens kurve endrer seg. Det er tydelig at jo nærmere innmatingen av 420 kV at feilstrømmen blir både større i amplitude og raskere kompensering av strømmen. Jo lengre ut i nettet man kommer jo mindre amplitude får man og saktere kompensering. Mellom *Reg1.Bus5* og *Reg3.Bus3* skiller det nesten tre ganger så høy feilstrøm momentant etter at feilen skjer.



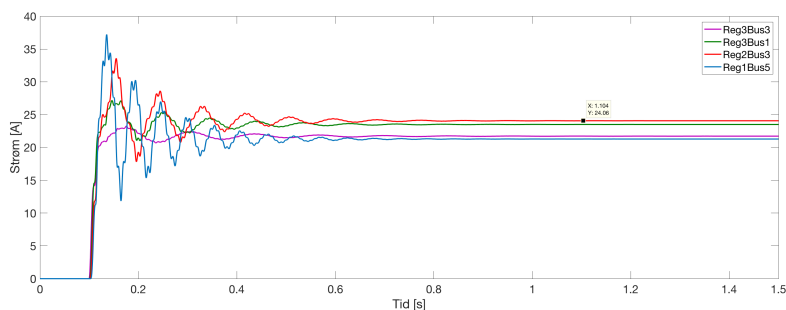
Figur 4.8: Feilstrøm basert på forskjellig lokasjon.

Siden feilstrømmens kurve varierer basert på lokasjon av feil er det interessant å se på RMS verdien til strømmene, både gjennom autospolen og spolen i *Reg3.Bus3*. I figur 4.9 ser man strømmen i RMS verdi gjennom autospolen som ligger i 420kV enden i *Reg1.Bus3* når feilen flyttes i de samme feilstedene som tidligere. Det er interessant å se at spolen varierer responsen basert på lokasjon. Den lyseblå grafen viser strømmen gjennom spolen når feilen er nærmest spolen. Her vil spolen raskt stille seg inn på en faste spoleytelse. Den vil heller ikke nå gitt spoleinnstilling, men noen ampere under. Ser man på den røde grafen, kan man se strømmen gjennom spolen når feilen er i *Reg2.Bus3*. Man ser at amplituden er høyest, men innsvingningen er ikke tregest. I tillegg legger også RMS verdien seg tilnærmet nøyaktig på spoleinnstillingen. Det kan tyde på at autospolen må bidra med full spoleytelse når feilen er påtrykt i *Reg2.Bus3*. Ser man på sammenhengen mellom lokasjonen av feilen i forhold til spolen kan man se at jo lengre unna feilen er, jo lengre tid tar det før spolestrømmen stabiliserer seg.



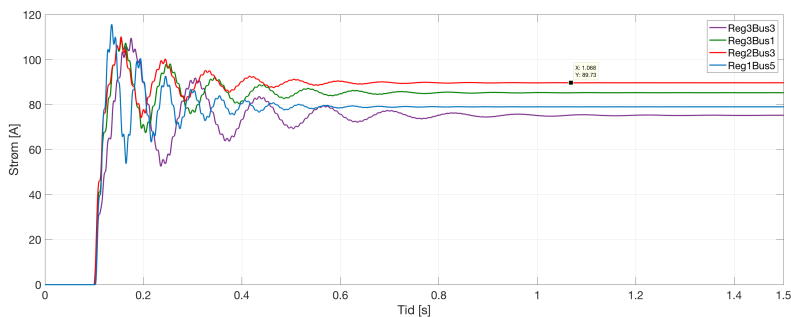
Figur 4.9: RMS verdi av strømmen gjennom autospolen basert på lokasjonen av feilen.

Videre sees det på hvordan spolen i andre enden av nettet, i *Reg3.Bus3* oppfører seg når man påtrykker feil i de forskjellige lokasjonene. Her observeres det ved å se på den lille grafen at når spolen er nært feilen vil maks amplitude være lavest. Man kan også se at innsvingningstiden er ganske lik for alle feilsituasjonene, men det er forskjell i bidrag. Det er interessant å observere at det største bidraget fra spolen i *Reg3.Bus3* er til feilen i region 2. Dette er det samme som for spolen i Region 1.



Figur 4.10: RMS verdi av strømmen gjennom spolen i *Reg3.Bus3* basert på lokasjonen av feilen.

For å se hvordan strømmen gjennom spolen i *Reg2.Bus3* oppfører seg i de ulike feilsituasjonene kan man se på figur 4.11. Her observeres også at bidraget er lavest til feilene i enden av nettet. I tillegg er det også her, høyest bidrag til feilen i region 2. Innsvingningstiden er også lengst for feilen i *Reg3.Bus3*. Det som skiller seg ut for denne spolen er impulsresponsen i feilen som er nærmest spolen. I figur 4.11 er amplituden nest størst i feilstedet.



Figur 4.11: RMS verdi av strømmen gjennom spolen i *Reg2.Bus3* basert på lokasjonen av feilen.

Korrelisjonen mellom grafene viser at spolen nærmest feilen vil ha en kort responstid i forhold til når feilen er lengst unna, hvor den vil ha lengst innsvingningstid. I tillegg bidrar spolene nærmest raskest. En annen observasjon er at feil i midten gir høyest spolestrømbidrag fra spolene i endene av nettet. Ser man på

figur 4.6 Ser man at når feilen er i region 1, får man høyest amplitude, og kjappest kompensering. Det tyder på at strømbidraget til spolene nærmest feilen kompenserer raskt med lav innsvingningstid. De resterende spolene i nettet får da lengre innsvingningstid, men i impulsresponsen får de høye amplituder, og på grunn av summen av størrelsen på kompenseringsstrømmen vil da feilstrømmen få et lavt maksimum. Siden størstedelen av spoleytelsen i nettet er i region 1 vil disse spolene ha lav momentan amplitude. Feilstrømmen vil da ha en høy amplitude og rask innsvingning.

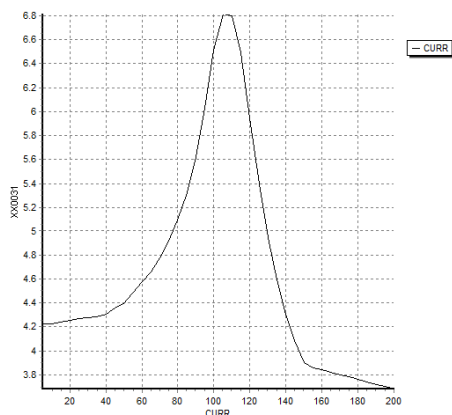
Ser man på når feilen er i *Reg3.Bus3* vil man se et lavt toppunkt og treg innsving. Dette kan tyde på at siden store deler av spoleytelsen ligger i region 1, som ligger lengst unna, vil disse spolestrømmene svinge på høy amplitude, som raskt vil komme opp i et stort spolebidrag momentant. Siden mesteparten av spoleytelsen ligger langt unna vil det også bruke lengre tid på innsvingningen før den er stabil. Dette fører til at feilstrømmen bruker lengre tid på å kompensere ned til et akseptabelt nivå.

4.2 Driftsituasjon 2

I denne driftsituasjonen skal det sees på hvordan nettet responderer til konduktivitet. Det settes inn en stor konduktiv last i alle regionene. Denne lasten er den samme lasten som blir vist i figur 3.6b. Spoleinnstillingene er den samme og feilene påtrykkes i de samme punktene. Driftsituasjonen er den samme som i tabell 4.1. Vi kjører resonanskurven og finner samme punkt i Optimizeren. Det som skal analyseres er om konduktansen påvirker feilstrømmen og spolestrømmen ved ulike feilsituasjoner.

4.2.1 Jevn konduktiv last

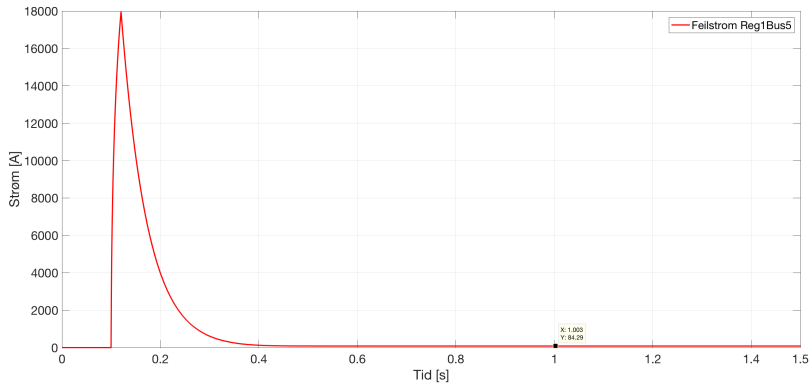
Ved å kjøre en jevn konduktiv last på 10000Ω i tre punkter representerer de konduktiviteten i hver region. Resonanskurven endrer seg når man påtrykker flere konduktive laster i motsetning til i 3.6b. I figur 4.12 er den nye resonanskurven illustrert. Man kan se at kurven har større maks punkt.



Figur 4.12: Resonanskurven for systemet med konduktans

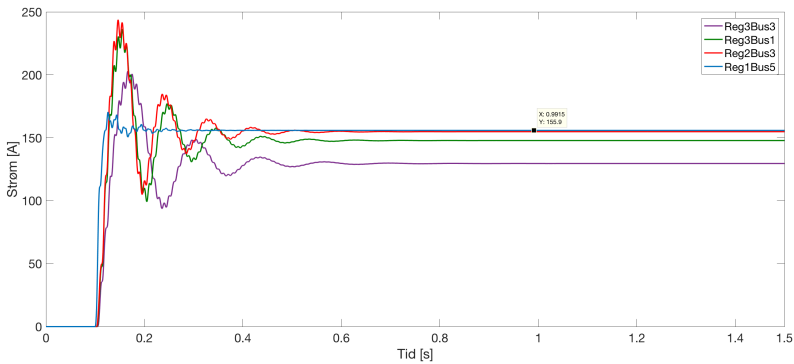
Videre kjøres det samme feiler som i forrige case. Ser vi på feilstrømmen i figur 4.13 kan en registrere en lik kurve som tidligere, men den stabile verdien på feilstrømmen har økt til 84.29 A. Dette er en økning på ca. 24 ampere. I dette tilfellet er det usikkerhet om det gir sikker slukking. Grunnen til at spolene i dette tilfellet ikke klarer å kompensere er på grunn av den reelle delen i feilstrømmen som øker med konduktansen. Ser man på likning 2.21 ser man at hvis man parallelkople flere resistanser, fører dette til en minking i resistans. Dette vil gjøre at konduktansen stiger, noe som igjen gjør at den reelle delen av viseren til strømmen øker. Dette øker absoluttverdien til den totale feilstrømmen.

Det stilles da spørsmål til hva som skjer med spolestrømmen under slike forhold. Ser man på figur 4.14 kan en se at strømmens transienter er ganske like, bortsett fra



Figur 4.13: Feilstrøm med jevn konduktans og feil i Reg1Bus5

at strømmene har kortere innsvingningstid. Siden induktansen ikke kan kompensere reelle reaktanser, vil den ikke klare å kompensere konduktansen. Den vil med andre ord kompensere for kapasitansen, men resistansen vil fortsatt være til stede. Resten av spolestrømmene kan finnes i appendikset.

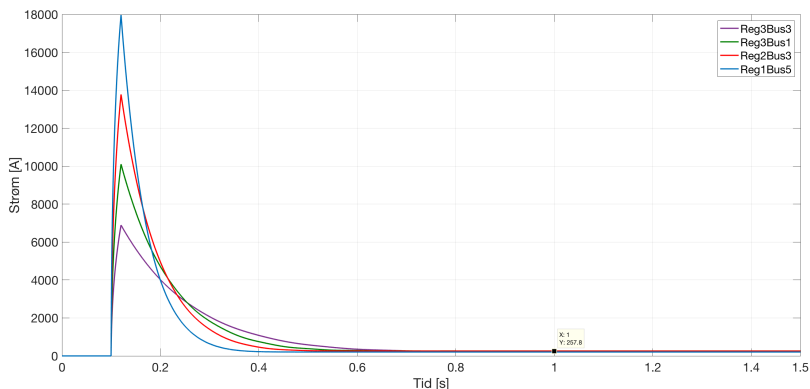


Figur 4.14: Strømmen gjennom spolen i Reg1.Bus5 stabiliserer seg raskere med konduktans tilkopleet.

4.2.2 Ujevn fordeling av konduktans

I Nordnettet er den geografiske topologien forskjellig. Noen steder har man innlandsklima, fjell og frodig jord. Andre plasser er det kystklima med mye berg. De forskjellige plassene har ulik konduktiv avledning. Dette gjør at man ikke kan anta jevn fordeling av konduktans. Dermed skal det analyseres ekstreme forskjeller. Det skal simuleres at ene delen av nettets konduktans blir større mens de andre

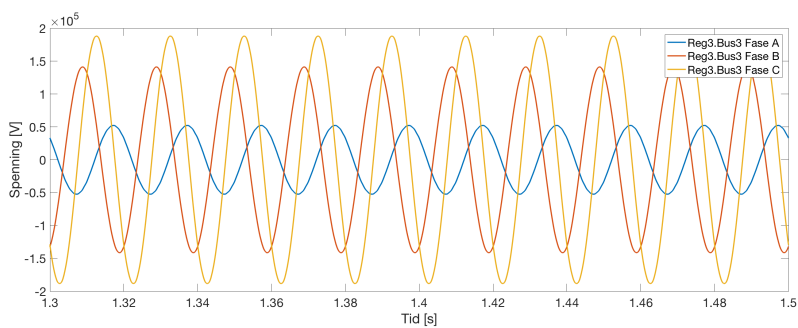
er stabil. Konduktansen i region 3 endres blir ti ganger høyere enn de andre, for å skape en tydelig endring.



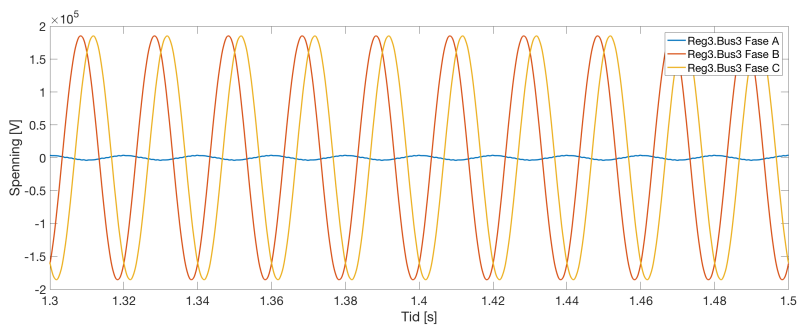
Figur 4.15: Feilstrømmen ved skjev konduktiv last.

Feilstrømmen påtrykkes de samme stedene som før. Ser man i figur 4.15 kan en se at feilstrømmen ikke kompenseres ned til ønsket verdi. Sammenligner man figur 4.15 med figur 4.6 ser man at det ikke er merkbar forskjell på hverken maks punkt eller kompenseringstid. I dette tilfelle vil systemet ha en stabil feilstrøm på 257 A som er kritisk høyt. Det skal presiseres at dette eksempelet er høyst urealistisk. Det er kun et eksempel for å illustrere hvordan konduktansens skjevfordeling påvirker strømmen.

Ser man på spenningen i andre enden av nettet når konduktansen inkluderes registreres det en interessant observasjon. I figur 4.16a kan en se at fasene på de friske fasene er skjeve. Spenningen på feilfasen har også økt i forhold til figur 4.16b som er samme feil bare uten konduktans. Det kan altså tyde på at konduktans bidrar på å høyne spenningen i feilfasen på bekostning av en av de friske fasene.



(a) Spenning med konduktans i Reg3.Bus3 ved feil i Reg1.Bus5.



(b) Spenning uten konduktans i Reg3.Bus3 ved feil i Reg1.Bus5.

Figur 4.16: Sammenlikning av spenningene i samme punkt med og uten konduktans involvert.

Kapittel 5

Diskusjon

Statnett bruker i dag PSSE fra Siemens som programvare for transiente analyser. Når statnett utfører analysr for feilstrømmen i Nordnettet opplever de problemer med alt for høy strøm. Datagrunnlaget for Nordnettet som brukes i PSSE er den samme som blir brukt i ATP modellen. Det eneste som er generert selv er spolene i ATP, som skal stilles inn for å møte ønsket driftsbilde.

5.1 Feilstrøm

Statnett sine beregninger i PSSE fører til for høye feilstrømmer ved enfaset jordfeil. Programvaren analyserer strømbidraget fra alle linjene inn til et punkt. PSSE er mye mer grundigere modellert enn ATP modellen, og er veldig nyttig for lastflyt, men virker ikke optimalt for spolejording. Statnett har som regel bare direktejordet nett der dette behovet ikke er nødvendig.

Ved enfaset jordfeil i Reg3.bus3 i PSSE regnes jordfeilstrømmen til 93.1 A. Muligheten for at spolene er feildimensjonert er til stede, men da skal denne strømmen være lik over hele nettet. Ved en feil i Reg3.Bus3 i PSSE regnes det ut at feilstrømmen er 184.8 A og i Reg2.Bus3 regnes det ut at feilstrømmen er 151.8 A. Altså ser man en forandring av feilstrømmen utover i nettet. Dette ser man ikke i ATP modellen presentert her. Uansett hvor feilen er lokalisert i nettet skal spolene kompensere strømmen til ønsket nivå. Hvorvidt det er datagrunnlaget eller beregningsmodellen som er feil, er vanskelig å si. Det er ikke tydelig hvem som har satt spoledataene i PSSE, og det er heller ikke mulighet å ta ut resonanskurven for analyse. Det ville være ønskelig å vite konkret hvor stor kompensering som trengs av autospolen, slik som i ATP modellen.

For å kunne analysere dette i PSSE trengs det en grundig sikker kvalitetssjekk av datainput. Det er høyst viktig at rett kapasitiv avledning er gitt og at man vet at spolene er riktig modellert slik at man kan regne ut riktige feilstrømmer. Da datagrunnlaget for Nordnettet ble gjennomgått ble det funnet feil i lengden

på noen linjestrekk. Det utgjorde over 10 A lade strøm noe som gjenspeiler seg i ATP modellen der den egentlige spoleytelsen til autotrafoen skulle vært innstilt på 166 A, i stedet for 157 A. Det betyr med andre ord at Statnett i utgangspunktet kan ha driftet med rund 60 A overkompensert hvis utregningen baserer seg på datagrunnlaget som er gitt. Dermed er det gunstig for Statnett å få en oversikt over resonanskurven for nettet sitt. Om dette er mulig kan man dobbeltsjekke med driftsdata at riktige innstillinger er satt.

I tillegg til dette er også oversikten over innstillingen av spolene uklart. Det regnes om til per unit og legges inn som en del av transformatoren. Det ideelle ville vært å sette en ønsket spoleytelse som kan kontrolleres for gitte driftsituasjoner. Det kan antas at programvaren som benyttes, PSSE, ikke er rustet for å behandle jordfeil i spolejordet regionalnett.

5.2 Spolebidrag

Ser man på feilstrømmen i figur 4.6 og sammenlikner med de ulike figurene for spolebidrag kan en se at spolens størrelse og plassering i forholdt til feilen er avgjørende for feilstrømmens kurve. Det viser seg at større spoler bruker lengre tid på å stabilisere spolebidraget for feil som er langt unna. I tillegg kan en se at feil som er i områder med små spoler, vil få lavere maksimum på feilstrømmen. Dette grunnet de høye amplitudene på impuls responsen fra store spoler, der spolene lengst unna gir høyt bidrag. Modellen klarer å kompensere ned feilstrømmen i alle feilstedene. I tillegg kan også transiente plotter og resonanskurve hentes ut. Spoleytelsen ser ut være tilstrekkelig for kompensering i alle deler av nettet.

Statnett må i dag bruke tid på å stille inn spolene til ønsket verdi til en hver tid. De må tune opp og ned, samt tilpasse reaktansverdiene for å få ønsket bidrag fra spolene. Dette er ikke nødvendig i ATP modellen, hvor man enkelt kan legge inn ønsket ytelse for å få korrekt modellerte petersons spoler. Når spolene først er innstilt som faste skal det ikke være nødvendig å endre reaktans. Da er det kun autospolen som skal tunes inn til ønsket verdi. Spørsmål må stilles om beregningsmetodikk i programvaren PSSE er korrekt.

5.3 Konduktans

Konduktans må taes med i betraktning av jordfeil. I modellen er det tydelig at konduktivet bidrar til å øke feilstrømmen. Det tyder på at jevn konduktans er det beste, men i et realistisk perspektiv er det forskjeller i konduktans på grunn av geografisk belligenhet. De verdiene som er brukt i modellen kan ikke begrunnes med å være realistiske, men brukt for å påpeke dens betydning. Ujevnheten øker feilstrømmen i modellen på grunn av parallellkoplinger mellom resistansene.

Størrelsen på konduktansen i nettet vil være avgjørende for om det er mulig å drifte et spolejordet nett. Det er umulig å kompensere den vekk. Det er også en avgjørende faktor at med større ekspansjon av nettet, så vil konduktansen øke. Nordnettet er relativt stort, slik at det kan være grunn til å analysere hvordan PSSE beregner dette.

Det virker også som at konduktansen bidrar til å heve spenningen i feilfasen, noe som gjør at ene fasen minker i spenning. Dette kan sees i figur 4.16. Spenningen i feilstedet er fortsatt null for fasen med feil, og spenningsheving som normalt, men i busser som ligger langt unna vil dette fenomenet oppstå. Når feiler kjøres i PSSE fremkommer også dette fenomenet.

Kapittel 6

Konklusjon

Det er presentert et teorigrunnlag om spolejording. Spolejording brukes for å redusere feilstrømmene ved en fase jordfeil. Dette gjør at nettet kan driftes med feil, og hvis det er overslag i luft, skal den selvslukke uten fysiske koplinger. Siden denne oppgaven er underlagt taushetsplikt etter energiloven §9-3 er det ikke presentert hverken stedsnavn eller sensitiv informasjon. Derfor er det laget anonymiserte navn for modellen. En plan ble laget for å kunne presentere dette på best mulig måte. Dermed får Statnett et eget vedlegg som presenterer hva de ulike stedsnavnene representerer.

6.1 Modellen

Store deler av arbeidet har gått i å kvalitetsjette linjedata og sette det inn i system. Det er grunnlaget for å kunne utvikle en modell som er så forenklet som det går uten å svekke egenskapene som skal analyseres. Modellen ble delt inn i tre regioner med flere seksjoner som representerer linjesegment. Det er modellert inn transformatorer som har brukt typiske verdier for reaktansene. Det er riktige konfigureringer med viklingene med hensyn på PSSE modellen. Spolene er koplet til nullpunktet og er dimensjonert ved bruk av variabler. Variablene er brukt som en forenkling til å kunne sette spoleinnstillingene og gjør det enkelt å endre dette. Det brukes en funksjon som heter MAX/MIN til å finne resonanskurven til modellen. Dette er en av de viktigste funksjonene i modellen. Den finner resonanspunktet til modellen både med bruk av faste spoler og med bruk av konduktans.

Modellen kan kjøre transiente grafiske analyser av både feilstrøm i spoler og feilsted. Feilstrømmen er blitt presenter for feil i alle regionene. På bakgrunn av disse feilene er det blitt sett på hvordan feilstrømmen oppfører seg. Det er også sett på spolenes egenskaper før og etter feil.

6.2 Resultat

Det første som ble laget og som er trukket med fra prosjektoppgaven er å få presentert resonanskurven for modellen. Den ble testet i et enkelt system, for så å bli ført videre til denne modellen. Det er en viktig del av modellen og opererer som den skal. Som vist i kapittel 3.5, vil resonanskurven endre seg ved ulik konduktans. Konduktansen fungerer som et dempingsledd på resonanskurven. Ut i fra denne kurven ble det brukt en optimizer funksjon til å finne nøyaktig resonanspunkt. I denne modellen ble det funnet et punkt på 157.026 A. Skulle det vært dimensjonert ut i fra Statnett sin informasjon hadde det vært 166 A. Grunnen til endringen kan være ene feilen som ble funnet under kvalitetsjekkingen i forberedelsen til modellen. Denne feilen alene er ca 10 A og vil da gi utslag på beregnet feilstrøm med hensyn på spoleinnstilling.

Modellen er tilpasset for å analysere feil i spolejordet nett. Den fungerer til sitt formål både med og uten konduktiv avledning. Selve designet gjør at man kan hente ut spolestrøm før og etter feil. Man kan se i figur 4.1 at det vil gå en liten strøm til jord før feil på grunn av konduktans og asymmetri. Dette bekrefter teorien presentert tidligere. Strømmen som går gjennom spolene er blitt illustrert. Det er observert at spolene bruker lengre tid på å stabilisere spolebidraget for feil langt unna. I tillegg vil den transiente responsen ha høy amplitude. Den høye amplituden er avgjørende for hvordan feilstrømmens utforming blir. Har man høyt spolebidrag i et område vil feilstrømmen i feil langt unna dette område få lavt maksimum på impulsresponsen. Til gjengjeld bruker også disse feilene lengre tid på å nå ønsket feilstrøm.

I alle situasjoner under normal drift, vil feilstrømmen i modellen kompensere strømmen ned til et ønsket nivå. Strømmene i spolene nærmest feilen vil ha minst svingninger og stabilisere seg raskest for å gi bidrag. Når feilen er i et område med høy spoleytelse vil feilen raskt bli kompensert ned til ønsket nivå. Dette er vist i figur 4.6. Størrelsene på spolene vil være avgjørende for hvilken kurve man ønsker på feilstrømmen. Det er ikke avgjørende med utformingen på kurven til feilstrømmen, da denne strømmen vil kompenseres ned i alle feilstedene i nettet.

En analyse av spenningene i nettet under feil er gjort. Det er vist at spenningen i feilstedet blir riktig i henhold til teorien. I feilstedet vil feilfasen ha null spenning mens de to friske fasene får en spenningsheving på $\sqrt{3}$. Ser man på ende til ende spenningen så vil feilfasen etablere en liten spenning, mens de to andre fasene fortsetter med en lik spenningsheving på ca. $\sqrt{3}$. Dette er vist i figur 4.16.

Spolebidragene til spolene nådde forventede verdier da de ble stabil. Det var ingen av spolene som overgikk innstillingen sin. Feilstrømmen nådde ønsket nivå på kompensering i alle feilsituasjonene. Spenningen i nettet nådde også forventet verdier med en økning på $\sqrt{3}$ i de friske fasene. Strømmen som går gjennom spolene i frisk tilstand før feil ble også funnet, og innfridde forventningene da disse var relativt veldig lave.

Relevante endringer var enkle å gjøre. Når modellen var underbygd godt med inndeling av seksjoner og regioner var det ikke noe problem å endre på konfigurasjonen i modellen. Dette ble gjort noen plasser for å inkludere flere nullpunkt og spoler. Noen spoler som var plasser nært hverandre geografisk, ble satt i parallell for å forenkle ytterligere.

6.3 Konduktans

Det ble endret driftsituasjon for å prøve å illustrere konduktansens funksjon i et spolejordet nett. Nettet størrelse er et vikt aspekt med tanke på konduktans. Med mer nett og utbygging øker konduktansen. Det er også et geografisk aspekt. Enkelte steder påvirker geografisk plassering konduktansen i nettet. Det er sett på hvordan konduktansen påvirker spolestrømmene. I figur 4.14 kan en se at konduktansen bidrar til at spolene reskere stabiliserer seg.

Det kan tyde på at konduktans bidrar med å øke feilstrømmen med en reel del i feilstrømmen. Det er absoluttverdien på den komplekse strømmen som avgjør hvor stor feilstrømmen blir. Spoleinnstillingen kan være korrekt, men med økt reell del vil det ikke være mulig å oppnå ønsket verdi på feilstrømmen. Dette er et fenomen som bør undersøkes videre.

Når konduktansen ble skjevfordelt ble det også en stor endring i feilstrømmen. Siden resistansen som utgjør konduktansen er en parallellkopling vil en endring i en del av nettet bidra å senke den totale resistansen, som igjen øker konduktansen. I dette tilfellet ble utslaget ved å senke ene regionens resistans med en tidel, veldig stort. Det skal understrekes at konduktansen i utgangspunktet var relativt stor. Allikevel er det et viktig aspekt når det kommer til utbygging og drift av et stort spolejordet nett.

Det ble også gjort observasjoner på ende til ende spenninger under denne driftsituasjonen. Det ble gjort funn av skjevfordelte faser der feilfasen fikk forhøyet spenningsnivå og den ene friske fasen fikk et minsket nivå. Disse observasjonene er også gjort i Statnetts modell. Det ville vært naturlig at Statnett å undersøker konduktiv avledning nøyere i PSSE.

6.4 PSSE

Statnett observerer feile beregningsverdier på jordfeilstrømmer. Det er uklart hvordan dette oppstår, men som vist i ATP modellen skal det være mulig å beregne korrekte verdier. Det er knyttet usikkerhet til måten Statnett modellerer spolene sine. Siden programvaren ikke tillater å utnytte resonanskurvens fordeler kan man ikke bekrefte om datagrunnlaget tilsvarer spoleinnstillingene satt i PSSE. Det virker også som at PSSE ikke får et jevnt resultat på jordfeilstrømmene i ulike lokasjoner av feilen. Dette er et sterkt tegn på at det trengs en utredning av pro-

gramvaren og hvordan spoleinnstillingene er satt.

Det skal være tilstrekkelig med spoleytelse i Nordnettet til å drifte det ved ønsket kompenseringstrøm. Nordnettet er et stort utbredt nett, med store forskjeller i klima noe som kan føre til at konduktansen må tas hensyn til. Om Statnett finner skjevfordeling av spenninger i ende til ende, kan dette være et tegn på konduktiv avledning. Det bør også gjennomgås data slik at man er sikker på at den kapasitive avledningen til jord er korrekt modellert. Det ble gjort funn av avvik i Statnetts datagrunnlag, noe som kan føre til feil i beregninger. Ved en implementering av muligheten for å ta ut resonanskurve i PSSE vil dette problemet forsvinne i simuleringer.

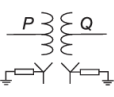
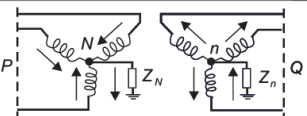
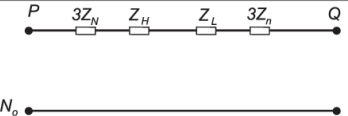
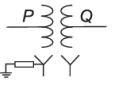
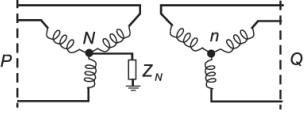
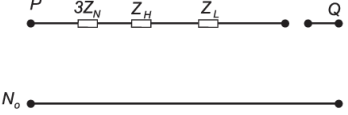
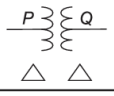
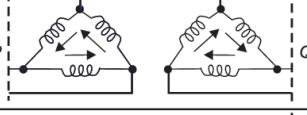
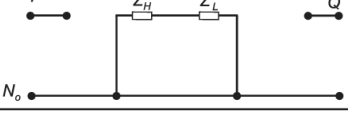
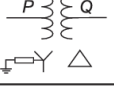
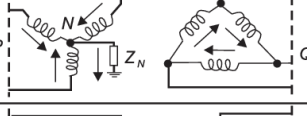
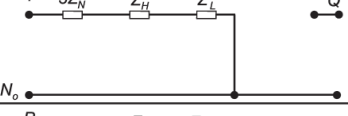
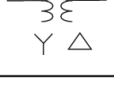
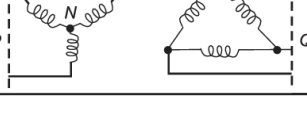
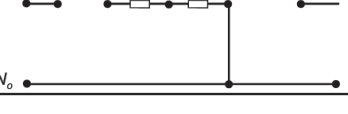
Bibliografi

- [circuitglobe(2019)] circuitglobe, 2019. Charging current in transmission line.
URL <https://circuitglobe.com/charging-current-in-transmission-line.html>
- [Electrical(2019)] Electrical, O., 2019. Symmetrical components.
URL https://wiki.openelectrical.org/index.php?title=Symmetrical_components
- [Flores(2009)] Flores, D., 2009. Handling of ground fault in distribution networks.
- [Fortescue(1918)] Fortescue, C. L., 1918. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. A. I. E. E. 34.
- [Gustavsen and Walseth(2002)] Gustavsen, B., Walseth, J., 2002. A case of abnormal overvoltages in a petersen grounded 132-kv system caused by broken conductor.
- [Jenssen(2019)] Jenssen, B. H., 2019. Nettutvikling, region nord.
- [Mayergoyz and Lawson(1997)] Mayergoyz, I. D., Lawson, W., 1997. Basic Electric Circuit Theory : A One-Semester Text. Academic Press.
URL <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=e230xwwAN=453890&site=>
- [Meng et al.(2018)] Meng, Weng, Tang, and Xu] Meng, J., Weng, W., Tang, X., Xu, X., 2018. Zero-sequence voltage trajectory analysis for unbalanced distribution networks on single-line-to-ground fault condition.
- [NPTEL(????)] NPTEL, ??? TRANSMISSION LINE MODELS.
URL <https://nptel.ac.in/courses/117104071/chap2.pdf>
- [Ram and Vishwakarma(1995)] Ram, B., Vishwakarma, D. N., 1995. Power System Protection and Switchgear.
- [Særen and Giset(2017)] Særen, M., Giset, M., 2017. Systemjording.
URL <https://www.nve.no/Media/6461/studentrapport-systemjording.pdf>
- [Von Meier(2006)] Von Meier, A., 2006. Electric Power Systems - A Conceptual Introduction. Wiley Interscience.
- [Wikipedia(2019)] Wikipedia, 2019. Electrical impedance.
URL https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_impedance

[Willheim and Waters.(1956)] Willheim, R., Waters., M., 1956. Neutral Grounding in High-voltage Transmission. New York: Elsevier.

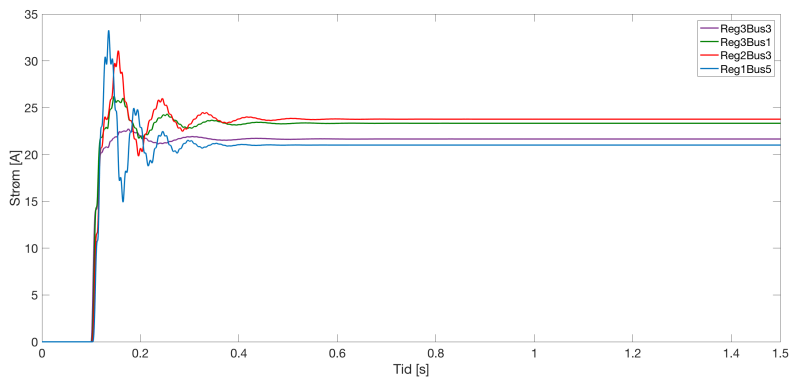
Appendiks

Transformatorkoplinger og nullsystem

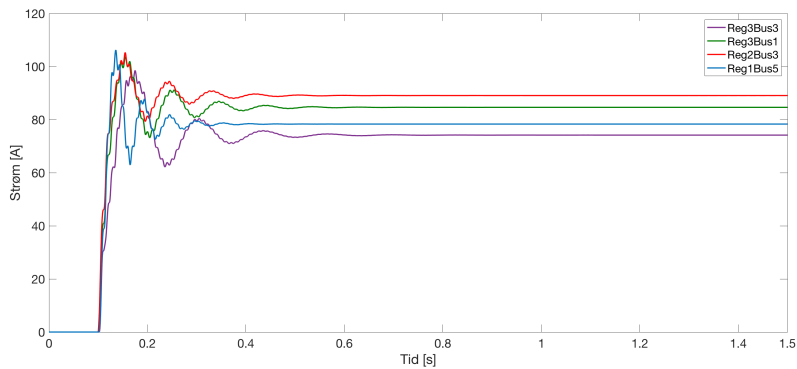
CASE	SYMBOLS	CONNECTION DIAGRAMS	ZERO-SEQUENCE EQUIVALENT CIRCUITS
1			
2			
3			
4			
5			

Figur 6.1: Ulike transformatorkonfigurasjoner

Spolestrømmer ved driftsituasjon 2



Figur 6.2: Feilstrøm med jevn konduktans i Reg3.Bus3



Figur 6.3: Feilstrøm med jevn konduktans i Reg2.Bus3

