

Verifieringsmätningar av transformator för lokal kompensering

En del av ett laboratorium för studier av kablifierade elnät

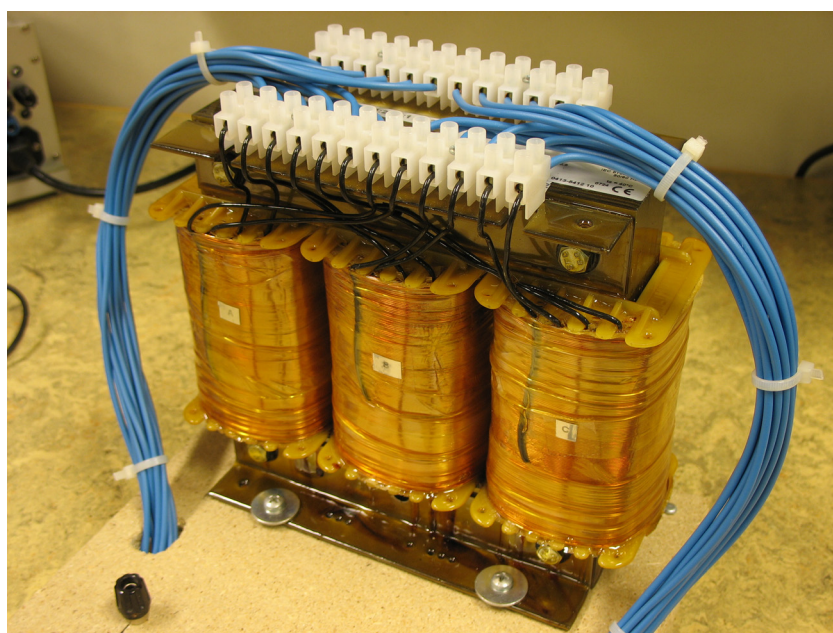


Victor Bagge

Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation
Lund University

Verifieringsmätningar av transformator för lokal kompensering

En del av ett laboratorium för studier av kablifierade elnät



Examensarbete
Elektroteknikprogrammet, 300 hp

Victor Bagge

Institutionen för Industriell Elektroteknik och Automation IEA
Lunds Tekniska Högskola LTH

Lund, december 2007



Sammanfattning

Just nu pågår en omfattande kablfiering av landsbygdsnät på många håll för att bl.a. öka tillförlitligheten. Att ersätta luftledning med markkabel innebär att den kapacitiva jordslutningsströmmen ökar och behovet av distribuerad/lokal kompensering blir därmed större för att jordfelskydd ska kunna fungera korrekt.

Detta är ett relativt nytt område eftersom man tidigare har haft många och korta kablar i t.ex. städer och i detta fall handlar det istället om färre men längre ledningar. Ett behov av ett laboratorium för test av kabelnät har uppstått som ett steg mellan datorsimuleringar och fältprov i riktiga nät (vilka ofta är tidskrävande och dyra att utföra).

Examensarbetet syftar till att undersöka en nedskalad distributionstransformator för lokal kompensering utifrån dess förmåga att spegla den verkliga förebildens egenskaper. Detta för att resultat från försöken i laboratoriet ska vara relevanta och indikera vad man kan vänta sig i det riktiga systemet. Dessutom är rapporten tänkt som stöd för fortsatt arbete med transformatorn och laborationssystemet.

Förebilden är distributionstransformatorn Transfix Ecobloc eftersom det är en sådan som har installerats av E.ON i Stenestad och fältmätningar har utförts på den. Märkeffekten är 100 kVA och omsättningen är 11 kV / 400 V.

Den nedskalade transformatorn har märkeffekten 500 VA och är av typen ZNdyn11. Samtliga lindningar är identiska för att öka flexibiliteten vilket innebär att omsättningen är 380 V / 220 V som en följd av Z-kopplingen.

Ett antal mätningar vid stationära förhållanden har gjorts, både enklare beloppsmätningar och mätningar med fasvinkel. Mätningar har gjorts även med andra kopplingsarter än den tilltänkta för att jämföra egenskaper.

Tomgångsströmmen är relativt låg, speciellt med tanke på det lilla formatet. Plusföljds- och nollföljdsimpedanserna var också jämförbara med förebilden. Mätningar med last visar på att förlusterna är något högre relativt sett men ändå i lämplig storleksordning. Slutsatsen blir att transformatorn är väl utformad för sitt syfte.

Ett antal idéer om fortsatta studier och användning av transformatorn presenteras även i rapporten. Transformatorn kan undersökas ytterligare t.ex. genom mätningar av transientförlopp eller så kan arbetet med laboratoriet fortsätta genom att komplettera transformatorn med ledningsmodeller.

Verification measurements of a transformer for local compensation

A part of a laboratory for studies of cabled power networks

Abstract

At the moment, an extensive replacement of overhead power lines with power cables on the countryside is carried out in many places. A consequence of this is that the capacitive earth fault current is increased. To make protection equipment work as desired and to fulfill legal regulations there is a need of distributed compensation.

This is a fairly new area since the former experience is from numerous but short cables (e.g. in a city) but in this case the cables are fewer but longer. Therefore a need of a laboratory for testing cable networks has rose to be used as a step between computer simulations and field tests (which often are time consuming and expensive).

The purpose of this master thesis is to do research on a scaled-down distribution transformer designed for local compensation to investigate its ability to imitate a real distribution transformer. This is because the results from the lab should be relevant and indicate what to expect in the real network. Besides, the report is supposed to act as support for the continued work with the transformer and the lab system.

The model is the distribution transformer Transfix Ecobloc since the power company E.ON has installed this in the Stenestad network and field tests has been carried out there. Rated power is 100 kVA and the ratio is 11 kV / 400 V.

The scaled-down transformer has a power rating of 500 VA and has a ZN_{dyn}11 connection type. All windings are identical to increase flexibility which means it has a ratio of 380 V / 220 V as a consequence of the zig zag-connection.

A number of measurements has been carried out, both more simple magnitude measurements and measurements including phase angle. Different connection configurations have been used besides the default one to compare characteristics.

The no-load current is relatively small, especially when considering the small format of the transformer. Also the positive and zero sequence impedances are comparable with the original. Measurements with load indicates that the losses are a bit higher relatively speaking but still in appropriate order. The conclusion is that the transformer is well designed for its purpose.

A number of ideas for continued studies and use of the transformer are also presented in the report. The transformer can be studied more, e.g. by doing transient tests, or the work with the lab can continue by complementing the transformer with cable models.

The report is written in Swedish.

Tillkännagivande

Detta examensarbete har utförts på Institutionen för Industriell Elektroteknik och Automation (IEA). Jag skulle vilja tacka min handledare Magnus Akke för all oumbärlig hjälp under arbetets gång.

Dessutom vill jag rikta ett tack till Johan Björnstedt och Anna Guldbrand m.fl. på institutionen för praktisk hjälp och värdefulla synpunkter. Jag vill också tacka Charlotte Klippel som har varit min kontaktperson på E.ON.

Slutligen vill jag tacka min familj för allt stöd under min utbildning.

Arbetet avslutar min civilingenjörsutbildning inom elektroteknik vid Lunds Tekniska Högskola.

Lund, december 2007

Victor Bagge

© 2007 Victor Bagge

Institutionen för Industriell Elektroteknik och Automation (IEA)
Lunds Universitet
Box 118
SE-221 00 Lund

Telefon 046-222 92 90

Omslagsbild: Laborationstransformator
Fotograf: Victor Bagge, 2007-12-05

Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	2
Abstract	3
Tillkännagivande	4
Innehållsförteckning	5
1 Inledning.....	7
1.1 Bakgrund	7
1.2 Syfte	8
1.3 Motivering	9
1.4 Disposition	9
2 Beskrivning och specifikationer transformator.....	10
2.1 Transfix Ecobloc	10
2.2 Kravspecifikation för tillverkning	10
2.2.1 Översiktlig specifikation	10
2.2.2 Tänkt användning.....	11
2.3 Den färdiga transformatorn	11
2.3.1 Specifikationer	11
2.3.2 Praktiska förbättringar	13
3 Beloppsmätningar.....	14
3.1 Enfasmatning av enskilda lindningar	14
3.1.1 Lindningsresistanser	14
3.1.2 Enfasigt tomgångsprov	15
3.1.3 Enfasig matningsspänning och kortslutning av en lindning	16
3.1.4 Enfasig matningsspänning och kortslutning av flera lindningar	18
3.2 Trefasigt tomgångsprov.....	21
3.3 Trefasigt kortslutningsprov (plusföljds-mätning)	22
3.4 Mätningar vid Z-koppling	23
3.4.1 Tomgångsmätning.....	24
3.4.2 Enfasig kortslutning sekundärsidan.....	24
3.4.3 Tvåfasig kortslutning sekundärsidan.....	25
3.4.4 Trefasig kortslutning sekundärsidan (plusföljds-mätning)	25
3.4.5 Enfasig kortslutning primärsidan	25
3.4.6 Tvåfasig kortslutning primärsidan.....	26
3.4.7 Nollföljds-mätning.....	26
4 Mätningar med mät dator	27
4.1 Metod/utrustning	27
4.1.1 Databehandling.....	27
4.1.2 Problem	28
4.1.3 Undersökning LEM-modul	29
4.2 Nollföljds-mätning, primärsidan.....	30
4.3 Nollföljds-mätning, sekundärsidan	30
4.3.1 Deltats inverkan.....	31
4.4 Plusföljds-mätning.....	31
4.5 Tomgångsmätning	32
4.6 Mätningar med last.....	33
4.7 Enfasigt jordfel primärsidan	34

5 Diskussion	36
6 Framtida arbete	37
6.1 Ytterligare studier av transformatorn	37
6.1.1 Transientförlopp	37
6.1.2 Matrisbeskrivning av induktanser	37
6.1.3 Annan utformning	37
6.2 Användning av transformatorn i laboratoriesystemet	38
6.2.1 Ledningsmodeller	38
6.2.2 Återskapa mätningar	38
6.2.3 Test av reläskydd	38
7 Referenser	39
Appendix A: Den ideala transformatorn	40
Appendix B: Per-unitbegreppet	43
Appendix C: Symmetriska komponenter	44
Nollföljd	44
Plusföljd	44
Minusföljd	44
Transformation	44
Appendix D: Testrapport Transfix Ecobloc	46
Appendix E: Datablad Tramo-ETV TOFS-0,8	47
Appendix F: Utdrag instruktionsbok IOTech Personal DAQ/3000	48
Appendix G: Utdrag instruktionsbok Fluke 80i-1000S	49
Appendix H: Datablad LEM LA55-P	50
Appendix I: Matlabscript för beräkning av fasvektorer	52

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Många kraftbolag arbetar för att öka driftsäkerheten i sina landsbygdsnät genom att ersätta friledning genom skogsmark med markförlagd kabel. Detta arbete påskyndades markant genom orkanen Gudrun 8-9 januari 2005 då c:a 2000 mil ledning skadades och c:a 200 mil totalförstördes. De kraftigt höjda lagreglerade ersättningarna till kunder vid driftavbrott har också bidragit till att det har blivit ekonomiskt fördelaktigt att kablifiera.

En viktig teknisk konsekvens av att ersätta friledning med kabel är ökad kapacitiv jordslutningsström. För att hålla potentialhöjningen i felstället nere (bl.a. av personsäkerhetsskäl) krävs anpassning av nollpunktskompenseringen varvid induktansen i Petersenspolarna centralt fördelas ut till utlokaliserade spolar.

De höga strömmarna gör dock att nollföljdsreaktansen i transformatorer samt resistansen i kablar och transformatorer påverkar förmågan att ställa in jordfelskydd korrekt så att selektiv bortkoppling erhålls. Dessutom förändras den kapacitiva jordslutningsströmmen kraftigt när enstaka linjer kopplas in och ur. Detta inträffar under drift när feldrabbade ledningar kopplas ur och eventuell reservmatning ordnas. I en annan tidsskala sker samma sak vid utbyggnad eller ombyggnad av nätet.

För stor induktiv kompensation är lika olämpligt som för liten. Svårigheterna med central nollpunktskompensering i dessa sammanhang har föranlett intresse för distribuerad kompensering, varvid kompensering av den kapacitiva jordslutningsströmmen associeras till enskilda ledningar snarare än till stationen de matas ifrån.

Relativt nyligen har vissa transformertillverkare börjat sälja distributionstransformatorer särskilt anpassade för lokal kompensering. Spänningen är typiskt 10 kV / 400 V, märkeffekten 100 kVA och kopplingsarten ZN_{dyn}11. Ett önskemål är små förluster för transformatorns nollföljdsimpedans (inklusive högspänningssidans spole i nollpunkten). Bland annat har E.ON köpt och installerat en sådan transformator av fabrikat Transfix med inbyggd nollpunktsreaktor i nätet i Stenestad. Fältprov har genomförts genom att applicera enpoliga jordslutningar i det aktuella distributionssystemet (Akke 2006, s. 8-12). Fältproven har utvärderats och resultaten ser positiva ut. Nästa steg är att installera och utvärdera ett system med flera transformatorer med lokal kompensering och av olika fabrikat.

En möjlig ingenjörsmetodik för införa denna nya typ av distributionssystem kan omfatta följande steg:

- Teoretisk analys
- Datasimuleringar
- Laboratorieförsök
- Fältförsök på ett verkligt system
- Installation i full skala

Hitintills har det saknats ett nedskalad laboratorium för distributionssystem med lokal kompensering och det är relativt komplicerat att mäta på kommersiella transformatorer, dels p.g.a. spänningsnivån, dels för att alla lindningar inte är tillgängliga. Därför hade det varit av stort värde att bygga upp ett laboratorium som är speciellt för denna nya typ av distributionssystem. Transformatorn med lokal kompensering torde vara den viktigaste komponenten i ett sådant laboratorium. Examensarbetet syftar till att designa, upphandla och verifiera en transformator med lokal kompensering.

1.2 Syfte

Det ursprungliga syftet med examensarbetet var att göra design, upphandla och verifiera en distributionstransformator med lokal kompensering, som skall vara en nedskalad modell och ha liknande egenskaper som de transformatorer som används i det verkliga distributionssystem, exempelvis Transfix Ecobloc. Ett viktigt villkor är att komponenterna som används i ett laboratorium är enkla och effektiva att hantera samtidigt som de bevarar de karakteristiska egenskaperna hos det verkliga systemet.

Emellertid insågs att tiden antagligen inte skulle räcka till alla dessa punkter varför en enkel specifikation på transformatorn togs fram och ett exemplar beställdes innan examensarbetet startade. Syftet blev härmed omformulerat till att analysera om specifikationen var lämplig och transformatorn på ett tillfredsställande sätt återspeglade förebildens egenskaper samtidigt som dess egenskaper dokumenterades för framtida bruk.

Den transformator som används i det verkliga systemet har typiskt märkeffekten 100 kVA och omsättningen 10 kV / 400 V. Denna transformator skall skalas ned så att den blir lämplig för laboratoriebruk. Spänningsnivån bör vara låg för att minska personfaran. Märkeffekten bör vara liten för att minska kostnader, vikt och volym.

Ett förslag var att den nedskalade transformatorns märkspänning skulle vara i storleksordningen 110 V och märkströmmen 5A, alternativt 2 eller 1 A. Detta innebär att märkeffekten hamnar i storleksordningen 500 VA. Förhållandet mellan primär- och sekundärspänning behålls dock inte, den nedskalade transformatorn kan med fördel ha en faktor $1/\sqrt{3}$ mellan primär och sekundärspänning eftersom detta ger fler anslutningsmöjligheter. En annan fördel med dessa värden är att de motsvarar sekundärvärdena för mättransformatorerna i det verkliga systemet. Därför skulle laboratoriesystemet direkt kunna användas för att testa kommersiella reläskydd.

1.3 Motivering

Fördelar som uppnås med en nedskalad laboratorietransformator:

- Säkerhet. Spänningen sänks från 10 kV till 110 V vilket ökar personsäkerheten.
- Kostnads- och tidseffektivitet. Det är mycket enklare att mäta på en kompakt laboratorieuppställning.
- Möjlighet till test av befintliga reläskydd.
- Möjlighet att utföra mätningar. Mätning i lab är ett naturligt steg mellan datasimuleringar och fältprov.
- Utbildning och demonstration för studenter och personal från elbolag.
- Möjlighet att studera och analysera intermittenta jordfel samt skyddens funktion.

1.4 Disposition

Rapporten börjar med en beskrivning av den transformator som modellen är tänkt att efterlikna. Därefter ges information om labtransformatorns utformning och specifikationer. I de följande avsnitten presenteras resultat från arbetet med mätningarna och kommentarer till dessa. Sedan följer en sammanfattande diskussion om transformatorns egenskaper utifrån mätningarna och avslutningsvis föreslås vad som kan vara lämpligt som framtida arbete. Översiktliga teoriavsnitt kring den ideala transformatorn, symmetriska komponenter och per-unitbegreppet finns med som appendix A, B och C.

2 Beskrivning och specifikationer transformator

2.1 Transfix Ecobloc

Transformatorn Transfix Ecobloc är förebilden för labtransformatorn och den typ som E.ON har köpt in och installerat i Stenestad. Kopplingsarten är ZNdyn11 och har inbyggd nollpunktsreaktor i primärsidans nollpunkt. Kompenseringsströmmen är nominellt 15 A. Testrapport med nyckeldata finns i appendix D.

Transformatorn är en distributionstransformator för omvandling mellan 11 kV och 400 V, d.v.s. omvandling till lågspänningsnivå. Märkeffekten är 100 kVA.

Transfix är en fransk transformator tillverkare som ingår i industrikoncernen Groupe Cahors.

2.2 Kravspecifikation för tillverkning

Följande specifikation togs fram av Magnus Akke och skickades till Tramo-ETV i Eslöv som underlag för tillverkningen av labtransformatorn. Trots de kortfattade specifikationerna blev transformatordesignen mycket genomtänkt.

2.2.1 Översiktlig specifikation

Transformatorn är trefasig och utgår från Tramo-ETV:s modell TOFS-0,8. Totalvikten är c:a 10-15 kg. Transformatorn skall via kopplingsplint kunna kopplas ZNdyn11. Kärnan har tre ben. Varje ben har fyra identiska lindningar som alla har märkspänningen 127 V. Lindningarna är av koaxialtyp, d.v.s. de fyra lindningarna på respektive ben ligger utanpå varandra. Detta betyder att lindningarna för varje ben blir fyra koaxiala lager med samma antal varv.

De två uttagen till varje lindning är framdragna till en kopplingsplint typ ”sockerbit”. Det totala antalet anslutningar är $3 \times 4 \times 2 = 24$ st, (3 faser, 4 lindningar per fas, 2 anslutningar per lindning). Plintarna är märkta på ett entydigt sätt som visar lindningarnas position, d.v.s. vilket ben och vilket lager.

2.2.2 Tänkt användning

Lindningarna kopplas via kopplingsplinten till kopplingsarten ZNdyn11. Man kan välja vilket lager som skall användas till Z, d eller y. Primärsidans nollpunkt (ZN) anslutes via en extern reaktor till systemets jord. Det lilla y:ets nollpunkt ansluts direkt till jord. Detta ger möjlighet att mäta alla strömmar och spänningar.

Transformatorns Z-sida skall kunna anslutas till ett 380/220 V system. Fasspänningen 220 V fördelar sig då mellan de två Z-lindningarna så att respektive lindning får $220/\sqrt{3} = 127$ V över sig. Fasspänningen för Y-lindningen blir 127 V och huvudspänningen på sekundärsidan blir 220 V. Den resulterande ZNdyn-transformatorn får alltså omsättningen 380/220.

2.3 Den färdiga transformatorn

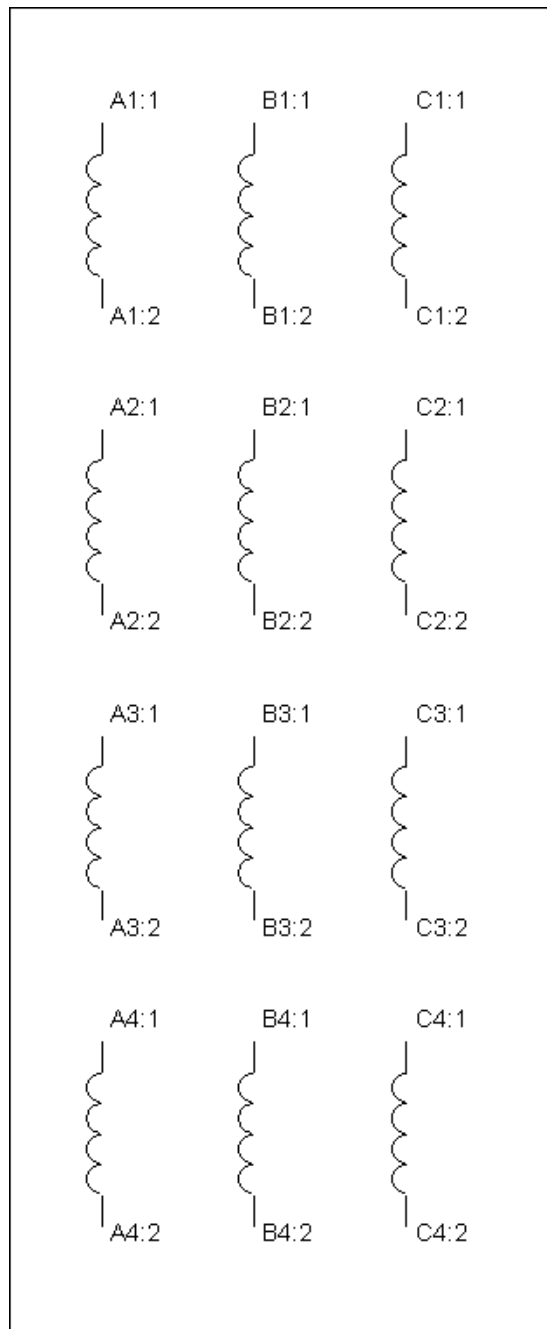
2.3.1 Specifikationer

Transformatorn är som i specifikationen baserad på modellen TOFS-0,8, se appendix E för utformning och mått. Tramo-ETV anger följande märkdata för transformatorn (tabell 2.1):

Primär huvudspänning	400 V
Sekundär huvudspänning	230 V
Märkström	1,25 A
Märkeffekt	500 VA

Tabell 2.1: Märkdata för transformatorn

Ovanstående data gäller vid ZNdyn-koppling. Märkspänningen för en lindning är alltså 133 V ($230\text{ V}/\sqrt{3}$) och varje lindning får max belastas med 1,25 A. Samtidigt får den totala belastningen inte överstiga 500 VA. Man hade annars kunnat tänka sig att man t.ex. använder lindningarna till deltat som Y-kopplade sekundärlindningar för att öka effektuttaget på sekundärsidan utan att överstiga 1,25 A per lindning. Max effekt hade då varit c:a 860 VA (1,25 A i primärlindningarna sätter gränsen). Dock är transformatorn inte designad för de sammanlagda förlusteffekterna vid dessa effektnivåer. Alltså bör försiktighet iakttagas vid experiment där transformatorn kopplas annorlunda än tänkt.



Figur 2.1: Benämningar för transformatorns lindningar

Transformatorns ben betecknas A,B resp. C. Lindningarna betecknas 1-4 där lindning 1 är närmast kärnan. Lindning 1 på ben A benämns därmed A1 osv. Anslutningarna till lindningarna benämns 1 resp. 2 där 1 är den positiva anslutningen. Lindning 1 på ben A:s positiva anslutning benämns alltså A1:1. Dessa benämningar används i fortsättningen i rapporten. Se bild 2.1.

2.3.2 Praktiska förbättringar

För att göra anslutningen av transformatorn flexiblare och mer överskådlig placerades transformatorn på en skiva där polskruvar för lindningarnas anslutningar monterades i logisk ordning med markering av lindningarna. Se bild 2.1.

Kopplingsledningarna ($1,5 \text{ mm}^2$) är dragna dolt under plattan upp till transformatorns befintliga kopplingsplintar. Med denna organisation av anslutningarna ökar dessutom förståelsen eftersom man kan se den aktuella kopplingsarten direkt. Detta är en fördel då transformatorn bl.a. är tänkt att användas för undervisning.

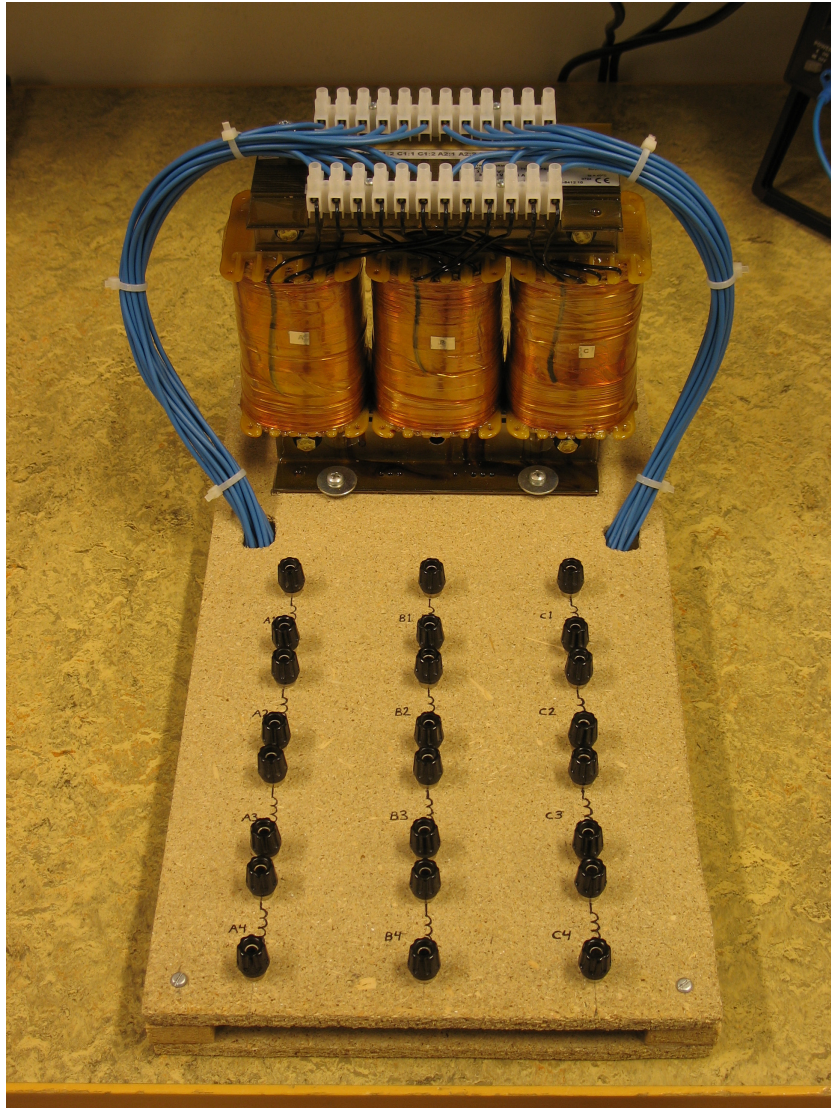


Bild 2.1: Transformatorn monterad på labplatta och ansluten till polskruvar

3 Beloppsmätningar

I följande kapitel har beloppet av spänningar och strömmar mätts för att bilda en uppfattning om de grundläggande egenskaperna för transformatorn och undersöka vad som är intressant att mäta mer noggrant med exempelvis fasvinkel. Mätningar har gjorts med olika kopplingskonfigurationer förutom den tilltänkta. Kapitlet kan också ses som dokumentation för framtida användning vid arbete med transformatorn.

3.1 Enfasmatning av enskilda lindningar

Mätningarna i detta avsnitt är utförda direkt på transformatorns lindningar utan någon speciell kopplingsart. Enfasig matningsspänning har använts.

3.1.1 Lindningsresistanser

Följande lindningsresistanser uppmättes med Gossen Metrawatt METRA Hit 16S multimeter. Se tabell 3.1.

Lindning	Resistans (Ω)	Lindning	Resistans (Ω)	Lindning	Resistans (Ω)
A1	5,33	B1	5,40	C1	5,55
A2	5,15	B2	5,29	C2	5,16
A3	5,14	B3	5,13	C3	5,17
A4	5,55	B4	5,66	C4	5,65

Tabell 3.1: Lindningsresistanser

Resistansen i p.u. är kring 4,8-5,3% (beräknat på $U_{\text{base}} = 132,7 \text{ V}$, $I_{\text{base}} = 1,25 \text{ A}$, $Z_{\text{base}} = 106,2 \Omega$).

Resistansernas värden är mycket jämna trots att de yttre lindningslagren har längre tråd än de inre. Grövre tråd har använts för att motverka högre resistans i de yttre lindningarna.

3.1.2 Enfasigt tomgångsprov

Magnetiseringsströmmarna togs fram genom tomgångsmätning, d.v.s. spänning läggs på en lindning med övriga lindningar öppna och strömmen mäts. Se tabell 3.2-3.4 för resultat. Samtidigt noterades spänningarna på en öppen lindning på de icke spänningsatta benen. Spänningsmätningarna gjordes med Gossen Metrawatt METRA Hit 16S multimeter och strömmätningarna med ITT/metrix MX47 multimeter. Matning skedde via en vridtransformator ansluten till ett 127/220 V system.

Lindning A1 spänningsatt:

U_{A1} (V _{RMS})	I_{A1} (mA _{RMS})	U_{B1} (V _{RMS})	U_{C1} (V _{RMS})
63,5	43,0	55,4	8,7
100,1	58,7	86,1	15,2
126,6	78,9	104,7	23,0

Tabell 3.2: Tomgångsström och inducerade spänningar med lindning A1 spänningsatt

Lindning B1 spänningsatt:

U_{B1} (V _{RMS})	I_{B1} (mA _{RMS})	U_{A1} (V _{RMS})	U_{C1} (V _{RMS})
63,8	33,9	32,3	30,9
99,8	43,5	50,2	48,9
127,2	56,2	63,8	62,5

Tabell 3.3: Tomgångsström och inducerade spänningar med lindning B1 spänningsatt

Lindning C1 spänningsatt:

U_{C1} (V _{RMS})	I_{C1} (mA _{RMS})	U_{A1} (V _{RMS})	U_{B1} (V _{RMS})
63,6	43,0	9,6	54,4
100,0	58,8	15,8	85,0
127,2	79,7	23,5	103,9

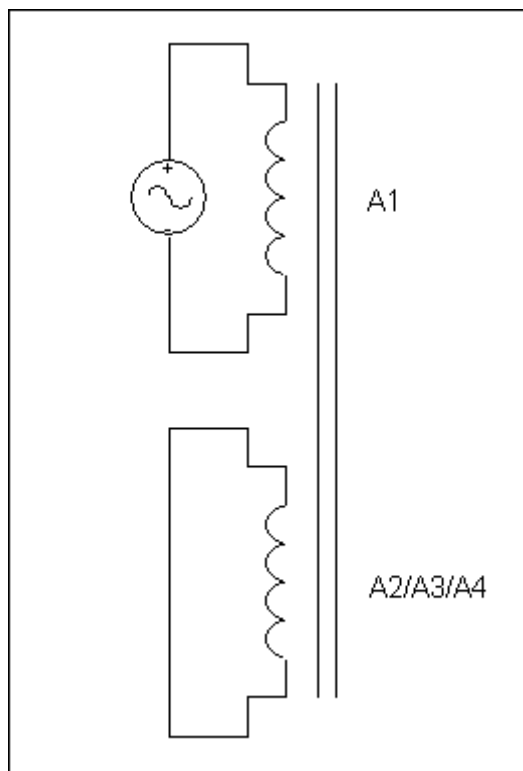
Tabell 3.4: Tomgångsström och inducerade spänningar med lindning C1 spänningsatt

Som synes i tabell 3.2-3.4 är magnetiseringsströmmen för de yttre benen mycket lika medan den är något mindre för mittenbenet vilket beror på att reluktansen är lägre. Om reluktansen genom ett ben definieras som 1 är reluktansen för en lindning på mittenbenet $1 // 1 = 0,5$. För ytterbenen blir reluktansen ungefär $1 // 2 = 2/3$. Detta innebär att magnetiseringsströmmen bör vara i storleksordningen $(2/3)/0,5 = 4/3$ gånger större för ytterbenen än innerbenet vilket stämmer väl överens med mätningarna.

Samma sak syns också de inducerade spänningarna. När mittenbenet är spänningsatt induceras lika stora spänningar i lindningarna på de andra benen och mer ojämna spänningar induceras när ett av ytterbenen spänningsätts eftersom fördelningen av magnetflödet är ojämnt.

3.1.3 Enfasig matningsspänning och kortslutning av en lindning

Ett antal kortslutningsmätningar gjordes genom att en lindning på samma ben som den spänningssatta kortslöts. Spänningen ökades tills en ström i storleksordningen av märkströmmen inducerades i den kortslutna lindningen. Se figur 3.1 för uppkoppling. Resultat ses i tabell 3.5.



Figur 3.1: Kortslutning av lindning på samma ben som matande lindning

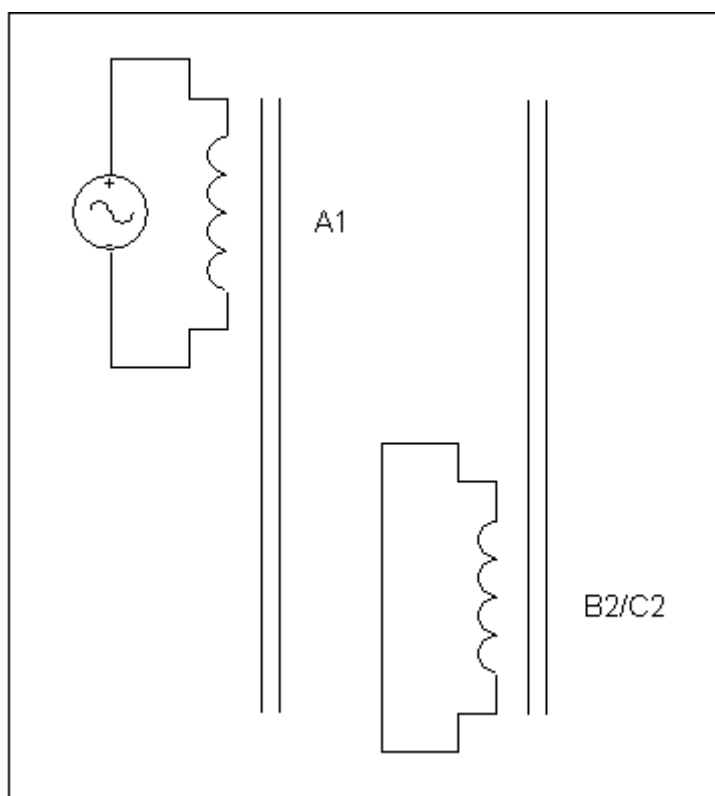
Lindning A1 var spänningssatt vid samtliga mätningar.

Kortsluten lindning	U_{A1} (V _{RMS})	I_{A1} (mA _{RMS})	$I_{\text{kortsluten}}$ (mA _{RMS})
A2	7,09	663	662
A3	7,22	680	678
A4	7,07	634	632

Tabell 3.5: Kortslutningsmätningar på spänningssatt ben

Ingen signifikant skillnad mellan lindningslagren m.a.p. på den magnetiska kopplingen kan ses.

För att undersöka kopplingen mellan transformatorns olika ben spänningssattes lindning A1 som tidigare men en lindning på något av de andra benen kortslöts istället (figur 3.2). Se tabell 3.6 för resultat.



Figur 3.2: Kortslutning av lindning på annat ben än det spänningssatta

Kortsluten lindning	U_{A1} (V _{RMS})	I_{A1} (mA _{RMS})	$I_{\text{kortsluten}}$ (mA _{RMS})
B2	100,0	87	41
C2	100,3	62	15

Tabell 3.6: Kortslutningsmätningar på annat ben än det spänningssatta

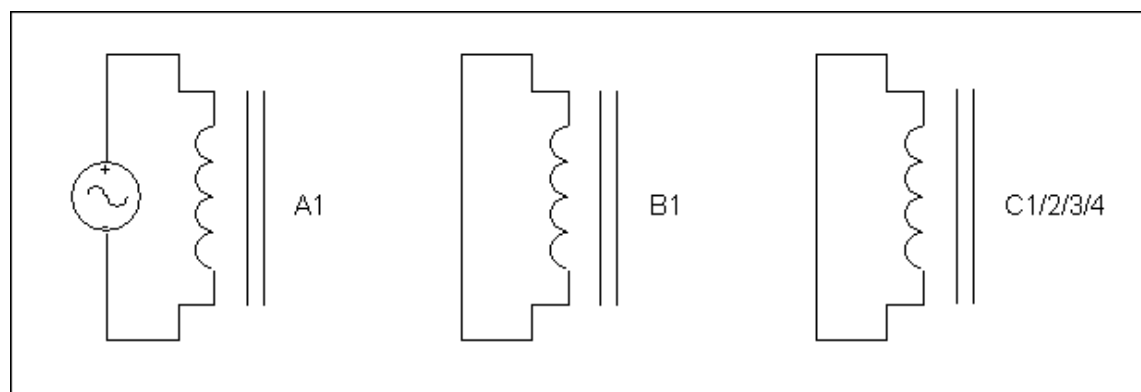
Som synes är den magnetiska kopplingen till de andra benen inte speciellt stark. Detta beror på att magnetflödet slutes i det återstående benet som är oanslutet. Denna typ av kortslutningsmätning ger mindre information eftersom returflödet till största delen styrs över till benet med öppna lindningar. Därför gjordes försök med enfasig spänningssättning och olika kombinationer av kortslutning av flera lindningar.

3.1.4 Enfasig matningsspänning och kortslutning av flera lindningar

Lindning A1 spänningssattes och olika kombinationer av lindning B1 och lindningar på ben C kortslöts. Resultatet ses i tabell 3.7. Se figur 3.3 för uppkoppling.

Kortslutna lindningar	U_{A1} (V _{RMS})	I_{A1} (mA _{RMS})	I_{B1} (mA _{RMS})	I_{C1-4} (mA _{RMS})
B1, C1	29,03	706	688	682
B1, C2	28,57	703	685	678
B1, C3	28,50	704	687	682
B1, C4	28,55	707	690	684

Tabell 3.7: Kortslutningsmätningar med kortslutning av flera lindningar

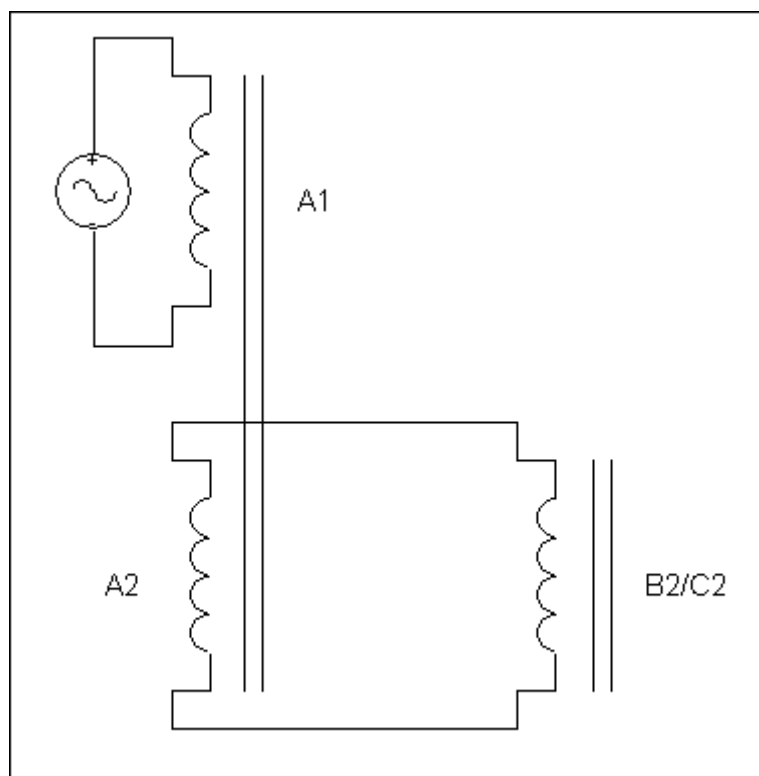


Figur 3.3: Kortslutning av flera lindningar

Resultaten är snarlika oavsett vilken lindning på ben C som kortsluts. Samtliga strömmar är i samma storleksordning vilket är anmärkningsvärt eftersom intuitivt borde magnetflödet delas lika mellan de två benen och därmed borde strömmarna vara c:a hälften av strömmen i den spänningssatta lindningen.

Uppenbarligen bildas ett motriktat flöde i båda de kortslutna benen som till hälften motverkar det pålagda flödet i ben A och till hälften motverkar det andra benets flöde. Detta bör i sin tur bero på att magnetflödet sluts i båda övriga benen och genom superposition av flödena fås samma resultat som det uppmätta.

Mätningar gjordes även med lindningar från två ben sammankopplade enligt figur 3.4. Dessutom kortslöts motsvarande lindning på det sista benet (C2 resp. B2).



Figur 3.4: Uppkoppling vid mätning med sammankopplade lindningar

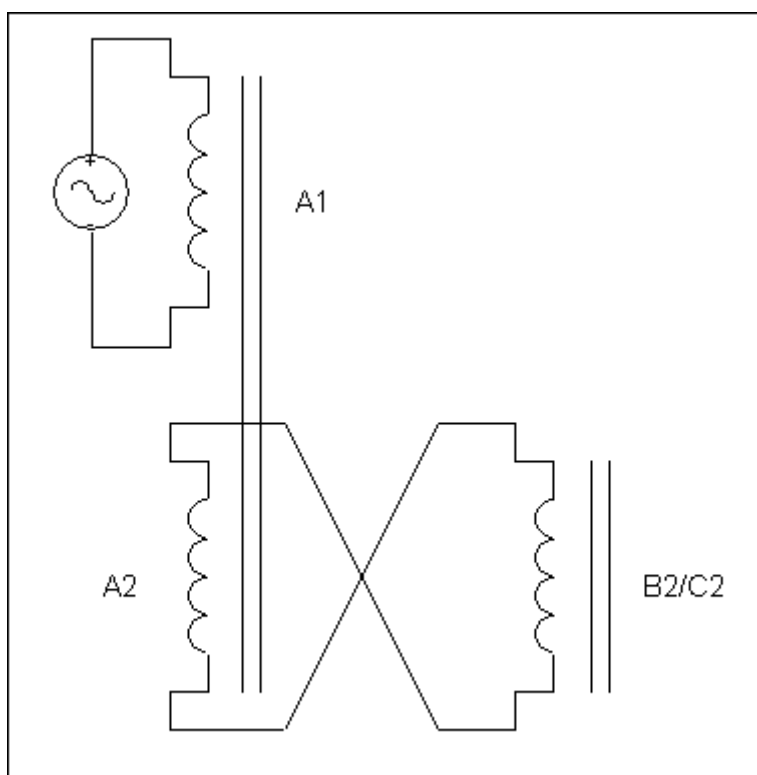
Lindning A1 var spänningssatt och mätresultatet kan ses i tabell 3.8.

Sammankopplade lindningar	Kortsluten lindning	U_{A1} (V _{RMS})	I_{A1} (mA _{RMS})	$I_{\text{sammankopplade}}$ (mA _{RMS})	$I_{\text{kortsluten}}$ (mA _{RMS})
A2, B2	C2	9,83	736	368	359
A2, C2	B2	9,82	732	368	362

Tabell 3.8: Kortslutningsmätningar med sammankopplade lindningar

Strömmen som induceras i de sammankopplade resp. den kortslutna lindningen är ungefär lika stora och summan är i storleksordning med strömmen i den spänningssatta lindningen.

Om strömriktningen genom B2 resp. C2 (se figur 3.5) vänds fås resultaten i tabell 3.9.



Figur 3.5: Uppkoppling vid mätning med sammankopplade lindningar, polvänt

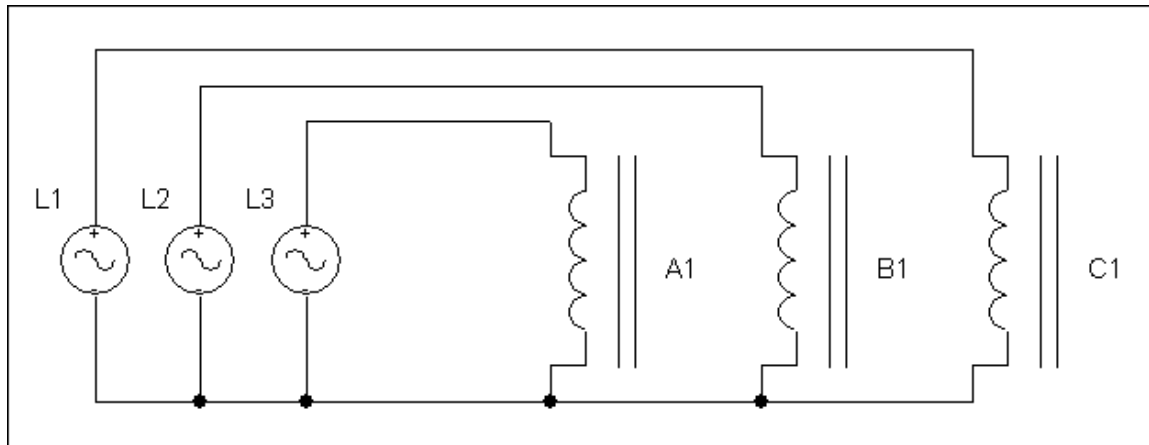
Sammankopplade lindningar	Kortsluten lindning	U_{A1} (V _{RMS})	I_{A1} (mA _{RMS})	$I_{\text{sammankopplade}}$ (mA _{RMS})	$I_{\text{kortsluten}}$ (mA _{RMS})
A2, B2	C2	100,64	61,4	23,9	9,3
A2, C2	B2	100,62	86,7	39,6	11,9

Tabell 3.9: Kortslutningsmätningar med sammankopplade lindningar, polvänt

Intressant är att förhållandet mellan strömmen i primärlindningen (I_{A1}) och i de sammankopplade lindningarna är klart olika beroende på om B2 eller C2 används.

3.2 Trefasigt tomgångsprov

Trefasspänning (Y-kopplat) lades på de inre lindningarna (A1, B1, C1) och strömmen mäts. Se figur 3.6 för koppling och tabell 3.10 för resultat.



Figur 3.6: Trefasigt tomgångsprov

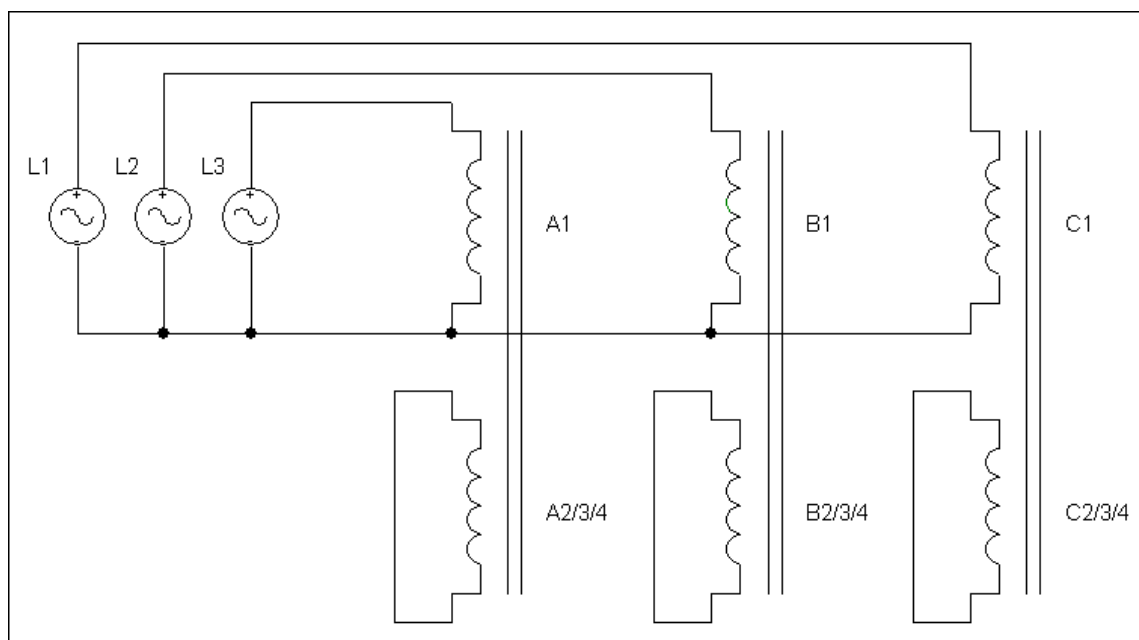
U_{A1} (V _{RMS})	U_{B1} (V _{RMS})	U_{C1} (V _{RMS})	I_{A1} (mA _{RMS})	I_{B1} (mA _{RMS})	I_{C1} (mA _{RMS})
10,1	10,0	10,0	12,0	6,1	11,6
20,1	20,0	20,1	13,8	12,0	18,7
40,1	40,2	40,0	50,3	39,4	55,0
80,1	80,3	80,0	31,8	21,6	32,1
100,3	100,2	100,1	45,5	22,4	34,6
127,2	127,1	127,1	53,9	37,0	53,0

Tabell 3.10: Tomgångsströmmar vid trefas spänningssättning

Strömmarna är ganska ojämna mellan faserna. I många fall är strömmen något lägre i en av lindningarna och de andra två är mer lika. Uttryckt i p.u. är tomgångsströmmen som mest 4,4%.

3.3 Trefasigt kortslutningsprov (plusföljdmätning)

Trefasspänning (Y-kopplat) lades på de inre lindningarna (A1, B1, C1). Därefter kortslöts en annan lindning på varje ben. Se figur 3.7. Strömmen mättes med Tektronix TDS210 digitalt oscilloskop tillsammans med Kyoritsu 8113 strömtång. Resultat kan ses i tabell 3.11.



Figur 3.7: Trefasigt kortslutningsprov

Kortslutet lager	U_{A1}	U_{B1}	U_{C1}	I_{A1}	I_{B1}	I_{C1}	$I_{A2/3/4}$	$I_{B2/3/4}$	$I_{C2/3/4}$
2	8,00	7,94	7,99	813	806	811	810	803	808
3	8,00	7,97	7,99	816	805	808	813	801	801
4	8,03	8,00	8,05	781	769	771	780	767	768

Tabell 3.11: Kortslutningsprov med trefasspänning
Samtliga spänningar i V_{RMS} och samtliga strömmar i mA_{RMS}

8 V motsvarar c:a 6% och 800 mA motsvarar c:a 65% i p.u. vilket innebär att beloppet av plusföljdsimpedansen är kring 9,2%.

Inga större skillnader mellan lager 2 och 3, dock är strömmarna något lägre i lager 4. Detta bör bero på det ökade avståndet från kärnan vilket ger en svagare magnetisk koppling. Prov gjordes även att ansluta den ena polen av de kortslutna lindningarna till nollpunkten, se tabell 3.12.

Kortslutet lager	U_{A1}	U_{B1}	U_{C1}	I_{A1}	I_{B1}	I_{C1}	$I_{A2/3/4}$	$I_{B2/3/4}$	$I_{C2/3/4}$
2	7,98	8,01	7,99	801	800	798	800	796	792
3	7,98	8,03	7,98	805	802	802	807	802	800
4	8,04	8,06	8,03	778	771	766	778	771	769

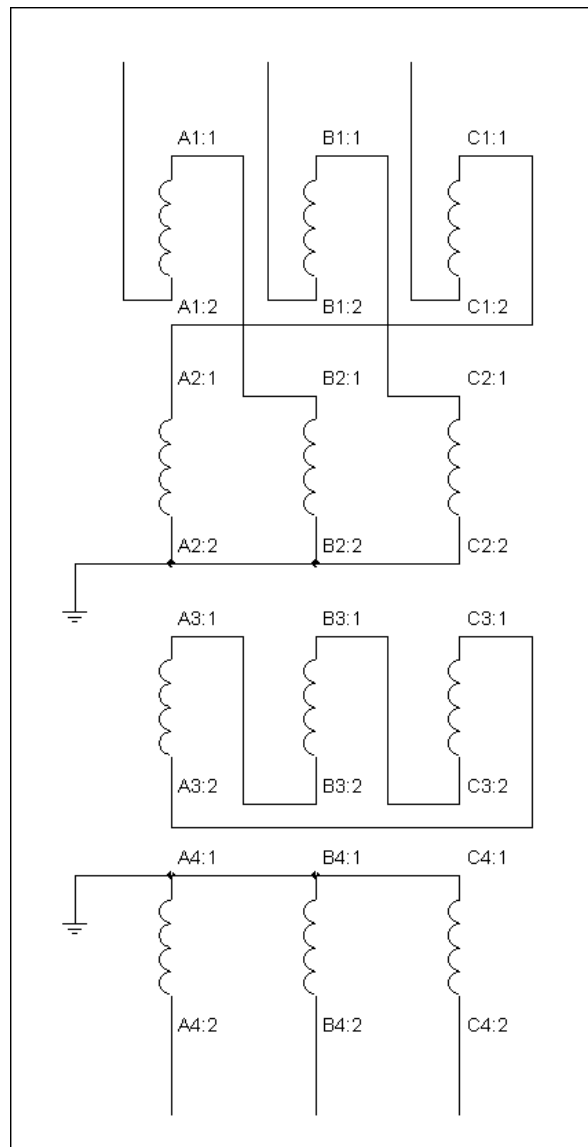
Tabell 3.12: Kortslutningsprov med trefasspänning, lindningarna anslutna till nollpunkten
Samtliga spänningar i V_{RMS} och samtliga strömmar i mA_{RMS}

Som synes kunde inga tydliga skillnader med och utan nollpunktsanslutning kunde ses.

3.4 Mätningar vid Z-koppling

Transformatorn kopplades upp som den är tänkt att användas, se figur 3.8. De inre lagren användes till Z-kopplingen, nästa lager till deltat och det yttersta till sekundärlindningarna.

Fas L1 anslöts till lindning A1, fas L2 till lindning B1 och fas L3 till lindning C1 om inget annat anges.



Figur 3.8: ZNdyn-kopplad transformator

3.4.1 Tomgångsmätning

Trefassspänning anslöts till primärlindningarna och sekundärlindningarna lämnades öppna. Se tabell 3.13.

Fas	Ben för första lindning	$U_{A/B/C1}$ (V _{RMS})	$U_{A/B/C4}$ (V _{RMS})	I (mA _{RMS})
L1	A	135,3	78,1	14,43
L2	B	135,4	78,3	14,32
L3	C	134,0	77,6	20,60

Tabell 3.13: Tomgångsmätning vid Z-koppling

Magnetiseringsströmmen för fas L3 avviker tydligt från de övriga två. Detta kan härledas till att båda lindningarna som matas av denna fas sitter på ett ytterben medan de andra två faserna har en lindning på ett ytterben och en lindning på mittenbenet. Omsättningen är den förväntade.

Uttryckt i p.u. är tomgångsströmmen som mest 2,9% (ben C). Transfixtransformatorn har 0,8% tomgångsström vilket visserligen är lägre, men med tanke på den förhållandevis låga märkeffekten på labtransformatorn är dess tomgångsström ändå låg (appendix D). I riktigt små transformatorer (t.ex. i äldre mobiltelefonladdare som inte bygger på switchteknik, batterieliminators och liknande) kan tomgångsströmmen ibland vara i samma storleksordning som märkströmmen.

3.4.2 Enfasig kortslutning sekundärsidan

Primärsidan anslöts till trefassspänning och en kortslutning lades på en av sekundärlindningarna (C4). Mätningar gjordes med och utan deltat inkopplat. Se tabell 3.14.

	U_{A1}	U_{B1}	U_{C1}	I_{A1}	I_{B1}	I_{C1}	I_{C4}	U_{A4}	U_{B4}	I_{Δ}
Med delta	10,67	10,67	11,03	12,2	224	244	700	6,54	6,11	205
Utan delta	10,65	10,63	11,07	9,3	233	246	710	8,61	4,63	0

Tabell 3.14: Enfasig kortslutning sekundärsidan

Samtliga spänningar i V_{RMS} och samtliga strömmar i mA_{RMS}

I_{A1} sjunker något och I_{B1} ökar marginellt utan deltat anslutet, men den stora skillnaden syns på U_{A4} och U_{B4} som är betydligt jämnare med deltakopplingen.

3.4.3 Tvåfasig kortslutning sekundärsidan

Primärsidan anslöts till trefassspänning och en kortslutning lades på två av sekundärlindningarna (B4, C4). Spänningar och strömmar mättes med och utan deltat inkopplat. Till spänningsmätningarna användes Philips PM2519 bänkmultimeter. Resultatet ses i tabell 3.15.

	U_{A1}	U_{B1}	U_{C1}	I_{A1}	I_{B1}	I_{C1}	I_{B4}	I_{C4}	U_{A4}	I_{Δ}
Med deltat	11,05	10,91	11,38	231	413	256	680	715	6,70	210
Utan deltat	11,18	10,91	11,34	162	412	305	426	836	7,96	0

Tabell 3.15. Samtliga spänningar i V_{RMS} och samtliga strömmar i mA_{RMS}

Jämfört med enfasig kortslutning ger deltat större inverkan på primärströmmarna. Deltat ger att I_{A1} ökar och I_{C1} sjunker medan I_{B1} är oförändrad. På sekundärsidan ökar I_{B4} medan I_{C4} minskar. Även spänningen på den öppna lindningen (A4) minskar något vid inkoppling av deltat.

Försök gjordes också med kortslutning av ytterbenens sekundärlindningar (A4, C4) för att undersöka om transformatorns geometri påverkar resultatet men inga signifikanta skillnader i mätresultatet kunde ses. De berörda spänningarna och strömmarna ökade resp. minskade ungefär lika mycket, både absolut och relativt sett.

3.4.4 Trefasig kortslutning sekundärsidan (plusföljdsättning)

Primärsidan anslöts till trefassspänning och en kortslutning lades på sekundärlindningarna. Spänningar och strömmar. Se tabell 3.16.

U_{A1}	U_{B1}	U_{C1}	I_{A1}	I_{B1}	I_{C1}	I_{A4}	I_{B4}	I_{C4}
11,38	11,52	11,38	437	449	433	780	781	772

Tabell 3.16. Samtliga spänningar i V_{RMS} och samtliga strömmar i mA_{RMS}

Ingen mätbar ström inducerades i deltat vilket var väntat eftersom belastningen var symmetrisk.

3.4.5 Enfasig kortslutning primärsidan

Trefassspänning lades på primärsidan utom till C1 som istället anslöts till jord. Uppmätta spänningar och strömmar kan ses i tabell 3.17.

U_{A1}	U_{B1}	I_{A1}	I_{B1}	I_{C1}	U_{A4}	U_{B4}	U_{C4}
22,56	23,03	719	723	724	7,54	13,40	7,69

Tabell 3.17. Samtliga spänningar i V_{RMS} och samtliga strömmar i mA_{RMS}

U_{B4} ger nominell spänning medan de andra två sekundärlindningarna ger en jämn men lägre spänning. Strömmarna på primärsidan är jämna. Strömmen i deltat var omätbart låg och ingen skillnad kunde ses vid ur/inkoppling av deltat.

3.4.6 Tvåfasig kortslutning primärsidan

Spänning anslöts till A1 medan B1 och C1 kortslöts till jord. Resultat ses i tabell 3.18.

U_{A1}	I_{A1}	I_{B1}	I_{C1}	U_{A4}	U_{B4}	U_{C4}
20,75	699	695	689	6,97	6,98	0

Tabell 3.18. Samtliga spänningar i V_{RMS} och samtliga strömmar i mA_{RMS}

Att U_{C4} blir 0 var väntat eftersom båda lindningarna i Z-kopplingen på ben c är kortslutna till jord. Dock flyter en betydande ström genom dessa lindningar men eftersom de är motriktade induceras inget magnetiskt flöde.

3.4.7 Nollföljdsmätning

Samtliga primärlindningar anslöts parallellt till samma spänningskälla och sekundärlindningarna lämnades öppna. Se tabell 3.19.

$U_{A1} (V_{RMS})$	$I_{A1} (mA_{RMS})$	$I_{B1} (mA_{RMS})$	$I_{C1} (mA_{RMS})$
2,54	271	271	268
7,19	746	751	734

Tabell 3.19. Spänningar och strömmar vid nollföljdsmätning

Sekundärspänningarna blev omätbart låga, vilket beror på att ingen magnetisering sker eftersom samtliga flöden tar ut varandra. Den uppmätta impedansen härstammar främst från lindningarnas resistans, vilka kan ses i tabell 3.1.

4 Mätningar med mätdator

Det som var mest intressant att mäta upp med fasvinkel var plus- och nollföljdsimpedans eftersom dessa värden kan användas till många beräkningar av transformatorns beteende i ett kraftnät. Även tomgångsbeteendet och egenskaper vid last har undersökts. Dessutom undersöktes ett felfall för att verifiera att nollföljdskomponenter inte överförs från primär- till sekundärsidan av transformatorn.

4.1 Metod/utrustning

Inledningsvis användes följande utrustning:

- IOTech Personal Daq/3000 mätdator
- Esselte Studium 8000-771 diffprobar för spänningsmätning
- Fluke 80i-1000S strömtänger

Mätdatorn ansluts till en PC med USB. Den kräver ingen extern spänningsmatning utan får detta från PC:n via USB-anslutningen.

Samtliga värden är effektivvärden och transformatorn var kopplad som den är tänkt att användas, d.v.s. ZN_{dyn11} om inte annat anges.

4.1.1 Databehandling

Mätdata bearbetades i Matlab för att få information om bl.a. fasvinkeln. Scriptet som användes är framtaget av Johan Björnstedt och vidareutvecklat av Magnus Akke, se appendix I för källkod. Principen för att beräkna vektorerna är följande:

- De samplade signalerna skalas om för att få rätt storhet (spänningsprobarna har 100 gångers dämpning, spänningen från strömmätningen måste skalas om till motsvarande ström).
- Medelvärdet av alla sampel dras bort från varje enskilt sampel för att minska eventuell DC-offset.
- Ström- och spänningsvektorerna beräknas med en DFT-metod där man summerar samplen över en period multiplicerat med cosinus resp. sinus för vinkeln vid aktuellt sampel och därefter delar med antal sampel per period för att få den reella resp. imaginära komponenten (Phadke 1990 s. 125).

Beräkningen utförs flytande så för varje sampel får man ett värde på vektorerna. Eftersom samplingen inte börjar vid nollgenomgången tar det ett antal sampel innan spännings- och strömvektorernas värde stabiliseras. Därför tas medelvärdet av den andra halvan av värdena för att få ett entydigt värde på vektorn.

4.1.2 Problem

Vid de inledande mätningarna avvek en av fasströmmarna kraftigt från de övriga två trots att inkopplade multimetrar visade på små skillnader i strömstyrka mellan faserna. Efter kontroll av manualen till mätdatorn visade det sig att det rekommenderas att kortsluta varannan kanal om skillnaden i insignalnivå är stor mellan närliggande kanaler för att minska överhörningen. Genom att läsa in en jordad kanal mellan två mätningar med stor nivåskillnad drar man ned signalnivån till noll så att strökapacitanser laddas ur. Efter omorganisation av kanal användningen och jordning av varannan kanal (sett i den ordning de läses in) blev mätningarna betydligt bättre (Datablad appendix F).

Vid beräkning av den komplexa impedansen framkom tydligt att mätningarna var felaktiga. Strömmens fasläge mot spänningen antydde att plusföljdsimpedansen skulle vara kapacitiv vilket ju borde vara fysiskt omöjligt för en transformator. Test med 10 kHz samplingsfrekvens istället för 1 kHz gjordes men felet kvarstod. Val av kanaler för spänning och ström kontrollerades m.a.p. överhörning utan resultat. Felet lokaliserades sedan till strömtängerna som har en markant fasavvikelse i positiv riktning. Eftersom reaktansen inte var så stor relativt resistansen räckte vinkelfelet för att visa på en kapacitiv last.

Ett test för att undersöka vinkelfelet storlek gjordes. En lastresistor användes istället för transformatorn och spänningen över ett shuntmotstånd mättes med oscilloskopprobe. Samtidigt mättes strömmen med strömtången, även den ansluten till oscilloskopet. Vinkelavvikelsen uppskattades med oscilloskopets cursorfunktion eftersom det var storleksordningen och inte exakta värden som var av intresse.

Följande vinkelavvikelser uppmättes, se tabell 4.1:

Ström (A)	Vinkelavvikelse (°)
0,5	8,3
1,0	6,3
1,2	6,1
2,0	3,5
3,0	3,6
4,0	3,7
5,0	3,7
6,0	3,6

Tabell 4.1: Vinkelavvikelse för strömtängerna

Som synes varierar vinkeln kraftigt just i det område där de flesta mätningarna på transformatorn ligger, strax under 1 A. Skillnaden i vinkel mellan de tre olika exemplaren av strömtänger var dock så liten att den inte syntes på oscilloskopskärmen. Databladet för strömtängerna anger att en vinkelavvikelse på upp till 25° kan vara möjlig vid låga strömmar och aktuellt mätområde vilket med all tydlighet visar att strömtängerna endast kan användas till beloppsmätningar av ström (datablad appendix G).

Shuntmätning hade alltså varit att föredra om korrekt fasvinkel är av stor vikt. Ett problem med att shuntmäta i detta fall är att mät datorn inte har galvaniskt isolerade ingångar vilket kräver någon form av isolationsförstärkare mellan strömshunten och ingången. Även i många andra sammanhang kan shuntmätning vara problematiskt t.ex. vid höga strömmar eller där inkoppling av shuntmotstånd inte är möjlig t.ex. i fasta installationer.

Efter undersökning av alternativ bestämdes att en strömmättningsmodul från LEM (LA 55-P) skulle testas då denna har visat sig ha goda egenskaper vid tidigare användning på institutionen och ett antal sådana fanns tillgängliga.

4.1.3 Undersökning LEM-modul

Strömmättningsmodulen har beteckningen LA 55-P och bygger på tekniken med sluten kärna och halleffektgivare där ledaren vars ström ska mätas passerar genom centrum av kärnan. Modulen behöver separat spänningsmatning (± 15 V). Se bild 4.1.

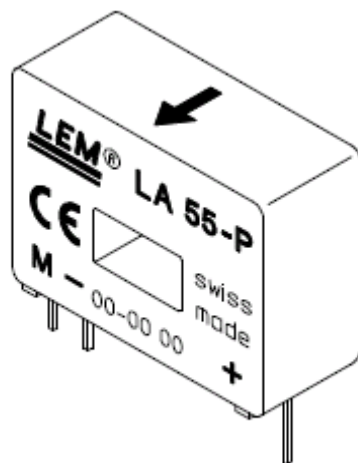


Bild 4.1: LEM LA55-P strömmättningsmodul

Nominell ström är 50 A och genom att linda ledaren flera varv minskar man detta värde för att bibehålla noggrannheten även för mindre strömmar. I detta fall lindades tio varv för att få en nominell ström på 5 A. Mätutgången är en ström utgång med omsättning 1000:1, d.v.s. vid nominell ström genom gapet fås 50 mA på mätutgången. Ett lämpligt motstånd kopplas från mätutgången till jord och spänningen över detta samplas med mät datorn. Se appendix H för datablad.

Eftersom omräkning från spänning till ström görs i efterhand kan med fördel det aktuella motståndets resistans mätas upp för att få högre noggrannhet. Följande motståndsvärden hade de tre använda motstånden (tabell 4.2):

Fas	Resistans (Ω)
A	220,2
B	219,7
C	219,6

Tabell 4.2: Resistanser för mätmotstånd

220 Ω motstånd ger lämplig utsignalnivå för mätdata vid de aktuella strömmarna.

Jämförelse gjordes mot mätning med strömshunt och värdena sparades med digitalt oscilloskop. Mätdata bearbetades som tidigare i Matlab för att undersöka fasvinkeln. Resultatet blev att LEM-modulen hade mindre än $0,5^\circ$ fasavvikelse (negativ) vilket får anses som mycket bra.

4.2 Nollföljds-mätning, primärsidan

De tre primäranslutningarna parallellkopplades till samma spänningskälla och ström och spänning mättes.

Samplingsfrekvensen var 50 kHz och 5000 sampel (d.v.s. fem perioder) togs (samplingstid 100 ms). Spänning och ström vid nollföljds-mätningen blev $3,2096 - j6,2627$ V resp. $0,8824 - j1,8540$ A. Resulterande Z_0 blir då $3,4258 + j0,1007$ Ω eller $3,43$ Ω $\angle 1,7^\circ$ (1,1% i p.u.). Den induktiva delen var som väntat förhållandevis liten då spänningen och strömmarnas storlek vid beloppsmätningen antydde att lindningarnas resistans var de huvudsakliga komponenterna i nollföljdsimpedansen.

Transfixtransformatorn har c:a 1% nollföljdsimpedans om man bortser från den inbyggda kompenseringspolen vilket innebär att labtransformatorn väl speglar den riktiga i det avseendet (Thierry 2006).

En ytterligare iakttagelse var att i princip ingen spänning inducerades på sekundärsidan vilket kan inses genom att studera hur primärlindningarna är kopplade. Strömriktningarna tar ut varandra vilket innebär att kärnan idealt sett inte magnetiseras alls. Detta antyder att fel på ovansidan av transformatorn som ger upphov till nollföljdsström inte påverkar sekundärsidan av transformatorn.

Resistansens storlek stämmer väl överens med de tidigare uppmätta (tre parallellkopplade grupper om två seriekopplade lindningar). Virvelströms- och hysteresförlusterna är små eftersom det hade varit större avvikelser mellan de tidigare DC-mätningarna och växelströmsmätningen annars. Resistansens värde utifrån DC-mätningarna är 3,54 Ω . De små förlusterna beror bl.a. på att transformator-kärnan är laminerad. Dock borde värdet från växelströmsmätningen vara högre med tanke på de ökade förlusterna. Det är dock inte säkert hur multimeter utför resistansmätningen

4.3 Nollföljds-mätning, sekundärsidan

För att undersöka transformatorns nollföljdsimpedans sett från sekundärsidan matades transformatorn från samma källa på de tre sekundärlindningarna och spänningen och strömmen mättes. Primärsidan lämnades oansluten.

Spänning resp. ström uppmättes till $-3,8324 + j5,9078$ V och $-0,7924 + j2,0460$ A. Impedansen blir då $3,1417 + j0,6563i$ Ω eller $3,21$ Ω $\angle 11,8^\circ$. Detta motsvarar 3,0% i p.u. (basen på sekundärsidan är 133 V, 1,25 A).

Resistansen var högre än väntat eftersom den borde bestå av tre lindningsresistanser parallellt på vardera c:a 5 Ω. Att den induktiva delen var större än på primärsidan var dock väntat eftersom transformatorn är Y-kopplad på sekundärsidan och magnetfälten inte tar ut varandra som vid Z-koppling.

4.3.1 Deltats inverkan

Vid nollföljdsmatning från sekundärsidan induceras en ström i deltat vilket bör medföra förluster vilket kan förklara det ökade värdet på resistansen. För att undersöka detta mättes nollföljdsimpedansen med deltat öppet. Dessutom noterades strömmen som inducerades i deltat när det var slutet.

Spänningen uppmättes till $6,1803 + j6,2021$ V och strömmen till $1,9244 - j0,6379$ A utan deltat inkopplat. Impedansen blir $1,9311 + j3,8630$ Ω eller $4,32$ Ω $\angle 63,4^\circ$. I p.u. motsvarar detta 4,1% (med deltat inkopplat $3,21$ Ω $\angle 11,8^\circ$).

Den anmärkningsvärda skillnaden med och utan deltakopplingen är den stora skillnaden i fasvinkel. Utan deltat är nollföljdsimpedansen till största delen induktiv medan den resistiva delen är dominerande med deltat inkopplat. Den resistiva delen av impedansen är lägre vilket tyder på att förlusterna är något mindre utan deltat.

Strömmen i deltat med detta inkopplat är i samma storleksordning som fasströmmarna. Detta var väntat eftersom deltat består av tre lindningar i serie som inducerar lika stor spänning som den som läggs på sekundärlindningarna. Det bör alltså inte föreligga någon särskilt stor risk för överbelastning av deltalindningarna före någon annan lindning.

4.4 Plusföljds mätning

Sekundärlindningarna kortslöts och symmetrisk trefassspänning lades på primärlindningarna. Följande spänningar och strömmar uppmättes (tabell 4.3):

Fas	Spänning (V)	Ström (A)
L1	$-9,9591 + j12,9776$	$-0,2969 + j0,5213$
L2	$16,4506 + j2,2782$	$0,6014 + j0,0011$
L3	$-6,1614 - j15,1938$	$-0,2948 - j0,5214$

Tabell 4.3: Komplexa spänningar och strömmar vid plusföljds mätning

Efter transformering till symmetriska komponenter (se appendix C) kan Z_1 beräknas genom $V_1/I_1 = 27,1741 + j3,6638$ Ω eller $27,4200$ Ω $\angle 7,7^\circ$. Uttryckt i p.u. motsvarar impedansen 8,6% vid 230 V fasspänning (märkdata för transformatorn). För Transfix-transformatorn är plusföljdsimpedansen 4,00% och vinkeln c:a 65° (datablad appendix D). Att den induktiva delen är dominerande är inte förvånande med tanke på spänning/strömförhållandet (11 kV/5,25 A).

Vid beloppsmätningen med Y-Y-kopplad transformator (avsnitt 3.3) uppmättes 9,0% vilket är nära värdet vid Z-koppling.

4.5 Tomgångsmätning

Det var osäkert ifall LEM-modulerna var tillräckligt noggranna vid så låga strömmar som vid tomgång så ett försök gjordes där modulernas mätvärde jämfördes med multimeter. Resultatet visade att mätningarna mycket väl kunde användas i alla fall i avseende att bestämma fasläget. Amplituden var mer svårbestämd eftersom kurvformen innehöll en del övertoner. Efter filtrering i Matlab visade det sig dock att även amplituden var fullt användbar.

Tomgångsspänningarna, -strömmarna och resulterande impedans visas i tabell 4.4:

Fas	Spänning (V)	Ström (mA)	Impedans (Ω)	Impedans polärt (Ω)
L1	129,47 - j20,37	5,9 - j12,8	5163,3 + j 7737,8	9302,3 \angle 56,3°
L2	82,79 + j103,10	-13,6 - j5,9	7866,1 + j 4133,3	8885,9 \angle 27,7°
L3	-47,441 + j122,58	6,7 + j18,4	5050,6 + j 4424,3	6714,4 \angle 41,2°

Tabell 4.4: Komplexa tomgångsspänningar, -strömmar och -impedanser

Resultatet visar att tomgångsimpedansen är olika för alla tre faserna. Fas A och B är relativt lika beloppsmässigt men fasmässigt är de olika. Fas C har något högre ström vilket kan härledas till att fas L3 matar två ytterlindningar i Z-kopplingen men också vinkeln avviker från de två andra fasernas.

Transfixtransformatorns vinkel för tomgångsimpedansen är c:a 73°, ev. skillnad mellan faserna anges ej (datablad appendix D).

Förlusteffekten vid tomgång är också intressant att jämföra med den riktiga transformatorn. Följande förlusteffekter beräknades ur de uppmätta spänningarna och strömmarna (tabell 4.5):

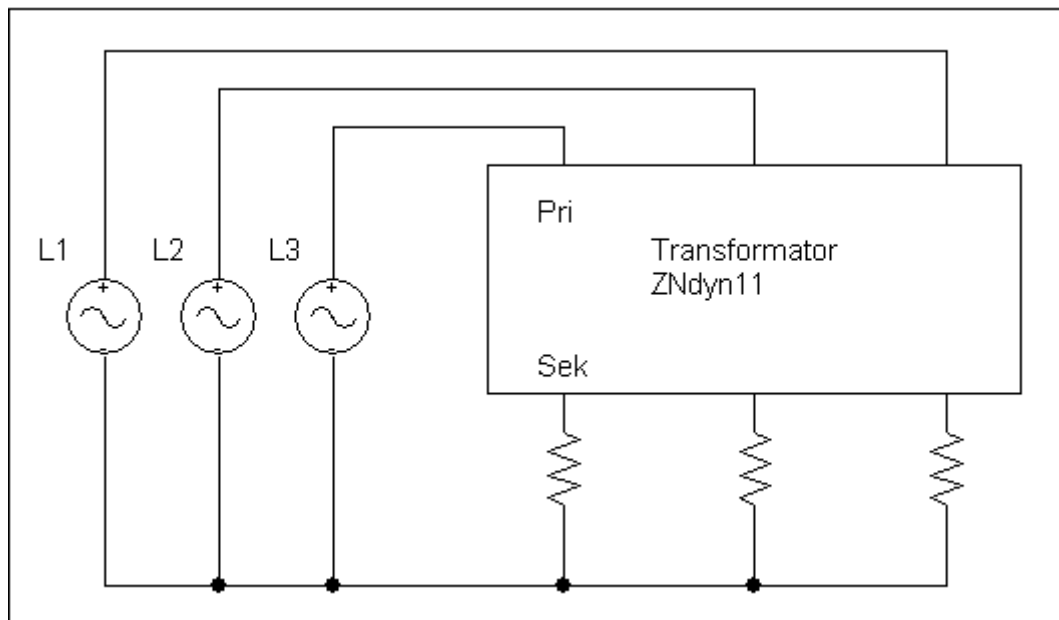
Fas	Skenbar effekt (belopp) (VA)	Aktiv effekt (W)	Reaktiv effekt (VAr)
L1	1,8466	1,0250	1,5361
L2	1,9676	1,7418	0,9152
L3	2,5732	1,9355	1,6955

Tabell 4.5: Effekttutveckling vid tomgång

Sammanlagd förlusteffekt blir 4,7023 W eller 0,94% i p.u. För den riktiga transformatorn är förlusteffekten 0,23% vilket är c:a en faktor 4 mindre. Dock är förlusterna under drift främst proportionella mot strömmen i kvadrat, inte tomgångseffekten. Jämför man märkströmmarnas storlek med förlusteffekten ser man att 233 W förlusteffekt vid 5,25 A märkström för den riktiga transformatorn motsvarar 4,4 W vid 0,72 A märkström vilket ligger nära den uppmätta förlusteffekten för labtransformatorn.

4.6 Mätningar med last

För att undersöka förlusterna vid normal drift mättes ström och spänning på transformatorns primär- och sekundärsida då transformatorns sekundärsida var ansluten till en Y-kopplad trefas lastresistor, se figur 4.1.



Figur 4.1: Uppkoppling vid lastmätning

80% av max last (c:a 1 A på sekundärsidan) användes eftersom det är vid 80% last som sekundärspänningen specificeras (datablad appendix D).

Följande spänningar och strömmar uppmättes (tabell 4.6 och 4.7):

Primärsidan:

Fas	Spänning (V)	Ström (A)
A	$-96,9107 - j89,4349$	$-0,4519 - j0,3880$
B	$-29,489 + j128,71$	$-0,1204 + j0,5900$
C	$127,79 - j39,529$	$0,5710 - j0,2003$

Tabell 4.6: Spänningar och strömmar på primärsidan vid last

Sekundärsidan:

Fas	Spänning (V)	Ström (A)
A	$-33,8688 + j58,1478$	$-0,5120 + j0,8820$
B	$67,1269 + j0,2354$	$1,0172 + j0,0041$
C	$-33,5892 - j59,0215$	$-0,5081 - j0,8924$

Tabell 4.7: Spänningar och strömmar på sekundärsidan vid last

Ur dessa mätvärden beräknades följande effekter (tabell 4.8 och 4.9):

Primärsidan

Fas	Skenbar effekt (belopp) (VA)	Aktiv effekt (W)	Reaktiv effekt (VAr)	Fasvinkel (°)
A	78,5522	78,5019	2,8118	2,1
B	79,5133	79,4904	1,9047	1,4
C	80,9391	80,8826	3,0236	2,1

Tabell 4.8: Effekter på primärsidan

Sekundärsidan

Fas	Skenbar effekt (belopp) (VA)	Aktiv effekt (W)	Reaktiv effekt (VAr)	Fasvinkel (°)
A	68,6274	68,6273	0,0988	0,10
B	68,2828	68,2828	-0,0375	-0,03
C	69,7414	69,7414	0,0137	0,01

Tabell 4.9: Effekter på sekundärsidan

Som synes är lastresistorn nära nog helt resistiv. Fasvinklarna på sekundärsidan är mindre än strömmättningsmodulernas noggrannhet i det avseendet.

Total aktiv ineffekt är 238,8749 W och uteffekten över lasten är 206,6515 W vilket ger 32,2234 W i totala förluster eller 6,5% i p.u. För den riktiga transformatorn är totala förlusteffekten 1,8% i p.u. Som nämnts i samband med tomgångsförlusterna beror förlusterna främst på belastningsströmmarna, inte märkeffekten. Eftersom lindningsförhållandet är annorlunda är det svårt att göra en direkt jämförelse men primärströmmen är c:a 7 gånger högre på Transfix-transformatorn och förlusterna är proportionella mot strömmen i kvadrat.

Utifrån detta borde förlusterna vara kring 1705 W (vid 80% last) om båda transformatorerna var lika effektiva. I själva verket uppgår förlusterna till c:a 1450 W vid motsvarande last vilket är 1,17 gånger mindre (se appendix D). Därför bör man kunna säga att labtransformatorn har 1,17 gånger större förluster (inte 3,6 gånger större vilket man får om man jämför förlusteffekterna i p.u.) vid last än den riktiga transformatorn relaterat till dess märkström på primärsidan.

4.7 Enfasigt jordfel primärsidan

Denna mätning har tidigare gjorts bland beloppsmätningarna men även fasvinklarna kan vara intressanta i detta fall, speciellt på sekundärsidan. Enligt simuleringar gjorda av Anna Guldbrand ska nollföljdskomponenter inte överföras till sekundärsidan vid fel på primärsidan. Nollföljds-mätningen antyder att detta stämmer men att verifiera detta vid ett riktigt felfall hade också varit önskvärt att uppnå (Guldbrand 2006 s. 4).

Trefassspänning anslöts på primärsidan utom till fas C som kortslöts till jord. Sekundärsidan lämnades öppen. Som i den tidigare beloppsmätningen påverkades resultatet inte av om delat var inkopplat eller ej. Följande spänningar och strömmar uppmättes (tabell 4.10):

Fas	Primärspänning (V)	Primärström (A)	Sekundärspänning (V)
L1	24.7707 \angle -17.6473°	0.7464 \angle -82.3916°	8.3127 \angle -51.5119°
L2	24.8051 \angle -142.4735°	0.7363 \angle -82.6699°	14.6381 \angle 156.1285°
L3	-	0.7399 \angle -82.0617°	8.3092 \angle 3.6633°

Tabell 4.10: Enfasigt jordfel uppsidan, transformatorn ZNdyn-kopplad

Sekundärspänningarnas vinkelangivelser kan inte jämföras med vinklarna för primärspänningarna och -strömmarna eftersom de är från en separat mätning. Dock är det av intresse att se dess inbördes skillnad varför vinklarna är medtagna i tabellen.

Värt att notera är att samtliga tre strömmar ligger i fas. Strömmen i fas L1 är förskjuten 60° negativt och strömmen i fas L2 är förskjuten 60° positivt vilket innebär att sett utifrån beter sig transformatorn som en kapacitiv last på fas L2 vid denna typ av fel.

Sekundärspänningarna är symmetriska på så sätt att deras summa är mycket nära 0, vilket innebär att det inte överförs någon signifikant nollföljdsspänning till sekundärsidan. Detta stämmer alltså överens med tidigare nämnda simuleringar. Påverkan från bortfallet av fas L3 på primärsidan är jämnt fördelad mellan fas L1 och L3 på sekundärsidan medan fas L2 har nominell spänningsnivå.

Som jämförelse Y-kopplades transformatorn även på uppsidan (lindningslager 2 lämnades oanslutet) och mätningen gjordes om. Deltat var inkopplat under mätningen och bidrar i detta fall till en viss utjämning. I tabell 4.11 visas uppmätta värden:

Fas	Primärspänning (V)	Primärström (A)	Sekundärspänning (V)
A	25.7778 \angle 80.4628°	0.5839 \angle -43.4166°	23.4487 \angle 66.1793°
B	24.5416 \angle -41.3747°	0.5849 \angle -45.9736°	22.6837 \angle -77.3684°
C	-	0.5728 \angle -44.9784°	4.2097 \angle 169.7388°

Tabell 4.11: Enfasigt jordfel uppsidan, transformatorn YNdyn-kopplad

Även i denna mätserie är sekundärspänningarna från en separat mätning.

Primärströmmarna är även i detta fall i fas, dock är skillnaden i fasvridning inte jämnt fördelad mellan faserna som i det tidigare fallet. För fas A är strömmen vriden c:a 120° i förhållande till spänningen medan den nästan ligger i fas med spänningen för fas B.

Sekundärspänningarna är något förskjutna. Vinkeln mellan fas A och B är c:a 143° och mellan B och C c:a 114° istället för förväntade 120°. Den stora skillnaden är dock att fas A och B har i storleksordning nominell spänning medan fas C har betydligt lägre spänning. Utan deltat hade obalansen varit ännu större, för till skillnad från fallet med Z-koppling påverkar deltat resultatet något. Värt att nämna är också att sekundärspänningarna inte tar ut varandra med Y-koppling, vilket innebär att nollföljdsspänning överförs till sekundärsidan vid fel på uppsidan. Detta innebär i sin tur att nollföljdsströmmen påverkas av det aktuella lastförhållandet.

5 Diskussion

Efter utförda mätningar har labtransformatorn visat sig vara en lämplig modell av förebilden i de flesta avseenden. Förlusterna både vid tomgång och last är i samma relativa storleksordning. Även nollföljds- och plusföljdsimpedanserna är relevanta vilket är speciellt viktigt i detta fall då låg nollföljdsimpedans är eftersträvarsvärdt vid lokal kompensering.

Det är dock stor skillnad i fasvinkel för plusföljdsimpedanserna. Detta kan härledas till att de resistiva komponenterna är mer dominerande vid de lägre spänningarna i labtransformatorn eftersom märkströmmen är betydligt närmare storleksmässigt (0,72 A jämfört med 5,25 A på primärsidan).

Kopplingsarten och i viss mån den asymmetriska utformningen innebär att transformatorn t.ex. vid tomgång utgör en relativt ojämn belastning. Mätningarna med last visar dock att detta inte märks vid normala drifttillstånd och kopplingsarten har visat sig ha flera goda egenskaper såsom låg nollföljdsimpedans och isolering av nollföljdskomponenter mellan primär- och sekundärsidan.

Att ha identiska lindningar på labtransformatorn har visat sig vara mycket praktiskt eftersom kopplingsalternativen blir fler. Dessutom är det mindre risk för felkoppling och feltolkning av resultat vid utbildnings- och experimentbruk.

I övrigt har en rad andra upptäckter gjorts under arbetets gång såsom att fasriktiga mätningar kan vara svårt att åstadkomma även med påkostade mätinstrument om inte extra fokus har lagts på liten fasavvikelse vid designen.

6 Framtida arbete

6.1 Ytterligare studier av transformatorn

I detta avsnitt presenteras ett par idéer för fortsatt arbete kring att undersöka och dokumentera transformatorns egenskaper ytterligare.

6.1.1 Transientförlopp

I detta arbete har enbart stationära tillstånd vid 50 Hz undersökts. Transientförlopp vid exempelvis fel kan därför vara intressant att studera. Befintlig mät dator skulle kunna användas även till sådana mätningar.

6.1.2 Matrisbeskrivning av induktanser

För att få en mer omfattande modell av transformatorn finns det en idé som bygger på att sätta upp samband mellan de olika lindningarna i en matris och reducera antalet parametrar. Därefter kan man använda systemidentifiering (minsta kvadrat-estimering) för att skatta dessa.

Fördelar med denna metod är bl.a. att det endast blir 5 parametrar som behöver skattas och att man kan jämföra olika mätserier för att se om någon avviker från de övriga (Dettmann 2002, Johansson 1993).

6.1.3 Annan utformning

Trefastransformatörer kan konstrueras så att de är geometriskt symmetriska. Den s.k. Hexa-transformatorn från Hexaformer AB är en intressant idé med många påstådda fördelar. Bl.a. har de en modell med inbyggd kompensering och kopplingsart ZNzn0 som motsvarar Transfix Ecobloc i övriga avseenden (märkspänning och märkeffekt) tillgänglig (Hexaformer 2007).

Symmetrisk utformning bör ha positiv inverkan på t.ex. tomgångsströmmen för den Z-kopplade transformatorn. En jämförelse med en symmetrisk transformator som i övrigt har likvärdiga specifikationer kunde därför ha varit värdefull för att undersöka om det ger några klara fördelar jämfört med traditionell utformning.

6.2 Användning av transformatorn i laboratoriesystemet

Avsnittet beskriver ett par uppslag för hur arbetet med laboratoriesystemet kan påbörjas.

6.2.1 Ledningsmodeller

Nästa steg i arbetet med laboratoriet där transformatorn ska användas kan vara att koppla upp transformatorn tillsammans med lednings/kabelmodeller och spoljordning och undersöka beteendet. Efterhand kan man komplettera med fler komponenter.

6.2.2 Återskapa mätningar

När tillräcklig kunskap om laboratoriesystemets beteende har inhämtats skulle det vara intressant att se om man kan återskapa exempelvis mätningarna som gjordes i Stenestad (Akke 2006 s. 13-14). Lyckas det får man en bekräftelse på att laboratoriesystemet verkligen kan ge en adekvat bild av ett verkligt system.

6.2.3 Test av reläskydd

Eftersom spänningsnivån matchar kommersiella reläskydds ström/spänningstransformatörer kan dessa kopplas in direkt i laboratoriesystemet för testning.

7 Referenser

Akke, Magnus (2006), *Rapport Projekt Ic, E.On, Etapp 1*, dokument IEA

Dettmann, K.-D. – Heuck, K. – Hirsch, G. – Lotter, O. (2002), Transient node admittance matrices of three-phase power transformers. Part 1. Two-winding transformers., *Electrical Engineering* 84 s. 241 - 249.

Duncan Glover, J. – Sarma, Mulukutla S. (2002), *Power System Analysis and Design, 3rd edition*, Brooks/Cole, Pacific Grove

Grima, Thierry, Groupe Cahors/Transfix (2006-03-16), E-postmeddelande

Guldbrand, Anna (2006), *Central or Local Compensation of Earth-Fault Currents in Non-Effectively Earthed Distribution Systems*, teknisk rapport IEA, CODEN:LUTEDX/(TEIE-7217)/1-12/(2006)

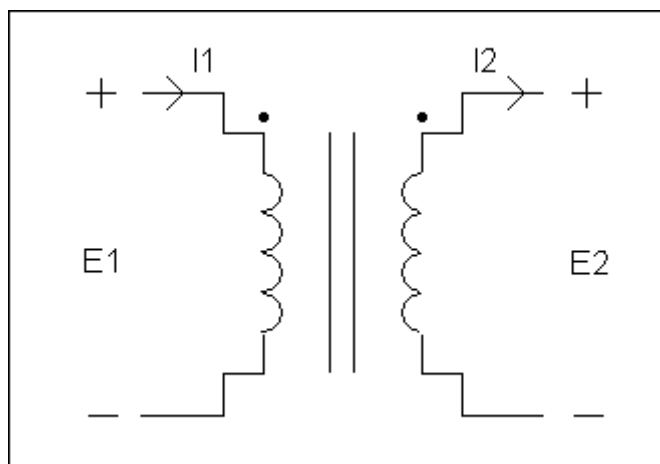
Hexaformer Produktion AB (2007-11-26), *Kompenserade transformatorer*, <http://www.hexaformer.se/pro/kotr.html>

Johansson, R. (1993), *System Modeling & Identification*, Prentice-Hall, Upper Saddle River

Phadke, Arun G. – Thorp, James S. (1990), *Computer Relaying for Power Systems*, Research Studies Press, Taunton

Appendix A: Den ideala transformatorn

Schemat för en enkel transformator bestående av två lindningar runt en gemensam magnetisk kärna visas i figur A.1. Lindningarna har N_1 resp. N_2 varv och har spänningsvektorerna E_1 resp. E_2 över sig. Vidare har varje lindning en ström där riktningen för I_1 är definierad in i lindningen och riktningen för I_2 är definierad ut ur lindningen.



Figur A.1: Schema för enkel ideal transformator

Kärnan har tvärsnittsarean A , permeabiliteten μ och genomsnittslängden för den magnetiska kretsen benämns l . För den ideala transformatorn antas följande:

- Lindningarna saknar resistans.
- Kärnans permeabilitet är oändlig, vilket innebär att dess reluktans är noll.
- Det existerar inget läckflöde utan hela magnetflödet (benämnt Φ) går i kärnan och kopplar ihop lindningarna.
- Inga förluster förekommer i kärnan.
- Samtliga spänningar och strömmar är sinusformade och stationära

Ampères lag säger att integralen av den tangentiella magnetiska fältstyrkan H längs en sluten slinga är lika med nettoströmmen som omsluts av slingan. I detta fall utgörs slingan av transformator-kärnan och nettoströmmen genom kärnan blir $N_1 I_1 - N_2 I_2$. Det förutsätts att H är konstant i hela kärnan vilket leder till ekvation A.1:

$$Hl = N_1 I_1 - N_2 I_2$$

Ekvation A.1: Ampères lag vid konstant fältstyrka H .

Den magnetiska flödestätheten B ges av ekvation A.2:

$$B = \mu H$$

Ekvation A.2: Magnetiska flödestätheten B .

Magnetflödet Φ i kärnan ges då av ekvation A.3:

$$\Phi = BA$$

Ekvation A.3: Magnetflödet Φ .

Kombineras ekvation A.2 och A.3 med A.1 fås följande samband (ekvation A.4):

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

Ekvation A.4: Samband mellan nettoström och magnetflöde.

Kärnans reluktans R definieras enligt ekvation A.5:

$$R = \left(\frac{l}{\mu A} \right)$$

Ekvation A.5: Definition av reluktansen R .

Detta kombinerat med ekvation A.4 ger ekvationen för mmk-balans (ekvation A.6):

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = R \Phi$$

Ekvation A.6: Villkor för mmk-balans i en magnetisk krets.

Reluktansen i en magnetisk krets motsvarar resistansen i en elektrisk krets. Enligt villkoren för den ideala transformatorn är reluktansen noll vilket innebär att $N_1 I_1 = N_2 I_2$.

Faradays lag säger att spänningen $e(t)$ som induceras i en lindning med N varv av ett magnetiskt flöde $\varphi(t)$ som varierar i tiden är (ekvation A.7):

$$e(t) = N \frac{d\varphi(t)}{dt}$$

Ekvation A.7: Faradays lag.

Eftersom spänningar och strömmar är stationära är även magnetflödet stationärt. Om frekvensen är ω kan man uttrycka e och φ med dess fasvektorer enligt ekvation A.8:

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

Ekvation A.8: Faradays lag med vektorer vid stationärt förhållande.

Eftersom hela flödet antas gå i kärnan och koppla båda lindningarna fås följande samband för E_1 och E_2 (ekvation A.9):

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

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

Ekvation A.9: Samband för E_1 och E_2 .

Divideras uttrycken i ekvation A.9 med varandra fås resultatet i ekvation A.10:

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

Ekvation A.10: Förhållanden mellan N och E.

Sammantaget gäller följande förhållanden för spänning och ström i transformatorns lindningar (ekvation A.11):

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

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

Ekvation A.11: Förhållanden för spänningar och strömmar.

Eftersom spänningen skalas med N_1/N_2 och strömmen med N_2/N_1 innebär detta att ineffekten i lindning 1 är densamma som uteffekten från lindning 2, d.v.s. den ideala transformatorn har inga förluster (Duncan Glover 2002 s. 76-80).

Appendix B: Per-unitbegreppet

I kraftsystem uttrycker man ofta spänningar, strömmar, impedanser och effekter i per-unit (förk. p.u.) eller procent av förutbestämda basvärden. Speciellt fördelaktigt är p.u. just vad det gäller transformatorer eftersom spänningar, strömmar osv. är samma uttryckt i p.u. på båda sidor om transformatorn.

Värdet i p.u. beräknas genom att dela det aktuella värdet med basvärdet. Exempel: Om aktuell effekt är 37 kVA och basvärdet är 100 kVA är effekten $37/100 = 0,37$ eller 37% i p.u.

Oftast används märkvärden för olika komponenter som bas. Detta har fördelen att t.ex. impedanser ofta ligger inom samma område i p.u. vilket innebär att man t.ex. snabbt kan identifiera avvikande och potentiellt felaktiga värden.

Eftersom basvärdet alltid är ett reellt tal är fasvinkeln samma för värdet i p.u. som för det riktiga värdet.

De elektriska lagarna gäller även i p.u, därför kan inte alla basvärden väljas fritt. Har man exempelvis baseffekten 100 W och basspänningen 100 V måste basströmmen vara 1 A eftersom $P_{\text{base}} = V_{\text{base}} * I_{\text{base}}$ (Duncan Glover 2002 s. 88-95)

Appendix C: Symmetriska komponenter

Eftersom symmetriska komponenter används mycket inom elkraft och även i denna rapport ges en översiktlig bild av vad det innebär.

Symmetriska komponenter är en användbar metod för att beskriva trefassystem. Istället för att arbeta med fasspänningar och strömmar görs en linjärtransformation till vad man kallar plus- minus- och nollföljdskomponenter. En av fördelarna är att analys av trefassystem ofta blir relativt enkelt att utföra eftersom ett system delas upp i tre separata system som bara är sammankopplade vid obalans.

Nollföljd

Definitionen av nollföljd är tre visare med samma amplitud och utan fasskillnad. I praktiken symboliserar nollföljden de spänningar och strömmar som är samma (både amplitud och belopp) i alla tre faserna. Markeras med index 0.

Plusföljd

Plusföljd definieras som tre visare med samma amplitud och 120 fasskillnad mellan sig, d.v.s. ett idealt balanserat trefassystem. Markeras med index 1.

Minusföljd

Precis som plusföljd definieras minusföljden som tre visare med samma amplitud och 120 fasskillnad, dock är fasordningen negativ. Markeras med index 2.

Transformation

För att gå mellan fasdomänen och symmetriska domänen används det komplexa talet a som symboliserar en visare med längden 1 och vinkel 120° (ekvation C.1):

$$a = 1 \angle 120^\circ = \frac{-1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Ekvation C.1: Definition av a

De symmetriska komponenternas förhållande till faskomponenterna definieras med matrisen A (ekvation C.2):

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

Ekvation C.2: Definition av matrisen A

Fasspänningarna (V_a , V_b och V_c) förhåller sig till de symmetriska spänningarna (V_0 , V_1 , V_2) enligt följande ekvation (C.3):

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

Ekvation C.3: definition av transformation mellan fasdomänen och symmetriska domänen

För att transformera från fasdomänen till symmetriska komponenter används inversen av A (ekvation C.4):

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

Ekvation C.4: Definition av transformation mellan symmetriska domänen och fasdomänen

Skrivet som separata ekvationer fås följande samband (ekvation C.5-C.7):

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c)$$

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c)$$

Ekvation C.5: Nollföljdsekvationer

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c)$$

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c)$$

Ekvation C.6: Plusföljdsekvationer

$$V_2 = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c)$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c)$$

Ekvation C.7: Minusföljdsekvationer

Som synes blir nollföljdskomponenterna 0 vid balanserat system eftersom fasernas visare då tar ut varandra (Duncan Glover 2000 s.356-361).

Appendix D: Testrapport Transfix Ecobloc



TEST REPORT N°				135050721	
Type	ECOBLOC TRANSFORMER	Serial Number	135050721	Year	2005
Rated Power	100 kVA	Dielectric Weight	408 Kgs	Frequency	50 Hz
Reference standard	IEC 60076 - HN 52 S 24		Connection Group	ZN(d)yn11	
Cooling System	ONAN	Total Weight	1720 kgs	Dielectric	Oil

	Winding Material	Tappings					RATED I (A)
		1	2	3	4	5	
HV	Copper	11550V	11275V	11000V	10725V	10450V	5,25 A
	Copper						
LV	Copper	420 V					137 A
	Copper						

DIELECTRICAL TESTS						
SEPARATE SOURCE VOLTAGE WISTHSTAND				INDUCED VOLTAGE WISTHSTAND		
	kV	Hz	Time		V	Hz
LV / HV + Ground	3 kV	50 Hz	60 s	8T	840	200 Hz
HV / LV + Ground	28 kV	50 Hz	60 s			

EARTHING REACTOR			
Zo (earthing reactor+transformer) =	417.1 Ω	IR (40°C) = 0,47 A	IX (40°C) = 16.2A
Rated Values		IR max = 0.5 A	IX (40°C) = 15 A +/- 5%
(stabilisation winding) / LV +ground		3 kV	50 Hz
(earthing reactor + HV) / LV + ground		28 kV	50 Hz
Induced voltage wisthstand		840 V	200 Hz

WINDING RESISTANCE (Ω)			Temperature 16°C						
Position	HV (Ω)			LV (mΩ)			LV (mΩ)		
	UV	UW	WU	UV	UW	WU	UV	UW	WU
3	19.15	19.17	19.12				14.35	14.25	14.29

VOLTAGE RATIO								
Position	Voltage		Rated Values	Measured Values	Voltage		Rated Values	Measured Values
	HV	LV			HV	LV		
-	5.00%	11550V	420V	47.63	47.64			
	2.50%	11275V		46.60	46.53			
3		11000V		45.36	45.39			
4	2.50%	10725V		44.23	44.24			
5	5.00%	10450V		43.10	43.08			

Tested values			
Rated Position	11000 V	Rated Values	Tolerances
No-load losses	233W	210W	+ 15%
No-load current	0.80%		
Load losses at 75 °C	1523W	1475W	+ 15%
Total losses	1756W	1685W	+ 10%
Impedance Voltage at 75 °C	3.96%	4.00%	± 10%

CONCLUSION : The results of measurements and above mentioned tests are satisfactory .

Date : 22/12/05

Name & Visa operator : L. CALLES

ZI Toulon-Est
636, avenue de Draguignan
BP 89
83079 Toulon Cedex 09
France

Tél. +33(0)4 94 08 74 00
Fax +33(0)4 94 75 00 28

Société Nouvelle Transfix Toulon S.A.
SA au capital de 1 680 000 euros
RCS Cahors 78 B 23
Siret 312 346 810 000 20 - APE 311A

Appendix E: Datablad Tramo-ETV TOFS-0,8

TRAMO-ETV AB , SE-241 92 ESLÖV Tel. 0413-54 12 10 Fax. 0413-54 11 95

TRAMO
ETV

Three-phase transformer, open

GENERAL DRAWING

Power: 0,8 kVA
Primary voltage: On request
Secondary voltage: On request
Vector group: Dyn-11, or other on request
Connecting: Terminalblock
Rated secondary voltage calculated at 80 % load
Frequency: 50-60 Hz
ta: 40°C (maximum ambient temperature)
Temperature class B, 130°C
Losses: Po 19 W , Pcu 50 W
uk: 6,0 %
Used components are UL-approved

Type:

TOFS-0,8

Standards:

IEC 989/EN 61558-2-1 , Separating transformers

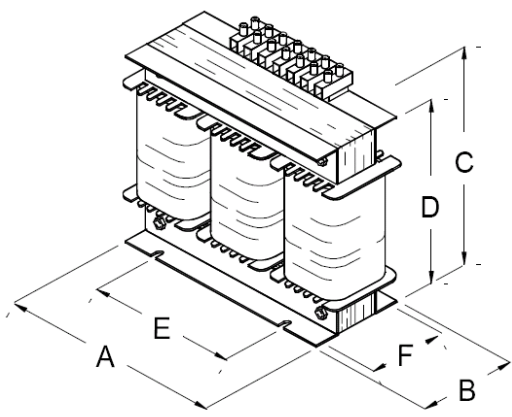
EN 61558-2-4 , Isolating transformers

EN 61558-2-6 , Safety isolating transformers

Manufactured by TRAMO-ETV AB , SE-241 92 ESLÖV

A: 208 mm
B: 105 mm
C: 200 mm
D: 177 mm
E: 110 mm
F: 71 mm

Weight: 10,5 kg



CE

Appendix F: Utdrag instruktionsbok IOTech Personal DAQ/3000

Crosstalk

Crosstalk is a type of noise related to source impedance and capacitance, in which signals from one channel leak into an adjacent channel, resulting in interference or signal distortion. The impact of source impedance and stray capacitance can be estimated by using the following equation.

$$T = RC$$

Where **T** is the time constant, **R** is the source impedance, and **C** is the stray capacitance.

High source (transducer) impedance can be a problem in multiplexed A/D systems. When using more than 1 channel, the channel input signals are multiplexed into the A/D. The multiplexer samples one channel and then switches to the next channel. A high-impedance input interacts with the multiplexer's stray capacitance and causes crosstalk and inaccuracies in the A/D sample.

A solution to high source impedance in relation to multiplexers involves the use of buffers. The term buffer has several meanings; but in this case, *buffer* refers to an operational amplifier having high input impedance but very low output impedance. Placing such a buffer on each channel (between the transducer and the multiplexer) prevents the multiplexer's stray capacitance from combining with the high input impedance. This use of a buffer also stops transient signals from propagating backwards from the multiplexer to the transducer.

Personal Daq/3000 and PDQ30 systems do not have a buffer for each analog input channel, due to power restrictions. Crosstalk is particularly troublesome when measuring high amplitude signals (+/-10V) along with low level signals (+/- 100mV.) All temperature measurements are low level signals that use the +/- 100mV range of the Personal Daq.

If an acquisition's scan group includes both high level signals and low level signals, here are some tips on how to reduce the amount of crosstalk.

- Use as much oversampling as possible.
- Within the scan group, group high level signals together, group low level signals together
- Place a shorted channel in the scan group between the high level signals and the low level signals. The shorted channel should have the same gain as the last high level signal. This may allow for a faster scan rate with less oversampling.

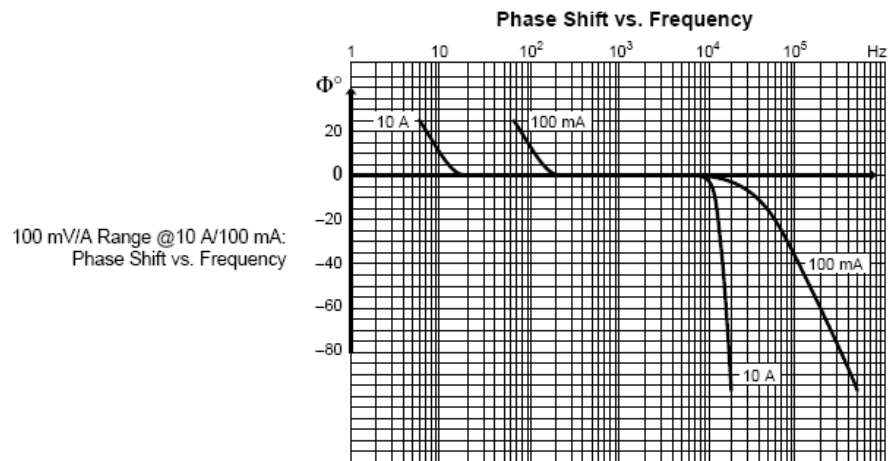
Appendix G: Utdrag instruktionsbok Fluke 80i-1000S

Table 2. Maximum Phase Shift

SWITCH POSITION	PHASE SHIFT*		
100 mV/A	25° @ 0.5A	15° @ 2A	10° @ 10A
10 mV/A	4° @ 5A	3° @ 20A	2° @ 100A
1 mV/A	2° @ 50A	2° @ 200A	1° @ 1000A

* Accuracies and Phase Shifts are given for 45 Hz to 1 kHz, an ambient temperature of 23 °C ±5 °C, relative humidity of 20 to 75%, conductor centered in jaw window, no DC component, no external current carrying conductor, magnetic field < 40 A/m and 1 MΩ/47 pF oscilloscope or meter input impedance.

TYPICAL RESPONSE CURVES (cont)



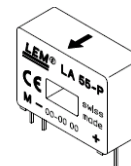
Appendix H: Datablad LEM LA55-P



Current Transducer LA 55-P

For the electronic measurement of currents : DC, AC, pulsed..., with a galvanic isolation between the primary circuit (high power) and the secondary circuit (electronic circuit).

$$I_{PN} = 50 \text{ A}$$



Electrical data							
I_{PN}	Primary nominal r.m.s. current		50		A		
I_P	Primary current, measuring range		0 .. ± 70		A		
R_M	Measuring resistance @		$T_A = 70^\circ\text{C}$				
			R_{Mmin}	R_{Mmax}		R_{Mmin}	R_{Mmax}
		with ± 12 V	@ ± 50 A _{max}	10	100	60	95
			@ ± 70 A _{max}	10	50	60 ¹⁾	60 ¹⁾
		with ± 15 V	@ ± 50 A _{max}	50	160	135	155
			@ ± 70 A _{max}	50	90	135 ²⁾	135 ²⁾
I_{SN}	Secondary nominal r.m.s. current		50		mA		
K_N	Conversion ratio		1 : 1000				
V_C	Supply voltage (± 5 %)		± 12 .. 15		V		
I_C	Current consumption		10 (@ ± 15 V) + I_S		mA		
V_d	R.m.s. voltage for AC isolation test, 50 Hz, 1 mn		2.5		kV		

Features

- Closed loop (compensated) current transducer using the Hall effect
- Printed circuit board mounting
- Insulated plastic case recognized according to UL 94-V0.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.

Accuracy - Dynamic performance data					
X	Accuracy @ $I_{PN}, T_A = 25^\circ\text{C}$	@ ± 15 V (± 5 %)	± 0.65		%
		@ ± 12 .. 15 V (± 5 %)	± 0.90		%
ϵ_L	Linearity		< 0.15		%
I_O	Offset current @ $I_P = 0, T_A = 25^\circ\text{C}$		Typ	Max	mA
I_{OM}	Residual current ³⁾ @ $I_P = 0$, after an overload of $3 \times I_{PN}$				mA
I_{OT}	Thermal drift of I_O	0°C .. + 70°C	± 0.1	± 0.5	mA
		- 25°C .. + 85°C	± 0.1	± 0.6	mA
t_{ra}	Reaction time @ 10 % of I_{Pmax}		< 500		ns
t_r	Response time @ 90 % of I_{Pmax}		< 1		µs
di/dt	di/dt accurately followed		> 200		A/µs
f	Frequency bandwidth (- 1 dB)		DC .. 200		kHz

General data					
T_A	Ambient operating temperature		- 25 .. + 85		°C
T_S	Ambient storage temperature		- 40 .. + 90		°C
R_S	Secondary coil resistance @		$T_A = 70^\circ\text{C}$		
			R_{Smin}	R_{Smax}	
				$T_A = 85^\circ\text{C}$	85
m	Mass		18		g
	Standards ⁴⁾		EN 50178		

- Notes :** ¹⁾ Measuring range limited to ± 60 A_{max}
²⁾ Measuring range limited to ± 55 A_{max}
³⁾ Result of the coercive field of the magnetic circuit
⁴⁾ A list of corresponding tests is available

980706/8

Appendix I: Matlabscript för beräkning av fasvektorer

```
clear all; close all;

load daqv01 % Laddar filen med sampeldata

fs = 50000; % Samplingsfrekvens
Ts = 1/fs; % Periodtid
K = 1000; % Antal sampel per period

v1 = 100*(A(:,1)-mean(A(:,1))); % Spänningarna skalas och
v2 = 100*(A(:,3)-mean(A(:,3))); % medelvärdet tas bort från varje
v3 = 100*(A(:,5)-mean(A(:,5))); % sampel

iA1 = (A(:,7)-mean(A(:,7)))/220.2/0.050*5; % Strömmarna skalas
iA2 = (A(:,9)-mean(A(:,9)))/219.7/0.050*5; % beroende på
iA3 = (A(:,11)-mean(A(:,11)))/219.6/0.050*5; % mätförhållandena och
% medelvärdet tas bort
% från varje sampel

t = (1:length(v1))*1e-3;

Nstart = 1;
Nstop = length(t)-1;

v1 = v1(Nstart:Nstop);
v2 = v2(Nstart:Nstop);
v3 = v3(Nstart:Nstop);

iA1 = iA1(Nstart:Nstop);
iA2 = iA2(Nstart:Nstop);
iA3 = iA3(Nstart:Nstop);

t = t(Nstart:Nstop);

%Beräkning av ström och spänningsvektor (Phadke)
dPhi=2*pi/K; % Vinkelförändring per sampel

index=[Nstart:Nstop]';

Phi=dPhi*index; % Vinkel från 0 till mycket stora värden

Phi=rem(Phi,2*pi); % Begränsning av vinkeln till mindre än 2*pi

Sin=sin(Phi);
Cos=cos(Phi);

v1_sin=v1.*Sin;
v1_cos=v1.*Cos;

v2_sin=v2.*Sin;
v2_cos=v2.*Cos;

v3_sin=v3.*Sin;
v3_cos=v3.*Cos;
```

```

iA1_sin=iA1.*Sin;
iA1_cos=iA1.*Cos;

iA2_sin=iA2.*Sin;
iA2_cos=iA2.*Cos;

iA3_sin=iA3.*Sin;
iA3_cos=iA3.*Cos;

% Tag medel av en period med Matlabs filterfunktion
% Skapa filterkoefficienter för medel av en period
B=(1/K)*ones(1,K);
A=[1 zeros(1,K-1)];

v1_real=filter(B,A,v1_cos);
v1_imag=filter(B,A,v1_sin);
V=sqrt(2)*(v1_real - j* v1_imag);

v2_real=filter(B,A,v2_cos);
v2_imag=filter(B,A,v2_sin);
V2=sqrt(2)*(v2_real - j* v2_imag);

v3_real=filter(B,A,v3_cos);
v3_imag=filter(B,A,v3_sin);
V3=sqrt(2)*(v3_real - j* v3_imag);

iA1_real=filter(B,A,iA1_cos);
iA1_imag=filter(B,A,iA1_sin);
I=sqrt(2)*(iA1_real - j * iA1_imag);

iA2_real=filter(B,A,iA2_cos);
iA2_imag=filter(B,A,iA2_sin);
I2=sqrt(2)*(iA2_real - j * iA2_imag);

iA3_real=filter(B,A,iA3_cos);
iA3_imag=filter(B,A,iA3_sin);
I3=sqrt(2)*(iA3_real - j * iA3_imag);

disp('Nu beräknas Effekten')
S = V.*conj(I);
P = real(S);
Q = imag(S);

Vmean = mean(V(2500:4999)); % Medelvärdet av andra halvan av
V2mean = mean(V2(2500:4999)); % vektorvärdena används
V3mean = mean(V3(2500:4999));

Imean = mean(I(2500:4999));
I2mean = mean(I2(2500:4999));
I3mean = mean(I3(2500:4999));

% Beräkningar av impedans
Z1 = V./I;
R1 = real(Z1);
X1 = imag(Z1);
Z1mean = mean(Z1(2500:4999));

Z2 = V2./I2;

```

```

R2 = real(Z2);
X2 = imag(Z2);
Z2mean = mean(Z2(2500:4999));

Z3 = V3./I3;
R3 = real(Z3);
X3 = imag(Z3);
Z3mean = mean(Z3(2500:4999));

disp('Nu beräknas fi')
fi = (unwrap(angle(V)) - unwrap(angle(I)))*360/2/pi;
cosfi = cos(fi*2*pi/360);

disp('Nu beräknas frekvensen')
varg = unwrap(angle(V));
vn = 50 + diff(-varg)/Ts/(2*pi);
vn = [vn ; vn(length(vn))];

[B,A]=butter(4,0.05);
vn_filt = filtfilt(B,A,vn);

disp('Nu plottas resultatet')
plot_resolution=99;
mm=[Nstart:round(Nstop/plot_resolution):Nstop];
% Minskar antalet plottade punkter för att öka hastigheten

figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(t(mm),abs(V(mm)), t(mm),abs(I(mm)))
grid
legend('V', 'I')
subplot(2,1,2)
plot(t(mm),P(mm), t(mm),Q(mm))
grid
legend('P', 'Q')

figure(2)
subplot(3,1,1)
plot(t(mm),fi(mm))
grid
ylabel('\fontname{times}\it \phi')

subplot(3,1,2)
plot(t(mm),cosfi(mm))
grid
ylabel('\fontname{times}\it cos \phi')

subplot(3,1,3)
plot(t(mm),vn_filt(mm))
grid
ylabel('\fontname{times}\it Frekvens')

figure(3)
plot(t,v1,t,v2,t,v3);

figure(4)
plot(t,v1,t,iA1);

grid

```