

Programvara för inställning av transformator-differentialskydd



Niclas Johannesson

Division of Industrial Electrical Engineering and Automation
Faculty of Engineering, Lund University

Denna sida har medvetet lämnats tom.

Programvara för inställning av transformator-differentialskydd

Niclas Johannesson

Oktober 2010

Handledare:

Niklas Stråth, E.ON Elnät

Magnus Akke, IEA

Examinator:

Olof Samuelsson, IEA



LUNDS UNIVERSITET

Lunds Tekniska Högskola

Master's Thesis

Division of Industrial Electrical Engineering and Automation

Abstract

Differential protection is commonly used in electric power systems for protection of objects with smaller geographical extent such as busbars and transformers.

When a fault in a transformer occurs, the increased gas pressure inside the transformer tank might result in fire which might cause an explosion if the transformer is not disconnected. Transformer differential protection is often used for protection of larger transformers since they offer 100% selectivity and therefore can trip the faulted transformer instantaneously if a fault is detected.

Certain scenarios may cause false differential currents for which the differential relay should not trip the transformer. One such scenario is the inrush current that is caused when the transformer is energized. The inrush current is a transient phenomenon which fades over time and contains a significant amount of harmonics which can be used to block the relay from tripping.

Another source of false differential current is the on-line tap-changer (OLTC) if the transformer is equipped with such. False differential is caused when the OLTC is in an off-nominal position and the magnitude of the differential current is proportional to the load current of the transformer. In order to prevent the relay from tripping, transformer differential relays have a restraining function which allows for larger amount of differential current when the transformer is heavily loaded. The restraining function also prevents the relay from tripping when the current transformers get saturated at high through fault current.

An electromechanical transformer differential relay uses analog compensation for zero-sequence elimination and current transformer mismatch. Since this compensation cannot be considered to be made with high precision, sacrifices in sensitivity is required in order to avoid unnecessary tripping. In modern microprocessor based relays this compensation is made numerically in algorithms which can be considered to have high precision and thus allows for more sensitive settings without the risk of unnecessary tripping.

In order to help the relay protection engineer with the calculation of appropriate settings, a software has been developed that graphically can present the false differential current caused by the OLTC and any load in the protection zone. The software can handle different transformer differential relays from the manufacturers ABB, Areva and Siemens.

Sammanfattning

Differentialskydd används ofta i elkraftsystem för att skydda objekt med mindre geografisk utsträckning som t.ex. samlingsskenor och transformatorer.

När en transformator drabbas av fel kan det ökade gstrycket inuti tanken leda till brand och i värsta fall också en explosion om transformatorn inte frångkopplas. För att skydda större transformatorer används ofta transformatordifferentialskydd eftersom de erbjuder hundraprocentig selektivitet och därmed kan frångkoppla momentant om ett fel upptäcks.

Differentialskydd för transformatorer måste innehålla funktioner för att blockera frångkoppling vid vissa scenarion som orsakar "falska" differentialströmmar utan att ett fel har inträffat. Ett exempel är inrusningsströmmen som uppstår när en transformator spänningssätts. Inrusningsströmmen är ett transient fenomen och avtar med tiden. Eftersom strömmen innehåller övertoner kan övertonsstabilisering användas för att blockera frångkoppling.

Falsk differentialström uppstår även då transformatorn är utrustad med lindningskopplare och denna inte befinner sig i mittläge. Differentialströmmen som uppstår är beroende av lindningskopplarens läge samt proportionell mot storleken av den genomgående strömmen. Transformatordifferentialskydd har därför en stabiliserande funktion som tillåter större differentialströmmar när transformatorn är högt belastad. Den stabiliserande funktionen förhindrar även frångkoppling då strömtransformatorerna blir mättade vid stora genomgående strömmar som kan orsakas av t.ex. ett externt fel i närheten av transformatorn.

Elektromekaniska transformatordifferentialskydd förlitar sig på analog kompensering av nollföljdseliminering samt felanpassning av strömtransformatorer. Eftersom denna kompensering inte kan antas vara speciellt noggrann måste känslighet offras för att inte riskera onödiga frångopplingar. I moderna transformatordifferentialskydd används istället en mikroprocessor för att numeriskt utföra all kompensering i beräkningsalgoritmer. Detta medför en mer exakt funktion vilket ger möjligheten för känsligare inställningar utan att minska pålitligheten.

För att underlätta reläskyddsingenjörens inställningsarbete har en programvara utvecklats för att åskådliggöra den förväntade differentialströmmen orsakad av lindningskopplare och eventuellt lastuttag i skyddszonen. Programmet är utvecklat för att hantera olika transformatordifferentialskydd från ABB, Areva och Siemens.

Förord

Detta examensarbete har utförts på Lunds Tekniska Högskola som den avslutande delen av min civilingenjörsexamen. Examensarbetet har utförts på Institutionen för Industriell Elektroteknik och Automation i samarbete med E.ON Elnät. Jag har fått mycket värdefullt stöd och hjälp under arbetets gång och vill därför passa på att tacka:

- **Niklas Stråth** min handledare hos E.ON Elnät som under arbetets gång bidragit med ett ovärderligt stöd i form av kunskap och intressanta diskussioner. Jag vill även tacka för den återkoppling jag har fått på arbetet.
- **Olof Samuelsson** examinator på Institutionen för Industriell Elektronik och Automation.
- **Brian Augustsson** som har läst, granskat och kommenterat på rapporten.
- Övriga som på något sätt har bidragit och hjälpt till i utvecklingen av detta arbete.

Tack!

Niclas Johannesson

Lund, oktober 2010

Innehåll

1. Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Disposition	1
2. Transformatorn	3
2.1 Transformatorns historia	3
2.2 Magnetisk induktion	4
2.3 Den ideala transformatorn	5
2.4 Teckenkonvention	6
2.5 Transformatorn i praktiken	7
2.6 Magnetisering	7
2.6.1 Stationärt flöde	7
2.6.2 Transient flöde	8
2.7 Trefastransformatorn	9
2.7.1 Grundläggande konstruktionsprinciper.....	9
2.7.2 Transformatorkopplingar	10
2.7.2.1 Δ -koppling	10
2.7.2.2 Y-koppling	10
2.7.2.3 Z-koppling	11
2.7.3 Transformator typer.....	11
2.7.3.1 Transformatorer med två lindningar.....	11
2.7.3.2 Transformatorer med tre lindningar.....	12
2.7.3.3 Autotransformatorer.....	12
2.7.3.4 Transformatorer med spänningsreglering	12
2.7.3.5 Fasvridande transformatorer	13
2.8 Transformatorfel	13
2.8.1 Externa orsaker.....	13
2.8.1.1 Överspänning	13
2.8.1.2 Överlast.....	13
2.8.1.3 Övermagnetisering	14
2.8.1.4 Externa fel.....	14
2.8.2 Interna orsaker.....	14
2.8.2.1 Kärnfel	14
2.8.2.2 Reducerad kylning	14
2.8.2.3 Förorening av olja och oljeläckage.....	14
2.8.3 Felströmmar	15
2.8.3.1 Jordfel	15
2.8.3.2 Faskortslutning.....	15
2.8.3.3 Varvkortslutning	15
3. Differentialskydd för transformator	16
3.1 Introduktion.....	16
3.2 Grundprincipen för differentialskydd.....	16
3.3 Funktion	17
3.3.1 Frånkoppling.....	18
3.3.2 Blockera frånkoppling	18
3.3.2.1 Inkopplingsströmstöt	18
3.3.2.2 Inkoppling av parallell transformator	18
3.3.2.3 Övermagnetisering	19

3.3.2.4 Externa fel.....	19
3.4 Känslighet.....	20
3.4.1 Strömtransformatorer.....	20
3.4.2 Lindningskopplare.....	20
3.4.3 Effektuttag i skyddsområdet.....	20
3.5 Elektromekaniska differentialskydd.....	21
3.5.1 Konstruktion.....	21
3.5.2 Kompensering av fasvridning.....	23
3.5.3 Blockering av felaktig utlösning.....	24
3.6 Numeriska differentialskydd.....	25
3.6.1 Sampling.....	25
3.6.2 Strömtransformatorer till numeriska differentialskydd.....	26
3.6.3 Algoritm för beräkning av differentialströmmar.....	26
3.6.3.1 Intern matchning av strömtransformatorer.....	27
3.6.3.2 Konvertering till per unit.....	27
3.6.3.3 Vektorgruppskompensering.....	28
3.6.3.4 Eliminering av nollföljdsströmmen.....	28
3.6.3.5 Beräkning av differentialströmmar.....	29
3.6.4 Funktionskaraktistiker i numeriska differentialskydd.....	29
3.6.5 Blockering av felaktig utlösning.....	31
3.6.5.1 Övertonsstabilisering.....	31
3.6.5.1.1 Inkopplingsströmstöt.....	31
3.6.5.1.2 Övermagnetisering.....	31
3.6.5.1.3 Cross-blocking.....	31
3.6.5.2 Ostabiliserad funktion.....	31
4. Utveckling av program för inställningar av transformordifferentialskydd.....	33
4.1 Kravspecifikation.....	33
4.2 Plattform.....	33
4.3 Beräkningar.....	33
4.3.1 Antaganden i beräkningarna.....	33
4.3.2 Differentialström orsakad av lindningskopplare.....	34
4.3.2.1 Transformator med två lindningar.....	34
4.3.2.2 Transformator med tre lindningar.....	35
4.3.3 Differentialström vid maximal genomgående felström.....	36
4.3.3.1 Beräkning av nätimpedans.....	36
4.3.3.2 Impedans i en tvålindningstransformator.....	37
4.3.3.3 Impedans i en trelindningstransformator.....	37
4.3.3.4 Beräkning av maximal genomgående felström.....	38
4.3.3.4.1 Nätimpedans i per unit.....	38
4.3.3.4.2 Genomgående ström för en tvålindningstransformator.....	39
4.3.3.4.3 Genomgående ström för en trelindningstransformator.....	39
4.3.3.5 Effektuttag i skyddsområdet.....	41
5. Resultat.....	44
6. Slutsatser.....	45
7. Fortsatt arbete.....	46
Referenser.....	47
Bilaga.....	49

1. Inledning

Detta kapitel ger en kort bakgrund till transformator-differentialskydd samt beskriver syftet med arbetet och rapportens disposition.

1.1 Bakgrund

För att kunna driva elkraftssystem på ett säkert sätt används reläskydd vars uppgift är att upptäcka och koppla bort fel. Differentialskydd är en typ av reläskydd som används för att skydda objekt med begränsad geografisk utsträckning. Några exempel är generatorer, transformatorer, samlingsskenor och kortare ledningar.

Även om alla differentialskydd fungerar enligt samma principer så måste objektets egenskaper tas i beaktning. För transformator-differentialskydd måste hänsyn tas till bl.a. nollföljdseliminering, fasvridning och lindningskopplare.

I äldre elektromekaniska transformator-differentialskydd krävdes det mycket planering av reläskyddsingenjören vid en installation eftersom vissa av dessa egenskaper var tvungna att kompenseras analogt genom att t.ex. använda mellanströmstransformatorer med speciella kopplingar för att filtrera nollföljdsströmmen.

Dagens digitala transformator-differentialskydd innehåller istället funktioner för att numeriskt utföra kompenseringarna som krävs, vilket gör att ett transformator-differentialskydd kan anslutas till en i stort sett godtycklig anläggning utan att speciella kopplingar måste göras. De numeriska kompenseringarna erbjuder dessutom mer precision vilket tillåter känsligare inställningar som i sin tur ger snabbare fränkopplingstider och därmed minskar eventuella skador vid ett transformatorfel.

1.2 Syfte

Vid inställningsarbete av ett modernt transformator-differentialskydd måste hänsyn tas till faktorer i transformatorns omgivning. En "falsk" differentialström kan uppstå när t.ex. en eventuell lindningskopplare befinner sig i en annan position än mittläget eller om en last är ansluten i skyddsområdet. För att transformator-differentialskyddet ska kunna ställas in med stor känslighet utan att offra pålitlighet måste de falska differentialströmmarna tas i beaktning i inställningsarbetet.

Detta examensarbete består av två delar. Den ena delen består av denna rapport som innehåller teori kring transformatorer och transformator-differentialskydd och den andra delen består av ett utvecklat program som åskådliggör den falska differentialströmmen tillsammans med karakteristiken för olika differentialskydd. Syftet är att dessa två delar tillsammans kan användas för att underlätta inställningsarbetet för transformator-differentialskydd. Ett sekundärt syfte är att rapporten kan användas som en introduktion till transformator-differentialskydd.

1.3 Disposition

Denna rapport är indelad i sju kapitel.

- **Kapitel 2** handlar om transformatorn för att ge en inblick i olika feltyper. Även fenomenet inrusningsström tas upp eftersom det innebär anpassning av differentialskyddet.
- **Kapitel 3** innehåller teori kring transformator-differentialskydd som grundprincip samt orsaker till olika falska differentialströmmar. Dessutom beskrivs hur både elektromekaniska och numeriska differentialskydd fungerar.

- **Kapitel 4** innehåller teori som ligger i grund för beräkningar som det utvecklade programmet utför.
- **Kapitel 5-7** består av resultat, slutsatser samt förslag på vidare arbete inom området.

2. Transformatorn

Detta kapitel innehåller lite allmän historia och teori om transformatorer. Den ideala transformatorn för en fas studeras och sedan appliceras den utvecklade teorin för trefasiga transformatorer. Kapitlet tar också upp några av de många olika typer av transformatorer som existerar samt fel och orsaker som leder till transformatorfel.

2.1 Transformatorns historia

Fenomenet elektromagnetisk induktion upptäcktes redan 1831 av Michael Faraday som konstruerade en apparat innehållandes två spolar kring en järnkärna. Det dröjde dock ytterligare 54 år innan hans uppfinning fick en praktisk användning i det som idag kallas för transformator.

Joseph Henry studerade Faradays uppfinning och upptäckte 1832 att genom att skapa ett avbrott i likströmmen genom den ena spolen skapades en hög spänning i den motsatta spolen. Han insåg även att detta orsakades av ändringen i det magnetiska flödet. För att generera dessa avbrott uppfanns olika oscillatorer, först den handdrivna och senare den elektromekaniska. Användningsområdet för uppfinningarna var främst inom medicin för elterapi.

Den fortsatta utvecklingen ledde till att man kring 1840 hade lyckats alstra en spänning i storleksordningen kilovolt vilket gav upphov till en gnista över luftgap på sekundärsidan. Detta ledde till en kapplöpning bland forskare i hela världen för att producera den längsta gnistan som tillslut sträckte sig ca 1,5 m. De tekniska framsteg som gjordes innefattade bl.a. oljeisolering och laminerad järnkärna som senare skulle visa sig vara viktiga i konstruktionen av högspänningstransformatorer.

Den första kommersiella användningen av elektricitet var för gatubelysning. Problemet man brottades med var hur man skulle kunna ansluta flera lampor till samma generator. Vid parallellkoppling måste lamporna anslutas till en ledning med låg spänning (ca 35 V). När många lampor ansluts till denna ledning krävs därför en stor ström vilket leder till stora förluster i ledningarna. En räckvidd på mer än 100-200 m från generatoren var därför inte möjligt. Om istället en seriekoppling med hög spänning (1000-1500 V) användes för att driva lamporna kunde räckvidden ökas till flera kilometer. Dock var problemet att om en lampa gick sönder så slocknade hela gatan. Lamporna längst en gata borde istället göras oberoende av varandra.

I Paris 1877 fick Paul Jablochkoff en idé som kunde lösa problemet. Istället för att använda en traditionell seriekoppling menade han att seriekopplade induktionskretsar kunde användas för att driva lamporna. Induktionskretsarna bestod av två spolar där lampan anslöts till respektive sekundärspole. Hans teori var att eftersom lamporna nu var elektriskt isolerade från varandra så borde de inte påverka varandra. Idag vet vi att denna teori inte riktigt stämmer, dock ledde hans idé till en signifikant prestandaökning hos ljusslingorna.

Prestandaökningen gjorde att fler följde teorin som Jablochkoff hade utvecklat och ljusslingor började installeras för allmänt bruk. Ett exempel är en 12 km lång ljusslinga som installerades 1884 i Londons tunnelbana. Italien byggde också ett system längs järnvägssträckan Torino-Lanzo där den mest avlägsna lampan var monterad 40 km från generatoren. Dock så visade sig felaktigheterna i Jablochkoffs teori när enskilda grupper av lampor sattes på eller stängdes av. Variationerna i spänningar och ström som uppstod var skadligt för lamporna vilket gjorde att systemet aldrig kunde användas för konsumenter utan endast där ljuset skulle lysa konstant.

I Mars 1885 fick tre ungerska ingenjörer ett genombrott i sitt arbete. Károly Zipernowsky, Ottó Bláthy och Miksa Déri insåg att det enda sättet att bygga ett elsystem med

lång räckvidd var att använda transformatorer med hög omsättning mellan lindningarna för att på så sätt skilja högspänningsnät (1,4 -2,0 kV) från konsumenternas lågspänningsnät (100 V). De insåg också att en transformator med en sluten järnkärna var att föredra eftersom den medför mindre förluster samt klarar att hålla spänningen relativt stabil även vid olika lastförhållanden.

Det föreslagna systemet visades upp 1885 vid *the Industrial Exhibition of Budapest*. En växelspänningsgenerator med frekvensen 100 Hz drev en 1400 V-transmissionsledning som i sin tur drev tolv stycken 5 kVA samt fyra stycken 7,5 kVA transformatorer parallellt. De 16 transformatorerna hade sekundärspänningen 60 V och drev 1067 glödlampor samt en del ljusbågslampor kring vägar och i stora lokaler.

Trots att Zipernowsky och hans kollegor inte uppfann själva transformatorn så uppfann de distributionssystemet och transformatorns centrala del i detta [1].

2.2 Magnetisk induktion

Transformatorn fungerar på samma sätt som andra elektriska maskiner, enligt principen av elektromagnetisk induktion. Detta stycke tar därför upp några grundläggande principer som är viktiga inför nästa stycke då samma principer tillämpas i den ideala transformatorn.

Ett magnetiskt flöde (Φ) genom arean (A) samt flödestätheten (B) beräknas enligt ekvation 2.1.

$$\phi = B \cdot A \quad (2.1)$$

Flödestätheten i en spole är beroende av antalet varv i spolen (N), strömmen (I), spolens längd (l) samt permeabiliteten (μ) som är en materialberoende konstant.

$$B = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{l} \quad (2.2)$$

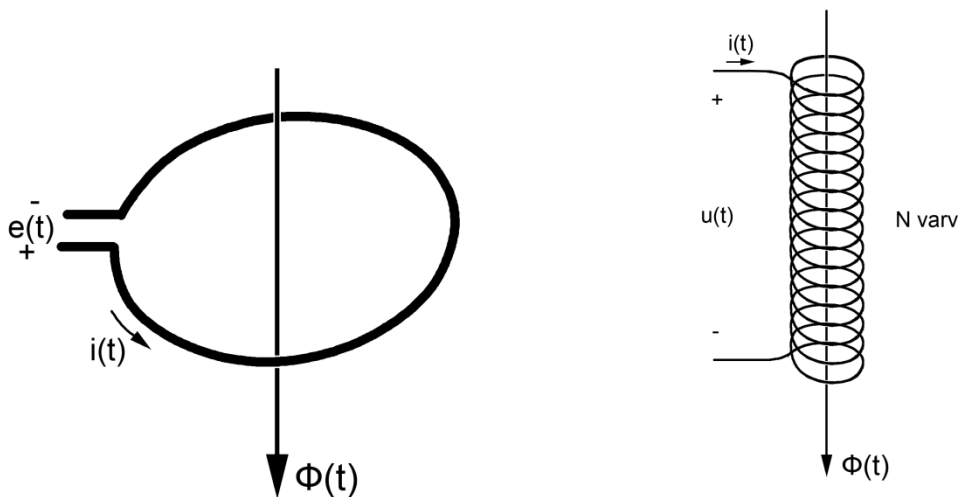
När ett lindningsvarv istället utsätts för ett tidsberoende magnetiskt flöde så induceras en spänning (e) enligt Faradays induktionslag enligt ekvation 2.3. Minustecknet i ekvationen kommer från Lenz' lag som säger att om en förändring sker i ett magnetiskt system så kommer en motverkan som motarbetar denna förändring att uppstå.

$$e(t) = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2.3)$$

Om N stycken varv seriekopplas gäller sambandet mellan den totala spänningen över spolen och det magnetiska flödet enligt ekvation 2.4.

$$u(t) = N \cdot e(t) = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.4)$$

Sambandet i ekvationerna 2.3 och 2.4 illustreras i figur 2.1 där ett respektive flera lindningsvarv utsätts för ett magnetiskt flöde.



Figur 2.1 Referensriktningar för ström och spänning då ett respektive flera lindningsvarv utsätts för ett magnetiskt flöde.

En integrering av ekvation 2.4 ger det magnetiska flödet som en funktion beroende av spänningen (u).

$$\Phi(t) = \frac{1}{N} \int u(t) dt \quad (2.5)$$

Ekvation 2.4 och 2.5 är viktiga eftersom de visar att sambandet mellan spänning och magnetiskt flöde måste vara tidsberoende [2] [3].

2.3 Den ideala transformatorn

I föregående avsnitt behandlas grunderna för elektromagnetisk induktion. I detta avsnitt används denna princip för att överföra magnetisk energi mellan två spolar i en magnetisk krets. För att underlätta beräkningarna görs följande antaganden:

- Lindningarna har ingen resistans, så de resistiva förlusterna är noll.
- Permeabiliteten i kärnan är oändlig, så kärnans reluktans är noll.
- Allt magnetiskt flöde går genom kärnan och inget går genom luften.
- Kärnan orsakar inga förluster, som t.ex. hysteres.

När spolen på primärsidan är spänningssatt skapas ett magnetiskt flöde genom kärnan som leder till att en spänning kan induceras över spolen på sekundärsidan. Om spänningen är en ren växelspanning med konstant frekvens så kommer det magnetiska flödet anta samma frekvens, dock med en annan amplitud och en fjärdedels periods fäsförskjutning enligt ekvationer 2.6–2.7.

$$\Phi = |\Phi| \cdot e^{j\omega t} \quad (2.6)$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = j\omega \cdot |\Phi| \cdot e^{j\omega t} = \omega \cdot |\Phi| \cdot e^{j(\omega t + \frac{\pi}{2})} \quad (2.7)$$

Flödets koppling till primärsidans spänning anges av ekvation 2.5, men kan även

skrivs med ekvation 2.4. Spänningen över primär- och sekundärsidan lyder då båda enligt ekvation 2.4 och resulterar i ekvationerna 2.8–2.9.

$$U_1 = N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = N_1 \cdot \omega \cdot |\Phi| \cdot e^{j(\omega t + \frac{\pi}{2})} \quad (2.8)$$

$$U_2 = N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = N_2 \cdot \omega \cdot |\Phi| \cdot e^{j(\omega t + \frac{\pi}{2})} \quad (2.9)$$

Division av ekvation 2.8 med 2.9 ger sambandet mellan spänningar och antalet lindningsvarv i de båda sidorna.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1 \cdot \omega \cdot |\Phi| \cdot e^{j(\omega t + \frac{\pi}{2})}}{N_2 \cdot \omega \cdot |\Phi| \cdot e^{j(\omega t + \frac{\pi}{2})}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.10)$$

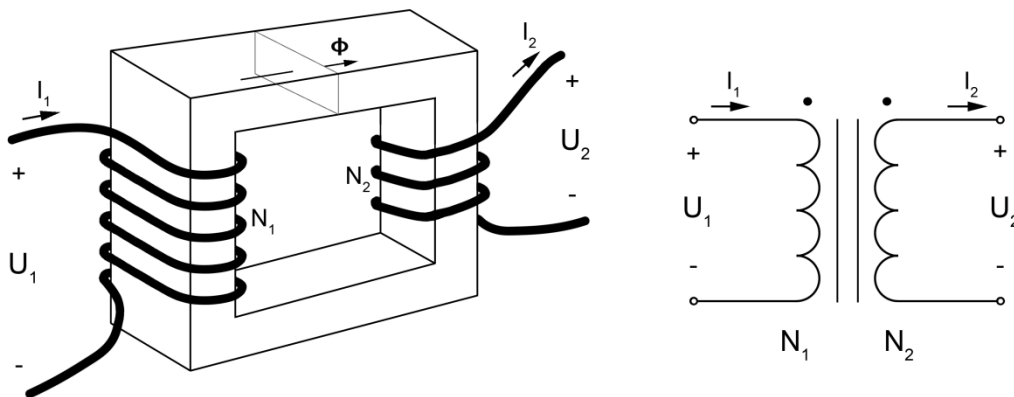
Eftersom transformatorn är ideal (inga förluster) gäller också att hela effekten överförs från den primära till den sekundära sidan. Detta ger sambandet enligt ekvation 2.11 som efter omskrivning resulterar i ekvation 2.12 [3].

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \quad (2.11)$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.12)$$

Spänningar, strömmar och antalet lindningsvarv från ekvation 2.12 illustreras i figur 2.2.

Trots att ovanstående ekvationer endast gäller för den ideala transformatorn fungerar de ofta för verkliga transformatorer då de uppträder väldigt snarlikt den ideala transformatorn [2].



Figur 2.2 Enfastransformator och kretssymbol för en ideal transformator.

2.4 Teckenkonvention

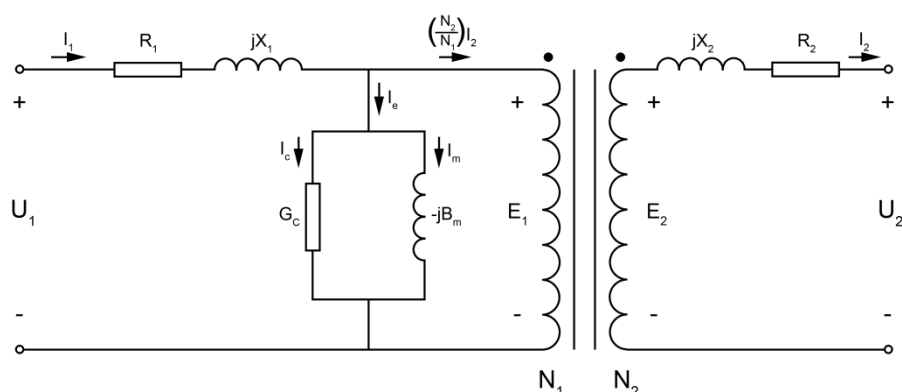
Eftersom det inducerade magnetfältet har en riktning innebär det att transformatorn har en polaritet som är beroende av spolarnas utformning. I figur 2.2 visas teckenkonventionen då strömmar och spänningar på båda sidor är i fas med varandra. När strömmen går in vid markeringen på primärsidan går strömmen samtidigt ut ur den markerade polen på sekundärsidan som om de båda sidorna vore sammankopplade i en krets [4].

2.5 Transformatorn i praktiken

Beskrivningen av den ideala transformatorn i avsnitt 2.3 byggde på vissa antaganden som inte helt överensstämmer med verkligheten men som ändå kan antas vara rimliga när man behöver göra en snabb uppskattning. I detta avsnitt diskuteras översiktligt effekterna av dessa med hjälp av en kretsekivalent som bättre representerar den verkliga transformatorn.

Lindningarna i en verklig transformator har alltid en viss resistans, betecknad med R_1 och R_2 i figur 2.3. Resistenserna ger upphov till spänningsfall och därmed också en förlust av aktiv effekt i form av värmeutveckling på båda sidorna. X_1 och X_2 representerar det magnetiska flödet som går utanför kärnan och därmed inte inducerar någon spänning i den motsatta spolen. Reaktanserna orsakar förutom ett spänningsfall även en förlust av reaktiv effekt.

Eftersom att permeabiliteten inte är oändlig i verkligheten har kärnan en reluktans som inte är noll. Det innebär i praktiken att en del av effekten inte kan överföras till sekundärsidan. I kretsen representeras detta av strömmen I_e som består av både en reell och imaginär komponent. De båda strömmarna representerar olika förluster i kärnan, bl.a. hysteres- och magnetiseringsförluster. Dessa förluster är mycket beroende av bl.a. vilket material som använts i konstruktionen av kärnan [3].



Figur 2.3 Kretsekivalent för den verkliga transformatorn [3].

Kretsen representerar en del av transformatorns förluster, dock tar den inte hänsyn till vissa fenomen som uppstår i en riktig transformator. Mättning och inrusningsström är två exempel på fenomen som inte representeras i kretsekivalenten.

2.6 Magnetisering

Magnetiska flödet genom kärnan kan delas upp i två komponenter, det stationära och det transienta flödet.

2.6.1 Stationärt flöde

Det stationära magnetiska flödet (Φ) är beroende av kvoten mellan spänning (U) och frekvensen (f) samt en konstant (C) vilken är beroende av transformatorns konstruktion. Sambandet visas i ekvation 2.13.

$$\Phi = C \cdot \frac{U}{f} \quad (2.13)$$

En transformator brukar vanligtvis vara byggd för att tolerera en U/f -kvot upp till ca 10 % utöver sin specifikation utan att gå in i mättningsområdet. Under denna gräns är

magnetiseringsströmmen relativt liten, ca 0,2-0,5 % av den totala strömmen för transformatorer större än 30 MVA [5].

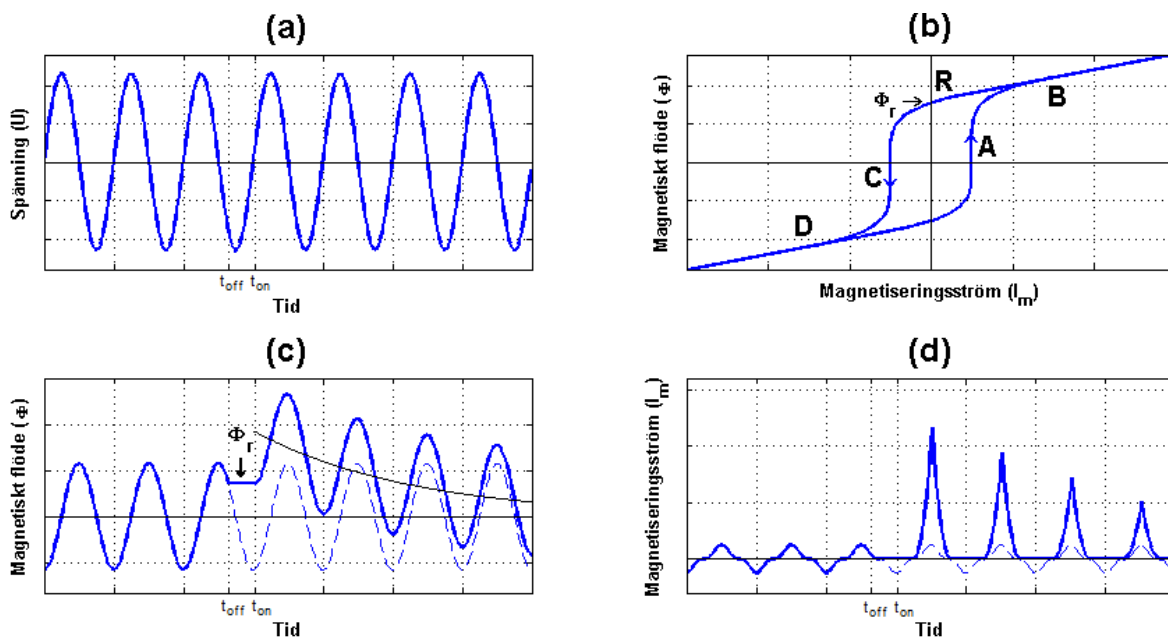
2.6.2 Transient flöde

Transient magnetiskt flöde uppstår när spänningen på primärsidan ändrar amplitud eller fasförskjutning, vid exempelvis spänningssättning eller åsknedslag. Det transienta flödet ger upphov till transienta strömmar som vid t.ex. spänningssättning kan nå en storlek upp till ca 200-500 % av transformatorns märkström [5].

Inrusningsströmmar uppstår främst när en transformator kopplas till nätet men liknande strömmar kan också uppstå när t.ex. ett externt fel inträffar eller bortkopplas. Eftersom de övriga orsakerna är externa kommer endast strömmen som uppstår vid spänningssättning av en transformator att behandlas i detta avsnitt.

Inrusningsströmmens storlek beror främst på två orsaker, i vilken tid spänningen kopplas in (punkten på sinuskurvan) samt remanensen. Remanensen är det magnetiska flöde som finns kvar i kärnan sedan senaste bortkopplingen (punkt R i figur 2.4b). Observera att remanensen har en riktning eftersom magnetiseringskurvan skär y-axeln vid två punkter.

Om bortkoppling av transformatorn sker under den senare halvan av den positiva, eller den första halvan av den negativa perioden i primärspänningen (d.v.s. $\phi > 0$ i figur 2.4c), kommer det magnetiska flödet ϕ_r som indikeras i punkten R att finnas kvar i transformatorn. Om bortkopplingen istället sker under den senare halvan av den negativa eller första halvan av den positiva perioden (d.v.s. $\phi < 0$ i figur 2.4c) kommer remanensen istället att vara $-\phi_r$ vilket motsvarar en spegling av punkten R. Remanensen bevaras i transformatorn eftersom det inte finns någon motverkande magnetisk kraft.



Figur 2.4 Storheterna spänning, magnetiskt flöde och magnetiseringsström vid en spänningssättning med resulterande inrusningsström. (a) Nätspänningen på transformatorns uppsida, (b) Det olinjära sambandet mellan magnetiseringsström och magnetiskt flöde, (c) Det magnetiska flödet i transformatorn samt (d) Transformatorns magnetiseringsström.

Vid stationär drift, d.v.s. innan t_{off} i figurerna så följer det magnetiska flödet en symmetrisk hystereskurva kring origo som visas i figur 2.4b. När spänningen över primärsidan har positiv halvperiod följer det magnetiska flödet kurvan från punkt D till punkt B

genom A. Motsvarande gäller under den negativa halvperioden då det magnetiska flödet följer kurvan från punkt B till punkt D genom C. Notera att det magnetiska flödet är fasförskjutet med 90° efter spänningen. Den stationära magnetiseringsströmmen illustreras även i figur 2.4d.

Det magnetiska flödet, som är beroende av spänningens integral, kommer att utgå från punkten för det remanensen i magnetiseringskurvan (figur 2.4b). Om återinkopplingen av en transformator med remanensen Φ_r sker i början av primärspänningens positiva halvperiod (t_{on}) så kan transformatorn teoretiskt sett kräva ett magnetiskt flöde upp till dubbelt mot det normala vid normal drift. Detta innebär att transformatorn tvingas in i mättningsområdet för att kunna åstadkomma tillräckligt med magnetiskt flöde, d.v.s. punkt B i figur 2.4b. Magnetiseringsströmmen som krävs för att producera detta magnetiska flöde kommer därför att öka. Inrusningsströmmen illustreras i figur 2.4d där strömspikarna orsakas av transformatorns mättning.

I figur 2.4c-d visas även hur transienterna i ström och magnetiskt flöde avtar efter inkoppling. Tidskonstanten, som avgör tiden för transformatorn att återgå till sitt ursprungsläge är beroende av märkeffekten och kan variera från 0,2 – 720 sekunder där transformatorer med högre märkeffekt generellt har en längre tidskonstant [2] [6] [7].

2.7 Trefastransformatorn

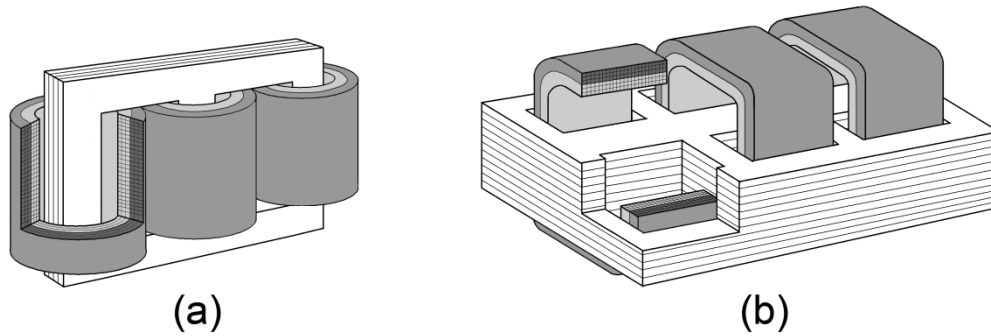
Hittills har endast den enfasiga transformatorn behandlats. I detta avsnitt introduceras transformatorn som komponent i trefassystem och innebörden av detta diskuteras.

2.7.1 Grundläggande konstruktionsprinciper

Att använda transformatorn i ett trefassystem är egentligen inte mer komplicerat än att använda en enfastransformator per fas. Nackdelen med detta är att det blir dyrt, tungt och tar mycket plats med tre separata järnkärnor. I praktiken placeras därför oftast alla fasernas lindningar på en och samma kärna. Nackdelen med detta är att hela transformatorn måste tas ur drift och repareras när ett fel inträffar i en fas till skillnad från fallet då tre separata enfaseenheter används eftersom en reservenhet då kan ersätta transformatorn i den drabbade fasen [3].

Trefastransformatorer kan delas in i två konstruktionsprinciper, *core* (figur 2.5a) och *shell* (figur 2.5b). Skillnaden mellan dessa är placeringen av lindningarna relativt till järnkärnan. I en *core*-konstruktion så omger lindningarna järnkärnan medans i en *shell*-konstruktion så innesluts lindningarna av järnkärnan. De båda koncepten illustreras i figur 2.5.

Kärnan består av hopsatta laminerade järnskivor. Anledningen till detta är att en kärna av massiv järn hade gett upphov till cirkulerande strömmar i kärnan som i sin tur hade orsakat förluster i form av värmeutveckling. För att elektriskt isolera och även kyla transformatorn är den normalt fylld med olja [2].



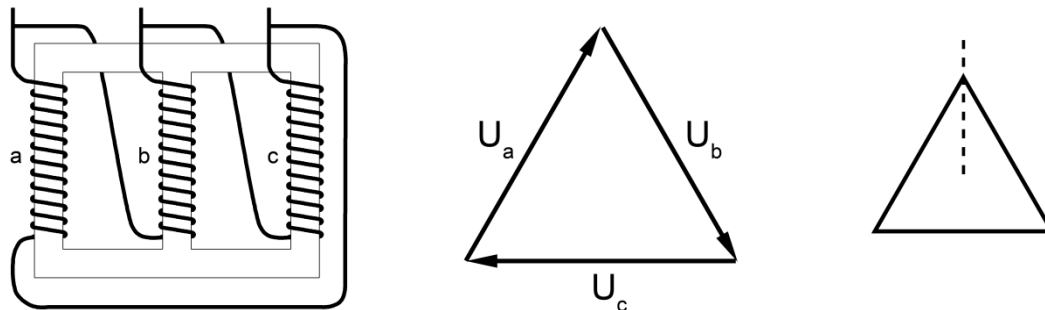
Figur 2.5 Konstruktionsprinciper för en trefastransformator, (a) core och (b) shell [2].

2.7.2 Transformatorkopplingar

Lindningarna i transformatorn kan kopplas på en rad olika sätt. I detta avsnitt diskuteras de två vanligaste kopplingarna, delta och Y samt specialfallet Z. En transformator kan ha två likadana kopplingar eller en kombination av ovanstående.

2.7.2.1 Δ -koppling

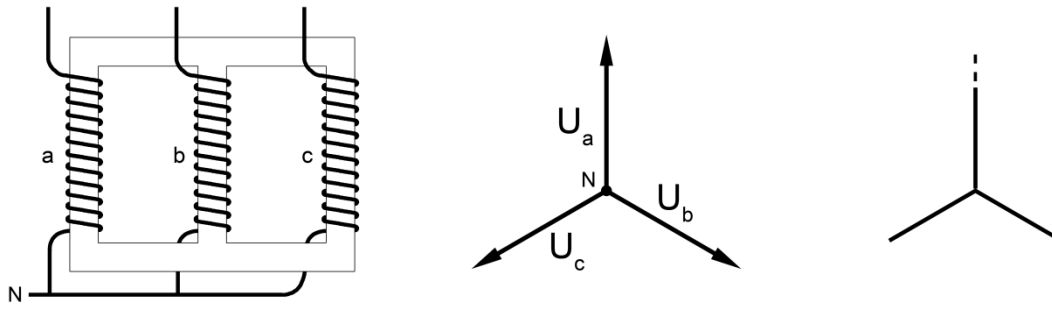
Deltakopplingen är fas-till-fas-koppling och har fått sitt namn efter den grekiska bokstaven Δ . En fördel med deltakopplingen är att den effektivt blockerar den tredje övertonen som uppstår vid magnetiseringen av t.ex. en generator. En typ av deltakoppling illustreras i figur 2.6 [3].



Figur 2.6 Deltakoppling i praktiken, spänningsvektorer samt kopplingssymbol där fasvridningen representeras av en streckad linje.

2.7.2.2 Y-koppling

I en Y-koppling kopplas lindningarnas ena sida ihop för att bilda en nollpunkt. Denna punkt kan anslutas till jord om så önskas. Jordning av transformatorn sluter en krets för nollföljdsströmmen vid jordfel vilket gör att felet kan upptäckas och frånkopplas. En typ av Y-koppling visas i figur 2.7 [8].

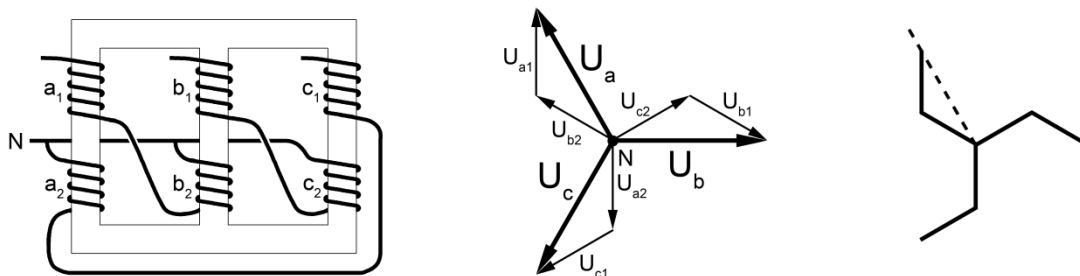


Figur 2.7 Y-koppling i praktiken, spänningsvektorer samt kopplingsymbol där fasvridningen representeras av en streckad linje.

2.7.2.3 Z-koppling

Z-koppling är en speciell typ av transformatorkoppling där två lindningar på olika ben seriekopplas för att på så sätt skapa en fasförskjutning. I figur 2.8 visas ett exempel där den ena lindningen placerats med omvänd polaritet på ett intilliggande ben vilket leder till 60° fasförskjutning mellan de två bidragande spänningskomponenterna. Normalt har de seriekopplade lindningarna samma antal varv i lindningarna vilket leder till att den resulterande spänningen fasförskjuts 30° . I specialfall kan man även uppnå olika fasförskjutningar genom att ändra omsättningen mellan lindningarna.

Eftersom Z-kopplingen bildar en nollpunkt är den lämplig att användas för att skapa en jordpunkt i system där nollpunkt annars inte finns tillgänglig, t.ex. i delta-delta-kopplade system. Nollpunkten är viktig eftersom den skapar en väg för nollföljdsströmmen då ett jordfel inträffar, vilket innebär en möjlighet att upptäcka och koppla bort jordfel [8] [9] [10].



Figur 2.8 Z-koppling i praktiken, spänningsvektorer samt kopplingsymbol där fasvridningen representeras av en streckad linje.

2.7.3 Transformator typer

Förutom variationer i kopplingarna förekommer en del andra varianter av transformatorer som kortfattat kommenteras i detta avsnitt.

2.7.3.1 Transformatorer med två lindningar

Transformatorer med två lindningar (per fas) är den vanligaste förekommande typen av transformatorer. De båda lindningarna kan vara kopplade på samma eller olika sätt, t.ex. Y-delta, delta-delta eller delta-Z. Transformatorer med en Z-kopplad lindning är dock sällan större än 5 MVA.

Genom att koppla primär- och sekundärsidan på olika sätt kan man åstadkomma en fasvridning mellan sidorna. Genom att kombinera Y, delta och Z-kopplingar (med samma antal lindningsvarv) blir fasvridningen som uppstår alltid en multipel av 30° , d.v.s.

fasvridningen kan anta värden $\Theta = n \cdot 30^\circ$ där n kallas för klocktal och är ett heltal mellan 0 och 11. Principen för en tvålindningstransformator illustreras i figur 2.9a [5].

2.7.3.2 Transformatorer med tre lindningar

Transformatorer med tre lindningar har som namnet antyder, tre separata lindningar. Eftersom de tre lindningarna kan ha olika spänningsnivåer kan en trelindningstransformator användas för att koppla samman nät med tre olika spänningsnivåer.

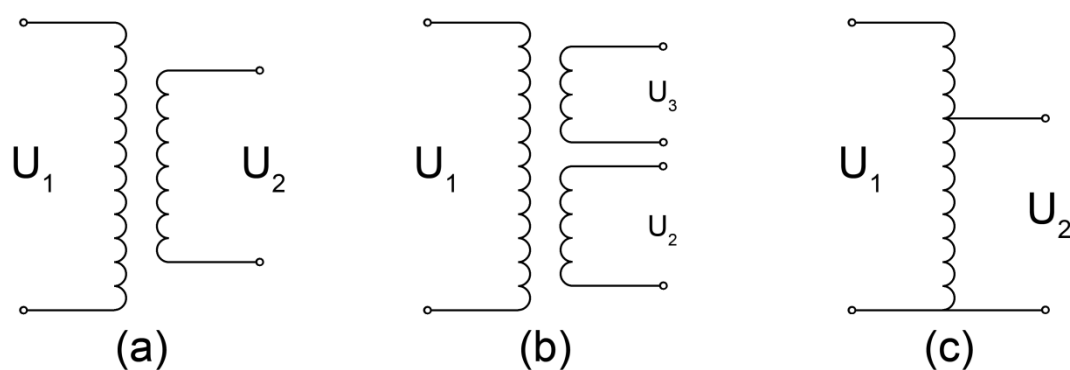
Trelindningstransformatorer kan också, beroende på kopplingsgrupp, införa en fast fasvridning mellan lindningarna. Precis som i fallet med tvålindningstransformatorer antar fasvridningen värden i steg om 30° . En trelindningstransformator med tre spänningsnivåer visas i figur 2.9b [5].

2.7.3.3 Autotransformatorer

En autotransformator, eller sparkopplad transformator är en typ av transformator där minst två av lindningarna har en gemensam del. Fördelen med denna typ av transformator är att den kan göras mindre, lättare och därmed billigare än den vanliga typen av transformator med separata lindningar för alla sidor. Detta gäller framförallt när sidornas spänningar inte skiljer för mycket [5].

Till skillnad från fallet med separata lindningar så är sidorna inte elektriskt isolerade från varandra. Det är nödvändigt att de båda lindningarna är Y-kopplade eftersom alla sidor måste ha en gemensam nollpunkt. Detta innebär också att autotransformatorer inte ger upphov till någon fasvridning mellan sidorna [2].

Autotransformatorer förekommer även med fler än två lindningar. Ofta används en tredje delta-kopplad utjämningslindning som är elektriskt isolerad från de två sparkopplade lindningarna. Principen för en sparkopplad transformator visas i figur 2.9c [5].



Figur 2.9 Tre olika transformatorer, (a) Tvålindningstransformator, (b) Trelindningstransformator, (c) Sparkopplad transformator

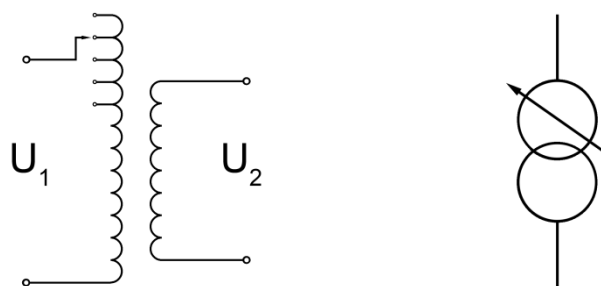
2.7.3.4 Transformatorer med spänningsreglering

Olika lastförhållanden kan ofta påverka spänningen i nätet. Eftersom spänningen på nedsidan är beroendet av förhållandet mellan antalet lindningsvarv i de båda sidorna kan en för låg/hög spänning kompenseras genom att justera detta förhållande.

Det finns två typer av mekaniska lösningar för att realisera justeringen. Dels *lindningskopplare* som automatiskt kan reglera spänningen under drift och dels *omsättningskopplare* som kräver att transformatorn tas ur drift. Lindningskopplare är oftast placerade på transformatorns uppsida eftersom strömmen är mindre där jämfört med nedsidan. En transformator med lindningskopplare illustreras schematiskt tillsammans med

sin symbol i figur 2.10.

En lindningskopplare brukar typiskt ha mellan ± 9 och ± 17 lägen där det är ca 1-2% spänningsskillnad mellan två närliggande lägen [2] [5].



Figur 2.10 Två lindningstransformator med lindningskopplare.

2.7.3.5 Fasvridande transformatorer

Fasvridande transformatorer används i regel för att kunna reglera det aktiva effektlödet i komplexa nät eftersom effektöverföringen är beroende av skillnaden i fas. Detta innebär i praktiken att användningsområden kan vara att kontrollera effektlödet i två parallella ledningar eller tvinga effektöverföring från lågspännings- till högspänningssidan i en transformator.

Fasvridningen mellan primär- och sekundärsidan kan uppnås genom speciell konstruktion av transformatorn. En eller flera lindningskopplare kan användas för att ändra fasvridningen och eftersom dessa typiskt justeras i ± 9 till ± 17 olika steg kan man genom att kombinera olika justeringar uppnå en fasvridning upp till $\pm 75^\circ$ [5].

Fasvridande transformatorer är ett specialfall och är därför mycket ovanliga i det svenska elnätet.

2.8 Transformatorfel

Ett transformatorfel kan, om det inte kopplas bort utvecklas till brand och i värsta fall en explosion. Ett transformatorfel kan inträffa när isolationen i transformatorn har blivit skadad vilket kan leda till ett överslag med ljusbåge. I detta avsnitt behandlas kortfattat ett antal externa samt interna orsaker som kan leda till skador eller slitage av isolationen som i sin tur kan leda till de olika typerna av kortslutningar som kan inträffa i en transformator. Transformator-differentialskydd har till uppgift att skilja mellan dess olika typer av fel.

2.8.1 Externa orsaker

Externa orsaker som kan skada transformatorns isolation innefattar överspänning, överlast, övermagnetisering och externa fel. Gemensamt för de externa orsakerna är att transformatorns differentialskydd inte ska lösa ut eftersom de beror på fel i närliggande nät.

2.8.1.1 Överspänning

Överspänningar kan uppstå av flera orsaker, t.ex. åsknedslag. För att skydda transformatorn mot överspänningar installeras *ventilavledare* nära transformatorns anslutningar [11].

2.8.1.2 Överlast

När en transformator utsätts för en hög last, d.v.s. en för stor ström under en tid kan de ökade förlusterna i lindningarna leda till en temperaturökning i transformatorn. En för hög temperatur under en längre tidsperiod leder till påfrestningar och därmed nedbrytning av

isolationen. Tidsperioden som en transformator klarar att överlastas beror främst på kylningens konstruktion [11].

2.8.1.3 Övermagnetisering

En transformator kan övermagnetiseras när primärsidans spänning antingen är för hög eller när nätfrekvensen är för låg. När en transformator övermagnetiseras så blir transformator kärnan mättad vilket leder till en ökad magnetiseringsström.

När järnkärnan har blivit mättad tvingas delar av det magnetiska flödet söka andra vägar genom transformatorn som t.ex. transformatorlådan. Eftersom dessa delar inte är laminerade mot virvelströmmar utvecklas värme när dessa delar utsätts för magnetiskt flöde och värmen kan i sin tur skada transformatorns isolation [11] [12].

2.8.1.4 Externa fel

Fel i närliggande komponenter med stora felströmmar som resultat kan även skada transformatorn. Ett exempel på en sådan situation är då en kortslutning i en samlingsskena på transformatorns nedsida inträffar. Felet ger upphov till stora felströmmar som passerar genom transformatorn. Dessa ger förutom värmeutveckling även upphov till mekaniska påfrestningar genom de elektromagnetiska krafter som uppstår mellan strömförande delar [11].

2.8.2 Interna orsaker

Interna orsaker som kan leda till skador på isolationen är kärnfel, reducerad kylning samt förorening av olja och oljeläckage.

2.8.2.1 Kärnfel

Om någon del av kärnans isolation har blivit skadad kan virvelströmmarna som uppstår leda till en stor värmeutveckling som i sin tur kan skada lindningarna. Denna typ av fel leder dock inte till någon märkbar skillnad i strömmarna vilket gör att denna typ av fel normalt inte kan detekteras med ett vanligt differentialskydd innan det har utvecklats till ett allvarigare fel.

I oljefyllda transformatorer orsakar dock värmeutvecklingen nedbrytning av oljan som leder till att gaser utvecklas i transformator tanken. En gasvakt installeras därför i transformatorlådan för att kunna detektera och koppla ifrån denna typ av fel [11].

2.8.2.2 Reducerad kylning

Om kylningen av en transformator inte fungerar som den ska kan transformatorn överhettas med skador av isolationen som följd. En anledning till fel i kylningen kan t.ex. vara oljeslam som täpper till rör. Transformatorer med aktiv kylning bör därför utrustas med temperaturlarm som varnar när temperaturen blir för hög [11] [12].

2.8.2.3 Förorening av olja och oljeläckage

Oljan i en oljefylld transformator fungerar både som kylande och isolerande medium. Kvaliteten på oljan är därför viktig för transformatorns funktion. Om oljan t.ex. innehåller fukt så försämras de dielektriska egenskaperna och ett genomslag av isolationen kan inträffa.

Oljeläckage genom hål i transformatorlådan kan leda till allvarliga fel om oljenivån blir för låg. Överhettning eller genomslag kan snabbt utvecklas till allvarliga fel. Oljefyllda transformatorer utrustas därför med en oljenivåmätare som kan upptäcka om oljenivån blir för låg [11] [12].

2.8.3 Felströmmar

När isolationen i en transformator har skadats kan en kortslutning uppstå. Eftersom skadan är proportionell mot fränkopplingstiden bör felet upptäckas och fränkopplas snabbast möjligt. Tre typer av kortslutningar illustreras i figur 2.11.

2.8.3.1 Jordfel

Jordfel uppstår när en ledare får kontakt med en jordad del i transformatorn som t.ex. kärnan eller lådan. Kontakten kan ske via ett överslag eller via en direkt metallisk kontakt. Felströmmens storlek är beroende av flera faktorer, bl.a. systemjordning, typen av transformator samt var på lindningen felet inträffar. Ett jordfel illustreras i figur 2.11a [11] [12].

2.8.3.2 Faskortslutning

Kortslutning mellan faserna i transformatorn ger upphov till stora felströmmar som endast begränsas av nätets källimpedans och transformatorimpedansen. En faskortslutning illustreras i figur 2.11b [11] [12].

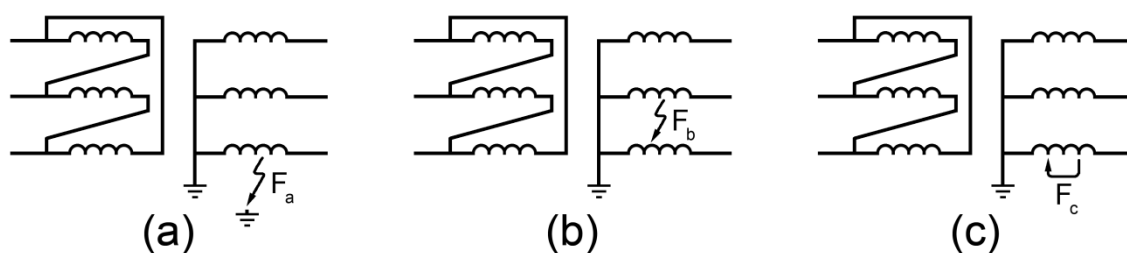
2.8.3.3 Varvkortslutning

Varvkortslutning inträffar när ledare i samma lindning kommer i kontakt med varandra. Varvkortslutningar är det vanligast förekommande felet i transformatorer och ca 70 till 80 % av alla transformatorfel uppskattas att starta som en varvkortslutning [11].

Om en varvkortslutning uppstår kan värmen som utvecklas smälta delar av lindningen som resulterar i utveckling av kopparpärlor och sot. När detta händer måste transformatorn transporteras till en verkstad för reparation och invändig rengöring.

Varvkortslutningar mellan enstaka varv är svåra att upptäcka med endast mätning av elektriska kvantiteter eftersom strömmen genom transformatorn endast ökar marginellt. En gas- eller tryckvakt är därför lämpligt att använda för att detektera varvkortslutningar.

Felströmmen ökar i takt med att felet sprider sig och innefattar fler varv. Felströmmen når samma storlek som märkströmmen först då varvkortslutningen innefattar ca 2-4% av varven. En varvkortslutning illustreras i figur 2.11c [11] [12].



2.11 Transformatorfel, (a) jordfel, (b) faskortslutning och (c) varvkortslutning.

3. Differentialskydd för transformator

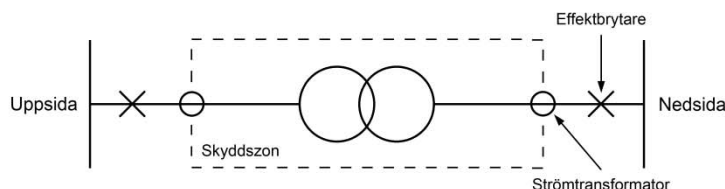
I slutet av föregående kapitel beskrevs transformatorfel och vad de kan leda till. Detta kapitel handlar om hur differentialskydd kan användas för att upptäcka fel och koppla bort transformatorn för att undvika skador på utrustning och människor.

Metoden som används för att skydda transformatorer beror på transformatorns märkeffekt. Transformatorer med lägre märkeffekt skyddas ofta endast av säkringar medan transformatorer med större märkeffekt ofta skyddas med differentialskydd.

3.1 Introduktion

Differentialskydd används främst för att skydda objekt med mindre geografisk utsträckning. Några exempel är transformatorer, generatorer, motorer och samlingsskenor. Principen är att mäta ingående och utgående ström för objektet och koppla ifrån om dessa skiljer sig.

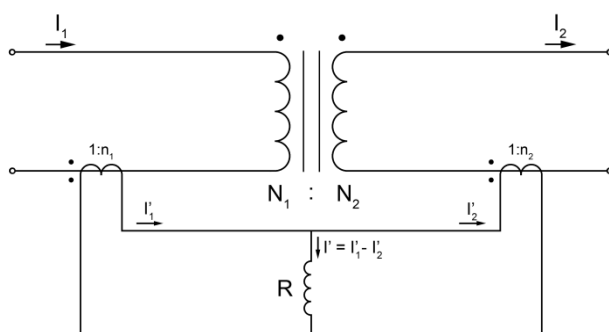
Differentialskydd är 100 % selektiva vilket betyder att det endast reagerar på fel inom skyddszonen och därmed inte påverkas av externa fel i närliggande nät. Differentialskyddet behöver därför inte samordnas med andra skydd i närheten. Enkelheten hos konceptet medför även att skyddszonen enkelt definieras med placeringen av strömtransformatorerna vilket visas i figur 3.1 [7].



Figur 3.1 Transformatordifferentialskyddet löser endast för fel i skyddszonen som definieras av strömtransformatorernas placeringar.

3.2 Grundprincipen för differentialskydd

Principen bakom differentialskydd illustreras i figur 3.2.



Figur 3.2 Grundprincipen för ett transformatordifferentialskydd.

Figuren visar ett differentialskydd för en enfastransformator. En mättransformator, även kallad strömtransformator är ansluten på respektive sida av krafttransformatorn med omsättningen $1/n_1$ respektive $1/n_2$. Primärsidan i mättransformatorerna har alltså ett lindningsvarv och sekundärsidan har n_x stycken lindningsvarv. Induktansen R symboliserar ett relä som öppnar effektbrytarna och därmed kopplar bort transformatorn när det flyter en ström genom det.

Ekvation 2.12 ger att strömmarna I_1' och I_2' blir enligt ekvationerna 3.1 och 3.2.

$$I'_1 = \frac{I_1}{n_1} \quad (3.1)$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{n_2} \quad (3.2)$$

Differentialströmmen (I') är skillnaden mellan sekundärströmmarna enligt ekvation 3.3.

$$I' = I'_1 - I'_2 = \frac{I_1}{n_1} - \frac{I_2}{n_2} \quad (3.3)$$

Strömmen på sekundärsidan av krafttransformatorn tecknas av ekvation 3.4.

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} \cdot I_1 \quad (3.4)$$

Genom att kombinera ekvationerna 3.3 och 3.4 erhålls ekvation 3.5.

$$I' = \frac{I_1}{n_1} - \frac{I_1}{n_2} \cdot \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_1}{n_1} \left(1 - \frac{N_1/N_2}{n_2/n_1} \right) \quad (3.5)$$

Då transformatorn inte har drabbats av något fel, d.v.s. då ekvation 3.4 uppfylls ska differentialströmmen vara noll vilket leder till förhållandet i ekvation 3.6.

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.6)$$

Omsättningarna i strömtransformatorerna ska alltså väljas i förhållande till omsättningen i krafttransformatorn för att differentialskyddet ska fungera. I praktiken innebär detta dock ett problem eftersom specialbyggda strömtransformatorer skulle krävas för varje typ av krafttransformator.

Eftersom skyddet kopplar från transformatorn när differentialströmmen skiljer sig från noll finns det inga inbyggda marginaler. Avsaknaden av marginaler i skyddet innebär att transformatorer utrustade med lindningskopplare inte kan skyddas med denna lösning eftersom kvoten N_1/N_2 är varierande under drift och därmed kräver en motsvarande justering av kvoten n_2/n_1 .

Skillnaden i strömtransformatorernas omsättning kan även leda till andra problem. Eftersom konstruktionen i strömtransformatorerna kan skilja sig är det troligt att strömtransformatorernas egenskaper skiljer sig. Ett exempel är vid ett externt fel som resulterar i en stor genomgående felström. Om den ena strömtransformatorn hamnar i mättningsområdet kan en "falsk" differentialström uppstå vilket kan orsaka differentialskyddet att felaktigt koppla bort transformatorn [3].

3.3 Funktion

Som i andra reläskydd är det viktigt att bortkoppling sker inom en kort tid efter att ett fel inträffat samtidigt som oönskade fränkopplingar måste förhindras. I transformatordifferentialskydd måste hänsyn därför tas till vissa kända scenarion som ger upphov till differentialströmmar utan att ett fel i transformatorn har inträffat.

3.3.1 Frånkoppling

Differentialskyddet har en tydligt markerad skyddszon som definieras av strömtransformatorernas placering. Differentialskyddet kan därför användas för att skydda övrig utrustning (t.ex. kablar eller skenor) som är placerade inom strömtransformatorernas område. Detta kan jämföras med t.ex. gasvakter som endast skyddar mot fel i transformatorlådan. Differentialskyddet konfigureras så att frånkoppling sker då differentialströmmen uppnår ett visst värde [12].

3.3.2 Blockera frånkoppling

Scenarion som ger upphov till plötsliga falska differentialströmmar är bl.a. magnetiseringsströmmen vid inkoppling (inrusningsström), genomgående felströmmar från externa fel samt ökade magnetiseringsförluster då transformatorn utsätts för övermagnetisering. Skyddet måste ha inbyggda funktioner för att upptäcka dessa scenarion och blockera så att transformatorn inte kopplas från vid dessa.

3.3.2.1 Inkopplingsströmstöt

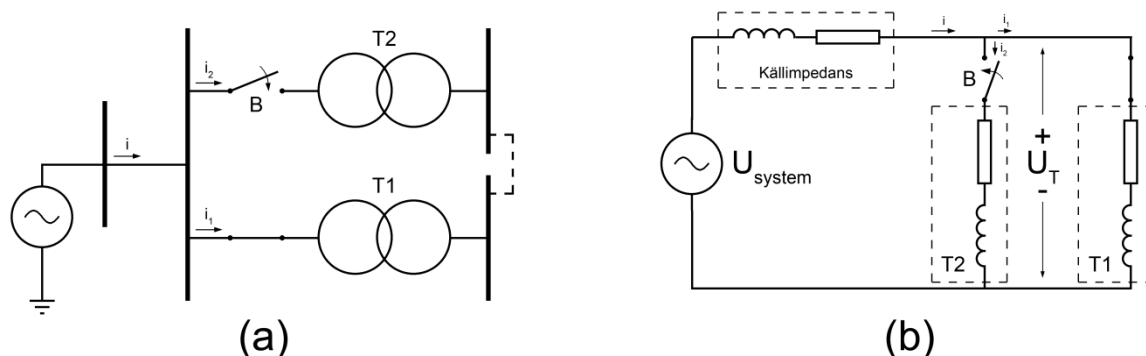
Fenomenet med inrusningsströmmar vid spänningssättning av en transformator beskrivs i avsnitt 2.6.2. Magnetiseringsströmmen uppträder endast i primärsidan vilket leder till en differentialström genom reläet då den ökade strömmen inte registreras av strömtransformatorn på sekundärsidan. Inkopplingsströmmen kan påverka alla faser och även en jordad nollpunkt.

Inkopplingsströmmen innehåller en likströmskomponent samt övertoner där grundtonen och 2:a övertonen är dominerande. Detta kan utnyttjas för att identifiera och därmed hindra skyddet från att koppla bort transformatorn [12].

3.3.2.2 Inkoppling av parallell transformator

Två transformatorer är parallellkopplade när båda transformatorernas primär- samt sekundärsidor är kopplade till samma samlingsskenor. Sekundärsidorna behöver dock inte vara sammankopplade för att fenomenet som beskrivs nedan ska uppträda.

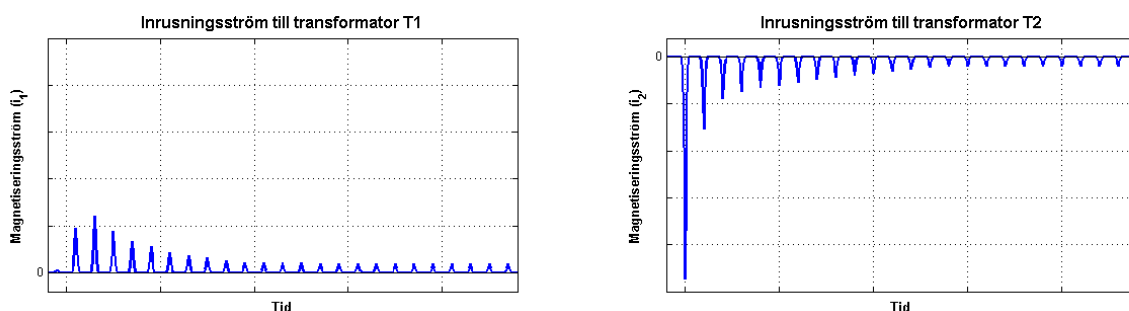
När inkoppling av en parallell transformator sker så kan inrusningsströmmen till denna påverka den andra transformatorn som redan är i drift. Differentialskyddet för denna transformator kan eventuellt felaktigt frånkoppla om detta scenario inte blockeras. I figur 3.3 illustreras ett exempel för en fas.



Figur 3.3 Inkoppling av en parallell transformator som enlinjeschema och kretsschema för en fas.

En transformator (T1) är i drift när brytaren (B) till den andra transformatorn (T2) slås till. Transformator T2 kommer att magnetiseras och därmed dra en magnetiseringsström (i_2) enligt beskrivningen i avsnitt 2.6.2. Eftersom magnetiseringsströmmen är osymmetrisk så orsakar strömmen ett osymmetriskt spänningsfall över källimpedansen ($i \cdot Z_{källa}$) i nätet.

Detta leder till att spänningen på samlingssskenan (U_T) också drabbas av osymmetri. Då det magnetiska flödet i en transformator är proportionellt mot tidsintegralen av spänningen leder den osymmetriska spänningen till att det magnetiska flödet förskjuts från sin jämviktspunkt kring noll. Ett exempel på hur inrusningsströmmarna kan se ut illustreras i figur 3.4.



Figur 3.4 Magnetiseringsströmmar över tiden till transformatorerna T1 och T2.

Den osymmetriska spänningen som transformatorn T2 orsakar tvingar det magnetiska flödet i transformator T1 att gå mot det motsatta mättningsområdet vilket leder till att magnetiseringsströmmen i transformator T1 ökar. När de båda transformatorerna hamnat i varsitt mättningsområde drar båda en magnetiseringsström som uppträder i varsin halvperiod. De båda magnetiseringsströmmarna kommer därför att orsaka ett spänningsfall över källresistansen under sin respektive halvperiod som påverkar den andra transformatorn. Effekten blir att båda transformatorerna under sin halvperiod håller den andra transformatorn kvar i mättningsområdet.

Eftersom båda transformatorerna håller varandra kvar i mättningsområdet så är tidskonstanten betydligt större jämfört med tidskonstanten för endast en transformator. Tidskonstanten är mycket beroende på systemets parametrar men kan variera från några sekunder upp till flera minuter [13] [14].

3.3.2.3 Övermagnetisering

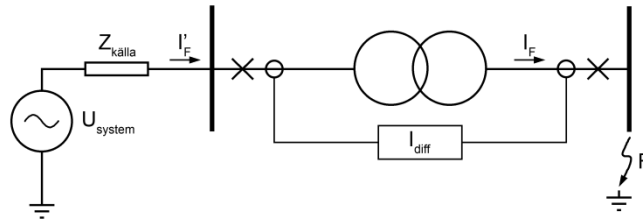
När spänningen blir för hög eller frekvensen blir för låg ökar det stationära magnetiska flödet och transformatorn blir övermagnetiserad. En 20 % för hög spänning kan orsaka att magnetiseringsströmmen ökas med en faktor uppåt 10 gånger. Eftersom orsaken till en onormal spänning eller frekvens finns i kraftsystemet ska transformatordifferentialskyddet inte lösa vid övermagnetisering.

Differentialströmmen vid övermagnetisering har visat sig innehålla en stor del av den 5:e övertonen. Detta kan utnyttjas i differentialskyddet för att blockera fränkoppling [12].

3.3.2.4 Externa fel

Då ett fel utanför skyddszonen inträffar, t.ex. en kortslutning på nedsidans samlingssskena så begränsas felströmmen endast av systemets och transformatorns impedans. Strömtransformatorerna kan i värsta fall mättas med en falsk differentialström och felaktig fränkoppling som följd. Strömtransformatorerna bör därför dimensioneras för att klara största möjliga felström. Figur 3.5 illustrerar den genomgående felströmmen vid ett fel på transformatorns nedsida [14].

Förändringen i spänningen då ett fel inträffar eller bortkopplas kan även orsaka transienter i det magnetiska flödet med inrusningsströmmar som följd. Dessa strömmar påminner om de som uppstår vid inkopplingen [7].



Figur 3.5 En genomgående felström vid ett fel på nedsidans samlingskena.

3.4 Känslighet

Principen för differentialskydd som presenterades i avsnitt 3.2 visade sig inte vara lämplig i praktiken eftersom skyddet saknade marginaler och därmed inte kunde tillåta falska differentialströmmar. I detta avsnitt diskuteras orsakerna till de uppoffringar som måste göras i känsligheten för att tillåta en viss falsk differentialström. Observera att eftersom känsligheten måste offras så kommer reläskyddet få svårare att upptäcka fel som endast ger små differentialströmmar, t.ex. varvkortslutningar som endast innefattar ett fåtal varv. Storleken av de olika differentialströmmarna beroende av den totala genomgående strömmen visas i figur 3.6.

3.4.1 Strömtransformatorer

Eftersom det är svårt att exakt anpassa strömtransformatorerna efter krafttransformatorns omsättning uppstår en differentialström genom skyddet. I strömtransformatorns linjära område är differentialströmmen proportionell mot den genomgående strömmen.

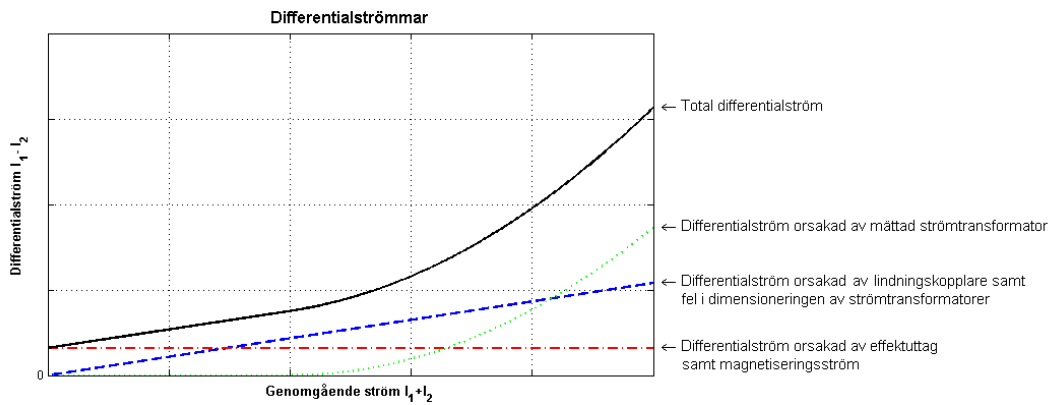
Vid stora genomgående strömmar, t.ex. vid externa fel så kan strömtransformatorerna mätas vilket leder till att differentialströmmen snabbt ökar när den genomgående strömmen växer. Differentialskyddet bör därför tillåta större differentialströmmar då stora strömmar passerar genom skyddszone, d.v.s. marginalerna bör vara större vid stora genomgående strömmar [7].

3.4.2 Lindningskopplare

Transformatorer som är utrustade med lindningskopplare (avsnitt 2.7.3.4) kommer att generera en differentialström då lindningskopplaren inte befinner sig i den position som differentialskyddet är dimensionerat för. Differentialströmmen ökar proportionellt mot den genomgående strömmen med en brantare lutning för lägen längre ifrån mittpositionen. Lindningskopplarens ytterlägen bör därför betraktas vid inställningen av differentialskyddet för att förhindra felaktig fränkoppling av transformatorn [7].

3.4.3 Effektuttag i skyddsområdet

Då effektuttag sker i skyddszone, t.ex. för stationens elförsörjning uppstår en differentialström eftersom en del av strömmen inte går genom strömtransformatorn på sekundärsidan. Differentialströmmen som orsakas av effektuttaget är dock inte beroende av den genomgående strömmen.



Figur 3.6 Storleken av olika falska differentialströmmar som funktion av den totala genomgående strömmen.

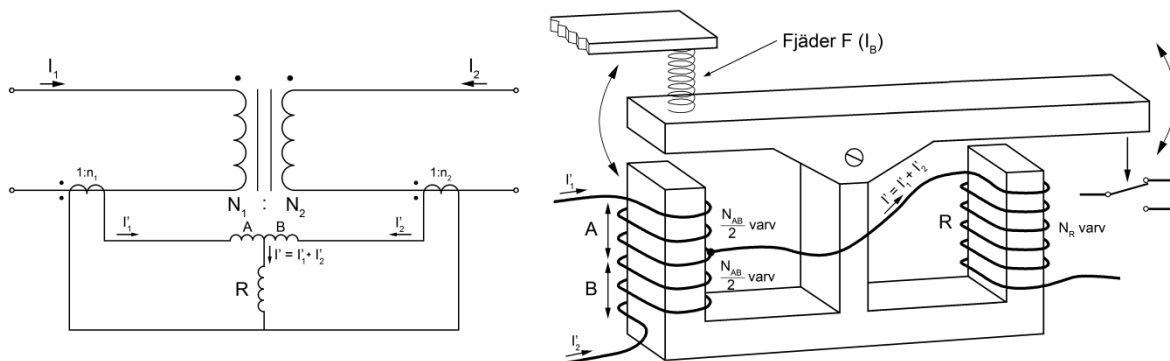
3.5 Elektromekaniska differentialskydd

I detta avsnitt presenteras de elektromekaniska differentialskydden där man genom mekaniska lösningar har lyckats komma runt problemet med överkänsligheten som visade sig i föregående avsnitt.

Utöver en historisk tillbakablick så underlättar förståelsen för de elektromekaniska skydden även förståelsen för de numeriska differentialskydden där matematiska operationer har ersatt mekaniken.

3.5.1 Konstruktion

För att lösa problemet med överkänsligheten som visade sig i avsnitt 3.2 kan konstruktionen som visas i figur 3.7 användas. Observera strömmarnas referensriktningar, om primärsidan är vänster i figuren så kommer strömmarna I_2 och I'_2 att vara negativa.



Figur 3.7 Konstruktionsprincipen för ett elektromekaniskt transformator-differentialskydd.

I stället för att endast använda differentialströmmen så jämförs den elektromagnetiska kraften mellan differentialströmmen och de båda sekundärströmmarna. Den elektromagnetiska kraften som verkar i en sida är proportionell mot kvadraten av spolens magnetomotoriska kraft (mmf) enligt ekvation 3.7.

$$emf \propto mmf^2 = (N \cdot I)^2 \quad (3.7)$$

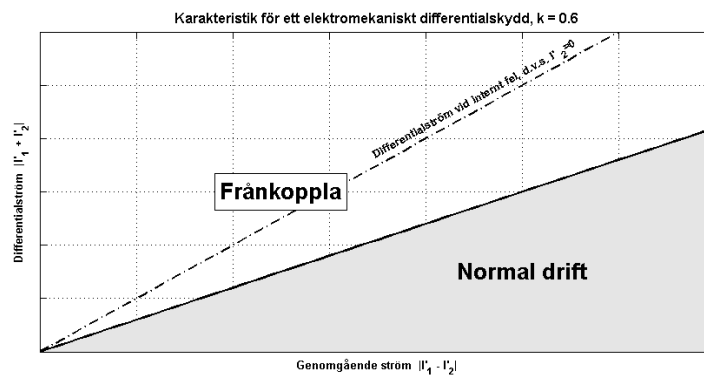
Om man bortser från fjädern i figuren så löser skyddet ut när den elektromagnetiska nedåtkraften orsakad av differentialströmmen är större än nedåtkraften orsakad av strömmarna genom de s.k. *stabiliserande* lindningarna A och B enligt ekvation 3.8.

$$\left(N_R \cdot (I'_1 + I'_2)\right)^2 > \left(\frac{N_{AB}}{2} \cdot (I'_1 - I'_2)\right)^2 \quad (3.8)$$

Genom att ta kvadratroten ur båda led och dividera med N_R erhålls resultatet i ekvation 3.9.

$$|I'_1 + I'_2| > \frac{N_{AB}}{2 \cdot N_R} \cdot |I'_1 - I'_2| \quad (3.9)$$

Resultatet i ekvation 3.9 kan tolkas som att skyddet löser ut när differentialströmmen korsar en linje genom origo och med lutningen $k = N_{AB}/2N_R$. Genom att ändra förhållandet mellan lindningarna kan man alltså justera skyddets känslighet. Ett högre inställningsvärde av k ger ett mindre känsligt skydd och vice versa. Resultatet visas i figur 3.8. Observera att ekvationerna 3.8–3.9 endast gäller för specialfallet då $N_A = N_B$ [3].



Figur 3.8 Karakteristik för ett elektromekaniskt differentialskydd.

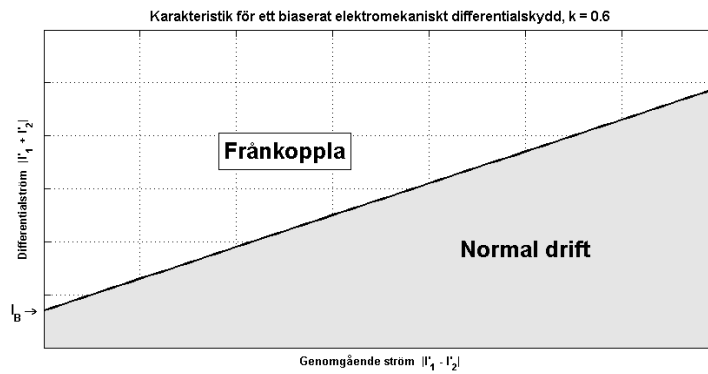
Resultatet ovan kräver fortfarande en viss matchning av strömtransformatorerna för att fungera stabilt. För att lösa detta problem är elektromagnetiska reläer utrustade med omsättningskopplare som tillåter justering av antalet varv i spolarna R samt en av de återhållande lindningarna. Detta innebär att reläet kan justeras för att uppnå en jämvikt i magnetiskt flöde snarare än jämvikt i strömmarna. Omsättningskopplarna brukar typiskt kunna justeras tillräckligt mycket för att tillåta användning av strömtransformatorer upp till dubbla storleken som teoretiskt krävs för att åstadkomma perfekt jämvikt i strömmarna [15].

Karakteristiken som visas i figur 3.8 har dock fortfarande ett problem eftersom den inte tillåter någon falsk differentialström vid mindre genomgående strömmar. Detta gör att differentialströmmar orsakade av magnetisering och lastuttag i skyddsområdet kan leda till felaktig fränkoppling. För att undvika detta används s.k. *biaserade* differentialskydd vilket innebär att skyddet har en tröskel som differentialströmmen måste uppnå för att fränkoppling ska ske. I praktiken kan detta realiseras med en fjäder som förhindrar att reläet tippas över vid små skillnader i magnetiskt flöde.

Funktionskarakteristiken för ett biaserat differentialskydd kan beskrivas enligt ekvation 3.10 som liknar ekvation 3.9 bortsett från en konstant term vilket är tröskelvärdet (I_B) [7].

$$|I'_1 + I'_2| > k \cdot |I'_1 - I'_2| + I_B \quad (3.10)$$

Karakteristiken som beskrivs av ekvation 3.10 illustreras i figur 3.9.

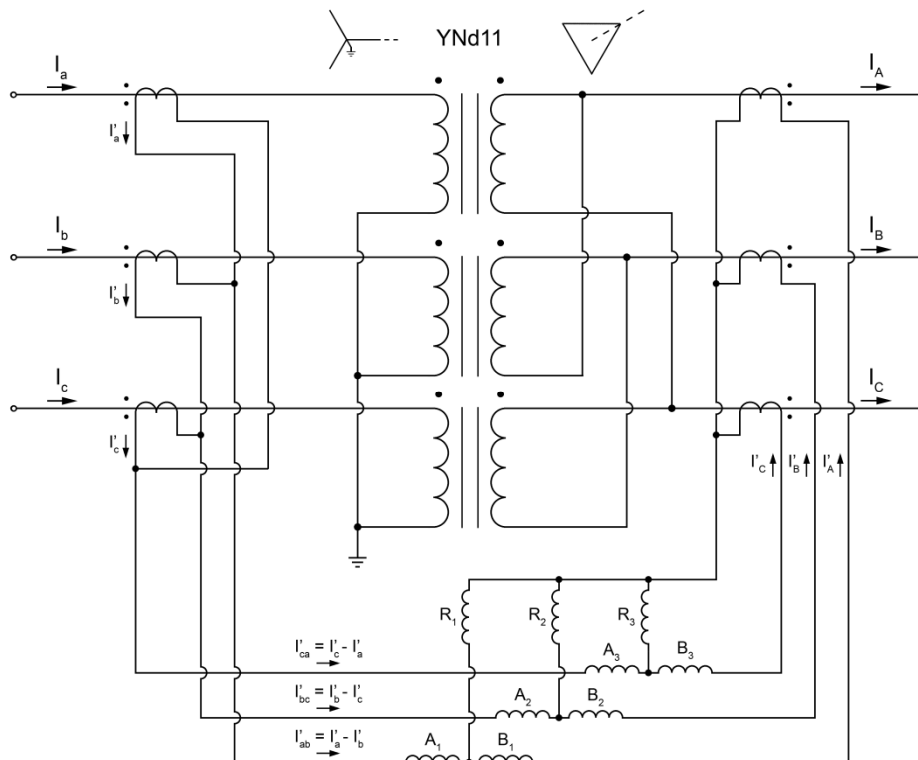


Figur 3.9 Karakteristik för ett biaserat elektromekaniskt transformator-differentialskydd.

3.5.2 Kompensering av fasvridding

Eftersom olika typer av transformatorer ofta medför en fasvridding mellan upp- och nedsidan måste differentialskyddet anpassas. I vissa transformatorer kan strömtransformatorerna kopplas för att direkt kompensera fasvriddingen.

I Y-Y, Y- Δ , Δ -Y och Δ - Δ transformatorer är regeln att alltid montera strömtransformatorerna i en deltakoppling på Y-sidan och i en Y-koppling på deltasidan. Detta kompenserar för den fasvridding (multipel av 30°) som en Y- Δ eller Δ -Y-kopplad transformator medför. En annan fördel är att nollföljdsströmmen till följd av externa jordfel inte kan ta sig in i differentialskyddet genom en deltakoppling vilket skyddar mot felaktig frånkoppling vid externa fel. I figur 3.10 visas ett exempel för hur strömtransformatorerna kan kopplas för att kompensera fasvriddingen i en Y- Δ transformator.



Figur 3.10 Elektromekaniskt transformator-differentialskydd med strömtransformatorerna anslutna för att kompensera fasvridding och filtrera nollföljdsström [3].

Differentialskydd kan även modifieras för att kompensera för fasvridningen som uppkommer i andra typer av transformatorer än de som är beskrivna ovan [3] [15].

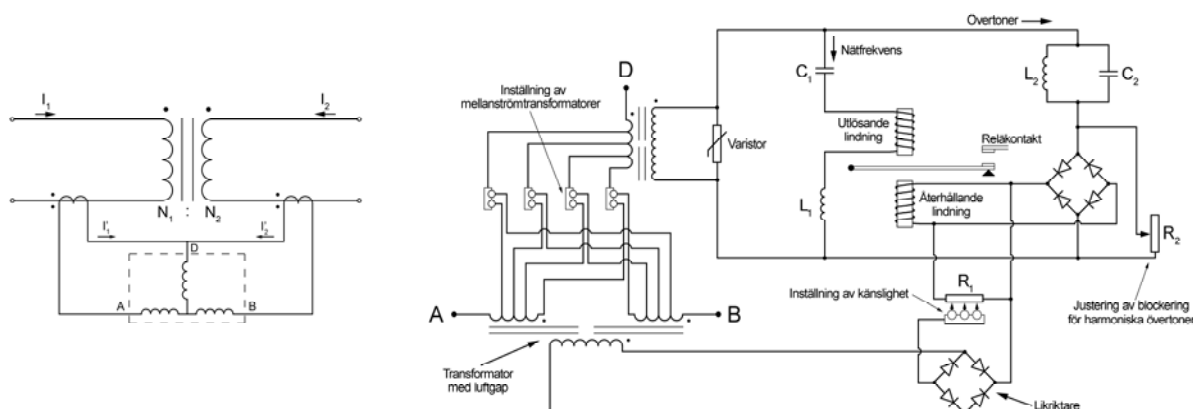
3.5.3 Blockering av felaktig utlösning

Några orsaker till falska differentialströmmar diskuterades i avsnitt 3.3.2. Det nämndes även att de falska differentialströmmarna innehåller en del övertoner. I [16] har två falska differentialströmmar analyserats för ett 60 Hz-system. I det ena fallet orsakas differentialströmmen av inrusningsströmmen när transformatorn spänningssätts. I det andra fallet uppstår differentialströmmen av mättning i strömtransformatorerna p.g.a. en genomgående felström orsakad av ett externt symmetriskt fel. Resultatet visas i tabell 3.1 där andelen övertoner är uttryckta i procent av grundtonen.

$f_{\text{system}} = 60 \text{ Hz}$	Fall 1 Magnetisk inrusningsström (procent)	Fall 2 Mättning av strömtransformator (procent)
Grundton	100,0	100,0
Likström	57,7	0,0
Andra övertonen	63,0	0,0
Tredje övertonen	26,8	37,4
Fjärde övertonen	5,1	0,0
Femte övertonen	4,1	16,7
Sjätte övertonen	3,7	0,0
Sjunde övertonen	2,4	7,8

Tabell 3.1 Andelen övertoner i differentialströmmen vid inrusningsströmstöt samt vid mättning av strömtransformator.

Resultatet i tabell 3.1 visar att de analyserade fallen innehåller stora delar övertoner. Detta resultat kan utnyttjas i konstruktionen av differentialskyddet för att blockera utlösning då dessa fall inträffar. I referens [16] presenteras transformatordifferentialskyddet HDA11A från General Electrics som utnyttjar övertonsblockering för att förhindra felaktig fränkoppling av transformatorn. Ett förenklat kretsschema för HDA11A visas i figur 3.11.



Figur 3.11 Anslutning samt ett schematiskt kretsschema för transformatordifferentialskyddet HDA11A.

Strömmarna flyter genom två mellanströmtransformatorer inuti skyddet. Den ena har sin primärlindning ansluten i differentialkretsen och den andra har två primärlindningar där de båda primärlindningarna är anslutna i varsin av strömtransformatorkretsarna. De båda lindningarna är anslutna på ett sådant sätt att deras magnetiska flöde adderas när en ström flyter genom skyddszonen. Alla primärlindningar är dessutom utrustade med möjligheten att

justera antalet inkopplade varv i lindningen vilket ger möjligheten att kompensera för den falska differentialström som annars uppstår vid missanpassning av strömtransformatorerna.

Mellanströmstransformatorn vars primärsida är ansluten till differentialkretsen har två parallella kretsar anslutna till sin sekundärsida. Den ena består av den utlösande lindningen som är kopplad i serie med en kapacitans (C_1) och en induktans (L_1). Storlekarna hos komponenterna väljs för att ge strömkomponenten som innehåller nätfrekvensen en väg genom den utlösande spolen med låg impedans. Den andra kretsen består av en kapacitans (C_2) parallellkopplad med en induktans (L_2) som sitter i serie med likriktare som är ansluten till reläets stabiliserande lindning. Syftet med denna parallellkrets är att släppa genom strömkomponenterna som innehåller övertoner. Parallellt med likriktaren sitter även en potentiometer (R_2) som justerar hur stor del av övertonerna som ska användas i blockeringen av reläet.

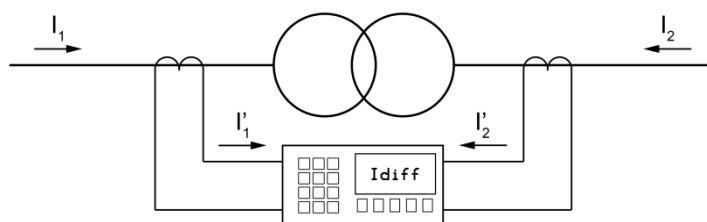
Mellanströmstransformatorn med två primärlindningar har en sekundärlindning som är ansluten till en likriktare som i sin tur är ansluten till den återhållande lindningen. Kretsen innehåller även en potentiometer som ger möjligheten att ställa in skyddets känslighet, d.v.s. lutningen hos linjen i karakteristikerna.

Värt att nämna är att mellanströmstransformatörerna har en kärna med luftgap. Det innebär att dessa transformatorer inte går in i mättningsområdet samt att likströmskomponenten dämpas kraftigt och inte överförs till kretsen på sekundärsidan. En för stor likström i denna krets kan mäta induktanserna L_1 och L_2 som leder till att de önskade frekvensegenskaperna försvinner. En viss likström kommer dock att överföras men eftersom denna delar sig mellan de två parallella kretsarna och deras respektive lindningar i reläet så påverkar det inte skyddets funktion nämnvärt.

Varistorn som är ansluten parallellt med differentialtransformatorn används för att begränsa effekten av tillfälliga spänningsspicar som annars kan tränga genom likriktaren eller kapacitanserna med felaktig funktion som följd.

3.6 Numeriska differentialskydd

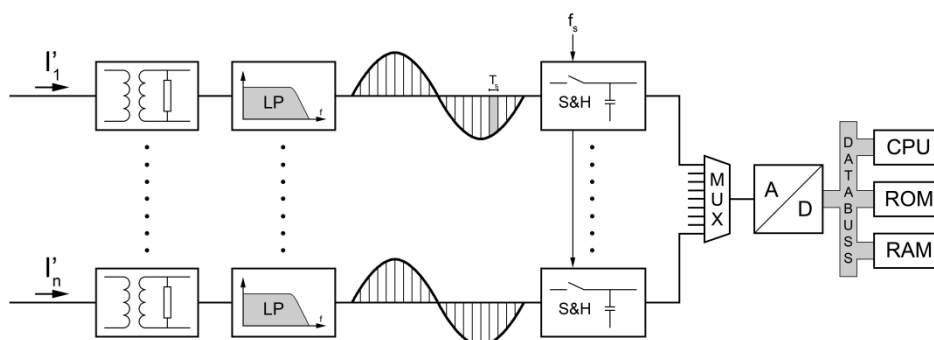
Sedan slutet av 1980-talet har de digitala reläskydden ersatt de äldre elektromekaniska. Eftersom skyddens funktion beror på aritmetiska operationer snarare än mekaniska jämvikter kan skydden erbjuda mer känslighet och fler inställningsmöjligheter. Andra fördelar med digitala reläskydd innefattar bl.a. inbyggd störningsregistrering, möjlighet att överföra nya inställningar via fjärranslutning och information kring en eventuell frånkoppling.



Figur 3.12 Numeriska differentialskydd beräknar differentialströmmarna utan någon fysisk krets.

3.6.1 Sampling

För att omvandla sekundärströmmarna till digitala värden som kan behandlas av mikroprocessorn ansluts varje strömtransformator till en av differentialskyddets ingångar enligt figur 3.13.



Figur 3.13 Konvertering från analog signal till binär sekvens [7].

Strömmarna ansluts till differentialskyddet genom transformatorer för att elektriskt isolera skyddets interna kretsar från strömtransformatorerna. En resistor parallellt med ingångstransformatoren konverterar strömmen till en proportionell spänning. Signalen filtreras sedan genom ett lågpasfilter för att begränsa frekvensinnehållet till högst halva samplingsfrekvensen enligt Nyquists samplingsteorem. Samplingsfrekvensen bör alltså vara minst två gånger större än nätfrekvensen. I praktiken bör dock en ännu högre samplingsfrekvens användas, dels för att öka upplösningen och dels för att kunna återge högre övertoner korrekt. Vanliga samplingsfrekvenser för differentialskydd är 600 Hz eller 1 kHz [7].

Efter lågpasfiltret sitter en *sample and hold*-krets vars uppgift är hålla spänningen konstant vid varje samplingstidpunkt. Samplingen måste ske i samma tidpunkt för alla signaler eftersom de annars inte går att jämföra med varandra. Efter att signalerna har samplats i sin respektive *sample and hold*-krets används en multiplexer för att i tur och ordning koppla signalerna till en A/D-omvandlare där amplituden hos signalen omvandlas till en binär sekvens som sedan skickas via databussen till mikroprocessorn för lagring och behandling [17].

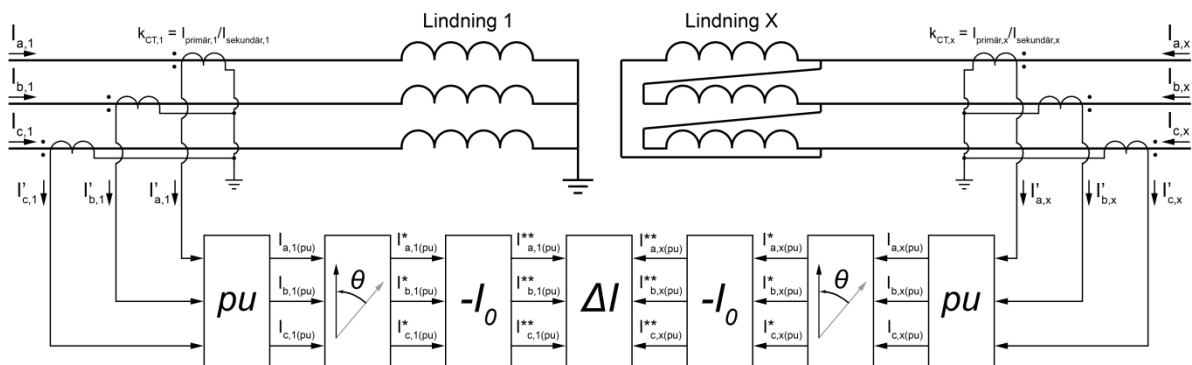
3.6.2 Strömtransformatorer till numeriska differentialskydd

I de elektromekaniska differentialskydden krävdes att strömtransformatorerna kopplades på speciella sätt för att kompensera den fasvridning som ibland förekommer mellan en krafttransformators olika sidor. I numeriska differentialskydd är inte detta nödvändigt eftersom samma kompensering kan utföras aritmetiskt istället. Blockering av nollsekvensströmmen samt normalisering av sekundärströmmarna kan också utföras numeriskt inuti skyddet och därför rekommenderas att strömtransformatorerna ansluts i en Y-koppling oberoende av krafttransformatorns kopplingsgrupp. Y-kopplade strömtransformatorer möjliggör även att samma sekundärströmmar kan utnyttjas för andra skyddsfunktioner som t.ex. överströmsskydd och jordfelskydd [14].

3.6.3 Algoritm för beräkning av differentialströmmar

Beräkningen av differentialströmmarna i ett numeriskt differentialskydd kan delas upp i fyra steg; intern matchning av strömtransformatorerna, konvertering till *per unit*, vektorgruppskompensering samt eliminering av nollföljdsströmmen. De olika stegen illustreras schematiskt i figur 3.14. Observera att strömmarnas referensriktningar definieras som positiva in i transformatorn. Detta underlättar då transformatorn har fler än två lindningar.

Detaljer kan givetvis skilja sig mellan olika tillverkare men i detta avsnitt ges ett exempel av en generell algoritm för att illustrera principen.



Figur 3.14 Principen för beräkning av differentialströmmar i ett numeriskt transformator-differentialskydd [7].

3.6.3.1 Intern matchning av strömtransformatorer

Numeriska differentialskydd har möjligheten att korrigera för viss missmatchning i strömtransformatorerna. Strömtransformatorernas omsättningar ingår därför som en normeringsfaktor i beräkningen av strömmarna. Fasströmmarna för en godtycklig lindning (x) beräknas genom att multiplicera sekundärströmmarna (I'_x) med strömtransformatorns omsättning ($I_{primär,x}/I_{sekundär,x}$) enligt ekvation 3.11.

$$\begin{bmatrix} I_{a,x} \\ I_{b,x} \\ I_{c,x} \end{bmatrix} = \frac{I_{primär,x}}{I_{sekundär,x}} \cdot \begin{bmatrix} I'_{a,x} \\ I'_{b,x} \\ I'_{c,x} \end{bmatrix} = k_{CT,x} \cdot \begin{bmatrix} I'_{a,x} \\ I'_{b,x} \\ I'_{c,x} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.6.3.2 Konvertering till per unit

Beräkningar inom elkraft görs ofta i per unit. Det innebär att strömmar, spänningar och impedanser anges som en andel av sitt respektive basvärde. En fördel med detta system är att de olika spänningarna och strömmarna för en transformators olika sidor kan jämföras med varandra vilket är speciellt användbart i differentialskydd. En lindnings märkström ($I_{N,x}$) beräknas av transformatorns märkeffekt (S_N) samt lindningens huvudspänning ($U_{N,x}$) enligt ekvation 3.12.

$$I_{N,x} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_{N,x}} \quad (3.12)$$

För att konvertera strömmarna till per unit divideras de verkliga strömmarna med denna märkström enligt ekvation 3.13 [7].

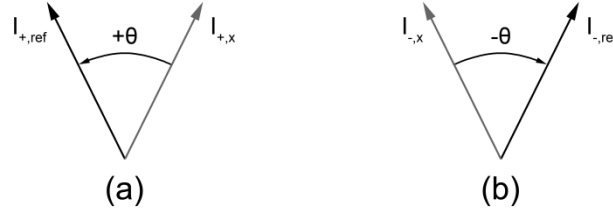
$$\begin{bmatrix} I_{a,x(pu)} \\ I_{b,x(pu)} \\ I_{c,x(pu)} \end{bmatrix} = \frac{1}{I_{N,x}} \cdot \begin{bmatrix} I_{a,x} \\ I_{b,x} \\ I_{c,x} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Genom att kombinera ekvationerna 3.11 och 3.13 kan sambandet mellan strömmarna i per unit och de uppmätta sekundärströmmarna tecknas enligt ekvation 3.14.

$$\begin{bmatrix} I_{a,x(pu)} \\ I_{b,x(pu)} \\ I_{c,x(pu)} \end{bmatrix} = \frac{k_{CT,x}}{I_{N,x}} \cdot \begin{bmatrix} I'_{a,x} \\ I'_{b,x} \\ I'_{c,x} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

3.6.3.3 Vektorgruppskompensering

Fasvridningen mellan lindningarna i en transformator anges i förhållande till referenslindningen vars fasvridning är noll. Fasvridningen för en lindning definieras som vinkeln plusföljdsströmmen skall roteras för att överlappa referenslindningens plusföljdsström. Vinkeln θ är definierad som positiv när plusföljdsvektorn roteras motsols. Förhållandet mellan plus- och minusföljdsströmmarna visas i figur 3.15.



Figur 3.15 Definition av fasvridningen i plus- och minusföljdsströmmar.

I de flesta fall antar fasvridningen mellan en transformatorns sidor steg om 30° enligt $\theta = n \cdot 30^\circ$ där n är ett heltal mellan noll och elva. Detta gäller dock inte för fasvridande transformatorer som kan ändra fasvridningen i drift genom att skifta lindningskopplarens läge. En givare för lindningskopplarläget kan användas för att ge differentialskyddet information om den aktuella fasförskjutningen så att rätt kompensering kan utföras.

En matris ($M(\theta)$) för att kompensera en godtycklig fasförskjutning visas i ekvation 3.15.

$$\begin{bmatrix} I_{a,x}^*(pu) \\ I_{b,x}^*(pu) \\ I_{c,x}^*(pu) \end{bmatrix} = \frac{k_{CT,x}}{I_{N,x}} \cdot M(\theta) \cdot \begin{bmatrix} I'_{a,x} \\ I'_{b,x} \\ I'_{c,x} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$\text{där } M(\theta) = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 + 2 \cdot \cos(\theta) & 1 + 2 \cdot \cos(\theta + 120^\circ) & 1 + 2 \cdot \cos(\theta - 120^\circ) \\ 1 + 2 \cdot \cos(\theta - 120^\circ) & 1 + 2 \cdot \cos(\theta) & 1 + 2 \cdot \cos(\theta + 120^\circ) \\ 1 + 2 \cdot \cos(\theta + 120^\circ) & 1 + 2 \cdot \cos(\theta - 120^\circ) & 1 + 2 \cdot \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Observera att eftersom referenslindningen är definierad som fastförskjutningen 0° så kommer strömmarna i den lindningen att multipliceras med matrisen ($M(0^\circ)$) vilken är en enhetsmatris [5].

3.6.3.4 Eliminering av nollföljdsströmmen

I vissa fall är det nödvändigt att eliminera nollföljdsströmmen på en eller flera sidor. Anledningen till detta är att nollföljdsströmmen inte överförs mellan transformatorns sidor vilket leder till en falsk differentialström. Nollföljdsströmmen i en lindning definieras enligt ekvation 3.16.

$$I_{0,x} = \frac{I'_{a,x} + I'_{b,x} + I'_{c,x}}{3} \quad (3.16)$$

Strömmarna utan nollföljdsström i en lindning kan beräknas genom att subtrahera den beräknade nollföljdsströmmen från de uppmätta strömmarna enligt ekvation 3.17.

$$\begin{bmatrix} I_{a,x}^{**}(pu) \\ I_{b,x}^{**}(pu) \\ I_{c,x}^{**}(pu) \end{bmatrix} = \frac{k_{CT,x}}{I_{N,x}} \cdot M(\theta) \cdot \begin{bmatrix} I'_{a,x} - n_x \cdot I_{0,x} \\ I'_{b,x} - n_x \cdot I_{0,x} \\ I'_{c,x} - n_x \cdot I_{0,x} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\text{där } n_x = \begin{cases} 0 & \text{då nollföljdsströmmen i linding } x \text{ inte elimineras} \\ 1 & \text{då nollföljdsströmmen i linding } x \text{ elimineras} \end{cases}$$

Genom att kombinera ekvationerna 3.15 och 3.17 kan en matris som både kompenserar fasförskjutning och eliminerar nollföljdsströmmen ($M0(\theta)$) erhållas enligt ekvation 3.18.

$$\begin{bmatrix} I_{a,x}^{**} \\ I_{b,x}^{**} \\ I_{c,x}^{**} \end{bmatrix} = \frac{k_{CT,x}}{I_{N,x}} \cdot M0(\theta) \cdot \begin{bmatrix} I'_{a,x} \\ I'_{b,x} \\ I'_{c,x} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$\text{där } M0(\theta) = M(\theta) - \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 120^\circ) & \cos(\theta - 120^\circ) \\ \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \cos(\theta + 120^\circ) & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Detta gör att matrisen $M0(\theta)$ kan användas när nollföljdsströmmen ska elimineras och i annat fall används $M(\theta)$ [5].

3.6.3.5 Beräkning av differentialströmmar

Genom att utföra ovanstående beräkningar erhålls strömmar som är jämförbara med varandra. För att beräkna differentialströmmarna summeras de beräknade fasströmmarna i alla lindingarna. En generell formel för en transformator med godtyckligt antal lindingar (m stycken) visas i ekvation 3.19 [5].

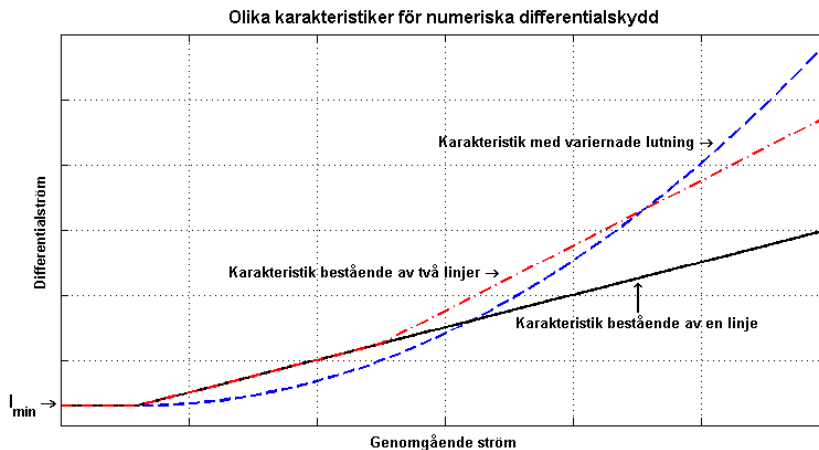
$$\begin{bmatrix} \Delta I_a(pu) \\ \Delta I_b(pu) \\ \Delta I_c(pu) \end{bmatrix} = \sum_{x=1}^m \frac{k_{CT,x}}{I_{N,x}} \cdot Z(\theta_x) \cdot \begin{bmatrix} I'_{a,x} \\ I'_{b,x} \\ I'_{c,x} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$\text{där } Z(\theta_x) = \begin{cases} M(\theta_x) & \text{då nollföljdsströmmen inte ska elimineras} \\ M0(\theta_x) & \text{då nollföljdsströmmen ska elimineras} \end{cases}$$

$$\text{och } I_{N,x} = \frac{S_{max}}{\sqrt{3} \cdot U_x} \text{ där } S_{max} \text{ definieras som transformatorns största märkeffekt}$$

3.6.4 Funktionskaraktistiker i numeriska differentialskydd

Egenskaperna hos de numeriska differentialskydden har även möjliggjort vidareutveckling av den procentuella karakteristiken som visades i avsnitt 3.5.1. Utseendet hos karakteristiken i numeriska differentialskydd varierar mellan olika tillverkare men grundprincipen är att tillåta användaren forma skyddsfunktionen med mindre marginaler och därmed högre känslighet då en mindre ström passerar genom skyddszonen samtidigt som en större differentialström tillåts vid stora stabiliserande strömmar eftersom strömtransformatorerna då förväntas hamna i mättningsområdet. Tre olika typer av karakteristiker visas i figur 3.16 [14].



Figur 3.16 Tre olika karakteristiker för olika slags numeriska transformatordifferentialskydd [14].

Differentialströmmen (y-axeln i figur 3.16) definieras som absolutbeloppet av de summerade strömmarna. Eftersom strömmarna definieras som positiva då de är riktade in mot transformatorn är denna summa i teorin noll då en eventuell lindningskopplare befinner sig i mittläget. En generell formel för differentialströmmen i en transformator med m stycken lindningar illustreras av ekvation 3.20 [7].

$$I_{diff} = |I_1 + I_2 + \dots + I_m| = \left| \sum_{x=1}^m I_x \right| \quad (3.20)$$

Genomgående strömmen, även kallad den stabiliserande strömmen (x-axeln i figur 3.16) definieras olika beroende av tillverkare. De två vanligaste definitionerna visas i ekvationerna 3.21a och 3.21b [14].

$$I_{stab} = \max(|I_1|, |I_2|, \dots, |I_n|) \quad (3.21a)$$

$$I_{stab} = k \cdot (|I_1| + |I_2| + \dots + |I_n|) = k \cdot \sum_{x=1}^n |I_x| \quad (3.21b)$$

där k är en konstant, ofta 0.5 eller 1

Eftersom karakteristiken beskrivs som en funktion av differentialströmmen är definitionen av denna viktig vid jämförelser av inställningar mellan olika skydd där olika definitioner förekommer. Ett exempel är två differentialskydd som båda använder ekvation 3.21b men där $k = 1$ respektive $k = 0.5$. En linje vars lutning är 100 % då $k = 1$ motsvarar då lutning som är 200 % för ett skydd som använder $k = 0.5$ [7].

Tabell 3.2 visar tre exempel på hur strömmarna definieras för tre olika modeller av transformatordifferentialskydd.

Tillverkare	Modell	I_{stab}	I_{diff}
ABB	RET670	$I_{stab} = \max(I_1 , I_2)$	$I_{diff} = I_1 + I_2 $
AREVA	P631	$I_{stab} = 0.5 \cdot (I_1 + I_2)$	$I_{diff} = I_1 + I_2 $
SIEMENS	7UT612	$I_{stab} = I_1 + I_2 $	$I_{diff} = I_1 + I_2 $

Tabell 3.2 Olika tillverkares definitioner av differentiell och stabiliserande ström.

3.6.5 Blockering av felaktig utlösning

För att undvika felaktig bortkoppling vid differentialströmmar orsakade av externa anledningar måste även de numeriska differentialskydden utrustas med funktioner för att hindra felaktig fränkoppling.

3.6.5.1 Övertonsstabilisering

Det finns olika sätt att undvika felaktig fränkoppling vid inkopplingsströmstöt eller övermagnetisering. Övertonsstabilisering är en av de vanligast förekommande lösningarna.

3.6.5.1.1 Inkopplingsströmstöt

Inkopplingsströmstöten som kan uppstå i transformatorns ena sida vid spänningssättning orsakas av att transformatorn hamnar i mätningsområdet, vilket behandlades i avsnitt 2.6.2. Eftersom inkopplingsströmstöten innehåller en stor andel av andra övertonen så filtreras differentialströmmen för att utvinna amplituden hos strömkomponenten innehållandes denna överton. Den filtrerade övertonen normeras sedan mot amplituden hos grundtonens strömkomponent (I_{2f}/I_f).

Om blockering för andra övertonen är aktiverad och överstiger ett visst inställningsvärde så förhindrar skyddet att bortkoppling sker, oberoende av hur karakteristiken är inställd. Ett rekommenderat riktvärde för denna kvot är ca 15 % [7] [18].

3.6.5.1.2 Övermagnetisering

När en transformator övermagnetiseras så uppstår en differentialström till följd av den ökade magnetiseringsströmmen. Eftersom magnetiseringsströmmen är symmetrisk kring tidsaxeln innehåller strömmen endast udda övertoner.

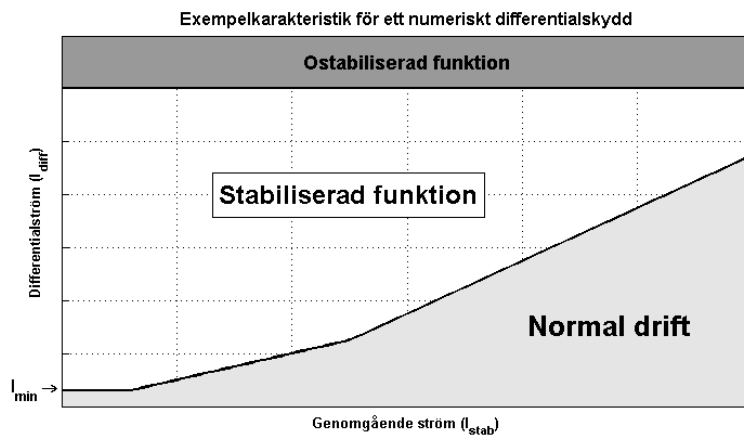
Eftersom den tredje övertonen inte kan flyta in i en delkopplad transformator är den femte övertonen den lägsta som kan användas för identifiering av övermagnetisering. Strömkomponenten filtreras ut från differentialströmmen och jämförs mot grundtonen (I_{5f}/I_f) på samma sätt som för inkopplingsströmstöten. Fränkoppling blockeras om denna kvot uppfyller ett inställningsvärde vars grundinställning rekommenderas vara ca 25-30% [7] [18].

3.6.5.1.3 Cross-blocking

Numeriska differentialskydd har ofta en funktion kallad *cross-blocking*. Om denna funktion är aktiverad betyder det att om inrusningsström eller övermagnetisering har detekterats i någon fas så blockeras de andra faserna automatiskt eftersom de övriga faserna eventuellt inte har tillräckligt höga andelar övertoner i differentialströmmarna för att aktivera stabiliseringsfunktionerna. Fasen som aktiverade cross-blocking upphäver också densamma när villkoret som aktiverade det upphör att gälla [18].

3.6.5.2 Ostabiliserad funktion

När ett allvarligt internt fel inträffar är det viktigt att transformatorn kopplas bort snabbt. För att möjliggöra detta finns det en ostabiliserad funktion i differentialskyddet. Detta innebär att momentan fränkoppling av transformatorn sker då differentialströmmen når ett visst inställt värde då man med säkerhet kan säga att ett internt fel har inträffat. Blockering av skyddet för inkopplingsströmstöt eller övermagnetisering gäller inte i denna region. Gränsen för ostabiliserad funktion är konstant i hela karakteristiken, d.v.s. oberoende av den genomgående strömmen vilket illustreras i figur 3.17. Ett riktvärde för inställning av denna differentialström är ca 10 pu [18].



Figur 3.17 Karakteristik för stabiliserad och ostabiliserad funktion.

4. Utveckling av program för inställningar av transformatordifferentialskydd

Detta examensarbete utmynnar i ett program för att underlätta arbetet vid inställning av transformatordifferentialskydd. Detta kapitel handlar om de bakomliggande kraven samt teorin bakom de beräkningar som programmet utför.

4.1 Kravspecifikation

Programmet ska uppfylla följande krav:

- Grafiskt åskådliggöra transformatordifferentialskydds karakteristik.
- Visa de förväntade differentialströmmarna som uppstår då lindningskopplaren befinner sig i godtyckligt läge.
- Hantera olika skydd från olika tillverkare, både elektromekaniska och numeriska.
- Beräkna och visa differentialströmmen som uppstår vid maximal genomgående felström vid fel utanför skyddszone.
- Hantera både tvålindnings- och trelindningstransformatorer.
- Visa differentialströmmen vid effektuttag inuti skyddszone.
- Innehålla dokumentering av inlagda skydd för att underlätta inställningsarbetet.

4.2 Plattform

För att senare kunna vidareutveckla programmet utan att kompileras är den valda plattformen för verktyget MATLAB. Fördelen med detta är att anställda vid E.ON Elnät Sverige AB redan har tillgång till MATLAB då liknande verktyg för bl.a. distansskydd finns implementerade på samma plattform. Nackdelen är licenskostnaden samt uppoffringar i prestanda då MATLAB är ett relativt resurskrävande program för uppgiften.

4.3 Beräkningar

För att åskådliggöra differentialströmmarna krävs en del beräkningar som redovisas i detta avsnitt. Beräkningarna som görs kommer att baseras på numeriska differentialskydd där fasvridningen har kompenserats korrekt.

4.3.1 Antaganden i beräkningarna

En formel för beräkningen av differentialströmmarna visades i ekvation 3.20. För att omvandla strömmarna används omsättningen i strömtransformatorn i kombination med anslutningens märkström (1 A eller 5 A) och inställt primärvärde i differentialskyddet.

Kompenseringen för fasvridningen antas ske korrekt vilket gör att strömmarna i transformatorns alla sidor kan antas vara i fas med varandra. Eftersom strömmarna endast jämförs per fas räcker det att göra beräkningen för en fas. Detta sammanfattas i ekvation 4.1 där $CT_{mm,x}$ representerar en missanpassningsfaktor för strömtransformatorn på sidan x . Vid korrekta inställningar och anslutningar är denna faktor 1.

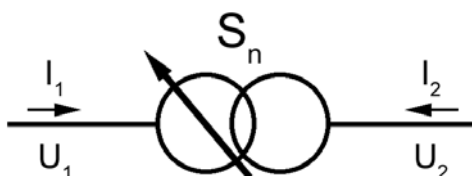
$$\Delta I = \left| \sum_{x=1}^m \frac{I_{inst\ddot{a}lld\ prim\ddot{a}r,x}}{I_{prim\ddot{a}r,x}} \cdot \frac{I_x}{I_{N,x}} \cdot I_{1A/5A} \right| = \left| \sum_{x=1}^m CT_{mm,x} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_x}{S_{max}} \cdot I_x \right| \quad (4.1)$$

4.3.2 Differentialström orsakad av lindningskopplare

Lindningskopplaren används för att höja eller sänka spänningen på nedsidan vid olika lastförhållanden. Om skyddet inte är kopplat till en givare som justerar algoritmen i realtid uppstår en differentialström när lindningskopplaren inte befinner sig i mittläget (eller det läge som skyddet är inställt för). Differentialströmmens storlek är proportionell mot strömmen genom transformatorn och bildar därför en rät linje med skärning i origo i karakteristiken. För att beräkna lutningen av denna linje beräknas därför differential- och stabiliseringsströmmarna i en punkt och sedan divideras dessa med varandra. Eftersom olika tillverkare definierar den stabiliserande strömmen på olika sätt så är lutningen i karakteristiken beroende av tillverkare och modell av differentialskyddet.

4.3.2.1 Transformator med två lindningar

En tvålindningstransformator utrustad med lindningskopplare har märkeffekten S_n samt strömmarna och spänningarna I_1, U_1 respektive I_2, U_2 som visas i figur 4.1.



Figur 4.1 Tvålindningstransformator med lindningskopplare och strömmarnas referensriktningar.

Differentialströmmen för transformatorn kan tecknas enligt ekvation 4.2.

$$\Delta I = \left| \frac{I_1}{I_{N1}} + \frac{I_2}{I_{N2}} \right| = \left| \frac{\sqrt{3} \cdot U_1}{S_n} \cdot I_1 + \frac{\sqrt{3} \cdot U_2}{S_n} \cdot I_2 \right| \quad (4.2)$$

Antag att omsättningen regleras för att hålla spänningen U_2 konstant genom att ändra lindningskopplarens läge till U_1^* där $U_1^* = U_1 \cdot p$ och där p kan tolkas som lindningskopplarens läge uttryckt i per unit.

Eftersom effekten in i transformatorn måste vara samma som effekten ut då inget fel har inträffat gäller ekvation 4.3.

$$\sqrt{3} \cdot U_1^* \cdot I_1 + \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 = 0 \quad (4.3)$$

Efter omskrivning kan I_2 uttryckas enligt ekvation 4.4.

$$I_2 = -\frac{U_1^*}{U_2} \cdot I_1 \quad (4.4)$$

Insättning av ekvation 4.4 i 4.2 ger differentialströmmen enligt ekvation 4.5.

$$\Delta I = \left| \frac{\sqrt{3} \cdot U_1}{S_n} \cdot I_1 - \frac{\sqrt{3} \cdot U_2}{S_n} \cdot \frac{U_1^* \cdot I_1}{U_2} \right| = \left| (1 - p) \cdot \frac{I_1}{I_{N1}} \right| \quad (4.5)$$

Differentialströmmen som uppstår till följd av lindningskopplaren är alltså proportionell mot skillnaden mellan det aktuella läget och mittläget.

För att beräkna lutningen av linjen i karakteristiken måste även den stabiliserande strömmen räknas ut. Tre vanliga sätt att räkna ut denna visas i ekvation 4.6a-c.

$$I_{stab,a} = \max\left(\left|\frac{I_1}{I_{N1}}\right|, \left|\frac{I_2}{I_{N2}}\right|\right) = \max\left(\left|\frac{I_1}{I_{N1}}\right|, \frac{\sqrt{3} \cdot U_2}{S_n} \cdot \frac{U_1^*}{U_2} \cdot |I_1|\right) =$$

$$= \max\left(\left|\frac{I_1}{I_{N1}}\right|, p \cdot \left|\frac{I_1}{I_{N1}}\right|\right) \quad (4.6a)$$

$$I_{stab,b} = \left|\frac{I_1}{I_{N1}}\right| + \left|\frac{I_2}{I_{N2}}\right| = \left|\frac{I_1}{I_{N1}}\right| + \frac{\sqrt{3} \cdot U_2}{S_n} \cdot \frac{U_1^*}{U_2} \cdot |I_1| = (1 + p) \cdot \left|\frac{I_1}{I_{N1}}\right| \quad (4.6b)$$

$$I_{stab,c} = \frac{1}{2} \cdot \left(\left|\frac{I_1}{I_{N1}}\right| + \left|\frac{I_2}{I_{N2}}\right|\right) = \frac{1}{2} \cdot I_{stab,b} = \frac{(1 + p)}{2} \cdot \left|\frac{I_1}{I_{N1}}\right| \quad (4.6c)$$

Lutningen kan nu enkelt räknas ut genom att dividera differentialströmmen med den stabiliserande strömmen. Eftersom samtliga uttryck innehåller I_1 uttryckt i per unit kan den termen förkortas bort vilket ger lutningarna (k_x) i ekvationerna 4.7a-c.

$$k_a = \begin{cases} |1 - p| & \text{då } p \leq 1 \\ \frac{|1 - p|}{p} & \text{då } p > 1 \end{cases} \quad (4.7a)$$

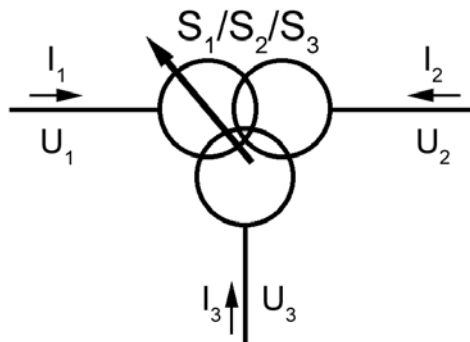
$$k_b = \frac{|1 - p|}{1 + p} \quad (4.7b)$$

$$k_c = \frac{2 \cdot |1 - p|}{1 + p} \quad (4.7c)$$

Värt att nämna är dock att dessa ekvationer endast gäller för numeriska differentialskydd eftersom kompenseringen i annat fall inte kan antas vara exakt.

4.3.2.2 Transformator med tre lindningar

Beräkningen av differentialströmmen i en trelindningstransformator påminner mycket om differentialströmmen i en tvålindningstransformator. Dock måste vissa antaganden göras. En trelindningstransformator med lindningskopplare illustreras i figur 4.2.



Figur 4.2 Trelindningstransformator med lindningskopplare och strömmarnas referensriktningar.

Det första steget är att uttrycka alla strömmar i samma effektbas eftersom de tre lindningarna kan ha olika märkeffekter, t.ex. 16/10/6 MVA. Den gemensamma effektbasen för transformatorn väljs till lindningen med störst märkeffekt enligt ekvation 4.8.

$$S_{max} = \max(S_1, S_2, S_3) \quad (4.8)$$

Differentialströmmen kan nu tecknas enligt ekvation 4.9.

$$\Delta I = \left| \frac{I_1}{I_{N1}} + \frac{I_2}{I_{N2}} + \frac{I_3}{I_{N3}} \right| = \left| \frac{\sqrt{3} \cdot U_1}{S_{max}} \cdot I_1 + \frac{\sqrt{3} \cdot U_2}{S_{max}} \cdot I_2 + \frac{\sqrt{3} \cdot U_3}{S_{max}} \cdot I_3 \right| \quad (4.9)$$

Eftersom den totala effekten i alla sidor sammanlagt måste bli noll då transformatorn inte drabbats av ett internt fel gäller sambandet i ekvation 4.10 som sedan kan skrivas om för att lösa ut I_3 i ekvation 4.11.

$$\sqrt{3} \cdot U_1^* \cdot I_1 + \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 + \sqrt{3} \cdot U_3 \cdot I_3 = 0 \quad (4.10)$$

$$I_3 = -\frac{U_1^* \cdot I_1}{U_3} - \frac{U_2 \cdot I_2}{U_3} \quad (4.11)$$

Insättning av ekvation 4.11 i ekvation 4.9 ger ett nytt uttryck för differentialströmmen enligt ekvation 4.12.

$$\begin{aligned} \Delta I &= \left| \frac{\sqrt{3} \cdot U_1}{S_{max}} \cdot I_1 + \frac{\sqrt{3} \cdot U_2}{S_{max}} \cdot I_2 - \frac{\sqrt{3} \cdot U_3}{S_{max}} \cdot \frac{U_1^*}{U_3} \cdot I_1 - \frac{\sqrt{3} \cdot U_3}{S_{max}} \cdot \frac{U_2}{U_3} \cdot I_2 \right| = \\ &= \left| \frac{\sqrt{3} \cdot U_1}{S_{max}} \cdot I_1 - \frac{\sqrt{3} \cdot U_1^*}{S_{max}} \cdot I_1 \right| = \left| (1 - p) \cdot \frac{I_1}{I_{N1}} \right| \end{aligned} \quad (4.12)$$

Observera att resultatet i ekvation 4.12 är exakt samma som för tvålindningstransformatoren, vilket innebär att differentialströmmen endast påverkas av den ström som passerar genom lindningskopplaren vilket är logiskt eftersom de övriga strömmarna antas kompenseras korrekt och därför inte bidrar till differentialströmmen.

Nästa steg är att beräkna den stabiliserande strömmen för att finna lutningen i karakteristiken. Eftersom vi söker fallet med störst lutning, d.v.s. störst kvot mellan differential och stabiliserande strömmen så måste strömmarna i lindningarna 2 och 3 vara av motsatt tecken i förhållande till strömmen i lindning 1 eftersom en eventuell ström som är riktad från t.ex. lindning 2 till lindning 3 endast skulle bidra med en stabiliserande ström vilket skulle ge en mindre lutning. Detta innebär att all effekt genom transformatorn antingen måste vara riktad in till eller ut från lindning 1 i figur 4.2. Eftersom vi dessutom antar att strömmarna genom lindningarna 2 och 3 kompenseras korrekt kan vi även anta att strömmen genom en av dessa är noll, d.v.s. att hela strömmen t.ex. går in i lindning 1 och ut ur lindning 2.

Om vi antar att strömmen i lindning 3 är noll så blir de stabiliserande strömmarna exakt samma som i ekvationerna 4.6a-c och lutningarna blir också exakt samma som för en tvålindningstransformator. Slutsatsen är alltså att lutningarna kan beräknas på exakt samma sätt för både en tvålindnings- och en trelindningstransformator.

4.3.3 Differentialström vid maximal genomgående felström

För att visualisera en lämplig inställning av karakteristiken underlättar det att räkna ut den maximala differentialströmmen som kan uppstå vid en maximal genomgående felström vid ett fel utanför skyddszonen, d.v.s. ett fel för vilket differentialskyddet inte ska lösa ut.

4.3.3.1 Beräkning av nätimpedans

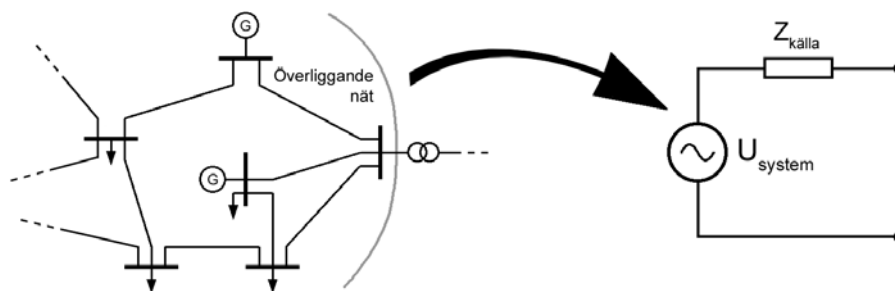
Den maximala strömmen som kan uppstå vid ett externt fel inträffar då en trefaskortslutning sker nära en av transformatorns sidor. Storleken av denna felström begränsas av två storheter, nätets och transformatorns impedanser.

Nätets styrka kan beskrivas av impedansen om man betraktar det bakomliggande nätet som en Theveninekvivalent. För att räkna ut källimpedansen i en viss punkt av elnätet görs

simuleringar som beräknar kortslutningseffekten (S_k). Genom att kombinera kortslutningseffekten med systemspänningen (U_{system}) kan källimpedansen ($Z_{källa}$) räknas ut enligt ekvation 4.13.

$$Z_{källa(\Omega)} = \frac{U_{system(kV)}^2}{S_k(MVA)} \quad (4.13)$$

I figur 4.3 illustreras principen av förenklingen från en modell i ett simuleringsprogram till en Theveninekvivalent som kan användas för beräkningar.



Figur 4.3 Transformerering från verkligt system till källimpedans.

4.3.3.2 Impedans i en tvålindningstransformator

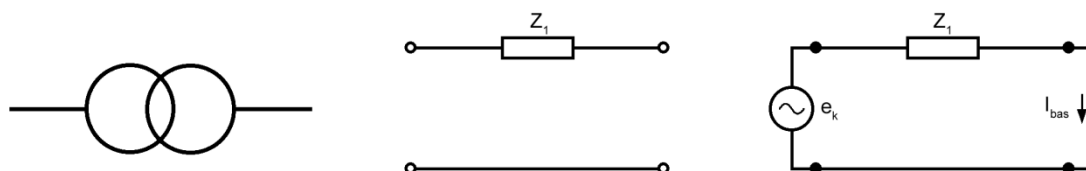
Som nämntes i föregående avsnitt så begränsas kortslutningsströmmen vid ett trefasfel nära transformatorn endast av nätets samt transformatorns impedans.

Transformatorimpedansen mäts av tillverkaren vid testning innan en ny transformator levereras och finns oftast angivet på transformatorns märkplåt. För att mäta transformatorns impedans placeras mätutrustningen på transformatorns ena sida samtidigt som den andra sidan kortsluts.

Transformatorimpedansen anges oftast uttryckt som en kortslutningsspänning (e_k) vilken per definition innebär spänningen i per unit som krävs för att uppnå märkströmmen genom transformatorn då motsatt sida är kortsluten. Detta innebär att e_k i praktiken är transformatorimpedansen uttryckt i per unit där baserna för effekt och spänning är transformatorns baser. Eftersom kortslutningsspänningen ofta anges i procent gäller sambandet i ekvation 4.14.

$$Z_{1(pu)} = e_{k(pu)} = \frac{e_k(\%)}{100} \quad (4.14)$$

I figur 4.4 illustreras modellen för transformatorns impedans i per unit.

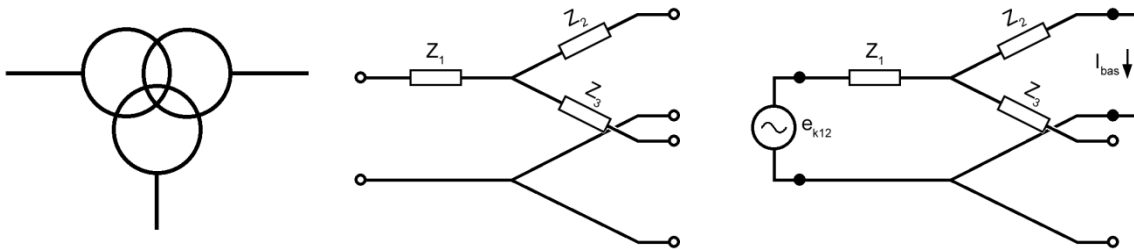


Figur 4.4 Impedans och impedansmätning för en tvålindningstransformator.

4.3.3.3 Impedans i en trelindningstransformator

Impedansen i en trelindningstransformator är precis som för en tvålindningstransformator, uppmätt av tillverkaren innan leverans. Dock går det inte att uppmäta impedansen med endast en mätning eftersom strömmen kan cirkulera mellan olika lindningar. För att beräkna

den enskilda impedansen i varje lindning måste därför tre mätningar genomföras. Mätningarna utförs genom att mäta mot en kortsluten lindning i taget medan den tredje lindningen lämnas öppen vilket illustreras i figur 4.5.



Figur 4.5 Impedanser och impedansmätning av e_{k12} i en trelindningstransformator.

Mätningarna resulterar i tre kortslutningsspänningar, e_{k12} , e_{k13} samt e_{k23} som tillsammans med villkoret $e_{kxy} = e_{kx} + e_{ky}$ bildar ett ekvationssystem som kan lösas för att räkna ut kortslutningsspänningen i respektive lindning enligt ekvationerna i 4.15.

$$\begin{aligned}
 e_{k1}(pu) &= \frac{1}{2} \cdot (e_{k12}(pu) + e_{k13}(pu) - e_{k23}(pu)) \\
 e_{k2}(pu) &= \frac{1}{2} \cdot (e_{k13}(pu) + e_{k23}(pu) - e_{k12}(pu)) \\
 e_{k3}(pu) &= \frac{1}{2} \cdot (e_{k23}(pu) + e_{k12}(pu) - e_{k13}(pu))
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

där $e_{k12}(pu)$, $e_{k13}(pu)$ och $e_{k23}(pu)$ är uttryckta i samma effektbas, S_{max}

Eftersom de olika lindningarna kan ha olika märkeffekter uttrycks ofta kortslutningsspänningarna i någon av lindningarnas effektbaser. Eftersom detta skiljer sig mellan tillverkare förutsätts att alla kortslutningsspänningar är konverterade till samma effektbas (S_{max}) innan beräkningar görs.

4.3.3.4 Beräkning av maximal genomgående felström

Beräkningen av den maximala genomgående felströmmen beräknas genom att bilda en krets där transformatorimpedansen seriekopplas med källimpedansen. För att möjliggöra beräkningar måste först nätimpedansen omvandlas till per unit med samma bas som transformatorimpedansen.

För tvålindningstransformatörer betraktas endast scenariot då ett fel inträffar på nedsidan. Detta antagande kan göras eftersom nätet på nedsidan i praktiken nästan alltid är "svagare" och därmed inte bidrar med en lika stor ström genom transformatorn då ett fel på uppsidan inträffar. Trelindningstransformatörer kan få strömbidrag från två sidor då ett fel inträffar vilket innebär att tre scenarion måste betraktas för att räkna fram den största differentialströmmen.

4.3.3.4.1 Nätimpedans i per unit

För att kunna använda nätimpedansen i beräkningar med transformatorimpedansen måste den först konverteras till per unit i den aktuella transformatorlindningens bas ($Z_{bas,x}$). För att göra detta divideras nätimpedansen (i ohm) med transformatorns basimpedans enligt ekvation 4.16.

$$Z_{källa (pu)} = \frac{Z_{källa (\Omega)} }{Z_{bas,x}} = \frac{Z_{källa (\Omega)} }{\frac{U_x^2}{S_{bas}}} = Z_{källa (\Omega)} \cdot \frac{S_{bas (MVA)}}{U_x^2 (kV)} \quad (4.16)$$

Observera att baseffekten (S_{bas}) är märkeffekten (S_n) för en tvålindningstransformator och att alla lindningar för en trelindningstransformator använder samma baseffekt (S_{max}).

4.3.3.4.2 Genomgående ström för en tvålindningstransformator

Den maximala genomgående strömmen för en tvålindningstransformator beräknas enkelt med Ohms lag genom att dividera systemspänningen (i per unit på transformatorlindningens bas) på transformatorns uppsida med den totala impedansen som består av källimpedansen seriekopplad med transformatorns impedans enligt förhållandet i ekvation 4.17.

$$I_1 (pu) = \frac{U_{system (pu)}}{Z_{tot (pu)}} = \frac{\frac{U_{system (kV)}}{U_1 (kV)}}{Z_{källa (pu)} + e_k (pu)} \quad (4.17)$$

Resultatet ges i per unit som kan översättas till ampere genom att multiplicera med lindningsströmbas enligt ekvation 4.18.

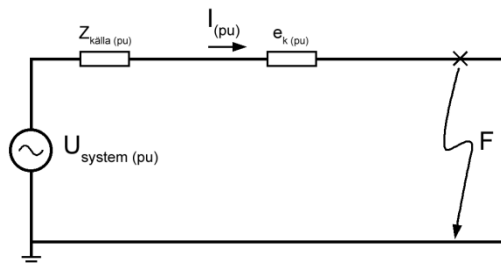
$$I_1 (A) = I_1 (pu) \cdot I_{bas,x} = I_1 (pu) \cdot \frac{S_{bas}}{\sqrt{3} \cdot U_1} = I_1 (pu) \cdot \frac{1000 \cdot S_{bas (MVA)}}{\sqrt{3} \cdot U_1 (kV)} \quad (4.18)$$

Observera att transformatorimpedansen gäller då lindningskopplaren befinner sig i mittläget. Då lindningskopplaren befinner sig i sina ytterlägen förändras denna impedans något men detta tas inte med i beräkningarna.

För att beräkna strömmen på nedsidan multipliceras den beräknade strömmen på uppsidan med transformatorns verkliga omsättning, d.v.s. inklusive lindningskopplarläge enligt ekvation 4.19.

$$I_2 (A) = -\frac{U_1^*}{U_2} \cdot I_1 (A) \quad (4.19)$$

Strömmarna I_1 och I_2 kan sedan användas för att beräkna differential- och stabiliserandeström som sedan indikeras i karakteristiken. Ett ekvivalent kretsschema för trefasfel på nedsidan visas i figur 4.6.

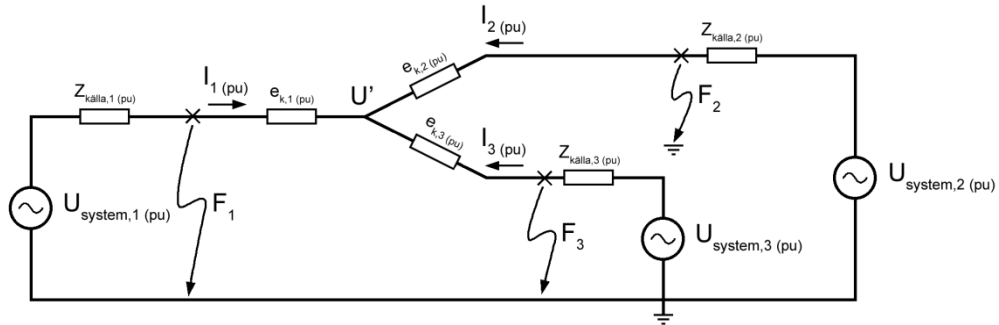


Figur 4.6 Tvålindningstransformator med trefasfel på nedsidan.

4.3.3.4.3 Genomgående ström för en trelindningstransformator

Kortslutningsströmmen genom en trelindningstransformator är något mer komplicerad att beräkna än strömmen genom en tvålindningstransformator eftersom två sidor kan bidra med ström.

En kretsekvivalent för en trelindningstransformator där alla sidor är anslutna till en spänningskälla visas i figur 4.7. Även de tre felfallen F_1, F_2 och F_3 är illustrerade.



Figur 4.7 Trelindningstransformator med felfall då trefasfel inträffar på respektive sida.

Kretsen gäller endast då samtliga storheter är uttryckta i per unit på en gemensam baseeffekt samt i respektive lindnings märkspänning. Eftersom konverteringen har visats i föregående avsnitt antas att samtliga impedanser och spänningar följer denna förutsättning i följande beräkningar.

Då systemet befinner sig i normal drift, d.v.s. då inget fel har inträffat gäller ekvation 4.20 enligt Kirchhoffs strömlag.

$$\frac{U_{system,1}(pu) - U'(pu)}{Z_{källa,1}(pu) + e_{k,1}(pu)} + \frac{U_{system,2}(pu) - U'(pu)}{Z_{källa,2}(pu) + e_{k,2}(pu)} + \frac{U_{system,3}(pu) - U'(pu)}{Z_{källa,3}(pu) + e_{k,3}(pu)} = 0 \quad (4.20)$$

För att räkna ut spänningen i mittpunkten (U') görs en omskrivning av ekvation 4.20 för att lösa ut denna spänning enligt ekvation 4.21.

$$U'(pu) = \frac{\frac{U_{system,1}(pu)}{Z_{källa,1}(pu) + e_{k,1}(pu)} + \frac{U_{system,2}(pu)}{Z_{källa,2}(pu) + e_{k,2}(pu)} + \frac{U_{system,3}(pu)}{Z_{källa,3}(pu) + e_{k,3}(pu)}}{\frac{1}{Z_{källa,1}(pu) + e_{k,1}(pu)} + \frac{1}{Z_{källa,2}(pu) + e_{k,2}(pu)} + \frac{1}{Z_{källa,3}(pu) + e_{k,3}(pu)}} \quad (4.21)$$

Antag att ett fel inträffar på sida 3 (F_3), d.v.s. $U_{system,3}(pu) = 0$ samt $Z_{källa,3}(pu) = 0$. Spänningen i mittpunkten kan sedan räknas ut enligt ekvation 4.22.

$$U'_{F_3}(pu) = \frac{\frac{U_{system,1}(pu)}{Z_{källa,1}(pu) + e_{k,1}(pu)} + \frac{U_{system,2}(pu)}{Z_{källa,2}(pu) + e_{k,2}(pu)}}{\frac{1}{Z_{källa,1}(pu) + e_{k,1}(pu)} + \frac{1}{Z_{källa,2}(pu) + e_{k,2}(pu)} + \frac{1}{e_{k,3}(pu)}} \quad (4.22)$$

Nästa steg är att beräkna strömbidragen från sida 1 och 2 och konvertera till ampere. För att göra detta används ekvationerna 4.23 samt 4.24.

$$I_1(A) = \frac{U_{system,1}(pu) - U'_{F_3}(pu)}{Z_{källa,1}(pu) + e_{k,1}(pu)} \cdot \frac{S_{max}}{\sqrt{3} \cdot U_1} \quad (4.23)$$

$$I_2(A) = \frac{U_{system,2}(pu) - U'_{F_3}(pu)}{Z_{källa,2}(pu) + e_{k,2}(pu)} \cdot \frac{S_{max}}{\sqrt{3} \cdot U_2} \quad (4.24)$$

För att räkna ut strömmen i den feldrabbade sidan används transformatorns verkliga

omsättning (med aktuellt lindningskopplarläge) på samma sätt som i föregående avsnitt för en tvålindningstransformator.

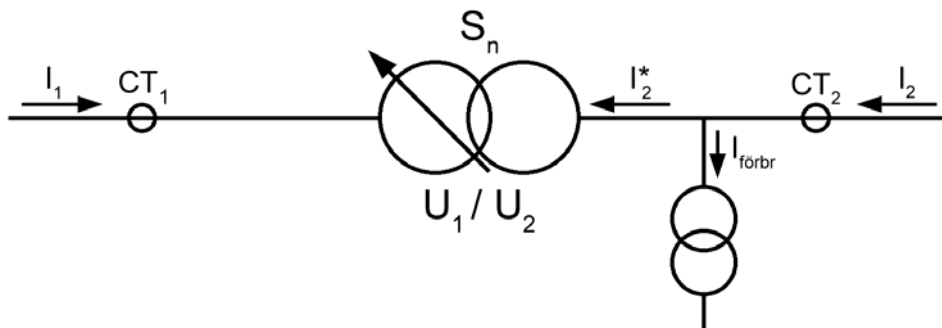
$$I_{3(A)} = -\frac{U_1^*}{U_3} \cdot I_{1(A)} - \frac{U_2}{U_3} \cdot I_{2(A)} \quad (4.25)$$

Då strömmarna har räknats ut kan differential- samt stabiliserande ström beräknas med respektive skydds definition av dessa.

Samma beräkning kan sedan utföras för fel F_1 och F_2 på motsvarande sätt för att sedan jämföra de uträknade differentialströmmarna och presentera fallet med störst differentialström i karakteristiken.

4.3.3.5 Effektuttag i skyddsområdet

Ett effektuttag i skyddszonen orsakar en differentialström eftersom en del av strömmen inte passerar genom båda strömtransformatorerna. Ett exempel illustreras i figur 4.8.



Figur 4.8 Transformator med lastuttag i skyddsområdet.

Den totala strömmen genom strömtransformatorn på nedsidan är summan av strömmarna enligt ekvation 4.26.

$$I_2 = I_{f\ddot{o}rbr} + I_2^* = \frac{S_{f\ddot{o}rbr}}{\sqrt{3} \cdot U_2} + I_2^* \quad (4.26)$$

Strömmen ut ur transformatorn på nedsidan (I_2^*) är beroende av strömmen in i transformatorn (I_1) samt omsättningen enligt ekvation 4.27.

$$I_2^* = -\frac{U_1^*}{U_2} \cdot I_1 \quad (4.27)$$

En hopskrivning av ekvationerna 4.26 och 4.27 ger den totala strömmen genom strömtransformatorn CT_2 (I_2) enligt ekvation 4.28.

$$I_2 = \frac{S_{f\ddot{o}rbr}}{\sqrt{3} \cdot U_2} - \frac{U_1^*}{U_2} \cdot I_1 \quad (4.28)$$

Insättning i ekvation 4.2 för att beräkna differentialströmmen resulterar i ekvation 4.29.

$$\begin{aligned} \Delta I &= \left| \frac{I_1}{I_{N1}} + \frac{I_2}{I_{N2}} \right| = \left| \frac{\sqrt{3} \cdot U_1}{S_n} \cdot I_1 + \frac{\sqrt{3} \cdot U_2}{S_n} \cdot \left(\frac{S_{f\ddot{o}rbr}}{\sqrt{3} \cdot U_2} - \frac{U_1^*}{U_2} \cdot I_1 \right) \right| = \\ &= \left| (1 - p) \cdot \frac{I_1}{I_{N1}} + \frac{S_{f\ddot{o}rbr}}{S_n} \right| \end{aligned} \quad (4.29)$$

Resultatet i ekvation 4.29 liknar resultatet i ekvation 4.5 frånsett en konstant term som är beroende av effektuttaget. Absolutbeloppet innebär dock att då $p > 1$ så kommer det finnas en ström I_1 större än noll som gör att differentialströmmen blir noll. Lutningen i karakteristiken kommer därför i detta fall vara negativ innan denna ström är uppnådd för att sedan bli positiv igen.

Genom att upprepa beräkningarna av de stabiliserande strömmarna i avsnitt 4.3.2.1 kan även ett uttryck för de stabiliserande strömmarna tecknas vilket visas i ekvation 4.30a-c.

$$I_{stab,a} = \max\left(\left|\frac{I_1}{I_{N1}}\right|, \left|\frac{I_2}{I_{N2}}\right|\right) = \max\left(\left|\frac{I_1}{I_{N1}}\right|, \left|\frac{\sqrt{3} \cdot U_2}{S_n} \cdot \left(\frac{S_{förbr}}{\sqrt{3} \cdot U_2} - \frac{U_1^*}{U_2} \cdot I_1\right)\right|\right) =$$

$$= \max\left(\left|\frac{I_1}{I_{N1}}\right|, \left|\frac{S_{förbr}}{S_n} - p \cdot \frac{I_1}{I_{N1}}\right|\right) \quad (4.30a)$$

$$I_{stab,b} = \left|\frac{I_1}{I_{N1}}\right| + \left|\frac{I_2}{I_{N2}}\right| = \left|\frac{I_1}{I_{N1}}\right| + \left|\frac{\sqrt{3} \cdot U_2}{S_n} \cdot \left(\frac{S_{förbr}}{\sqrt{3} \cdot U_2} - \frac{U_1^*}{U_2} \cdot I_1\right)\right| =$$

$$= \left|\frac{I_1}{I_{N1}}\right| + \left|\frac{S_{förbr}}{S_n} - p \cdot \frac{I_1}{I_{N1}}\right| \quad (4.30b)$$

$$I_{stab,c} = \frac{1}{2} \cdot \left(\left|\frac{I_1}{I_{N1}}\right| + \left|\frac{I_2}{I_{N2}}\right|\right) = \frac{1}{2} \cdot I_{stab,b} = \frac{1}{2} \cdot \left(\left|\frac{I_1}{I_{N1}}\right| + \left|\frac{S_{förbr}}{S_n} - p \cdot \frac{I_1}{I_{N1}}\right|\right) \quad (4.30c)$$

De stabiliserande strömmarna ger liknande resultat som för differentialströmmen. De liknar ekvationerna 4.6a-c bortsett från en konstant term. Detta innebär att samma lutningar som härleddes i avsnitt 4.3.2.1 kan användas även då ett lastuttag finns i skyddszone.

För att finna linjens startpunkt antas att strömmen som krävs för att försörja lasten är den minsta ström som differentialskyddet kan utsättas för. Detta innebär alltså att i startpunkten gäller $I_1 = \frac{S_{förbr}}{\sqrt{3} \cdot U_1^*}$ samt $I_2 = 0$. Detta leder till differentialströmmen som visas i ekvation 4.31.

$$\Delta I = \left| (1-p) \cdot \frac{S_{förbr}}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot p} \frac{\sqrt{3} \cdot U_1}{S_n} + \frac{S_{förbr}}{S_n} \right| = \left| \frac{1}{p} \cdot \frac{S_{förbr}}{S_n} \right| \quad (4.31)$$

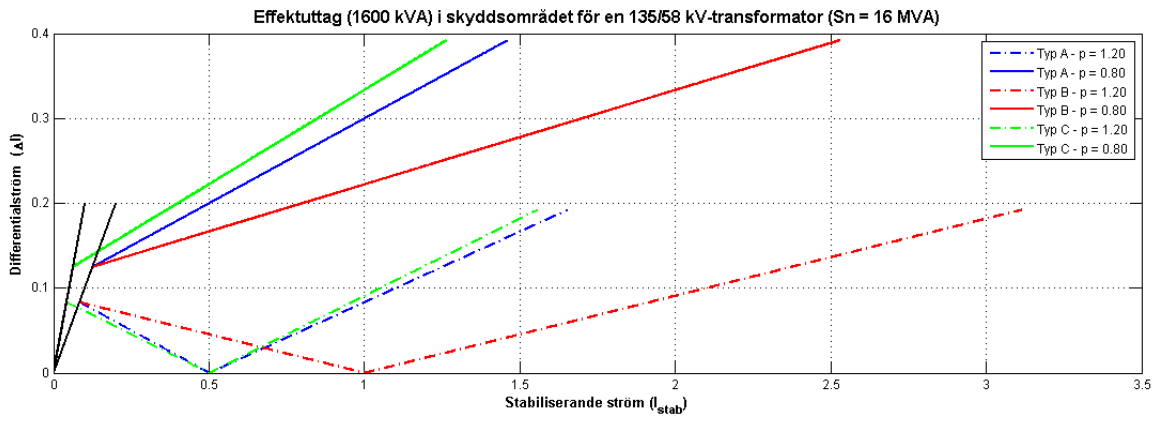
Samma strömmar resulterar i motsvarande stabiliserande strömmarna enligt ekvationerna 4.32a-c.

$$I_{stab,a} = \max\left(\left|\frac{I_1}{I_{N1}}\right|, \left|\frac{I_2}{I_{N2}}\right|\right) = \max\left(\left|\frac{1}{p} \cdot \frac{S_{förbr}}{S_n}\right|, |0|\right) = \left|\frac{1}{p} \cdot \frac{S_{förbr}}{S_n}\right| \quad (4.32a)$$

$$I_{stab,b} = \left|\frac{I_1}{I_{N1}}\right| + \left|\frac{I_2}{I_{N2}}\right| = \left|\frac{1}{p} \cdot \frac{S_{förbr}}{S_n}\right| + |0| = \left|\frac{1}{p} \cdot \frac{S_{förbr}}{S_n}\right| \quad (4.32b)$$

$$I_{stab,c} = \frac{1}{2} \cdot \left(\left|\frac{I_1}{I_{N1}}\right| + \left|\frac{I_2}{I_{N2}}\right|\right) = \frac{1}{2} \cdot I_{stab,b} = \left|\frac{1}{2p} \cdot \frac{S_{förbr}}{S_n}\right| \quad (4.32c)$$

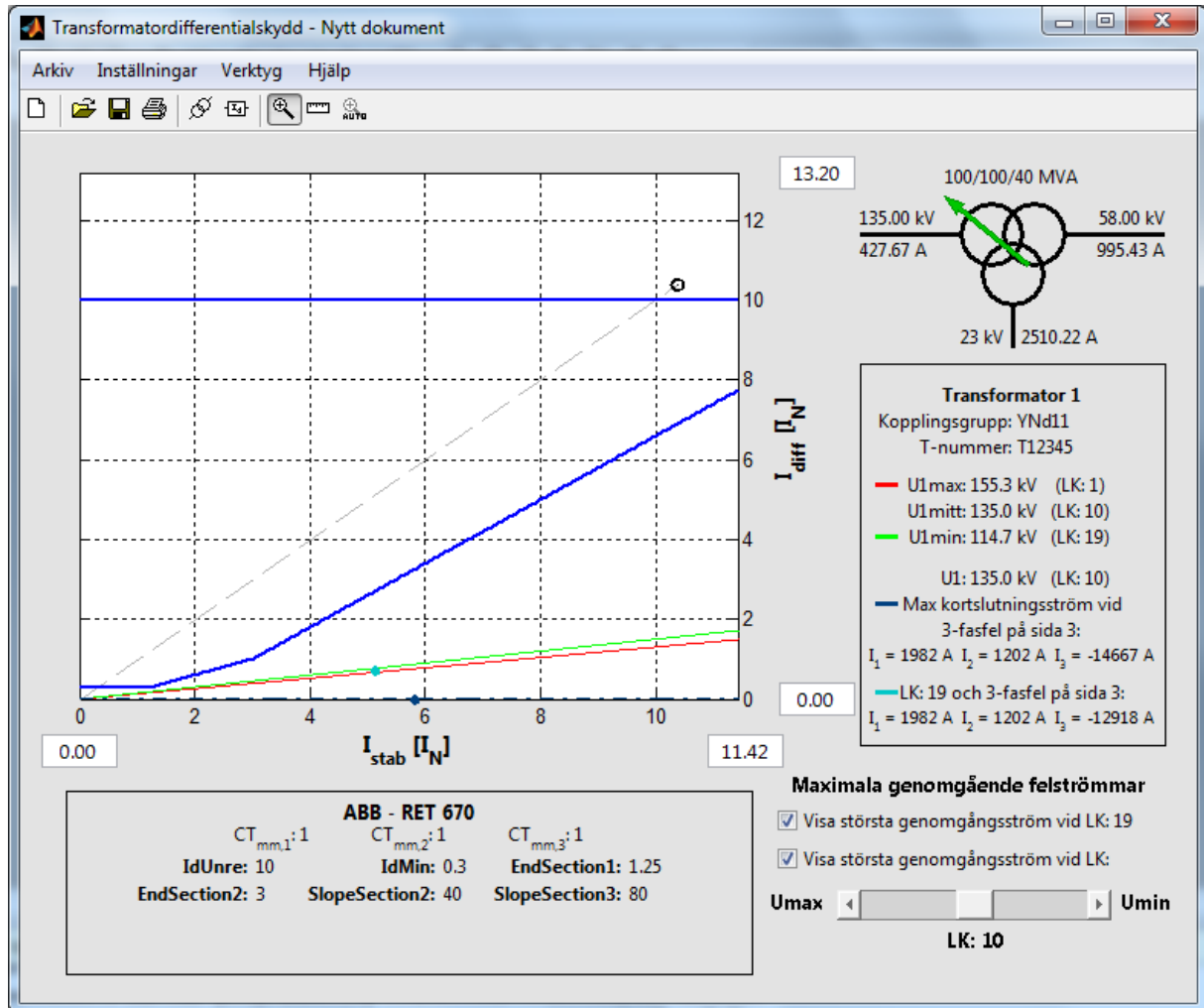
Uttrycken i ekvationerna 4.31 samt 4.32 beräknar alltså startpunkten i karakteristiken. Ett exempel för hur differentialströmmarna varierar vid lastuttag i skyddszone illustreras i figur 4.9.



Figur 4.9 Differentiella och stabiliserande strömmar vid lastuttag i skyddsområdet för olika typer av transformatordifferentialskydd vid lindningskopplarens respektive ytterlägen.

5. Resultat

Programmet har utvecklats enligt specifikationerna i avsnitt 4.1. Programmet är utvecklat i MATLAB vilket gör att programmet är oberoende av operativsystem och hårdvara, dessutom är det möjligt att vidareutveckla programmet i framtiden för att lägga till nya transformatordifferentialskydd eller nya funktioner. Mer detaljer om programmet finns i programmets manual (se Bilaga). Programmets huvudfönster visas i figur 5.1.



Figur 5.1 Det utvecklade programmets huvudfönster.

6. Slutsatser

När en kortslutning inträffar inuti en transformator bildas gas av den nedbrutna oljan. Gasutvecklingen kan i sin tur leda till ett ökat tryck inuti transformatorlådan vilket i värsta fall kan leda till explosion och brand. Transformatorfel måste därför snabbt kunna upptäckas för att undvika skador.

Transformatordifferentialskydd har länge i stort sett varit standard för att skydda större transformatorer då konceptet medför fördelar som hundra procentig selektivitet och snabb fränkoppling. En av utmaningarna i applikationen av transformatordifferentialskydd är den s.k. "falsa" differentialströmmen som uppstår av bl.a. lindningskopplarläge, mättning och felanpassning av strömtransformatorerna.

Då de elektromekaniska reläskydden förlitar sig på analoga kompenseringar för bl.a. fasvridning, nollföljdsfiltrering samt strömtransformatoromsättning måste känslighet uppoffras. Dagens numeriska differentialskydd utför intern numerisk kompensering av nollföljdsström samt strömtransformatorer vilket kraftigt minskar felfaktorerna vilket gör dessa skydd erbjuder mycket mer känslighet. Även signal för lindningskopplarläge kan tas med i beräkningarna vilket då innebär att den enda källan för falsk differentialström är mättning av strömtransformatorerna. Den ökade noggrannheten tillåter att känsligare inställningar kan göras vilket kan minska fränkopplingstiden och därmed minimera skadorna.

Programmet som har utvecklats är ett hjälpmedel för att grafiskt åskådliggöra hur känsliga transformatordifferentialskydd kan ställas in utan att riskera onödiga fränkopplingar vilket tillåter reläskyddsingenjörer att utnyttja de numeriska differentialskyddens känslighet mer effektivt.

7. Fortsatt arbete

Det utvecklade programmet uppfyller de krav som ställdes innan arbetet påbörjades.

Ett förslag för framtida utveckling inom området är en fördjupning inom strömtransformatorer och speciellt hur mätning av dessa påverkar differentialskyddet då transformatorn utsätts för stora genomgående strömmar. Målet med ett sådant arbete kan vara att utifrån strömtransformatorernas omsättning och klassificering uppskatta den resulterande differentialströmmen som i sin tur kan underlätta inställningen av transformatordifferentialsskyddets andra brytpunkt samt linjens lutning i karakteristiken eftersom detta område är starkt förknippat med strömtransformatorernas begränsningar.

Ett förslag på en ytterligare funktion i programmet hade varit möjligheten att spela upp strömmarna från en störningsskrivare. Detta hade inneburit en möjlighet att utvärdera inställningarna för ett givet fall.

Referenser

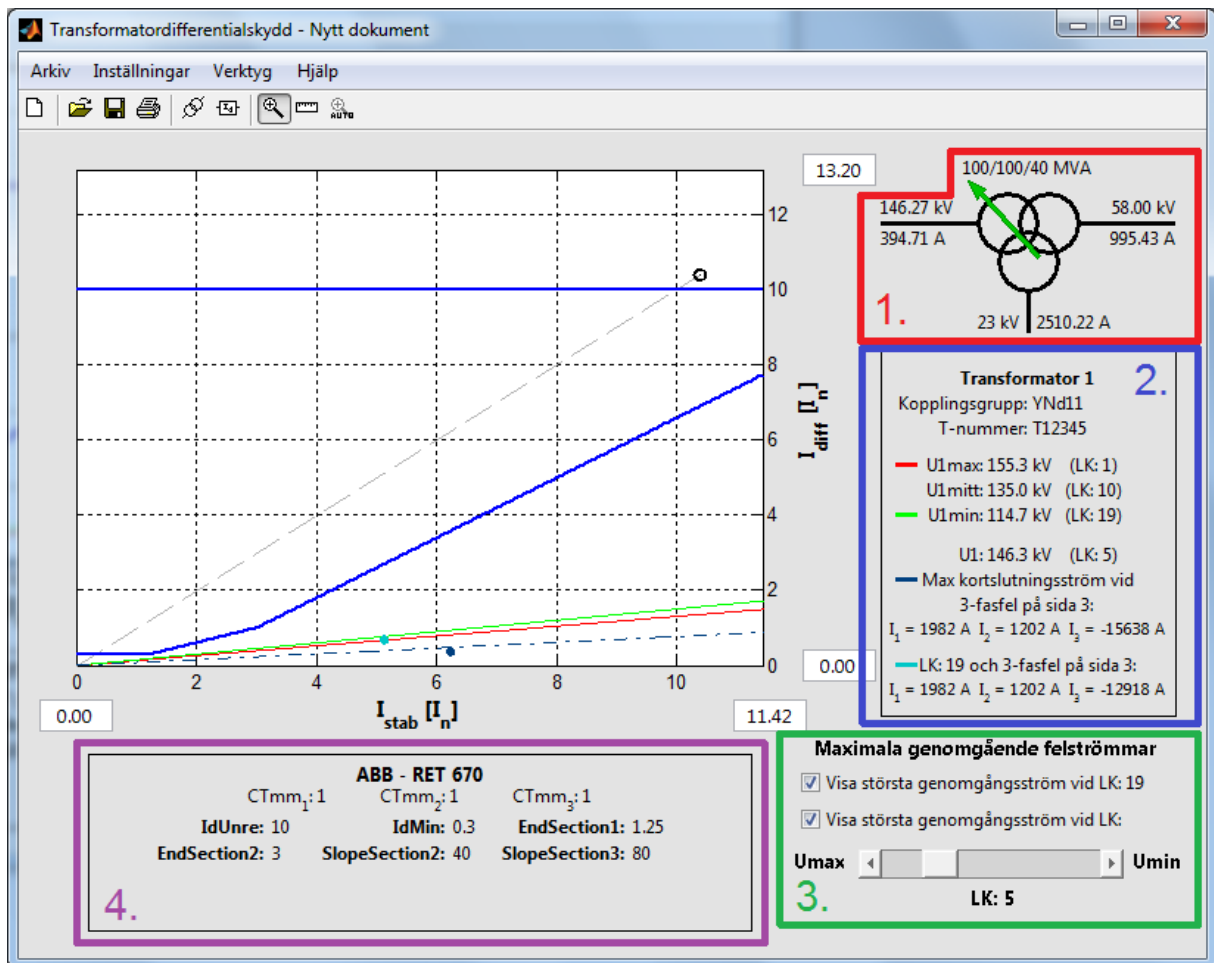
- [1] S. Jeszensky, "History of Transformers," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 16, no. 12, pp. 9-12, December 1996.
- [2] Å. Carlsson, *Power Transformer Design Fundamentals*, 3rd ed. Ludvika, Sverige: ABB Transformers, 2000.
- [3] J. D. Glover, M. S. Sarma, and T. J. Overbye, *Power System Analysis and Design*, 4th ed. Toronto, ON, Kanada: Thomson Learning, 2008.
- [4] "IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes," IEEE Std C37.110, 2007.
- [5] Z. Gajic, "Differential Protection for Arbitrary Three-Phase Power Transformers," Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund, Doktorsavhandling 2008.
- [6] P. C. Y Ling and A. Basak, "Investigation of Magnetizing Inrush Current in a Single-Phase Transformer," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 24, no. 6, pp. 3217-3222, November 1988.
- [7] G. Ziegler, *Numerical Differential Protection: Principles and Application*. Erlangen, Tyskland: Publicis Corporate Publishing, 2005.
- [8] M. Shen, "Grounding Transformer Application, Modeling, and Simulation," in *Power and Energy Society General Meeting*, Pittsburgh, PA, USA, 2008, pp. 1-8.
- [9] X. Liang, W. Jackson, and R. Laughy, "Transformer Winding Connections for Practical Industrial Applications," in *Petroleum and Chemical Industry Technical Conference*, Cargary, Alberta, Kanada, 2007, pp. 1-9.
- [10] H-L. Juo, J-C. Wu, K-D. Wu, W-J. Chiang, and Y-H Chen, "Analysis of Zig-Zag Transformer Applying in the Three-Phase Four-Wire Distribution Power System," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1168-1173, April 2005.
- [11] S. Lindahl, "Protection of Power Transformers," in *Power System Protection.*, 2007.
- [12] R. Nylén, "Transformatorskydd: Applikationsguide," ABB Relays, Västerås, 1989.
- [13] H. Bronzeado and R. Yacamini, "Phenomenon of sympathetic interaction between transformers caused by inrush transients," *IEEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, vol. 142, no. 4, pp. 323-329, Juli 1995.
- [14] "IEEE Guide for Protecting Power Transformers," IEEE Std C37.91, 2008.
- [15] G. W. McKenna, "Theory and Application of Transformer Protection," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 69, no. 2, pp. 1197-1202, Januari 1950.

- [16] C. D. Hayward, "Harmonic-Current-Restrained Relays for Transformer Differential Protection," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 60, no. 6, pp. 377-382, Juni 1941.
- [17] D. Baigent and E. Lebenhaft, "Microprocessor-based protection relays: Design and Application Examples," in *Petroleum and Chemical Industry Conference*, Toronto, Ontario, Kanada, 1991, pp. 237-244.
- [18] ABB Substation Automation Products, Application Manual: Transformer protection IED RET 670, 2007.

Bilaga

Manual till program

1. Huvudfönster



1.1 Transformatorsymbol

Transformatorsymbolen visar en symbol för en tvålindnings- eller trelindningstransformator med lindningskopplare på vald sida. Även transformatorns omsättning i aktuellt lindningskopplarläge visas med tillhörande märkström. Observera att transformatorns märkströmmar är uttryckta i samma effektbas, S_{max} vilken för en trelindningstransformator är den största av lindningarnas märkeffekter.

1.2 Transformatorinformation

I transformatorinformationen visas transformatorns namn, kopplingsgrupp samt T-nummer. Även färgkoderna för lindningskopplarens ändlägen visas tillsammans med position och respektive motsvarande spänning. När maximala genomgående strömmar (se 1.3 Maximala genomgående strömmar) är aktiverade visas även strömmarna som orsakar maximal differentialström vid ett fel utanför skyddszone.

1.3 Maximala genomgående strömmar

Då visa största genomgångsström vid LK: XX är aktiverat visas en punkt i grafen som motsvarar ett 3-fasfel utanför skyddszone då lindningskopplaren befinner sig i något av sina ytterlägen. Strömmarna redovisas i transformatorinformationen. För en

två lindningstransformator antas alltid felet vara på transformatorns nedsida men för en trelindningstransformator jämförs differentialströmmarna för kortslutningarna på alla sidor.

När visa största genomgångsström vid LK: är aktiverat så visas både en linje för aktuellt lindningskopplarläge samt en punkt för att indikera maximal genomgående felström. För en två lindningstransformator antas felet vara på nedsidan och för en trelindningstransformator jämförs differentialströmmarna vid kortslutningar på alla sidor. Aktuellt lindningskopplarläge ställs in med slidern längst ner. Observera att lindningskopplarläge 1 motsvarar att lindningen har flest antal varv inkopplade och att lindningen då har "högsta spänning". Ett exempel är en transformator med märkspänningarna $145 \pm 9 \cdot 1.67\% / 46$ kV. *Lindningskopplarläge 1* motsvarar då omsättningen 167/46 kV och *lindningskopplarläge 19* motsvarar omsättningen 123/46 kV.

1.4 Reläskyddsinställningar

Inställningarna i det valda reläskyddet visas tillsammans med $CT_{mm,x}$ som indikerar felaktigt inställda strömtransformatorer. Denna faktor är 1 då rätt omsättning är inställd. Detta kan vara användbart då en strömtransformator med 2 A sekundärström används eftersom de flesta skydd endast har 1 och 5 A-ingångar. Om strömtransformatorn då är ansluten till 1 A-ingången måste det inställda primärvärdet i skyddet kompenseras för att differentialskyddet inte ska misstolka strömmen från denna strömtransformator som dubbel.

2. Transformatordata

Transformatordata:

Namn:

T-nummer:

Kopplingsgrupp:

Lindningar: 1 3

ek: %

Märkeffekt: MVA

Märkspänning: / kV

Strömtransformatorer:

CT1: / Mellantr: /

CT2: / Mellantr: /

Lindningskopplare:

Lindningskopplarens placering: 1 2

Steg upp: Steg ner: Steg om: %

Övrig data:

Kortslutningseffekt: MVA

Driftspänning: kV

Effektuttag i skyddszone: kVA

Transformatordata:

Namn:

T-nummer:

Kopplingsgrupp:

Lindningar: 2 3

ek: / / %

Märkeffekt: / / MVA

Märkspänning: / / kV

Strömtransformatorer:

CT1: / Mellantr: /

CT2: / Mellantr: /

CT3: / Mellantr: /

Lindningskopplare:

Lindningskopplarens placering: 1 2

Steg upp: Steg ner: Steg om: %

Övrig data:

Kortslutningseffekt: / / MVA

Driftspänning: / / kV

Effektuttag i skyddszone: kVA

2.1 Namn

Transformators namn som visas i transformatorinformation i huvudfönstret.

2.2 T-nummer

E.ONs individnummer för krafttransformator som visas i huvudfönstret.

2.3 Kopplingsgrupp

Transformatorns kopplingsgrupp som visas i huvudfönstret.

2.4 Lindningar

Antal lindningar i transformatorn. Med antal lindningar menas antalet lindningar där strömtransformatorer finns placerade. En transformator med oklindning som används för t.ex. hjälpkraft ska därför betraktas som en tvålindningstransformator med effektuttag i skyddszonen.

2.5 Kortslutningsspänning

Tvålindningstransformator:

Transformatorns kortslutningsspänning angivet i procent på transformatorns märkeffekt.

Trelindningstransformator:

Kortslutningsspänningar angivna enligt $e_{k12}/e_{k13}/e_{k23}$ där spänningarna är angivna i procent på samma baseffekt (S_{max}). Konvertering av dessa storheter ska alltså göras manuellt innan inmatning.

2.6 Märkeffekt

Tvålindningstransformator:

Transformatorns märkeffekt angivet i MVA.

Trelindningstransformator:

De tre lindningarnas respektive märkeffekter som inmatas $S_1/S_2/S_3$. I beräkningar används S_{max} som är $\max(S_1, S_2, S_3)$. Programmet väljer dock ut denna gemensamma bas själv och det är inget som användaren behöver ta hänsyn till.

2.7 Märkspänning

Transformatorns omsättning då lindningskopplaren befinner sig i mittläge.

2.8 Strömtransformatorer

Strömtransformatorernas verkliga omsättning, d.v.s. omsättningen hos de verkliga strömtransformatorerna i anläggningen. Även eventuella mellanströmstransformatorers omsättningar anges, om dessa inte existerar anges omsättningen 1/1.

2.9 Lindningskopplare

Lindningskopplardata, på vilken lindning lindningskopplaren är placerad. Med *steg upp* menas antal steg som lindningskopplaren kan "höja märkspänningen" i sin lindning och vice versa gäller för *steg ner* som alltså "sänker spänningen".

2.10 Kortslutningseffekt

Tvålindningstransformator:

För en tvålindningstransformator anges endast kortslutningseffekten på uppsidan eftersom nätet antas vara mycket starkare där vilket leder till att ett fel på nedsidan orsakar störst ström genom transformatorn.

Trelindningstransformator:

För en trelindningstransformator anges kortslutningseffekter för samtliga sidor och programmet räknar sedan ut vilken sida som ger störst differentialström då en kortslutning inträffar.

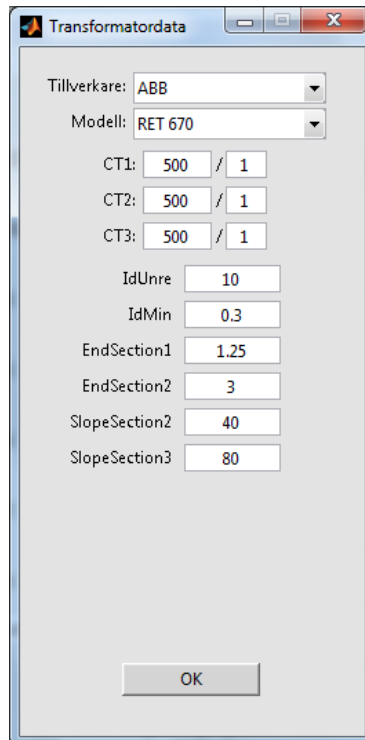
2.11 Driftspänning

Nätspänningen i respektive sida. Används för att tillsammans med kortslutningseffekten beräkna nätimpedans när kortslutningsströmmar beräknas.

2.12 Effektuttag i skyddszone

Parametern anges för att åskådliggöra ett konstant effektuttag i skyddszone. Ett exempel kan vara en nollpunktsbildande Z-kopplad transformator med en extra lindning som är ansluten för att försörja stationsutrustning.

3. Skydd



Tillverkare:	ABB
Modell:	RET 670
CT1:	500 / 1
CT2:	500 / 1
CT3:	500 / 1
IdUnre	10
IdMin	0.3
EndSection1	1.25
EndSection2	3
SlopeSection2	40
SlopeSection3	80

3.1 Tillverkare

Tillverkare av det använda skyddet.

3.2 Modell

Modell av skydd från vald tillverkare.

3.3 Strömtransformatordata

Här ska strömtransformatordata matas in från skyddets perspektiv. Sekundärvärdet i omsättningarna representerar skyddets mätgång (d.v.s. oftast 1 eller 5 A). Om en strömtransformator används med 2 A sekundärström som är ansluten till skyddets 1 A-ingång måste följaktligen det inställda primärvärdet (som matas in i skyddet) justeras för att "lura" skyddet.

3.4 Parametrar

Skyddets parametrar är beroende av modell, mer förklaring om dessa finns i avsnitt 6. Reläskydd. Programmet ser till att inställningarna är inom tillåtna intervallet och returnerar max eller min-värde om inmatat värde är utanför respektive gräns.

4. Verktyg

Verktygen nås genom att välja **Verktyg** i huvudfönstrets meny.

4.1 Zoom (Ctrl + Z)

Då zoom-verktyget är aktiverat kan användaren använda musen för att zooma. Håll in vänster musknapp och rör musen för att markera ett område. För att zooma ut till ursprungsläge, höger-klicka.

4.2 Mät (Ctrl + M)

När mät-verktyget är aktiverat visas muspekarens aktuella koordinater när den befinner sig innanför grafens område. Om användaren håller in vänster musknapp och rör muspekaren i grafens område så visas en linje mellan punkten där klicket skedde och muspekarens position med information om avståndet i x och y-led samt linjens lutning. Detta kan vara användbart för att mäta differentialströmmens lutning i grafen och därmed hitta en lämplig inställning av differentialskyddets första linjesegment.

4.3 Visa fel i skyddszon

När denna funktion är aktiverad visas den maximala ström som kan uppstå vid ett fel i skyddszonen på sida 1. Strömmen begränsas därför endast av nätets impedans på sida 1. Strömmarna i de övriga sidorna antas vara noll.

4.4 Autozoom

Autozoom är en funktion, som när den är aktiverad, automatiskt zoomar ut när någon inställning görs. Detta kan vara användbart när det ostabiliserade steget ställs in eftersom det annars kan hamna ovanför det synliga området.

5. Övrigt

5.1 Snabbkommandon

Följande snabbkommandon finns tillgängliga i programmet:

Funktion	Kommando
Nytt dokument	Ctrl + N
Öppna	Ctrl + O
Spara	Ctrl + S
Skriv ut	Ctrl + P
Aktivera zoom	Ctrl + Z
Aktivera mätning	Ctrl + M

5.2 Zooma ut

Automatisk ut-zoomning görs med ett klick på höger musknapp.

5.3 Filformat

Filer som skapats med Transformator-differentialskydd sparas som en textfil (*.txt). Detta gör att filer kan bifogas i e-mail för klienter som inte tillåter binära filer. En annan fördel är att filerna kan öppnas med t.ex. notepad för redigering.

6. Reläskydd

Nedan följer en sammanfattning av programmets inlagda transformatordifferentialskydd med bl.a. karakteristik och en förklaring av parametrarna. Strömmarna som anges antas vara uttryckta i per unit.

6.1 ABB – RET 670

För transformatorer med upp till 3 lindningar.

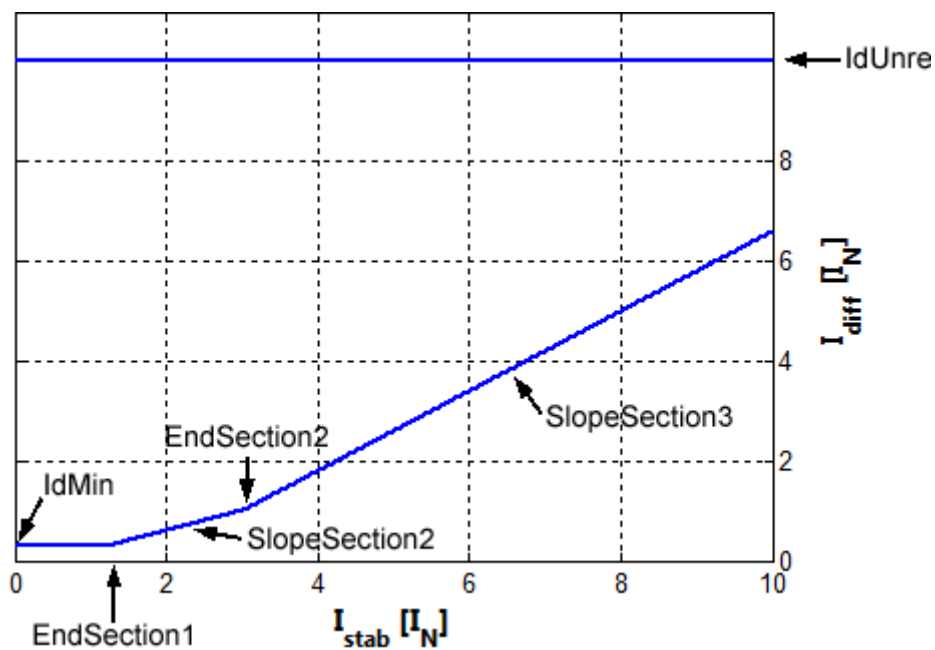
För transformator med två lindningar:

$$\Delta I = |I_1 + I_2| \quad I_{stab} = \max(|I_1|, |I_2|)$$

För transformator med tre lindningar:

$$\Delta I = |I_1 + I_2 + I_3| \quad I_{stab} = \max(|I_1|, |I_2|, |I_3|)$$

Parameter	Standardinställning	Inställningsområde	Steg	Kommentar
IdUnre	10.00 I _N	1.00-50.00 I _N	0.01 I _N	Ostabiliserad funktion
IdMin	0.30 I _N	0.05-0.60 I _N	0.01 I _N	Minsta differentialström för funktion
EndSection1	1.25 I _N	0.20-1.50 I _N	0.01 I _N	X-koordinat för slutet av linjesegment 1
EndSection2	3.00 I _N	1.00-10.00 I _N	0.01 I _N	X-koordinat för slutet av linjesegment 2
SlopeSection2	40.0 %	10.0-50.0 %	0.1 %	Lutning av linjesegment 2
SlopeSection3	80.0 %	30.0-100.0 %	0.1 %	Lutning av linjesegment 3



6.2 ABB – SPAD 346C

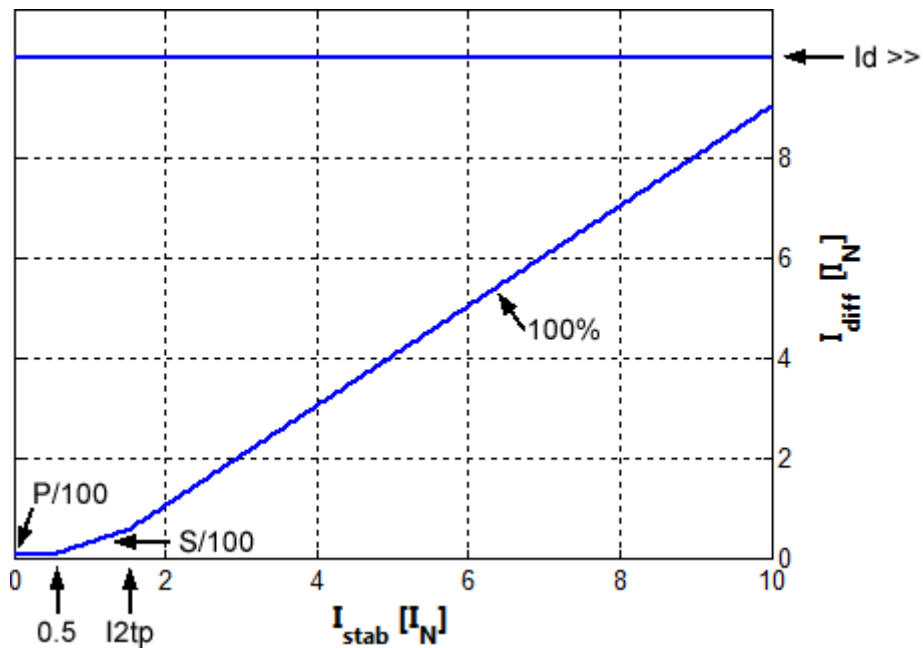
För transformator med 2 lindningar.

$$\Delta I = |I_1 + I_2| \quad I_{stab} = \frac{1}{2} \cdot |I_1 - I_2|$$

Observera att strömmarna på båda sidorna definieras som positiva då de är riktade in mot transformatorn. I manualen för SPAD346C används definitionen att båda strömmarna är positiva när strömmen flyter genom transformatorn vilket gör att ovanstående ekvationer skiljer sig från dem i manualen.

Parameter	Standardinställning	Inställningsområde	Steg	Kommentar
Id >>	10 I _N	5-30 I _N	1 I _N	Ostabiliserad funktion
I1	1.0	0.40-1.50	0.01	Korrektionsfaktor för strömtransformator 1 *)
I2	1.0	0.40-1.50	0.01	Korrektionsfaktor för strömtransformator 2 *)
P	40 %	5-50 %	1 %	Minsta differentialström för funktion
S	20 %	10-50 %	1 %	Lutning av linjesegment 2
I2tp	1.5 I _N	1.0-3.0 I _N	0.1 I _N	Startpunkt för linjesegment 3

*) Korrektionsfaktor väljs för att kompensera missanpassning i strömtransformatorn på respektive sida och bör väljas enligt $IX = \frac{I_{NX}}{CT_{x,primär}} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_x} \cdot \frac{1}{CT_{x,primär}}$ där X är sida 1 eller 2.



6.3 Areva – P63X

Där X: 1,2 – För transformator med 2 lindningar

3 – För transformator med upp till 3 lindningar

4 – För transformator med upp till 4 lindningar

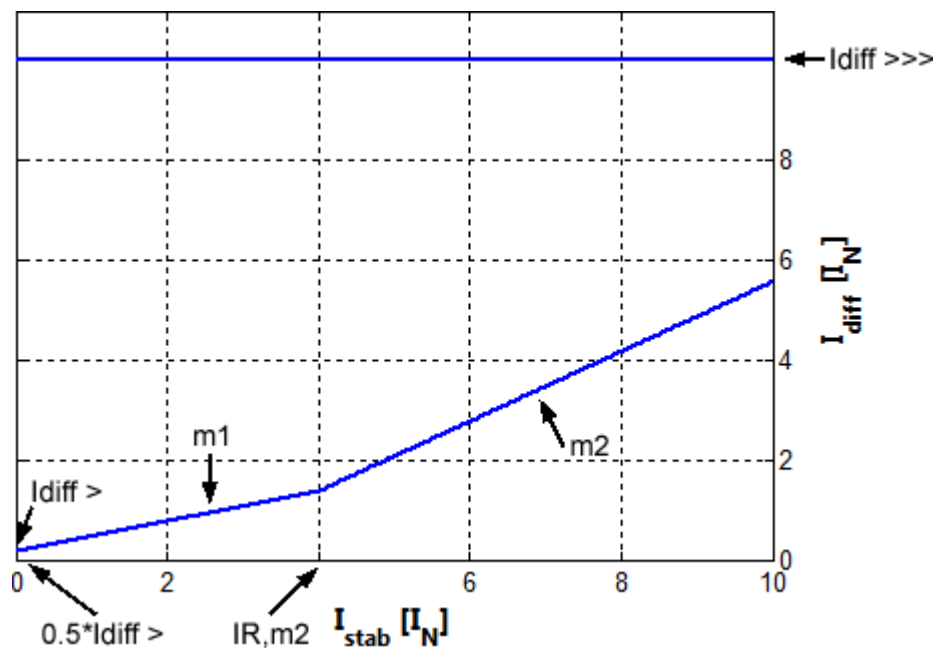
För transformator med två lindningar:

$$\Delta I = |I_1 + I_2| \quad I_{stab} = \frac{1}{2} \cdot (|I_1| + |I_2|)$$

För transformator med tre lindningar:

$$\Delta I = |I_1 + I_2 + I_3| \quad I_{stab} = \frac{1}{2} \cdot (|I_1| + |I_2| + |I_3|)$$

Parameter	Standardinställning	Inställningsområde	Steg	Kommentar
Idiff >>>	10.0 I _N	2.5-30.0 I _N	-	Ostabiliserad funktion
Idiff >	0.20 I _N	0.10-2.50 I _N	-	Minsta differentialström för funktion
m1	0.30	0.10-1.50	-	Lutning av linjesegment 2
IR, m2	4.00 I _N	1.50-10.00 I _N	-	Startpunkt för linjesegment 3
m2	0.70	0.10-1.50	-	Lutning av linjesegment 3



6.4 Siemens – 7UT61X

- Där X: 2 – För transformator med 2 lindningar
 3 – För transformator med upp till 3 lindningar
 5 – För transformator med upp till 5 lindningar

För transformator med två lindningar:

$$\Delta I = |I_1 + I_2| \quad I_{stab} = |I_1| + |I_2|$$

För transformator med tre lindningar:

$$\Delta I = |I_1 + I_2 + I_3| \quad I_{stab} = |I_1| + |I_2| + |I_3|$$

Parameter	Standardinställning	Inställningsområde	Steg	Kommentar
I-DIFF >>	7.5 I _N	0.5-35.0 I _N	0.1 I _N	Ostabiliserad funktion
I-DIFF >	0.20 I _N	0.05-2.00 I _N	0.01 I _N	Minsta differentialström för funktion
BASE-POINT 1	0.0	0.0-2.0 I _N	0.1 I _N	Linjesegment 1 – skärning med x-axeln
SLOPE 1	0.25	0.10-0.50	0.01	Lutning av linjesegment 1
BASE-POINT 2	2.5 I _N	0.0-10.0 I _N	0.1 I _N	Linjesegment 2 – skärning med x-axeln
SLOPE 2	0.50	0.25-0.95	0.01	Lutning av linjesegment 2
I-ADD ON STAB.	4.00	2.00-15.00 I _N	0.01 I _N	Extra stabilisering vid mätning av strömtransformator

