

# Mätning av krafttransformatorers nollföljdsimpedans



---

**Jasmin Selimovic**

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



## Abstract

In the E. ON sponsored research project, Distribution LABORatory, at the Department of Industrial Electrical Engineering and Automation at LTH the impact of the increased move towards use of cables in the Swedish distribution grid is examined. The project also built a model of a small distribution grid. The model was used to simulate a Petersen coil earthed grid system. Petersen coil earthing lowers the fault current by compensating the capacitive currents.

Since the share of cables in the medium-voltage networks have increased so have the capacitive currents. In order to minimize the fault current the inductive compensation currents need to be increased. When calculating the compensation current an uncertainty is found as an unknown zero sequence impedance in the Yyn-connected transformers.

The purpose of this master thesis is to measure the zero sequence impedance of the power transformers, investigate the transformer tank's impact on it, and to develop a method that can be used for measurement on the full-scale transformers.

The work shows that the zero sequence impedance in Yyn-connected transformers is not infinite as many textbooks show. For phase-to-ground faults the zero sequence magnetic flux is forced to flow into the air and the transformer tank which greatly affects the size of the zero sequence impedance. As a consequence, the zero sequence impedance should be measured on site and after installation to obtain an more accurate result.

The measurements of the zero sequence impedance in transformers gives some uncertainty that makes it difficult to draw definite conclusions. Measurements made on full-scale transformers where raw data is saved would increase the possibility to process the information and to exclude the influence of the Petersen coil earthing used in the distribution model.



## Sammanfattning

I det E.ON sponsrade forskningsprojektet, Distribution LABoratory, vid avdelningen för Industriell Elektroteknik och Automation vid LTH undersöks inverkan av ökad kablfiering i distributionsnätet. Inom ramen för projektet har även en modell av ett litet distributionsnät byggts. Modellen användes för att simulera ett spoljordat distributionsnät. Spoljordning sänker strömmen i felstället, vid jordfel, genom att kompensera de kapacitiva felströmmarna.

Eftersom andelen kabel i mellanspänningsnätet har ökat har även de kapacitiva felströmmarna ökat. För att hålla jordfelsströmmen i felstället låg behöver de induktiva kompenseringsströmmarna ökas i motsvarande mån. Vid beräkning av dessa har en osäkerhet upptäckts i form av okänd nollföljdsimpedans i Yyn-kopplade transformatorer.

Syftet med detta examensarbete är att mäta upp krafttransformatorers nollföljdsimpedans, undersöka transformator kärlets inverkan på den samt att ta fram en metod för mätning på fullskaliga transformatorer i fält.

Arbetet visar att nollföljdsimpedansen i Yyn-kopplade transformatorer inte är oändlig så som alltför många läroböcker visar. Vid fas-till-jord fel tvingas nollföljdsflödet ut i luften och transformator kärlet vilket kraftigt påverkar nollföljdsimpedansens storlek. Till följd av detta bör nollföljdsimpedansen mätas upp på plats och efter installation för att erhålla ett noggrannare resultat.

Mätresultaten för transformatorns nollföljdsimpedans ger viss osäkerhet som gör det svårt att dra definitiva slutsatser. Mätningar utförda på fullskaliga transformatorer där rådata sparas istället skulle öka möjligheterna att bearbeta informationen samt utesluta inverkan från spoljordningen i distributionsmodellen.



## **Förord**

Detta examensarbete är en avslutande del av min civilingenjörsutbildning vid Lunds Tekniska Högskola (LTH). Det har utförts vid avdelningen för Industriell Elektroteknik och Automation i forskningsprojektet DLAB i samarbete med E.ON Elnät Sverige AB. Under arbetets gång har jag fått mycket stöd från både institutionen och E.ON och vill särskilt rikta ett tack till:

Magnus Akke, min handledare på institutionen som alltid lika entusiastiskt och engagerat tagit sig tid att svara på mina frågor.

Per Molin, min handledare på E.ON för all hjälp med information om dagens system samt vägledning under projektets gång.

Jakob Hägg, för all hjälp med LabVIEW och ritande av signalschemat.

Getachew Darge, för hjälp med det praktiska arbetet.

Tack!

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

Jasmin Selimovic

Lund, Januari 2012





# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>5</b>
1.1	Bakgrund . . . . .	5
1.2	Arbetets syfte . . . . .	6
1.3	Disposition . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Teori</b>	<b>7</b>
2.1	Den ideala transformatorn . . . . .	7
2.2	Verklig transformator . . . . .	10
2.3	Trefastransformatorer . . . . .	10
2.4	Förenklningar . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Beloppsmätning och simulering</b>	<b>13</b>
3.1	Trefastransformator av kärn-typ . . . . .	13
3.1.1	Plusföljds-mätning . . . . .	14
3.1.2	Nollföljds-mätning . . . . .	15
3.2	Tre enfastransformatorer . . . . .	18
3.2.1	Plusföljds-mätning . . . . .	19
3.2.2	Nollföljds-mätning . . . . .	20
3.3	Översikt . . . . .	22
3.4	Transformator med kärn . . . . .	22
3.5	Simulering . . . . .	23

<b>4</b>	<b>Metodbeskrivning</b>	<b>25</b>
4.1	Metod . . . . .	25
4.2	DLAB . . . . .	26
4.2.1	Ledningsmodell . . . . .	26
4.2.2	Mät- och styrutrustning . . . . .	26
4.2.3	Utrustning för mätning på fullskalig transformator . . . . .	27
4.2.4	Mätutrustning beloppsmätning . . . . .	28
<b>5</b>	<b>Resultat</b>	<b>29</b>
5.1	Mätningar med mät dator . . . . .	29
5.2	Manuell mätning . . . . .	31
5.3	Verifiering . . . . .	35
<b>6</b>	<b>Slutsats och diskussion</b>	<b>37</b>
	<b>Litteraturförteckning</b>	<b>38</b>
<b>A</b>	<b>En introduktion till symmetriska komponenter</b>	<b>39</b>
<b>B</b>	<b>Mätresultat</b>	<b>41</b>
<b>C</b>	<b>Hypotestest</b>	<b>42</b>
<b>D</b>	<b>Detaljerat schema av mätuppställningen</b>	<b>43</b>
D.1	Plusföljd . . . . .	43
D.2	Nollföljd . . . . .	44
<b>E</b>	<b>Schema över labbuppställningen</b>	<b>46</b>
<b>F</b>	<b>Bilder</b>	<b>47</b>

# Kapitel 1

## Inledning

### 1.1 Bakgrund

Efter de kraftiga stormarna Gudrun (2005) och Per (2007) har krav ställts på att energibolagen ska öka driftsäkerheten i elnäten till kund. Detta har lett till att E.ON Elnät Sverige AB (hädanefter benämnt E.ON i texten) kraftigt ökat andelen kabel i sina mellanspänningsnät de senaste åren.

Ett mycket aktuellt område är spoljordade mellanspänningsnät, 10–20 kV, med stor andel kablar. Elnätets jordning har stor påverkan på felbortkopplingen, där syftet med jordningen är att minimera strömmen i felstället. I svenska mellanspänningsnät används oftast en central Petersenspole som ställs in för att kompensera mot kapacitiva felströmmar i ledningarna. Spole och nätkapacitanser bildar en resonanskrets som vid jordfel minimerar den reaktiva felströmmen och därmed bidrar till att ljusbågen självsläcks.

Den kablifiering som skett har kraftigt ökat de kapacitiva felströmmarna i många distributionsnät då strömmen beror på kabellängden [4]. Detta medför att den induktiva kompenseringsströmmen måste ökas i motsvarande mån. Ett sätt är att öka den centrala kompenseringen. Ett annat sätt är att använda lokalkompensering, dvs använda mindre spolar utmed ledningen med 5 – 10 km mellanrum. Båda metoderna har för- och nackdelar, därför används i praktiken en kombination av central och lokal kompensering.

Vid beräkning av hur mycket central kompensering som ska införas har en osäkerhet uppstått. Osäkerheten kommer från att nollföljdsimpedansen hos vissa krafttransformatorer inte varit uppmätt vilket uppmärksammats tidigare [3].

Detta gäller främst Yyn-kopplade transformatorer, dvs med uppsidans neutralpunkt isolerad. Kopplingsarten kommer, enligt vissa nyare läroböcker [2], att ge oändlig nollföljdsimpedans och därmed ingen nollföljdsström. Enligt den teorin skulle det vara riskfritt att komma i kontakt med utsatt del. I praktiken är inte detta sant, ett nollföljdsflöde kommer att slutas genom luften eller transformator kärlet. Detta leder till en högre nollföljdsimpedans än normalt men definitivt inte oändlig. Vidare diskuteras det även huruvida nollföljdsimpedansen är olinjär och beror på strömmens belopp eller inte.

## 1.2 Arbetets syfte

Syftet med examensarbetet är att mäta upp krafttransformatorers nollföljdsimpedans. Provning av teorin kommer att ske i laboratoriemiljö på en modell av ett litet distributionsnät. Resultatet från modellen används för att ta fram en metod för mätning på fullskaliga krafttransformatorer.

## 1.3 Disposition

Rapporten har följande struktur

- Kapitel 2 beskriver den grundläggande teorin för transformatorer och vilka förenklingar som görs.
- I kapitel 3 görs belopp-beräkningar på transformatorn för att snabbt uppskatta nollföljdsimpedansens storlek.
- Kapitel 4 beskriver metoden för mätning på fullskalig transformator, DLAB, ledningsmodellen samt utrustningskraven.
- Kapitel 5 presenterar resultaten av utförda mätningar.
- Kapitel 6 sammanfattar slutsatserna.

# Kapitel 2

## Teori

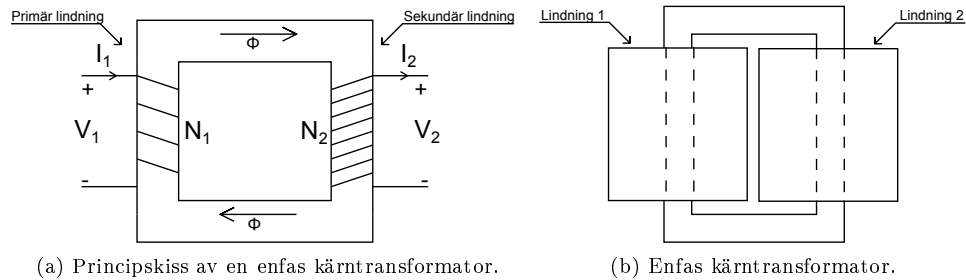
Osäkerheten i kompenseringsberäkningarna uppstår pga transformatorns kopplingsart. I detta kapitel presenteras transformator teorin, vilka förenklingar som kan göras och hur transformatorns uppbyggnad påverkar nollföljdsimpedansen. Avsnitt 2.1 och 2.2 baseras på [2].

### 2.1 Den ideala transformatorn

En ideal transformator definieras som:

1. Lindningarna har ingen resistans, vilket innebär att det inte blir några förluster i dessa.
2. Järnkärnans permeabilitet är oändlig.
3. Det förekommer inget läckflöde utan allt magnetiskt flöde stannar inom järnkärnan.
4. Inga förluster i järnkärnan.

I figur 2.1.1a ses en spänning  $V_1$  ligga över primärlindningen som driver en ström  $I_1$  in i lindningen (positiv riktning) vilken har  $N_1$  varv. Motsvarande på sekundärsidan ligger en spänning  $V_2$  över lindningen samtidigt som en ström  $I_2$  går ut ur lindningen (positiv riktning) med  $N_2$  varv. Kärnans tvärsnittsarea benämns  $A$  och har permeabiliteten  $\mu$ , den genomsnittliga längden för den magnetiska kretsen genom kärnan har betäckningen  $l$ .



Figur 2.1.1

Amperes lag säger

$$\oint H_{tan} dl = I_{omsluten}$$

vilket betyder att den tangentiella magnetiska fältstyrkan,  $H_{tan}$ , integrerad över en sluten slinga, transformatorns kärna, är lika med nettoströmmen omsluten av slingan. Om  $H$  är konstant längs hela den genomsnittliga slingan  $l$ , då är

$$Hl = N_1 I_1 - N_2 I_2 \quad (2.1.1)$$

Om kärnans permeabilitet,  $\mu$ , är konstant då är magnetiska flödestätheten,  $B$ , och magnetflödet i kärnan,  $\Phi$

$$B = \mu H \quad (2.1.2)$$

$$\Phi = BA \quad (2.1.3)$$

Sätts 2.1.2 och 2.1.3 in i 2.1.1 fås

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = \frac{lB}{\mu} = \left( \frac{l}{\mu A} \right) \Phi \quad (2.1.4)$$

Kärnans reluktans definieras som

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad (2.1.5)$$

Då blir 2.1.4

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = R\Phi \quad (2.1.6)$$

eftersom reluktansen är noll i en ideal transformator gäller

$$N_1 I_1 = N_2 I_2$$

Faradays lag

$$e(t) = N \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (2.1.7)$$

säger att en spänning,  $e(t)$ , induceras över en  $N$ -varvig lindning av ett tidsvarierande magnetiskt flöde,  $\phi(t)$ .

Vid stationärt tillstånd med frekvensen  $\omega$  konstant kan  $e(t)$  och  $\phi(t)$  ersättas med dess fasstorheter

$$E = N(j\omega)\Phi$$

För en ideal transformator, antas hela flödet vara inneslutet i kärnan och förbinda båda lindningarna. Detta ger följande samband

$$E_1 = N_1(j\omega)\Phi \quad (2.1.8)$$

$$E_2 = N_2(j\omega)\Phi \quad (2.1.9)$$

Ur 2.1.8 och 2.1.9 fås

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \iff \frac{E_1}{N_1} = \frac{E_2}{N_2}$$

För en ideal transformator gäller

$$E_1 = \frac{N_1}{N_2} E_2$$
$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2$$

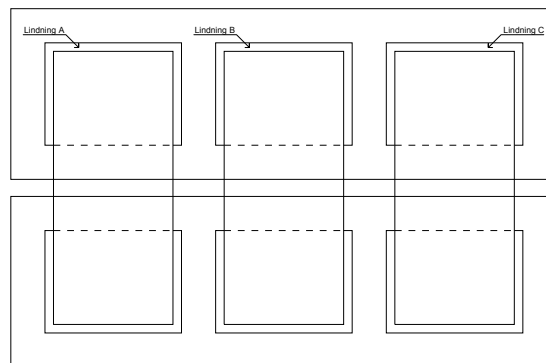
vilket visar att spänningen och strömmen på primär- och sekundärsidan bestäms av antalet varv lindningarna har i förhållande till varandra.

## 2.2 Verklig transformator

En verklig transformator skiljer sig från den ideala enligt följande punkter:

1. Lindningarna har resistans.
2. Järnkärnans permeabilitet är ändlig.
3. Det finns ett magnetiskt läckflöde.
4. Det finns aktiva och reaktiva förluster i transformatorn.

För att öka en transformators verkningsgrad kan järnkärnan och lindningar ordnas på olika sätt. Transformatorn som visas i figur 2.1.1b är av kärn-typ där benen är omslutna av lindningar och oken är fria. Järnkärnan kan även vara formad som en toroid, s.k. ringkärna, då har den lindningarna ovanpå varandra och runt hela ringen. Fördelen med en sådan är att det magnetiska läckflödet blir minimalt och att de är enkla att tillverka. Manteltransformatorer finns i figur 2.2.1, där lindningen sitter runt mittenbenet med tunnare ben på var sida vilka bildar en väg där returflödet kan gå igenom.

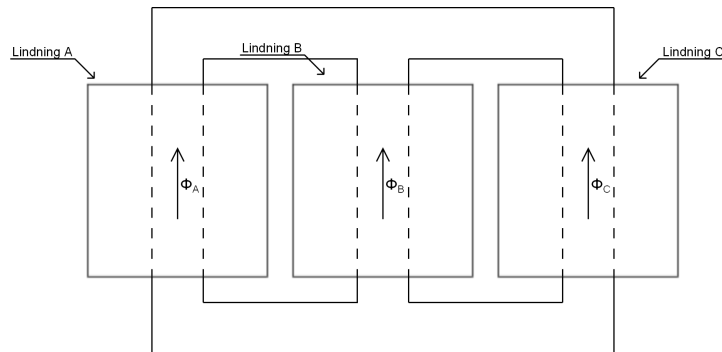


Figur 2.2.1: En manteltransformator.

## 2.3 Trefastransformatörer

En trefastransformator kan bestå av tre stycken individuella enfastransformatörer som kan vara av toroid-typ för bästa verkningsgrad. Oftast är trefastransformatoren utformad på så sätt att den använder så lite järn som möjligt. Då kommer den att se ut som i figur 2.3.1 och vara av kärn-typ med tre ben och lindningar på varje ben. Matas transformatorn med plus- eller minusföljdsströmmar





Figur 2.3.1: Principskiss på en trebent trefastransformator.

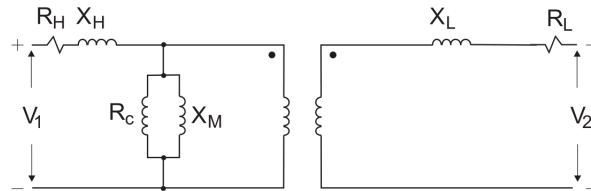
så finns en returväg för de inducerade flödena genom ett ben då flödena, likt strömmarna, är fasförsjutna. Detta ger låg reluktans och hög impedans enligt [6].

Problem uppstår när transformatorn matas med nollföljdsspänning, flödena kan då inte sluta sig genom något ben i transformatorn eftersom de är i fas. Följden blir att relativt lite magnetiskt flöde kommer att gå i transformatorn vilket resulterar i liten impedans jämfört med impedansen vid plus- och minusföljden enligt [6]. Flödena kommer att gå genom luft, olja, transformatorkärl eller vad som än har lägst reluktans, magnetiskt motstånd, i transformatorns omedelbara närhet—vilket också är det som kan skapa problem [8]. Reluktansen kommer att variera från transformator till transformator och bero på dess omgivning, uppbyggnad och hur varm och mättad omgivningen blir. Dock kommer impedansen att vara stor relativt de ordinarie läckageimpedanserna. Med anledning av detta kan transformatorer byggas med fyra eller fem ben som skapar en väg med låg reluktans för returflödet.

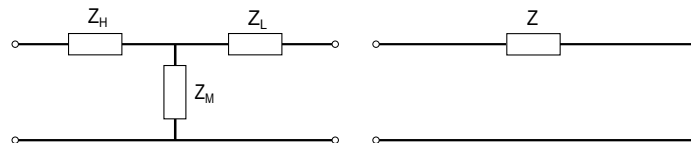
## 2.4 Förenklingar

För att förstå dessa förenklingar och varför de är möjliga behövs kunskap om symmetriska komponenter. En kortfattad introduktion till symmetriska komponenter finns i appendix A, mer omfattande information finns i [6].

Figur 2.4.1 visar ett ekvivalent schema av en verklig transformator med lindningsresistansen  $R_H$  och läckagereaktansen  $X_H$  med motsvarande resistans och reaktans på sekundärsidan.  $R_C$  representerar förluster i kärnan och  $X_M$  är magnetiseringsreaktansen. Förenklas det ekvivalenta schemat fås figur 2.4.2a. I många fall kommer magnetiseringsimpedansen  $Z_M$  att vara mycket större än övriga impedanser och kan då betraktas som avbrott likt figur 2.4.2b.



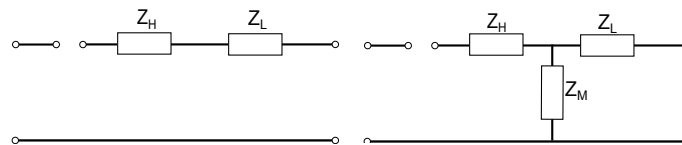
Figur 2.4.1: Ekvivalent schema av en transformator med två lindningar.[7]



(a) Förenklat ekvivalent schema av en transformator.  
 (b) Förenklat ekvivalent schema av en transformator med försummad magnetiseringsimpedans  $Z_M$  och ihopslogna läckageimpedanser.

Figur 2.4.2

För att utföra en full analys av en trefastransformators beteende under icke-symmetriska förhållanden, t.ex. jordfel, behövs plus-, minus-, och nollföljdsdata för matande nät. Schemat enligt figur 2.4.2b är en god approximation av plus- och minusföljden medan nollföljden är kopplingspecifik.



(a) Förenklat ekvivalent schema i nollföljd av en Yyn-kopplad transformator.  
 (b) Förenklat ekvivalent schema i nollföljd av en Yyn-kopplad transformator som tar hänsyn till magnetiseringsimpedansen  $Z_M$ .

Figur 2.4.3

Enligt flertal böcker [2, 5] kommer det ekvivalenta schemat för nollföljd för en Yyn-kopplad transformator att se ut som i figur 2.4.3a. Detta innebär att ingen nollföljdsström kan flyta i transformatorkretsen—vilket enkelt motbevisas med en mätning. Nollföljdsimpedansen,  $Z_0$ , kan vara i storleksordning  $0,3 \text{ p.u.} < Z_{0M} < 3,0 \text{ p.u.}$  på fullskaliga transformatorer enligt [6, 7]. Schemat som visas i figur 2.4.3b är en bättre approximation av en verklig transformator, i synnerhet för en trebent kärntransformator där  $Z_{0M}$  kan variera i storlek.

## Kapitel 3

# Beloppsmätning och simulering

Syftet med detta avsnitt är att göra en snabb uppskattning av impedansernas storleksordning. Medvetet har impedansernas fasvinklar försumrats vilket baseras på antagandet att impedansen domineras av den induktiva delen.

I detta avsnitt har beloppsmätningar gjorts av plusföljds- och nollföljdsimpedansen hos en trebent trefastransformator och hos tre enfastransformatorer. Detta för att lättare kunna sätta impedanserna i relation till varandra men även visa att det är direkt olämpligt att modellera en trebent trefastransformator som tre stycken enfastransformatorer. Även en simulering har gjorts som stödjer detta.

I avsnittet visas principschema över transformatorn och hur den blivit kopplad. Mätpunkternas placering framgår inte i dessa scheman utan läsaren är rekommenderad att läsa appendix D först.

### 3.1 Trefastransformator av kärn-typ

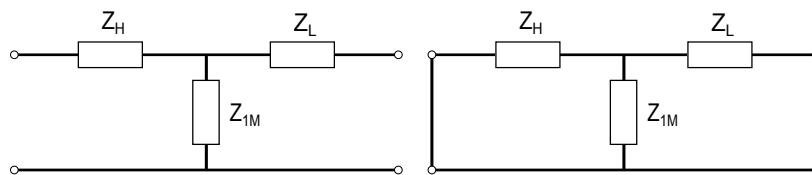
Transformatorn är en trebent labbtransformator med märkdata 2 kVA, 380, 220/2x66,5 V kopplad så att relationen mellan fasspänningarna är 220/133 V.

$$\begin{aligned}
S_N &= \frac{2000}{3} = 677 \text{ VA per fas} \\
I_N &= \frac{677}{133} = 5,1 \text{ A vid } 133 \text{ V} \\
Z_{Bas} &= \frac{133}{5,1} = 26,1 \Omega
\end{aligned}$$

För att kunna uppskatta magnetiseringsimpedansen görs både tomgångsprov och kortslutningsprov.

### 3.1.1 Plusföljdsmätning

Ekvivalent schema av en Yyn-kopplad transformator vid tomgångsprov kan ses i figur 3.1.1a.



(a) Förenklat ekvivalent schema av en Yyn-kopplad transformator vid tomgångsprov.

(b) Förenklat ekvivalent schema av en Yyn-kopplad transformator vid kortslutningsprov.

Figur 3.1.1

Tomgångsströmmen kommer att gå igenom  $Z_{1mät} = Z_L + Z_{1M}$ .

$$\begin{aligned}
|U_1| &= 133 \text{ V} \\
|I_{1mät}| &= 0,29 \text{ A} \\
|Z_{1mät}| &= \frac{133}{0,29} = 459 \Omega \\
|Z_{1mät}|_{p.u.} &= \frac{459}{26,1} = 17,6 \text{ p.u.}
\end{aligned}$$

Antas  $Z_L$  vara försumbar i jämförelse med  $Z_{1M}$ , är  $Z_{1M} \approx Z_{1mät} = 17,6 \text{ p.u.}$

Ekvivalent schema av en Yyn-kopplad transformator vid kortslutningsprov kan ses i figur 3.1.1b.

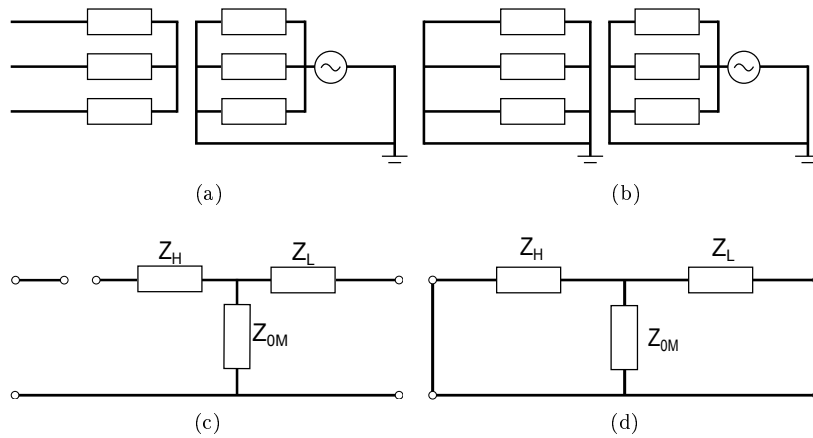
Kortslutningsströmmen kommer att gå igenom  $Z_{1mät} = Z_L + Z_H$  eftersom  $Z_{1M} \gg Z_L + Z_H$ .

$$\begin{aligned} |U_1| &= 6,4 \text{ V} \\ |I_{1mät}| &= 5 \text{ A} \\ |Z_{1mät}| &= \frac{6,4}{5} = 1,28 \Omega \\ |Z_{1mät}|_{p.u.} &= \frac{1,28}{26,1} = 0,05 \text{ p.u} \end{aligned}$$

Antas  $Z_L \approx Z_H$ , vilket är en rimlig approximation, är  $Z_H \approx Z_L \approx \frac{0,05}{2} = 0,025 \text{ p.u}$ .

### 3.1.2 Nollföljds-mätning

Kopplingsschema för nollföljds-mätning finns i figur 3.1.2a. Det förenklade ekvivalenta schemat är likadant som för plusföljds-mätningen och finns i figur 3.1.2c.



Figur 3.1.2: (a) och (b) visar principschemat samtidigt som (c) och (d) visar det förenklade ekvivalenta schemat vid tomgångsprov respektive kortslutningsprov i nollföljd.

Tomgångsströmmen kommer att gå igenom  $Z_{0mät} = Z_L + Z_{0M}$ .

$$\begin{aligned}
|U_0| &= 8 \text{ V} \\
|I_{0\text{mät}}| &= 5 \text{ A} \\
|Z_{0\text{mät}}| &= |Z_L + Z_{0M}| = \frac{8}{\frac{5}{3}} = 4,86 \Omega \\
|Z_{0\text{mät}}|_{p.u.} &= \frac{4,86}{26,1} = 0,186 \text{ p.u.}
\end{aligned}$$

Till synes är magnetiseringsimpedansen 100 gånger mindre i nollföljd jämfört med i plusföljd trots att många teoriböcker säger att den kan betraktas som oändlig. Anledningen till detta är att det magnetiska nollföljdsflödet tvingas ut i transformatorns omgivning som har mycket högre reluktans än själva transformatorn.

Sekundärsidan på transformatorn kortsluts enligt figur 3.1.2b vilket resulterar i en koppling så som figur 3.1.2d visar. Eftersom  $Z_{0M}$  inte kan försummas i det här fallet kommer kortslutningsströmmen att gå igenom  $Z_{0\text{mät}} = |Z_L + (Z_H \parallel Z_{0M})|$ .

$$\begin{aligned}
|U_0| &= 2,28 \text{ V} \\
|I_0| &= 5 \text{ A} \\
|Z_{0\text{mät}}| &= \left| Z_L + \frac{Z_H Z_{0M}}{Z_H + Z_{0M}} \right| = \frac{2,28}{\frac{5}{3}} = 1,368 \Omega \\
|Z_{0\text{mät}}|_{p.u.} &= \frac{1,368}{26,1} = 0,052 \text{ p.u.}
\end{aligned}$$

Nu kan  $Z_{0M}$  och  $Z_L$  räknas ut med hjälp av ovanstående mätningar.

För alla impedanser  $Z = R + jX$ , antages att  $X \gg R$  gäller. Då fås,

$$X_{0\text{mät}} = X_L + \frac{X_H \cdot X_{0M}}{X_H + X_{0M}}$$

Antag att  $X_H = X_L$ , så fås

$$X_{0\text{mät}} = X_L + \frac{X_L \cdot X_{0M}}{X_L + X_{0M}}$$

Index T indikerar tomgångsprov medan index K indikerar kortslutningsprov.

$$\begin{cases} X_{0mät_T} &= X_L + X_{0M} \\ X_{0mät_K} &= X_L + \frac{X_L \cdot X_{0M}}{X_L + X_{0M}} \end{cases} \quad (3.1.1)$$

Med hjälp av mätresultaten och ekvationssystemet kan  $X_L$  och  $X_{0M}$  bestämmas.

$$\begin{cases} X_{0M} &= X_{0mät_T} - X_L \\ (X_L + X_{0M}) \cdot X_{0mät_K} &= X_L \cdot (X_L + X_{0M}) + X_L \cdot X_{0M} \end{cases} \quad (3.1.2)$$

Sätts  $X_{0M} = X_{0mät_T} - X_L$  i den nedre ekvationen i ekvationssystemet 3.1.2 erhålles

$$\begin{aligned} & (X_L + (X_{0mät_T} - X_L)) \cdot X_{0mät_K} = \\ &= X_L \cdot (X_L + (X_{0mät_T} - X_L)) + X_L \cdot (X_{0mät_T} - X_L) \\ & \Leftrightarrow \\ & X_{0mät_T} \cdot X_{0mät_K} = X_L \cdot X_{0mät_T} + X_L \cdot X_{0mät_T} - X_L^2 \\ & \Leftrightarrow \\ & 0 = X_L^2 - 2X_L \cdot X_{0mät_T} + X_{0mät_T} \cdot X_{0mät_K} \end{aligned} \quad (3.1.3)$$

Andragsadekvationen 3.1.3 löses på sedvanligt sätt.

$$X_L = X_{0mät_T} \pm \sqrt{X_{0mät_T}^2 \cdot \left(1 - \frac{X_{0mät_K}}{X_{0mät_T}}\right)} \quad (3.1.4)$$

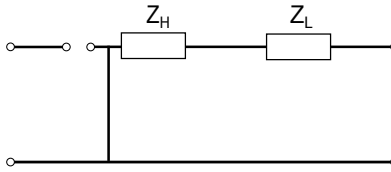
Ett positivt tal under kvadratroten skulle ge  $X_L > X_{0mät_T}$  vilket är omöjligt. Detta gör att den negativa roten är den giltiga lösningen.

$$X_L = X_{0mät_T} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{X_{0mät_K}}{X_{0mät_T}}}\right) \quad (3.1.5)$$

Sedan tidigare är

$$X_{0M} = X_{0mät_T} - X_L \quad (3.1.6)$$

Sätts resultatet  $X_{0mät_T} = 0,186$  och  $X_{0mät_K} = 0,052$  in i 3.1.5 erhålles



Figur 3.1.3: Förenklat ekvivalent schema av en Dyn-kopplad transformator vid tomgångsprov.

$$\begin{cases} X_L &= 0,186 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{0,052}{0,186}}\right) = 0,0281 \text{ p.u.} \\ X_{0M} &= 0,186 - 0,0281 = 0,158 \text{ p.u.} \end{cases}$$

Uträkningarna visar att magnetiseringsimpedansen är den dominerande impedansen i en Yyn-kopplad trefastransformator.

Som en jämförelse Dyn-kopplades transformatorn och nollföljds-mätning utfördes. Det förenklade ekvivalenta schemat visas i figur 3.1.3.

Mätresultatet blir,

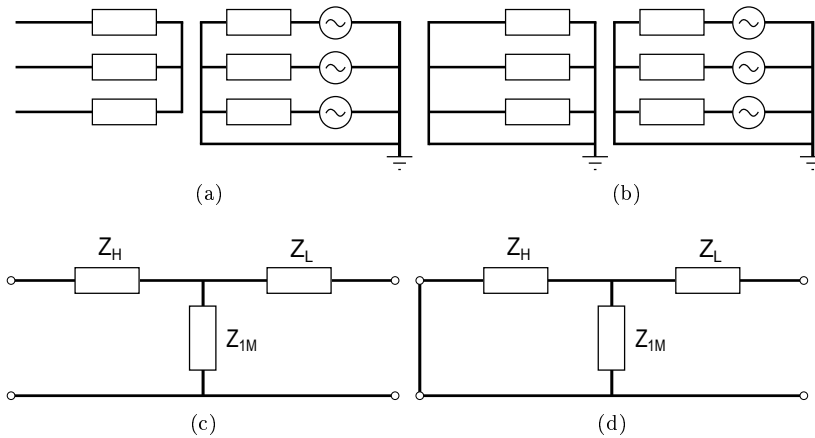
$$\begin{aligned} |U_0| &= 2,36 \text{ V} \\ |I_{0\text{mät}}| &= 5 \text{ A} \\ |Z_{0\text{mät}}| &= |Z_H + Z_L| = \frac{2,36}{\frac{5}{3}} = 1,42 \Omega \\ |Z_{0\text{mät}}|_{\text{p.u.}} &= \frac{1,42}{26,1} = 0,054 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

Vilket bekräftar att  $|Z_H + Z_L| \approx 0,05 \text{ p.u.}$

## 3.2 Tre enfastransformatorer

För att visa betydelsen av transformatorns uppbyggnad för nollföljdsimpedansen görs samma mätningar som i föregående avsnitt men på en trefastransformator uppbyggd av tre stycken enfastransformatorer. Transformatorns märkdata är 380, 220/2x66 V och 4,5 A kopplad så att relationen mellan fasspänningarna är 220/132.





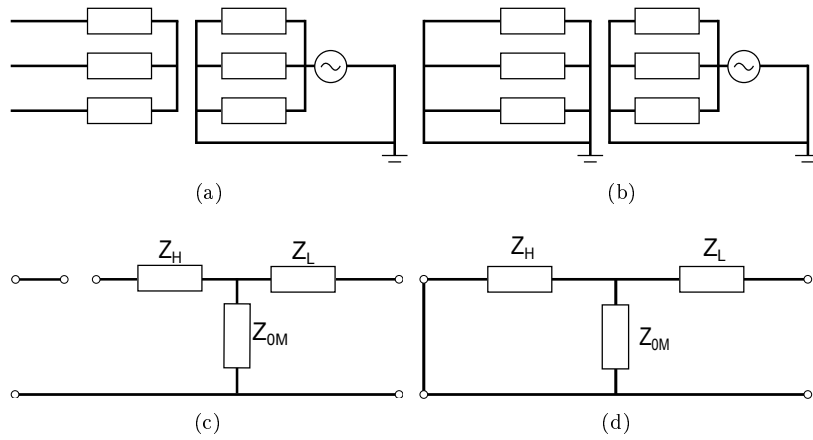
Figur 3.2.1: (a) och (b) visar principschemat samtidigt som (c) och (d) visar det förenklade ekvivalenta schemat vid tomgångsprov respektive kortslutningsprov i plusföljd.

$$\begin{aligned}
 S &= 3 \cdot 2 \cdot 66 \cdot 4,5 = 1800 \text{ VA} \\
 S_N &= \frac{1800}{3} = 600 \text{ VA per fas} \\
 I_N &= \frac{600}{132} = 4,5 \text{ A vid } 132 \text{ V} \\
 Z_{Bas} &= \frac{132}{4,5} = 29 \Omega
 \end{aligned}$$

### 3.2.1 Plusföljdmätning

Transformatorn kopplades enligt figur 3.2.1a. Figur 3.2.1c visar det förenklade ekvivalenta schemat där det framgår att den uppmätta impedansen är  $|Z_{1mät}| = |Z_L + Z_{1M}|$ .

$$\begin{aligned}
 |U_1| &= 132,5 \text{ V} \\
 |I_{1mät}| &= 0,025 \text{ A} \\
 |Z_{1mät}| &= \frac{132,5}{0,025} = 5300 \Omega \\
 |Z_{1mät}|_{p.u.} &= \frac{5300}{29} = 183 \text{ p.u.}
 \end{aligned}$$



Figur 3.2.2: (a) och (b) visar principalschemat samtidigt som (c) och (d) visar det förenklade ekvivalenta schemat vid tomgångsprov respektive kortslutningsprov i nollföljd.

Magnetiseringsimpedansen är tillräckligt stor i jämförelse med lindningsimpedanserna för att betraktas som ett avbrott. Detta kan jämföras med primär- och sekundärsidans impedanser som förväntas bli väldigt små. Transformatorn kopplas om enligt figur 3.2.1b vilket ger  $|Z_{1mät}| = |Z_L + (Z_H \parallel Z_{1M})|$  som följer av figur 3.2.1d.

$$\begin{aligned}
 |U_1| &= 9,9 \text{ V} \\
 |I_{1mät}| &= 4,5 \text{ A} \\
 |Z_{1mät}| &= \frac{9,9}{4,5} = 2,2 \Omega \\
 |Z_{1mät}|_{p.u.} &= \frac{2,2}{29} = 0,076 \text{ p.u.}
 \end{aligned}$$

I detta fall syns det tydligt att magnetiseringsimpedansen kan betraktas som ett avbrott i enlighet med teorin.

### 3.2.2 Nollföljds-mätning

Det intressanta är hur stor magnetiseringsimpedansen kommer att vara vid nollföljd. Transformatorn kopplas enligt figur 3.2.2a och figur 3.2.2c ger att  $|Z_{0mät}| = |Z_L + Z_{0M}|$ .

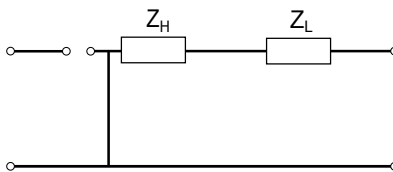
$$\begin{aligned}
|U_0| &= 132,3 \text{ V} \\
|I_{0\text{mät}}| &= 0,142 \text{ A} \\
|Z_{0\text{mät}}| &= \frac{132,3}{\frac{0,142}{3}} = 2795 \Omega \\
|Z_{0\text{mät}}|_{p.u.} &= \frac{2795}{29} = 96,4 \text{ p.u.}
\end{aligned}$$

Som synes beror magnetiseringsimpedansens storlek på transformatorns uppbyggnad. I det här fallet kan  $Z_{0M}$  betraktas som ett avbrott men för en kärn-typ trefastransformator bör detta undvikas.

För ett kortslutningsprov i nollföljd enligt figur 3.2.2b fås  $|Z_{0\text{mät}}| = |Z_L + (Z_H \parallel Z_{0M})|$  enligt figur 3.2.2d.

$$\begin{aligned}
|U_0| &= 3,39 \text{ V} \\
|I_{0\text{mät}}| &= 4,53 \text{ A} \\
|Z_{0\text{mät}}| &= \frac{3,39}{\frac{4,53}{3}} = 2,25 \Omega \\
|Z_{0\text{mät}}|_{p.u.} &= \frac{2,25}{29} = 0,077 \text{ p.u.}
\end{aligned}$$

Enligt förväntningarna blev  $Z_{0\text{mät}}$  mycket mindre än vid tomgångsprov. För att bekräfta teorin att  $Z_{0M}$  kan försummas görs en jämförelse med en Dyn-kopplad transformator. Det förenklade ekvivalenta schemat kan ses i figur 3.2.3.



Figur 3.2.3: Förenklade ekvivalenta schema av en Dyn-kopplad transformator vid tomgångsprov.

$$\begin{aligned}
|U_0| &= 3,37 \text{ V} \\
|I_{0\text{mät}}| &= 4,51 \text{ A} \\
|Z_{0\text{mät}}| &= \frac{3,37}{\frac{4,51}{3}} = 2,24 \Omega \\
|Z_{0\text{mät}}|_{p.u.} &= \frac{2,24}{29} = 0,077 \text{ p.u.}
\end{aligned}$$

I tre stycken enfastransformatorer finns det en närmast perfekt väg för magnetiseringsflödet att sluta sig kring vilket ger låg reluktans och hög impedans. Detta gör det möjligt att betrakta magnetiseringsimpedansen som ett avbrott för både plus-, minus- och nollföljd vilket mätningarna bekräftar.

### 3.3 Översikt

Resultaten från mätningarna sammanställs i tabell 3.1 för att underlätta översikten.

Typ	3-fas				
$Z_{Bas} = 26,1 \Omega$	Plusföljd		Nollföljd		
Koppling	T: Yyn	K: Yyn	T: Yyn	K: Yyn	T: Dyn
$Z_{0mp.u}$	17,6	0,05	0,186	0,052	0,054

(a)

Typ	3 st. 1-fas				
$Z_{Bas} = 29 \Omega$	Plusföljd		Nollföljd		
Koppling	T: Yyn	K: Yyn	T: Yyn	K: Yyn	T: Dyn
$Z_{0mp.u}$	183	0,076	94,6	0,077	0,077

(b)

Tabell 3.1: I tabellerna betyder T = tomgångsprov, K = kortslutningsprov

Skillnaden mellan transformator typerna är stor med avseende på nollföljdsimpedans och kopplingsätt. Som teorin säger beror detta på ifall magnetfältet i järnkärnan har möjlighet att sluta sig eller inte. En enfastransformator erbjuder en ideal väg för fältet vilket leder till hög magnetiseringsimpedans. En trefastransformator av kärn-typ tvingar magnetflödet ut i luften i nollföljd vilket sänker magnetiseringsimpedansen. Om transformatorn eller dess omgivning skulle erbjuda en bra returväg för magnetflödet skulle impedansen rimligtvis öka. Detta provas i nästa avsnitt.

### 3.4 Transformator med kärn

Enligt teorin kommer det magnetiska fältet att tvingas ut i luften i en trefastransformator vid nollföljdsfel. Det innebär att en transformator med kärn kommer att ha en annorlunda nollföljdsimpedans än en identisk transformator utan kärn. För att undersöka vilken påverkan ett kärn kan ha på impedansen

sattes en stålskiva på var sin långsida om transformatorn för att simulera ett transformatorkärl.

Stålskivorna som använts är skrotdelar vilket innebär att de skiljer sig åt i storlek och tjocklek och har möjligen olika magnetisk reluktans men de täcker i huvudsak långsidorna på transformatorn, se figur F.0.1.

Principen för mätuppställningen såg ut som i figur 3.1.2a med resulterande uppmätta impedans  $|Z_{0mät}| = |Z_L + Z_{0M}|$ , där  $Z_L$  är konstant. Mätningen utfördes två gånger, en gång med "kärl" och en gång utan, på sex stycken trefastransformatorer. Det intressanta resultat som erhöles finns i tabell 3.2, fullständiga resultatet från mätningen finns i appendix B.

Transformator serie nr.		469
Utan "kärl"	$ U_0 $ i V	8,72
	$ I_0 $ i A	5,02
	$ Z_{0mät} _{p.u.}$ i p.u.	0,20
Med "kärl"	$ U_0 $ i V	12,85
	$ I_0 $ i A	5,01
	$ Z_{0mät} _{p.u.}$ i p.u.	0,29

Tabell 3.2: Nollföljdsmätningar på transformator 469 med och utan "kärl".

Även om en skillnad i impedansen erhöles är mätonoggrannheten stor. Transformatorn som mätningen utfördes på är gammal och den körs på full strömstyrka. Vridtransformatorn som reglerar spänningen går inte att finjustera så att strömmen 5,00 A mäts upp. Mätmotståndet som används till strömmätning hettas upp och då ändras resistansen. Därför gjordes samma mätning på ytterligare fem transformatorer för att säkerställa att skillnaden är signifikant.

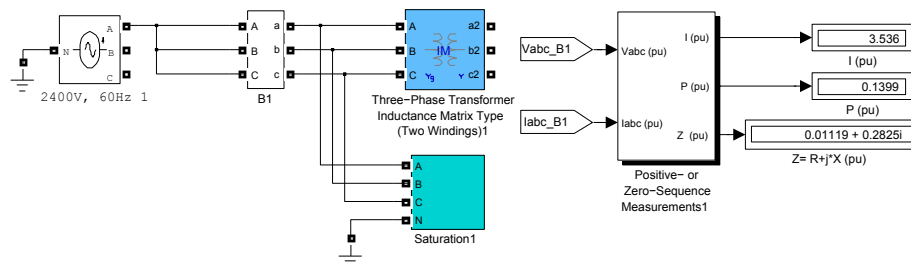
Ett ensidigt hypotestest gjordes i Matlab med nollhypotesen: det finns ingen signifikant skillnad mellan mätningarna. Resultatet från testet visar att skillnaden är signifikant och att nollhypotesen kan förkastas på nivån 95%. Matlabkoden finns i appendix C.

### 3.5 Simulering

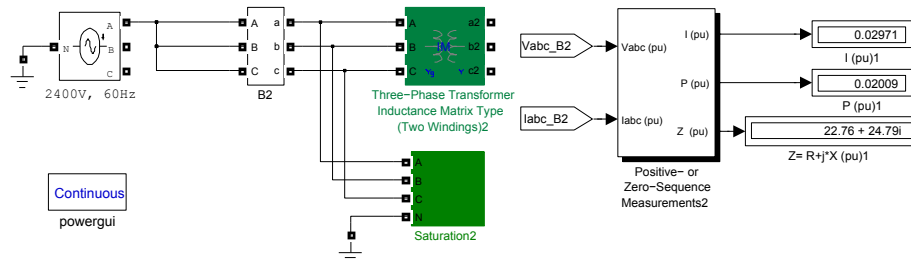
Med anledning av gängse uppfattningen att magnetiseringsimpedansen kan betraktas som ett avbrott i nollföljd för alla transformatorer gjordes en simulering i Matlab. Matlab har ett simuleringsspaket som heter SimPowerSystems med färdiga komponenter för elkrafttillämpningar.

I paketet finns ett antal transformatorkomponenter med olika uppbyggnad vilket gör det lätt att komma igång men även att välja fel transformator. Ett antal av trefastransformatorerna är uppbyggda av tre stycken enfastransformatorer, som därmed skulle visa fel vid simulering av nollföljdsimpedansen. Dock finns det i hjälpdokumentationen en jämförande demo som belyser just detta, samt visar vilka modeller som är lämpliga att använda vid simulering av en trefastransformator av kärn-typ.

Denna demo användes som grund för simulering av nollföljdsimpedansen. Transformatorerna i Matlab kopplades på samma sätt som i figur 3.2.2a. Programmet visas i figur 3.5.1. Den övre kretsen simulerar en trefastransformator av kärn-typ samtidigt som den nedre simulerar en trefastransformator bestående av tre stycken enfastransformatorer.



Circuit 1: Inductance Matrix Type Transformer model simulating a 3-fase core type transformer



Circuit 2: Inductance Matrix Type Transformer model simulating a 3-fase transformer with 3 single fase transformers

Modeling a 225 kVA, 2400V/600V Three-Phase Core-Type Transformer

Figur 3.5.1: Simuleringsprogrammet i Matlab.

I mätblocken till höger visas ström, effekt och impedans i nollföljd i p.u. I figuren har programmet körts och värden visas i rutorna längst till höger. Som väntat är det en kraftig skillnad mellan impedanserna i de båda transformatorkonfigurationerna. Nollföljdsimpedansen för en trefastransformator är  $0,01119 + 0,2825i$  p.u. medan för tre stycken enfastransformatorer är den  $22,76 + 24,79i$  p.u.

SimPowerSystems har versionsnummer 5.4 kombinerat med Matlab version 7.12.0 (R2011a).

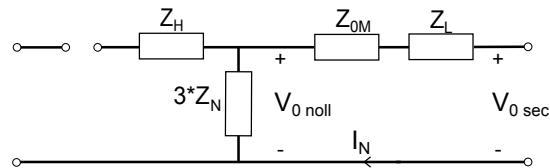
# Kapitel 4

## Metodbeskrivning

### 4.1 Metod

Målet med arbetet är att hitta en metod för att mäta nollföljdsimpedansen på en fullskalig transformator i drift utan att behöva koppla bort den från nätet.

Arbetet har visat att det finns en magnetiseringsimpedans som inte kan försummas i Yyn-kopplade transformatorer. Symmetriska komponenter kan användas för att ta fram ett kopplingschema av en Yyn-kopplad transformator. I nollföljd kommer schemat att se ut som i figur 4.1.1.



Figur 4.1.1: Schema över transformatorns nollföljdsimpedans som kan härledas m.h.a symmetriska komponenter.

Transformatorns nollföljdsimpedans blir  $Z_0 = Z_L + Z_{0M}$ . Alla impedanser kan slås ihop för att bilda den totala nollföljdsimpedansen i systemet.

Vanligtvis mäts transformatorns nollföljdsimpedans i fabriken genom ett tomgångsprov så som i kapitel 3 men där även fasvinkel tas med.

För att mäta transformatorns nollföljdsimpedans i drift behöver en nollföljds-spänning lägga sig över transformatorn. Detta sker när transformatorn blir sned-

belastad. Vid ett enfasigt jordfel läggs ett spänningsfall i nollföljd över transformatorn vilket kan då mätas. Mäts medelvärden av de komplexa fasspänningarna fås nollföljdsspänningen efter transformatorn enligt teorin om symmetriska komponenter. Mäts samtidigt spänningen i nollpunkten fås nollföljdsspänningen innan transformatorn. Skillnaden mellan dessa ger nollföljdsspänningsfallet över transformatorn. Strömmen i nollpunkten fås enkelt genom att mäta spänningsfallet över ett mätmotstånd i serie med nollpunkten.

För att inte koppla bort transformatorn från nätet kan mätutrustning sättas på plats och registrera de önskade punkterna. Denna utrustning bör sitta där tills ett enfasigt jordtagsfel inträffar. Nackdelen med den här metoden är att ett fel inte nödvändigtvis inträffar inom en rimlig tid.

## 4.2 DLAB

Den massiva kabelfiering av distributionsnätet som skett efter stormarna Per, 2007, och Gudrun, 2005, har skapat vissa problem i nätet som behöver belysas. Därför har Distribution LABORatory, DLAB, skapats. DLAB är ett samarbete mellan E.ON och LTH med målsättningen att skapa både teoretisk och praktisk kunskap inom området. I det här arbetet används ledningsmodellerna samt mät- och styrutrustningen i DLAB för att hitta en metod att mäta nollföljdsimpedansen i Yyn-kopplade transformatorer.

### 4.2.1 Ledningsmodell

Ledningsmodellen finns i appendix E där även mätpunkterna finns utritade med tillhörande plintnummer. En variabel matningstransformator används för att reglera spänningsnivån i modellen. En 1:1 huvudtransformator är ansluten till två luftledningsmodeller och två kabelmodeller. I huvudtransformatorns nollpunkt finns variabel nollpunktsutrustning ansluten samt komponenter för ströminjicering. I slutet av varje ledningsmodell kan ett variabelt jordfelsmotstånd anslutas för att genom den skapa ett jordfel. Jordfelsmotståndet består av åtta seriekopplade motstånd som kan förbikopplas och på så sätt varieras i diskreta steg från noll felresistans till  $4069 \Omega$ .

### 4.2.2 Mät- och styrutrustning

Utrustning som använts för mätningar

- En persondator med Microsoft Windows XP



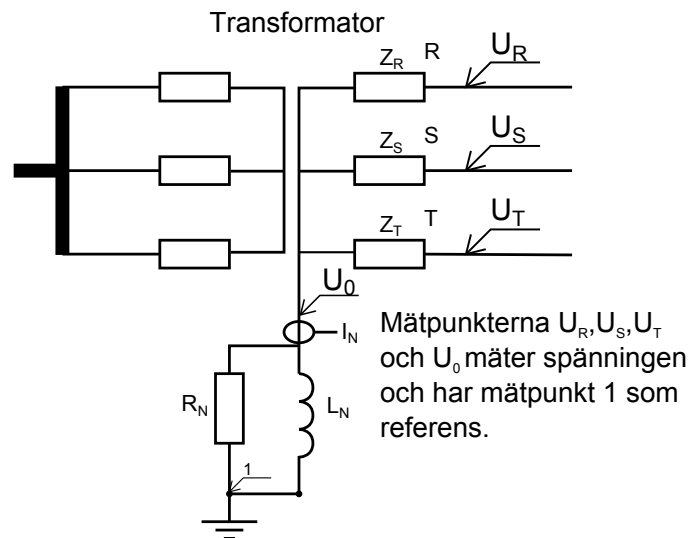
- National Instruments cDAQ-9172 hållare
  - 6 st NI 9239 analog input
  - 1 st NI 9264 analog output
  - 1 st NI 9477 digital output

På datorn körs en utvecklingsmiljö för provprogrammet LabVIEW från National Instruments. LabVIEW används för att samla in data från mätpunkterna i ledningsmodellen, behandla denna data och presentera den för användaren samt att automatisera mätningarna. För att presentera mätningarna och göra jämförelser används MathWorks MATLAB.

### 4.2.3 Utrustning för mätning på fullskalig transformator

DLAB har utvecklat en mätbox som är mer lämpad att sättas ut i en station än en persondator. Mätboxen består utav

- National Instruments compactRIO enhet med 8 moduler
- LEM-strömsensorer
- 3G länk
- Applikationsmjukvara från DLAB AB



Figur 4.2.1: Mätpunkter på transformator för fältmätning.

DLAB-mätbox kan sättas ut i en station under en längre tid där den kan registrera störningar samt för mätningen viktiga punkter. Mätpunkterna är: fasspänningar på transformatorns nedsida, spänningen i nollpunkten samt strömmen i nollpunkten enligt figur 4.2.1.

#### **4.2.4 Mätutrustning beloppsmätning**

Vid beloppsmätning används multimetrar och mätmotstånd utplacerade enligt appendix D.

# Kapitel 5

## Resultat

### 5.1 Mätningar med mätdator

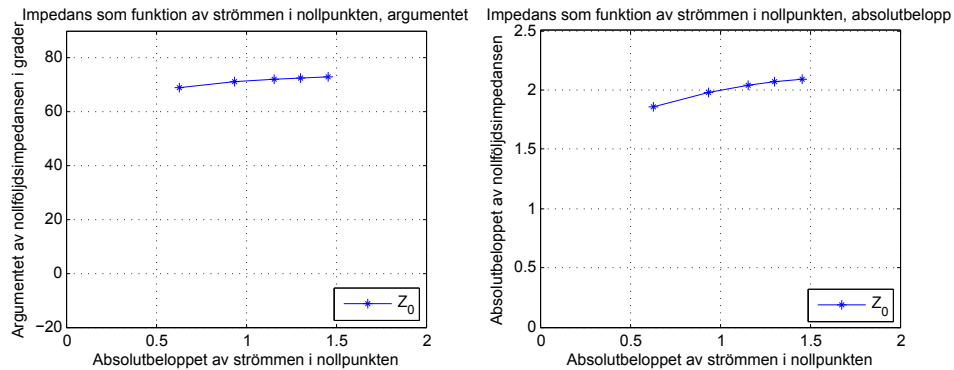
Modellen för ett litet distributionsnät med tillhörande programvara som fanns sedan tidigare i DLAB användes som grund i arbetet. För att möjliggöra mätning av impedansen anpassades programvaran en del. Schema över ledningsmodellen finns i appendix E. Vilka punkter som utrustningen mäter framgår av samma schema.

De intressanta punkterna för mätning av nollföljdsimpedansen är spänningarna på transformatorns sekundärsida, spänningen i nollpunkten samt strömmen i nollpunkten. Med Ohms lag fås

$$Z_0 = \frac{V_{0_{sec}} - V_{0_{noll}}}{\frac{I_N}{3}} \quad (5.1.1)$$

där  $V_{0_{sec}}$  är nollföljdsspänningen på transformatorns sekundärsida,  $V_{0_{noll}}$  är nollföljdsspänningen i nollpunkten och  $I_N$  är strömmen i nollpunkten.

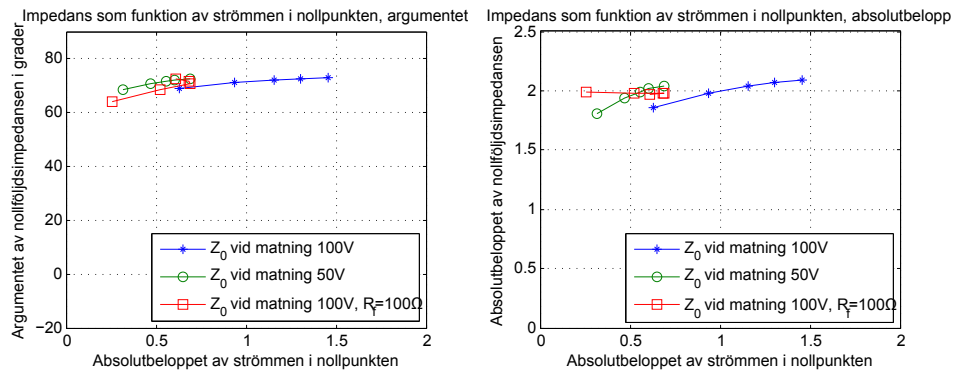
Mätningen automatiserades i programvaran för att underlätta förändring av parametrar. Spolen stämades av mot nätet manuellt och ett fel tillkopplades på en fas. Mätning av parametrarna, som sparades, och beräkningar genomfördes. Spolens märkström ändrades och en ny mätning genomfördes. Fem mätningar genomfördes i en serie där spolens märkström ändrades från avstämd, ca 2 A, till ca 6 A. Högre strömmar riskerar att orsaka skada på modellen. Felmotståndet är satt till noll ohm om inget annat anges.



Figur 5.1.1: Argumentet och absolutbeloppet av transformatorns nollföljdsimpedans.

Resultatet från mätningen kan ses i figur 5.1.1 där den vänstra grafen visar nollföljdsimpedansens vinkel och den högra grafen visar dess absolutbelopp som funktion av strömmen i nollpunkten. Felmotståndet var satt till noll ohm och matningsspänningen till 100 V. Tas impedansens medelvärde vid alla mätpunkter fås  $Z_0 = 0,621 + 2,00i \Omega = 2,09 \Omega \angle 72^\circ$ .

Liten förändring av nollföljdsimpedansen skedde vid ökning av strömmen i transformatorns nollpunkt.



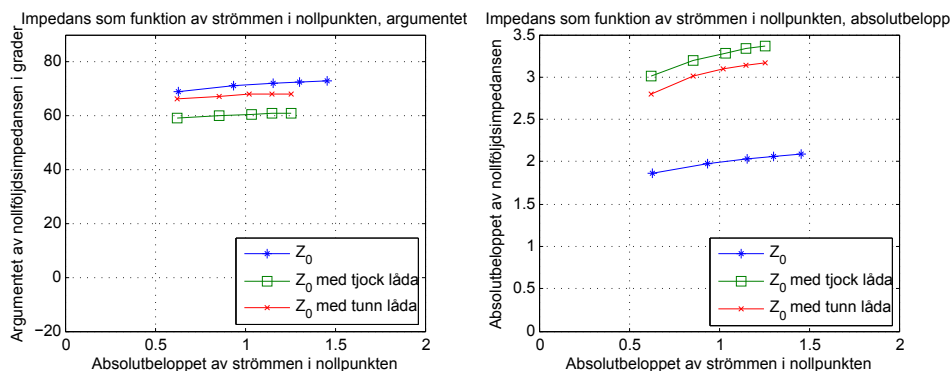
Figur 5.1.2: Figuren visar mätning av nollföljdsimpedansen vid 100 V matningsspänning (blå stjärnor), 50 V matningsspänning (gröna cirklar) och vid 100 V matningsspänning med  $R_f = 100 \Omega$  (röda kvadrater).

Spänningen sänktes till 50 V och en mätserie utfördes. För att utreda vilken inverkan felmotståndet har på nollföljdsimpedansen sattes felmotståndet till  $100 \Omega$  i syfte att minska felströmmen samtidigt som matningsspänningen åter höjdes till 100 V och en ny mätserie utfördes. Resultatet för sänkt matningsspänning och höjt felmotstånd visas i figur 5.1.2.

Även om strömmen i nollpunkten halverades visas ingen stor förändring av nollföljdsimpedansen.

Beloppsmätningar i avsnitt 3.4 visar att omgivningen har signifikant inverkan på nollföljdsimpedansen. För att illustrera dess inverkan byggdes två “transformatorkärl” i stål med olika tjocklek. Dessa “transformatorkärl” kan enkelt hängas på transformatorn och får då direkt kontakt med kärnan. Mätningar gjorda med lådorna påhängda visas i figur 5.1.3.

Enligt avsnittet ska nollföljdsimpedansen öka om den magnetiska reluktansen minskar d.v.s magnetfältet har mer järn att sluta sig igenom. Detta syns tydligt i figur 5.1.3 där impedansen närmast fördubblas när “transformatorkärl” används.



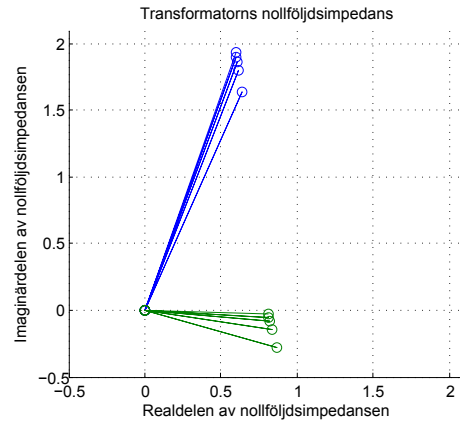
Figur 5.1.3: Figuren visar ordinarie mätning (blå stjärnor) samt mätning med två olika tjocklekar på “transformatorkärl” (gröna kvadrater och röda kryss).

Eftersom nyare transformatorer innehåller en utjämningslindning för att minska nollföljdsimpedansen är det intressant att se hur dessa transformatorer förhåller sig till Yyn-kopplade transformatorer av kärn-typ. Då labb-transformatorn har fyra lindningar är det möjligt att Yyn(d)-koppla den. Resultatet kan ses i figur 5.1.4. Nollföljdsimpedansens blir närmast enbart resistiv och mycket mindre för en transformator med en utjämningslindning.

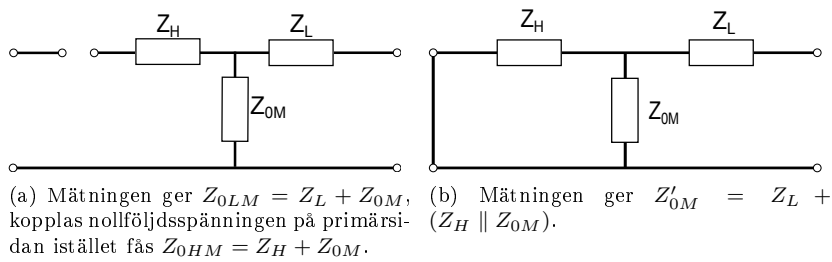
I de nät där permanent jordning saknas kan en nollpunktsbildare användas. Vid jordfel kommer inget, eller ett väldigt litet, nollföljdsspänningsfall att lägga sig över nollpunktsbildaren vilket inte går att mäta med den föreslagna metoden. Detta är att vänta då en av fördelarna av att använda en nollpunktsbildare är den låga nollföljdsimpedansen.

## 5.2 Manuell mätning

För att kunna jämföra metoden med det sanna värdet av nollföljdsimpedansen utfördes tomgångsmätning på transformatorn. Transformatorns magnetiserings-



Figur 5.1.4: Jämförelse mellan en Yyn-kopplad (blå stjärnor) och en Yyn(d)-kopplad (gröna fyrkanter) transformator.



Figur 5.2.1

impedans mättes även enligt [1] s. 249. Mätningarna är gjorda med mätdatorn vilket innebär att även fasvinkeln mättes. Mätning av magnetiseringsimpedans utfördes som i avsnitt 3.1.2 med tillkomsten av tomgångsmätning på primärsidan.

Från figuren 5.2.1a fås

$$\frac{U}{I} = Z_{0LM} = Z_L + Z_{0M} \quad (5.2.1)$$

vilket är  $\frac{Z_0}{3}$ . Kopplas nollföljdsspänningen på primärsidan istället fås

$$\frac{U}{I} = Z_{0HM} = Z_H + Z_{0M} \quad (5.2.2)$$

och från figur 5.2.1b fås

$$\frac{U}{I} = Z'_{0M} = Z_L + (Z_H \parallel Z_{0M}) = Z_L + \frac{Z_H Z_{0M}}{Z_H + Z_{0M}} \quad (5.2.3)$$

Skrivs 5.2.1 och 5.2.2 om till

$$Z_L = Z_{0LM} - Z_{0M} \quad (5.2.4)$$

$$Z_H = Z_{0HM} - Z_{0M} \quad (5.2.5)$$

och sätts in i 5.2.3 fås

$$Z'_{0M} = Z_{0LM} - Z_{0M} + \frac{(Z_{0HM} - Z_{0M}) Z_{0M}}{Z_{0HM} - Z_{0M} + Z_{0M}} \quad (5.2.6)$$

Förlängs ekvationen med  $Z_{0HM}$  och därefter förkortas fås

$$Z_{0M}^2 = Z_{0HM} (Z_{0ML} - Z'_{0M})$$

tas roten ur fås magnetiseringsimpedansen

$$Z_{0M} = \sqrt{Z_{0HM} (Z_{0ML} - Z'_{0M})} \quad (5.2.7)$$

Tre mätningar gjordes. Vid första mätningen var strömmen i transformatorns nollpunkt ca 2,2 A. Mätvärden som erhöles

$$\begin{aligned} Z_{0LM} &= 0,1935 + 0,6821i \Omega \\ Z_{0HM} &= 0,1984 + 0,7485i \Omega \\ Z'_{0M} &= 0,2548 + 0,0828i \Omega \\ Z_0 &= 0,5805 + 2,0462i \Omega \end{aligned}$$

Vid den andra mätningen höjdes strömmen till ca 3,7 A. Mätvärden som erhöles

$$\begin{aligned} Z_{0LM} &= 0,1958 + 0,6921i \Omega \\ Z_{0HM} &= 0,2028 + 0,7564i \Omega \\ Z'_{0M} &= 0,2568 + 0,0823i \Omega \\ Z_0 &= 0,5874 + 2,0764i \Omega \end{aligned}$$

Vid den tredje mätningen var strömmen ca 5,3 A. Mätvärden som erhöles

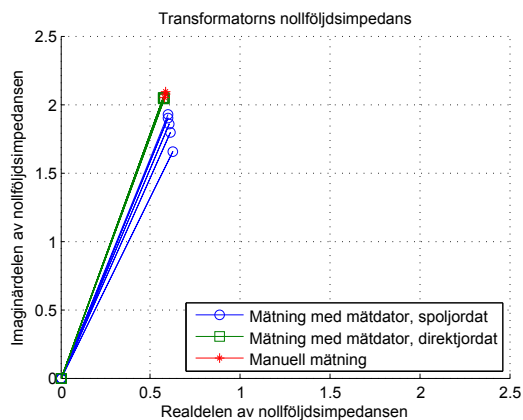
$$\begin{aligned} Z_{0LM} &= 0,1940 + 0,6973i \Omega \\ Z_{0HM} &= 0,2028 + 0,7616i \Omega \\ Z'_{0M} &= 0,2579 + 0,0825i \Omega \\ Z_0 &= 0,5819 + 2,0918i \Omega \end{aligned}$$

Detta insatt i ekvation 5.2.7 ger vid ca 2,2 A, 3,7 A respektive vid 5,3 A

$$\begin{aligned} Z_{0M_{2.2}} &= 0,0659 + 0,6851i = 0,6883 \Omega \angle 84,5049^\circ \\ Z_{0M_{3.7}} &= 0,0681 + 0,6941i = 0,6975 \Omega \angle 84,3931^\circ \\ Z_{0M_{5.3}} &= 0,0667 + 0,6991i = 0,7022 \Omega \angle 84,5470^\circ \end{aligned}$$

Den föreslagna mätmetoden i föregående avsnitt bestämde  $Z_0$  till  $0,621 + 2,00i \Omega = 2,09 \Omega \angle 72,72^\circ$ . Skillnaden mellan manuell mätning och mätning i drift visas i figur 5.2.2. Vad som orsakar skillnaden går bara att spekulera i men en möjlig orsak är implementationen av den variabla spolen. Den är implementerad





Figur 5.2.2: Jämförelse mellan manuell mätning och automatisk mätning på spoljordad och direktjordad trefastransformator.

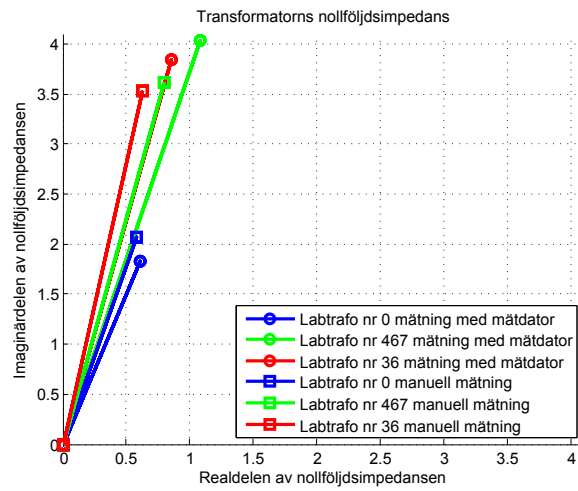
med en vridtransformator med sekundärsidan kopplad till en fast spole och primärsidan kopplad till nollpunkten. Spolens impedans varieras genom att ändra vridtransformatorns omsättning.

Görs mätningen på en direktjordad transformator, vilket ökar strömmen i nollpunkten, med den föreslagna mätmetoden fås  $Z_0 = 0,5730 + 2,0459i \Omega = 2,1246 \Omega \angle 74,3538^\circ$ , vilket syns i figur 5.2.2. Även detta indikerar svagt strömberoende, främst för den imaginära komponenten. Dock är resultatet betydligt närmare den manuella mätningen.

### 5.3 Verifiering

Mätningar utfördes även på andra transformatorer för att verifiera metoden. Mätning i drift genomfördes vid 100 V matningsspänning, ingen felresistans,  $R_f = 0 \Omega$ , samt spoljordning.

Transformatorer som användes var 2 kVA, kopplade så att relationen mellan fasspänningarna är 220/133 V. Resultatet syns i figur 5.3.1.



Figur 5.3.1: Transformatorns medelnollföljdsimpedans mätt i drift (cirklar) och vid manuell mätning (stjärnor). Tre olika transformatorer användes.

Figur 5.3.1 visar att felet vid mätning av transformatorns nollföljdsimpedans varierar från transformatorn till transformator och metoden är därför opålitligt.

## Kapitel 6

# Slutsats och diskussion

Strömmen i nollpunkten sänktes med såväl sänkt matningsspänning, men även genom att höja jordfelsresistansen. Mätningar visar att nollföljdsimpedansen är svagt beroende av strömmen i nollpunkten vid spoljordning. Vid direktjordning och vid manuell mätning försvinner strömberoendet.

Det som påverkar nollföljdsimpedansen mest är transformator kärlet. Detta tyder på att en stor del av nollföljdsflödet tvingas ut i luften och kärlet vid jordfel. Det betyder också att impedansen kan påverkas av fysiska objekt utanför transformatorn. Av den här anledningen bör transformatorer provas på plats efter installation.

Mätresultaten för transformatorns nollföljdsimpedans ger viss osäkerhet som gör det svårt att dra definitiva slutsatser. Resultat från transformator till transformator varierar vilket gör det svårt att extrapolera ett resultat. Varför det finns en diskrepans mellan resultaten och vad som mer kan inverka på nollföljdsimpedansen från ledningsmodellen är något för fortsatta arbeten. Det kan bero på implementationen av spoljordningen, samplingen och behandling av mätsignaler eller på själva metoden.

Genom att mäta på fullskaliga transformatorer och spara rådata istället skulle inverkan från distributionsmodellens spoljordning kringgås men även signalbehandlingen kunna verifieras.

Den viktiga slutsatsen är att nollföljdsimpedansen hos Yyn-kopplade transformatorer inte kan försummas i alla situationer så som alltför många läroböcker antyder.

# Litteraturförteckning

- [1] J. Lewis Blackburn. *Symmetrical Components for Power Systems Engineering*. CRC Press, 1 edition, June 1993.
- [2] J.Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, and Thomas J. Overbye. *Power Systems Analysis and Design*. Nelson Engineering, international ed of 4th revised ed edition, May 2007.
- [3] C. Hermansson and J. Olsson. Nollföljdsmodellering av transformatorer - beräkningar av följdproblem vid ökad kablifiering på mellanspanningsniva. *Institutionen för Energi och Miljö Chalmers Tekniska Högskola*, 2007.
- [4] J. Persson. Jordfelsproblematik i icke direktjordade system. *Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, CODEN: LUTEDX/(TEIE-5205)/1-117*, 2005.
- [5] Stanley Austen Stigant, Arthur Charles Franklin, and Harold Morgan Lacey. *The J. & P. Transformer Book, a Practical Technology of the Power Transformer, Ninth edition. Revised and extended by S. A. Stigant and A. C. Franklin. With illustrations*. 1961.
- [6] C.F. Wagner and Robley D. Evans. *Symmetrical Components*. McGraw-Hill Education, December 1933.
- [7] J. Wang and R. Lascu. Zero sequence circuit of three-legged core type transformers. In *Protective Relay Engineers, 2009 62nd Annual Conference for*, pages 188–213, 2009.
- [8] R. Willheim and Malcolm Waters. *Neutral Grounding in High-voltage Transmission*. Elsevier Science Ltd, December 1956.

# Bilaga A

## En introduktion till symmetriska komponenter

Symmetriska komponenter används mycket i elkraft eftersom det förenklar beskrivningen och analysen av balanserade system, t.ex trefassystemet, som arbetar under obalans vid exempelvis fas till jord fel. Ett trefassystem är symmetriskt och balanserat och representeras av tre vektorer. Vid fel blir systemet obalanserat och svårt att analysera.

En linjärtransformation förvandlar ett komplext problem till tre separata system av plus-, minus- och nollföljdskomponenter som endast är sammankopplade vid obalans. De markeras av index 1, 2 respektive 0.

### **Plusföljd**

Plusföljd definieras som ett idealt balanserat system, tre vektorer som är fasförskjutna  $120^\circ$  från varandra med samma amplitud som fasspänningen. Enligt konventionen är moturs positiv rotationsriktning, därav namnet. Max spänningsnivå nås då i ordningen fas a, fas b och fas c.

### **Minusföljd**

Minusföljd definieras som plusföljden men med negativ rotationsriktning d.v.s vektorerna roterar medurs och max spänningsnivå nås då i ordningen fas a, fas c och fas b.

## Nollföljd

Tre vektorer med samma amplitud och fasvinkel definierar nollföljd.

Kombineras plus-, minus- och nollföljden kommer de att representera det obalanserade systemet. Det kan verka ologiskt att en transformation från tre vektorer till nio vektorer är en förenkling av problemet. Förenklingen ligger i att ett obalanserat system blir tre symmetriska system som kan analyseras oberoende av varandra. En ytterligare fördel är att komponenterna representerar ett bättre kriterium av den kontrollerande faktorn. Exempelvis är fas till jordfel och andra jordfel nära associerade med nollföljdskomponenter.

Transformation mellan faskomponenter och symmetriska komponenter sker med hjälp av en transformationsmatris,

$$\begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_0 \\ Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix}, \text{ där } a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (\text{A.0.1})$$

$Q_{abc}$  är faskomponenter medan  $Q_{012}$  är de symmetriska komponenterna. Transformation från symmetriska komponenter till faskomponenter sker genom vänstermultiplikation med den inverterade transformationsmatrisen.

$$\begin{bmatrix} Q_0 \\ Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.0.2})$$

Nollföljdsströmmen och -spänningen blir då

$$V_0 = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \quad (\text{A.0.3})$$

$$I_0 = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) \quad (\text{A.0.4})$$

Ekvationerna A.0.3 och A.0.4 visar att nollföljdsströmmen och -spänningen är noll vid symmetrisk drift. Först vid fel och asymmetri kommer det att flyta någon nollföljdsström och en nollföljdsspänning kommer att bildas.

## Bilaga B

# Mätresultat

Fullständiga mätningar och uträkningar av  $Z_{0mät}$  som ligger till grund för uträkningar av konfidensintervall och hypotestest. Förklaring av beteckningarna och mätpunkternas placering hittas i figur D.2.1a i appendix D.

Transformator serie nr.	36	101	467	468	469	474
Utän "kärn"						
$ U_0 $ [V]	8,17	15,43	8,46	8,20	8,72	7,85
$ U_{I0} $ [V]	53,0	52,7	53,0	52,5	52,7	53,3
$R_{I0}$ [ $\Omega$ ]	10,6	10,5	10,6	10,6	10,5	10,6
$ I_0 $ [A]	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
$ Z_{0mät} $ [ $\Omega$ ]	4,9	9,3	5,1	5,0	5,2	4,7
$ Z_{0mät} _{p.u.}$ [p. u.]	0,19	0,35	0,19	0,19	0,20	0,18
Med "kärn"						
$ U_0 $ [V]	11,59	22,43	12,91	12,74	12,85	11,98
$ U_{I0} $ [V]	53,1	53,3	52,9	52,9	53,15	53,5
$R_{I0}$ [ $\Omega$ ]	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,7
$ I_0 $ [A]	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
$ Z_{0mät} $ [ $\Omega$ ]	6,9	13,4	7,8	7,7	7,7	7,2
$ Z_{0mät} _{p.u.}$ [p. u.]	0,27	0,51	0,30	0,29	0,29	0,28

Tabell B.1: Fullständigt resultat av mätningarna av nollföljdsimpedansen med och utan "transformator kärn".  $Z_{Bas}$  för samtliga transformatorer är 26,1  $\Omega$ .

## Bilaga C

# Hypotestest

Matlabkod som utför ett hypotestest på datan i appendix B.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Hypotestest
%
% Nollhypotes: Nollföljdsimpedansen hos en transformator
%               utan kärnl ar lika med nollföljdsimpedansen
%               hos en trafo med kärnl.
%
% Mothypotes: Z_0_pu med kärnl > Z_0_pu utan kärnl
%
% Jasmin Selimovic 09-10-2011
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Nollföljdsimpedansen i pu hos en trafo utan kärnl
t = [0.19 0.35 0.19 0.19 0.20 0.18];

% Nollföljdsimpedansen i pu hos en trafo med kärnl
tt = [0.27 0.51 0.30 0.29 0.29 0.28];

% Hypotestest
% tt,t,alpha,hoger test
% h=0 - kan ej forkasta nollhypotes,
% h=1 - forkasta nollhypotes
% sig - significansniva
% ci - konfidensintervall
[h, sig, ci] = ttest2(tt,t,0.05,'right')
```

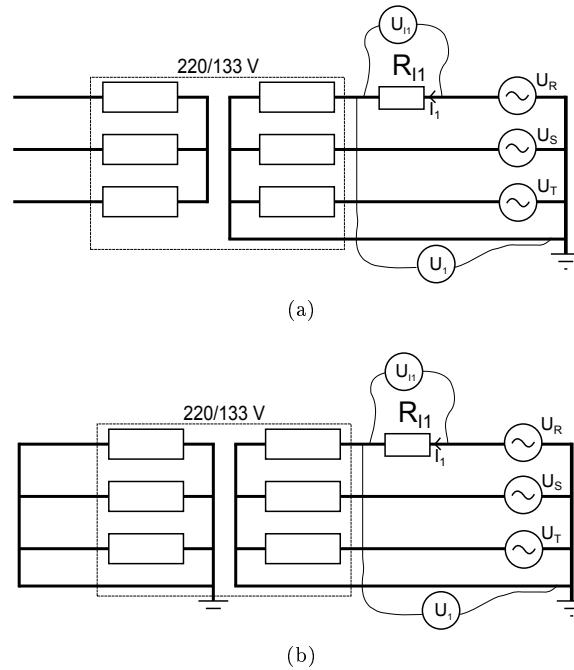


## Bilaga D

# Detaljerat schema av mätuppställningen

### D.1 Plusföljd

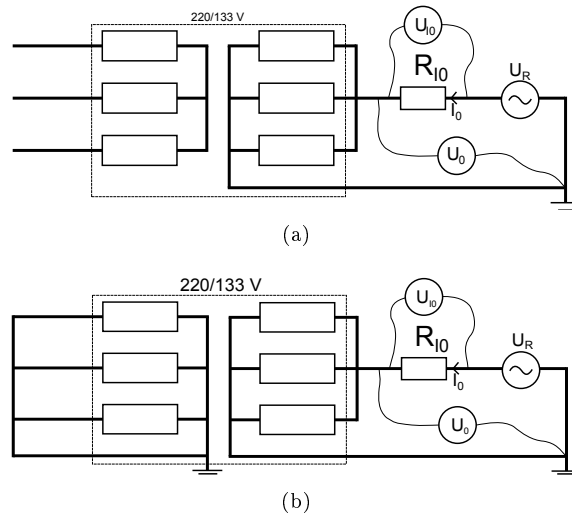
Spänningen reglerades med en vridtransformator som reglerar alla faserna samtidigt och kontrolleras med en voltmeter. Spänningsmätningen över  $R_M$ , vilket med Ohms lag blir strömmätning, ger strömmen som flyter in i transformatorn. Båda figurerna i D.1.1 visar plusföljdsmätning, D.1.1a vid tomgångsprov och D.1.1b vid kortslutningsprov.



Figur D.1.1: Mätupställning för plusföljdsättning, (a) vid tomgångsprov och (b) vid kortslutningsprov. Fasspänningarna  $U_R$ ,  $U_S$  och  $U_T$  är variabla i området 0 till 220 V.

## D.2 Nollföljd

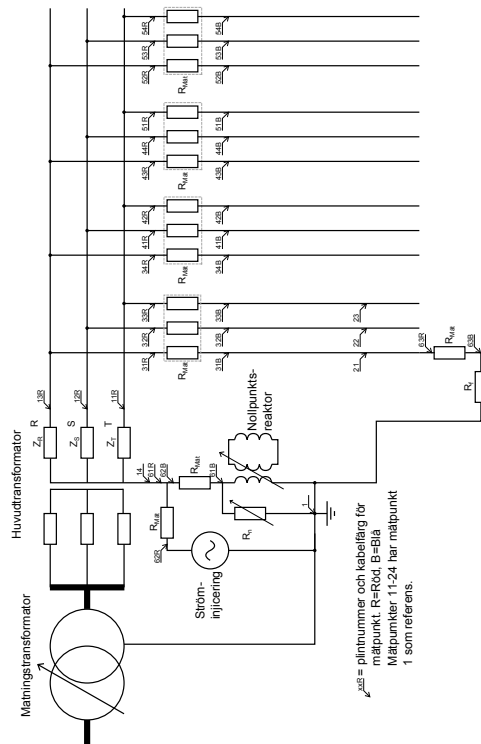
Samma vridtransformator användes för att reglera spänningen, som vid plusföljdsättning. Transformatorn som mätningarna utfördes på kopplades om så att den matas av en fas, dvs ingen fäsförskjutning mellan benen. Spänningsmätningen över  $R_M$ , vilket med Ohms lag blir strömmätning, ger tre gånger strömmen som flyter in i varje transformatorben. Båda figurerna D.2.1 visar nollföljdsättning, figur D.2.1a vid tomgångsprov och figur D.2.1b vid kortslutningsprov.



Figur D.2.1: Mätuppställning för nollföljds-mätning, (a) vid tomgångsprov och (b) vid kortslutningsprov. Fasspänningen  $U_R$  är variabel i området 0 till 220 V.

# Bilaga E

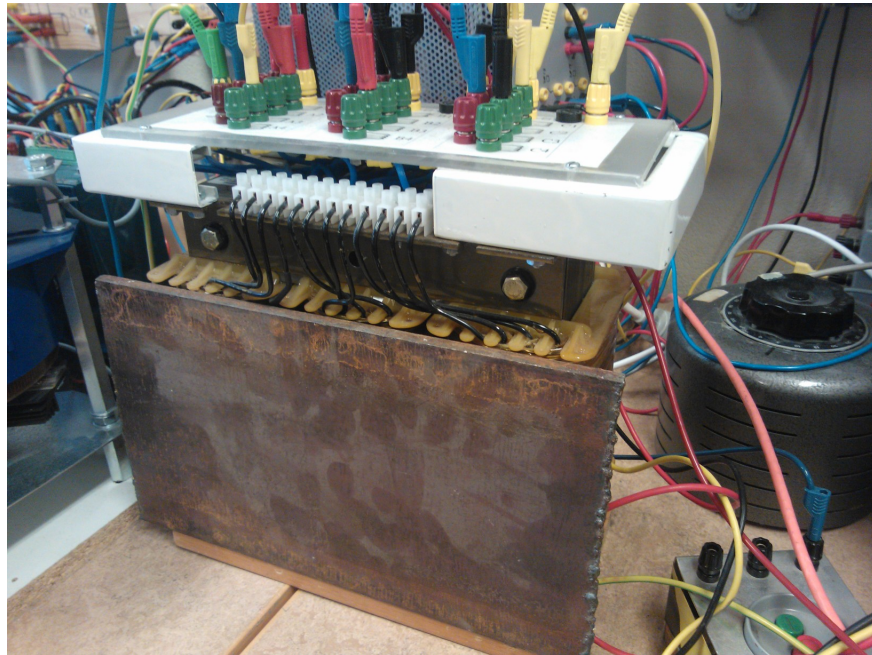
## Schema över labbuppställningen



Figur E.0.1

## Bilaga F

### Bilder



Figur F.0.1: Visar en trefas transformator av kärn-typ med sida täckt av en stål skiva.

