



NORGES VASSDRAG- OG ENERGIDIREKTORAT

SOMMERPROSJEKT

# Systemjording

*Morten Særen, Martin Giset*

Veiledet av

Øivind Høivik, Håvard Hansen, Eirik Eggum

7. august 2017



## Forord


Systemjording er et tema som har blitt aktuelt i senere tid grunnet et vedtak fra DSB om at Sørnettet driftes forskriftstridig. Sommeren 2017 engasjerte Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) to studenter for å lage en rapport som omhandler systemjording. Prosjektet har vært et samarbeid mellom seksjon for Regulering av Netttjenester (ETN) i avdelingen for Elmarkedstilsyn (ET), Kraftsystemseksjonen (EK) i Energiavdelingen (E) og Beredskapsseksjonen (TBB) i avdelingen for Tilsyn og beredskap (TB).

Studentene som har jobbet med prosjektet er Morten Paulsen Særen og Martin Giset. Morten er student ved NTNU på studiet Energi og Miljø og Martin er student ved NMBU på studiet Miljøfysikk og Fornybar Energi.

Vi vil gjerne takke alle som har bidratt med hjelp med prosjektet i løpet av sommeren, både internt i NVE og eksternt.

Oslo 7. august 2017

Signatur:   
Morten Paulsen Særen.

Signatur:   
Martin Giset.

# Sammendrag

Det er hovedsakelig 4 forskjellige jordingssystemer som benyttes i dag:

- Spolejording
- Direktejording
- Isolert nett
- Lavohmig(Reaktiv)

I de fleste nettområdene i regionalnettet benyttes det spolejording eller isolert nett, men er også noen steder er lavohmig eller direkte jordet. Hvilken løsning som blir valgt avhenger mye av spenningsnivå og nettets utstrekning, men som det skal vises i denne rapporten er spørsmålet mer komplekst enn dette. Nettenes form og utstrekning varierer svært mye, og må vektlegges i systemjordingsspørsmålet.

Den hyppigste feilformen er enpolet jordfeil i form av overslag med påfølgende lysbue. Erfaringer fra Statnett og Hafslund tyder på at det gjelder cirka 70-80% av alle feil [1] [2]. Denne feilformen vil det bli viet mest oppmerksomhet til, da det også er her spolejording gjør seg gjeldende. Lysbueslukking er den største fordelen med spolejording. Det kan være driftsmessige utfordringer knyttet til spolejording. Det er knyttet lite problemer til drift av et lavohmig nett, men det er tiltak som kreves ved å drifte et lavohmig jordet nett. Det viktigste er at man overholder kravene beskrevet i Forskrifter om elektriske forsyningsanlegg med tanke på berøringsspenning og induserte spenninger i nærliggende telenett/svakstrømsnett.

Et isolert nett egner seg best for mindre nett med lav utstrekning. Når utstrekningen blir for stor, kan man gå over til spolejording. Det avhenger veldig av hvordan type tilgang man har på nullpunktet til transformatoren. Når spolekapasiteten ikke er tilstrekkelig god nok i forhold til ladestrømmer i nettet, må man gjøre endringer. Enten kan man installere flere spoler, endre jordingssystem eller dele opp nettet med et galvanisk skille. Å endre jordingssystem er en omfattende prosess. Det er mye å ta hensyn til og det er økonomisk kostbart. Som regel strekker regionalnettet seg over flere områdekonsesjonærer. Det kan da være svært utfordrende å komme frem til rett løsning i tillegg til å koordinere hvem som skal ta hvilken kostnad.

Totalt sett er nettet i Norge delt opp i mange ulike regionalnett med påførende mange områdekonsesjonærer. Det er viktig at man enkeltvis ser på egenskapene til hvert nett, siden hvert nett har forskjellige utfordringer både med tanke på geografisk beliggenhet, tekniske løsninger og driftsform. Endringer en områdekonsesjonær gjør i sin del av nettet kan få konsekvenser for en annen områdekonsesjonær i fremtiden.

# Innholdsfortegnelse

<b>Innholdsfortegnelse</b>	<b>4</b>
<b>Figurer</b>	<b>6</b>
<b>Tabeller</b>	<b>7</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>9</b>
<b>2 Grunnleggende elektroforståelse</b>	<b>10</b>
2.1 Transformator og trefasesystem . . . . .	10
2.2 Skritt- og berøringsspenninger . . . . .	12
2.3 Induktivitet og kapasitans . . . . .	12
<b>3 Jordingssystemer</b>	<b>16</b>
3.1 Isolert jording . . . . .	16
3.2 Direktejording . . . . .	17
3.3 Motstandsjording . . . . .	19
3.4 Spolejording . . . . .	20
3.4.1 Prinsipp for Petersenspole . . . . .	20
3.4.2 Spenningsheving på friske faser . . . . .	22
3.4.3 Delta-kobling og tilgang til nøytralpunkt . . . . .	22
3.4.4 Resonans . . . . .	23
3.5 Oppsummering av jordingssystemer . . . . .	27
<b>4 Spolekoordinering</b>	<b>29</b>
4.1 N-1-krav og delte nett fordrer flere spoler . . . . .	29
4.2 Jordfeildetektering ved selektiv utkobling . . . . .	30
<b>5 Induserte spenninger i nærliggende telenett</b>	<b>32</b>
5.1 Overføring av induert spenning i telenett . . . . .	32
5.2 Gjennomgående jord som tiltak for å redusere induserte spenninger . . . . .	33
<b>6 Økonomisk perspektiv</b>	<b>35</b>
6.1 Kostnader ved overgang til lavohmig jording . . . . .	35
6.1.1 Kostnader til vern av telenett . . . . .	35
6.1.2 Kostnader til reaktanser . . . . .	35
6.1.3 Kostnader til nytt relévern . . . . .	36
6.1.4 Kostnader til nye jordliner og bedre jording i stasjoner . . . . .	36
6.2 Nytt ved overgang til lavohmig jording . . . . .	37
6.2.1 Lavere energitap . . . . .	37
6.2.2 Reduserte fremtidige investeringskostnader . . . . .	38
6.2.3 Lavere skadekostnader . . . . .	38
6.2.4 Annen nytteverdi . . . . .	39
6.2.5 Annen Løsning . . . . .	39
6.3 Oppsummering . . . . .	39
<b>7 Systemjording i Norge og utlandet</b>	<b>40</b>
7.1 Sørnettet - Store utfordringer med spolejording . . . . .	40
7.2 BKK og indre Hardanger - Tidlig overgang til lavohmig jording . . . . .	41
7.3 Buskerud - Erfaringer fra underkompansert drift . . . . .	41
7.4 Hedmark og Oppland - Gode erfaringer med spolejording . . . . .	41
7.5 Møre og Romsdal - Utfordringer knyttet til momentanreserve i delt nett . . . . .	42
7.6 Nord-Trøndelag - Lite nett og god spolekoordinering . . . . .	42
7.7 Oslo, Akershus og Østfold - Konflikt med telenettet og mye erfaring med vern . . . . .	42
7.8 Sør-Rogaland - Utbygging med spoler mulig, men anbefales direktejording . . . . .	42
7.9 Sør-Trøndelag - Påvirkning på telenettet resulterer i spolejording . . . . .	42
7.10 Sunnhordland og Nord-Rogaland - Delte nett og isolerte kabelnett på 22 kV-nivå . . . . .	43
7.11 Vestfold og Telemark - skal utrede direktejording . . . . .	43

7.12 Andre land - Primært direkte og lavohmig jordet på spenninger > 30 kV . . . . .	43
<b>Vedlegg</b>	<b>44</b>
<b>A Modell av trefasesystemer med jording og feil</b>	<b>44</b>
A.1 Enpolet jordfeil . . . . .	44
A.1.1 Overspenninger fra enpolet jordfeil . . . . .	45
A.2 Dobbel jordfeil . . . . .	47
A.3 Topolet feil . . . . .	47
A.4 Topolet jordfeil . . . . .	48
<b>B Diagram til utregning av induisert spenning i nærliggende telenett</b>	<b>49</b>
<b>C Jordfeilvern</b>	<b>50</b>
C.1 Nullspenningsrelè . . . . .	50
C.2 Sumstrømsrelè . . . . .	51
C.3 Retningsbestemt relè . . . . .	51
C.4 Wischer relè . . . . .	52
<b>D Forskrifter</b>	<b>53</b>
D.1 Forskrift om elektriske forsyningsanlegg . . . . .	53
D.2 Forskrift om systemansvar . . . . .	54
D.3 Forskrift om Elsikkerhet i elektronisk kommunikasjonsnett . . . . .	56
<b>8 Bibliografi</b>	<b>57</b>

## Figurer

1	Illustrasjon av kirchoffs 1. lov . . . . .	11
2	Illustrasjon av kirchoffs 2. lov . . . . .	11
3	Kapazitiv strøm i tid . . . . .	12
4	Kapazitiv strøm i visere . . . . .	12
5	Induktiv strøm i tid . . . . .	12
6	Induktiv strøm i visere . . . . .	12
7	Resistiv strøm i tid . . . . .	13
8	Resistiv strøm i visere . . . . .	13
9	Ledende strøm . . . . .	13
10	Ledende strøm i visere . . . . .	13
11	Grunnleggende krets . . . . .	13
12	Tilfeller av N-1 . . . . .	14
13	Revolving av en linje . . . . .	14
14	Gjenteining av lysbue . . . . .	15
15	Kapasitiv og resistiv avledning i et isolert nett. . . . .	16
16	Økende kapasitiv avledning med nettutstrekning. . . . .	16
17	Enpolt feil i et isolert nett. . . . .	17
18	Kapitative feilstrøm ved enpolt jordfeil. . . . .	18
19	Feilstrømmer med motstand i nullpunkt ved enpolt jordfeil. . . . .	19
20	Forenklet enpolt jordfeil med spole. . . . .	20
21	Kompensering av kapasitiv feilstrøm . . . . .	21
22	Overføring av jordfeilstrømmer i delta- og stjernevikling. . . . .	23
23	Overføring av jordfeilstrømmer i stjerne-stjernevikling. . . . .	23
24	Kunstig nullpunkt gjennom zig-zag-trafo . . . . .	23
25	Linjediagram med ulike kapasitanser . . . . .	23
26	Idealisert resonanskurve . . . . .	24
27	Skjeve faser over en periode . . . . .	24
28	Skjeve faser i viserdiagram . . . . .	24
29	Illustrasjon hentet fra EFI-rapport [3] som oppsummerer egenskaper ved forskjellige former for systemjordning . . . . .	27
30	Nettsegment med enpolt jordfeil og med kombinasjon av spole- og direktejordet . . . . .	29
31	To spoler deler feilstrømmen . . . . .	29
32	Delenett med feil . . . . .	30
33	Forenklet modell av induert spenning fra faseline til teleline . . . . .	32
34	Illustrasjon av maske/radialnett og kilekostnader . . . . .	37
35	Et usymmetrisk system dekomponert i symmetriske komponenter.[4] . . . . .	44
36	Enpolt jordfeil i et generisk trefase-system. . . . .	45
37	Friskt trefasesystem før feil. . . . .	46
38	System med enfase jordfeil uten overgangsmotstand . . . . .	46
39	System med enfase jordfeil med overgangsmotstand . . . . .	46
40	Dobbel jordfeil . . . . .	46
41	Topolet feil . . . . .	47
42	Topolet jordfeil . . . . .	48
43	Diagram for bestemmelse av koplingsimpedans mellom kraft- og teleledning ved 50 Hz som funksjon av avstand mellom parallellførte ledere. Spesifikk jordmotstand er parameter. [5]	49
44	Nullfølgespenning målt med åpen deltavikling . . . . .	51
45	Skjematisk sumstrømsrele . . . . .	51
46	Utløseområde for et retningsbestemt vern i et isolert nett. . . . .	52
47	Utløseområde for et retningsbestemt vern i et spolekompensert nett. . . . .	52

## Tabeller

1	Begreper i elektronikken med tilhørende benevninger og enheter. . . . .	10
2	Spenningsnivåer i overføringsnettet . . . . .	10
3	Oversikt over resistiv, induktiv og kapazitiv strøm . . . . .	13
4	Fordeler og ulemper med isolert nett . . . . .	17
5	Fordeler og ulemper med direktejording . . . . .	19
6	Fordeler og ulemper med lavohmig jording . . . . .	20
7	Fordeler og ulemper med spolejording . . . . .	26
8	Fordeler og ulemper med hvert jordingssystem . . . . .	28
9	Oversikt over kostnad og nytte. . . . .	39



## Akronymer

$A_c$	Spolens tversnitt
$B$	Magnetisk felt
$C_j$	Total kapasitans mellom linje og jord.
$C_{fj}$	Kapasitans fase til jord
$e$	Indusert elektromotorisk spenning
$E$	Elektrisk felt
$f$	Frekvens
$FEF$	Forskrifter om elektriske forskyningsanlegg
$FOS$	Forskrifter om systemansvar
$GIK$	Gjeninnkopling (etter feil)
$H$	Magnetisk feltstyrke
$I_+$	Plussfølgestrømmen
$I_-$	Minusfølgestrømmen
$I_0$	Nullfølgestrømmen
$I_C$	Kapazitiv strøm
$I_n$	Nominell strøm
$I_W$	Resistiv strøm
$I_f$	Feilstrøm
$L$	Induktans
$KILE$	Kvalitetsjusterte inntektsrammer ved ikke levert energi
$l_{spol}$	Spolens lengde
$N$	Vindingsantall
$R_f$	En ren resistiv overgangsmotstand i feilstedet
$R_p$	Parallellmotstand til en Peterson spole
$U_0$	Nullfølgespenning
$U_f$	Fasespenning
$U_0$	Nøytralpunktspenning
$U_i$	Indusert spenning
$Z_+$	Plussfølgeimpedans
$Z_-$	Minusfølgeimpedans
$Z_0$	Nullfølgeimpedans
$Z_f$	Impedans over feilstedet
$Z_{fj}$	Impedans fra linje til jord
$\mu_0$	Magnetisk permabilitet i vakum
$\mu$	Magnetisk permabilitet
$\phi$	Magnetisk fluks
$\omega$	Vinkelhastighet
$Z_k$	Koplingsimpedanse
$r$	Reduksjonsfaktor

# 1 Innledning

Systemjording er ikke det samme som jording i tradisjonell forstand. *Jording* er ment å føre feilstrøm ned til jord, og dermed unngå at strømmen enten går gjennom mennesker eller utstyr som ikke tåler denne påkjenningen. Kortslutningen mot jord blir dermed kontrollert. Hensikten med *Systemjording* er å håndtere feilstrømmen på en forsvarlig måte med tanke på anlegg og mennesker. Dette gjøres enten ved å begrense feilstrømmen tilfredstillende ved feil, eller, i samspill med vernene, sørge for at feilen hvor feilstrømmen går blir raskt nok koplet ut. Rask utkobling oppnås ved høy feilstrøm.

Feil kan også føre til økt potensial i jordsmonnet og i anlegg, som igjen vil få konsekvenser for skritt – og berøringsspenning. Hvis feilstrømmen går under befolket område blir naturligvis HMS-hensyn enda mer presserende. I henhold til FEF §6-7 skal jordingsystemet holde berøringsspenningen på et forsvarlig nivå, også ved høye jordfeilstrømmer. Skrittspenningen kan være høyere enn berøringsspenningen, og sikkerhetskravet vil da være ivaretatt hvis krav til berøringsspenning er det [6]. En lysbue oppstår ved enpolt jordfeil og kan utgjøre en risiko for mennesker. Lysbuen i seg selv er dødelig, men sekundæreffekter som brann må også regnes som en potensiell fare. FEF §4-3 regulerer hvor lenge en slik lysbue er tillatt å brenne før hele nettet må legges mørkt for å få slukke den.

Grad av overspenninger og feilstrømmer er avhengig av jordingsmetode, type feil og karakteristikk av nettet. Dette kan være blant annet kapasitans mot jord, linjemotstand og korreksjonsfaktor. Overspenningen kan føre til fasefeil hvis anlegg og linjers isolasjon ikke er (over)dimensjonert for å tåle denne. Som nærmere vist i vedlegg A.1 gir slike feil gjerne så høy feilstrøm at vern må koble ut hele linjen for å unngå skader på linjer og anlegg. Dette kan komme i konflikt med *Forskrift om leveringskvalitet i kraftsystemet* [7]. Dette gjelder også mindre konsekvenser som og overharmonier.

Induserte spenninger i telenettet kan også være et sentralt element for valg av systemjording. Denne utfordringen kan møtes med tiltak i telenettet såvel som i kraftnettet. Fra FEF § 2-7 har man at det er anleggseiers ansvar å sørge for at de induserte spenningene fra kraftnettet til telenettet holder seg innenfor grenseverdiene beskrevet i *Forskrift om elsikkerhet i elektronisk kommunikasjonnett*, FOR § 8.

Systemjordingen skal begrense disse problemene, men må sees i sammenheng med verneplan og nettkonstruksjonen. Systemansvarlig er sentral i spørsmålet om systemjording. I *Forskrift om systemansvar*, FOS §19 står det at *Systemansvarlig kan fastsette hvilken løsning for jordstrømkompensering som skal benyttes i regional- og sentralnettet*. Videre har man fra FOS §12 at det er systemansvarlig som skal koordinere tiltak hvis utbedring av feil må gjøres av flere konsesjonærer.

## 2 Grunnleggende elektroforståelse

For å forstå prinsippet om jordingssystemer trengs det grunnleggende kunnskap om elektrisitetslære og elektriske forsyningsanlegg. I dette kapittelet blir det gått grovt gjennom det som er relevant for å dekke kunnskapshull.

Elektrisk spenning er det arbeidet som må utføres per ladningsenhet for å forskyve en ladning fra et punkt til et annet i et elektrostatiske felt[8]. Det betyr at hvis en ledning kobles mellom to punkter med forskjellig potensial, vil elektrisk ladning (elektronene) bevege seg for å utligne potensialet. Elektroner i bevegelse kalles en elektrisk strøm [9].

Begrep	Enhet	Benevning
Elektrisk spenning	[U]	Volt [V]
Elektrisk strøm	[I]	Amperè [A]
Elektrisk ladning	[Q]	Coulomb [C]

Tabell 1: Begreper i elektronikken med tilhørende benevninger og enheter.

Det norske overføringsnett er kategorisert inn i tre ulike spenningsnivåer

Overføringsnett	Spenningsnivå
Distribusjonsnett	230V - 22 kV
Regionalnett	33 kV - 132kV
Transmisjonsnett	132kV - 420kV

Tabell 2: Spenningsnivåer i overføringsnett

I distribusjonsnett kan netteieren bygge og drive innenfor rammene av en områdekonsesjon i sitt område, det vil si ikke søke for hver utvidelse. De har i oppgave å fordele forsyningen fra regionalnett til forbruker. Fra regionalnett transformeres spenningen fra transmisjonsnett til distribusjonsnett. Disse type nett eies av nettselskap og er regulert av staten. Transmisjonsnett er nettet som frakter energi over store avstander, kople det norske nettet til det utenlandske og hvor broparten av produksjon mates inn i. Dette nettet er eid og regulert av Statnett på konsesjon som systemansvarlig fra NVE. Det må søkes om konsesjon for endring eller utbygging av regionalnettene. Oppgraderinger som anses ivaretatt i gammel konsesjon trenger man ikke søke ny konsesjon om.

### 2.1 Transformator og trefasesystem

Overføringsnettene er galvanisk sammenkople. Det vil si at det fysisk kan gå elektroner i forskjellige nett. Transformatorene brukes både for å transformere spenningen fra generatorene i kraftverket opp til ønsket nivå, men også for å transformere mellom spenningsnivåer i overføringsnett.

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (1)$$

Her indikerer subskriptet 1, 2 henholdsvis den ene siden (primærsiden) og den andre siden (sekundærsiden) av transformatoren. N beskriver antall vindinger på respektive sider av transformatoren. Fra likning 1 kan man se hvordan man kan transformere opp (eller ned) spenninger ved å ha forskjellig vindingsantall på hver side av transformatoren.

$$I_1 N_1 = I_2 N_2 \quad (2)$$

Likning 2 beskriver amper-vindingsbalansen. Amper-vinding er produktet på hver side av transformatoren,  $IN$ . At dette må være likt på begge sider av transformatoren er blant annet relevant for transformatorkonfigurasjoner i spolejordnet nett.

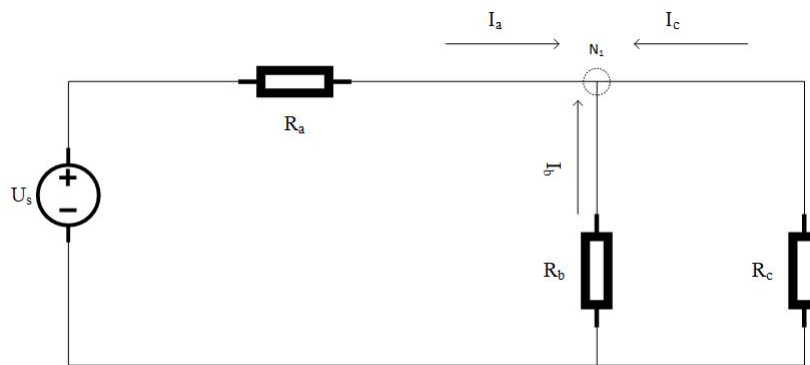
En transformator transformerer spenningen ved hjelp av elektromagnetisk induksjon. Induksjon er når magnetfeltet fra en strømførende leder setter opp en strøm i en annen nærliggende leder. Det betyr at det ikke er en fysisk tilkøpling mellom to spenningsnivå, og det kan sies at sidene av transformatoren er *galvanisk skilt*. Dette er relevant for systemjording da jordfeilstømmen ikke kan forplante seg over det galvaniske skillet.

Overføringsnettene bærer en trefaset vekselstrøm. Det betyr at systemet har tre *faseledere*. En *faseleder* er en av tre ledere som utgjør en *linje*. En *linje* i regionalnettet har tre faser som går sammen fra en transformator til en annen. Spenningene og strømmen på fasene er forskjøvet med  $120^\circ$  i forhold til hverandre. I et perfekt balansert trefase system der fasene ligger akkurat  $120^\circ$  i forhold til hverandre, er strømmen i en vilkårlig fase eksakt lik i størrelse, men i motsatt retning som summen av strømmen i de andre to fasene.[10] Dette følger av Kirchoffs 1. lov som sier at i et forgreningspunkt i en elektrisk krets er summen av de strømmene som flyter til punktet lik summen av de strømmene som flyter fra punktet.[11]

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (3)$$

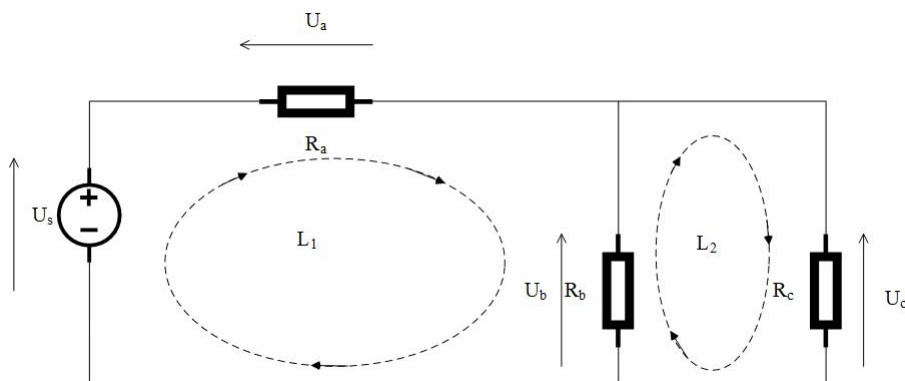
og følgelig at

$$-I_a = I_b + I_c \quad (4)$$



Figur 1: Illustrasjon av kirchoffs 1. lov

Kirchoffs 1. lov reflekterer at alle elektroner som kommer inn i en node (et kryss), også må komme ut igjen. Når fra utregning en av strømmene får negativt fortegn, indikerer det at strømmen i realiteten går motsatt vei av hva pilen peker. I figur 1, som illustrerer en likestrømskrets med tre resistorer, vil man måle  $I_a$  positiv og  $I_b, I_c$  negativ. Dette er fordi strømmen i en resitiv likespenningskrets flyter fra plus til minus.



Figur 2: Illustrasjon av kirchoffs 2. lov

Kirchoffs 2. lov sier at summen av alle spenninger i enhver lukket strømsløyfe er lik null. Strømsløyfe er i figur 2 beskrevet ved  $L_1$  og  $L_2$ . Retningene av spenningsdifferanse, her illustrert med pilretningen

som går fra lav til høy spenning, bestemmer fortegnene i likningen nedenfor.

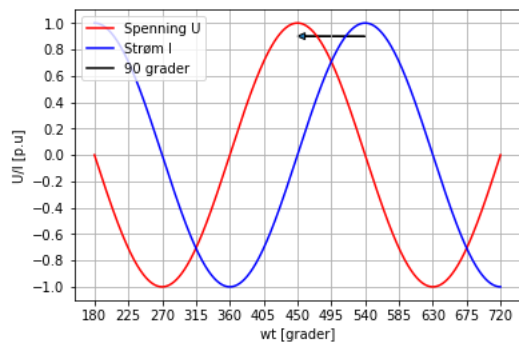
$$\begin{aligned} L_1 : \quad U_s - U_a + U_b &= 0 \\ L_2 : \quad U_b - U_a &= 0 \end{aligned} \tag{5}$$

## 2.2 Skritt- og berøringsspenninger

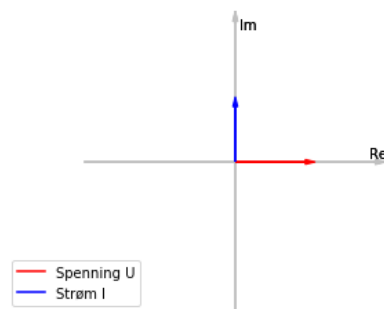
Når det skjer en feil i nettet, kan det oppstå strømmer og spenninger som er farlig for mennesker. Fra FEF §1-5 er berøringsspenningen definert som *en del av potensialstigning ved jordfeil som kan påvirke en person ved at strømmen går gjennom kroppen fra hånd til fot (horisontal avstand en meter fra utsatt del)*. Potensialstigningen er det samme som spenningsstigningen. Jo nærmere man kommer en utsatt del, for eksempel et jordingspyd, vil spenningen øke. Dermed vil det være en spenningsforskjell mellom føttene når disse har forskjellig avstand fra jordingspydet og denne potensialforskjellen utgjør *skrittspenningen*.

## 2.3 Induktivitet og kapasitans

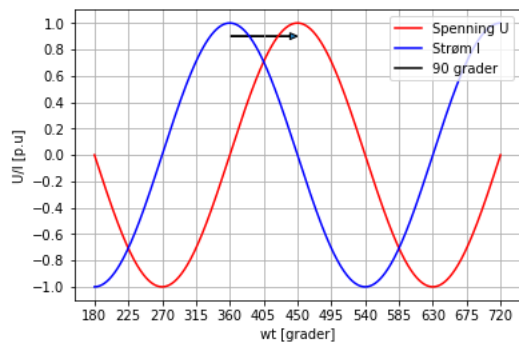
Som vist i figurene 3, 7 og 5 er både vekselstrøm og spenning sinusbølger. Hvorvidt strømmen er induktiv eller kapasitiv bestemmes av hvorvidt samme punkt (for eksempel topp-punktet) på strømbølgen ligger foran eller etter spenningen i tid. Forholdet beskrives ofte i grader, hvor topp til topp på signalet tilsvarer 360 grader.



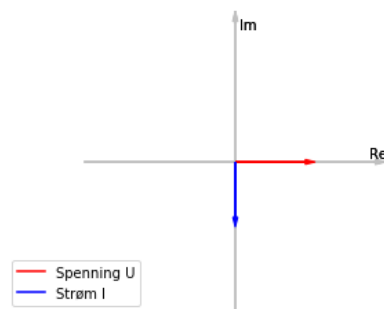
Figur 3: Kapsitiv strøm i tid



Figur 4: Kapsitiv strøm i visere

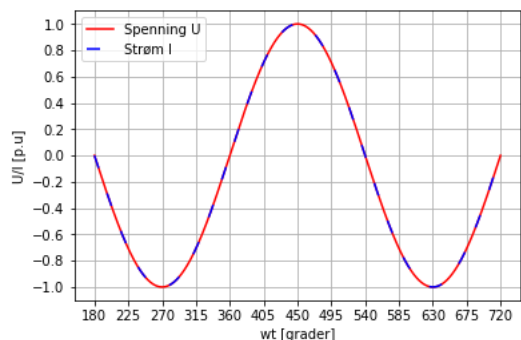


Figur 5: Induktiv strøm i tid

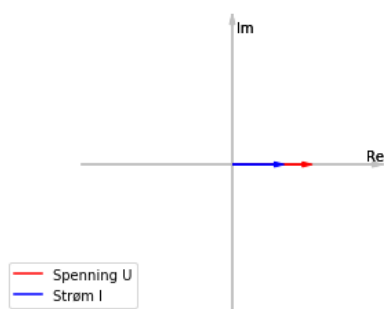


Figur 6: Induktiv strøm i visere

I viserdiagram som figur 4 og 6 er verdiene beskrevet utifra sine reelle og imaginære komponent på henholdsvis x og y-aksen. En forståelse av viserdiagrammer og imaginære tall er ikke nødvendig for å lese rapporten, men flere av formlene og diagrammene kan bli vanskelig å tolke uten denne kunnskapen. Dette kan også vises i et viserdiagram hvor y-aksen beskriver induktivitet og kapasitivitet. På den positive delen av y-aksen er kapasitiv strøm og på den negative induktiv, gitt at spenningen er definert langs x-aksen. Hvis strømmen ligger akkurat likt som spenningen kalles den resitiv.



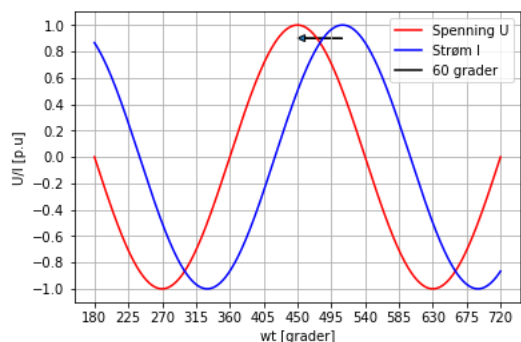
Figur 7: Resistiv strøm i tid



Figur 8: Resistiv strøm i visere

Fra figur 4 og 5 kan det forstås hvorfor kapasitiv strøm beskrives som å lede spenningen  $90^\circ$  og induktiv ligge etter spenningen med  $90^\circ$  siden visere roterer mot klokken.

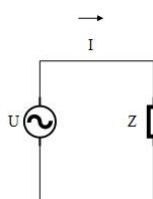
Som regel ligger ikke strømmen akkurat  $90^\circ$  bak eller foran spenningen. Da beskrives den ofte gjennom sine induktive/kapasitive og resistive komponenter. Eventuelt kan den beskrives gjennom sin fasevinkel, som i figur 10 er seksti grader. Det sies da at strømmen er den *vektorielle summen* av sin kapasitive og reestive komponent.



Figur 9: Ledende strøm



Figur 10: Ledende strøm i visere



Figur 11: Grunnleggende krets

Forskjellige impedanser (resistor, kapasitans, spole) vil gi henholdvis reestiv, kapasitiv og induktiv strøm hvis dette er eneste impedans spenningskilden står over, vist i figur 11. Z beskriver her impedansen som settes inn. Hvis impedansen består av en kombinasjon av disse vil man avhengig av koplingen og komponentenes størrelse få en strøm av samme art som beskrevet i 10 og 9.

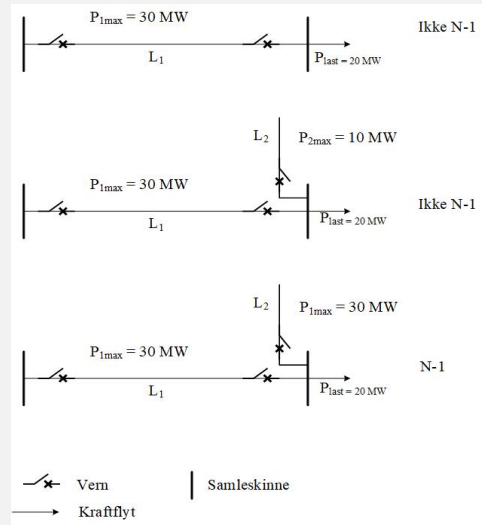
Strøm	Vinkel ifht. spenning $[\circ]$	Assosiert komponent
Resistiv	0	Resistor
Induktiv	-90	Spole
kapasitiv	90	Kondensator

Tabell 3: Oversikt over resistiv, induktiv og kapasitiv strøm

## N-1

N-1 (les *N minus en*) er et prinsipp som veldig ofte benyttes for å sikre et robust nok koplingsbilde. Det innebærer at én komponent i nettet kan falle ut, og nettet fungerer likefullt tilfredstillende med tanke på blant annet levering av kraft til forbruker. Transformatorer, linjer og bryterfelt er eksempler på hva som regnes som komponenter i denne sammenhengen. I dette eksempelet er linjer brukt.

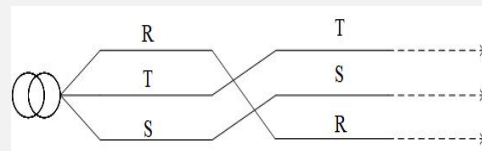
Det øverste koplingsbildet tilfredstiller ikke N-1 fordi lasten  $P_{last}$  ikke kan leveres hvis linjen  $L_1$  faller ut. Det midterste oppfyller ikke N-1 fordi  $L_2$  ikke kan levere  $P_{last}$  hvis  $L_1$  faller ut på grunn av effektgrensen på linjen. I det nederste eksempelet kan derimot hele  $P_{last}$  forsynes fra  $L_2$  hvis  $L_1$  faller ut. Dermed kan man utbedre feilen på  $L_1$  uten at dette fører til avbrudd for kunden.



Figur 12: Tilfeller av N-1

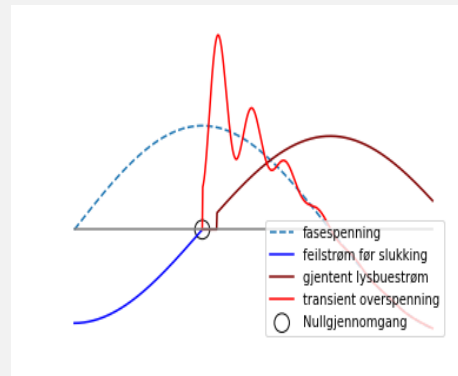
## Revolvering av linjer

Revolvering av linjer innebærer å variere hvordan de forskjellige faselinene henger relativt til hverandre over lengre avstander. Dette gjøres for å gjøre fasene symmetriske i eksempelvis induktiv kopling seg imellom og kapasitans mot jord. Terrenget kan vanskeliggjøre revolvering. Selv med en god revolveringsplan vil man aldri oppnå perfekt symmetri. Eksempler på revolveringsplaner er å finne i KSUene



Figur 13: Revolvering av en linje

Spenninger over tiltenkt nivå og medførende feltstyrke kan føre til dielektrisk sammenbrudd i luften mellom line og jord. Luften vil ioniseres og lede en feilstrøm. Under et visst strømnivå vil den oppståtte lysbuen slukke seg selv nær, eller ved nullgjennomgangen for strømmen. Hvorvidt denne tennes igjen avhenger sterkt av fasevinkelen og med det spenningen ved nullstrømgjennomgang. Dermed er kapasitive strømmer, som man har ved enpolet jordfeil, spesielt vanskelig å hindre fra gjentening. Slukkestrømmen for en lysbue er videre bestemt av lysbuens lengde, klimatiske egenskaper som fuktighet og vindstyrke, og spenningsnivå. Erfaringer Statnett har gjort i Sørnettet viser at slukkestrømmen har vært 10-15 A og 80A i henholdsvis 11/22kV/-nettet og 132kV-nettet[12], mens man i Sør-Rogaland fant en grense på 60A[13]. Den faktiske slukkestrømmen vil altså variere fra nett til nett. I figuren er det illustrert hvordan strømmen kan slukkes i nullgjennomgang til tross for maksimal spenning over feilstedet. Transiente overspenninger fra slukking av lysbuen kan føre til gjentening. Gjentening kan selvsagt også inntreffe uten store transienter eller ren kapasitiv strøm så lenge lysbuen ikke rekker å av-ionisere seg før spenningen igjen kommer opp på et høyt nivå etter strømmens nullgjennomgang.



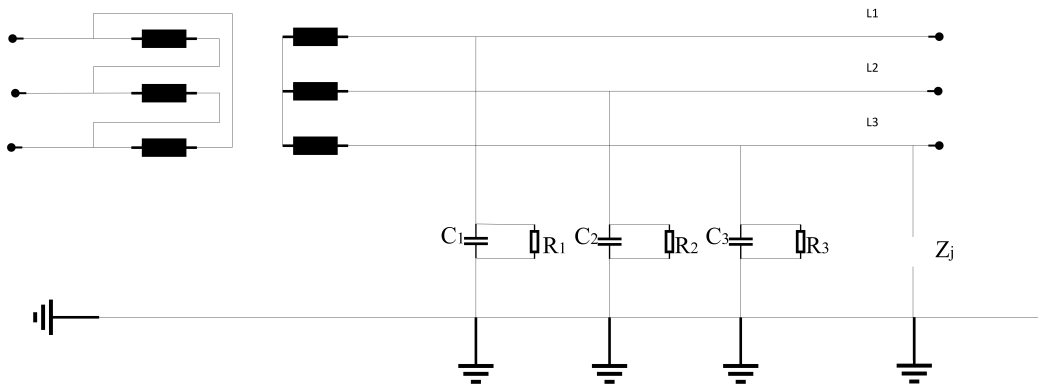
Figur 14: Gjentening av lysbue



### 3 Jordingsystemer

#### 3.1 Isolert jording

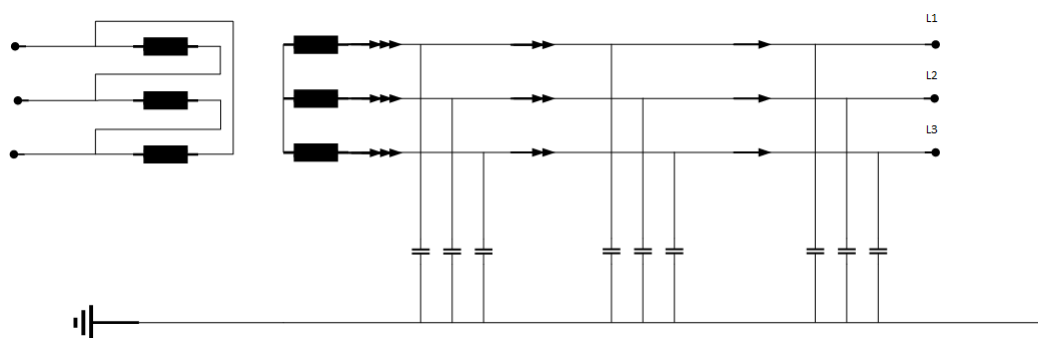
I et isolert nett er det ikke noen fysisk kobling til jord i nullpunktet. Det vil fortsatt være en kapasitiv avledning mellom fasene og jord. En kapasitiv avledning er i prinsippet at potensialforskjellen mellom fase og jord lader opp energi som en kondensator. Ved en jordslutning vil denne energien lades ut gjennom jordforbindelsen. Dette kan skape store feilstrømmer og er den vanskeligste strømmen å håndtere.



Figur 15: Kapasativ og resisitiv avledning i et isolert nett.

$C_x$  er i denne figur 15 kapasitans mellom fase og jord. Denne variabelen er avhengig av hvilken ledningstype som benyttes. Den er også avhengig av både utstrekningen på nettet og linjedimensjoner. I trefase kraftsystemer oppgis denne variabelen som regel i ampère, slik at et eksempel kan et 132 kV nett kan en luftledning ha en kapasitiv avledning på 0,7 A/km.

$R_x$  er her resistans fase og jord. På luftlinjer kommer denne fra lekkstrømmer i isolatorene. Den vil variere i verdi, men typisk verdi er 2-7 % av den kapasitive avledningen [13]. Her er det flere faktorer som kan spille en rolle, som for eksempel været og forurensning på isolatorene. Ved feil, vil det være en resistiv avledning, men den vil i isolerte nett bli neglisjerbar i forhold til den kapasitive. I et isolert luftnett er det utstrekningen på nettet som avgjør hvor stor feilstrømmen blir. Se figur 16. I nett hvor feilstrømmen ikke blir for stor og kan detekteres, er det vanlig at denne jordingsmetoden brukes.



Figur 16: Økende kapasitiv avledning med nettutstrekning.

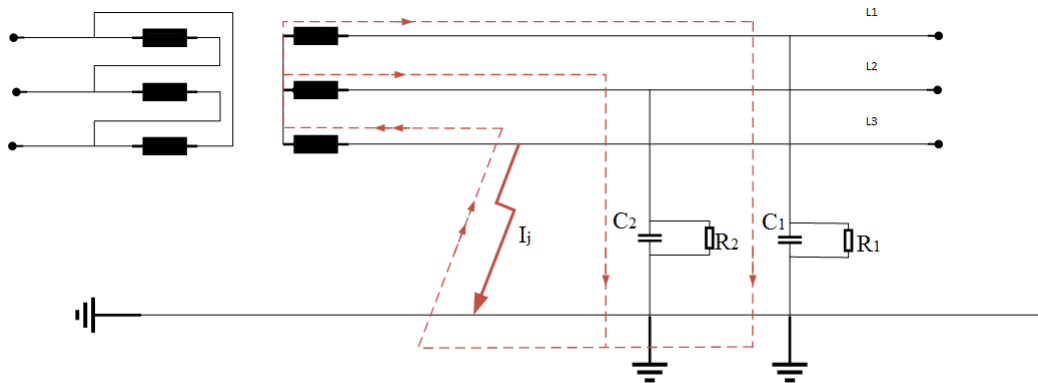
Ved en jordslutning på en fase vil den syke fasen bli ladet ut. Det vil si at den kapasitive avledningen vil kortslutte, slik at fasen blir låst til jord. Se figur 17. Spenningen i transformatorens nullpunkt, som normalt er null, vil da øke til fase-jord spenningen i fasen med jordfeilen (den syke fasen). I de friske fasene vil fase-jord spenningen øke til linjespenningen. Derfor er det viktig at komponenter i et isolert nett er dimensjonert for å tåle denne spenningen. Ved en stående lysbue må automatiske vern kople ut

fasene i henhold til FEF §4-3. Formelen for feilstrømmen i et isolert nett er gitt ved:

$$I_f = \frac{3U_f}{Z_j} = \frac{3U_f}{\frac{1}{j\omega C_j}} = 3U_f j\omega C_j \quad (6)$$

Her er  $I_f$  feilstrømmen,  $U_f$  fase-jord spenningen i et friskt nett,  $Z_j$  er impedansen mot jord,  $j$  indikerer imaginær verdi,  $\omega$  er nettets vinkelfrekvens og  $C_j$  er fasen kapasitans mot jord.

Jordfeilstrømmen øker med den kapasitive avledningen, som øker med utstrekningen på nettet. Derfor er det som regel ikke hensiktsmessig å bruke isolert nett som jordingsystem i regionalnett, der både spenning og utstrekning er relativt stor A.1.



Figur 17: Enpolt feil i et isolert nett.

JORDINGSSYSTEM	FORDEL	ULEMPE
ISOLERT NETT	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kan driftes med stående jordfeil</li> <li>• Det forekommer ikke spenningsdip</li> <li>• Små feilstrømmer gir ingen fare for induserte spenninger i nærførte telenett</li> <li>• Godt egnet til rene kabelnett</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transiente feilstrømmer</li> <li>• Temporære overspenninger</li> <li>• Tungvint feillokalisering</li> <li>• Fare for doble jordfeil</li> <li>• Feilstrømmen øker proporsjonalt med nettutstrekningen</li> <li>• Økt krav til isolasjon</li> <li>• Kun egnet for mindre nett</li> </ul>

Tabell 4: Fordeler og ulemper med isolert nett

### 3.2 Direktejording

I et direktejordnet nett vil alle godkjente nullpunkter jordes. Her vil det jordes direkte fra trafoens nullpunkt og ned i jord. I Norge praktiseres denne formen foreløpig hovedsaklig på transmisjonsnett, altså 300 kV og 400 kV (noen steder også 132kV). Ved en enfaset jordfeil vil jordfeilstrømmen bli stor, noe som gjør at vern slår ut raskt. Selv med GIK vil dette utgjøre betydelige KILE-kostnader hvis det er en radialavgang. I et masket nett, hvor kriteriet for momentanreserve er oppfylt, vil kunden bli forsynt av annen, feilfri avgang og denne ulempen forsvinner.

Når den ene fasen har en jordfeil, vil det ikke påvirke spenningen på de resterende feilfrie fasene. Dette betyr at man vil kunne bruke et lavere isolasjonsnivå på linjen enn man bruker i nett hvor det vil være spenningsøkning på de friske fasene. Det vil også være liten sannsynlighet for doble jordfeil. Selv om de

resterende fasene er friske vil man fortsatt få et spenningsdipp som kan forplanter seg ned til forbruker-nivå. I figur 15 kan en se hvordan jordingen er lagt mellom transformatorens nullpunkt og jord.

Hvor stor feilstrømmen blir er avhengig av impedansen mot jord. Det er enkelt henviset til Ohms lov

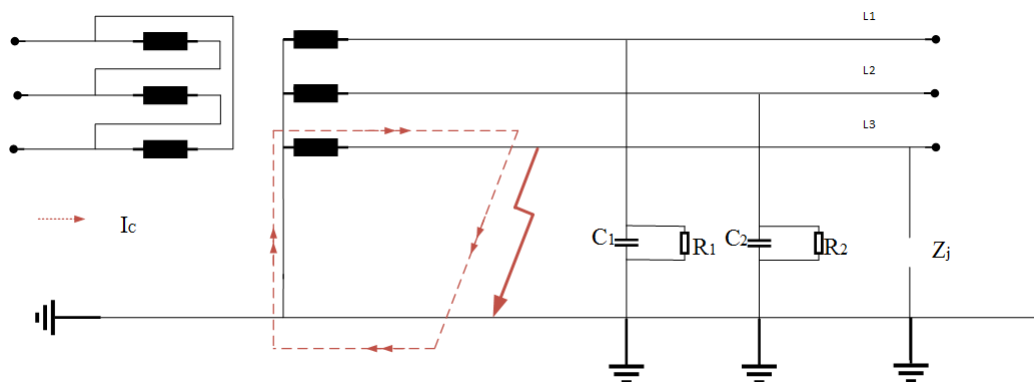
$$U = R \cdot I \quad (7)$$

Hvor  $U$  er spenningen,  $R$  er motstand og  $I$  er strømmen. En impedans er en motstand som kan inneholde både resistiv, kapasitativ og induktiv komponent. Den totale impedansen  $Z_j$ , mellom fase og jord, vil være summen av enkeltimpedansene i nettet:

$$\frac{1}{Z_j} = \left( \frac{1}{R_1} + j\omega C_1 \right) + \left( \frac{1}{R_2} + j\omega C_2 \right) + \left( \frac{1}{R_3} + j\omega C_3 \right) \quad (8)$$

Ved en jordfeil vil da denne impedansen bli parallellkoplet med impedansen mot jord i feilstedet. I figur 18 er det illustrert en jordfeil på L3. Da vil kapasitansen i L3, altså  $C_3$ , lades ut og føres tilbake mot nullpunktet. Dette er en ren kortslutning og man må kople L3, eller hele linja ut. Ved store jordfeilstrømmer vil vern slå ut hurtig. Det sikrer komponentene fra å havarere og det gir sikker og pålitelig utkobling. Gjennomgående jording, nærmere beskrevet i kapittel 5, vil være relevant for direktejording på grunn av to forhold:

- Når jordfeilstrømmen er stor er det viktigere å kontrollere dennes returvei for å unngå risiko for mennesker og utstyr
- Garantere stor nok feilstrøm. I tilfelle jordslutning gjennom en høyohmig retur som en tremast er ikke utkobling av vern garantert.



Figur 18: Kapasitive feilstrøm ved enpolt jordfeil.

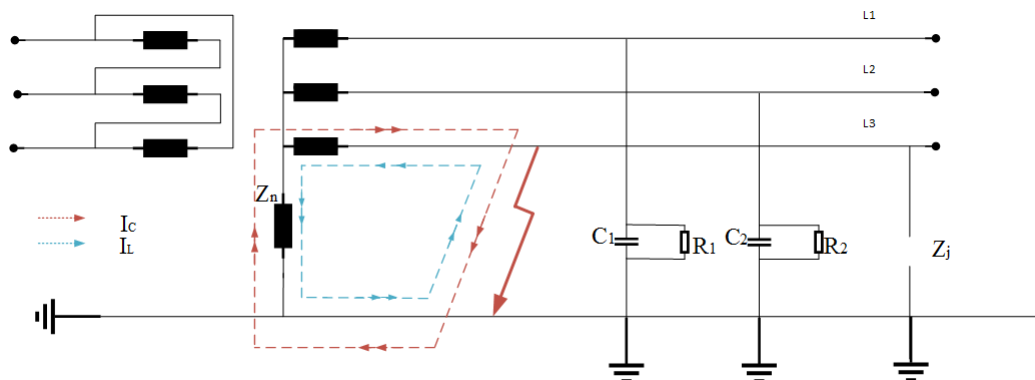
Disse jordfeilstrømmene kan bli så store at de ikke oppfyller forskrifter om industert spenning i nærliggende telenett (FEF § 2-7, FOR § 8) og forskrifter om berøringsspenning (FEF §2-7). Dette utdypes videre i kapittel 5. For å redusere jordfeilstrømmen ved et slikt tilfelle kan man velge å ikke jorde enkelte transformator-nullpunkter.

JORDINGSSYSTEM	FORDEL	ULEMPE
DIREKTE JORDING	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Selektiv utkopling</li> <li>• lave transiente jordstrømmer</li> <li>• Ingen temporære overspenninger</li> <li>• Ingen spenningsstigning og man kan bruke lavere isolasjonsnivå</li> <li>• Liten sannsynlighet for doble jordfeil</li> <li>• “Ubegrenset” nettstørrelse</li> <li>• Sikker utkopling</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Store feilstrømmer som kan indusere farlige spenninger i nærførte telenett</li> <li>• Spenningsdip ved jordfeil som kan forplante seg til forbruker</li> <li>• Må kople ut enten fase eller linje ved feil, koplingsintervallet er under 1 s</li> <li>• KILE kostnader ved hver enpølet jordfeil</li> </ul>

Tabell 5: Fordeler og ulemper med direktejording

### 3.3 Motstandsjording

Ved bruk av lavohmig jording blir det koplet til en impedans i transformatorens nullpunkt. Det vanlige er å kople til en reaktans (spole med luftkjerne). Hensikten er å begrense de store feilstrømmene, men ikke begrense de nok til at de svekker vernets funksjon. Hensikten ved å bruke en reaktans framfor en resistans er å unngå store ohmske tap og tilhørende termiske utfordringer. En reaktans vil også i sammenligning med en resistans redusere den transiente overspenningen[14]. Det er enklere å oppfylle både FEF §4-3 og FEF § 2-7 med motstandsjording. Med motstandsjording kan man begrense jordfeilstrømmen og dermed konsekvenser for telenettet, samtidig som man sørger for at strømmen blir stor nok til at vernet kopler ut. Det teoretiske grunnlaget for dette er at ved en jordfeil mellom fase og jord, vil størrelsen på den kapasitive feilstrømmen være en del større enn den induktive feilstrømmen fra reaktansen. Dette er illustrert i figur 19, der den kapasitive feilstrømmen er markert med rød pil. Den blå pilen illustrerer den induktive feilstrømmen, som er mindre enn den kapasitive. Det er altså størrelsen på reaktansen som bestemmer størrelsen på feilstrømmen, og det er størrelsen på feilstrømmen som bestemmer størrelsen på den induserte spenningen i telenettet.



Figur 19: Feilstrømmer med motstand i nullpunkt ved enpølet jordfeil.

Reaktansen i nullpunktet er i figuren over beskrevet med  $Z_n$ , som også er i likning (8), altså

$$\frac{1}{Z_j} = \left( \frac{1}{R_1} + j\omega C_1 \right) + \left( \frac{1}{R_2} + j\omega C_2 \right) + \left( \frac{1}{R_3} + j\omega C_3 \right) + \frac{1}{Z_n} \quad (9)$$

Som nevnt tidligere har en også høyohmig jording. Denne metoden baseres på å ha en enda høyere reaktans i nullpunktet. Dette gjøres hovedsaklig for å begrense feilstrømmen ytterligere og på den måten innfri kravene om berøringsspenningen ved en feilsituasjon. Dette kan dog svekke vernets funksjon, siden feilstrømmen kan bli så lav at jordfeilvernet ikke detekterer feilen. I Norge benyttes som regel en spole med luftkjerne som impedans i lavohmig jording. Denne er langt mindre enn en Peterson-spole og ligger normalt også fast.

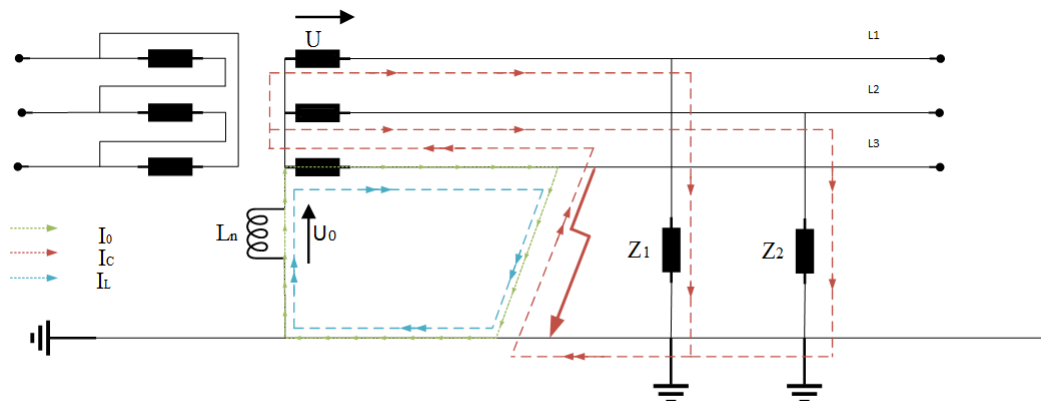
JORDINGSSYSTEM	FORDEL	ULEMPE
LAVOHMIG JORDING	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Selektiv utkopling</li> <li>• Lave transiente jordstrømmer</li> <li>• Ingen temporære overspenninger</li> <li>• Lavere isolasjonsnivå</li> <li>• Liten sannsynlighet for doble jordfeil</li> <li>• Ubegrenset nettstørrelse</li> <li>• Sikker utkopling</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kan indusere farlige spenninger i nærførte telenett</li> <li>• Spenningsdip ved jordfeil</li> <li>• Må kople ut enten fase eller linje ved feil</li> <li>• Må kjøpe og vedlikeholde reaktorer</li> <li>• Må ha tilgang til nullpunkt med deltavikling</li> <li>• Må ha gjennomgående jord der jordresistiviteten er for dårlig</li> </ul>

Tabell 6: Fordeler og ulemper med lavohmig jording

### 3.4 Spolejording

#### 3.4.1 Prinsipp for Petersenspole

Ved spolejording settes en spole mellom nøytralt punktet og jord. Hensikten med spolejording er å redusere og slukke feilstrømmer som følge av enpolet jordfeil. Dette skjer ved at spolen setter opp en induktiv strøm som er tilnærmet den kapasive feilstrømmen i nettet. Siden den induktive strømmen er  $180^\circ$  faseforskyvd i forhold til den kapasive strømmen, vil de utligne hverandre. Størrelsen på den induktive strømmen fra spolen, i forhold til den kapasive feilstrømmen, bestemmer kompenseringsgraden. Ved å justere spolen i forhold til nettets kapasitanser vil den vektorielle summen av strømmene i feilstedet bli liten.



Figur 20: Forenklet enpolet jordfeil med spole.

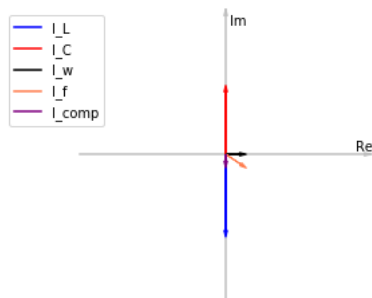
Hvis man som i 20 ser bort ifra overgangsmotstand i feilstedet, kan det fra vedlegg A.1 sees at feilstrømmen  $I_f$  i feiløyeblikket reduseres til;

$$I_f = U_f \left( j \left( 3C_{fj} - \frac{1}{\omega^2 L} \right) + \frac{R_{fj}}{3} \right) \quad (10)$$

hvor  $R_{fj}$  henspiller på motstanden mellom fase og jord og  $L$  er spolens induktans. Ved å stille inn induktansen til spolen slik at den blir like stor som den samlede kapasitansen til nettet, vil feilstrømmen bestå nesten kun av den resistive komponenten. Fra ligning 10 blir denne:

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C_0} \quad (11)$$

I figur 21 er  $I_f$  den endelige strømmen som går i feilkretsen, som her er overkompensert.  $I_w$  er gjort stor for illustrasjonens skyld. Strømmen blir sterkt redusert av kompenseringen. Kompenseringsgraden



Figur 21: Kompensering av kapasitiv feilstrøm

er normalt ikke gitt gjennom induktans, men i kompenseringsstrøm

$$I_{comp} = \sqrt{I_f^2 - I_w^2} \quad (12)$$

hvor  $I_{comp}$  er den reaktive kompenseringsstrømmen og  $I_w$  er den resistive delen av den totale feilstrømmen  $I_f$  i en enpolet jordfeil i et spesifikt nett.

#### Eksempelregnestykke

Hvis man omorganiserer likning 13 med hensn på feilstrømmen får man:

$$I_f = \sqrt{I_{comp}^2 - I_w^2} \quad (13)$$

Merk at fra likning 18 kan  $I_{comp}$  skrives  $I_L - I_C$ . Hvis vi antar 5 % kompensering og at den resistive avledningen er 4 % av den kapasitive, kan vi skrive:

$$I_{comp} = 0,05I_C \rightarrow I_L = 1,05I_C$$

$$I_w = 0,04I_C$$

Ved en total ladestrøm i nettet på 800A vil man da ha  $0,05 * 800A = 40A$

Verdiene for  $I_{comp}$  og  $I_w$  innsatt i likning 13 gir:

$$I_f = 0,064I_C \quad (14)$$

Den totale ladestrømmen finnes ved å addere de forskjellige linjestykkene (og øvrige komponenter hvis det skal gjøres enda mer nøyaktig) i nettet sin kapasitans mot jord. Hvis man for enkelthetskyld betrakter et uniformt nett med kapasitans:

$$I'_C = 1,5 A/km \quad (15)$$

Det er verdt å bemerke seg at normalt oppgis disse verdiene per linje, ikke per kilometer, som  $I'_C$  her illustrerer. Hvis man da samtidig ønsker å begrense feilstrømmen til:

$$I_{fmax} = 60 A \quad (16)$$

vil den maksimale utstrekningen på nettet bli:

$$L_{max} = \frac{I_f}{I'_C 0,064} = \frac{70A}{1,5A/km 0,064} = 730km \quad (17)$$

Hvert nett er forskjellig, og det vil også spille inn mange andre hensyn hva jordfeilstrøm angår. Videre er tallverdiene veldig grove anslag. Dette regnestykket må derfor tas som en illustrasjon av ligningen, ikke en tommelfingerregel av hvor stort et nett kan bli før man får problemer med spolejording.

Ved jordslutning vil kapasitansen til linje 3 i figur 20 lades ut. Dette vil medføre en strømtransient som kan være stor nok til at vern løser ut, som igjen ville gjøre spolejording overflødig da linjen kobles ut med tilhørende KILE-kostnader. Andre konsekvenser kan være skade på komponenter som

måletransformatorer. I nett med utelukkende kabler vil det ikke være noen lysbue å slukke, og følgelig har ikke spolejording noen funksjon.

Selv om den resistive komponenten er liten i forhold til den kapasitive, vil man ved tilstrekkelig stort nett få en resitiv strøm som vil få betydelig virkning på den endelige strømmen hvis størrelse er

$$I_f = \sqrt{(I_C - I_L)^2 + I_w^2} \quad (18)$$

Likning 18 er likning 10 omorganisert og med kompenseringstrøm delt opp i kapasitiv og induktiv del. Den resistive feilstromkomponenten kan naturlig nok ikke motvirkes med økt spolekapasitet. Denne vil gi en absoluttgrense for hvor stort nett som kan spolekompanseres med hensikt å slukke lysbuen.

### 3.4.2 Spenningsheving på friske faser

Som vist i vedlegg A.1 vil nullpunktet flyttes til  $U_3$ . Som en konsekvens vil fase-jord spenningen på de friske fasene stige til linjespenning,  $\sqrt{3}U_f$ . Denne overspenningen vil kunne gi en kaskadering av feil og over tid svekkelse av komponenter i nettet. En typisk følgefeil er dobbel jordfeil. Siden spenningen på de friske fasene stiger i *hele* det galvanisk sammenkoblede nettet, vil sannsynlighet for følgefeil øke proporsjonalt med nettutstrekningen. Overspenningene vil være mindre ved ikke-metallisk jordslutning (det vil si motstand i feilstedet), da noe av spenningen til den syke fasen vil falle over motstanden i feilstedet. Ferrantieffekten, som er en konsekvens av spenningsfall over linjens induktan, kan medføre en ytterligere økning opp mot det dobbelte av fasespenning. Denne effekten vil være tydeligere med økt linjelengde og strøm i lederene[15].

I Sørnettet ble det påvist at denne overspenningen svekket isolasjonsfasthet til komponenter i nettet.

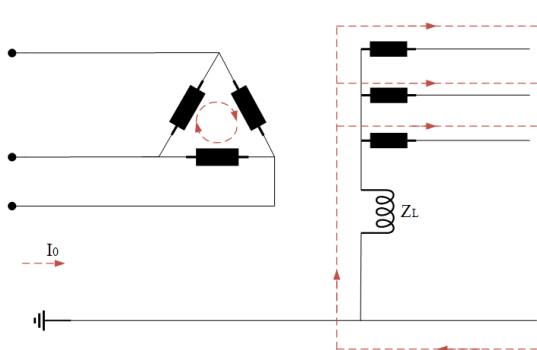
### 3.4.3 Delta-kobling og tilgang til nøytralt punkt

For at et nett skal oppfylle både N-1 prinsippet og ha tilstrekkelig med spolekapasitet, kan nettselskap sette inn nye spoler ved utbygging. Dette kan være problematisk, både i forhold til kostnader og tekniske utfordringer.

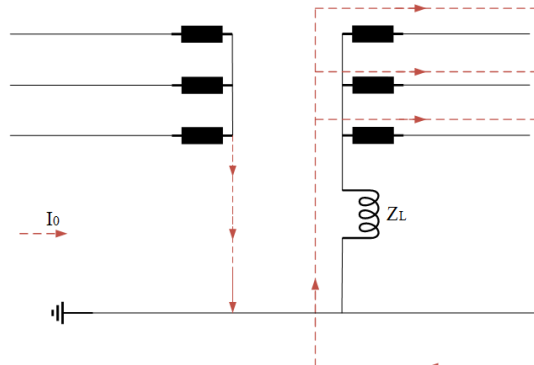
For at spolejording skal være et alternativ må trafoens nullpunkt være tilgjengelig. Videre er det en fordel å ha en delta-kobling. Ved en jordfeil vil det gå en  $I_f = 3I_0$  gjennom spole og feilsted. Som vist i figur 22 vil det grunnet fluks-balanse sirkulere en  $I_0$  i trafoens primærvikling. Samme effekt oppnås ofte med stjerne-stjerne-kobling og en delta-koplet tertiærvikling. Hvis transformatoren her er stjerne-stjerne-koplet som i figur 23 vil ikke nullfølgestrømmen ha noen lavohmig retur på primærsiden. Nullfølgestrømmen vil da gå i kasseveggen og annen transformator-armatur. Dette vil medføre termisk påkjenning og kan føre til skade på transformatoren. Dette vil typisk begrense tillatt nullfølgestrøm. Størrelsen på tillatt nullfølgestrøm må beregnes i hvert enkelttilfelle. IEC har anslått at en mellomstor transformator kan bære 25 % av merkestrøm i to timer med tanke på termisk belastning [16]. Samme dokument anbefaler imidlertid ikke løsning med stjerne-stjerne-vikling. Ifølge Statnett er 10-15% en fornuftig grense [1].

Hvis  $I_0$  får mulighet til å sirkulere i delta-viklingene vil det med tanke på trafo i prinsippet kunne tillate  $I_0 \approx I_n$ . Feildetektering vil også bli enklere siden nullstrømsekvens detekteres av vern på primærsidelinjen. Siden  $I_0$  fra feil på sekundærsiden sirkulerer i delta-viklingen, kan det antas at enhver detektert nullfølgestrøm målt av vern på primærsiden stammer fra feil på denne siden.

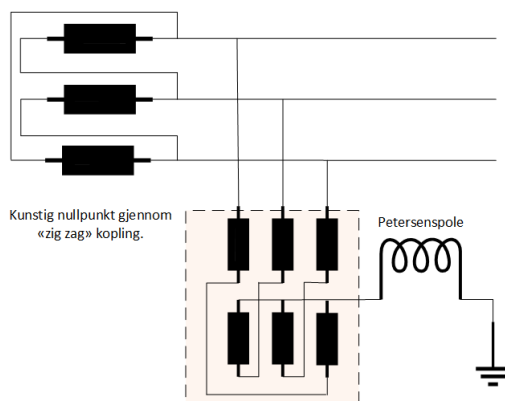
I en delta-vikling eller i transformatorer der stjerne-viklingene ikke har tilgjengelig nullpunkt kan det benyttes en jordingstrafo. Dette er billigere enn å installere en skilletrafo kun for å få tilgang til et nullpunkt. Jordingstrafoen trekker liten magnetiseringsstrøm og gir nullfølgestrømmen en returvei. Transformatoren er utført med zig-zag koblingen som vist i figur 24. Virkemåten baserer seg på ampère-vindingsbalanse i viklingene. Ved bruk av jordingstrafo må størrelsen og akseptert varighet på jordfeilstrom tas hensyn til. En innføring i jordingstrafoens virkemåte kan blant annet finnes i [17].



Figur 22: Overføring av jordfeilstømmer i delta- og stjernevikling.



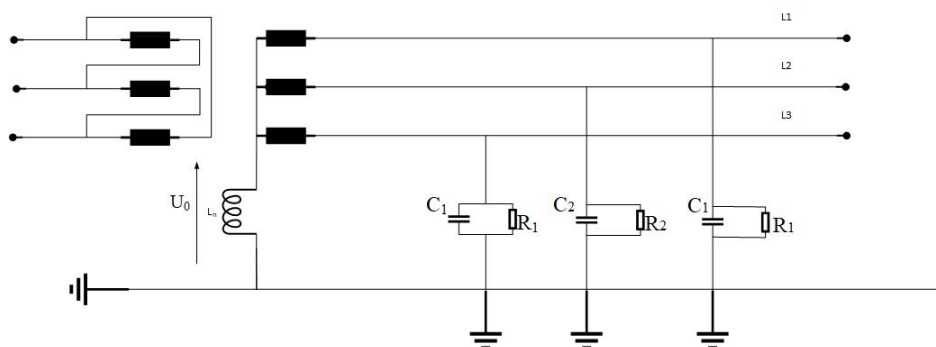
Figur 23: Overføring av jordfeilstømmer i stjerne-stjernevikling.



Figur 24: Kunstig nullpunkt gjennom zig-zag-trafo

### 3.4.4 Resonans

På grunn av forskjellig lengde på fasene og ufullstendig revolvering vil det alltid være en forskjell i kapasitans mot jord for hver linje. Dette kalles kapasitiv usymmetri.



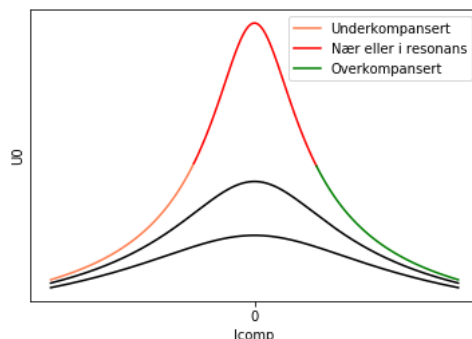
Figur 25: Linjediagram med ulike kapasitanser

Jo større forskjell mellom  $C_1$ ,  $C_2$  og  $C_3$  det er i figur 25, jo større kapasitiv usymmetri er det i nettet. En nærmere beskrivelse av hvordan man regner ut den kapasitive usymmetrien er å finne i blant annet [18]. Sammen med spolen vil denne kapasitive usymmetrien utgjøre en resonanskrets som vil øke nullpunktspenningen  $U_0$  i resonans.

Som vist i figur 26 vil nøytralpunktspenningen øke betraktelig rundt resonanspunktet hvor spolen er



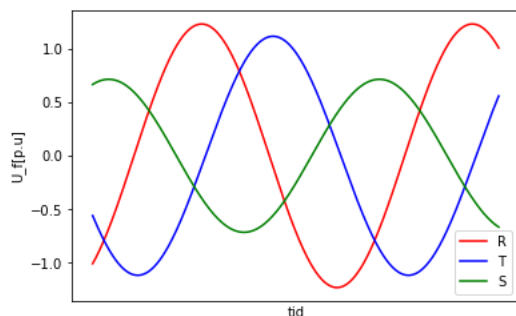
perfekt avstemt mot nettets kapasitans og  $I_{comp} = 0$ . Spolen, den kapasitive usymmetrien mot jord og den resistive avledningen vil danne et RLC-krets (en krets med en resistans, en kapasitans og en induktans), hvor motstanden som gir resistiv avledning mot jord vil fungere som et demperledd. Dennes effekt er vist i figur 26, ved de svarte kurvene, hvor den resistive avledningen er satt til henholdsvis to og tre ganger av den originale. I et friskt nett er ikke denne spenningsøkningen sammenlignbar i størrelse



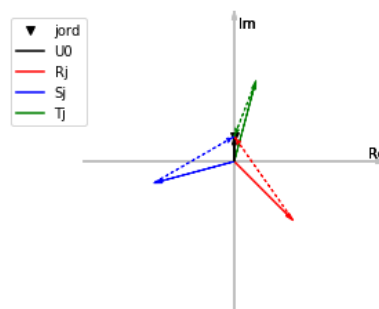
Figur 26: Idealisert resonanskurve

med den nullpunktspenning som oppstår ved enpolet jordfeil, men kan fortsatt være utslagsgivende for hvordan nettet driftes. Konsekvensene er:

- Forskjøvet nullpunkt med en vektor ute av fase for alle fasespenningene. Dette vil føre til skjev fase-jord spenninger for enkelte av fasene som igjen utfordrer isolasjonsnivået.
- En spolestrøm i transformatorens nullpunkt. Tas det ikke hensyn til resonans vil dette utgjøre en begrensende faktor i valg av trafo. I beste fall må man overdimensjonere nullpunkttytelsen, i verste fall kan spolen og trafoen havarere.



Figur 27: Skjeve faser over en periode



Figur 28: Skjeve faser i viserdiagram

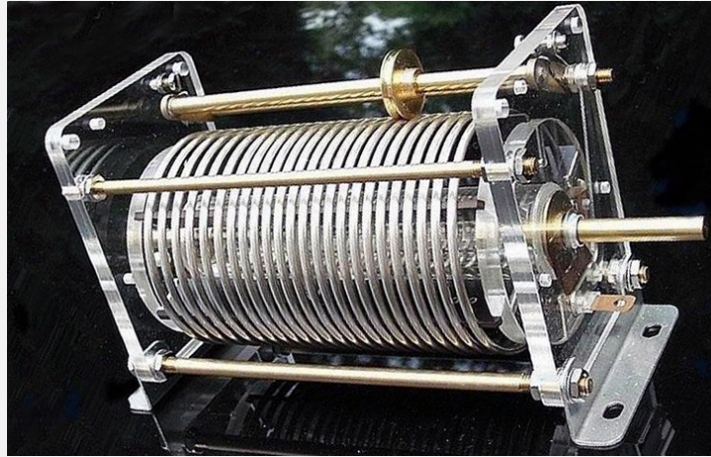
Som vist i 27 og 28 gjør en forrykket  $U_0$  at noen av fase-jord spenningene blir lavere og noen høyere enn nominell spenning. I dette plottet er størrelsesordenen av endringen i  $U_0$  sterkt overdrevet for å illustrere effekten.

Fasebrudd er spesielt problematisk i et spolejordnet nett. Dette vil medføre svært høy kapasitiv usymmetri, og store overspenninger. Et tilfelle er beskrevet inngående i [19].

Spolen kan justeres slik at resonans unngås. I et nett med begrensede forstyrrelser byr ikke fastslåelse av resonanspunktet på videre problemer. Men med eksempelvis overharmonier eller asymmetrisk last kan dette by på utfordringer[20]. Videre er det viktig å påse at ikke to automatisk regulerte Petersonspoler står i samme nett, da disse vil regulere mot hverandre. Det er ønskelig å drive over- eller underkompensert, det vil si  $I_{comp} > 0, I_L > I_C$ . Ved utfall eller utkobling av en linje vil nettets kapasitans minke og man beveger seg da vekk fra resonanspunktet. I neste omgang kan spolen nedjusteres for å ikke få for stor feilstrom. Med økt nullpunktspenning kan resonans forveksles med vanlig, stående jordfeil. Dermed kan drift nær resonans uten feil gi feilsignaler og unødvendig omkobling i nettet på jakt etter en ikke-eksisterende feil.

Ved drift nær resonans og feil i nettet kan man oppnå svært høye overspenninger. Erfaringer viser at enkelte nett kan ha stasjonære overspenninger på 2 p.u. ved enkle fasefeil [12]. I tillegg vil det kunne oppstå farlige transiente overspenninger som er enda høyere. Spesielt måletrafoer har havarert som følge av slike overspenninger [1].

#### Justerbar Petersonspole



Bildet over viser en kontinuerlig justerbar induktans. Spolen på bildet er brukt i sambandsteknologi. En Petersonspole vil naturligvis være forskjellig i utførelse og størrelse, men prinsippet er det samme [21]. Det finnes flere løsninger for å variere Petersonspolens induktans. En forenklet analyse for en spole gir en induktans på:

$$L = \frac{\mu N^2 A_c}{l_{sol}} \quad (19)$$

Her er  $L$  spolens induktans,  $\mu$  er permabiliteten i kjernen,  $N$  er antall vindinger,  $A_c$  er arealet til spolens tversnitt og  $l_{sol}$  er lengden på spolen.

Noen vanlige løsningene er:

1. Justerbar kjerne. Denne styres inn og ut av viklingen av et mekanisk drivsystem. I praksis varierer man  $\mu$  i ligning 19. For økt effekt kan denne kjernen være en permanenmagnet.
2. Justerbart vindingstall. Gjennom forskjellige tapper kan man endre antall vindinger,  $N$  i ligning 19
3. Bruk av hjelpevinding og justerbar kapasitator. I tillegg til vinding mot jord, har man kveilet et hjelpevinding rundt samme kjerne. Denne er i serie med en variabel kondensator. På grunn av amper-vindingbalansen kan man slik begrense den induktive strømmen generert av hovedvindingen.

(1) er relativt treg og lager mye støy. (2) sin største ulempe er mangel på kontinuerlig justering. Aldring av kapasitatorer er en utfordring i (3). Det utvikles også alternativer som benytter seg av kraftelektronikk som motvirker overnevnte ulemper, men bringer med seg utfordringer rundt overharmonier [22].

JORDINGSSYSTEM	FORDEL	ULEMPE
<b>SPOLEJORDING</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minst jordfeilstøm av alle jordingstyper</li> <li>• Ikke spenningsdip</li> <li>• Nettet kan drives med stående jordfeil</li> <li>• Slukker lysbuer og enpolte jordfeil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Begrenset nettstørrelse</li> <li>• Tungvint feillokalisering</li> <li>• Feil fører til temporære overspenninger</li> <li>• Økt krav til isolasjon på grunn av spenningsstigning ved jordfeil.</li> <li>• Problemer med Wischer reléer</li> <li>• Spolekoordinering er nødvendig</li> <li>• Fare for doble jordfeil</li> <li>• Transiente jordstrømmer kan starte distansevern og gir unødvendig utkopling</li> </ul>

Tabell 7: Fordeler og ulemper med spolejording

### 3.5 Oppsummering av jordingsystemer

I tabell 9 er det laget en oversikt over fordeler og ulemper med hvert jordingsystem. Det må presiseres at hva som er den beste systemjordingen for et konkret nett ikke kan leses ut fra denne oversikten. Dette må vurderes etter driftserfaringer fra hver netteier og sammenligning av to nett må gjøres med forbehold. I ett nett kan det være ladestrømmer opp mot 2000 A og allikevel ha gode driftserfaringer, mens andre nett kan ha rundt 1000 A og slite veldig med driften. Dermed blir det ikke konkludert om det er noen bedre eller verre løsninger mellom jordingsystemene. I figur 29 er det laget en oversikt over de ulike jordingsystemene og hvilken egenskap de besitter. Det finnes også andre løsninger som brukes konkret for eksempel i industri og det er *resistiv høy/lav jording*, *reaktiv høyohmig* og *effektiv jording*. Disse er utelukket i denne rapporten.

SYSTEMJORDING / NULLPUNKT						
BESKRIVELSE	ISOLERT NETT	MOTSTANDSJORDING				DIREKTE JORDING
		RESISTANS		SPOLE-JORDING	LAVOHMIG JORDING	
		HØY	LAV			
MOTSTAND [OHM]	-	> 1 k	<100	100-1 k	1-100	-
DRIFTSPENNING kV	< 24	< 24	< 24	20-150	?	> 100
BRUKSOMRÅDE	EI	I	EI	E	EI	E
ENPOLET FEILSTRØM	1 – 100	1 – 100	100 – 1k	10 – 100	1 k – 10 k	< 1 k
VERN	XR	XRO	O(R)	XR+	DOR+	DO+

BOKSTAV	BETYDNING
E	ELFORSYNING
I	INDUSTRI
X	IKKE VERN
R	RETNINGSRELÉ
O	OVERSTRØMSRELÉ
D	DISTANSEVERN
R+, O+	SPESIALRELÉ / TILLEGGSUTSTYR

Figur 29: Illustrasjon hentet fra EFI-rapport [3] som oppsummerer egenskaper ved forskjellige former for systemjording

JORDINGSSYSTEM	FORDEL	ULEMPE
<b>SPOLEJORDING</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minst jordfeilstrom av alle jordingstyper</li> <li>• Ikke spenningsdip</li> <li>• Nettet kan drives med stående jordfeil</li> <li>• Slukker lysbuer og enpolte jordfeil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Begrenset nettstørrelse</li> <li>• Tungvint feillokalisering</li> <li>• Feil fører til temporære overspenninger</li> <li>• Økt krav til isolasjon på grunn av spenningsstigning ved jordfeil.</li> <li>• Problemer med Wischer reléer</li> <li>• Spolekoordinering er nødvendig</li> <li>• Fare for doble jordfeil</li> <li>• Transiente jordstrømmer kan starte distansevern og gir unødvendig utkopling</li> </ul>
<b>DIREKTE JORDING</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Selektiv utkopling</li> <li>• lave transiente jordstrømmer</li> <li>• Ingen temporære overspenninger</li> <li>• Ingen spenningsstigning og man kan bruke lavere isolasjonsnivå</li> <li>• Liten sannsynlighet for doble jordfeil</li> <li>• “Ubegrenset” nettstørrelse</li> <li>• Sikker utkopling</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Store feilstrømmer som kan indusere farlige spenninger i nærførte telenett</li> <li>• Spenningsdip ved jordfeil som kan forplante seg til forbruker</li> <li>• Må kople ut enten fase eller linje ved feil, koplingsintervallet er under 1 s</li> <li>• KILE kostnader ved hver enpolte jordfeil</li> </ul>
<b>ISOLERT NETT</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kan driftes med stående jordfeil</li> <li>• Det forekommer ikke spenningsdip</li> <li>• Små feilstrømmer gir ingen fare for induserte spenninger i nærførte telenett</li> <li>• Godt egnet til rene kabelnett</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transiente feilstrømmer</li> <li>• Temporære overspenninger</li> <li>• Tungvint feillokalisering</li> <li>• Fare for doble jordfeil</li> <li>• Feilstrømmen øker proposjonalt med nettutstrekningen</li> <li>• Økt krav til isolasjon</li> <li>• Kun egnet for mindre nett</li> </ul>
<b>LAVOHMIG JORDING</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Selektiv utkopling</li> <li>• Lave transiente jordstrømmer</li> <li>• Ingen temporære overspenninger</li> <li>• Ingen spenningsstigning og man kan bruke lavere isolasjonsnivå</li> <li>• Liten sannsynlighet for doble jordfeil</li> <li>• Ubegrenset nettstørrelse</li> <li>• Sikker utkopling</li> <li>• Lavere feilstrøm og mindre induserte spenninger i nærførte telenett</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Store feilstrømmer som kan indusere farlige spenninger i nærførte telenett</li> <li>• Spenningsdip ved jordfeil</li> <li>• Må kople ut enten fase eller linje ved feil, koplingsintervallet er under 1 s</li> <li>• Må kjøpe og vedlikeholde reaktorer</li> <li>• Må ha tilgang til nullpunkt med deltavikling</li> <li>• Må ha gjennomgående jord der motstanden i returveien er for dårlig</li> </ul>

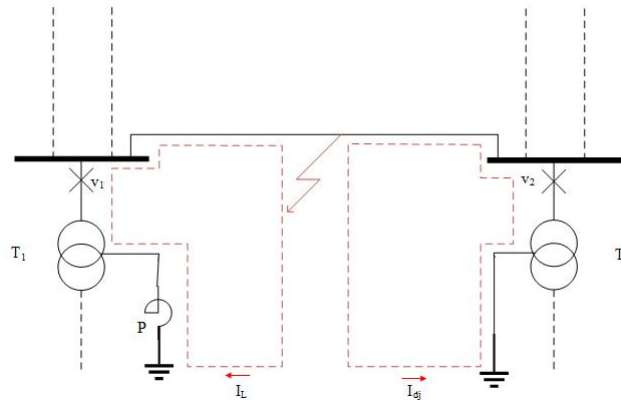
Tabell 8: Fordeler og ulemper med hvert jordingssystem

## 4 Spolekoordinering

I arbeidet med en jordingsplan, enten i omlegging til spolejording eller utbedring av allerede delvis spolejordnet nett er det flere hensyn som må tas utover kun samlet spoleytelse sett opp mot nettets totale kapasitans. Spesielt i tilfeller hvor eierskapet av et galvanisk sammenhengende nett er delt mellom flere aktører, vil en god oversikt over spolefordelingen være viktig. Nullpunktene i et galvanisk sammenkoplett nett kan være jordet på forskjellige måter. Mulige kombinasjoner er:

- Spolejordnet og isolert.
- Motstandsjordet, direktejordet og isolert.

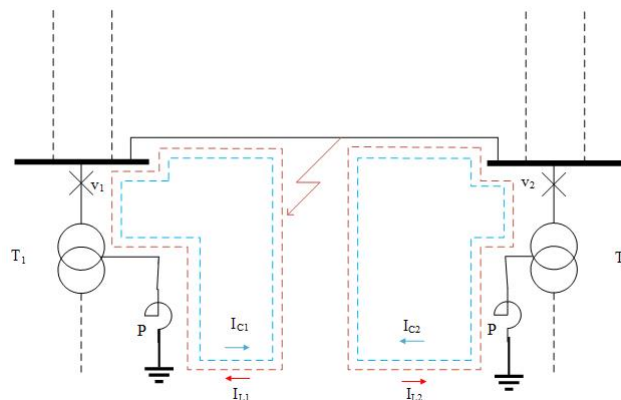
En spolejordnet transformator i samme nett som for eksempelvis en direktejordet transformator vil ikke være hensiktsmessig da en så stor feilstrom vil gå i den direktejordete transformatoren, slik at vern løses ut og spolejording er overflødig.



Figur 30: Nettsegment med enpolet jordfeil og med kombinasjon av spole- og direktejordet

I figur 30 er jordfeilstrommen  $I_{dj}$  i den direktejordete transformatoren  $T_2$  så langt større enn feilstrommen  $I_L$  i den spolejordede transformatoren  $T_1$ . Denne strømmen vil opprettholde lysbuen, helt fram til vernet  $v_2$  løser ut. Hvis  $T_1$  sin spole er dimensjonert til å slukke den kapasitive strømmen som vil stå i jordfeilen, hadde det ikke vært nødvendig med direktejording og utløsning av  $v_1$ . Hvis det ikke er tilfelle vil man få en stående jordfeil med tilhørende komplikasjoner. Dette er grunnen til at disse to jordingsmetodene ikke kan eksistere i galvanisk sammenkoplete nett.

### 4.1 N-1-krav og delte nett fordrer flere spoler



Figur 31: To spoler deler feilstrommen

Med flere spoler i et galvanisk sammenkoplett nett vil disse dele på å kompensere den kapasitive feilstrommen. Spolene trenger ikke å ha samme størrelse, så lenge den totale induktive strømmen  $I_L$  veier opp den kapasitive strømmen  $I_C$ . Flere, fordelte spoler er heldigere enn én stor. Dette beror på at feilstrommen da

blir fordelt. Dette stemmer også overens med erfaringer gjort i Sverige[23]. Men den relative størrelsen på spolene kan ha en påvirkning på konsekvensene av for eksempel fasebrudd. [19] går nærmer inn på et konkret feiltilfelle i Sørnettet. Der det ble funnet ut at en særdeles høy overspenning var et resultat av uheldig kompensering av to nett-deler, at feilen inntraff på en radial og at nettet ble drevet nær resonans.

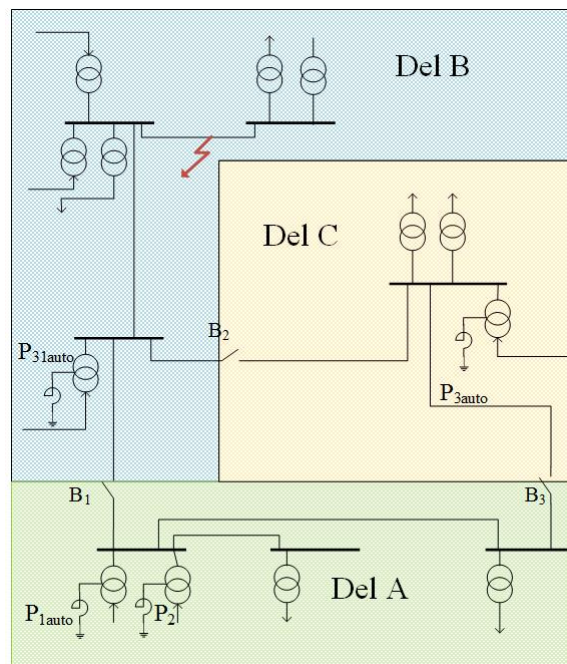
Heller ikke under korte feil skal oppstå fare for mennesker eller utstyr som beskrevet i FEF §4-11. En jordfeil med feil i spolejordingen kan føre til en kjede av feil, og det er derfor viktig å opprettholde N-1 også når det kommer til spoler. I nett som enten drives nær resonans eller hvis kapasitans kan endres hyppig vil dette gjelde også for spoler som ikke ligger fast, men kan stilles inn.

Avstanden til feilsted spiller også inn. På eksempelvis en streng vil den resistive komponenten, og dermed også til en viss grad spolens effektivitet, være avhengig av hvor langt unna feilstedet den er plassert.

Galvanisk deling oppnåes ved å installere en skilletransformator. En skilletransformator er en transformator med 1:1 i viklingsforhold og med lav kapasitiv kopling. Kostnadene og begrensningene av denne er ikke uten betydning da transformatoren må være dimensjonert for å kunne bære merkeytelse på linjen. Ved å dele nettet deler man opp også kapasitansen som jordfeilen ser, og dermed også jordfeilstrommen som spolen må kompensere for. En utfordring blir at hvert delenett må ha egen spolekompensasjon. Sett i sammenheng med at det er fordelaktig med flere, fordelte spoler fremfor en stor, kan dette by på utfordringer spesielt med delenett hvor tilgang til nullpunkt er en begrensende faktor.

## 4.2 Jordfeildetektering ved selektiv utkobling

Spolejordingen er tenkt å slukke enfase jordfeil. Men i tilfeller hvor feilstrommen enten går gjennom solid leder (feil i kabel, metallisk kortslutning eksempelvis) eller hvis spolene ikke er riktig avstemt vil det kunne oppstå en stående jordfeil. Ved stående jordfeil har driftsentralen opptil 120 minutter på å detektere feilen ut ifra FEF §4-3.



Figur 32: Delenett med feil

Figur 32 er et grovt forenklet tenkt nett bestående av tre delenett. P betegner Petersonspole. Subskript auto betyr at den har mulighet for automatisk regulering. Bryterne  $B_1$ ,  $B_2$  og  $B_3$  ligger normalt inne. Viktig her er at i et så enkelt nett vil normalt Wicherreléer kunne detektere feilretningen, men uten disse vil det ved registrering av jordfeilstrom i spolene ikke kunne fastslås hvor den stående jordfeilen befinner seg. Ved først å koble ut  $B_1$  og  $B_3$  kan det bestemmes hvorvidt feilen befinner seg i delenett A eller i enten delenett B eller C. Hvis det nå ikke registreres noen feilstrom i nullfølgestrømreleet tilknyttet delenett A,

vil også  $B_2$  kobles ut. Dermed kan det fastslås ved å registrere nullstrøm i releet i del B og ikke i del C at feilen ligger i del B.

En annen strategi som benyttes er å legge hele nettet mørkt, for så å bygge det opp igjen del for del. Hvis jordfeilen er av permanent art vil man slik oppdage hvilken del den oppstår i[1]. Dette gjøres under forutsetning av at kostnadene og risikoen av en stående jordfeil er større enn kostnadene av denne strategien.

Også i delenettene må det sørges for riktig kompensering med tanke på resonans og medfølgende overspenninger og spenningskjevheter. Spolekapasitet og samlet kapasitans i hver nettdel må holdes oversikt over. Sistnevnte kan endres både med innkobling av forskjellige seksjoner og over tid med eksempelvis endret linehøyde over snø/bakke. Hvis ikke kan flytting av feil fra for eksempel feilområde BC til BA ved å omkopling føre til resonans og ytterligere overslag i tilfelle  $I_{compAB} \approx 0$ . Hvis nettet og feilen er slik at retningsbestemte reléer klarer å detektere feilretningen blir naturlig nok prosessen langt raskere. Driftserfaring og fornuftig systematisering av feildata vil også forkorte tiden det tar å detektere feilen. Spesielt er dette tilfelle hvor retningsbestemte vern kan brukes, men ikke nødvendigvis gir entydig signal [24]. Utypende notat om jordfeilvern i vedlegg C

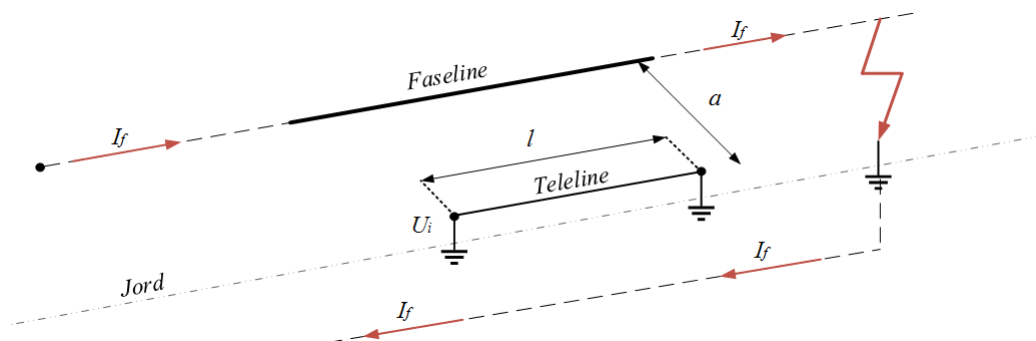


## 5 Induserte spenninger i nærliggende telenett

### 5.1 Overføring av indusert spenning i telenett

Kraftledninger og kraftkabler kan forårsake driftsforstyrrelser, skade og berøringsfare på tele- og signalutstyr på grunn av induserte spenninger eller strømmer [5]. Telekabler som ligger nært kraftlinjer er spesielt utsatt. Når et nett er friskt, vil det ikke være noen påvirkning på nærliggende kabler eller anlegg. Det er fordi summen av fasestrømmene er tilnærmet lik null. Dermed er også nullfølgestrømmen tilnærmet lik null. Ved en kortslutning mellom to faser i en kraftlinje vil det føre til stor strøm på fasene. Det vil imidlertid heller ikke påvirke nærliggende kabler og anlegg siden summen av strømmen i de to fasene er tilnærmet lik null. Det som vil påvirke nærliggende kabler og anlegg er hvis det blir en kortslutning mellom fase og jord. Ved en slik jordslutning kan det medføre høye induserte spenninger på teleledninger fordi denne strømmen gir en meget sterk induktiv kopling til parallelle ledere. Dette er fordi strømsløyfen til jordstrømmen vil ha en retur så dypt som flere km ned i jorda ved 50 Hz[5]. Magnetfeltet fra returveien er motsatt rettet i forhold til magnetfeltet fra kraftnettet. Siden telenettet ligger relativt langt unna returveien, kan bidraget fra returveien neglisjeres.

Ser man på teleledningen som en strømsløyfe mellom telelinje og jord, vil dette være en meget sterk induktiv kopling. Ved høye systemspenninger vil det også kunne overføres en kapasitiv spenning, gitt at avstanden er liten. Kapasitiv kopling beror på at spenningsvariasjon ( $\frac{dv}{dt}$ ) over kapasitansen mellom kraftkabel og telenettkabel. Denne kapasitansen skyldes igjen gjennomgående uisolert jordtråd. Frekvens, avstand og kabeltype er noen av faktorene som bestemmer den kapasitive koplingens størrelsesorden. Det er bare strømmen med retur i jord som inducerer spenning med vesentlig betydning som kan påvirke telenett, kan kraftledningen med tilstrekkelig nøyaktighet representeres som en enkelt leder.[5]



Figur 33: Forenklet modell av indusert spenning fra faseline til teleline

Induserte spenninger ved jordfeil kan medføre fare for både personell og utstyr. Spenningen kan bli så høy at berøringsfare oppstår. Det er også risiko for at isolasjonen på utstyret skades og at sikringer smelter. Dette kan føre til at forbindelser settes ut av funksjon. For et gitt nett og feilsituasjon er de induserte spenningene proporsjonale med jordstrømmen.[5]

I følge FEF § 2-7 (vedlegg D.1) om overført spenning i telenett skal anlegget være dimensjonert for å ikke overføre for høye spenninger til elektroniske kommunikasjonsnett, både i normaldrift og feilsituasjoner. Disse er nærmere tallfestet i FOR § 8 (vedlegg D.3) som viser at varighet såvel som nivå av forskjellige spenninger er regulert.

Figur 33 viser en illustrasjon av en telelinje i parallell med en strømlinje.

Formelen for den induserte spenningen er gitt av ligning (20)

$$U_i = Z_k \cdot I_f \cdot l \quad [V/km] \quad (20)$$

Hvor  $U_i$  er den induserte spenningen.  $Z_k$  er koplingsimpedansen mellom kraft- og teleledningen [ $\sigma/km$ ].  $I_f$  er jordstrømmen langs den aktuelle kraftledningen [A].

$Z_k$  er proporsjonal med trasélengden ( $l$ ) og avhenger forøvrig av traséavstanden ( $a$ ) og jord- eventuelt luft-, resistiviteten ( $\rho$ ).  $Z_k$  kan bestemmes vha diagrammene i vedlegg B, der koplingsimpedansen er tegnet som funksjon av traséavstanden for ulike verdier av spesifikk jordmotstand langs kraftlederen.[5]

Ved enpolet jordfeil vil fra ligning 20 den induserte spenningen fra et direktejordet system være langt større enn fra et spolejordet, siden feilstrømmen er langt større i førstnevnte tilfelle. Erfaringer Telenor har gjort seg sier at det snarere er belastningsstrømmen ved normal drift som er avgjørende for verne-tiltak/minimumsavstand i spolejordete nett [25]. Jordingsystemet spiller dermed en avgjørende rolle for induserte spenninger, og dette blir som regel en utfordringer først med lavohmig- og direktejordete systemer. Videre er det avgjørende om det dreier seg om kabel eller lineanlegg. I luftlinje kan man på en innvirkning på opp til 3 km, mens med kabler vil denne avstanden være maksimalt 50-100 meter. Dette skyldes blant annet forskjellig magnetisk permabilitet for luft og jord, samt faselederens egenskaper. Videre vil det i kabler snarere være kapasitiv kobling i normaldrift som setter minimumsavstanden mellom tele- og høyspentnett, heller enn induserte feilspenninger[26].

Utover begrensing av jordfeilstrøm som er dekket ellers i rapporten, er det flere tiltak som kan gjøres, avhengig om det dreier seg om kabel eller luftledning. I kabelanlegg er kun tiltak i kraftnettet aktuelt. Her kan tiltak være å ta hensyn til minimumsavstand mellom kraftnett og telenett og isolering av gjennomgående jording i kraftnettet med tanke på kapasitiv kobling. Når det gjelder luftledninger kan både tiltak i telenettet og kraftnettet være aktuelle. I begge tilfeller er det netteier som står for kostnaden. Typiske tiltak i kraftnettet er å endre linekonfigurasjoner og installere gjennomgående jordledning. I telenettet kan det installeres avledervern, jorde bærelinjen i transportnettet, dele opp eller omorganisere telenettet eller bytte om til fibernet. De forskjellige tiltakenes ulemper og fordeler er avhengig av pris, beligenhet, nettets form med mer.

For å unngå forsinkelser og store kostnader er det viktig at eier av telenettet kontaktes tidlig i prosessen hvor omlegging av jordingssystemer som kan forårsake øke feilstrømmer diskuteres. Under omlegging til direktejordet i Bergensområdet hadde BKK svært gode erfaringer, også kostnadmessig, med å ha et tett og tidlig samarbeid rundt dette spørsmålet med Telenor[27]. Påvirkning på telenettet er nevnt som et eksempel i NVEs veileder for konsesjonssøknader [28], men det er likevel ikke ofte at type systemjording, med de konsekvenser det har for telenettet, blir beskrevet. Telenor erfarer at slike saker blir oppfattet som regulerings- og eller andre byggeplaner, hvorpå de blir kontaktet[26]. Fra FEF §2-7 har man at *Anlegg skal være slik at det i normal drift og i feilsituasjoner ikke blir overført for høye spenninger til elektroniske kommunikasjonsnett*. Dermed er det anleggseier som må betale for tiltak hvis kraftnettet skulle komme i konflikt med eksisterende telenett.

Siden 1950-årene har koaksialkabler blitt brukt i telenettets nær- og fjernet. Som regel brukes to koaksialkabler, en for hver retning. Televerket sluttet i 1986 med å installere koaksialkabler i nettet, og begynte en overgang til optiske kabler (fiber) på 1970-årene. Optiske kabler er mer fleksibel, lettere, mindre i dimensjon og blir ikke forstyrret av indusert spenning. Det er fortsatt en del koaksialkabler igjen på landsbasis [29]. Av det telenettet som kan bli berørt av regionalnettet, er kun en liten andel fibernet. Per idag brukes også kobbernettene til annen kommunikasjon enn telefon hvor det ikke lønner seg med fiber, og de vil oppleve samme problem som tidligere. I de fleste tilfeller vil ikke fiber som løsning lønne seg, men dette kommer ann på hvert enkelt tilfelle.

## 5.2 Gjennomgående jord som tiltak for å redusere induserte spenninger

Gjennomgående jord er en jordline som går enten over, under eller i jord parallellt med strømlinjen. Ved en jordfeil vil feilstrømmen føres direkte gjennom jorden. Den induserte spenningen i telenettet er sterkt avhengig av størrelsen på denne strømmen. Med gjennomgående jord avledes jordstrømmen gjennom jordlinen og den føres den tilbake til nullpunktet med en reduksjonsfaktor  $r$ . Reduksjonsfaktoren defineres som forholdet mellom strøm i jordlinen og feilstrøm i fasene når det forutsettes ideell jordforbindelse av jordline. Ved bruk av jordline vil man da redusere den induserte spenningen i telelinen med en korrigerings

av formel 20

$$U_i = r \cdot Z_k \cdot I_f \cdot l \quad [V/km] \quad (21)$$

Ved et overslag til en mast ved jordfeil og linjen har gjennomgående jordline, vil jordlinen fange opp nesten hele feilstrømmen  $I_f$ . Normalt vil det gå 5-10%, eller mindre, direkte til jord ved feilstedet. Det øvrige vil gå til jord via jordlinene og fordele seg via dem over en strekning på noen kilometer til hver side[5]. Dette er avhengig av avledningen mot jord i mastepunktene. Dette er en relativ god løsning på problemet med berøringsspenning. Trenger man ytterligere minking av jordstrømmen som går til jord, kan man bruke to jordliner eller en markline. Ved ujordede mastepunkt vil man ikke lengre ha nødvendigvis ha sikker frakopling av feil, og dermed bryter man med paragraf §4-3 i FEF, vedlegg D.1 [30].

## 6 Økonomisk perspektiv

### 6.1 Kostnader ved overgang til lavohmig jording

Når det blir større ladestrømmer i et nett, og utstrekningen øker, vil det oppstå problemer og det kan være nødvendig med en endring av systemjordingen. Enten er det en mulighet å sette inn spoler i et isolert nett, eller legge om fra spolejording til lavohmig eller direktejording. For å sette et grovt anslag over hvor stor kostnaden er ved en endre jordingssystem, er det tatt utgangspunkt i situasjonen i Sørnettet. Sørnettet er et sammenkople 132 kV nett i Sør-Troms, Lofoten, Vesterålen og nordlige deler av Nordland. Det er mange områdekonsesjonærer her og Statnett har tatt over en del av den delen som heter Lofotrinen.

DSB har fattet vedtak om at Sørnettet blir driftet forskriftstridig. Sørnettet har grunnet høy ladestrøm og mye kabel, driftet nettet nært resonans. Det er flere tiltak som kan gjøres for å drifte nettet forsvarlig. En av dem er å endre jordingssystem til lavohmig jording, mens en annen er å skille nettet opp. BKK gjennomførte en overgang fra et spolejordet nett til et lavohmig nett i 1996. I senere tid har Lyse Nett også vurdert det samme tiltaket. Skal en se på omlegging av jordingssystem fra spolejordet til lavohmig kan det bli kostbart. Selv om det er kostbart vil det være driftsmessig både enklere og sikrere. Videre skal de nevnes noen av kost-nytte faktorene som spiller en rolle i en eventuell omlegging. Prisene for komponenter må forventes å variere med +/- 50% på grunn av bestillingstidspunkt, råvarepriser, valutakurser, spesielle tekniske spesifikasjoner og lignende [13]. De kostnadsfaktorene som må tas hensyn til er[31]:

- Vern av telenett
- Reaktorer til begrensning av feilstrøm
- Nytt relévern
- Utbedring av jordingsanlegg
- Mulige KILE-kostnader

#### 6.1.1 Kostnader til vern av telenett

Å verne telenettet kan være en av de største kostnadene ved en overgang til et direktejordet system. Som nevnt tidligere er den avhengig av jordfeilstrømmen i feilstedet. Jo større strøm, desto høyere indusert spenning. Det er også nevnt tidligere at et direktejordet nett vil ha høyere strøm enn et lavohmig/reaktorjordet nett. Dermed er det større kostnader knyttet til vern i et direktejordet nett enn i et lavohmig nett. Løsningene for enkelte traséer der nærførte teleledninger kan bli dyre fordi man kan ha dramatisk økning i spenning i disse utsatte områdene av telenettet. Vernløsninger i slike traséer er ofte jordkabler. I 1993 vurderte televerket Sørnettet, Mørenettet, Trøndelagsnettet og BKK sitt nett med tanke på dette. Kostnadene med alle transformatornullpunkt jordet, ble den gang angitt til å ligge på 50 - 100 mill.kr. Ved lavohmig jording ble kostnaden begrenset til 15-30 mill.kr som tilsvarer fra cirka 15 000 - 80 000 kr/km kraftledninger i de nettene som er sterkt avhengig av nærføringer/befolkningstetthet [31].

#### 6.1.2 Kostnader til reaktanser

Ved jording av nøytralpunkt velges som tidligere nevnt alle punktene. Det som er mest gunstig er å jorde alle stjerne-stjerne transformatorene hvis det lar seg gjøre. Feilstrømmen i slike transformatorer er vesentlig lavere enn i delta-stjerne transformatorer. Siden strømmen på primærsiden vil gå i den høyohmige transformator-kassa og dermed begrenses, sørger amper-vindingsbalansen for at  $I_0$  strømmen på primærsiden også begrenset. Deretter kople man inn en reaktor i delta-stjerne transformatorene. Dette gjøres for å begrense feilstrømmen til det en har behov for og dermed redusere kostnader til vern i telenettet. Prisen per reaktor, ferdig installert under forutsetning av at transformatoren også står utendørs og at det er plass til reaktoren i anlegget, antas å ligge mellom 0.2-0.3 mill.kr [31].

### 6.1.3 Kostnader til nytt relévern

Det er mulig å finne et utdypende vedlegg som beskriver jordfeil vern grundigere i vedlegg C.

Ved å gå over til lavohmig nett kreves det endring av vernløsninger som kan sørge for hurtig utkopling. I henhold til FEF paragrafer som §2-7, §2-6, §4-3, §4-10 og §6-7 er det krav til isolasjonsnivå, berøringsspenning og utkoplingstider. Siden kravene om berøringsspenning og induisert spenning er tidsavhengige, er det som regel mest gunstig med så kort frakoplingstid som mulig. Et raskt vernsystem vil komme kundene til gode pga økt leveringskvalitet. Skal man heller jorde mastepunkter for å redusere berøringsspenning, vil dette ikke ha direkte effekt for kundene. For et regionalnett på størrelse med BKK og Sørnettet estimeres en overgang til direktejordet nett til ca 40-50 mill.kr for vernsystem og vernsamband.

Under forutsetning av at eksisterende distansereleer kan brukes til å kople ut enfasefeil, er det bare nødvendig å anskaffe et spesielt overstrømsrelé med invers tidskarakteristikk av samme type som brukes i 300 og 400 kV. Dette skal brukes til utkopling av høyohmige enfase feil, og det trengs ett relé per linjeavgang[31].

Med så begrenset feilstrøm som det er ønskelig å ha både av hensyn til televerkets linjer og jordpotensial ved stasjoner og i master, må det anbefales moderne distansereleer [31]. En slik utskifting begynte på 90-tallet for å få nøyaktigere og sikrere reléer. Der hvor dette ikke er gjort, blir kostnaden til nye reléer minst dobbel så høy som for jordfeilreléene alene [31].

### 6.1.4 Kostnader til nye jordliner og bedre jording i stasjoner

I en del regionalnett er det i dag en rekke tremaster som ikke har gjennomgående jord, og en del av de igjen er antatt å være ujordet. Ved en omlegging bør det vurderes om det er hensiktssig å legge gjennomgående jord eller jorde mastepunktene[12]. Dette for å sikre en sikker utkopling ved feil. Som regel vil det være snakk om store avstander i et regionalnett, noe som medfører store kostnader. I enkelte nett kan det også være at mastene er bygd slik at linene ligger akkurat på grensen til maksimal høyde over bakken. Her vil det ikke være mulig å legge gjennomgående jord mellom line og bakken fordi det da overstrider forskriftene om minimal høyde. Utbygger må da sette inn en ny mast og forhøye linen. Dette er kostbart og tidskrevende arbeid. Gjennomgående jord er en av de største kostnadene ved omlegging til lavohmig eller direktejordet nett.

På en annen side kan det i enkelte netter være lite aktuelt å henge opp nye jordliner. Det som er mest aktuelt for slike nett er å redusere jordmotstand i enkelte stasjoner ved å legge flere eller lengre jordelektroder ved master der det allerede ligger toppliner. Hvis innføringsvernet ikke er mer enn 1 km langt, har det liten hensikt å skifte line. Det skyldes at motstanden i stålline ikke kan være mer enn ca 1-2 ohm, som er relativt lite i forhold til det en normalt kan oppnå i jordmotstand [31].

## 6.2 Nytte ved overgang til lavohmig jording

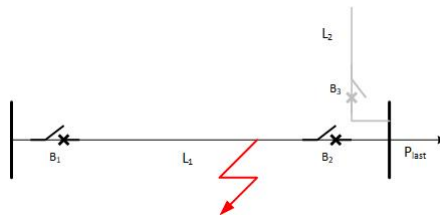
Det er vanskelig å si noe om nytteverdien rent økonomisk i motsetning til investeringskostnadene. Det viktigste i forhold til nytteverdiene knytter seg opp mot sikkerhet og driftsmessige forhold i nettene. Noen ulike nytteverdier kan være[31]:

- Muligheter for lavere energitap
- Redusere fremtidige investeringskostnader
- Lavere skadekostnader
- Annen nytteverdi

### 6.2.1 Lavere energitap

Endringen av KILE ved overgangen fra spolejordet til direktejordet er avhengig av:

- Radialt eller maskenett
- Hyppighet av enpolet jordfeil
- Hyppighet av feil som ikke kan slukkes av spole
- Størrelse på lastflyt på utsatte linjer
- Kundegruppe



Figur 34: Illustrasjon av maske/radialnett og kilekostnader

Figur 34 illustrerer en nett-del med en enpolet feil. I et direktejordet nett vil denne strømmen brytes ved at vernene slår inn. Hvis først kun den svarte linje  $L_1$  betraktes vil denne feilen medføre at  $B_1$  og  $B_2$  brytes, og som en konsekvens blir ikke effekten  $P_{last}$  levert til forbruker. Dette tilsvarer situasjonen i et radialnett. Men hvis også  $L_2$  tas med i betrakningen vil  $P_{last}$  kunne bli forsynt over  $L_2$ . Det vil si at strømforsyningen ikke avbrytes, tross feil på  $L_1$  og at  $B_1, B_2$  åpner seg for å slukke strømmen. Dette scenarioet fordrer naturligvis at verneplanen sørger for at  $B_3$  kobles ut ved feil på  $L_1$ . KILE skal gjenspeile den totale samfunnsøkonomiske kostnaden ved strømbrudd. Det kan illustreres ved den forenklete formelen:

$$KILE = P_L \cdot t_{brudd} \cdot K \quad (22)$$

hvor  $P_L$  er effekten som ikke blir levert til forbruker som konsekvens av feil,  $t_{brudd}$  er tiden det går før normal funksjon er gjenopprettet mens  $K$  er en konstant. I denne ligger flere forhold, hvorav de viktigste er; strømpris, tidsdifferensiering (mer eller mindre enn 3 minutter avbrudd), kundegruppe, tidspunkt på dagen og i året med mere.

Et spolejordet nett vil kunne slukke den enpolet feilen, og dermed ikke sørge for at det ikke blir noen KILE. Et direktejordet radialnett (kun  $L_1$ ) vil oppleve KILE. Denne kan bli betydelig selv med GIK. Et direktejordet maskenett ( $L_2$  er også med) vil ikke oppleve KILE. Hvor ofte denne situasjonen oppstår vil naturligvis ha innvirkning på hvor stor KILE det direktejordete radialnettet pådrar seg i forhold til det spolejordet. Hvis derimot feilen er av en karakter som gjør at spolen ikke klarer å slukke den, for eksempel stående jordfeil, vil det spolejordete nettet pådra seg langt høyere KILE enn det direktejordete radialnettet (og i alle fall maskenettet). Da må feilsøking og deleplan benyttes, mens i tilfellet med direktejordet nett detekteres feilen raskt og  $t_{brudd}$  blir relativt liten. Av 22 fremkommer det også at jo

større lastflyt man har på linjen, jo større blir KILE ved utfall. Hvorvidt det er en industrikunde eller også en av flere faktorer som vil spille inn. Et ekstremt tilfelle er hvis for eksempelvis et smelteverk ender opp med store mengder størknet aluminium som følge av strømprudd.

Ved å gå over til lavohmig kan man bespare energi i form av lavere tap. Alternativet til nett som Sørnettet er å dele det opp med et galvanisk skille. Det vil være tap både i transformatoren og i nettet grunnet at forbrukslasten fordeler seg på et mindre nett. Det er ikke usannsynlig at en oppdeling av nett som Sørnettet og Mørenettet kan føre til et ekstra tap på mellom 1-5 MW [31]. Med et tap på 1 MW fører det til en besparelse i nåverdi på ca 40 mill.kr, forutsatt at man bruker systemprisen på 247 kr/MWh (anno Juli 2017), en levetid på 40 år, og en diskonteringsrente på 4%.

En kan også redusere tapet i nettet ved å øke driftsspenningen. I et spolejordet nett vil ikke dette la seg gjøre uten å revurdere vern og isolasjonsnivå med tanke på de temporære overspenningene. Det kan bli kostbart å skifte ut enkelte komponenter i nettet. I et lavohmig jordet nett vil det derimot ikke være noen temporære overspenninger og isolasjonsnivået kan være det samme, selv med en spenningsoppgradering. Det kan tenkes at en kan øke driftsspenningen fra 132 kV til 145 kV. Det vil evt. gi en spenningsøkning med ca 5 %, og det vil redusere tapet i nettet med cirka 10 % [31]. Hvis en legger til grunn at totalt tap i nettets linjer er ca 30 MW i tunglast (Mørenettet 1995 [31]) blir da tapsreduksjonen 3 MW. Det blir, omgjort til nåverdi, ca 135 mill.kr. Det må her presiseres at det er fiktive tall og at det ikke er undersøkt om forholdene ligger til rette for å oppgradere spenningen. Det vil sannsynlig ligge en del restriksjoner i reguleringsområdene til de forskjellige transformatorene og kostnaden for å bytte eller omplassere disse vil kunne overgå nytten.

### 6.2.2 Reduserte fremtidige investeringskostnader

Det kan være vanskelig å anta hvor mye en kan spare av fremtidige investeringskostnader, men det er et par punkter som bør trekkes frem. Det vil være en nytteverdi i:

- Billigere komponenter i lavohmig jordet nett.
- Senere investeringer som kan unngås.

Det siste punktet underbygges ved at en slipper å investere i nye petersenspoler for eksempel i forbindelse med utbygging av nye sjø- eller jordkabler. En dykkspole på 200 A kan koste opp mot 2 mill.kr [31]. Komponentene som anvendes blir billigere på grunn av reduserte temporære overspenninger ved jordfeil, slik at all fremtidig investering i komponenter, blir en besparelse. Dette gjelder spesielt overspenningsavledere og isolatorkjeder. Til sammenligning bør man enkelte steder i et spolejordet nett vurdere å bruke et isolasjonsnivå på 750 kV for avledning av lyn, noe som i et lavohmig nett vil være 550 kV eller 450 kV.

### 6.2.3 Lavere skadekostnader

I spolekompenserte nett med driftsspenning på 132 kV har en hatt høy skadesannsynlighet for komponenter [32]. Det er enkelte nett som er mer utsatt for dette enn andre, spesielt nett med mye kabler og som drives nær resonans. Ved jordfeil vil spenningen, som nevnt tidligere, øke med 1.7 pu. I noen tilfeller har det også blitt observert en økning på 2.2 pu. Når disse feilene blir liggende i flere minutter, av og til i over en time, er det klart at påkjenningene kan bli store, og desverre være ødeleggende. Erfaringer hentet fra nett som sørnettet viser tilfeller der komponenter havarerer totalt, strømtransformatorer eksploderer og ødelegger andre komponenter i stasjonene. En er heller ikke lenger klart om komponenter grunnet stor påkjenning er dimensjoner for det samme isolasjonsnivået lengre. Det kan likevel antas at mange komponenter eldes i betydelig grad under de påkjenningene som er nevnt ovenfor [31]. Det kan da forventes at neste gang kreves det lavere temporære overspenninger for å ødelegge ytterligere komponenter. Ved lavohmig jordet nett vil det ikke være slike overspenninger og det vil gi mindre skader i nettet. Det avhenger såklart av hvilke komponenter som har vært valgt.

#### 6.2.4 Annen nytteverdi

I et lavohmig jordet nett, vil delene med feil bli automatisk utkoplet ved jordfeil. Dette betyr at det vil bli bedre personsikkerhet og enklere for driftspersonalet å lokalisere varige feil. Det vil også være en viss verdi i salg av spoler og andre komponenter. Det vil også bli større leveringskvalitet, i den forstand at jordfeil i mindre grad får gå over til kortslutning mellom fasene eller dobbel jordfeil [31]. Det vil forårsake påkjenning på brytere og større spenningsdip.

#### 6.2.5 Annen Løsning

En annen løsning er å skille opp nettet, slik det er forklart tidligere i avsnitt 4.1. Det er imidlertid usikkert hvor stor kostnadene er for å lage et skilletransformator-anlegg

### 6.3 Oppsummering

BESKRIVELSE	KOSTNAD	NYTTE
Vern av telenett	ca 15 000 - 80 000 kr/km	
Reaktor	ca 0.2 - 0.3 mill.kr	
Nytt Relévern	Avhengig av nett, ca 40-50 mill.kr	
Nye jordline	Størst kostnad, vanskelig å sette tall.	
KILE	Vanskelig å sette tall	
Lavere energitap		ca 40 mill.kr, ca 40 år levetid
Økt driftspenning		ca 135 mill.kr 40 år levetid
Reduserte fremtidige investeringskostnader		usikkert
Lavere skadepkostnader		uvisst, kanskje 1-10 mill.kr avhengig av nett

Tabell 9: Oversikt over kostnad og nytte.



## 7 Systemjording i Norge og utlandet

I regionalnettet benyttes primært spolejording, sekundært isolert nullpunkt. Noen steder har man også direkte eller lavohmig jording. Hvilken løsning som blir valgt avhenger mye av spenningsnivå og nettets utstrekning, men som det skal vises i dette kapitlet er spørsmålet mer komplekst enn at kun disse faktorene bestemmer foretrukken jordingsmetode. Nettens form og utstrekning varierer også mye, og dermed også forholdene som vektlegges i systemjordingsspørsmålet. I Finnmark har man et for det meste radielt nett tilknyttet transmisjonsnettet på forskjellige steder. I Oslo, Akershus og Østfold er regionalnettet et maskenett over til sammenligning små avstander. At på til har regionalnettet i dette området en relativt svært høy andel kabler (17% mot nasjonalt snitt på 4%)[33]. De store geografiske og klimatiske forskjellene spiller inn. Isolasjonsfasthetene kan svekkes av mye snøfall og føre til hyppige overslag, graden av hardt vær kan avgjøre hvilken feiltype man opplever og bebyggelse kan legge begrensninger på jordfeilstrømmens styrke og varighet. Dette er bare noen av de eksterne faktorene som vil avgjøre hvordan, og i tilfelle i hvor gunstig det er å bruke spole- eller direktejording som løsning. Hvert område har sine utfordringer og erfaringer. Erfaringene er på grunnlag av utredningsarbeid, KSUer og mailkorrespondanser med KSU-ansvarlig i nettområdet.

Dette er *ikke* en utfyllende liste over situasjonen rundt omkring i landet, snarere noen konkrete eksempler på hvor forskjellig nettområder kan være med tanke på spørsmålet om systemjording. Ikke alle KSU-ansvarlige er kontaktet direkte, i noen tilfeller er avsnittene basert kun på informasjon i KSU og rapportarbeid gjort tilgjengelig for NVE.

### 7.1 Sørnettet - Store utfordringer med spolejording

Sørnettet er et særegent nett med tanke på systemjording. På slutten av 70-tallet fikk det sitt navn etter at datidens region 4 måtte deles i en nord- og sørdel på grunn av høye jordfeilstrømmer. Dette problemet har til dels vedvart i Sørnettet, og ble møtt med spolejording i resonansdrift. Høye overspenninger og driftforstyrrelser gjorde at man rundt 2000 tok driften litt ut av resonans.

Hele 10% av regionalnettet ligger i kabler, i stor grad under vann. Disse utgjør omtrent 2/3 av den totale ladestrømmen. Statnett forventer også at ladestrømmen vil øke betraktelig i nær fremtid. Nettområdet opplever også tøft vær og utfordringer med salting og is på isolatorer. Transiente vern ikke har gitt gode resultater hva feildetektering angår.

DSB har som sommeren 2017 vedtatt at driften av Sørnettet er forskriftsstridig og har pålagt netteiere å gjøre tiltak[34]. Pålegget fra DSB kom etter et Statnett og nettselskapene i Sørnettet har, gjennom et prosjekt startet av Statnett selv, bedt DSB vurdere om nettets drift er innenfor forskriftene. Det vil likevel ta noen år før omlegging til direktejordet eller delt nett er tilfredstillende gjennomført. [1].

Den lange tiden Sørnettet har blitt driftet som et utfordrende nett i dette henseende, har ført til mye kunnskap rundt konsekvensene av en slik drift. Sentralt står det faktum at dagens spolejording ikke alltid slukker lysbuen tilfredstillende. Videre er det funnet fase-jord spenninger opp til 2.2 p.u. under stående jordfeil. Et annet problem er svært høye overspenninger ved fasebrudd. I friskt nett er det også gjort undersøkelser av fase-jords spenninger og funnet relativt store faseforskyvninger som har gitt utfordringer rundt spenningsnivå og isolasjon som nettet har blitt driftet med. Dette problemet har delvis blitt løst ved å forbedre forlegning av kabler med hensikt å redusere kapasitiv usymmetri. Det er også blitt påvist høyere enn forventet svekkelse i isolasjonsfastheten og levetiden til spenningstrafoene i Sørnettet, samt havarier i feilsituasjoner. Statnett sin Sørnettstudien [12] fra 2013 gjør en svært grundig gjennomgang av situasjonen i dag og medfølgende utfordringer. Her anbefales å gå over til direkte/lavohmig jording.

Sørnettet eies av 11-12 forskjellige netteiere, som gjør vedtak rundt endelig løsning utfordrende. Flere av nettselskapene mener det å dele nettet opp i flere galvanisk skilte deler er en bedre løsning enn å direktejorde [1]. Lofotkraft mener at et galvanisk skille kan være et alternativ til Statnetts ønske om endring til et lavohmig jordet nett. De kan da drifte nettet selv og ha kontrollen på fremtidige kostnader. Det er stor usikkerhet rundt hva kostnadene blir for hver enkelt nettselskap. NVE har på spørsmål fra Statnett vurdert det slik at Statnett i tilfelle ikke er ansvarlig for å betale skilletrafo [35]. Andøy Energi

må enten investere i et skilletrafoanlegg eller en jording av deres 132 kv linje. De mener det er feil at innbyggerne må ta kostnaden for at noen andre har gjort endringer i nettet andre steder. Da Andøy Energi bygde linja på 1980-tallet var den godkjent av NVE [36].

## 7.2 BKK og indre Hardanger - Tidlig overgang til lavohmig jording

BKK sitt 132 kV nett er lavohmig jordet, mens et annet, mindre 132 kV nett er isolert. 45-66 kV nettene har enten spolejordet eller isolert nullpunkt, avhengig av enkeltnettets utstrekning. BKK var blant de aller første i Norge som i deler av sitt nett la om fra spolejordet til lavohmig jordet. Motivasjonen til dette var at ladestrømmen økte raskt med flere kabler i nettet, og man så også for seg økt kabelandel i fremtiden. I utgangspunktet ble nettet delt for å omgå problemer med at distansevern løste ut under innsvingningsforløpet under enpolet jordfeil. Delingen var problematisk for forsyningen og begrensninger på overføring med ledige traseer[37]. I tillegg var BKK sitt nett av en slik karakter at kabelnettet ikke enkelt lot seg skille fra luftlinenettet. Datidens forskrifter regulerte at stående jordfeil nær telenett var tillatt å brenne i kun 5 sekunder. Dermed hadde BKK utfordringer ovenfor telenettet både med spolejording og lavohmig jording. Løsningen på disse problemene lå dels i raskere relévern i kraftnettet og ved at BKK betalte vernetiltak som Telenor gjorde i eget nett[27]. Et viktig moment som bidra til langt lavere kostnad enn først antatt, var en endring i reguleringene. Andre nærliggende svakstrømnett ble også vurdert. Samlet sett var tiltak med tanke på telenett likefullt en liten detalj i forhold til andre oppgaver som måtte løses[38]. I dag fungerer BKKs nett godt både med tanke på drift og leveringskvalitet. Siden nettet driftes masket fører ikke enpolet feil til KILE og luftledningene har automatisk gjeninnkobling. BKK har gjort omfattende dokumentasjon av prosessen tilgjengelig for NVE.

## 7.3 Buskerud - Erfaringer fra underkompansert drift

Regionalnettet er her for det meste spolejordet og overkompansert. Mulighetene for å havne i resonans ved utkobling av enkelte anlegg vurdert lite sannsynlig. Det har likefullt oppstått feil i forbindelse med kobling som antas skyldes resonans. Ved resonans er det enkeltkomponenter som spenningstrafoer og gjennomføringer som er utsatt, og det er disse som må dimensjoneres rett med tanke på resonans. I Buskerud er erfaringene med Wicher-releer dårlige, og det må som oftest benyttes deleplan for å finne og koble ut stående jordfeil. Glitre Energi sin vurdering er at det ikke *alltid* er nødvendig å drifte nettet overkompensert. Så lenge forskriftskrav rundt jordfeilstrømmer og lignende overholdes, samt hver enkeltsituasjon vurderes bør det være forsvarlig å drifte underkompensert, er Glitre sin oppfatning.

## 7.4 Hedmark og Oppland - Gode erfaringer med spolejording

Hedmark og Oppland kan sies å være den rake motsetningen av Sørnettet hva spørsmålet spolejording kontra direktejording angår. I likhet med Sørnettet er nettet både i 132 kV og 66kV for det meste spolejordet, men erfaringene er av en helt annen art. Terrenget er i motsetning til kystområdet lett å bygge i, været er stabilt og man har ingen utfordringer med salting av isolatorer. Nettet har også vært stabilt i mange år, og det er ikke forventet noen store endringer i årene som kommer. Kabler utgjør kun litt over tre prosent av det totale nettet, og disses bidrag til den totale ladestrømmen er mer beskjedent enn i Sørnettet. Trolig grunnet mindre usymmetri og større andel resistiv avledning (se 3.4.4) gir nettet i Hedmark og Oppland bedre demping i resonans. Det er ikke blitt opplevd tilsvarende overspenninger som i Sørnettet, ei heller ved fasebrudd. I Hedmark og Oppland har man heller ikke opplevd slitasje i transformatorer eller tap av måletrafoer som konsekvens av overspenninger og feil.

I dette nettet har man også hatt blandede erfaringer med transiente vern, men med økt erfaring og modernisering av anleggene øker nytten av disse for å detektere jordfeil stadig. Vernene fungerer dårligst ved stasjoner med spole. Spolejordingen synes også til å fungere godt, og det er sjelden deleplan og detektering må benyttes. I 22 kV nettet har man fått redusert antall strømbrudd ved å gå over til spolejording. Dette tilskrives at feil som tidligere ble vellykket koblet med GIK nå blir tatt hånd om av spolen.

## 7.5 Møre og Romsdal - utfordringer knyttet til momentanreserve i delt nett

132 kV nettet i nettområdet inngår i et større nett som er del av flere KSU-områder. Dette hadde per 2011 en total jordfeilstrom på 2250 A, med spoleytelse på cirka 3200 A. Som løsning på ytterligere vekst av nettet trekkes en ytterligere deling av nettet, som allerede består av flere galvanisk skilte områder, frem. En utfordring med oppdeling av nett var i et spesefikt område manglende momentanreserve ved utfall av en linje. I dette tilfelle ble det vurdert å knytte sammen to nettsegmenter med en skilletrafo. Dette ble imidlertid frafalt da problemet med manglende momentanreserve ble løst med senere tilkobling av annen nettdel.

## 7.6 Nord-Trøndelag - Lite nett og god spolekoordinering

Dette nettet er forholdsvis lite og består kun av to radialer. Per nå benyttes spolejording som fungerer godt. Gitt nettets struktur er det heller ikke overraskende at Wicher-releene fungerer godt. Fordelingen av kostnadene for spoler har fungert godt i dette nettområdet. Det plasseres felles spolekapasitet i Statnetts stasjon, og denne bekostes av underliggende netteiere. Hvis en utbygging medfører behov for større spoleytelse, så er det den netteieren som er ansvarlig for utvidelsen som betaler for dette.

## 7.7 Oslo, Akershus og Østfold - Konflikt med telenettet og mye erfaring med vern

Det aller meste av regionalnettet i denne regionen er spolejordet. Et interessant unntak er 132 kV kabelanlegget i Oslo, som erstatter gammelt isolert 33 kV og 50 kV nett. Omleggingen til 132 kV ble påbegynt i 1990, delvis motivert av ønske om å redusere graving i Oslos gater. I 2009 gikk ble reaktansjording valgt for å unngå konflikt med Telenors telenett. Aspektet rundt induerte spenninger i nærliggende telenett har blitt diskutert og gjennomgått også ved legging av nye høyspentkabler [39]. Utover jordingsmetoden/størrelse på strømbegrensende reaktans spiller her minimumavstand til Telenors telenett en stor rolle.

I det øvrige nettet, hvor det i de fleste tilfeller har spolejording, brukes forskjellige vern aktivt for å detektere stående jordfeil. I tilfeller hvor deleplan likefult må deles opp, har man god oversikt over ladestrøm og spoler til å unngå å koble seg til resonanspunkt eller lignende.

## 7.8 Sør-Rogaland - Utbygging med spoler mulig, men anbefales direktejording

Per idag er 132 kV nettet spolejordet. Men det er planlagt en del oppgraderinger og utbygninger, og økt andel av jordkabel er forventet. Lyse har fått gjort en utredning av konsekvensene for utbygging med tanke på systemjording og gjort denne tilgjengelig for NVE [13]. Denne er igjen bygget på EFIs arbeid for BKK [14]. Det konkluderes med at selv om det teknisk mulig å utvide 132 kV nettet uten først å endre systemjording, bør endring til lavohmig jording være en prioritert oppgave for Lyse Elnett som eier nettet. Dette begrunnes i at å fortsette med spolekompansering på sikt kan medføre ekstra kostnader og ekstraarbeid. Videre vil ladestrømmen bli for stor for at spolejording kan brukes hvis samtlige av tiltak som Lyse ser for seg i nettet gjennomføres. Det samme gjelder for utredningsarbeidet Telenor har utredet konsekvenser og kostnader rundt tiltak i telenettet ved endring av systemjording i nettet slik det ser ut idag. Telenor konkluderte med at nødvendige tiltak med tanke på telenettet ikke er av betydelig størrelse [40].

## 7.9 Sør-Trøndelag - Påvirkning på telenettet resulterer i spolejording

Regionalnettet på både 66 kV og 132 kV er spolejordet og driftes i flere galvanisk skilte nett. TrønderEnergi Nett (TEN) har ikke overraskende forskjellige erfaringer i to nettseksjoner med mye nett, og øvrige seksjoner hvor kabelandelen er langt mindre. Tross godt fungerende Wicher-releer gjør et sammenmasket nett at det tar relativt lang tid å detektere en stående jordfeil. Utfordringene i disse delen er primært

det store behovet for spoler for å kompensere jordfeilstømmen, da antall feil er relativt liten. I de øvrige nettdelene er det flere feil, men feilsøking går lettere og de fleste feil slukker seg selv. Det er på et par steder blitt vurdert å direktejordet noen 132 kV linjer, men landet på spolejording av bekymring for mulig påvirkning av telenettet. Disse avgjørelsene ble imidlertid gjort uten et større utredningsarbeid og det er ifølge TEN er mulighet for at direktejording likevel hadde vært det beste alternativet. I motsetning til for eksempel Sørnettet opplever man i Sør-Trøndelag utfordringer i noen nettseksjoner utfordringer knyttet til fordeling av spoler. For å unngå for store jordfeilstømmer i én enkeltspole, bør spolekapasiteten være fordelt. Men i dette tilfellet blir antall tilgjengelige nullpunkter begrenset av transformatorenes nullpunktsytelse.

## **7.10 Sunnhordland og Nord-Rogaland - Delte nett og isolerte kabelnett på 22 kV-nivå**

66 kV nettet er spolejordet, mens 300 kV nettet er direktejordet. Samlet sett er ladestrømmen betraktelig, men nettet er delt i normalt fem galvansik skilte nett. Disse har betraktelig forskjell i ladestrøm, og følgelig også forskjellig spoleytelse. Den nåværende konfigurasjonen fungerer godt for SNR, og overgang til direkte/lavohmig jording er ikke vurdert i regionalnettet. I 22 kV delen på distribusjonsnettet kan det derimot være aktuelt å skille kabelandelen av nettet fra linjene og drifte dette med isolert nullpunkt. Dette vil imidlertid føre med seg store investeringer siden det også er en del luftledning i 22 kV-nettet.

## **7.11 Vestfold og Telemark - skal utrede direktejording**

132 kV nettet er driftet spolejordet, mens på 66 kV nivå er et konsesjonsområde som har isolert nullpunkt, og ett med spolejording. I Telemark er det god spolekapasitet, men her oppleves det også større utfordringer med Wicher-releer enn i Vestfold. Den noe lave spolekapasiteten i Vestfold er planlagt utbedret med ny spole. Selv om Skagerak Nett ikke frem til nå har vurdert noe annet enn spolejording, jobber de nå med en utredningen av direktejording.

## **7.12 Andre land - Primært direkte og lavohmig jordet på spenninger > 30 kV**

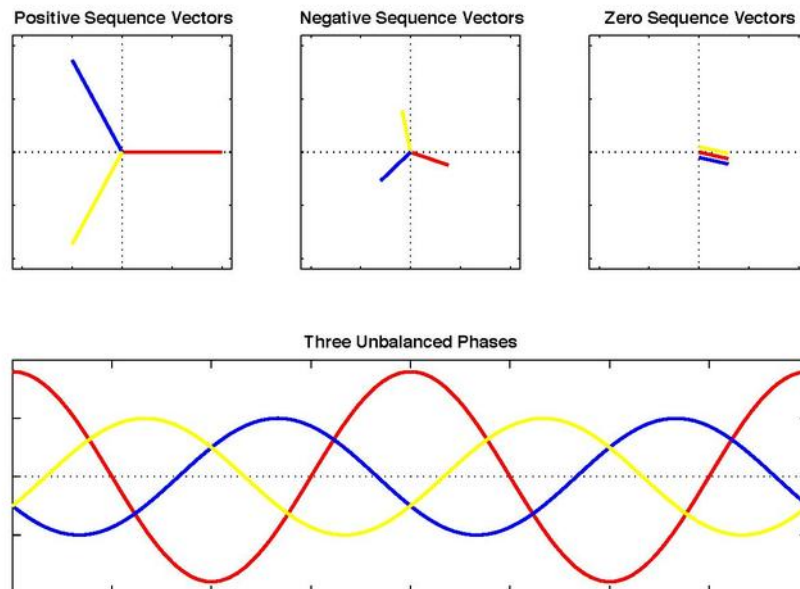
På spenningsnivåer tilsvarende det norske regionalnettet benyttes primært direkte- eller lavohmig jording.

- I Sverige er 70 kV nett fortsatt spolejordet. Dette skal imidlertid avvikles til fordel for direktejordet 132 kV nett.
- I Finland er 400 og 200 kV nettet direktejordet, mens 110 kV nettet er lavohmig jordet. På lavere spenningsnivåer, typisk 5-35 kV er spolejording oftere brukt.
- Italia begynte på midten av 2000-tallet et større prosjekt med å installere automatisk styrte Peterson-spoler på spenningsnivåer 10-20 kV, som tidligere var drevet isolert [41].
- Kina[22] og Irland[42] benytter spolejording på spenningsnivåer i nett over 30 kV.

# Vedlegg

## A Modell av trefasesystemer med jording og feil

Analysen av usymmetriske systemer som fase- eller jordfeil representerer gjøres enklere ved bruk av symmetriske komponenter.



Figur 35: Et usymmetrisk system dekomponert i symmetriske komponenter.[4]

Gjennom kompleks-linær transformasjon kan et usymmetrisk system beskrives gjennom pluss, minus og null-system. Disse betraktningene gjelder for spenninger og impedanser. En nærmere matematisk forklaring og utledning av feilstrømmer, spenninger og impedanser er for eksempel å finne i Roepers [43]. Regneeksempler med parametere for blant annet linjekapasitans og korreksjonsfaktor er å finne i [44]. Tilhørende regneark gir også feilstrømmer ved trepolet kortslutning og enpolet jordslutning i IT-nett på lavspenningsnivå.

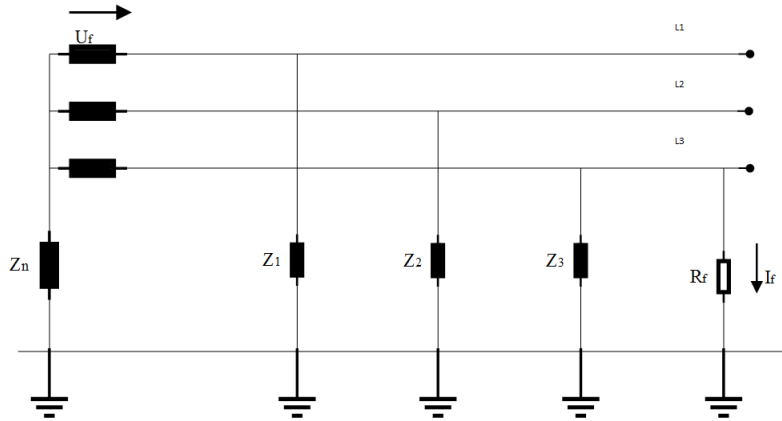
### A.1 Enpolet jordfeil

I figur 36 referer  $Z_n$  til overgangsmotstanden mellom nøytralepunktet og jord,  $U_f$  til fasespenningen,  $Z_{1-3}$  til impedansene mot jord,  $R_f$  til overgangsmotstanden for feilstrømmen. Her er  $Z_n$ ,  $Z_+$ ,  $Z_-$  og  $Z_0$  for komplekse impedanser å regne. Jordfeilstrømmen er gitt ved

$$I_f = 3I_0 = \frac{3U_f}{Z_+ + Z_- + Z_0} \quad (23)$$

I systemer som i i feilfri tilstand er symmetriske vil  $Z_+ = Z_-$  og beskrive pluss-/minusimpedansen i systemet sett fra spenningskilden. Denne kan bestå av både liner og komponenter som brytere, trafoer eller generatorer. Nullsystemimpedansen vil bli

$$Z_0 = 3Z_n || Z_{fj} || 3R_f \quad (24)$$



Figur 36: Enpolet jordfeil i et generisk trefase-system.

I de fleste tilfeller vil  $Z_{fj}$  kunne beskrives som ren kapasitiv siden den resistive strømmen blir liten da den resistive admittansen er betraktelig mindre enn kapasitansen.

$$Z_{fj} \approx Z_C = \frac{1}{j\omega C_{fj}} \quad (25)$$

Videre har ikke overgangsmotstanden avgjørende virkning på feilstrømmens størrelse, slik at man kan se bort ifra  $R_f$ .

$Z_+$  og  $Z_-$  er gitt av nettet, men fra 24 fremkommer det at ved å manipulere jordingen,  $Z_n$ , kan nullfølgeimpedansen og dermed feilstrømmen reguleres. I isolert nett og spolejordet nett vil man som regel kunne regne med at  $Z_0 \gg Z_+, Z_-$ . For henholdsvis isolert og spolejordet nett blir da feilstrømmene:

$$I_f \approx 3U_f j\omega C_{fj} \quad (26)$$

$$I_f \approx 3U_f \left( j\omega C_{fj} - \frac{j}{3\omega L_n} \right) \quad (27)$$

Her er  $L_n$  spolens induktans for et spolejordet nett. I direktejordet nett vil  $Z_n \approx 0$  og dermed  $Z_+, Z_- \gg Z_0$  som igjen vil gi høy jordslutningsstrøm som kan sees fra ligning 23

### A.1.1 Overspenninger fra enpolet jordfeil

Når den syke fasen blir knyttet til jord, enten direkte eller gjennom overgangsmotstand, vil nullpunktet forrykkes. Dette kan sees gjennom KVL over spolen, den syke-fasevindingen og spenningen over feilstedet som gir:

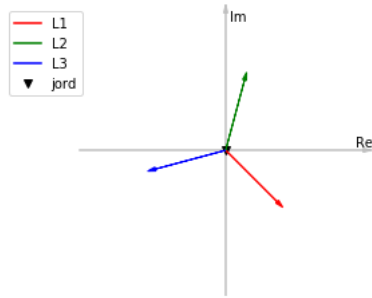
$$U_0 = U_R - I_f R_f \quad (28)$$

Hvor  $R_f$  er overgangsmotstanden og  $U_R$  i dette tilfellet er den syke fasen. Her er det verdt å observere at  $I_f R_f$  vil stå  $90^\circ$  på  $U_0$  da  $I_f$  er en kapasitiv nullfølgestrøm.

Med det økes fase-jord spenningene på de friske fasene som vist i figur 38 og 39.

I figur 39 er  $R_f$  gjort langt større enn det man normalt kan forvente for illustrasjonens skyld.

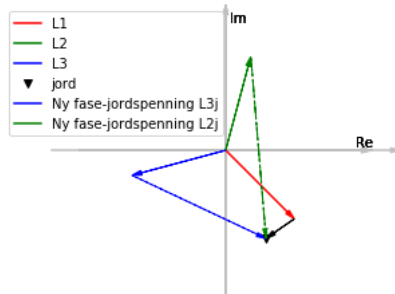
Lignende forhold vil gjelde for trepolet kortslutning eller flerfaset jordfeil. Slike feil kan opptre som følge av overspenninger fra enpolet jordfeil og føre til utkobling. En inngående, matematisk innføring i metodikk for å finne overspenninger er å finne i [45]



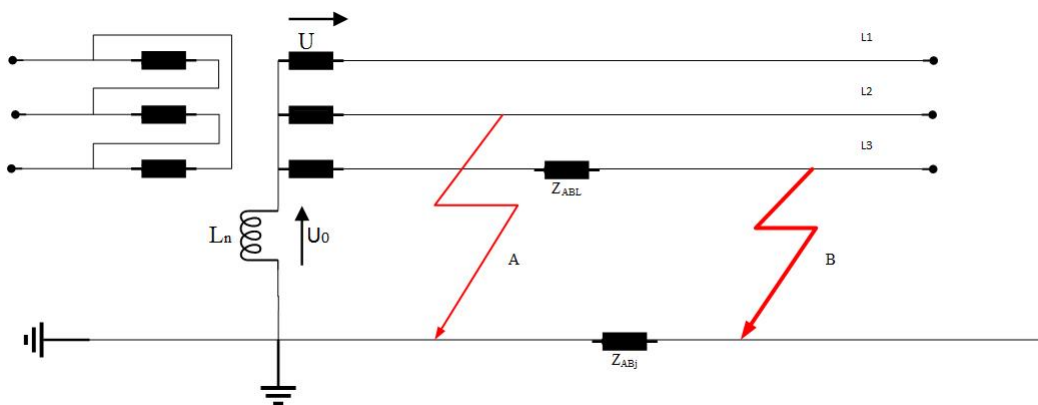
Figur 37: Friskt trefasesystem før feil.



Figur 38: System med enfase jordfeil uten overgangsmotstand



Figur 39: System med enfase jordfeil med overgangsmotstand



Figur 40: Dobbelt jordfeil

## A.2 Dobbel jordfeil

Dobbel jordfeil er ofte en konsekvens av en enpolet jordfeil hvor spenningsstigning mot jord på de friske fasene stiger. Dette kan føre til overslag, og dermed har man jordfeil på to forskjellige steder og to forskjellige faser som vist i 42

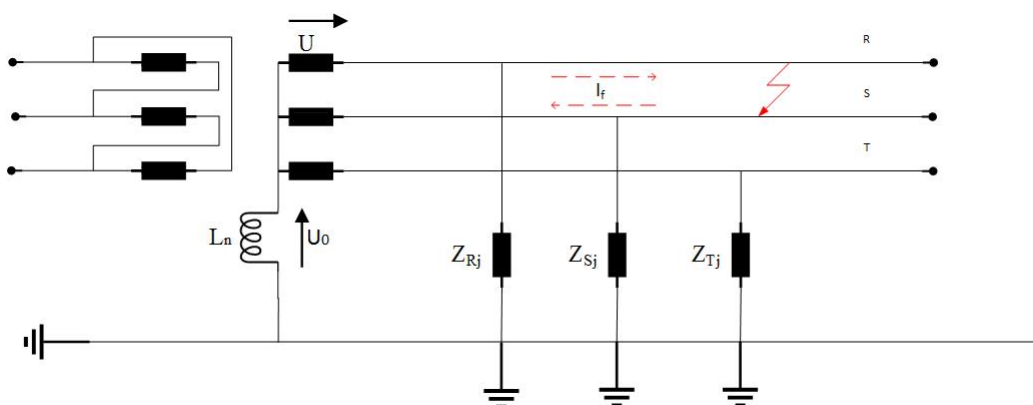
Feilstrømmen er her gitt ved:

$$I_f = 3I_0 = \frac{3\sqrt{3}U_f}{6Z_{+A} + 2Z_{+AB} + Z_{0AB}} \quad (29)$$

$2Z_{+AB}$  og  $Z_{0AB}$  henspiller på henholdsvis pluss og nullfølgeimpedansen mellom feilstedene. Forutsetter man ideel jord, er denne kun avhengig av linjeimpedansen og proporsjonal med avstanden mellom feilstedene.  $Z_{+A}$  henspiller på impedansen fram til feilstedet A. I tillegg til lineimpedansen må her trafoens impedans, da referert til sekundærsiden, tas med. Ligning 29 er kun ment som en illustrasjon, for å fastlå verdiene må man gå til inngående teknisk litteratur og samle komponentdata.

Feilstrømmen vil være langt større enn ved enpolet jordfeil. Størrelsesorden på denne strømmen vil være mindre enn topolet feil, eller topolet jordfeil, men likefullt kunne utgjøre et problem for blant annet påvirkning i telenettet. Impedansenes karaktere, som ved denne feilmodus ikke lenger er rene kapasitive verdier, gjør at spolen mister sin funksjon som slukkemekanisme, og dermed må deleplan og lignende benyttes for å koble ut denne typen feil.

## A.3 Topolet feil



Figur 41: Topolet feil

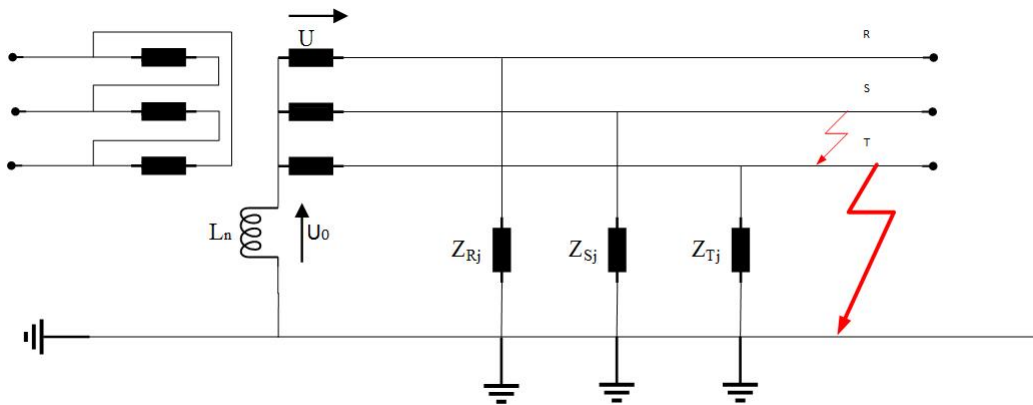
Feilstrømmen er gitt av

$$I_f = \frac{3U_f}{Z_+ + Z_-} \quad (30)$$

Som det fremkommer av 31 vil feilstrømmen kun være avhengig av pluss- og minusfølgeimpedansene. Disse er som tidligere bestemt av impedansene i feilkretsen og som regel vil man ha  $Z_+ = Z_-$ . Konsekvensene av dette er:

- Det vil gå langt høyere strømmere enn ved enpolet jordfeil for spolejording eller isolert jord.
- Nullfølgeimpedansen  $Z_0$  og dermed jordingsimpedansen  $Z_n$  vil ikke påvirke feilstrømmen. Dermed er det i denne feiltypen ikke jordingssystemet som begrenser feilen, og effektbryterene må bryte feilstrømmen.
- Denne feiltypen vil ikke i betydelig grad ha konsekvenser for induksjon i telenettet fra luftlinjer.





Figur 42: Topolet jordfeil

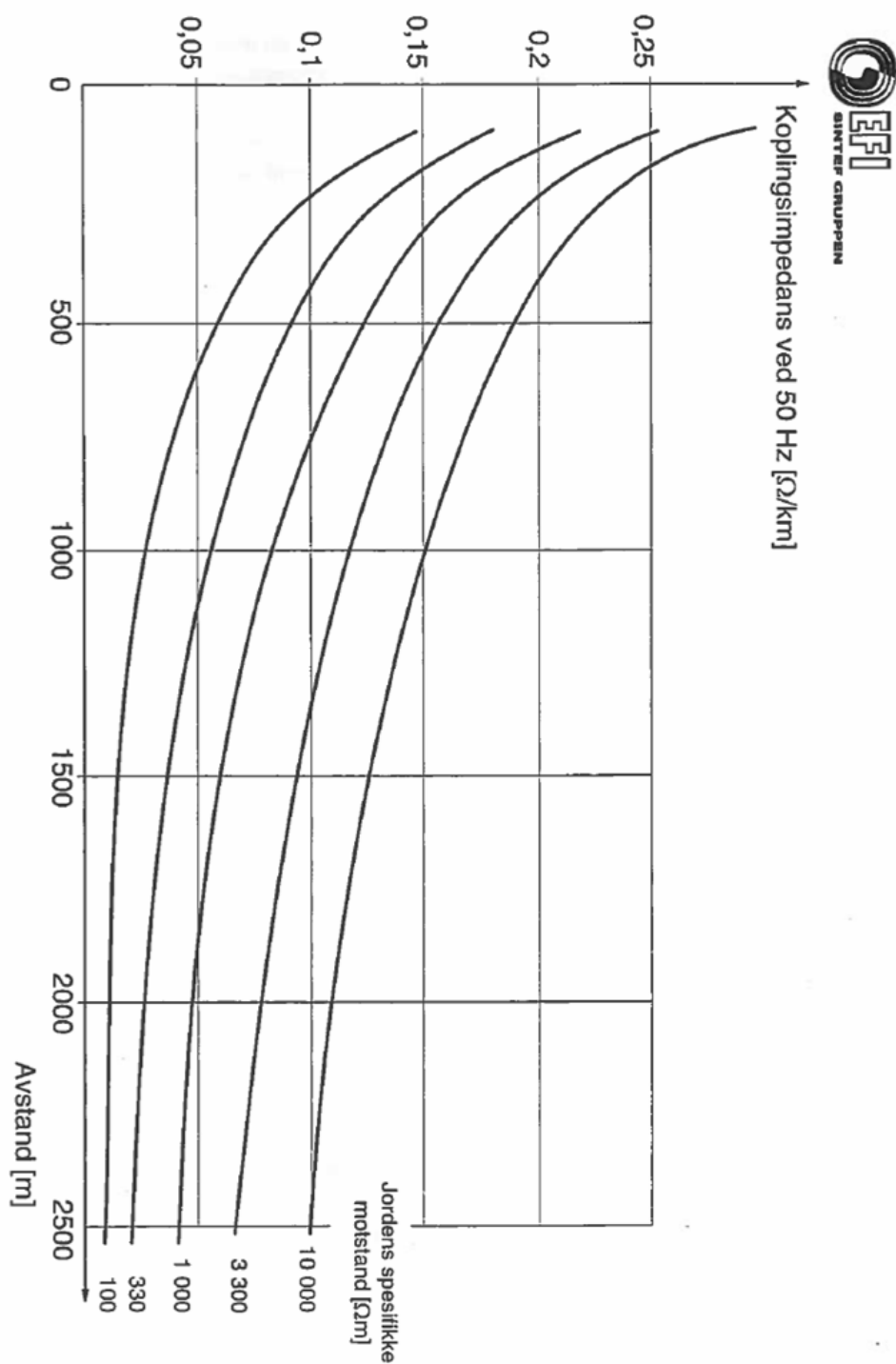
#### A.4 Topolet jordfeil

Feilstrømmen er her gitt ved:

$$I_f = 3U_f \frac{Z_0 Z_-}{Z_+ Z_- + Z_- Z_0 + Z_0 Z_1} \quad (31)$$

Topolet jordfeil kan ofte være en konsekvens av enpolet jordfeil. I kontrast til topolet feil vil det man her ha feilstrøm i jord, samt en påvirkning av nullfølgeimpedansen og dermed jordingssystemet. En annen relevant feiltype hvor jordingssystemet spiller en rolle er overslag fase-jord på to forskjellige linjer, såkalt dobbel jordfeil. Her vil også jordresistiviteten spille inn i impedansene.

B Diagram til utregning av induisert spenning i nærliggende telenett



Figur 43: Diagram for bestemmelse av koplingsimpedans mellom kraft- og teleledning ved 50 Hz som funksjon av avstand mellom parallellførte ledere. Spesifikk jordmotstand er parameter. [5]

## C Jordfeilvern

Vern og relèer faller også inn under systemjording siden vernene er de som skal fysisk detektere jordfeil. Temaet vern og relèer er omfattende, men her blir det grovt gjengitt. FEF § 4-10 (Vern, kontroll og hjelpesystemer) sier at *Installasjoner skal ha nødvendige hjelpesystemer og utstyr for overvåking, kontroll, regulering og beskyttelse, slik at drift, gjenoppretting av funksjon og vedlikehold kan gjennomføres på en effektiv og sikker måte.*[30]

Denne forskriften legger et grunnlag for å bruken av vern og relèer, samt effektive kontrollanlegg. Det er viktig for å sikre nettet mot både skade og personsikkerhet. Man har ulike vern for å sikre ulike deler av nettet. Det er visse krav som må være oppfylt for et beskyttede relè. Hvis de ikke fungerer som de skal, kan netteier tape store summer, og det kan være fare for personskader.

Et beskyttenderelè må være[46]:

1. **Pålitelig.** Hvis ikke jordfeilvern oppdager en jordfeil, vil den ikke gjøre noe.
2. **Selektiv.** Delen av kraftnettet som er utkoplest ved en feil, skal være så liten som mulig.
3. **Rask.** For å redusere skade.
4. **Billig.** Det skal være rimelig å vedlikeholde og kjøpe jordfeilvern.
5. **Brukervennelig.** Instillingen av vernet skal være enkelt å gjøre.

Det er ikke nødvendigvis krav om automatisk ukopling i et kraftnett som er spolejordet eller isolert. Når en jordfeil oppstår vil feilstrømmen, spesielt i et spolejordet nett, være så liten at man må implementere relèer som er sensitive nok til å detektere jordfeilen.

Relèer som brukes til dette er[46]:

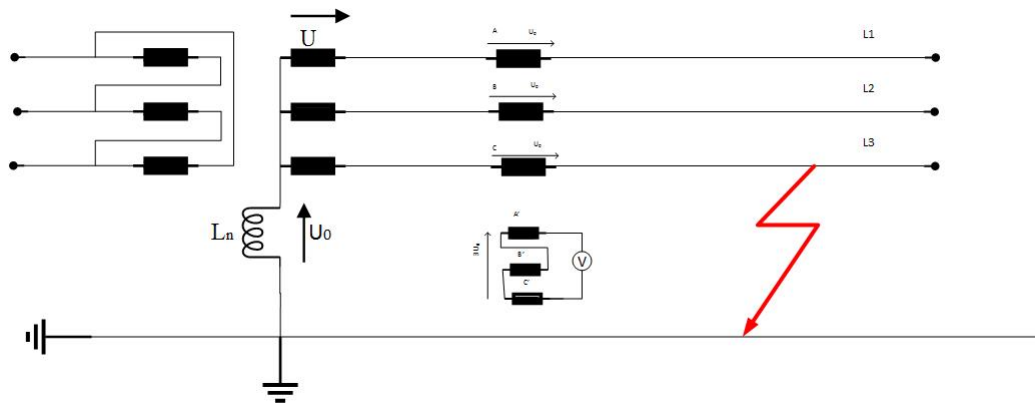
- Sumstrøm-transformator.
- Nullspenningsrelè.
- Wischer relèer.
- Retningsbestemte relèer.

### C.1 Nullspenningsrelè

Et nullpunkt spenningsrelè brukes normalt for å detektere jordfeil i spolekompenserte og isolerte nett. Det er et enfase spenningsmålede relè som er tilkoplest en åpen deltavikling på en spenningstransformator. Under normale forhold vil nullpunktet spenning i transformatoren ha jordpotensial. Det betyr at  $U_n \approx 0$ , som igjen betyr at  $U_0 \approx 0$ .  $U_0$  vil være den samme uansett hvor i nettet man måler. Ved en jordfeil vil  $U_0$  stige og relèet vil detektere feilen. Det vil si at den måler om det er en endring i nullpunktspenningen.[46] Hvis nettet har relativt store 3. harmonier, bør dette tas hensyn til med innstillinger eller digitale/analoge filtre da 3. harmonier også er nullfølgespenninger.

Hvis relèet oppdager en jordfeil vil den ikke kunne si i hvor jordfeilen er. Her må man da bruke en koplingsplan for å seksjonere og selektivt kople seg frem til feilstedet, som nevnt i kapittel 4.2. Når man har koplest seg frem til feilstedet, og koplest det ut, vil spenningsrelèet nullstille seg. Deretter prøver man en gjeninnkopling, i noen tilfeller to. [46]

$U_0$ - vern blir som regel plassert på spenningssettende sider av en transformator (spolejordet eller isolert). Den skal ligge så nært transformatoren som mulig.  $U_0$  er den målte spenningen bak trekantkoplingen på en spenningstransformator. Ved full jordslutning måles det over de sekundære viklingene. Det er også mulig å beregne denne ubalansespenningen. Denne kalles  $3U_0$ . Vernene som bruker dette kan være upålitelige, og funksjonaliteten bør kontrolleres. Det gjelder alle vern som bruker  $3U_0$ , også jordfeil retningsrelèer. [2]

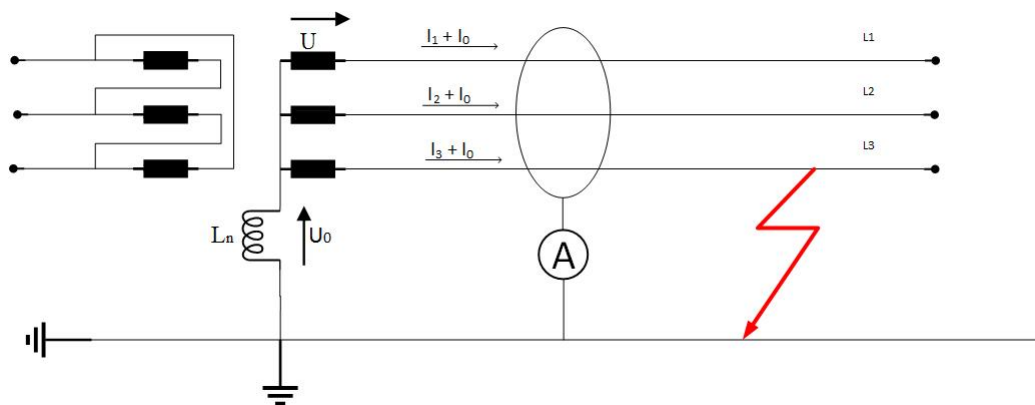


Figur 44: Nullfølgespenning målt med åpen deltavikling

## C.2 Sumstrømsrelè

Et jordfeilsvern fungerer slik at ved en jordfeil på en eller flere faser, vil en ubalanse registreres av en sumstrømstransformator. Ved normal drift, i et trefase-system, vil fasestrømmene være sånn høvelig i balanse. Ved en enfase, eller flerfase jordfeil, vil denne balansen og størrelsen på strømmene, endres dramatisk. En sumstrømstransformator registrerer denne ubalansestrømmen og via en elektromagnetisk bryter legger ut fase, eller linje. Denne funksjonen er ofte brukt sammen med automatisk gjeninnkopling (GIK)[47]. Jordfeilsvern kan bygges meget følsomme; 30 mA jordfeilstrom er en vanlig verdi for automatisk utkopling. Jordfeilsvernet fungerer dermed som vern både mot personskade og mot brann [47].

Sumstrømsrelè bruker nullstrømmen i systemet. Den kan være ulik i forskjellige deler i nettet. Ved jordfeil skal strømmen, i prinsippet bli så stor at den overstiger en gitt verdi i vernet. Problemet med dette vernet er at i spolekompenserte nett, kan strømmen bli så liten at den ikke overstiger denne verdien. Man vil da ha en stående jordfeil uten at vernet slår ut og det kan bli problemer med selektiv utkopling.



Figur 45: Skjematisk sumstrømsrelee

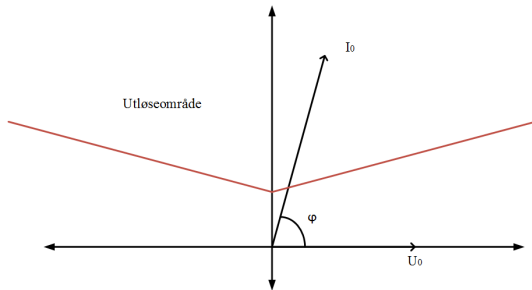
I figur 45 er summasjonen illustrert med én vikling rundt alle liner, men dette kan bli utført ved andre konfigurasjoner. Prinsippet beror på at linjespenningene  $I_1, I_2$  og  $I_3$  vil summeres til null, mens  $I_0$ -strømmene vil summeres til  $3I_0$  siden de er i fase (se vedlegg A.4).

## C.3 Retningsbestemt relè

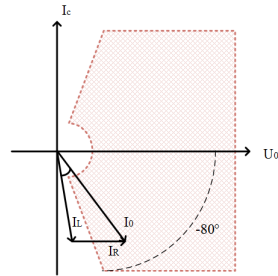
Retningsbestemte relèr bruker både nullspenningsrelè og et sumstrømsrelè for å detektere en jordfeil når den transiente innsvingingen er blitt stabil. Ved å bruke  $U_0$  som referanse, er det mulig å bestemme hvilken retning jordfeilen har. Det er da vinkelen  $\phi$ , mellom  $I_0$  og  $U_0$  som brukes for å bestemme retningen.

For et isolert nett vil  $I_0$  som regel være gitt av den kapasitive avledningen mot jord.  $I_f$  vil da ligge,

enten  $90^\circ$  foran  $U_0$ , eller  $90^\circ$  bak, avhengig av om jordfeilen er har retning forover eller bakover. Hvis jordfeilen ligger i retning forover, vil feilen ligge på linjen fremfor måleinstrumentet. Hvis jordfeilen ligger i retning bakover, vil feilen ligge bak måleinstrumentet og som regel på en annen linje. i et isolert system så brukes derfor  $I_0 \sin \phi$ -innstillingen er det samme som å måle den reaktive delen i en jordfeilstrøm.[46] En illustrasjon av innstillingen av vernet er illustrert i figur under.



Figur 46: Utløseområde for et retningsbestemt vern i et isolert nett.



Figur 47: Utløseområde for et retningsbestemt vern i et spolekompensert nett.

I et spolekompensert system, vil den reaktive strømdelen enten være innstilt for over -eller underkompensering, forklart i kapittel 3.4.1. Relèet vil da være innstilt i  $I_0 \cos \phi$ . Opp til 66kV benyttes det enkelte steder en motstand i parallell med spolen. Hensikten med denne er å gi feilstrømmen en stor nok resitiv komponent slik at retningsbestemte vern kan detektere feilen. Vernene kan stilles inn slik at man kan sikre utkopling når det trengs. I figur 46 og 47 er begge jordfeilene forover i systemet. Hadde  $I_0$  ligget speilvendt, ville jordfeilen vært bakover i systemet. I figur 47 er utløseområdet innstilt til 80 grader. En kan også se hvordan den resistive strømmen bidrar til utløsning. Dette kan være et problem i enkelte nett, der det er høy resistiv avledning mot jord, da vern kan utløses selv om det ikke er jordfeil.

## C.4 Wischer relè

Et Wischer relè baserer seg på å måle nullspenningen  $U_0$  under det transiente innsvingingsforløpet ved en jordfeil. Relèet fungerer slik at den måler i det øyeblikket jordfeilen oppstår helt til spenningen er stabil. Dette relèet signaliserer feil og kan brukes i kombinasjon med andre relèer for å finne ut akkurat hvor jordfeilen er[46]. Wicher-releers pålitelighet avhenger blant annet av i hvor stor grad nettet er masket (eventuelt ringnett) og nettets transiente egenskaper. Forskjellige nettområder har også varierende erfaringer med bruk av disse.

## D Forskrifter

Her ligger de viktigste forskriftene som omhandler temaet rundt systemjording.

### D.1 Forskrift om elektriske forsyningsanlegg

#### **FEF §2-1 *Prosjektering, utførelse, drift og vedlikehold.***

Elektriske anlegg skal prosjekteres, utføres, driftes og vedlikeholdes slik at de sikkert ivaretar den funksjon de er tiltenkt uten å fremby fare for liv, helse og materielle verdier.

Anlegg og utstyr skal være robust og egnet for alle påregnelige påkjenninger. Anlegg skal være fagmessig utført.

#### **FEF §2-6 *Beskyttelse mot farlig overspenning, underspenning og jordfeil.***

Anlegg skal være slik at det tåler normalt forekommende spenninger, inkludert overspenninger som normalt kan forventes.

Overføring av høye spenninger til lavspenningsanlegg eller andre gjenstander og anlegg skal unngås. Anlegg skal være slik at underspenninger, jordfeil eller bortfall av faser ikke medfører følgeskader så langt dette med rimelighet kan oppnås.

#### **FEF §2-7 *Overførte spenninger til telenett.***

Anlegg skal være slik at det i normal drift og i feilsituasjoner ikke blir overført for høye spenninger til elektroniske kommunikasjonsnett.

#### **FEF §2-11 *Overvåking og kontrollsystemer.***

Anlegg skal ha nødvendig overvåking, vern, regulerings- og kontrollutstyr slik at det fungerer etter hensikten og på en sikker måte.

#### **FEF §4-3 *Tiltak ved isolasjonsfeil i høyspenningsnettet***

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

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

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

#### **FEF §4-10 *Vern, kontroll og hjelpesystemer***

Installasjoner skal ha nødvendige hjelpesystemer og utstyr for overvåking, kontroll, regulering og beskyttelse, slik at drift, gjenoppretting av funksjon og vedlikehold kan gjennomføres på en effektiv og sikker måte.

#### **§ 5-5 *Jordingssystem***

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

### § 6-7 *Jordingssystem*

Jordingssystemet unntatt arbeidsjordinger skal konstrueres slik at:

- Det gir personsikkerhet mot farlige berøringsspenninger, også ved høyeste jordfeilstrom.
- Skade på eiendom og utrustning forhindres
- Det dimensjoneres for å tåle termisk påkjenning fra feilstømmer.
- Det dimensjoneres for å tåle korrosjon og mekaniske påkjenninger i hele det elektriske anleggets levetid.
- Det gir nødvendig driftspålitelighet av linjen.

## D.2 Forskrift om systemansvar

### FOS §12 *Anstrengte driftssituasjoner og driftsforstyrrelser*

Konsesjonær skal utarbeide og skriftlig rapportere til systemansvarlig plan for effektiv gjenopp-  
retting av normal drift av egne anlegg, ved driftsforstyrrelser i regional- og sentralnettet og tilknyttede  
produksjonsenheter. Systemansvarlig skal ved vedtak godkjenne planen eller pålegge endringer.

Systemansvarlig skal samordne inngrep ved driftsforstyrrelser som berører flere konsesjonæ-  
rer.

Systemansvarlig skal fastsette hvem som skal utøve frekvensreguleringen i et område som mid-  
lertidig er uten fysisk tilknytning til tilgrensende overføringsnett.

Systemansvarlig kan i vanskelige driftssituasjoner rekvirere effekttilgang ved å kreve at all til-  
gjengelig regulerytelse innenfor produksjon og forbruk anmeldes i regulerkraftmarkedet, etter at prisen i  
elspotmarkedet er satt.

Systemansvarlig kan ved driftsforstyrrelser kreve å få benytte all tilgjengelig regulerbar effekt  
i produksjonsapparatet til å gjenopprette normal drift. Ikke anmeldt produksjon prissettes til elspot-  
områdets regulerkraftpris, dersom ikke annet er avtalt.

Systemansvarlig skal utarbeide og til enhver tid ha tilgjengelig en oversikt over produksjons-  
enheter som har teknisk evne til å utøve frekvensregulering i et område som midlertidig er uten fysisk  
tilknytning til tilgrensende overføringsnett, og produksjonsenheters evne til oppstart uten ekstern forsy-  
ning.

Systemansvarlig skal sørge for systemer og rutiner som sikrer en effektiv rapportering i henhold  
til første ledd.

Systemansvarlig skal skriftlig rapportere til Norges vassdrags- og energidirektorat, vedtak fattet  
i medhold av fjerde og femte ledd samt dersom konsesjonærer ikke oppfyller sin plikt i henhold til første  
ledd første punktum.

### FOS §14 *Planlegging og idriftsettelse av tekniske anlegg i kraftsystemet*

Konsesjonær skal informere systemansvarlig om planer for nye anlegg eller endring av egne  
anlegg i eller tilknyttet regional- eller sentralnettet, når andre konsesjonærer blir berørt av dette. System-  
ansvarlig skal fatte vedtak om godkjenning av nye anlegg eller endringer i eksisterende anlegg før disse  
kan idriftsettes.

Områdekonsesjonær skal informere systemansvarlig om planer for nye eller endringer i eksiste-  
rende produksjonsanlegg i eget distribusjonsnett når disse planene kan ha vesentlig betydning for driften

og utnyttelsen av regional- eller sentralnett. Systemansvarlig kan fatte vedtak vedrørende anleggenes funksjonalitet.

Systemansvarlig skal sørge for systemer og rutiner som sikrer en effektiv informering i henhold til første og annet ledd.

Systemansvarlig skal skriftlig rapportere til Norges vassdrags- og energidirektorat, dersom konsesjonærer ikke oppfyller sin plikt i henhold til første ledd første punktum eller annet ledd første punktum.

#### **FOS §16 *Koblingsbilde***

Systemansvarlig skal utarbeide og kontinuerlig oppdatere detaljskjema for regional- og sentralnett samt tilknyttede forbruks- og produksjonsenheter.

Detaljskjema utarbeidet etter første ledd, skal rapporteres til Norges vassdrags- og energidirektorat innen 1. februar hvert år.

#### **FOS §17 *Samordning av driftsstanser***

Ved behov for driftsstanser i regional- og sentralnett og tilknyttede produksjonsenheter, som kan påvirke andre konsesjonærer, skal konsesjonær sende plan for driftsstans til systemansvarlig i rimelig tid før ønsket tidspunkt for driftsstans. Konsesjonær kan ikke iverksette driftsstans for slike anlegg uten etter vedtak av systemansvarlig.

Systemansvarlig skal samordne og fatte vedtak om konsesjonærenes planlagte driftsstanser i regional- og sentralnett, og tilknyttede produksjonsenheter. Planene innsendt etter første ledd, skal inngå som del av beslutningsgrunnlag for vedtak.

Systemansvarlig skal samordne og fatte vedtak om ikke planlagte driftsstanser i regional- og sentralnett, og tilknyttede produksjonsenheter, som kan påvirke andre konsesjonærer. Dette gjelder kun for nødvendige driftsstanser hvis behov oppstår som følge av uforutsette hendelser. Konsesjonær skal melde slike behov til systemansvarlig uten ugrunnet opphold.

Systemansvarlig kan av eget initiativ eller etter forespørsel fra konsesjonær, omprioritere allerede fastlagte driftsstanser.

Dersom omprioritering etter fjerde ledd påfører systemansvarlig eller andre konsesjonærer kostnader, skal den som initierer omprioriteringen betale for disse kostnadene. Systemansvarlig skal bære kostnadene ved omprioritering som skyldes driftsforstyrrelser eller andre forhold som gjør at tilfredsstillende leveringskvalitet ikke kan opprettholdes. Systemansvarlig vedtar betalingens størrelse og hvem som skal dekke hvilke kostnader overfor hvilke konsesjonærer. Betaling skal skje til den økonomisk skadelidende konsesjonær. Økte kostnader for systemansvarlig som følge av omprioritering etter fjerde ledd, skal håndteres slik at systemansvarlig ved vedtak i den enkelte sak, fastsetter det beløp som skal innbetales. Beløpet for systemansvarlig sine kostnader skal gjenspeile hvorvidt omprioriteringen medfører økte spesialreguleringskostnader, kan størrelsesreguleres over tid og kan differensieres i forhold til om omprioriteringen skyldes årsaker utenfor konsesjonærens kontroll. Underlaget for konsesjonærenes kostnader ved omprioritering skal dokumenteres, og arkiveres av systemansvarlig i 10 år.

#### **FOS §19 *Jordstrømkompensering***

Systemansvarlig kan fastsette hvilken løsning for jordstrømkompensering som skal benyttes i regional- og sentralnett.



## D.3 Forskrift om Elsikkerhet i elektronisk kommunikasjonsnett

### FOR §8 Overspenninger

Liv, helse og eiendom skal være beskyttet mot skadelig virkning av isolasjonssvikt eller feil mellom kretser med ulike spenninger og andre uønskede høye spenninger, som overspenninger forårsaket av elektriske produksjons-, distribusjons- og baneanlegg eller lynutladninger.

Avhengig av spenningens varighet, skal spenninger i elektronisk kommunikasjonsnett referert til lokal jord forårsaket av elektriske produksjons-, distribusjons- og baneanlegg være begrenset til

Tid	Spenning
0-200 ms	1.030 V
201-350 ms	780 V
351-500 ms	650 V
501-1.000 ms	430 V
1.001-2.000 ms	300 V
2.001-3.000 ms	250 V
3.001-5.000 ms	200 V
5.001-10.000 ms	150 V
Lenger enn 10 000 ms	60 V

Post- og teletilsynet kan tillate at grenseverdiene fravikes på deler av elektronisk kommunikasjonsnett bortsett fra i utstyrspunkter og grensesnitt mot andre elektroniske kommunikasjonsnett. Ved fravik skal grenseverdiene være begrenset til

Tid	Avvik
0-100 ms	2.000 V
101-200 ms	1.500 V
201-350 ms	1.000 V

Det tillates maksimalt 10 mA kortslutningsstrøm mellom linje i elektronisk kommunikasjonsnett og lokal jord ved kapasitiv kopling mellom et høyspenningsanlegg og en linje.

Fenomener som påvirker sikkerheten og relevante dimensjonerende drifts- og feilsituasjoner i elektriske produksjons-, distribusjons- og baneanlegg gitt i «Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines» utgitt av Den internasjonale teleunion (ITU), jf. oversikt i rekommandasjon ITU-T K.26, skal følges.

I elektronisk kommunikasjonsnett skal lynoverspenninger være begrenset til 1500 V mot brukerstyr og andre nett, og risiko for skade skal ikke være større enn beskrevet i relevante standarder.

Dersom det i elektronisk kommunikasjonsnett nyttes overspenningsvern mellom ledere og jord, skal disse ha minimum likestrøm tennspenning på 360 V når det er tatt hensyn til overspenningsvernets aldrings- og produksjonstoleranser. Tennspenningskravet kan fravikes dersom netteier har kontroll med bygningens elektriske installasjoner, inkludert jordingsanlegg.

## 8 Bibliografi

- [1] R. Mangelrød, “Spolejording - begrensninger,” Presentasjon under møte, 19. Juni 2017.
- [2] C. Gebs and S. Solberg, *Overordnet releplan generelt*, Hafslund Nett, September 2016.
- [3] “Metoder og bruksområder,” EFI Sintefgruppen, Tech. Rep.
- [4] K. Valiveti, “Unbalanced symmetrical components,” Publisert under CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication, 27. November 2013.
- [5] A. P. Brede, B. Gustavsen, and H. Seljeseth, “Induserte spenninger og strømmer fra kraftledninger og kraftkabler til andre lednings-/kabelanlegg.” Energiforsyningsens Forskningsinstitutt AS, Tech. Rep., September 1995.
- [6] *Veiledning til forskrift om elektriske forsyningssanlegg*, Direktorat for sikkerhet og beredskap, 2006.
- [7] *Forskrift om leveringskvalitet i kraftsystemet*, Olje- og energidepartementet, 2004, <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-11-30-1557>.
- [8] Grøn, “Elektrisk spenning,” *Store Norske Leksikon*, Desember 2016, [https://snl.no/elektrisk\\_spenning](https://snl.no/elektrisk_spenning).
- [9] —, “Elektrisk strøm,” *Store Norske Leksikon*, Desember 2016, [https://snl.no/elektrisk\\_str%C3%B8m#-Elektrisk\\_str%C3%B8m\\_i\\_forskjellige\\_materialer](https://snl.no/elektrisk_str%C3%B8m#-Elektrisk_str%C3%B8m_i_forskjellige_materialer).
- [10] “Trefase,” *Wikipedia*, mai 2017, <https://no.wikipedia.org/wiki/Trefase>.
- [11] Grøn, “Kirchhoffs lover,” *Store Norske Leksikon*, August 2010, [https://snl.no/Kirchhoffs\\_lover](https://snl.no/Kirchhoffs_lover).
- [12] H. S. Goldstein, T. Trøtscher, and J. Å. Walseth, “Analyserapport sørnettet,” Statnett, Tech. Rep., 2013.
- [13] RFP, “Systemjording 132kv-nettet lyse elnett as,” Goodtech, Tech. Rep., 2016.
- [14] T. A. Berg, “Nullpunktsbehandling - jordfeilsindikering og jordfeilsvern,” Foredrag for Norske Sivilingeniørers Forening, 13.-14. september 1995.
- [15] G. Deb, “Ferranti effect in transmission line,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 447–451, August 2012.
- [16] *IEC 60076-8 Power transformers - Application guide*, IEC, 1999.
- [17] electrical4us, “Earthing transformer or grounding transformer.”
- [18] G. Delbekk, “Jordslutningsvern i høgspente (opptil 24 kv) fordelingsnett,” Master’s thesis, NTNU.
- [19] B. Gustavsen and J. Walseth, “A case of abnormal overvoltages in a petersen grounded 132-kv system caused by broken conductor,” *IEEE Transactions on Power delivery*, vol. 18, no. 1, pp. 195–200, Januar 2002.
- [20] G. Druml, A. Kugi, and B. Parr, “Control of persen coils,” *International Symposium on theoretical Electrical engineering*, August 2011.
- [21] t. . HBD20.
- [22] B. Xu, J. Zhang, X. Cai, H. Qin, and D. Xi, “A novel arc suppression coil,” *Przeglad elektrotechniczny*, vol. 89, no. 3a, pp. 213–217, 2013.
- [23] “Systemnording i sverige,” Internt notat.
- [24] S. Solberg and C. Gebs, *Overordnet releplan generelt*, Hafslund nett, 2006.
- [25] J. I. Johansen, “Nærføringsproblematikk nye 132kv høyspentkabler og telekabler på strekningen ammerud-nordtvedt,” Bedriftsintern rapport, 27.10 2015.
- [26] —, Mailkorrespondanse, 11.07 2017.
- [27] S. M. Risser, “Direktejording av 132 kv nettet i bkk-området - sluttrapport for teleerstatningene,” Notat, 31.03 2000.

- [28] H. J. Bihli, *Veileder for utforming av søknader om anleggskonsesjon for kraftoverføringsanlegg*, NVE, September 2015.
- [29] K. W. Olsen, “Telekabler,” *Store Norske Leksikon*, 2009, <https://snl.no/telekabler>.
- [30] *Forskrift om elektriske forsyningsanlegg*, Justis- og beredskapsdepartementet, 2006, <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2005-12-20-1626>.
- [31] H. Seljeseth, “Direkte jording av 132 kv nett,” EFI Sintef Gruppen, Tech. Rep., Februar 1993.
- [32] S. A. Fismen, “Måletransformatorer. erfaringer fra drift og vedlikehold,” Samkjøringen, Tech. Rep., Oslo 1990.
- [33] NVE, “Statestikk for ledninger,” Publisert på NVEs nettsider, Desember 2014, <https://www.nve.no/energiforsyning-og-konsesjon/nett/statistikk-for-ledninger/>.
- [34] K. Larsen, “Sørnettet - overgang til lavohmig jording - forskriftskrav,” Notat, 23.02 2017.
- [35] K. R. Verlo, “Svar på henvendelse - klassifisering av skilletrafoer, ref. 201701554-2,” Svar på henvendelse fra Statnett, 07.04 2017.
- [36] I. M. Elven, “Strømkunder må betale for nye nett-investeringer,” *Bladet Vesterålen*, mai 2017.
- [37] T. A. Berg, “Overgang til direktejording i 132 kv-nettet i bkk området,” Forelesning for Norske Sivilingeniørers Forening.
- [38] S. M. Risser, Mailkorrespondanse, 14.06 2017.
- [39] J. I. Johansen, *Nærføringsproblematikk nye 132kV høyspentkabler og telekabler på strekningen Ammerud- Nordtvedt*, Telenor, 2015.
- [40] “Endring av systemjording ofr 132kv lednings- og kabelnett til lyse el-nett,” Telenor, Tech. Rep., 2015.
- [41] A. Cerreti, D. G. Lembo, and G. Valtorta, “Improvement inthe continuity of supply due to a large introduction of petersen coils in hv/mv substations,” June 2005.
- [42] B. Lacroix and R. Calvas, “Eartingh systems worldwide and evolutions,” *Cahier Technique merlin Gerin*, no. 173, September 1995.
- [43] R. Roeper, *Short-circuit Currents in Three-phase Systems*. John Wiley and Sons, 1985.
- [44] *Planleggingsbok for kraftnett, Bind 3, kapittel 2*, Sintef, 2016, <http://www.ren.no/planbok>.
- [45] M. A. Calado and S. Mariano, “Determination of the earth fault factor in power systems for different earthed neutrals,” *International conference on renewable energies and power quality*, no. 173, pp. 1476–1481, Mars 2010.
- [46] A. L. Fredriksen, “Earth fault protection in isolated and compensated power distribution systems.” Master’s thesis, NTNU.
- [47] K. A. Rosvold, “Jordfeilvern,” *Store Norske Leksikon*, 2014, <https://snl.no/jordfeilvern>.