

Studie samt implementation av intermittenta jordfel i DLAB



Jimmy Dahlquist

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

Studie samt implementation av intermittenta jordfel i DLAB

Jimmy Dahlquist

Oktober 2010

Handledare:
Magnus Akke, LTH
Anna Pettersson, E.ON Elnät

Examinator:
Olof Samuelsson



LUNDS UNIVERSITET
Lunds Tekniska Högskola

Master's Thesis
Division of Industrial Electrical Engineering and Automation

Abstract

The division of Industrial Electrical Engineering and Automation at LTH is running the research project DLAB, sponsored by E.ON Elnät Sverige AB. The purpose of the DLAB project is to highlight the issues regarding increased cablification of the Swedish medium voltage i.e. 10-20 kV distribution grid.

Certain kinds of faults, caused by faulty cable joints or cracks in the insulation, may cause a sequence of ignitions of earth faults. These faults are called intermittent earth faults and usually contains several transients. This thesis aims to increase the understanding of these intermittent earth faults as well as implementing them in DLAB.

Fault recordings from intermittent earth faults are studied and the line models present in DLAB are deemed insufficient. The line models need upgrading to better reproduce the frequency contents of intermittent earth faults. Different methods of modeling lines are studied and new line models are implemented using π -links. The software, based on LabVIEW programming, is also upgraded to calculate and control the intermittent earth faults.

Finally the faults modeled in DLAB are compared to the fault recording and the new models are considered to reproduce the main features of intermittent earth faults.

Sammanfattning

På avdelningen för industriell elektroteknik och automation, IEA, vid LTH drivs forskningsprojektet DLAB, finansierat av E.ON Elnät Sverige AB. Syftet med projektet är att bygga upp ett elkraftslaboratorium som kan illustrera de viktigaste problemställningarna ökande kablifiering av svenska mellanspänningsnät leder till.

Vissa typer av fel, exempelvis i kabelskarvar eller sprickor i isolatorer, kan ge en sekvens med släckningar och återtändningar av jordfel. Denna typ av fel kallas intermittenta jordfel och innehåller vanligtvis en stor andel transienter. Detta examensarbete syftar till att öka förståelsen för de intermittenta jordfelen samt implementera dem i DLAB.

Störningsregistreringar av intermittenta jordfel har undersökts och nuvarande ledningsmodeller i DLAB visar sig behöva uppgraderas för att bättre återskapa frekvensinnehållet i intermittenta jordfel. Olika metoder för att modellera ledningar undersöks och nya ledningsmodeller konstrueras baserat på π -länkar. Dessutom uppgraderas LabVIEW mjukvaran som styr DLAB så att den kan beräkna och återskapa sekvenser med intermittenta jordfel.

Slutligen jämförs de fel som modelleras i DLAB med störningsregistreringar och modellen anses återskapa huvuddragen av intermittenta jordfel.

Förord

Detta examensarbete har utförts på Lunds Tekniska Högskolan som en del av forskningsprojektet DLAB. Arbetet är den avslutande delen av min civilingenjörsutbildning och har utförts på avdelningen för Industriell Elektroteknik och Automation i samarbete med E.ON Elnät, från både institutionen och E.ON Elnät har jag fått mycket stöd och jag vill särskilt tacka:

- **Magnus Akke**, min handledare på institutionen, tack för många viktiga kommentarer och stöd under arbetet.
- **Anna Pettersson**, min handledare från E.ON Elnät, tack för all hjälp med information om dagens system samt vägledning under projektets gång.
- **Getachew Darge**, tack för all hjälp med praktiskt arbete och inköp, du har besparat mig otaliga timmars arbete.
- **Andreas Jönsson** och **Christoffer Örndal**, tack för all hjälp med det befintliga DLAB, både mjukvaran och hårdvaran.
- Övriga på institutionen och från E.ON Elnät som på något sätt varit inblandade och bidragit till arbetet.

Innehållsförteckning

Kapitel 1 - Inledning.....	7
1.1 Bakgrund.....	7
1.2 Syfte.....	7
1.3 Disposition.....	7
Kapitel 2 - DLAB.....	9
2.1 Projektet DLAB.....	9
2.2 Försökupställningen i DLAB.....	9
2.3 Omvandling från DLAB till mellanspänningsnät.....	11
Kapitel 3 – Intermittenta jordfel.....	13
3.1 Vad innebär intermittent jordfel.....	13
3.2 Fältmätningar av intermittenta jordfel.....	14
3.3 Frekvensinnehåll.....	17
Kapitel 4 – Ledningsmodeller.....	19
4.1 Modelleringsmetoder.....	19
Kapitel 5 – Implementering.....	25
5.1 Ledningsmodeller.....	25
5.2 Intermittenta jordfel.....	27
Kapitel 6 – Resultat.....	31
6.1 Ledningsmodeller.....	31
6.2 Intermittenta jordfel.....	33
Kapitel 7 – Slutsatser.....	41
7.1 Nya DLAB uppställningen.....	41
7.2 Slutsatser intermittenta jordfel.....	42
7.3 Slutsatser ledningsmodeller.....	42
7.4 Slutsatser implementering.....	42
Kapitel 8 – Fortsatt arbete.....	45
Litteraturförteckning.....	47
Bilagor.....	49

Kapitel 1 - Inledning

Detta kapitel beskriver bakgrund och syfte till arbetet och rapportens disposition går igenom.

1.1 Bakgrund

På avdelningen för industriell elektroteknik och automation, IEA, vid LTH drivs forskningsprojektet DLAB. DLAB är en förkortning för Distribution LABORatory och finansieras av E.ON Elnät Sverige AB (i fortsättningen kallat E.ON). Syftet med projektet är att bygga upp ett elkraftslaboratorium som kan illustrera de viktigaste problemställningarna som uppkommer vid ökande kablifiering av svenska mellanspänningsnätet.

Spoljordade mellanspänningsnät, 10-20 kV, med stor andel kablar är ett mycket aktuellt område. E.ON har de senaste åren med investeringsprogrammet Krafttag förbättrat driftsäkerheten i mellanspänningsnäten genom omfattande kablifiering.

Vissa typer av fel, exempelvis i kabelskarvar eller i sprickor på isolatorer, kan ge ett förlopp med en sekvens av släckningar och återtändningar av jordfel. Detta kallas intermittent jordfel och innehåller vanligtvis en stor andel transienter.

1.2 Syfte

Reläskydd är oftast gjorda för att mäta grundtonen och kan ha problem att fungera korrekt vid intermittenta jordfel. Speciellt riktade strömmätande jordfelsskydd har problem. Dessa problem resulterar i en icke selektiv reservutlösning via nollpunktspänningskyddet som kopplar från hela stationen.

Detta examensarbete syftar till att öka förståelsen för intermittenta jordfel och dess inverkan på felbortkoppling. För att på sikt få bättre möjlighet att utvärdera och analysera ledningsskydds jordfelsfunktion kommer det inom detta arbete implementeras modeller för att återskapa och studera intermittenta jordfel i försöksuppställningen i DLAB.

1.3 Disposition

Detta avsnitt beskriver rapportens uppbyggnad. Rapporten är uppdelad i 7 kapitel men observera att dispositionen inte nödvändigtvis korrelerar med arbetsgången.

- **Kapitel 2** innehåller en beskrivning av originaluppställningen i DLAB

- **Kapitel 3** beskriver mer ingående vad intermittenta jordfel är och ger exempel på hur de kan uppstå. Resultat från fältmätningar visas och frekvensinnehållet i ett intermittent jordfel analyseras.
- **Kapitel 4** presenterar de olika modelleringsmetoder för ledningar som används till implementationen av de nya ledningsmodellerna.
- **Kapitel 5** beskriver hur teori och undersökningar använts för att fysiskt implementera de intermittenta jordfelen och ledningsmodellerna i DLAB. Den LabVIEW kod som producerats beskrivs.
- **Kapitel 6** visar hur de implementerade ledningsmodellerna skiljer sig från de ledningsmodeller som använts tidigare. Modellen för intermittenta jordfel jämförs med uppmätta jordfel i distributionsnätet.
- **Kapitel 7** sammanfattar de viktigaste slutsatserna som kan dras av arbetet. Slutsatser för både ledningsmodeller och intermittenta jordfel presenteras.
- **I kapitel 8** ges slutligen förslag på vidare arbete inom DLAB projektet.

Kapitel 2 - DLAB

Detta kapitel beskriver försöksuppställningen som används i projektet DLAB. Uppställningens funktioner beskrivs endast kortfattat och den mer intresserade läsaren hänvisas till (Jönsson, Örndal 2009).

2.1 Projektet DLAB

I ett försök att belysa eventuella problem som uppstår vid ökad kablfiering av distributionsnät har LTH och E.ON ingått ett samarbete i DLAB. DLAB är en förkortning för Distribution LABORatory. Målsättningen är att skapa såväl teoretisk som praktisk kunskap inom området. I detta arbete har DLAB använts för att återskapa och undersöka intermittenta jordfel. Bild 1 visar DLABs utseende vid arbetets start. I vit ruta syns ledningsmodeller och i svart ruta kopplingsplintar.

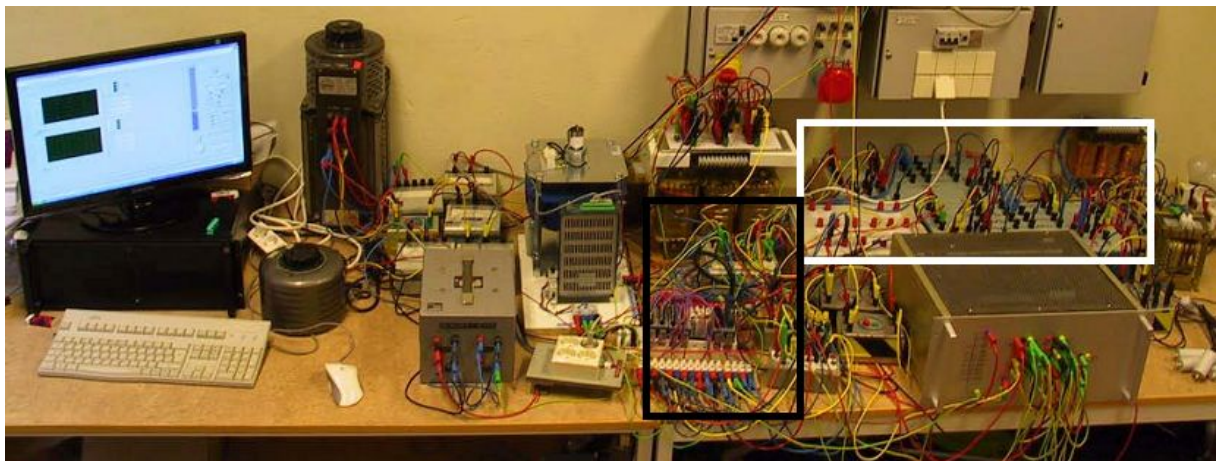
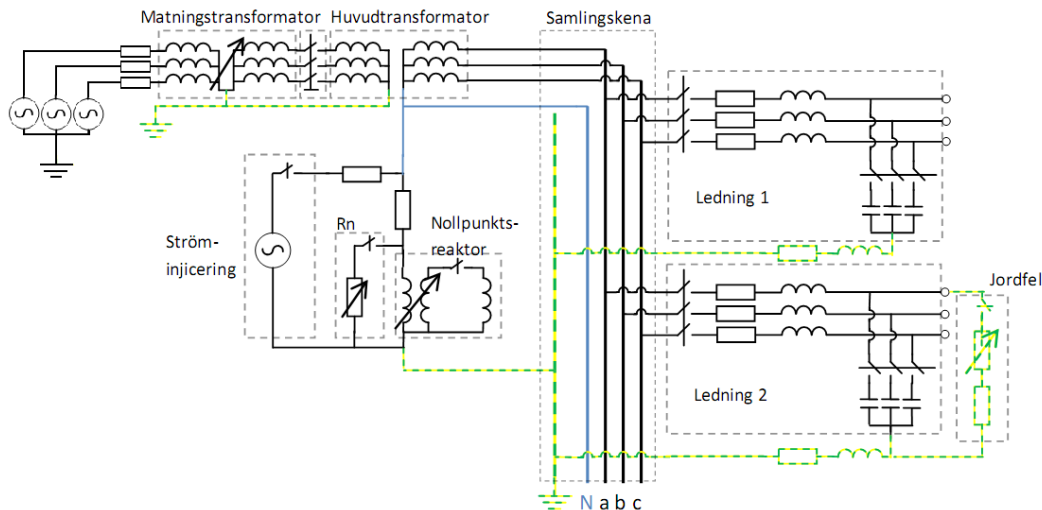


Bild 1: DLAB

2.2 Försöksuppställningen i DLAB

Försöksuppställningen är designad för att efterlikna ett distributionsnät med utmatningar, samlingskena, transformator och nollpunktsutrustning. Figur 1 visar kopplingschemat över DLAB vid arbetets start.



Figur 1: Kopplingschema DLAB, gröna ledningar symboliserar jord

2.2.1 Ledningsmodeller

De två ledningsmodeller som tidigare använts består av en halv π -länk per ledning eftersom det endast ansluts kapacitanser i slutet. Dessa modeller behöver uppgraderas för att bättre modellera ledningars beteende vid hög frekvens. Mer om detta i kapitel 4.

2.2.2 Nollpunktsreaktor

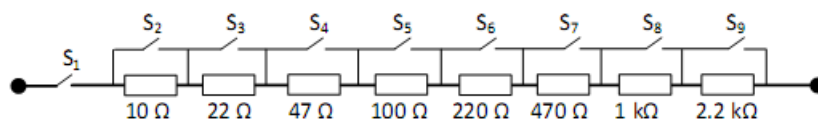
I uppställningen består nollpunktsreaktorn av en fast spole vars kompenseringnivå styrs med hjälp av en vridtransformator. Spolen kan generera en maximal kompenseringström i DLAB på 9 A vilket motsvarar en reaktor med cirka 300 A kompenseringström i ett 12 kV system.

2.2.3 Automatavstämning

Genom att injicera en ström och undersöka inverkan på nätet kan nollpunktsreaktorn automatiskt ställas in för att ge korrekt kompenseringström. Uppställningen använder sig av CDC, Compensated Direct Calculation, metodik för att automatiskt kompensera för förändringar i nätet (Jönsson, Örndal 2009).

2.2.4 Jordfel

Sedan tidigare finns en modul designad för att ansluta jordfel med varierbart motstånd. Jordfelet kan varieras från 0 till 4069 Ω i 256 steg med hjälp av åtta elektromekaniska reläer, med beteckning S2-S9 i Figur 2, jordfelet kopplas till och från med halvledarreläet S1.



Figur 2: Jordfelsanslutning

2.2.5 Mätutrustning

För att i realtid mäta i uppställningen används National Instruments modulbaserade system CompactDAQ. Systemet är samlat i bakplanet cDAQ-9172 som via USB för över data till PC och mjukvaran LabVIEW. De moduler som används i projektet är

- **NI 9239** som är en modul med fyra analoga ingångar som samplar data med 24 bitars upplösning i 50 kHz. Totalt fyra NI 9239 är anslutna för samtliga mätningar.
- **NI 9264** som är en modul med 16 analoga utgångar. Denna modul används för att bland annat styra nollpunktsreaktorns kompensering.
- **NI 9477** som är en modul med 32 digitala utgångar. Modulen används för styrning av bland annat alla reläer i uppställningen.

2.2.6 LabVIEW

I projektet DLAB används National Instruments egen mjukvara LabVIEW. LabVIEW är ett grafiskt programmeringsverktyg som genom ett stort bibliotek av färdiga block tillåter kort utvecklingstid. LabVIEW kan användas utan några förkunskaper inom programmering av logiska kretsar exempelvis FPGA.

2.3 Omvandling från DLAB till mellanspänningsnät

Eftersom försök på mellanspänningsnivåer är svårt och medför stora risker har DLAB skalats ned till en lägre spänningsnivå. Med regelverk och förenklad konstruktion i åtanke har DLAB designats för att drivas med 220 V och 5 A.

För att kunna relatera resultat i DLAB med mellanspänningsnätet behöver omvandlingsfaktorer beräknas. Basimpedansen fås av (2.1)

$$Z_{bas} = \frac{U}{\sqrt{3} \times I} \quad (2.1)$$

Dessutom behövs förhållandet:

$$\frac{Z_{EON}}{Z_{bas_{EON}}} = \frac{Z_{DLAB}}{Z_{bas_{DLAB}}} \rightarrow \frac{1}{j\omega C_{EON}} = \frac{1}{j\omega C_{DLAB}} \text{ samt } \frac{j\omega L_{EON}}{Z_{bas_{EON}}} = \frac{j\omega L_{DLAB}}{Z_{bas_{DLAB}}} \quad (2.2)$$

där index EON innebär mellanspänningsnivå. Med (2.1) och (2.2) är det möjligt att beräkna

omvandlingsfaktorer för att gå från DLAB nivå till mellanspänningsnivå.

Förutsatt att mellanspänningsnätet har en spänning på 12 kV och en ström på 100 A ger (2.1) att $Z_{bas_{EON}}$ är 69.3 Ω och $Z_{bas_{DLAB}}$ är 25.4 Ω .

C_{DLAB} och L_{DLAB} i förhållande till C_{EON} och L_{EON} kan beskrivas enligt

$$C_{DLAB} = \frac{Z_{bas_{EON}}}{Z_{bas_{DLAB}}} \times C_{EON} = 2.73 C_{EON}$$

$$L_{DLAB} = \frac{Z_{bas_{DLAB}}}{Z_{bas_{EON}}} \times L_{EON} = 0.37 L_{EON}$$

Omvandlingsfaktorer som används i denna rapport sammanfattas i Tabell 1

Tabell 1: Omvandlingsfaktorer

Storhet	Omvandlingsfaktor EON ► DLAB
Impedans	0.37
Kapacitans	2.73
Induktans	0.37

Om inget annat nämns anges enheter i denna rapport på DLAB bas.

Kapitel 3 – Intermittenta jordfel

Detta kapitel beskriver mer ingående intermittenta jordfel. Vad är ett intermittent jordfel och hur uppstår det? Resultat från fältmätningar visas och frekvensinnehåll identifieras.

3.1 Vad innebär intermittent jordfel

Ett intermittent jordfel är ett återkommande jordfel. Vanliga orsaker till denna typ av fel är bland annat svängningskretsar, på grund av jordning med central Petersenspole, och ljusbågar orsakade av trasiga eller skadade kablar. För ytterligare information se (Larsson, Ericsson 2009).

3.1.1 Jordning med central Petersenspole

En av de vanligaste jordningsmetoderna i det svenska mellanspänningsnätet är användandet av en central Petersenspole som ansluts mellan transformatorns nollpunkt och jord eller som en separat nollpunktsbildare. Syftet med Petersenspolen är att ge resonans mot nätets kapacitiva strömmar. Eftersom elnätets struktur är dynamisk och kan förändras beroende på kopplingsläge används ofta varierbara spolar där induktansen anpassas till den aktuella kapacitiva strömmen i nätet. Anpassningen kan göras genom användandet av till exempel automatavstämd spole med glidkärna (Jönsson, Örndal 2009, s.13).

Efter ett jordfel uppstår svängningar på grund av en parallell RLC-resonanskrets som bildas. Kapacitansen motsvaras av ledningarnas kapacitiva koppling mot jord, resistansen motsvarar nätets resistiva förluster och Petersenspolen står för induktansen i kretsen.

3.1.2 Ljusbågar

Ljusbågar uppstår när en spänning joniserar luft som därmed blir elektriskt ledande. En ljusbåge är mycket svår att bryta och därför förblir ljusbågen aktiv tills strömmen går mot noll. Denna typ av jordfel återfinns bland annat i kablar där skyddsisoleringen skadats eller i undermåliga kabelskarvar. När fasspänningen stigit till en hög nivå tänds en ljusbåge mellan fas och nolledare och när spänningen sjunkit igen slocknar ljusbågen. Att ljusbågen är återkommande gör att denna typ av fel anses vara ett typisk intermittent jordfel.

3.1.3 Ljusbågsmotstånd

En viktig aspekt för modellering av ljusbågar är det motstånd som ljusbågen motsvarar mellan fas och jord. Det finns framför allt tre empiriska framtagna modeller för att beräkna ljusbågsmotstånd; Warrington, Neugebauer och Westinghouse (Lindahl 1998).

Warrington:

$$R_f = \frac{28707 \times L}{I^{1.4}} \quad (3.1)$$

Neugebauer:

$$R_f = \frac{2500 \times L}{I} \quad (3.2)$$

Westinghouse:

$$R_f = \frac{1440 \times L}{I} \quad (3.3)$$

där L är längden i meter på ljusbågen och I är strömmen i ampere.

3.2 Fältmätningar av intermittenta jordfel

För att öka förståelsen för intermittenta jordfel har resultat från tidigare försök utförda inom DLAB projektet studerats samt nya mätningar utförts i samarbete med E.ON.

3.2.1 Utförande

Tre olika metoder för att studera intermittenta jordfel har använts. Två är baserade på att återskapa beteendet vid ett intermittent jordfel medan det tredje är mätningar av faktiska fel.

Den första metoden har utförts genom att borra hål i isolationen på en 10 kV kabel, vattenfylla hålet och spänningssätta kablenn.



Bild 2: Första metoden, sönderborrad 10 kV kabel

Fler försök att återskapa fel gjordes med metod två; ett gnistgap som anslöts mellan jord och fasledare. Genom att sakta minska avståndet i gnistgapet uppstod ljusbågar. Bild 3 visar uppställningen.

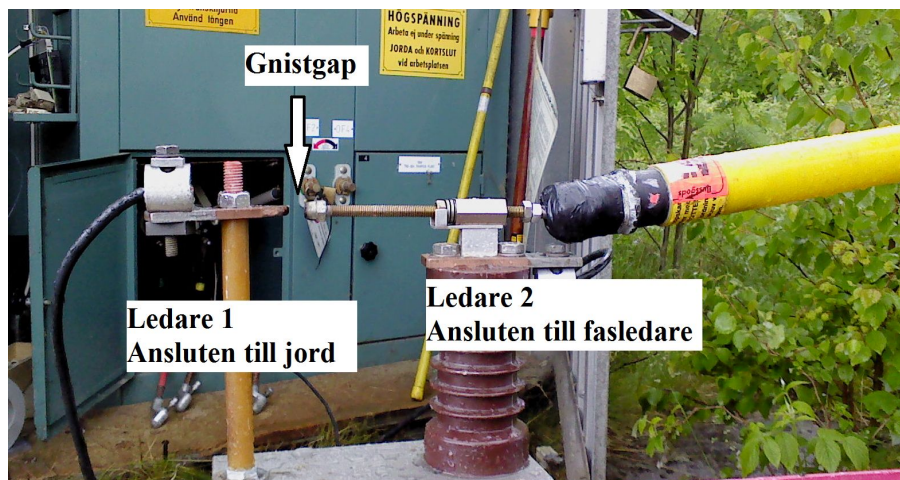


Bild 3: Andra metoden, gnistgap anslutet i 10 kV nätet

Fördelar med metoder baserade på återskapning av felen är att det går att kontrollera när felet sker och dessutom ha kontroll över omständigheterna vid felet. Nackdelar är att riktiga intermittenta fel är mycket mer oberäkneliga. Risken finns dessutom för att det intermittenta jordfelet tändes ett annat fel någon annanstans i nätet. Felen utfördes i närheten av ställverket och högfrekventa komponenter kan därför analyseras noggrant. Sker felen längre ut i nätet dämpas de eftersom den ökande kapacitansen till jord i kombination med ledningens serieinduktans agerar som ett lågpassfilter.

Den tredje metoden är studier av störningsskrivningar från riktiga intermittenta jordfel. Mätutrustning bestående av en CompactRIO från National Instruments används för att sampla förloppet med 50 kHz och 24 bitars upplösning. Fördelen med den tredje metoden är förstås att det ger mest rättvisande resultat. Nackdelen är dock att det inte går att veta när eller ens om något fel kommer att inträffa.

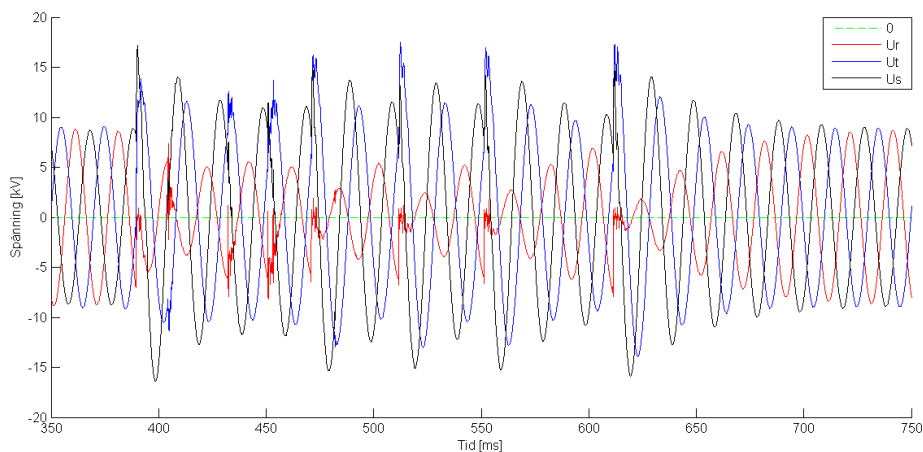
3.2.2 Mätresultat från fältmätningar

De resultat som visas här är exempel ifrån testerna utförda med sönderborrad kabel. Samma mätutrustning som den utplacerade störningsskrivaren i metod tre användes: en CompactRIO från National Instruments med 50 kHz samplingsfrekvens och 24 bitars upplösning. Resultaten anses därför vara noggrant uppmätta och representera felen bra.

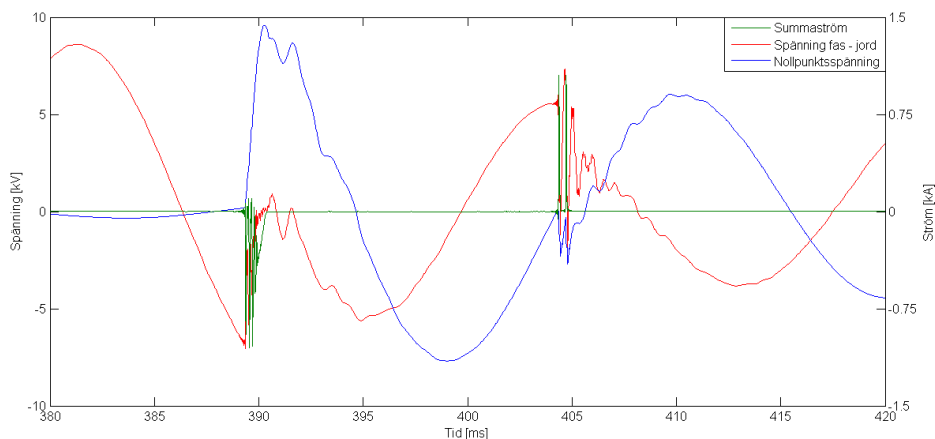
Som Figur 3 visar så tänds ljusbågen vid en hög spänning mellan fas och jord något som överensstämmer med teorin i 3.1.2. Ljusbågen slocknar snabbt och spänningen stiger tills den blir tillräckligt hög varpå ljusbågen tänds igen.

Det syns att jordfelen inte inträffar vid samma spänning varje gång utan spänningsnivån

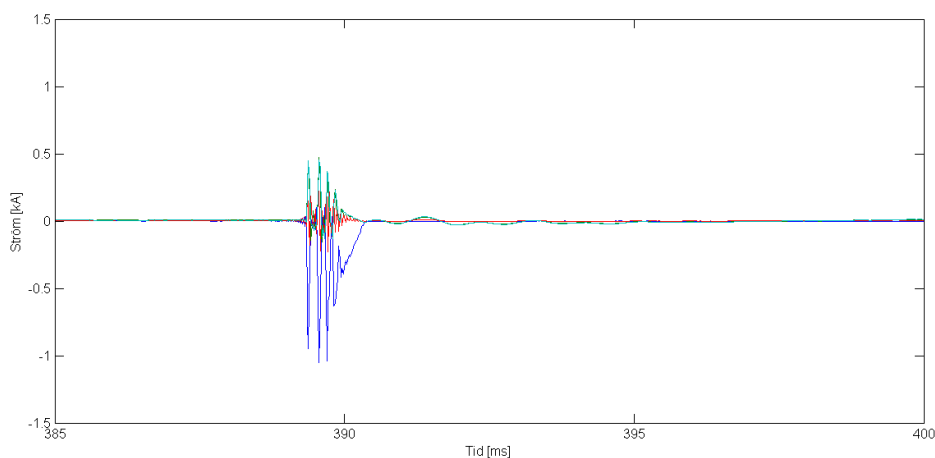
varierar. Jordfel uppstår inte heller i varje period. Detta slumpmässiga beteende i kombination med att det rör sig om högfrekventa störningar gör intermittenta jordfel svåra att detektera och korrekt koppla bort med traditionella skydd.



Figur 3: Spänningar mellan fas och jord, intermittent jordfel i fas R



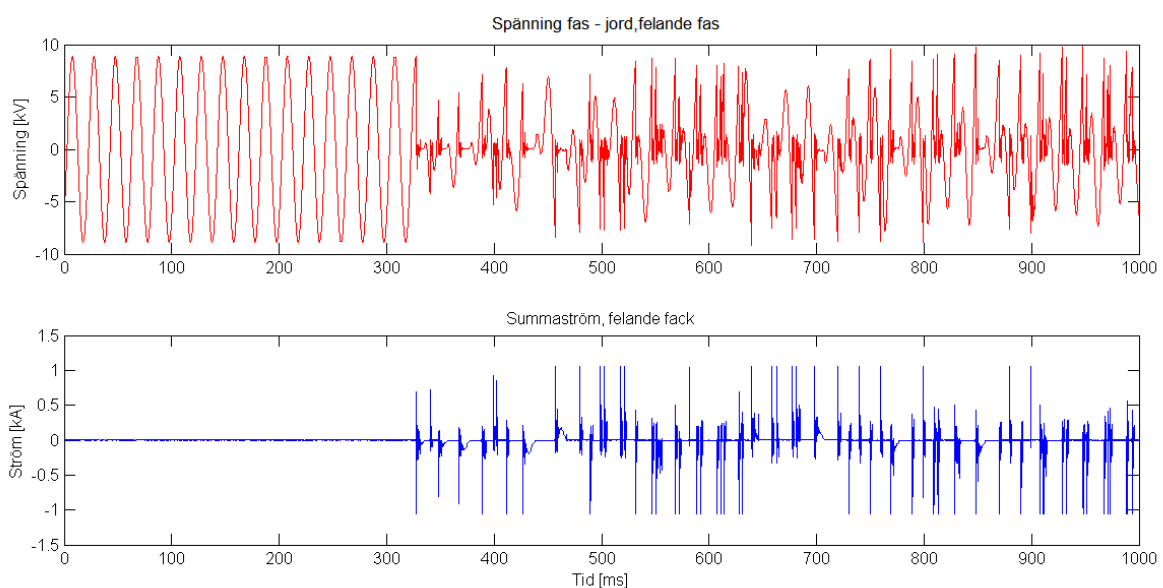
Figur 4: Spänning mellan felande fas och jord samt nollpunktsspänning och summaström i felande fack. Förstoring av förloppet i figur 3



Figur 5: Summaströmmar i felbehäftat fack (blå) samt friska fack vid ljusbåge

3.3 Frekvensinnehåll

I mätningarna syns tydligt att de intermittenta jordfelen innehåller högfrekventa, det vill säga över 50 Hz, komponenter. Med hjälp av fouriertransform kan frekvensinnehållet analyseras mer ingående. Figur 6 visar den störningsregistrering som analyseras där det intermittenta jordfelet fick fortsätta under en längre tid än i exemplet tidigare. Enbart den del av störningsskrivningen där felet är igång, 320 ms till 1 s, används till analysen eftersom den friska delen av störningsskrivningen mestadels tillför 50 Hz komponent till fouriertransformen.



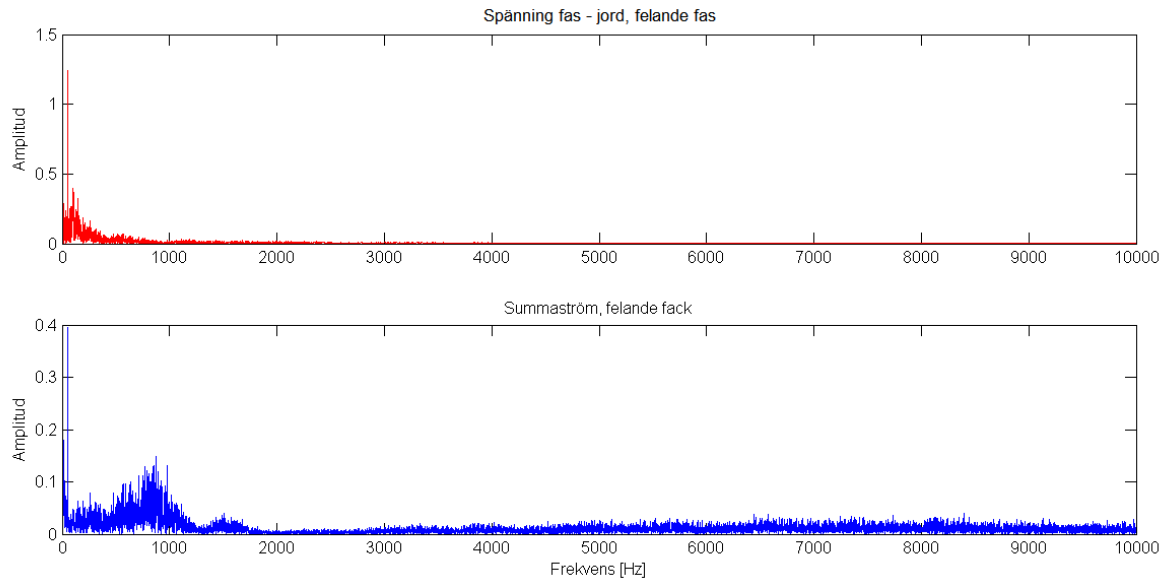
Figur 6: Störningsregistrering som användes för analys med fouriertransform

3.3.1 Fouriertransform

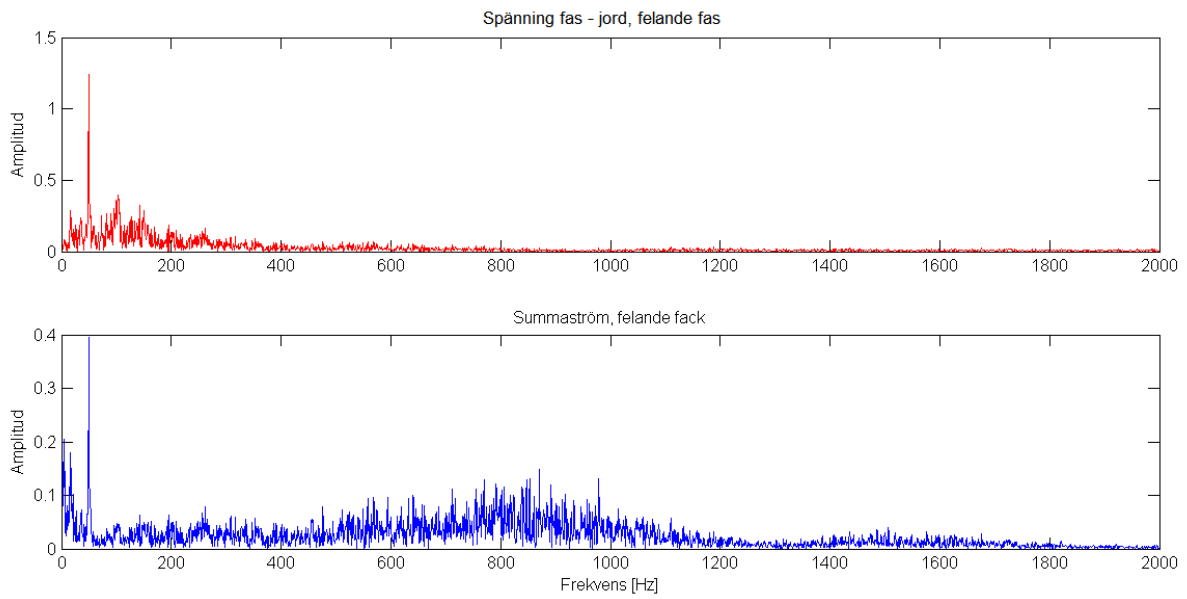
För att analysera frekvensinnehållet har MATLAB-funktionen FFT använts. Tack vare den höga samplingshastigheten på mätningen kan höga frekvenser studeras. Figur 7 - Figur 8 visar resultatet av fouriertransformen.

Spänningen mellan fas och jord innehåller frekvenser upp till ungefär 300 Hz med de högsta topparna på multipler av grundtonen, det vill säga övertonerna 100, 150 och 200 Hz. På grund av de snabba strömtransienterna innehåller summaströmmen högre frekvenser mestadels i regionen 100 - 1000 Hz.

Dessa resultat är viktiga för designen av ledningsmodeller som behandlas i kommande kapitel.



Figur 7: Fouriertransform



Figur 8: Fouriertransform, inzoomad

Kapitel 4 – Ledningsmodeller

Detta kapitel beskriver den teori som ligger bakom de nya ledningsmodeller som konstrueras till DLAB. Mer avancerade ledningsmodeller är viktiga för att kunna återskapa de transienter som intermittenta jordfel innehåller.

4.1 Modelleringsmetoder

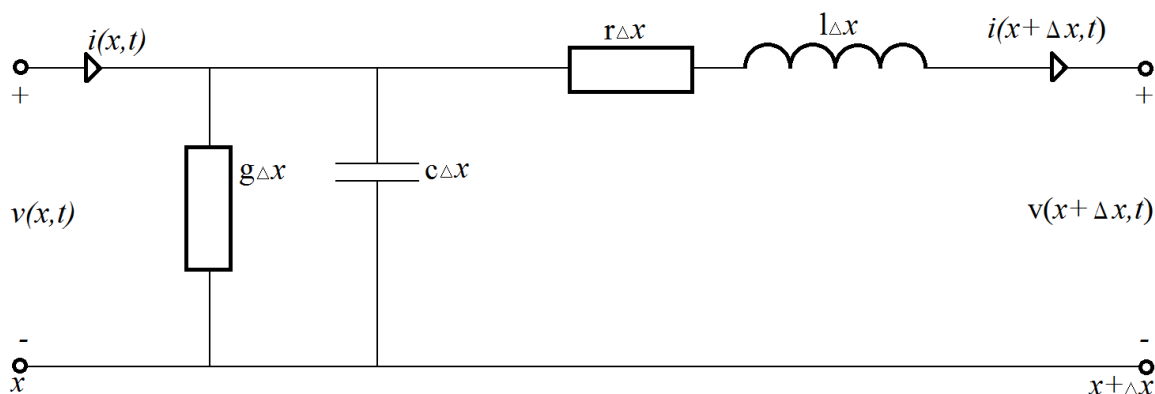
Det finns flertalet olika modelleringsmetoder som kan användas för distributionsledningar i detta arbete behandlas tre av dem:

1. Modellering med distribuerade parametrar
2. Distribuerade parametrar med strömförträngning
3. π -länkar

4.1.1 Distribuerade parametrar

I många modeller av distributionsledningar klumpas resistanser, kapacitanser och induktanser ihop för att förenkla beräkningar. Detta tillvägagångssätt är en användbar approximation så länge distributionsledningen kan anses vara mycket kortare än våglängden för intressanta frekvenser. När en distributionsledning blir längre kommer strömmen inte att vara densamma över hela ledningens längd och en modell med klumpade parametrar är inte längre giltig.

En modelleringsmetod som tar hänsyn till att resistans, kapacitans och induktans är spridd längs med distributionsledningen är den så kallade distribuerade parametrar modellen. Denna modell kan härledas genom att distributionsledningen delas upp i flera seriekopplade delar. Varje del beskrivs enligt Figur 9 där samtliga värden anges per längdenhet. g är läckkonduktansen [S/m], c är kapacitansen [F/m], l är induktansen [H/m] och r är resistansen [Ω /m].



Figur 9: Ledningsstycke mellan x och $x+\Delta x$

När Δx går mot noll erhålls en partiell differentialekvation som resulterar i sambandet (4.1) (Claesson, Eriksson, Mandersson, Salomonsson 1989 s.129-130). Formel (4.1) kan användas för att beskriva spänningar och strömmar i fyrpoler för godtyckliga insignaler.

$$\begin{bmatrix} V_{\text{sändare}} \\ I_{\text{sändare}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma d) & Z_0 \sinh(\gamma d) \\ \frac{1}{Z_0} \sinh(\gamma d) & \cosh(\gamma d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\text{mottagare}} \\ I_{\text{mottagare}} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

γ är utbredningskonstanten, d är distributionsledningens längd och Z_0 är karakteristiska impedansen.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{(r + j\omega l)}{(g + j\omega c)}} \quad (4.2)$$

$$\gamma = \sqrt{(g + j\omega c)(r + j\omega l)} \quad (4.3)$$

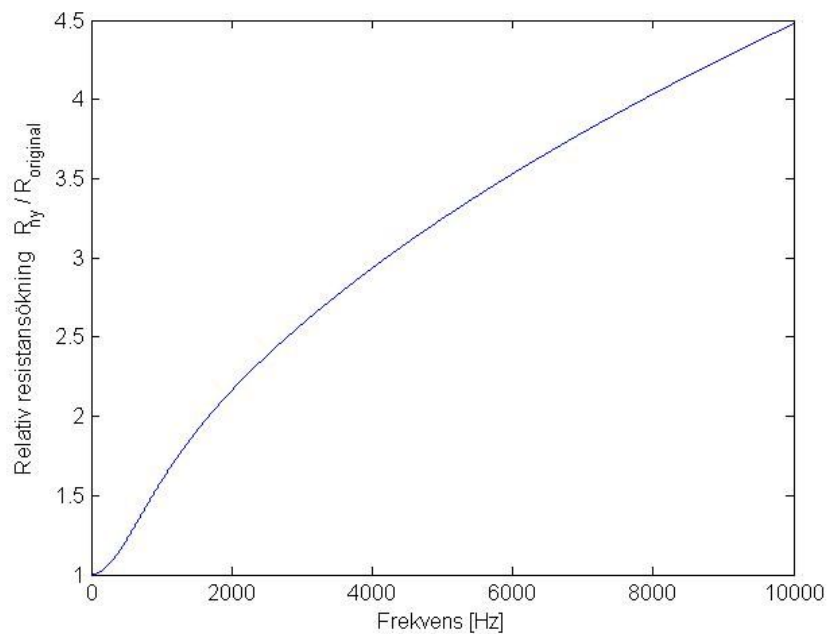
4.1.2 Strömförträngning

Eftersom intermittenta jordfel innehåller högfrekventa komponenter bör påverkan från strömförträngning undersökas. Strömförträngning är ett fenomen som uppkommer då högfrekvent ström flyter genom en ledare. Den högfrekventa strömmen pressas ut mot ledarens yta och den effektiva ledarytan minskar vilket därmed ökar resistansen för de högfrekventa komponenterna.

Uttrycket för den inre impedansen i en cirkulär ledning kan med god noggrannhet beskrivas enligt

$$R + j\omega L_i = \frac{l}{\pi r^2 \sigma} \frac{k \times R}{2} \frac{J_0(kr)}{J_1(kr)} \quad (4.4)$$

där $k = \pm \sqrt{\frac{1}{2} \omega \mu_r \mu_0 \sigma (1 - j)}$ och J_0 och J_1 är Besselfunktioner av nollte respektive första ordningen (Hallén 1953, s.330). I denna rapport bortses ifrån påverkan på den inre induktansen i ledaren. En studie av realdelen visar hur ledningens resistans ökar med frekvensen och Figur 10 visar detta förhållande i en typisk ledning. Detaljerna för en typisk ledningen återfinns i avsnitt 5.1.1. Redan vid 1 kHz har resistansen i kabeln ökat med cirka 60 % och strömförträngning anses därför påverka tillräckligt för att inkluderas i beräkningarna.

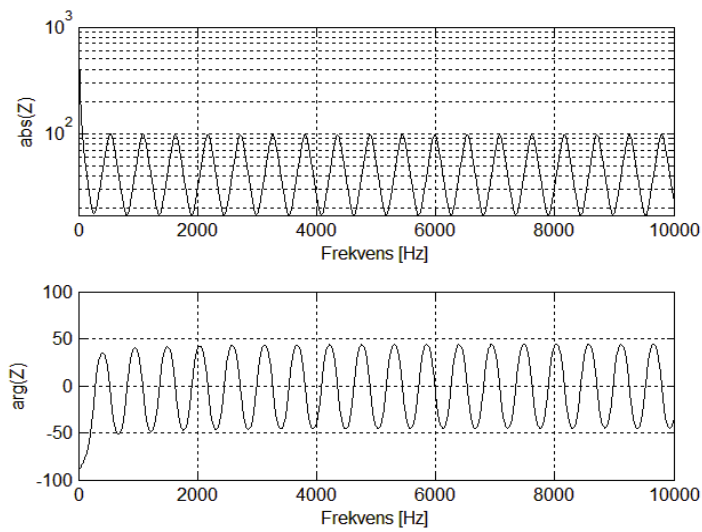


Figur 10: Resistansförändring på grund av strömförträngning

Ett komplett MATLAB script för beräkning av strömförträngning återfinns i Bilaga A

4.1.3 Jämförelse mellan distribuerade parametrar med och utan strömförträngning

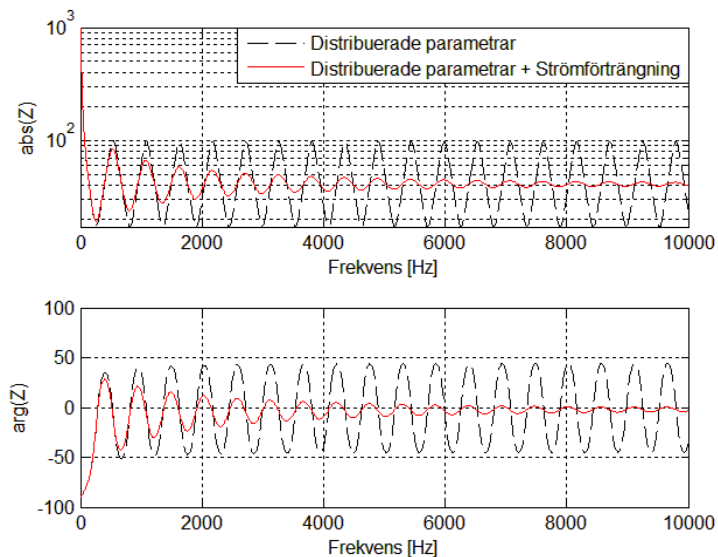
I Figur 11 visas beteendet för en typisk distributionsledning av kabeltyp modellerad med distribuerade parametrar. Diagrammet visar absolutbeloppet och argumentet av Z .



Figur 11: Distributionsledning modellerad med distribuerade parametrar utan strömförträngning

På grund av strömförträngningen kommer absolutbeloppet av Z förändras med ökad frekvens och i Figur 12 visas distributionsledningen modellerad både med distribuerade parametrar och distribuerade parametrar där strömförträngning är inkluderat.

Det är tydligt att de distribuerade parametrarna enbart stämmer vid låga frekvenser och strömförträngning anses därför som en viktig faktor i modelleringen.

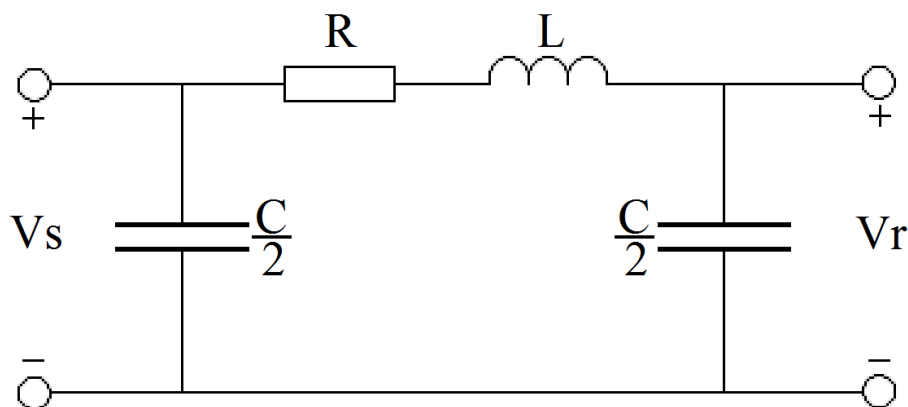


Figur 12: Distributionsledning modellerad med distribuerade parametrar och strömförträngning

4.1.4 Ledningsmodell med π -länk

Ett vanligt sätt att fysiskt implementera modeller av distributionsledningar är med så kallade π -länkar. π -länkar är designade för att noggrant återge en distributionsledning inom en viss bandbredd och utanför π -länkens giltighetsområde avtar förmågan att modellera ledningen.

π -länkar är baserade på att hälften av totala kapacitansen placeras i början av ledningen och andra hälften i slutet. Ledningens induktans och resistans seriekopplas i ledningens mitt vilket ger ett utseende liknande ett π och därav namnet. Se Figur 13 för förtydligande.



Figur 13: π -ledning

π -länkar är användbara för att implementera ledningsmodeller med korta ledningar. Definitionen av vad som är lång och kort distributionsledning baseras på vilka frekvenser som behöver modelleras. En distributionsledning anses vara lång då längden på ledningen överskrider en fjärdedel av intressanta frekvensers våglängd (Arrillaga, Watson 2003 s.278-279). Utbredningshastigheten i en distributionsledning ges av (4.5) där L och C är i Henry respektive Farad per km

$$v = \frac{1}{\sqrt{L \times C}} \quad (4.5)$$

Våglängd ges av utbredningshastighet och frekvens enligt (4.6)

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (4.6)$$

En distributionsledning anses därmed vara lång då längden överskrider

$$l_{lång} = \frac{1}{4 \times f \times \sqrt{L \times C}} \quad (4.7)$$

För att kompensera den fundamentala frekvensen när en π -länk används för långa ledningar finns den ekvivalenta π -länken men den behandlas inte i denna rapport.

Typiska nollföljdsparametrar för en 95 mm², 12 kV kabel är 0.3 μ F/km och 0.3 mH/km, se avsnitt 5.1.1 för mer information. För 50 Hz ger det

$$l_{lång} = \frac{1}{4 \times 50 \times \sqrt{(0.3 \times 10^{-6} \times 0.3 \times 10^{-3})}} = 527 \text{ km}$$

Vid denna längd kallas uppstår så kallad kvartvågsresonans som drastiskt förändrar ledningens impedans. För att garanterat kunna försumma denna effekt säger en tumregel att π -länken bör vara kortare än en femtedel av kvartvågsresonansen.

I exemplet med 50 Hz säger denna tumregel att π -länken inte bör motsvara en ledningslängd längre än cirka 100 km.

Kapitel 5 – Implementering

Detta kapitel beskriver hur teori och mätningar har använts för att fysiskt implementera intermittenta jordfel och nya ledningsmodeller i DLAB. Även den LabVIEW programmering som genomförts beskrivs.

5.1 Ledningsmodeller

För att bättre återskapa ett distributionsnäts beteende vid ett intermittent jordfel behövs nya ledningsmodeller till DLAB. Sammanlagt fyra ledningsmodeller konstrueras, två modeller av luftledningar samt två modeller av kablar. Detta avsnitt beskriver detaljerna för implementeringen av samtliga ledningsmodeller

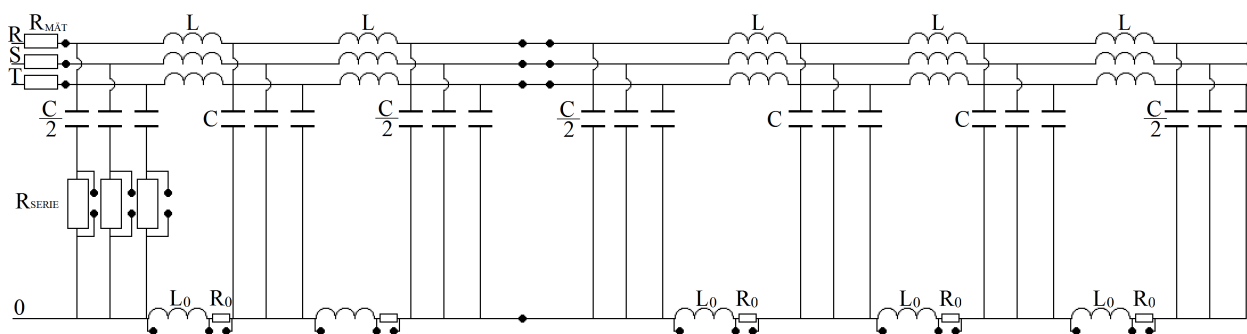
5.1.1 Modellerad kabel

Modellerad distributionsledning av kabeltyp antas vara 25 km lång och ha en ledningsarea på 95 mm^2 . Typiska nollföljds induktans- och kapacitans- och resistansvärden för 95 mm^2 , 12kV kablar med tre kopparledare är $0.3 \mu\text{F}/\text{km}$, $0.3 \text{ mH}/\text{km}$ och $1.5 \Omega/\text{km}$ (www.nktcables.se, 2010-06-08) läckkonduktansen antas vara försumbar. Samma induktans- och resistansvärden används för luftledningen dock antas kapacitansen vara en trettiondel av den för kablar.

I avsnitt 3.3.1 analyseras mätningar på intermittenta jordfel och frekvensområdet upp till ca 1 kHz identifieras som viktigast. Enligt (4.7) kan en π -länk som ska modellera upp till 1 kHz motsvara ungefär 26 km distributionsledning. Med hjälp av tumregeln bör 25 km kabel modelleras med fem seriekopplade π -länkar för god noggrannhet.

5.1.2 Kopplingsschema för ledningsmodell

Kopplingsschema för de ny implementerade ledningsmodellerna syns i Figur 14:



Figur 14: Implementerade π -länkar (se även Bilaga B för större kopplingsschema)

Nya ledningsmodellerna är uppbyggda av fem seriekopplade π -länkar var där varje π -länk motsvarar 5 km ledning. En bygling är placerad mellan andra och tredje π -länken för att kunna bryta och modellera 10 km istället för 25 km samt för inkoppling av jordfel. Jordfel kan anslutas vid 0, 10 och 25 km.

Anslutningar, i Figur 14 markerat med svarta ringar, finns längs med hela nolledaren och ger möjlighet att förändra nolledarens resistans och induktans.

I serie med första π -länkens kondensatorer är en resistor placerad. Denna resistor är placerad dels för att höja absolutbeloppet av impedansen för höga frekvenser och dels för att begränsa strömmen genom kondensatorerna vid kortslutning nära källan.

Modellens fysiska konstruktion syns i Bild 4

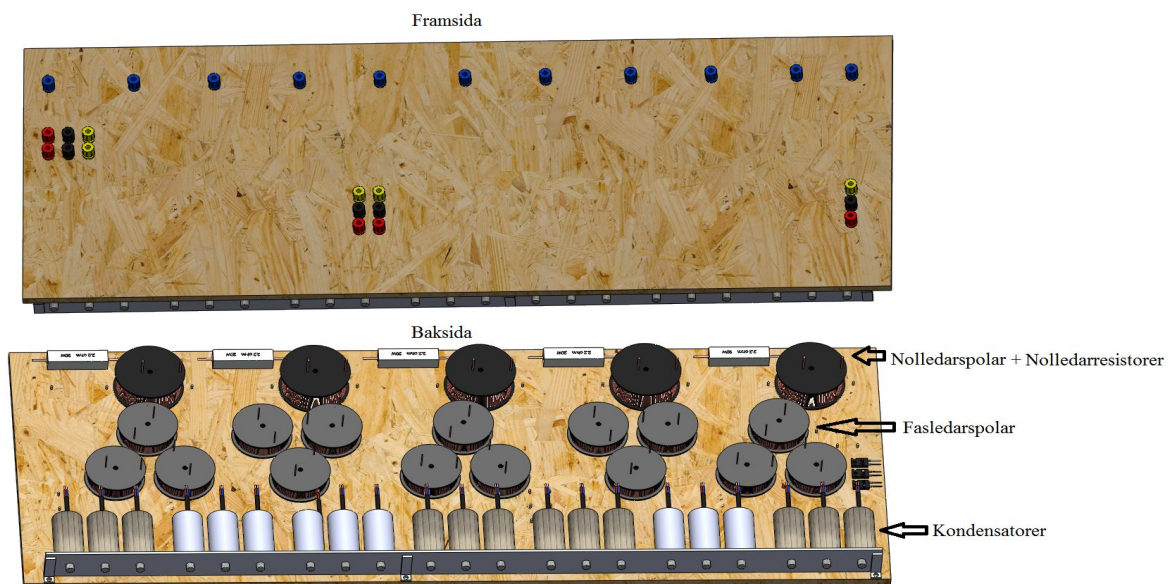


Bild 4: Ledningsmodellens konstruktion

5.1.3 Komponentvärden

Med antagen distributionskabel enligt 5.1.1 blir motsvarande värden i fasledarna på DLAB bas:

- $0.82 \mu\text{F} / \text{km}$ vilket ger $4.1 \mu\text{F}$ per π -länk
- $0.11 \text{ mH} / \text{km}$ vilket ger 0.55 mH per π -länk
- $0.11 \Omega / \text{km}$ vilket ger 0.55Ω per π -länk

I en nolledare placerad i närheten av fasledarna antas kapacitansen per km vara densamma som för fasledarna. Värdena $0.3 \mu\text{F} / \text{km}$, induktansen $1.5 \text{ mH} / \text{km}$ och resistansen $1.5 \Omega / \text{km}$ på 12kV bas används. På DLAB-bas blir detta:

- 0.82 μF / km vilket ger 4.1 μF per π -länk
- 0.55 mH / km vilket ger 2.8 mH per π -länk
- 0.55 Ω / km vilket ger 2.8 Ω per π -länk

Komponenterna i Figur 14 specificerats slutligen till:

Tabell 2: Komponentvärden i ledningsmodell för kabel / luft

Komponent	Värde
$R_{\text{MÄT}}$	0.5 Ω
R_{SERIE}	5 Ω
R_0	2.2 Ω
L	0.82 mH
L_0	2.7 mH
C	4 μF / 0.13 μF
C/2	2 μF / 0.06 μF

Kommentarer till val av komponenter

- L har valts till 0.82 mH istället för beräknade 0.55 mH eftersom 0.82 mH var närmsta komponentvärde som gick köpa
- R_0 är 2.2 Ω och serieresistansen i L_0 är 0.35 Ω . Tillsammans blir det 2.55 Ω vilket är nära det beräknade 2.8 Ω
- Serieresistansen i L är 0.28 Ω på grund av det används ingen separat resistor i fasledarna

5.2 Intermittenta jordfel

För att kunna återskapa beteendet av de intermittenta jordfelen behövs ett halvledarrelä som kan öppnas och slutas mycket snabbt. Reläet som används är av direktpåslags typ det vill säga att reläet kan slutas när som helst och inte enbart i nollgenomgångar.

Halvledarreläet används på plats S1 i Figur 2 och för att skapa ett intermittent jordfel sluts relä S2-S10. När S1 sluts bildas ett stumt jordfel och genom att snabbt öppna S1 igen återskapas beteendet av en ljusbåge som tänds och slocknar.

5.2.1 Ljusbågsmotstånd

Eftersom strömmen i ljusbågen är okänd kan man istället studera spänningen över felet med hjälp av (3.2) eller (3.3). Tjockleken på isolationen i en kabel är typiskt under 1 cm därför kommer spänningen som ligger över ljusbågen vara mycket låg. Neugebauers formel (3.2) med ljusbåglängd $L = 0.01$ m ger

$$U_f = R_f \times I_f = 2500 \times L = 2500 \times 0.01 = 25 \text{ V}$$

Eftersom modellerna är framtagna för 400 kV ledningar motsvarar 25 V en mycket liten andel av spänningen över felet. Utgående ifrån detta antas motståndet i ljusbågen vara försumbart i detta arbete.

5.2.2 LabVIEW program

För att styra det intermittenta jordfelet vidareutvecklas den LabVIEW programvara som sedan tidigare används för att styra uppställningen. Grundfunktionen är att återskapa en ljusbåge genom att reläet sluts i närheten av en spänningstopp och öppnas vid låg spänning över felstället. Med hjälp av inmatningarna för antalet fel, tiden mellan fel och på vilken fas felet läggs bestäms en sekvens med slutningar och öppningar av relä S1 i Figur 2.

På grund av att huvudprogramvaran inte visar data i realtid utan samplar och behandlar data i 100 ms paket börjar det nyutvecklade subprogrammet med att identifiera en punkt i närheten av en spänningstopp. Det värde som identifieras ligger inom ± 5 % av spänningstoppvärdet för att ansluta jordfelet med viss slump och inte på spänningstopp varje gång. När subprogrammet identifierat ett sampel inom ± 5 % gränsen fortsätter det med sekvensbestämning. Först väntar programmet 100ms från det identifierade samplet med att sluta reläet. Jordanslutningen blir då synkroniserad med en ny spänningstopp.

Programmet fortsätter och beroende på vilka val som gjorts vid initieringen i Bild 5 sker nu ett av två alternativ

1. Om valet är att göra ett kontinuerligt intermittent jordfel sluts och öppnas reläet tills stopp-knappen trycks in
2. Om istället ett visst antal fel bestäms görs motsvarande antal öppningar och slutningar av reläet

Tiden reläet är slutet har hårdkodats till 5 ms för att motsvara en ljusbåge som slocknar snabbt. Denna tid hårdkodas istället för att beräknas på grund av att huvudprogramvaran inte arbetar i realtid. Denna variabel kan mycket enkelt ändras till något annat värde om reläet behöver vara slutet längre eller kortare tid.

När programmet är inställt på att skapa mer än en ljusbåge kommer den första ljusbågen

beräknas enligt ovan men de följande felen kommer skapas med ett mellanrum bestämt av användaren. Att tiden mellan felen måste bestämmas av användaren beror på att programmet arbetar med 100 ms paket. Ifall beräkningar hade gjorts och felen synkroniserats precis som första felet hade felfrekvensen begränsats till 10 Hz det vill säga en gång per 100 ms paket.

5.2.3 Pseudokod

Här visas LabVIEW programmets princip i pseudokod. Bilaga C visar den faktiska LabVIEW koden för den intresserade.

bestäm U_{max}

```
while (0.95* $U_{max}$  > spänning i sampel(i) > 1.05* $U_{max}$ ) {  
    i++  
}
```

*Vänta 100 ms från första sampel identifierat inom utsatt spänningsspann
Ställ in resistansen i felen
starta störningsskrivning*

```
if kontinuerligt fel {  
    while !stop {  
        slut reläet  
        vänta 5 ms  
        öppna reläet  
        vänta bestämd tid mellan fel  
        i++  
    }  
    avsluta skrivning  
}
```

```
else if bestämt antal fel {  
    for [i=0 : i=antal fel] {  
        slut reläet  
        vänta 5 ms  
        öppna reläet  
        vänta bestämd tid mellan fel  
        i++  
    }  
}
```

avsluta störningsskrivning
}

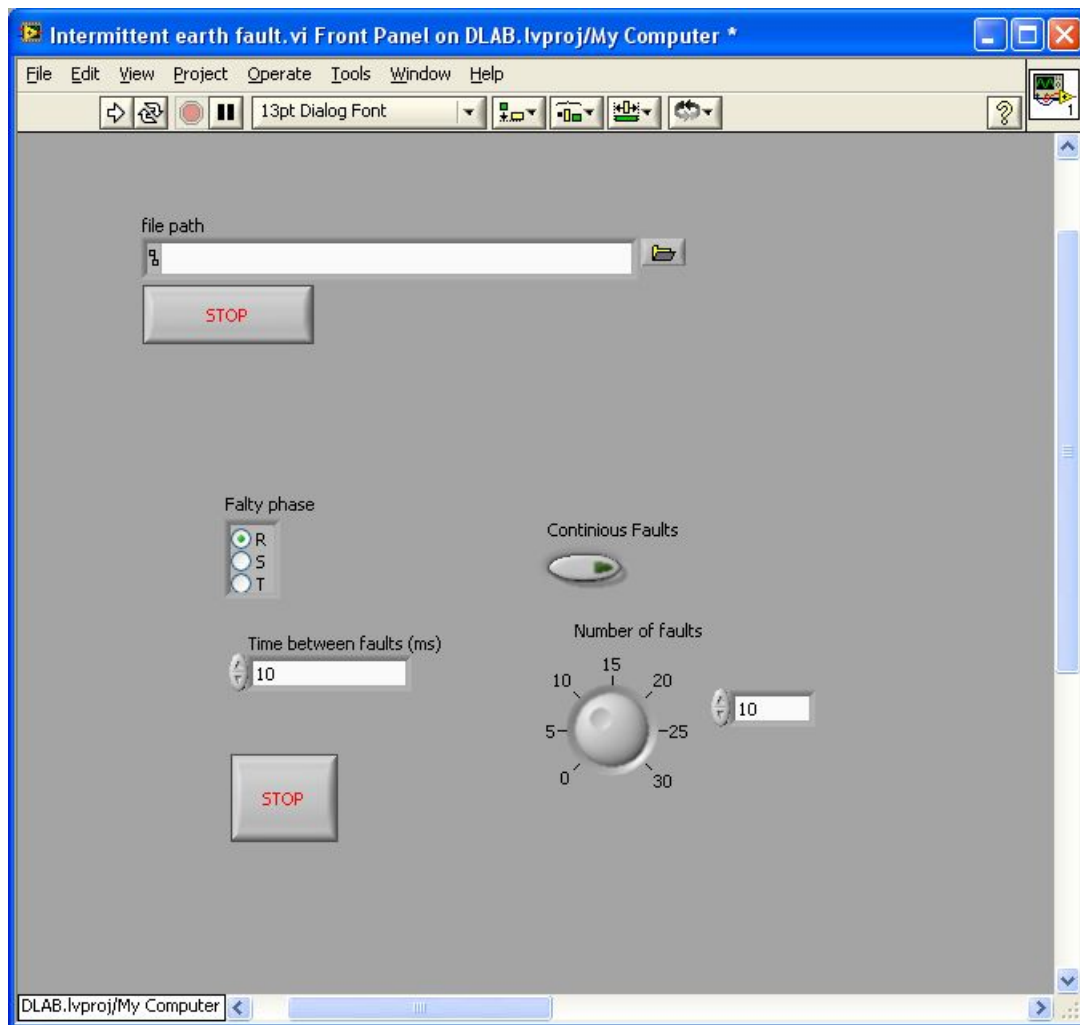


Bild 5: Användargränssnitt, intermittenta jordfel

Kapitel 6 – Resultat

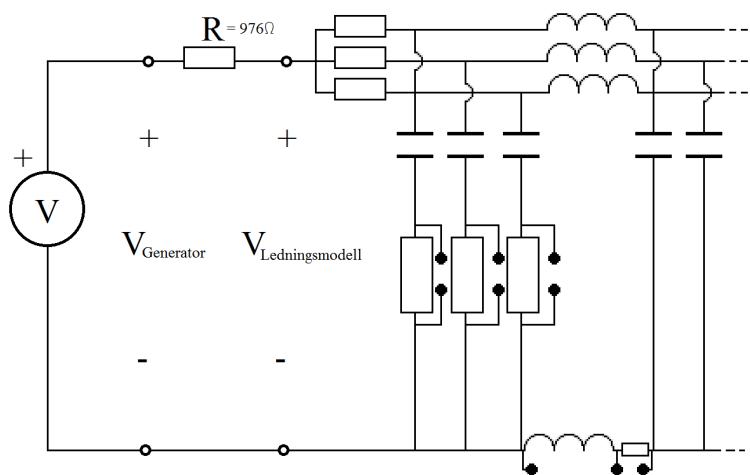
Detta kapitel beskriver hur de nya ledningsmodellerna presterar jämfört med de gamla. Dessutom visas hur de intermittenta jordfelen i DLAB beter sig i jämförelse med uppmätta intermittenta jordfel i distributionsnätet.

6.1 Ledningsmodeller

För att verifiera de nya ledningsmodellernas funktion görs ett frekvenssvep på en av kabelmodellerna. Resultatet jämförs dels med den gamla ledningsmodellen och dels med den teoretiska modellen baserad på distribuerade parametrar med strömförträngning som anses vara referens.

6.1.1 Mätningar på ledningsmodell

Mätningar utförs på ledningsmodellen enligt Figur 15. Beteckningen V innebär en sinusformad spänning som sveps från 30 – 10000 Hz. Under frekvenssvepet hålls spänningen i funktionsgeneratorn konstant på 70 V topp till topp medan spänningen över ledningsmodellen mäts.



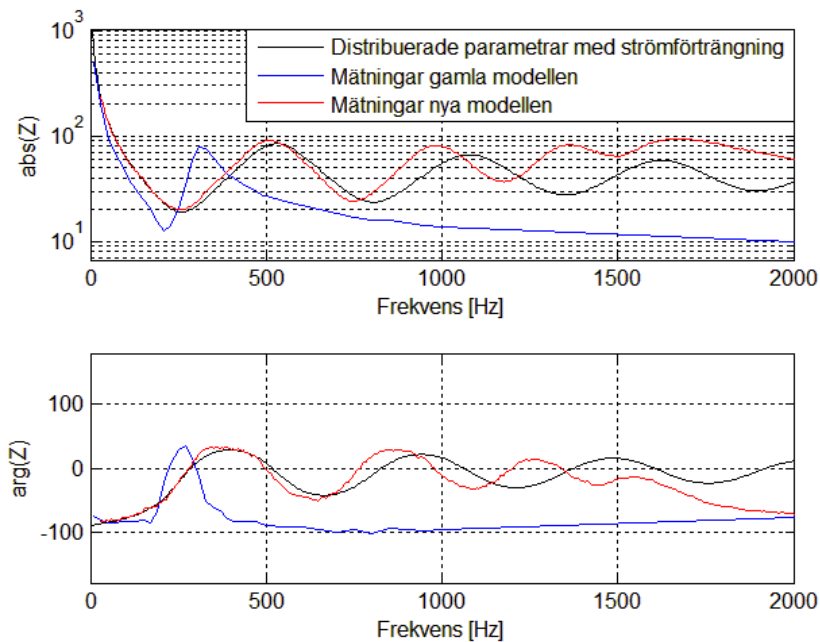
Figur 15: Mätuppställning

$$|Z_{\text{ledningsmodell}}| = 3 \times R \times \left| \frac{V_{\text{Ledningsmodell}}}{V_{\text{Generator}} - V_{\text{Ledningsmodell}}} \right| \quad (6.1)$$

Mätningarna upprepas på samma sätt för den gamla ledningsmodellen.

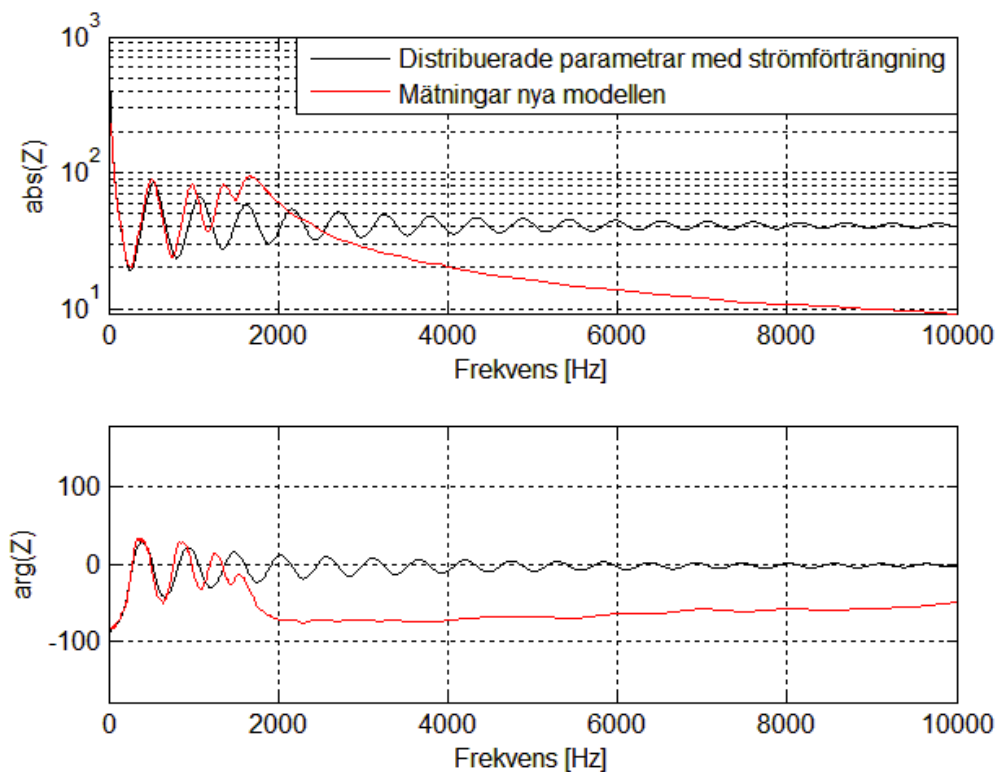
6.1.2 Jämförelse teoretisk och implementerad modell

I Figur 16 visas en jämförelse mellan de distribuerade parametrarna, den nya ledningsmodellen och gamla ledningsmodellen. Mätningen visar förmågan att modellera en kabel med specifikationer enligt 5.1.1. Den gamla ledningsmodellen består endast av en π -länk och är tänkt att modellera en luftledning och därför stämmer modelleringen dåligt redan strax över 50 Hz medan den nya noggrant modellerar ledningen upp till ungefär 750 Hz.



Figur 16: Jämförelse distribuerade parametrar, gamla ledningsmodellen samt nya ledningsmodellen

Efter 1 kHz avtar noggrannheten och absolutbeloppet av impedansen vid höga frekvenser kommer vara lägre än i den teoretiska modellen med distribuerade parametrar. Detta beror på att det behövs fler π -länkar för att återskapa kvartvågsresonanser för högre frekvenser. Figur 17 visar den nya ledningsmodellens beteende vid frekvenser upp till 10 kHz. Avsnitt 3.3.1 visar dock att det merparten av frekvensinnehållet för intermittenta jordfel ligger runt 0 – 1 kHz och den implementerade modellen anses därför en god modellering av en distributionsledning av kabeltyp.



Figur 17: Nya ledningsmodellens högfrekvensbeteende

6.2 Intermittenta jordfel

Med hjälp av det nyutvecklade subprogrammet i DLAB utförs intermittenta jordfel som jämförs med fältmätningar av intermittenta jordfel.

6.2.1 Återskapande av fältmätningar i DLAB

De fel som mätts upp på riktig distributionskabel utfördes precis i närheten av ställverket och på en kabelstump som enbart var ett tiotal meter. Nollpunktsreaktorn under mätningarna överkompenserade och levererade ungefär dubbel kompenseringström eftersom ett antal fack kopplades från och ingen ny avstämning utfördes. För att återskapa detta i DLAB krävs att:

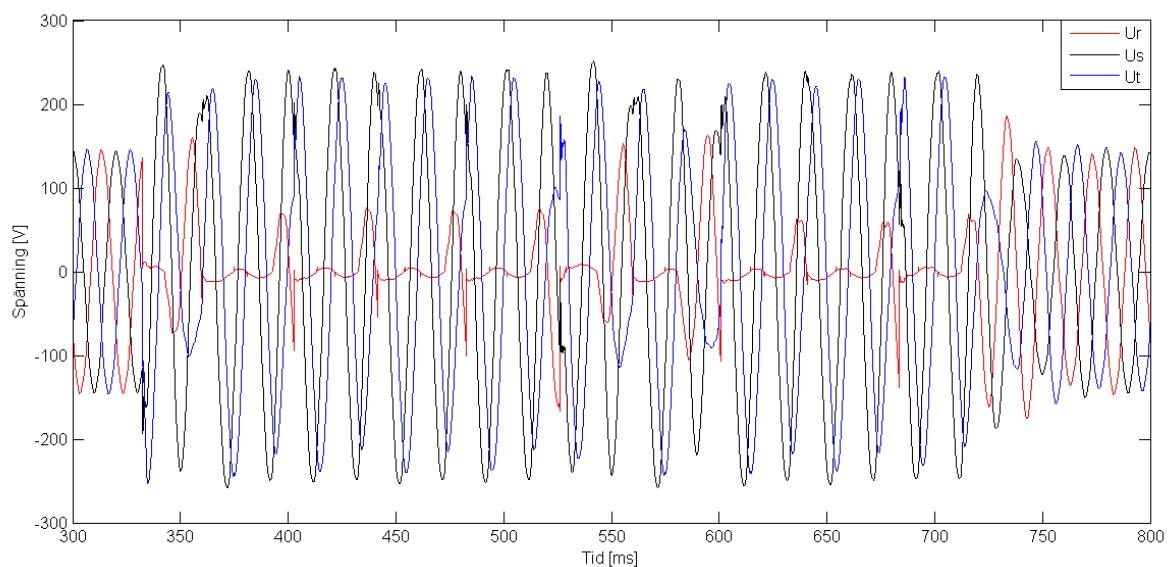
- Mätningarna sker på en ledningsmodell som modellerar en luftledning. Detta på grund av att kapacitansen i luftledningsmodellen är betydligt mindre än i kabelledningsmodellen och bättre motsvarar kapacitansen i en kort kabel.
- Jordfelet ansluts i första anslutningspunkten på ledningsmodellen för att motsvara anslutning precis vid ställverk.
- Petersenspolen kalibreras automatiskt och den resulterande kompenseringströmmen

dubbleras för att överkompensera.

- Samtliga fyra fack är anslutna vid jordfelet.

6.2.2 Jämförelse resultat i DLAB och fältmätningar

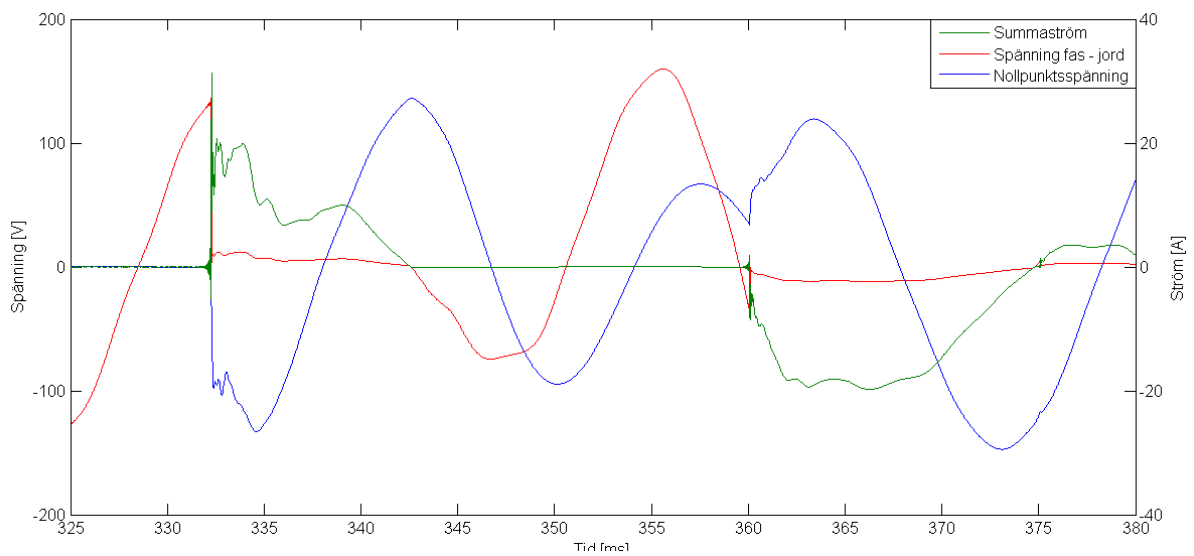
Resultaten från mätningar i DLAB presenteras i Figur 18 – Figur 20. Det relä som används på plats S1 i Figur 2 visar sig ta 20 – 30 ms att öppna istället för det eftersträvade 5 ms och resultaten av upprepade mätningar blir därför inte helt identiska. Ett nytt relä med kortare öppningstid är beställt men vid avslutning av denna rapport är leveranstiden fortfarande osäker.



Figur 18: Spänning fas - jord, intermittent jordfel i fas R, DLAB

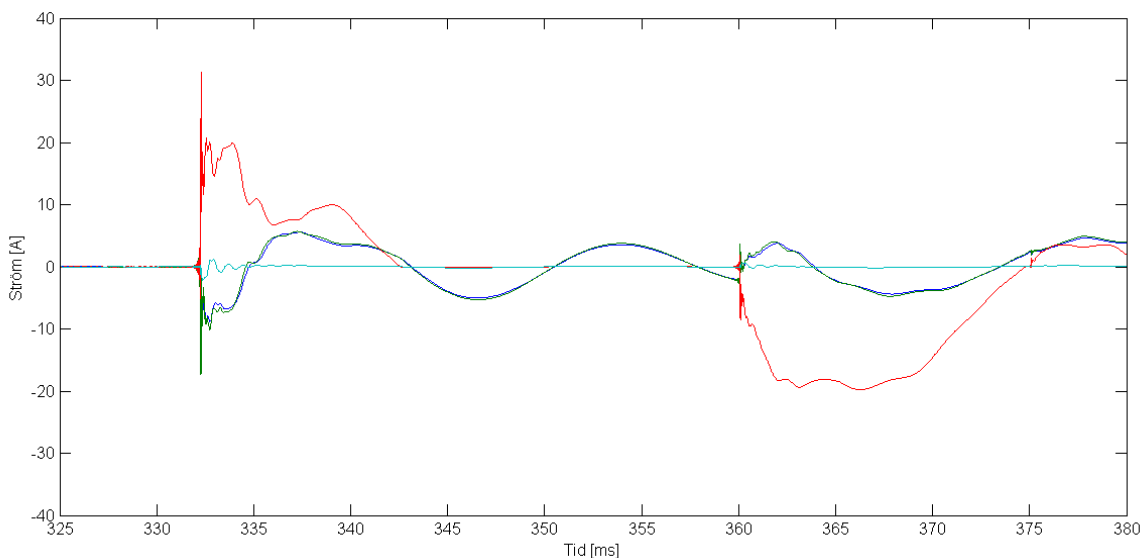
I Figur 18 syns spänningarna mellan fas och jord vid ett intermittent jordfel. Skillnaden från fältmätningar är att jordfelet i fas R är anslutet längre tid, detta beror på att reläets öppningstid är för lång, se ovan. Förutom tiden ljusbågen är aktiv stämmer spänningarnas beteende väl överens med fältmätningarna i Figur 3.

Vid jordfel får felbehäftad fas R jordpotential vilket resulterar i att nollpunkten ej är på jordpotentialen längre. När det sker ökar spänningen relativt jord för de friska faserna S och T.



Figur 19: Inzoomning av figur 18, spänning över felande fas och nollpunkten samt summaström i felande fack, DLAB

Också i Figur 19 stämmer beteendet överens med fältmätningarna. När halvledarreläet sluter, det vill säga ljusbågen tänds, stiger summaströmmen och nollpunktsspänningen snabbt. När det intermittenta jordfelet upphör, det vill säga strömmen genom felet blir noll, vid 342 ms avtar nollpunktsspänningen till sitt originalvärde.



Figur 20: Summaströmmar felande fack (röd) samt friska fack, DLAB

Precis som i Figur 5 är strömmarna i de friska facken motriktade strömmarna i det felande facket precis vid tillslaget. Bilaga D visar intermittenta jordfel utförda på samma sätt som ovan fast med enbart en ljusbåge.

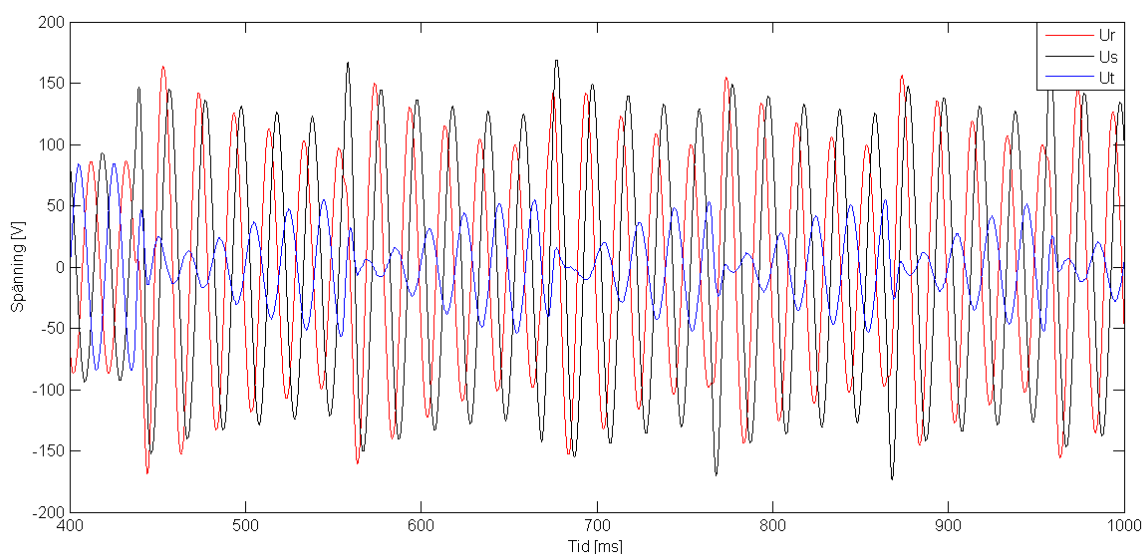
6.2.3 Återskapande av störningsregistrering från SÖV

Ett exempel på intermitterent jordfel under drift påträffades av DLABs störningsskrivare placerad i E.ONs fördelningsstation SÖV på 20 kV nivå. Felet är av intermitterent typ och resulterade inte i att reläskydden utlöste eftersom feltiden var kortare än nollpunktsskyddets utlösningstid. Här utförs jordfelen i DLAB enligt följande specifikationer:

- Det intermittenta jordfelet ansluts i sista anslutningspunkten, det vill säga vid 25 km, på en luftledningsmodell för att motsvara ett fel längre ut i nätet.
- Samtliga fyra fack är anslutna.
- Precis som i störningsregistreringen sätts mellanrummet mellan fel till ungefär 80 ms.
- Nollpunktsutrustningen antas vara väl avstämd. Automatisk kalibrering av Petersenspolen utförs i DLAB.

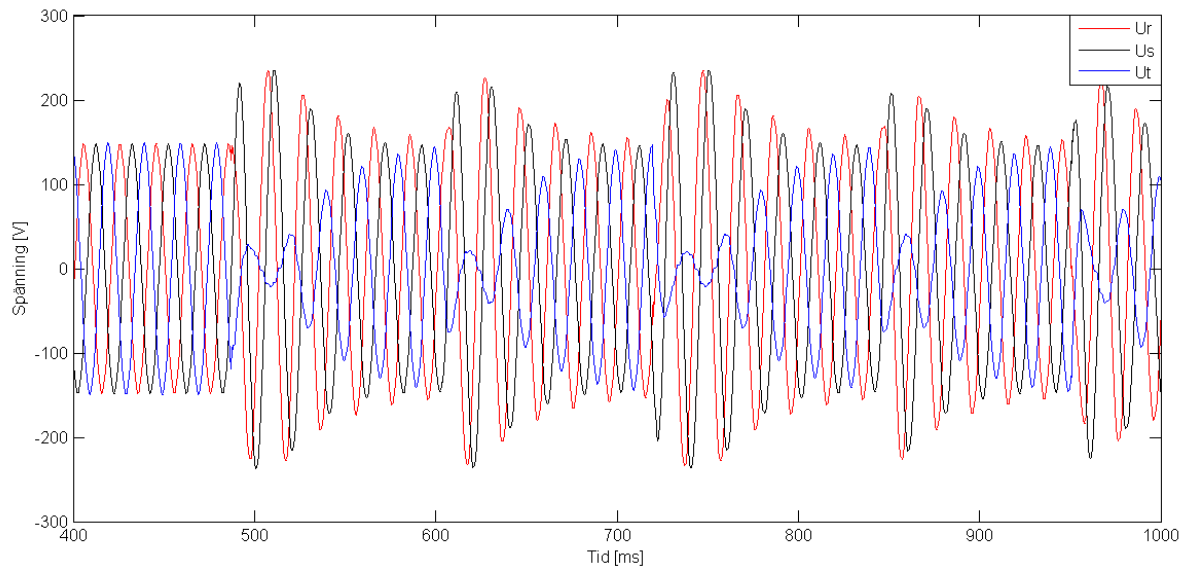
6.2.4 Jämförelse störningsskrivning i SÖV

Spänningarna mellan fas och jord vid det intermittenta jordfelet i SÖV betar sig på liknande sätt som vid de fältmätningar som utförts. Själva ljusbågen kommer mer sällan än vid tidigare tester vilket resulterar i att spänningen hinner stiga i cirka fem perioder innan nytt överlag sker.



Figur 21: Spänning mellan fas och jord, störningsregistrering SÖV.

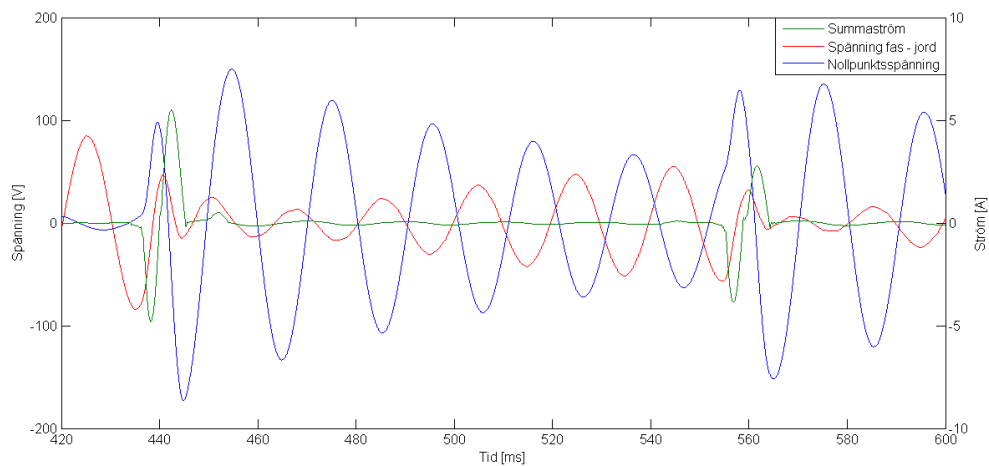
Liknande fel utförs på fas T i DLAB:



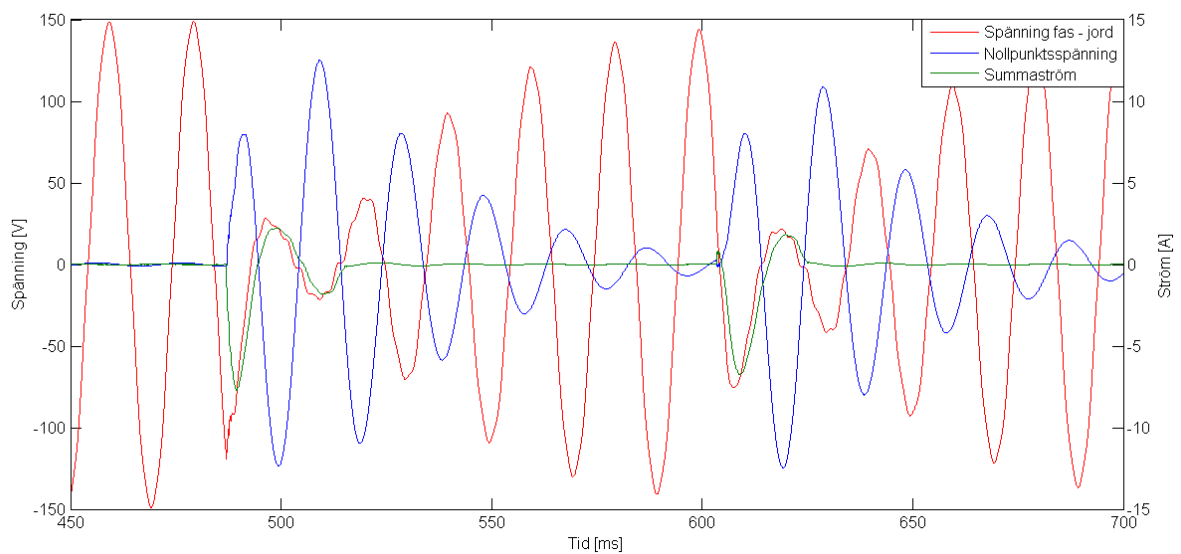
Figur 22: Spänning mellan fas och jord, mätning DLAB

Resultatet är lyckat och spänningarna vid mätningen i DLAB påminner mycket om spänningarna i SÖV.

Om man jämför beteendet för spänningen i felande fas, nollpunktsspänningen samt summaströmmen i felande fack från SÖV med mätningar i DLAB är även de mycket lika.

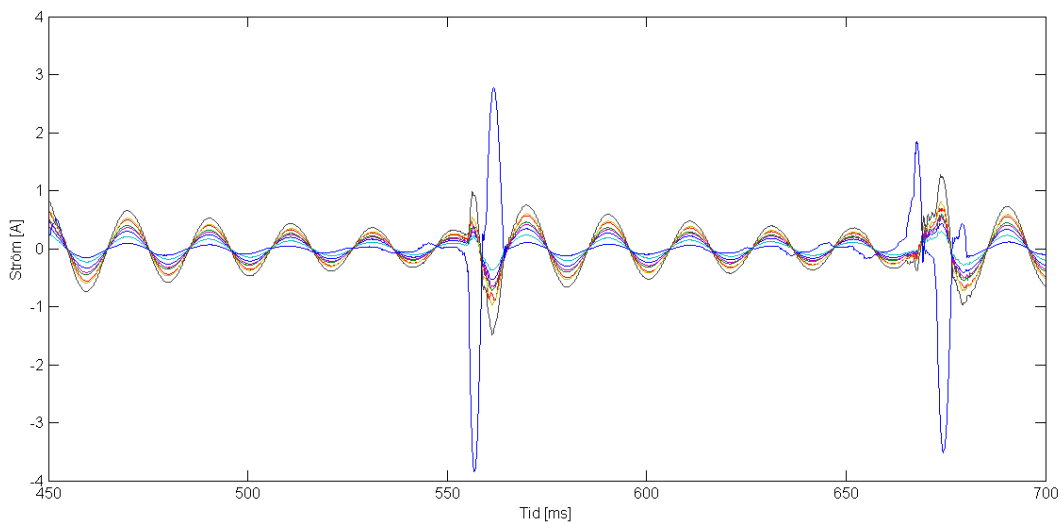


Figur 23: Spänning mellan felande fas och jord, nollpunktsspänning samt summaström i felande fack, SÖV, förstoring av figur 21

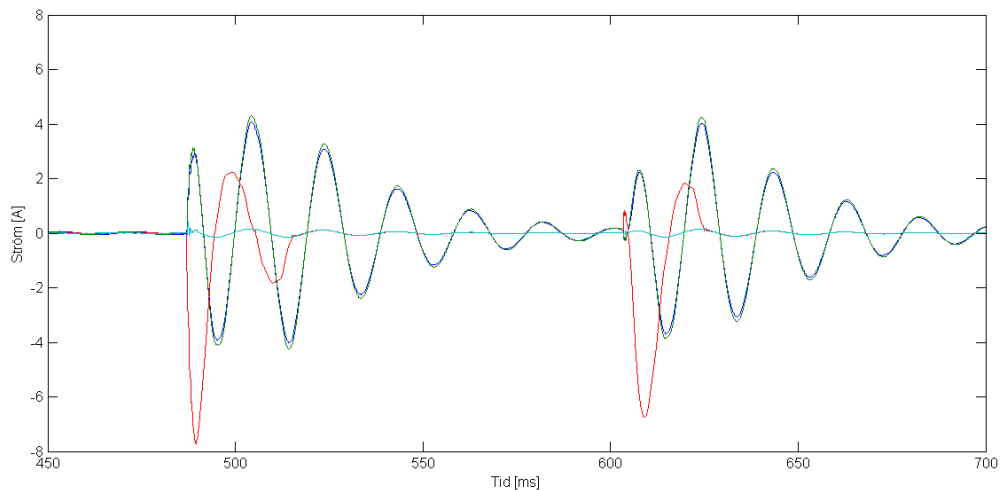


Figur 24: Spänning mellan felande fas och jord, nollpunktsspänning samt summaström i felande fack, DLAB. Förstoring av figur 21

Slutligen kan även summaströmmarna i de olika facken jämföras. I SÖV finns fler fack än i DLAB men huvuddragen från SÖV återfinns även i DLAB mätningar.



Figur 25: Summaströmmar felbehäftat fack (blå) samt friska fack, SÖV



Figur 26: Summaströmmar felbehäftat fack (röd) samt friska fack, DLAB

När ljusbågen tänds är strömmarna i de friska facken motriktade strömmen i det felbehäftade facket eftersom de friska facken matar det felbehäftade facket med kapacitiv ström. När felet försvinner börjar facken istället svänga i fas. Svängningarna beror på resonanskretsen bildad av kapacitanserna i kablarna samt nollpunktsutrustningen och avtar beroende på nätets resistans och nollpunktsmotstånd.

Kapitel 7 – Slutsatser

Detta kapitel sammanfattar de viktigaste slutsatser som kan dras av arbetet, hur intermittenta jordfel kan se ut och hur de jämförs med jordfel i DLAB.

7.1 Nya DLAB uppställningen

Med hjälp av bland annat de nya ledningsmodellerna har uppställningen i DLAB fått ett ansiktslyft. Bild 6 visar hur DLAB ser ut efter detta arbetets avslut. Ledningsmodellerna i Bild 1 har bytts mot de som nu syns i vita rutan och kopplingsplintarna har koncentreras till lådan i svart ruta under ledningsmodellerna.

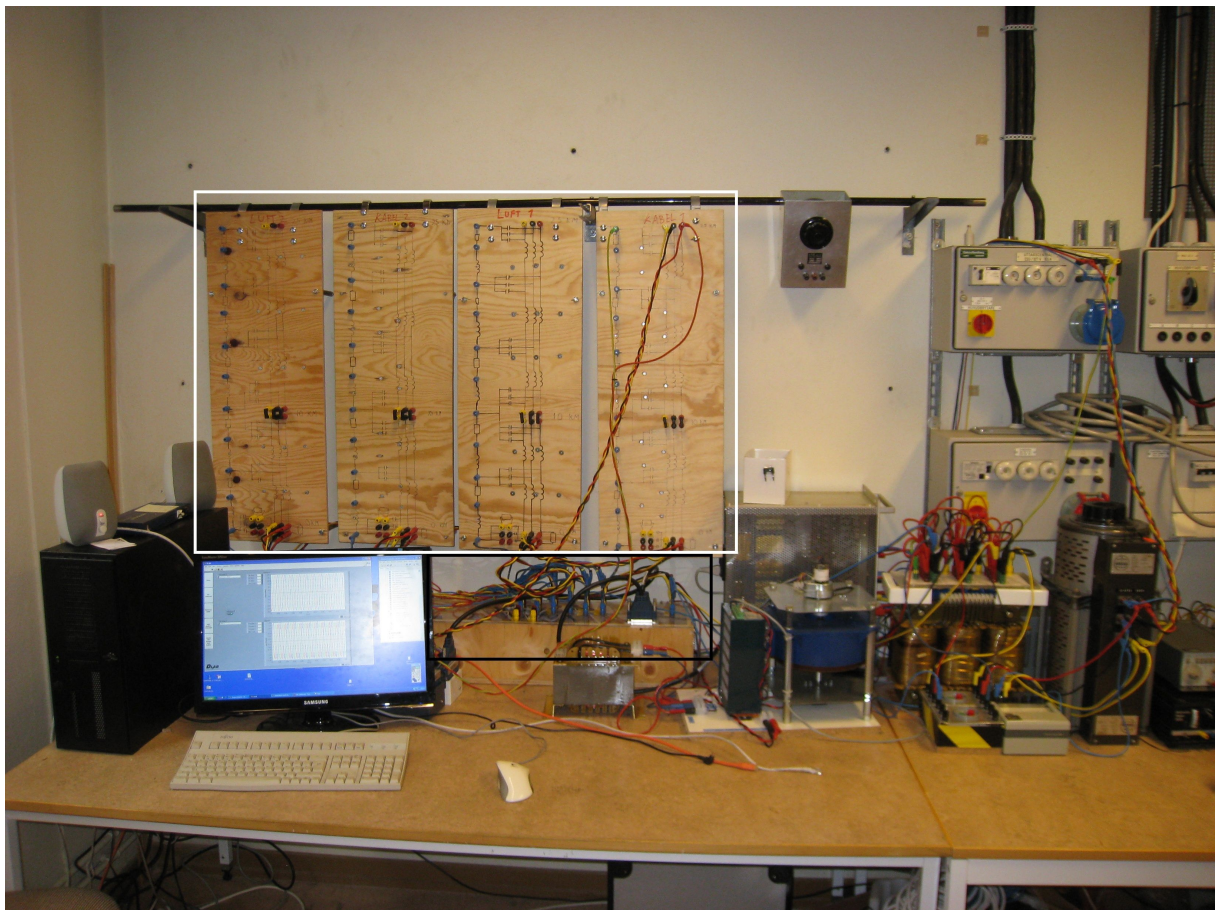


Bild 6: DLAB efter detta arbetes avslutning

Uppställningen är betydligt mer överskådlig vilket ses som en stor fördel då det inom DLAB projektet ska utföras laborationsövningar för bland annat studenter.

7.2 Slutsatser intermittenta jordfel

Målet med examensarbetet var att studera intermittenta jordfel och metoder för att implementera dem i DLAB. Tidigare mätningar samt nya tester utfördes och analyserades. Fouriertransform på felen visar att de intermittenta jordfelen har ett större frekvensspektrum än stationära jordfel. Större delen av frekvensinnehållet anses ligga i spannet upp till 1 kHz. För att korrekt kunna mäta intermittenta jordfel i till exempel reläskydd behövs därför en relativt hög samplingsfrekvens.

Beroende på var i nätet ett intermittent jordfel uppstår påverkas utseendet och frekvensinnehållet. I ett fel som sker i närheten av ställverk kommer dynamiken vara mycket snabb. I ett fel som sker långt ut i nätet kommer ledningens impedans och kapacitans agera lågpasfilter och sänka dynamiken.

7.3 Slutsatser ledningsmodeller

De ledningsmodeller som sedan tidigare användes i DLAB var designade för att återskapa en luftledning och de var dessutom anpassade till 50 Hz signaler. Eftersom kablifiering av mellanspänningsnätet ökar anses det viktigt att implementera kabelmodeller i DLAB. Intermittenta jordfel innehåller högre frekvenser och därför är de nya ledningsmodellerna dessutom anpassade för att klara högre frekvenser.

Distribuerade parametrar samt påverkan av strömförträngning anses teoretiskt modellera en distributionskabel mycket noggrant och denna modell användes som referens för design av de nya ledningsmodellerna. Med hjälp av fem implementerade π -länkar kan de nya ledningsmodellerna noggrant efterlikna en kabels beteende upp till ungefär 1 kHz.

7.4 Slutsatser implementering

Jämförelse mellan mätningar i det riktiga nätet och mätningar gjorda i DLAB visar att de implementerade funktionerna i DLAB återspeglar förloppen vid intermittenta jordfel bra. Det finns flera typer av intermittenta jordfel än de som undersökts i detta arbete. Felen kan innehålla både högre och lägre dynamik, tiderna mellan fel kan variera kraftigt med mera men eftersom samtliga variabler går att manipulera i LabVIEW antas DLAB kunna återskapa och mäta huvuddragen av alla typer av intermittenta jordfel väl.

Begränsning på jordfelen sätts för tillfället av det halvledarrelä, S1 i Figur 2, som används.

Sluttiden av reläet är mycket snabb men att öppna reläet tar 20 - 30 ms. Begränsningen i reläet innebär att alla fel måste vara tillkopplade minst den tiden något som enligt de undersökningar som gjorts inte är fullt realistiskt för en ljusbåge som bör slockna betydligt snabbare.

Ett nytt relä som enligt specifikationer ska gå att öppna snabbare är beställt men vid avslutning av denna rapport är leveranstiden fortfarande osäker. När det nya reläet är installerat bör inga begränsningar finnas kvar utan mycket varierande intermittenta jordfel kan simuleras med nuvarande mjukvara. Uppställningen är förberedd för direkt byte mellan nya och existerande reläet och inga förändringar behöver därför göras i varken mjukvara eller hårdvara.

Kapitel 8 – Fortsatt arbete

Detta kapitel presenterar förslag på fortsatta undersökningar av intermittenta jordfel samt vidareutveckling av DLAB.

Med möjligheten att simulera intermittenta jordfel i DLAB dyker flera frågeställningar upp som inte kunnat behandlas inom utsatt tidsram för detta arbete.

- Hur påverkas intermittenta jordfel av ett nät med lokalkompensering?
- Med olika konfigurationer av nollpunktsutrustning, exempelvis kombinationer av spole och kondensatorer, finns det en risk för att resonanskrets bildas?
- Vad händer vid ett intermittent jordfel i stora kabelnät som tillfälligt drivs utan nollpunktsutrustning på grund av exempelvis arbete eller fel på utrustning?
- Hur fungerar olika tillverkares reläskydd vid intermittenta jordfel? Går det att implementera skyddsfunktioner i DLAB som också klarar av intermittenta jordfel?
- Går det att positionsbestämma fel på en utmatning med hjälp av stegsvar och teorin för kvartsvågsresonanser? Går det att implementera detta i DLAB?
- Kan DLAB mjukvaran uppgraderas så att den körs i realtid?

Litteraturförteckning

Jönsson, Andreas – Örndal, Christoffer (2009), *Automatik för avstämning av Petersenspole*, Industriell Elektroteknik och Automation, Lund.

Larsson, Dan – Ericsson, Tom (2009), *Intermittenta jordfel i kablifierade distributionsnät*, KTH, Stockholm.

Lindahl, Sture (1998), *Arc resistance and resulting dc time constant*, ABB Network Partner AB.

Claesson, Ingvar – Eriksson, Per – Mandersson, Bengt – Salomonsson, Göran (1989), *Analoga kretsar och signaler*, Studentlitteratur, Lund.

Hallén, Erik (1953), *Elektricitetslära*, Almqvist & Wiksells, Uppsala

Arrillaga, Jos – Watson, Neville (2003), *Power System Harmonics*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.

NKT Cables (2010-06-08), Produktdatablad,

<http://www.nktcables.se/Products/00%20Krafikablar%2012-24%20kV.aspx>

Bilagor

Bilaga A – Strömförträngning, MATLAB script

```
function corr_factor=SkinEffect(area,metal,f)

metal=upper(metal);
u0 = 4*pi*1e-7;           % Permeability of free space
r = sqrt(area/pi)/1000;  % Radius of the cable

switch metal
    case 'AL'
        p = 2.82e-8 ;      % Resistivity of Aluminum [ohm meter]
        u = 1.256665e-6;   % Permeability of Aluminum
    case 'CU'
        p = 1.68e-8 ;      % Resistivity of Copper [ohm meter]
        u = 1.2566290e-6;  % Permeability of Copper
    case 'FE'
        p = 1e-7 ;         % Resistivity of Iron [ohm meter]
        u = 8.75e-4;       % Permeability of Iron
    otherwise
        error(['Unknown metal: ' metal])
end

ur = u/u0;               % Relative resistivity
sigma = 1/p;             % Electrical conductivity

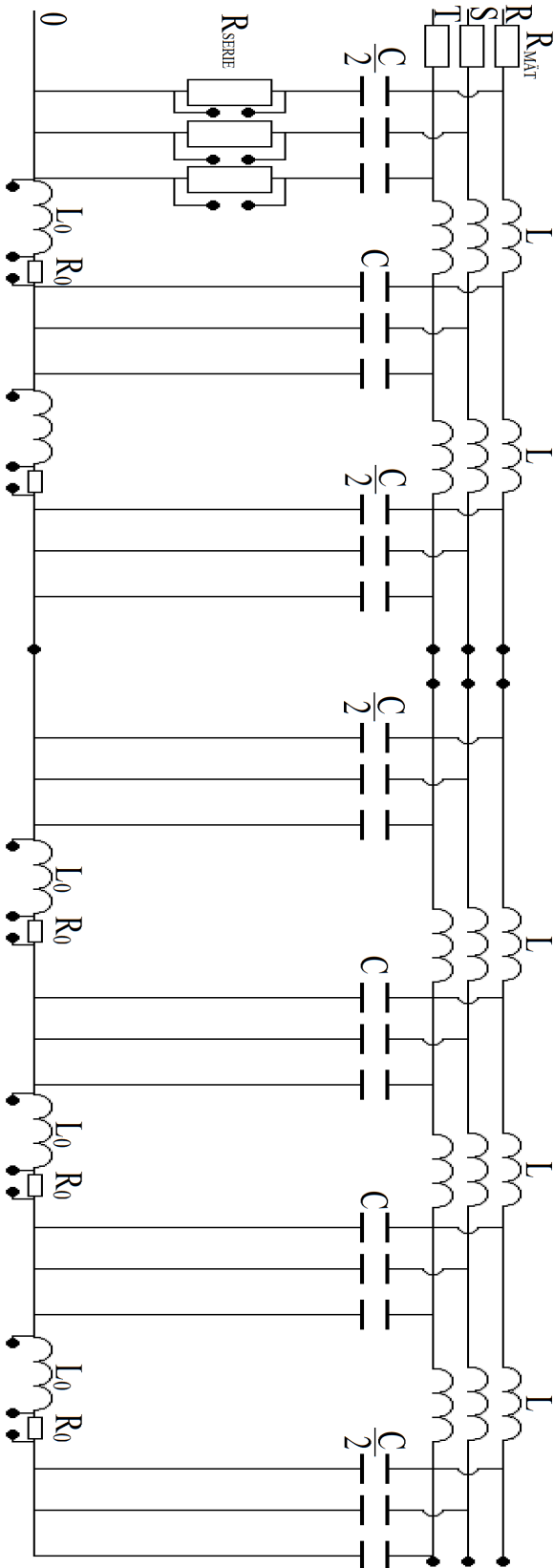
w = 2*pi*f;

H = sqrt(0.5*w*u0*ur*sigma); % Damping constant (Hallén 1953 s.323-331)
k=H*(1-j);
ka = k*r;

J0=besselj(0,ka); % Bessel function of first kind, zero order
J1=besselj(1,ka); % Bessel function of first kind, first order

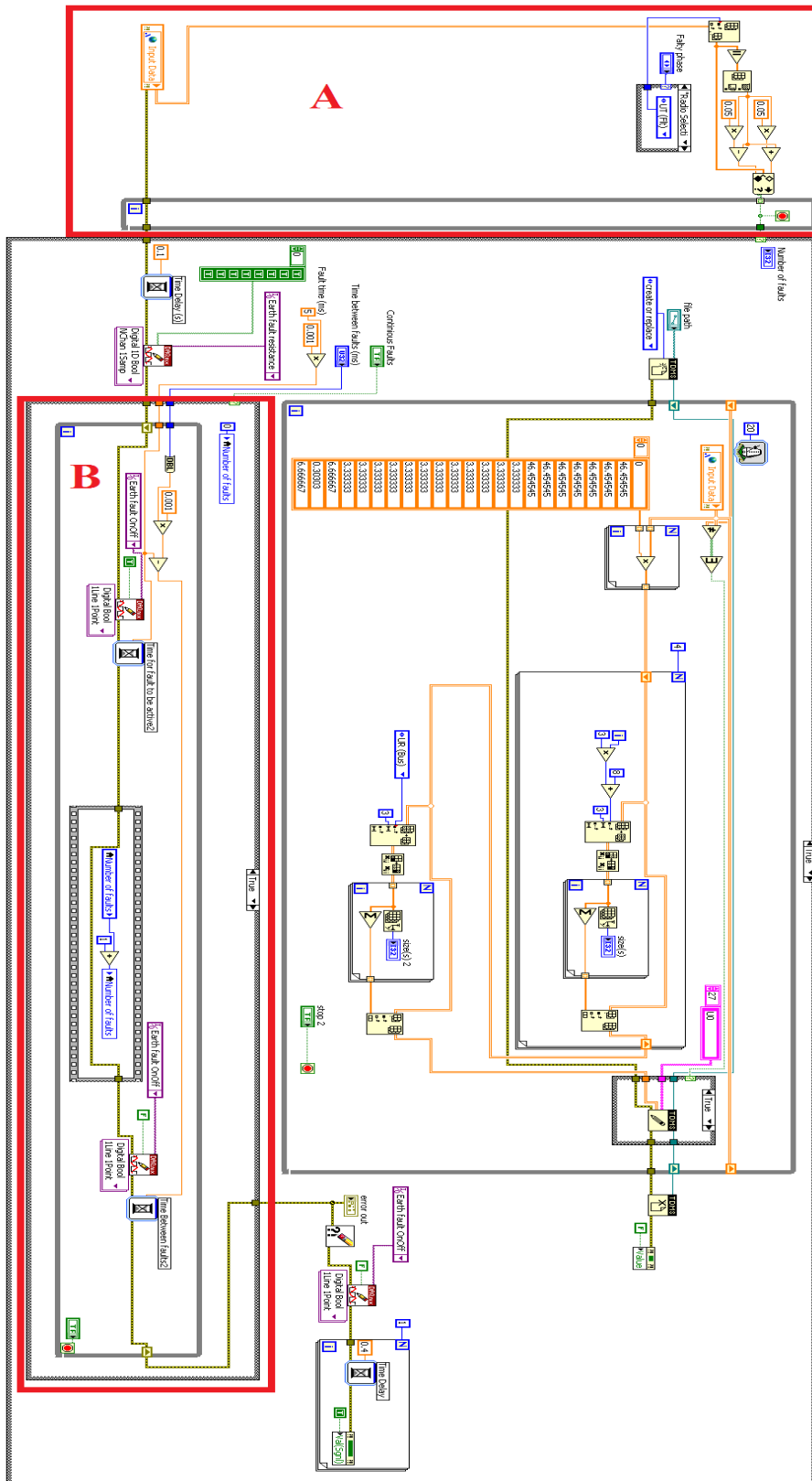
corr_factor= (0.5*ka.*J0)./J1; %Correction factor based on Skin effect
```

Bilaga B – Kopplingschema ledningsmodeller



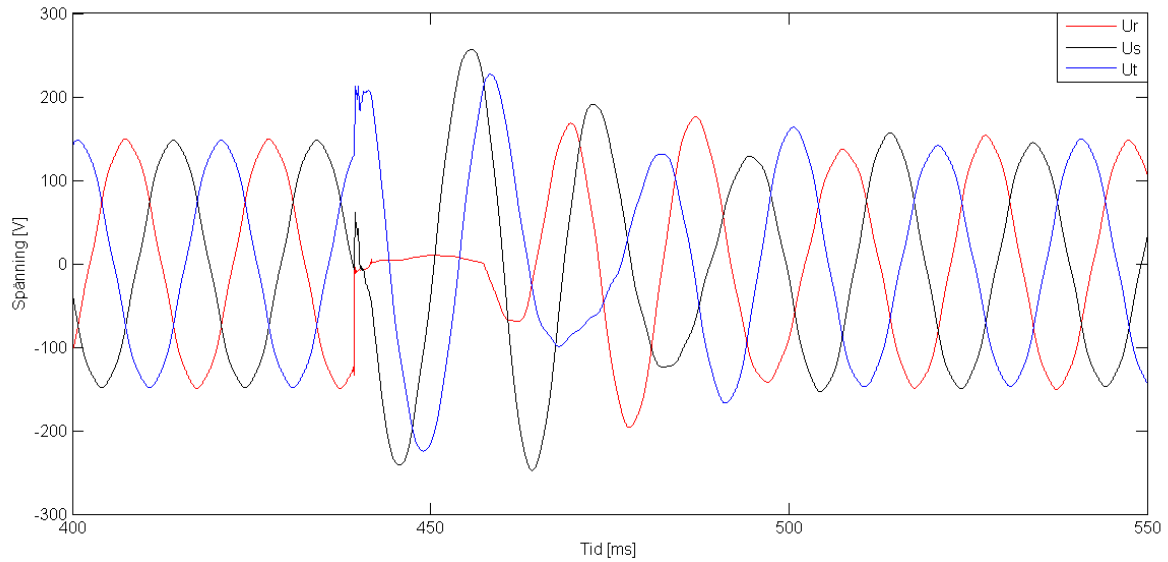
Bilaga 1: Kopplingschema π -länkar

Bilaga C – LabVIEW kod

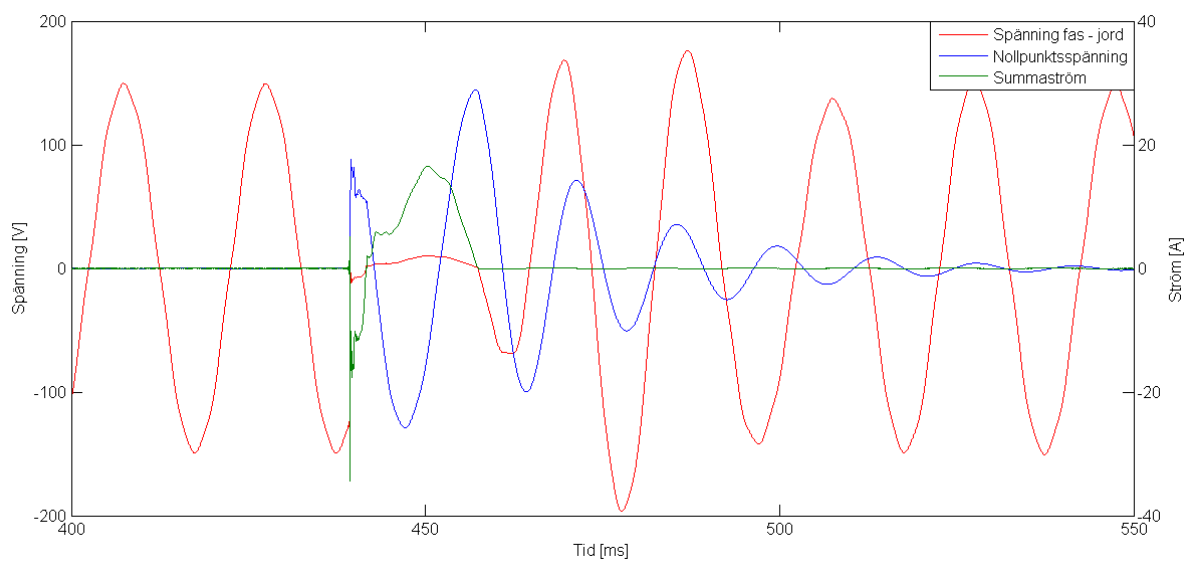


Bilaga 2: LabVIEW kod

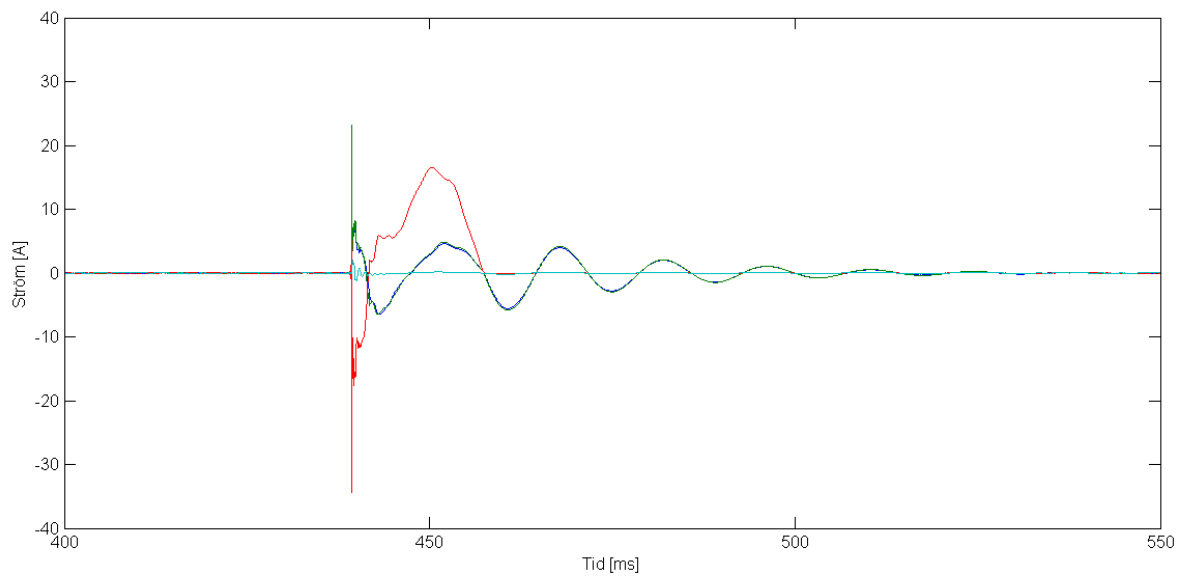
Bilaga D – Intermittenta jordfel utförda enligt 6.2.1



Bilaga 3: Spänningar mellan fas och jord, mätning DLAB



Bilaga 4: Spänning mellan felande fas och jord, nollpunktsspänning samt summaström i felbehäftat fack, mätning DLAB



Bilaga 5: Summaströmmar felheftat fack (röd) samt friska fack, mätning DLAB