

Provning av reläskydd med intermittentfunktion



Jakob Hägg

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

Abstract

The Division of Industrial Electrical Engineering and Automation, IEA, at LTH is participating in the research project DLAB, sponsored by E.ON. The goal of this project is to gain more understanding of the problems arising from increased cablification of Swedish medium voltage distribution grid and to develop an electric power laboratory.

More and longer cables have increased the capacitive earth fault current, which in combination with Petersen coil system increase the risk for more intermittent earth faults. The intermittent earth fault is a sequence of ignitions and extinctions of earth faults. Cause of error can be poor insulation in cable connections or cracked overhead line insulators. The use of more and longer cables also increases the demands on the feeder protection relay and instrument transformers accuracy.

This thesis aims to improve the understanding of protective relay testing with different types of ground faults. The work has included the construction of test equipment with a performance that allows testing of the key features in a modern feeder protection relay, particularly the function of transient earth fault detection.

Two different methods are used to test the relay protections, namely playback of generated fundamental signals and of real disturbance recordings.

The equipment has been used to test two different radial feeder protection relays, namely, ABB RXHL421 and REF615. The testing of the directional earth-fault protection shows that they mostly follow the settings. However, the test of the operating characteristics shows that they differ slightly from the intended characterization. The transient earth-fault protection in REF615 was tested with transients from disturbance recordings. The protection did not start for all transients, it is however hard to draw a direct conclusion of the protection performance from this test. The reason for this is that there is no possibility to change the settings of the protection but also because no other corresponding transient earth-fault protection has been tested.

Sammanfattning

På avdelningen för Industriell Elektroteknik och Automation, IEA, vid LTH drivs forskningsprojektet DLAB, sponsrat av E.ON. Målsättning med projektet är att öka förståelsen för de problem som uppkommer vid ökad kablifiering av distributionsnät, samt att utveckla ett elkraftslaboratorium.

Fler och längre kablar har ökat de kapacitiva jordfelsströmmarna, vilket i kombination med spoljordning, gett fler intermittenta jordfel. De intermittenta jordfelen är sekvenser av tändningar och släckningar och felorsaken kan vara dålig isolation i kabelskarvar eller en sprucken isolator på luftledningar. Fler och längre kablar ställer också högre krav på reläskyddens funktion och mättransformatorernas noggrannhet.

Detta examensarbete syftar till att öka förståelsen för reläskyddsprovning av olika typer av jordfelsfunktioner. Arbetet har inkluderat att bygga en provutrustning med prestanda som möjliggör provning av de viktigaste funktionerna i ett modernt reläskydd, speciellt funktionerna för intermittenta jordfel.

Två olika metoder används för att testa reläskydden, närmare bestämt uppspelning av datorgenererade signaler och uppspelning av verkliga störningsregistreringar.

Provutrustningen har använts för att testa två olika reläskydd, ABB RXHL421 och REF615. Provning av de riktade jordfelssfunktionerna visar att de i huvudsak följer inställningarna dock visar provningen av funktionsområdena att skydden avviker något från den tänkta karakteristiken. Den transientmätande funktionen i REF615 provades med transienter från störningsregistreringar. Skyddet startade inte för alla transienterna men då parametrarna för funktionen är internt ställda och andra transientmätande skydd inte har provats är det svårt att dra några direkta slutsatser angående skyddets prestanda.

Förord

Detta examensarbete har utförts vid Lunds Tekniska Högskola (LTH) som en del i forskningsprojektet DLAB. Examensarbetet är den avslutande delen av min civilingenjörsutbildning och har utförts på avdelningen för Industriell Elektroteknik och Automation i samarbete med E.ON Elnät Sverige AB. Under arbetes gång har jag fått mycket stöd från både E.ON och institutionen och jag vill särskilt tacka följande personer:

Magnus Akke, min handledare på institutionen för sitt stora engagemang och alltid tagit sig tid att svara på mina frågor.

Anna Pettersson, min handledare på E.ON för alla hjälp med vägledning, information om elnätets olika delar och alla ovärderliga kommentarer under projektets gång.

Getachew Darge, för hjälp med alla beställningar och det praktiska arbetet.

Jonas Brink, för hjälp med programmering av reläskydd.

Cristoffer Örndal och Andreas Jönsson, för hjälp med alla frågor kring LabVIEW-programmeringen.

Det förutsätts att läsaren av denna rapport besitter goda kunskaper inom elkraft.

Jakob Hägg

Lund, Juni 2011

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	1
1.3	Disposition	1
2	Mellanspänningsnät 6-36 kV	3
2.1	Distributionsnätet och dess systemjordning	3
2.2	Säkerhetsföreskrifter	5
2.3	Olika typer av jordfel	5
2.3.1	Enfasigt jordfel	7
2.3.2	Intermittenta jordfel	10
2.3.3	Dubbelt jordfel	11
2.4	Reläskyddsfunktioner	12
2.4.1	Överströmsskydd	12
2.4.2	Riktat jordfelsskydd	12
2.4.3	Oriktat jordfelsskydd	16
2.4.4	Nollpunktsspänningsskydd (NUS)	16
2.4.5	Transientmätande skydd	16
2.5	Mättransformatorer	17
3	Provningsmetodik	19
3.1	Riktad jordfelsfunktion	19
3.2	Oriktad jordfelsfunktion	21
3.3	Transientmätande funktion	21
3.4	Testspecifikation	21
3.4.1	Signaler som spelas in under provning	21
3.4.2	Provning av grundtonsfunktion för riktat jordfelssteg	22
3.4.3	Prov med uppspelning av transienter	24
3.4.4	Prov med uppspelning av intermittenta jordfel	24
3.4.5	Övriga prov	24
4	Provutrustning	25
4.1	Mjukvara	25
4.2	Hårdvara	25
4.2.1	Förstärkare	27

4.2.2	Ljudkort.....	27
4.2.3	Dataloggning av reläskyddets signaler	27
4.3	Beskrivning av provprogram	28
4.3.1	Grundtonsuppspelning	28
4.3.2	Uppspelning av störningsregistrering	31
4.4	Mätdatahantering	32
5	Utförande av reläprovning.....	33
5.1	Provning av ABB RXHL421	34
5.1.1	Provning av grundtonsfunktion för riktat jordfelssteg	34
5.1.2	Prov med uppspelning av transienter.....	48
5.1.3	Prov med uppspelning av intermittenta jordfel.....	48
5.1.4	Övriga prov	49
5.2	Provning av ABB REF615.....	49
5.2.1	Prov av grundtonsfunktion för riktat jordfelssteg.....	49
5.2.2	Prov med uppspelning av transienter.....	63
5.2.3	Prov med uppspelning av intermittenta jordfel.....	73
5.2.4	Övriga prover.....	75
6	Slutsats och diskussion.....	82
6.1	Provmetodik	82
6.2	Provutrustning.....	82
6.3	Utförande av reläprovning.....	83
7	Fortsatt arbete	85
8	Referenser.....	86
9	Bilagor	87

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Sedan ett par år tillbaka drivs forskningsprojektet DLAB (vilket är en akronym för Distribution LABoratory) på avdelningen för Industriell Elektroteknik och Automation (IEA), på institutionen för Mätteknik och Industriell Elektroteknik, vid Lunds Tekniska Högskola (LTH). Forskningsprojektet sponsras finansiellt av E.ON¹ och har som målsättning att öka förståelsen för de problem som uppkommer vid ökad kablifiering av distributionsnät, samt att utveckla ett elkraftslaboratorium.

Efter stormen Gudrun år 2005 startade E.ON (dåvarande Sydkraft) projektet Krafttag. Stormen medförde stora skador på elnätet och målsättningen var att öka tillförlitligheten i distributionsnäten. Projektet innebar att E.ON började byta ut friledningar mot kablar i riskområden. Fler och längre kablar har ökat de kapacitiva jordfelsströmmarna, vilket i kombination med spoljordning, gett fler intermittenta jordfel. De intermittenta jordfelen är en sekvenser av tändningar och släckningar och felorsaken kan bero på dålig isolation i kabelskarvar eller en sprucken isolator på luftledning. Fler och längre kablar ställer också högre krav på reläskyddens funktion och mättransformatorernas noggrannhet.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att öka förståelsen för reläskyddsprovning vid utvärdering av olika typer av jordfelsfunktioner. Arbetet har inkluderat att bygga en provutrustning med prestanda som möjliggör provning av de viktigaste funktionerna i ett modernt reläskydd, speciellt för de intermittenta jordfel.

1.3 Disposition

Rapporten är upplagd enligt följande.

Kapitel 2 beskriver det aktuella elnätet och dess systemjordning, olika typer av jordfel och reläfunktioner, samt mättransformatorernas egenskaper.

Kapitel 3 ger en översikt om provningsmetodiken.

Kapitel 4 beskriver den provningsutrustning som byggts och används i examensarbetet.

Kapitel 5 redovisar utförd reläprovning.

Kapitel 6 sammanfattar de viktigaste slutsatserna som kan dras av arbetet.

¹ Vid användning av namnet E.ON är det företaget E.ON Elnät Sverige AB som avses i denna rapport.

I kapitel 7 ges slutligen förslag för vidare arbete i DLAB projektet.

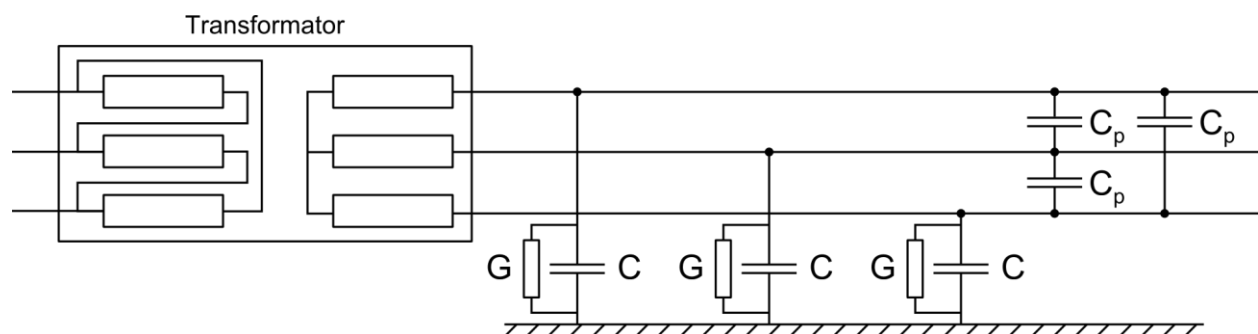
2 Mellanspänningsnät 6-36 kV

Elnätet kan delas upp i transmissions- och distributionsnät. Fokus för detta arbete är provning av ledningsskydd för radialmatade distributionsnät inom spänningsintervallet 6 till 36 kV.

2.1 Distributionsnätet och dess systemjordning

Detta avsnitt tar upp olika typer av systemjordning.

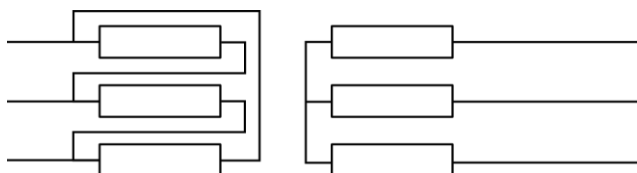
Mellan varje ledare i en trefasutmatning finns det en kapacitans C_p som beror på avståndet mellan ledarna och isolationsmaterialet, se Figur 1. Det finns också en kapacitiv koppling mellan varje ledare och jord, med beteckningen C . För kablar är avstånden mindre än för luftledningar, både mellan ledarna inbördes, och även till jord. Detta tillsammans med kablarnas isolationsmaterial, förklarar varför kablar har högre kapacitans än luftledningar. Därför ökar också den kapacitiva jordfelsströmmen då kablar ersätter luftledningar. Konduktansen G i Figur 1, modellerar resistiva förluster som orsakas av läckströmmar eller koronaförluster. I de flesta fall är konduktansvärdet försumbart litet. Vid jordslutning återleds felströmmen via kapacitanserna till jord. Jordfel behandlas mer utförligt i avsnitt 2.3.



Figur 1 Symmetriskt trefassystem

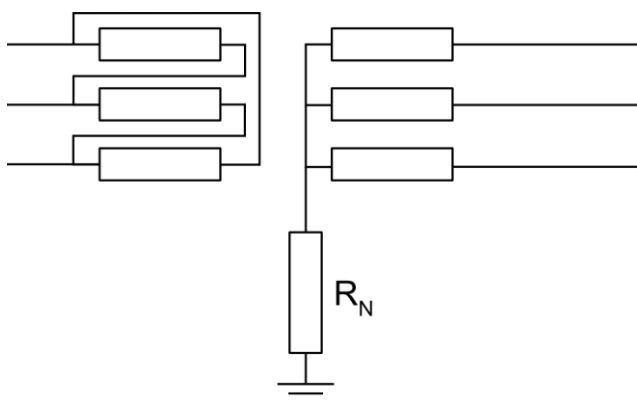
Figur 1 ovan visar en Dy-kopplad transformator, men andra kopplingsarter används också. Exempelvis använder E.ON, Yd-transformatorer med separat nollpunktsbildare och i vissa fall, typiskt 20 kV/10 kV, Yyn-kopplade transformatorer. Jordningen av transformatorns nedsida styr jordfelskyddens karakteristik och jordfelsströmmens storlek bestäms i huvudsak av systemjordning, felresistans och nätkapacitans [1]. Tre olika typer av systemjordning beskrivs nedan:

- Isolerat system
- Resistansjordat system
- Spoljordat system



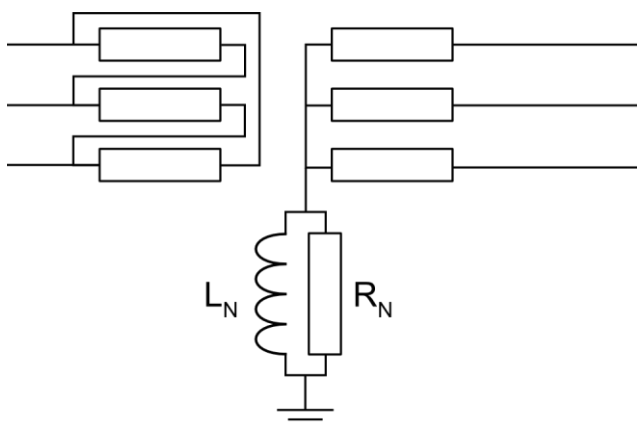
Figur 2 Isolerat system

Figur 2 visar en Dy-kopplad transformator där nedsidans neutralpunkt är isolerad, även kallat ojordat system. Detta typ av system ger en nollföljdsström i alla utmatningsfack som i det närmaste är rent kapacitiv. Systemjordningen fungerar för små nät där jordfelsströmmen är begränsad i storlek.



Figur 3 Resistansjordat system

Figur 3 visar en Dyn-kopplad transformatorn med en resistans till jord i neutralpunkten. Vid jordfel kommer strömmen att bestå av en mer betydande aktiv komponent, som det riktade jordfelskyddet kan använda för feldetektering.



Figur 4 Spoljordat system

Figur 4 visar en Dyn-kopplad transformator med en parallellkopplad resistor och spole i nedsidans neutralpunkt. Syftet med spolen är att skapa en parallellresonans tillsammans med nätkapacitanserna. Denna typ av systemjordning kallas därmed också för resonansjordning, eller Petersenjordning. Vid enfasiga jordfel, av fundamentalfrekvens, kompensera spolens induktiva ström, nätets kapacitiva felström, så att strömmen i felstället blir minimal. Detta ökar möjligheterna att släcka en eventuell ljusbåge i

felstället, vilket förklarar att Peterenspolen också kallas släckspole (på engelska arc suppression coil). Principen för resonansjordning är utförligare beskrivet i avsnitt 2.3.1. En korrekt avstämning innebär att spolens induktiva ströms skall vara samma som nätets kapacitiva jordfelsström. För distributionsnät med stor kapacitiv felström måste spoljordning användas för att uppfylla elsäkerhetsföreskrifternas krav på max 100 V spänningen på utsatt anläggningsdel vid jordslutning.

I praktiken är det svårt att göra en exakt avstämning av spolens ström, vilket innebär att den ibland är något för stor och i andra fall är den något för liten. Som en följd, kan det felbehäftade fackets ström antingen vara kapacitiv eller induktiv, beroende på avstämningen. Därför går det inte att använda reaktiv ström för säker feldetektering. För att göra säker feldetektering i spoljordade nät använder de riktade jordfelskydden aktiv ström. För att öka den aktiva strömmen kopplas därför resistansen R_n in parallellt med spolen. Kraven på mättransformatorerna ökar när det krävs stor känslighet vid mätning av aktiv ström [2].

2.2 Säkerhetsföreskrifter

Föreskrifter för bortkoppling av jordfel i starkströmsanläggningar finns beskrivna i Elsäkerhetsverkets författningssamling ELSÄK-FS 2008:1. Under kapitel 5 - "särskilda säkerhetskrav för högspänningsanläggningar" paragraf 3-6 anges följande bestämmelser för icke direktjordat system (direktjordat innebär lågimpediv jordning):

- Anläggning skall vara utförd så att en- eller flerpoliga jordslutningar kopplas ifrån snabbt och automatiskt.
- För distributionsnät utan luftledning med nominell spänning om högst 25 kV behöver enpolig jordslutning inte automatiskt kopplas bort utan endast signaleras.
- För anläggning med förstärkt friledning skall reläskyddsfunktionen säkerställt kunna detektera och frånkoppla jordfelsresistanser upp till 5 k Ω .
- För anläggning som inte innehar luftledningar enligt ovanstående punkt skall reläskyddsfunktionen kunna detektera och frånkoppla jordfelsresistanser upp till 3 k Ω .
- Vid bortkopplingstider över 2 sekunder får spänningen över jordad anläggningsdel ej överstiga 100 V vid enpoligt jordfel.

Vid enpolig jordslutning för anläggningar med luftledning skall frånkoppling ske inom fem sekunder vid jordfelresistanser upp till 3 eller 5 k Ω beroende på typ av luftledning.

2.3 Olika typer av jordfel

För att analysera osymmetriska system (till exempel ett system med enfasig jordslutning) används med fördel symmetriska komponenter. Transformerings från faskomponenter till symmetriska komponenter gör analysen betydligt enklare då fassystemet kan delas in i tre olika skalära delar:

- Plusföljd
- Minusföljd
- Nollföljd.

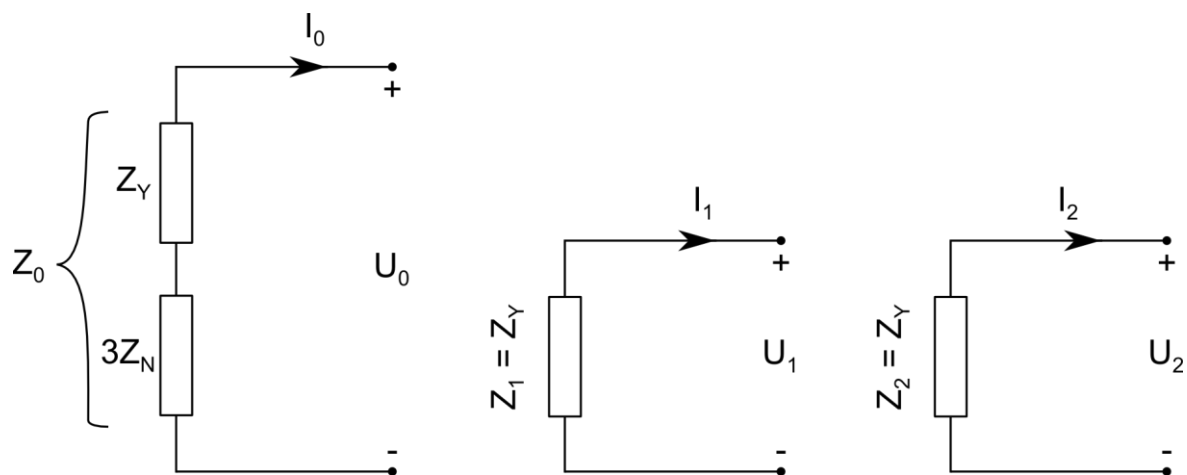
Dessa delar är då frikopplade tills systemet blir osymmetriskt. Fel som ger osymmetri är jordslutning eller kortslutning mellan ledare, ett undantag är symmetriska trefasfel. Transformationsmatrisen är definierad som [3][4]:

$$\begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_0 \\ Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix}, a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad 1$$

Faskomponenterna motsvaras av $Q_{a,b,c}$ och de symmetriska komponenterna av $Q_{0,1,2}$. Plusföljd-, minusföljd- och nollföljds-komponenten är Q_1 , Q_2 och Q_0 , respektive. Efter vänstermultiplikation med den inverterade transformeringsmatrisen ges de symmetriska komponenterna enligt formeln nedan:

$$\begin{bmatrix} Q_0 \\ Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \end{bmatrix} \quad 2$$

Ett symmetriskt trefassystem blir som tidigare nämnt frikopplat vid användning av symmetriska komponenter, detta är illustrerat för en Y-kopplad last i Figur 5 nedan.



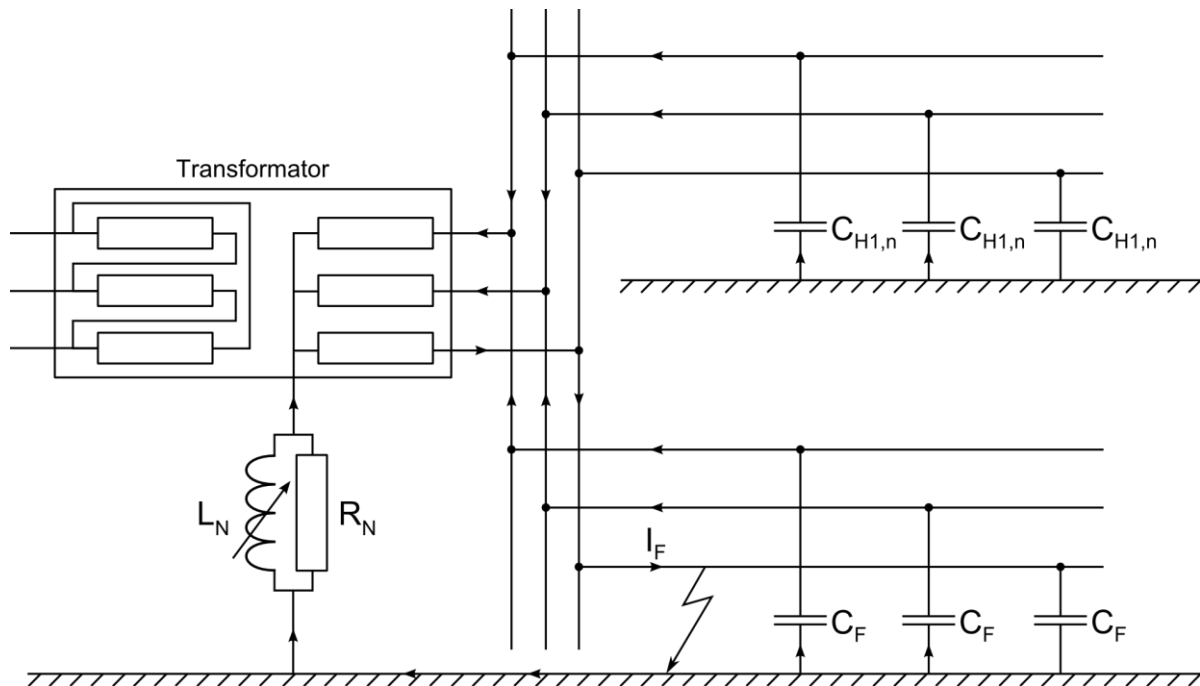
Figur 5 Koppling för symmetrisk Y-last med symmetriska komponenter

Hur dessa kretsar kopplas samman beror på feltyp och felbehäftade faser. Vid härledning av ekvivalenta kretsar används de faserna som vid typfelet ger enklast beräkningar. Nollföljdsimpedansen $Z_0 = Z_Y + 3Z_N$, plusföljdsimpedansen $Z_1 = Z_Y$ och minusföljdsimpedansen $Z_2 = Z_1 = Z_Y$.

Z_Y är fasimpedansen och Z_N är nollföljdsimpedansen.

2.3.1 Enfasigt jordfel

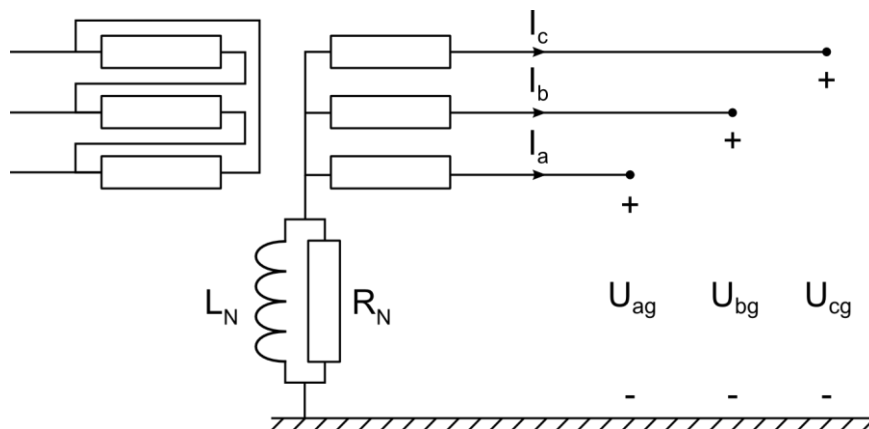
Detta avsnitt behandlar permanenta enfasiga jordfel. Figur 6 illustrerar jordfelsströmmen vid ett enfasigt jordfel i ett spoljordat system.



Figur 6 Jordfelsström vid stumt enfasigt jordfel

Figur 6 visar ett förenklat kretsschema över ett distributionsnät där lastens påverkan försummas. För den felbehäftade utmatningen är fas till jord kapacitanserna namngivna till C_F och för de friska utmatningarna är motsvarande kapacitanser parallellkopplade och namngivna till $C_{H1,n}$. Vid jordfel kommer potentialen mellan den felbehäftade fasen och jord att minska. Denna osymmetri leder till ökad nollpunktsspänning (spänningen mellan transformatorns neutralpunkt och jord) och jordfelsström kommer att gå till de friska utmatningarna via jord.

För övergång till symmetriska komponenter används Figur 7 som utgångspunkt.



Figur 7 Generellt kopplingsschema för spoljordat system

Vid jordslutning med en felimpedans Z_F mellan fas a och jord blir spänningen:

$$U_{ag} = Z_F \cdot I_F, I_a = I_F \quad 3$$

Fasströmmarna blir:

$$\begin{aligned} I_a &\neq 0 \\ I_b &= I_c = 0 \end{aligned} \quad 4$$

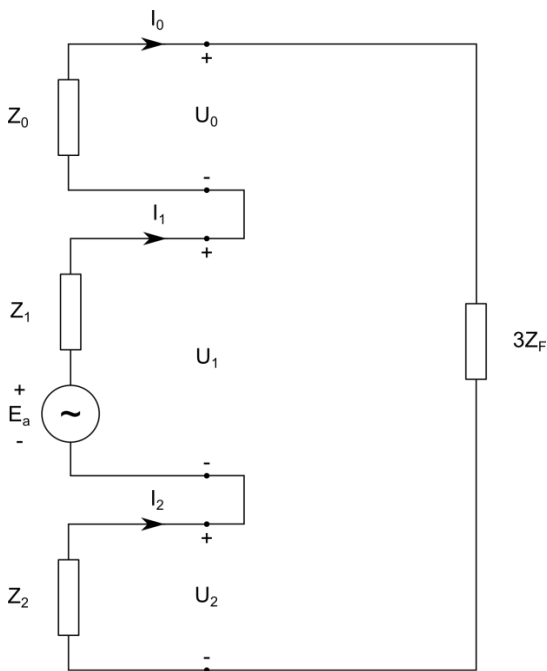
Vid insättning av strömmarna i 2 ges följande:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_a \\ I_a \\ I_a \end{bmatrix} \quad 5$$

Formel 1 ger de symmetriska spänningarna som:

$$\begin{aligned} (U_0 + U_1 + U_2) &= Z_F(I_0 + I_1 + I_2) = 3Z_F \cdot I_1 \\ U_0 &= Z_0 \cdot I_0 \\ U_1 &= E_a + Z_1 \cdot I_1 \\ U_2 &= Z_2 \cdot I_2 \end{aligned} \quad 6$$

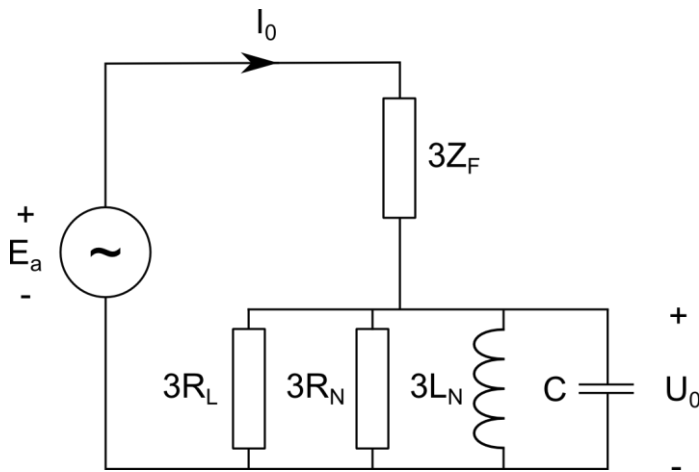
Om en helt perfekt symmetrisk trefasspänning ges från transformatorn blir $U_1 = E_a + Z_1 \cdot I_1$ där E_a är transformatorspänningen. Dessa ekvationer ger följande ekvivalenta krettschema:



Figur 8 Ekvivalent krettschema vid enfasigt jordfel

Vid förenkling av det ekvivalenta schemat i Figur 8, kan plus- och minusföljdsimpedanserna försummas då de ofta är betydligt mindre än nollföljdsimpedanserna. Transformatorns nollföljdsimpedans kan ofta försummas då den bör vara betydligt mindre än nollpunktsimpedansen, förhållandet mellan spolens

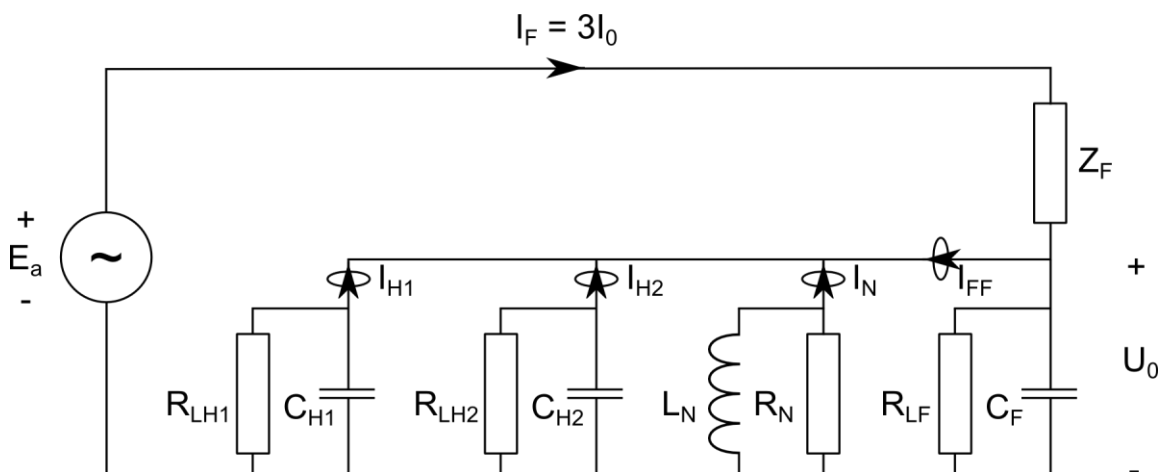
och krafttransformatorns märkeffekt påverkar liksom transformatorns kopplingsart. Ledningarna approximeras med π -länkar där induktansen försummas, vilket ofta är en acceptabel approximation. Efter ovanstående förenklingar blir det motsvarande schema nu:



Figur 9 Ur symmetriska komponenter förenklat schema vid enfasigt jordfel

Ur Figur 9 framgår parallellresonansen tydligt och om spolen är rätt avstämd för 50 Hz kommer enbart en resistiv ström att gå genom felstället. Nollpunktsresistansen modelleras med R_N och samtliga nätförluster modelleras med R_L .

Det förenklade schemat kan modifieras för att tydliggöra de strömmar som uppmätas av reläskydden. Figur 10 visar ett nät med tre utmatningar där högra utmatningen är felbehäftad. Nollföljdsströmmen är ändrad till I_F istället för I_0 vilket innebär en tredubbling av den tidigare nollföljdsströmmen och därmed måste impedanserna också reduceras till en tredjedel av dess värde.



Figur 10 Förenklat schema med utmatningar

Ringarna är en symbol för strömmätningen på varje utmatning. Figur 10 visar också att strömmen som reläskyddet mäter i det felbehäftade facket är nollföljdsströmmen av alla friska fack och nollpunktsströmmen. Med andra ord är nollföljdsströmmen i det felbehäftade facket:

$$I_{FF} = -(I_{H1} + I_{H2} + I_N)$$

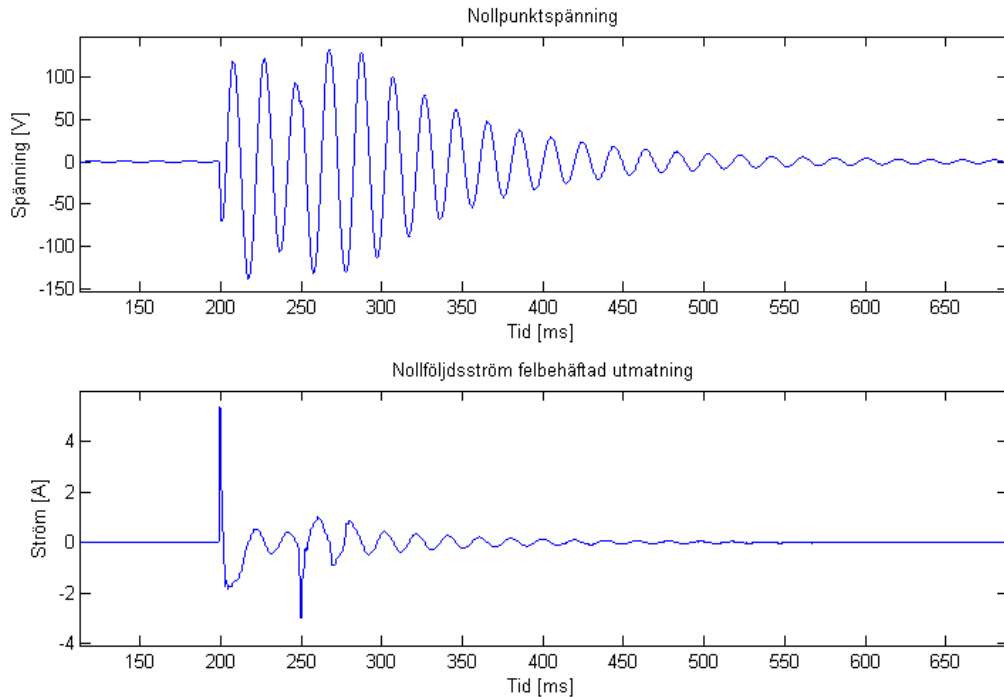
7

Om spolen vore perfekt avstämd skulle nollföljdsströmmen i det felbehäftade facket motsvara den kapacitiva strömmen i det felbehäftade facket samt den aktiva strömmen från nollpunktsutrustningen och de friska ledarna, fast med omvänt tecken.

2.3.2 Intermittenta jordfel

Ett intermittent jordfel är en sekvens av jordslutningar som uppkommer i tät följd. Varje jordslutning ger en transient som består av urladdning- och uppladdningsström. Sekvensen kan beskrivas med hjälp av Figur 9, noterbart är att denna modell är ytterst förenklad och endast ger en approximativ modell för strömtransienten. Schemat fungerar dock bra för att beskriva principen för intermittenta jordfel.

Vid första jordslutningen går en strömtransient via fas till jord kapacitanserna. När nollpunktspänningen ökar i amplitud kommer spolen strömbidrag att växa med en dynamik som styrs av spolens förhållande mellan induktans och resistans (typiskt 30-150 ms). Om felet är anslutet längre kompenserar spolens ström ut den kapacitiva felströmmen och nollpunktspänningen når sitt maximum. Detta innebär att spänningen över felet minimeras och om jordslutningen består av en ljusbåge kan den att släckas. När ljusbågen släcks bortkopplas felet och nollföljdssystemet resonanskrets svänger med sin egenfrekvens. Den uppladdade energin i spolen och kapacitanserna kommer att laddas ur via nollpunktsmotståndet och övriga resistanserna i nätet. När nollpunktspänningen minskar, så ökar spänningen över felstället vilket ökar risken för nytt överslag. Vid ett nytt överslag uppkommer en ny strömtransient vars storlek bland annat beror på fas till jordspänningen vid feltillfället. Figur 11 visar ett kortvarigt intermittent jordfel med endast två tändningar.

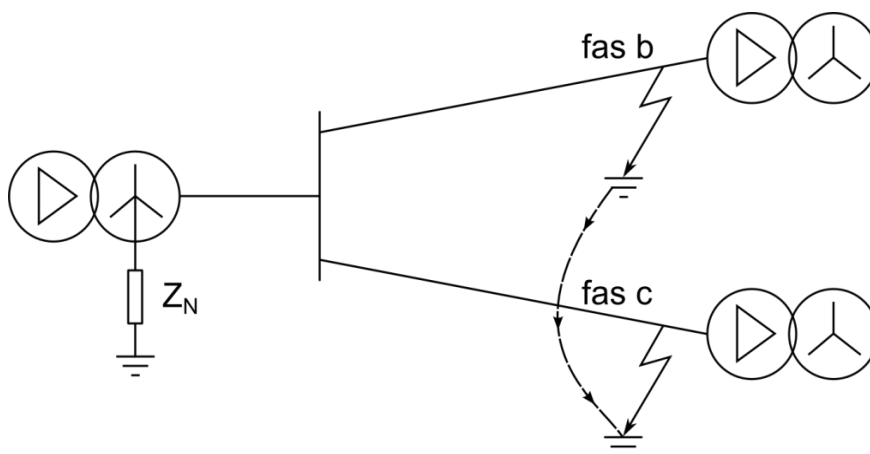


Figur 11 Kortvarigt intermittent jordfel

För mer information om intermittenta jordfel och implementation av ledningsmodeller hänvisas läsaren till [5][6].

2.3.3 Dubbelt jordfel

Ett dubbelt jordfel innebär en tvåpolig jordslutning på två olika utmatningar i nätet. Figur 12 nedan visar ett exempel på ett dubbelt jordfel i ett radialmatat distributionsnät.



Figur 12 Dubbelt jordfel

Vid dubbelt jordfel beror nollpunktspänningens amplitud på ledningsimpedanserna, samt resistanserna i felställe och jordtag för respektive utmatning.

Ofta börjar de dubbla jordfelen som ett enfasigt jordfel. På grund av det enfasiga jordfelet ökar spänningen för de två friska faserna. Om någon del i nätet har nedsatt isolationsförmåga för någon av de friska faserna, finns nu en risk att ytterligare ett jordfel tänds, vilket resulterar i ett dubbelt jordfel.

2.4 Reläskyddsfunktioner

I varje transformatorstation finns ett antal skydd för att säkerställa en hög säkerhetsnivå för allmänheten och stationsutrustningen. Det finns olika skydd för krafttransformatorer, samlingskenor, ledningar, nollpunktsutrustning och kondensatorbatterier. Nedan följer några beskrivningar av funktioner som kan finnas implementerade i ett modernt reläskydd för radialmatade ledningar.

2.4.1 Överströmsskydd

Överströmsskydden mäter fasströmmarna på varje utmatning och skall detektera kortslutningar. Normalt finns ett antal olika steg med inställningsbar strömnivå och tidsfördröjning. Tidskaraktistiken är inställningsbar och kan vara invers vilket innebär att funktionstiden är omvänt proportionellt mot strömmens belopp. Ett annat alternativ är fast tidsfördröjning där en tidsräknare aktiveras om strömmen överstiger inställt startvärde.

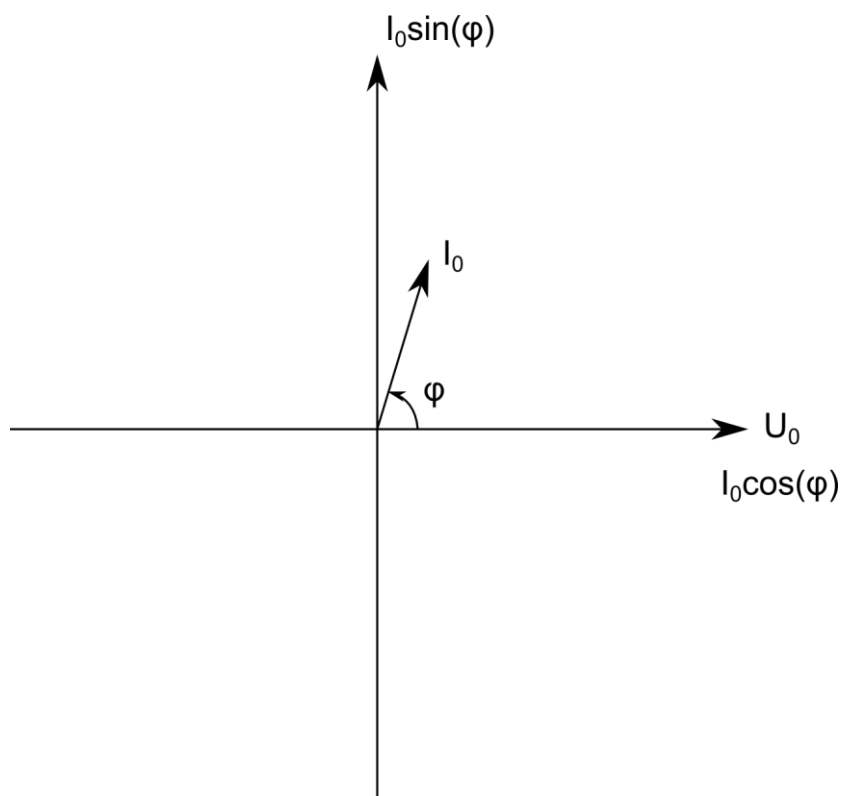
2.4.2 Riktat jordfelsskydd

För varje ledningsfack används ofta ett riktat jordfelsskydd för att detektera och bortkoppla enfasiga jordslutningar. Skyddet skall ge selektiv bortkoppling vid enfasigt jordfel och använder nollföljdsströmmen (egentligen tre gånger nollföljdsströmmen, $3 \cdot I_0$) från utmatningen och nollpunktspänningen för detektering. Skyddet mäter strömmens riktning i relation till nollpunktspänningen (polarisationsspänning).

Nedan följer en beskrivning av ett reläskydds typiska inställningsparametrar, de engelska namnen inom parantes motsvarar namnen för inställningarna i bilaga A och B. Det ska dock noteras att namnen på själva inställningsparametrarna kan variera mellan tillverkare och modell.

Funktionsområde

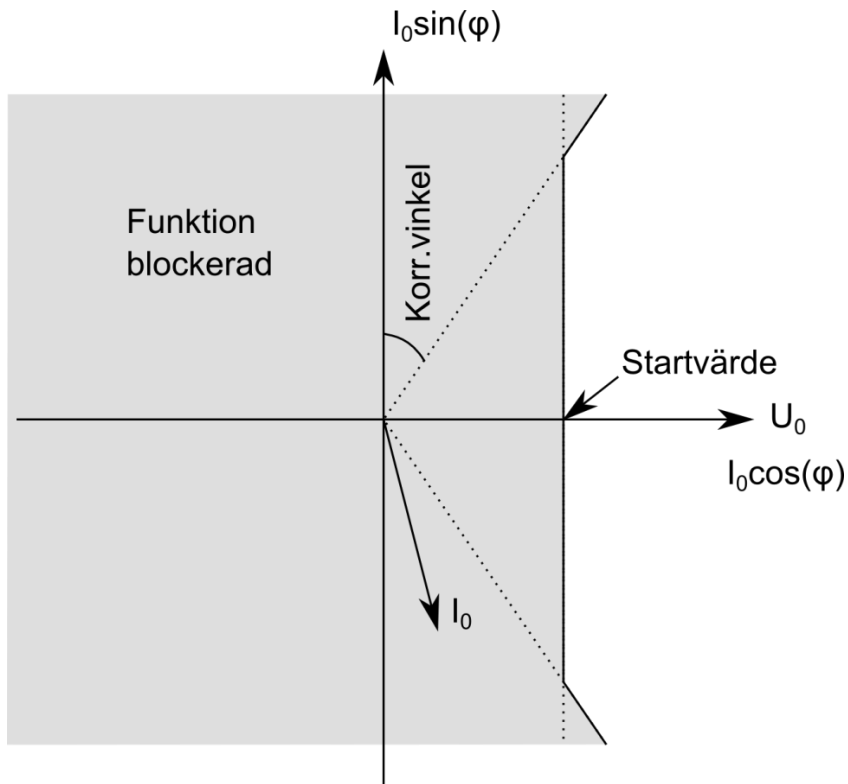
Funktionsområdet beskriver nollföljdsströmmen och nollpunktspänningens grundtonskomponenter i det komplexa talplanet. Figur 13 nedan visar reläskyddets funktionsområde, x-axeln motsvarar nollpunktspänningens riktning.



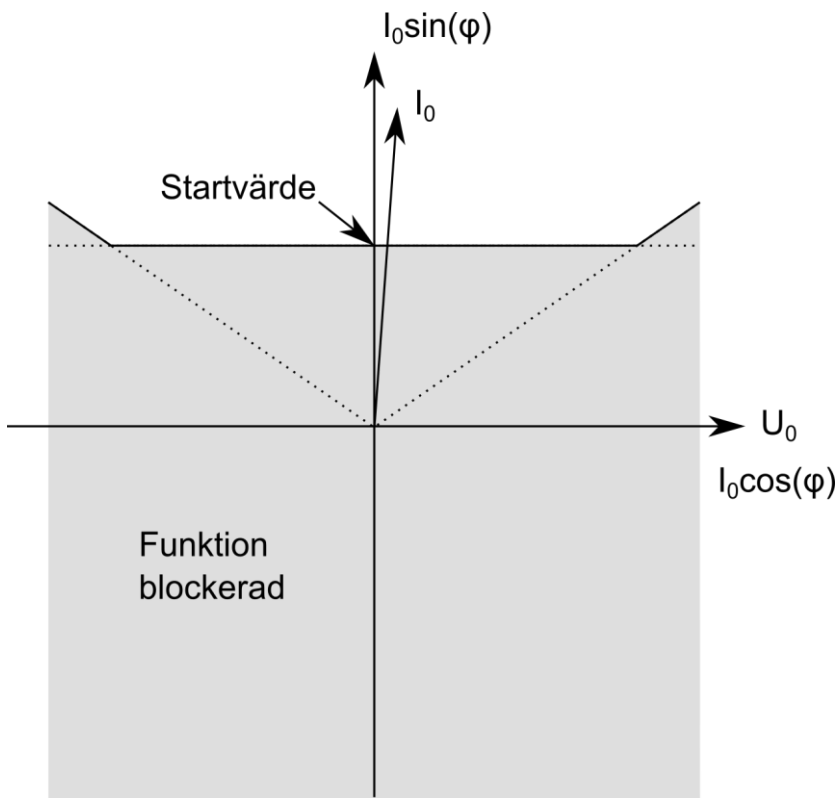
Figur 13 Funktionsområde för riktat jordfelskydd

Karakteristiker (Operation mode)

Det finns olika typer av karakteristiker som kan ställas in beroende på reläskyddsmodell. I denna rapport behandlas enbart $\cos(\varphi)$ och $\sin(\varphi)$. Vid $\cos(\varphi)$ -mätning används den aktiva strömkomponenten (I_0 :s realdel) för att detektera jordfel, och vid $\sin(\varphi)$ -mätning används reaktiva komponenten (I_0 :s imaginärdel). Vid isolerat system används $\sin(\varphi)$ -mätning och för resistans- och spoljordat system används $\cos(\varphi)$ -mätning. Figur 14 nedan visar funktionsområdet för $\cos(\varphi)$ -mätande skydd och Figur 15 för $\sin(\varphi)$ -mätande skydd.



Figur 14 Funktionsområde vid $\cos(\varphi)$ karakteristik och framåtriktning



Figur 15 Funktionsområde vid $\sin(\varphi)$ karakteristik och framåtriktning

Startvärde för nollföljdsström (Start value)

Startvärdet för nollföljdsströmmen bestämmer när skyddet startar och värdet bestäms utifrån krav på högsta detekterbara felresistans. Startvärdet avser vid $\cos(\varphi)$ - eller $\sin(\varphi)$ -mätning den aktiva respektive den reaktiva strömmen, se Figur 14 och Figur 15.

Startvärde för nollpunktsspänning (Voltage start value)

Startvärdena för nollpunktsspänning och nollföljdsström bestämmer när det riktade jordfelssteget skall starta. Startkriteriet för det riktade jordfelssteget är alltså att både nollpunktsspänningen och nollföljdsströmmen skall överstiga sina startvärden. Värdet sätts efter den högsta jordfelresistans som skall kunna detekteras. Vid inställning måste också naturlig osymmetri beaktas, så att skyddet inte kan starta obefogat. Dessutom måste spänningens amplitud överskrida en minsta nivå.

Funktionstid (Operate delay time)

Tiden trip-räknaren måste räkna upp innan skyddet skickar frångkopplingssignal till brytaren. Räknar upp då startkriteriet för nollpunktsspänningen och nollföljdsströmmen uppfylls.

Återställningstid (Reset delay time)

Om det riktade jordfelssteget har startat för jordslutning och felet försvinner, så stannar trip-räknaren. Återställningstiden bestämmer sedan tiden från det att skyddet slutat räkna tills trip-räknaren nollställs. Alla tillverkare har inte denna parameter implementerade i sina skydd.

Återgångsförhållande

Återgångsförhållandet är ingen ställbar skyddsparameter. Värdet beskrivs i procent av startvärdet för nollpunktsspänningen eller nollföljdsströmmen. Förhållandet beskriver relationen mellan skyddets startvärde och värdet när startsignalen återgår. Återgångsförhållandet är kvoten mellan det värde då startsignalen återgår och det inställda startvärdet.

Tidskarakteristik (Operation curve type)

Tidskarakteristiken vid jordfel är valbar, se 2.4.1. Normalt används fast tidsfördröjning.

Korrektionsvinkel (Correction angle)

Korrektionsvinkeln är en extra säkerhetsfunktion för att i möjligaste mån undvika sympatiutlösningar vid vinkelfel i ström- och spänningstransformeringen. Vinkeln är illustrerad i Figur 14 och Figur 15

som Korr.vinkel. I figurerna är vinkeln något överdriven, för verkliga applikationer är vinkeln inställd på någon enstaka grad.

2.4.3 Oriktat jordfelsskydd

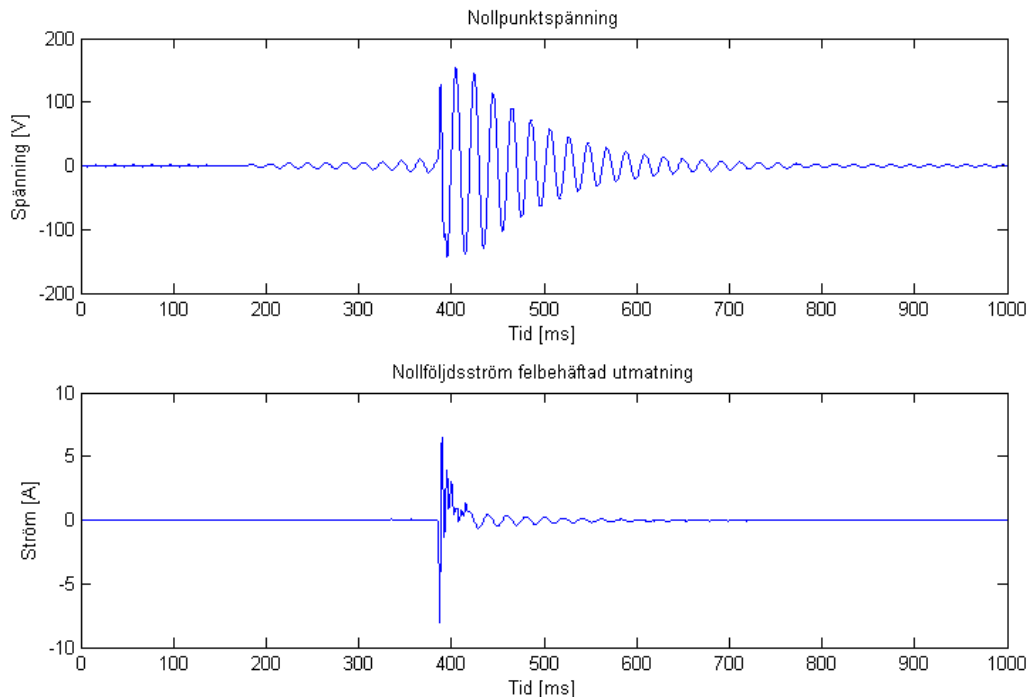
Ett oriktat jordfelsskydd mäter nollföljdsströmmens belopp utan hänsyn till strömmens riktning. Skyddet kan användas för att koppla bort dubbla jordfel. Inställningen på överströmskyddets startsteg begränsas av att det måste ställas med god marginal mot förekommande lastströmmar. Ett oriktat jordfelsskydd kan ställas känsligare eftersom normalt förekommande nollföljdsströmmar begränsas till någon enstaka procent av lastströmmen. Dock måste startvärdet för det oriktade jordfelsskyddet ställas större än den kapacitiva felströmmen för den utmatningen som den skall skydda för att undvika obefogade utlösningar vid jordfel på annat fack än det där skyddet sitter.

2.4.4 Nollpunktsspänningsskydd (NUS)

Detta skydd använder nollpunktspänningens belopp för att detektera jordfel. Skyddets användningsområde kan variera beroende på distributionsnätets uppbyggnad och storlek. Huvudsyftet är oftast att skydda vid jordfel på samlingsskenan och krafttransformatorn nedspänningssida. I de flesta fall är även NUS:et ett reservskydd för de riktade jordfelstegen vid jordfel i nätet. Vid inställning av startvärdet måste hänsyn tas till de riktade jordfelstegen och eventuella osymmetrier i nätet tas, för att säkerställa selektivitet och förhindra obefogad start. NUS:et har därför en längre tidsfördröjning än de riktade jordfelsstegen. Vid utlösning bortkopplas alla inmatningar till samlingsskenan och det finns även ett andra steg som löser uppsidan av krafttransformatorn

2.4.5 Transientmätande skydd

Ofta startar en lågohmig enfasig jordslutning med en tydlig ström- och spänningstransient. Transientens storlek beror på felläge, felresistans, matande nät (alla friska utmatningar) och momentanspänningen för den felbehäftade fasen. Tecknen på ström- och spänningstransienten kan användas för att peka ut den felbehäftade utmatningen. Figur 16 nedan visar exempel på en tydlig transient



Figur 16 Exempel på transient

Vissa typer av jordfel, exempelvis höghögsmå, ger ingen tydlig transient utan domineras av en fundamental frekvens, därför bör ett riktat grundtonsmätande jordfelsskydd användas parallellt med det transientmätande skyddet. Det är också viktigt att skyddet är säkert, det vill säga att det inte löser ut för normalt förekommande kopplingstransienter.

2.5 Mättransformatorer

Mättransformatorerna är viktiga för reläskyddens funktion men lämnas utanför detta arbete, varför de endast nämns kortfattat. De används för att transformera ner höga spänningar och strömmar till mer hanterbara nivåer för reläskydden. De isolerar också högspänningsdelarna från skyddsutrustningen.

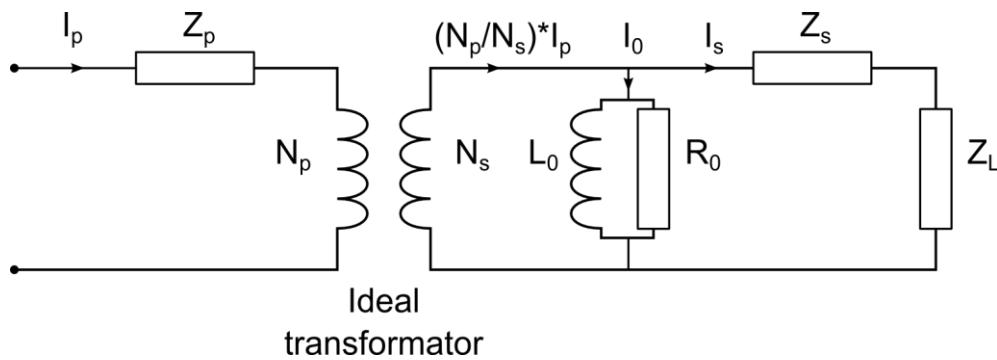
Vid mätning av nollpunktspänningen kopplas en spänningstransformator in parallellt med nollpunkten och jord. I Sverige är ofta spänningsnivån på sekundärsidan nominellt 110 V vid stumt jordfel. På grund av förluster och reaktiva komponenter i transformatorn uppstår mätfel vid spänningstransformering, både i amplitud och i fas. Förlusterna uppstår på grund av lindningsresistans, last, magnetiseringsström och magnetiska förluster såsom hysteresförluster. För mättransformatorer finns det standarder som beskriver maximal amplitud- och vinkelfel inom ett givet område vid specifierad last.

Vid mätning av nollföljdsström används istället strömtransformatorer och två olika typer kan användas nämligen:

- Kabelströmstransformator

- Summaströmkopplad strömtransformator (tre separata transformatorer)

Figur 17 visar en modell för en strömtransformator, samma principiella modell kan också används för spänningstransformatorer. För strömtransformatorerna finns en övre och en undre gräns för när skillnaden mellan primär- och sekundärströmmen håller sig inom de givna specifikationerna. Anledningen till den nedre gränsen är att magnetiseringsinduktansen, L_0 inte förhåller sig någorlunda linjär ända upp till mättning utan är lägre vid små strömmar, vilket gör att det relativa felet ökar vid små strömmar.



Figur 17 Modell för strömtransformator

3 Provningsmetodik

Detta avsnitt beskriver de olika metoderna för provning av funktioner i ett modern reläskydd [8]. Proven skall visa om korrekt funktion vid jordfel uppnås för inställt värde. Vid utveckling av reläskydd har tillverkaren möjlighet att testa varje funktion i detalj utifrån deras specifikation. Ur användarsynpunkt går det enbart att testa de inställningar som användaren har tillgång till. De utsignaler som finns tillgängliga för utvärdering av en funktion och dess inställningar är startsignalen (Trig) och utlösningssignalen (Trip). Två typer av principer används för provningen, datorgenererade signaler (mestadels 50 Hz sinussignaler för nollföljdsström och spänning) och störningsregistreringar.

3.1 Riktad jordfelsfunktion

För säkerställande att det riktade jordfelssteget fungerar korrekt i ett modernt reläskydd har ett antal olika prov utarbetats.

Funktion vid avvikande frekvens

Vid stora störningar kan frekvensen avvika från den nominella nätfrekvensen. Därför är det viktigt att bestämma frekvensområdet där det riktade jordfelssteg ger korrekt funktion [9]. Skyddets startkriterier för spänning och ström, provas vid avvikande frekvens. Vid jordfel är nollföljdsströmmens amplitud ofta det sista startvärdet som överskrids, och därför provas skyddet med en strömamplitud nära startvärdet.

Funktionstid vid varierande nollföljdsström

För att säkerställa att skyddet verkligen löser enligt inställd funktionstid vid det inställda startvärdet kan skyddets funktionstid provas vid olika nollföljdsströmmar. Mätningen av funktionstid visar också skyddets mätnoggranhet vid startvärdet.

Funktionstid vid varierande nollpunktsspänning

Funktionstiden provas också vid varierande nollpunktsspänning. Eftersom spänningens startvärde ofta är känsligare än strömmens, är spänningens mätnoggranhet mindre kritiskt. Provet är ändå användbart för att visa skyddets mätnoggranhet vid inställt startvärde.

Återgångsförhållande som funktion av nollföljdsström

Det råder alltid en viss hysteres vid start och återgång för ett reläskydd. Denna hysteres får inte vara för stor så att en kortvarig störning där nollföljdsströmmen går över startvärdet och sedan snabbt går under igen leder till att skyddet löser ut.

Återgångsförhållande som funktion av nollpunktsspänning

Samma krav på återgångsförhållandet gäller även för nollpunktsspänningen. Spänningens startvärdet är ofta inställd med högre känslighet vilket minskar kravet på återgångsförhållandet.

Bruskänslighet

Mätbrus bör ha liten påverkan på skyddets inställda startkriterier. Vid test av bruskänsligheten har enbart brus lagts till i nollföljdsströmmen då det räcker för påverka vinkelmätningen. Amplitudmätningen påverkas också av brus. Spänningens startvärde är ofta känsligare inställd, vilket betyder att strömmens startvärde blir mest bruskänslig. Nollföljdsströmmen sätts så liten som möjligt (nära startvärdet och 0° fasvinkel mellan ström och spänning) för att SNR² skall bli så liten som möjlig.

Övertonskänslighet

Skyddet skall mäta grundtonskomponenten och använda den för att avgöra storleken på nollföljdsström och nollpunktsspänningen samt fasvinkeln. För att prova skyddets förmåga att mäta korrekt även vid övertoner adderas en överton till nollföljdsströmmen.

Funktionsområde

Skyddets förmåga att korrekt mäta amplitud och fasvinkel provas genom att spela upp nollpunktsspänning och nollföljdsström med olika kombinationer av amplituder och fasvinklar. I provet går det att se om skyddet följer den inställda karakteristiken.

Inspelade störningar

Även om ovanstående prov ger en god bild av hur skyddet fungerar, så är felen i verkligheten mycket mer komplexa och varierande än rena sinussignaler. Därför används också inspelade jordfel för att kunna prova det riktade jordfelssteget. I DLAB har en störningsskrivare³ utvecklats och varit installerad i en transformatorstation under en tid [10]. De riktade jordfelssteget har provats med inspelade störningar. Vid användning av inspelade störningar måste också omsättningen på strömtransformatorn för den inspelade utmatningen tas i beaktan vid inställning av reläskyddet då den bestämmer startvärdet för strömmen.

² Signal to Noise Ratio

³ En störningsskrivare är en utrustning som under störningar spelar in ström- och spänningssignaler

3.2 Oriktad jordfelsfunktion

Tankegången för provningen av det oriktade jordfelssteget är ungefär samma som för det riktade jordfelssteget. Skillnaden är att mätningen av nollpunktsspänningen inte behöver beaktas. Nedanstående prov för test av korrekt funktion kan användas:

Frekvenskänslighet

Funktionstid som funktion av nollföljdsström

Återgångsförhållande som funktion av nollföljdsström

Bruskänslighet

Övertonskänslighet

Inspelade störningar

3.3 Transientmätande funktion

Eftersom verkliga inspelade transienter varit tillgängliga, har det inte funnits något behov att göra ytterligare datasimuleringar. Datasimuleringars giltighet och relevans kan alltid ifrågasättas. Det är alltid mycket svårare att ifrågasätta provningsresultat baserat på verkliga mätningar. Mätningarna måste dock vara av god kvalitet vad gäller upplösning, mätnoggrannhet och frekvensomfång för att kunna återge transienter med bra precision. Återgångsförhållandet för nollpunktsspänningen har dock uppmätts enligt samma princip som för det riktade jordfelssteget.

3.4 Testspecifikation

Testspecifikationen beskriver mer ingående hur proven är tänkta att utföras.

3.4.1 Signaler som spelas in under provning

Vid provning av reläskydd samplas följande insignaler till skyddet i 100 kHz

- Nollföljdsström
- Nollpunktsspänning

Följande utgående signaler från skyddet samplas i 10 kHz

- DEFHPDEF Trig (Det övre riktade jordfelsskyddets startsignal, oriktat)
- DEFHPDEF Trip (Det övre riktade jordfelsskyddets utlösningssignal, oriktat)
- DEFLPDEF Trig (Det lägre riktade jordfelsskyddets startsignal)
- DEFLPDEF Trip (Det lägre riktade jordfelsskyddets utlösningssignal)
- INTRPTEF Trig (Det transientmätande stegets startsignal)

- INTRPTEF Trip (Det transientmätande stegets utlösningssignal)

Namnen på funktionerna är valda enligt deras motsvarighet i IEC 61850 protokollet. Fördelen är att namnen fungerar bättre vid programmering då de inte innehåller några specialtecken. Alla de ovanstående funktionerna är aktiverade under proven, undantaget RXHL421 som enbart har ett riktat jordfelssteg och en enklare variant av intermittenfunktion. Motsvarande namn för det riktade jordfelssteget i RXHL blir DEFLPDEF. Övriga funktioner som finns implementerade i skyddet är avstängda.

3.4.2 Provning av grundtonsfunktion för riktat jordfelssteg

Följande prover kommer att utföras för att prova det riktade grundtonsmätande jordfelsstegets funktion. Om mätningen inte går att utföra enligt specifikationen, eller att mätningen inte stämmer överrens med specifikationen så framgår det i vid presentation av resultatet. Varje prov kommer att spelas upp tre till sex gånger och när det är möjligt, presenteras resultatet som min-, max- och medianvärde. Medianvärdet blir vid jämt antal mätningar medelvärde av de två medianvärdena. Om den uppmätta realdelen eller imaginärdelen av strömmen skiljer sig från önskat värde med mer än 0,5 % anses resultatet opålitligt och används inte. Undantag gäller för mätningar där spänning och ström skall ligga i fas, där kontrolleras enbart realdelen. Eftersom det inte är meningsfullt att mäta den relativa skillnaden för referenser som är noll. Alla prov utförs med aktiv ström (fasvinkel mellan spänning och ström sätts till 0°) om inget annat anges.

- Prov av funktionstid som funktion av nollföljdsström

Ström = 90-130 % av inställt startvärde i steg om 1 %. Nollpunktspänningen inställd på värde väl över startvärdet för nollpunktspänningen (anges vid presentation av resultatet).

- Prov av funktionstid som funktion av nollpunktsspänning

Spänning = 90-130 % av inställt startvärde för nollpunktspänningen i steg om 1 %. Nollföljdsström inställd på värde väl över startvärdet (anges vid presentation av resultatet).

- Prov av frekvenskänslighet

Frekvens = 30-70 Hz i steg om 0,25 Hz.

Ström = 101 % av strömvärdet då skyddet startar. Nollpunktspänningen inställd på värde väl över startvärdet för nollpunktspänningen (anges vid presentation av resultatet).

- Prov av återgångsförhållande som funktion av nollföljdsström

Ström = 105-80 % av inställt startvärde i steg om 1 %. Nollpunktspänningen inställd på värde väl över startvärdet för nollpunktspänningen (anges vid presentation av resultatet).

- Prov av återgångsförhållande som funktion av nollpunktsspänning

Spänning = 105-80 % av inställt startvärde för nollpunktspänningen i steg om 1 %. Nollföljdsström inställd på värde väl över startvärdet (anges vid presentation av resultatet).

- Prov av skyddets förmåga att mäta korrekt även vid inverkan av övertoner

Uppspelning av grundton och en överton.

Grundtonsamplitud = 101 % av strömvärdet då skyddet startar.

Övertonsfrekvens = 2-6*grundtonsfrekvens.

Övertonsfas = 0, 45, 90° i förhållande till fasläget för grundtonen.

Övertonsamplitud = 0-20 % av grundtonamplitud i steg om 1 %.

- Prov av skyddets brus känslighet (normalfördelat, enbart brus i nollföljdsström)

Väntevärde = 0

Standardavvikelse = 1, 3, 10 % av nollföljdsströmmens RMS värde.

Nollföljdsströmmen = 95-105 % av startvärdet i steg om 1 %.

Nollpunktspänningen inställd på värde väl över startvärdet för nollpunktspänningen (anges vid presentation av resultatet).

- Prov av skyddets funktionsområde.

Vid korrektionsvinkel > 0°

Aktiv del av nollföljdsström = 80-140 % av startvärde i steg om 5 %.

Reaktiv del av nollföljdsström = -140-140 % av startvärdet*tan(90°-korrektionsvinkel) i steg om 5 %.

Vid korrektionsvinkel = 0°

Aktiv del av nollföljdsström = 80-140 % av startvärde i steg om 5 %.

Reaktiv del av nollföljdsström = -140-140 % av startvärdet*tan(89°) i steg om 5 %.

3.4.3 Prov med uppspelning av transienter

Inspelade transienter har spelats upp för att prova skyddets förmåga att detektera transienter. Transienter som uppkommit vid ett antal uppmätta jordfel samlas in till ett testbibliotek. För inspelningar som innehåller intermittenta jordfel plockas transienterna ur inspelningen för att spelas upp en i taget.

Vid varje transientprov används strömmen från det felbehäftade facket och därefter provas även funktionen med uppspelning av ström från två friska fack. De två friska facken väljs efter största amplitud och frekvensinnehåll vid feltillfället.

Vid varje uppspelning spelas insignaler och utsignaler in för att efteråt kunna kontrolleras och analyseras.

3.4.4 Prov med uppspelning av intermittenta jordfel

Denna del av provningen provar reläskyddets funktion vid uppspelning av intermittenta jordfel. Tidigare prov visar skyddets förmåga att detektera enstaka transienter. Detta prov kontrollera skyddets beteende vid flera transienter i tät följd.

Ett urval av inspelade intermittenta jordfel spelas upp. Först ström från det felbehäftade facket sedan från två friska.

Vid varje uppspelning spelas insignaler och utsignaler in för att efteråt kunna kontrolleras och analyseras.

3.4.5 Övriga prov

De inspelningar med fel som inte kan klassificeras som varken transienta eller intermittenta jordfel provas under övriga prov. Dessa jordfel kan till exempel börja med ett permanent jordfel för att sedan övergå till ett dubbelt jordfel.

Vid varje uppspelning spelas insignaler och utsignaler in för att efteråt kunna kontrolleras och analyseras.

4 Provutrustning

Kapitlet beskriver val och utvecklingen av hård- och mjukvara som tagits fram under arbetet.

4.1 Mjukvara

Utvecklingsmiljö för provprogrammet är National Instruments LabVIEW vilket är en utmärkt plattform för automatiserade mätningar. Även MathWorks MATLAB har använts, främst för mätdatautvärdering men också för snabbare programmeringstester.

4.2 Hårdvara

Hårdvaran som har använts för provutrustningen är angiven nedan:

- PC (Operativsystem: Microsoft Windows XP)
- LD DP4950 4x950W (slutsteg)
- M-AUDIO ProFire 2626 (ljudkort)
- NI cDAQ-9174 (USB-chassi för IO moduler)
 - NI 9215 C serie IO modul (4 analoga ingångar, simultan sampling)
 - NI 9205 C serie IO modul (32 analoga ingångar, multiplexad sampling)
- Effektmotstånd
 - 5 Ω (8 x 10 Ω á 100 W -> 800 W)
 - Låginduktiv 100 Ω (100 W)
- Toroidtransformator (15 V -> 230 V)

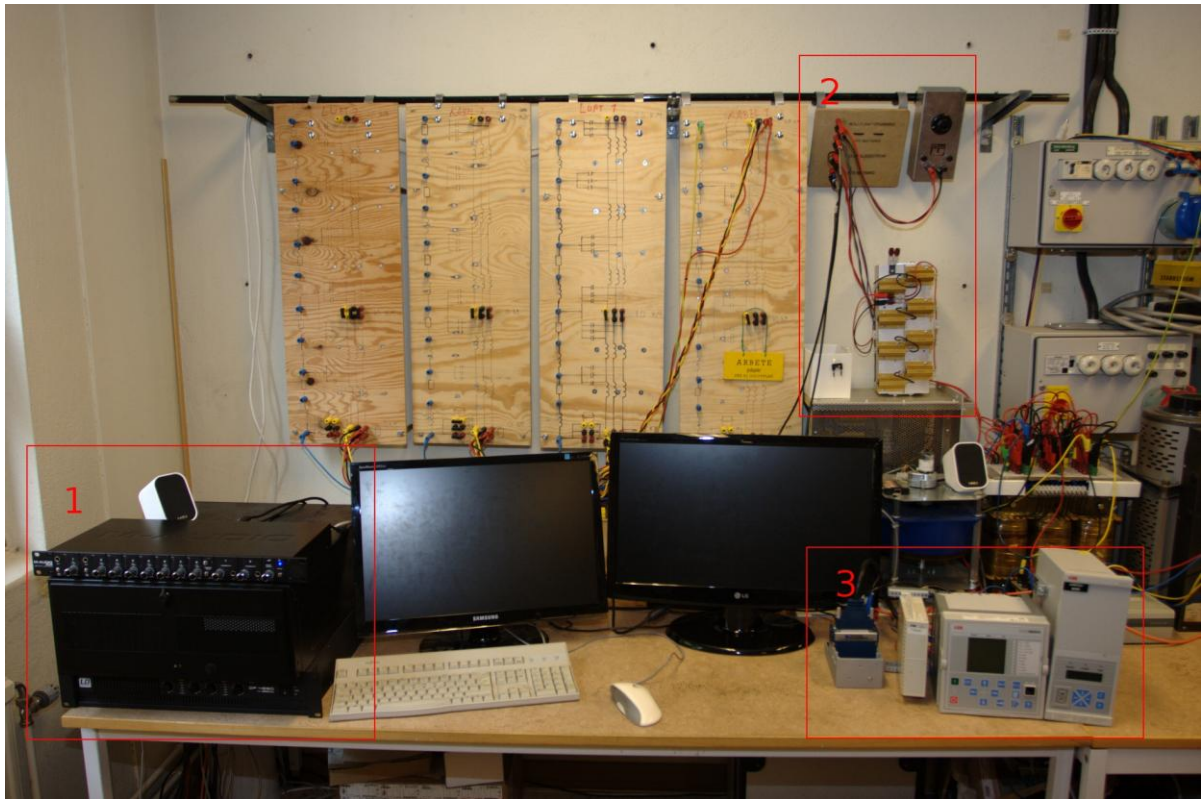
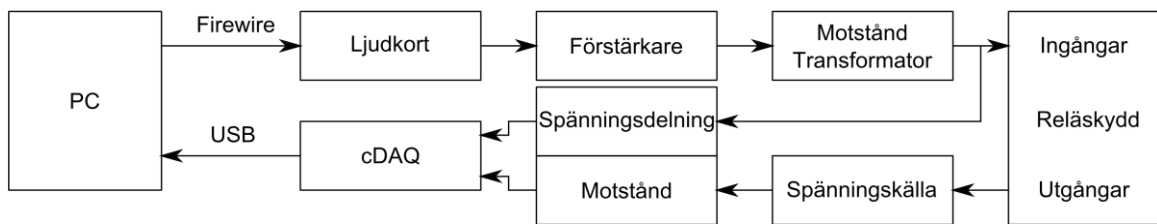


Bild 1 Provutrustningen i DLAB

Bild 1 ovan visar provutrustningen, ram 1 visar ljudkortet, PCn och slutsteget. Ram 2 visar utgångarna från provutrustningen och mätpunkterna för utsignalerna, längst ner i ramen syns effektmotståndet. Ram 3 visar samplingsutrustningen och två reläskydd.



Figur 18 Blockschemat över mätsystemet

Ett blockschema över utrustningen illustreras i Figur 18 ovan. En kort beskrivning av en provuppspelningssekvens utifrån blockschemat:

Testsignaler (nollföljdsström och nollpunktsspänning) skickas från dator till ljudkortet via Firewire-bussen, ljudkortet DA-omvandlar signalerna som förstärks. Motståndet är på ca 5 ohm och kan ses som en omvandling av förstärkarens utspänning till en för skyddet lämplig strömnivå.

Reläskyddets spänningsingångar behöver ofta högre spänning, ca 110 V, än effektförstärkarens max spänning. Därför användes en spänningstransformator som

transformerar förstärkaren utspänning till en för skyddet lämplig spänningsnivå. Signalen går in till skyddet och parallellt med uppspelningen samplas insignalerna till skyddet och utsignalerna från skyddet. Spänningsdelningen anpassar signalerna till modulens (NI 9215) mätområde. Varje skyddsfunktion använder två reläer som utgångar, och vid start- eller utlösningssignal sluts motsvarande relä. Spänningskällan (9 V batteri) används för att spänningssätta motstånden i serie med varje utgångsrelä, modulen (NI 9205) mäter i sin tur spänningen över varje motstånd. Den inspelade signalen kan användas för att korrigera eventuella fel och provet kan sedan repeteras med en ny korrigerad testsignal.

4.2.1 Förstärkare

Störningsskrivaren i DLAB projektet har en samplingshastighet om 50 kHz. Ett vanlig PA-slutsteg har en frekvensgång på 20 – 20000 Hz vilket gör den användbar som förstärkare eftersom större delen av den inspelade signalens frekvensinnehåll kan återskapas. Ett toppvärde på ca 15 A är tillräckligt och ett motstånd på 5 Ω valdes. Detta motståndsvärde ansågs tillräckligt stort för att spänningsdelningen mellan skyddets ingångsimpedans och motståndet skulle vara försumbar. För att också kunna generera tillräcklig hög nollpunktsspänning, ca 110 V, användes en toroidtransformator för upptransformering.

4.2.2 Ljudkort

Som uppspelningskälla valdes ett externt ljudkort för att göra utrustningen mer mobil. Prestandan för ljudkortet är:

- 8 Analoga utgångar
- 192 kHz uppspelningshastighet
- 24 bitar upplösning

Fördelen med ett ljudkort gentemot en analog C serie modul (går att koppla direkt i cDAQ) är att utgångsfilter finns färdigt samt att ljudkortet har högre upplösning och högre uppspelningshastighet. Nackdelen är sämre drivrutiner och ingen synkronisering mellan uppspelning och inspelning. Avsaknaden av synkroniseringen innebär att samplingen måste starta innan uppspelningen och att vid jämförelse mellan uppspelad signal och insignal så måste signalerna synkroniseras i efterhand. Det innebär också att det kommer vara en viss frekvensskillnad på signalerna eftersom sampelklockan och ljudkortetsklocka inte är synkroniserade, detta ses genom att tidskillnaden mellan signalerna ökar för varje sampelsteg. Denna skillnad kan dock korrigeras i efterhand.

4.2.3 Dataloggning av reläskyddets signaler

En NI 9215 modul används för att logga reläskyddets insignaler. Samplingshastigheten är satt till 100 kHz och den simultana samplingen medför hög precision vid beräkning av fasskillnad mellan insignalerna.

Reläskyddets binära ut signaler loggas med en NI 9205 modul där samplingshastigheten är satt till 10 kHz. Samplingen för denna modul är multiplexad vilket ger en liten fördröjning mellan varje mätning på 4 μ s. Tidsupplösningen vid 10 kHz blir 0,1 ms vilket ger tillräcklig precision för mätning av start- och utlösningstid.

Båda modulerna samplar synkront.

4.3 Beskrivning av provprogram

Programmet möjliggör både uppspelning av enstaka prov, samt hela fördefinierade testbibliotek. I bilaga D finns ett urval av bilder på programmets gränssnitt.

Vid start av programmet utförs först en kalibrering av ström och spänning. Förstärkaren har inte helt linjär förstärkning varför den kalibreras med ett antal ström- och spänningsmätningar med varierande amplitud, vilket förbättrar noggrannheten. Val av kalibreringstyp beror vald provmetodik. Provmethoderna som kan användas är:

- Grundtonsuppspelning
- Uppspelning av störningsregistrering

För grundtonsuppspelning väljs RMS kalibrering som börjar med att en två sekunder lång sinussignal (både nollföljdsström och nollpunktsspänning) spelas upp för ungefärlig kontroll av spänning- och strömförstärkning och fasskillnad. Därefter följer ett antal mätningar av spänning och ström vid olika amplituder. De inspelade värdena används sedan för att interpolera fram utsignalsamplituder efter önskade sekundärvärden.

Vid uppspelning av störningsregistreringar, så kalibreras spännings- och strömförstärkningen med hjälp av korta impulser. Resultatet används för att interpolera fram aktuell utsignalsamplitud.

4.3.1 Grundtonsuppspelning

Vid grundtonsuppspelningen används det låginduktiva 100 Ω motståndet. Under följande förhållande uppfyller provningsutrustningen noggrannhetskraven för amplitud och fasvinkeln

Nollföljdsström = 6 - 700 mA

Nollpunktsspänning = 5 - 200 V

Uppspelningstid > 250 ms

Om signalnivåerna, eller uppspelningstiden, ej uppfyller ovanstående värden, så minskar signal brusförhållandet, vilket kan medföra oacceptabelt låg precision i amplitud och

fasvinkelmätningen. Ett exempel är att nollföljdsströmmens återgångsförhållande provas med en nollpunktsspänning med hög amplitud, ca 50 V, vilket ger en tydligare riktningsreferens. Uppspelningshastighet om 192 kHz, och dataloggning vid 100 kHz, respektive 10 kHz, kräver mycket arbetsminne, varför uppspelningstiden är begränsad till ca 10 s. Då funktionstiden under grundtonstestningen sällan överstiger 500 ms innebär detta ingen begränsning.

Varje grundtonstest kan ställas in med följande parametrar:

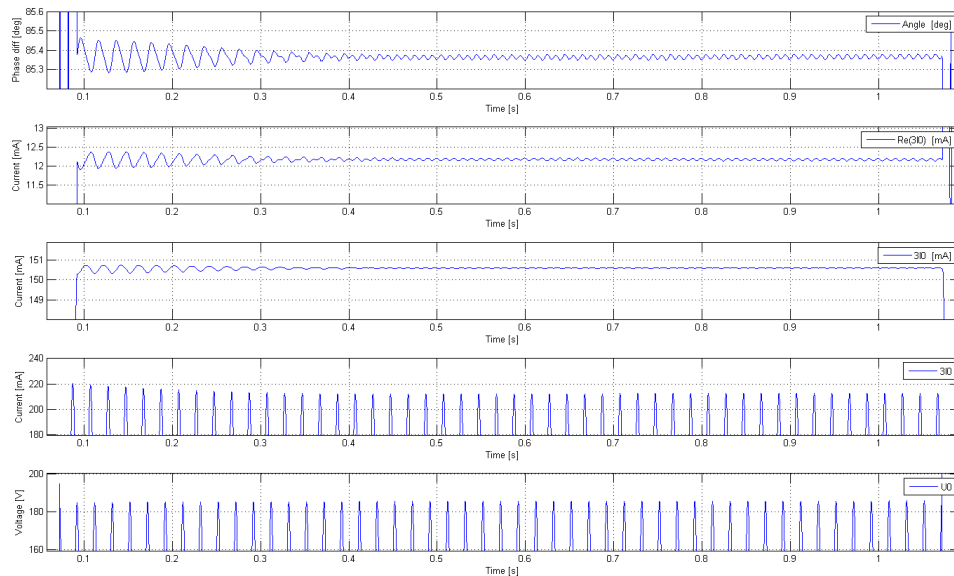
- Frekvens (Hz)
- Uppspelningstid (ms)
- Amplitud på nollföljdsströmmen (mA)
- Amplitud på nollpunktspänningen (V)
- Fasvinkel (°)
- Amplitud ändring
 - Aktivera för ström (boolesk variabel)
 - Aktivera för spänning (boolesk variabel)
 - Starttid för ändring av amplitud (% av uppspelningstid)
 - Tid för återgång av amplitud (% av uppspelningstid)
 - Typ av amplitudförändring
 - Direkt
 - Linjär
 - Exponentiell
- Brus och övertoner
 - Aktivera för ström (boolesk variabel)
 - Aktivera för spänning (boolesk variabel)
 - SD för brussignal (% av grundtonsbelopp)
 - Övertton 1-5
 - Amplitud (% av grundtonsbelopp)
 - Fasvinkel (°)

För varje grundtonstest mäts och presenteras följande data:

- Frekvens (Hz)
Frekvensen mäts med ett av LabVIEWs färdiga VI.
- Storlek på grundtonskomponenten av nollföljdsströmen (mA)
Korrigerig av DC komponent i början av uppspelning och DFT på hela uppspelningssignalen.
- Storlek på grundtonskomponenten av nollpunktspänningen (V)
Samma som för nollföljdsströmmen.
- Fasvinkeln mellan nollföljdsströmmen och nollpunktspänningen (°)
Använder resultatet av DFTn för nollföljdsström och nollpunktspänning för beräkning av fasvinkel.
- Starttid för uppspelningen (samplingen startar innan uppspelning)
Mäter tidpunkt då nollpunktspänningen överstiger ett viss tröskelvärde.
- Start- och stoptider för olika reläfunktioner
 - Tid från start av uppspelning till start av reläskyddets startsignal
Samma som för starttid för uppspelning
 - Tid från start av uppspelning till reläskyddets startsignal återgår
Samma som för starttid för uppspelning
 - Tid från start av uppspelning till reläskyddets utlösningssignal startar
Samma som för starttid för uppspelning

Uppspelningssignalernas DC-komponent filtreras bort innan DFT-beräkningen. Amplitudmätningen av signalen påverkas inte nämnvärt av DC-komponenten men mätningen av fasvinkeln blir något sämre varför korrigeringen utförs. Skillnaden rör sig om enstaka minuter av en grad men är tillräcklig för att mätningen av funktionsområdet skall bli alltför osäker vid stora vinklar.

För att få en ungefärlig uppfattning av hur DC-komponent påverkar grundtonsmätningen i början på uppspelningssignalen har en testinspelning gjorts, se Figur 19.



Figur 19 Kontroll av DFT mätning av grundtonsuppspelning

Längst ner i Figur 19 syns topparna på nollpunktsspänningen, spänningen startar alltid vid sitt maximum för att minimera DC-komponenten. Mätningen visar också att DC-komponenten i nollpunktsspänningen är försumbar. För nollföljdsströmmen som vid inspelningen inte startar vid sitt maximum är DC-komponenten desto mer tydlig. Mätningen av fasvinkel, strömbelopp och aktiv ström har på grund av DC-komponenten ett visst rippel men medelvärde över en period stämmer väl överrens med de värden som mätningarna konvergerar mot. Därför anses att en DC-komponent har marginell påverkan på provresultaten.

Vid testsekvenser väljer användaren vilka typer av testmetoder som skall utföras och ställer in ett antal olika parametrar. Samtidigt väljer också användaren vad det är för reläskydd som provas och vilka inställningar som är gjorda. Efter uppspelningen av alla testmetoder sparas all mätdata och reläskyddsinställningar i en mapp med tidpunkt för provningen som namn. I grundtonsuppspelningen sparas inte inspelningar av signalerna undan utan enbart testresultatet. Mer om mätdatahanteringen i avsnitt 4.4.

4.3.2 Uppspelning av störningsregistrering

Vid uppspelning av störningsregistreringar används 5Ω motståndet för möjlighet till större strömmar. Inställningarna för uppspelning av en störning är:

- Val av störningsfil
- Val av spänning (antingen delta eller nollpunktsspänning)
- Val av utmatning (inspelad nollföljdsström i varje fack)

- Aktivera korrigering av signal (boolesk variabel)

Korrigering av signal innebär att inspelningsdatan interpoleras upp till samma samplingsfrekvens som den uppspelade signalen från ljudkortet. Datan synkroniseras sedan genom minsta kvadratmetod, punkten där signalerna ska synkroniseras är den del av uppspelningssignalen som har störst derivatabelopp. Skillnaden mellan signalerna sparas undan och dras ifrån vid nästa återuppspelning av signalen, detta fungerar bra då förstärkningen är relativt linjär. Nackdelen med metoden är att brus från mätningen nu läggs till i uppspelningssignalen.

Ett problem med uppspelning av transienter är den DC-komponent som då läggs till signalen. Problemet beror på högpassfiltren i ljudkort och förstärkare, dessa filter går dock inte att ta bort och behövs dessutom för att en eventuell DC-offset i uppspelningssignalerna inte skall mätta spänningstransformatorn. För exempel på DC-komponent, se Figur 66.

Vid längre testsekvenser så väljer användaren feltyp som skall testköras och antingen kan hela det valda testbiblioteket spelas upp eller utvalda delar. Val av reläskydd och dess inställningar utförs precis som för grundtonsuppspelningen. Alla uppspelningar och mätningar sparas undan för att kunna användas vid utvärdering av provresultat. Mer om det i nästa avsnitt.

4.4 Mätdatahantering

För mätdatahantering används MATLAB då plottning av data är mer lätthanterligt än vid användning av LabVIEW. Vid grundtonsuppspelning kan vald mätdata laddas ner i MATLABs arbetsminne. All mätdata är sparad i textfiler och en rekursiv funktion letar igenom den valda mappen och lägger in all textdata i en struktur⁴. Beroende på provmetod kan sedan plottar skapas genom färdigskrivna script som hämtar data ur strukturen.

Vid provning med störningsregisteringar kan samma rekursiva funktion användas för att hämta hem mätdata. Varje provning är också sparad och kan plottas via ett annat script. Grundtonskomponenten i uppspelad signal och referens, kan kontrolleras genom en DFT beräkning och en grafisk jämförelse (Matlab-plottning).

⁴ En struktur kan bestå av flera olika värden

5 Utförande av reläprovning

Två olika reläskydd har under arbetets gång provats med provprogrammet.

- ABB RXHL421
- ABB REF615



Bild 2 ABB RXHL 421



Bild 3 ABB REF615

ABB RXHL421 är ett äldre skydd och dess främsta funktion för jordfelsdetektering är dess riktade jordfelssteg.

ABB REF615 är ett nytt reläskydd från ABB och har för jordfelsdetektering både riktad, oriktad och transientmätande funktion. Den oriktade jordfelsfunktionen används inte då den provade versionen av skyddet använder fasströmmarna för att beräkna nollföljdsströmmen. Istället används det övre riktade steget som ställs in för oriktad funktion.

5.1 Provning av ABB RXHL421

Alla inställningar och data ges i sekundärvärden om inget annat anges.

5.1.1 Provning av grundtonsfunktion för riktat jordfelssteg

Denna sektion visar provningen av grundtonsfunktionen för det provade reläet.

Vid varje prov skickas signaler till reläskyddet under en bestämd tid samtidigt som insignalerna (nollpunktspänning och nollföljdström) till reläet samt reläets ut signaler trip och trig samplas. Mellan proven är det ett kort uppehåll på ca 200 ms. Funktionstiden är satt till 500 ms, normalt används tidsfördröjningar på upp till 3s.

Detta skulle dock ge onödigt långa tester varför tiden har kortats ner till ett rimligare värde.

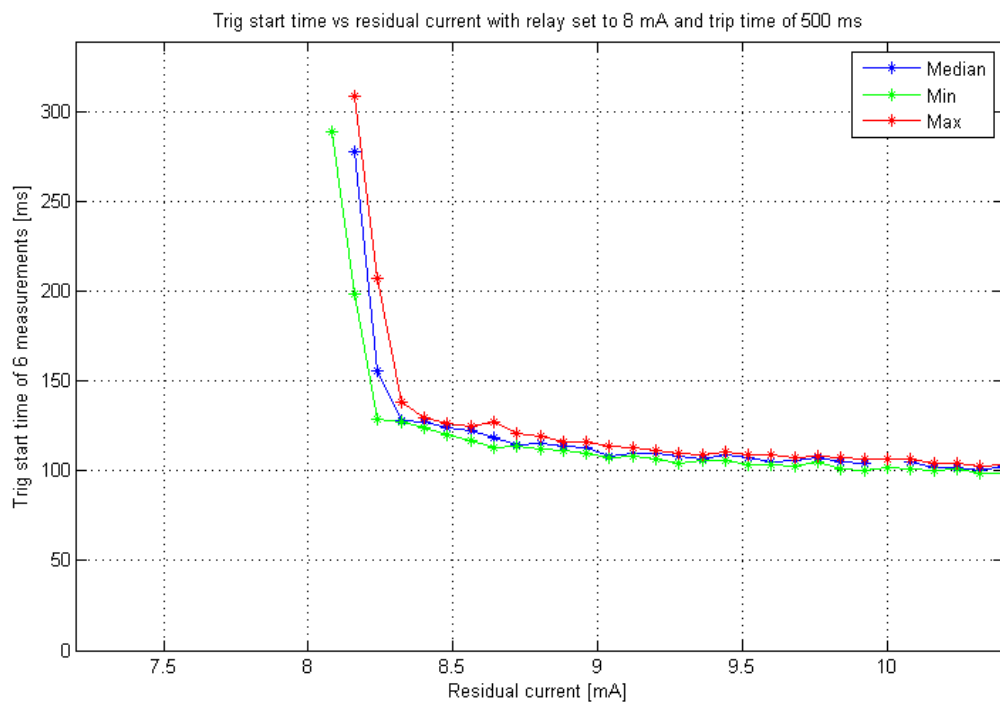
Under provningen är reläet inställt enligt bilaga A Tabell 1. Skyddets startvärde är inställt för ett 10 kV nät med ett nollpunktsmotstånd på 5 A.

Återställningstiden är inställd till noll eftersom reläet kan starta senare än tänkt. Om återställningstiden är för stor, kan värdet ligga kvar i trip-räknaren, vilket skulle kunna medföra att reläet skulle kunna utlösa tidigare vid nästa testsignal.

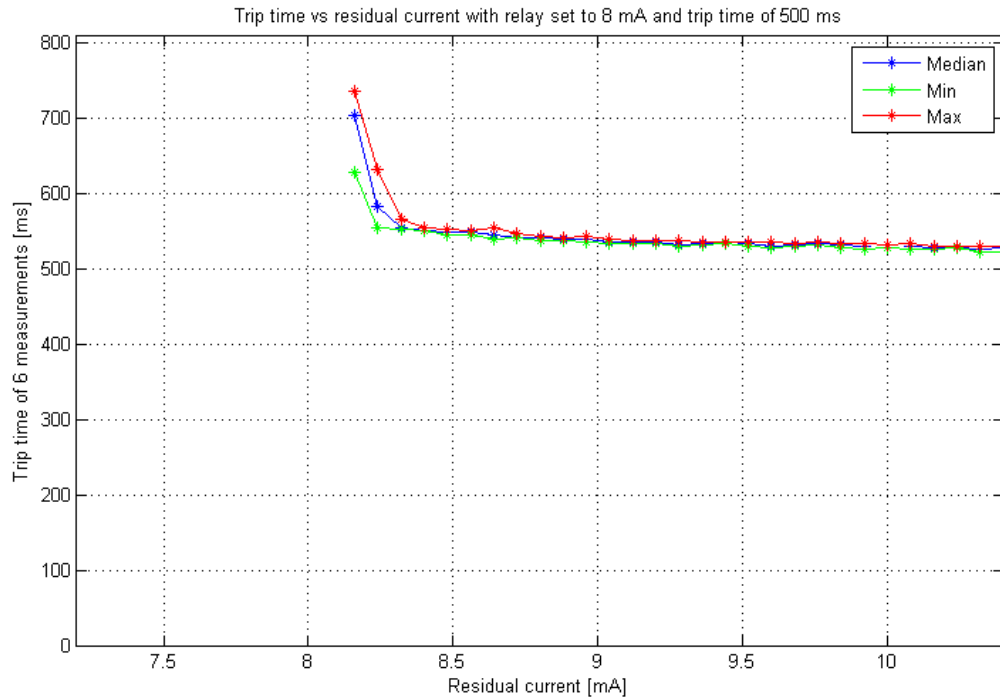
Om inget annat anges i texten har alla proven utförts med aktiv nollföljdsström, det vill säga resistiv ström.

5.1.1.1 Prov av funktionstid som funktion av nollföljdsström

Detta prov visar hur skyddets strömmätning fungerar vid aktiva strömmar och funktionstidens beroende av strömstorleken. Uppspelningstid = 1000 ms, nollpunktspänning = 50 V.

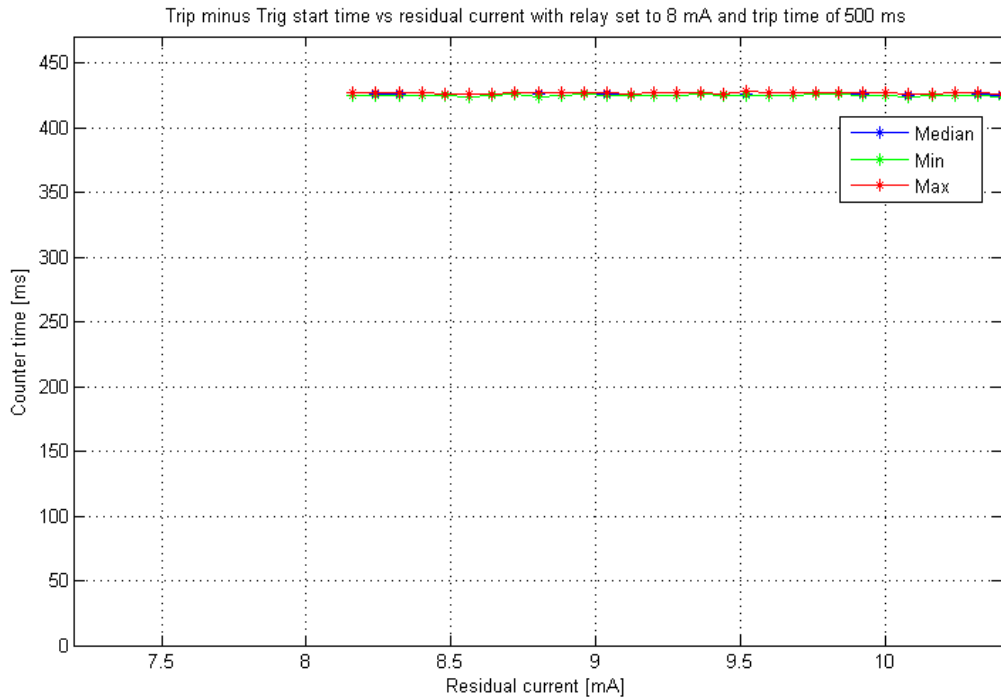


Figur 20 Starttid vid olika aktiva nollföljdsströmmar



Figur 21 Funktionstid vid olika aktiva nollföljdsströmmar

Det som skall kontrolleras är den inställda funktionstiden (500 ms) mot den uppmätta vid nollföljdsströmmar nära det inställda startvärdet. Mätningen visar att skyddet detekterar ett jordfel vid ca 8,3 mA istället för det inställda värdet på 8,0 mA, vilket är en skillnad på ca 3-4 %. Vid denna strömstorlek finns stora osäkerheter i startsignalens tidsfördröjning, vilket också syns tydligt i Figur 20. Skillnaden mot det inställda värdet gör att skyddet inte detekterar riktigt så höghögiga jordfelsresistanser som användaren har ställt in, skillnaden i resistans är linjär mot skillnaden i detekteringen. Det uppmätta värdet skall ligga så nära som möjligt mot det inställda eftersom alla osäkerheter i nätinställningar och nätparametrar gör att skyddet alltid måste ställas in med extra marginal. Det är därför viktigt att skyddet följer inställningarna så att säkerhetsmarginalen inte går förlorad. Vad som utgör en acceptabel avvikelse beror på vilket nät som skyddet skall sitta i och det är därför svår att ange ett värde.

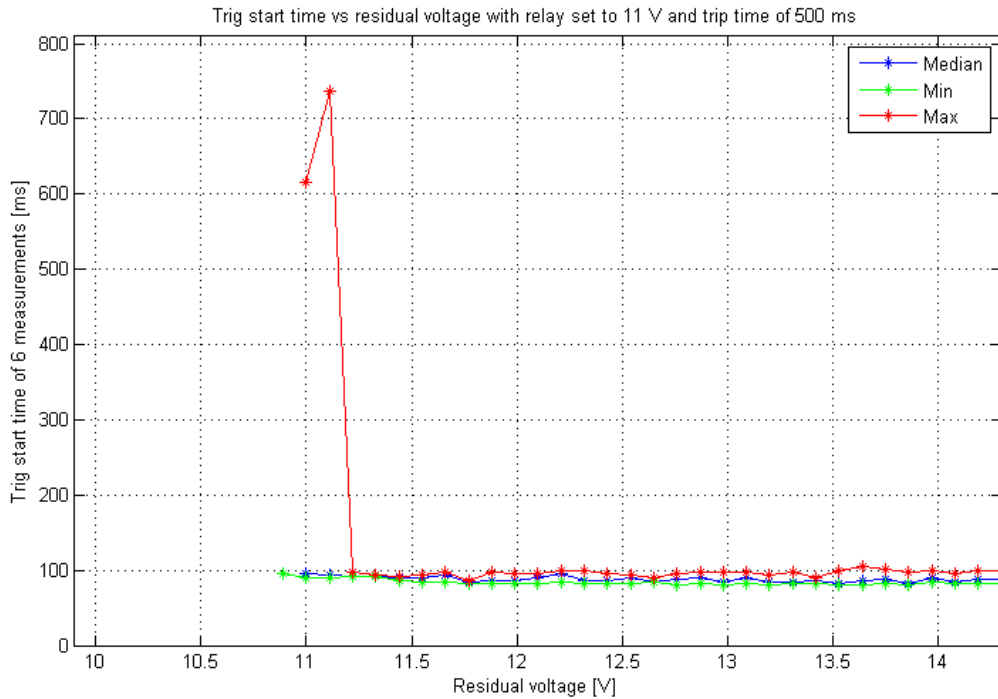


Figur 22 Tripräknaren vid prov av olika aktiva nollföljdsströmmar

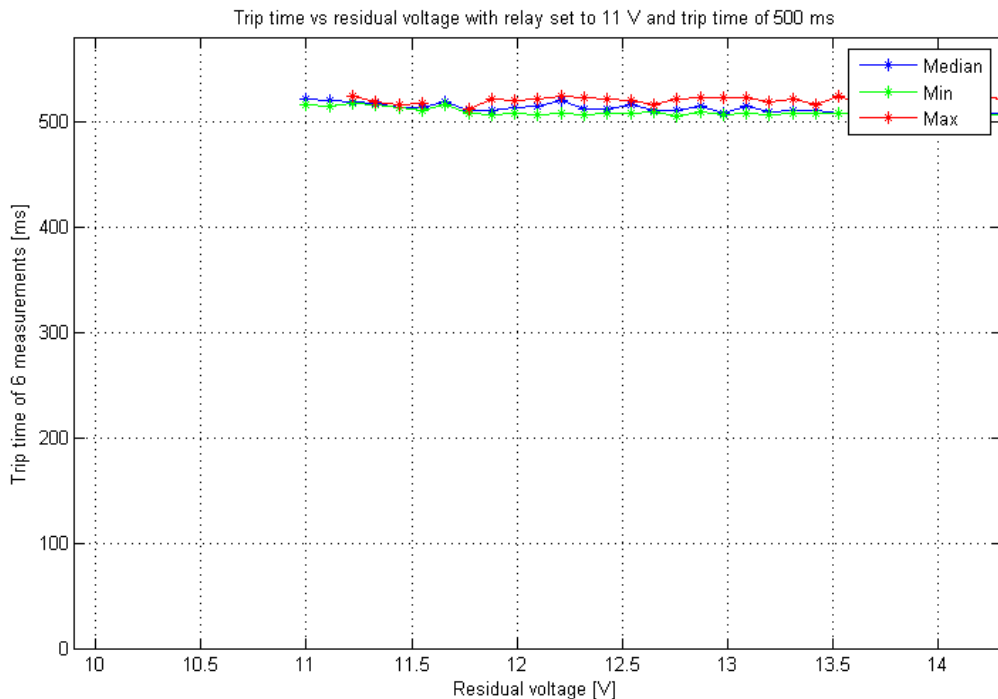
Figur 22 visar att trip-räknaren är inställd på att skapa en tidsfördröjning på ca 425 ms efter startsignalen vid en funktionstid på 500 ms. Skyddet håller alltså startsignalen ca 75 ms från det att startvärdet har överskridit.

5.1.1.2 *Prov av funktionstid som funktion av nollpunktsspänning*

Detta prov visar hur väl skyddets spänningsmätning fungerar vid aktiva strömmar och hur funktionstiden varierar beroende på spänningsstorlek. Uppspelningstid = 1000 ms, nollföljdsström = 30 mA.



Figur 23 Starttid vid olika nollpunktsspänningar



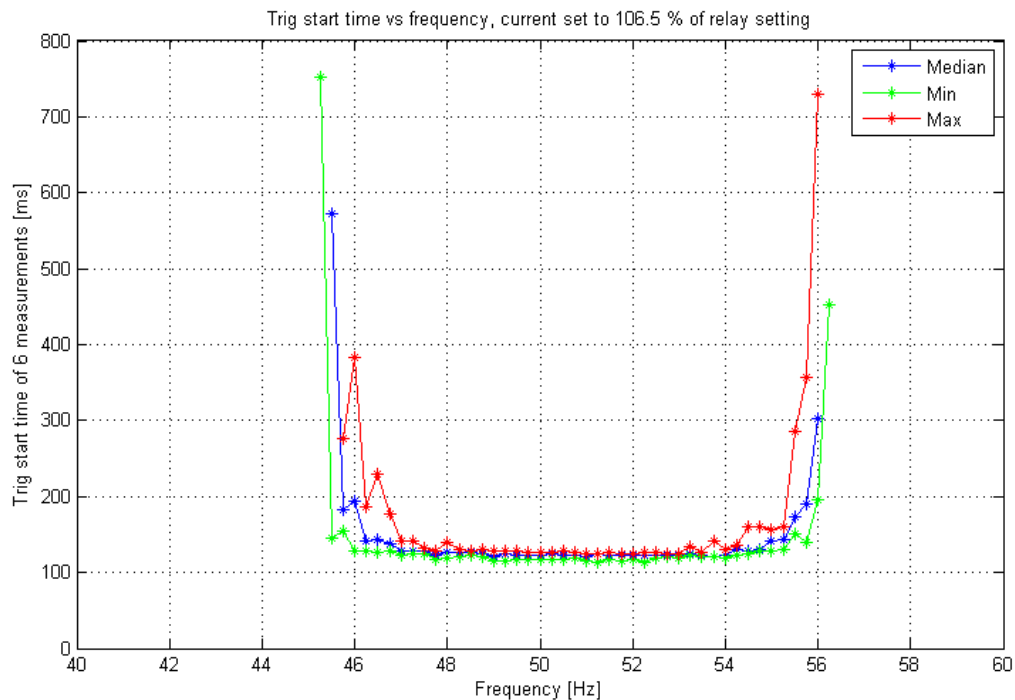
Figur 24 Funktionstid vid olika nollpunktsspänningar

Precis som för nollföljdsströmmen skall den inställda funktionstiden kontrolleras mot den uppmätta funktionstiden. Starttiden för startsignalen visar på en viss osäkerhet vid startvärdet tills nollpunktsspänningen når 11.2 V. Skillnad i känslighet för inställt värde och uppmätt är inte lika känsligt som för nollföljdsströmmens startvärde då

nollpunktspänningens startvärde ställs in känsligare vilket innebär att startvärdet överskrids tidigare än motsvarande startvärde för strömmen.

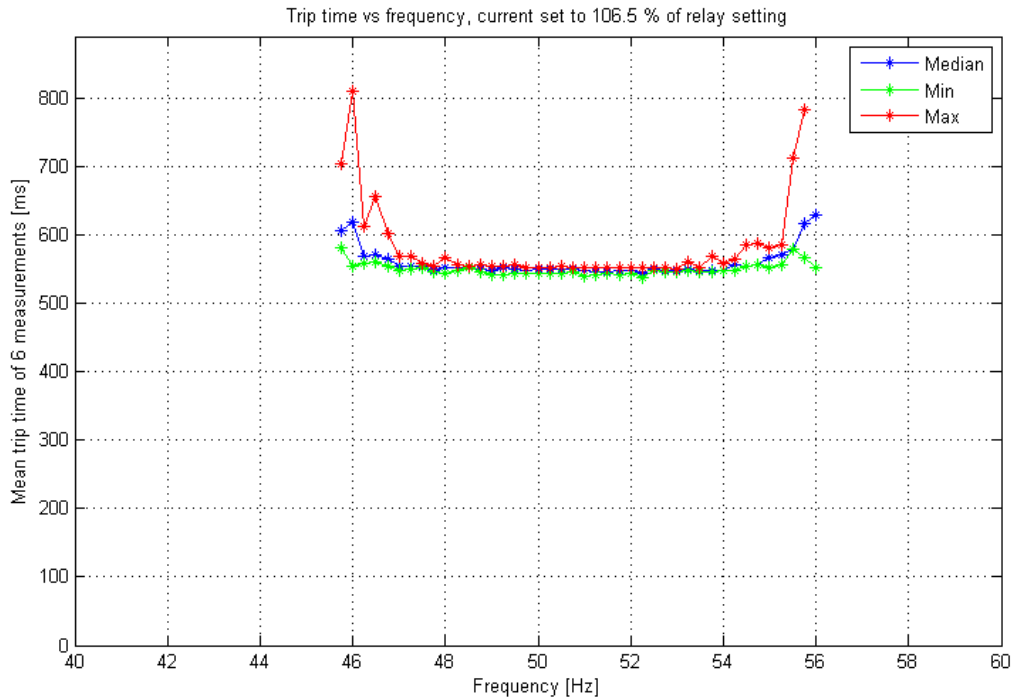
5.1.1.3 Prov av frekvenskänslighet

I ett försök att undersöka känsligheten för andra grundtonsfrekvenser än den i skyddet inställda 50 Hz uppmättes startsignaltiden och funktionstiden vid strömmar på 106,5 % av reläets inställda startvärde⁵. Uppspelningstid = 1000 ms, nollpunktspänning = 50 V.



Figur 25 Starttid vid prov av frekvenskänslighet

⁵ Nollföljdsströmmen storlek har ökat från 101 % (enligt testspecifikation) till 102.5 % av strömvärdet när skyddet startar då testet är utfört enligt en äldre specifikation. Samma sak gäller frekvensomfånget som också har ändrats sedan testet utfördes.

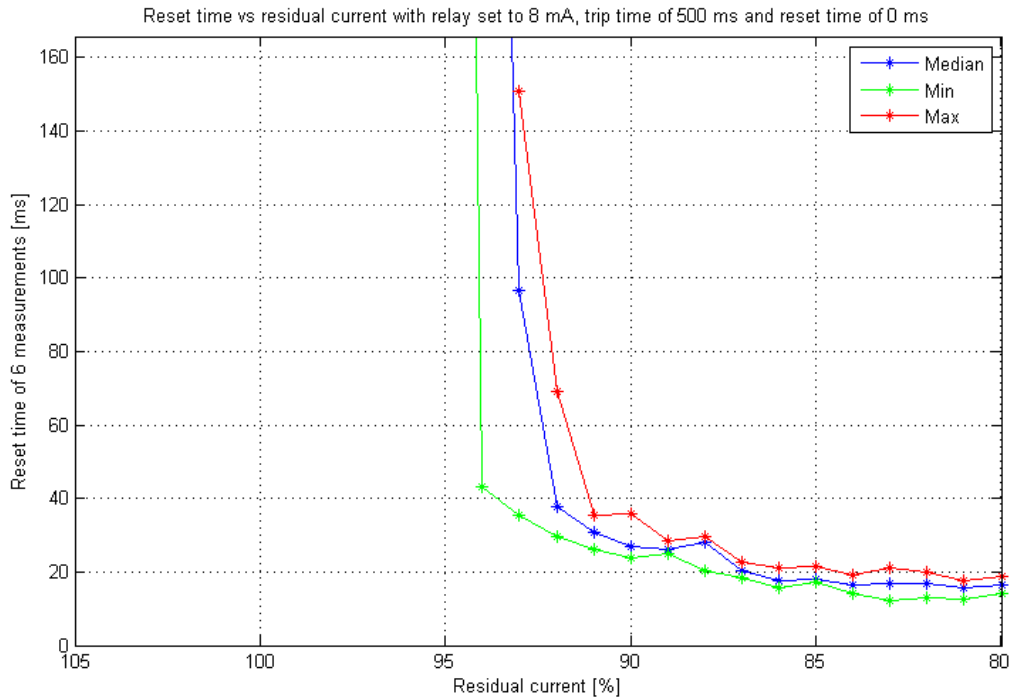


Figur 26 Triptid vid prov av frekvenskänslighet

För detta prov skall den inställda funktionstiden jämföras mot den uppmätta tiden. Denna typ av skydd är inte tänkt att kunna hantera stora avvikelser i nätfrekvensen, det kan dock ändå vara intressant att se vilka avvikelser den klarar av. Det är därför svårt att bestämma ett rimligt värde på frekvensområdet som ett skydd av denna typ bör klara av. Start- och funktionstiden visar att, om strömmen överstiger 6.5% av startvärdet, så detekterar skyddet ett höghmigt jordfel, inom 300 ms, för frekvenser mellan 46-55 Hz. Det är möjligt att skyddet även klarar ett bredare frekvensomfång, risken är dock att tappa selektivitet gentemot nollpunktsspänningsskyddet.

5.1.1.4 Återgångsförhållande som funktion av nollföljdsström

Detta prov visar återgångstiden från det att amplituden för nollföljdsströmmen har ändrats. Begynnelseströmmen är satt till 150 % av skyddets startvärde. En första mätning utförs för att avgöra tidsfördröjningen från det att nollföljdsströmmens amplitud minskar tills det att startsignalen återgår. Detta då det är en viss fördröjning av ändringen i startsignalen även vid återgång från 150 % till 0 %. Uppspelningstid = 1300 ms, nollpunktsspänning = 50 V.

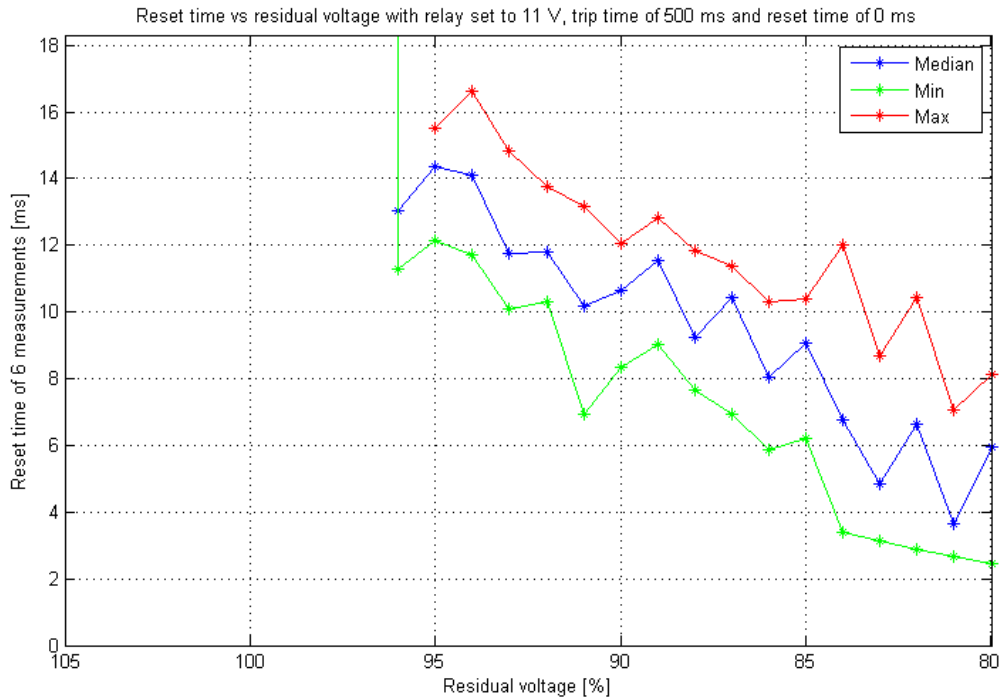


Figur 27 Återgångstid som funktion av nollföljdsström där 100 % motsvarar reläskyddets inställning

Tiden från ändringen av signalen till återgång visar när skyddet når en acceptabel återgångsnivå. Mätningen visar alltså att återgångstiden minskar till acceptabla nivåer vid ca 92 % av reläets inställda startvärde. Då E.ON vill att moderna skydd skall ha ett återgångsförhållande på minst 90 % är värdet fullt acceptabelt.

5.1.1.5 Återgångsförhållande som funktion av nollpunktspänning

Provet har utförts på samma sätt som i 5.1.1.4 men med varierande nollpunktsspänning. Uppspelningstid = 1300 ms, nollföljdsström = 50 mA.



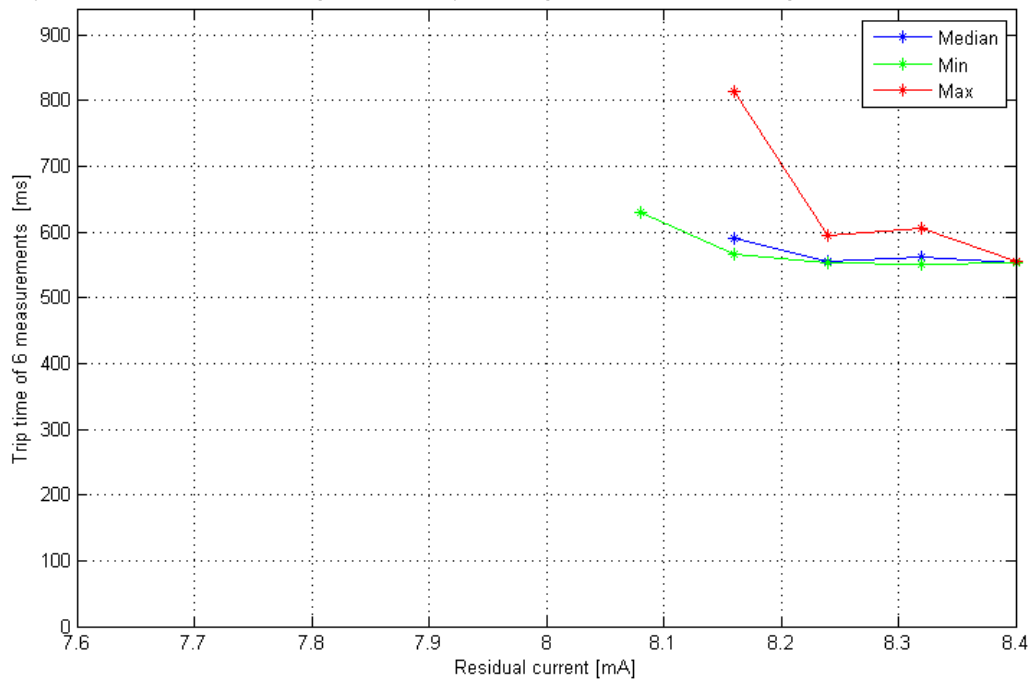
Figur 28 Återgångstid som funktion av nollpunktsspänning där 100 % motsvarar reläskyddets inställning

Provresultatet visar att återgångstiden minskar till acceptabla nivåer vid ca 95 % av reläets inställda startvärde. Spridningen i tid är märkbart bättre än för motsvarande resultat vid strömmätningen. Återgångsförhållandet för nollpunktsspänningen skall också vara över 90%.

5.1.1.6 Brus känslighet (endast nollföljdsström)

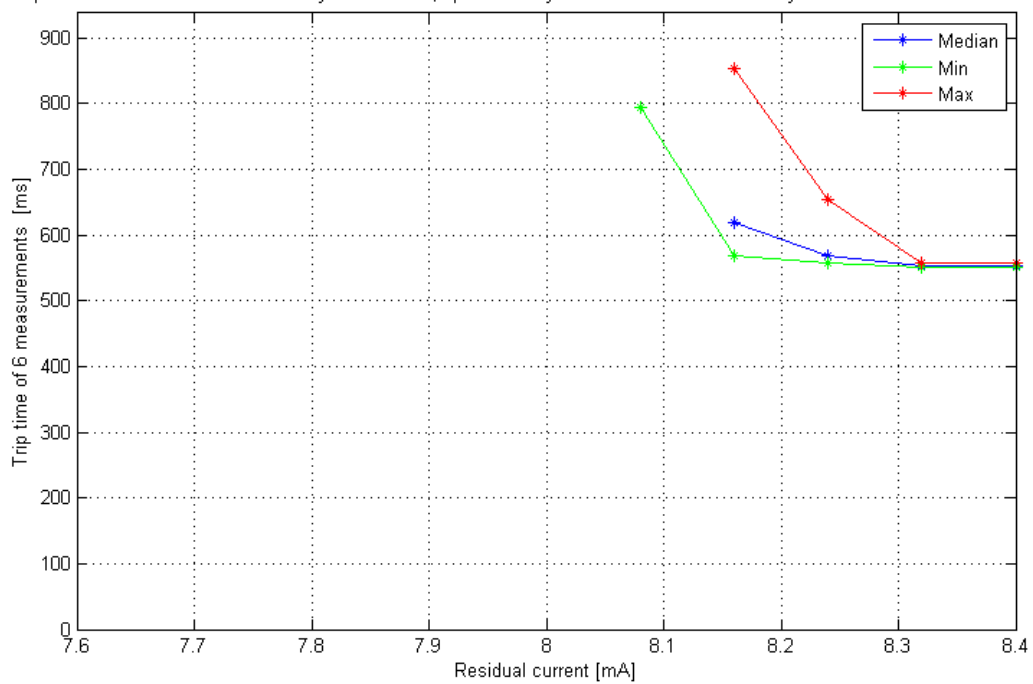
Vid provning av skyddets förmåga att filtrera brus läggs normalfördelat brus med väntevärde = 0 på nollföljdsströmsignalen. Uppspelningstid = 1000 ms, nollpunktsspänningen = 50 V.

Trip time vs residual current with relay set to 8 mA, operate delay time of 500 ms and normally distributed noise with std of 1 %

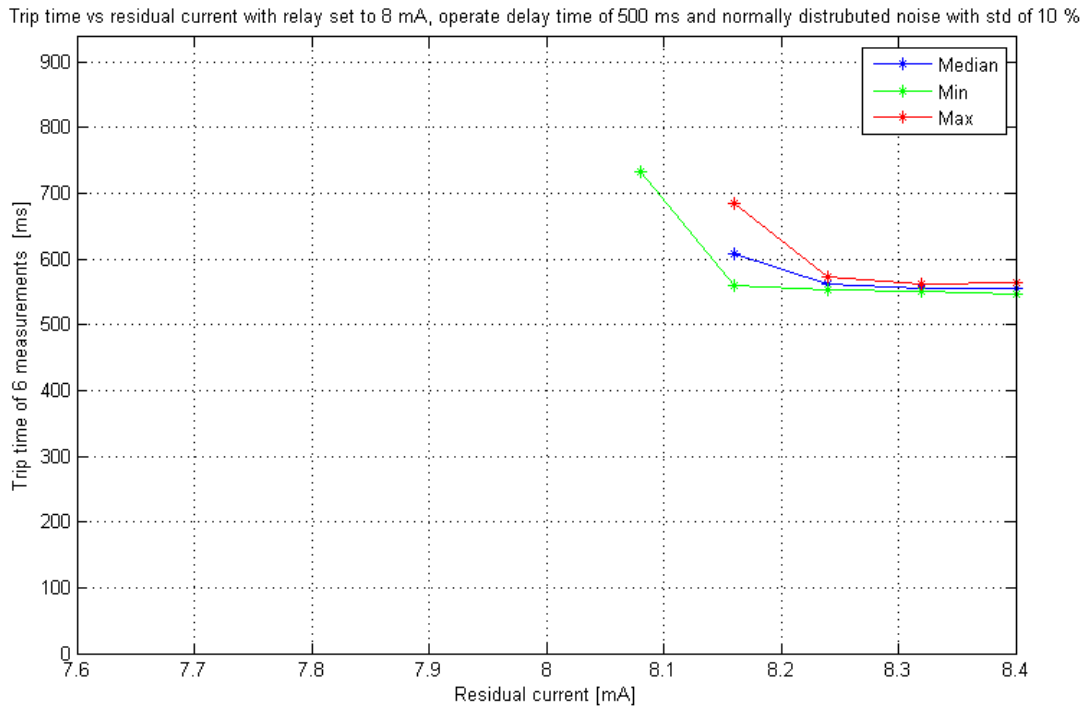


Figur 29 Funktionstid vid prov av brus känslighet med SD på 1 %

Trip time vs residual current with relay set to 8 mA, operate delay time of 500 ms and normally distributed noise with std of 3 %



Figur 30 Funktionstid vid prov av brus känslighet med SD på 3 %



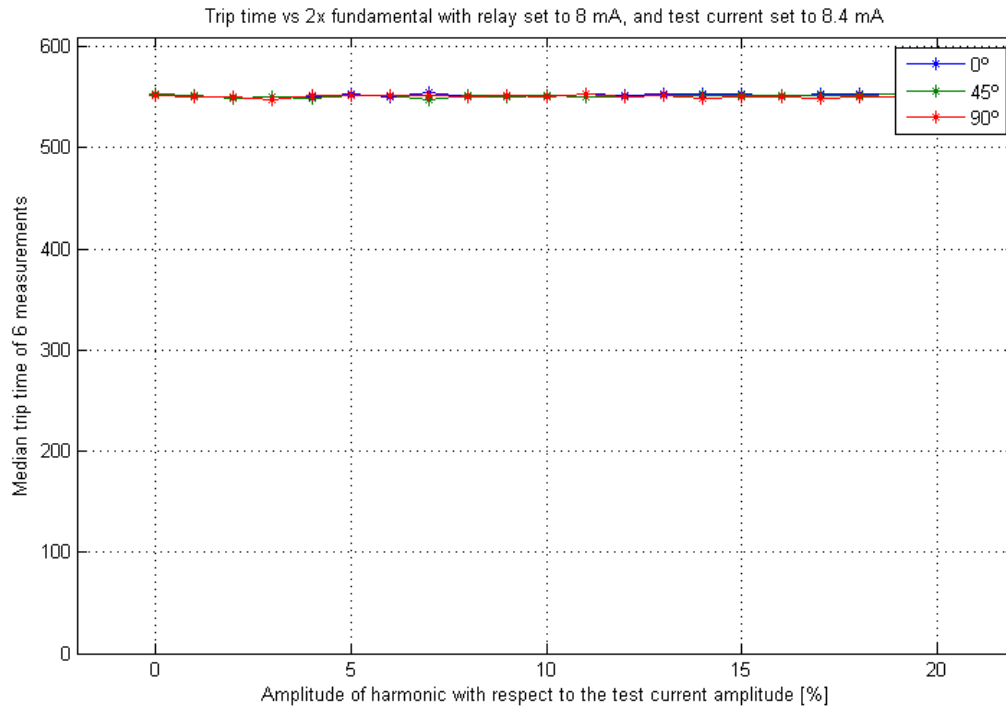
Figur 31 Funktionstid vid prov av brus känslighet med SD på 10 %

Mätningen visar att skyddet har bra förmåga att undertrycka brus då funktionstiden inte ändras nämnvärt vid de olika nollföljdsströmmarna. Bruset ökar dock sannolikheten för funktionsutlösning jämfört med värdet då skyddet normalt startar (ca 8,3 mA vid aktiv ström).

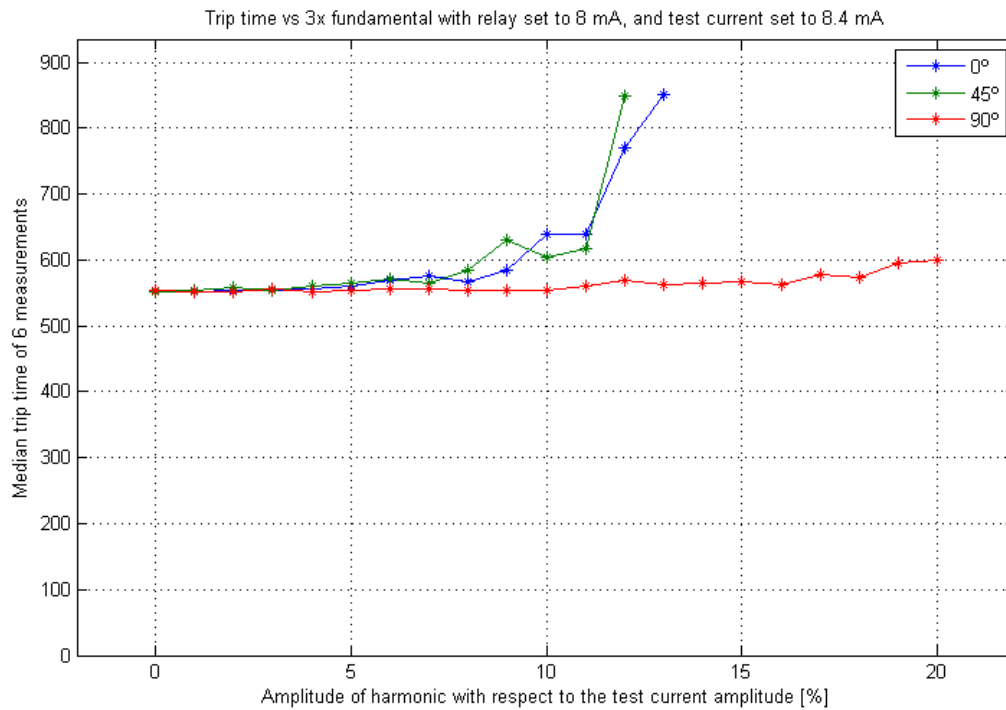
5.1.1.7 Grundton + en överton

Detta prov kontrollerar skyddets grundtonsmätning. Det riktade jordfelsteget mäter grundtonen och funktionen skall inte påverkas av övertoner. Maximal amplitud på övertonen i förhållande till grundtonen har satts till 20 %. Uppspelningstid = 1000 ms, nollpunktspänningen = 50 V⁶.

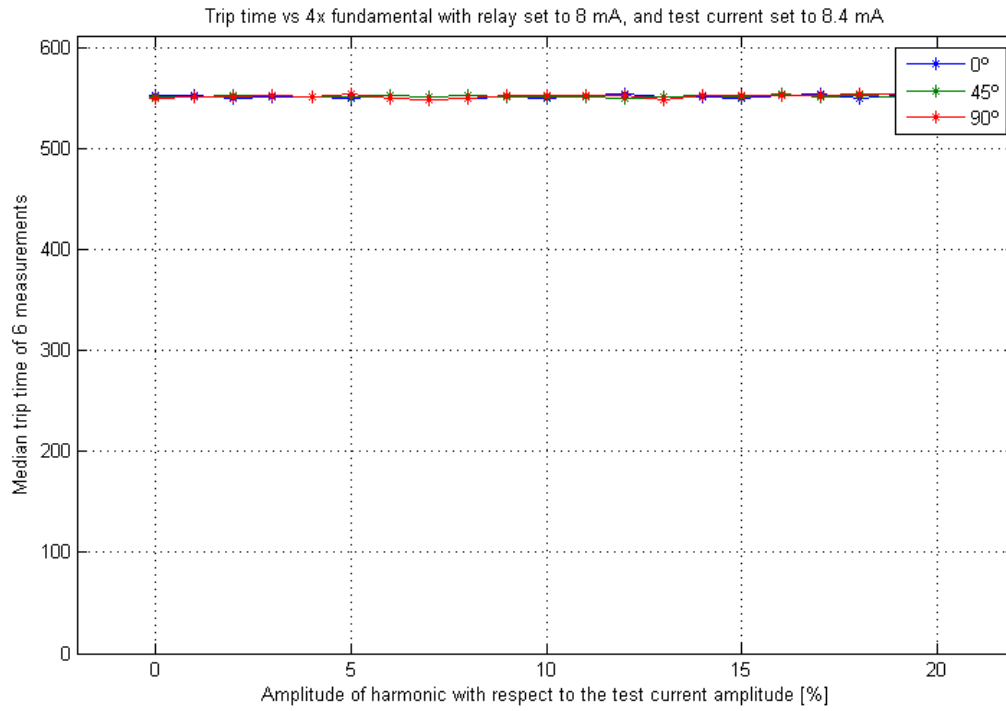
⁶ Istället för en nollföljdsström på 101 % av startvärdet enligt specifikationen har 105 % av startvärdet använts då skyddet inte startar förrän vid ca 104 % av startvärdet.



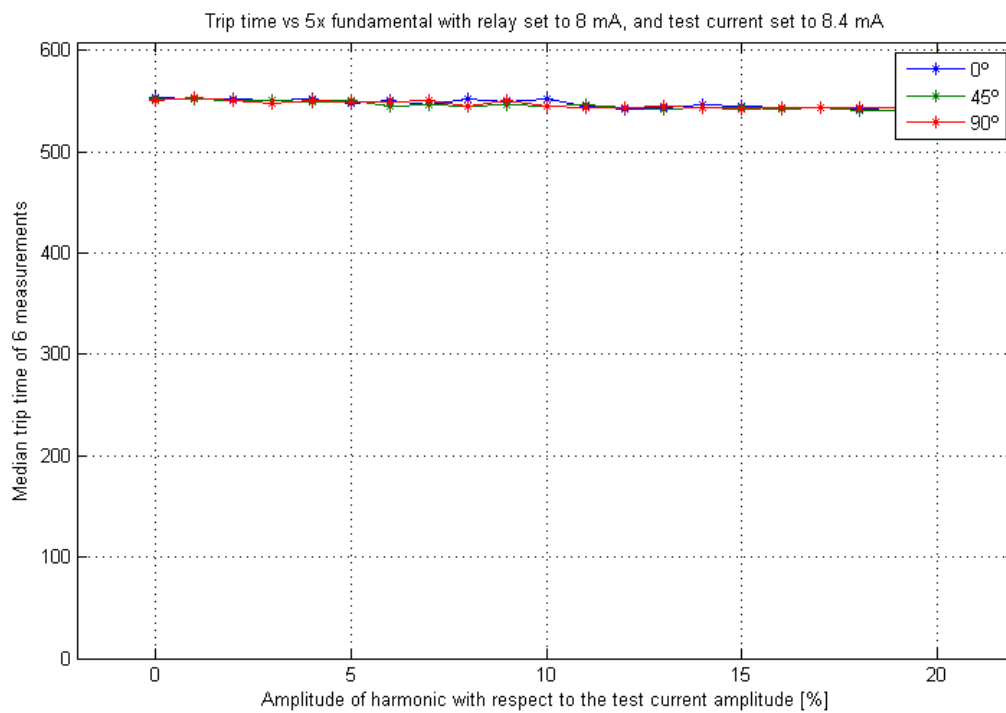
Figur 32 Funktionstid vid prov av övertonskänslighet för första övertonen



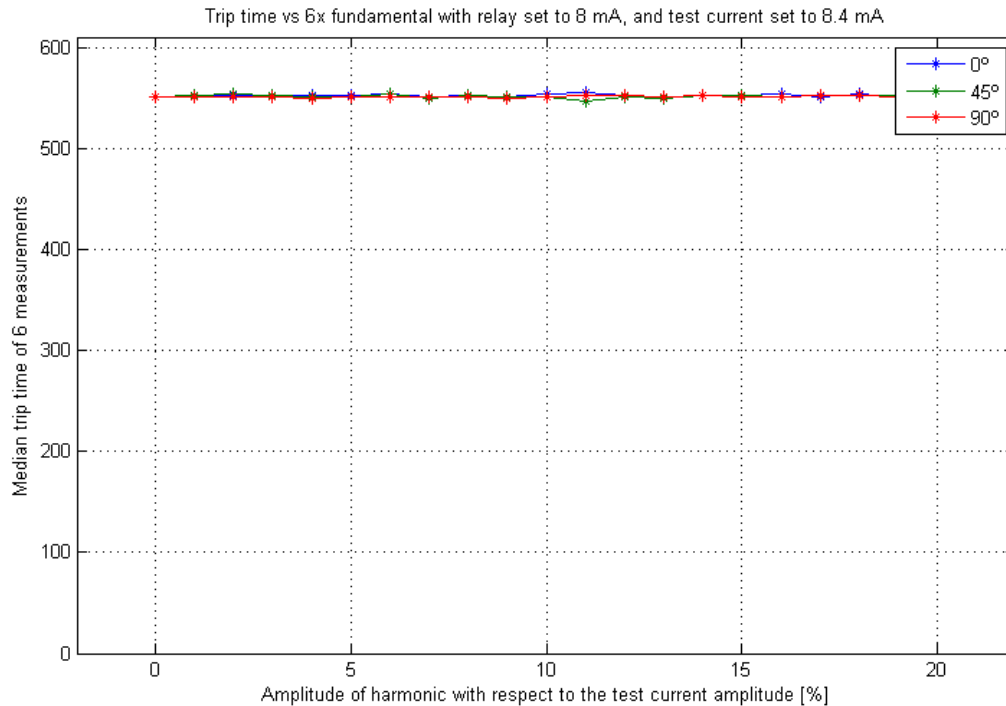
Figur 33 Funktionstid vid prov av övertonskänslighet för andra övertonen



Figur 34 Funktionstid vid prov av övertonskänslighet för tredje övertonen



Figur 35 Funktionstid vid prov av övertonskänslighet för fjärde övertonen

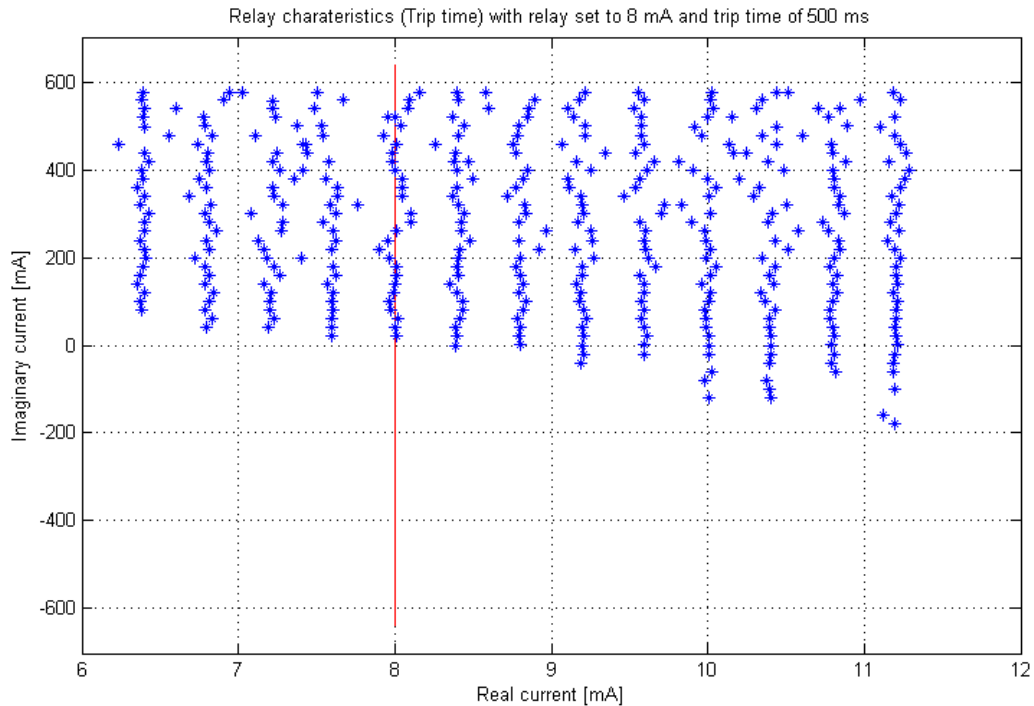


Figur 36 Funktionstid vid prov av övertonskänslighet för femte övertonen

Vid provningen är det den inställda funktionstiden som skall jämföras mot den uppmätta. Mätningen visar att de flesta övertonerna har försumbar påverkan på skyddets grundtonsmätning. Intressant nog kan andra övertonen (3·grundtonsfrekvensen) dock påverka mätningen vid amplituder över 10 % av grundtonsamplituden. Vid test med grundtonsamplitud på över 8,6 mA startar dock skyddet.

5.1.1.8 Funktionsområde

Vid detta prov undersöks reläets funktionsområde och är det enda av proven som inte använder aktiv ström. Uppspelningstiden = 1000 ms, nollpunktspänningen = 50 V



Figur 37 Funktionutlösning som funktion av nollföljdsström, den röda linjen visar skyddets karakteristik

Skyddets karakteristik är inställt på $\cos(\varphi)$ det vill säga mätning av aktiv ström och skall starta för nollföljdsströmmar som ligger till höger om den röda linjen. Observera att skalorna på figuren inte är lika stora varför figuren ser hoptryckt ut. De blå stjärnorna motsvarar en utlösning inom 1000 ms.

Mätningen visar att skyddet har en vinkelavvikelse på ca 2° . Denna avvikelse innebär att skyddet blir mindre känsligt vid höghögma jordfel för utmatningar med stor kapacitiv felström.

5.1.2 Prov med uppspelning av transienter

Detta skydd saknar separat funktion för detektering av transienter.

5.1.3 Prov med uppspelning av intermittenta jordfel

Skyddet saknar separat funktion för detektering av intermittenta jordfel men det riktade jordfelssteget skall klara transienter. Det hade därför varit intressant att prova hur skyddet hade reagerat på inspelade intermittenta jordfel. Dessvärre var det problem med att spela upp transienter då problem uppstod under mätningarna. Problemet beror sannolikt på för stor kapacitiv koppling mellan ström- och spänningsingången för RXHL421. Då proven inte säkert kunde genomföras enligt inspelningarna har mätningarna uteslutits. Mer om detta i avsnitt 6.2.

5.1.4 Övriga prov

Ingen övrig provning har utförts för detta skydd.

5.2 Provning av ABB REF615

Alla inställningar och data som presenteras är enbart i sekundärvärden om inget annat anges.

5.2.1 Prov av grundtonsfunktion för riktat jordfelssteg

Denna sektion visar provningen av grundtonsfunktionen för det provade reläet. Testerna är utförda enligt samma tankegång som i avsnitt 5.1.1.

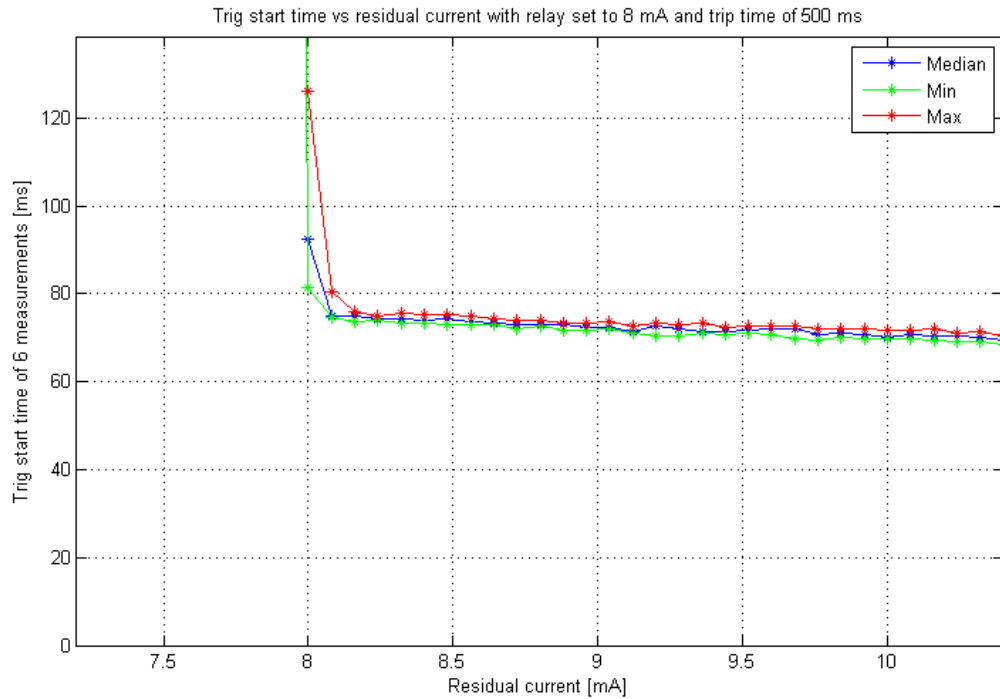
Skyddet är inställt enligt bilaga B Tabell 2 och skyddens startvärde är inställt för ett 10 kV nät med ett nollpunktsmotstånd på 5 A.

Återställningstiden är inställd till noll, se avsnitt 5.1.1.

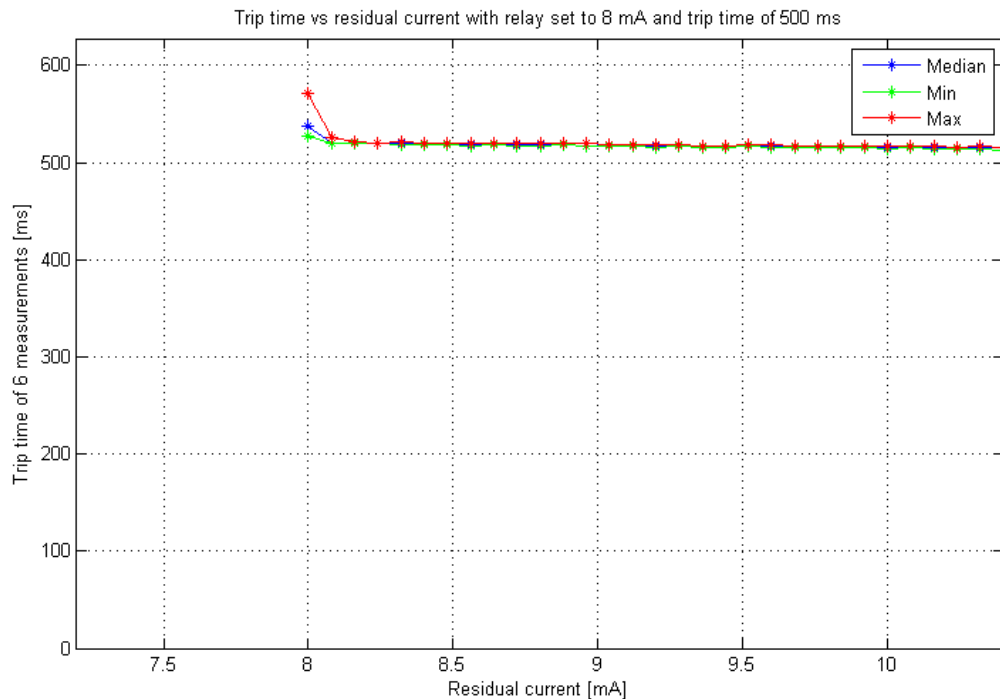
Om inget annat anges i texten har alla proven utförts med aktiv nollföljdsström det vill säga resistiv ström.

5.2.1.1 Prov av funktionstid som funktion av nollföljdsström

Detta prov visar hur skyddets strömmätning fungerar vid aktiva strömmar och hur funktionstiden varierar beroende på strömstorleken. Uppspelningstid = 1000 ms, nollpunktspänning = 50 V.

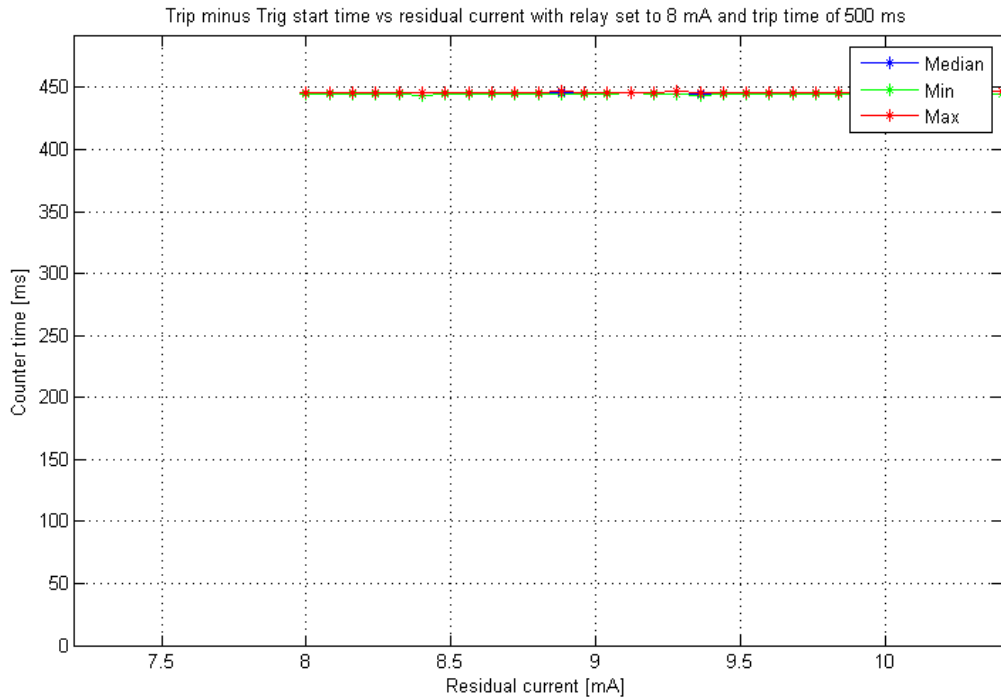


Figur 38 Starttid vid olika aktiva nollföljdsströmmar



Figur 39 Funktionstid vid olika aktiva nollföljdsströmmar

Skyddet startar med liten spridning vid 8,1 mA. Starttiden för startsignalen är snabbare än motsvarande för RXHL421 och osäkerheten för startsignaltiden är mindre. Funktionstiden ligger på ca 520 ms vid nollföljdsström på 8,1 mA.

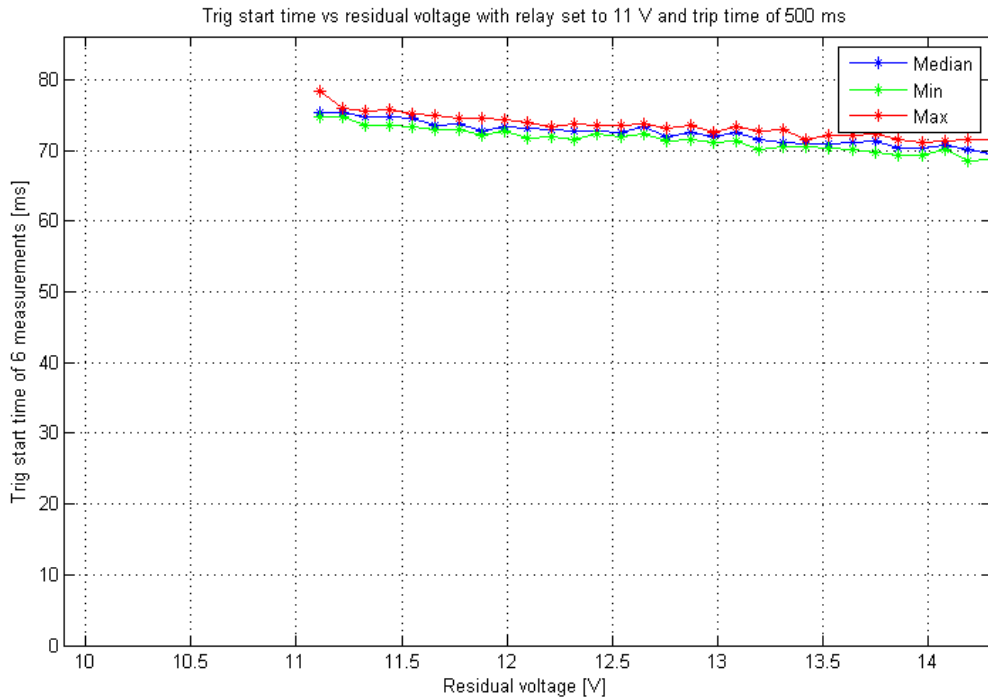


Figur 40 Tripräknaren vid prov av olika aktiva nollföljdsströmmar

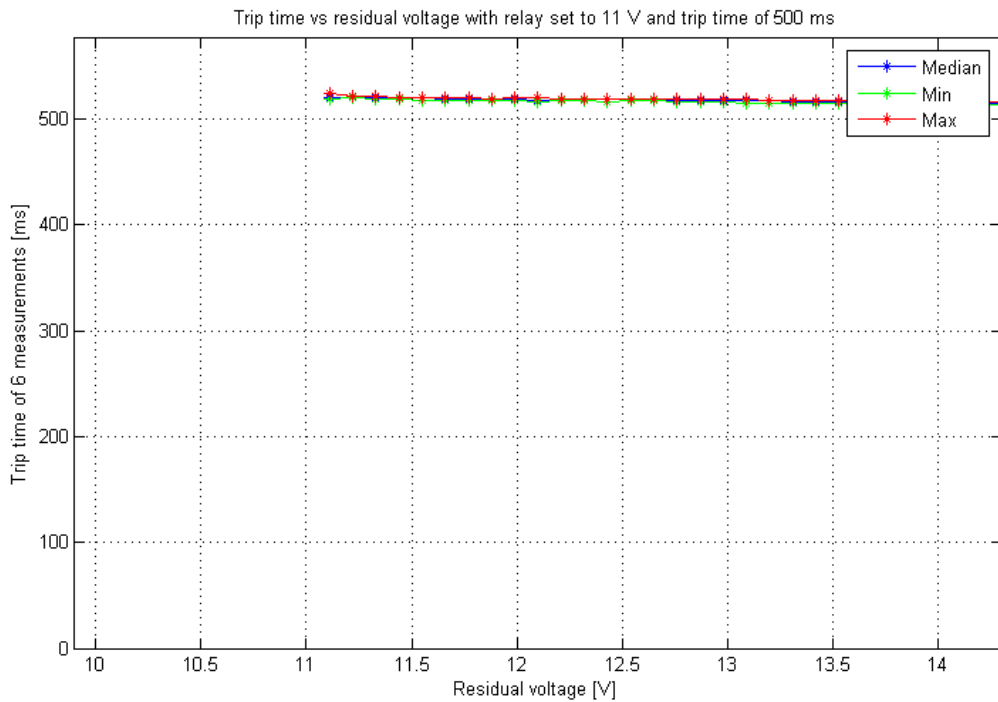
Figuren ovan visar att trip-räknarens inställning skapar 445 ms tidsfördröjning efter startsignalen, vid en funktionstid på 500 ms. Skyddet håller alltså startsignalen ca 55 ms från det att startvärdet har överskridits.

5.2.1.2 *Prov av funktionstid som funktion av nollpunktsspänning*

Detta prov visar skyddets spänningsmätning vid aktiva strömmar och funktionstidens beroende av spänningsstorlek. Uppspelningstid = 1000 ms, nollföljdsström = 30 mA.



Figur 41 Starttid vid olika nollpunktsspänningar

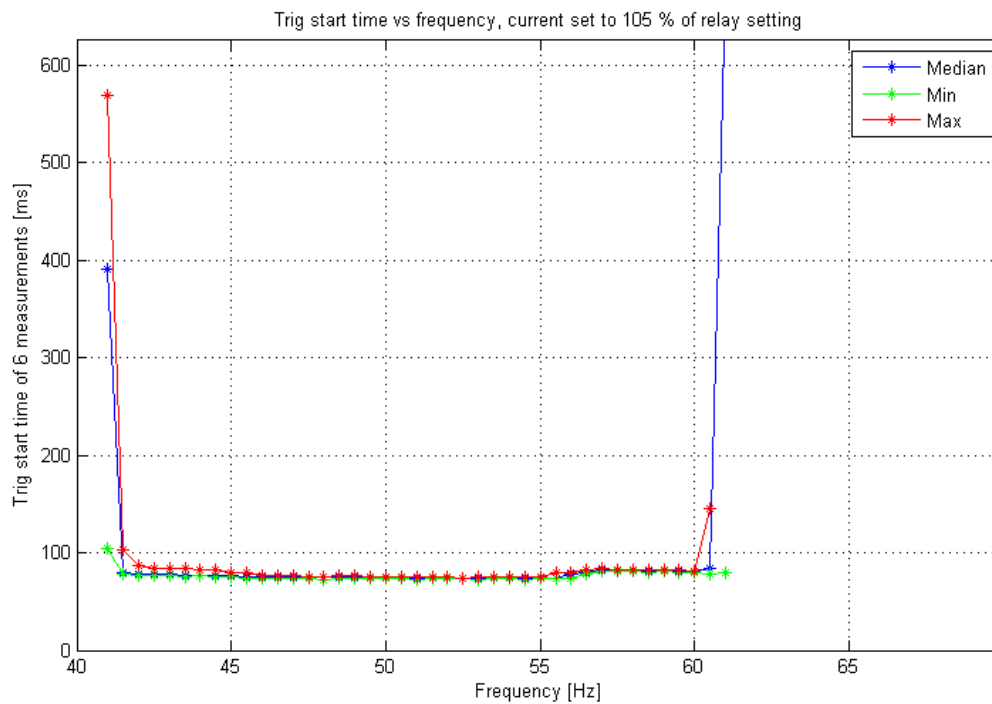


Figur 42 Funktionstid vid olika nollpunktsspänningar

Skyddet detekterar först att spänningen överskridit startvärdet vid 11.1 V. Spridningen i starttid i mätningen är samma som för motsvarande mätning med nollföljdsström.

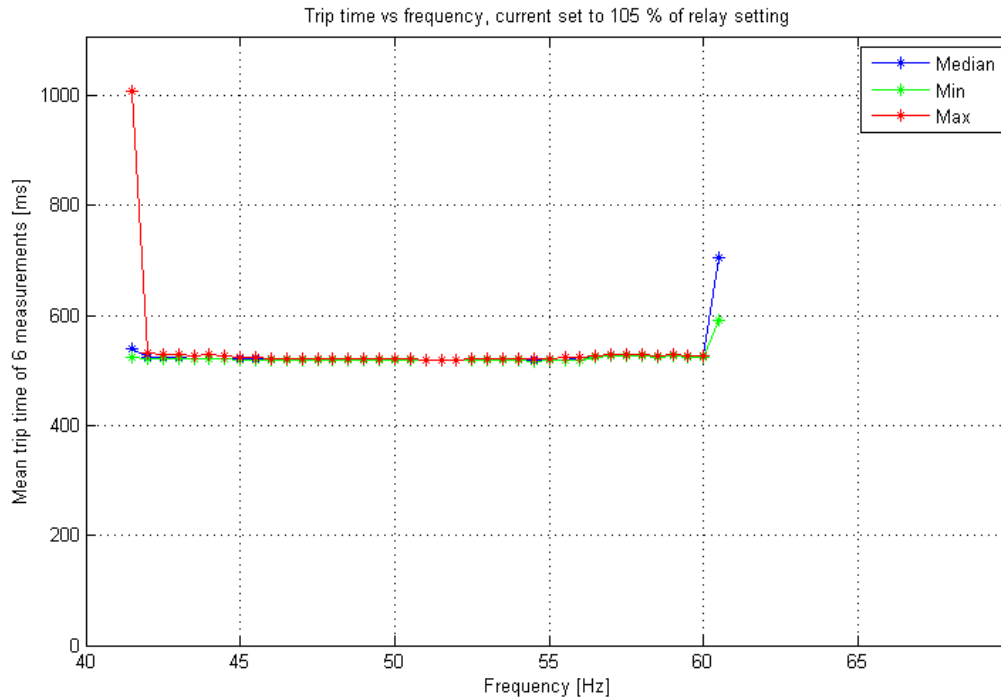
5.2.1.3 Prov av frekvenskänslighet

För att undersöka känsligheten för andra grundtonsfrekvenser än den i skyddet inställda 50 Hz uppmättes starttiden och funktionstiden vid strömmar på 105 % av reläets inställda startvärde. Frekvensen sveptes från 40-70 Hz⁷. Uppspelningstid = 1000 ms, nollpunktspänning = 50 V.



Figur 43 Starttid vid prov av frekvenskänslighet

⁷ Frekvenssvepets omfång har en annan inställning då skyddet inte följer den senaste testspecifikationen.

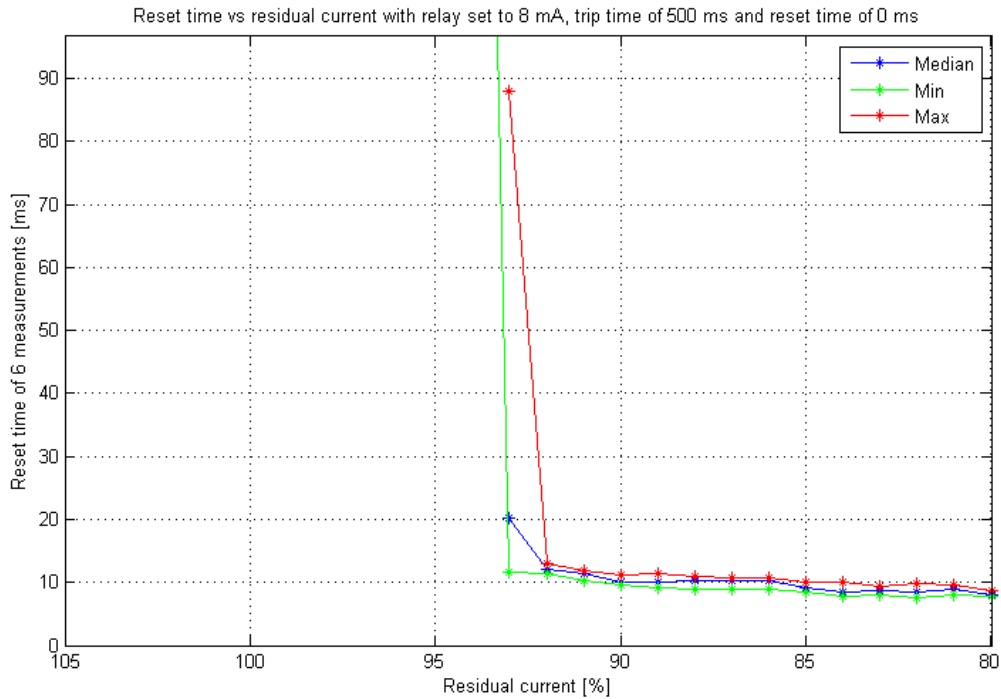


Figur 44 Triptid vid prov av frekvenskänslighet

Vid nollföljdsström på 105 % av det inställda startvärdet klarar skyddet att mäta jordfel vid nätfrekvenser mellan 42-60 Hz. Spridningen för starttiden är ca 10 ms upp till gränserna på 42 och 60 Hz.

5.2.1.4 Återgångsförhållande som funktion av nollföljdsström

Detta prov visar återgångstiden från det att amplituden för nollföljdsströmmen har ändrats. Begynnelseströmmen är satt till 150 % av skyddets inställning. En första mätning utförs för att avgöra tidsfördröjningen från det att nollföljdsströmmens amplitud minskar till det att startsignalen återgår. Detta då det är en viss fördröjning av ändringen i startsignalen även vid återgång från 150 % till 0 %. Uppspelningstid = 1300 ms, nollpunktsspänning = 50 V.

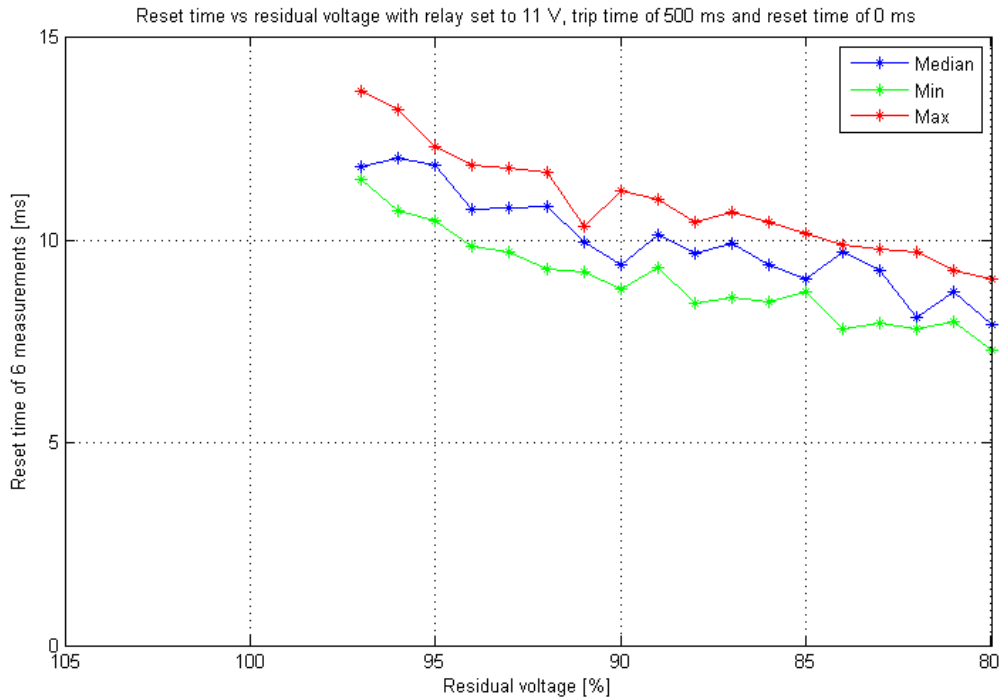


Figur 45 Återgångstid som funktion av nollföljdsström där 100 % motsvarar reläskyddets inställning

Återgångsförhållandet för nollföljdsströmmen ligger på ca 92 %, spridningen är dock betydligt mindre än för RXHL421.

5.2.1.5 Återgångsförhållande som funktion av nollpunktsspänning

Provet har utförts på samma sätt som i 5.2.1.4 men med varierande nollpunktsspänning. Uppspelningstid = 1300 ms, nollföljdsström = 50 mA.



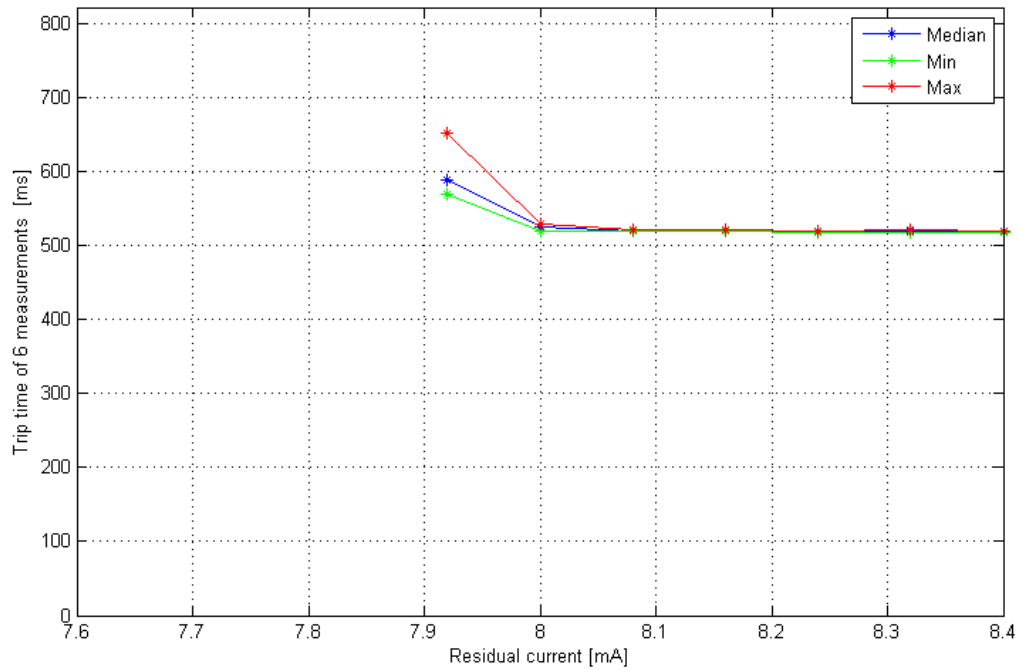
Figur 46 Återgångstid som funktion av Nollpunktspänningen där 100 % motsvarar reläskyddets inställning

Återgångsförhållandet för nollpunktspänningen ligger på ca 97 %.

5.2.1.6 Brus känslighet (endast nollföljdsström)

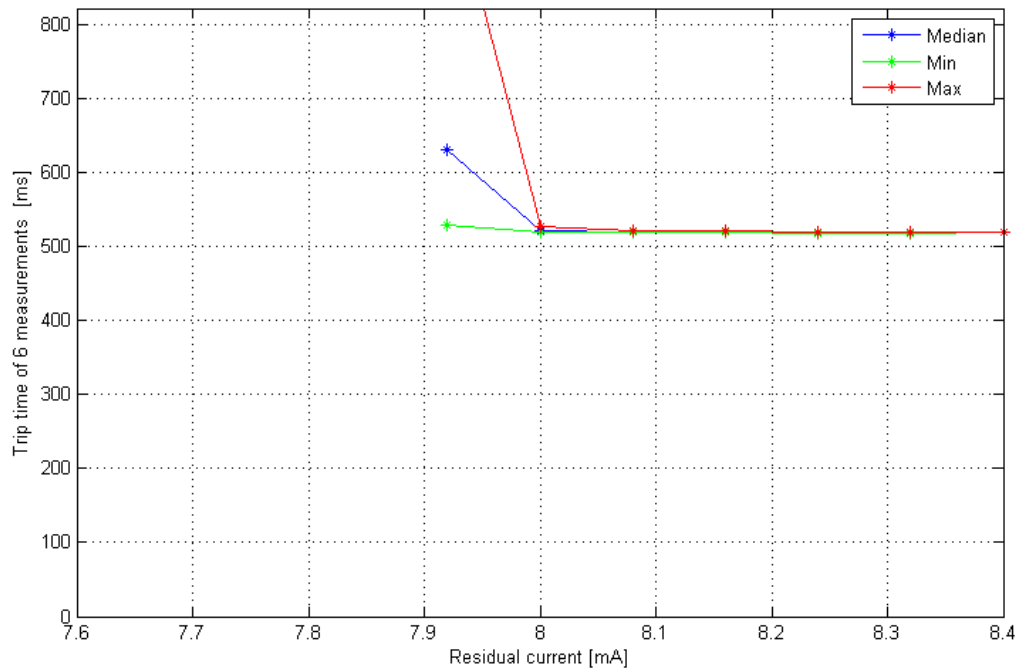
Vid provning av skyddets förmåga att filtrera brus läggs normalfördelat brus med väntevärde = 0 på nollföljdsströmsignalen. Uppspelningstid = 1000 ms, nollpunktspänningen = 50 V.

Trip time vs residual current with relay set to 8 mA, operate delay time of 500 ms and normally distributed noise with std of 1 %

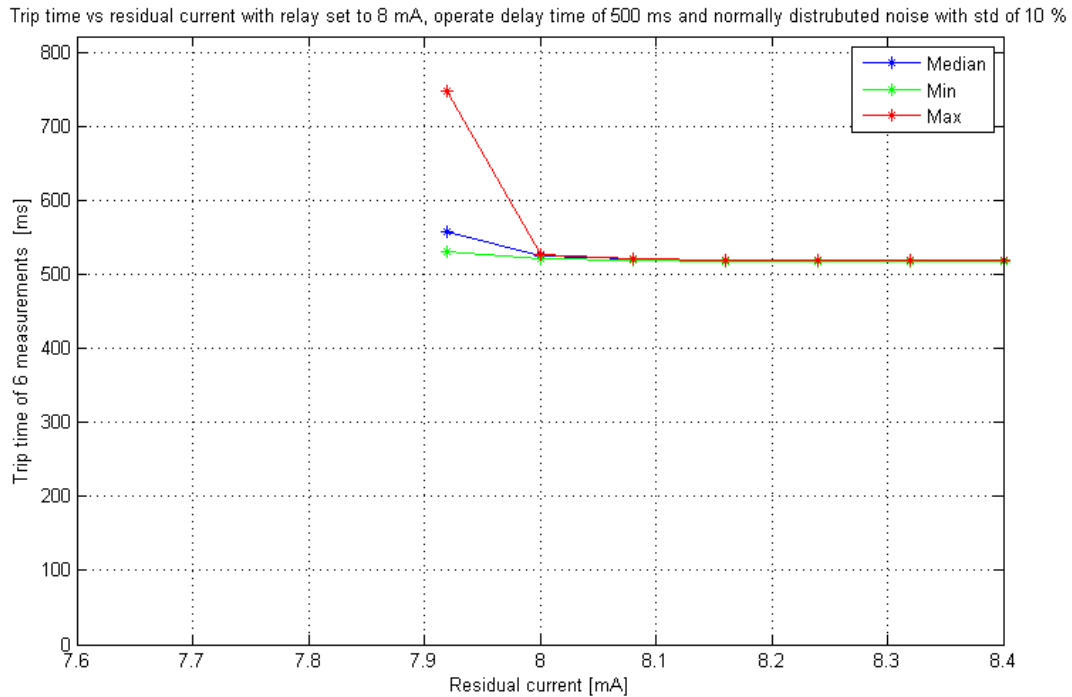


Figur 47 Funktionstid vid prov av brus känslighet med SD på 1 %

Trip time vs residual current with relay set to 8 mA, operate delay time of 500 ms and normally distributed noise with std of 3 %



Figur 48 Funktionstid vid prov av brus känslighet med SD på 3 %

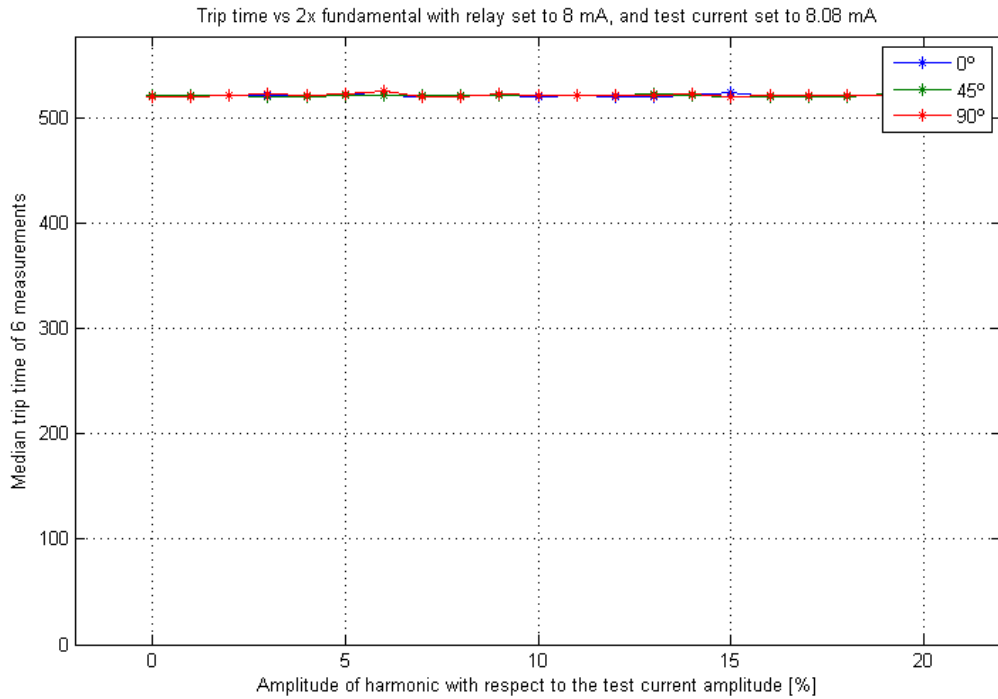


Figur 49 Funktionstid vid prov av brus känslighet med SD på 10 %

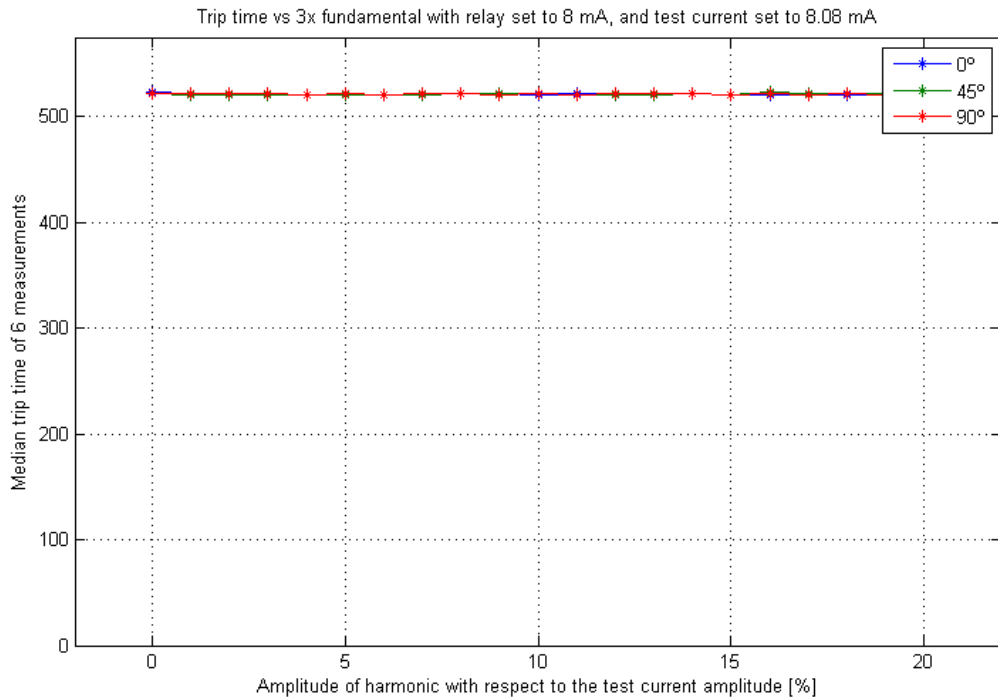
Mätningen visar att skyddet har bra förmåga att undertrycka brus. Bruset ökar dock sannolikheten något för utlösning då nollföljdsströmmen underskrider startvärdet.

5.2.1.7 Grundton + en överton

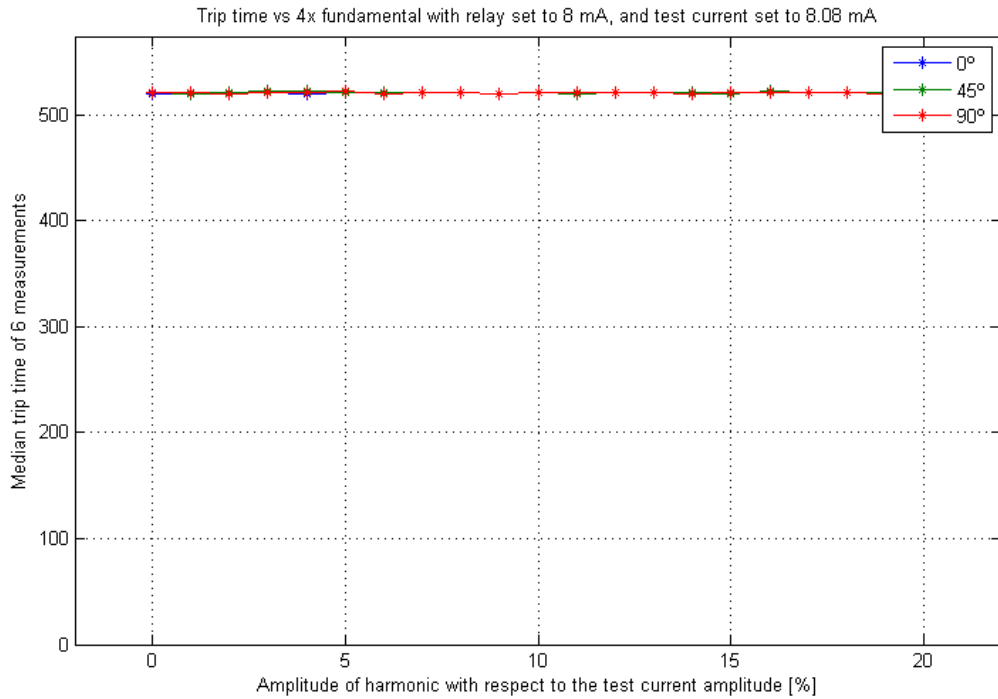
Detta prov kontrollerar skyddets grundtonsmätning. Det riktade jordfelsteget mäter grundtonen och funktionen skall inte påverkas av övertoner. Maximal amplitud på övertonen i förhållande till grundtonen har satts till 20 %. Uppspelningstid = 1000 ms, nollpunktspänningen = 50 V.



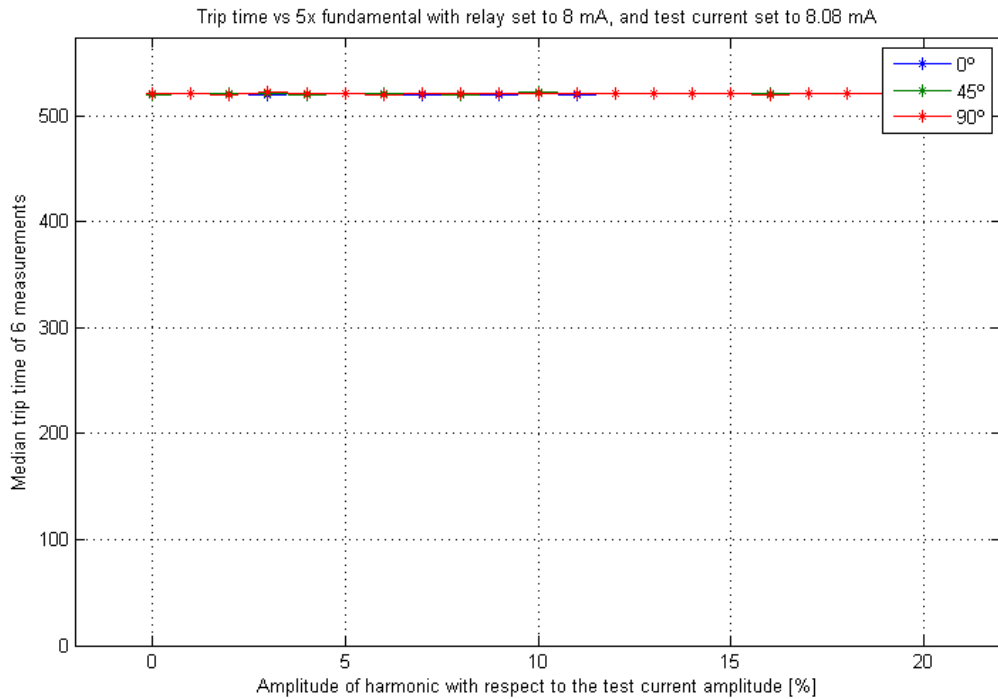
Figur 50 Funktionstid vid prov av övertonskänslighet för första övertonen



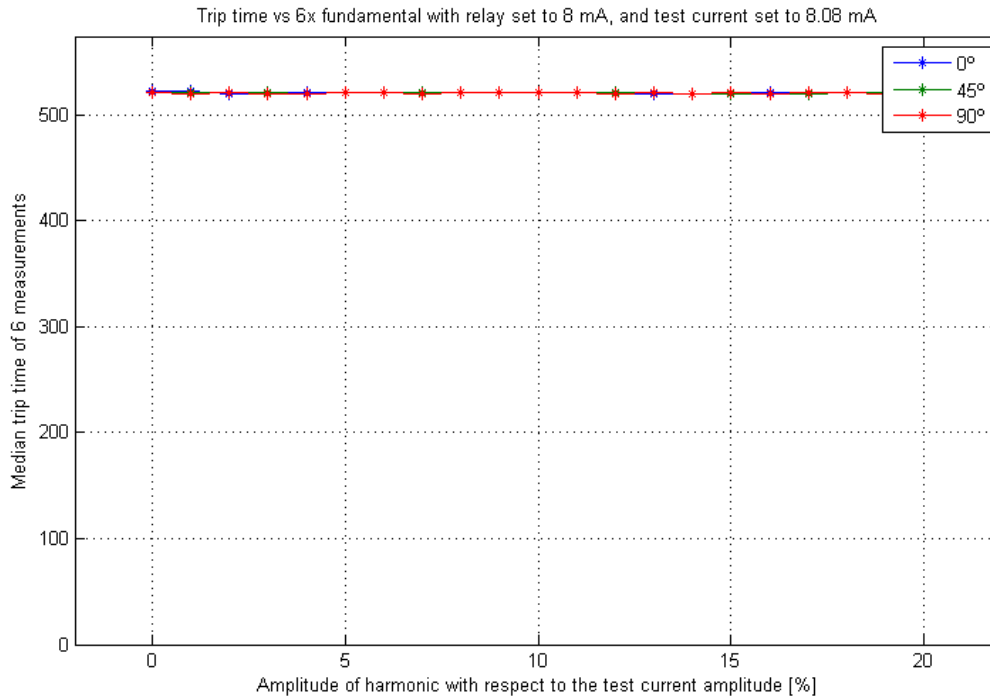
Figur 51 Funktionstid vid prov av övertonskänslighet för andra övertonen



Figur 52 Funktionstid vid prov av övertonskänslighet för tredje övertonen



Figur 53 Funktionstid vid prov av övertonskänslighet för fjärde övertonen



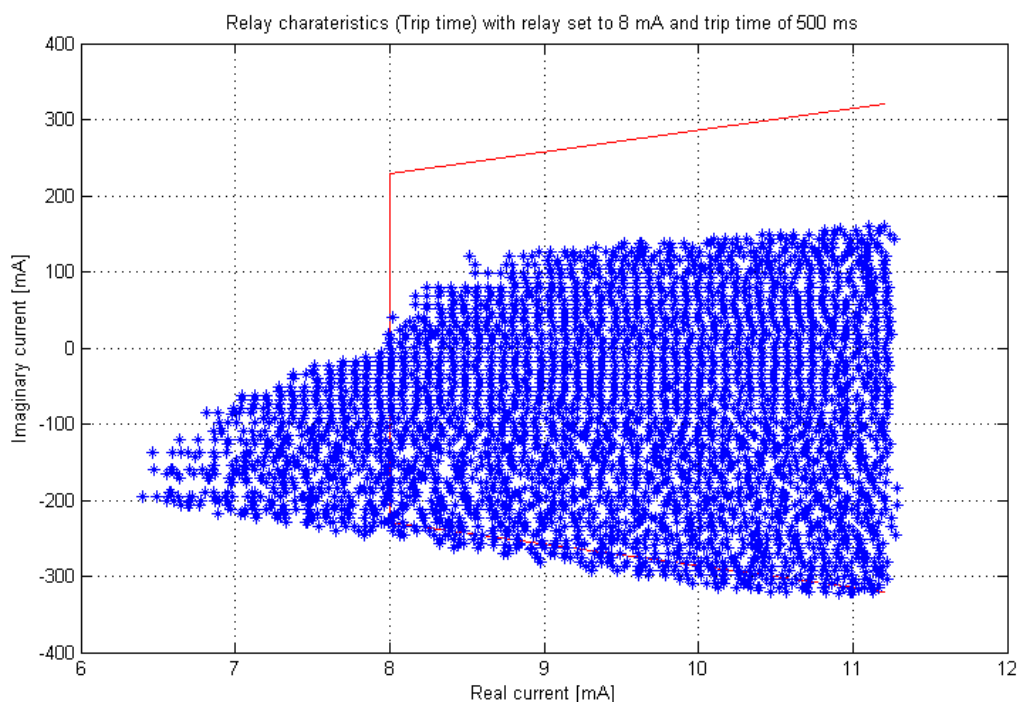
Figur 54 Funktionstid vid prov av övertonskänslighet för femte övertonen

Mätningen visar att övertonerna har försumbar påverkan på skyddets grundtonsmätning.

5.2.1.8 Funktionsområde

Vid detta prov undersöks reläets funktionsområde och är det enda av proven som inte använder aktiv ström. Uppspelningstiden = 1000 ms, nollpunktspänningen = 50 V⁸.

⁸ Vid provning har antalet mätpunkter ökat kraftigt jämfört med testspecifikationen för att testa utrustningens stabilitet under långa testsekvenser.



Figur 55 Funktionutlösning som funktion av nollföljdsström, den röda linjen visar skyddets karakteristik med korrektionsvinkel

Skyddets karakteristik är inställt på $\cos(\varphi)$ det vill säga mätning av aktiv ström och skall starta för nollföljdsströmmar som ligger innanför området som sluts av den röda linjen. Korrektionsvinkeln är under provning inställd på 2° . Observera att skalorna på figuren inte är lika stora varför figuren ser hoptryckt ut. De blå stjärnorna motsvarar att skyddet har utlöst inom ca 1000 ms.

Mätningen visar att skyddet har en vinkelavvikelse på ca $0,5^\circ$ då det uppmätta funktionsområdet borde ha följt den röda linjen upp till ca ± 230 mA reaktiv ström. Eftersom skyddet för övrigt följer korrektionsvinklarna tyder det på att vinkelavvikelsen är en inställning av tillverkaren och att det inte är något mätfel i skyddet. Anledningen till denna avvikelse är okänd. I den övre delen av den första kvadranten i figuren slutar skyddet att starta då den reaktiva strömmen går över 120 mA och följer sedan korrektionsvinkeln. Denna skillnad mot den tänkta karakteristiken är också okänd.

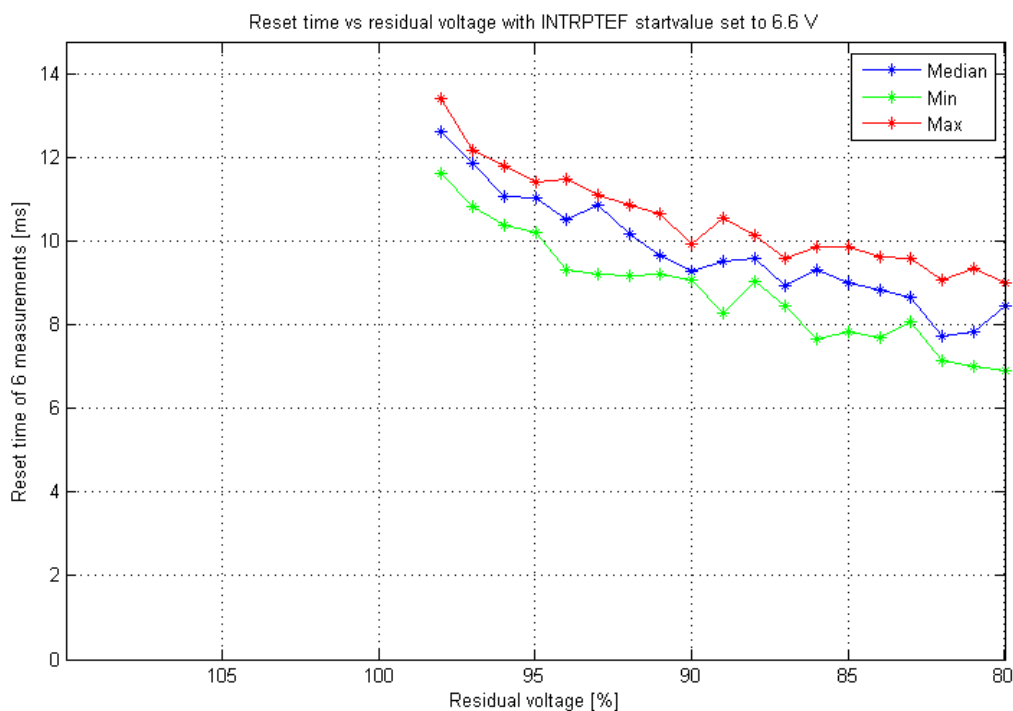
Vinkelavvikelsen kommer göra att skyddet blir mer känsligt vid enfasiga jordslutningar då skyddet mäter stor induktiv ström men skyddet kommer också att tappa i känslighet vid mätning av stor kapacitiv ström⁹. En mätning av kapacitiv ström för den felbehäftade utmatningen beror antingen på vinkelfel eller på underkompensering. Det måste dock vara en stor underkompensering för att skillnaden i startvärdet för att skyddet skall påverka utlösningen. Vid bra avstämning kommer avvikelsen istället att göra skyddet något mer känsligt beroende på kapacitiv felström för felbehäftad utmatning där mer kapacitiv felström ger större känslighet. Vid överkompensering kommer vinkelavvikelsen att kompensera bort lite av förlusten i känslighet då mer induktiv

⁹ Med kapacitiv ström menas att strömvektorn befinner sig i första kvadranten av funktionsområdet. Motsvarande för induktiv ström bli den fjärde kvadranten av funktionsområdet.

ström minskar den aktiva samtidigt som vinkelavvikelsen gör att känsligheten för den aktiva strömmen ökar.

5.2.1.9 Återgångsförhållande för nollpunktsspänning (INTRPTEF)

För den transientmätande funktionen är ett av kriterierna för att trip-räknaren skall räkna upp att startvärdet för spänningen överskrider det inställda värdet. Transientskyddet använder sig av samma uppmätta värde för spänningen som det riktade jordfelssteget men de har olika startvärden. För att kontrollera att återgångsförhållande för det inställda startvärdet också fungerar enligt inställning för transientskyddet provas den enligt samma princip som i avsnitt 5.2.1.5.



Figur 56 Återgångstid som funktion av nollpunktsspänningen där 100 % motsvarar reläskyddets inställning

Återgångsförhållandet är ungefär samma som vid motsvarande mätning för det riktade jordfelssteget.

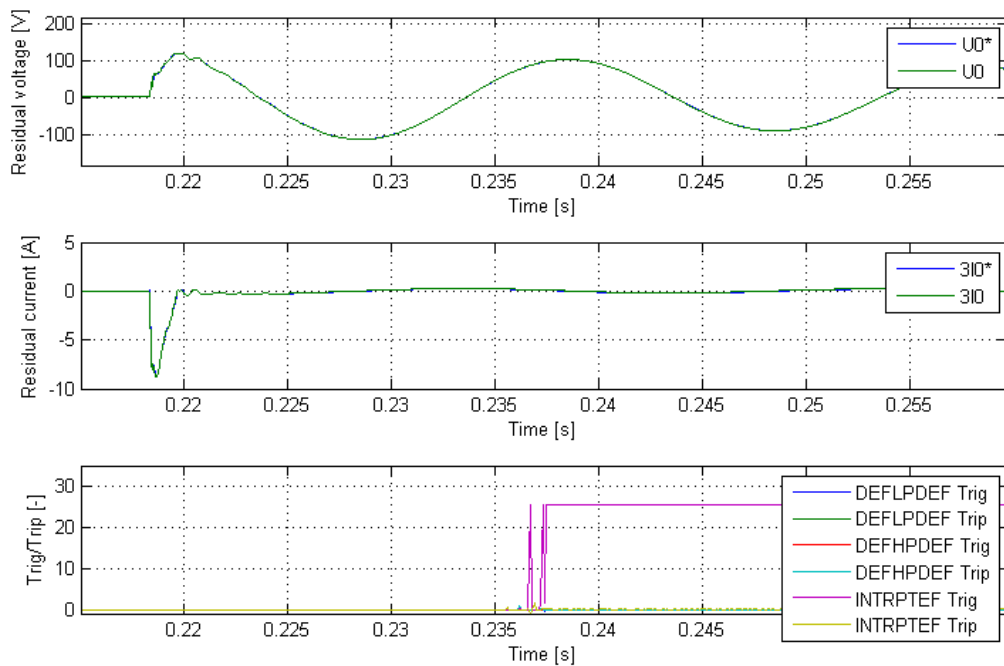
5.2.2 Prov med uppspelning av transienter

Vid provningen har ett antal inspelade transienta och intermittenta jordfel använts för att skapa ett testbibliotek på 75 transienter. Provingen har utförts efter testspecifikationen vilket innebär att först har den felbehäftade utmatningen spelats upp och därefter 2 friska utmatningar. Till skillnad från RXHL421 har REF615 tillräckligt bra isolering mellan kanalerna för att mätning med utrustningen skulle kunna utföras med bra resultat.

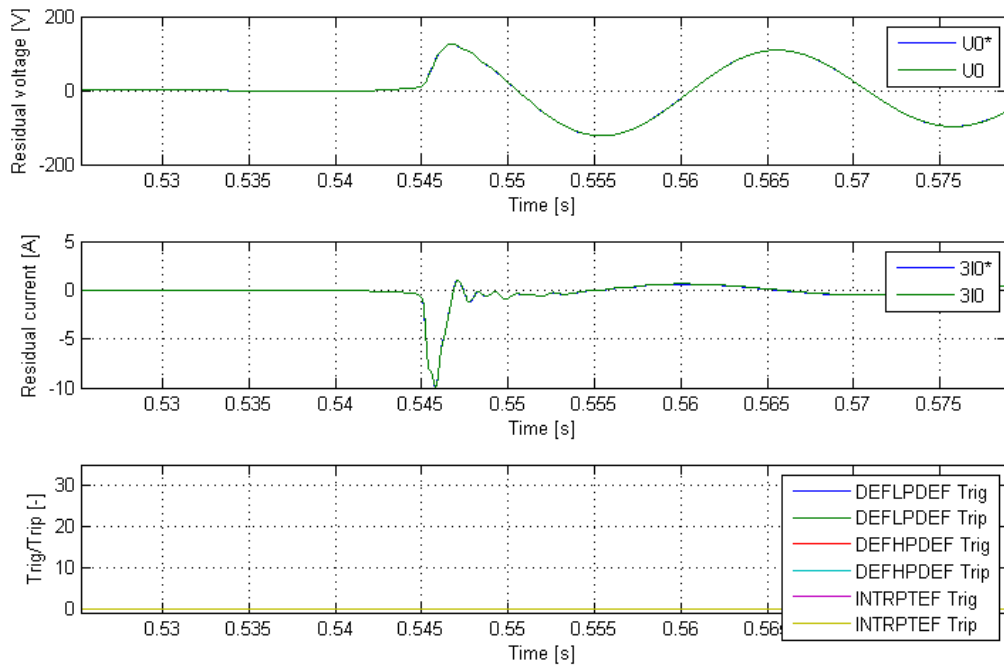
Skyddet är inställt enligt bilaga B Tabell 2. I bilaga C beskrivs transient- och intermittenfunktionen samt dess inställningar för ABB REF615. Anledningen till att transientmätningen är inställd för mätning i backriktningen är att registreringarna med störningsskrivaren är gjorda med omvänd polaritet, antingen på ström- eller spänningsingångarna.

Under alla testuppspelningar som utförts under arbetet har skyddet alltid varit konsekvent vid detekteringen av transienter.

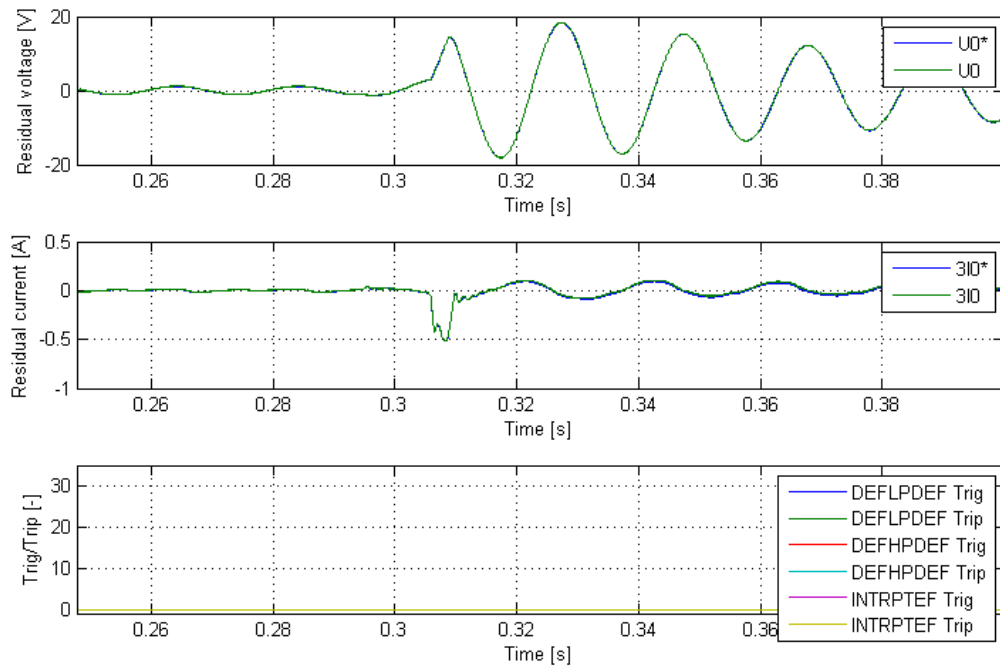
Provningen visade att reläskyddet startade för 62 av de 75 transienterna. Skyddet startade inte obefogat för någon av de friska utmatningarna. De fel som skyddet inte startade för visas nedan med referenssignalerna, insignalerna till skyddet och alla utgående signaler från skyddet. Som referensen visas först en transient som skyddet detekterat korrekt, se Figur 57. Därefter följer de transienter som skyddet inte startade för.



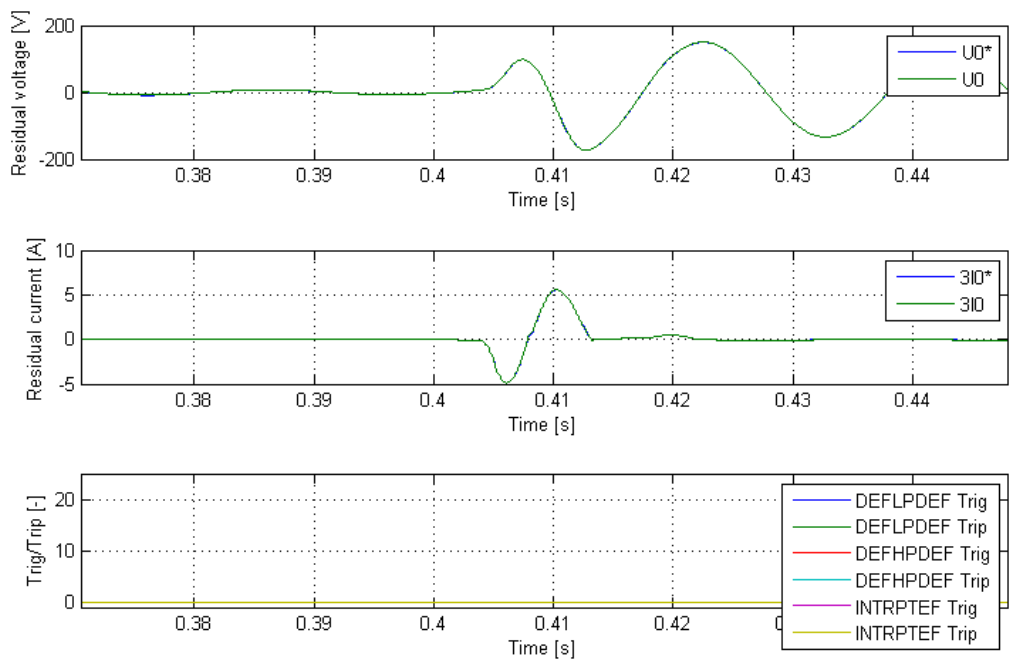
Figur 57 Transient nr 1, omsättning för strömtransformator = 300/5



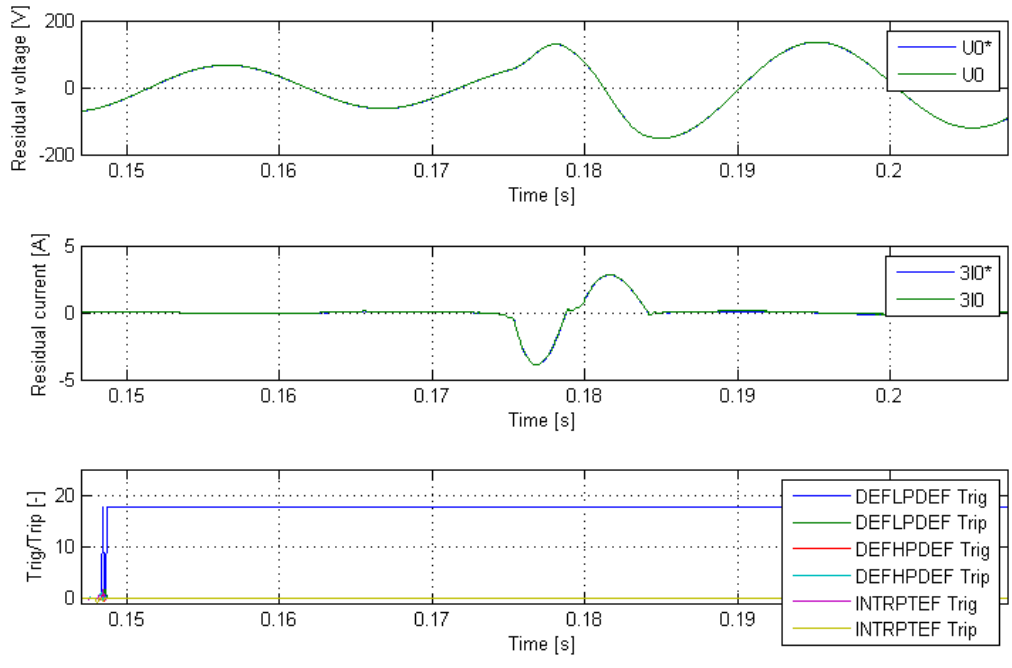
Figur 58 Transient nr 2, omsättning för strömtransformator = 300/5



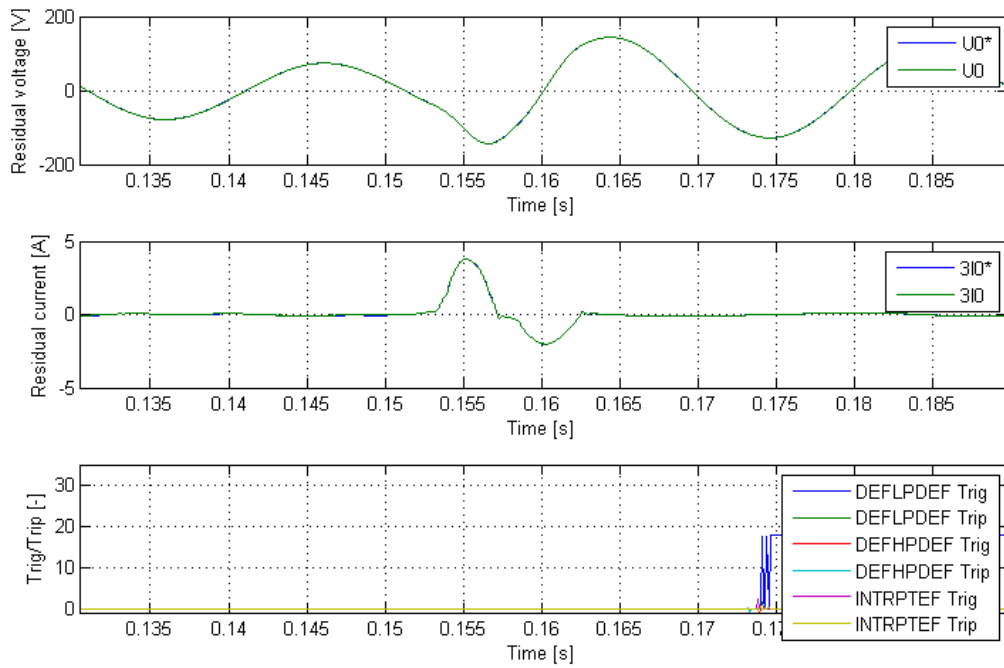
Figur 59 Transient nr 3, omsättning för strömtransformator = 300/5



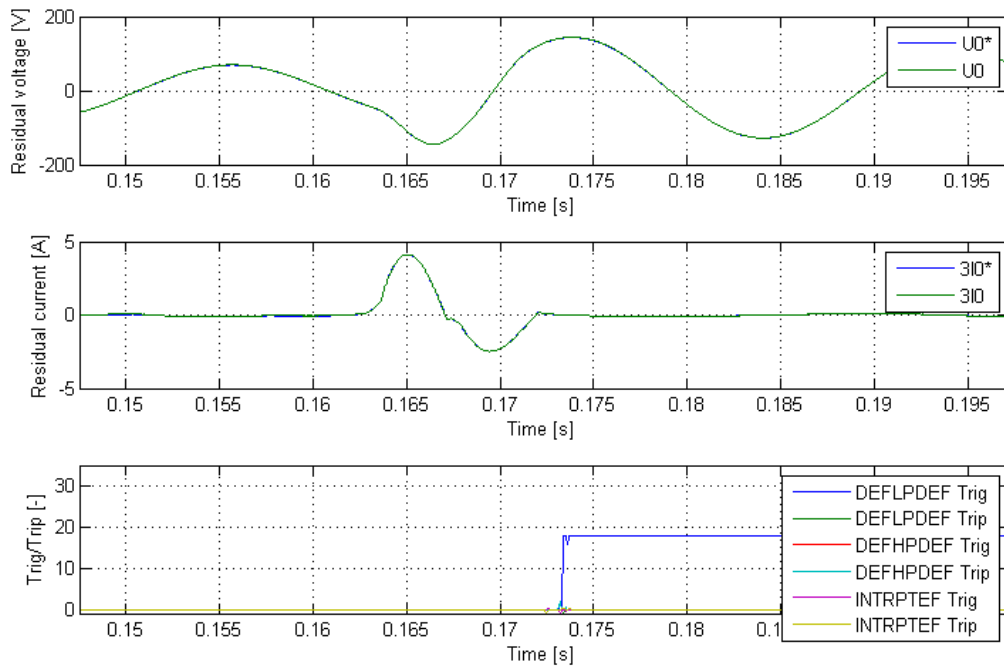
Figur 60 Transient nr 4, omsättning för strömtransformator = 300/5



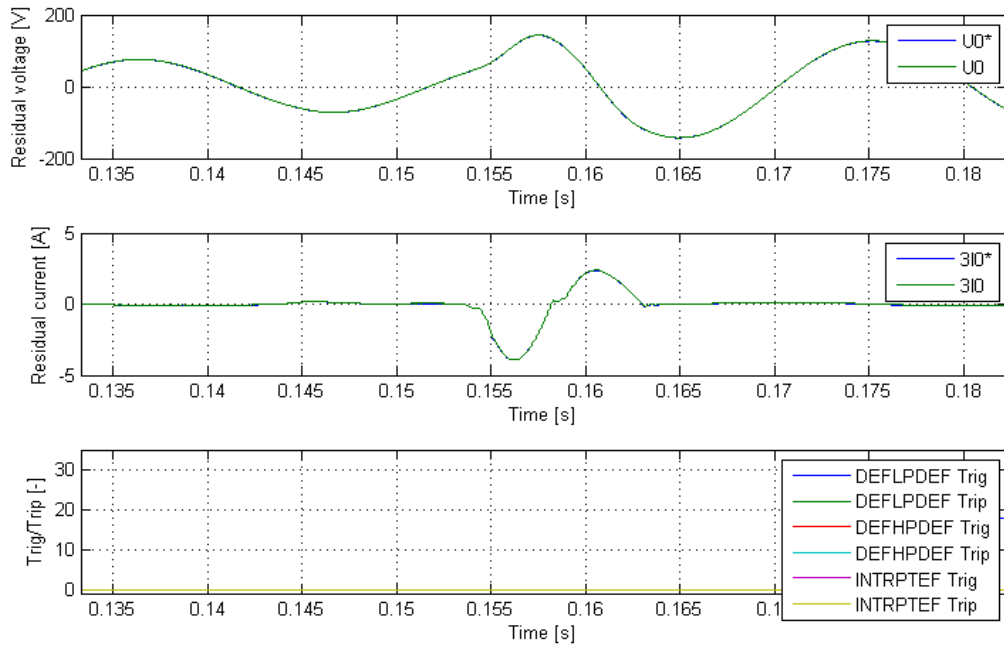
Figur 61 Transient nr 5, omsättning för strömtransformator = 300/5



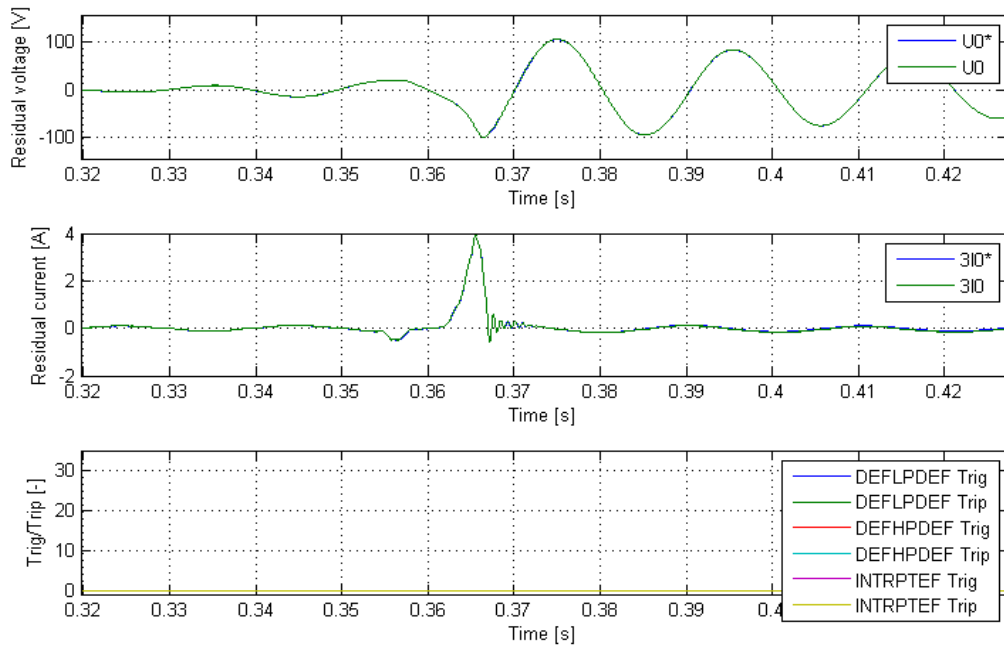
Figur 62 Transient nr 6, omsättning för strömtransformator = 300/5



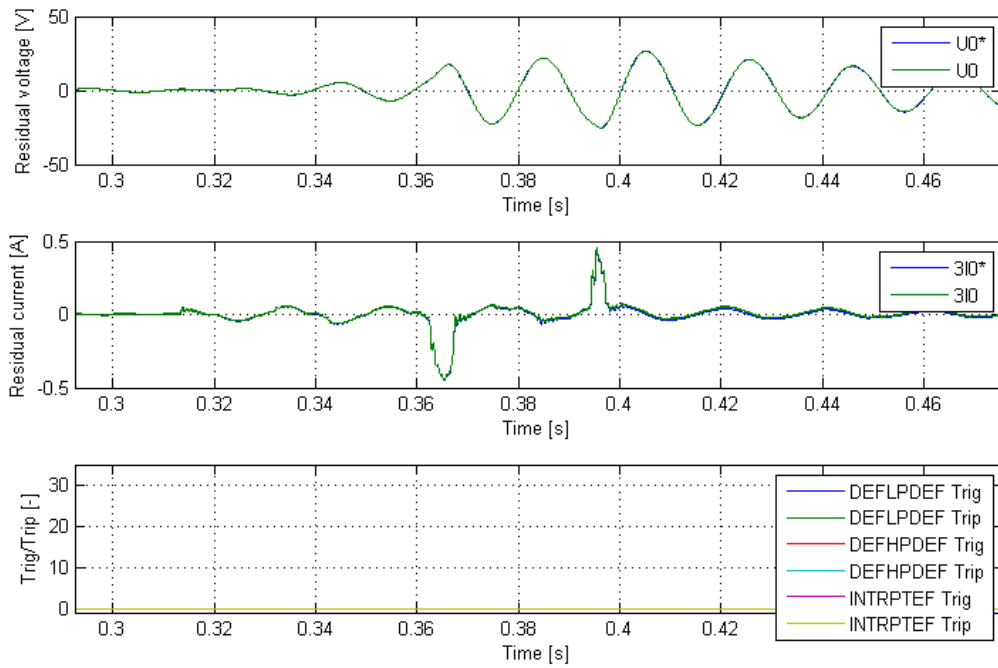
Figur 63 Transient nr 7, omsättning för strömtransformator = 300/5



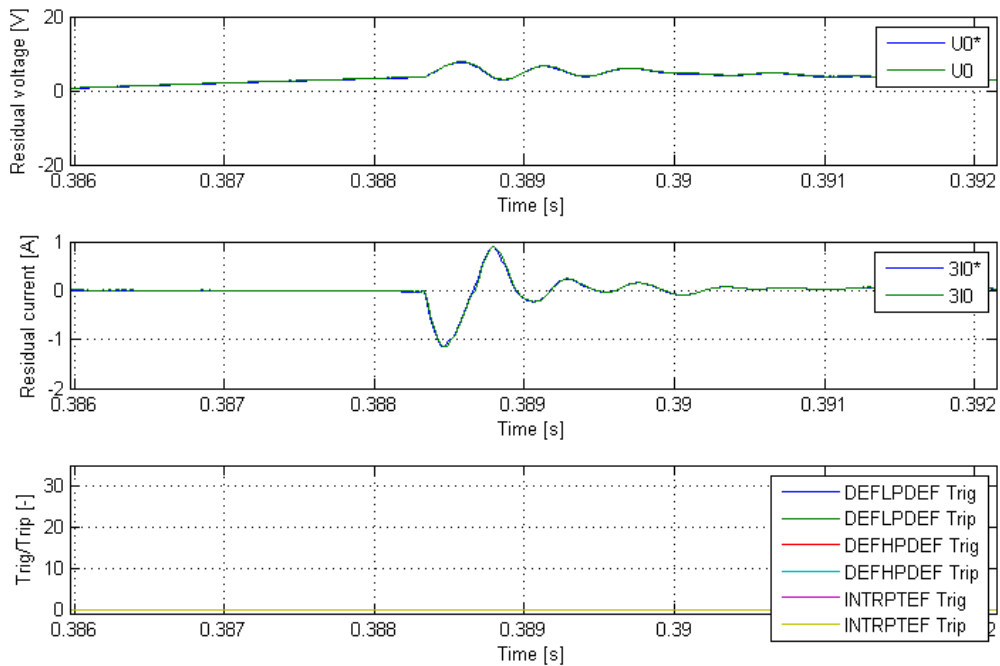
Figur 64 Transient nr 8, omsättning för strömtransformator = 300/5



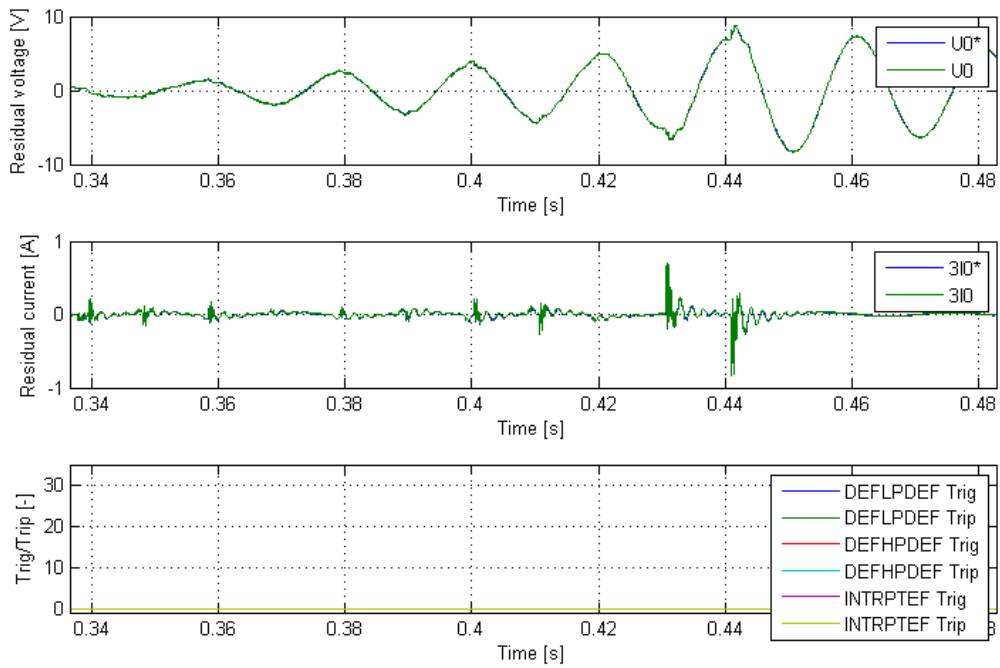
Figur 65 Transient nr 9, omsättning för strömtransformator = 300/5



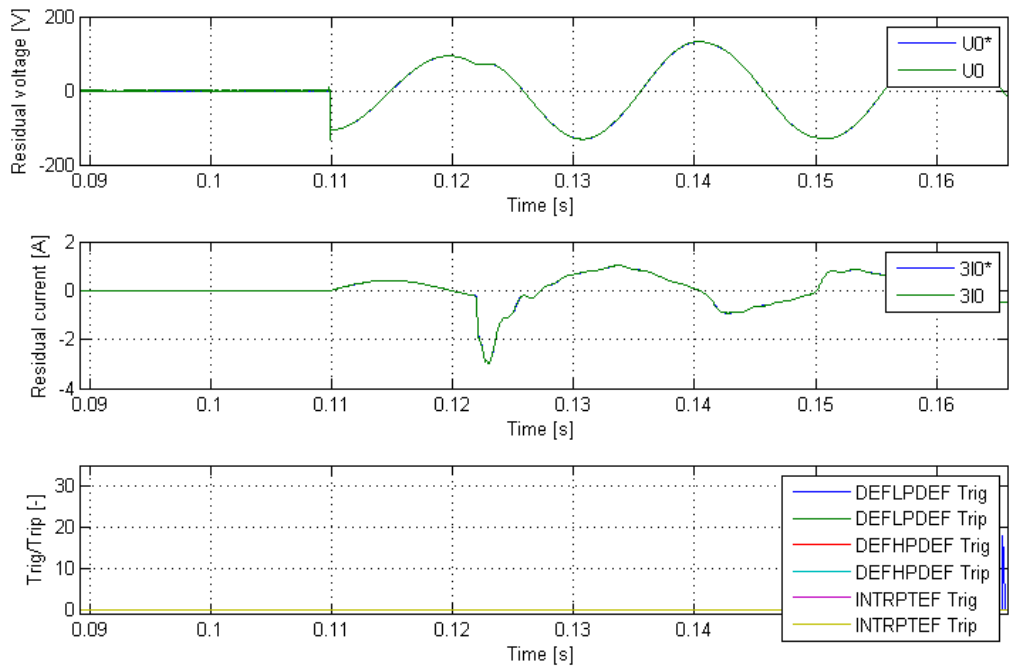
Figur 66 Transient nr 10, omsättning för strömtransformator = 300/5



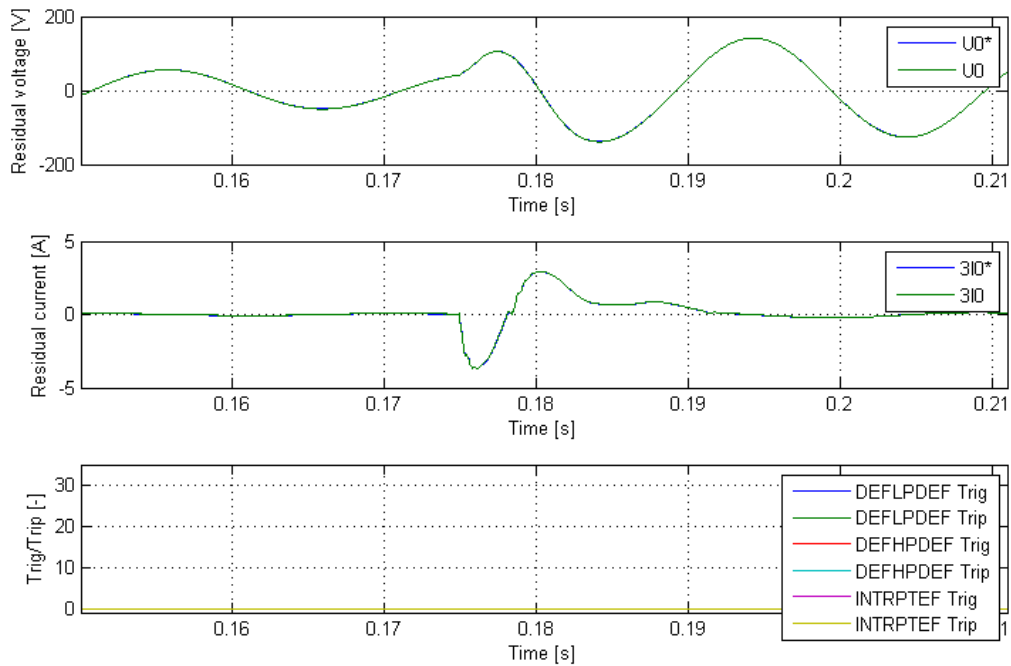
Figur 67 Transient nr 11 (återinkoppling av ett fast enfaset jordfel) , omsättning för strömtransformator = 300/5



Figur 68 Transient nr 12, omsättning för strömtransformator = 300/5

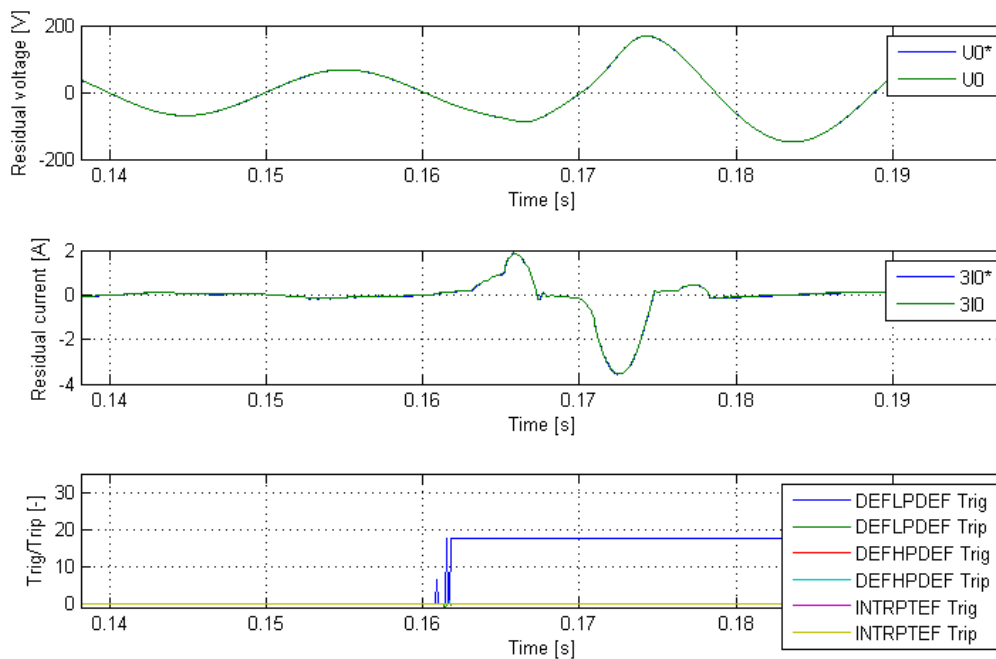


Figur 69 Transient nr 13, omsättning för strömtransformator = 300/5

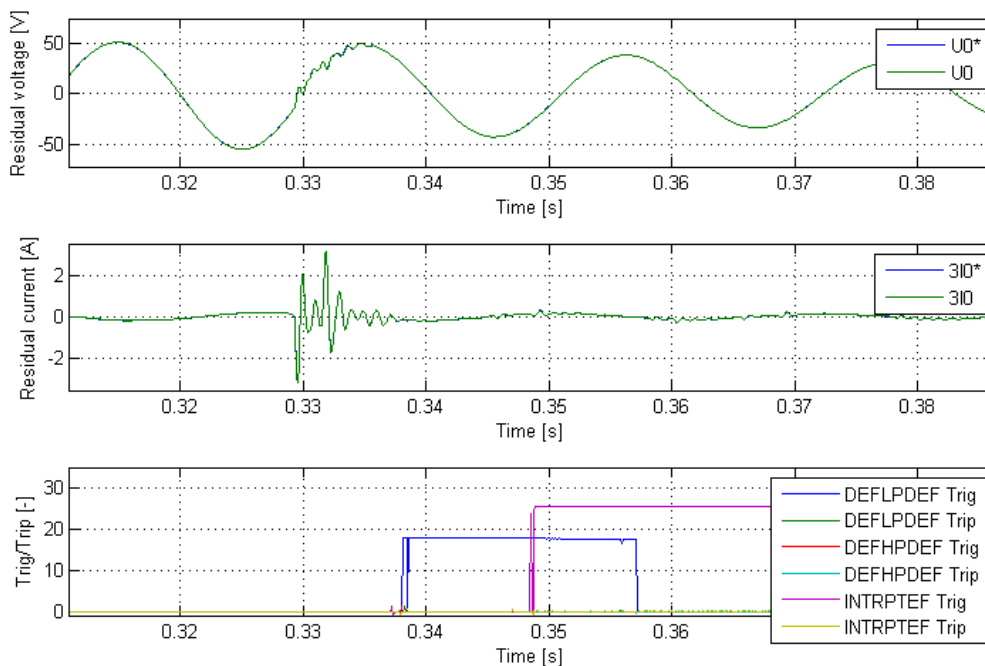


Figur 70 Transient nr 14, omsättning för strömtransformator = 300/5

Alla transienterna som skyddet inte startat för har haft ett toppvärde på mellan 0,5-5 A med undantag för transient nr 2 i Figur 58 som har ett toppvärde på ca 10 A. Majoriteten av de transienter som har ett toppvärde på mer än ca 6 A startar skyddet för (undantaget transient nr 2 i Figur 58). De transienter med lägst toppvärde som skyddet detekterade är presenterade i Figur 71 och Figur 72.



Figur 71 Transient nr 15, omsättning för strömtransformator = 300/5



Figur 72 Transient nr 16, omsättning för strömtransformator = 300/5

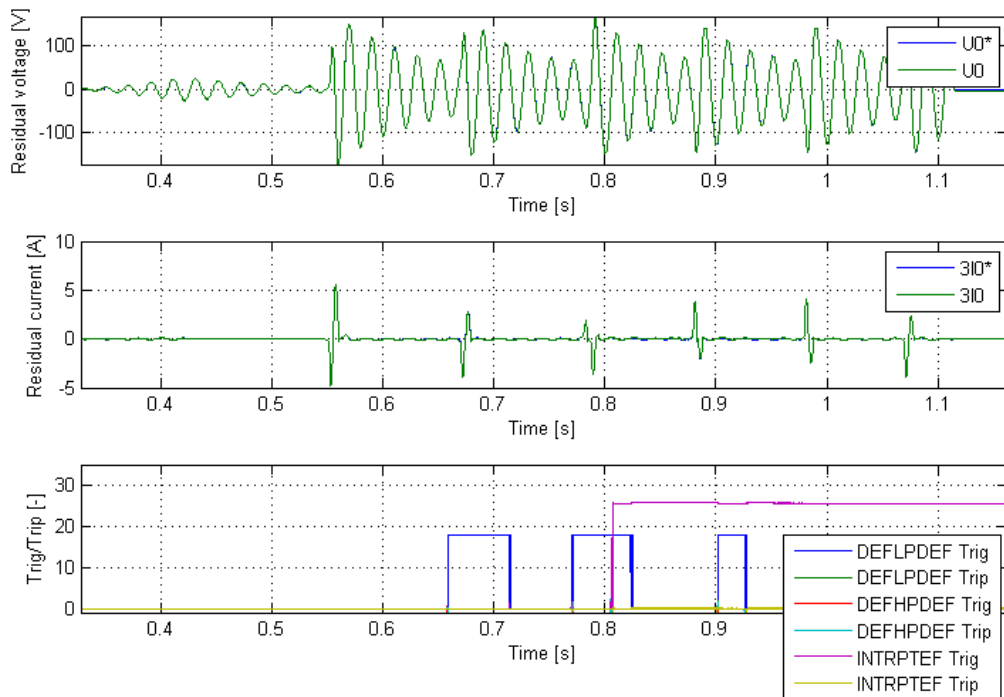
Det går inte att direkt se någon avgörande skillnad för transienter som skyddet inte startar för och transienter som den startar för.

5.2.3 Prov med uppspelning av intermittenta jordfel

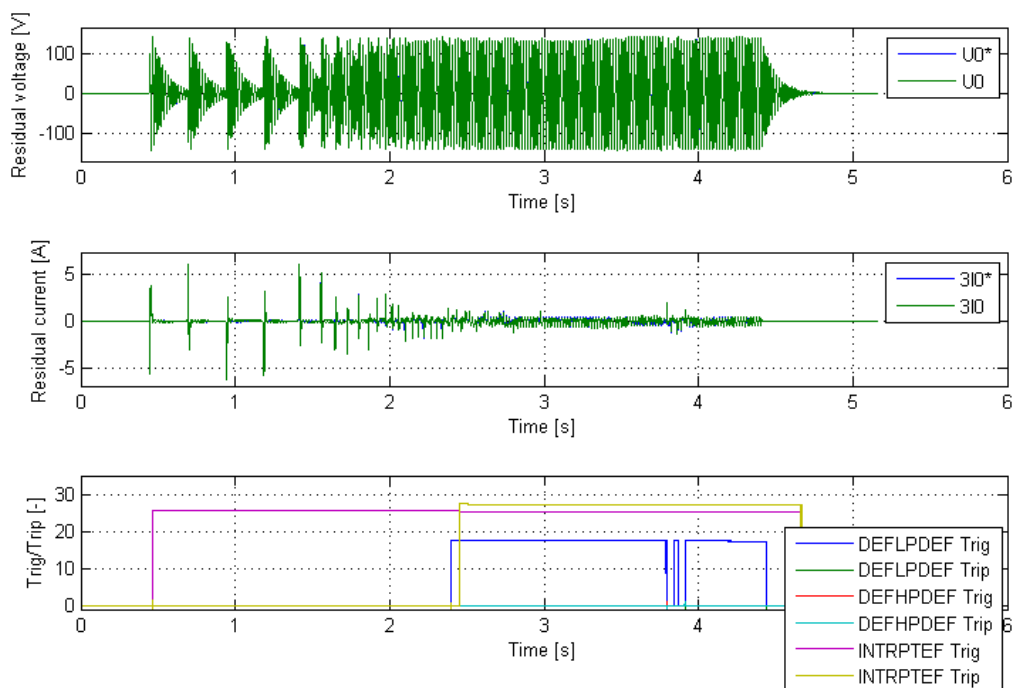
Vid prov av intermittenta jordfel har sex olika jordfel valts för provning av intermittent- och transientfunktionen. Provningsen har utförts efter testspecifikationen vilket innebär att först har den felbehäftade utmatningen spelats upp och därefter 2 friska utmatningar.

Skyddet är inställt enligt bilaga B Tabell 2

Nedan följer resultatet för två av uppspelningarna.



Figur 73 Uppspelad intermittent jordfel nr 1

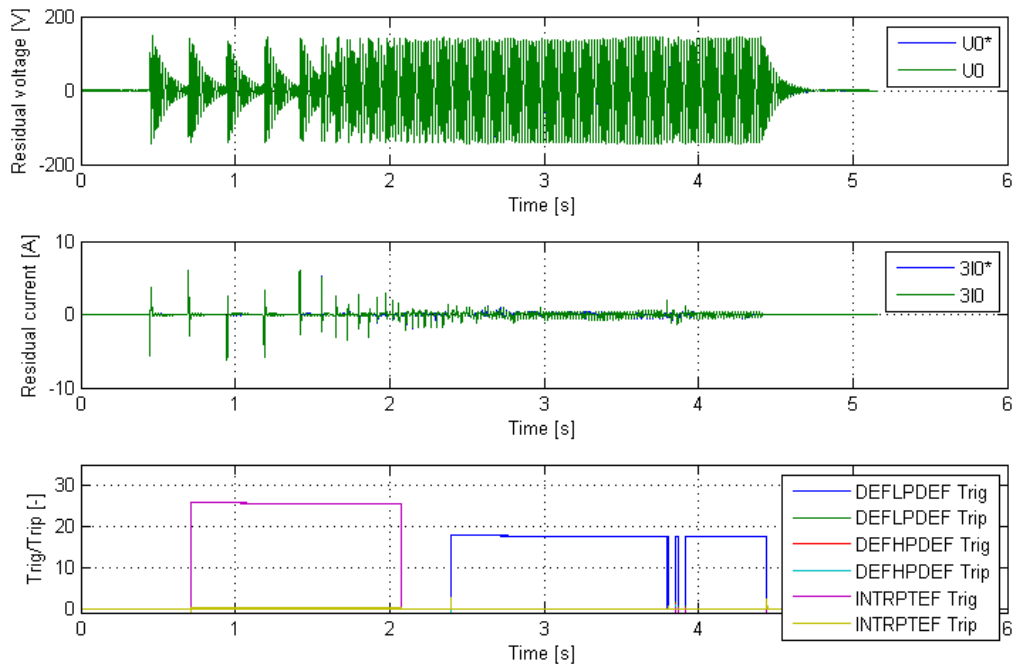


Figur 74 Uppspelad intermittent jordfel nr 2

För det intermittenta jordfelet i Figur 73 startar inte skyddet på någon av de två första transienterna utan först vid den tredje. Detta överrensstämmer med resultaten från testen med transienter, där skyddet varken startade på de två första, eller de tre sista transienterna. Att det riktade jordfelskyddet startar beror på en höghöglig jordslutning mellan transienterna där den aktiva strömmen sakta ökar. Vid det intermittenta jordfelet i Figur 74 startar skyddet på första transienten och då nollpunktspänningen överstiger startvärdet under hela förloppet, så löser transientfunktionen ut helt enligt inställning. Det riktade jordfelskyddet startar inte förrän jordfelet övergår över till ett permanent jordfel. Innan det sker är 50 Hz komponenten av strömmen stor vid jordslutningen och nära noll precis efter jordslutningen är bortkopplad. Detta gör det svårt för det riktade jordfelssteget att starta. Testet visar vikten av ett bra transientkydd som kan bidra till en selektiv bortkoppling. För just denna inspelning (Figur 74) startade det riktade jordfelssteget i stationen och utmatningen kopplades bort. Om skyddet inte hade startat i tid hade nollpunktsspänningsskyddet löst och brytaren på krafttransformatorn nedspänningssida hade fråkopplat.

Det finns också en intermittenfunktion i skyddet som är tänkt att användas för helt kablifierade nät. Vid provning av funktionen är inställningarna samma som för transientfunktionen. Det finns ytterligare en variabel för det intermittenta:

Uppspelningen gav följande resultat för samma transient som i Figur 74:



Figur 75 Uppspelad intermittent jordfel nr 2 (intermittentfunktion)

Skyddet startar som inställt det vill säga efter 2 transienter och skyddet måste också detektera nya transienter inom återgångstiden för att inte trip-räknaren skall nollställas. Mätningar har visat att skyddet startar på de första sex transienterna för att sedan inte detektera någon av de efterföljande.

5.2.4 Övriga prover

Under övriga prover har sju olika inspelningar spelats upp för kontroll av skyddets olika funktioner.

Skyddet är inställt enligt bilaga B Tabell 2.

5.2.4.1 Prov nr 1

Första uppspelningen består av en trefaskortslutning där en av utmatningarna har en koppling till jord.

Kort felbeskrivning: Transient -> Trefaskortslutning under ca 150 ms -> Fri svängning

Utmatningen med koppling till jord:

Transient: Skyddet startar inte för transienten, se Figur 76.

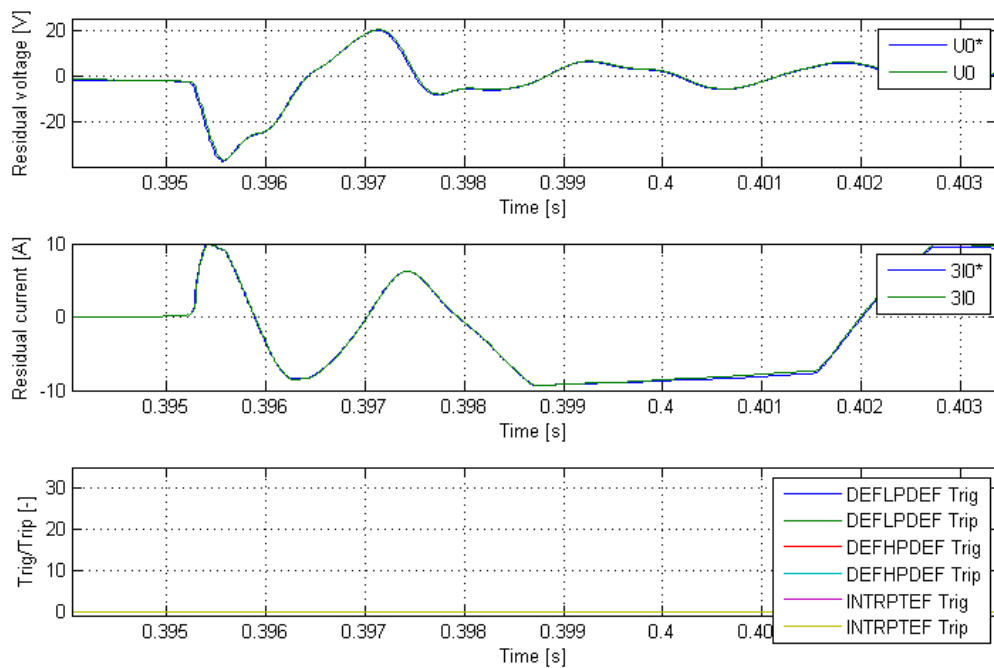
Trefaskortslutning: En stor ström går via jord och det oriktade steget startar efter ca 50 ms. Med hjälp av grundtonsmätning uppmäts tiden det tar för startsignalen att återgå.

Det tar ca 16 ms för skyddet att låta startsignalen återgå efter att strömmen sjunkit under startvärdet. Mätningen tar inte hänsyn till grundtonsmätningens förskjutning av signalen vilket innebär att det egentligen tar längre tid för startsignalen att återgå. Tidsskillnaden från uppmätt värde är dock inte längre än 20 ms om skyddet mäter över en grundtonsperiod.

Fri svängning: Utmatning bortkopplad.

Friska utmatningar:

Skyddet startar inte vilket är korrekt.



Figur 76 Transient före trefasfel

5.2.4.2 Prov nr 2

Nästa uppspelning börjar med en kort enfasig jordslutning och övergår till ett dubbelt jordfel för att sen övergå till ett trefasfel.

Kort felbeskrivning: Transient -> 1-5 ms enfasig jordslutning -> ca 60 ms dubbelt jordfel -> ca 60 ms trefasfel

Felbehäftad utmatning 1:

Transient: Skyddet startar för transient, osäkert om det är transienten för den enpoliga jordslutningen eller den tvåpoliga som skyddet startar för.

Tvåpolig jordslutning och trefasfel: Efter ca två perioder startar det oriktade jordfelssteget och håller startsignalen till strömmen under startvärdet. Startsignalen återgår ca 15 ms efter att strömmen sjunkit under startvärdet.

Felbehäftad utmatning 2:

Tvåpolig jordslutning och trefasfel: Det oriktade jordfelssteget startar efter ca 2 perioder. Startsignalen återgår efter ca 13 ms. Det riktade jordfelssteget startar ungefär samtidigt som det oriktade skyddet. Vid trefasfelet så gör fasvridningen av nollpunktspänningen att strömmen ändrar riktning och startsignalen återgår igen.

Frisk utmatning:

Skyddet startar inte vilket är korrekt.

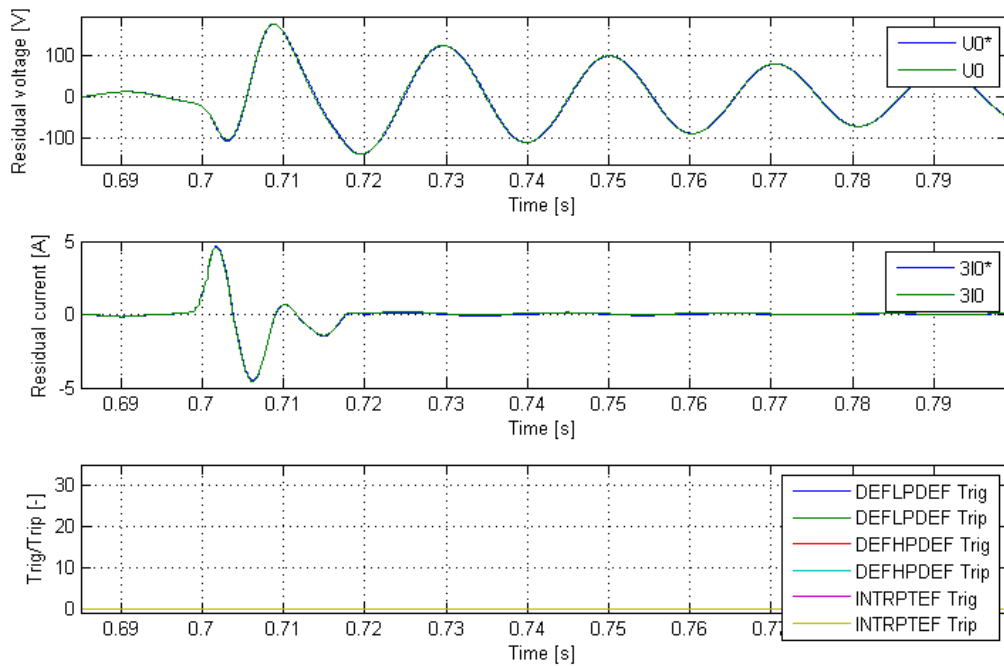
5.2.4.3 Prov nr 3

Kort felbeskrivning: Höghmigt enfasigt jordfel ca 80 ms -> transient -> fri svängning ca 80 ms -> höghmigt jordfel -> liten transient -> transient -> ca 40 ms senare bortkoppling under några perioder -> transient -> fri svängning

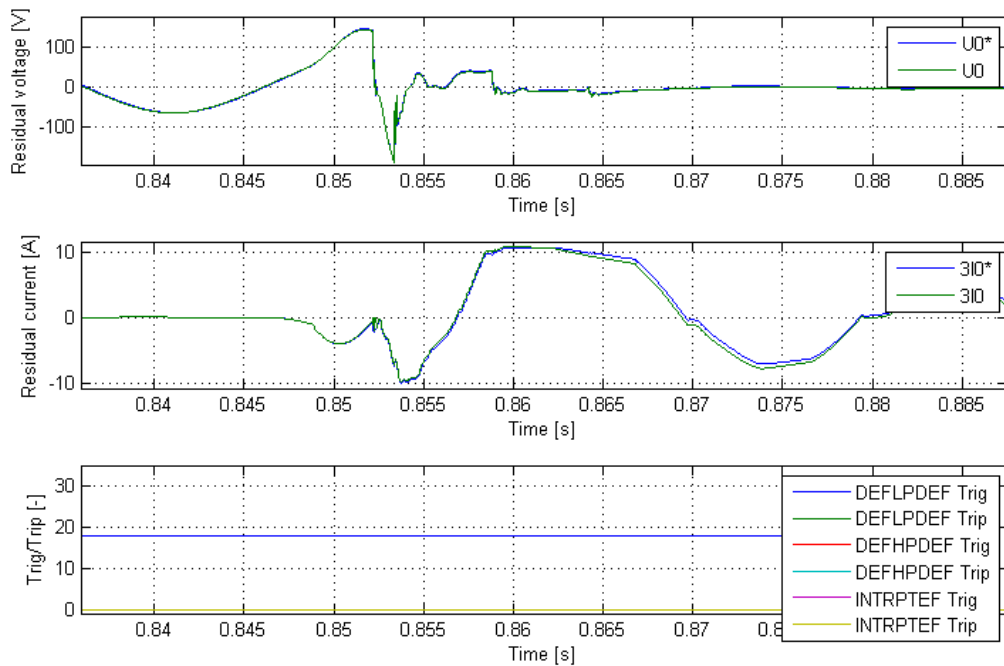
Eftersom förloppet är ganska komplext delas inte utmatningarna upp i beskrivningen utan en gemensam beskrivning följer nedan.

Uppspelningen börjar med ett höghmigt jordfel där nollpunktspänningen sakta byggs upp och när felet försvinner sjunker spänningen igen. Under perioden där spänningen ökar är den aktiva strömmen ca 50 mA för den då felbehäftade utmatningen, nollpunktspänningen är dock för liten för att det riktade jordfelssteget skall starta.

Därefter följer en kort transient som skyddet inte startar på, se Figur 77. Spänningen sjunker igen under tre till fyra perioder och därefter startar en höghmig jordslutning som det riktade jordfelssteget startar för och en liten transient. En period senare kommer en transient som skyddet inte startar för, se Figur 78. Efter transienten går det stora nollföljdsströmmar för alla utmatningar under ungefär en period. För två av utmatningarna startar det oriktade jordfelssteget, strömmarnas maximala värde ligger enligt grundtonsmätningen på ca 6 A. Den tredje har något lägre nollföljdsström vilket kan förklara varför den inte startade, motsvarande värde var ca 4,5 A. De oriktade jordfelstegen startsignal startar signalen återgår efter ca 15 ms.



Figur 77 Transient i början av jordfelssekvens



Figur 78 Transient före trefassfel

5.2.4.4 Provnr 4

Kort felbeskrivning: Transient -> dubbelt jordfel under ca 30 ms -> fri svängning

Felbehäftad utmatning 1:

Transient: Skyddet startar inte för transienten, se Figur 79.

Dubbelt jordfel: Det oriktade skyddet startar efter ca 50 ms och startsignalen återgår efter ca 15 ms efter att strömmen sjunkit under startvärdet.

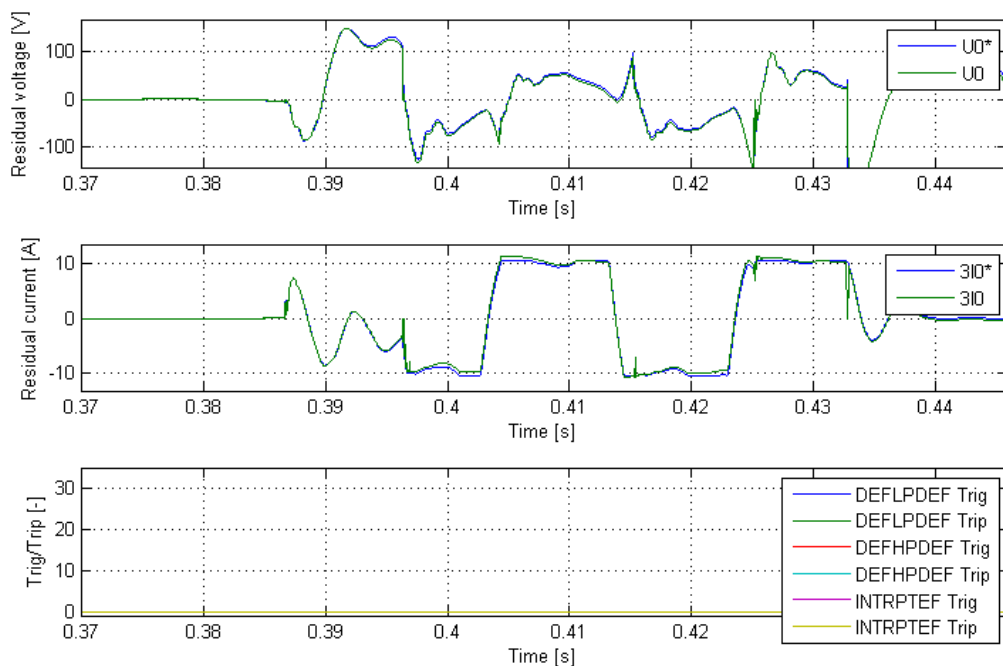
Felbehäftad utmatning 2:

Transient: Startar inte vilket är korrekt.

Dubbelt jordfel: Det oriktade skyddet startar efter ca 50 ms och signalen återgår efter ca 15ms efter att strömmen sjunkit under startvärdet. Under det dubbla jordfelet är den aktiva strömmen mer än 1 A under ca 35 ms, det riktade jordfelsteget starta dock inte. Det kan bero på att strömmen byter riktning under en kort tid efter att felet försvunnit

Frisk utmatning:

Startar inte på något vilket är korrekt.



Figur 79 Transient i början av jordfel

5.2.4.5 Prov nr 5

Kort felbeskrivning: Transient -> enfasig jordslutning -> dubbelt jordfel -> enfasig jordslutning -> dubbelt jordfel -> enfasig jordslutning-> dubbelt jordfel -> fri svängning -> dubbelt jordfel -> enfasig jordslutning

Felbehäftad utmatning 1:

Transient: Skyddet startar korrekt för transient.

Enfasig jordslutning: Det riktade jordfelssteget startar korrekt för de enfasiga jordslutningarna och startsignalen startar ca 50 ms efter felet startas. Det riktade jordfelsstegets startsignal återgår ca 15 ms efter att strömmen underskridit startvärdet. Vid övergången mellan dubbla jordfel och enfasig jordslutning återgår dock startsignalen då den aktiva strömmen byter riktning under ca 3 ms och med ett maxvärde på ca 172-190 mA. Startsignalen startar sedan efter ca 50 ms igen.

Dubbelt jordfel: Det oriktade steget startar korrekt för varje dubbelt jordfel och som tidigare är tidsfördröjningen från felet till startsignalen ca 50 ms och startsignalen återgår efter ca 13-15 ms. Det riktade steget startar för det dubbla jordfelet.

Felbehäftad utmatning 2:

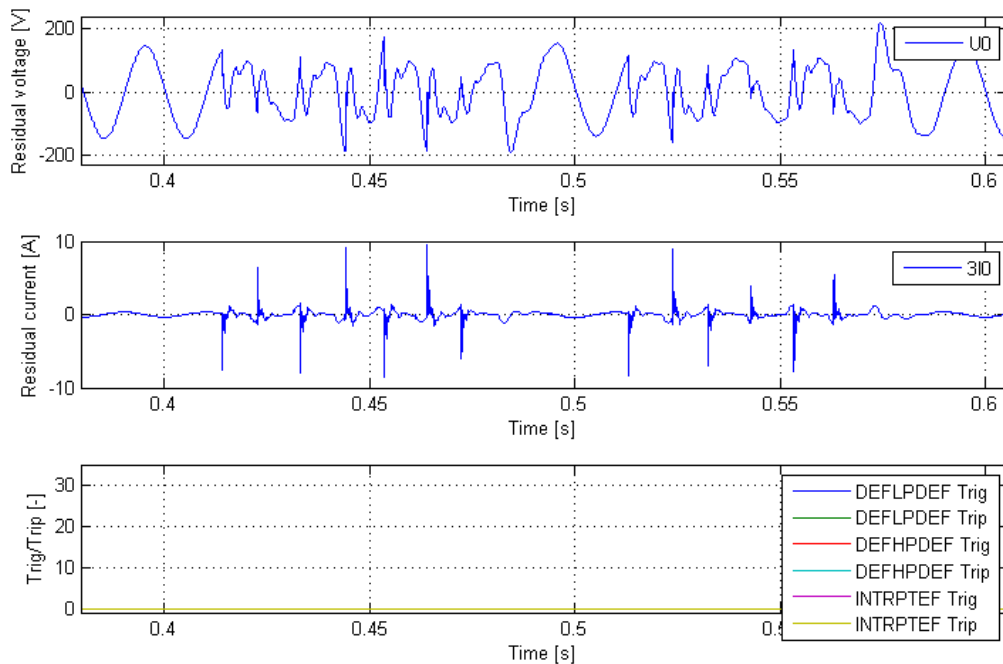
Transient: Skyddet startar inte vilket är korrekt.

Enfasig jordslutning: Det riktade jordfelsskyddet startar inte vilket är korrekt.

Dubbelt jordfel: Det oriktade skyddet startar på samma sätt som för den första felbehäftade utmatningen. Det riktade steget startar inte vilket är korrekt.

Frisk utmatning:

Inget skydd startar. Noterbart är de stora strömtransienterna som uppkommer varje gång nollpunktspänningen får ett fasskift. Skiftet beror troligen på att jordslutningen består av en eller två ljusbågar vars resistans varierar med spänningen över felet, se Figur 80.



Figur 80 Dubbelt jordfel frisk utmatning

Detta innebär också att riktningen för felströmmen förändras hela tiden vilket gör att den uppmätta aktiva strömmen varierar något mer än den totala strömmen som det oriktade skyddet mäter.

5.2.4.6 Prov nr 6

Kort felbeskrivning: Enfasig jordslutning

Felbehäftad utmatning:

Enfasig jordslutning: Det riktade jordfelssteget startar för jordfel efter ca 50 ms och startsignalen återgår ca 12 ms efter att strömmen underskridit startvärdet. Aktiv felström ca 220 mA vid en vinkel på 115°.

Friska utmatningar:

Inget skydd startar vilket är korrekt.

5.2.4.7 Prov nr 7

Kort felbeskrivning: Enfasig jordslutning

Ger samma resultat som i prov 6, aktiv nollföljdsström = 180 mA vid en vinkel på 122°.

6 Slutsats och diskussion

6.1 Provmethodik

Provmethodiken med uppspelningen av datagenererade grundtonssignaler ger information om det riktade och det oriktade jordfelsstegets prestanda och funktion. Många av inställningsparametrarna har provats för att kontrollera att skyddet fungerar korrekt. Återkoppling från driftserfarenhet av störningar och reläskyddens tillkortakommanden, skulle kunna användas för att förbättra provprogrammet.

Uppspelning av störningsregistreringar är ett utmärkt sätt att testa reläskydd. Den information som fås genom registrering av verkliga jordfel är ovärderlig, eftersom många felförlopp är komplexa, och näppeligen går att fundera ut och simulera. Störningsregistreringar kan användas för att testa specifika skyddsfunktioner, till exempel den transientmätande funktionen. Uppspelning av mer komplexa förlopp med övergående fel, kan med fördel användas för att samtidigt testa flera av skyddets funktioner. Exempelvis kan både det riktade och oriktat jordfelsskyddet, provas genom uppspelning av registreringar där ett enkelt jordfel utvecklas till ett dubbelt jordfel (cross country).

Fler störningsregistreringar från fler nät med olika uppbyggnad för att få med olika näts beteenden vid jordfel borde läggas till för att få mer bredd i provningen av skydd. Som tidigare nämnt i avsnitt 3.1 skall omsättning på strömtransformatorn tas i beaktan vid störningsuppspelning. Detta för att inställningarna i det riktade och det oriktade jordfelssteget skall vara rätt. Detta har inte gjorts i arbetet men eftersom några helautomatiska provningar inte har utförts utan de intermittenta och övriga proven har kontrollerats manuellt så har det inte inneburit något problem. Ett sätt att ta hänsyn till skillnaden i omsättning skulle kunna vara att välja en referensomsättning som skall gälla för uppspelningen och sedan skala varje uppspelning utifrån referensen. Nackdelen är då att sekundärströmmen vid olika strömtransformatorer i nätet skalas om jämfört med den verkligt uppmätta vilket gör transientmätningen för till exempel ABB REF615 mindre realistisk. Anledningen är att transientmätningen i det skyddet saknar inställningar och således är det den verkliga sekundära strömmen som borde användas.

För mer automatiska testningar av skydd måste också alla störningsregistreringar ha olika klassificeringar, till exempel storlek på aktiv ström som skydd bör lösa för etc.

6.2 Provutrustning

Mycket tid och kraft har lagts på att få provutrustningen att utnyttja hårdvarans prestanda. Resultatet har blivit en provutrustning som kan spela upp både sinussignaler och transienter med tillräcklig precision för en tillförlitlig provning av reläskydd. All mätdata och alla inställningar sparas vid testningen, både för uppspelningen och för reläskyddet. Detta ger fullständig dokumentation för att kunna repetera proven.

DC-komponenten som kan uppkomma vid uppspelningen skall inte påverka transientmätningen eller grundtonsmätningen nämnvärt. Uppspelningen av de intermittenta jordfelen för ABB RXHL421 fungerade inte vilket sannolikt berodde på att strökapacitans gjorde så att spänningen på ingångarna startade modulens överspänningskydd. Detta skulle kunna lösas genom att använda en annan modul med isolerade kanaler.

6.3 Utförande av reläprovning

Provningen av RXHL421 visade att de riktade jordfelssteget fungerade i stort sett korrekt enligt de inställda parametrarna, skillnaderna låg på högst 3-4 %. Skyddet klarade av mäta korrekt för att uppfylla startkriterierna under ändring i frekvens på uppemot ± 4 Hz. Vid mätning av funktionsområdet visa det sig dock att skyddet vid normal spolinställning och stor kapacitiv felström för felbehäftad utmatning tappar något i känslighet. Avvikelsen skulle kunna vara ett försök att minska risken för sympatiutlösningar på grund av vinkelfel i mätning och vid intermittenta jordfel då resonanskretsen laddas ur.

Vid provningen av REF615 klarade det riktade jordfelssteget sig utmärkt förutom vid prov av funktionsområdet. Skyddet klarade också av att mäta korrekt under ändring i frekvens på uppemot ± 8 Hz. I den första kvadranten av funktionsområdet var skyddet något okänsligare än för den fjärde kvadranten. Avvikelsen i den fjärde kvadranten vid normal spolinställning innebär att skyddet blir något känsligare vid enfasiga jordfel. Hur mycket mer känslig skyddet blir beror främst på den felbehäftade utmatningens kapacitiva felström.

Det är svårt att dra några direkta slutsatser av transientmätningen mer än att skyddet inte startar för alla uppspelade transienter. Några andra tillverkares transientmätande funktioner har inte heller testats vilket ger än mindre underlag för jämförande slutsatser. Det är också okänt vilka inställningar som ABB gjort för transientmätningen då de är internt ställda och inte går att ändra.

Testet av intermittentfunktionen visar att transientfunktionen är att föredra. Enda anledningen till att använda intermittentfunktionen är att den endast löser för intermittenta jordfel. Fördelen är att användaren direkt får information att utlösningen orsakades av ett intermittent jordfel. Det är dock bättre att skyddet verkligen löser selektivt än att NUS:et löser.

De övriga testerna visar att skyddets riktade och oriktade funktion fungerar enligt inställningarna. Det visar också att återställningstiden för det riktade jordfelsskyddet kan vara avgörande för att undvika obefogad utlösning av NUS:et. En för kort återställningstid för det riktade jordfelsskyddet, kan göra att dess trip-räknare nollställts upprepade gånger under ett intermittent fel, vilket ökar risken för att NUS:et

löser först. Användning av återställningstid skulle dock kunna öka risken för sympatiutlösningar

7 Fortsatt arbete

Då möjlighet att prova reläskydd nu finns i DLAB så finns det flera saker som skulle kunna förbättras och undersökas.

- Fler störningsskrivare och längre mättid ökar antalet registrerade störningar, vilket utökar testbiblioteket för reläprovning.
- En del förbättringar av provutrustningen skulle kunna utföras, till exempel så skulle en mätmodul från National Instruments kunna ersätta ljudkortet för att få mer synkrona mätningar. En modul med isolerade kanaler för mätning av uppspelade signaler. Mer stöd för automatiska uppspelningar och utvärderingar av resultatet.
- Fler reläskydd borde provas, framförallt för att kunna jämföra de olika tillverkarnas transientmätande funktion.

8 Referenser

- [1] IEEE, *IEEE Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems - Part 1: Introduction*, chapter 5, 2001.
- [2] M. Lethtonen, T. Hakola, *Neutral Earthing and Power System Protection – Earthing Solutions and Protective Relaying in Medium Voltage Distribution Networks*, Vaasa: ABB Transmit Oy, 1996.
- [3] C. Wagner, R. Evans, *Symmetrical components*, New York and London, USA: McGraw-Hill Book Company, 1933.
- [4] J. D. Glover, M. Sarma and T. J. Overbye, *Power System Analysis and Design*, Thomson Learning, International Student Edition (4rd), 2008.
- [5] J. Dahlquist, *Studie samt implementation av intermittenta jordfel i DLAB*, examensarbete IEA, LTH, TEIE-5273.
- [6] D. Larsson, T. Ericsson, *Intermittenta Jordfel i Kablifierade Distributionsnät*, examensarbete, KTH, 2009.
- [7] A. Jönsson, C. Örndal, *Automatik för avstämning av Petersenspöle*, examensarbete IEA, LTH, TEIE-5264.
- [8] S. Hutter, *Earthing system evaluation and influence on protection performance in resonantly earthed MV networks*, 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2009.
- [9] C. A. Ruiz, N. J. Orrego, and J. F. Gutierrez, *The Colombian 2007 black out*, Proc. IEEE/Power Eng. Soc. Transmission and Distribution Conf. Expo.: Latin America, pp. 1–5, 2008.
- [10] C. Örndal, A. Jönsson and M. Akke, *Rapid prototyping of smart high-end fault recorder for distribution network*, to appear at PACWorld Conference 2011, Dublin.

9 Bilagor

Bilaga A

Tabell 1 ABB RXHL421 provinställningar

Jordfelsfunktion DEFLPDEF	Provning av grundtonsfunktion
Operation	ON
Start value	8 mA
Operation mode	$\cos(\varphi)$
Voltage start value	11 V
Operate delay time	2000 ms
Directional mode	UniDir
Reset delay time	0 ms

Bilaga B

Tabell 2 ABB REF615 provinställningar

Jordfelsfunktion DEFHPDEF	Provning av grundtons- funktion	Provning med uppspelning av transienter	Provning med uppspelning av intermittenta jordfel	Övriga prov
Operation	ON	ON	ON	ON
Measurement mode	DFT	DFT	DFT	DFT
Start value	1000 mA	1000 mA	1000 mA	1000 mA
Operation mode	Ph angle	Ph angle	Ph angle	Ph angle
Directional mode	Non-dir	Non-dir	Non-dir	Non-dir
Operation curve type	DT	DT	DT	DT
Reset delay time	0 ms	0 ms	0 ms	0 ms
Operate delay time	1000 ms	1000 ms	1000 ms	1000 ms
Enable voltage limit	False	False	False	False
Characteristic angle	0	0	0	0
Correction angle	0°	0°	0°	0°
kValue	0	0	0	0
Voltage start value	11	11	11	11
DEFLPDEF				
Operation	ON	ON	ON	ON
Measurement mode	DFT	DFT	DFT	DFT
Start value	8 mA	8 mA	8 mA	8 mA
Operation mode	cos(φ)	cos(φ)	cos(φ)	cos(φ)
Directional mode	Forward	Reverse	Reverse	Reverse
Operation curve type	DT	DT	DT	DT
Reset delay time	0 ms	0 ms	0 ms	0 ms
Operate delay time	500 ms	2000 ms	2000 ms	2000 ms
Enable voltage limit	True	True	True	True
Characteristic angle	0	0	0	0
Correction angle	2°	2°	2°	2°
kValue	0	0	0	0
Voltage start value	11	11	11	11
INTRPTEF				
Operation	ON	ON	ON	ON
Operation mode	Transient EF	Transient EF	Transient EF och senare Intermittent EF	Transient EF
Directional mode	Reverse	Reverse	Reverse	Reverse
Reset delay time	500 ms	500 ms	500 ms	500 ms
Peak counter limit	2	2	2	2
Operate delay time	2000 ms	2000 ms	2000 ms	2000 ms
Voltage start value	6,6 V	6,6 V	6,6 V	6,6 V

Bilaga C

Inställningar för transient- och intermittenfunktionen (INTRPTEF) i ABB REF615

Nedan följer beskrivning av de olika variablerna som skall ställas in vid aktivering av funktionen:

Operation [ON,OFF]

Aktivering av funktionen

Directional mode [Non-directional, Forward, Reverse]

Bestämmer riktningen för detektering av transienter. Vid forward skall spänning och ström öka med samma derivata vid transient. Vid reverse skall spänning och ström öka med motsatt derivata. Vid non-directional är riktningen för spänning och ström inget kriterie för transientdetektering.

Operate delay time [40...1200000 ms]

Tidsfördröjning av trip, hur den används beror på val av Operation mode.

Voltage start value [0.01...0.5 x Un, Un = 110]

Startvärde för nollpunktsspänning. Endast för Transient EF.

Reset delay time [0...60000 ms]

Återgångstid innan nollställning av trip-räknare. Användningen beror på val av operation mode.

Peak counter limit [2...20]

Antal transienter innan trip-räknare aktiveras. Endast för Intermittent EF.

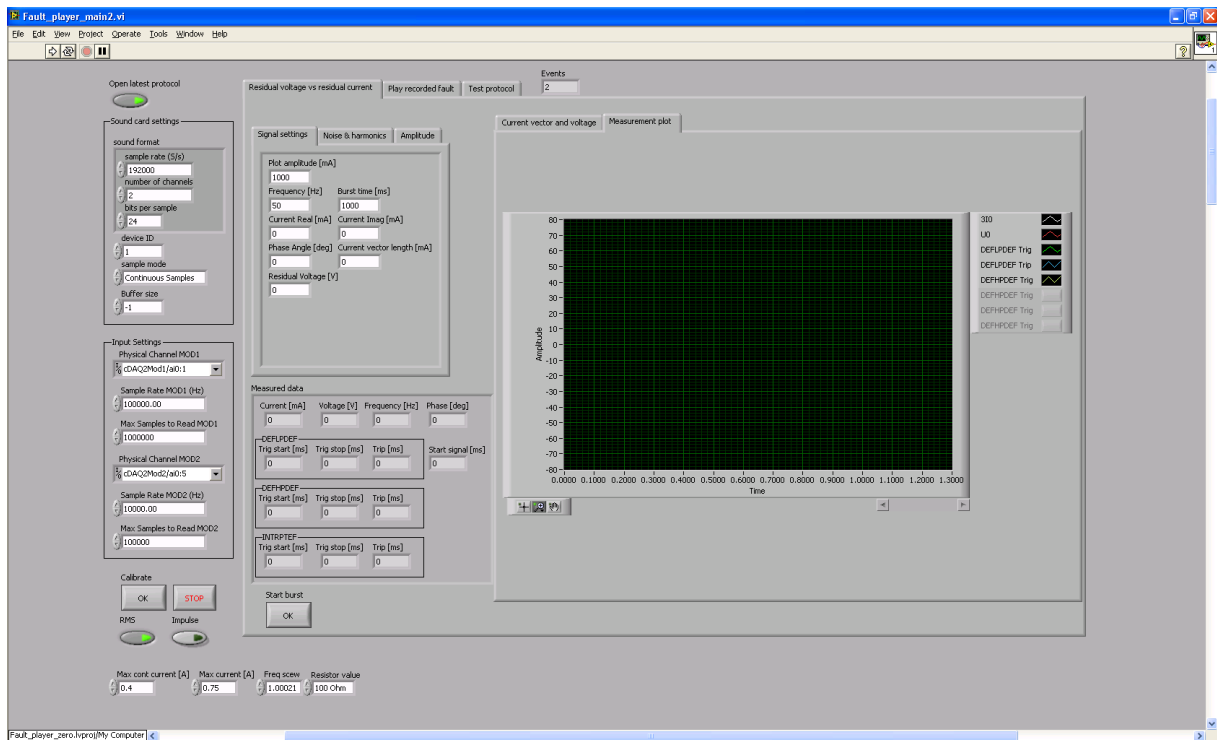
Operation mode [Transient EF, Intermittent EF]

Två olika huvudinställningar, Intermittent EF är tänkt för kabelnät och Transient EF för luftledning/blandnät.

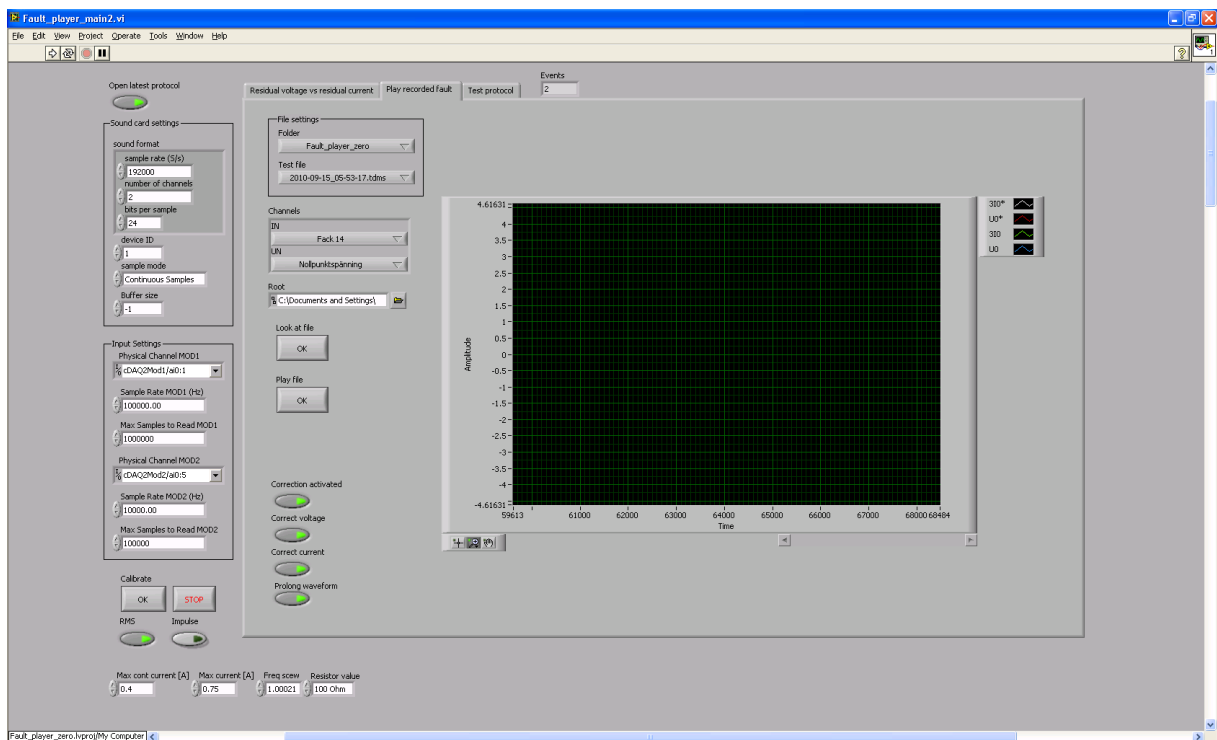
Transient EF: Skyddet ställs in för att vid första detekterade transient starta trip-räknaren. Första transienten kommer också att låsa riktningen för transientfunktionen under ett fel. Trip-räknaren kommer att räkna upp så länge nollpunktsspänningen överskrider Voltage start value. Skulle spänningen underskrida startvärdet slutar trip-räknaren uppräknningen och en annan annan räknare startar. Skulle den andra räknaren nå Reset delay time innan nollpunktsspänningen går över startvärdet nollställs trip-räknaren. Riktningen nollställs samtidigt som trip-räknaren.

Intermittent EF: Peak counter value bestämmer hur många transienter som måste detekteras innan trip-räknaren startar. Skulle skyddet detektera en transient som har fel riktning mot inställningen räknar skyddet ner antal detekterade transienter. För att inte trip-räknaren eller antal detekterade transienter skall nollställas måste nya transienter detekteras innan Reset delay time har räknats upp.

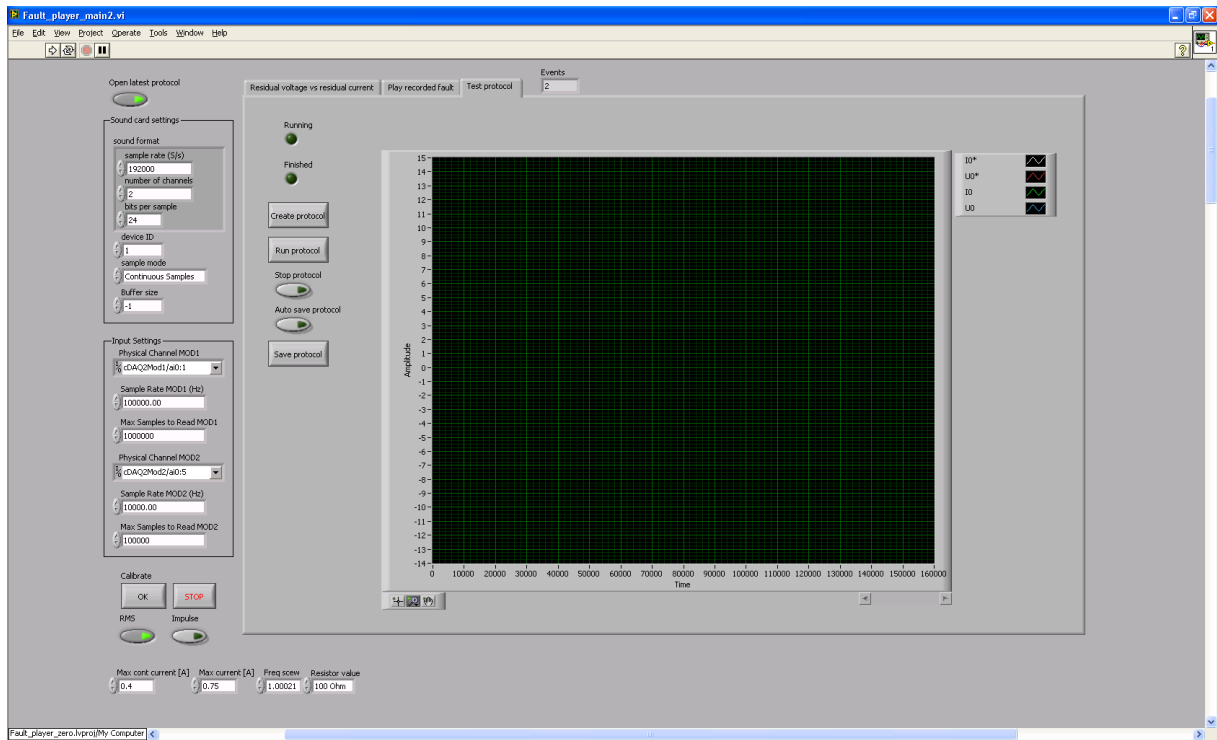
Bilaga D



Bilaga D 1 Frontpanel datorgenererade sinussignaler



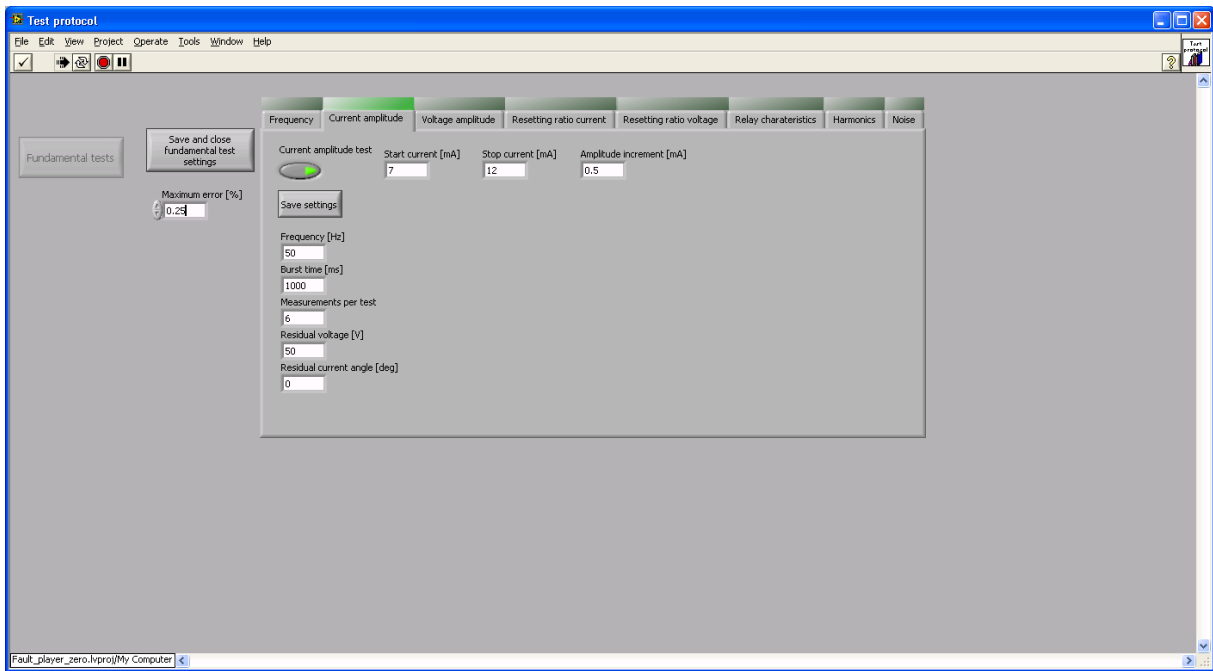
Bilaga D 2 Frontpanel uppdelning av störningsregistrering



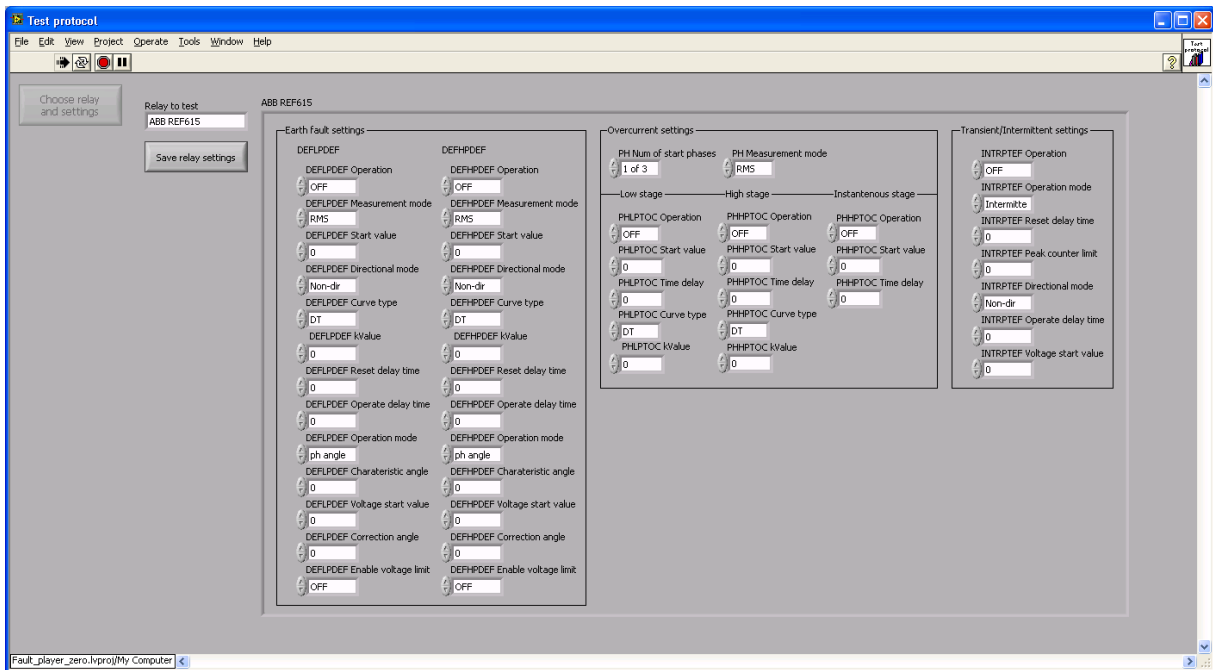
Bilaga D 3 Frontpanel provning med test protokoll



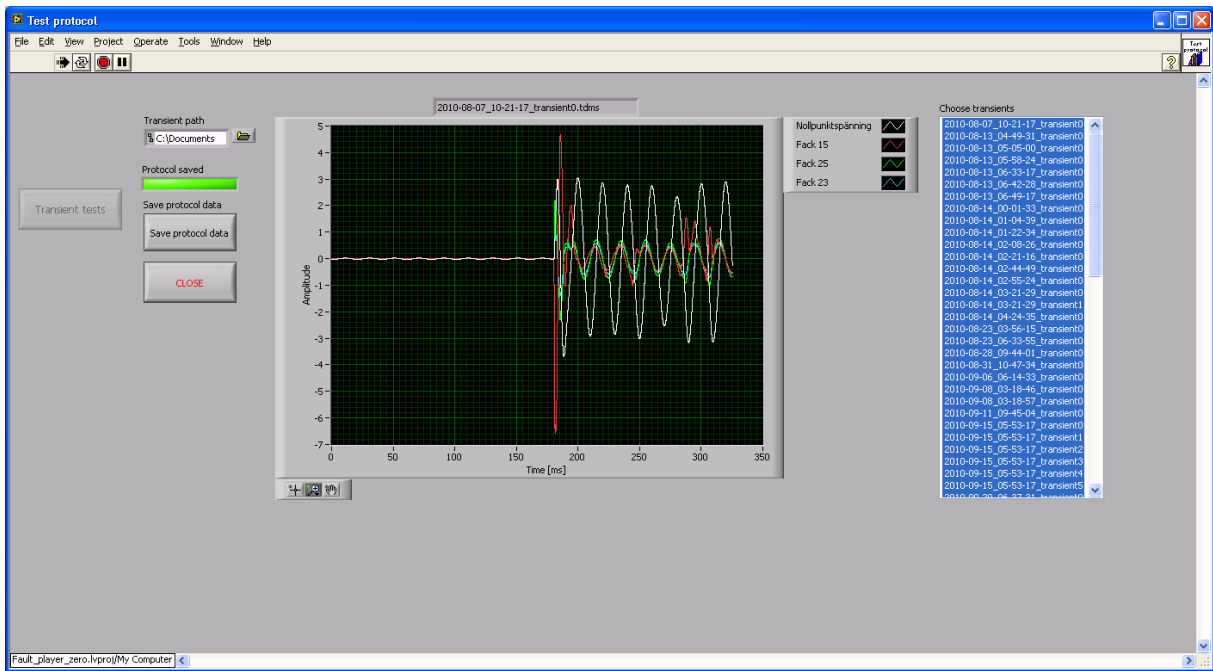
Bilaga D 4 Frontpanel för testprotokoll generering



Bilaga D 5 Testprotokoll, val av grundtonsuppspelnings prov



Bilaga D 6 Testprotokoll, inställningparametrar i valt reläskydd



Bilaga D 7 Testprotokoll, val av transienter ur testbibliotek