

JORDFEILDETEKSJON I HØYSPENT DISTRIBUTJONSNETT VED HJELP AV FEILINDIKATORER

Av Ingrid Myhr, masterstudent NTNU

Sammendrag

Artikkelen tar for seg et utvalg av deteksjonsalgoritmer for enpolet jordfeil i høyspent distribusjonsnett (1-22 kV). Det eksisterer mange slike algoritmer, og det er her fokusert på metoder som kan benyttes av retningsbestemte feilindikatorer i isolert eller spolejordet nett. Algoritmene er forsøkt sammenliknet teoretisk, men ytterligere uttesting er nødvendig før det kan konkluderes hvilke algoritmer som er best egnet i denne typen nett.

1. BAKGRUNN

Feilindikatorer er relativt kostnadseffektive instrumenter som har vist seg å kunne bedre leveringspåliteligheten i distribusjonsnettet. De består i hovedsak av målesensorer og programvare som kan retningsbestemme en kortslutning eller jordfeil. Dette kan føre til raskere feillokalisering og redusere behovet for seksjonering og prøvekobling [1]. Gjennom pilotstudier gjennomført av Hafslund Nett ble det funnet at en fullstendig utrulling i alle nettstasjoner vil kunne redusere KILE-kostnader og ikke levert energi ved varige feil med ca 30% [2].

Feilindikatorer er til en viss grad allerede i bruk av norske nettselskap, men dette er ofte enklere modeller som er lokalavleste og kun kan detektere kortslutninger. Moderne feilindikatorer kan i de fleste tilfeller fjernavleses, slik at indikatorene kommuniserer med nettselskapets driftskontrollsystem i sanntid. I kombinasjon med fjernstyrte brytere muliggjør dette utviklingen av såkalte selvreparerende nett (self-healing grids), der feilstedet lokaliseres og isoleres automatisk [1].

I Norge, der det høyspente distribusjonsnettet (1-22 kV) som regel driftes med isolert eller spolejordet nullpunkt, er selektiv deteksjon av enpolet jordfeil en utfordring. Dette skyldes i hovedsak at jordfeilstrømmen er liten sammenliknet med laststrømmen, og at deler av feilstrømmen også vil flyte i avganger uten feil [3]. Det eksisterer flere ulike deteksjonsalgoritmer for jordfeil i denne typen nett. Valg av al-

goritme er derfor en av karakteristikene som skiller eksisterende feilindikatorer fra hverandre.

Gjennom et innovasjonsprosjekt i næringslivet kalt 'Feil- og avbruddshåndtering i smarte distribusjonsnett' (FASaD) [4] skal 12 forskjellige typer feilindikatorer testes ut i distribusjonsnettet. I denne artikkelen vil jordfeilalgoritmene disse indikatorene baserer seg på bli beskrevet. Enkelte andre algoritmer vil også presenteres kort. For mer inngående beskrivelse av de nevnte algoritmene, samt prinsipiell virkemåte til feilindikatorer, vises det til prosjektoppgaven [5] gjennomført ved Institutt for elkraftteknikk på NTNU høsten 2016.

2. JORDFEILDETEKSJON

2.1 Jordfeildeteksjon i isolert eller spolejordet nett

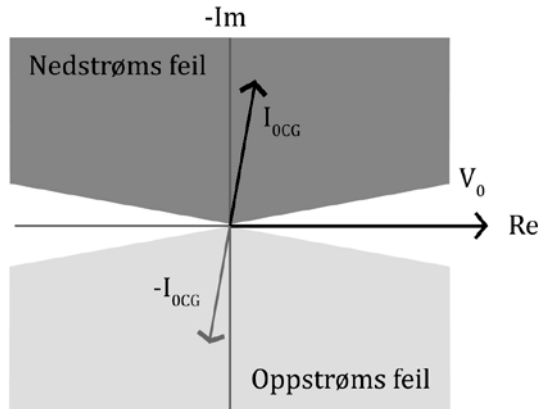
Ved enpolet jordfeil i isolert nett er feilstrømmens eneste returvei gjennom den distribuerte linjekapasitansen [3]. Dette resulterer i en høy impedans i feilkretsen, gitt ved en stor kapasitiv impedans i nullsystemet. Den resulterende feilstrømmen blir derfor liten sammenliknet med laststrømmen. I spolejordet nett vil Petersenspolen produsere en induktiv strøm som kompenserer den kapasitive feilstrømmen og reduserer strømmen i feilstedet betydelig [3].

Tradisjonelle metoder for jordfeildeteksjon i isolert og spolejordet nett baserer seg på stigning av strøm og spenning i nullsystemet, V_0 og I_0 [3]. Begge disse verdiene vil ideelt sett være lik null ved normale driftssituasjoner, men stige ved tilstedeværelse av jordfeil i systemet. I enkelte eldre jordfeilvern er kun V_0 -målinger benyttet, men dette gir ikke selektiv deteksjon [3]. I dag krever de aller fleste deteksjonsalgoritmer måleverdier av både V_0 og I_0 for å oppnå retningsbestemt jordfeildeteksjon. To algoritmer som kun krever strømmålinger vil også bli presentert i underkapittel 2.2.

2.2 Deteksjonsalgoritmer for jordfeil

To av de mest brukte algoritmene for jordfeildeteksjon i isolert og spolejordet nett er $\sin(\varphi)$ - og $\cos(\varphi)$ -metoden. Disse kalles også for varmetrisk og wattmetrisk metode og er mye brukt i jordfeilvern [3]. Algoritmene baserer seg på målinger av grunnfrekvensen (50 Hz-komponenten) til V_0 og I_0 , og benytter fasevinkelen mellom disse til å retningsbestemme feilen.

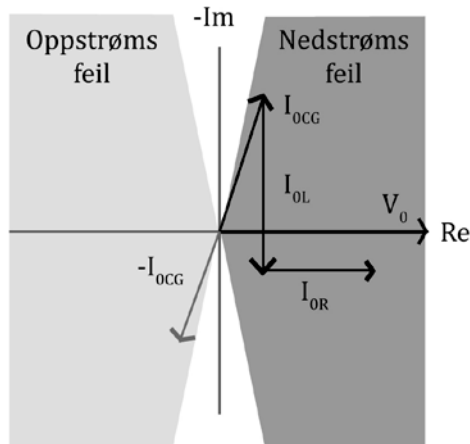
$\sin(\varphi)$ -metoden benyttes i isolerte nett og tar utgangspunkt i den imaginære komponenten til I_0 , altså den delen som er 90° ute av fase med V_0 [3]. Et eksempel på hvordan deteksjonsområdet kan se ut er gitt i figur 1. Med referanse til nullsystemspenningen, V_0 , vil altså en feilstrøm som havner i 1. eller 2. kvadrant (I_{0CG}) detekteres som en feil nedstrøms for indikatorens plassering. Dersom feilstrømmen imidlertid havner i 3. eller 4. kvadrant ($-I_{0CG}$), er feilen oppstrøms. Ved jordfeil i isolerte nett er feilstrømmen i hovedsak kapasitiv, med et lite resistivt bidrag. Dette er årsaken til at feilstrømmene ikke er fullstendig 90° ute av fase med V_0 .



Figur 1: Deteksjonsprinsipp basert på $\sin(\varphi)$ -metoden.

$\cos(\varphi)$ -metoden benyttes i spolejordet nett og tar utgangspunkt i den reelle komponenten til I_0 [3]. Et eksempel på hvordan dette deteksjonsområdet kan se ut er gitt i figur 2. For en nedstrøms feil vil det kapasitive bidraget (I_{0CG}) kompenseres av det induktive bidraget fra Petersenspolen (I_{0L}), og den totale feilstrømmen blir liten. Dersom Petersenspolen er utstyrt med en parallellmotstand som kobles inn etter en gitt tidsforsinkelse, vil det resistive bidraget (I_{0R}) fra denne føre

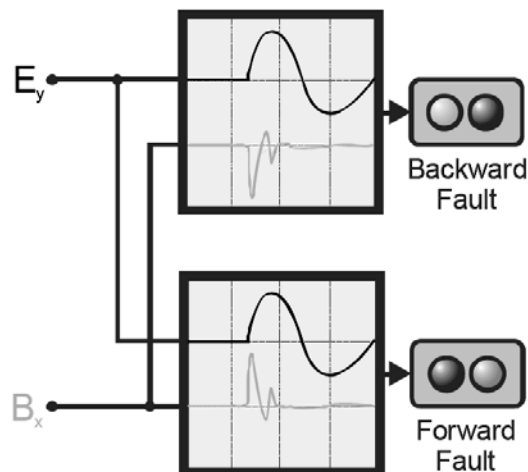
til at den totale feilstrømmen øker [3]. Dermed vil en nedstrøms feil lettere kunne detekteres som en feilstrøm i 1. eller 4. kvadrant. Ved en oppstrøms feil vil feilstrømmen være identisk som ved feil i isolert nett, og kun bestå av det kapasitive bidraget ($-I_{0CG}$).



Figur 2: Deteksjonsprinsipp basert på $\text{Cos}(\varphi)$ -metoden.

En annen metode for retningsbestemt jordfeildeteksjon baserer seg på måling av jordfeiltransienter, og kalles derfor transientmetoden. Når en jordfeil inntreffer oppstår særlig to transienter som kan benyttes til feildeteksjon: utladnings- og oppladningstransienten [6]. Disse strømmene produseres fordi fasespenningene endres, og man får en redistribusjon av ladning knyttet til kapasitansene i systemet. Summen av de to strømtransientene kan måles i I_0 som et transient forløp med høyere frekvens og amplitude enn den stasjonære jordfeilstrømmen [6].

For å detektere og retningsbestemme en jordfeil basert på transientmetoden måles transientene til både V_0 og I_0 . Fasevinkelen mellom disse signalene vil avsløre om feilen er oppstrøms eller nedstrøms for målepunktet, som illustrert i figur 3. Fra figuren kan det observeres at V_0 -målingene vil være like uavhengig av om målepunktet er oppstrøms eller nedstrøms for feilen, men at I_0 -målingene vil ha motsatt fortegn. Metoden kan benyttes både i isolert og spolejordet nett, da transientene ikke blir nevneverdig påvirket av en eventuell Petersenspole [6].



Figur 3: Deteksjonsprinsipp basert på transientmetoden. Signalet E_y representerer V_0 , mens signalet B_x representerer I_0 . Figur hentet fra [6] med tillatelse.

En algoritme som ikke krever spenningsmålinger er 'Insensitive to Capacitive Currents (ICC)'-metoden [7]. Den er utviklet av Schneider Electric, og benyttes i flere av deres feilindikatorer. Metoden gjennomfører statistiske sammenlikninger av det transiente forløpet til de tre fasestrømmene og nullstrømmen, I_0 . Hovedprinsippet går ut på at dersom den transiente bølgeformen til I_0 kun likner på en av fasestrømmene vil feilen detekteres som nedstrøms for målepunktet. Dersom I_0 likner på to av fasestrømmene vil feilen være oppstrøms for målepunktet. Dersom ikke disse signalene gir tilstrekkelig informasjon til å kunne retningsbestemme feilen, sammenliknes også RMS-verdiene til fasestrømmene.

Andre velkjente deteksjonsalgoritmer, som ikke er benyttet av feilindikatorerne i FASaD-prosjektet, er QU2-metoden [8] og 'Fast-pulse'-metoden [9]. QU2-metoden likner på den nevnte transientmetoden, men i dette tilfellet vil I_0 -signalet integreres for å finne endringen i ladning [8]. Her kan det vises at dersom feilen befinner seg oppstrøms for målepunktet, vil endringen i ladning som funksjon av V_0 følge en rett linje, som representerer den totale kapasitansen i systemet. Er feilen nedstrøms for målepunktet vil funksjonen være ulineær.

'Fast-pulse'-metoden går ut på at en High-Power-Current-Injector (HPCI) injiserer et høyfrekvent strømsignal i parallell med Petersenspolen ved en feil i systemet [9]. Dette signalet vil flyte fra hovedforsyningen, gjennom feilstedet og tilbake til transformatorens nullpunkt. Signalet kan dermed kun måles mellom hovedforsyningen og

feilen, og slik kan feilstedet finnes ved hjelp av feilindikatorer. Metoden krever dermed ikke spenningsmålinger.

De nevnte algoritmene kan oppsummeres etter deteksjonsprinsipp som gitt i tabell 1. Det tas forbehold om at de ulike algoritmene kan variere mellom leverandørene, og at det i visse tilfeller benyttes andre navn på disse. Listen er heller ikke utelukkende, da det eksisterer flere deteksjonsalgoritmer enn nevnt her.

Tabell 1: Oppsummering av de nevnte deteksjonsalgoritmene.

Deteksjonsprinsipp	Algoritmer
Grunnfrekvens (50 Hz)	<ul style="list-style-type: none">• Sin(φ)• Cos(φ)
Transienter	<ul style="list-style-type: none">• Transientmetoden• ICC-metoden• QU2-metoden
Andre	<ul style="list-style-type: none">• 'Fast-pulse'-metoden

Eksisterende feilindikatorer varierer stort i pris. Erfaringene fra FA-SaD-prosjektet tilsier imidlertid at det er andre faktorer enn valg av deteksjonsalgoritme for jordfeil som avgjør investeringskostnaden ved en gitt type indikator. Dette skyldes at kostnadene knyttet til utrulling og implementasjon utgjør en betydelig del av total kostnaden, spesielt kostnader knyttet til fjernavlesning. Enkelte feilindikatorer har for eksempel innebygget RTU (remote terminal unit), mens dette i andre tilfeller må bestilles separat. For å vurdere lønnsomheten i et utrullingsprosjekt må derfor pålitelighetsberegninger og kostnad-nytteanalyser gjennomføres.

2.3 Deteksjon av høyohmige og gjentakende jordfeil

Det er særlig når det kommer til deteksjon av høyohmige og gjentakende jordfeil at sensitiviteten til de ulike algoritmene varierer. Med høyohmig menes jordfeil med en betydelig overgangsmotstand til jord. Dette er utfordrende å detektere da overgangsmotstanden fører til både lavere feilstrøm og lavere stigning i nullsystemspenningen, V_0 [3]. Med gjentakende jordfeil menes jordfeil av kort varighet som gjentar seg på samme sted i nettet og med samme årsak.

For de tradisjonelle $\sin(\varphi)$ og $\cos(\varphi)$ -metodene vil sensitiviteten overfor høyohmige jordfeil i stor grad avhenge av terskelverdien som settes for V_0 [3]. I [10] ble det funnet at $\cos(\varphi)$ -metoden var uegnet til deteksjon av gjentakende jordfeil. Dette er ikke uventet, da metoden baserer seg på stasjonære målinger av grunnfrekvensen til I_0 . Ved feil av kort varighet er det ventet at denne feilstrømmen ikke rekker å stabilisere seg.

Transientmetoden har vist seg å ha lavere sensitivitet overfor høyohmige jordfeil, da transientene blir dempet av en eventuell overgangsmotstand. I [6] ble det funnet at selektiv deteksjon i spolejordet nett var mulig opp til en overgangsmotstand på 1 k Ω . Videre er transientmetoden ventet å kunne detektere gjentakende jordfeil under visse forhold, da den kun måler jordfeiltransientene og dermed ikke krever stasjonære målinger.

Pålitelig deteksjon av alle typer gjentakende jordfeil er imidlertid en utfordring, og i [11] ble det konkludert med at egne deteksjonsalgoritmer for gjentakende jordfeil er nødvendig. For QU2-algoritmen er det utviklet en egen variant for deteksjon av gjentakende jordfeil, QUI-metoden, som beskrevet i [12].

For de andre nevnte algoritmene er sensitivitet overfor disse jordfeiltypene lite beskrevet i litteraturen. Ytterligere testing er derfor nødvendig for en fullstendig sammenlikning av algoritmene.

3. KONKLUSJON

For feilindikatorer til bruk i høyspent distribusjonsnett med isolert eller spolejordet nullpunkt er valg av deteksjonsalgoritme for jordfeil avgjørende. Det eksisterer mange algoritmer, alt fra de tradisjonelle $\sin(\varphi)$ og $\cos(\varphi)$ -metodene til nyere metoder som kun krever strømmålinger. Det er funnet at det særlig er sensitiviteten overfor høyohmige og gjentakende jordfeil som skiller de ulike algoritmene, men at ytterligere uttesting er nødvendig for å kunne gjøre en fullstendig sammenlikning.

I tillegg til deteksjonsalgoritme vil andre faktorer som investeringskostnad, målemetoder og kommunikasjonsmuligheter være avgjørende i valg av feilindikatorer. Planlagte uttestinger i distribusjonsnettet gjennom det nevnte FASaD-prosjektet er ventet å kunne gi ytterligere svar på disse problemstillingene.

4. REFERANSER

- [1] Vefsnmo, H. M., Jakobsen, S. H. (2016), *Arbeidsprosessbeskrivelser for dagens og morgendagens feil- og avbruddshåndtering*, Prosjektnotat SINTEF Energi, Trondheim.
- [2] Kjølle, G., Vadlamudi, V.V., Kvistad, S., Tutvedt, K.A., (2013), *Potential for Improved Reliability and Reduced Interruption Costs Utilizing Smart Grid Technologies*, Proceedings 22nd International Conference on Electricity Distribution (CIRED).
- [3] Roberts, J., Altuve, H. J., Hou, D., (2001), *Review of Ground Fault Protection Methods for Grounded, Ungrounded and Compensated Distribution Systems*, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman WA USA.
- [4] SINTEF Energi (2015), *Feil- og avbruddshåndtering i smarte distribusjonsnett*. <http://www.sintef.no/prosjekter/feil-og-avbruddshandtering-i-smarte-distribusjonsn/>, (Lastet 17.01.17).
- [5] Myhr, I., (2016), *Algoritmer og virkemåte til retningsbestemte feilindikatorer i distribusjonsnett*, Prosjektoppgave ved Institutt for elkraftteknikk høsten 2016, NTNU Trondheim.
- [6] Bjerkan, E., Venseth, T., (2005), *Locating Earth-Faults in Compensated Distribution Networks by means of Fault Indicators*, Proceedings 6th International Conference on Power System Transients (IPST05).
- [7] Verneau, G., Chollot, Y., Cumunel, P., (2011), *Auto-Adaptive Fault Passage Indicator with Remote Communication Improves Network Availability*, Proceedings 21st International Conference on Electricity Distribution (CIRED).
- [8] Druml, G., 2009, *QU2-Algorithm for Detecting Earth Faults*, A.Eberle GmbH & CoKG, <http://www.hvpower.co.nz/TechnicalLibrary/RE+DS/QU2-Algorithm%20for%20detecting%20earth-faults.pdf>, (Lastet 17.01.17).
- [9] Druml, G., Raunig, C., Schegner, P., Fickert, L., (2013), *Fast Selective Fault Localization using the new Fast Pulse Detection Method*, Proceedings 22nd International Conference on Electricity Distribution (CIRED).
- [10] Teng, C. et al., (2013), *Evaluation of New Earth Fault Localization Methods by Earth Fault Experiments*, Proceedings 22nd International Conference on Electricity Distribution (CIRED).
- [11] Altonen, J., Mäkinen, O., Kauhaniemi, K., Persson, K., (2003) *Intermittent Earth Faults- Need to Improve the Existing Feeder*

Earth Fault Protection Schemes? Proceedings 17th International Conference on Electricity Distribution (CIRED).

- [12] Druml, G., Seiert, O., Marketz, M., (2011) *Directional Detection of Restriking Earth Faults in Compensated Networks*, Proceedings 21st International Conference on Electricity Distribution (CIRED).