

# Jordfelsproblematik i icke direktjordade system



---

**Johan Persson**

Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation  
Lund University

## Sammanfattning

Denna rapport sammanfattar olika studier kring jordfel i mellanspänningsnäten, dels för att kunna bygga en modell i Simulink, Matlab<sup>®</sup> med innehållande parametrar och dels för att få ihop ett material som möjligtvis kan höja förståelsen för de problem som förekommer i icke direktjordade system. Med hjälp av simulering har strömmar och spänningars ögonblicksvärden vid en enpolig jordslutning studerats och analyserats.

Myndigheterna kräver att spänning på utsatt del inte ska överstiga 100 V vilket leder till att den jordfelsström som uppkommer när ett fel uppstår måste begränsas. Rapporten visar att den kapacitiva strömmen genererad i kabeln ökar med ökad längd kabelledning. Detta problem kan lösas med att sätta in en induktor, Petersenspole, mellan transformatorns nollpunkt och jordpotentialen. Denna genererar en induktiv ström i motfas med den kapacitiva och kompenserar denna.

För att kompensera bort strömmen från ledningarna vill man ställa in spolen så att man hamnar så nära avstämningpunkten som möjligt. Fördelen med detta är att nollpunktsspänningsskyddet har lättare att detektera höghögsmiga jordslutningar än när man har mer snedavstämning. Om man väljer att ligga på avstämningpunkten ska man vara beredd på att det kan uppstå resonans mellan nätet och spolen med hög nollföljdsspänning som följd.

## Abstract

The purpose of this M.Sc. thesis is partly to build a model of a non-solid earthed system to analyse what happens when an earth fault appears and partly to summarize literature from research and reports on these topics to improve the understanding of the problems. By simulating when a line to ground fault occurs, the currents and voltages have been analysed.

According to regulations there is an upper limit of the fault current that appears when an earth fault occurs. This thesis shows that the capacitive current generated in the cable increases when the length of the cable increases. This problem can be solved with a coil, Peterse'n coil, between the neutral of the transformer and ground. This coil generates an inductive current that compensates the capacitive current so that the total reactive current is kept small.

In order to get the best compensation the coil should be tuned close to the resonant point. Another advantage is that the voltage protection, measuring the zero sequence voltage, could easier detect an earth fault than when the coil is set longer from the resonant point. If the tuning of the coil is chosen closed to the resonant point, one should be aware of the consequence that resonance with high zero sequence voltage could appear.

## **Tillkännagivande**

Examensarbetet ”Jordfelsproblematik i icke direktjordade system” har i huvudsak utförts på Sydkraft Nät AB i Malmö. Tomas Johannesson har varit min handledare vid Sydkraft Nät och Olof Samuelsson och Sture Lindahl har varit mina handledare vid institutionen för Industriell Elektroteknik och Automation.

Jag vill speciellt tacka dessa personer för all ovärderlig hjälp med mitt arbete.

Jag vill även tacka Niklas Stråth och alla på institutionen för många berikande synpunkter och diskussioner. Dessutom vill jag rikta ett tack till personalen på Sydkraft Nät AB för användbara råd och hjälp med information.

Slutligen vill jag även passa på att tacka min underbara familj för deras stöd genom min utbildning.

Lund, juni 2005

Johan Persson

## Innehållsförteckning

1	Inledning .....	5
1.1	Bakgrund .....	5
1.2	Problemställning .....	5
1.3	Syfte och mål .....	6
1.4	Disposition .....	6
2	Systemets uppbyggnad och fysik .....	7
2.1	Ledningar .....	7
2.2	Transformatorer .....	16
2.3	Olika typer av systemjordning .....	18
2.4	Systemens nollföljdsimpedans vid jordslutning .....	23
2.5	Jordtag .....	24
3	Jordslutningstyper .....	27
3.1	Enpolig jordslutning .....	27
3.2	Tvåpolig jordslutning .....	31
3.3	Simultana enpoliga jordslutningar .....	33
3.4	Bakmatade jordslutningar .....	34
3.5	Intermittenta jordslutningar .....	35
4	Lagar, förordningar och föreskrifter .....	36
5	Detektering och bortkoppling .....	39
5.1	Felbortkoppling av jordfel i olika system. ....	39
5.2	Selektivitet .....	42
5.3	Grundtonsmätande jordfelsskydd .....	43
5.4	Transientmätande jordfelsskydd. ....	45
5.5	Mättransformatorer .....	45
6	Simulering .....	50
6.1	Verifiering av modellen. ....	50
6.2	Enkel ledning .....	59
7	Analys och diskussion .....	72
8	Framtida arbeten .....	74
9	Referenser .....	75
10	Appendix A .....	77
	Symmetriska komponenter .....	77
11	Appendix B .....	80
	Simuleringsvärden och figurer .....	80
11.1	Simuleringsparametrar vid enkel ledning. ....	80
11.2	Kurvor från felställe och nollpunkt vid simulering av enkel ledning. ....	81
11.3	Kurvor från matande fack vid simulering av enkel ledning .....	105

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Dagens krav på att elleverantörer skall leverera el utan avbrott och störningar är höga. Att kraven har ökat genom åren kan bero dels på att vi är mer beroende av el till dagligen använda apparater, dels att avbrottsstatistiken har förbättrats kontinuerligt som följd av bättre driftövervakning, snabbare felavhjälpning men framför allt säkrare nätuppsbyggnad\*, vilket beror på att oisolerade luftledningarna successivt byts ut till mer vädertåliga ledningar som belagda linor, hängkabel och jordkablar.

En påminnelse om att det finns mer att göra inom detta område aktualiserades när stormen Gudrun drog fram i södra Sverige i januari 2005 där ett stort antal träd föll över luftledningarna med avbrott som följd. Denna sorts ombyggnader tar dock lång tid och är väldigt kostsamma. Arbetet omfattar inte bara att byta ut ledningar utan även andra påföljder gör sig gällande. Vid ombyggnad av systemet, från luftledningarna i form av blanklina till jordkabel, ökar bland annat kapacitiva jordfelsströmmar vid jordfel vilka ska bortkompenseras så att myndighetskrav uppfylls.

Utbyte av luftlinjer till markkabelledningar bidrar inte bara till att avbrottstiden minskar på grund av att dessa är mer vädertåliga, utan innebär också att säkerheten för person och egendom ökar på så vis att risken för fysisk kontakt med spänningförande delar reduceras. Andra aspekter som talar för markförläggning är att man slipper skogning och besiktning.

## 1.2 Problemställning

Kablifiering kan dock medföra vissa problem, såsom ökad kapacitiv strömgenerering bildad i kabelns isolering mellan fasen och jord. Dessa strömbidrag kan ge upphov till höga spänningar i ett eventuellt felställe och måste kompenseras bort. Denna rapport har för avsikt att studera hur denna kompensering kan utföras för att kunna följa gällande lagar och föreskrifter. Kompensering görs genom att man installerar en spole i matande fördelningsstation eller i efterföljande nätstationer.

Det är inte bara problem med de kapacitiva bidragen från ledningarna utan även de serieresistiva bidragen ökar med ökad utbredning av kabelnät. Även resistiva bidrag från spolarna gör sig gällande när kompenseringen ökas. Dessa resistiva bidrag kan bli så pass höga att risk finns för obefogad funktion hos aktivt mätande jordfelsskydd vilket i värsta fall kan betyda att felbehäftad ledning ej löses ut.

Dessa bekymmer är mer påtagliga på landsbygden där fel på en lång ledning kan generera en högre jordslutningsström än i tätorten p.g.a. sämre jordningsförhållanden.

---

\* Leveranssäkerheten i det svenska elnätet låg enligt svensk energi på ett medelvärde av 99,95 % 2003. Detta medelvärde gäller både tätort och landsbygd.

### **1.3 Syfte och mål**

Rapporten ska på ett enkelt sätt försöka förklara ovanstående problematik samt beskriva olika typer av jordfel. Simuleringsmodeller kommer att byggas för att studera de olika icke direktjordade systemen. Målet är att skapa förståelse för hur jordfelsströmmarna ser ut när ett enpoligt jordfel inträffar, vilket är av vikt då mellanspänningsnät utformas och kompensering av nätens kapacitiva generering ska hanteras.

### **1.4 Disposition**

Först ges en sammanfattande bakgrund av fysiken hos mellanspänningsnätets komponenter i form av transformatorer, ledningar och nollpunktsutrustning. Detta ger en uppfattning om vilka parametrar som ska användas i modellen. Olika jordfelstyper sammanfattas och gällande lagar, förordningar och föreskrifter kring felbortkoppling redovisas. Därefter beskrivs systemens jordfelsutrustning, hur de fungerar och var de används. Slutligen görs simuleringar av enpoliga jordfel i ett enkelt nät och resultaten analyseras och diskuteras. Avslutningsvis ges förslag till fortsatt fördjupning och forskning inom området.

## 2 Systemets uppbyggnad och fysik

### 2.1 Ledningar

#### 2.1.1 Allmänt

Totalt omfattar det svenska elnätet 528 000 km, varav 260 000 km är jordkabel. Om det skulle gå att sträcka ut det svenska elnätet i en enda lång ledning, skulle denna räckta tio varv runt jorden. Det lokala mellanspänningsnätet (12-24 kV) i Sverige består av drygt 120 000 km luftledning och knappt 60 000 km jordkabel<sup>3</sup>.

Som det nämndes i inledningen så önskar kraftbolagen i många fall göra ledningarna mer vädertåliga genom att byta ut oisolerade luftledningar till exempelvis markförlagda kablar. Ett av problemen som finns när man byter ut luftledningar till kabel är att den kapacitiva strömgenereringen orsakat av ledningen blir avsevärt högre om kabel används. Ett förenklat och allmänt använt uttryck för att bestämma en lednings kapacitiva generering ges av<sup>4</sup>

$$I_{c,luftledn.} = V_H \frac{l_{luftledn.}}{300}, \quad [A] \quad \text{Formel 2.1}$$

för luftledning och

$$I_{c,kabel} = V_H \frac{l_{kabel}}{a}, \quad [A] \quad \text{Formel 2.2}$$

för kabel där  $V_H$  betecknar huvudspänningen och  $l$  ledningens längd i kilometer. Den kapacitiva strömmen beror också på vilken kabel typ som används och detta betecknar  $a$ . För pappersisolerade kablar är  $a = 10$  och för PEX-isolerade (*Tvärbunden Polyetylen, Etenplast*) är  $a = 5$ . Utifrån dessa ekvationer ser man att en kabelsträckning genererar 30 till 60 gånger mer kapacitiv ström jämfört med samma sträckning luftlinje. Denna och andra egenskaper hos ledningar studeras i detta kapitel och i slutet sammanfattas dessa egenskaper i form av en modell.

Framför allt formeln för kapacitiv ström i kabel ger i praktiken ej tillräcklig noggrannhet eftersom  $I_c$ -strömmen är beroende av ledarnas area, form, isolationsmaterial samt om kabeln är enfás eller trefás.

I detta avsnitt visas olika sekvensföljdsstorheter för de olika ledningarna. Dessa storheter förklaras grundligare senare i rapporten.

<sup>3</sup> Svensk Energi elåret 2003, <http://www.svenskenergi.se/energifakta/distribueras.htm>

<sup>4</sup> Allmänna råd, ELSÄK-FS 1999:5 "Blå boken", § B73

## 2.1.2 Luftledningar

Luftledningar är utförda i antingen bara aluminium, (Al), eller aluminium med järnkärna, (FeAl). Ledningarna kan delas upp i två kategorier.

### Blanklina

Luftledning utan skyddande beläggning runt ledaren som är uppfäst i isolatorer för att få elektrisk isolation till stolpar.

### Belagd lina

Luftledning med skyddande beläggning som är uppfäst i isolatorer för att få elektrisk isolation till stolpar. Man kan däremot inte se beläggningen runt ledaren som skydd vid beröring utan mer som ett skydd mot jordfel exempelvis vid påfallna träd eller saltbildning för att öka driftsäkerheten.

Oavsett om linan är belagd eller inte så bestäms ledningens nollföljd liktydigt.

### 2.1.2.1 Kapacitiva bidrag

De geometriska avstånden och formationen på fasledarna har en stor betydelse när det gäller kapacitansen. Kapacitansen per km för de tre fasledarna ges av

$$C = \frac{10^{-6}}{18 \ln \left( \frac{A}{\sqrt[3]{ra^2}} \right)}, \quad [F / km] \quad \text{Formel 2.3}$$

där  $a$  betecknar medelavståndet i meter mellan fasledarna och  $r$  betecknar ledarnas radie i meter.  $A$  är avståndet från ledarknippen ner till fiktiv ledare i marken där återledningsströmmen tänks gå. Den ges av

$$A = 93\sqrt{\rho}, \quad [m] \quad \text{Formel 2.4}$$

där  $\rho$  betecknar markresistiviteten.

Med hjälp av  $C$  fås nollföljdssusceptansen av

$$B_0 = \frac{1}{3} \omega C, \quad [S / fas \cdot km] \quad \text{Formel 2.5}$$

Finns det topplinor så blir nollföljdssusceptansen följande.

$$B_0 = \frac{1}{3} \omega \frac{C_{fas}}{1 - \frac{C_{fas} * C_{topp}}{C_{fas, topp}}}, \quad [S / fas \cdot km] \quad \text{Formel 2.6}$$



$C_{fas}$  är fasledarsystemets egenkapacitans,  $C_{topp}$  är topplinornas egenkapacitans och  $C_{fas,topp}$  är den ömsesidiga kapacitansen.

### 2.1.2.2 Induktiva bidrag

Härledning av nollföljdsinduktansen per km för ett ledarknippe med tre fasledare ingår ej i denna rapport men efter beräkningar kan den skrivas som<sup>5</sup>:

$$L_0 = 10^{-4} \left( 2 \ln \left( \frac{A}{\sqrt[3]{ra^2}} \right) + \frac{1}{3} * 0.5 \right), \quad [H / km] \quad \text{Formel 2.7}$$

Nollföljdsimpedansen för hela ledarknippen kan per km betecknas som

$$Z_0 = \frac{1}{3} R_{fas} + R_j + j\omega L_0 \quad [\Omega / km] \quad \text{Formel 2.8}$$

där  $R_{fas}$  är ledningsresistansen per fasledare och km och  $R_j$  är jordtagsresistansen. Därmed kan nollföljdsimpedansen per fas och km skrivas som

$$Z_{0,fas} = R_{fas} + 3R_j + 3j\omega L_0, \quad [\Omega / km \cdot fas] \quad \text{Formel 2.9}$$

Om luftledningen har två topplinor kan man skriva nollföljdsimpedansen enligt

$$Z_{0,topp} = \frac{1}{2} R_{topp} + R_j + j\omega L_{0,topp}, \quad [\Omega / km] \quad \text{Formel 2.10}$$

där nollföljdsinduktansen för topplinorna ges av

$$L_{0,topp} = 10^{-4} \left( 2 \ln \left( \frac{A}{\sqrt{ra}} \right) + \frac{1}{2} * 0.5 \mu \right), \quad [H / km] \quad \text{Formel 2.11}$$

Konstanten  $\mu$  betecknar permeabiliteten för materialet i topplinorna.

Den ömsesidiga impedansen per km ges av

$$Z_{fas,topp} = R_j + j\omega L_{fas,topp}, \quad [\Omega / km] \quad \text{Formel 2.12}$$

där

<sup>5</sup> Elkraftsystem del 2, Stenborg Bertil, Chalmers, Dept. Electric Power Engineer, 1997

$$L_{fas,topp} = 10^{-4} * 2 \ln \left( \frac{A}{a_{fas,topp}} \right), \quad [H / km] \quad \text{Formel 2.13}$$

Den resulterande impedansen för fasledarna blir då

$$Z_{fas,totalt} = Z_{0,fas} \left( 1 - \frac{Z_{fas,topp}}{Z_{0,fas} * Z_{0,topp}} \right), \quad [\Omega / km] \quad \text{Formel 2.14}$$

Den sökta nollföljdsimpedansen blir slutligen

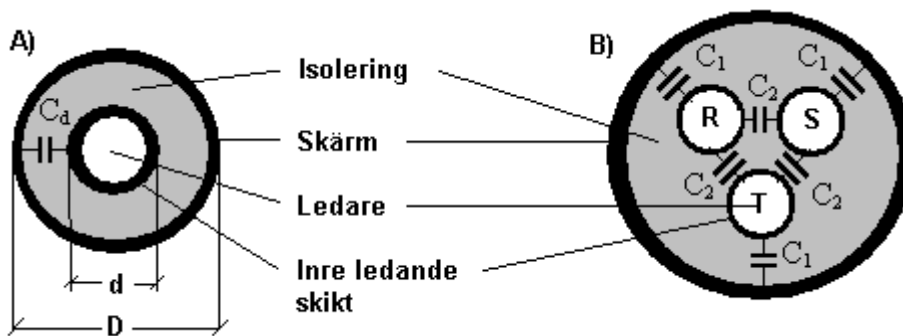
$$Z_{0,fas,totalt} = 3Z_{fas,totalt}, \quad [\Omega / km \cdot fas] \quad \text{Formel 2.15}$$

### 2.1.3 Markledningar

Markledningar fasledare är utförda i antingen aluminium, (Al), eller koppar, (Cu). Omgivande skärmledare är gjord i koppar.

#### 2.1.3.1 Kapacitiva bidrag

En kabel kan elektriskt betraktas som en kondensator där ledaren är ena elektroden och skärmen den andra med det isolerande skiktet mellan motsvarande kondensatorns dielektrikum<sup>6</sup>. Beroende på om det är en enledare- eller treledarekabel så beräknas kapacitansen olika. Dessa två kabelutföranden visas i Figur 2.1. Treledarekablar finns också med sektorformade fasledare vilka också studeras i detta avsnitt.



Figur 2.1. A) Enledarekabel och B) treledarekabel med runda fasledare.

För en *enledarekabel* med omgivande skärm eller en *flerledarekabel med skärm runt var ledare* ges kapacitansen per kilometer av:

$$C = k * \frac{\epsilon_r}{\ln(D/d)}, \quad [\mu F / km] \quad \text{Formel 2.16}$$

<sup>6</sup> Kraftkabelhandboken, Ericsson Cables Kraftkabeldivisionen

Där  $k$  är en konstant, beräknad ur

$$k = 2\pi\epsilon_0 = \frac{2\pi * 10^{-9}}{36\pi} = \frac{1 * 10^{-9}}{18} \quad \text{Formel 2.17}$$

, som har värdet 0,055 och  $\epsilon_r$  är relativa dielektrisitetskonstanten för det isolerande skiktet mellan ledare och skärm. Konstanten  $\epsilon_r$  är olika beroende på materialet hos mellanskiktet. För de två vanligaste idag förekommande materialen vid kabelförläggning PVC (*Polyvinylklorid, plastmaterial*) och PEX så är konstanten  $\epsilon_r = 5,0$  respektive  $\epsilon_r = 2,3$ . Det ska tilläggas att i de befintliga mellanspänningsnäten är PVC mindre vanligt förekommande medan pappersisolerad kabel är mer representerat.

Över det isolerade skiktet ligger en växelspanning som får en växelström, laddningsström, att flyta genom den bildade kondensatorn. I ett trefassystem ges denna ström i varje fas av:

$$I_q = V_{fas} * \omega * C_d * 10^{-3}, \quad [A/km] \quad \text{Formel 2.18}$$

Där  $V_{fas}$  är fasspänningen i kV och  $C_d$  är driftkapacitansen i  $\mu F/km$ . Driftkapacitansen är i detta fall lika med kapacitansen per längdenhet,  $C$ , som togs fram i Formel 2.16. När ett jordfel uppkommer fås en kapacitiv jordslutningsström enligt:

$$I_c = 3I_q, \quad [A/km] \quad \text{Formel 2.19}$$

För en treledarekabel där faserna har gemensam skärm, Figur 2.1, beräknas driftkapacitansen ut på följande förenklade sätt. Man delar först upp kapacitanserna i delkapacitanser  $C'$  och  $C''$  där  $C'$  komponenter mäts och beräknas enligt

$$C' = C_1 + 2C_2, \quad [\mu F / km] \quad \text{Formel 2.20}$$

$C_1$  är kapacitans mellan ledaren och skärmen d.v.s. nollföljdskapacitansen medan  $C_2$  är kapacitansen mellan ledaren och någon av de andra ledarna.

Efter detta förbinder man de tre ledarna och mäter  $C_1$  och på så vis får man fram  $C''$  genom:

$$C'' = 3C_1, \quad [\mu F / km] \quad \text{Formel 2.21}$$

När nu delkapacitanserna är kända kan driftkapacitansen d.v.s. plus/minusföljdskapacitansen beräknas enligt:

$$C_d = C_1 + 3C_2, \quad [\mu F / km] \quad \text{Formel 2.22}$$

Ofta är driftkapacitansen i de ovanstående fallen uppmätta och redovisade av kabeltillverkaren. Laddningsströmmen och jordfelsströmmen beräknas enligt Formel 2.18 respektive 2.19.

Nedan följer en jämförelse på kapacitiva jordfelsströmmar som kan uppstå i olika kablar med skärm. Tre parallella enledarekablar med PEX-isolering, treledarkabel med PEX-isolering och runda ledare samt treledarekabel med PEX-isolering och sektorformade ledare studeras.

Följande gäller:

Area på ledare:	$A = 95 \text{ mm}^2$
Ledardiameter:	$d = 11 \text{ mm}$
Fasspänning:	$V_{\text{Fas}} = 24 / \sqrt{3} \text{ kV} = 13,86 \text{ kV}$
Längd:	$l = 12 \text{ km}$

#### **Enledarekabel med PEX-isolering och runda ledare:**

Användning av Formel 2.16 ger att vid en kabel diameter av 22 mm fås driftkapacitansen till  $0,21 \mu\text{F}/\text{km}$  som i sin tur med hjälp av ekvation 2.18 och 2.19 ger  $I_C = 2,74 \text{ A}/\text{km}$ . Totala kapacitiva jordfelsströmmen i hela ledningen ges då av  $\Sigma I_C = 32,88 \text{ A}$ .

Om kapacitiva strömmen  $I_C$  jämförs med tabellvärde i *Kraftkabelhandboken*<sup>7</sup>, så stämmer detta väl överens. Följande beräkningar på totala kapacitiva strömmen beräknas därför utifrån denna tabell.

#### **Treledarekabel med PEX-isolering och runda ledare:**

Driftkapacitansen är samma,  $0,21 \mu\text{F}/\text{km}$ , som i enledarefallet och därmed samma totala kapacitiva jordfelsströmmen, d.v.s.  $\Sigma I_C = 32,88 \text{ A}$ .

#### **Treledarekabel med PEX-isolering och sektorformade\* ledare:**

Ur tabellen i *Kraftkabelhandboken* kan man utläsa att driftkapacitansen,  $0,22 \mu\text{F}/\text{km}$ , och därför fås en något högre total kapacitiv jordfelsström på  $34,80 \text{ A}$ .

Det finns alltså en skillnad när det gäller runda eller sektorformade fasledare. För sektorformade ledare är driftkapacitansen något högre än för de runda. Skillnaderna i den resulterande jordfelsströmmen kan tyckas vara små men om flera ledningar med denna längd är anslutna till samma fördelningsstation så blir skillnaden större. I sin tur innebär detta att en avstämning med ett eventuellt reaktansjordat system måste göras på grund av felkompensering. Eftersom kapacitansen i kabeln är olika för olika isoleringsmaterial så är jordfelsströmmen likaså.

---

<sup>7</sup> Kraftkabelhandboken, Ericsson Cables Kraftkabeldivisionen, tabell 39 sid 129

\* Ledarnas form i en treledar kabel utgör tre likadana snittbitar, som bildar en cirkulär snittyta.

### 2.1.3.2 Induktiva bidrag

Induktionen i en kabel uppstår när denna kabel är nära belägen en annan kabel. Induktionen i en fas med runda ledare ges av:

$$L = 0,05 + 0,2 * \ln \frac{a}{r}, \quad [mH / km] \quad \text{Formel 2.23}$$

om ledningarnas faser är förlagda i symmetrisk triangel. I formeln är  $a$  avståndet mellan fasernas mittpunkter,  $r$  är ledarradien i mm och 0,05 är uppskattad induktans mellan ledare och skärm.

Om däremot de runda ledarna är förlagda på rad kan induktansens medelvärde för en fas förenklat räknas ut genom:

$$L = 0,05 + 0,2 * \ln \frac{\bar{a}}{r}, \quad [mH / km] \quad \text{Formel 2.24}$$

där

$$\bar{a} = \sqrt[3]{2} * a$$

Sektorformade ledare kan skilja något från de runda. Även induktansen kan fås av kabeltillverkaren eller så kan man mäta upp den.

### 2.1.4 Ledningsreaktans

Som setts i ovanstående avsnitt så finns både kapacitiva och induktiva komponenter utmed en ledning. Den kapacitiva reaktansen verkar mellan fasledare och jord medan den induktiva existerar längs ledningen. Den kapacitiva reaktansen fås genom:

$$jX_c = \frac{10^6}{j\omega C_d}, \quad [\Omega * km] \quad \text{Formel 2.25}$$

där  $C_d$  är driftkapacitansen per längdenhet, [ $\mu F/km$ ].

Den induktiva reaktansen per längdenhet ges av:

$$jX_L = j\omega L * 10^{-3}, \quad [\Omega / km] \quad \text{Formel 2.26}$$

där  $L$  är induktansen per längdenhet, [ $mH/km$ ].

### 2.1.5 Ledningsresistans

Ledarresistansen beror på ledarens area och ledarmaterialets resistivitet enligt

$$R = \frac{\rho l}{A}, \quad [\Omega] \qquad \text{Formel 2.27}$$

där  $l$  är ledaren längd. För koppar är resistiviteten =  $0,018 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  och för aluminium  $0,028 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  Uträkning av resistans i andra material som t.ex. marken görs på liknande vis. Det ska tilläggas att resistansen även har ett temperaturberoende vilket inte gås in i närmare på än att resistansen ökar med ökad temperatur i ledaren. Formeln ovan gäller vid  $20^\circ\text{C}$ .

### 2.1.6 Ledningsimpedans

I en ledning finns ledarimpedans som är sammansatt av ledningsresistans och induktans enligt:

$$Z = R + jX_L, \quad [\Omega] \qquad \text{Formel 2.28}$$

Det förekommer även en kapacitiv reaktans längs ledaren men den är så låg att den försummas.

Storleken på impedansen beräknas enligt:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + jX_L^2}, \quad [\Omega] \qquad \text{Formel 2.29}$$

och fasförskjutningen mellan spänning och ström enligt:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{X_L}{R}\right) \qquad \text{Formel 2.30}$$

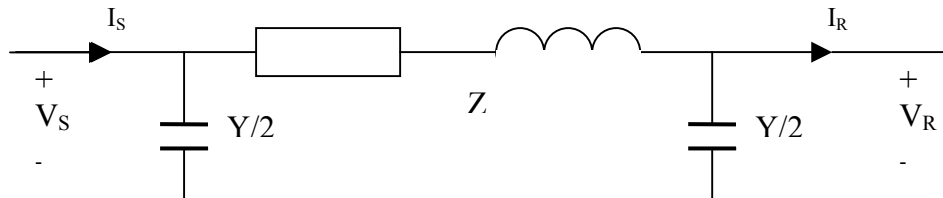
Den induktiva reaktansen  $X_L$  bildar en fasförskjutning mellan ström och spänning så att strömmen ligger efter spänningen i systemet. Omvänt kan kapacitiv fasförskjutning uppstå. Denna fasförskjutning fås t.ex. vid fel i kabelnät eftersom ström kommer att löpa mellan kablarnas friska faser och jord och därmed bilda en seriekopplad kapacitans.

### 2.1.7 Hängkabel och hängspiralkabel

Hängkabel och hängspiralkabel är kablar med karaktäristik som markledning förutom att dessa är upphängd i luften mellan stolpar med bärlina och inte har fysik direktkontakt med marken. Fasledarna som är PEX-isolerade sitter ihop utan yttre omgivande mantel. Kabeln betraktas precis som den belagda linan som icke personsäker när den är i drift.

### 2.1.8 $\pi$ -länk

Alla ledningar kan modelleras för varje fas med en så kallad  $\pi$ -länk. Denna länk, se Figur 2.2, representerar induktanser, kapacitanser och resistanser som diskuterades ovan.



Figur 2.2.  $\pi$ -länk för modellering av ledning.

Beteckningarna visar serieimpedansen respektive shuntadmittansen:

$$Z = z l = (R + j\omega L)l, \quad [\Omega]$$

Formel 2.31

$$Y = y l = (G + jB)l = (G + j\omega C)l, \quad [S]$$

$V_S$  och  $V_R$  är plusföljdsspänningarna,  $I_S$  och  $I_R$  plusföljdsström i sändar- respektive mottagningsida.

Beroende på om länken representerar luftlednings- eller kabelmodell värderar man de innefattande komponenterna olika. Denna värdering baseras på resonemangen i ledningsavsnitten ovan.

För luftledning så viktas parametrarna från 1 viktig till 4 mindre viktig enligt:

1.  $L$  [ $\Omega/\text{km}$ ] själv och ömsesidig induktans.
2.  $R$  [ $\Omega/\text{km}$ ] resistiva ledningsförluster.
3.  $C$  [ $\text{F}/\text{km}$ ] kapacitanser mellan fasledare och jord.
4.  $G$  [ $\text{S}/\text{km}$ ] Koronaförluster.

För kabel så viktas parametrarna från 1 viktig till 4 mindre viktig enligt:

1.  $C$  [ $\text{F}/\text{km}$ ] kapacitanser mellan fasledare och jord.
2.  $R$  [ $\Omega/\text{km}$ ] resistiva ledningsförluster.
3.  $L$  [ $\Omega/\text{km}$ ] själv och ömsesidig induktans.
4.  $G$  [ $\text{S}/\text{km}$ ] Koronaförluster.

Om ledningen är lång kan punkt 3 och 4 försummas för respektive ledningstyp.

## 2.2 Transformatorer

Transformatorerna som kommer att användas i simulering kommer att antas vara ideala på det viset att de inte kan mättas. Parametrarna deklarerar i p.u., (per unit), i Matlab och därför visas i avsnittet hur man tar fram dessa.

För att räkna med per unit systemet måste man specificera så kallade ”basvärden” vilket görs utifrån transformatorns skenbara märkeffekt  $S_N = S_{bas}$  och huvudspänningsnivåerna på uppsidan,  $V_{prim} = V_{bas1}$ , och nedsidan,  $V_{sek} = V_{bas2}$ , som är givna. Med hjälp av dessa värden kan nu basimpedansen beräknas enligt

$$Z_{bas1} = \frac{V_{bas1}^2}{S_{bas}}, \quad [\Omega] \quad \text{Formel 2.32}$$

och

$$Z_{bas2} = \frac{V_{bas2}^2}{S_{bas}}, \quad [\Omega] \quad \text{Formel 2.33}$$

Utifrån dessa basvärden vars värde är 1 p.u. kommer de andra parametrarna att beräknas utifrån förhållandet

$$\text{per unit värde} = \frac{\text{verkligt värde}}{\text{basvärde}} \quad \text{Formel 2.34}$$

vilket innebär att de har en procentuell relation till basvärdena.

Även märkström,  $I_N$ , tomgångseffekt,  $P_{tom}$ , tomgångsström,  $I_{tom}$ , och kortslutningseffekt,  $P_k$ , brukar vara kända varpå kortslutningsresistanser,  $R_k$ , och magnetiseringsresistans,  $R_m$ , kan bestämmas med hjälp av

$$R_{k1} = \frac{P_k}{3I_{N1}^2}, \quad [\Omega] \quad \text{Formel 2.35}$$

$$R_{k2} = \frac{P_k}{3I_{N2}^2}, \quad [\Omega] \quad \text{Formel 2.36}$$

$$R_{m1} = \frac{V_{prim}^2}{P_0}, \quad [\Omega] \quad \text{Formel 2.37}$$

$$R_{m2} = \frac{V_{sek}^2}{P_0}, \quad [\Omega] \quad \text{Formel 2.38}$$

Om resultaten från formlerna 2.35 till 2.38 sätts in i 2.34 så fås



$$R_{k1,pu} = \frac{R_{k1}}{Z_{bas1}}, \quad [p.u.] \quad \text{Formel 2.39}$$

$$R_{k2,pu} = \frac{R_{k2}}{Z_{bas2}}, \quad [p.u.] \quad \text{Formel 2.40}$$

$$R_{m1,pu} = \frac{R_{m1}}{Z_{bas1}} = \frac{R_{m2}}{Z_{bas2}} = R_{m2,pu}, \quad [p.u.] \quad \text{Formel 2.41}$$

För att ta reda på magnetiseringsreaktansen kan man t.ex. först beräkna reaktiva tomgångseffekten enligt

$$Q_{tom} = \sqrt{S_{tom}^2 - P_{tom}^2}, \quad [VAr] \quad \text{Formel 2.42}$$

där skenbara tomgångseffekten av

$$S_{tom} = \sqrt{3} * V_{sek} * I_{tom}, \quad [VA] \quad \text{Formel 2.43}$$

som slutligen ger den sökta reaktansen

$$X_{Lm1} = \frac{V_{prim}}{Q_0}, \quad [\Omega] \quad \text{Formel 2.44}$$

och representeras i p.u. som

$$X_{Lm1,pu} = \frac{X_{Lm1}}{Z_{bas1}} = \frac{X_{Lm2}}{Z_{bas2}} = X_{Lm2,pu}, \quad [p.u.] \quad \text{Formel 2.45}$$

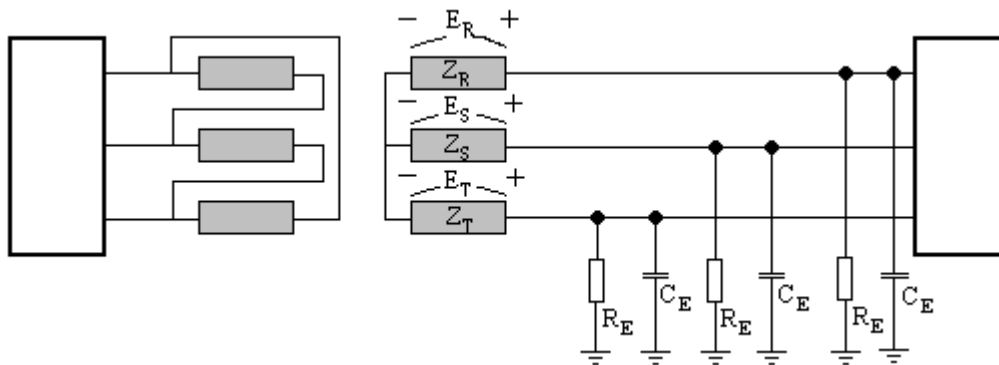
Dessa beräkningar gäller tvålindningstransformatörer där tomgångs- och kortslutningseffekter tas fram genom att mäta ström och spänning på primärsidan när sekundärsidan är öppen respektive kortsluten. Vad gäller trelindningstransformatörer, vilka ej behandlas i denna rapport, används analoga mätningar för att få fram dessa storheter. Tomgångsprovet görs på samma sätt som i tvålindningsfallet. Kortslutningsprovet utförs däremot med först den ena sekundärlindningen öppen, den andra kortsluten och vice versa. Beräkningar av ovan beskriven typ genomförs sedan utifrån respektive mätning.

## 2.3 Olika typer av systemjordning

När man talar om jordning kan man avse antingen skyddsjordning eller systemjordning. Skyddsjordning avser *jordning av ledande del som inte tillhör spänningsförande delar för att skydda personer mot elchock* och kommer inte att behandlas här. Systemjordning innebär *jordning av en punkt i en aktiv krets, erforderlig för riktig drift av utrustning och transformatorstationer* och förklaras i detta avsnitt<sup>8</sup>.

Det finns ett antal metoder för att jorda ett system. Valet mellan de olika metoderna görs utifrån nätets spänningsnivå, begränsning av jordslutningsström och så att jordfelsskydden detekterar och kopplar bort jordslutningar med god känslighet och selektivitet. Denna rapport behandlar problematiken i mellanspänningsnivåerna, 6-70kV, i vilka direktjordade system ej tillämpas på grund av att dessa ger stora värden på eventuell jordslutningsström och därmed höga överspänningar. Direktjordade system behandlas därför ej i denna rapport. Här beskrivs de icke direktjordade system som är vanligt förekommande i svenska distributionsnät.

Först beskrivs en del av de komponenter som ingår i modellen, Figur 2.3, och därefter de olika icke direktjordade systemen<sup>9,10</sup>.



**Figur 2.3 Isolerat system med sekundärsidans impedanser och nedsidans ledningsimpedanser.**

Transformatorns inre impedans  $Z_{R,S,T}$  på sekundärsidan består av lindningsresistans och läckreaktans. Spänningarna över sekundärlindningarna,  $E_{R,S,T}$ , beskrivs som:

$$\begin{cases} E_R = V \\ E_S = a^2 V \\ E_T = a V \end{cases} \quad a = -0,5 + j\frac{\sqrt{3}}{2} = \angle 120^\circ, \quad a^2 = -0,5 - j\frac{\sqrt{3}}{2} = \angle 240^\circ \quad \text{Formel 2.46}$$

där  $a$  symboliserar fasförskjutningen.

<sup>8</sup> Svensk standard SS 421 01 01, Starkströmsanläggningar med nominell spänning överstigande 1kV AC, Svenska elektriska kommissionen, SEK 1999-12-17

<sup>9</sup> Onormala tillstånd I elkraftnät, N. Knudsen, B. Stenborg, Inst för elektrisk anläggningsteknik Chalmers, 1974

<sup>10</sup> Bortkoppling av högresistiva jordslutningar i icke direktjordade distribution- och transmissionsnät, Svenska Elverksföreningen Arbetsgruppen för känsliga jordfelsskydd, 1990

Om man tittar på nedsidan av transformatorn så finns, utefter ledningen, en shuntadmittans. Denna förenklade admittans ges av:

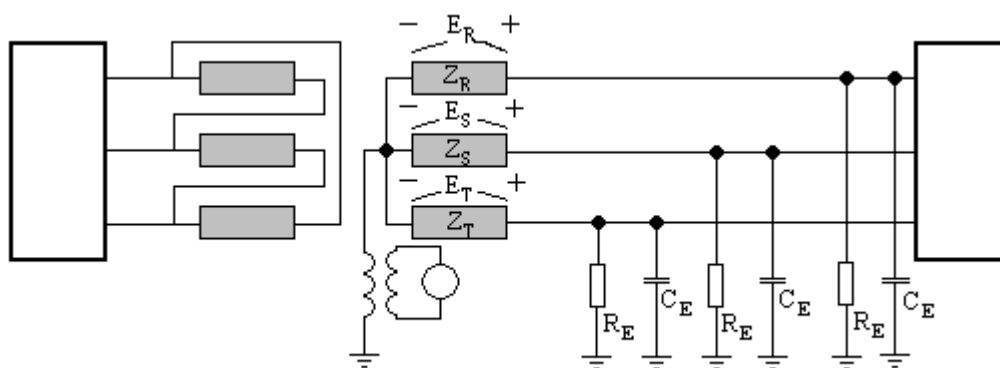
$$Y_E = \frac{1}{Z_E} = G + jB = \frac{1}{R_E} + j\omega C_E \quad \text{Formel 2.47}$$

Kortfattat består admittansen av en kapacitiv komponent som beror på hur mycket kabel nätet innehåller. Ju mer kabel desto större kapacitivt bidrag. Det resistiva bidraget innefattar förutom ledningsresistans även smuts och fukt som förekommer på t.ex. isolatorer och kabelavslut. Även serieinduktans och serieresistans i ledning förekommer (*se mer beskrivning av ledningstyper*).

### 2.3.1 Isolerat system

Exempel på ett system med isolerad nollpunkt visas i Figur 2.4. Den enda kopplingen är via en spänningstransformator och/eller överspänningsavledare i nollpunkten för att kontrollera nollpunktspotentialen. Isolerad koppling till jord används om det finns strömbidrag vid jordslutningar som är mätbara och inte för höga. Exempel på ett sådant system kan vara ett geografiskt litet nät, med minst tre stycken utmatande fack. Anledningen till att det måste vara tre fack är följande:

Antag att vi har två fack med samma kapacitiva bidrag i båda ledningarna. De kapacitiva mätande jordfelskydden är oriktade och mäter strömmarna i de eller som i detta fall det andra fackets bidrag. Eftersom detta bidrag är lika stort sker ingen utlösning av det felbehäftade facket. Om däremot stationen består av tre fack så spelar det ingen roll om de olika facken har lika stora bidrag men de två "friska" fackens totala ström får ej vara lika med det felbehäftade. Jordslutningar kan då detekteras av kapacitivt mätande oriktade jordfelsskydd.



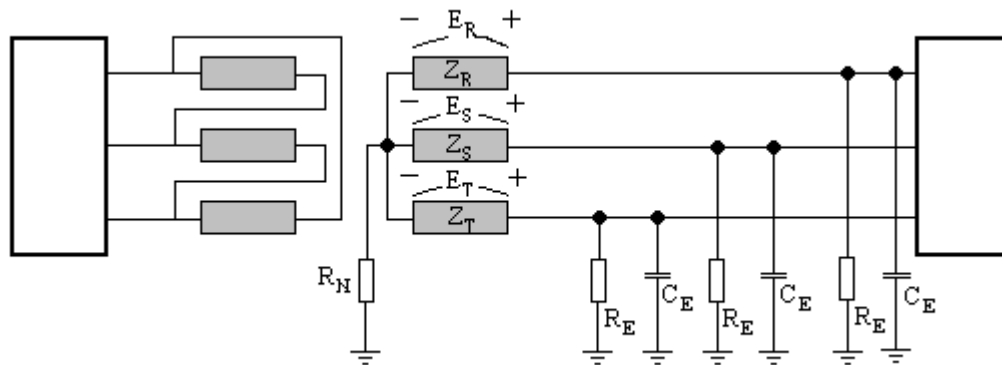
Figur 2.4 Isolerat system med Y-kopplad sekundärsida.

Det finns en undre gräns på den mätbara strömmen. Om den kapacitiva jordslutningsströmmen är mindre än 0.5 A blir det problem om jordslutningarna är av högre felresistans. Denna höga felresistans ger upphov till hög nollföljdsspänning som kan ge oönskad funktion hos jordfelsskydden. En övre gräns finns också på jordslutningsströmmen så att inte farlig spänningssättning på utsatt del inträffar. Då måste man på något sätt kompensera bort dessa strömmar. Mer om regler för

spänningssättning av utsatt del visas senare i kapitel 4, *Lagar förordningar och föreskrifter*.

### 2.3.2 Resistansjordat system

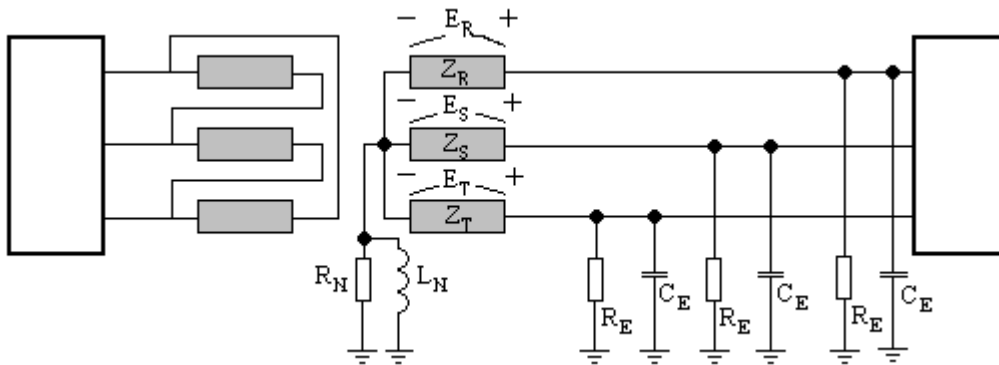
Komponenten mellan transformatornollpunkt och jord utgörs i detta fall av en högohmig resistor (Figur 2.5). Det finns även lågohmigt resistansjordade system men de är ovanligt förekommande och behandlas ej här. Resistansjordat system med högohmig resistor används om den kapacitiva jordslutningsströmmen är liten ( $< 0.5$  A) för att få en bättre koppling till jord. Syftet med att införa ett motstånd är att den ger en resistiv komponent som ger en väldefinierad ström vid jordslutning. Ledningarnas jordströmsskydd väljs för att mäta denna ström. Strömmen som motståndet ger upphov till benämns aktiv ström. Resistansen väljs i storleksordningen 5-25 A beroende på spänningsnivå och den utgående ledningens(-arnas) utlösningsskrav. Nätet karakteriseras av att det är geografiskt litet och består i huvudsak av luftledning med försumbart kapacitiva strömmar.



Figur 2.5 Exempel på resistansjordat system.

### 2.3.3 Reaktansjordat system

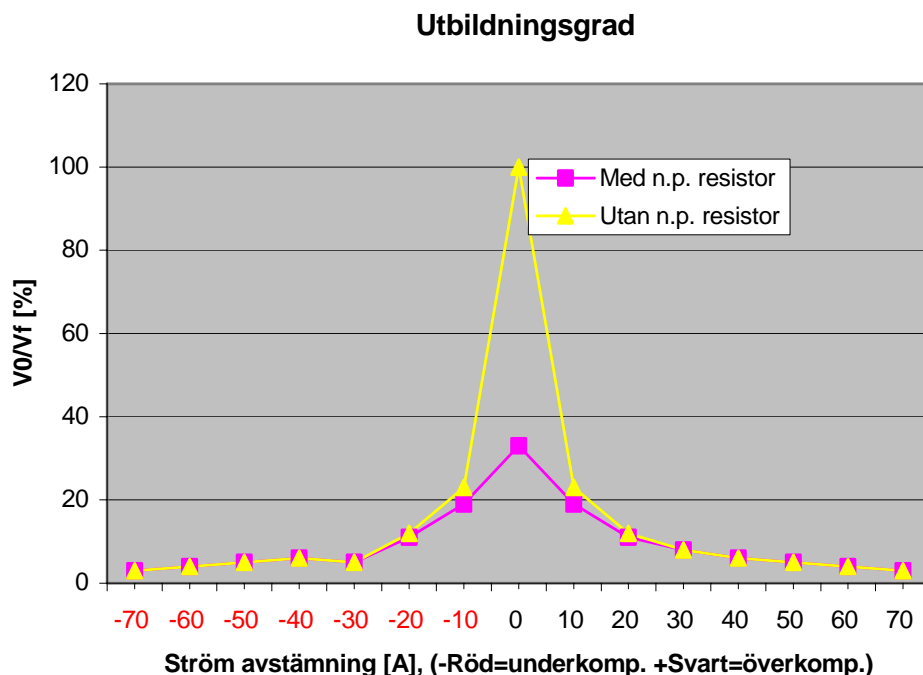
För att minska den totalt uppkomna jordslutningsströmmen i felstället används en nollpunktsreaktor. Syftet med nollpunktsreaktorn är att motverka ledningsnätets kapacitiva strömbidrag som uppkommer vid jordslutning. I nät med övervägande kabel är den kapacitiva strömmen betydligt större än i nät med luftledning. Genom att kompensera den kapacitiva jordslutningsströmmen med en induktiv ström minskas den totala felströmmen i felstället. På så sätt hålls spänningssättningen vid jordslutning nere.



**Figur 2.6** Reaktansjordat system med parallellkopplad resistor.

Reaktansjordning används även för att självsläcka eventuell ljusbåge i felstället. Parallellt med reaktorn mellan nollpunkt och jord sitter oftast en resistor för att bygga upp en aktiv ström att mäta på. Denna resistor kopplas bort vid jordfelsdetektering. Är systemet väl avstämt, d.v.s. om kapacitiva jordslutningsströmmen är ungefär lika med induktiva nollpunktsströmmen, så slocknar ljusbågen. Denna icke direktjordade metod kallas impedansjordning och visas i Figur 2.6.

För att ställa in nollpunktsreaktorn så att den är avstämmd mot nätet görs uppmätning av nollpunktsspänningen vid olika steg på nollpunktsreaktorn. Punkterna plottas upp i ett diagram där nollpunktsspänningen visas på y-axeln och reaktorström på x-axeln.



**Figur 2.7.** Framtagning av resonanspunkt med respektive utan nollpunktresistor.

För att få till diagrammet ökar man reaktorströmmen stegvis och mäter nollpunktsspänningen för varje steg. När reaktorströmmen motsvarar nätets  $I_c$ -ström fås en resonanspunkt. Om reaktorströmmen ökas ytterligare kommer nollpunktsspänningen åter att sjunka. För att få bättre utslag så kan nollpunktsmotståndet kopplas ur och mätningarna görs om. Den gula kurvan motsvarar utan nollpunktsresistor.

Önskemålet är att ligga nära denna topp för att få bästa kompensering mot de kapacitiva strömmarna. Är nätet symmetriskt kan det vara problem att hitta denna topp. Förutom bortkoppling av motståndet kan man lösa detta problem genom att man inför en viss osymmetri i form av en kondensator ute i nätet. På detta sätt framträder toppen vid avstämningpunkten och utbildningsgraden värde kan ställas.

Det finns olika typer av nollpunktsreaktorer<sup>11</sup>.

### **Stegreaktorer**

Stegreaktorer består av en kärna med en lindning där antalet varv stegvis kopplas in eller ur efter behov. En nackdel är att exakt kompensering är svår att få vid förändringar i nätet.

### **Reglerbara reaktorer**

Glidkärnereaktorer kan däremot regleras kontinuerligt och kan på så vis följa med nätförändringar. Nackdelen här är priset. Glidkärnereaktorer kostar ungefär 1/3 mer än stegreaktorer. Dyrast av dessa är dock dykkärnereaktorn, på grund av att denna har två rörliga kärnor för att reglera luftgapet istället för att som glidkärnereaktorn endast ha en kärna. Fördelen är att dykkärnereaktorn kan byggas för större effekter.

Även reglering kan göras om man istället kopplar in seriekapacitanser parallellt med en fast spole. Regleringen görs sen i form av att kontaktorer kopplar ur och in olika antal kondensatorer.

### **Utdistribuerade nollpunktsreaktorer.**

Tanken med utlokaliserad nollpunktsreaktor är att man istället för att reglera eller i värsta fall byta ut nollpunktsutrustning i fördelningsstationer vid ändring av kapacitiva strömmar, som vid utbyggnad av kabelnät, sätter ut nollpunktsinduktanserna lokalt i nätstationer. Ytterligare en fördel är att vid sektionering så avstäms det nya driftläget automatiskt eftersom bortkopplad del kompenseras i delens nätstationer. På så vis ligger man rätt i kompensering vid bortfall av ledning i systemets yttre delar både vid fel och vid annan driftomläggning.

Nackdelen är däremot ökad kostnad för inköpt nätstation och aktiva förluster i transformatorn. Enligt ABB:s utredning av Stenestadsprojektet<sup>12</sup> så fann man att de lokala kompenseringsspolarna bör kompletteras med nollpunktsreaktor och nollpunktsmotstånd i matande fördelningsstation för att avstämningen skall bli god. Anledningen att nollpunktsmotståndet placeras där är att reläerna ska ha den väldefinierade aktiva strömmen att mäta på. Denna metod är vid denna rapportskrivning i en utvecklingsfas. Eventuellt skulle en utvärdering av Vattenfalls elnät på Värmlandsnäs utanför Säffle kunna ge en bild av hur man ska lösa problemen i ovan nämnda utredning.

---

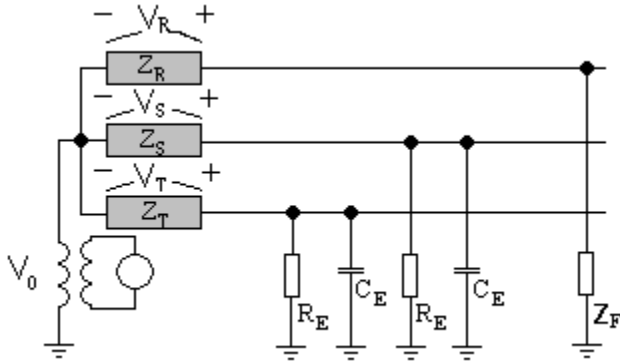
<sup>11</sup> Jordfelsteknik, ekonomisk utvärdering, Svenska Elverksföreningen, 1992

<sup>12</sup> Jordfelsbortkoppling I distributionsnät med lokal kompensering, Messing Lars, ABB, 2001

## 2.4 Systemens nollföljdsimpedans vid jordslutning

De olika systemen har olika nollföljdsimpedans beroende på nollpunktsutrustning och detta visas nedan. Vad nollföljdskomponenter är och hur man kommer fram till dessa förklaras i *Appendix A*. Inverkan av nollföljdsimpedans vid fel förklaras senare i kapitel 3.

### 2.4.1 Isolerat system



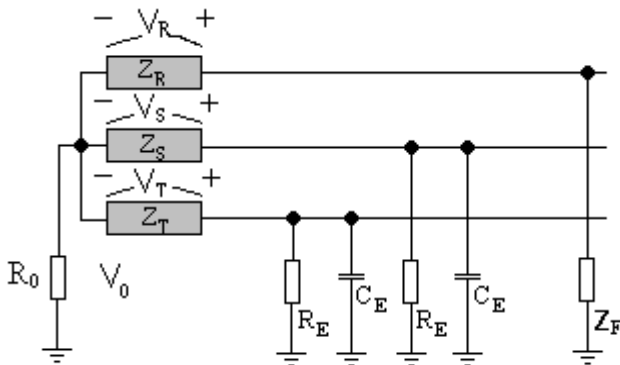
Figur 2.8. Isolerat system med enpoligt jordfel.

Nollföljdsimpedansen består, efter förenkling som kommer att beskrivas i kapitel 3, av ledningarnas kapacitans till jord och impedansen i nollpunkten enligt:

$$Z_0 = -\frac{1}{j\omega C_E} // R_E = X_{CE} // R_E$$

Formel 2.48

### 2.4.2 Resistansjordat system



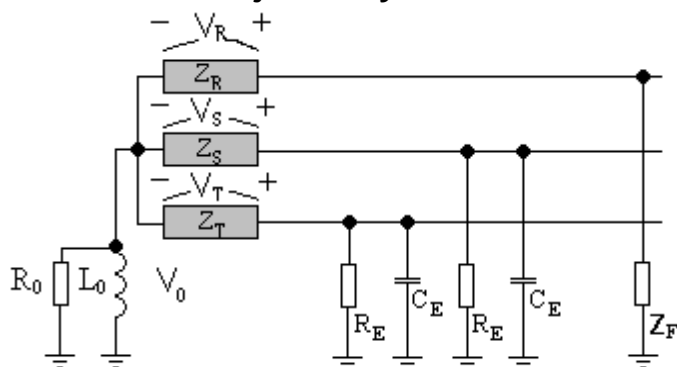
Figur 2.9. Resistansjordat system med enpoligt jordfel.

I resistansjordat nät ges nollföljdsimpedansen efter förenkling av:

$$Z_0 = -\frac{1}{j\omega C_E} // 3R_0 // R_E$$

Formel 2.49

### 2.4.3 Reaktansjordat system



Figur 2.10. Reaktansjordat system med enpoligt jordfel.

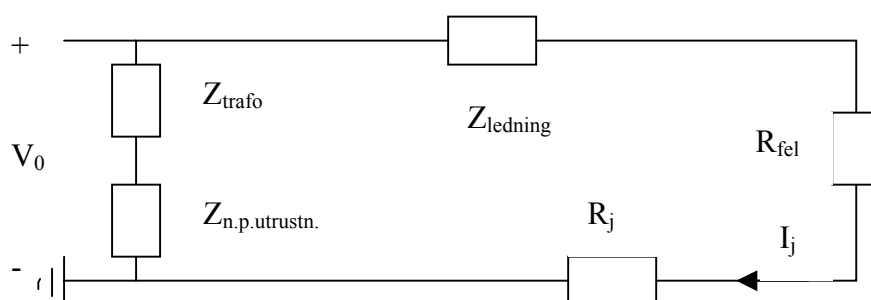
Nollföljdsimpedansen i ett reaktansjordat nät ges av:

$$Z_0 = -\frac{1}{j\omega C_E} // 3R_0 // 3j\omega L_0 // R_E \quad \text{Formel 2.50}$$

Observera att ovanstående beräkningar är förenklingar av teoretiska modeller vad gäller nollföljdsimpedanser. Nollföljdsimpedanser som ledningens längs-, transformatorlindnings- och lastimpedans är försummade men skall tillkomma vid exakt återgivning av modellen.

### 2.5 Jordtag

Nollpunktsutrustningen förbinds därefter till marken genom det så kallade jordtaget. Eftersom jordtaget ihop med markresistiviteten bestämmer vilken spänning som kommer att bildas i felstället så vill man uppnå så liten jordtagsresistans som möjligt. Detta kan förenklat beskrivas som figur nedan.



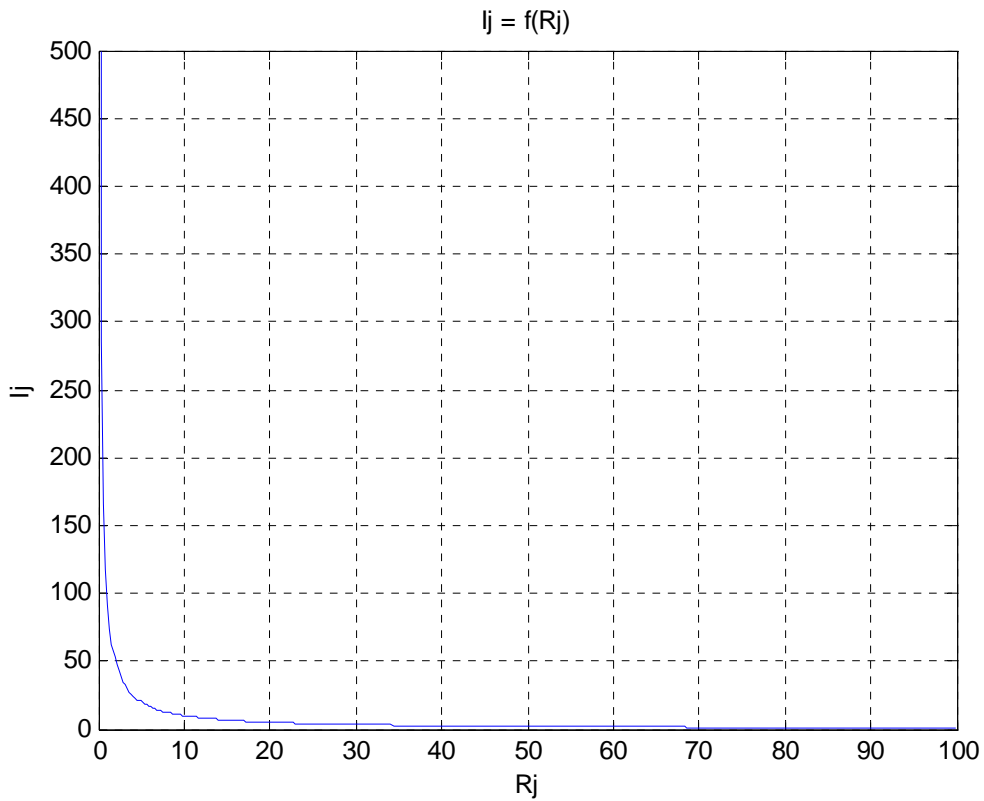
Figur 2.11. Beskrivning av jordtagets betydelse.

Ur figuren ser man att strömmen  $I_j$  bestäms bland annat utifrån vilken jordtagsresistans man har. Enligt bestämmelser som visas senare under *Lagar förordningar och föreskrifter* så ska spänning av utsatta jordelar ej vara mer än 100 V. Detta ger följande

$$V = I_j * R_j = 100 \text{ V} \quad \text{Formel 2.51}$$

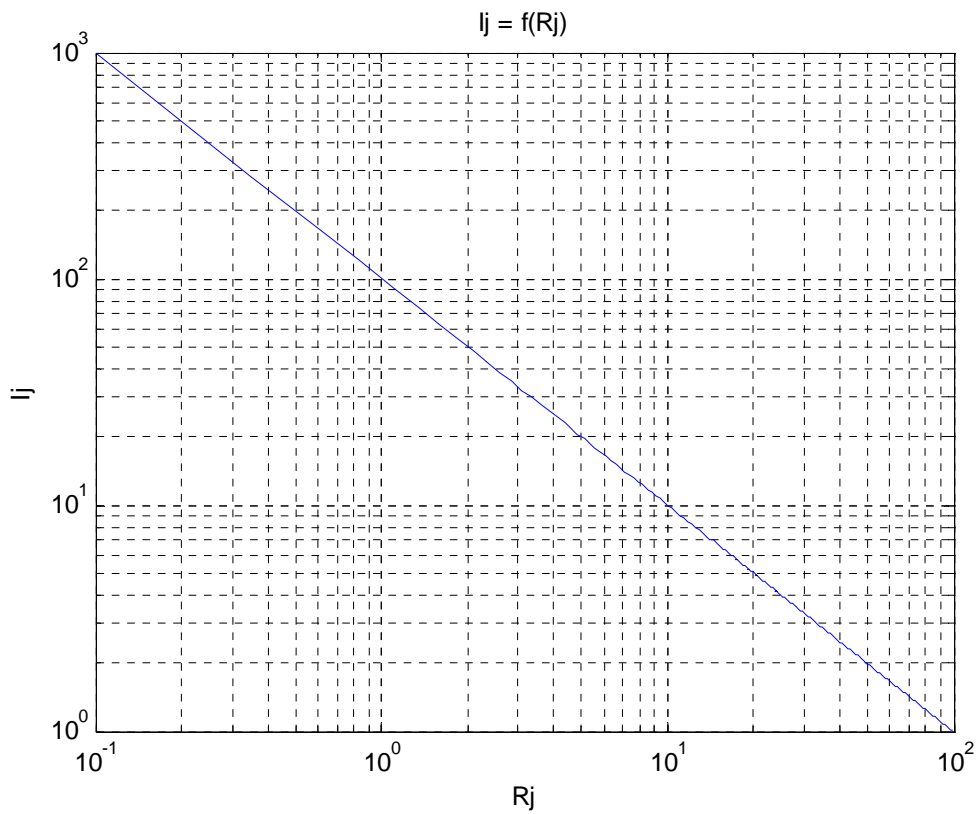


I nedanstående figur visas jordfelsströmmen som funktion av jordtagsresistansen.



Figur 2.12. Jordfelsströmmen som funktion av jordtagsresistansen, (lin-lin).

För lättare avläsning väljs att plotta logaritmiskt.



Figur 2.13. Jordfelsströmmen som funktion av jordtagsresistansen, (log-log).

Utifrån figurerna kan utläsas vilken ström som fås vid olika jordtagsresistanser för att uppfylla formeln ovan.

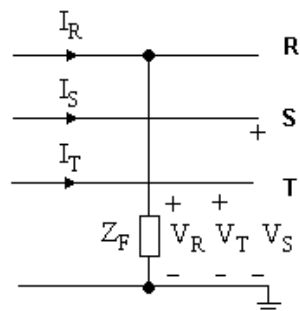
I tätorterna är resistansen låg eftersom det finns jordtag på väldigt många ställen och bildar en "enhetlig jordpotential". Exempel på sådana ställen är vattenrör, jordningar i kabelskåp, jordkoppling i hemmen m.m. På landsbygden däremot är detta ett problem om man har ett kabelnät eftersom en lång ledning jordad i matningspunkten inte blir jordad igen förrän vid mottagningspunkten som ofta är långt bort. Kabelns kapacitiva bidrag av ström vid ett jordfel ökar med ökad längd. Ska man då följa kravet med spänning på utsatt del måste jordtagsresistansen hållas nere.

Ett sätt att hålla ner denna resistans är att utmed kabelsträckningen lägga en oisolerad ledning. Om det finns en följelina redan som använts för att förbinda luftledningsstolparna och deras topplinor så kan man använda denna följelina. När sträckningen sedan drivs av kabeln och luftledningen tagits ur drift kan man även använda resten av linorna genom att markförlägga dessa.

### 3 Jordslutningstyper

För att kunna förstå och beräkna parametrar som uppstår vid jordslutningar så behövs kunskap om symmetriska komponenter. Dessa förklaras i *Appendix A*.

#### 3.1 Enpolig jordslutning



**Figur 3.1. Enpolig jordslutning.**

Ur figuren syns att  $I_S=I_T=0$ . Med ekvation 10.10 ger detta att:

$$I_0 = I_1 = I_2 = I_R / 3$$

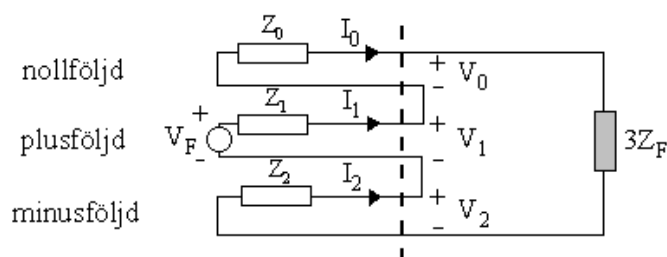
**Formel 3.1**

Över jordfelet fås spänningen  $V_R=I_R Z_F$ , där  $Z_F$  är felimpedans (resistiv), vilket ger med hjälp av ekvationerna 10.2 och 3.1:

$$V_0 + V_1 + V_2 = 3I_1 Z_F$$

**Formel 3.2**

Utifrån 3.1 och 3.2 kan Thevenin ekvivalent ritas som visas i Figur 3.2.



**Figur 3.2 Theveninekvivalent med enpolig jordslutning i sekvensdomän.**

Thevenins teorem säger att alla spänningskällor i ett nät kan ersättas med en enda. Spänningskällorna nollställs, förutom spänningskällan i felstället, genom att dessa kortsluts. Spänningen i felstället är då lika med spänningen i felstället före felets inträffande men med omvänd polaritet d.v.s. fasspänningen.

Ur Figur 3.2 syns att komponentströmmarna blir:

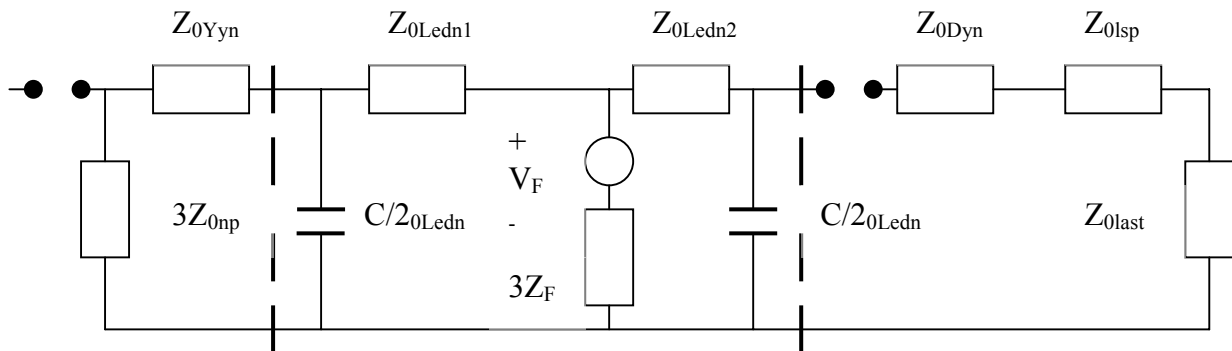
$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{V_F}{3Z_F + Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad \text{Formel 3.3}$$

Med ekvation 3.1 ger detta jordslutningströmmen i felbehäftad fas:

$$I_R = \frac{3V_F}{3Z_F + Z_0 + Z_1 + Z_2} = I_F \quad \text{Formel 3.4}$$

där  $V_F$  är spänningen över felet vilken motsvarar fasspänning innan felets inträffande.  $Z_0, Z_1, Z_2$  är nollföljds, plusföljds respektive minusföljdsimpedanser och dessa innefattar generator, lednings, transformatorlindnings och lastimpedanser som ingår i systemet. Nollföljdsimpedansens utseende varierar också utifrån vilken sorts nollpunktsutrustning som finns i transformatorns nollpunkt.

Oftast försummas minusföljds och plusföljdsimpedans på grund av att dessa impedanser, inkluderat de kapacitiva bidragen i ledningarna, från de "friska" faserna är mycket mindre än i nollföljdens bidrag. Följande utseende fås då i sekvensdomänen med samtliga nollföljdsimpedanser.



**Figur 3.3. Exempel på nollföljdsimpedanser i ett nät med nollpunktsutrustning.**

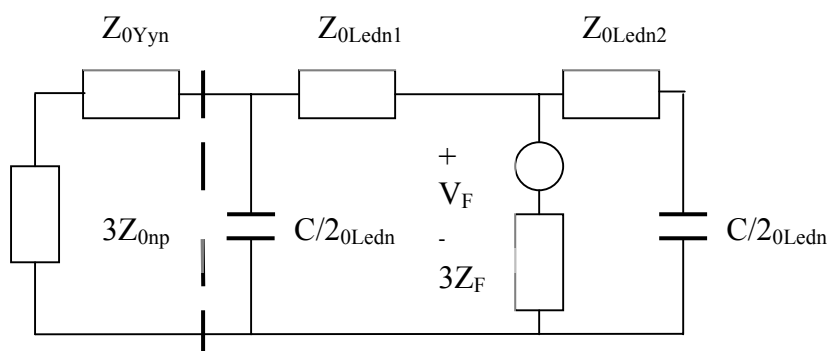
Nollföljdsimpedanser i:

- $Z_{0Yyn}$  = Transformatorns lindning, primärt och sekundärt, (55/11kV)
- $Z_{0Dyn}$  = Transformatorns lindning, (11/0,4kV)
- $Z_{0Ledn.}$  = Mellanspänningsnätets ledning, (11kV)
- $Z_{0LSP}$  = Lågspänningsnätets ledning, (0,4kV)
- $Z_{0Last}$  = Lågspänningsnätets last
- $Z_{0Nollp.utr.}$  = Nollpunktsutrustningen

$C/20Ledn.$  är nollföljdskapacitansen det vill säga kapacitansen mellan faserna och jord.

Nollföljdskomponenterna utom den i nollpunktsutrustningen försummas normalt också vid beräkning av nollföljdsimpedans och kompenseras genom att en viss marginal läggs till vid inställning av detekteringsgrad. Ett exempel på en försummad komponent är den felbehäftade ledningens längsimpedans. Anledningen till att denna försummas är att den är förhållandevis liten jämfört bidragen från ledningens kapacitans till jord och nollpunktsutrustningens impedans. Utifrån dessa förenklingar

kan nollföljdsimpedansen tecknas som Figur 3.4. I och med att längsimpedansen försummas syns det ur figur att felströmmens storlek oberoende av felets lokalisering.



**Figur 3.4. Nollföljdsimpedanser i förenklad representation.**

Om man dessutom förutsätter att transformatorn är utrustad med utjämningslindning<sup>13</sup> så kan även  $Z_{0Yyn}$  försummas. Ett exempel kommer att illustreras senare för att verifiera en modell i kapitel 6.

För att jordfelskydden skall kunna detektera jordslutningar mäter skyddet nollföljdsspänning och nollföljdsström. Spänningen över nollpunktsutrustningen kallas nollpunktsspänning och är ekvivalent med nollföljdsspänning i icke direktjordade system eftersom ovanstående förenklingar görs i praktiken. Nollpunktsspänningen  $V_0$  beräknas följande:

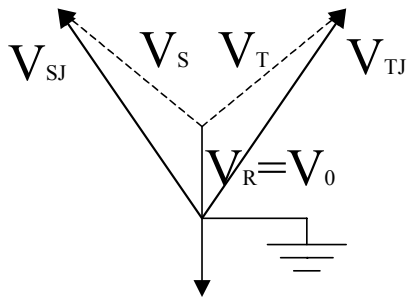
$$V_0 = \frac{Z_0}{3Z_F + Z_0} V_F \quad \text{Formel 3.5}$$

Detta förenklade uttryck fås av ekvation 3.3 samt

$$V_0 = Z_0 I_0 \quad \text{Formel 3.6}$$

som fås genom studerande av Figur 3.2. Teoretiskt skall denna spänning vara noll men i praktiken är detta omöjligt på grund av osymmetrier som t.ex. ledningsinduktion och osymmetriska laster. Med hjälp av ekvation 3.5 kan man få fram den så kallade utbildningsgraden, se Figur 3.5,  $V_0/V_F$  som används som indikation till nollpunktspänningsskyddet om hur utvecklat jordslutningen är och om jordslutningen skall lösas ut eller ej.

<sup>13</sup> D-kopplad lindning som anordnas i Yy-kopplad transformator för att minska dess impedans mot nollföljdsström, Definition ur svensk standard SS 427 01 04.



**Figur 3.5. Utbildningsgrad vid jordslutning i R-fas.**

Om jordslutningen är stum det vill säga att jordslutningsimpedansen är noll och om plus och minusföljd försummas erhålls:

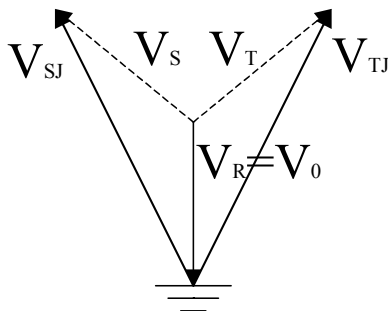
$$I_F = \frac{3V_F}{Z_0} \quad \text{Formel 3.7}$$

Ur detta ser man att jordslutningsströmmen är större än när felresistansen ingick.

Utbildningsgraden vid stumt fel blir, om man studerar ekvation 3.6 och 3.7:

$$\frac{V_0}{V_F} = \frac{Z_0}{3Z_F + Z_0} = 1 \quad \text{Formel 3.8}$$

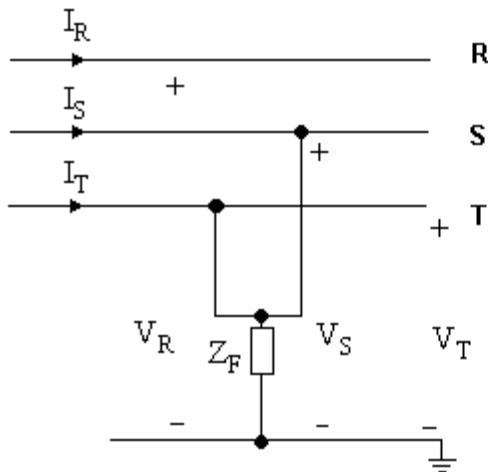
och kan illustreras enligt Figur 3.6 nedan.



**Figur 3.6. Utbildningsgrad av stum jordslutning i R-fas.**

Studering av vektorrepresentationen visar att de friska faserna ökar med faktorn  $\sqrt{3}$  gentemot felbehäftad fas och nollpunktsspänningen.

### 3.2 Tvåpolig jordslutning



**Figur 3.7** Tvåpolig jordslutning.

Figur 3.7 karakteriserar tvåpolig jordslutning. Denna typ av fel kan ibland detekteras med kortslutningsskydd. Om däremot felresistansen mellan de kortslutna faserna är stor klarar inte kortslutningsskyddet av att detektera felet utan då måste jordfelsskyddet detektera.

Ur figuren kan man utläsa fasströmmen och fasspänningarna:

$$I_R = 0 \quad \text{Formel 3.9}$$

$$V_S = V_T = (I_S + I_T)Z_F \quad \text{Formel 3.10}$$

Efter transformering från fasdomän till sekvensdomän via 10.2 och 10.12, (Appendix A), insatt i Formel 3.9 respektive 3.10 erhålls:

$$I_0 + I_1 + I_2 = 0 \quad \text{Formel 3.11}$$

och

$$V_0 + a^2V_1 + aV_2 = V_0 + aV_1 + a^2V_2 \Rightarrow V_1 = V_2 \quad \text{Formel 3.12}$$

Användning av ekvation 10.2 fås delementet  $V_S$  och användning av 10.10 fås  $I_S$  samt  $I_T$  enligt:

$$V_S = V_0 + a^2V_1 + aV_2 \quad \text{Formel 3.13}$$

$$I_S = I_0 + a^2I_1 + aI_2 \quad \text{Formel 3.14}$$

$$I_T = I_0 + aI_1 + a^2I_2 \quad \text{Formel 3.15}$$

$$V_0 + aV_1 + a^2V_2 = Z_F(I_0 + a^2I_1 + aI_2 + I_0 + aI_1 + a^2I_2) \quad \text{Formel 3.16}$$

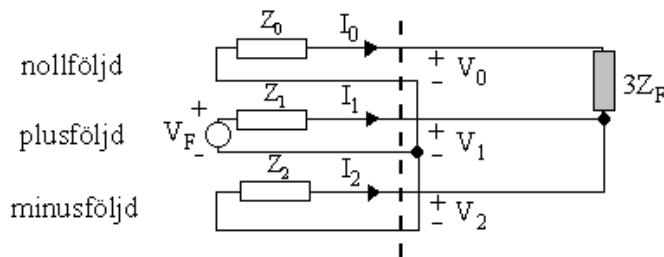
Om man nu tar denna ekvation och att  $V_S = V_T$  så fås:

$$V_0 - V_1 = Z_F(2I_0 - I_1 - I_2) \quad \text{Formel 3.17}$$

eftersom  $a^2 + a = -1$  enligt ekvation 10.1. Används nu ekvation 3.11 ger detta slutligen:

$$V_0 - V_1 = 3Z_F I_0 \quad \text{Formel 3.18}$$

Utifrån 3.11, 3.12 och 3.18 kan nu sekvenskrets för systemet ritas.



**Figur 3.8. Theveninekvivalent med tvåpolig jordslutning i sekvensdomän.**

De olika sekvensströmmarna fås sedan ur Figur 3.8:

$$I_1 = \frac{V_F}{Z_1 + [Z_2 // (Z_0 + 3Z_F)]} = \frac{V_F}{Z_1 + \left[ \frac{Z_2(Z_0 + 3Z_F)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_F} \right]} \quad \text{Formel 3.19}$$

$$I_2 = (-I_1) \frac{Z_0 + 3Z_F}{Z_0 + 3Z_F + Z_2} \quad \text{Formel 3.20}$$

$$I_0 = (-I_1) \frac{Z_2}{Z_0 + 3Z_F + Z_2} \quad \text{Formel 3.21}$$

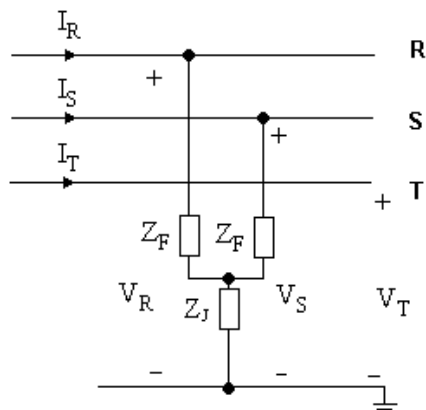
och likaså sekvensspänningarna om man dessutom använder:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_F \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad \text{Formel 3.22}$$

Slutligen kan då fasspänningarna och fasströmmarna beräknas utifrån sekvensvärden ovan genom användning av ekvation 10.2 respektive 10.12.



På samma sätt som togs upp vid det enpoliga fallet görs även här antaganden och förenklingar för att på ett enkelt sätt ta fram utbildningsgraden. Utbildningsgraden blir densamma, se ekvation 3.5, men eftersom tvåpolig jordslutning kan se ut på två olika sätt, Figur 3.9, så fås följande fall:



Figur 3.9. Specialfall av tvåpolig jordslutning.

Fall 1:  $Z_K = 0$  Tvåpoligt stum jordslutning

Fall 2:  $Z_J = 0$  Två enpoliga jordslutningar

Eftersom  $3Z_F = 3[Z_J + (Z_K//Z_K)]$  erhålls då:

$$\frac{V_0}{V_F} = \frac{Z_0}{2Z_0 + 3Z_K + 6Z_J} \quad \text{Formel 3.23}$$

och i sin tur:

$$I_F = \frac{3V_F}{2Z_0 + 3Z_K + 6Z_J} \quad \text{Formel 3.24}$$

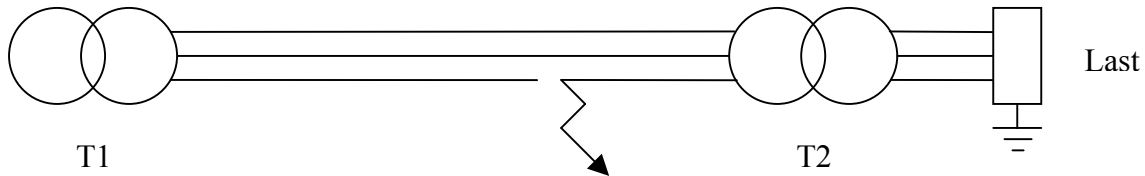
Systemets plus-, minus- samt nollföljdsimpedanser förutom de i nollpunktsutrustningen är ej medtagna utan är försummade precis som i enpoliga fallet. Nollföljdsimpedanserna för respektive nollpunktsutrustning visades i kapitel 2.

### 3.3 Simultana enpoliga jordslutningar

Denna typ av enpoliga fel inträffar direkt efter varandra som ett följdfele. Det första uppkomna felet är av lågresistiv karaktär d.v.s. nästan eller helt stumt, medan det andra felet har högre jordfelsresistans. Som visades ovan så ökar spänningen i dom friska faserna vid en jordslutning, se Figur 3.5. Denna spänningsökning kan bidra till att en annan jordslutning uppkommer antingen i samma eller i annan ledning. Uträkningar och härledning till denna typ av fel fås också med symmetriska komponenter men behandlas ej i denna rapport.

### 3.4 Bakmatade jordslutningar

Bakmatade jordslutningar förklaras lättast genom att studera figuren nedan.



**Figur 3.10. Bakmatad jordslutning. Transformator 2 är av typ  $\Delta/Y$  eller  $Y/Z$  med direktjordad nollpunkt.**

Denna typ av fel är relativt ovanliga men när den förekommer är det oftast på luftledning. Lindelen från mottagande station kommer i kontakt med jord medan lindelen från matande station fortfarande är fäst i isolatorn på stolpen och saknar kontakt med jord.

Med hjälp av symmetriska komponenter som visas i *Appendix A* kan uttrycket för att beräkna jordslutningsströmmen tas fram. Uttrycket blir<sup>14</sup>

$$I_F = \frac{V_F}{9Z_L + 6R_j + 2Z_0} \quad \text{Formel 3.25}$$

där  $Z_L$  är ekvivalent Y-kopplad impedans som beskriver belastningen hos transformator T1,  $R_j$  är felresistansen och  $Z_0$  är systemets nollföljdsimpedans som visades i avsnittet *Systemjordning*, kapitel 2. Om man jämför ekvationen ovan med ekvation 3.7 och 3.24 ser man att jordslutningsströmmen kommer att bli mindre på grund bland annat av belastningens impedans vid samma fel och nollföljdsimpedans. Belastningens impedans fås av

$$Z_L = \frac{V_N^2}{S_{bel}} \quad \text{Formel 3.26}$$

där  $V_N$  är transformatorns märkspänning och  $S_{bel}$  är belastningseffekten. Med minskad belastning på transformator kan man se att den drivande jordfelsströmmen också minskar och blir därmed svårare att detektera med jordfelsskydden.

Om man däremot tittar på nollpunktsspänningsskydden blir effekten tvärt om. Ökad belastning medför svårare för nollpunktsspänningsskyddet, (Nus-skyddet) att detektera eftersom utbildningsgraden ges av

$$\frac{V_0}{V_F} = \frac{Z_0}{9Z_L + 6R_j + 2Z_0} \quad \text{Formel 3.27}$$

<sup>14</sup> Bortkoppling av högresistiva jordslutningar i icke direktjordade distributions- och transmissionssystem, Svenska Elverksföreningen – arbetsgruppen för känsliga jordfelsskydd, 1990

Lägsta nivån för skyddet sätts till 10 % och 5 % för luftledning respektive kabel vilket medför att man kan hamna under dessa värden ganska enkelt vid bakmatad jordslutning.

Några lösningar på hur man ska behandla denna typ av fel omfattas ej i detta arbete men en tanke kan vara att man på mottagande transformators lågspänningssida mäter fasströmmarna. Om någon av dessa strömmar avviker från sitt börvärde så skickas en signal tillbaka till överliggande fördelningsstations fackbrytare varpå denna kopplar bort berörd distributionsstation. Signalen kan överföras med hjälp av befintlig signalkabel om sådan finns eller via etern. Det förstnämnda bör ge en snabbare bortkoppling och därmed ett bättre skydd.

### **3.5 Intermittenta jordslutningar**

Med en intermittent jordslutning menas en jordslutning som återkommer vanligtvis när spänningen över felet når sitt toppvärde. Då sker en omfördelning av laddningarna mellan ledare och skärm under en väldigt kort tid vilket medför höga strömpikar. Under urladdning sjunker spänningen till noll för att sedan under nästa halvperiod, eller senare, åter stiga igen tills överslag sker o.s.v. Resistansen i form av ljusbågen är alltså hög när ingen laddningsomfördelning sker och i princip noll vid genomslag. Detta fenomen kan ge höga spänningar när det både finns en induktans och en kapacitans i systemet som bildar en serieresonanskrets. Om resonanskretsens egenfrekvens är densamma som systemets så kan dessa två spänningar adderas till varandra i urladdningsskedet och superponera spänningen upp till höga värden.

## 4 Lagar, förordningar och föreskrifter

All transmission och distribution av elektrisk ström regleras av olika lagar, förordningar och föreskrifter för att på ett så säkert sätt som möjligt, för person och egendom, tillgodose kundernas behov. Med avseende på jordfel, en eller flerpoligt, innebär detta olika bortkopplingskrav beroende på typ av ledning och spänningsnivå. Vidare finns även krav på jordade delar till vilka jordslutning kan ske genom uppkomna spänningar förorsakade av jordström. Dessa är angivna i *Elsäkerhetsverkets föreskrifter om hur elektriska starkströmsanläggningar skall vara utförda samt allmänna råd om tillämpningen av dessa föreskrifter*, beslutade den 29 januari 2004. Dessa föreskrifter trädde i kraft 1 juli, 2004 och ersätter avdelningarna A och B i ELSÄK-FS 1999:5, "Blå boken", som upphör att gälla 1 juli 2006.

Härefter följer ett utdrag ur dessa föreskrifter med undantag för fotnot 14.

ELSÄK-FS 2004:1

### **5 kap. Särskilda säkerhetskrav för högspänningsanläggningar**

#### ***Automatisk fränkoppling vid jordfel i icke direktjordat system***

**4 §** *En högspänningsanläggning skall vara utförd så, att en en- eller flerpolig jordslutning kopplas ifrån snabbt och automatiskt. Undantag gäller för en högspänningsanläggning för högst 25 kV systemspänning som inte innehåller någon luftledning. En sådan anläggning får vara utförd så, att en enpolig jordslutning enbart signaleras automatiskt.*

**5 §** *För en högspänningsanläggning i vilken det ingår*

- *en friledning i förstärkt utförande,*
- *en friledning med plastbelagda ledare eller*
- *en luftledning utförd med hängspiralkabel utan metallisk skärm*

*skall jordfelskydden ha högsta möjliga känslighet vid detektering av jordfel. Reläfunktionen för fränkoppling skall vara säkerställd för resistansvärden upp till 5 000 ohm.*

**6 §** *För en högspänningsanläggning för högst 25 kV systemspänning i vilken det ingår luftledningar av något annat slag än vad som anges i 5 § skall jordfelskydden vara anordnade så, att reläfunktionen för fränkoppling är säkerställd för resistansvärden upp till 3 000 ohm. Inom ej detaljplanelagt område får en sådan anläggning innehålla ett fåtal spann friledning med plastbelagda ledare.*

**7 §** *För spänningssättning av sådana jordade delar i anläggningar för högst 25 kV systemspänning till vilka jordslutning kan ske gäller de värden som anges i tabell 1.*

Anläggningsdel	Högsta tillåtna värden vid enpolig jordslutning		
	Frånkopplas automatiskt inom		Signaleras automatiskt
	2 sekunder	5 sekunder	
Skyddsledare och PEN-ledare som tillhör något annat ledningssystem anslutet över transformator i vilket neutralpunkten är direkt jordad (TN-system)			
– vid gemensam jordning	100 V	100 V	50 V
– vid skilda jordningar	200 V	200 V	100 V
Utsatta delar i driftrum eller på sådana platser där människor ofta vistas	400 V	300 V	100 V
Övriga delar	800 V	600 V	200 V

**Tabell 4.1. Högsta tillåtna värden vid spänningssättning av jordade delar.**

*8 § I anläggningar med systemspänning över 25 kV skall förhöjda markpotentialer som uppträder vid en jordslutning jämnas ut. Alternativt skall den spänningssättning av jordade delar som jordslutningsströmmen orsakar begränsas till värdena i tabell 1.*

***Elsäkerhetsverkets allmänna råd<sup>15</sup> om tillämpningen av föreskrifterna om hur elektriska starkströmsanläggningar skall vara utförda.***

### **5 kap.**

*Utförande av starkströmsanläggningar för högspänning behandlas i Svensk standard SS 421 01 01<sup>16</sup>.*

***Till 8 och 9 §§*** *Markpotentialen kan i ett icke direktjordat system anses vara utjämnad om de förekommande spänningarna inte överstiger 150 V vid en jordslutning som kopplas ifrån inom 5 sekunder respektive inte överstiger 240 V vid en jordslutning som kopplas ifrån inom 2 sekunder. Markpotentialen kan i ett direktjordat system anses vara utjämnad om de förekommande spänningarna inte överstiger 600 V inom ett driftrum eller i dess omgivning. Spänningarna kan fastställas som produkten av en resistans om 3 000 ohm och den ström som vid en jordslutning flyter genom resistansen.*

<sup>15</sup> Allmänna råd utgör sådana generella rekommendationer om tillämpningen av en författning som anger hur någon kan eller bör handla i ett visst hänseende.

<sup>16</sup> Starkströmsanläggningar med nominell spänning överstigande 1 kV AC. (Speciellt kap.9 Riktlinjer för konstruktion, provning och underhåll av jordningssystem).

När det gäller detektering rekommenderas högsta möjliga känslighet dock lägst  $20\,000\ \Omega$  för 10 kV-nät med kortslutningsström,  $I_C$ , på högst 30 A och högst 50 A för 20 kV-nät. Om  $I_C$  är högre, som i övervägande kablfierade nät, medger Elsäkerhetsverket ett lägre detekteringsvärde<sup>17</sup>.

---

<sup>17</sup> Allmänna råd, ELSÄK-FS 1999:5 "Blå Boken", § B73

## 5 Detektering och bortkoppling

I detta avsnitt kommer först några metoder för felbortkopplingar i icke direktjordade system att beskrivas. Därefter förklaras de innefattade komponenterna i felbortkopplingssystemet som möjliggör detektering och bortkoppling av jordslutningar<sup>18</sup>.

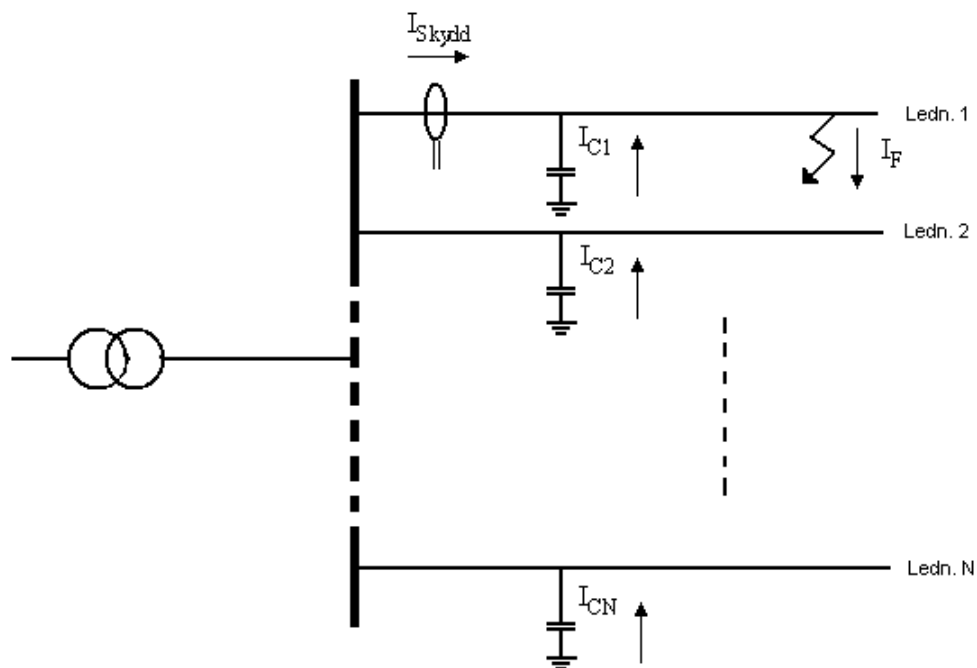
### 5.1 Felbortkoppling av jordfel i olika system.

Som visades i kapitlet *Lagar och förordningar* så finns krav på spänningssättningen av jordad anläggningsdel vid jordfel. Spänningssättningen ges enligt avsnitt *Jordtag*, kapitel 2, av  $U=I_j \cdot R_j$  där  $I_j$  är jordslutningsströmmen i felstället och  $R_j$  är jordtagsresistansen. För samjordat system ska spänningen ej överstiga 100 V och den begränsas antingen genom låg jordtagsresistans eller minskning av jordslutningsströmmen.

#### 5.1.1 Felbortkoppling av jordfel i isolerade system

Först beskrivs alltså var och hur jordfelsströmmarna mäts av de ordinarie grundtonsmätande jordfelskydden i de olika systemen. Därefter förklaras deras och reservjordfelskyddens funktion samt vilka parametrar som skydden mäter på. Även transientmätande skydd beskrivs kortfattat.

I ett isolerat system mäts endast den kapacitiva jordslutningsströmmen, också kallad nollföljdströmmen, av jordströmsskyddet i det berörda facket ut på ledningen.



Figur 5.1. Jordfel i isolerat system.

Jordfelsströmmen som skyddet mäter blir:

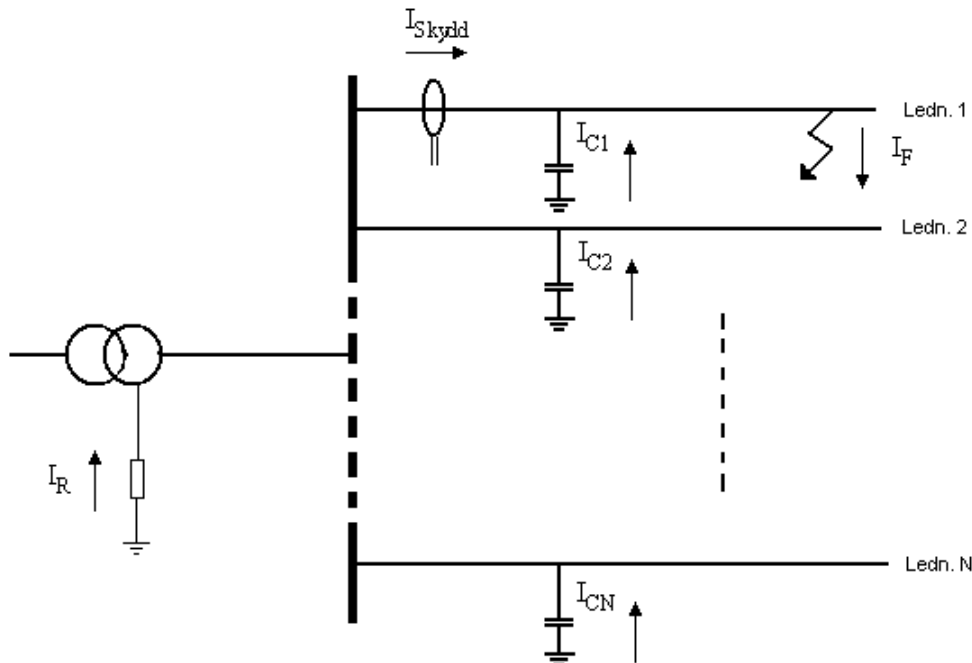
<sup>16</sup> Reläskydd 1, Johannesson Tomas, kursmaterial Sydkraft Nät AB, Malmö

$$I_{Skydd} = I_f - I_{C1} = \sum_{j=2}^N I_{Cj}$$

Formel 5.1

Jordfelskyddet skall alltså mäta den kapacitiva komponenten av jordfelsströmmen. Vid fel på denna ledning kommer skyddet att mäta utmatande nätets totala kapacitiva ström, minus sitt eget kapacitiva bidrag. Största nackdelen är att vid nätförändring, t.ex. om en av ledningarna är ur drift av någon anledning, så ändras nätets totala  $I_C$ -ström. Eftersom detta är den parameter som jordfelskyddet mäter så kan det innebära att skyddet ligger och mäter på fel område. En annan nackdel är att  $I_C$ -strömmen blir större om nätet utökas med kabel, vilket kan medföra kravet på spänning av utsatt del ej kan följas. Fördelen med denna typ av design är att kostnaden för nollpunktsutrustningen inte finns.

### 5.1.2 Felbortkoppling av jordfel i resistansjordade system



Figur 5.2. Jordfel i resistansjordat system.

Jordfelsströmmen som skyddet mäter blir:

$$I_{Skydd} = I_f - I_{C1} + I_R = I_R + \sum_{j=2}^N I_{Cj}$$

Formel 5.2

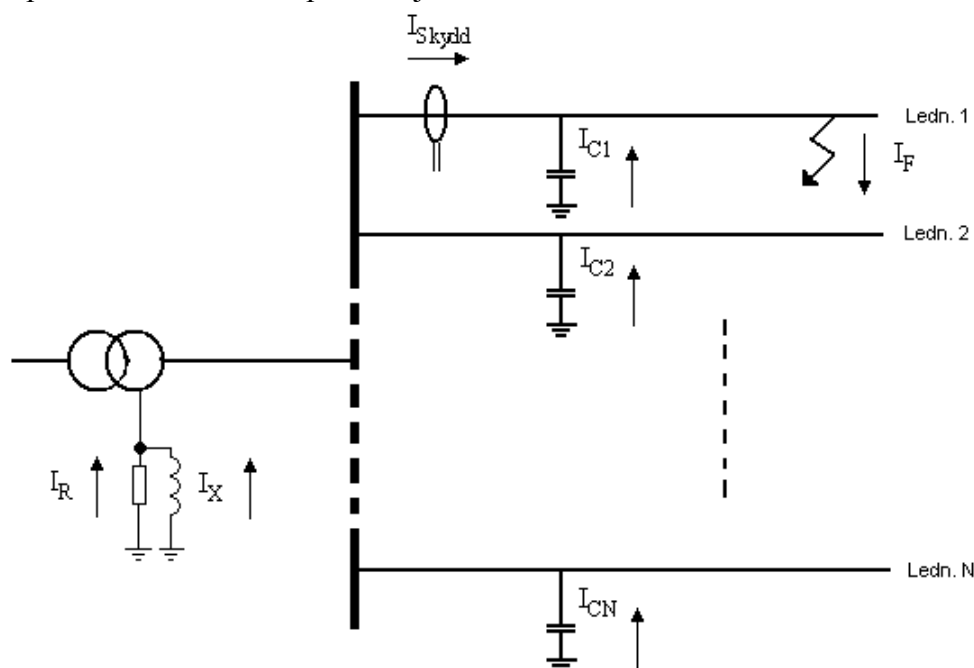
Ur ekvation ser man att strömmen genom skyddet är vektorsumman av aktiva strömkomponenten,  $I_R$ , genererad i resistansen och den kapacitiva strömkomponenten,  $I_C$ . Skyddet ska mäta på den aktiva komponenten vilket medför att den inte är känslig för nätförändringar. Denna form av jordning används framförallt när systemet innehåller mycket luftledningar men även när delar av utmatande ledningar innehåller för liten mätbar kapacitiv ström jämfört med de andra.



Däremot kompenseras inte den kapacitiva komponenten som den görs i reaktansjordade system.

### 5.1.3 Felbortkoppling av jordfel i reaktansjordade system

Vid stora nät med mycket kabel bidrar den kapacitiva kopplingen till jord med stora strömmar om ett jordfel skulle uppstå. Dessa strömmar kan medföra spänningssättning, som är svår att begränsa, i utsatta delar. Man måste därför kompensera bort denna kapacitiva jordfelsström.

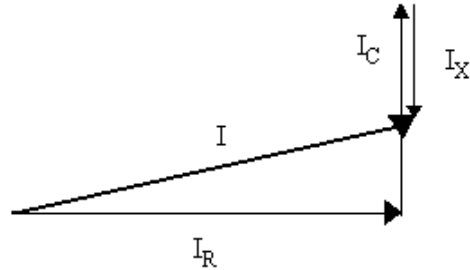


Figur 5.3. Jordfel i reaktansjordat system.

Jordfelsströmmen som skyddet mäter blir:

$$I_{Skydd} = I_f - I_{C1} + I_X + I_R = I_X + I_R + \sum_{j=2}^N I_{Cj} \quad \text{Formel 5.3}$$

Även här ska skyddet mäta på den aktiva komponenten bildat av resistansen i nollpunktsutrustningen. Den induktiva komponenten,  $I_X$ , ligger i motfas med kapacitiva komponenten,  $I_C$ , och väljs dessa lika stora minimeras den totala vektorsumman av strömmarna. Eftersom det riktade skyddets funktion bygger på att känna riktning med hjälp av den vinkelskillnad som uppstår när nätet ej är rent resistivt så är det viktigt att ligga rätt i avstämning så att inte fel riktning detekteras på grund av överkompensering vid jordslutning. Det riktade jordfelsskyddets funktion förklaras mer i 5.3.3. Strömbidragets komponenter visas i Figur 5.4.



**Figur 5.4. Strömbidragets komponenter.**

Vektorsumman  $I$  av dessa komponenter ges av:

$$|I| = \sqrt{(I_C - I_X)^2 + I_R^2} \quad \text{Formel 5.4}$$

Observera att ovanstående gäller vid stumt jordfel d.v.s. ingen resistans i felet. Om resistans finns ska denna läggas till i ekvationerna (5.1, 5.2, 5.3, 5.4).

Reaktiva strömkomponenten,  $I_X$ , ges av:

$$I_X = \frac{V_f}{X_L} = \frac{V_f}{\omega L} \quad \text{Formel 5.5}$$

och den kapacitiva strömkomponenten,  $I_C$ , ges av:

$$I_C = V_f \sum \omega C_E \quad \text{Formel 5.6}$$

För att minimera strömmen i jordfelet, och därmed spänningen över densamma, ska följande villkor gälla:

$$\omega L = \frac{1}{\sum \omega C_E} \quad \text{Formel 5.7}$$

Ekvation 5.7 är det matematiska uttrycket för Petersens regel så att reaktansjordningen dimensioneras för total avstämning av systemets kapacitiva bidrag<sup>19</sup>.

## 5.2 Selektivitet

För att uppfylla myndigheters krav på automatisk detektering och bortkoppling av felbehäftade nätdelar krävs noggrann och välavstämd utrustning. Dock ställs inga krav på selektiv bortkoppling utan det räcker med ett nollpunktsspänningsskydd för

<sup>19</sup> Neutral Grounding In High Voltage Transmission, R. Willheim & M. Waters, Elsevier publishing company, New York-Amsterdam-London-Princeton, 1956

att klara myndighetskravet. Däremot leder kravet på spänningssättning till önskemål om små jordslutningsströmmar vilket innebär att man väljer att ha jordströmsskydd.

Nollpunktsspänningsskydd och jordströmsskydd ska inte bara vara bra var för sig utan ska fungera tillfredställande tillsammans. Olika typer av utrustning används till att känna av olika typer av fel. Koordinering av skydden ska göras genom upprättning av selektivplan. Jordfelsskyddet ska lösa innan nollpunktsspänningsskyddet, vars funktion beskrivs nedan, löser och detta klarar man med olika känslighetsinställningar eller med tidselektivitet. På så vis kopplas endast felberörda nätdelar bort och avbrottets geografiska omfattning minskar.

### **5.3 Grundtonsmätande jordfelsskydd**

Dessa skydd mäter grundtonsfrekventa, 50 Hz, nollföljdsspänningar och nollföljdsströmmar. Utifrån dessa storheter utförs detektering och bortkoppling.

#### **5.3.1 Nollpunktsspänningsskydd.**

Nollpunktsspänningsskyddet används primärt för att skydda anläggningsdelarna mellan transformatorns nedsida och strömtransformatorerna men fungerar även som ett reservskydd vid eventuellt jordfel på utmatande fack. Spänningen kan alltså användas för att detektera fel i hela systemet. Genom att utnyttja tidsselektivitet kan man sluta sig till att jordslutningen drabbat skenan eller transformatorlindningen. Skyddet mäter nollföljdsspänningen antingen i transformatorns nollpunkt över nollpunktsutrustningen eller på transformatorns nedsida. Vanligast är att man i ett fack på transformatorn nedsida placerar en spänningstransformatorsats med öppen deltalindning eftersom placering i matande transformators nollpunkt ej är att rekommendera. Detta på grund av att eftersom spänningstransformatorn normalt inte är belastad kan fukt tränga in och medföra att spänningstransformatorn exploderar eller orsaka kortslutning mellan nollpunkt och jord och därmed bildas ett direktjordat system vid ett eventuellt jordfel.

Spänningen vid normal drift är i stort sett noll med undantag av mindre spänningar som uppkommer genom t.ex. parallella ledningar och osymmetriska belastningar. Vid förekomst av ett jordfel ökar nollföljdsspänningen. Blir denna spänning högre än på skyddet förinställt värde och jordströmsskyddet ej löser ut så löser nollpunktsspänningsskyddet ut efter förinställd tid. Brytstället är på stationens inkommande sida vilket betyder att hela stationen löser ut. Värden som nollpunktsskyddet ska lösa ut för är följande:

- 3 000  $\Omega$  för utlösning vid oisolerad luftledning, (blanklina)
- 5 000  $\Omega$  för utlösning vid BLL, BLX<sup>20</sup>

När detta inte går p.g.a. selektivitet till de riktade jordfelsskydden så måste de riktade jordfelsskydden lösa för ovanstående jordfelsimpedanser.

Nollpunktsspänningsskyddet ställs även att göra en indikation vid 20 000  $\Omega$  om nätet består av BLL eller BLX.

---

<sup>20</sup> BLL, BLX är belagd luftledning där ledarens isolering består av polyeten.

### 5.3.2 Oriktade jordströmsskydd.

Oriktade jordströmsskydd mäter endast den grundtonsfrekventa nollströmmen och löser ut om denna ström överstiger inställt värde i en viss inställd tid. Strömmen uppstår vid jordfel och strömmens storlek samt nollpunktsspänningen är omvänt proportionell mot felställets övergångsresistans. För att uppnå selektivitet så finns en tumregel att de oriktade jordströmsskydden normalt ställs på  $1000 \Omega$  mer än nollpunktsspänningsskydden.

### 5.3.3 Riktade jordströmsskydd.

Riktade jordströmsskydd används när selektivitet behövs som vid maskade nät eller nät med flera elektriska tillförspunkter men även vid radiellt matade system. Ett riktat skydd känner av fel i en viss riktning och ska lösa ut om den känner en felström i denna riktning. Skydden placeras i respektive fack för att skydda på respektive utmatande ledning men även längs en ledningssträcka för att kunna sektionera bort fel på ett tillfredställande sätt. Selektiviteten löses med olika tidssteg på cirka 0,4 s mellan förekommande skydd längs ledningen.

Reläskydden har två insignaler, spänning och ström, som fås från spännings- respektive strömtransformatorer. Spänningen är referenssignal, d.v.s. nollvinkel och om nedanstående villkor är uppfyllt så ska det riktade jordfelsskyddet lösa ut vederbörande ledning.

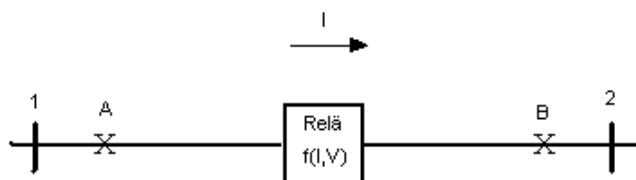
$$\{V = V \angle 0^\circ, I = I \angle \varphi\}$$

$$\text{om } -180^\circ < (\varphi - \varphi_b) < 0^\circ \quad (\text{lös ut})$$

**Formel 5.8**

$$\text{annars} \quad (\text{ingen åtgärd})$$

$\varphi$  är vinkeln mellan ström och spänning och  $\varphi_b$  är ett vinkelområde mellan utlösning och ingen åtgärd,  $(2^\circ-8^\circ)^{21}$ . Beroende på om nätet är isolerat eller jordat med nollpunktselement så mäter de riktade skydden aktiv respektive kapacitiv jordfelsström.



**Figur 5.5. Riktat jordfelsskydd.**

Det riktade skyddet kan även känna på vilken sida om skyddet felet inträffat om man vill detta (Figur 5.5). Om fel inträffar i B kommer en felström  $I$ , som eftersläpar spänningen, att flyta från punkt 1 till punkt 2. Strömmen går i positiv riktning. Om

<sup>21</sup> Power Systems analysis and design 3:rd edition, J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, Brooks/Cole, 2002

istället ett fel inträffar i punkt A så kommer felströmmen att ligga före spänningen och då flyter strömmen i negativ riktning.

## 5.4 Transientmätande jordfelsskydd.

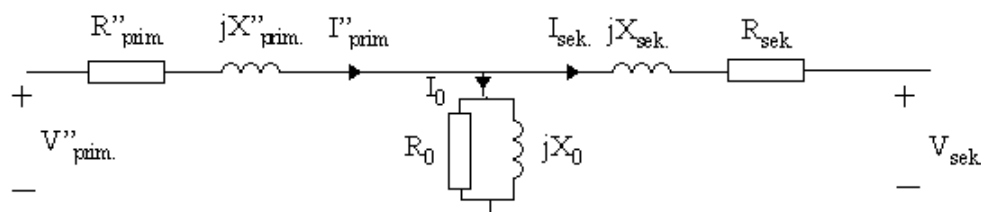
Dessa skydd tittar på ström och spänningstransienter, med högre frekvens än grundtonen, för att kunna detektera och lösa ut ledning med jordfel. Nackdelen är att dessa har begränsad funktion vid långsamma förlopp som vid exempelvis trädpåfall. Vid ett trädpåfall så är resistansen till jord hög men allt eftersom trädet förkolnas på grund av genomlöp felström så minskar trädets felresistans och därmed ökar felströmmen. Nedfallen ledare på hårdpackad snö eller is är ett liknande exempel<sup>22</sup>. Problemen löses med att de transientmätande jordströmsskydden har ett bivillkor att bortkoppling endast sker vid hög nollpunktsspänning. Däremot kan dessa skydd med fördel användas i kablifierade nät där långsamma förlopp är mindre förekommande.

Det är inte bara vissa jordfel som är transienta utan även vid t.ex. in och urkoppling av ledningar men detta löses med tidsvillkor för utlösning som ställs i skydden.

## 5.5 Mättransformatorer

Spänningar och strömmar på flera kV, (kilovolt) respektive kA, (kiloampére) måste transformeras ner så att de kan mätas av mätinstrument och reläskydd vilket görs med mättransformatorer. På så vis kan man standardisera instrument och reläer men framför allt skyddas dessa från höga spänningar och strömmar. Även användaren skyddas vid eventuella inställningar, kalibreringar och underhåll. Spänningar och strömmar behövs för att reläskydd ska fungera, detektera, vid förekommande fel. Genom att mäta nollföljdsspänning och nollföljdsström fås den information som behövs för att jordfelsskydd ska reagera<sup>23</sup>.

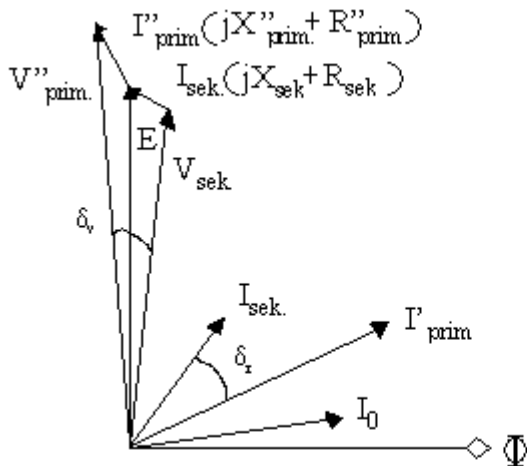
En mättransformator kan beskrivas som i Figur 5.6 vid grundtonsfrekvens (50 Hz).



Figur 5.6. Ersättningsschema för att beskriva mättransformatorns komponenter.

<sup>22</sup> Demands on the relay protection system, Messing Lars, Seminar for UTE in Montevideo, June 1994

<sup>23</sup> Instrument transformers in relay protection systems, Messing Lars, Seminar for UTE in Montevideo, June 1994



Figur 5.7. Mättransformatorns spänningar och strömmar med respektive vinkelfel. Skillnad i vektorlängd motsvarar omsättning. (Proportioner i vinkel och omsättning överdrivna).

Beteckningar i figuren beskriver:

- $X_0$  : Magnetiseringsreaktans
- $R_0$  : Magnetiseringsresistans
- $I_0$  : Magnetiseringsström
- $V_{sek}$  : Spänning över sekundärlindning
- $I_{sek}$  : Ström i sekundärlindning
- $R_{sek}$  : Sekundärlindningens resistans
- $X_{sek}$  : Sekundärlindningens reaktans
- $I'_{prim}$  : Ström i primärlindningen omskalad till sekundärlindningsnivå genom omsättningen d.v.s.  $(N_{prim}/N_{sek}) * I_{prim, verklig}$
- $V''_{prim}$  : Spänning över primärlindningen omskalad till sekundärlindningsnivå genom omsättningen d.v.s.  $(N_{sek}/N_{prim}) * U_{prim, verklig}$
- $R''_{prim}$  : Resistansen i primärlindningen omskalad till sekundärlindningsnivå genom omsättningen d.v.s.  $(N_{sek}/N_{prim})^2 * R_{prim, verklig}$
- $X''_{prim}$  : Reaktansen i primärlindningen omskalad till sekundärlindningsnivå genom omsättningen d.v.s.  $(N_{sek}/N_{prim})^2 * X_{prim, verklig}$

### 5.5.1 Spänningstransformator

För att få en spänning som är mätbar för ett mätinstrument transformeras den höga spänningen ner till en lägre. På detta vis ökar man också säkerheten eftersom den lägre spänningen är galvaniskt isolerad från den högre. Nackdelen är att i transformatorn bildas ett spänningsfall vilket gör att spänningen på sekundärsidan ej återger den verkliga spänningen på primärsidan. Ur figuren ser man att detta spänningsfall ges av

$$\Delta V = V''_{prim} - V_{sek} = I''_{prim} * (R''_{prim} + jX_{prim}) + I_{sek} * (R_{sek} + jX_{sek}) \quad \text{Formel 5.9}$$

Eftersom primärströmmen är summan av magnetiseringsströmmen och strömmen i sekundärlindningen (Kirchoffs strömlag) så ges totala spänningsfallet av

$$\Delta V = I_0 * (R''_{prim} + jX_{prim}) + I_{sek} (R''_{prim} + jX_{prim} + R_{sek} + jX_{sek}) \quad \text{Formel 5.10}$$

Ur denna formel syns att spänningsfallet, även kallad omsättningsfelet, beror på lindningsimpedansen och magnetiseringsströmmen som bildas i transformatorn samt belastningsströmmen som bildas i det inkopplade instrumentet, d.v.s. bördan. Det är inte bara felet av spänningsåtergivningen som framträder utan även ett vinkelfel på den sekundära spänningen jämfört med primära. Denna fäsförskjutning uppkommer i kretsens ingående reaktanser och beror på impedanserna i transformatorn samt den anslutna impedansen ansluten på sekundärsidan. Detta visas i Figur 5.7. Vinkelfelet kan ge upphov till att en felaktig aktiv ström registreras vid stor kapacitiv jordslutningsström.

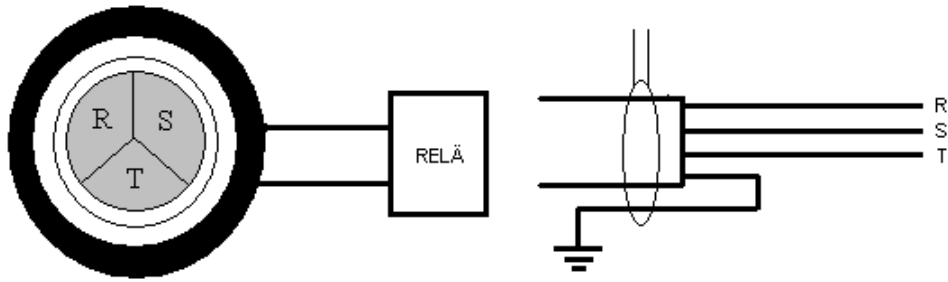
Spänningstransformatorer indelas i noggrannhetsklasser beroende på ändamålet för mätningen. Misstänks vinkelfelet i spänningstransformatorn vara anledning till felaktig funktion hos skydd kan annan transformator med större noggrannhet väljas. Dock överstiger vinkelfelet inte 1° och kan oftast anses som försumbart. Spänningstransformatorn används till:

- Spänningsvisning
- Nollpunktsspänningsskydd
- Oriktade spänningskännande jordfelsskydd
- Riktade jordströmsskydd för att få vinkeln mellan spänning och ström och därmed riktningen.

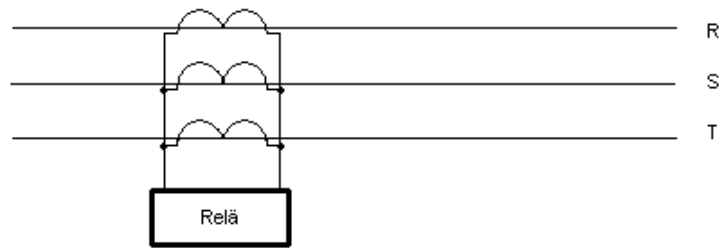
Spänningstransformatorn kan placeras mellan nollpunkten och jord vilket ger nollpunktsspänningen. Alternativt sätts tre likadana spänningstransformatorer på utmatande ledning. Om det senare alternativet används och systemet är isolerat kan ferroresonans uppkomma på grund av att man har ledningens kapacitans parallellt med den induktiva spänningstransformatorn. Resonanskretsens egenfrekvens kan dels sammanfalla med nätfrekvensens undertoner vilket kan medföra transformatormättning och i sin tur överhettning, dels med nätfrekvensens övertoner och ge överslag på grund av ökning av spänningsamplitud. Detta problem löses med att man kopplar in ett motstånd, bördan, över det öppna delat på mättransformatorns nedsida.

### 5.5.2 Strömtransformator

Det finns i huvudsak två sätt att mäta ström i en ledning, antingen med kabelströmstransformatorer, Figur 5.8, eller med summaströmskopplade transformatorer, Figur 5.9. Kabelströmstransformatorer sitter runt kabelns faser i stationsfacken på de utgående ledningarna. Summakopplade transformatorer förekommer mest i äldre anläggningar eller där kabelströmstransformator ej är möjligt. Det finns även okonventionella strömtransformatorer, så kallade Rogowski-transformatorer, vilka ej behandlas i denna rapport.



Figur 5.8. Inkoppling av kabelströmstransformator.



Figur 5.9. Inkoppling av summatransformator.

Den viktigaste skillnaden på dessa två är att kabelströmstransformatorn har en bättre verkningsgrad. Verkningsgraden ges av:

$$\eta = \frac{P_{ut}}{P_{in}} = \frac{P_{ut}}{P_{ut} + P_0 + P_b} \Rightarrow \frac{U_{sek} I_{sek}}{U_{prim} I_{prim}} = \frac{I_{sek}}{I_{prim}} * \frac{N_{sek}}{N_{prim}} = \frac{I_{sek}}{I'_{prim}} \quad \text{Formel 5.11}$$

där  $N_{sek}/N_{prim}$  är omsättningen. Vid strömmätning förekommer det också ett fel. Strömfelet beror på magnetiseringsimpedansen där en magnetiseringsström,  $I_0$ , uppkommer. Mätfelet blir då:

$$\Delta I = I''_{prim} - I_{sek} = I_0 \quad \text{Formel 5.12}$$

Om transformatorn blir mättad (*eng. saturated*), d.v.s. när det magnetiska flödet inte ökar linjärt med ökad ström, så fås en kraftig magnetisk impedansökning och därmed en hög magnetiseringsström. Detta betyder att omsättningsfelet ökar och en felaktig ström erhålls på sekundärsidan. Det betyder också att verkningsgraden minskar och att vinkelfelet ökar. Detta kan vara ett problem när jordströmsskydden mäter på den aktiva komponenten i system med nollpunktsmotstånd.

Ett annat problem är vid summakoppling då flera transformatorer ansluts parallellt. Vinkelfel och omsättningsfel är ej lika för alla tre utan en något felaktig summaström fås.

Till skillnad från spänningstransformatorn vill man ha en så liten impedans som möjligt på nedsidan där man mäter. Detta för att få en så exakt återgiven ström som



möjligt. Om strömmarna som mäts är små ( $< 5\%$  av märkström) så blir problemen påtagligare.

Även för strömtransformatorer finns normerade noggrannhetsklasser där dessa anger omsättningsfelet.

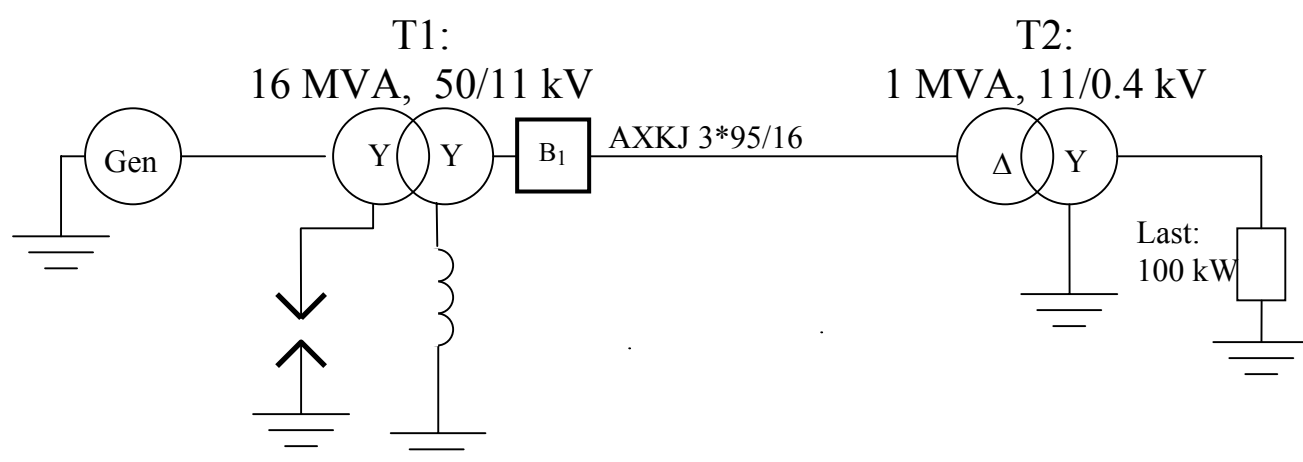
## 6 Simulering

Simulering kommer att utföras av en enkel ledning för att studera strömmar och spänningar på olika punkter i simuleringsmodellen vid inträffande av ett enpoligt jordfel. För att få en uppfattning om att simuleringen ger trovärdiga resultat görs en verifiering. Därefter klargörs och diskuteras resultaten. Simuleringarna görs på de fyra följande icke direktjordade system vilka definieras i denna rapport enligt\*:

- **Isolerat system:** Ingen nollpunktsutrustning.
- **Resistansjordat system:** Resistor i nollpunkten.
- **Spoljordat system:** Endast en induktor i nollpunkten.
- **Reaktansjordat system:** Induktor med en parallellkopplad resistor i nollpunkten.

### 6.1 Verifiering av modellen.

Verifieringen genom handräkning görs på ett reaktansjordat system med inträffande av ett enpoligt jordfel. Verifieringen baseras på diskussionen om symmetriska komponenter (se *Appendix A*) och jordfel i kapitel 3 ”*Jordfelstyper*”. Systemet som ska verifieras kan tecknas i enlinjeschema som Figur 6.1.



Figur 6.1. Enlinjeschema över systemet som ska simuleras med i detta fall spoljordning.

Ur kabeltabell<sup>24</sup> kan man utläsa följande värden för AXKJ 3\*95/16, (räknat på 12 kV huvudspänning):

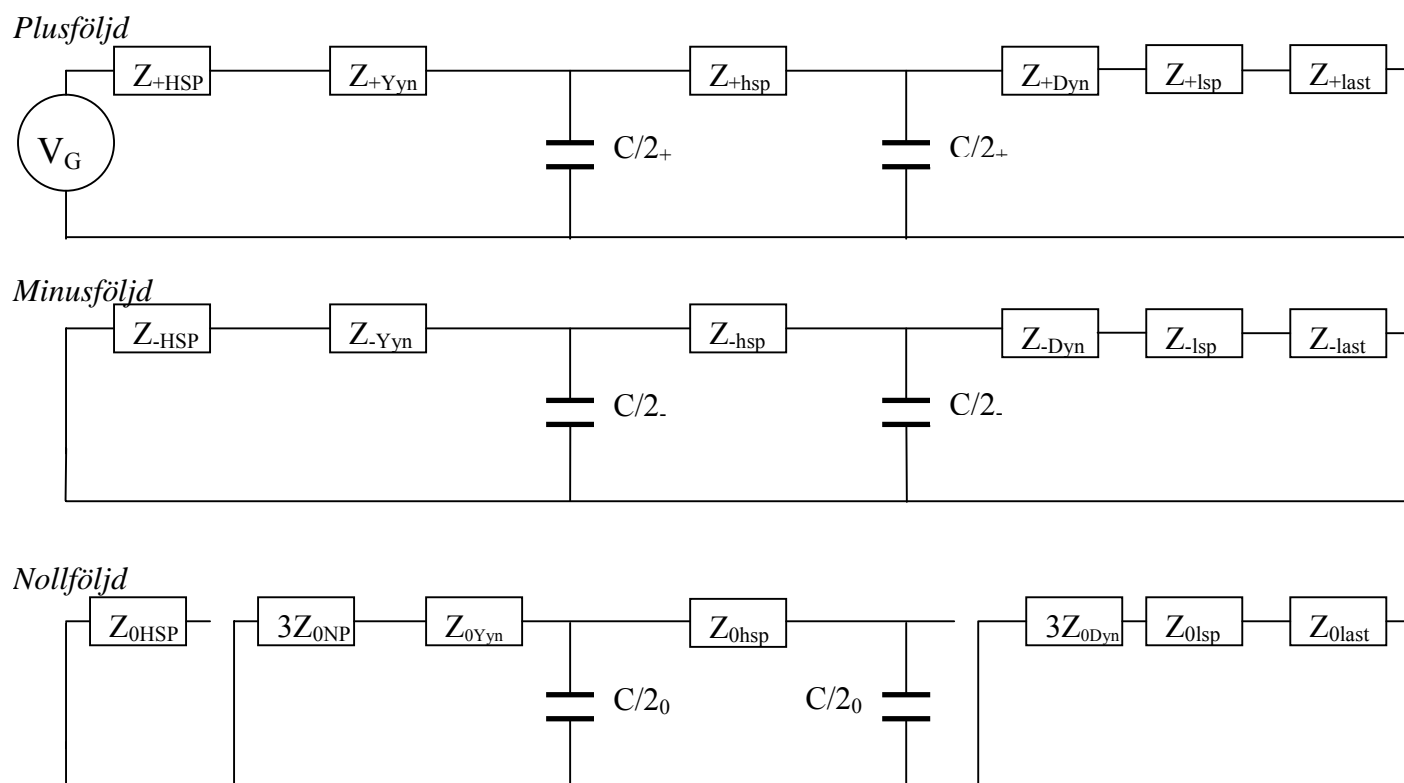
- Ledarresistans = 0.320  $\Omega$ /km
- Skärmresistans = 1.2  $\Omega$ /km
- Induktans = 0.31 mH/km
- Reaktans = 0.1  $\Omega$ /km
- Kapacitans = 0.30  $\mu$ F/km
- $I_c$  = 2.0 A/km, (1.8 A räknat på 11 kV huvudspänning)

Dessa värden används som parametrar till modellens  $\pi$ -länkar.

\* Läsaren bör uppmärksammas på att annan definition förekommer i annan litteratur.

<sup>24</sup> Draka kabel Sverige AB, informationsblad, [http://www.draka.se/pdf/AXKJ\\_12\\_kv\\_3-led.pdf](http://www.draka.se/pdf/AXKJ_12_kv_3-led.pdf), 2005-05-31

Nätets sekvensschema innan fel har följande utseende, Figur 6.2, om transformatorns shuntadmittanser är försummade.



**Figur 6.2. Nätets sekvensschema vid symmetriska förhållanden.**

Efter det enfasiga felets inträffande och införande av Thevenins teorem som diskuterades i kapitel 3 samt borttagning av de komponenter där ström ej kan flyta fås följande utseende enligt figur 6.3.

Absolutvärdena för impedanserna i plusföljdssystemet är följande, (omräknat till 11kV- nivå), och därmed också i minusföljdssystemet ty  $Z_+ = Z_-$ :

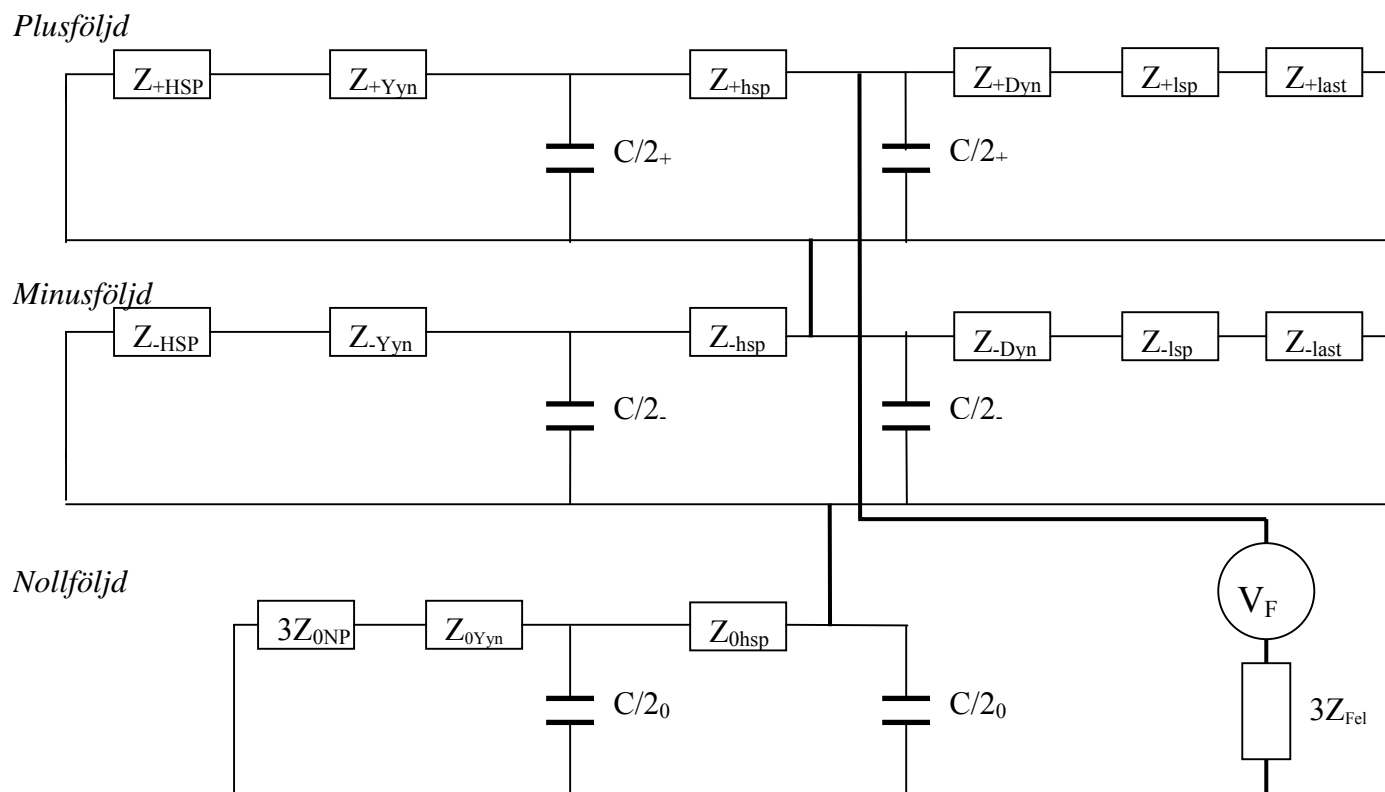
- $|Z_{+HSP}| = 0.0624 \Omega$
- $|Z_{+Yyn}| = 9.2\% = 0.092 * U^2 / S_N = 0.696 \Omega$
- $|Z_{+hsp}| = |40 * (0.32 + j 0.1)| = 12.8 \Omega$
- $|Z_{+Dyn}|^{23} = 5.4\% = 0.054 * U^2 / S_N = 6.534 \Omega$
- $|Z_{+lsp}| = 0 \Omega$  (ty försumbart lång lågspänningsledning simuleras)
- $|Z_{+last}| = Z_{+last}$ , (ty resistiv last) = 1210  $\Omega$

Samtliga impedanser ovan är angivna för 11kV-nivån d.v.s att de impedanser på lsp respektive HSP-sidan är omräknade enligt:

$$Z_{+last,11kV} = (\text{transformatoromsättningen})^2 * Z_{+last,0.4kV} = \left(\frac{11000}{400}\right)^2 * 1.6 \quad \text{Formel 6.1}$$

<sup>23</sup> Onninen, informationsblad, 1 MVA transformator Dyn 11 märke: ABB, <http://www.onninen.se/laddahem/dokument/TrafoF1.pdf>, 2005-05-31

$$Z_{+HSP, 11kV} = \frac{Z_{+HSP, 55kV}}{(\text{transformatoromsättningen})^2} = 0.3121 * \left(\frac{55000}{11000}\right)^{-2} \quad \text{Formel 6.2}$$

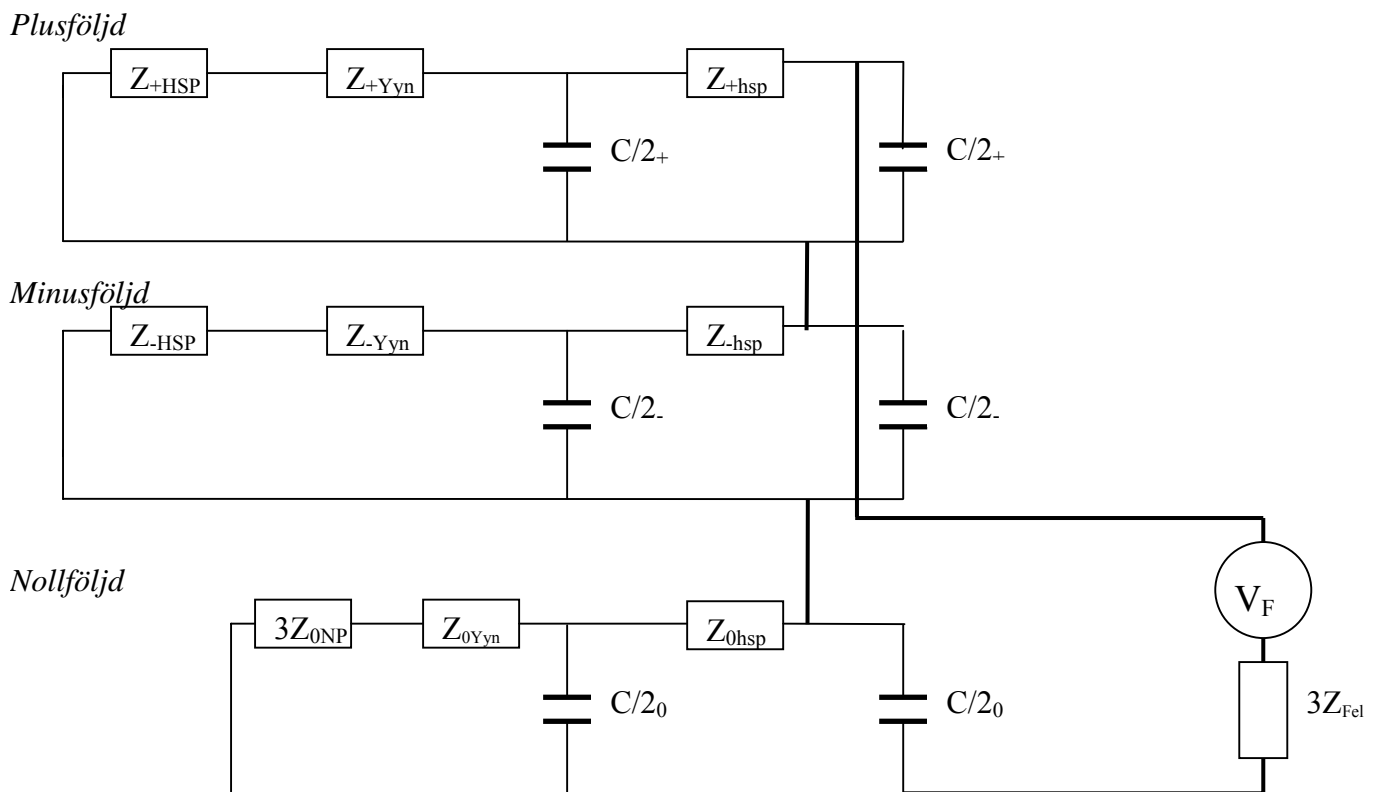


Figur 6.3. Förenkling av sekvensföljd, steg ett.

Utifrån detta kan man se att endast en liten ström kommer att flyta genom plus lsp-sidans och lastens plus och minusföljdskomponenter ty :

$$|Z_{+last}| + |Z_{+lsp}| + |Z_{+Dyn}| \gg |Z_{+HSP}|, |Z_{+Yyn}|, |Z_{+hsp}| \text{ och därför kan dessa försummas.}$$

Detta ger följande utseende, figur 6.4.



Figur 6.4. Förenkling av sekvensföljd, steg två.

Även plusföljds/minusföljdsreaktanser<sup>24</sup> kan på liknande sätt försummas enligt:

$$X_{c+} = X_{c-} = \frac{1}{-j\omega C_{\pm}} = \frac{1}{-j4000\pi * 0.30 * 10^{-6}} = j265.26 \Omega \quad \text{Formel 6.3}$$

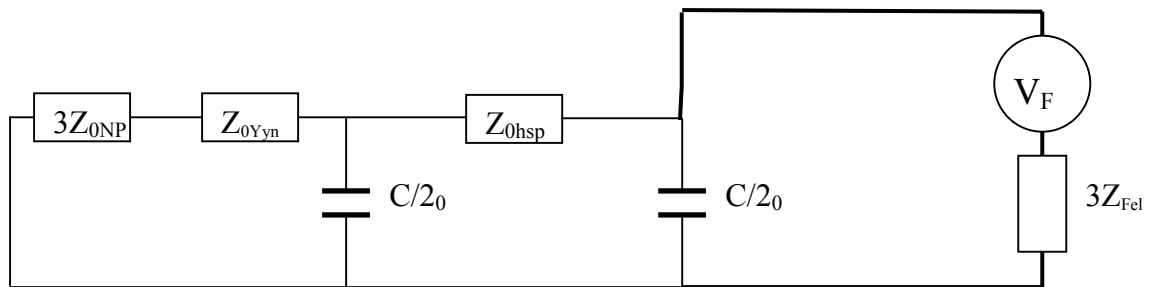
De två parallella kondensatorerna ger upphov till en plus/minusföljdsreaktans på 265.25  $\Omega$  vilket är väsentligt mer än 55 kV-ledningens och 55/11 kV-transformatorns impedanser på 0.7584  $\Omega$  och kan på så sett försummas.

Avslutningsvis kan plus/minusföljdsimpedanserna jämföras med nollföljdskomponenterna. Man upptäcker då att de ganska små plus/minusföljdsimpedanserna kan försummas gentemot nollföljdskomponenterna som har storleksordningen några hundratals – tusentals  $\Omega$  beroende på hur höghmigt felet är samt typ och storlek på nollpunktsutrustningen.

Strömmens storlek beror alltså i huvudsak på systemets nollföljdskomponenter varför plusföljdens och minusföljdens komponenter kan försummas. Detta ger det slutgiltigt approximerade systemet, figur 6.5.

<sup>24</sup> Draka kabel Sverige AB, informationsblad, [http://www.draka.se/pdf/AXKJ\\_12\\_kV\\_3-led.pdf](http://www.draka.se/pdf/AXKJ_12_kV_3-led.pdf), 2005-05-31

Nollföljd



Figur 6.5. Förenkling av sekvensföljd, slutgiltigt.

Transformatorns lindningsimpedans består i stort sett av induktiv komponent<sup>25</sup>. Denna lindningsimpedans,  $Z_{0Yyn}$ , kan försummas för att underlätta beräkningarna om man förutsätter att transformatorn innehåller utjämningslindning som diskuterades i kapitel 3.

Ledningsimpedansen,  $Z_{0hsp}$ , bortses ifrån därför att den ger ett förhållandevis litet resistivt och induktivt bidrag. När simulering sedan utförs ska man ta i beaktande att en viss ström, alstrad i försummade komponenter, kommer att flyta genom felstället.

Utrustningen i T1:s nollpunkt är en spole enligt figur 6.1. För att verifiera modellen sätts felimpedansen till noll, (stunt jordfel). Kapacitiva strömbidraget från kablarna skall uppgå till 80 A enligt ovan nämnda kabeltabell men utifrån beräkning av kapacitivt strömbidrag genom skall strömmen bli 71.82 A. Strömkillnaden beror bland annat på att kabeltabellen är beräknad på 12 kV. Spolen i nollpunktsutrustningen väljs så att det uträknade kapacitiva strömbidraget kompenseras bort enligt:

$$3jX_{LN} - jX_C = 0 \Omega \Rightarrow 3X_{LN} = X_{C0} = 265.26 \Omega \Rightarrow X_{LN} = 88.42 \Omega \quad \text{Formel 6.4}$$

Storleken på spolen blir därmed:

$$L = \frac{X_{LN}}{\omega} = 0.281 H \quad \text{Formel 6.5}$$

Ovanstående parametrar ihop med lednings- och transformatorparametrar som visas i *Appendix B* användes i simuleringarna.

Ledningsparametrarna när det gäller kabel baseras på att nollföljdssusceptansen är identisk med plusföljdssusceptansen<sup>26</sup>. Parametrarna baseras också på att nollföljdsimpedansen är 40 % högre än plusföljdsimpedansen på grund av återledaren, den så kallade skärmen. Lasten är  $\Delta$ -kopplad med aktiva effekten 100 kW.

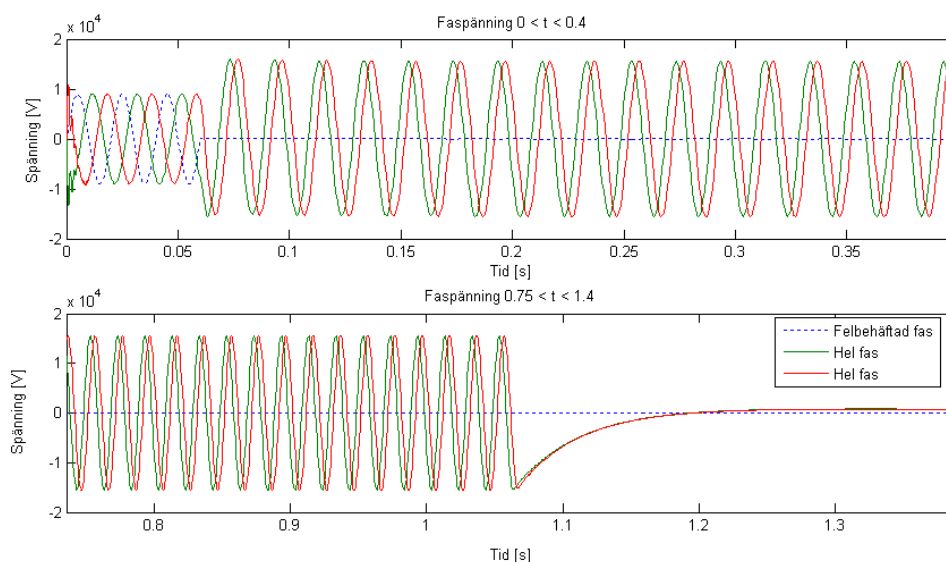
<sup>25</sup> Transformatorprotokoll från Energoinvest, Tovarna transformatorjev, Ljubljana-Yugoslavia, 1989

<sup>26</sup> Elkraftsystem del 2, Stenborg Bertil, Chalmers, Dept. Electric Power Engineer, 1997

Simuleringsförloppet är följande:

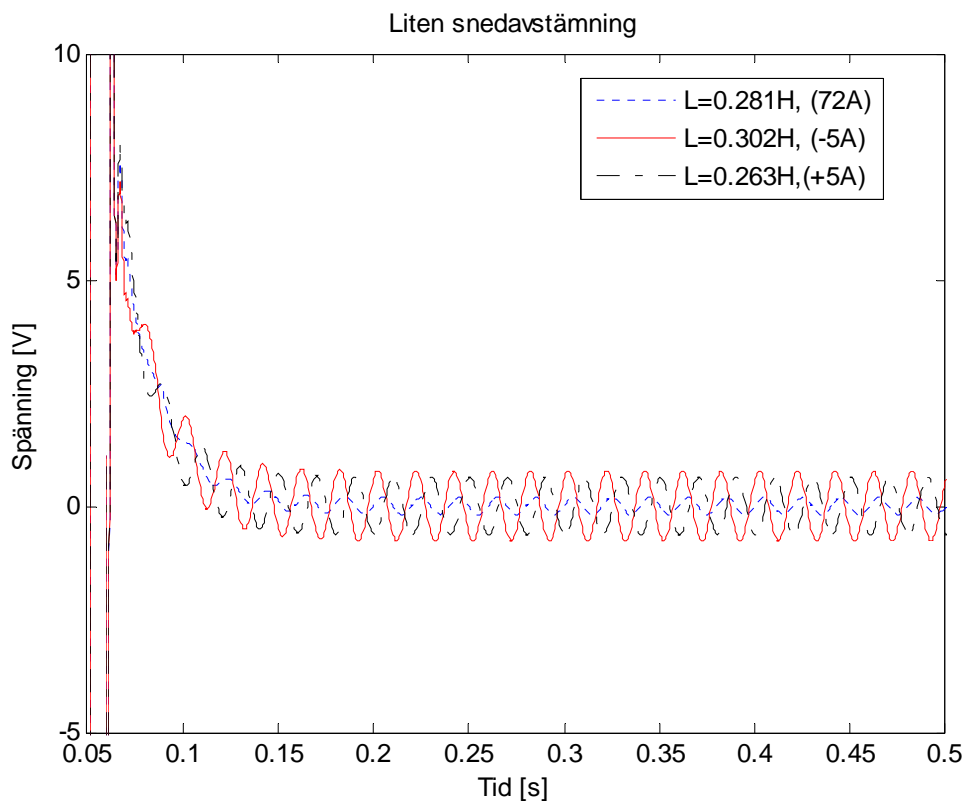
- $t = 0 \text{ s}$  Simulering startar och systemet går med symmetrisk drift.
- $t = 0.06 \text{ s}$  Stumt, ( $0.2 \Omega$ ), enpoligt jordfel inträffar.
- $t = 1.06 \text{ s}$  Brytare  $B_1$  löser ut felbehäftad ledning för jordfel.

Förloppet visas i Figur 6.6 nedan.



**Figur 6.6. Händelseförloppet. Övre visar från  $t=0\text{s}$  till  $t=0.4\text{s}$ , undre från  $t=0.75\text{s}$  till  $1.4\text{s}$ .**

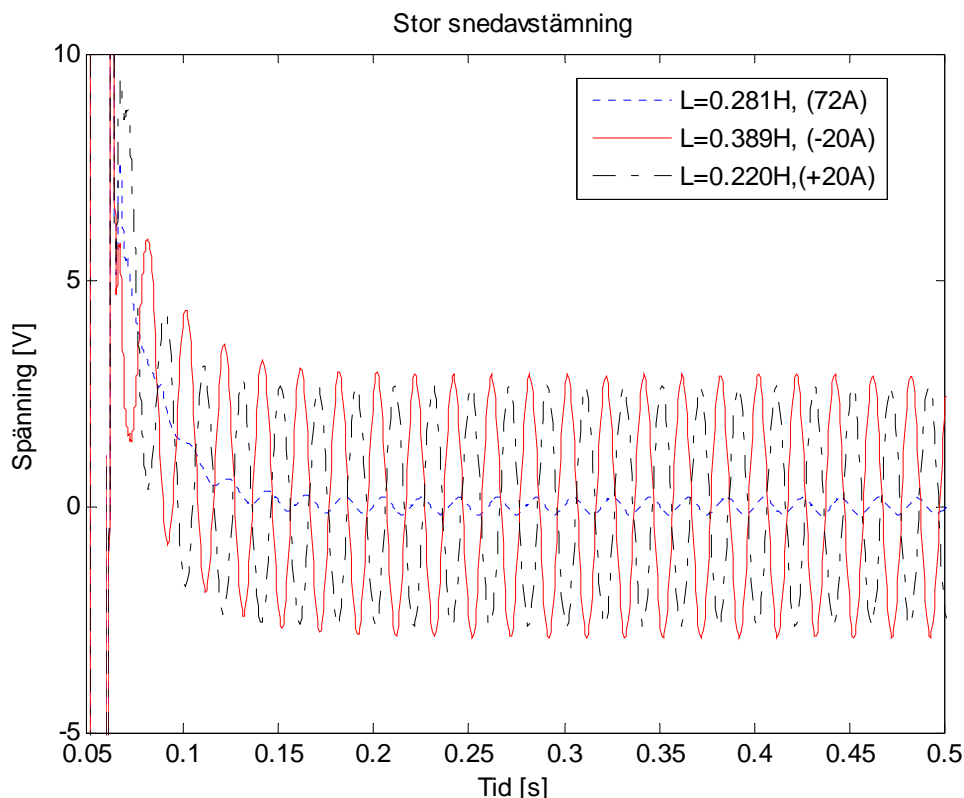
Ur Figur 6.6 kan man avläsa att fasspänningens toppvärde för de friska faserna ökar från  $8970 \text{ V}$  till  $15\,500 \text{ V}$  när jordfelet inträffar. Detta ger förhållandet 1.73 mellan fasspänning före och efter felets inträffande vilket motsvarar huvudspänningen som diskuterades i kapitel 3.



**Figur 6.7. Spänningen över felstället vid  $0.2 \Omega$  felresistans för avstämningarna  $\pm 5A$  från beräknad resonanspunkt.**

Figuren ovan visar resultatet vid simulering d.v.s. spänningen över felstället vid beräknad total avstämning och  $\pm 5 A$  snedavstämning och figuren nedan med snedavstämningen  $\pm 20 A$ . Att kurvorna ovan och nedan har det utseendet att de planar ut är förmodligen p.g.a. den likströmskomponent som uppstår eftersom jordslutningen av felbehäftad fas inte sker i spänningens nollgenomgång.





**Figur 6.8. Spänningen över felstället vid  $0.2 \Omega$  felresistans för avstämningarna  $\pm 20$  A från beräknad resonanspunkt.**

Man ser att ju mer spolen avviker från det beräknade totalavstämningvärdet desto mer ökar spänningen över felstället. Man kan se att minsta spänningen över felstället fås när  $L$  sattes till  $0.281$  H.

Däremot skiljer sig positiv avstämning något mot negativ avstämning relativt den uträknade. Detta beror troligen på de approximationer som gjordes vid beräkningar på spolen ovan. Som det framgår sedan tidigare så finns det även induktiva bidrag i både ledning och transformatorer. Det värde,  $0.281$  H, som använts i simuleringarna är en aning för hög med tanke på detta.

Vid studerande av Figur 6.8 ovan syns också att spänningen vid överkompensering, induktiv krets, är  $180^\circ$  fäsförskjuten gentemot den spänning som uppkommer vid underkompensering.

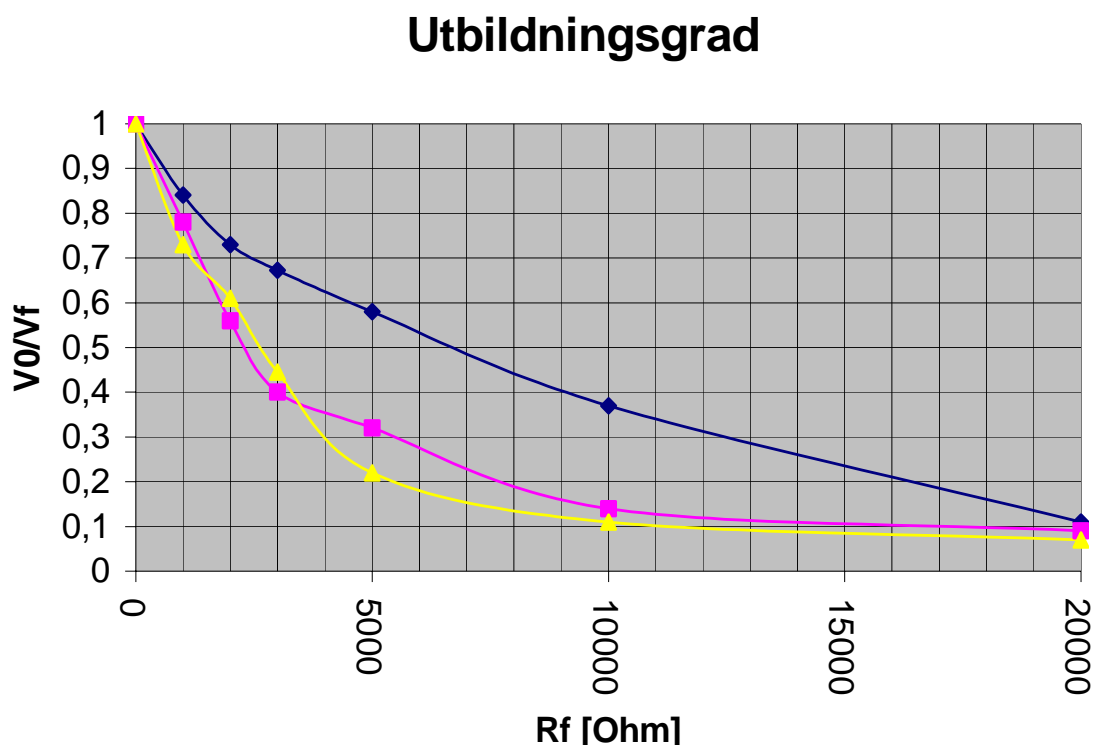
Utifrån detta kan man anse att simuleringsmodellen med innefattande parametrar verkar trovärdig. Beaktande ska tas till att i praktiken blir spänningen ej noll p.g.a. de försummade komponenterna samt de resistiva bidrag som ej kan kompenseras bort med en reaktor i nollpunkten.

Figurerna ovan visar som sagt att en större snedavstämning, positiv som negativ, ger en högre spänning i felstället.

Vad det gäller inställningar för att lösa ut en felbehäftad ledning så använder man sig, som nämnts innan, bland annat av ett nollpunktsspänningsskydd som mäter

nollpunktsspänningen. Detta skydd löser om nollpunktsspänningen (nollföljdsspänningen) blir högre än förinställt värde under en viss tid.

Utifrån nätet och spoljordningen ovan plottades felresistansen mot utbildningsgraden,  $V_0/V_f$ .

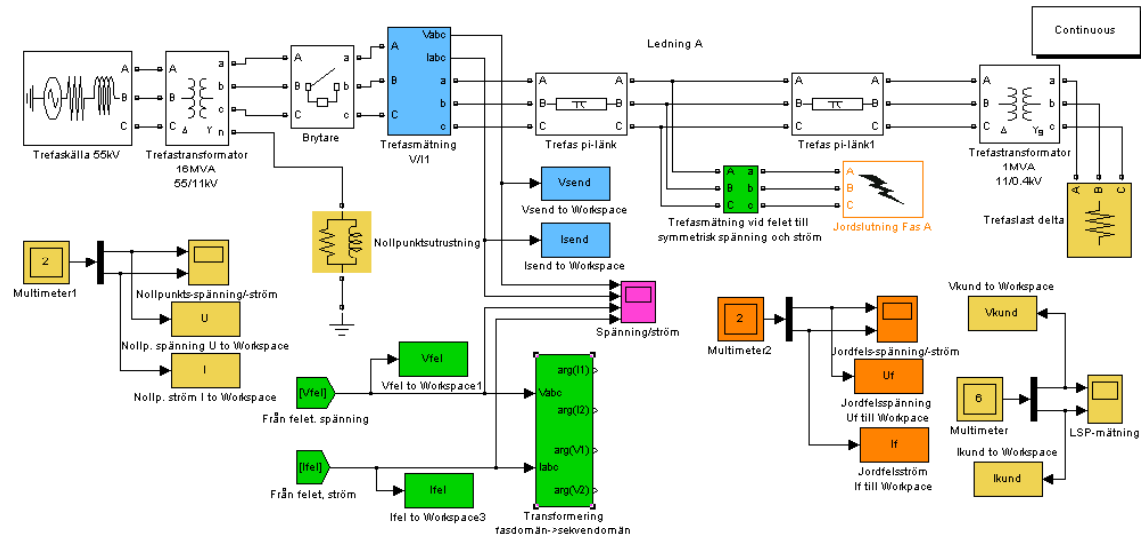


**Figur 6.9.** Utbildningskurvan för det simulerade nätet med avstämmt, (blå), + 5 A snedavstämmt, (lila) och - 5 A snedavstämmt, (gul).

Genom att man vet myndigheternas krav (se *Lagar, förordningar och föreskrifter*) så kan man med ovanstående figur hitta vilken utbildningsgrad skyddet skall ställas på. Om man exempelvis ska uppfylla kraven för utlösning av 5 k $\Omega$ -kravet så bör utlösning ske vid en utbildningsgrad som inte överstiger 0.32 (32 %), vilket medför en nollföljdsspänning på  $0.32 * U_f = 2\,876$  V, om nollpunktsinduktorn är avstämmd 5 A överkompenserat gentemot nätet. Snedavstämningarnas kurvor skulle egentligen vara lika men eftersom totalavstämningpunkten är uträknad med vissa approximationer, se ovan, så blir det inte så. Lågstanivåer brukar vara 5 % för kabel och 10 % för luftledning. Anledningen till detta är att obefogad funktion hos jordfelskydden ska undvikas om det förekommer en viss osymmetri. Om man tyder kurvan ovan så kan man se att det blir problematiskt att kunna detektera 20 k $\Omega$  fel. Svårare att detektera blir det ju längre från avstämningpunkten man kommer. Dessutom ska transformatorns nollföljdsimpedans, ledningarnas serieresistans och jordtagsresistans tas i beaktande när det gäller känsligheten. Detta på grund av att de adderas till jordslutningsresistansen.

## 6.2 Enkel ledning

Kretsen med en enkel ledning som visades i Figur 6.1 byggdes i Simulink, Matlab<sup>®</sup> enligt Figur 6.10. Transformator T1 är av  $\Delta/Y$  modell så att undersökt systemdel ej beror på ovanliggande nollföljd.



Figur 6.10. Modellen som användes för simulering av enkel ledning med innefattande mätpunkter.

Modellen ovan användes för simulering av olika jordningssystem vid olika Ic-generering, olika kabellängder, och varierande typ av enpoliga fel vid konstant kompensering. De olika enpoliga felen som simulerades var av typen stumt d.v.s.  $0.002 \Omega$ , samt med resistanser i felstället på  $3\,000 \Omega$ ,  $5\,000 \Omega$  och  $20\,000 \Omega$ . Ingående komponenters parametrar visas i tabellerna 11.1-11.3 i Appendix B.

### Mätpunkter

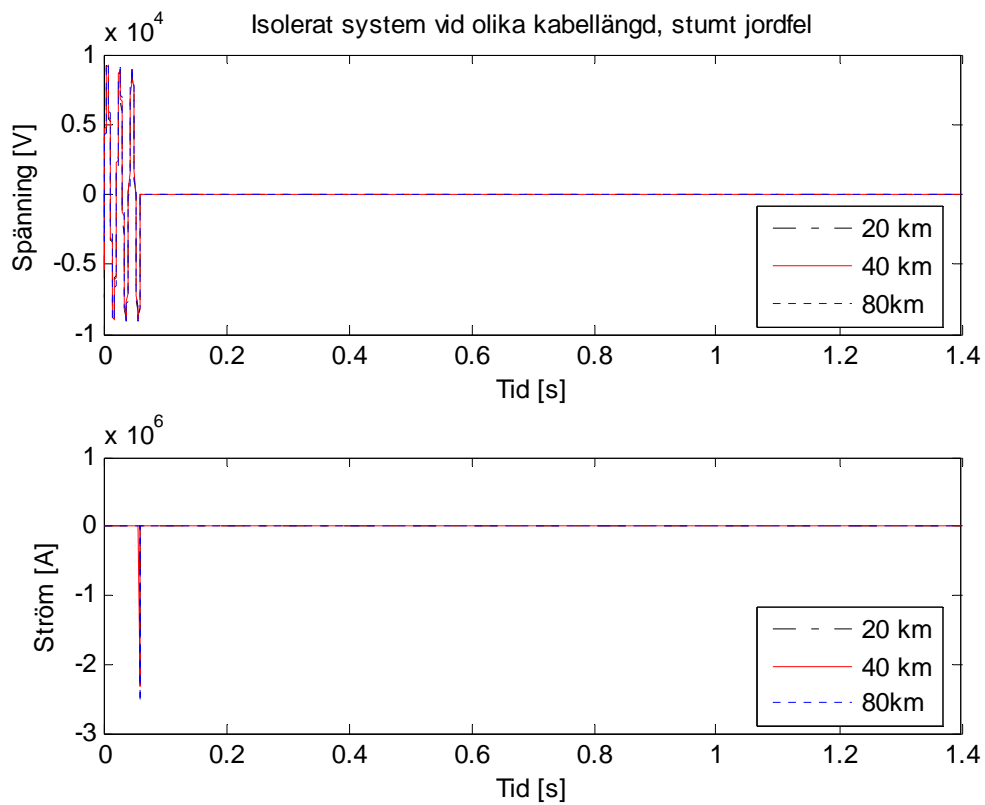
Först studeras, i modellen ovan, strömmar och spänningar i felstället, märkta  $U_f$  och  $I_f$  respektive i nollpunktsutrustningen, märkta  $U$  och  $I$  för de olika systemjordningarna. Därefter studeras spänningen och strömmen i ledningens matande fack märkta  $V_{send}$  och  $I_{send}$ . Isolerad nollpunkt och tre olika systemjordningarna innefattas i simuleringen.

Dessa tre är:

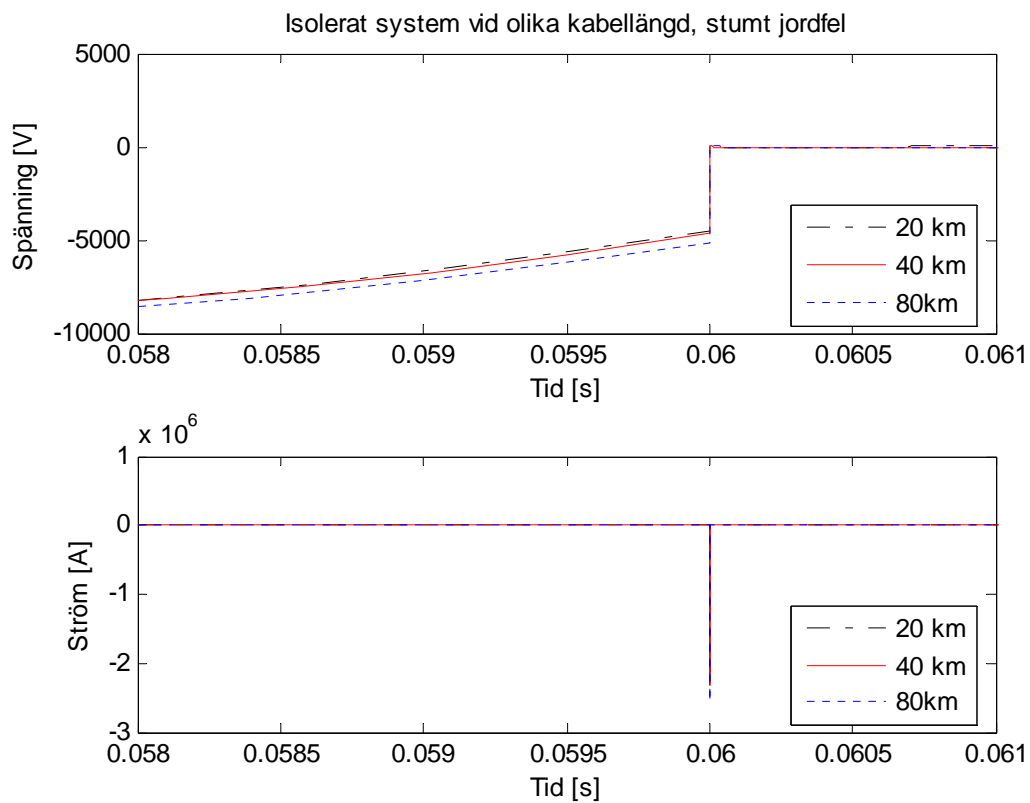
- Resistansjordat med en resistor på  $1\,270 \Omega$  i nollpunkten
- Spoljordat med endast en induktör avstämmd för 40 km kabledning.
- Reaktansjordat med samma induktör som ovan plus  $1\,270 \Omega$  motstånd parallellt med induktorn.

Valet av nollpunktsresistorn baseras på fasspänningen 11 kV och med ett för Sydkraft principiellt värde på jordtagsmotstånd,  $20 \Omega$ , för att klara myndighetskravet 100 V på utsatt anläggningsdel. För utläsning av nedanstående beskrivna figurer som inte visas i avsnittet hänvisas till Appendix B. Sekvensen är den som beskrivs av Figur 6.6.

## 6.2.1 Isolerat system



Figur 6.11. Isolerat system vid kabellängderna 20, 40, 80 km vid stumt jordfel. Övre: Spänningen över felet. Undre: Strömmen genom felet.



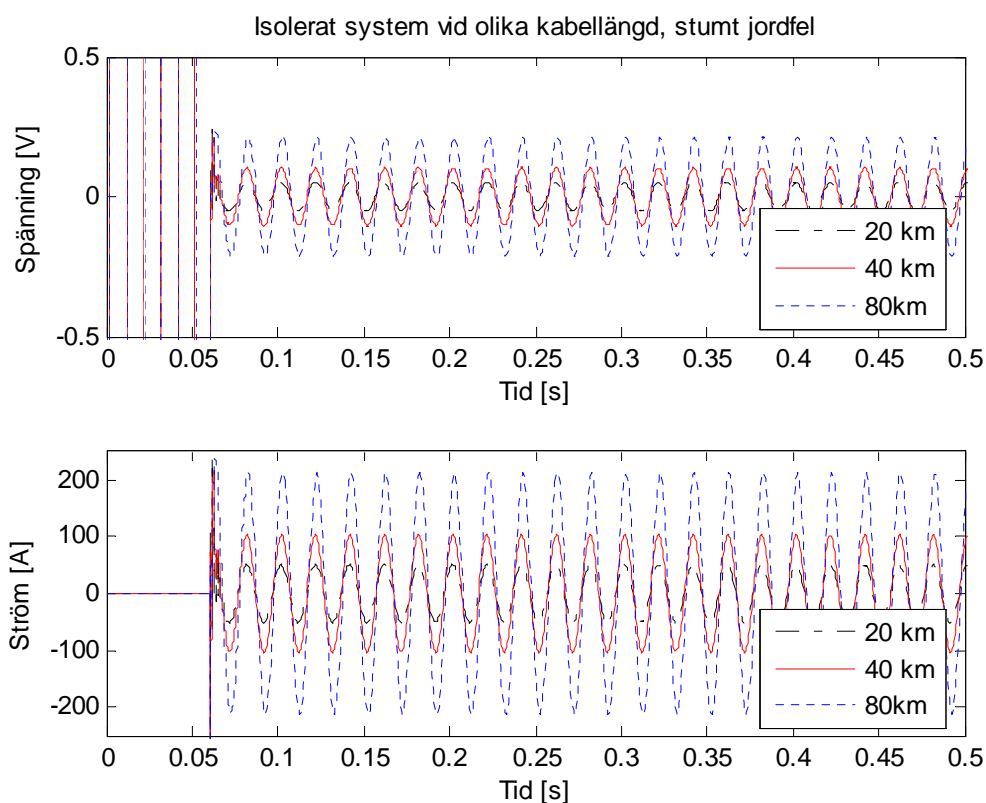
Figur 6.12. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0s och 0.061s.

Strömsspiken som uppträder vid felets inträffande beror på att spänningen ”gör ett hopp” från sitt ursprungliga läge till nollpotential under en väldigt kort tid. Detta kan formuleras enligt:

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt} = C \frac{\Delta u}{\Delta t} = C \frac{u_{slut} - u_{start}}{(t_{slut} - t_{start})} \quad \text{Formel 6.6}$$

Ur Figur 6.12 kan man utläsa att  $\Delta t$  nästan 0 vilket ger att  $i(t) \approx -\infty$ . Energin i strömsspiken d.v.s. arean under strömkurvan är däremot liten ty  $\Delta t$  litet. Att strömmens amplitud skulle anta sådana här höga värden i praktiken är knappast troligt eftersom detta är en simulering av ett nästan idealt stumt jordfel där inga jordtagsresistanser och felresistanser som t.ex. övergångsresistans skapad av luftgap och ljusbåge i felstället existerar. Storleken på resistanserna utgör däremot inte någon ändring av strömmens energi i systemet.

Figurerna 11.1 till 11.3 och tabellen 11.4 visar att längden av kabeln inte har någon större betydelse vad det gäller spänning och ström i felstället om inte felet är av lågohmig karaktär.



**Figur 6.13. Isolerat system vid kabellängderna 20, 40, 80 km vid stumt jordfel vid  $t = 0.06$ . Övre: Spänningen över felet. Undre: Strömmen genom felet. Förstoring av Figur 6.11.**

Oavsett system är det ganska klart att felspänningen beror på om jordfelet är stumt, som Figur 6.13 visar, eller högohmigt. Ett högohmigt fel ger upphov till en högre potential mellan felbehäftad fas och jordpotential.

Nollföljdsspänningen i systemet ges av Formel 10.4. Det ska tilläggas att ett resistivt fel kan ge högre felspänning ( $1,82 \cdot V_{fas}$ ) än den felspänning som fås vid stumt jordfel ( $1,73 \cdot V_{fas}$ )<sup>27</sup>.

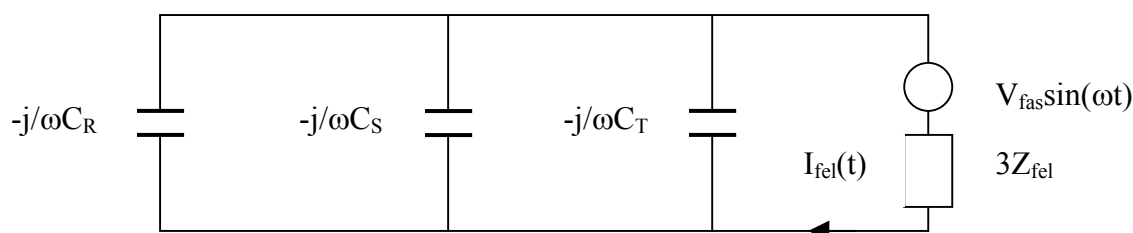
Spänningen i de andra fallen visas i figur 11.1 – 11.3, *Appendix B*.

Ur figurerna går det också att utläsa att felspänningarna är likvärdiga oberoende om felmotståndet är 3 kΩ, 5 kΩ, eller 20 kΩ. Anledningen till att spänningen är lika stor över felstället beror på att impedansen i ledningen och i transformatorlindningarna är små i förhållande till felresistansen. Strömmen däremot är omvänt proportionellt mot felresistansen och ökar vid mindre övergångsmotstånd.

Figur 6.13 visar att strömmen ökar proportionellt mot kabellängden om felet är stumt. Det stämmer bra med teorin som säger att jordfelsströmmen är ekvivalent med den kapacitiva strömmen genererad i ledningen i ett isolerat system enligt

$$I_{fel}(t) = V_{fas} \sin(\omega t) * 3j\omega(C_R + C_S + C_T), \quad [A] \quad \text{Formel 6.7}$$

Theveninekvivalenten för nollföljds-kretsen visas i Figur 6.14<sup>28</sup>,  $Z_{fel} = 0$  om felet är stumt. Andra komponenter som ledningsimpedans och transformatorimpedans är försummade.



**Figur 6.14. Nollföljdssystemet för isolerat system.**

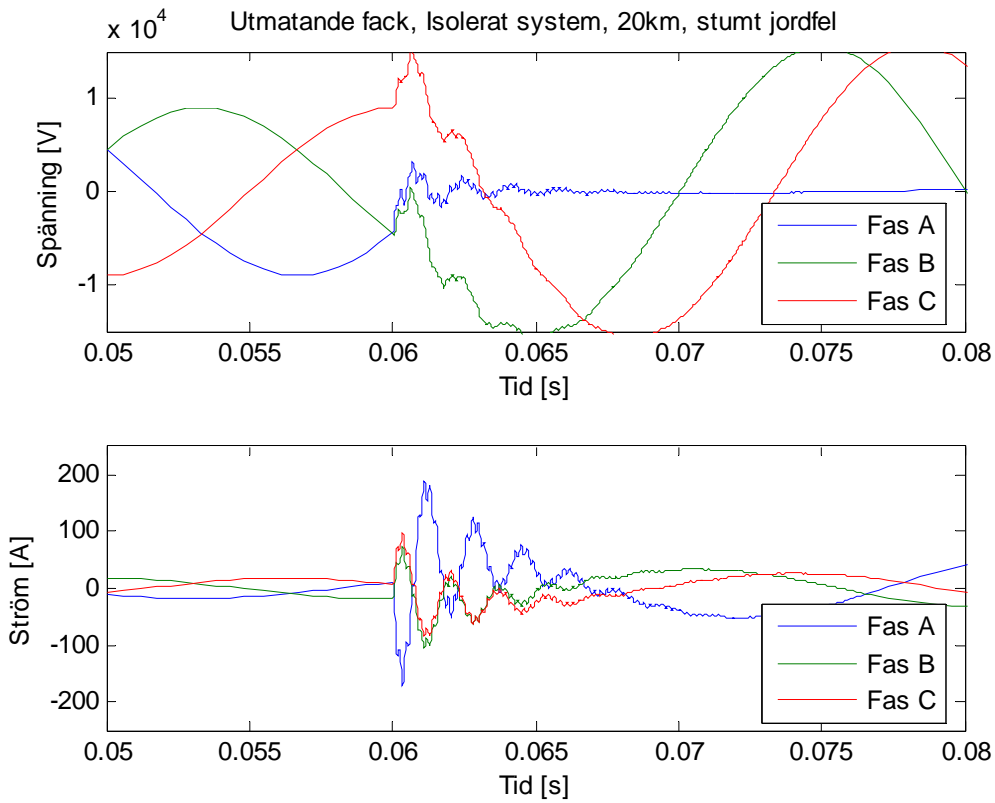
I det isolerade systemet ingår ingen nollpunktsutrustning och därmed inga nollpunktsströmmar och nollpunktsspänningar.

### Matande fack

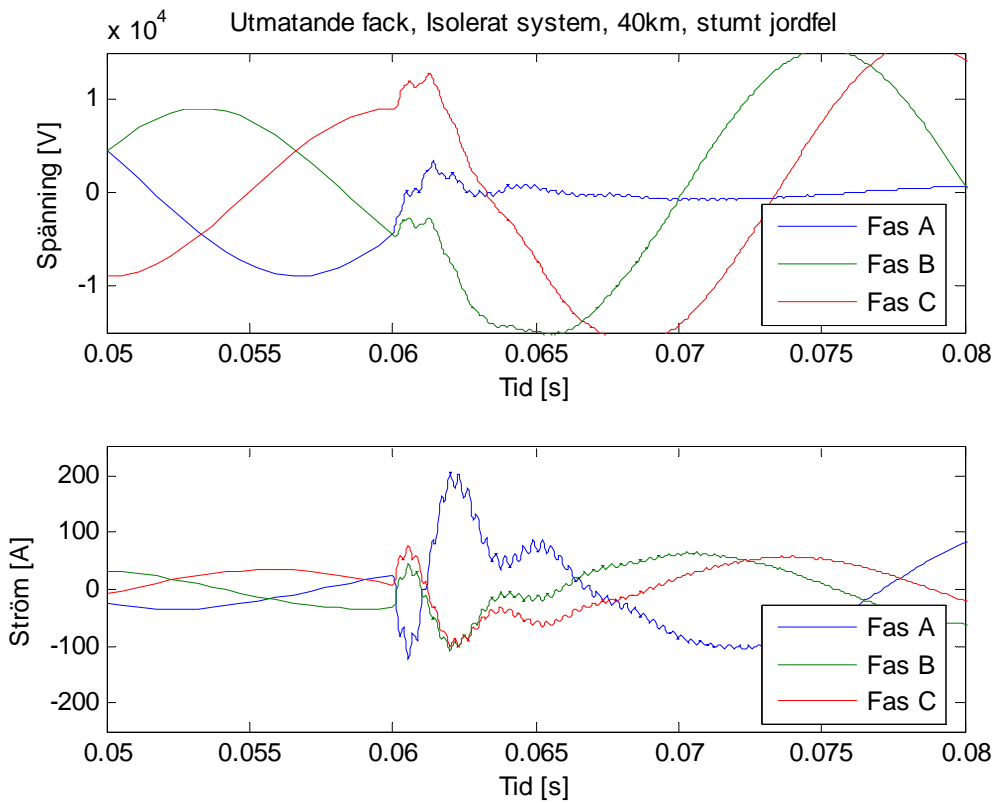
Om man tittar på spänningar och strömmar ut från matande fack vid felets inträffande så fås transienter. Speciellt strömmen är intressant att titta på för att se om det uppstår transienter vid fel som jordfelsskydden kan detektera. Transienter erhålls endast vid lågohmiga fel och därför visas bara dessa i figurerna nedan under transientens varaktighet. För att se förloppet under en längre tid hänvisas till figurerna 11.45 till 11.47 i *Appendix B*.

<sup>27</sup> Neutral Grounding In High Voltage Transmission, R. Willheim & M. Waters, Elsevier publishing company, New York-Amsterdam-London-Princeton, 1956

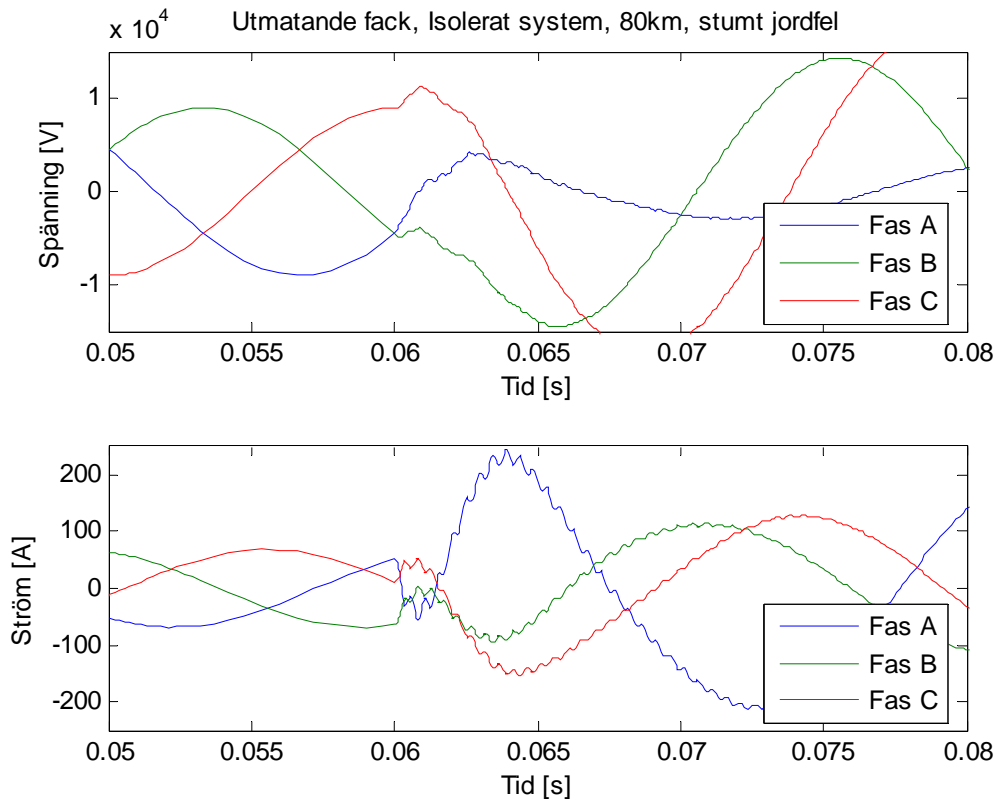
<sup>28</sup> System Earthing, Sture Lindahl, System Operation, 10 oktober 1992



**Figur 6.15. Spänning och ström i matande fack vid isolerat system, 20km kabel och stumt jordfel mellan tiden 0.05s och 0.08s.**



**Figur 6.16. Spänning och ström i matande fack vid isolerat system, 40km kabel och stumt jordfel mellan tiden 0.05s och 0.08s.**



**Figur 6.17. Spänning och ström i matande fack vid isolerat system, 80km kabel och stumt jordfel mellan tiden 0.05s och 0.08s.**

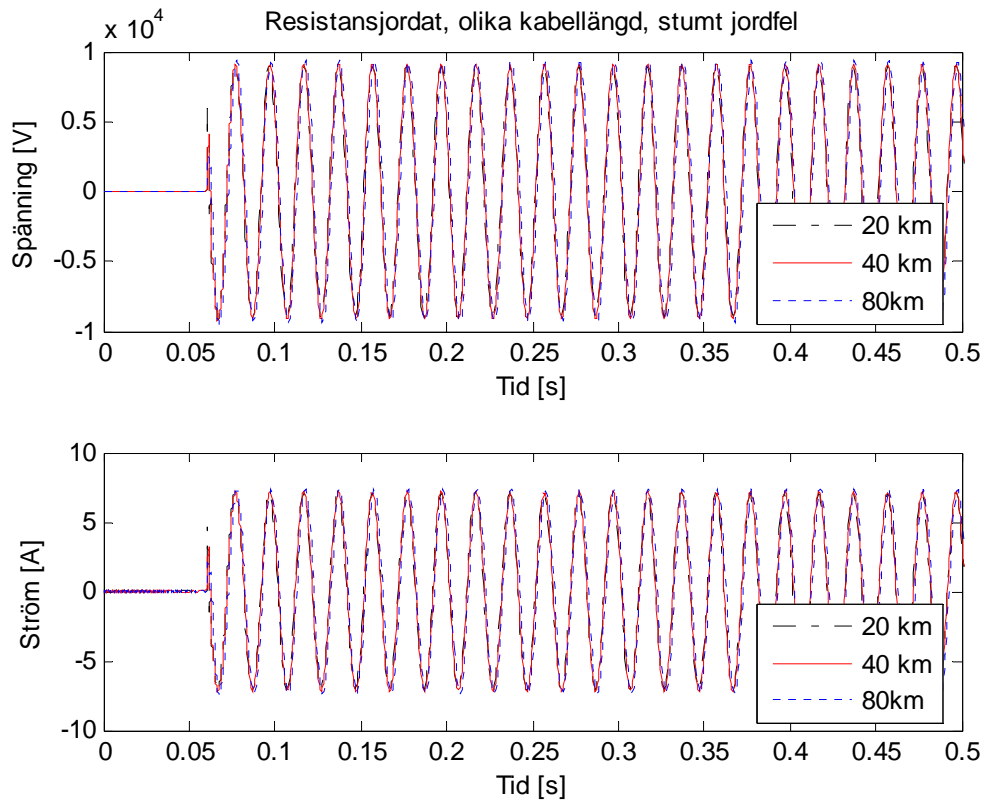
Transientens toppvärde, frekvens och varaktighet visas i figurerna 6.15 till 6.17 för de olika längderna. Dessa värden är sammanställda i tabell 11.11 tillsammans med de andra icke direktjordade systemens transienter i deras utmatande fack. Man ser att transienternas amplitud blev högre vid längre kabellängd och utan induktiv kompensering. Man ser också att frekvensen hos transienten minskade med ökad kabellängd.

Stationära rms-värden vad gäller stumma fel visas i *Appendix B* tabellerna 11.12 till 11.15 De höghögsmiga fallen gav inga utmärkande transienter utan visas också endast i form av stationära rms-värden i samma tabeller.

## 6.2.2 Resistansjordat system

Motståndet i nollpunkten valdes till  $1\,270\ \Omega$ , (5 A). Valet baserades på vanligt förekommande resistans i mellanspänningsnäten.



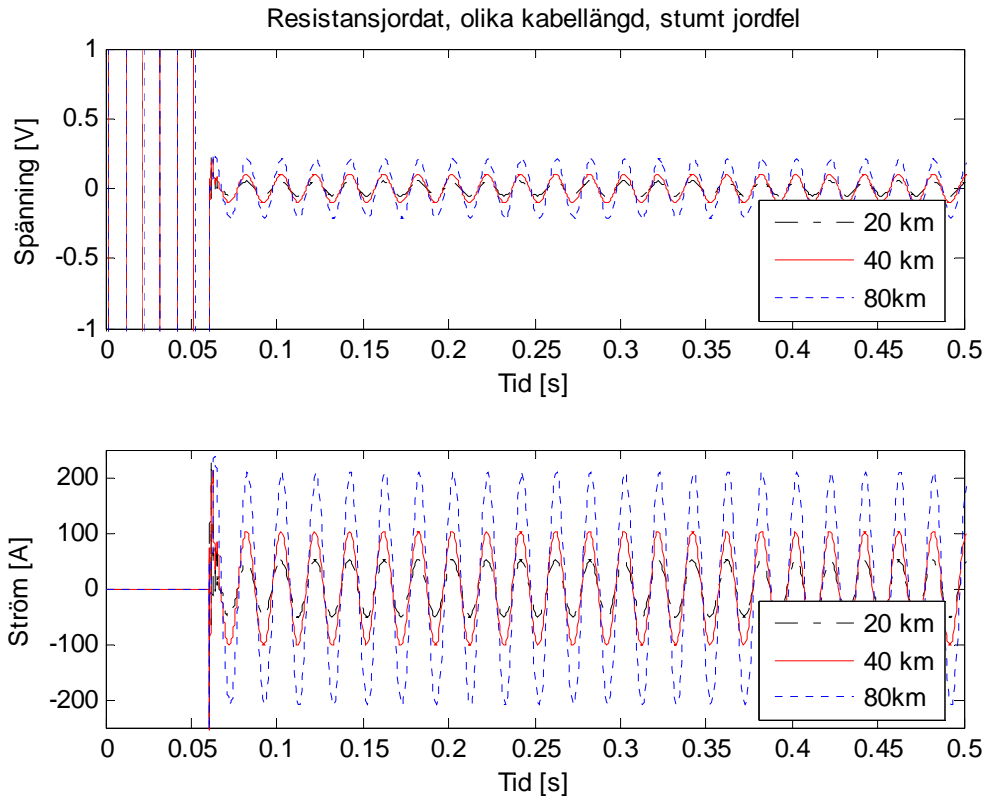


**Figur 6.18. Nollpunktsspänning och ström, resistansjordat system vid stumt jordfel.**

Man ser att motståndet i nollpunkten endast har den funktionen att skapa en ström vid fel som jordfelskydden kan mäta på eftersom 5 A fås i nollpunkten vid stumt fel. Detta är, som nämnts innan, en fördel i ett system med lite kapacitiv strömgenerering. Vid användning av resistans i nollpunkt bör man tänka på att spänningssättningen i felstället, som ej får överstiga 100 V, sätter en övre gräns för motståndets märkström.

Nollpunktsströmmen minskade också om felresistansen ökade. Detta på grund av att dessa ligger i serie med varandra och felresistansen är så hög att nästan ingen ström flyter. Figurer som illustrerar de höghomiga felfallen finns i *Appendix B* figurerna 11.4 till 11.14.

Theveninekvivalensen är i stort sett samma som för isolerat system med en resistor parallellkopplad med ledningskapacitanserna.



**Figur 6.19. Felspänning och ström, resistansjordat system vid stumt jordfel mellan tiden 0s och 0.5s.**

Felströmmen i det resistansjordade systemet är snarlik felströmmen i det isolerade eftersom motståndet inte har kompenserande verkan. Orsaken till att inte det aktiva bidraget syns i felstället bör vara att den aktiva vektordelen är liten jämfört med den kapacitiva och eftersom kurvan visar summan av vektorerna syns inte den aktiva delen. Vid de höghohmiga felresistanserna, se *Appendix B* figurerna 11.4 till 11.14, blev strömmen mindre om längden på kabeln ökades.

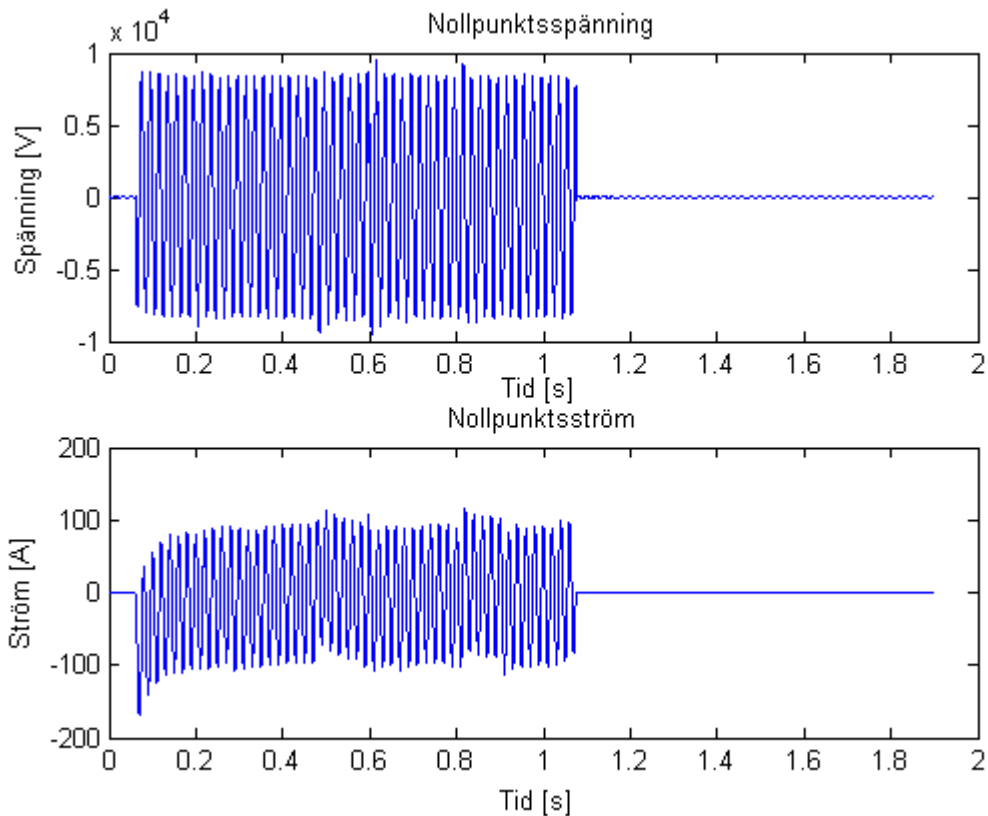
### Matande fack

Utseende på kurvorna ifrån matande fack vid resistansjordning var i stort sett identiska med isolerat system vid studerande av transienter och därför är dessa placerade i *Appendix B*, figurerna 11.48 till 11.53.

### 6.2.3 Spoljordat system

Simulering utfördes på ett nät med ett system jordat med endast spole i nollpunkten enligt Figur 6.10. Totala längden på ledningen, AXKJ 3\*95/16, var 40 km med  $I_c$  generering om ca 72 A, (rms).

Spänningen och strömmen i nollpunktsutrustningen får följande utseende vid stumt jordfel.

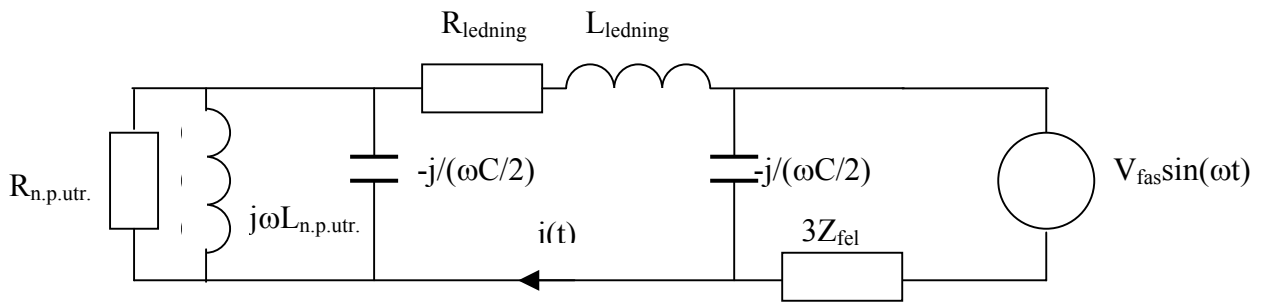


**Figur 6.20. Nollpunktsspänning och ström vid spoljordat system.**

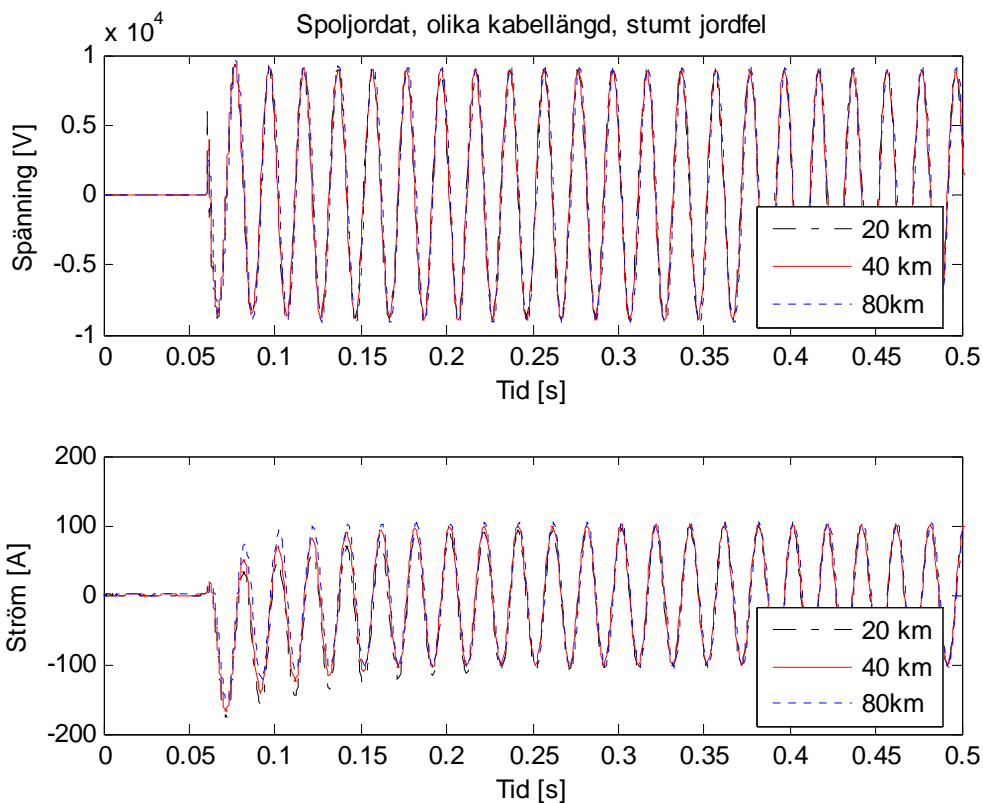
Utseendet på nollpunktsströmmen antas enligt egen teori orsakas av att det initialt, när jordslutningen sker, bildas en stor urladdning av kapacitiv ström från ledningarna eftersom felet ej inträffar i spänningens nollgenomgång. Detta ger upphov till den med tiden avtagande komponent som växelströmmen genom induktorn pendlar kring. Efter hand som tiden går planar komponenten ut på grund av de resistiva bidragen i ledningarna och i transformatorn, d.v.s. resistansen är systemets dämpning. Man kan utläsa ur Figur 6.22 samt i *Appendix B* Figur 11.16 att längden på kabeln bestämmer hastigheten på komponentens avtagande. Ju längre kabel desto större serieresistans i förhållande till systemets reaktans vilket i sin tur ger ett snabbare avtagande.

När stationärt tillstånd erhålls vid tiden 0.25 s så svänger kretsen med perioden 50 Hz och amplituden 95 A vilket motsvarar fasspänningen dividerat med kretsens totala impedans. Nollpunktsspölen samt induktansen i ledningarna ger upphov till att strömmen eftersläpar fasspänningen med ca 32°.

Nollföljdsschemat för reaktansjordat system illustreras i Figur 6.21 nedan. Om  $R_{n.p.utr}$  är oändlig d.v.s. när nollpunktsmotstånd ej finns så erhålls spoljordat system. Kapacitansen  $C$  är summan av varje fas kapacitans till jord.



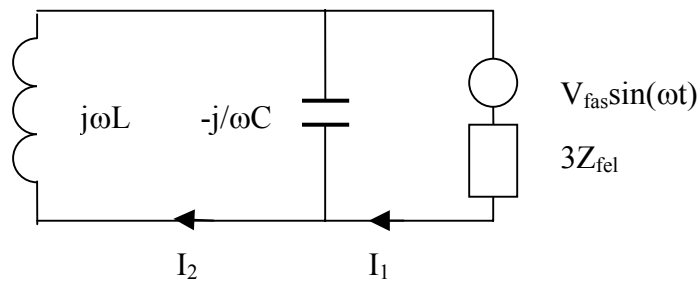
Figur 6.21. Nollföljssystemet för jordfel i reaktansjordat system. För spoljordat gäller  $R_{n,p.utr}=\infty$ .



Figur 6.22. Nollpunktsspänning och ström, spoljordat system, stumt jordfel mellan tiden 0s och 0.5s.

För de olika ledningslängderna erhöles ovanstående, Figur 6.22. En intressant observation var den i *Appendix B* figur 11.16 där spänningen fortsätter att oscillera efter det att brytaren kopplat bort felet. Detta tyder på att den resonanskrets, bestående av induktorn och ledningens kapacitans, som fås vid (nästan) avstämning oscillerar mot varandra en tid efter att den felbehäftande ledningen kopplats bort för att sedan dämpas ut av de resistiva komponenterna i systemet.

Vid studerande av nollföljdsströmmen vid de höghmiga felfallen så fås ett ”cigarrformat” utseende på nollföljdsströmmen om vi har avstämning. Förklaringen till detta är att nollföljden bildar en parallellresonanskrets enligt Figur 6.23 om man försummar ledningsimpedansen.



**Figur 6.23. Parallellresonanskretsen som bildas i nollföljdssystemet.**

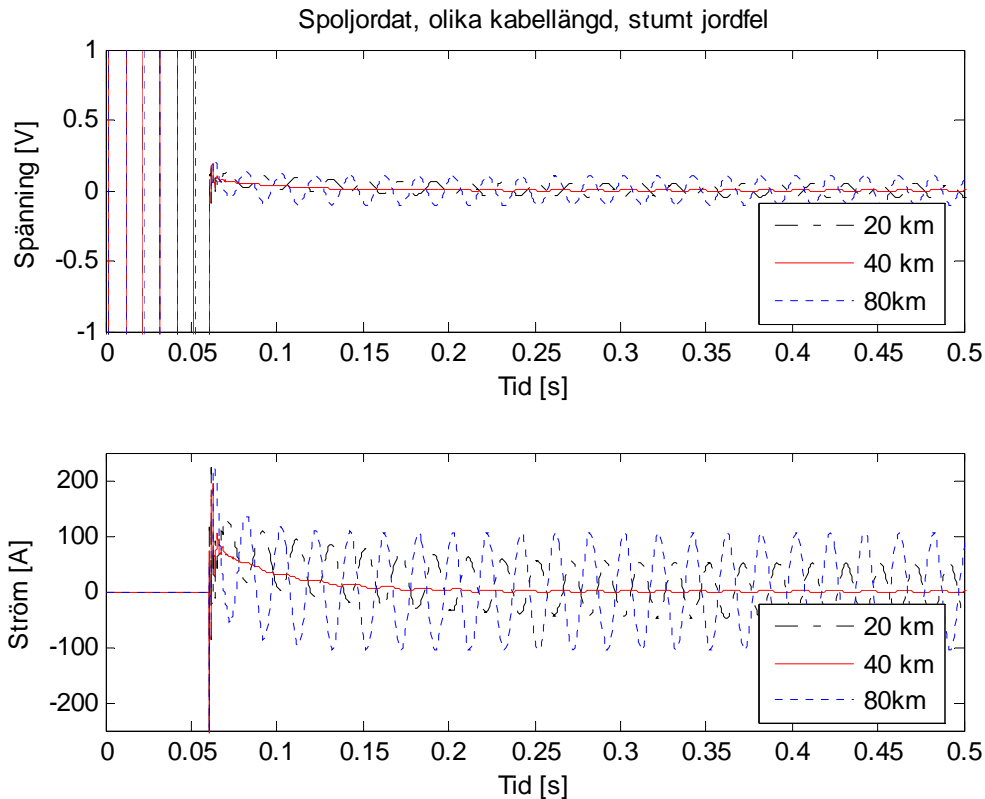
Skillnaden i detta fallet jämfört med felfallet ovan är att felimpedansen ej är noll. En del spänning kommer att lägga sig över felimpedansen. Storleken på denna spänning beror hur stor felimpedansen är jämfört med motståndet i spolen och i kapacitansen. Eftersom  $Z_{fel} \geq 3 \text{ k}\Omega$  så fås en liten spänning över spolen och ledningskapacitansen och  $I_1$  är nästan noll. Att man sedan avstämmer spolen mot kapacitansen gör att denna parallellkrets tillsammans inte drar någon ström.

$$I_1 = \frac{V \sin(\omega t)}{j\omega L // -\frac{j}{\omega C}} \approx 0, \quad [A] \quad \text{Formel 6.8}$$

Dock finns en liten spänning som kommer att ladda upp kondensatorn som i sin tur bildar en resonanskrets med spolen. Denna resonanskrets kommer att dra upp strömmen  $I_2$  och för den del spänningen upp tills felimpedansen begränsar storleken på spänningen. Begränsningen av  $I_2$  bestäms av storleken på  $L$  och på  $Z_{fel}$  enligt

$$I_2 = \frac{V \sin(\omega t) - V(Z_{fel})}{j\omega L}, \quad [A] \quad \text{Formel 6.9}$$

Spänning och strömbegränsningen går att urskilja ur de olika höghögmiga fallen som visas i figurerna 11.15 till 11.28.



**Figur 6.24. Felspänning och ström, spoljordat system vid stumt jordfel mellan tiden 0s och 0.5s.**

Förklaringen till Figur 6.24 ovan gavs vid verifiering av modellen.

Om man tittar på felspänning och felström så sjunker dessa för det avstämnda fallet när strömmen och spänningen i nollpunkten ökar. Efter ett tag planar spänningen över felet ut och vi har en stationär spänningsdelning med nollpunktsutrustningen.

Eftersom strömmen i de höghmiga felen är mindre vid lika lång ledning jämfört med de tidigare två kan man säga att teorin om att spolen ska motverka de kapacitiva strömmarna även gäller för de höghmiga felen. Anledningen att strömmarna är små och spänningen över felet är hög beror på den stora felresistansen. Anledningen till att strömmen är större vid längre ledning är att, som diskuterats innan, generad kapacitiv ström från de friska faserna ökar med ökad ledningslängd.

### Matande fack

Strömmen i matande fack ökar med ökad kabellängd medan transientens frekvens och varaktighet minskar med ökad längd. Några ytterligare analyser om utseendet jämfört med de fall då induktor ej förekommer i nollpunkten omfattas inte av detta arbete. Detta kan dock vara till nytta vid om man vill fördjupa sig i transientmätande skydd och titta på deras karaktäristik. Kurvorna visas i *Appendix B*.

### 6.2.4 Reaktansjordat system

Reaktansjordade systemets nollpunktsutrustning består i simuleringen av spolen på 0.281 H, (72 A) och resistansen på 1 270  $\Omega$ , (5 A). Samtliga kurvor finns i *Appendix B*.

Utseendet i nollpunkten är liknande som för spoljordat system men den tid det tar för ciganren att öka till sitt maximala värde är kortare. Anledningen till detta torde vara den resistor som ligger parallellt med spolen vilken ökar tillväxthastigheten på strömmen genom och spänningen över spolen.

Spänningens och strömmens utseende i felstället är liknande för spoljordat system vilket förklarades ovan.

**Matande fack**

Utseendet liknar det spoljordade och läsaren hänvisas till *Appendix B*.

## 7 Analys och diskussion

### Kompensering av kapacitiva bidrag.

Eftersom det ur jordslutningssynpunkt är lika bra att ligga något underkompenserat som en aning överkompenserat, vilken av de två punkterna ska man då välja? Fördelen med att ligga lite överkompenserat kan vara, att om en ledning kopplas bort på grund av fel eller annan orsak så finns det inte någon risk att hamna på resonanspunkten och få obehagliga fenomen som höga spänningar och strömmar över respektive igenom nollpunktsutrustningen. Fördelen med att ligga underkompenserat är, att om en ledning bortkopplas på grund av ett fel så hamnar man närmre resonanspunkten vilket ger en bättre känslighet för andra eventuella fel. Risk finns dock att man hamnar exakt på denna punkt och skapar en resonanskrets vilket kan förstöra systemets anläggningsdelar.

Man kan fråga sig hur troligt det är att man hamnar exakt på denna punkt? Enligt min mening är risken ganska liten att det skulle bortkopplas en exakt så stor del av nätet så att detta inträffar. Om man ändå hamnar på resonanspunkten så kommer, enligt resultaten ovan, felresistansen, transformatorns nollföljdsimpedans, ledningsimpedansen och de andra resistiva bidragen att hålla nollpunktsspänningen nere. Sedan kan man också tillägga att sannolikheten för att ett fel ska inträffa, just när man under pågående driftomläggning under en kortare tid ligger på resonanspunkten, förmodligen inte är särskilt stor.

Vilket val man än gör så bör man i förväg betänka vilka scenarier som kan uppstå vid t.ex. utlösning av en ledning med stor kapacitiv generering eller driftomläggningar, så att reaktorn är dimensionerad för att kompensera detta. Slutsatsen är att man bör ligga nära resonanspunkt, dels för att få bättre känslighet för skydd, dels för att kompensera ner det kapacitiva strömbidraget så att spänning på utsatt del hålls nere.

### Simulerade resultat i nollpunkten och i felstället

En stor strömspik fås i samtliga system då ett stumt jordfel inträffar. Orsaken till denna strömspik är att spänningen i den felbehäftade fasen under en väldigt kort tid faller till nollpotential. Initialt kan ledningens urladdning av kapacitiv ström genom felet ge upphov till en strömspik men att spiken är av den storlek som i simuleringen är i verkligheten inte så troligt på grund av att felet inte är så idealt stumma som i simuleringen. I verkligheten finns mer eller mindre övergångsresistanser i form av en ljusbågsresistanser, felresistanser, markresistanser etc. Att strömmens och spänningens amplitud är beroende av felresistansen syns i de höghmiga fallen. Däremot är inte den frigjorda energin beroende av felresistansen.

Felet är applicerat vid en bestämd tidpunkt ( $t = 0,06 \text{ s}$ ) när spänningen på feldrabbad fas är nära noll. Oftast inträffar merparten av fel när spänningen över felstället stiger och närmar sig spänningsmaximum. Denna simulering omfattas ej i rapporten utan får ses som en utvidgning och ges som ett förslag till fortsatt studie.

Att den kapacitiva strömmen blir större med ökad längd diskuterades i avsnittet *Ledningar*. Detta syntes även i simuleringarna och kurvorna visar också att man med en induktor i nollpunkten kan kompensera denna kapacitiva ström. Vid ännu noggrannare studier av simuleringsskurvorna än vad som är möjligt här i rapporten, så



ser man att en aktiv strömkomponent också förekommer i felstället. Storleken på denna varierar beroende på om man har nollpunktsmotstånd eller ej men framför allt om felresistans, ledningens serieresistans och jordtagsresistansen ändras.

Det ska tilläggas att transformatorns nollföljdsimpedans också har en stor inverkan. Det som går att göra för att förbättra och få ner resistansen och därmed felströmmen är att hålla ner ledningslängden, förbättra jordtagsresistansen och använda sig av transformatorer med små nollföljdsimpedanser. En tanke kan vara att öka arean på ledningen och på så sett få ner resistansen men då försämras slutresultatet eftersom kabelns geometriska förändring får till följd att kapacitansen ökar och därmed den kapacitiva strömmen. Då måste denna kompenseras bort med en större induktor som i sin tur har större aktiva förluster, vilka kommer att synas i felstället som aktiv ström.

### Simulerade resultat i matande fack

Som man kan utläsa från Figur 6.15 till Figur 6.17 samt från kurvorna i *Appendix B* så fås transienter med högre amplitud ju längre kabel som används. Detta verkar trovärdigt då det är mer laddning som ska laddas ur över felet och bilda det kapacitiva strömtillskottet. Oavsett längd på kabeln dämpas transienten ut och strömmen från facket hamnar i stationär svängning. De stationära värdena visas i tabellerna 11.12-11.15. Då frekvensen på transienten studeras ser man att den minskar med längre kabel. Min tolkning av detta är att jag har en serieresonanskrets bestående av först den kapacitiva delen i form av kabelns shuntadmittans och induktanser från ledningen och lindningsinduktanser från transformatorn. En serieresonanskrets egenvinkelfrekvens ges av

$$\omega_{egen} = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad [rad/s] \quad \text{Formel 7.1}$$

där en ändring av  $L$  och  $C$ , som visas med olika längd på kabel, ger en förändring på frekvensen. Resistansen i systemet bestämmer dämpningen av transienten, d.v.s varaktigheten hos transienten.

Kurvorna från matande fack vid isolerat och resistansjordat system skilde sig inte nämnvärt vad det gällde amplitud. Detta förklaras med att den resistiva strömmen är liten i förhållande till den kapacitiva så att totala strömvektorn blir ungefär densamma i båda fallen. Exempelvis för 20 km ledning så fås en kapacitiv ström på ca 36 A. För att få den totala strömmen så ska den kapacitiva vektorn läggas ihop med den aktiva och det resultat man får då är ungefär samma ström som den kapacitiva. Vid höghögliga fel erhöles inga transienter oavsett jordningsdesign. Utifrån detta är min tolkning att höghögliga fel kan vara svåra att detektera med hjälp av transientmätande utrustning.

## 8 Framtida arbeten

Målet med denna rapport var att samla information genom litteraturstudier för att kunna beskriva de icke direktjordade systemen och jordfelsproblematiken. Denna tidskrävande process har gjort att några djupgående simuleringar av ytterligare intressanta fall ej kunnat genomföras inom tidsramen för detta arbete. Arbetet kan ses som ett avstamp både litteraturmässigt och simuleringsmässigt för framtida arbeten. Några idéer för fortsatt forskning redovisas nedan.

- Eftersom Simulink, Matlab<sup>®</sup> är ett användbart verktyg framför allt vid studerande av ögonblicksvärden skulle man kunna titta närmare på olika transienter som uppstår inte bara vid ett jordfel utan även vid bortkoppling av en jordslutning på olika delar i systemet. När ledningarna består av mycket kabel kan höga urladdningsströmmar erhållas och dessa kan vara förödande för skydden. Om detta inträffar kan man med hjälp av detta verktyg bilda sig en uppfattning om transienternas storlek och behov av eventuella filtreringar.
- Intressant hade också varit att försöka simulera ett bakmatat jordfel med en Dyn-kopplad transformator som transformerar ner till hushållsspänning där apparater med skyddsjordning är anslutna. Denna typ av jordfel är mycket svåra att detektera för jordfelskydd och möjligen skulle simuleringen ge ledtrådar för hur man på ett bättre sätt ska kunna detektera dessa.
- En annan typ av fel som skulle behöva studeras mer är de återkommande jordslutningarna, så kallade intermittenta jordfel, eftersom dessa är vanligt förekommande i kabelnät. Detta är framför allt av intresse när nätet är helt kompenserat eftersom att höga spänningar i nätet då kan förekomma.
- Oftast består en fördelningsstation av flera utmatande fack med olika Ic-bidrag. Modellen i denna rapport kan byggas ut för att studera en sådan och se vad som händer i respektive fack när jordfel inträffar på en eller flera av de utmatande ledningarna.
- Modellen skulle även kunna byggas ut med utdistribuerade spolar eller andra kompenseringsformer och analyseras. Byggs ett liknande nät med vanlig traditionell kompenseringsform samtidigt, skulle man kunna jämföra dessa för att finna för och nackdelar för respektive design.
- Kablifiering på landsbygden innebär långa ledningssträckor med ökad ledningsresistans vilket tillsammans med ökad jordtagsresistans orsakar problem på grund av dessa långa sträckor och dåliga markförhållanden. Var gränsen går innan problem uppstår, i form av överträdelse av myndighetskravet *spänning av utsatt del* p.g.a. aktiva strömmar i felstället, är ytterligare ett område som kan undersökas.

## 9 Referenser

### Litteratur

Allmänna råd, ELSÄK-FS 1999:5 "Blå boken", § B73

Elkraftsystem del 2, Stenborg Bertil, Chalmers, Dept. Electric Power Engineer, 1997

Kraftkabelhandboken, Ericsson Cables Kraftkabeldivisionen

Svensk standard SS 421 01 01, Starkströmsanläggningar med nominell spänning överstigande 1kV AC, Svenska elektriska kommissionen, SEK 1999-12-17

Onormala tillstånd I elkraftnät, N. Knudsen, B. Stenborg, Inst för elektrisk anläggningsteknik Chalmers, 1974

Bortkoppling av högresistiva jordslutningar i icke direktjordade distribution- och transmissionsnät, Svenska Elverksföreningen Arbetsgruppen för känsliga jordfelsskydd, 1990

Jordfelsteknik, ekonomisk utvärdering, Svenska Elverksföreningen, 1992

Jordfelsbortkoppling I distributionsnät med lokal kompensering, Messing Lars, ABB, 2001

Starkströmsanläggningar med nominell spänning överstigande 1kV AC. (Speciellt kap.9 Riktlinjer för konstruktion, provning och underhåll av jordningssystem).

Reläskydd 1, Johannesson Tomas, kursmaterial Sydkraft Nät AB, Malmö

Neutral Grounding In High Voltage Transmission, R. Willheim & M. Waters, Elsevier publishing company, New York-Amsterdam-London-Princeton, 1956

Power Systems analysis and design 3:rd edition, J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, Brooks/Cole, 2002

Demands on the relay protection system, Messing Lars, Seminar for UTE in Montevideo, June 1994

Instrument transformers in relay protection systems, Messing Lars, Seminar for UTE in Montevideo, June 1994

Transformatorprotokoll från Energoinvest, Tovarna transformatorjev, Ljubljana-Yugoslavia, 1989

System Earthing, Sture Lindahl, System Operation, 10 oktober 1992

## **Internet**

Svensk Energi elåret 2003, <http://www.svenskenergi.se/energifakta/distribueras.htm>

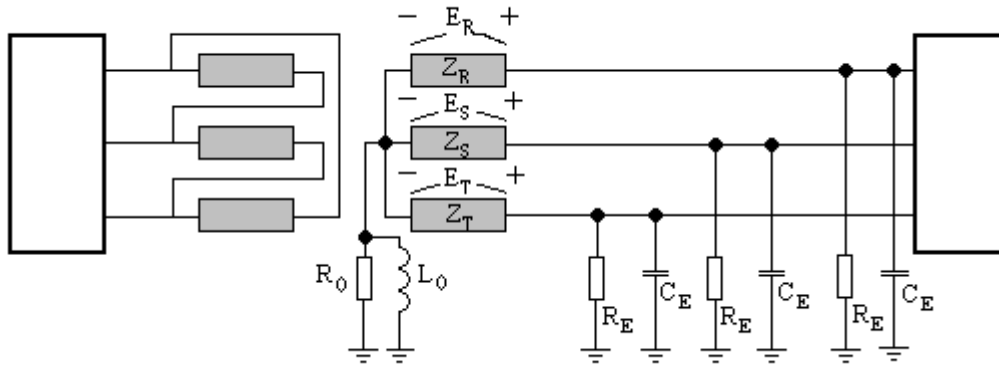
Draka kabel Sverige AB, informationsblad,  
[http://www.draka.se/pdf/AXKJ\\_12\\_kV\\_3-led.pdf](http://www.draka.se/pdf/AXKJ_12_kV_3-led.pdf), 2005-05-31

Onninen, informationsblad, 1 MVA transformator Dyn 11 märke: ABB,  
<http://www.onninen.se/laddahem/dokument/TrafoF1.pdf>, 2005-05-31

# 10 Appendix A

## Symmetriska komponenter

Användningen av symmetriska komponenter är till för att lösa obalanserade problem med balanserad teknik och togs fram av C. Fortescue 1917.

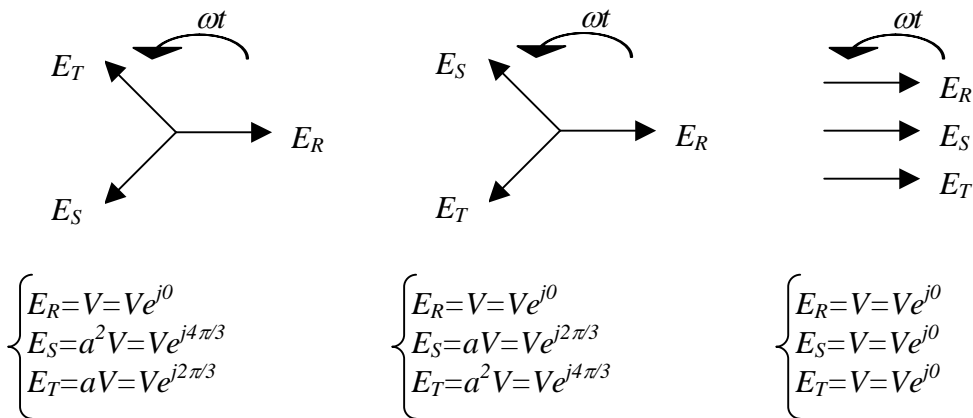


Figur 10.1 Exempel på icke direktjordat system.

Spänningarna över  $E_{R,S,T}$  i Figur 10.1 kan beskrivas, vilket har visats innan, som:

$$\begin{cases} E_R = U \\ E_S = a^2 U \\ E_T = a U \end{cases} \quad a = -0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2} = \angle 120^\circ, \quad a^2 = -0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2} = \angle 240^\circ \quad \text{Formel 10.1}$$

där  $a$  symboliserar fasförskjutningen. Spänningarna har lika amplitud och  $120^\circ$  fasförskjutning. Fasordningen när  $E_R$  ligger  $120^\circ$  före  $E_S$  och  $240^\circ$  före  $E_T$  kallas även *plusföljd*. På samma sätt kan *minusföljd* förklaras men med fasordningen  $E_R$  ligger  $120^\circ$  efter  $E_S$  och  $240^\circ$  efter  $E_T$  och *nollföljd* där faserna inte har någon förskjutning till varandra. Följderna illustreras i Figur 10.2 med vektorer och rotationsriktning  $\omega t$  samt tillhörande komplexa beskrivning.



Figur 10.2. Spänningen representerad från vänster till höger: plus-, minus-, nollföljdssekvens.

Samma sak gäller för strömsekvenser men dessa är förskjutna i förhållande till fasspänningen. Man brukar införa beteckningarna  $V_1$ ,  $V_2$ , och  $V_0$  för plus, minus respektive nollföljd.

Om fasspänningsbeteckningarna  $E_{R,S,T}$  byts mot  $V_{R,S,T}$  och man studerar Figur 10.2 så ser man att dessa kan skrivas i matrisform innehållande sekvensspänningarna

$$\underbrace{\begin{bmatrix} V_R \\ V_S \\ V_T \end{bmatrix}}_{V_P} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}}_{V_S} \quad \text{Formel 10.2}$$

där  $V_P$  är fasspänningsmatrisen och  $V_S$  är sekvensspänningsmatrisen.

Inversen till  $A$ ,  $A^{-1}$  transformerar tillbaka från fasdomän till sekvensdomän.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ V_S \\ V_T \end{bmatrix} \quad \text{Formel 10.3}$$

Delas matrisen upp i ekvationer fås:

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_R + V_S + V_T) \quad \text{Formel 10.4}$$

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_R + aV_S + a^2V_T) \quad \text{Formel 10.5}$$

$$V_2 = \frac{1}{3}(V_R + a^2V_S + aV_T) \quad \text{Formel 10.6}$$

Studerar man nu ekvation 10.4 så ser man att nollföljdsspänningen är noll i ett balanserat system eftersom summan av de tre fasspänningarna är noll. Oftast finns det osymmetrier i ledningar p.g.a. induktion, snedbelastningar m.m. men i denna rapport antas ändå ledningar utan fel vara balanserade. Om nu ett jordfel skulle uppstå blir det obalans i systemet och detta ger upphov till nollföljdskomposant.

För sekvensströmmarna fås motsvarande (med förskjutning mot respektive spänning) enligt:

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_R + I_S + I_T) \quad \text{Formel 10.7}$$

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_R + aI_S + a^2I_T) \quad \text{Formel 10.8}$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_R + a^2I_S + aI_T) \quad \text{Formel 10.9}$$

som på matrisform kan skrivas:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} \quad \text{Formel 10.10}$$

Strömmen i transformatorn nollpunkt är summan av fasströmmarna vilket i sin tur ger:

$$I_N = I_R + I_S + I_T = 3I_0 \quad \text{Formel 10.11}$$

ur ekvation 10.7. Om systemet är balanserat så blir denna nollföljdsström noll. Omvänt fås fasströmmen ur:

$$\begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad \text{Formel 10.12}$$

Fasimpedanserna följer ur detta med hjälp av Ohms lag och kan skrivas på matrisform:

$$V_P = Z_P I_P \quad \text{Formel 10.13}$$

Med multiplikation av först A-matrisen och sedan dennes invers fås

$$V_S = Z_S I_S \quad \text{Formel 10.14}$$

där

$$Z_S = A^{-1} Z_P A \quad \text{Formel 10.15}$$

Detta är den så kallade sekvensimpedansmatrisen som innefattar plus-, minus och nollföljdsimpedanserna.

## 11 Appendix B

### Simuleringsvärden och figurer

#### 11.1 Simuleringsparametrar vid enkel ledning.

	Resistans [ $\Omega$ ]	Induktans [H]
Resistansjordat	1 270	---
Spoljordat	---	0.281
Reaktansjordat	1 270	0.281

Tabell 11.1. Nollpunktsutrustningens parametrar.

	Resistans [ $\Omega$ /km]	Induktans [mH/km]	Kapacitans [ $\mu$ F/km]
Plus/Minusföljd	0.32	0.31	0.3
Nollföljd	0.45	0.43	0.3

Tabell 11.2. Ledningsparametrar AXKJ 3\*95/16 mm<sup>2</sup> per km. Ledningarnas längd = 20, 40 respektive 80 km.

Följande parametrar erhöles ur transformatorprotokoll<sup>29</sup>

- $S_N = S_{bas} = 16$  MVA
- $V_{prim} = V_{bas1} = 55$  kV
- $V_{sek} = V_{bas2} = 11$  kV
- $P_{tom} = 11$  kW
- $P_k = 86.974$  kW
- $I_{N2} = 803.3$  A
- $I_{tom} = 0.31\%$  av  $I_N$

Utifrån ovanstående värden kunde parametrarna i tabellen nedan beräknas enligt beskrivning i kapitel 2.

	T1	T2
Effekt [MVA]	16	1
Kopplingsart	Dyn?	Dyn?
Spänningsnivå [kV]	55/11	11/0.4
Lindningsresistans, prim [pu]	0.00540	0.002
Lindningsresistans, sek [pu]	0.00595	0.003
Lindningsinduktans, prim [pu]	0.00696	0.002
Lindningsinduktans, sek [pu]	0.00652	0.003
Magnetiseringsresistans [pu]	1452.6	500
Magnetiseringsinduktans [pu]	346.7	2000

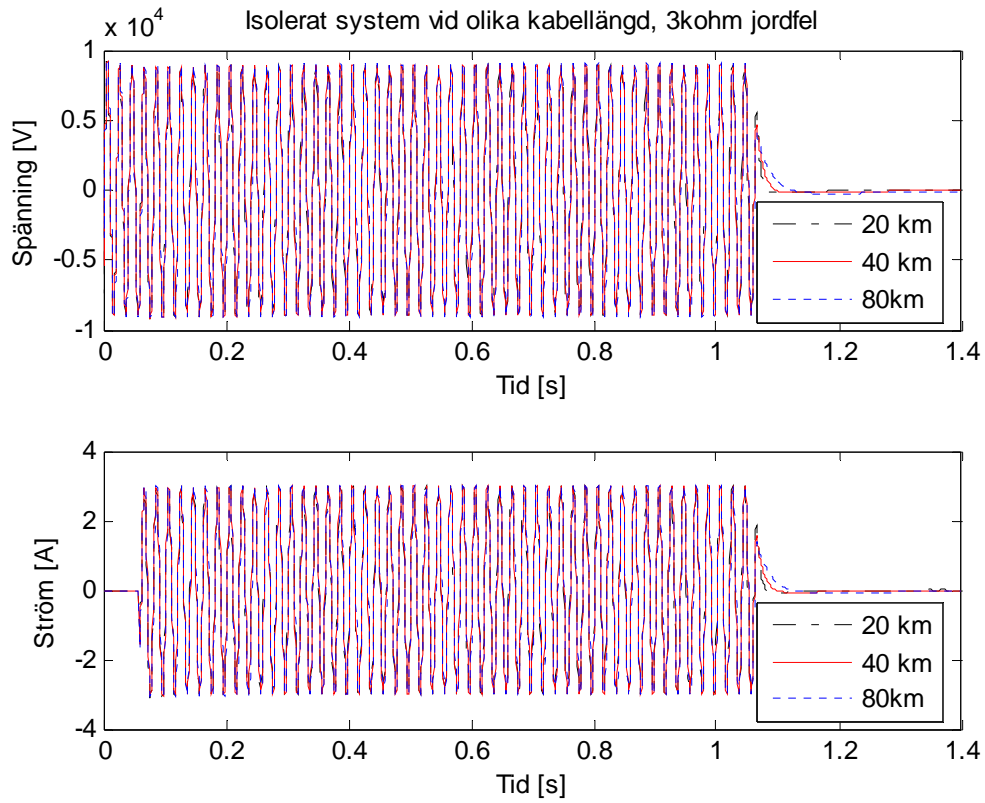
Tabell 11.3. Transformatorparametrar.

<sup>29</sup> Transformatorprotokoll från Energoinvest, Tovarna transformatorjev, Ljubljana-Yugoslavia, 1989

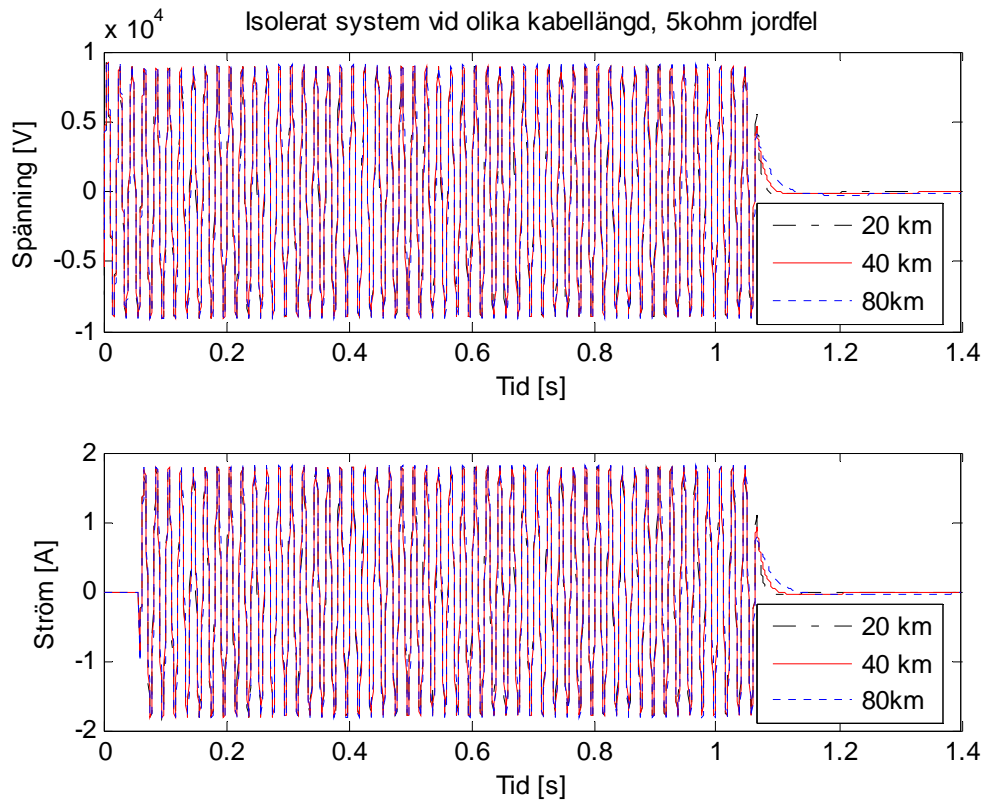


## 11.2 Kurvor från felställe och nollpunkt vid simulering av enkel ledning.

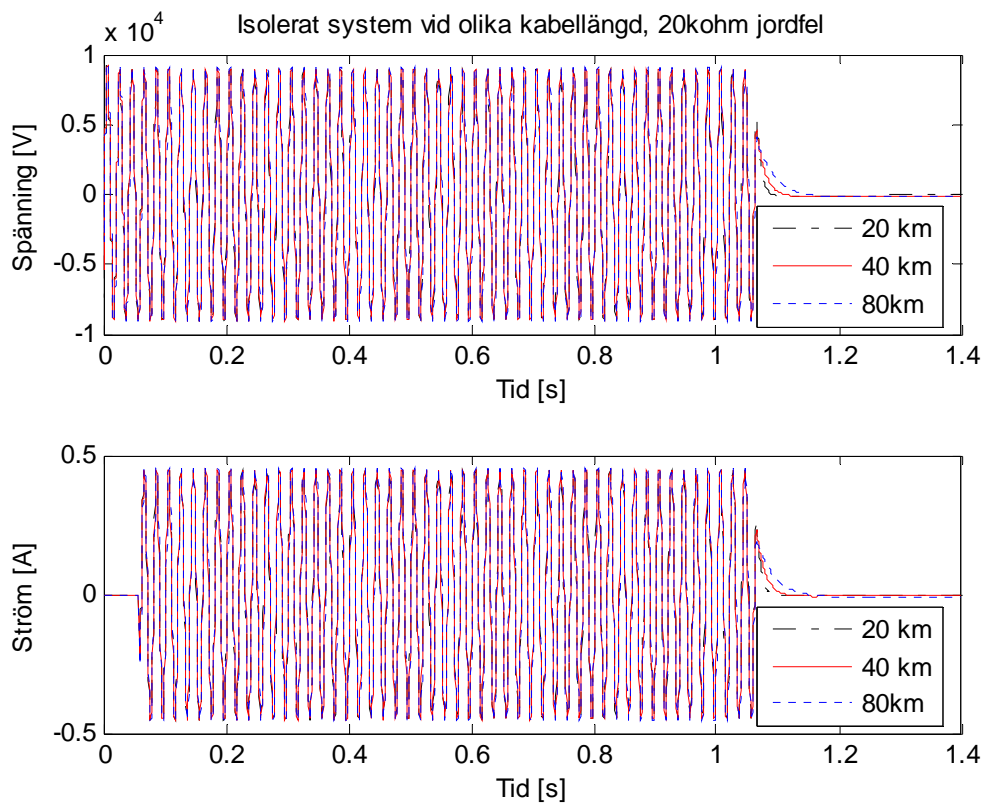
### 11.2.1 Isolerat system



Figur 11.1. Isolerat system vid kabellängderna 20, 40, 80 km vid 3k $\Omega$  jordfel. Övre: Spänningen över felet. Undre: Strömmen genom felet.

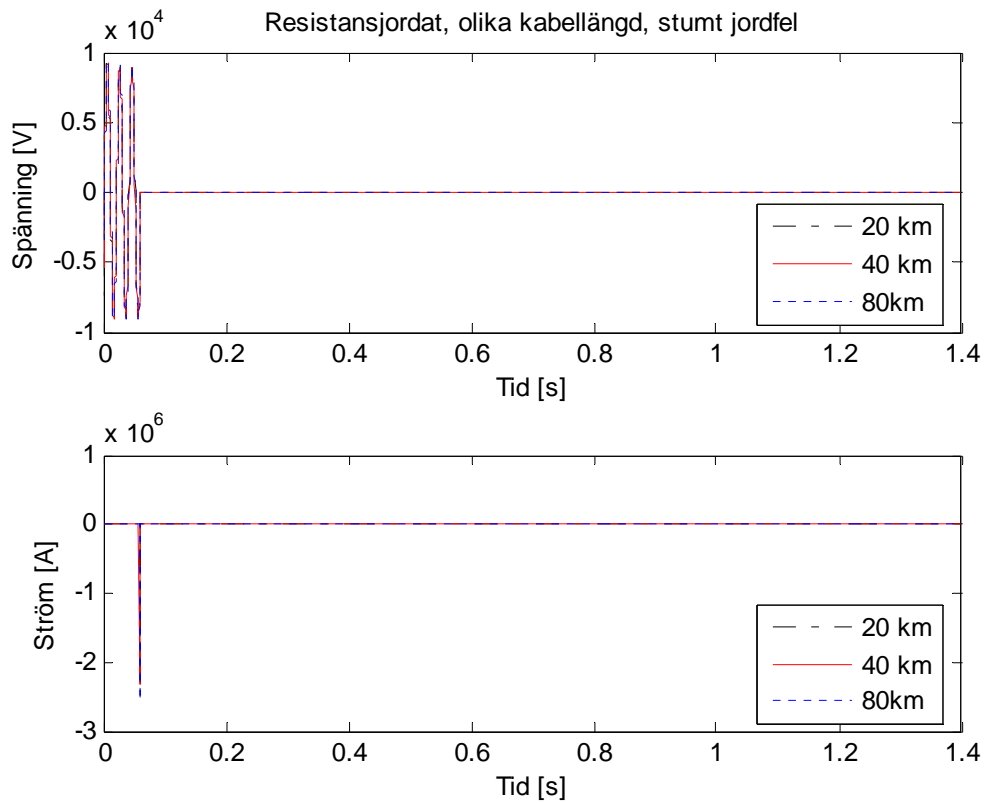


**Figur 11.2. Isolerat system vid kabellängderna 20, 40, 80 km vid 5kΩ jordfel. Övre: Spänningen över felet. Undre: Strömmen genom felet.**

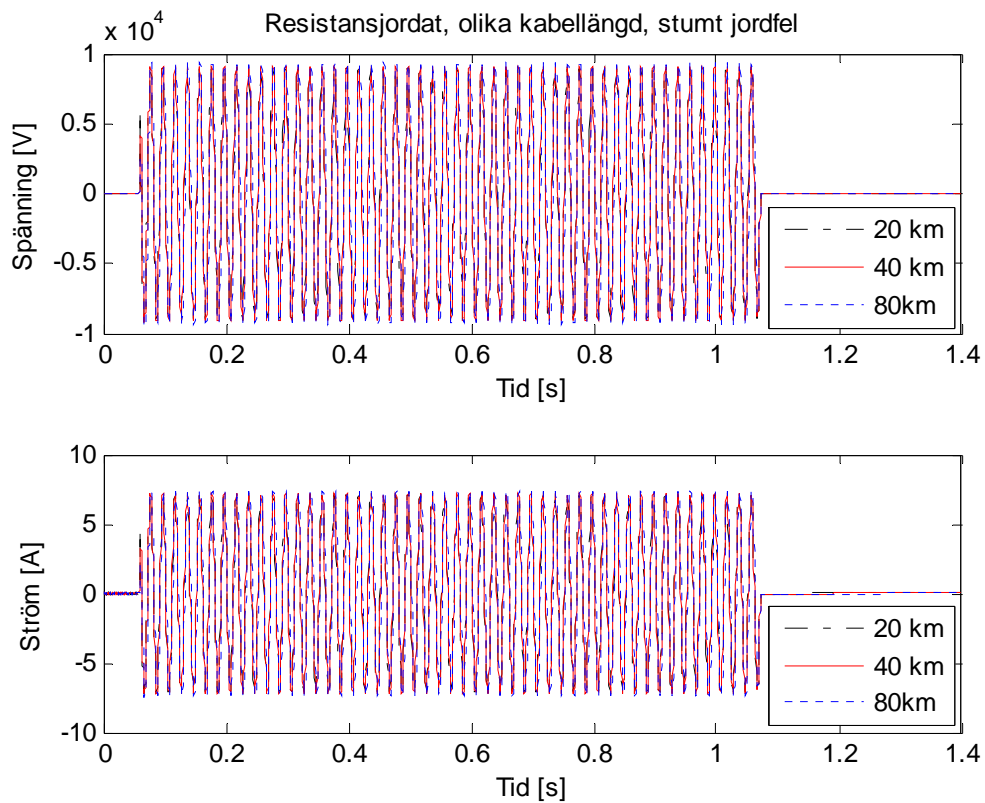


**Figur 11.3. Isolerat system vid kabellängderna 20, 40, 80 km vid 20kΩ jordfel. Övre: Spänningen över felet. Undre: Strömmen genom felet.**

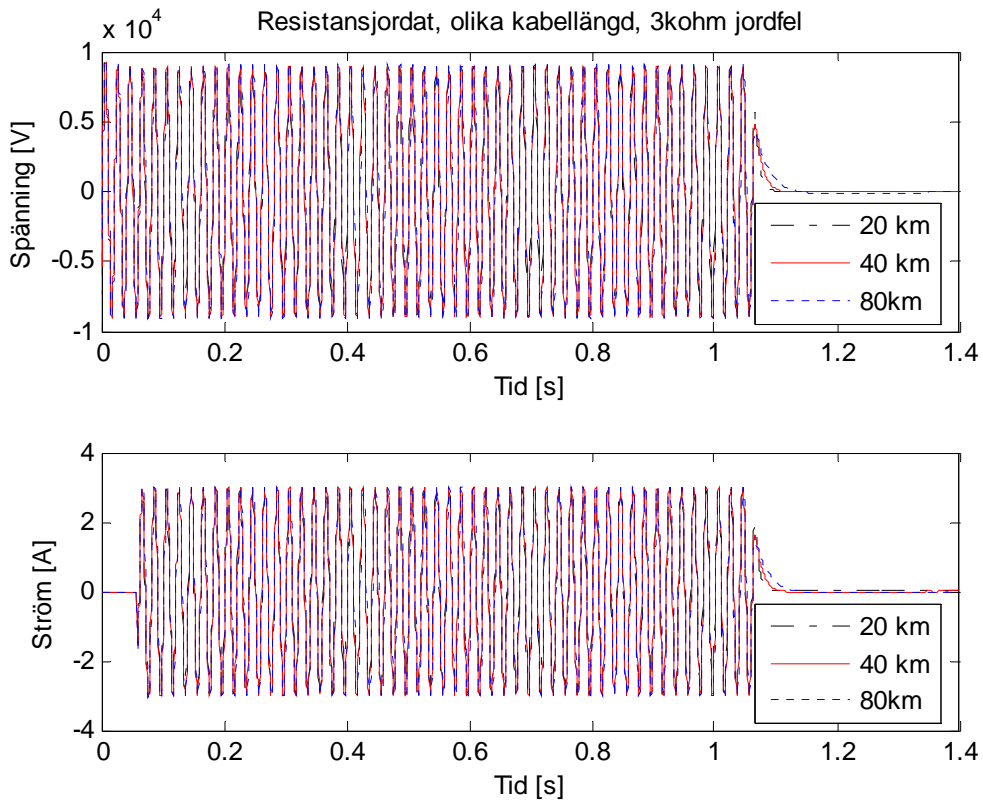
## 11.2.2 Resistansjordat system



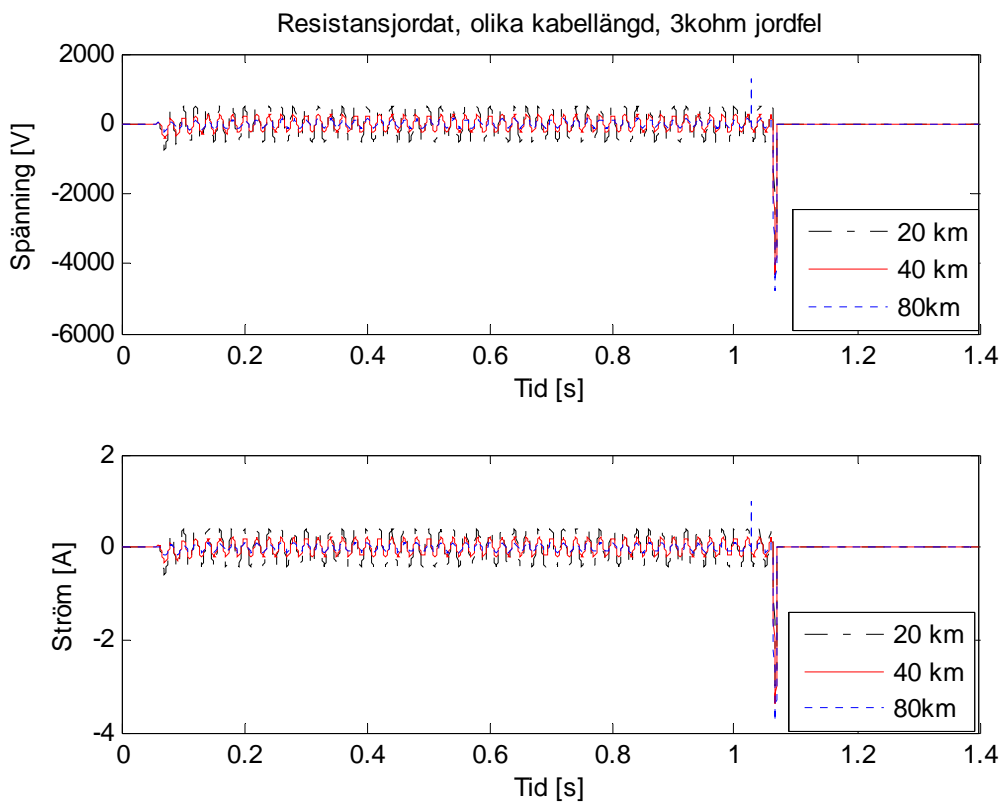
Figur 11.4. Felspänning och ström, resistansjordat system vid stumt jordfel.



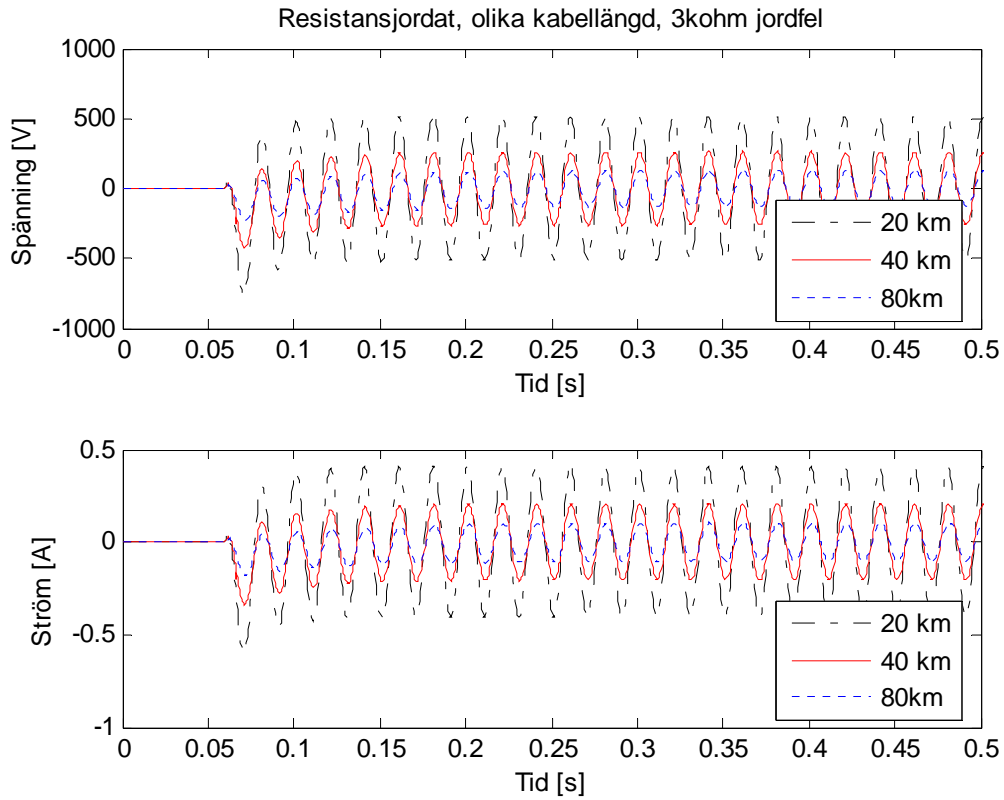
Figur 11.5. Nollpunktsspänning och ström, resistansjordat system vid stumt jordfel.



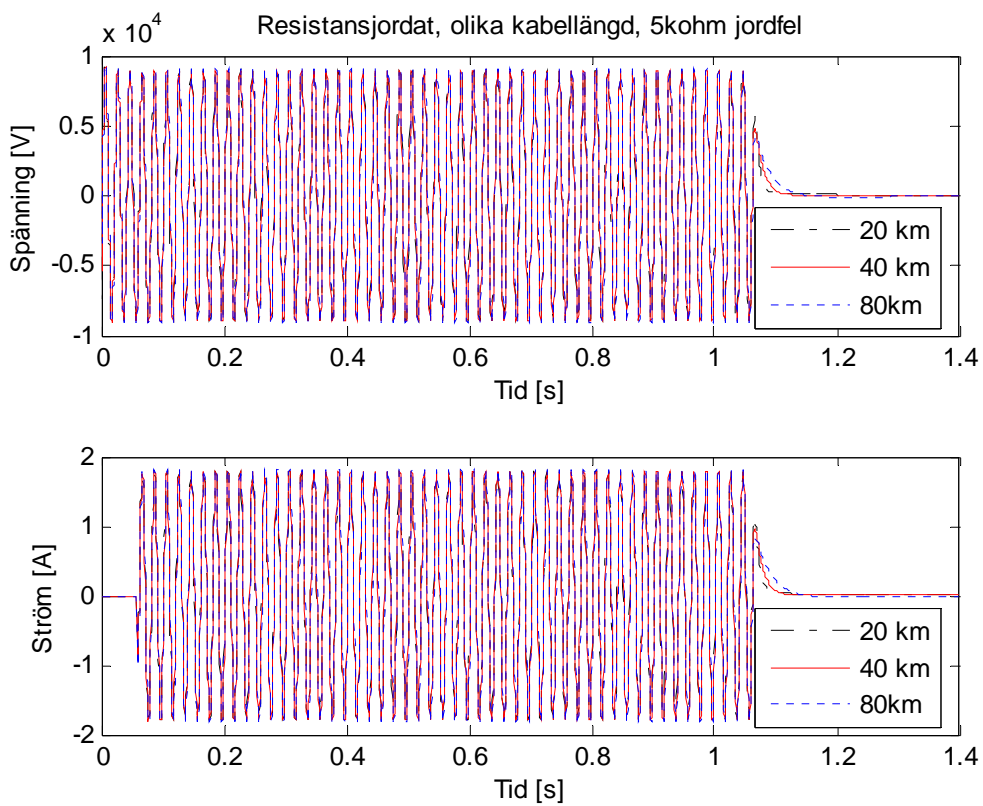
Figur 11.6. Felspänning och ström, resistansjordat system vid 3kΩ jordfel.



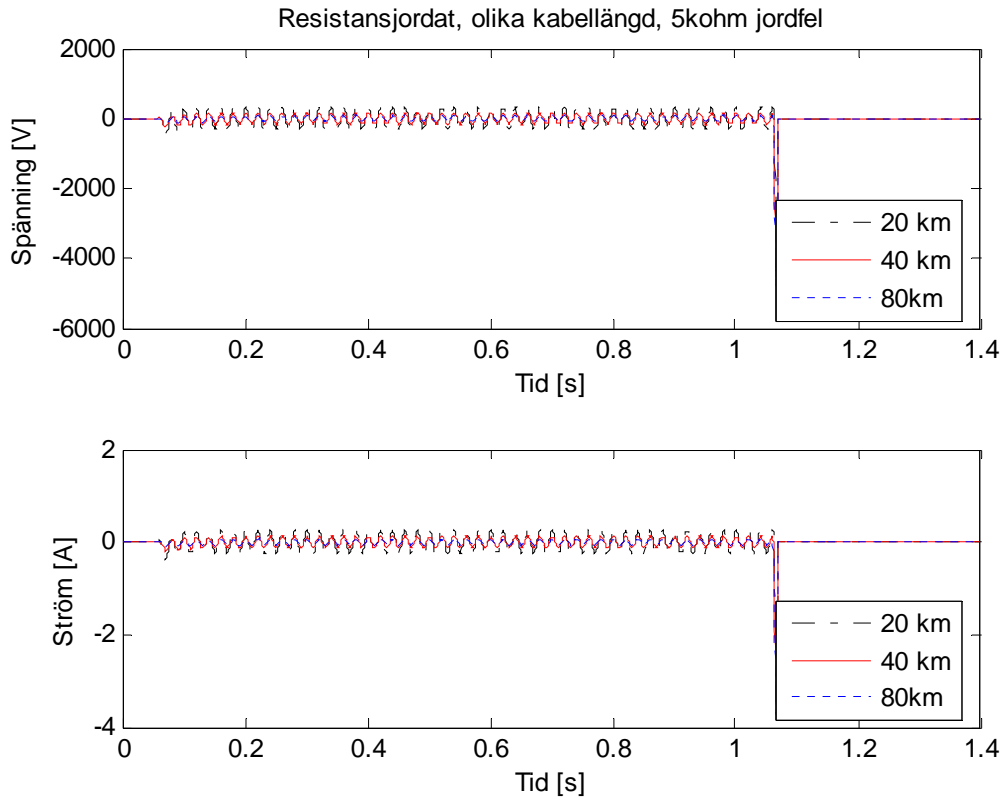
Figur 11.7. Nollpunktsspänning och ström, resistansjordat system vid 3kΩ jordfel.



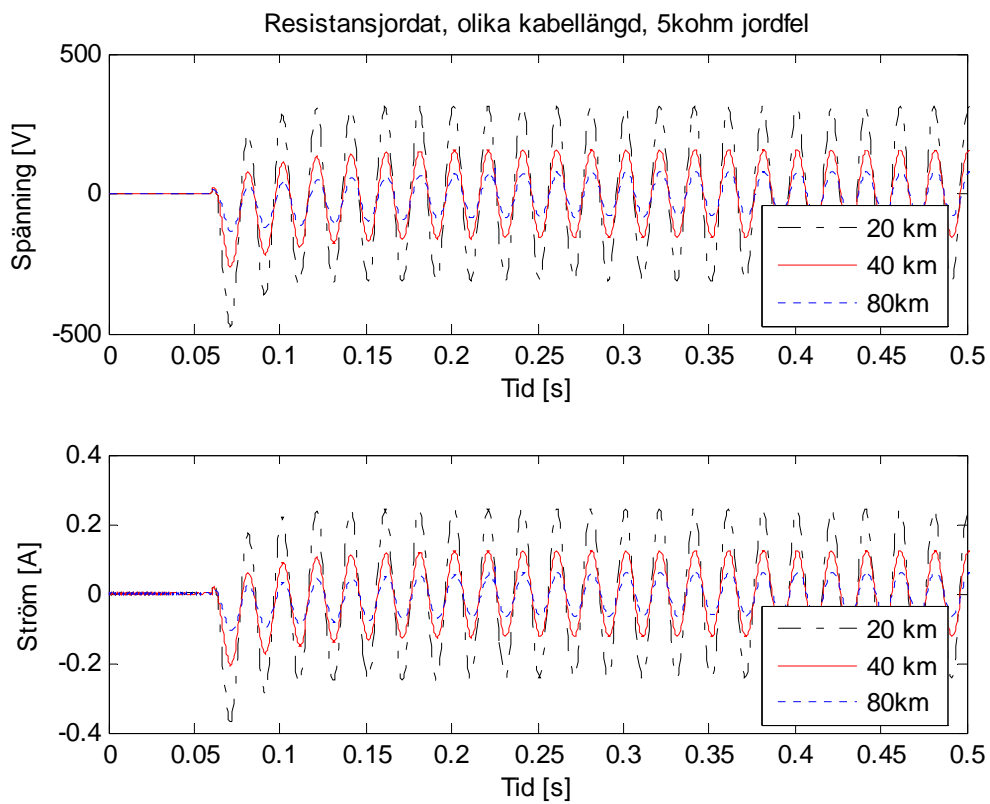
Figur 11.8. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0s och 0.5s.



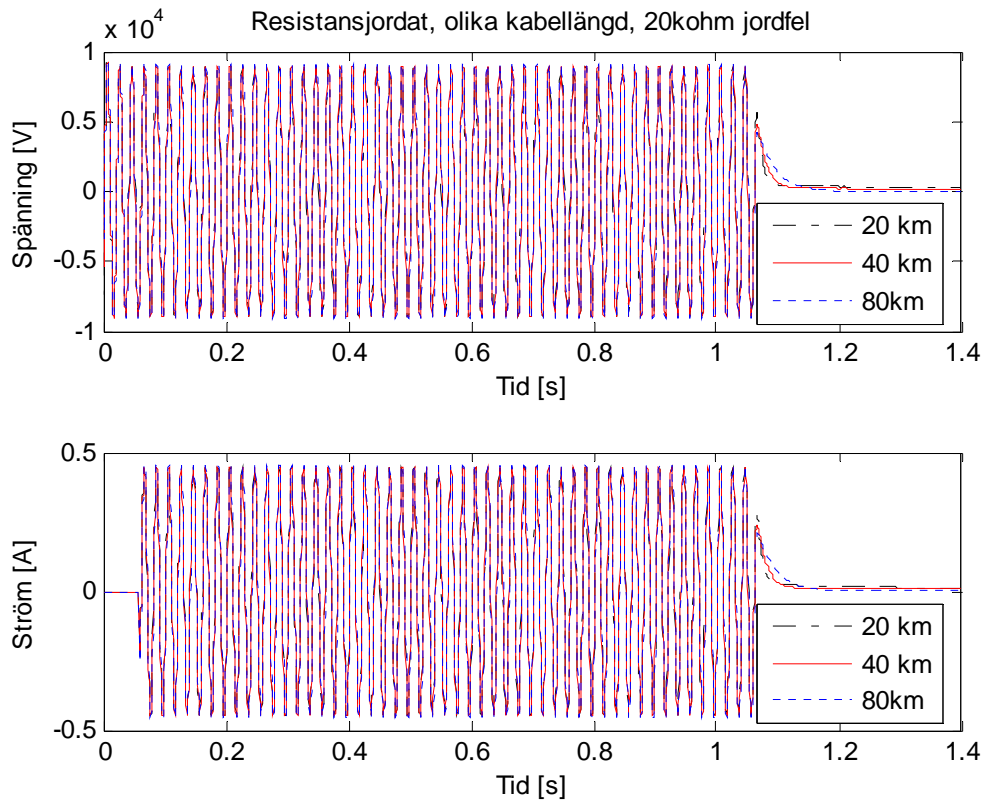
Figur 11.9. Felspänning och ström, resistansjordat system vid 5k $\Omega$  jordfel.



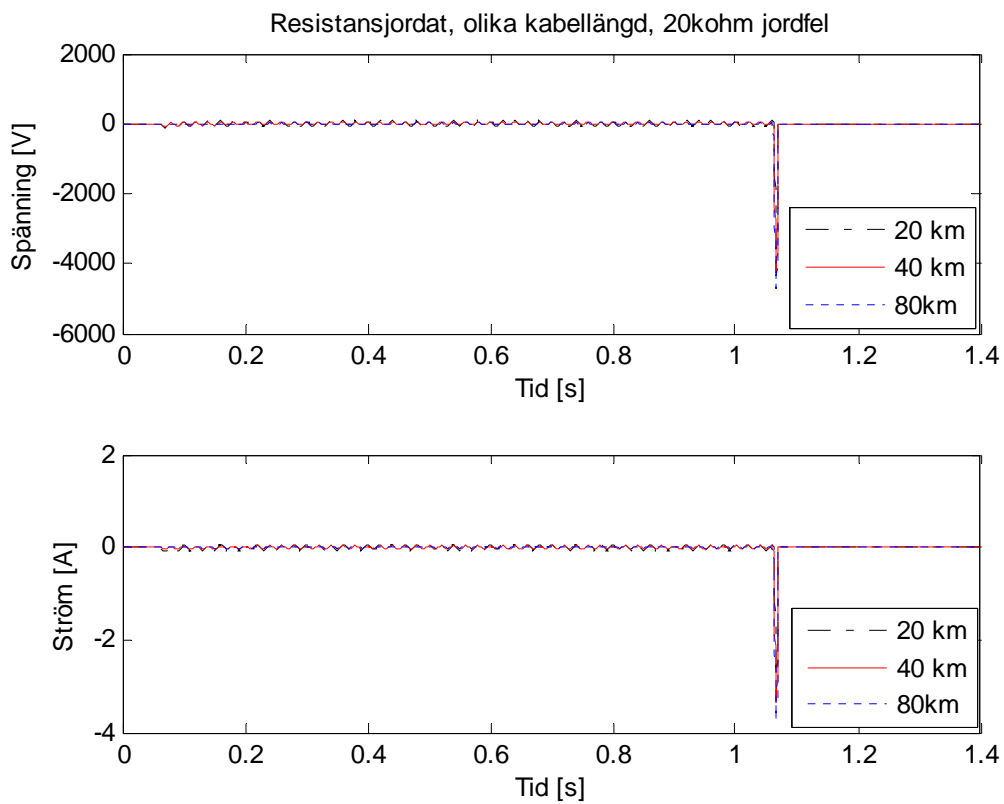
Figur 11.10. Nollpunktsspänning och ström, resistansjordat system vid 5k $\Omega$  jordfel.



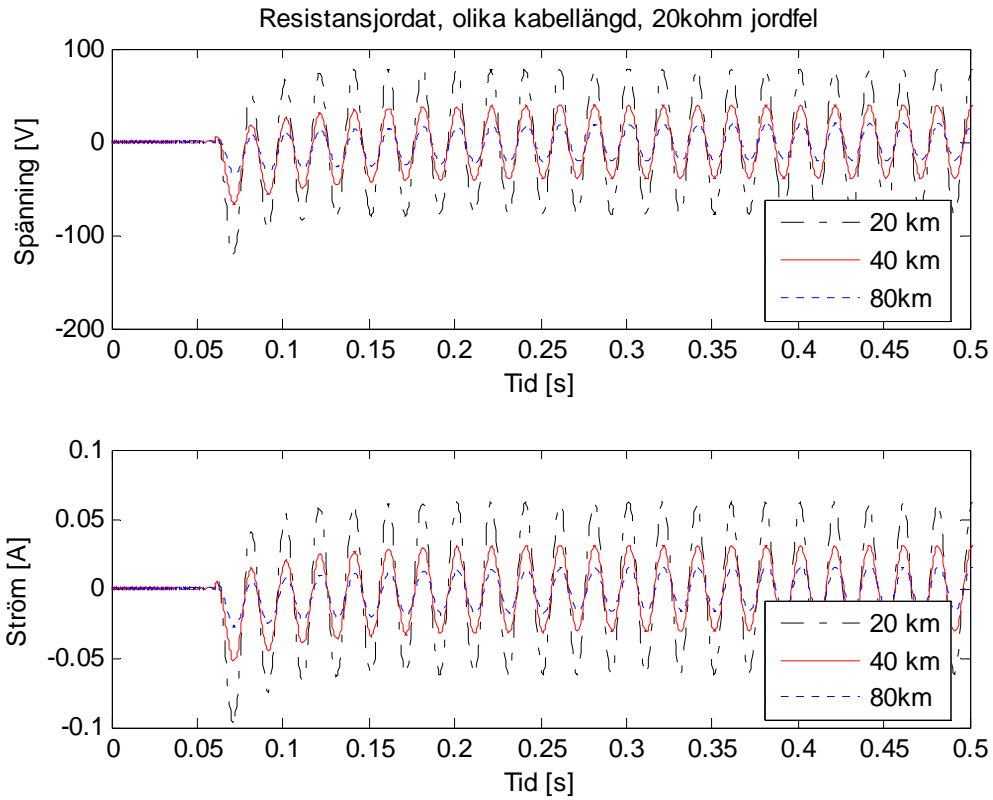
Figur 11.11. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0s och 0.5s.



Figur 11.12. Felspänning och ström, resistansjordat system vid 20kΩ jordfel.

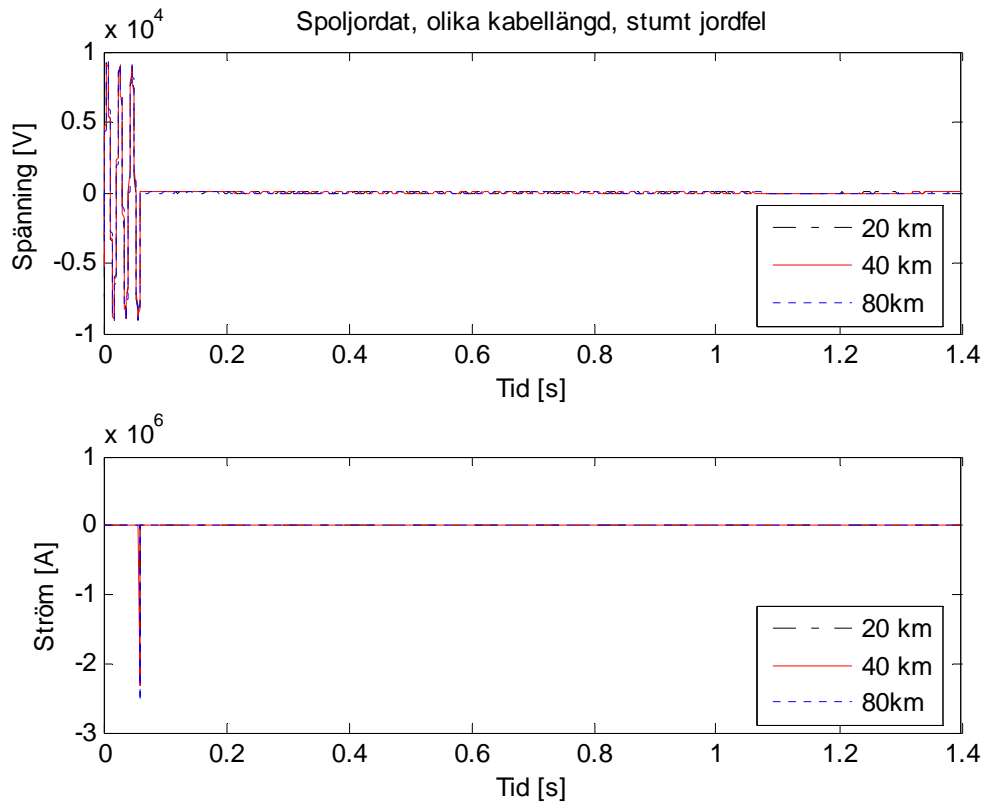


Figur 11.13. Nollpunktsspänning och ström, resistansjordat system vid 20kΩ jordfel.



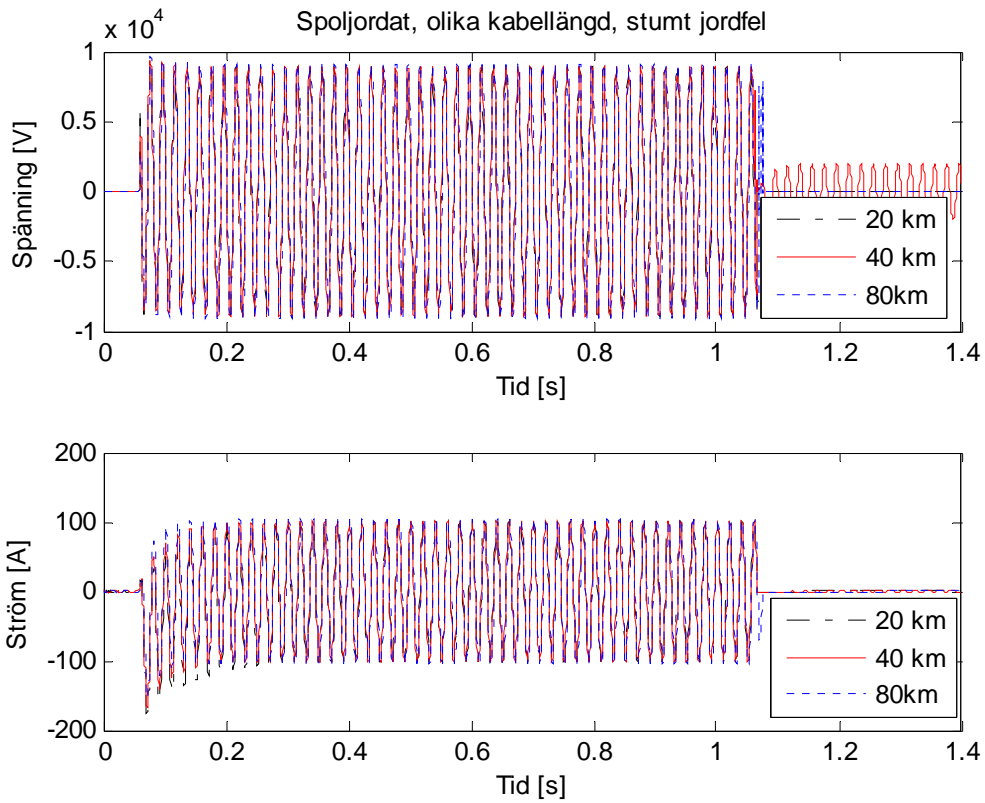
Figur 11.14. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0s och 0.5s.

### 11.2.3 Spoljordat

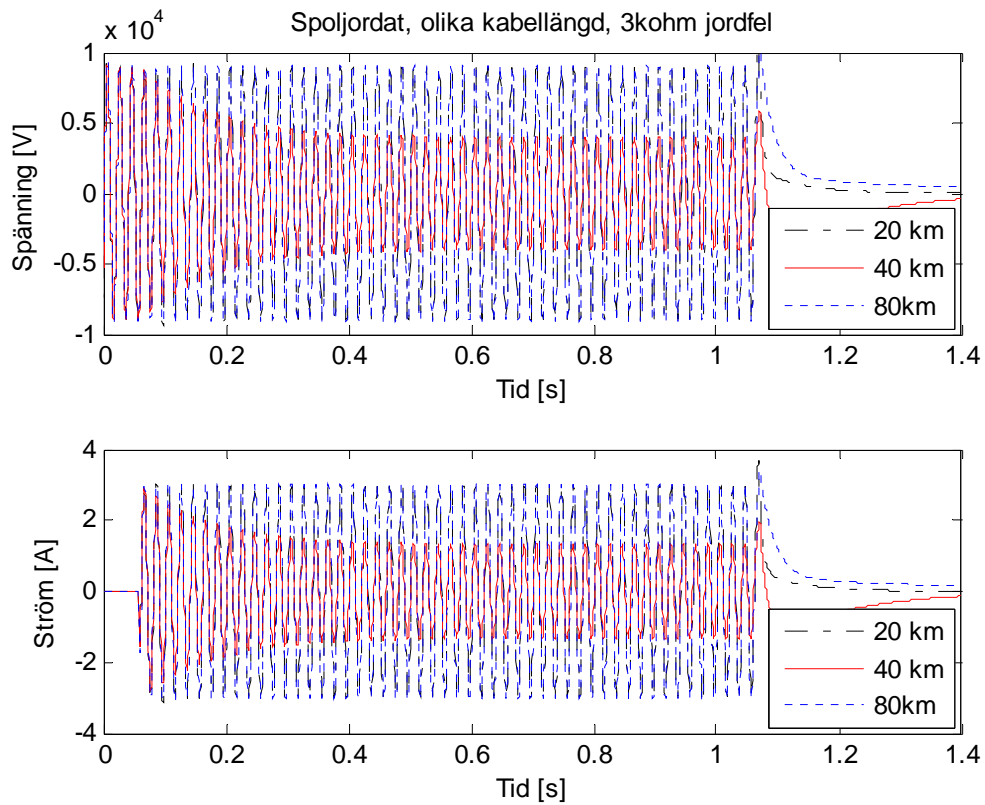


Figur 11.15. Felspänning och ström, spoljordat system vid stumt jordfel.

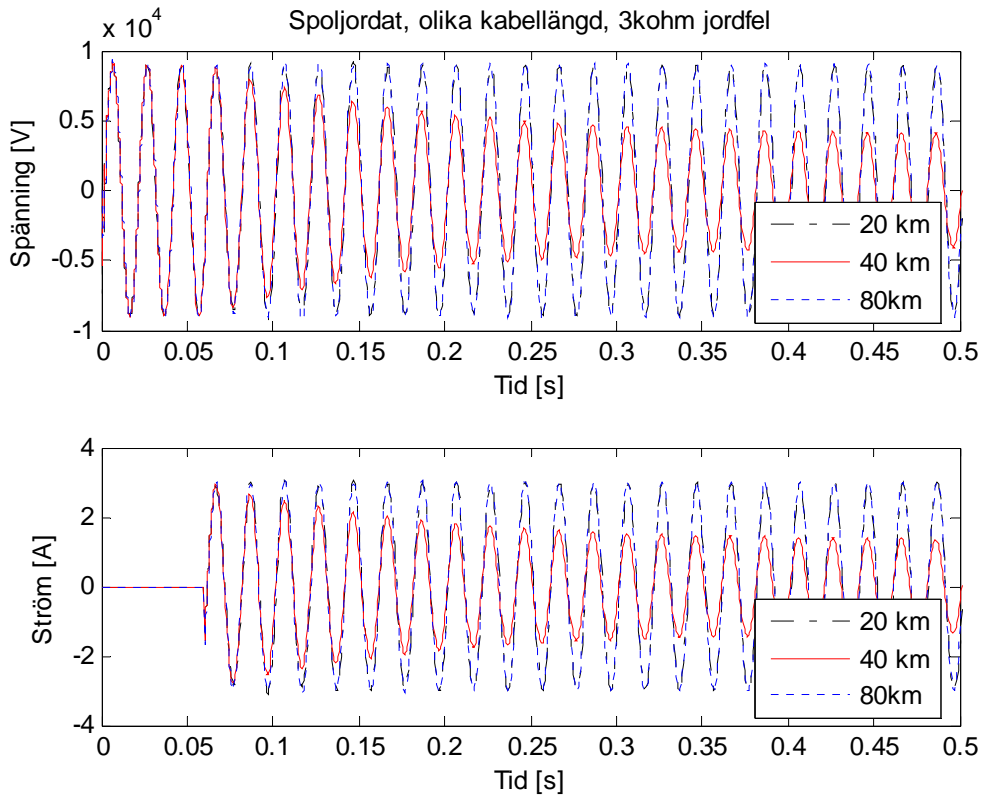




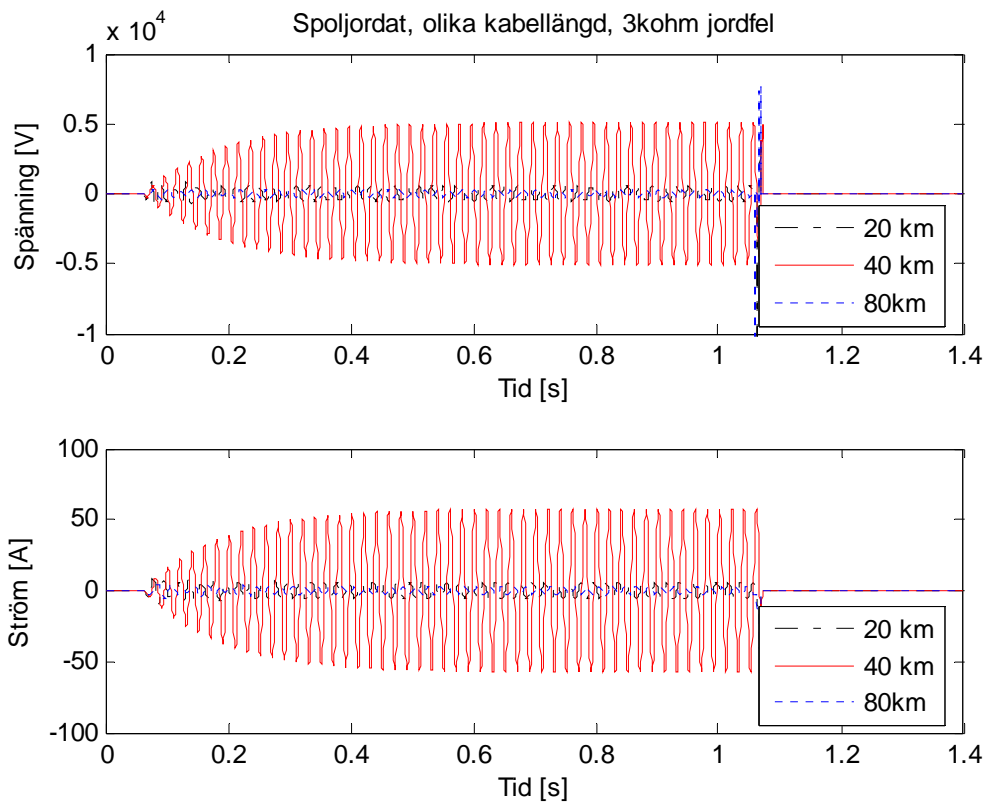
Figur 11.16. Nollpunktsspänning och ström, spoljordat system, stumt jordfel.



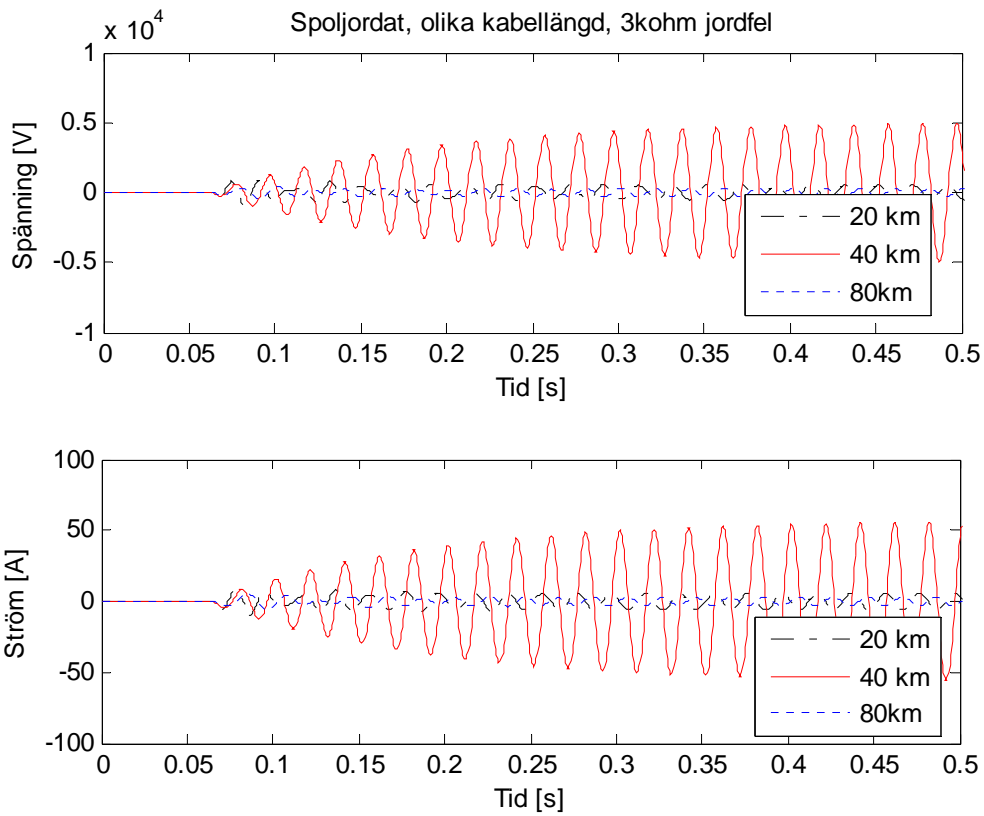
Figur 11.17. Felspänning och ström, spoljordat system vid 3k $\Omega$  jordfel.



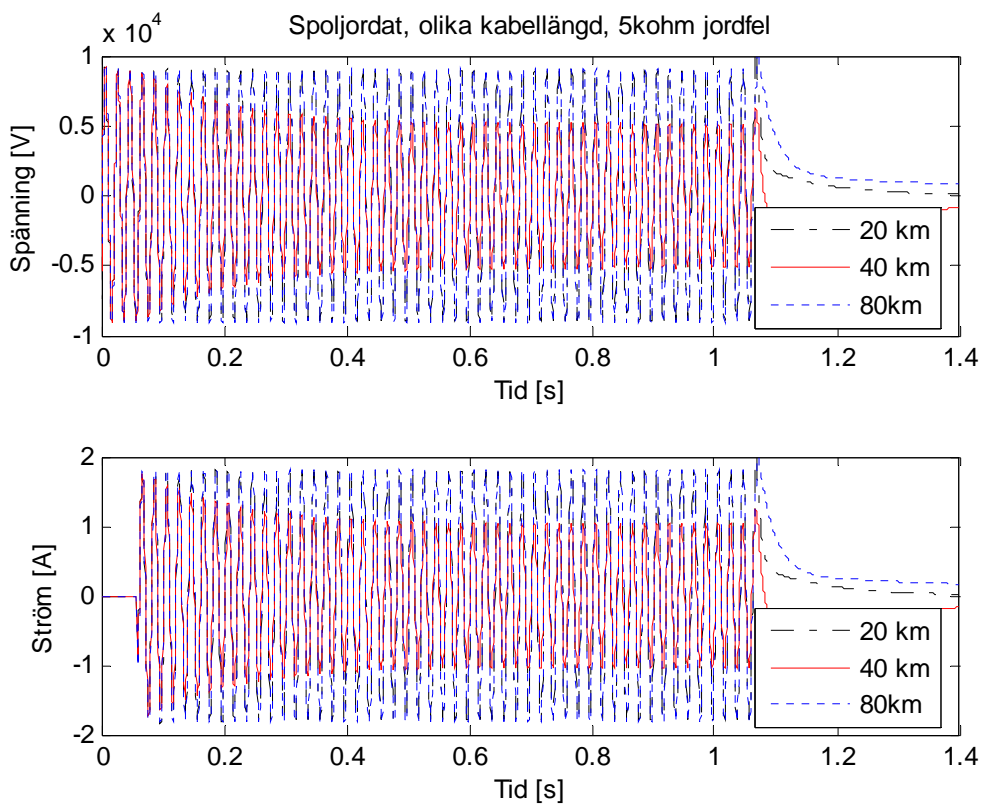
Figur 11.18. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0s och 0.5s.



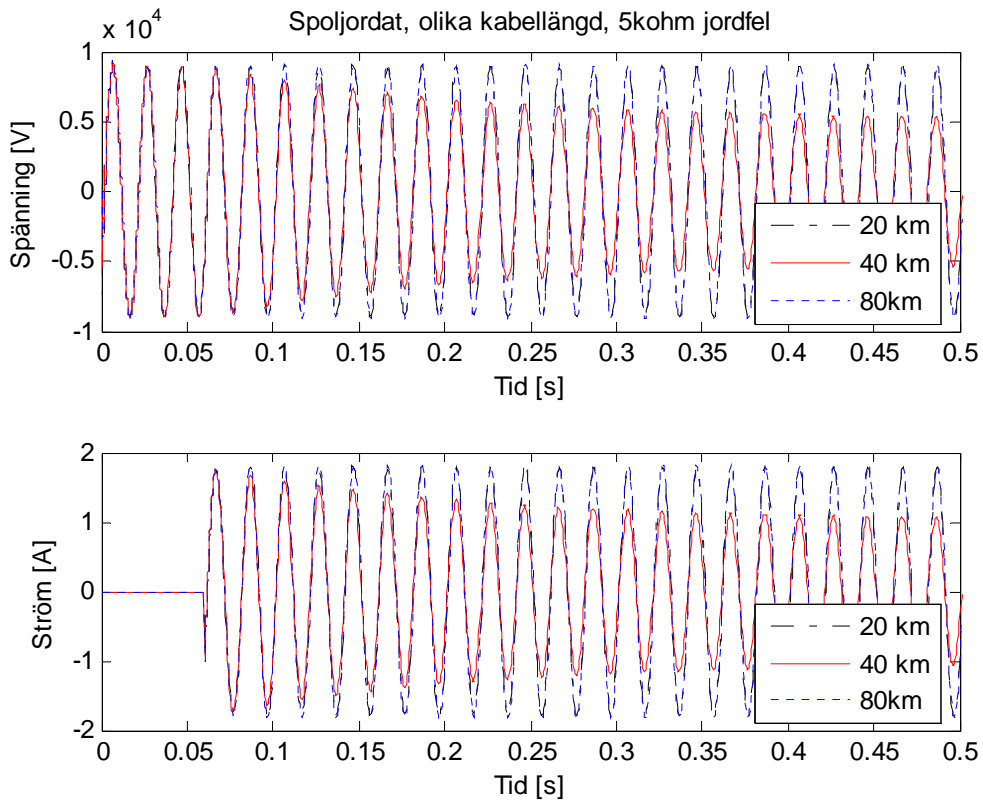
Figur 11.19. Nollpunktsspänning och ström, spoljordat system, 3k $\Omega$  jordfel.



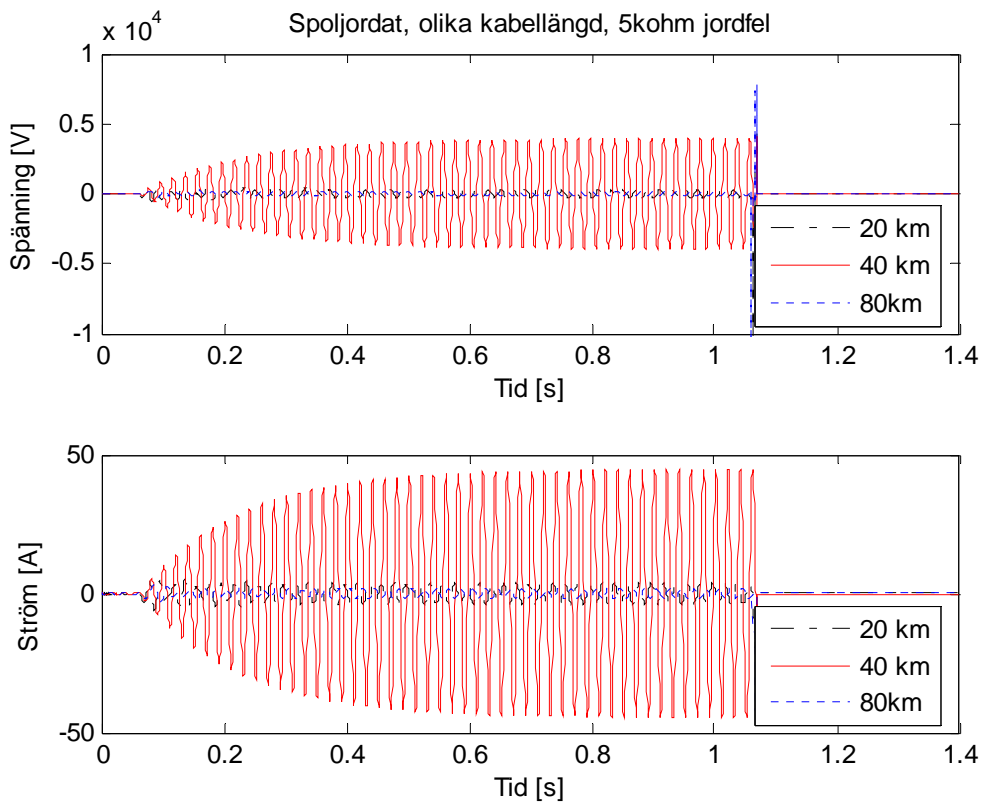
Figur 11.20. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0s och 0.5s.



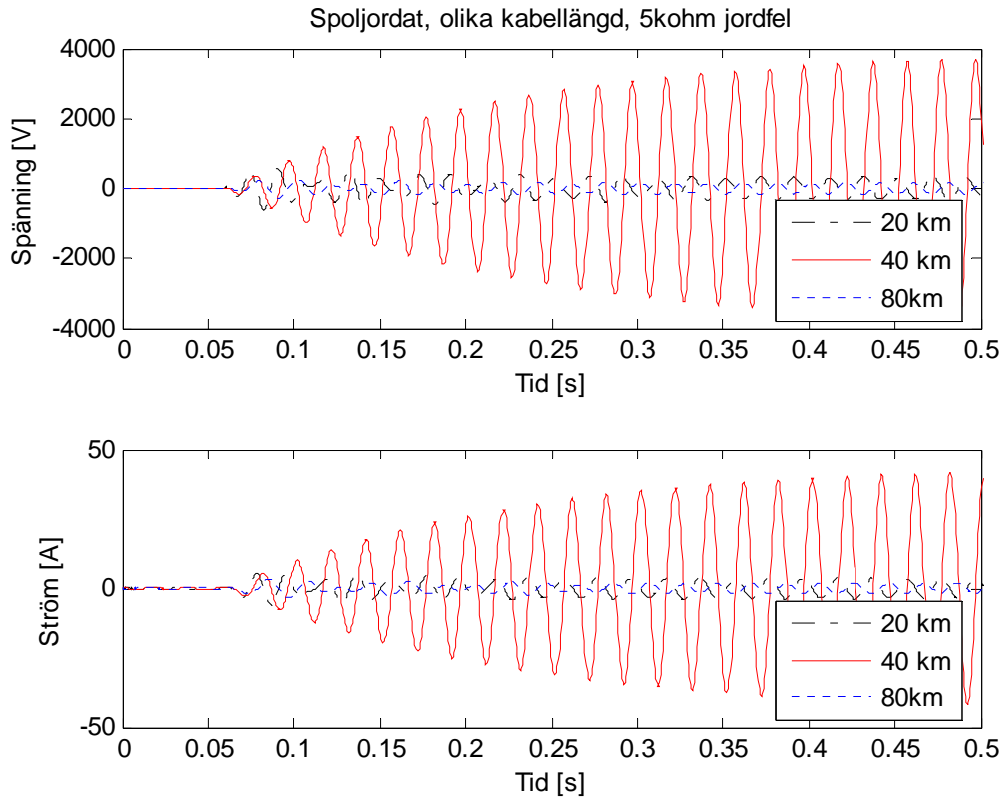
Figur 11.21. Felspänning och ström, spoljordat system vid 5k $\Omega$  jordfel.



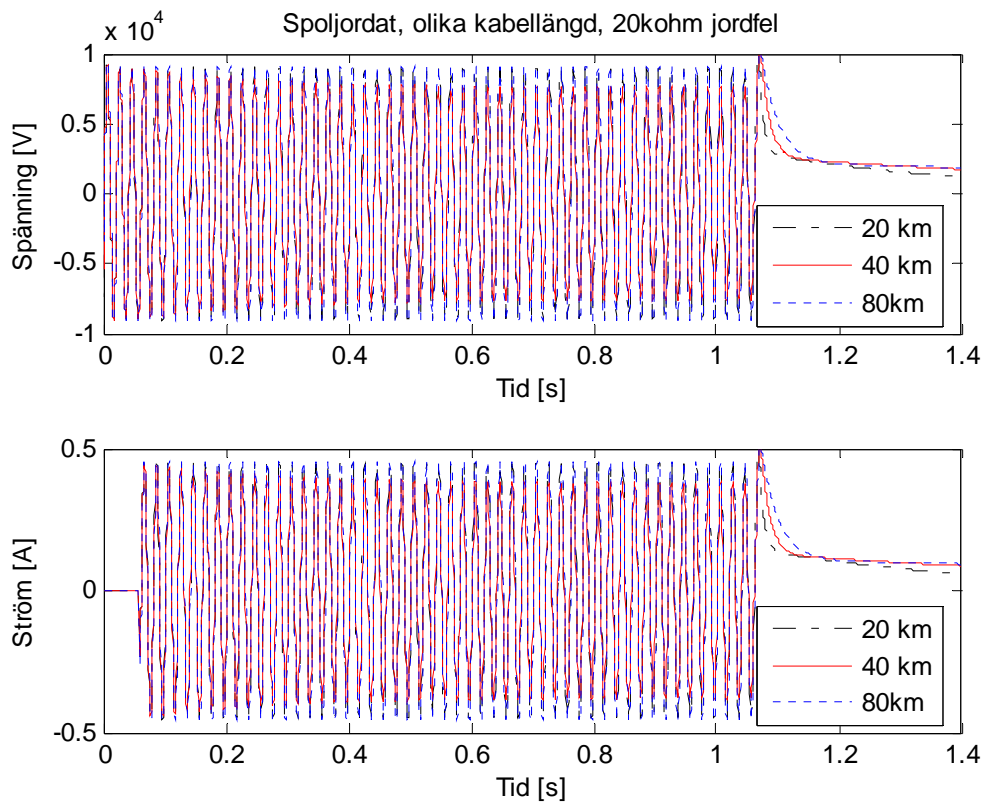
Figur 11.22. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0s och 0.5s.



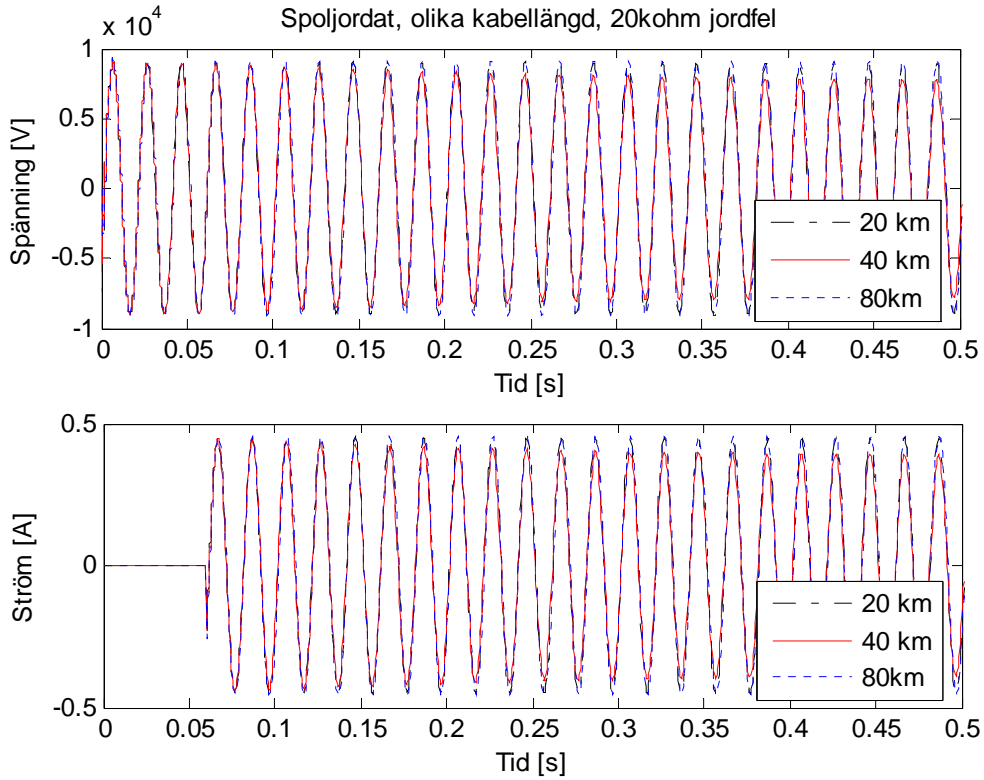
Figur 11.23. Nollpunktsspänning och ström, spoljordat system, 5k $\Omega$  jordfel.



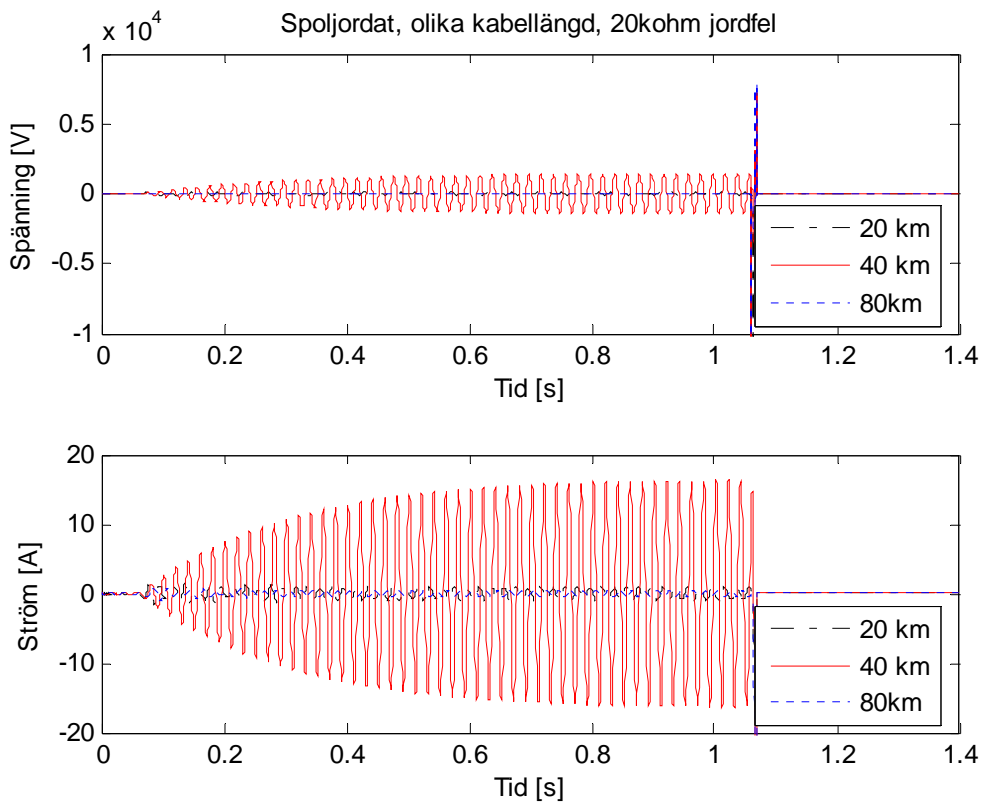
Figur 11.24. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0s och 0.5s.



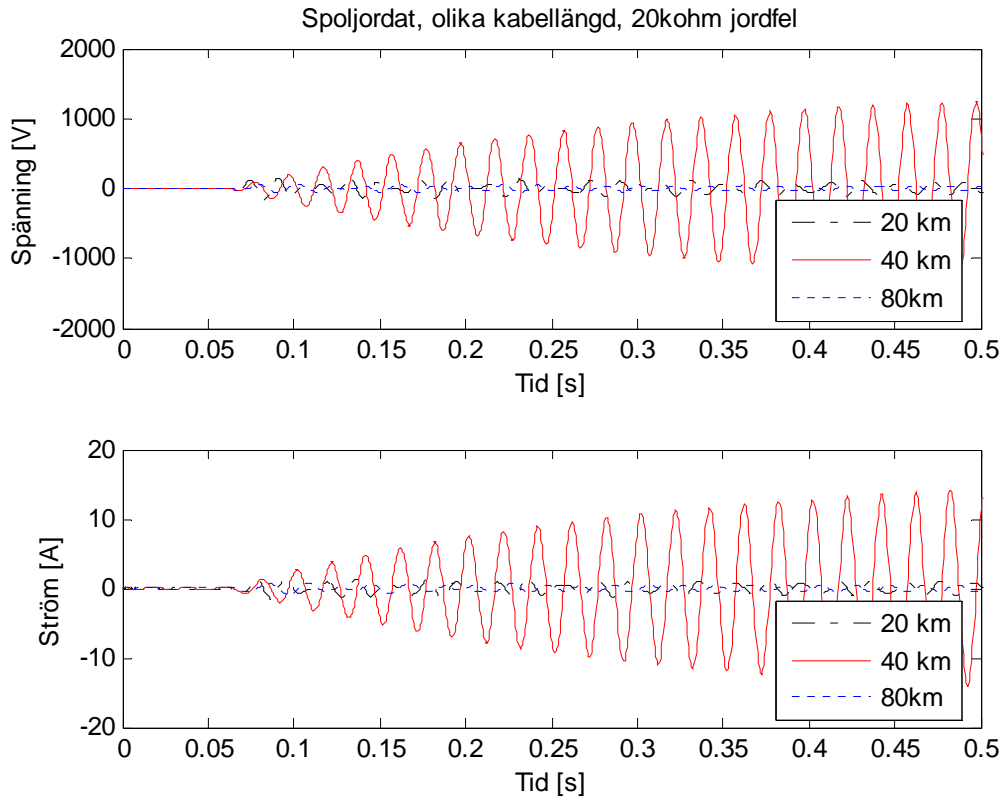
Figur 11.25. Felspänning och ström, spoljordat system vid 20k $\Omega$  jordfel.



Figur 11.26. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0s och 0.5s.

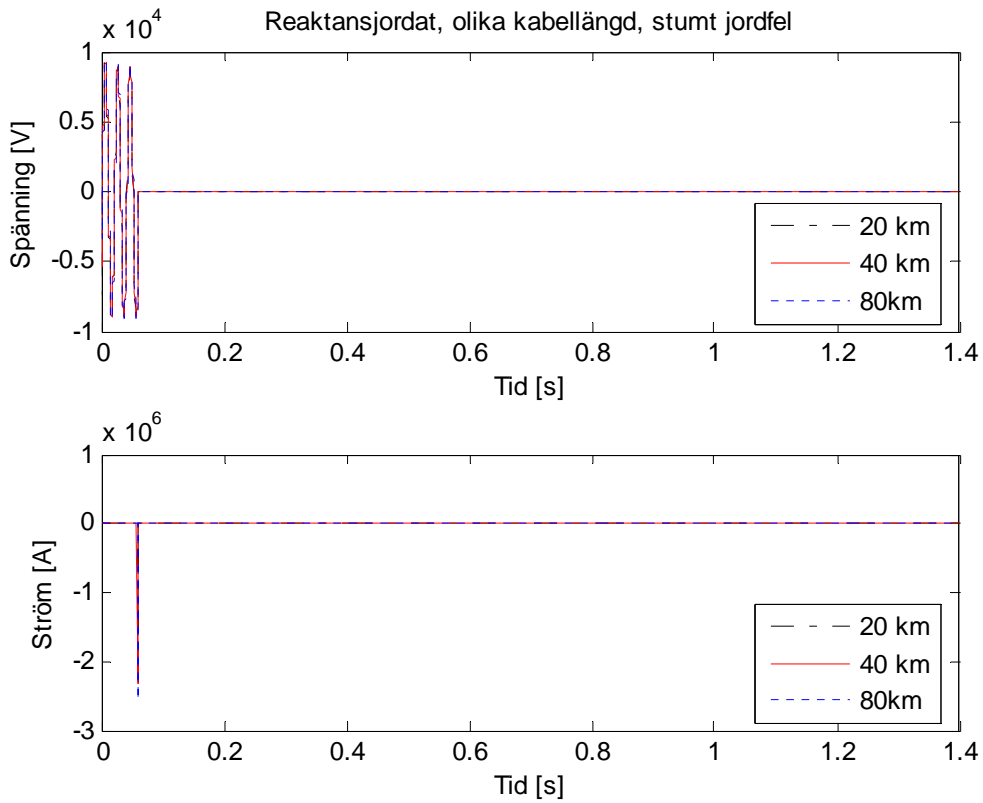


Figur 11.27. Nollpunktsspänning och ström, spoljordat system, 20kΩ jordfel.

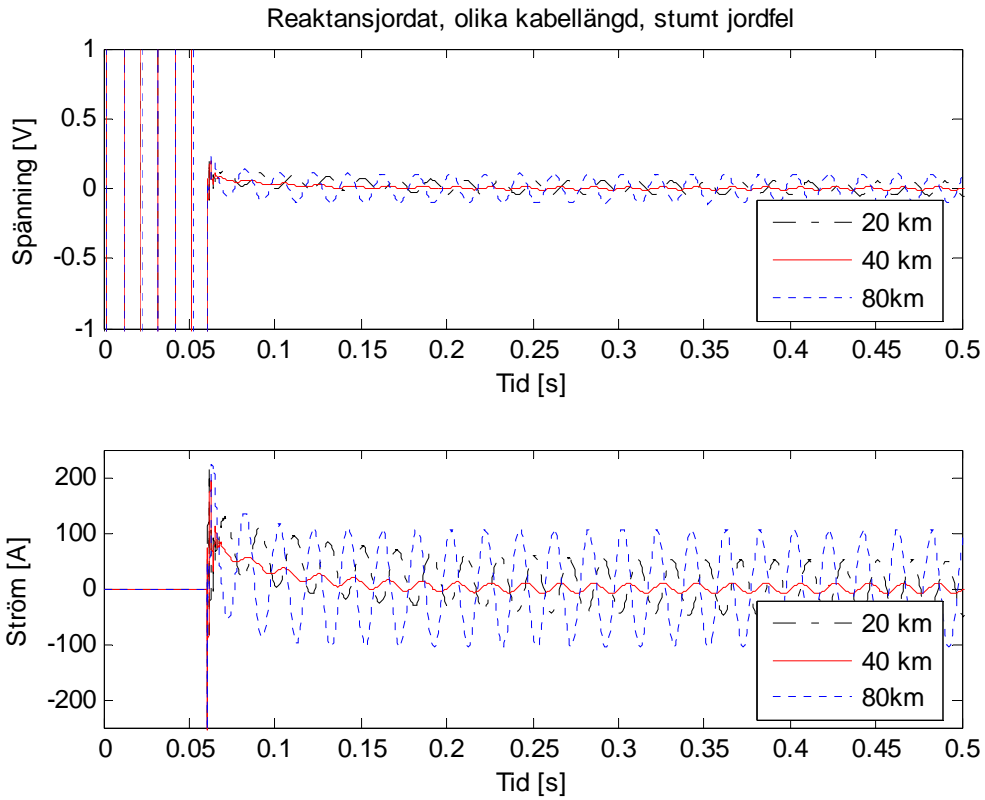


Figur 11.28. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0s och 0.5s.

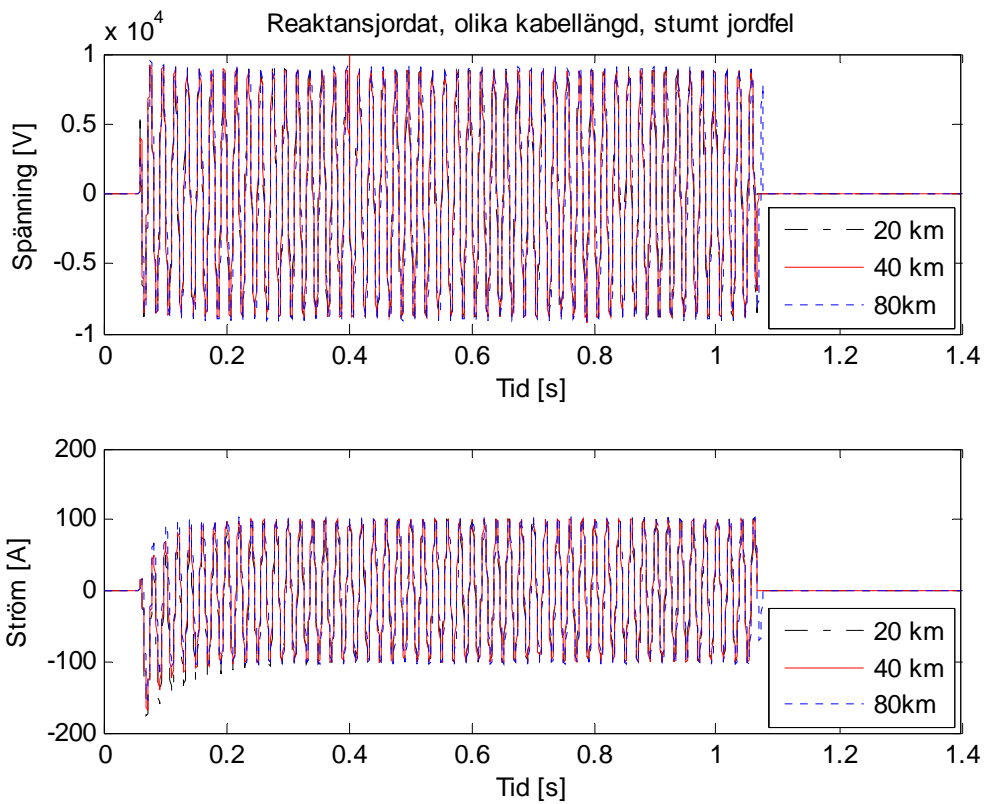
### 11.2.4 Reaktansjordat



Figur 11.29. Felspänning och ström, reaktansjordat system vid stumt jordfel.

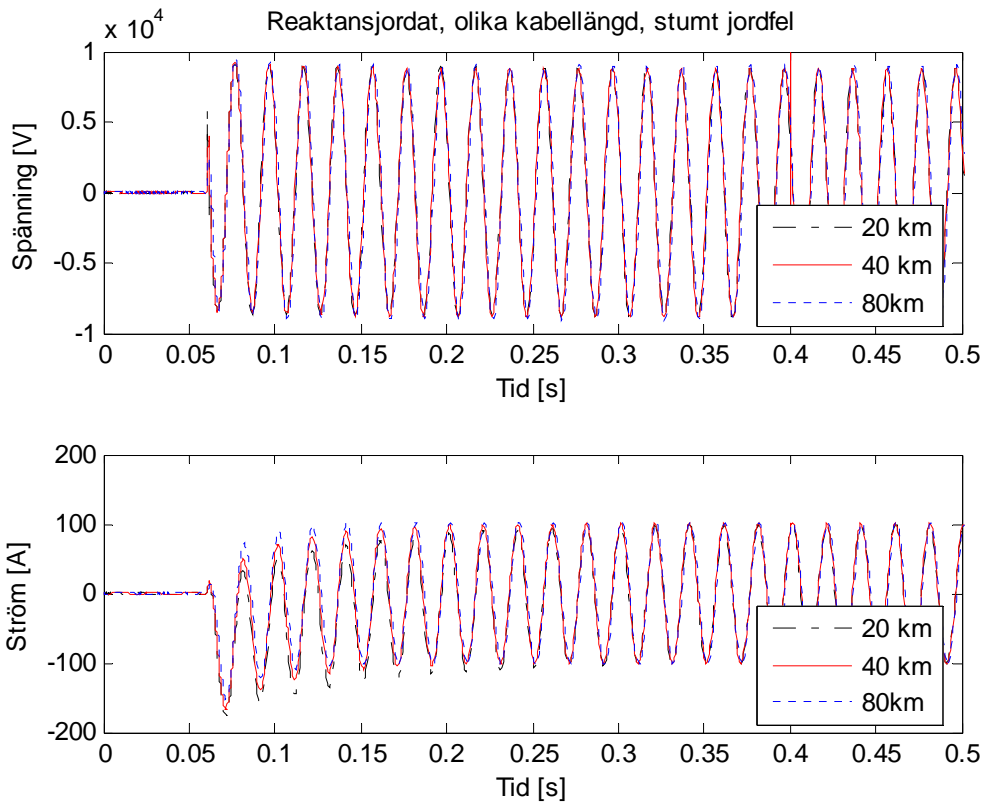


Figur 11.30. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0s och 0.5s.

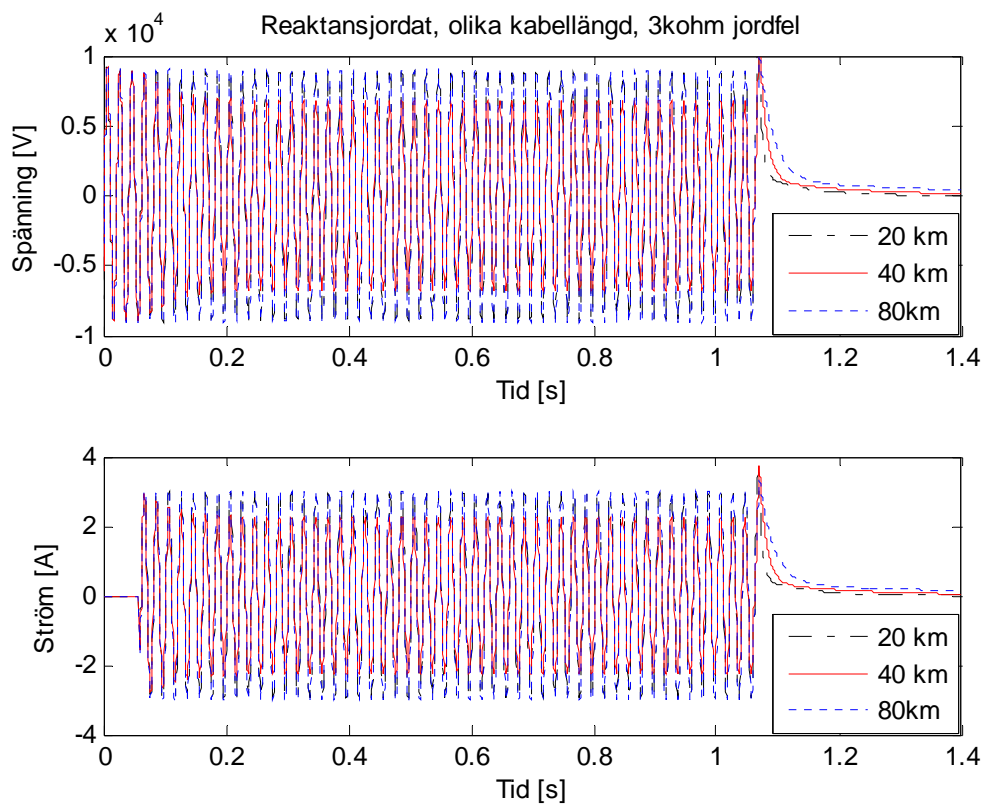


Figur 11.31. Nollpunktsspänning och ström, reaktansjordat system vid stumt jordfel.

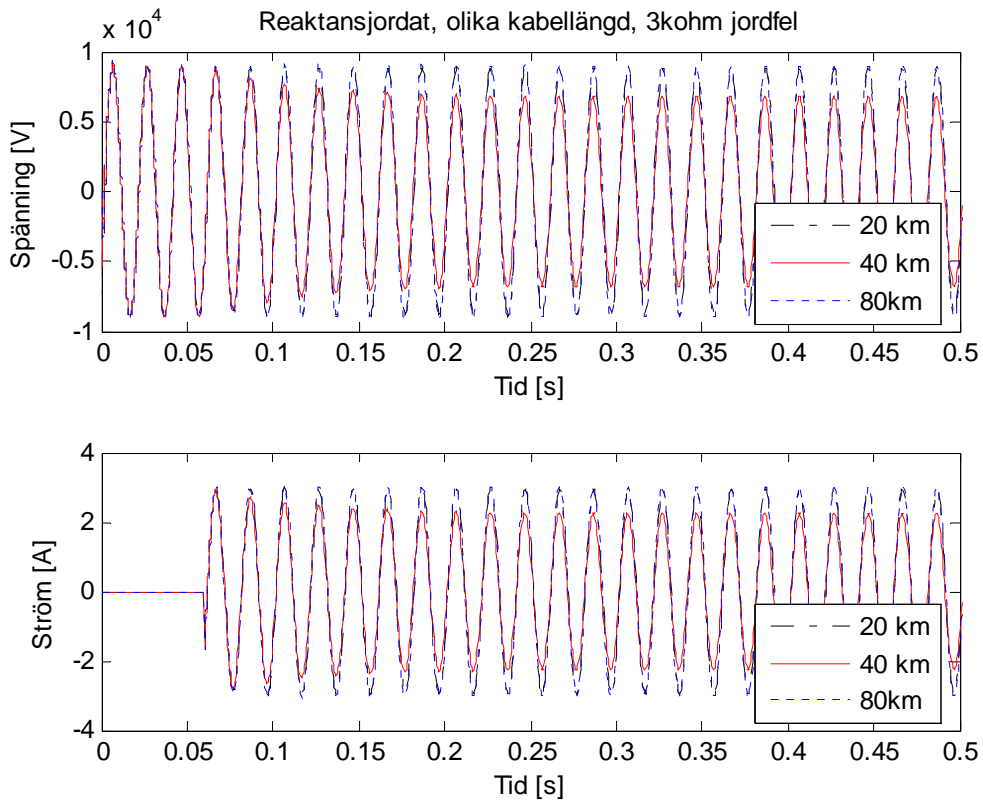




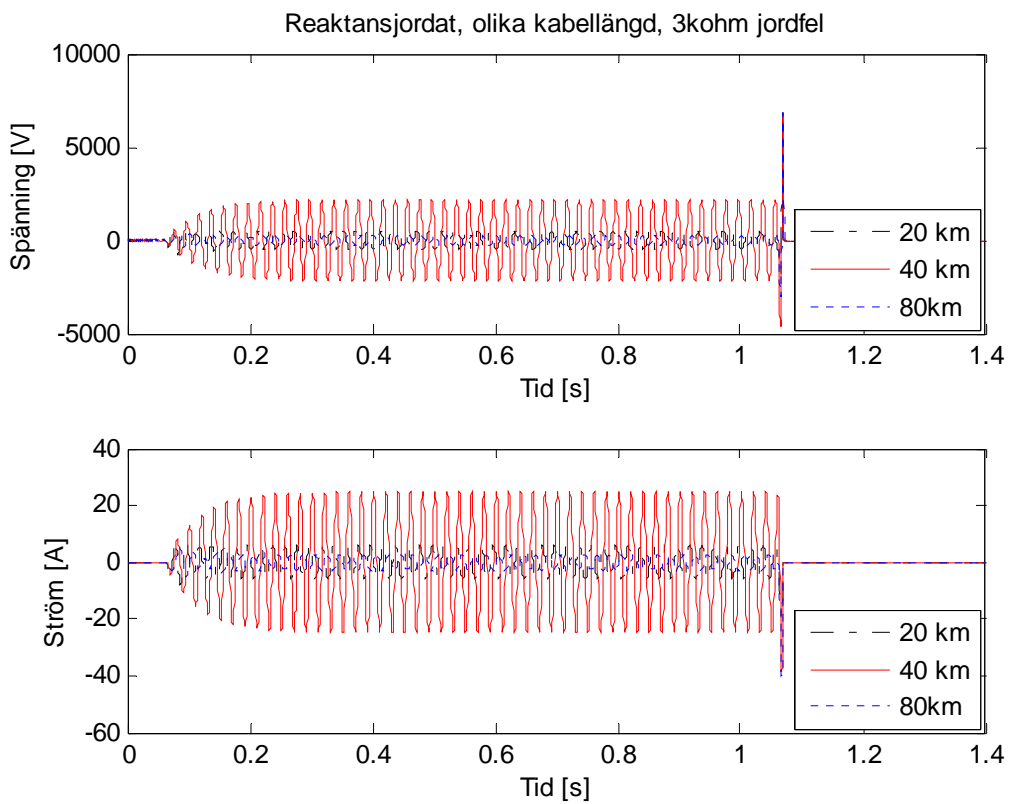
Figur 11.32. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0s och 0.5s.



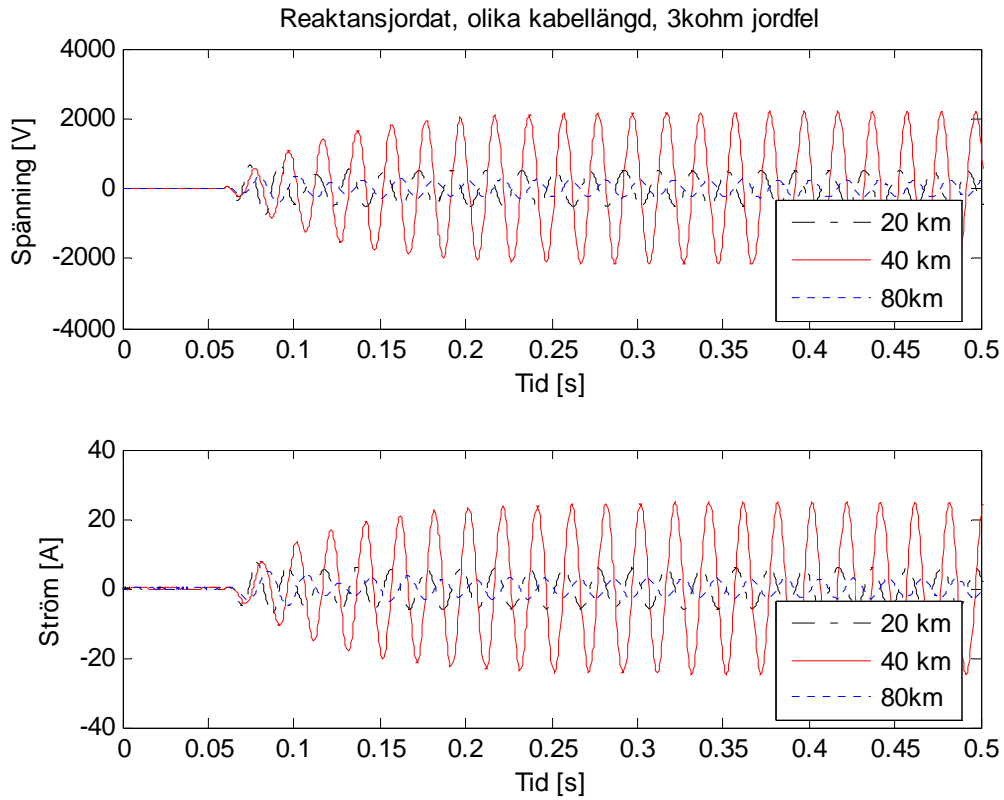
Figur 11.33. Felspänning och ström, reaktansjordat system vid 3k $\Omega$  jordfel.



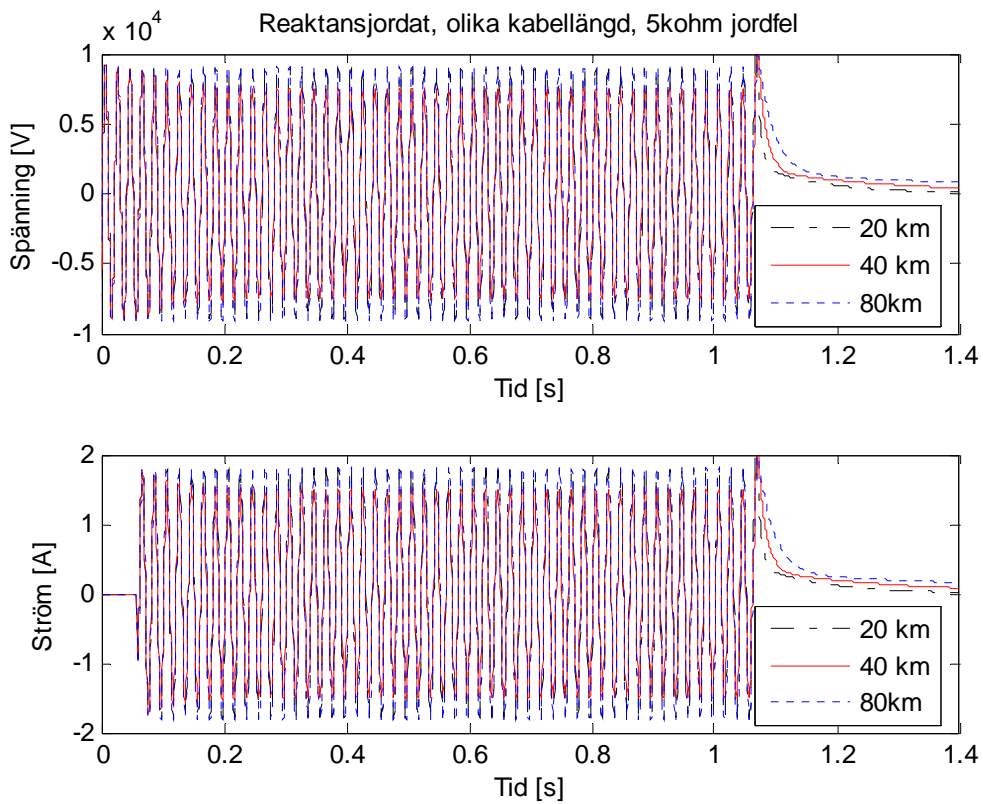
Figur 11.34. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0s och 0.5s.



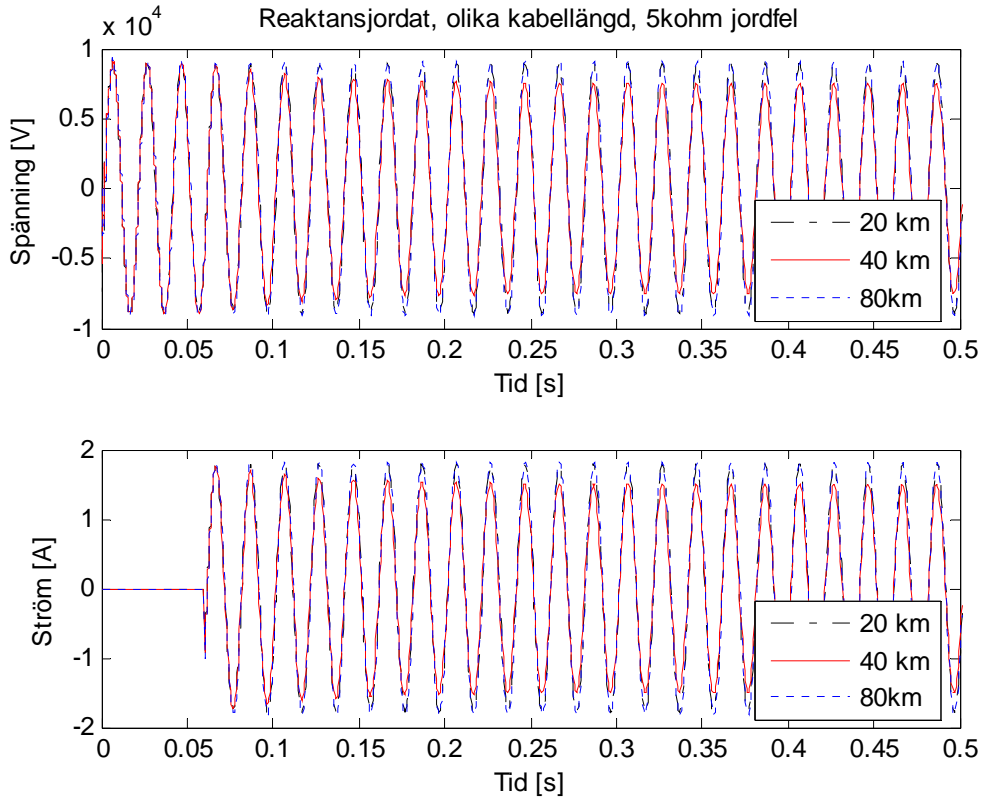
Figur 11.35. Nollpunktsspänning och ström, reaktansjordat system vid 3k $\Omega$  jordfel.



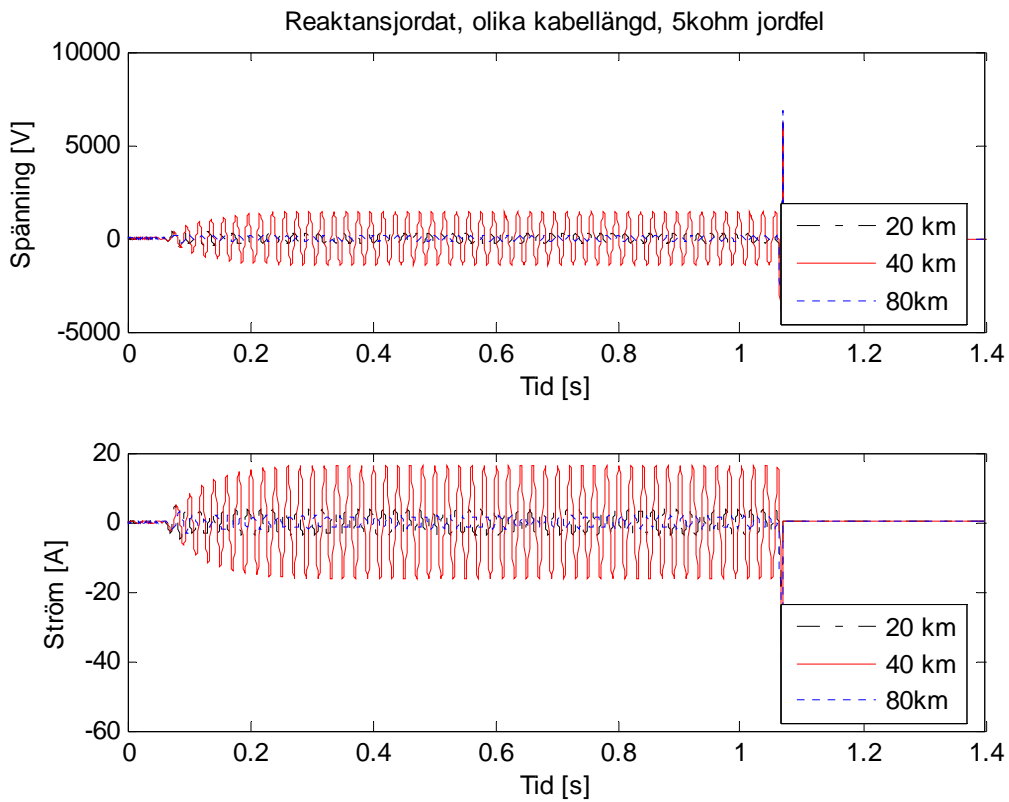
Figur 11.36. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0s och 0.5s.



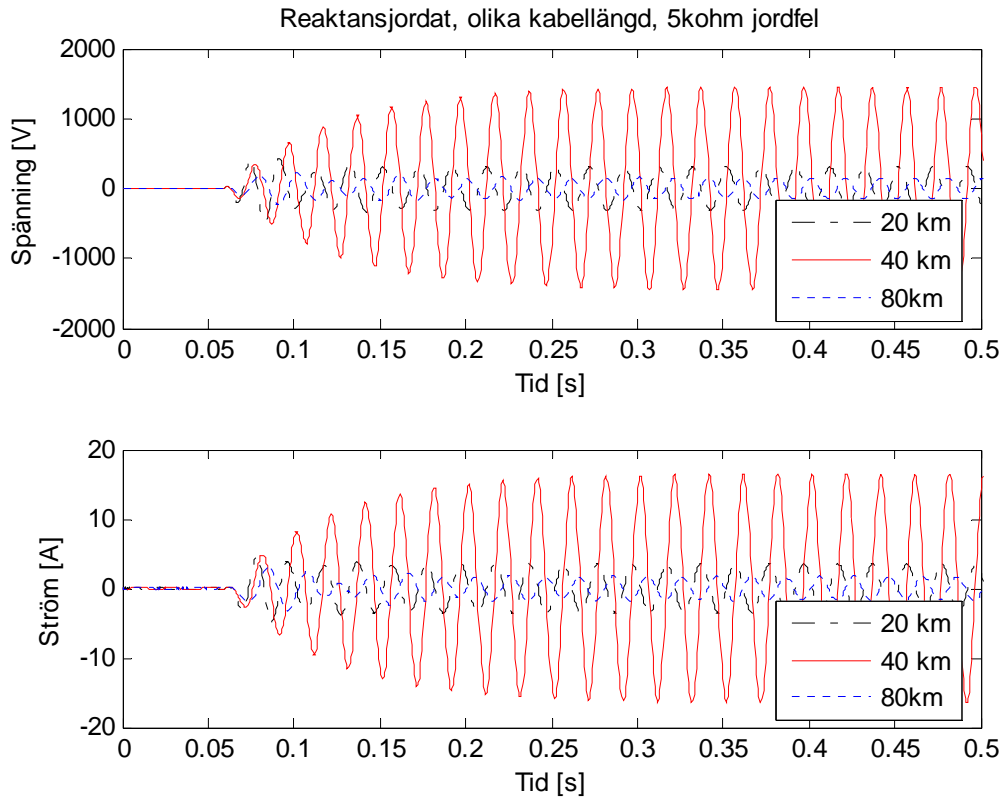
Figur 11.37. Felspänning och ström, reaktansjordat system vid 5k $\Omega$  jordfel.



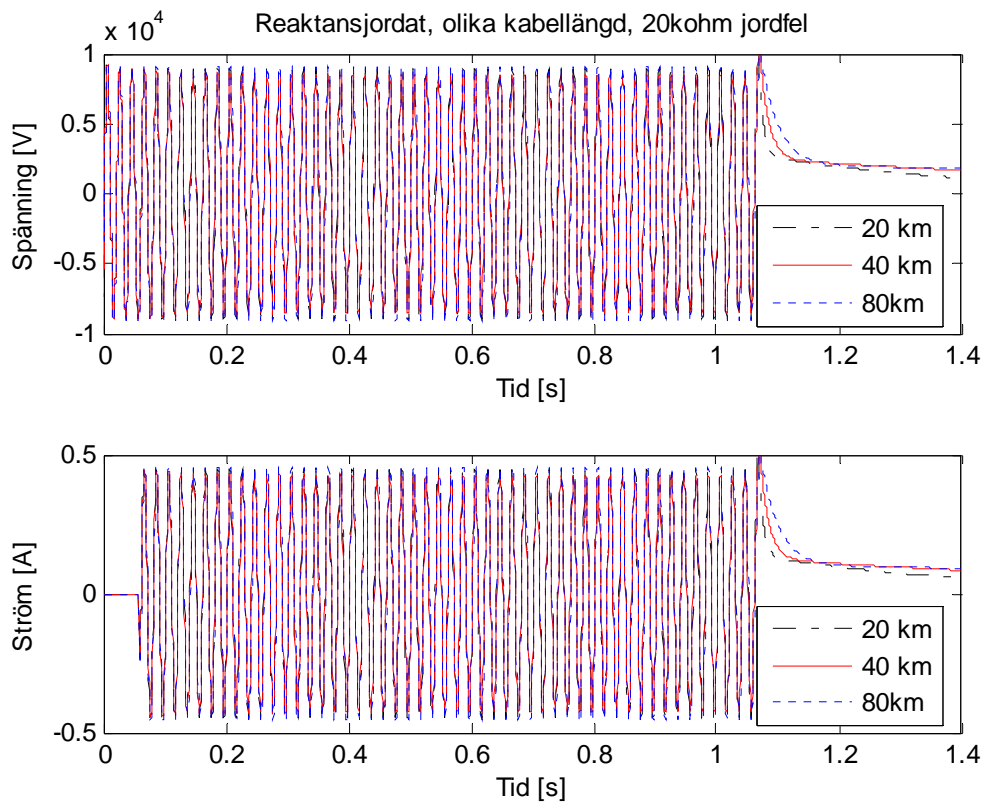
Figur 11.38. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0s och 0.5s.



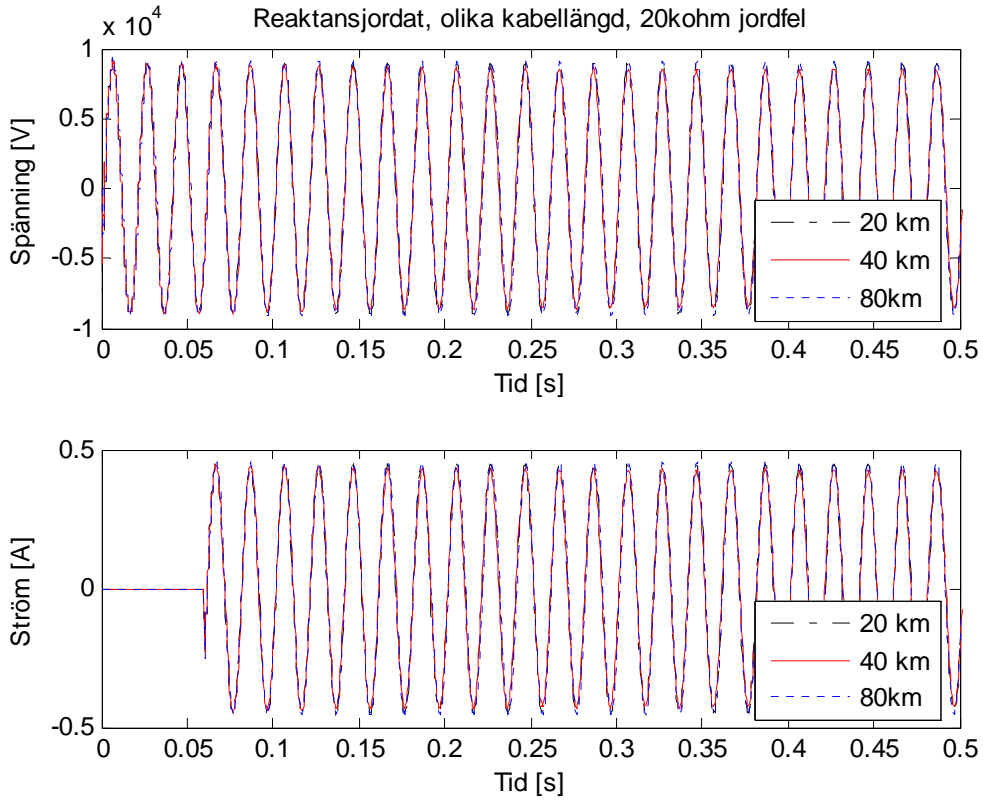
Figur 11.39. Nollpunktsspänning och ström, reaktansjordat system vid 5k $\Omega$  jordfel.



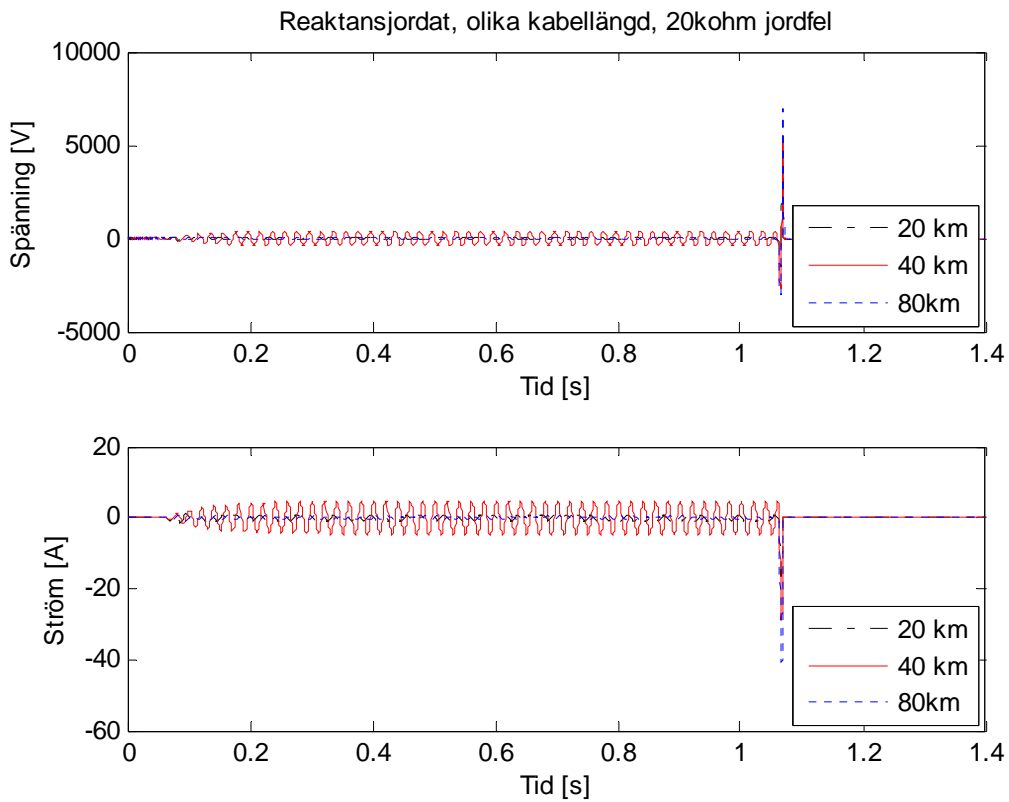
Figur 11.40. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0s och 0.5s.



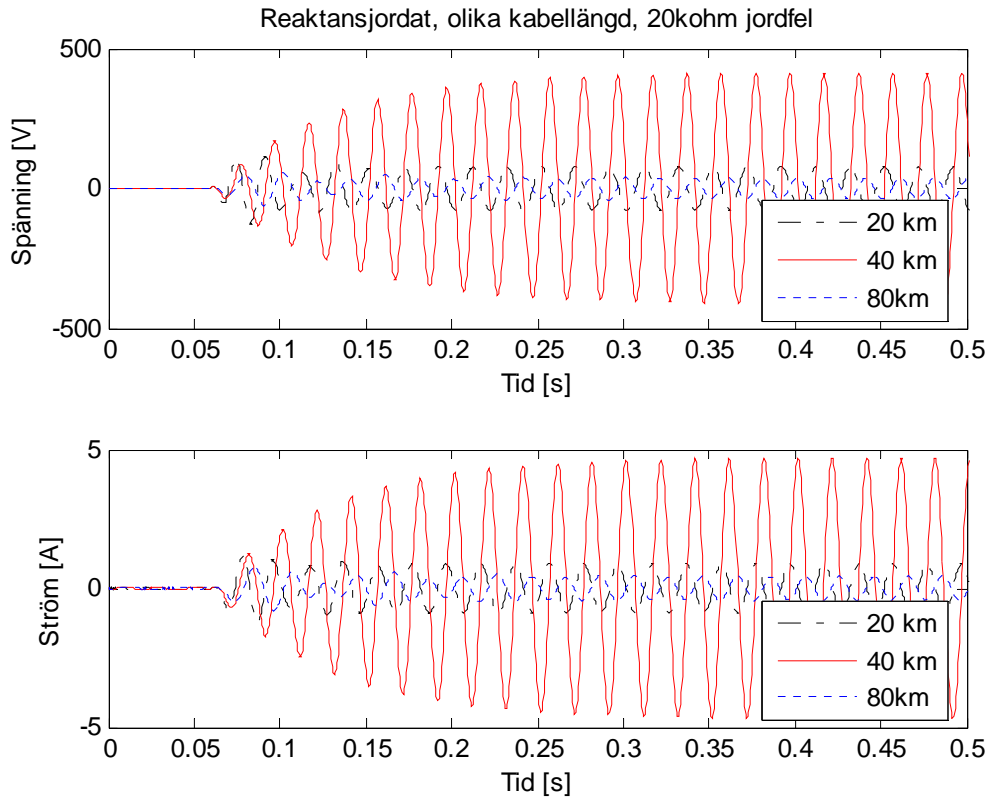
Figur 11.41. Felspänning och ström, reaktansjordat system vid 20k $\Omega$  jordfel.



Figur 11.42. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0s och 0.5s.



Figur 11.43. Nollpunktsspänning och ström, reaktansjordat system vid 20k $\Omega$  jordfel.



Figur 11.44. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0s och 0.5s.

### 11.2.5 Felströmstabeller

Isolerat system				
Ström i felstället på felbehäftad fas, stationärt				
RMS-värde		Ledningslängd		
		20 km	40 km	80 km
Feltyp	Stumt	36	73	148
	3 kohm	2.1	2.1	2.1
	5 kohm	1.26	1.26	1.26
	20 kohm	0.32	0.32	0.32

Tabell 11.4. Strömmen genom felstället med olika resistans och ledningslängd vid isolerat system.

Resistansjordat system				
Ström i felstället på felbehäftad fas, stationärt				
RMS-värde		Ledningslängd		
		20 km	40 km	80 km
Feltyp	Stumt	36	73	148
	3 kohm	2.1	2.1	2.1
	5 kohm	1.27	1.27	1.27
	20 kohm	0.3	0.3	0.3

Tabell 11.5. Strömmen genom felstället med olika resistans och ledningslängd vid isolerat system.

Spoljordat system				
Ström i felstället på felbehäftad fas, stationärt				
RMS-värde		Ledningslängd		
		20 km	40 km	80 km
Feltyp	Stumt	35	1.6	74
	3 kohm	2.1	1	2.1
	5 kohm	1.3	0.7	1.3
	20 kohm	0.3	0.3	0.3

Tabell 11.6. Strömmen genom felstället med olika resistans och ledningslängd vid isolerat system.

Reaktansjordat system				
Ström i felstället på felbehäftad fas, stationärt				
RMS-värde		Ledningslängd		
		20 km	40 km	80 km
Feltyp	Stumt	36	6	74
	3 kohm	2.1	1.6	2.1
	5 kohm	1.3	1.1	1.3
	20 kohm	0.3	0.3	0.3

Tabell 11.7. Strömmen genom felstället med olika resistans och ledningslängd vid isolerat system.

## 11.2.6 Nollpunktströmstabeller

Resistansjordat system				
Nollpunktström, stationärt rms-värde				
RMS-värde		Ledningslängd		
		20 km	40 km	80 km
Feltyp	Stumt	5	5	5
	3 kohm	0.28	0.14	0.07
	5 kohm	0.18	0.9	0.4
	20 kohm	0.01	0.02	0.04

Tabell 11.8. Strömmen genom nollpunktsutrustningen vid resistansjordat system.

Spoljordat system				
Nollpunktström, stationärt rms-värde				
RMS-värde		Ledningslängd		
		20 km	40 km	80 km
Feltyp	Stumt	71	71	73
	3 kohm	4.0	57	2.1
	5 kohm	2.5	31	1.2
	20 kohm	0.6	11.3	0.3

Tabell 11.9. Strömmen genom nollpunktsutrustningen vid spoljordat system.

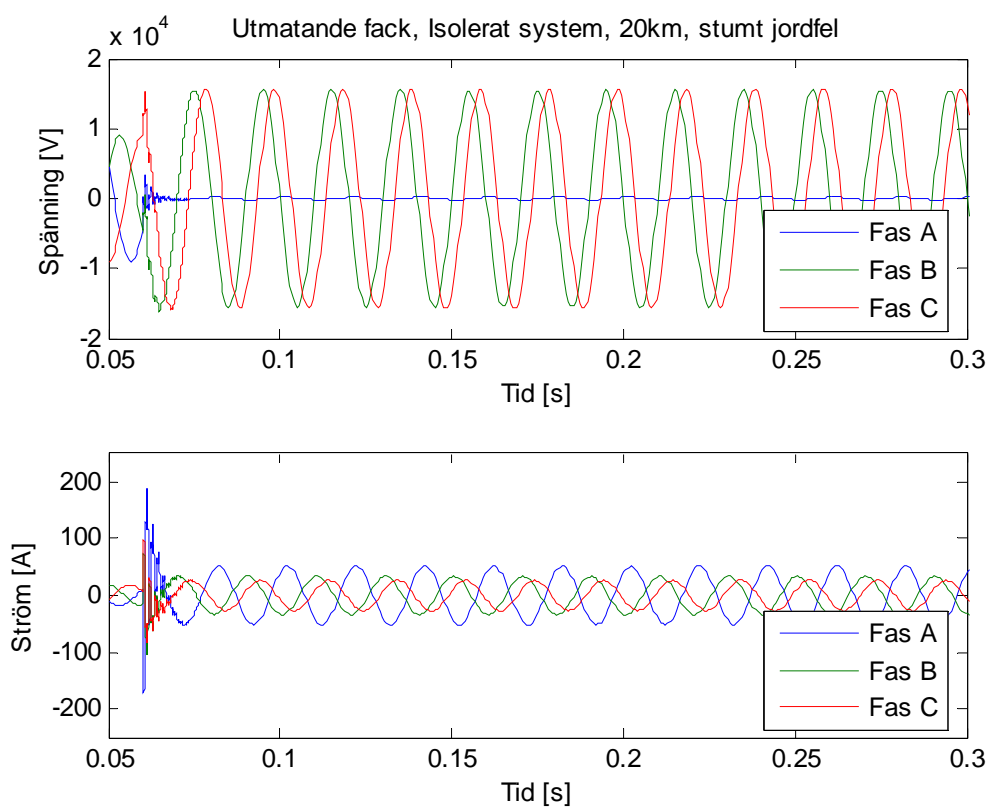


Reaktansjordat system				
Nollpunktström, stationärt rms-värde				
RMS-värde		Ledningslängd		
		20 km	40 km	80 km
Feltyp	Stumt	71	71	72
	3 kohm	6.3	17.7	4.2
	5 kohm	2.5	11.3	1.2
	20 kohm	0.6	3.3	0.3

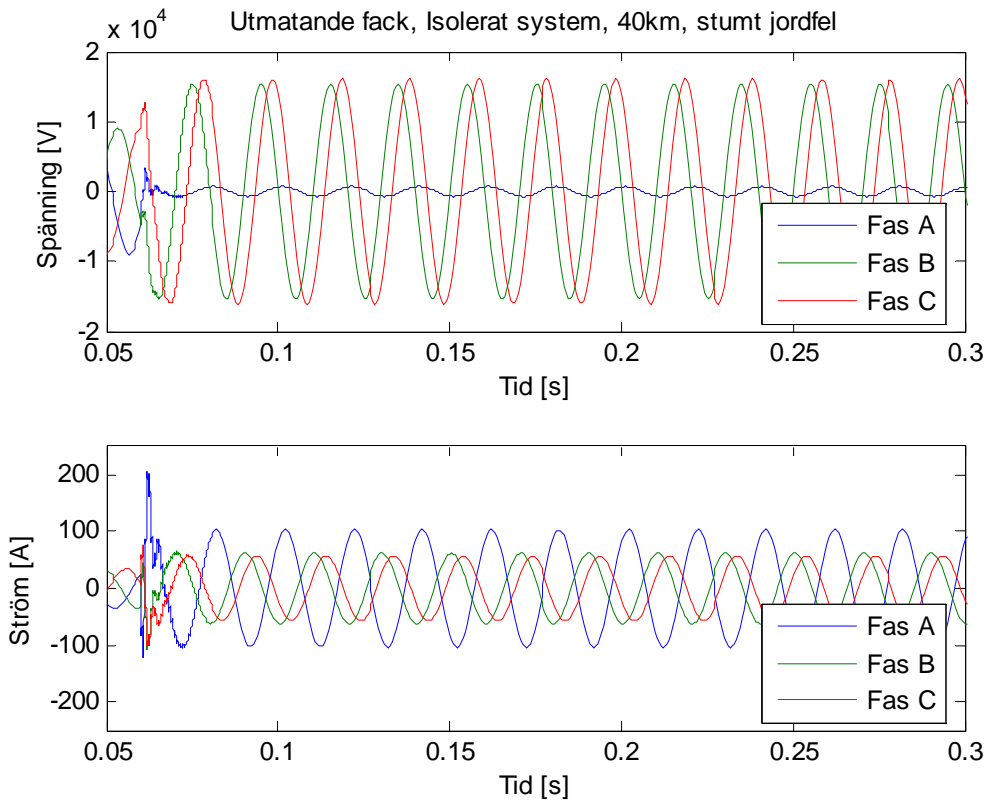
Tabell 11.10. Strömmen genom nollpunktsutrustningen vid reaktansjordat system.

## 11.3 Kurvor från matande fack vid simulering av enkel ledning

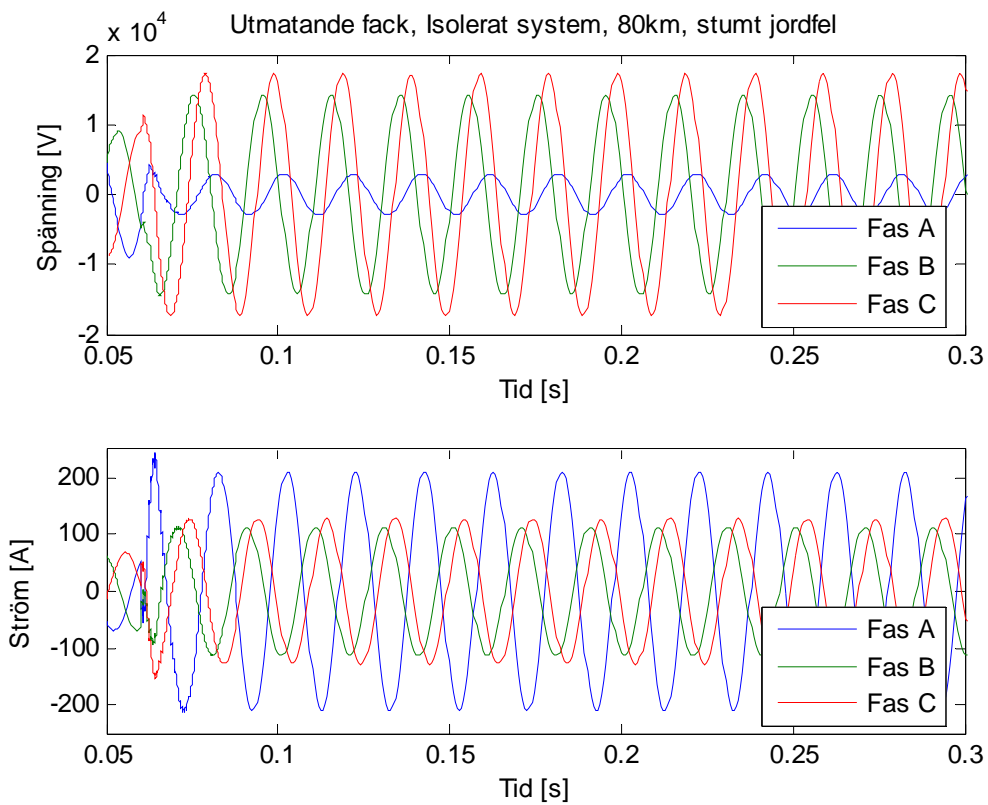
### 11.3.1 Isolerat system



Figur 11.45. Spänning och ström i matande fack vid isolerat system, 20km kabel och stumt jordfel.

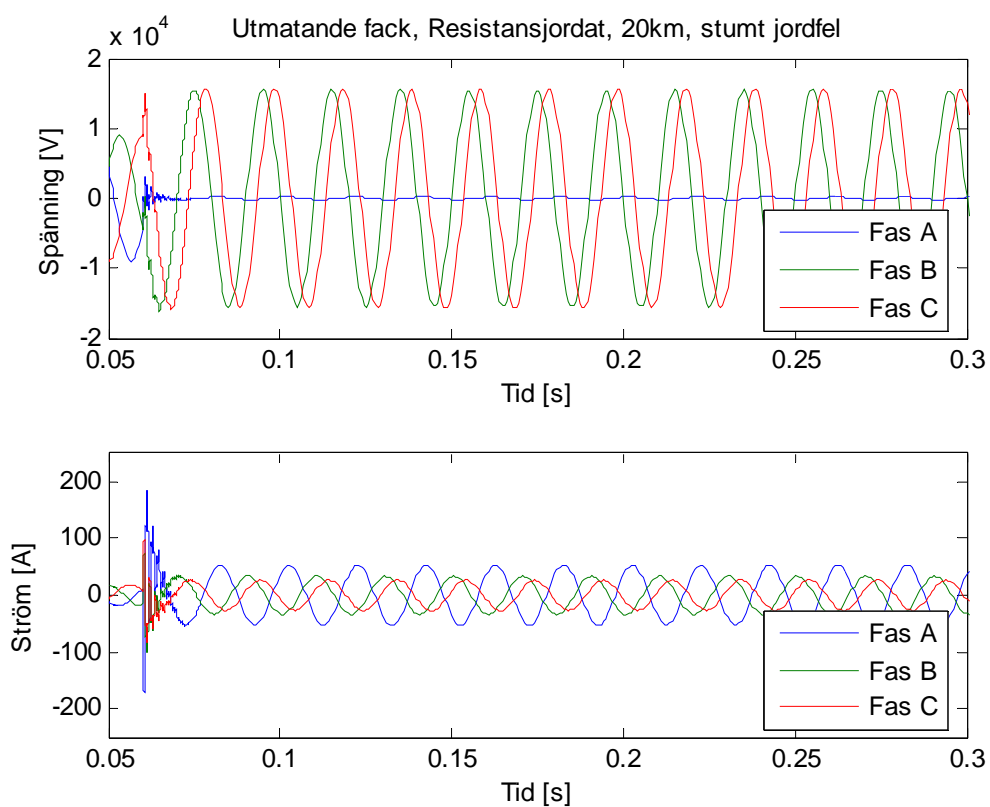


**Figur 11.46. Spänning och ström i matande fack vid isolerat system, 40km kabel och stumt jordfel.**

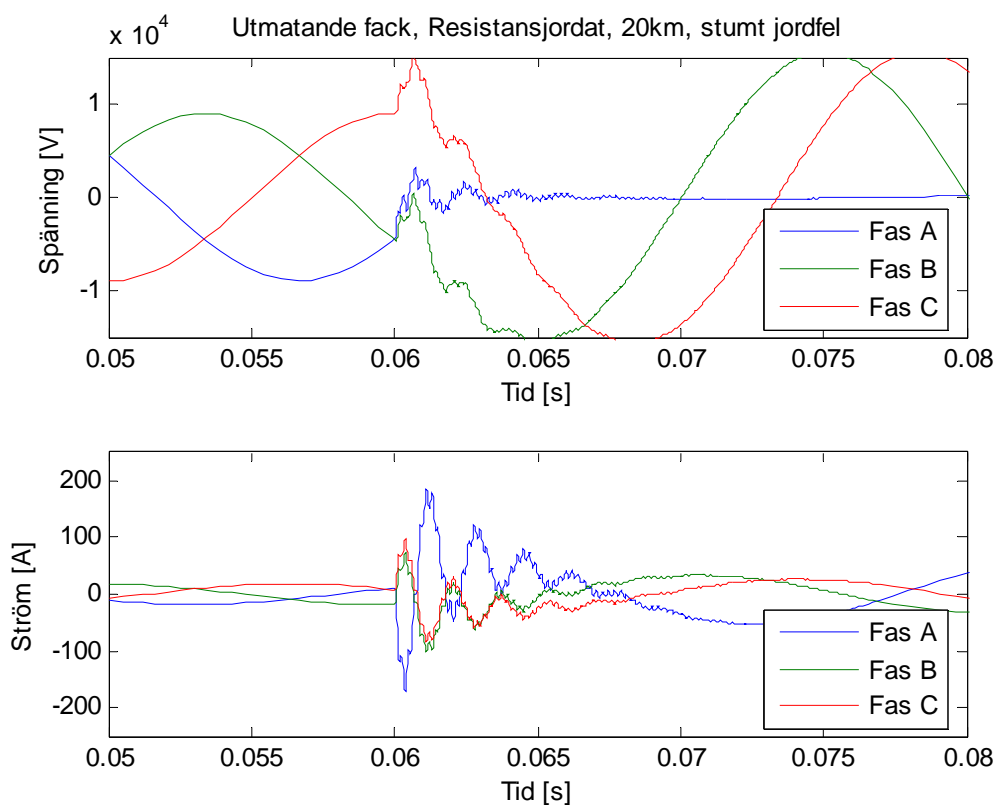


**Figur 11.47. Spänning och ström i matande fack vid isolerat system, 80km kabel och stumt jordfel.**

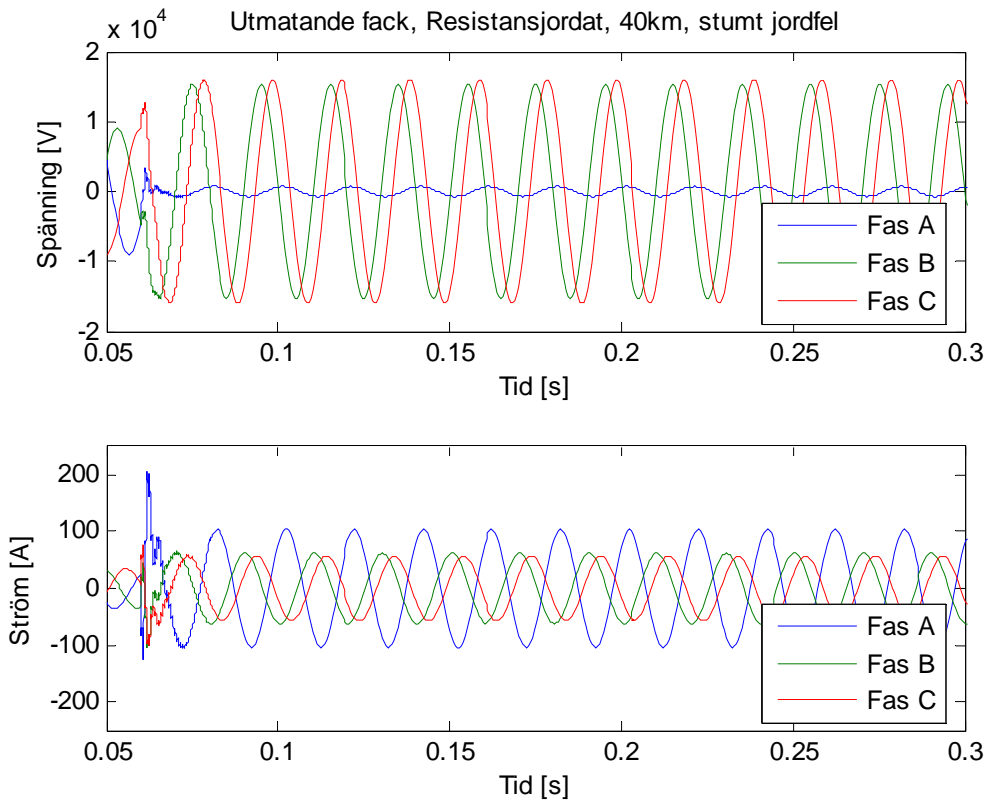
### 11.3.2 Resistansjordat system



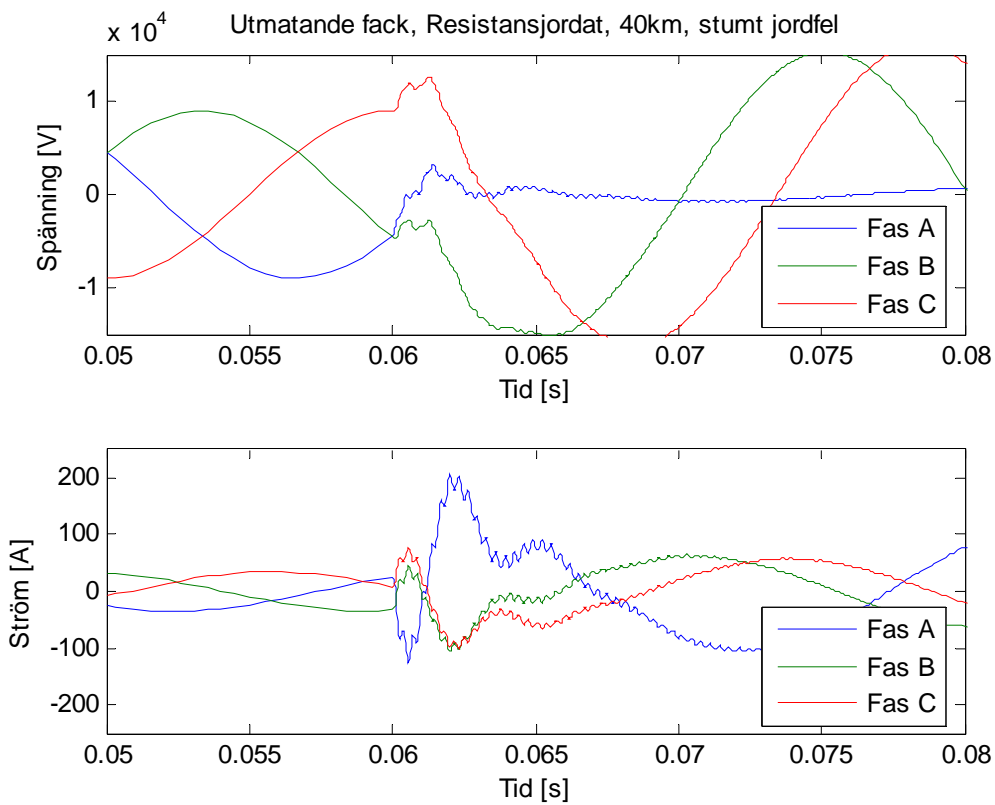
Figur 11.48. Spänning och ström i matande fack vid resistansjordat system, 20km kabel och stumt jordfel.



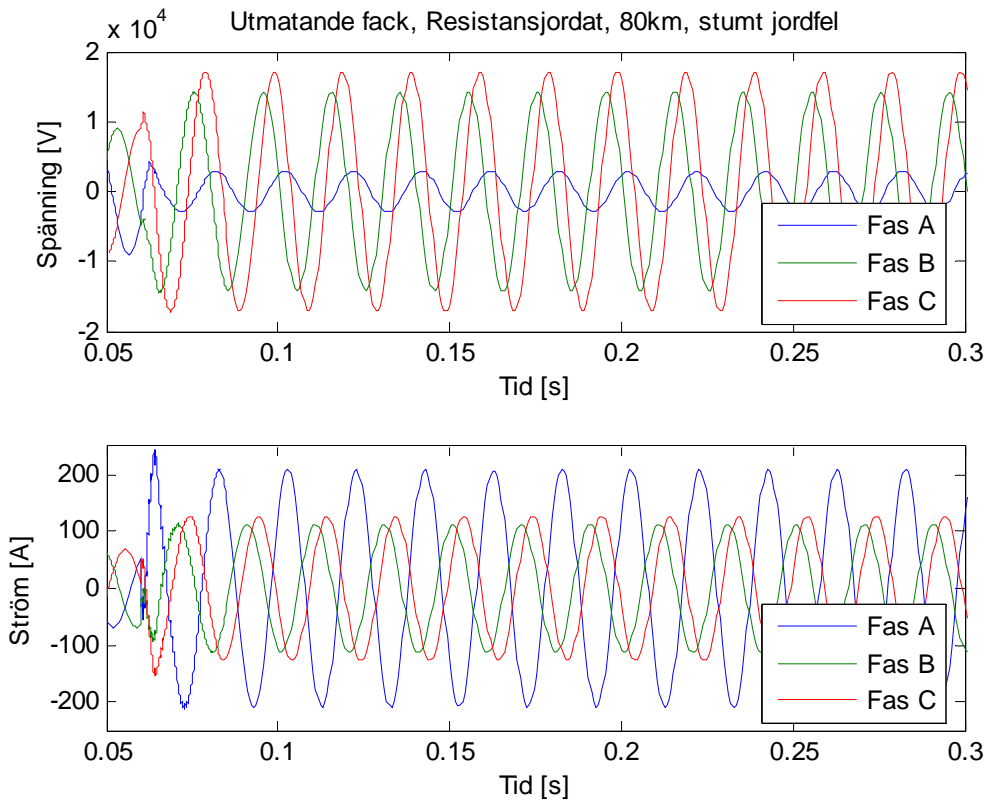
Figur 11.49. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0.05s och 0.08s.



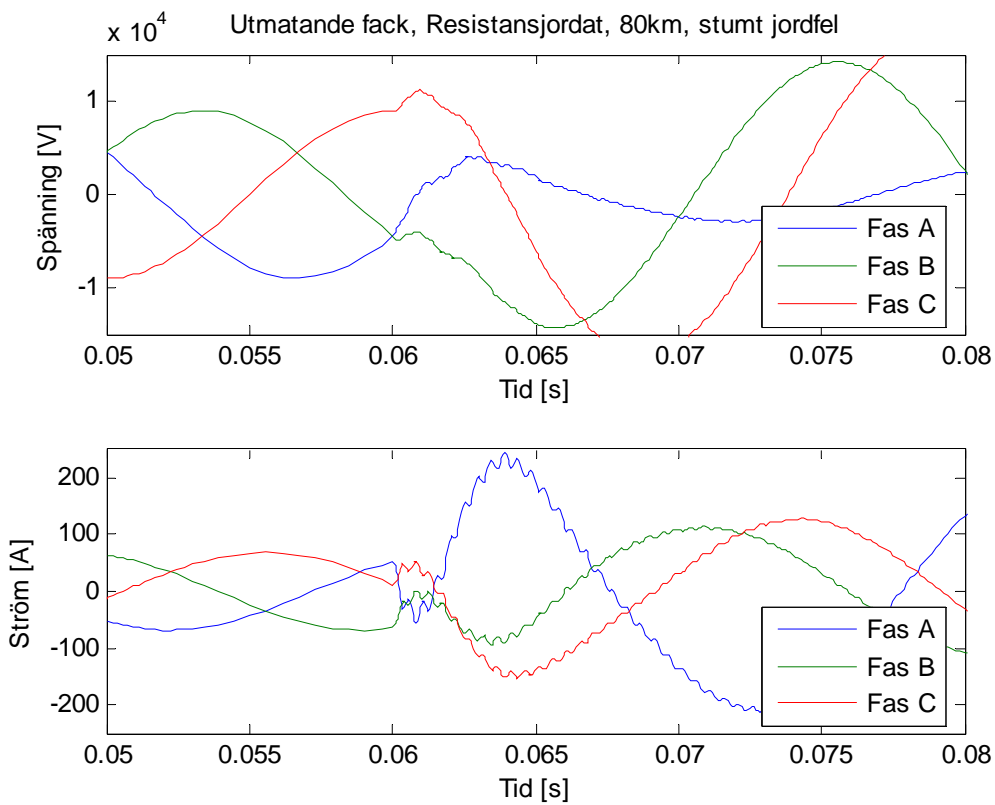
Figur 11.50. Spänning och ström i matande fack vid resistansjordat system, 40km kabel och stumt jordfel.



Figur 11.51. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0.05s och 0.08s.

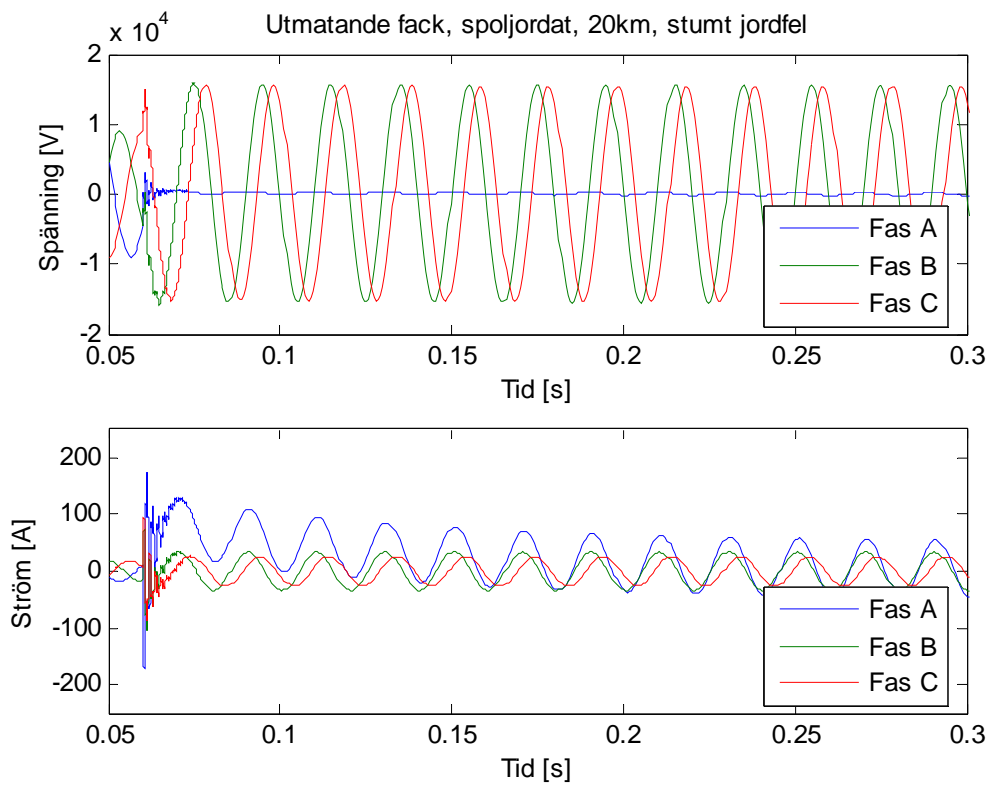


Figur 11.52. Spänning och ström i matande fack vid resistansjordat system, 80km kabel och stumt jordfel.

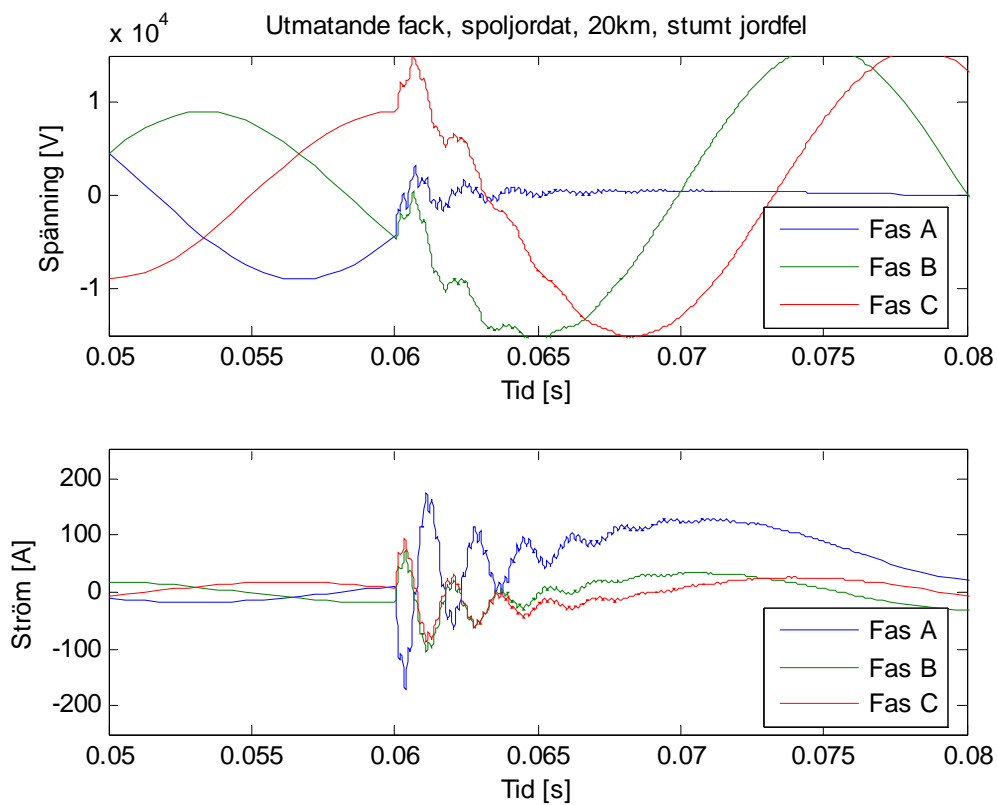


Figur 11.53. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0.05s och 0.08s.

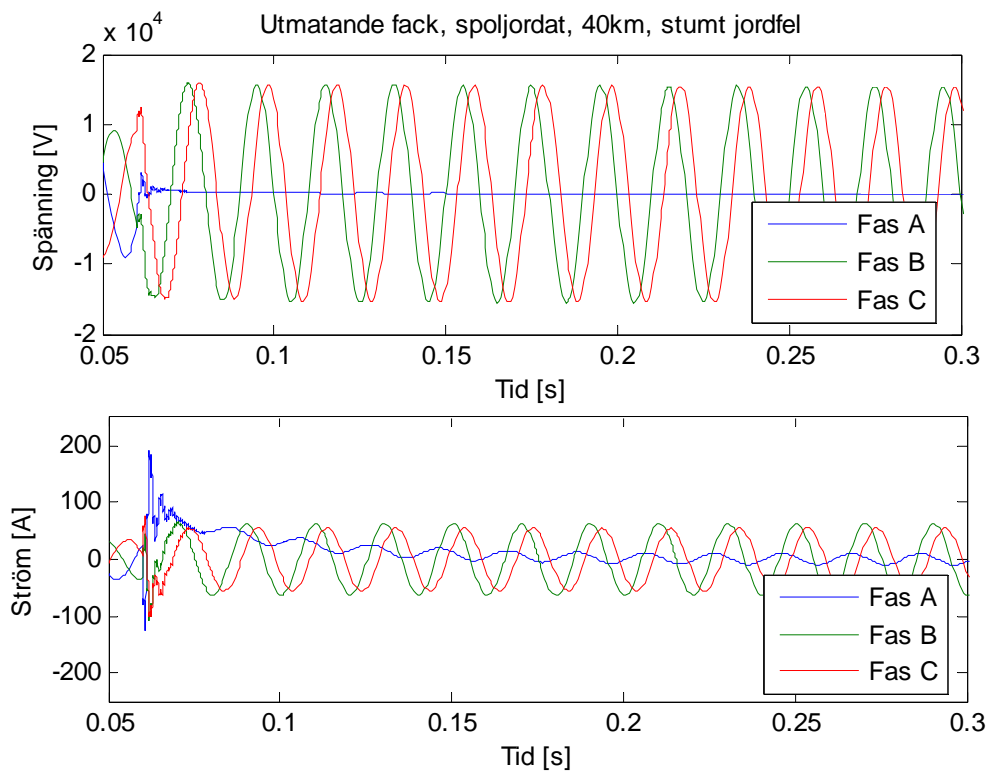
### 11.3.3 Spoljordat system



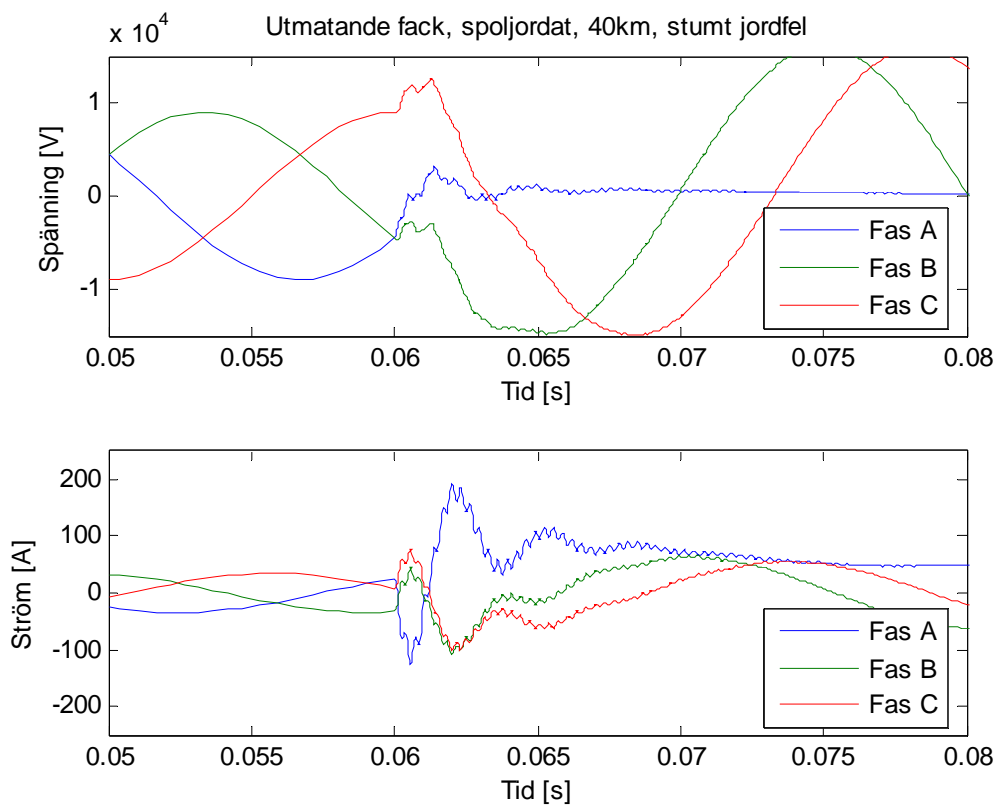
Figur 11.54. Spänning och ström i matande fack vid spoljordat system, 20km kabel och stumt jordfel.



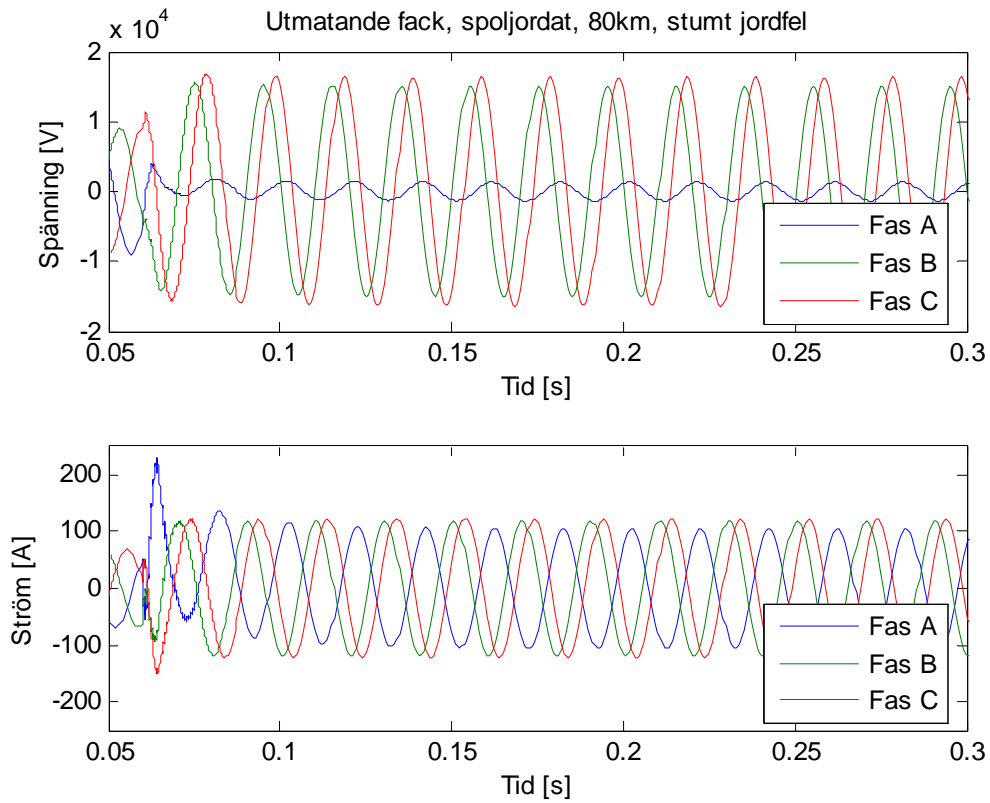
Figur 11.55. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0.05s och 0.08s.



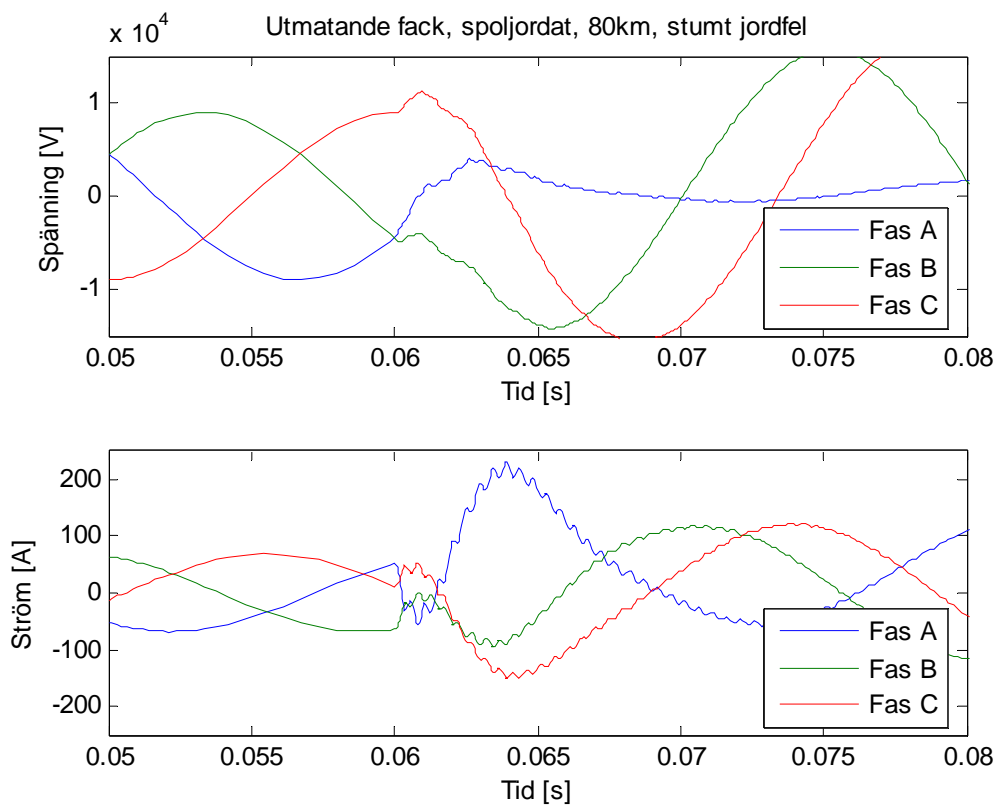
Figur 11.56. Spänning och ström i matande fack vid spoljordat system, 40km kabel och stumt jordfel.



Figur 11.57. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0.05s och 0.08s.



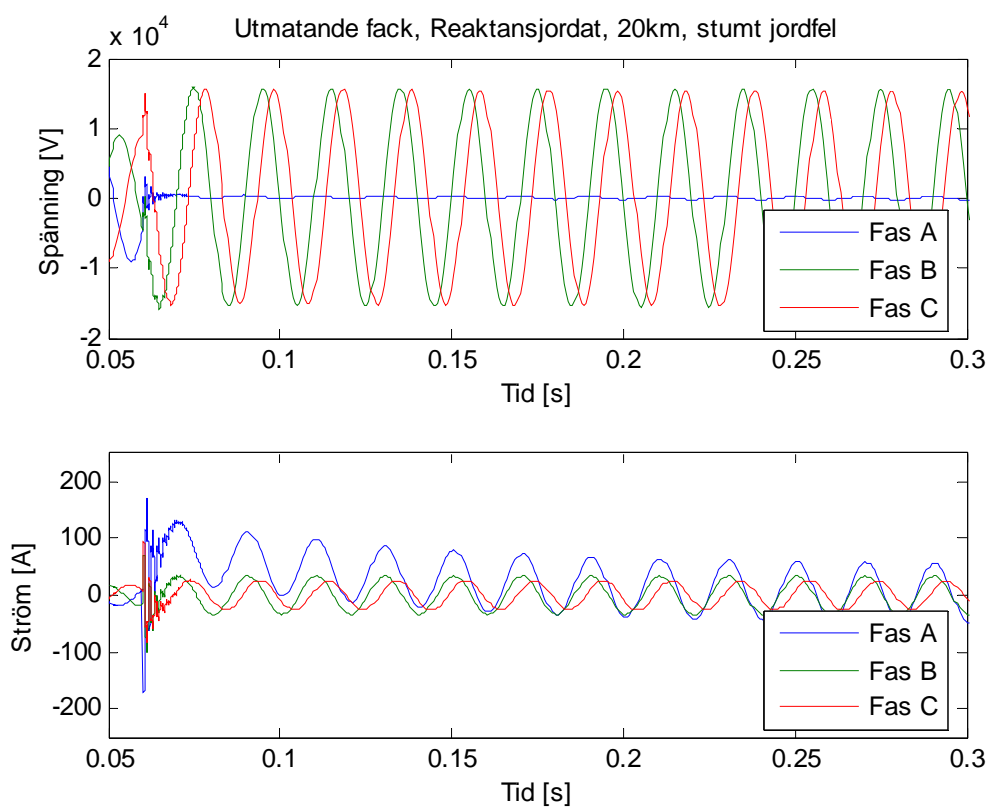
Figur 11.58. Spänning och ström i matande fack vid spoljordat system, 80km kabel och stumt jordfel.



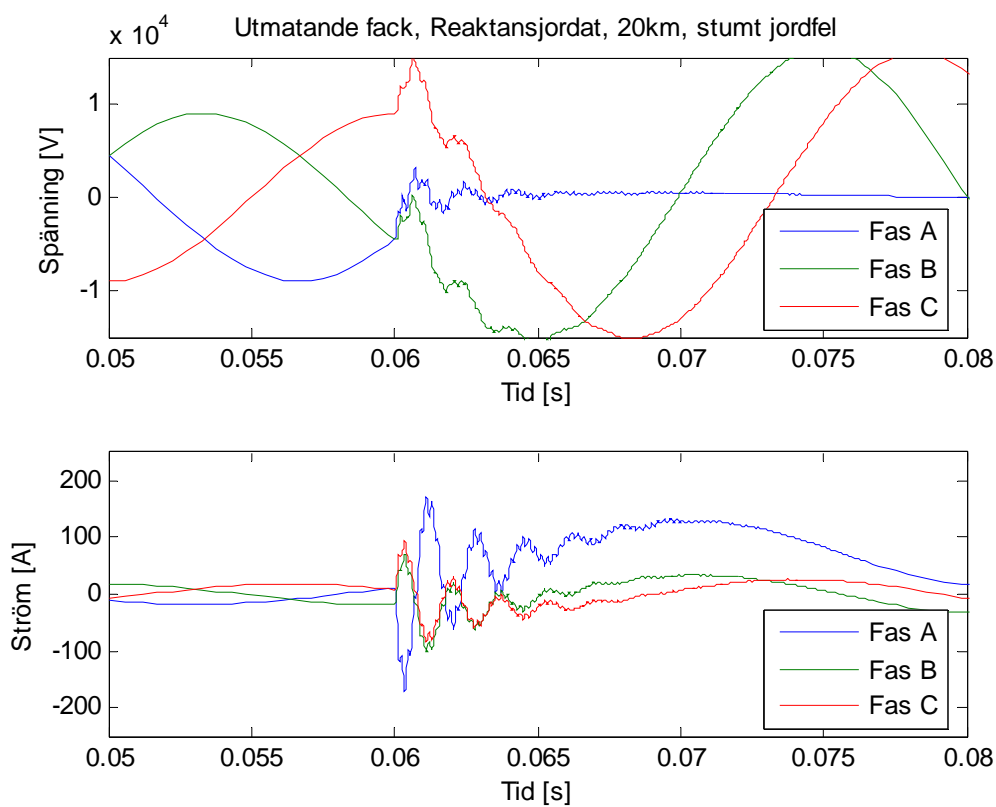
Figur 11.59. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0.05s och 0.08s.



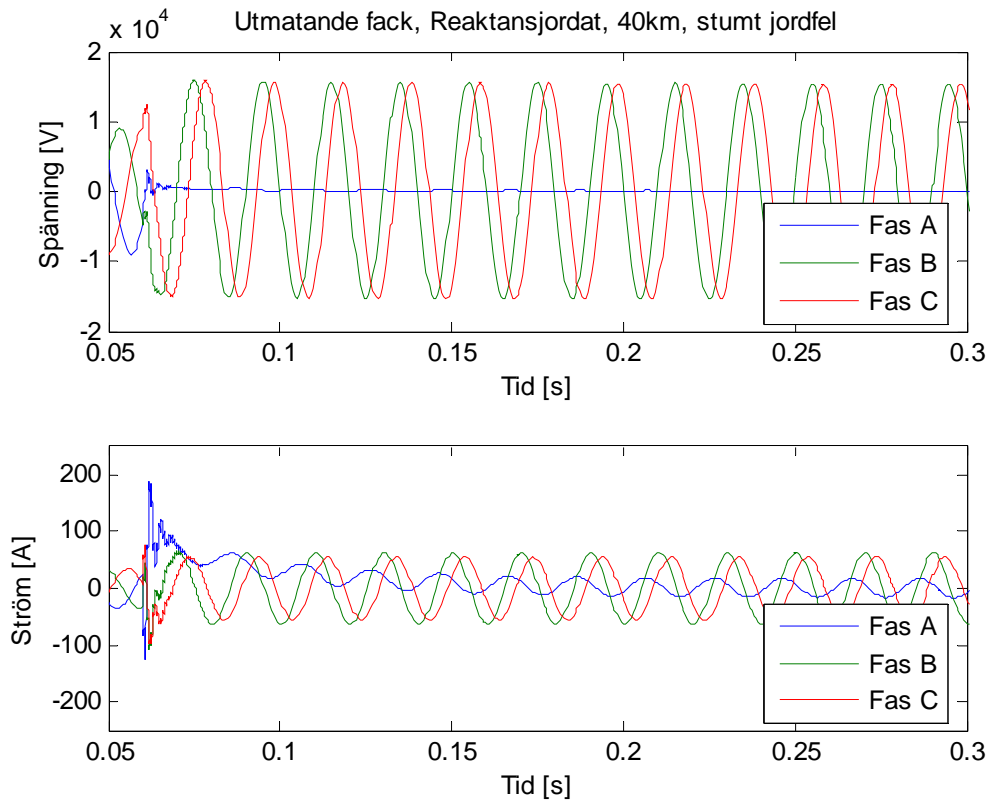
### 11.3.4 Reaktansjordat system



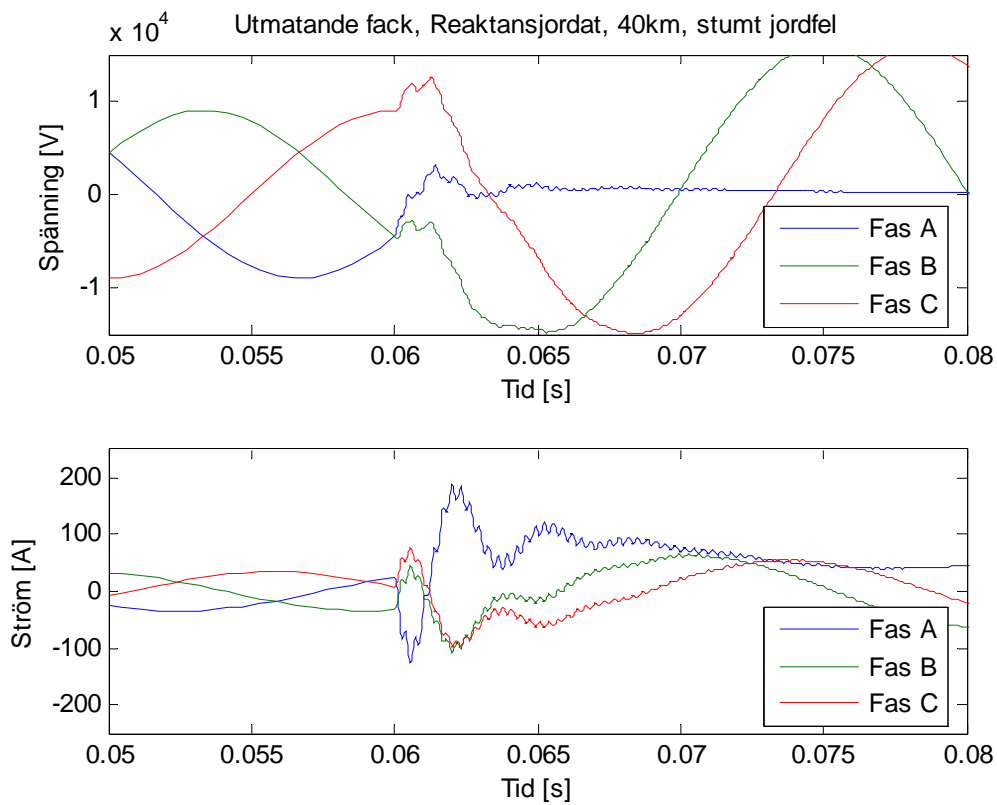
Figur 11.60. Spänning och ström i matande fack vid reaktansjordat system, 20km kabel och stumt jordfel.



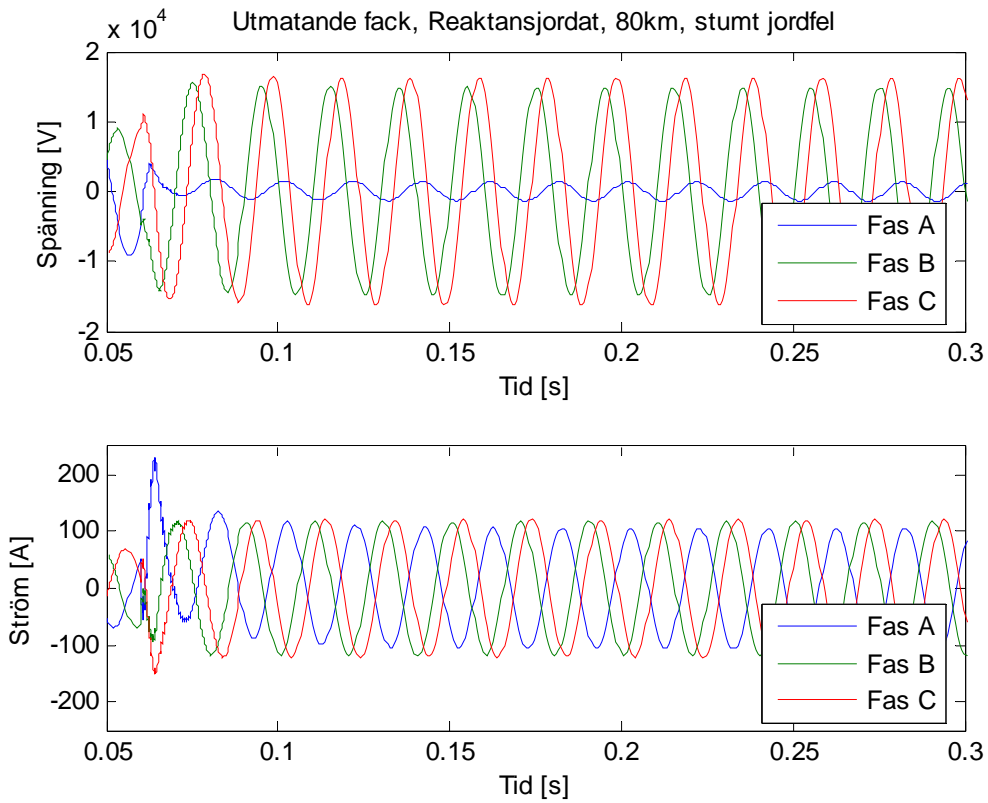
Figur 11.61. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0.05s och 0.08s.



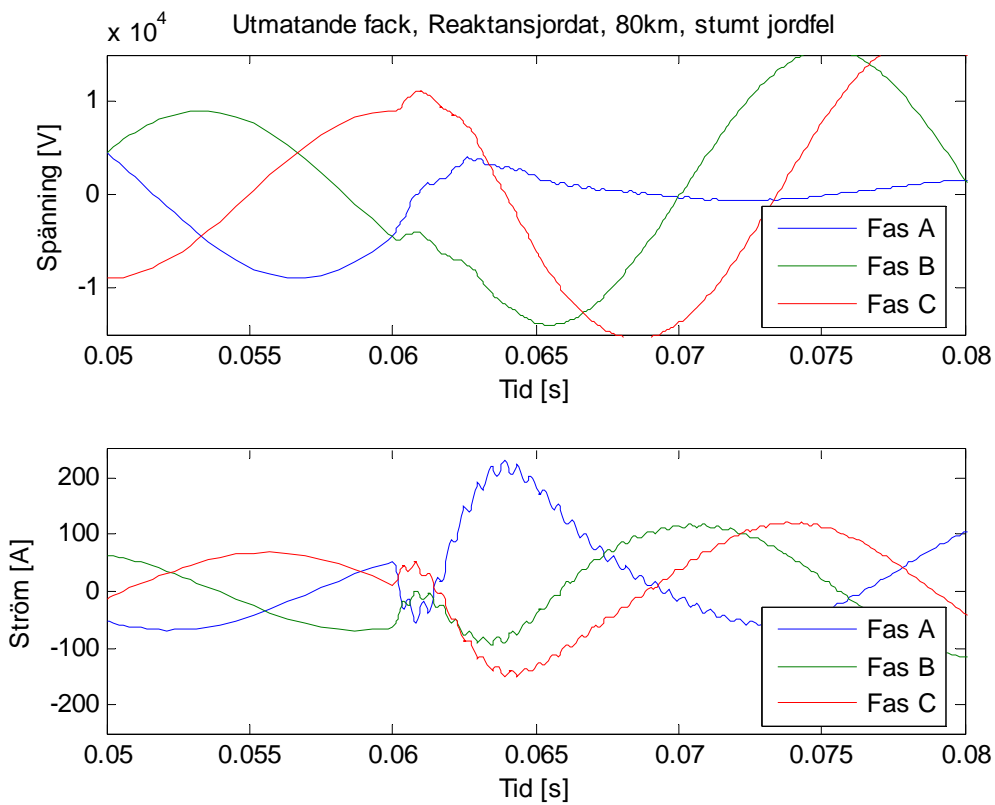
Figur 11.62. Spänning och ström i matande fack vid reaktansjordat system, 40km kabel och stumt jordfel.



Figur 11.63. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0.05s och 0.08s.



Figur 11.64. Spänning och ström i matande fack vid reaktansjordat system, 80km kabel och stunt jordfel.



Figur 11.65. Förstoring av föregående kurva mellan tiden 0.05s och 0.08s.

### 11.3.5 Tabeller utifrån kurvor från matande fack

System	Längd [km]	Transient-amplitud, rms, [A]	Transient-frekvens [Hz]	Varaktighet [s]
Isolerat	20	131	600	0.012
	40	148	300	0.01
	80	170	200	0.005
Resistansjordat	20	131	600	0.012
	40	148	300	0.01
	80	170	200	0.005
Spoljordat	20	123	600	0.012
	40	134	300	0.01
	80	159	200	0.005
Reaktansjordat	20	121	600	0.012
	40	134	300	0.01
	80	159	200	0.005

Tabell 11.11. Ungefärliga Transientvärden vid matande fack när stumt fel inträffar utifrån studerande av figurer ovan.

Isolerat system				
Ström, felbehäftad fas i matande fack, stationärt				
RMS-värde		Ledningslängd		
		20 km	40 km	80 km
Feltyp	Stumt	36	73	148
	3 kohm	13	24	48
	5 kohm	13	24	48
	20 kohm	13	24	48

Tabell 11.12. Strömmen i felbehäftad fas sett i facket, isolerat system.

Resistansjordat system				
Ström, felbehäftad fas i matande fack, stationärt				
RMS-värde		Ledningslängd		
		20 km	40 km	80 km
Feltyp	Stumt	37	73	148
	3 kohm	13	24	48
	5 kohm	13	24	48
	20 kohm	13	24	48

Tabell 11.13. Strömmen i felbehäftad fas sett i facket, resistansjordat system.

Spoljordat system				
Ström, felbehäftad fas i matande fack, stationärt				
RMS-värde		Ledningslängd		
		20 km	40 km	80 km
Feltyp	Stumt	36	7	74
	3 kohm	13	24	48
	5 kohm	13	24	48
	20 kohm	13	24	48

Tabell 11.14. Strömmen i felbehäftad fas sett i facket, spoljordat system.

Reaktansjordat system				
Ström, felbehäftad fas i matande fack, stationärt				
RMS-värde		Ledningslängd		
		20 km	40 km	80 km
Feltyp	Stumt	37	12	75
	3 kohm	13	24	48
	5 kohm	13	24	48
	20 kohm	13	24	48

Tabell 11.15. Strömmen i felbehäftad fas sett i facket, reaktansjordat system.