

Kartläggning av metoder för jordfelslokalisering i distributionsnätverk

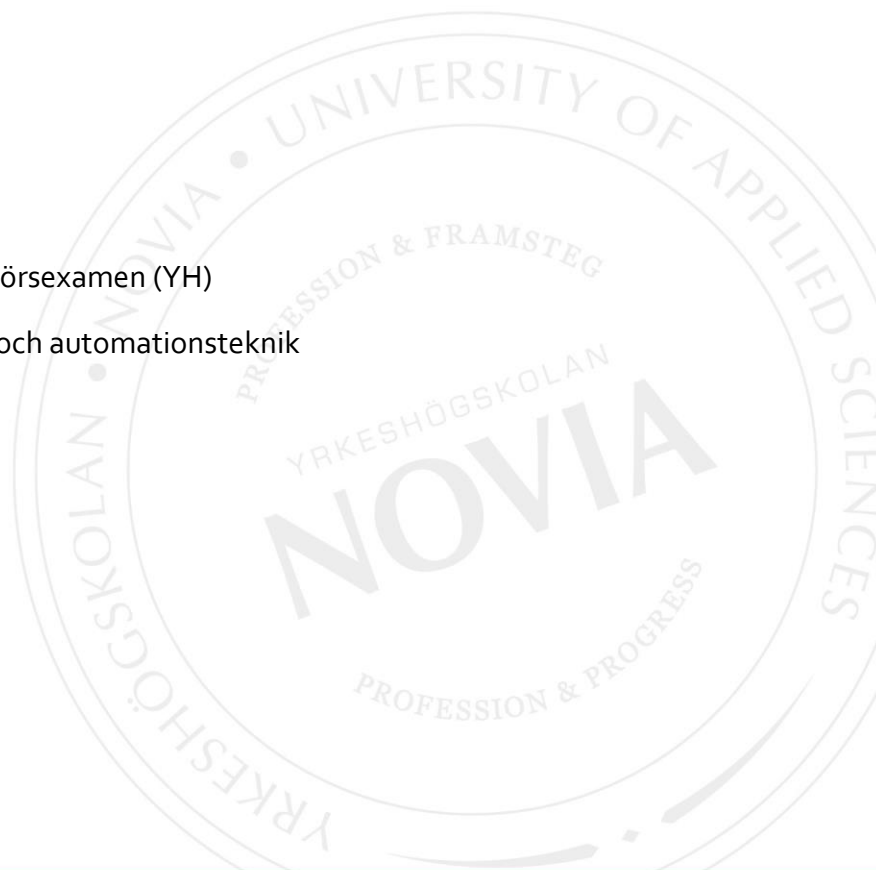
Ett beställningsarbete av Esse Elektro-Kraft Ab

Jimmy Finnholm

Examensarbete för ingenjörsexamen (YH)

Utbildningen för elektro- och automationsteknik

Vasa 2018



EXAMENSARBETE

Författare: Jimmy Finnholm

Utbildning och ort: Elektroteknik, Vasa

Inriktningsalternativ: Kraftelektronik

Handledare: Lars Enström (YH Novia), Ingvar Kulla (Esse Elektro-Kraft)

Titel: Kartläggning av metoder för jordfelslokalisering i distributionsnätverk

Datum: 23.10.2018

Sidantal: 29

Abstrakt

I takt med att vårt samhälle i allt större utsträckning elektrifieras ställs också högre krav på kontinuerlig leverans av elkraft, vilket för elbolagen innebär att ännu snabbare lokalisera, isolera och åtgärda fel som uppstår i nätet. I detta examensarbete behandlas ett antal företag och deras lösningar och metoder för att uppnå dessa mål. Primära fokusområdet som genomsyrar texten ligger på att hitta metoder för att effektivare detektera och lokalisera enfasiga jordfel så noggrant som möjligt, men också produkter som saknar denna egenskap presenteras likvärdigt.

Esse Elektro-Kraft som beställare av detta examensarbete presenteras samt beskrivs egenskaper för bolagets nät och refereras till under genomgången av de olika produkterna och lösningsmetoderna. Likaså presenteras teoretisk bakgrund och relevanta ämnen som grund för beskrivningen av lösningarnas egenskaper och funktionalitet.

Den teoretiska informationen har till stor del hämtats från olika undervisningsmaterial, såväl från fackböcker som elektroniska artiklar och forskningsrapporter. Företagsinformation och produktbeskrivningarna har delvis hämtats från respektive företags hemsidor och resten via kontakt med representanter för företagen och som senare fått möjlighet att läsa presentationen och åtgärda sakfel.

Tanken var i början att eventuellt simulera metoderna, men ju längre arbetet framskridit har det konstaterats bli svår genomförligt samt knepigt att få en rättvis jämförelse då produkterna och metoderna skiljer sig markant från varandra.

I resultatdelen lyfts för- och nackdelar fram och produkterna jämförs sinsemellan enligt funktionalitet och omfattning så gott det går och i diskussionen spekuleras det i branschens framtid, vad som kan komma att bli centralt framöver.

Språk: svenska

Nyckelord: jordfel, selektivitet, lokalisering, mätmetoder

OPINNÄYTETYÖ

Tekijä: Jimmy Finnholm

Koulutus ja paikkakunta: Sähkötekniikka, Vaasa

Suuntautumisvaihtoehto: Sähkövoima

Ohjaajat: Lars Enström (Yrkeshögskolan Novia), Ingvar Kulla (Esse Elektro-Kraft)

Nimike: Keskijänniteverkon maasulun paikallistamiseen käytettyjen menetelmien kartoitus

Päivämäärä: 23.10.2018

Sivumäärä: 29

Tiivistelmä

Yhteiskuntamme sähköistyminen nostaa sähkön jatkuvan jakelun vaatimuksia. Voimayhtiöille tämä tarkoittaa yhä nopeampaa sähköverkon virheiden paikantamista, eristämistä ja korjaamista. Tässä opinnäytetyössä käsitellään useita yrityksiä ja heidän ratkaisujaan ja menetelmiään näiden tavoitteiden saavuttamiseksi. Työn keskeinen tarkoitus oli etsiä keinoja, joilla pystyttäisiin tehokkaammin havaitsemaan ja paikantamaan yksivaiheiset maasulut mahdollisimman tarkasti, mutta myös tuotteita, joissa tätä ominaisuutta ei ole, esitellään tasapuolisesti.

Opinnäytetyön tilaaja Esse Elektro-Kraftin sekä yrityksen verkon ominaisuudet esitellään ja käytetään vertailukohtana eri tuotteiden ja ratkaisumenetelmien käsittelyssä. Myös teoreettista taustaa ja asiaankuuluvia aiheita käydään läpi pohjana tuotteiden ja menetelmien toiminnallisuuden ja ominaisuuksien kuvaukselle.

Teoreettinen tieto on suurimmalta osin peräisin erilaisista opetusmateriaaleista, oppikirjoista sekä sähköisistä artikkeleista ja tutkimusraporteista. Yhtiöiden perustiedot ja tuotekuvaukset on osin kerätty kunkin yhtiön verkkosivuilta ja loput yritysten edustajien kautta. Edustajille on myös annettu mahdollisuus lukea esitys läpi ja korjata mahdollisia asiavirheitä.

Alkuperäiseen suunnitelmaan kuului myös menetelmien simulointi, mutta työn edetessä se osoittautui vaikeaksi toteuttaa ja ennen kaikkea haastavaksi saada aikaan tasapuolinen vertailu tuotteista ja menetelmistä niiden erotessa merkittävästi toisistaan. Tulososassa nostetaan esiin tuotteiden hyviä ja huonoja puolia ja niitä verrataan keskenään toimivuuden ja laajuuden mukaan mahdollisimman tasapuolisesti. Pohdintaosiossa luodaan katsaus alan tulevaisuuteen.

Kieli: ruotsi

Avainsanat: maasulku, selektiivisyys, paikallistaminen, mittaus

BACHELOR'S THESIS

Author: Jimmy Finnholm

Degree Programme: Electrical engineering, Vaasa

Specialization: Power electronics

Supervisors: Lars Enström (Novia UAS), Ingvar Kulla (Esse Elektro-Kraft)

Title: Mapping of Localization Methods of Earth Faults in Distribution Networks

Date: October 23, 2018

Number of pages: 29

Abstract

As the electrification of our society is ever-increasing, higher requirements are set on continuous supply of electricity, which for the electricity utilities mean there is a clear need to locate, isolate and resolve anomalies that occur in the distribution network even faster than before. In this thesis, a number of companies with their products and methods for solving these issues are presented. The primary area of focus that permeates this study is identifying methods for more efficient and more accurate, detection and location of single-phase earth faults, however, products that lack this feature are also presented on equal basis.

Esse Elektro-Kraft, being the client of this thesis, is presented and the characteristics of the company's distribution network is described and referred to during the review of the different products and solutions. The theoretical background and selected relevant topics are also presented as a starting point for the discussion of the functionality and properties of the presented solutions.

The theoretical information has mainly been derived from various educational materials, both from textbooks as well as electronic articles and research reports. The company information and product descriptions have been partially retrieved from the respective companies' websites and the rest via contact with representatives of the companies, whom later have received the opportunity to proofread the presentations.

The initial scope included the prospect of simulating the investigated methods, but the further the work progressed, the clearer it appeared that it would be difficult to implement and tricky to get a fair comparison as the products and methods differ significantly from each other. The advantages and disadvantages are highlighted in the result section and the products are compared to each other according to the functionality and magnitude as far as possible and the discussion speculates around the potential central aspects of the industry's future.

Language: Swedish

Key words: earth fault, selectivity, localization, measurements

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Esse Elektro-Kraft Ab.....	1
1.2	Framtiden.....	1
2	Syfte och problemprecisering.....	2
3	Teoretiska utgångspunkter.....	3
3.1	Skillnader mellan luftledning och kabel.....	3
3.2	Jordfel.....	4
3.2.1	Enfasiga jordfel.....	4
3.2.2	Två- och trefasiga jordfel.....	5
3.3	Lokalisering av enfasiga jordfel.....	5
3.4	Skyddsrelä.....	6
3.5	Rogowskispole.....	6
3.6	Systemjordning.....	7
3.6.1	Direktjordning.....	7
3.6.2	Resistansjordning.....	8
3.6.3	Isolerat system.....	8
3.6.4	Reaktansjordning.....	9
3.7	Symmetriska komponenter.....	9
3.8	Egenskaper hos Esse Elektro-Krafts elnät.....	11
3.9	Nuvarande jordfelslokaliseringsmetod vid Esse Elektro-Kraft.....	11
4	Undersökta alternativ.....	12
4.1	Arteche.....	12
4.1.1	Produkter.....	12
4.1.2	Installation.....	13
4.2	NorTroll.....	13
4.2.1	Produkter.....	13
4.2.2	Installation.....	14
4.3	Protrol.....	15
4.3.1	Produkter.....	15
4.3.2	Installation.....	16
4.4	Spänningsfallsdetektering på lågspänningssidan av en distributionstransformator.....	16
4.4.1	Metod.....	16
4.5	Netcontrol.....	17
4.5.1	Produkter.....	17

4.5.2	Installation	18
4.6	Swedish Neutral.....	19
4.6.1	Produkter.....	19
4.6.2	Installation	21
4.7	Exeri.....	21
4.7.1	Produkter.....	21
4.7.2	Installation	23
4.8	ABB	23
4.8.1	Produkter.....	23
4.8.2	Installation	25
5	Resultat	25
6	Diskussion.....	27
7	Referenser.....	28

Ordförklaringar

Här förklaras kort centrala begrepp och förkortningar

Direktjordat nät	Alla transformatornollpunkterna är direkt anslutna till jord
Distributionsnät	Spriker elkraften (låg- och mellanspänning 400 V – 40 kV) ut till användarna
Enfasigt jordfel	Oönskad kontakt mellan spänningssatt ledning och jordledare alternativt fas och jord
FLISR	Fault Location, Isolation and Service Restoration, ett begrepp omfattande hela processen från felsökning till avklarad service
FPI	Fault Passage Indicator, felpassage indikator
Högspänning, HV	Spänningar över 1000 V AC eller 1500 V DC
Impedansjordat nät	Eller spoljordat nät, innebär att alla transformatornollpunkterna är anslutna till jord via en spole
Lågspänning, LV	Spänningar under 1000 V AC eller 1500 V DC
Mellanspänning, MV	Nedre intervallet av högspänning, ca 1 – 40 kV
Selektivitet	Kunna se var ett fel har inträffat och låta rätt skydd lösa ut
Stumt jordfel	Felresistansen mellan fas och jord är mycket liten eller noll
Transienter	Högfrekventa amplitud- och frekvensförändringar i spänning och ström orsakade av tex. kapacitiva och induktiva komponenter i nätet
Transmissionsnät	Nät för att transportera elkraft (högspänning 50 kV – 400 kV), ofta över längre sträckor

1 Inledning

Examensarbetet, som är en beställning från Esse Elektro-Kraft Ab, blev diskuterat och planerat i grova drag på hösten 2017, men själva arbetet inleddes först under sommaren 2018. Uppgiften togs emot med stor nyfikenhet och iver, men också med ödmjukhet till följd av min föga erfarenhet inom området sedan tidigare. Under arbetets gång har förståelsen stegvist ökat och texten uppdaterats efter hand för tydligare beskrivningar. De presenterade företagen har också fått möjlighet att kommentera och åtgärda sakfel i den ursprungliga texten, något de flesta varit tacksamma för och utnyttjat möjligheten till.

1.1 Esse Elektro-Kraft Ab

Esse Elektro-Kraft (EEK) är ett litet finskt kraftbolag grundat 1920 med huvudkontor i Överesse. Företagets verksamhetsområde är utöver Pedersöre också de närliggande orterna Kauhava (Kortesjärvi och Alahärmä), Nykarleby (Markby) och Kronoby (Jeussen). Kärnverksamheten utgörs av elproduktion med vattenkraft, eldistribution samt elförsäljning. (Esse Elektro-Kraft Ab, 2018)

I dagsläget har Esse Elektro-Kraft 3800 nätkunder till vilka levereras ca 50 miljoner kWh el-energi per år. Företagets vattenkraftproduktion når upp till ca. hälften av denna energi och resterande del anskaffas via s.k. andelskraft genom delägarskap i Katternö Kraft Ab och Perhonjoki Oy vilket betyder att EEK är självförsörjande till över 100 %. (Esse Elektro-Kraft Ab, 2018)

Elnätet som nätkunderna betjänas via består av 460 km högspänningsledningar (20 kV), drygt 400 transformatorstationer och 540 km lågspänningsledningar. Dessutom omvandlas stamnätets 110 kV spänning i fyra stationer, varav tre är egna. (Esse Elektro-Kraft Ab, 2018)

1.2 Framtiden

Vill man hänga med i den snabba utvecklingen inom elektronikbranschen gäller det att hela tiden tänka på vad framtiden ser ut att föra med sig då man förnyar utrustning. För att lyckas med detta gäller det att hålla sig uppdaterad om vad som forskas i samt hurdana bestämmelser och krav som förbereds på högre instanser. I dagsläget är redan övergången till så kallade smarta nät (en: smart grids) på agendan, men detta kräver förstås stora investeringar av dess intressenter. Intressenterna förväntar sig naturligtvis också betydande

avkastning på investeringarna samtidigt som det är allt viktigare att verksamheten blir både miljövänligare, säkrare, tillförlitligare och effektivare.

2 Syfte och problemprecisering

I ett elnät uppstår ofrånkomligt olika typer av fel så det gäller att vara förberedd och snabbt kunna hitta dessa och åtgärda felet för att minimera skadan på komponenter och apparater samt begränsa elavbrotten för kunderna. Exempel på vanliga fel i nätet är kortslutning, jordfel och ledningsbrott. Enbart i trefasiga kortslutningar är felet av symmetrisk natur, dvs alla fasströmmar och - spänningar är lika stora, i alla andra fall är felet osymmetriskt.

När ett fel uppstår i elnätet är automationens första uppgift att detektera att ett fel har uppstått och beroende av feltyp agera enligt förinställda instruktioner. För att inte behöva släcka ner hela nätet direkt ett fel inträffar samlar man in data på mätpunkter utspritt över hela nätet samt ställer in de olika reläskydden olika så att man beroende på uppmätt data kan lokalisera felet och koppla ifrån en mindre del av nätet där felet uppstått och således inte störa driften på övriga områden. När felet är av kortslutningsnatur kan man också beräkna avståndet från mätstationerna till felpunkten, men inte när det kommer till enfasiga jordfel.

Så mycket som cirka 70 % av alla fel i mellanspänningsnätet är enfasiga jordfel (Linčiks & Baranovskis, 2009). Uppdragsgivaren till detta examensarbete söker en metod, lämpad att snabbare lokalisera dessa enfasiga jordfel i sina distributionsnät för att minska på avbrottstiden vid fel. De vanligaste orsakerna till att ett enfasigt jordfel uppkommer i luftledningsnät är felande isolatorer samt träd som faller på luftledningar och skapar kontakt mellan en ledande fas och jord. I kabelnät är felen betydligt färre till antalet, men desto svårare att lokalisera och reparera. När det uppstår fel i kabelnät är det oftast frågan om enfasiga jordfel, vanligen till följd av en skadad kabel och många gånger blir det också frågan om intermittenta jordfel, dvs. fel som tänds och släcks från och till.

Uppgiften är alltså att ta reda på vilka alternativ som finns och göra en sammanställning över dessa, samt möjligen simulera fel i exempelnett jämförbara med Esse Elektro-Krafts distributionsnät. I diskussionsdelen är tanken att kunna rekommendera någon metod eller åtminstone lyfta fram för- och nackdelar med de olika produkterna och metoderna.

3 Teoretiska utgångspunkter

Lågspänningsnätet i Finland är i huvudsak jordat, medan mellanspänningsnätet ofta är isolerat. Att mellanspänningsnätet i huvudsak är ojordat beror till största delen på att jordmånens specifika ledningsförmåga på vissa områden i Finland är så dålig att skyddsjordningarnas jordningsresistanser i distributionstransformatörer och frånskiljarstationer inte fås tillräckligt liten (Lakervi & Partanen, 2008).

3.1 Skillnader mellan luftledning och kabel

Rätt långt görs stora beslut såväl inom företag som kommunala organ baserat på ekonomiska förutsättningar och så också gällande installering av luftledning/jordkabel. Luftledningar var tidigare flera gånger billigare att dra samt billigare att distribuera via jämfört med kabel, men i dagsläget styrs marknaden alltmera mot kabel via de nya kraven i elmarknadslagen från 2013 (Energiavirasto, 2018). Till följd av detta har också kabelpriserna sjunkit drastiskt under senaste åren och numera är det inte någon desto större prisskillnad på luftledning och jordkabel.

Av alla avbrott som kunderna upplever härstammar ca 90 % från fel i mellanspänningsnätet och av dessa då till allra största del från oisolerade luftlinjer (Energiateollisuus, 2018). Ett sätt att värja sig från dessa fel är att byta ut luftledningarna till jordkablar då det uppstår betydligt färre fel i dem, dock bör påpekas att när fel väl uppstår går det ca. 25 gånger snabbare att reparera fel på luftledningar än på jordkablar (Fingrid, 2018).

Kabelledningar är klart mera skyddade för exempelvis stormar/åska, erosion och viltlivsinteragerande än i fallet med luftledningar. Däremot är livslängden överlag på luftledningar längre, lättare att underhålla samt mera kostnadseffektiva. Ser man på hurudana fel som normalt sett uppkommer i de olika näten så är felen i ett kabelnät rätt långt begränsat till att man gräver/borrar i ledningarna av misstag eller att vatten tränger in och orsakar fel, men ett luftledningsnät är utsatt för fordon som kommer i kontakt med elstolpar/ledningarna, växtlighet som faller/blåser på ledningarna, djur (främst större fåglar) som kommer i kontakt med ledningarna och vattenangrepp.

När ett fel uppstår i ett luftledningsnät är det betydligt lättare att lokalisera då man ofta enkelt kan se felet, medan i ett kabelnät blir felsökningen och lokaliseringen betydligt mera omständlig. En annan fördel med luftledningar är att det är betydligt enklare att gå upp i

dimensioner av ledare vid ökande förbrukning, kablar nergrävda under jord är förståeligt nog besvärligare att byta ut. (Western Power, 2018)

3.2 Jordfel

Jordfel är ett isolationsfel mellan spänningsförande delar i ett isolerat system och jord eller en del i ledande kontakt med jord. Om det i elnätet samtidigt förekommer isolationsfel på två olika platser i olika faser pratar man om dubbelt jordfel. I systemjordade nät är jordfel till sin natur likt enfasig kortslutning och felströmmen kan beräknas då man känner nätets impedanser. Isolerade och kompenserade nät kräver däremot att man känner till hela (galvaniskt sammankopplade) nätet för att kunna beräkna jordfels- och nollpunktsströmmarna (ABB, 2000).

3.2.1 Enfasiga jordfel

När det uppstår en oönskad, ledande kontakt mellan en fas och jord, brukar man prata om enfasigt jordfel. Ifall två faser samtidigt är i kontakt med jord kallas det dubbelt jordfel.

Beräkning av jordfelsström vid enfasigt jordfel:

$$I_j = \frac{3U_f}{Z_0 + 3R_f} \quad (1)$$

$$Z_0 = \frac{1}{\frac{1}{3R_N} + \frac{1}{3jX_N} + \frac{1}{-jX_C}} \quad (2)$$

där

I_j är jordfelsström

U_f är fasspänning

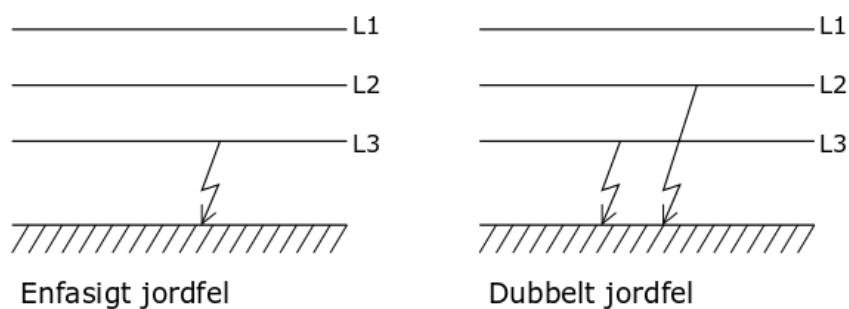
Z_0 är nollföljdsimpedans

R_f är övergångsresistans

R_N är nollpunktsmotståndets resistans

X_N är nollpunktsreaktors induktiva reaktans

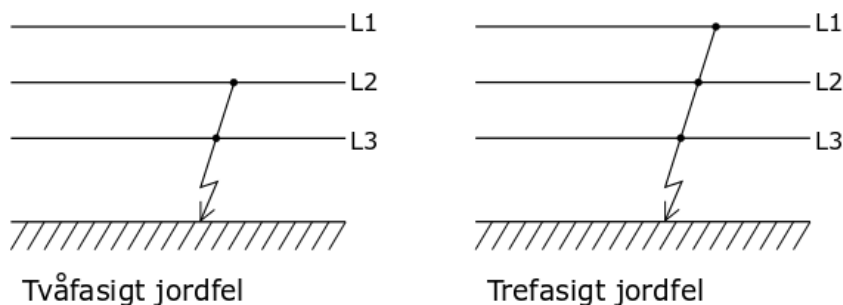
X_C är elnätets kapacitiva reaktans till jord



Figur 4.1 schematisk bild av enfasigt samt dubbelt jordfel.

3.2.2 Två- och trefasiga jordfel

När det uppstår ett två- eller trefasigt jordfel betyder det inte enbart att det går en läckström till jord, utan samtidigt också uppstår kortslutning mellan faserna och dessa kan därför lokaliseras betydligt enklare genom att mäta kortslutningsströmmarna och ”räkna baklänges” via kapacitansen i ledningarna för att ta reda på avståndet till felpunkten. Trefasigt jordfel är i praktiken det samma som trefasig kortslutning.



Figur 4.2 schematisk bild av två- och trefasigt jordfel.

3.3 Lokalisering av enfasiga jordfel

Lokalisering av enfasiga jordfel i mellanspänningsnätverk är besvärligt. De populäraste metoderna bygger bland annat på mätningar av ström och spänning i grundfrekvensen och analysering av den transienta processen samt övertonerna under pågående jordfel (Linčiks & Baranovskis, 2009). Enfasiga jordfel kan man egentligen inte beräkna avståndet till, men man kan detektera i vilken riktning från mätstationerna felet ligger och således begränsa söksområdet till linjerna mellan två mätstationer.

3.4 Skyddsrelä

Ett skyddsrelä är en mätande enhet som fungerar med hjälp av en specifik mätstorhets värde. Reläet märker när det uppmätta värdet går över det förinställda funktionsvärdet och låter brytaren lösa ut efter att funktionstiden gått såvida värdet inte gått under funktionsvärdet igen. Med funktionsvärde avses det värde på mätstorheten som orsakar frånkoppling vid över-/underskridning ifall värdet inte återgår till önskat värde under funktionstiden. Reläets verkan är omedelbar om inte funktionstiden innehåller avsiktlig fördröjning. (ABB, 2000)

Skyddsreläer finns i många olika versioner beroende av funktionalitet och kallas ofta därefter, några vanliga är exempelvis överströms-, kortslutnings-, avbrotts- och jordfelsrelä. Beroende på funktionalitet mäter de spänningen, strömmen, effekten eller frekvensen och hur värdet ändras samt meddelar fel ifall mätvärdet går utanför förinställda gränsvärden. Det är viktigt att skyddsreläer är driftsäkra och skyddar hela systemet utan några luckor. Skyddsreläer bör fungera selektivt så att endast en liten del av nätet blir bortkopplat vid fel, de bör också fungera snabbt för att minimera skadorna.

För detta examensarbete är främst jordfelsreläets funktion av intresse och speciellt riktat jordfelsrelä. Påverkande storheter för det riktade jordfelsreläet är jordfelsström, nollpunktsspänning samt vinkeln mellan spänning och ström.

3.5 Rogowskispole

En Rogowskispole, namngett efter Walter Rogowski är ett elektriskt instrument för att mäta växelström. Spolen är en toroid, dvs. ett donutformat mätinstrument bestående av en cirkulär spiralspole med början och slut i samma ände av cirkeln. När denna toroid placeras runt den raka ledare vars ström ska mätas kommer en spänning, direkt proportionell till strömförändringen i den raka ledaren, att induceras i spolen och kan mätas. Utgången från en Rogowskispole är normalt sett ansluten till en elektrisk integreringskrets för att utsignalen ska vara en ström proportionell till strömmen i den raka ledaren, vilket gör den till en strömtransformator.

Spänningen producerad av en Rogowskispole kan beräknas enligt följande formel

$$v(t) = \frac{-AN\mu_0}{l} \frac{dI(t)}{dt} \quad (3)$$

där

$A = \pi r^2$ är arean av en de små looparna i spiralspolen

N är antalet loopar i spolen

$l = 2\pi R$ är längden av den cirkulära spolen

$\frac{dI(t)}{dt}$ är förändringshastigheten av strömmen i den mätta ledningen

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ V} \cdot \text{s}/(\text{A} \cdot \text{m})$ är den magnetiska konstanten

R är radien av toroiden

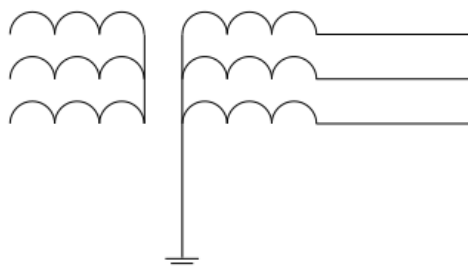
r är de små looparnas radie

3.6 Systemjordning

”De flesta nät matas från sekundärlindningen på en transformator. Vanligen är denna lindning Y- eller Z-kopplad, och har därmed en nollpunkt eller neutralpunkt. Med systemjordning menas det sätt på vilken denna nollpunkt jordas.” (Blomqvist, Elkrafthandboken - Elkraftsystem 2, 2003b)

3.6.1 Direktjordning

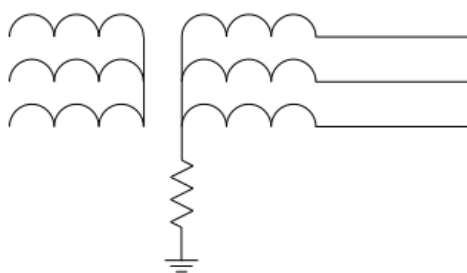
Ett direktjordat system innebär att transformatorns nollpunkt är direkt kopplad till jord. Direktjordning har till uppgift att vid enfasigt jordfel snabbt koppla ifrån den del av nätet där felet uppstått, samt att vid överledning från överliggande system med högre spänning begränsa spänningsstegringen (Blomqvist, Elkrafthandboken - Elkraftsystem 2, 2003b). De största felströmmarna uppstår i direktjordade nät, men jämfört med de andra typerna av jordning har direktjordning de lägsta överspänningarna i de icke-drabbade faserna.



Figur 4.3 Direktjordad nollpunkt.

3.6.2 Resistansjordning

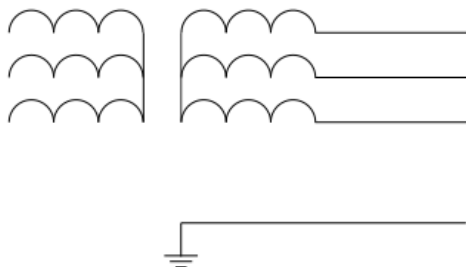
När transformatorns nollpunkt är kopplad till jord via en resistans pratar man om resistansjordat system. Fördelen med denna typ av jordning är att man vid enfasiga jordfel begränsar felströmmens storlek, men orsakar också överspänningar i de icke-drabbade faserna. Man delar ännu in denna jordningstyp i lågresistivt och högresistivt jordade system. I ett lågresistivt jordat system väljs resistansen sådan att felströmmen blir två till tre gånger nominella lastströmmen, detta för att lätt kunna skilja på dessa strömmar. I högresistivt jordat system uppstår betydligt mindre felström än vid lågresistiv jordning, vanligtvis i storleksklassen 10 A.



Figur 4.4 Resistansjordad nollpunkt.

3.6.3 Isolerat system

Då transformatorns nollpunkt inte är kopplad till jord är det frågan om ett isolerat system och då bestäms felströmmen av systemets totala kapacitans. Vid skydd av isolerade system är selektivitet väldigt svårt. Denna typ av jordning används i geografiskt begränsade lågspänningssystem där hög tillförlitlighet är det viktigaste samt i högspänningsnätet då man inte vid ett första jordfel önskar få avbrott i distributionen.

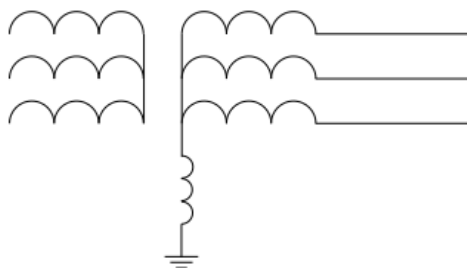


Figur 4.5 Isolerad nollpunkt.

3.6.4 Reaktansjordning

Begränsning av felströmmen vid jordfel kan uppnås via inkoppling av en s.k. Petersenspole mellan transformatorns nollpunkt och jord. Genom att avstämna spolen till samma absolutvärde som kapacitansen i systemet skapas parallellresonans vid fel, dvs. induktansen och kapacitansen kompenserar ut varandra, vilket teoretiskt skulle medföra att felströmmen blir noll. En perfekt avstämning är dock inte i verkligheten möjlig då förluster i systemet är ofrånkomliga. Fördelen med användningen av en Petersenspole är att felströmmen vid enfasiga jordfel blir liten och skadeverkningarna kan på så vis reduceras.

För att underlätta selektiv urkoppling systemjordar man ofta med en Petersenspole parallellkopplat med en resistans i transformatorns nollpunkt. Tack vare detta parallellkopplade motstånd kan man uppmäta en resistiv riktad felström och således också koppla bort den felande delen av nätet vid bestående fel. Statistiken visar att närmare 90 % av alla övergående enfasiga jordfel kan åtgärdas utan störningar i den normala driften genom att man momentant kopplar från motståndet och ger Petersenspolen möjlighet att utföra självsläckning, varpå motståndet åter kopplas in ett par sekunder senare för att kontrollera om felet inte kunde självsläckas och då kopplas den felande sektionen bort. (Blomqvist, Elkrafthandboken - Elkraftsystem 2, 2003b)



Figur 4.6 Reaktansjordad nollpunkt.

3.7 Symmetriska komponenter

Enkelt beskrivet är de symmetriska komponenterna en matematisk modell som möjliggör beräkningar av osymmetriska förhållanden i trefassystem. Med hjälp av denna modell kan man beräkna amplitud och fasläge av strömmar och spänningar för olika feltyper. Ett trefassystem kan enligt denna modell beskrivas med tre komponenter (internationell standard i parenteserna): plusföljds- (positive sequence component, psc), minusföljds- (negative sequence component, nsc) och nollföljds- (zero sequence component, zsc). Dessa innefattar både ström, spänning och impedanser som betecknas enligt följande:

$$\text{Plusföljdsstorheter: } I_1, U_1, Z_1 \quad (4 \text{ a})$$

$$\text{Minusföljdsstorheter: } I_2, U_2, Z_2 \quad (4 \text{ b})$$

$$\text{Nollföljdsstorheter: } I_0, U_0, Z_0 \quad (4 \text{ c})$$

I normal drift är trefassystemets spänningar lika stora och fasförskjutna med 120° . För att göra beräkningar och beteckningar enklare använder man sig av den vektoriella faktorn a samt a^2 :

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (5)$$

Vilket är en vektor med längden 1 och vinkeln $+120^\circ$ ($1 \angle 120^\circ$).

$$a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (6)$$

Vilket är en vektor med längden 1 och vinkeln $+240^\circ$ ($1 \angle 240^\circ$). Trefassystemet kan därför även representeras av vektorerna $1, a^2, a$.

De symmetriska komponenterna och trefassystemets vektorer förhåller sig till varandra enligt följande (L1 används som referensfas):

$$I_{L1} = I_1 + I_2 + I_0 \quad (7 \text{ a})$$

$$I_{L2} = a^2 \cdot I_1 + a \cdot I_2 + I_0 \quad (7 \text{ b})$$

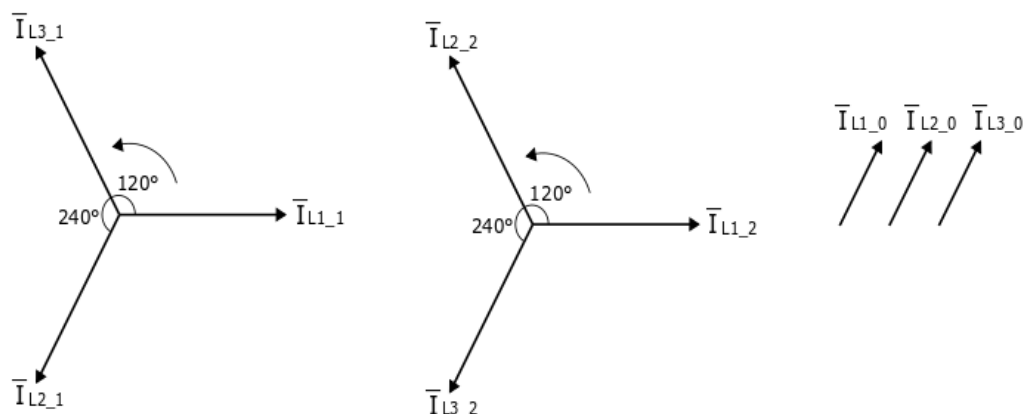
$$I_{L3} = a \cdot I_1 + a^2 \cdot I_2 + I_0 \quad (7 \text{ c})$$

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_{L1} + a \cdot I_{L2} + a^2 \cdot I_{L3}) \quad (8 \text{ a})$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_{L1} + a^2 \cdot I_{L2} + a \cdot I_{L3}) \quad (8 \text{ b})$$

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}) \quad (8 \text{ c})$$

Formlerna som ovan beskriver strömmarna i ett trefassystem kan också användas på samma sätt med spänningarna. (Blomqvist, Elkraftshandboken - Elkraftsystem 1, 2003a)



Figur 4.7 Trefasströmmar i plusföljd, minusföljd och nollföljd.

3.8 Egenskaper hos Esse Elektro-Krafts elnät

Esse Elektro-Krafts elnät har i dagsläget en total längd på 996 km, varav 544 km är lågspänningslinjer (0,4 kV) och 452 km mellanspänning (1 – 70 kV). Företaget har inga egna 110 kV linjer. Av dessa 544 km lågspänningslinjer är 257 km jordkabel (47,3 %) samt 19 km av de 452 km mellanspänningslinjerna (4,1 %). Jordkablingsgraden är något som är ständigt ökande i samband med att nätet byggs ut och förnyas, den främsta orsaken till detta är elsäkerhetslagen som trädde i kraft 2013 och omfattar betydligt striktare krav på säkerhet än tidigare och således driver utvecklingen mot större del kabelnät. Angående luftledningarna kan man nämna att omkring 24 km är isolerade, resten oisolerade. Mellanspänningsnätet är kompenserat med en Petersenspole, men kan också köras som isolerat.

3.9 Nuvarande jordfelslokaliseringsmetod vid Esse Elektro-Kraft

Då ett enfasigt jordfel detekterats i nätet händer i dagsläget följande:

- Brytaren för den felande linjen löser ut i elstationen samtidigt som reläskyddet larmar om ”jordfel”. Man vet alltså i detta läge *att* det finns ett jordfel och på vilken linje, men inte *var* på linjen.
- Man öppnar en frånskiljare på ungefär halva linjen eller på en gren och kopplar in linjen igen. Ifall brytaren löser ut igen vet man att felet ligger mellan elstationen och den öppnade frånskiljaren, ifall den inte bryter ut vet man att felet är ”bakom” den öppnade frånskiljaren från matningen sett.

- Efter detta upprepas processen genom att öppna en annan frånskiljare omkring halvvägs på den i föregående punkt upptäckta felande sträcka. Detta upprepas så många gånger tills man har begränsat felet till en linje mellan två frånskiljare.
- När man vet mellan vilka frånskiljare felet ligger skickar man ut linjemontörer till fots eller med fyrhjuling längs med den felande linjen.

Ifall det är mörkt och felet är svårt att se med blotta ögat kan man återinkoppla linjen, då kan man se felet som en blix. När man känner till sitt elnät och utsatta områden i det kan man förstås förkorta tiden för sökande en aning genom att gissa sig till en eller ett par tänkbara felpunkter. (Personlig kommunikation, 10.9.2018, Ingvar Kulla, VD Esse Elektro-Kraft Ab)

4 Undersökta alternativ

Alternativ till lösningar kommer från ett antal olika företag inom elkraftsbranschen och metoderna varierar delvis i funktion, men också i omfattning, vilket gör att de olika lösningarna lämpar sig olika bra beroende av vad man är ute efter. Till examensarbetet har valts ett spektrum blandat av såväl välbeprövade lösningar som nytänkande metoder för att åskådliggöra nutiden och vad som klassiskt sett använts samt vad som kan komma att bli framtiden.

4.1 Arteche

Arteche är ett multinationellt företag grundat 1946 med bas i Spanien som utvecklar utrustning och lösningar för elkraftindustrin, fokuserat på generering, transmission och distribution. Företaget har kring 2400 anställda, utspridda på fyra kontinenter och med produkter installerade i över 150 länder. Företaget beskriver sig som ett etiskt företag som vill utvecklas tillsammans med samhället samt ständigt effektivisera verksamheten och använda sig av erfarenheten som drygt 70 år av verksamhet har fört med sig. (Arteche, 2018)

4.1.1 Produkter

Fasspänningssensorerna *sensART* är utvecklade för att mäta spänningen i mellanspänningsnät med mätning och felskydd som delar samma sensor. SensART fungerar som en central del av moderna FLISR (Fault Location, Isolation and Service Restoration) metoden, dvs. ett steg mot att bli ett smartnät. Sensorerna fungerar med hög noggrannhet inom ett brett temperaturintervall. (Arteche, 2018)



Figur 5.1 Arteches sensART oversens (t.v) samt sensART undersens (t.h).

4.1.2 Installation

SensART finns i två modeller; sensART undersens för kabelnät samt sensART oversens för luftledning. Installationen är simpel, i kabelnät kan man installera direkt på befintlig kabel tack vare den delade kärnan på Rogowskispolarna och för friledning stolpmonteras sensorerna smidigt, samt är mätinstrumenten smått dimensionerad och väger lite. Man kan också installera sensorerna på en DIN-skena.

4.2 NorTroll

Nortroll är ett norskt företag, specialiserad på bl.a. elkraftskomponenter och sektioneringsutrustning, som på sin hemsida beskriver sig som branschledande och rekommenderade när det kommer till att förse sina kunder med utrustning och lösningar för att hitta uppkomna fel snabbt. Man tar särskilt i beaktan det krävande nordiska klimatet inkluderande snö, stormar och översvämningar i utvecklingen av sina produkter. Företaget har huvudsäte i Levanger, Norge men är aktivt i över 50 länder. (NorTroll, 2018)

4.2.1 Produkter

När det kommer till Nortrolls produktutbud för luftburna mellanspänningslinjer kan man indela dessa i två huvudkategorier; stolpmonterade och ledarmonterade felpassageindikatorer (FPI). Båda kategorierna är baserade på detektering av förändringar i det elektriska och elektromagnetiska fältet. De stolpmonterade FPI, exempelvis *LineTroll*

R400D, är trefas-enheter som detekterar såväl känsliga jordfel som kortslutningar, men man kan inte utläsa vilken fas felet är på. Däremot är de känsligare än linjemonterade FPI, exempelvis *LineTroll 110E μ r*, då de kan detektera jordfelsströmmar ner till 2 A jämfört med 6 A för linjemonterade FPI. Fördelen med linjemonterade FPI är att man kan identifiera den felande linjen. (personlig kommunikation, Lars Gunnar Jensen, NorTroll, 15.6.2018)



Figur 5.2 Linjemonterad FPI *LineTroll 110E μ r* (t.v.) samt stolpmonterad FPI *LineTroll R400D* (t.h.).

4.2.2 Installation

De stolpmonterade detektorerna har vissa begränsningar i installationsplatser, de kan inte installeras där det finns parallella linjer eller två matande linjer i samma stolpe, de kan heller inte installeras på ställen där jordningskabeln går undertill.

Linjemonterade FPI har inga begränsningar i var de installeras, men däremot behövs det en indikator per fas. En funktionalitet som bör finnas vid linjemonterade FPI med multipla linjer är en strömåterställare. Normalt sett finns enbart spänningsåterställare, men i LT 110E μ r finns också möjligheten att välja huruvida man vill återställa spänningen eller belastningsströmmen när linjen är återställd. Detta vill man göra för att undvika att den andra matande linjen, som alltså kan användas även om den ena är frånkopplad, ska påverka det elektriska fältet.

4.3 Protrol

Protrol är ett svenskt produkt- och konsultbolag inom kraft och automationsteknik. Fokus ligger på kostnadseffektiv driftövervakning och feldetektering i såväl små nätstationer på landsbygden som fördelningsstationer i städer. (Protrol, 2018)

4.3.1 Produkter

IPC4010 (Integrated Protective Controller) är en fjärrterminal även innehållande en detektorfunktion för såväl jordfel som överström. *IPC4011* kommunicerar via optisk fiber (max 15km) och *IPC4012* via ethernet, men i övrigt lika som *IPC4010*. Unikt med Protrols patenterade jordfelsdetektering Fault Pass Through är att den genom analys av de tre fasströmmarna avgör riktningen för ett fel utan någon spänningsreferens. Algoritmen har också hög känslighet för både transienta och högohmiga fel. Detektorerna utnyttjar en egen patenterad mätteknik PAD (Phase Asymetry Detection). När det kommer till noggrannhet har de gjort många tester med 3 och 5 k Ω felmotstånd som grovt sett gett 1 A felström primärt.

Under hösten 2018 lanserades en betydligt kraftfullare uppgradering av feldetektorerna, *IPC4020* på marknaden med en tillhörande expansionsmodul så att man inte längre behöver komplettera med fristående feldetektorer om man har flera utgående linjer från nätstationen. Detta ger också betydligt större möjligheter till att bland annat fjärrkonfigurera enheterna och läsa upp störskrivarfiler. *IPC4020* har också integrerad fjärrterminalsfunktionalitet. (Protrol, 2018)



Figur 5.3 Protrols feldetektormodeller *IPC4011* med Rogowskispolar (t.v.) och den pinfärska *IPC4020* (t.h.).

4.3.2 Installation

IPC4010 är kompakt med måtten 195*105*64 mm (IPC4020 195x105x75 mm), och kan enkelt installeras i nätstationer på en DIN-skena. För Protrols feldetektering behövs en feldetektor samt tre stycken strömtransformatorer, en per fas, men ingen spänningsreferens är nödvändig, vilket gör installationen väldigt kostnadseffektiv. Strömtransformatorerna monteras på isolerad del av varje part av kraftkabeln och kan lätt monteras på befintlig kabel tack vare att det finns en delbar modell. Man kan koppla samman upp till 32 stycken feldetektorer som kan kommunicera med ett överordnat system.

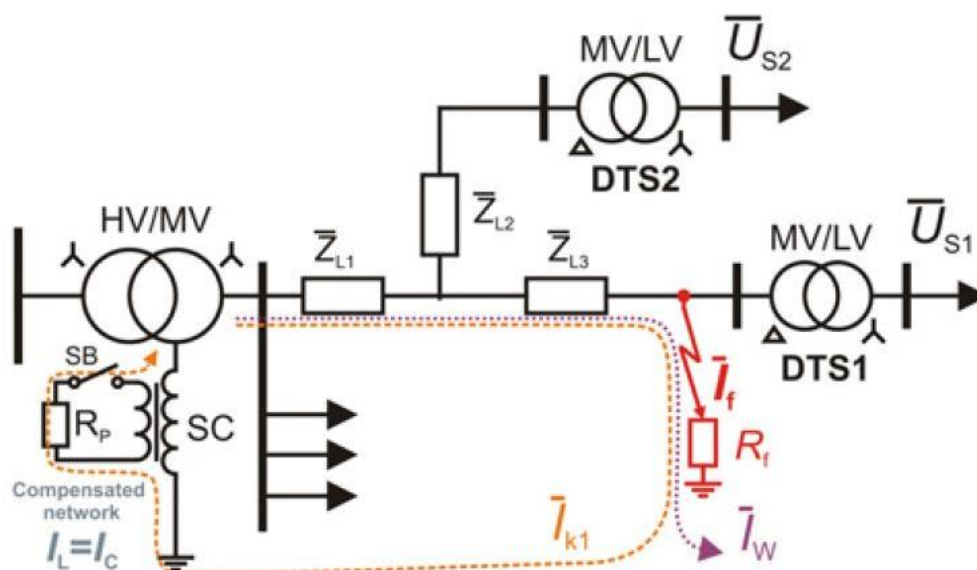
4.4 Spänningsfallsdetektering på lågspänningssidan av en distributionstransformator

Denna metod är baserad på en forskningsartikel skriven av bland andra Matti Lehtonen, som är något av en guru i Finland när det kommer till jordfel. I artikeln presenteras en metod som skulle möjliggöra jordfelslokalisering från sekundärsidan av en MV/LV transformator med hjälp av synkroniserat data uppmätt på lågspänningssidan i kompenserade distributionsnät, försett med ett hjälpmotstånd för tillfällig ökning av den aktiva delen av felströmmen. Hjälpmotståndet kopplas in momentant parallellt med jordningsspolen i matande transformatorns nollpunkt. Detta förutsätter alltså att alla mätvärden från mätarna är synkroniserade och kan jämföras centralt från ett ställe. (Topolanek, Lehtonen, Adzman, & Toman, 2015)

4.4.1 Metod

Den beskrivna metoden använder sig av spänningsfall framkallade av inkopplandet av hjälpmotståndet för lokalisering av felet. När ett enfasigt jordfel uppstår går en ström, \bar{I}_{kl} via systemjordningen in i den felande linjen igen samt en läckström, \bar{I}_w som går från fas till jord (Figur 5.4). Denna läckströms storlek är liten och svår att detektera, men via inkopplingen av hjälpmotståndet momentant får man en tillfälligt större läckström vilket ger upphov till de största spänningsfallen närmast felet. Om man mäter spänningsfallet i alla MV/LV transformatorstationer kan man få fram mellan vilka två mätstationer felet ligger, eftersom felet kommer ge upphov till det största spänningsfallet i stationen närmast bakom felet från matande sidan sett, samt näststörsta spänningsfallet i första stationen mot matningen sett och sedan mindre spänningsfall närmare matningen samt ingen inverkan på oberoende linjegrenar.

Metoden är testad med hjälp av en numerisk modell som representerar en del av distributionsnätet. När jordfel detekteras kopplas ett hjälpmotstånd in som ger upphov till ett spänningsfall i alla mätpunkter, men spänningsfallets storlek varierar sådant att det största spänningsfallet sker närmast bakom felet från matningen sett och det näst största spänningsfallet i sista mätpunkten före felet. På så vis kan man lokalisera det enfasisiga jordfelet till en linjesträcka mellan två mätstationer och koppla bort enbart den berörda linjen utan att hela nätet behöver släckas ner. Höghögliga fel kan med denna metod vara svåra att lokalisera då spänningsfallen då blir så små i alla mätpunkter att man inte kan lokalisera felet. (Topolanek, Lehtonen, Adzman, & Toman, 2015)



Figur 5.4 Schema för nollföljdsström i en felande linje under ett jordfel i ett kompenserat nät (Topolanek, Lehtonen, Adzman, & Toman, 2015).

4.5 Netcontrol

Netcontrol Oy är ett finskt bolag, grundat 1991 med kontor också i Sverige, Norge samt Storbritannien. ”Netcontrol erbjuder lösningar för datakommunikation, nätautomation, stationsautomation och driftcentraler”, sammanfattas verksamheten på bolagets hemsida.

4.5.1 Produkter

Netcon 100 är en enhetlig lösning som har integrerat alla nödvändiga funktioner i en och samma enhet. Genom placering av Netcon 100 ute i nätet fungerar den tillika som skyddsrelä och reagerar snabbare än utgångens skyddsrelä på fel ”bakom” Netcon 100 och kunder närmare matningen berörs ej av fel på ”andra sidan”. Netcon 100:s fellokalisering mäter

riktningen för felet samt felreaktansen, varvid man snabbt kan sektionera ut rätt del av nätet och påbörja reparationsarbetet.

En annan fördel med Netcon 100 är att man med hjälp av de exakta mätresultaten och trenderna kan undvika för tidiga, onödiga investeringar som gjorts ”för säkerhets skull”. Likaså kan man upptäcka situationer där transformatorn av någon orsak tidvis är klart överbelastad med förhöjd risk för transformatorhaveri eller förkortad livslängd, något som klassiska uppskattningar baserat på statistiska värden inte skulle ge någon varning för.

Central administrering av alla Netcon 100 nätstationers programversioner och konfiguration som sköts med hjälp av verktyget Netcon Application Manager (NAM) bidrar till minskning av systemets totala kostnader då det behövs betydligt färre besök till stationen. Med Netcon 100 kan också nätets och nätstationernas belastning övervakas och styras baserat på realtidsmätningar, vilket är speciellt praktiskt vid exempelvis servicearbeten eller pågående fel. (Netcontrol, 2018b)



Figur 5.5 Integrerad operatörspanel (HMI127) till Netcon 100 samt Netcon 100 S6 rack.

4.5.2 Installation

Tack vare färdiggjorda konfigurationer samt ett användarvänligt webbaserat gränssnitt påstår företaget på sin hemsida installationen vara snabb och simpel. Netcon 100 är flexibelt på så sätt att man kan välja vilka moduler man är intresserad av och vill ha installerat, i systemet finns alltid ett huvudprocesskort samt ett strömförsörjningskort, men de återstående kortplatserna (två eller fyra beroende på modell) i ett Netcon 100-rack är för mät- och

styrkort beroende på applikation. Ifall nätstationen är stor och behöver flera kort än vad som ryms i ett 6 korts rack kan man i tillägg ha flera rack i samma elstation.

För examensarbetet är Netcon FDM112 modulen mest intressant, dvs. modulen för felindikering och fellokalisering för mellanspänningsnätet. Modulen innehåller beräkningsfunktioner för felindikering och felreaktans samt störningsregistrering och elkvalitetsmätning. Netcon FDM112 modulen har 12 analoga ingångar för ström- och spänningssensorer med 16 bits noggrannhet. Modulen har också 4 överströms- och 5 jordfelssteg för 3 fack. För riktad jordfelstetektering behövs en spänningsreferens samt strömmätning i form av Rogowskispolar.

Övriga moduler är Netcon RCM130 fjärrkontroll, Netcon LVM111 övervakning av lågspänning, Netcon HMI127 integrerad operatörspanel och HMI16x integrerad operatörspanel (Netcontrol, 2018b)

4.6 Swedish Neutral

Swedish Neutral Ab är ett svenskt bolag, grundat 1987 som utvecklar, tillverkar och marknadsför kompletta system för nollpunktsbehandling och jordfelsskydd som ökar tillförlitligheten och säkerheten för mellan- och högspänningsnätverk.

4.6.1 Produkter

Jordfelsskyddssystemet *Ground Fault Neutralizer* (GFN) neutraliserar ultrasnabbt (på mindre än 60 ms, dvs. 3 cykler) jordfelsströmmen i felstället vid jordfel. Denna snabba neutralisering gör att jordfelet inte har någon inverkan på nyttolasten längs den felande ledningen och således kan jordfelet hanteras utan att slutkunden behöver drabbas av strömavbrott. Alla övergående fel i friledningsnät kan hanteras utan fränkoppling tack vare att nollpunktsreaktorn begränsar felströmmen till under gränsen för självsläckning av ljusbågar (<35 A) genom kompensering av nätets kapacitiva felström.

Ett jordfel kan lätt starta en markbrand vid torrt klimat, GFN är i dagsläget enda skyddet som är tillräckligt snabbt och känsligt för att undvika en brand (Swedish Neutral, 2018a). Uppenbara orsaker till att vilja eliminera skogsbränder är förstås att förhindra att personer eller materiella ting tar skada, men enligt WWF:s studie om skogsbränder ger de också upphov till 15 – 20 % av världens koldioxidutsläpp årligen, vilket i sin tur bidrar till den globala uppvärmningen och något som i hög grad är aktuellt (WWF Deutschland, 2016). I

Australien där vegetationen är väldigt torr och stora markbränder härjar årligen har GFN tagits emot med öppna armar och metoden har döpts till Rapid Earth Fault Current Limiter (REFCL). Till följd av de förödande bränderna i Kalifornien på senare tid har elbolagen där också fått upp ögonen för Swedish Neutrals lösningar.

Jordfelslokaliseringen med GFN är baserat på två överlägsna detektionsmetoder – en väldigt snabb transientdetektering, huvudsakligen för återtändande kabelfel samt en högsensitiv adaptiv metod som mäter nollsekvensens admittans för att detektera höghögspännings fel på såväl luftledningarna som kablar (Winter, 2014). Eftersom driften inte direkt bryts kan man när jordfel detekteras fokusera på nästa viktiga fråga, nämligen var felet är. En unik GFN pilotsignal hjälper operatören att lokalisera det egentliga felet och informera linjemontörer för reparation – innan den felade sektionen kopplas bort (Swedish Neutral, 2018b).

GFN Enhanced PD (Partial Discharge) Measurement är ett verktyg för att kunna förebygga jordfel genom att detektera svaga punkter i isolationen och således kunna åtgärda redan innan fel uppstår. Med detta jordfelsskydd kan man minimera såväl strömavbrottens antal som brand- och personrisker samt kan man optimera utnyttjandet av nätets komponenter genom tillståndsbaserat underhåll. (Swedish Neutral, 2018a)

Utöver jordfelsskyddssystemet GFN erbjuder företaget också ett komplett urval av standardneutrala enheter såsom nollpunktsreaktorer, jordningstransformatorer och nollpunktsmotstånd. Exempelvis *Stand Alone Earth Fault Locator (SAEFL)* som är en specialversion av standardmodellen Swedish Neutrals jordfelslokalisering (Swedish Neutral Earth Fault Locator - SNEFL). SAEFL kan installeras på alla nivåer i ett nätverk där en inkommande matning distribueras till flera utgående matningar som i sin tur förgrenas vidare i flera matningar (exempelvis i en gruva eller distribuering i en stadskärna). SAEFL detekterar jordfel i resonans- samt andra högimpedansjordade högspänningsnät. (Swedish Neutral, 2018c).



Figur 5.6 Swedish Neutrals nollpunktsreaktor GFN.

4.6.2 Installation

Ground Fault Neutralizer installeras i transformatorstationen samt ansluts till transformatorns nollpunkt och kan därefter skydda hela nätet från en punkt. Ett komplett GFN-system består av en Petersenspole, ett fack för kraftelektronik och ett GFN kontrollfack.

4.7 Exeri

Exeri är ett svenskt företag grundat 2009 av tre f.d. Ericsson-anställda med lång erfarenhet av bland annat sensornät, nätverksövervakning, militära ledningssystem och säkerhet. I dagsläget har företaget fem anställda och är verksamma inom Sverige i första hand, men inom några år är företagets mål att vara internationellt etablerade och vara en viktig leverantör inom eldistribution. Företaget har ett klart framtids tänkande och vill utveckla smarta, självtänkande nät som kan åtgärda de flesta fel själv och rapportera om de resterande. (Exeri AB, 2018)

4.7.1 Produkter

Smart Grid Surveillance (SGS) är Exeris huvudprodukt och är ett system som omvandlar ett vanligt elnät till ett smart nät genom digitalisering. Detta betyder i praktiken att SGS ger en fullständig bild av nätverkets status i realtid och när fel väl uppstår i nätet lokaliseras och

klassificeras de direkt av systemet så att linjemontörer kan skickas ut vid behov och eventuella reparationsarbeten påbörjas med kort varsel.

SGS systemet byggs upp av en ICCU (Intelligent Collecting and Conclusion Unit) och intelligenta agenter som är monterade på stolpar ute i nätet. Dessa kommunicerar via radio på frekvenserna 433–868 MHz, vilket gör att de kan kommunicera ostört med egna protokoll och dessutom vara energieffektivt, vilket är viktigt för att batterierna ska hålla länge (ca 10 år i dagsläget). Kommunikationen sker genom att agenterna skickar information till ICCU:n som i sin tur med hjälp av artificiell intelligens (AI) analyserar informationen så att nödvändig del av linjen kan kopplas bort samt ger användaren information om vad felet är och var. För att säkerställa hög noggrannhet och tillförlitlighet i systemet placerar man gärna ut ett antal redundanta kommunikationshubbar för en alternativ kommunikationsväg vid behov.

Intermittenta jordfel är ofta svåra att hitta och åtgärda, men med SGS lokaliseras de automatiskt när de uppstår och kan därefter underhållas korrekt. När det kommer till höghögliga jordfel är det väldigt klurigt att urskilja dem från nätets naturliga variationer och summan av alla de små läckströmmarna i stolparna och eftersom Exeri är ett relativt ungt företag har man inte ännu i detta skede valt att fokusera på att identifiera dem, men det står nog på agendan inom en snar framtid. Exakt vad som mäts och analyseras är av naturliga orsaker tillsvidare affärshemligheter och presenteras alltså inte. (Personlig kommunikation, Magnus Karlsson, CEO Exeri, 15.10.2018)



Figur 5.7 Exeris intelligenta agenter är stolpmonterade utan fysisk kontakt med linjerna.

4.7.2 Installation

SGS-systemet består av så kallade smart agenter som stolpmonteras längs linjerna i strategiska punkter, dvs. i besvärligare områden med högre felfrekvens och svårtillgängliga områden kan man montera agenterna så tätt som i varje stolpe, medan i långa linjer över öppna fält kan man ha kilometertal mellan agenterna. Detta är något som Exeri erbjuder konsultation för och i samråd med kunden beslutar var agenterna placeras vilket då påverkas av kundens behov och systemets användningsområde. Installationen av en smart agent går på kring 5 minuter då den bara behöver fästas på stolpen, utan fysisk kontakt med linjen, något som också skyddar den från blixtnedslag. Efter installationen ska agenterna vara så gott som underhållsfria tack vare att de är självkalibrerande via artificiell intelligens som ser till att agenterna är anpassade till rådande förhållanden hela tiden. Först när batteriet behöver bytas ca. tio år efter installationen behövs underhåll och även då har Exeri varit smarta nog att erbjuda ett utbyte av gamla agenter mot ett mellanpris, så att kunden får nya agenter samt nya batterier i agenterna, redo för nästa tio år. (Personlig kommunikation, Magnus Karlsson, CEO Exeri, 15.10.2018)

4.8 ABB

ABB står ursprungligen för ASEA Brown Boveri och är ett svensk-schweiziskt multinationellt företag som verkar inom elkraft- och automationsteknik. Företaget har kring 147 000 anställda (ca 5 000 i Finland) utspritt över drygt 100 länder och har sitt huvudkontor i Zürich, Schweiz. ABB grundades år 1988 då schweiziska Brown Boveri (1891) gick ihop med svenska ASEA (1890) som i sin tur bildats av Elektriska Aktiebolaget i Stockholm (1883) och Wenströms & Granströms Elektriska Kraftbolag (1889) så man kan säga att det finns över 130 års erfarenhet från branschen inom bolaget. Bolaget är uppdelat i fyra divisioner: *Electrification Products*, *Robotics and Motion*, *Process Automation* samt *Power Grids* som är världsledande leverantör av bland annat kraft- och automationsprodukter. (ABB, 2018a)

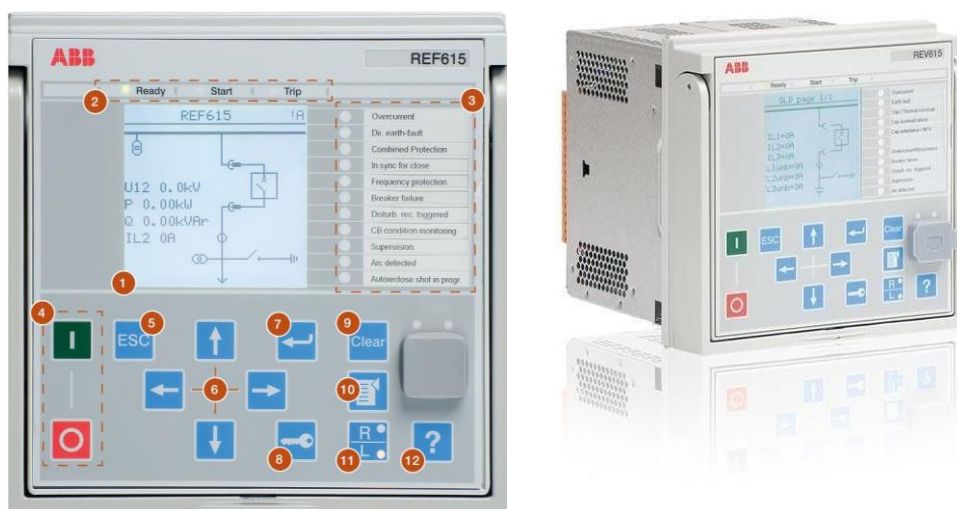
4.8.1 Produkter

Relion 615 samt det mera omfattande *Relion 630* är reläskydd för skydd och styrning i eldistributionsnät och är baserat på en ny skyddsfunktionsmetod som utvecklats på ABB som resultat av många års forskning och praktiska erfarenheter med analys av de mest krävande felen. Skyddsfunktionen baseras på en patenterad algoritm som använder sig av multifrekvent admittansberäkning (MFA) och är speciellt bra vid ökad andel kabel i elnätet

samt då traditionella metoder har problem med variationer i lastströmmarna. MFA-skyddsfunktionen upptäcker, lokaliserar och identifierar alla typer av jordfel, i såväl jordkabelnät som luftledningsnät. Med hjälp av den avancerade algoritmen kan man detektera fel i tidigt skede så att felet kan isoleras och åtgärdas innan stationen kopplar ifrån linjen. (ABB, 2018b)

Trots att metoden är ny och tagits i bruk år 2015 finns det tusentals störningsregistreringar ifrån flera nät som styrker tillförlitligheten i MFA. Ett par exempel på företag som har tagit i bruk MFA är Seiverkot Oy i Seinäjoki samt Helen Ab i Helsingfors. Metoden är ett genombrott inom branschen och ett steg in i framtiden och har också uppmärksammats som vinnare av ”Network Initiative of the Year 2017” priset.

Elkraftföretag måste ständigt utvärdera sina distributionssystem tillförlitlighet och det man i första hand tar fasta på är hur ofta avbrott förekommer och hur länge de varar. De vanligaste avbrottsindexen är System Average Interruption Duration Index (SAIDI) och System Average Interruption Frequency Index (SAIFI). Med hjälp av införandet av ABB:s skyddsfunktion har man kunnat förbättra båda dessa index och således besparas elkraftföretagen på straffavgifter och andra tillhörande kostnader samtidigt som slutkunden får ännu tillförlitligare leverans av el. Tack vare avancerad teknologi kan man också upptäcka fel på ett kostnadseffektivt sätt genom mätning på lågspänningssidan av transformatorerna. Känsligheten beror på nätverksparametrarna, men med metoden kan höghögma jordfel upp till ca 10 k Ω upptäckas. (ABB, 2018b)



Figur 5.8 ABB:s reläskydd Relion 615 baseras på multifrekvent admittansberäkning.

4.8.2 Installation

Relion 615 seriens reläer är kompakta plug-in enheter med måtten 177*177*201 mm. I manualen för enheten finns tydliga instruktioner för hur installationen rent praktiskt kan göras ifall befintliga reläskydd hör till ABB:s eller Strömbergs modeller. Den utdragbara plug-in enheten och färdiggjorda standardkonfigurationer möjliggör snabb testning samt installation med skraddarsydda funktioner. Relion familjens reläer är enkla att använda med tydlig display och användarvänligt gränssnitt. (ABB, 2018c)

5 Resultat och utvärdering

Något direkt och kortfattat resultat kan knappast göras av detta examensarbete då de undersökta produkterna och metoderna skiljer sig på många sätt. Man kan inte säga att någon metod skulle vara klart bättre än en annan, då alla har sina fördelar samt brister.

I dagsläget går utvecklingen alltmera mot att luftledningarna stegvist byts ut mot jordkabel då nätet förnyas. Detta är förstås något som kan komma att påverka också då man uppdaterar mätinstrumenten eftersom kabelnät medför andra typer av utmaningar och sätter andra krav på utrustningen.

Något som är ständigt återkommande i utvecklingen är de ökade kraven för säkerhet och då är Swedish Neutrals lösning ett steg före alla andra i och med att GFN har den unika funktionen att kunna släcka ljusbågar och fortsätta brand- och personsäker drift, något som kanske är framtidens melodi, åtminstone i gnistkänsliga områden. En annan metod som kan komma att bli populärt i framtiden är Lehtonens metod med detektering av spänningsfall på sekundärsidan av transformatorn då detta skulle medföra betydligt lägre utrustningskostnader, men metoden har än så länge svårigheter att detektera höghögsmåga jordfel ($1\text{ k}\Omega$ +) och tillsvidare finns ingen dokumentation på att metoden skulle ha testats praktiskt i ett ”riktigt” elnät.

En annan metod som är relativt ny, men ändå har stora mängder data insamlad från riktiga elnät är ABB:s multifrekventa admittansberäkning, vinnare av ”Network Initiative of the Year 2017” priset. Det kan ju också kännas som ett hållbart alternativ som kunde användas i många år framöver utan att bli föråldrat. Speciellt bra att kunna detektera jordfel redan i uppståande skede så att man kan koppla bort den felande delen innan hela linjen kopplas bort och således spara såväl tid som pengar.

Netcon 100 samlar data om systemets belastningar i realtid och analyserar trender så att man med högre noggrannhet kan bedöma när det är dags att byta ut delar. Central administrering och konfigurering minskar på antalet besök till stationen vilket sparar både tid och pengar. Dessa funktioner ger också möjlighet att både övervaka och styra nätstationernas belastningar vid exempelvis servicearbeten. Likaså Exeris SGS visar mätdata i realtid och ger en bra helhetsbild av nätets status. Kommunikationen för SGS fungerar ostört och smidigt över långa distanser och har alternativa vägar att gå vid eventuella störningar någonstans på linjen, vilket gör att man kan hålla koll på hela nätet och undvika onödiga besök ut till stationerna. En av de främsta fördelarna med SGS-systemet är att det är närapå underhållsfritt då den artificiella intelligensen tar hand om analyseringen av fel och att agenternas batterier håller ca. tio år samt att agenterna är skyddade för åska i och med att de inte är fysiskt kopplade till ledningarna.

Lösningarna ovan kan verka rätt omfattande, men det finns också simplare alternativ, exempelvis Protrols IPC4020 som är bland det nyaste på marknaden, en uppgradering från tidigare modellerna och man kan alltså med den samla strömvärden från flera utgående linjer i samma nätstation, så det behövs inte längre en enhet per utgående linje. Möjligheterna att fjärrkonfigurera enheterna samt att läsa störskrivarfiler är också bättre än tidigare i och med att IPC4020 har en integrerad fjärrterminalsfunktionalitet. Detektorerna utnyttjar dessutom Protrols patententerade mätteknik PAD vilket gör att det inte behövs någon spänningsreferens, utan det räcker med fasströmmarna.

För luftlinjer erbjuds stolpmonterade felpassageindikatorer från Nortroll som är enkla att installera och som tydligt visar huruvida felet är längre fram på linjen eller närmare matningen. Likaså gällande de ledningsmonterade felpassageindikatorerna, men de har ännu fördelen att man kan avläsa på vilken linje som felet ligger när man väl är ”förbi” felet från matningen sett. Också Artech har liknande stolpmonterade enheter med sina fasspänningssensorer som installeras en för varje fas. De har också en version för kabelnätet som enkelt installeras på befintlig kabel med hjälp av delbara Rogowskispolar.

Simulering av de undersökta metoderna var i planeringsskedet en tanke, men vartefter arbetet framskridit har det konstaterats bli för omfattande att genomföra samt knepigt att få till en rättvis jämförelse mellan produkterna och metoderna.

Sammanfattningsvis kan man väl konstatera att oberoende av hur bra produkter och metoder som finns på marknaden så är det i slutändan ändå en balansgång mellan investeringskostnader och de kostnader ett fel kan komma att resultera i ifall man inte snabbt kan åtgärda det.

6 Diskussion

Elbranschen liksom hela den tekniska branschen går framåt med stormsteg och man bör ständigt blicka framåt för att inte tappa mark mot konkurrenterna eller riskera att utrustningen föråldras. Framtiden inom jordfelslokalisering lär bli att med högre noggrannhet lokalisera jordfel i kabel och kanske det i något skede utvecklas en metod för att kunna bestämma på vilket avstånd från mätpunkten felet ligger också för enfasiga jordfel.

GFN är den enda av dessa metoder som är tillräckligt snabb för att förhindra att en ljusbåge uppstår och således snabb nog för att förhindra brand i torra områden. Detta är förstås av yttersta vikt i kruttorra områden som exempelvis Australien eller Kalifornien som tidigare nämnts i arbetet där det varma och torra klimatet årligen gör naturen väldigt känslig för minsta lilla gnista. Utöver de självklara fördelarna med att förhindra bränder, såsom inbesparingen av människoliv och materiella ting kan man också rädda klimatet i och med minskning av koldioxidutsläpp. I en studie vid University of California påvisar forskare att skogsbränder i vissa områden släpper ut lika mycket koldioxid som bilar årligen.

Samhällets utveckling inom elektroniken har under de senaste decennierna varit oerhört snabb och verkar inte avta ännu heller, utan tvärtom fortsätter tillväxten exponentiellt. Samtidigt som all verksamhet bör bli effektivare och billigare ska också säkerheten och stabiliteten i alla produkter och lösningar förbättras, så utmaningarna inom branschen räcker nog till. Allt mera ska automatiseras och bli smartare, i eldistributionssektorn innebär det i första hand att nätverken ska bli smartare och mera självtänkande så att de kan detektera, lokalisera samt åtgärda fel i systemet så långt som möjligt, och i annat fall alarmera om fel samt peka ut felpunkten så noggrant som möjligt och koppla bort enbart den felande delen av nätet.

7 Referenser

- ABB. (2000). *Teknisiä Tietoja ja Taulukoita*. Vasa: Ykkös-Offset Oy.
- ABB. (den 24 Augusti 2018a). *Om oss: ABB*. Hämtat från ABB: <https://new.abb.com/se/om-abb>
- ABB. (den 23 Augusti 2018b). *ABB:s innovativa reläskydd för detektering av alla typer av jordfel*. Hämtat från ABB: <https://new.abb.com/medium-voltage/sv/rela-kontroll-distribution/innovativt-jordfelsskydd>
- ABB. (den 24 Augusti 2018c). 615 series Installation Manual. Vasa, Österbotten, Finland.
- Arteche. (den 27 Juli 2018). *Arteche: Datasheet sensART OVERSENS*. Hämtat från Arteche: www.arteche.com/en/datasheet-sensart-oversens
- Blomqvist, H. (2003a). *Elkraftshandboken - Elkraftsystem 1*. Stockholm: Liber AB.
- Blomqvist, H. (2003b). *Elkraftshandboken - Elkraftsystem 2*. Stockholm: Liber AB.
- Energiateollisuus. (den 23 Augusti 2018). *Materiaalipankki*. Hämtat från Energiateollisuus: https://energia.fi/files/881/Sahkontoimituksen_laatu_ja_toimitustapavirheen_sovellusohje_2014.pdf
- Energiavirasto. (den 23 Augusti 2018). *Tillsynsmetoder 2016-2023*. Hämtat från Energimyndigheten: <https://www.energiavirasto.fi/documents/10179/0/S%C3%A4hk%C3%B6%20jakeluverkko+----+2+suuntaviivat+valvontamenetelmiksi+2016-2023+---+30062015+korjattu.pdf/7cd6b85e-3538-4342-a224-e264fe118bd1>
- Esse Elektro-Kraft Ab. (den 22 Juni 2018). *Om oss: Företaget*. Hämtat från www.eekab.fi
- Exeri AB. (den 15 Oktober 2018). *Om oss: Exeri*. Hämtat från Exeri: www.exeri.se/om-oss
- Fingrid. (den 23 Augusti 2018). *Fingrid*. Hämtat från Fingrid: <https://www.stjornarradid.is/lisalib/getfile.aspx?itemid=40a9219b-0fdd-11e8-9427-005056bc530c>
- Lakervi, E., & Partanen, J. (2008). *Sähköjakelutekniikka*. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press.
- Linčiks, J., & Baranovskis, D. (2009). Single Phase Earth Fault Location in the Medium. *The 50th international scientific conference "power and electrical engineering"* (ss. 13-18). Riga, Lettland: Riga Technical University.
- Netcontrol. (den 22 Juni 2018a). *Om Netcontrol*. Hämtat från Netcontrol: www.netcontrol.com
- Netcontrol. (den 4 Juli 2018b). *Netcon 100: Egenskaper*. Hämtat från Netcontrol: <https://www.netcontrol.com/swe/produkter/stationsautomation/natstationer/netcon-100/egenskaper/>

- NorTroll. (den 22 Juni 2018). *About us*. Hämtat från www.nortroll.no
- Protrol. (den 6 Juli 2018). *Om oss: Protrol*. Hämtat från Protrol: www.protrol.se
- Swedish Neutral. (den 24 Augusti 2018a). *Swedish Neutral*. Hämtat från <http://www.swedishneutral.se/download/Flyer%20SN%20Workshop%202013%20Smart%20Grid%20Solutions%20-%20Svenska.pdf>
- Swedish Neutral. (den 30 Augusti 2018b). *Swedish Neutral*. Hämtat från Swedish Neutral: <http://www.swedishneutral.se/download/pressrelease.pdf>
- Swedish Neutral. (den 13 Juli 2018c). *Stand Alone Earth Fault Locator*. Hämtat från Swedish Neutral: www.swedishneutral.se
- Swedish Neutral Ab. (den 5 Juli 2018). *Swedish Neutral: Premium Power Protection*. Hämtat från Swedish Neutral: www.swedishneutral.se
- Topolanek, D., Lehtonen, M., Adzman, M. R., & Toman, P. (2015). Earth fault location based on evaluation on voltage sag at secondary side of medium voltage/low voltage transformers. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2069-2077.
- Western Power. (den 7 Juli 2018). *Western Power: overhead vs underground*. Hämtat från Western Power: <https://westernpower.com.au/community/blog/head-to-head-overhead-vs-underground/>
- Winter, K. (2014). The RCC Ground Fault Neutralizer - A Novel Smart Grid Protection. *International Conference on Electricity Distribution* (ss. 1-4). Buenos Aires, Argentina: Cidel.
- WWF Deutschland. (2016). *Forrests ablaze*. Berlin: WWF.