

Transformatorers beteende vid fasavbrott i matande spänning



Anton Christensson
Erik Lingärde

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

Transformatorers beteende vid fasavbrott i matande spänning

Anton Christensson, E09 anton.christensson@gmail.com
Erik Lingärde, E09 erik@lingarde.se

23 juni 2014

Sammanfattning

Seriefelet i Forsmarks kärnkraftverk den 30 maj 2013 har uppmärksammat behovet av utredning kring effekterna av fasavbrott på transformatorers primärsida när sekundärsidan är lastad med olika typer av last. I Forsmark spänningssattes de bortfallna faserna bakvägen via kombinationen av transformatorer och lastobjekt i systemet så väl att underspänningsskydden inte kunde detektera felet. Reservkraften startade därmed aldrig automatiskt.

På uppdrag av OKG har datorsimuleringar på motsvarande felsituation i Oskarshamns kärnkraftverk utförts, men då det råder osäkerhet kring simuleringsverktygens förmåga att korrekt återge fenomenen har motsvarande undersökning gjorts experimentellt i laboratoriemiljö i form av detta examensarbete.

Transformatorer har specificerats och beställts hem och en laboratoriemiljö har byggts upp för att vid olika trefastransformeringar med avseende på kärnans utformning, kopplingsarter och med olika belastningsförhållanden undersöka inverkan av enfasiga och tvåfasiga seriefel på transformatorns primärsida.

Experimenten visade att de olika transformatorkopplingarna lite grovt kan delas in i två olika grupper med inbördes liknande resultat, men som sinsemellan ger väldigt olika fenomen.

Lasttypen har visat sig ha en mycket viktig inverkan på till vilken grad bortkopplade faser spänningssätts, där asynkronmotorlast generellt ger en mer symmetrisk spänningssättning jämfört med resistiv last (de bortkopplade faserna kunde i vissa fall spänningssättas till nära sin ursprungliga amplitud och fasläge trots att två av de tre matande faserna var bortkopplade).

De resultat som tagits fram experimentellt i detta arbete har vid jämförelse kunnat matcha de simuleringsresultat som funnits att tillgå.

Abstract

The series fault that occurred in Forsmark nuclear power plant on May 30, 2013 has drawn attention to the need for investigating the impacts of open phase faults on the primary side of transformers where the secondary side supplies different types of load objects. In Forsmark the two open phases were, via the combination of transformers and load objects present in the system, energized to such a degree that the undervoltage protection relay could not detect the fault and the backup diesel generators therefore did not start automatically.

Computer simulations commissioned by OKG has been done on the corresponding situation in the Oskarshamn nuclear power plant, but since there are uncertainties regarding how well the simulation tools are able to handle the fault type, experiments have been performed in a laboratory environment as a part of this thesis work.

Transformers have been specified and ordered, and a laboratory setting has been built in order to, with respect to different core designs, winding connections and load compositions, investigate how three-phase transformers respond to open phase faults on its primary side.

The experiments show that the different transformer setups can be roughly divided into two sets where the setups mutually behave almost the same, but with greater differences between the sets.

The load composition has proven to have a very big impact on to what degree the lost phases are energized. Compared to pure resistive load, induction motor load contributes to a greater degree to energize the lost phases (in some cases, the two open phases could be re-energized to almost its original magnitude and phase angle when only one out of three phases was connected to the grid).

The results and conclusions drawn from the experiments match the simulation results.

This report is written in Swedish.

Förord

Rapporten du läser är resultatet av ett examensarbete som utförts på institutionen för industriell elektroteknik och automation (IEA) vid Lunds tekniska högskola i samarbete med Oskarshamns kraftgrupp under våren 2014. Examensarbetet är den avslutande delen i vår utbildning till civilingenjörer inom elektroteknik.

Vi vill rikta ett stort tack till våra handledare Sture Lindahl och Francesco Sullà för all värdefull kunskap och vägledning. Vi vill också tacka Olof Samuelsson för hans stora engagemang i examensarbetet, och Getachew Darge för all praktisk hjälp.

Tack riktas också till Fredrik Heyman med flera vid Oskarshamns kraftgrupp som möjliggjort arbetet, och till Bo Hanson vid Tramo-ETV för hjälpen med laboratorietransformatorerna.

Anton Christensson
Erik Lingärde

Lund, Sveriges nationaldag 2014

Innehåll

1	Inledning	3
1.1	Bakgrund	3
1.2	Syfte	3
1.3	Avgränsning	4
1.4	Disposition	4
2	Teori	6
2.1	Transformortyper	6
2.2	Seriefel	7
2.3	Asynkronmotorn	7
3	Laborietransformatörer	8
3.1	Specifikation av laborietransformatörer	8
3.2	Mätning av transformatorparametrar	11
3.2.1	Impedans	11
3.2.2	Mättnad	12
3.2.3	Lindningsresistans	12
3.3	Jämförelse med större transformatorer	14
3.4	Nollpunktsjordning	15
4	Mätningar	16
4.1	Metod	16
4.1.1	Mätupställning	16
4.1.2	Datainsamling	16
4.1.3	Databehandling	17
4.1.4	Noggrannhet	17
4.1.5	Namngivningssystem för mätfall	18
4.2	Lastobjekt	19
4.2.1	Effektmotstånd	19
4.2.2	Asynkronmotor	19
4.3	Mätresultat	21
4.3.1	Tre enfastransformatörer Yd-lre	21
4.3.2	Trebent trefastransformatör Yd-de	29
4.3.3	Trebent trefastransformatör Dy-hre	36
4.3.4	Trebent trefastransformatör Yy-de-hre	43
4.3.5	Trebent trefastransformatör Yy-in-hre	50
4.3.6	Fembent trefastransformatör Yd-de	57
4.4	Transientmätningar	64
4.4.1	Trebent trefastransformatör Yd-de	64

5	Diskussion	69
5.1	Jämförelser mellan kopplingsarter	69
5.1.1	Yd-de & Yy-de-hre	69
5.1.2	Dy-hre & Yy-in-hre	69
5.2	Jämförelse mellan transformator typer	70
5.2.1	3-Yd-de & 5-Yd-de	70
5.2.2	3-Yd-de & 1-Yd-lre	70
5.3	Gruppering av transformator konfigurationer	71
5.3.1	Gruppernas karaktäristik	71
5.4	Jämförelse med simuleringsresultat	73
5.4.1	”Bortfall av en eller två faser på uppspänningssidan av aggregattransformatorn”	73
5.4.2	”Initial Studies of Open Phase Detection at Oskarshamn NPP”	74
6	Slutsatser	76
7	Fortsatt arbete	77
7.1	Flödesmätning	77
7.2	Osymmetrisk matning av asynkronmotor	77
7.3	Metoder för detektering	77
7.4	Ytterligare transformator konfigurationer	77
8	Referenser	78
A	DFT	79
B	Symmetriska komponenter	80
C	Mätvärden	81
C.1	Fasspänning	81
C.2	Fasström	82
C.3	Sekvensspänning	83
C.4	Sekvensström	84

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Vikten av hög driftsäkerhet är mycket stor både för elkraftsystem i allmänhet och för kärnreaktorer i synnerhet. Den 30 maj 2013 inträffade en driftstörning vid reaktor 3 på Forsmarks kärnkraftverk som innebar att anläggningen förlorade sin ordinarie elmatning, samtidigt som dieselgeneratorerna i reservkraftsystemet inte startade automatiskt. Det visade sig att detta berodde på fasobalans i anläggningens interna elsystem som uppkommit på grund av ett fel i en brytare på uppspänningssidan av aggregattransformatorn, vilket inte omedelbart detekterades. Detta problem ansågs av Strålsäkerhetsmyndigheten vara av allvarlig och generisk karaktär, varför alla svenska kärnkraftverk ålades att undersöka och rapportera om och hur de kan hantera denna sorts fel.

Vid Oskarshamns kärnkraftverk har man därför låtit göra simuleringar för att kartlägga hur bortfall av en eller två matande faser på uppspänningssidan av aggregattransformatorn påverkar det underliggande systemet. Eftersom driftsäkerheten är av yttersta vikt bör en laboratoriemiljö byggas upp, där egenskaperna hos nedskalade versioner av de transformatorkonfigurationer som används i kraftverket kan undersökas för dessa driftförhållanden, som komplement till simuleringarna.

Det finns flera anledningar till att mätningar i laboratoriemiljö är att föredra i stället för mätningar på enheterna i kraftverket. I en laboratoriemiljö är det enkelt att testa olika kombinationer av transformator typer och lasttyper, samtidigt som personsäkerheten ökas då testerna görs vid lågspänning. Det kan dessutom vara svårt att få tillstånd att testa olika felsituationer direkt på kraftverket. I laboratoriemiljön är det också enklare att mäta de spänningar och strömmar som behövs för analysen.

1.2 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att undersöka egenskaperna för trefastransformatorer vid onormala driftförhållanden, vilket innefattar bortfall av en eller två faser på den matande sidan av transformatorn. Detta ska göras genom att bygga upp en laboratoriemiljö där olika konfigurationer för trefastransformering, det vill säga olika kopplingsarter kombinerat med olika utformningar av transformatorernas kärnor och med olika belastningstyper, kan testas och analyseras.

För att uppnå detta måste transformatorer lämpade för laboratoriebruk designas och specificeras så att de på lämpligt vis motsvarar de transformatorer

som används till verkliga reserv- och säkerhetssystem. Vidare behöver lämpliga belastningsobjekt i form av resistiv last och asynkronmotorlast väljas. Ett mät-system behöver till detta konfigureras så att det kan registrera den data som är intressant för analysen, i första hand spänningar och strömmar i alla tre faser-na för primär- och sekundärsida för den aktuella transformator-konfigurationen. Den insamlade datan ska behandlas och analyseras för att identifiera eventuella intressanta egenskaper som uppkommer vid fasbortfall.

1.3 Avgränsning

Att känna till vilka effekter man kan förvänta sig vid bortfall av en eller två faser på uppsidan till den transformator som förser ett reserv- och säkerhetssystem är förstås viktigt oavsett var detta system finns. I detta examensarbete fokuseras dock arbetet på de transformator-konfigurationer som används i reservkraftssystemen för de tre reaktorerna vid Oskarshamns kärnkraftverk. Detta innebär i praktiken att det är de transformator-konfigurationer som återfinns i tabell 1.1 som kommer att undersökas.

Utöver dessa transformatorer finns även sparkopplade (auto-)transformatorer i systemet. Dessa används mellan stamnätet (400 kV och 220 kV) och regionnätet (130 kV). Några mätningar eller närmare undersökning av denna transformator-typ kommer inte att genomföras inom ramen för det här examensarbetet.

I samråd med handledare har det beslutats att laboratoriemätningar och identifiering av intressanta fenomen i resultatet av dessa mätningar är det huvudsakliga målet med examensarbetet. Därför görs ingen ansats till att förklara de fenomen som eventuellt uppträder. Teori och beräkningsmetoder för att vidare studera effekterna av osymmetrisk matning finns att hämta i bland annat Anderson (1995).

1.4 Disposition

Rapporten inleds med en kort teoridel som behandlar de aktuella transformator-typerna, beskriver vad seriefel innebär samt presenterar en modell för asynkron-motorn. Därefter följer en beskrivning av de transformatorer som specificerats och beställts till examensarbetet. Här presenteras även de transformatorpara-metrar som mätts. I avsnittet om mätningar behandlas mätuppställning och mätresultat för både asynkronmotorns egenskaper och de introducerade serie-felen på transformatorernas primärsida. Diskussionsdelen innehåller reflektioner kring hur de kopplingsarter, transformatorutformningar och lasttyper som tes-tats visat sig styra följderna av seriefel. Korta jämförelser görs med tillgängliga simuleringsresultat. Rapporten avslutas med en sektion där lämpliga utgångs-punkter för fortsatta studier föreslås. Längst bak finns en uppsättning appendix som inkluderar fullständig mätdata (appendix C), tillsammans med appendix B som behandlar symmetriska komponenter och appendix A som behandlar den algoritm som använts för att beräkna dessa.

<i>Transformator</i>	<i>Kopplingsart</i>	<i>Kärnkonstruktion</i>	<i>Jordningsart</i>
Aggregattransformator O1, T1	Y/ Δ	Fembent	Direktjordad
Aggregattransformator O2, T2	Y/ Δ	Trebent	Direktjordad
Aggregattransformator O3, T3	Y/ Δ	3 x Enfasenheter	Nollpunktsmotstånd ¹
Stationstransformator O1, T11	Δ /y	Trebent	Nollpunktsmotstånd ²
Stationstransformator O2, T21	Δ /y	Trebent	Nollpunktsmotstånd ²
Stationstransformator O3, T31/T33	Δ /y	Trebent	Nollpunktsmotstånd ²
Starttransformator O1, T12	Y/y	Trebent	Direktjordad / Nollpunktsmotstånd ²
Starttransformator O2, T22	Y/y	Trebent	Isolerad nollpunkt / Nollpunktsmotstånd ²
Starttransformator O3, T32	Y/y	Trebent	Direktjordad / Nollpunktsmotstånd ²
¹ Lågresistiv jordning; nollpunktsmotståndet är av samma storleksordning som serieimpedanserna (kortslutningsimpedansen) i aktuellt system. ² Högresistiv (högimpediv) jordning; nollpunktsmotståndet är av samma storleksordning som shuntimpedanserna (impedansen mellan faserna och jord i det obelastade systemet eller mera precist 1/3 av nollföljdsimpedansen) i det aktuella systemet.			

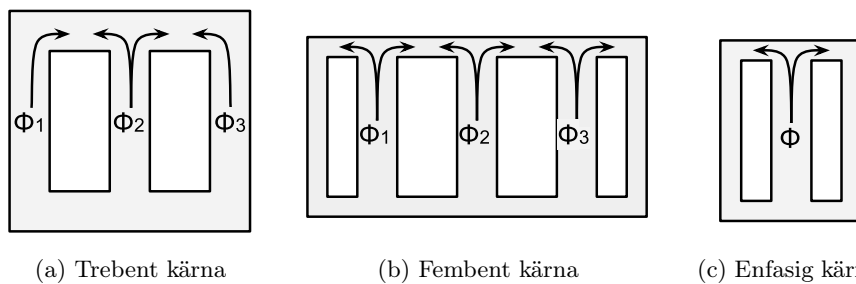
Tabell 1.1: Transformatorkonfigurationer för Oskarshamns kärnkraftverk.

2 Teori

2.1 Transformortyper

Kärnan i trefastransformatorer kan utformas på olika sätt. Detta examensarbete fokuserar på de tre vanligaste typerna som är: tre separata enfastransformatorer, trebent trefastransformator och fembent trefastransformator. De olika typerna kan ses i figur 2.1. Vid symmetrisk belastning av de tre faserna beter sig dessa transformatorer lika och vilken typ som installeras beror främst på mer praktiska faktorer såsom kostnad och fysiska mått. Kärnans utformning påverkar dock beteendet vid osymmetrisk belastning, främst genom att ge olika nollföljdsimpedans (Heathcote, 1998).

Detta ses tydligast vid jämförelse mellan en trebent (figur 2.1a) och en fembent (figur 2.1b) trefastransformator: Vid symmetrisk drift summeras flödena från de tre faslindningarna till noll på samma sätt som symmetriska trefasströmmar. Eftersom ytterbenen i en fembent kärna då inte leder något flöde beter sig de trebenta och fembenta transformatorerna lika. Vid osymmetrisk drift däremot och särskilt med ett nollföljdsflöde, då flödet i de tre faslindningarna är lika, spelar kärnan stor roll. I den fembenta transformatorn återleds ett nollföljdsflöde i ytterbenen, medan den trebenta kärnan saknar sådan flödesväg varför flödet i stället lämnar kärnan och återleds via tanken. Enfastransformatorn (figur 2.1c) beter sig i detta avseende som en fembent transformator, men utnyttjar inte att flödena summeras till noll vid symmetrisk matning.



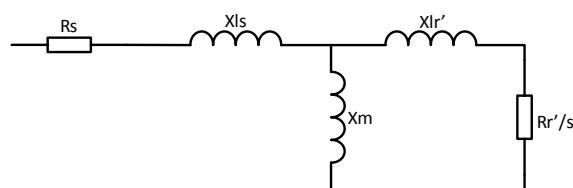
Figur 2.1: Kärnans utformning hos tre stycken enfasenheter, en trebent trefasenheter och en fembent trefasenheter.

2.2 Seriefel

Seriefel är en feltyp som till skillnad från shuntfel inte innebär någon kortslutning mellan faser eller mellan fas och jord. Istället består felet av en obalanserad serieimpedans, typiskt ett avbrott i någon av faserna (Anderson, 1995).

De seriefel som studeras i det här examensarbetet är avbrott på en respektive två faser på transformatorns primärsida.

2.3 Asynkronmotorn



Figur 2.2: Ekvivalent plusföljdsschema för asynkronmotorn.

Ett (förenklat) ekvivalent plusföljdsschema för asynkronmotorn kan ses i figur 2.2. De olika parametrarna är:

R_s	Lindningsresistans, stator
X_{ls}	Lindningsreaktans, stator
X_m	Magnetiseringsreaktans
X'_{lr}	Lindningsreaktans, rotor
R'_r	Rotorresistans
s	Eftersläpning

Eftersläpningen, s , refererar till avvikelserna mellan rotorns mekaniska vinkelhastighet jämfört med det synkrona varvtalet, det vill säga

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}.$$

ω_s är här det synkrona varvtalet, alltså elnätets frekvens dividerat med hälften av maskinens poltal. ω_r är rotorns mekaniska vinkelhastighet. Ideal tomgång (synkron drift) ger alltså eftersläpningen 0. Bromsad motor som inte roterar alls ger eftersläpningen 1 (100 %). Normalt för en asynkronmotor i storleksklassen (< 5 Hp) är enligt Anderson (1995) en eftersläpning om 3–5 % vid märklaster medan större maskiner (> 1000 Hp) normalt har ett lägre värde, runt 1 %.

Minusföljdsschemat för asynkronmotorn är likadant som plusföljdsschemat, däremot bör man vara medveten om den stora skillnaden mellan minusföljdsimpedansen och plusföljdsimpedansen för maskinen. En minusföljdsspänning som läggs på roterar baklänges, eller med en eftersläpning på 200 %, relativt plusföljdsspänningen. Därmed blir rotorns eftersläpning i förhållande till minusföljdsspänningen $2 - s$ där s är rotorns eftersläpning relativt plusföljdsspänningen. Jämfört med plusföljdsfallet blir alltså eftersläpningen väldigt stor och detta leder till att en asynkronmaskin har kraftigt lägre minusföljdsimpedans än plusföljdsimpedans. För en rent resistiv last är ju impedansen densamma oavsett fasföljd.

3 Laborietransformatorer

Som del i examensarbetet ingår att specificera, beställa och undersöka de transformatorer som använts för att göra de aktuella testerna. Detta kapitel behandlar dessa delar.

3.1 Specifikation av laborietransformatorer

De transformatorer som ska användas i laborieuppställningen specificeras och beställs hem inom ramen för examensarbetet. Målet är en mätuppställning som är så flexibel som möjligt (även för andra projekt än detta) och som medger mätning av de olika transformator typer och kopplingsarter som presenteras i tabell 1.1. I praktiken innebär de konfigurationsönskemål som presenteras i tabellen att följande egenskaper är lämpliga:

- Typer: 1 st Femben, 1 st Treben, 3 st Enfastransformatorer
- Okopplade lindningar

Vidare är det av säkerhetsskäl önskvärt att använda det 220/127 V lågspänningssystem som finns tillgängligt i den laborielokal som används. För att inte få allt för låg spänning på transformatorernas sekundärsida väljs omsättningen 1:1. Detta har också fördelen att det inte behövs något extra uttag för att kunna koppla den trebenta trefastransformatorn som både Y/Δ och Δ/Y med bibehållen spänning på transformatorns sekundärsida. Istället räcker det att "vända" på transformatorn när man vill koppla den i Y/Δ -konfiguration. Transformatorernas effekt väljs så att deras kapacitet är 2–3 gånger större än vad som krävs för att driva den avsedda lasten, även om detta inte motsvarar det värsta fallet i kraftverken. Det kan vara värt att notera att förhållandet mellan laststorlek och transformatorns märkeffekt kan påverka mätresultat och detekterbarhet vid seriefel.

Det fanns önskemål om en extra lindning för varje fas för alla tre transformator typerna för att möjliggöra användning av transformatorerna för tester som inte är relaterade till detta projekt. För dessa lindningar önskades uttag vid 42 V och 73 V, med en märkeffekt som svarade mot ca 20 % av effekten hos de huvudsakliga sekundärlindningarna.

De olika önskemålen diskuterades med Bo Hanson på Tramo-ETV, och de slutgiltiga specifikationerna för laborietransformatorer fastställdes till:

Typer

- 1 st trebent 3-fas transformator 2400 VA
- 1 st fembent 3-fas transformator 2400 VA

3 st 1-fas transformatorer 800 VA

Gemensamma specifikationer

Primär: 127-220 V 50-60 Hz

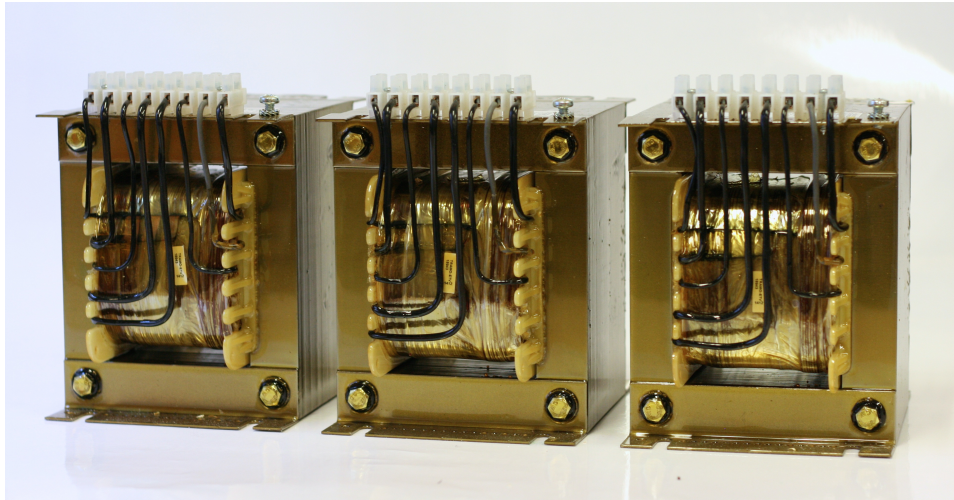
Sek 1: 127 V 5,2 A

Sek 2: 42-73 V 1,8 A

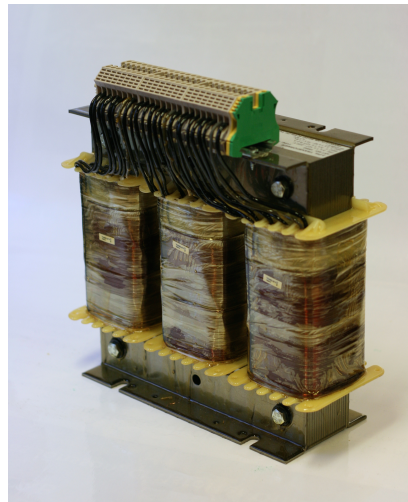
Alla lindningstrådar går till sin egen plint

Fembenstransformatorer tillverkas normalt inte i storleksklassen och Tramo-ETV saknar beräkningsunderlag för denna kärntyp. De kunde dock specielltillverka en transformator av denna typ genom att klippa till bitar av kärnor från andra transformatorer enligt specificerade mått som innebär att de lindade benen har samma tvärsnittsarea som den trebenta transformatorn, medan oken och de yttre (olindade) benen har hälften av denna tvärsnittsarea.

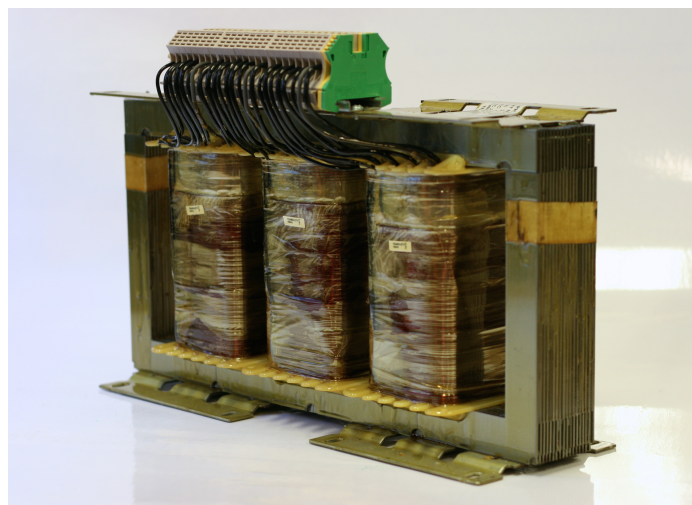
Bilder av de inköpta transformatorerna kan ses i figur 3.1, 3.2 och 3.3.



Figur 3.1: De tre enfastransformatorerna. Kärnans yttermått är 125x150x93 mm (bxhxd).



Figur 3.2: Den trebenta trefastransformatorn. Kärnans yttermått är 250x250x59 mm (bxhxd).



Figur 3.3: Den fembenta trefastransformatorn. Kärnans yttermått är 400x200x53 mm (bxhxd).

3.2 Mätning av transformatorparametrar

För att undersöka de inköpta transformatorernas karaktäristik mättes deras impedanser samt lindningsresistanser och de magnetiska mättnadskurvorna plottades.

3.2.1 Impedans

Några av de intressantaste parametrarna på transformatorer är deras plus- och nollföljdsimpedans, vilka kan skilja mycket mellan olika transformatorer.

3.2.1.1 Nollföljdsimpedans

Metoden som används för att skatta de olika transformatorkonfigurationernas nollföljdsimpedans, Z_0 , beskrivs av Evenson (1961). Då transformatorn är Y-kopplad på den sida som undersöks mäts nollföljdsimpedansen på så vis att lindningarna för de olika faserna parallellkopplas, samtidigt som terminalerna på den andra sidan lämnas obelastade. En känd enfasig spänning V_z appliceras mellan parallellkopplingen och nollpunkten, varefter den resulterande strömmen I_z mäts. Eftersom I_z är summan av strömmarna i de tre faserna ges nollföljdsimpedansen av

$$Z_0 = 3 \frac{V_z}{I_z}.$$

Eftersom transformatorernas märkström är 5,2 A används en vridtransformator för att justera testspänningen till en nivå som inte resulterar i en ström större än detta värde i lindningarna. Strömmen ut från nollpunkten justerades alltså till cirka 15 A ($\approx 3 \cdot 5,2$ A) och den resulterande spänningen används vid mätningen. Mätssystemet som används för att mäta spänning och ström är detsamma som används för datainsamling till huvudmätningarna och finns beskrivet i avsnitt 4.1. Resultaten för de olika transformatorkopplingarna redovisas i tabellen nedan, där per unit-värdena är normaliserade utifrån transformatorernas basimpedans:

Typ	Nollföljdsimpedans (Ω)	(p.u.)	Belopp (Ω)	(p.u.)
1-Yd	0,93+j0,10	0,046+j0,005	0,93	0,046
3-Yd	1,03+j0,14	0,051+j0,007	1,04	0,052
3-Yy	0,83+j3,08	0,041+j0,153	3,19	0,158
5-Yd	1,06+j0,13	0,053+j0,006	1,07	0,053

Notera de stora resistiva komponenterna, samt att fallet 3-Yy har en reaktiv komponent som är cirka 25 gånger större än för övriga transformatorkopplingar.

3.2.1.2 Plusföljdsimpedans

En transformators plusföljdsimpedans (Z_+) och minusföljdsimpedans (Z_-) är lika stora och samma sak som kortslutningsimpedansen enligt Evenson (1961). Det är alltså förhållandet mellan den spänning och ström som uppkommer då fassuttagen på transformatorns sekundärsida kortsluts samtidigt som primärsidan matas med en symmetrisk trefassspänning. Det gäller även att denna impedans uttryckt i per-unit är lika stor sett från båda sidor av transformatorn; byter

man plats på spänningsmatning och kortslutning blir alltså resultatet detsamma, vilket inte är fallet med nollföljdsimpedansen.

Precis som vid mätningen av nollföljdsimpedansen användes en vridtransformator för att anpassa spänningen till en nivå som inte resulterade i en ström överstigande lindningarnas märkström och storheterna mättes på samma sätt som för nollföljdsimpedansen. Plusföljdsimpedansen ges nu enligt Ohms lag,

$$Z_+ = \frac{V_+}{I_+}.$$

Resultaten för de olika transformatorkopplingarna redovisas i tabellen nedan:

<i>Typ</i>	<i>Plusföljdsimpedans</i> (Ω)	(p.u.)	<i>Belopp</i> (Ω)	(p.u.)
1-Yd	0,64+j0,08	0,032+j0,004	0,64	0,032
3-Yd	0,73+j0,12	0,036+j0,006	0,74	0,037
3-Yy	0,74+j0,08	0,037+j0,004	0,75	0,037
5-Yd	0,74+j0,10	0,037+j0,005	0,75	0,037

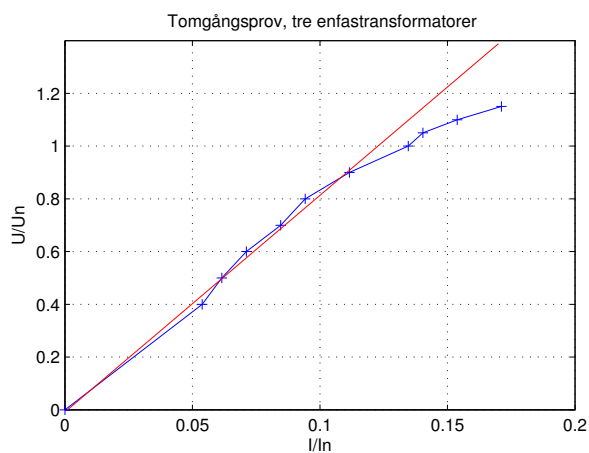
Notera här den stora resistiva komponenten.

3.2.2 Mättnad

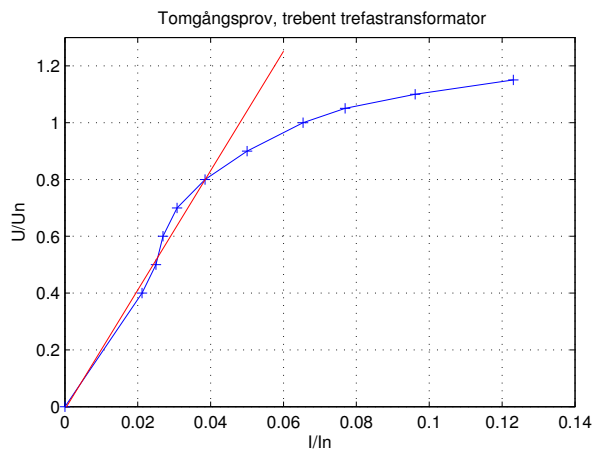
För att ta fram transformatorernas mättnadskurva utförs tomgångsprov där den testade transformatorn matas från en vridtransformator. Sekundärsidan lämnas obelastad och den pålagda testspänningen ökas i steg. Den resulterande strömmen mäts för de olika spänningsnivåerna med en Gossen-Metrawatt MetraHit 16s multimeter. Resultatet plottas med kvoten mellan den pålagda spänningen och transformatorns märkspänning på Y-axeln och kvoten mellan den resulterande strömmen och transformatorns märkström på X-axeln. För att tydliggöra mättnadsfenomenet anpassas en linjär regressionskurva till de tre lägsta mätvärdena och origo. Mättnadskurvan för de tre enfastransformatörerna kan ses i figur 3.4, för den trebenta trefastransformatör i figur 3.5 och för den fembenta trefastransformatör i figur 3.6. Eftersom fasspänningen i laboratoriet ligger runt 138 V snarare än märkspänning 127 V ($U/U_n \approx 1,09$) arbetade transformatorerna längre ut i mättnadsområdet vid testerna än avsett i specifikationen.

3.2.3 Lindningsresistans

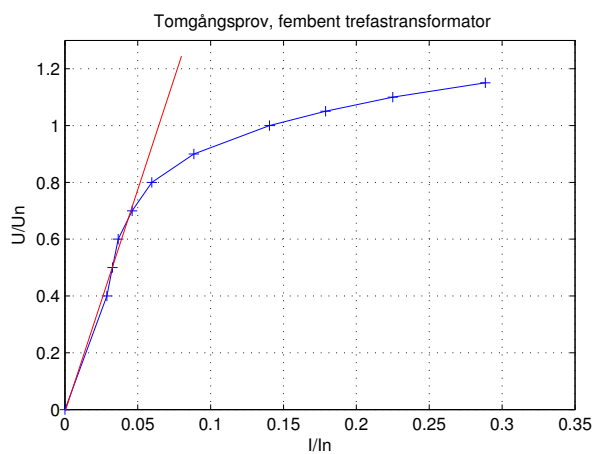
För att mäta lindningsresistansen används fyrtråds-mätning eftersom denna mätmetod ger bättre noggrannhet vid små resistanser än den tvåtråds-mätning som vanliga multimetrar använder (vid fyrtråds-mätning påverkar inte resistansen i mätinstrumentets kablar och kontakter resultatet signifikant). En extern likspänningskälla kopplas till en transformatorlindning i taget samtidigt som spänningen och strömmen genom lindningen registreras med två stycken Gossen-Metrawatt MetraHit 16s multimetrar. Resistansen ges direkt ur Ohms lag och redovisas i tabellen nedan:



Figur 3.4: Mättnadskurva för enfastransformatorerna



Figur 3.5: Mättnadskurva för den trebenta trefastransformatorn



Figur 3.6: Mättnadskurva för den fembenta trefastransformatorn

<i>Transformortyp</i>	<i>Lindning</i>	Resistans 127 V-uttag		Resistans 220 V-uttag	
		(Ω)	(p.u.)	(Ω)	(p.u.)
Tre enfas- transformatorer	A	0,29	0,014	0,81	0,040
	B	0,29	0,014	0,80	0,040
	C	0,29	0,014	0,81	0,040
	a	0,34	0,017	-	-
	b	0,33	0,016	-	-
	c	0,33	0,016	-	-
Trebent trefas- transformator	A	0,34	0,017	0,96	0,048
	B	0,34	0,017	0,95	0,047
	C	0,34	0,017	0,95	0,047
	a	0,39	0,019	-	-
	b	0,39	0,019	-	-
	c	0,39	0,019	-	-
Fembent trefas- transformator	A	0,34	0,017	0,96	0,048
	B	0,34	0,017	0,95	0,047
	C	0,34	0,017	0,95	0,047
	a	0,40	0,020	-	-
	b	0,39	0,019	-	-
	c	0,39	0,019	-	-

3.3 Jämförelse med större transformatorer

Storleksskillnaden mellan de små transformatorer som använts till testerna i det här examensarbetet och de fullskaliga transformatorer som sitter i Oskarshamnsverket är gigantisk. För att ge en bild av den stora skillnaden kan nämnas att enfasenheterna som används i testerna och som ska motsvara T3 vid OKG väger cirka 11 kg styck, medan förlagan väger 333 000 kg styck.

De elektriska egenskaperna skiljer sig också åt på några viktiga punkter. Några kortare jämförelser har gjorts med provningsprotokollet för en större transformator som ska förbli anonym, men som arbetar med de nominella spänningarna 400 kV/20 kV.

Den plusföljdsimpedans som mätts upp på laborietransformatorerna ligger kring 3–4 %. Dessutom är den största delen av denna impedans resistiv, den reaktiva komponenten ligger under 1 %. För den större transformatorn är plusföljdsreaktansen 14 % och resistansen så liten att den kan försummas. Motsvarande mönster gäller för nollföljdsimpedansen som, med undantag för den trebenta Y/y-kopplade transformatorn, ligger kring 5 % för laborietransformatorerna. Den större transformatorn har 14 % uppmätt nollföljdsimpedans.

Vad gäller tomgångsströmmen (vid märkspänning) så är denna (och därmed de proportionella förlusterna) mycket högre för laborietransformatorerna (13 % för enfasenheterna, 6,5 % för den trebenta och 14 % för den fembenta transformatorn) jämfört med den större transformatorn (0,038 %).

Den slutsats som kan dras av dessa jämförelser är att även om de fenomen som uppträder vid laborietransformatorerna troligen kan översättas till den fullskaliga anläggningen så kan inte exakta siffrvärden dras. Detta kanske inte förvånar om man ser till den gigantiska storleksskillnaden som finns mellan dessa båda system.

3.4 Nollpunktsjordning

I Oskarshamnsverket förekommer tre olika jordningsarter för transformatorerna: direktjordning, jordning via lågresistivt motstånd och jordning vid högresistivt motstånd.

Resistansvärdet för det lågresistiva nollpunktsmotståndet valdes så att det, i likhet med aggregattransformatorn T3 på OKG har ett värde på 0,023 p.u. Med laborietransformatorernas per-unitbas motsvarar det 0,47 Ω .

För det högresistiva nollpunktsmotståndet valdes resistansvärdet så att det i likhet med nollpunktsresistorerna till start- och stationstransformatorerna på OKG drar ungefär 1 % av transformatorns märkström då full fasspänning läggs över motståndet. För laborietransformatorerna innebär det ett nollpunktsmotstånd om cirka 2 k Ω .

4 Mätningar

4.1 Metod

4.1.1 Mätuppställning

En mätuppställning sattes upp i laboratoriet för att med enkla omkopplingar kunna utvärdera de aktuella konfigurationerna vid olika felfall. Som last till transformatorn som testas användes dels rent resistiv last, dels asynkronmotorlast. Dessa lastobjekt beskrivs närmare i kommande avsnitt 4.2. Dessutom fanns reglerbara resistanser att använda som nollpunktsmotstånd i de transformatorkopplingar som krävde detta.

De storheter som mättes upp under testen var fasspänningar och fasströmmar på transformatorns primär- och sekundärsida. För detta användes en mätapparat uppbyggd på institutionen (IEA). Denna apparatur använder modulerna LEM LV25-P för att mäta spänning och LEM LA55-P för att mäta ström. Utgången på dessa moduler är kopplade till förstärkare som ger en utspänning proportionell mot mätvärdet. Denna spänning kan sedan samplas med valfri utrustning.

För en del fall saknas nollpunkt att referera fasspänningsmätningar mot. Detta gäller för de fall där transformatorn är deltakopplad på sekundärsidan eftersom någon nollpunkt då inte finns att tillgå. För dessa fall mäts de sekundära fasspänningarna mot en virtuell nollpunkt som är resistivt neddelad med 10 k Ω -motstånd. Resistansen är vald att vara tillräckligt stor för att inte belasta systemet nämnvärt vid mätningarna. Är transformatorn deltakopplad på primärsidan finns fortfarande elnätets neutralledare att tillgå och virtuell nollpunkt har alltså inte använts i de fallen.

För att undersöka transientförloppet vid bortfall av en eller två faser användes en kontaktor som med en enkel omkoppling kunde konfigureras att bryta antingen en eller två matande faser.

4.1.2 Datainsamling

Datainsamling gjordes med fyra stycken insamlingsenheter av modell National Instruments NI 9239 placerade i ett chassi av typ NI cDAQ-9172 som ansluts med USB till en PC. På PC:n skrevs ett Labviewprogram för att automatisera datainsamlandet.

Labviewprogrammet innehåller ett användargränssnitt som låter användaren ställa in samplingsfrekvens, inspelningstid och huruvida mätvärdena ska sparas ner till en Matlabkompatibel fil eller ej. All insamlad rådata plottas i nio grafer

efter avslutad inspelning för att datan inte ska behöva importeras till Matlab vid snabba kontroller och liknande.

De insamlingsenheter som användes kräver att samplingsfrekvens väljs som $f_s = \frac{f_{s_{max}}}{n}$, där $f_{s_{max}} = 50000$ kS/s och $n = 1 \dots 31$. Databehandlingen underlättas om samplingsfrekvensen kan väljas så att antalet mätvärden per period är en multipel av frekvensen hos den signal som samplas, förutsatt att denna signal har sinuskaraktär. Den lägsta samplingsfrekvens som uppfyller dessa krav ges således av $n = 25$, det vill säga $f_s = \frac{50000}{25} = 2000$ kS/s.

För att styra kontaktorn som användes för att undersöka transientförloppet vid fasavbrott kompletterades mätuppställningen med en utgångsmodul av modell NI 9477 samt en extern likspänningskälla och ett hjälprelä. Labview-programmet kompletterades med en funktion för att automatiskt utföra dessa mätningar.

4.1.3 Databehandling

För att kunna studera den uppmätta datan på ett översiktligt sätt behövde viss databehandling utföras, vilket gjordes med hjälp av ett matlabskript. I detta skript görs till att börja med en *diskret fouriertransform* (se appendix A) för att skatta en funktion som svarar mot grundfrekvensen hos den uppmätta signalen. Utifrån denna funktion bestäms amplitud och fasvinkel. För vidare analys är det intressant att studera de symmetriska komponenterna, vilket kan göras genom att konvertera de beräknade grundfrekvensfunktionerna för tre faser till symmetriska komponenter enligt appendix B.

Efter utförd databehandling visualiseras informationen på lämpligt vis. För fasspänningar och fasströmmar har visardiagram använts eftersom det ger en överskådlig representation av amplitud och fasvinkel. För sekvensstorheters absolutbelopp har stapeldiagram använts. En komplett tabellsamling innehållande alla mätdata har också sammanställts, se appendix C.

4.1.4 Noggrannhet

De datainsamlingsenheter som använts har 24 bitars upplösning och referensspänningsnivåer som väl matchar utspänningarna från mätutrustningen. Kvantiseringsfelet är alltså mycket litet ($< 100 \mu\text{V}$ och $< 1 \mu\text{A}$) och kan försummas i jämförelse med den större onoggrannhet som beror av mjukvarukalibreringen av de uppmätta nivåerna innebär. Det är nämligen så att förstärkarna som används mellan LEM-modulerna och A/D-omvandlarna har lite olika förstärkningsfaktor. Detta har kompenserats för i Matlab-skriptet, men för kalibreringen användes bänkmultimetern Philips PM2519 som referens, vilken vid de använda mätområdena har en noggrannhet på $\sim \pm 1,69$ V vid spänningsmätning och $\sim \pm 0,06$ A för strömmätning. Felmarginalen i kalibreringen är alltså i storleksordningen 1 – 2 %, och detta är den onoggrannhet som satt begränsningen för datainsamlingens noggrannhet. Det kan därför tyckas oförsvarligt att redovisa mätresultaten med upp till fem värdesiffror som gjorts på en del ställen i denna rapport. Anledningen till att detta ändå gjorts är att eftersom alla mätkanaler kalibrerats mot samma multimeter är felet i de relativa skillnaderna förmodligen mindre än vad som antyds ovan. Mätvärdena som presenteras är främst avsedda att jämföras relativt varandra medan absolutvärdena är av mindre intresse.

4.1.5 Namngivningssystem för mätfall

För att på enkelt vis kunna särskilja de olika mätfall som ska testas används ett namngivningssystem för fallen. Detta fungerar på så vis att varje mätfall får en speciell sekvens som namn, där de olika delarna av sekvensen beskriver någon egenskap för mätkonfigurationen. Sekvensen ges på följande format:

Transformatortyp-kopplingsart-jordning(-jordning sek)-last-matande faser(-VE)

De olika värden som de olika delarna av sekvensen ovan kan anta ges av:

Transformator typer

- 1 – Tre enfastransformatorer
- 3 – Trebent trefastransformator
- 5 – Fembent trefastransformator

Kopplingsart

- Yd – Y/ Δ -koppling
- Dy – Δ /Y-koppling
- Yy – Y/Y-koppling

Jordning (för neutralpunkt i Y-koppling)

- hre – Högresistiv jordning
- lre – Lågresistiv jordning
- de – Direktjordad
- in – Isolerad neutralpunkt

Last

- R830 – Rent resistiv last (830 W i symmetriska fallet)
- IM260 – Asynkronmotorlast (260 W i symmetriska fallet)

Matande faser

- abc – Alla faser anslutna
- ab – Fas a och b anslutna
- a – Fas a ansluten

OBS!

”Jordning sek” förekommer endast för Yy-fallet. ”VE” läggs till i slutet på sekvensen i de fall virtuell nollpunkt använts för spänningsmätning på sekundärsidan. Asynkronmotorn körs i tomgång och något mättad, vilket gör att effekten till stor del utgörs av järnförluster i kärnan.

4.2 Lastobjekt

Som last på transformatorernas sekundärsida användes dels rent resistiv belastning i form av effektmotstånd med reglerbar resistans, dels en asynkronmotor.

4.2.1 Effektmotstånd

Det trefasiga effektmotståndet Y-kopplades med isolerad nollpunkt och ställdes in på 830 W lasteffekt för att ligga inom intervallet 2–3 gånger lägre än transformatorns märkeffekt (2,4 kVA).

4.2.2 Asynkronmotor

Asynkronmotorn som användes har en märkström på 4,15 A vid 127 V fasspänning. Dess skenbara effekt är alltså $3 \cdot 4,15 \cdot 127 = 1581$ VA. Med $\cos \varphi = 0,66$ ger detta en aktiv elektrisk effekt om $1581 \cdot 0,66 = 1044$ W. Den mekaniska märkeffekten är 750 W och motorn har alltså en verkningsgrad på 72 %. Det här är anledningen till att motorns effekt ligger något högt i förhållande till idén att transformatorns märkeffekt skulle vara 2–3 gånger större än lastens effekt; när transformatorerna beställdes dimensionerades de enligt effekten på motorns typskylt som alltså anger den mekaniska (axel-)effekten på 750 W.

4.2.2.1 Plusföljdsschema för asynkronmotorn

För att skatta parametrarna till den plusföljdsekvivalent som presenterades i teoridelen (avsnitt 2.3, speciellt figur 2.2) gjordes ett tomgångsprov och ett kortslutningsprov på maskinen. Plusföljdsspänning och plusföljdsström mättes med den ordinarie mätutrustningen (se avsnitt 4.1.1 – 4.1.3) och plusföljdsimpedansen gavs direkt som kvoten mellan dessa enligt Ohms lag.

Kortslutningsprov

Motorn anslöts via en vridtransformator till elnätet. Med axeln fasthållen i stillastående läge ökades den pålagda spänningen successivt till dess att strömmen nått märkström. Plusföljdsimpedansen vid kortslutning mättes upp till

$$Z_{+,SC} = 6,60 + j5,87 \Omega.$$

Dessutom gjordes antagandena

$$\begin{aligned} s = 1 &\implies \left(\frac{R_r}{s} + X_{lr}\right) \ll X_m \\ &\implies Z_{+,SC} \approx R_s + R'_r + j(X_{ls} + X'_{lr}). \end{aligned}$$

Sätt $X_l = X_{ls} + X'_{lr}$

$$\implies Z_{+,SC} \approx R_s + R'_r + jX_l.$$

Tomgångsprov

Plusföljdsimpedansen mättes upp en gång till, nu med motorn körandes på tomgång och vid märkfasspänning 127 V. Notera dock att det för "ideal" tomgång (det vill säga för $s = 0$) krävs att asynkronmotorns axel hålls i synkron rotation av en externt påkopplad synkronmaskin vilket inte skedde vid det här provet. Plusföljdsimpedansen vid tomgångskörning mättes upp till

$$Z_{+,idle} = 5,44 + j36,82 \Omega.$$

Dessutom gjordes antagandet

$$\begin{aligned} s \approx 0 &\implies \frac{R'_r}{s} \gg R_s \\ \implies Z_{+,idle} &= R_s + j(X_m + X_{ls}) \end{aligned}$$

och

$$\begin{aligned} X'_{lr} \approx X_{ls} &\approx \frac{X_l}{2} \\ \implies Z_{+,idle} &\approx R_s + j\left(X_m + \frac{X_l}{2}\right). \end{aligned}$$

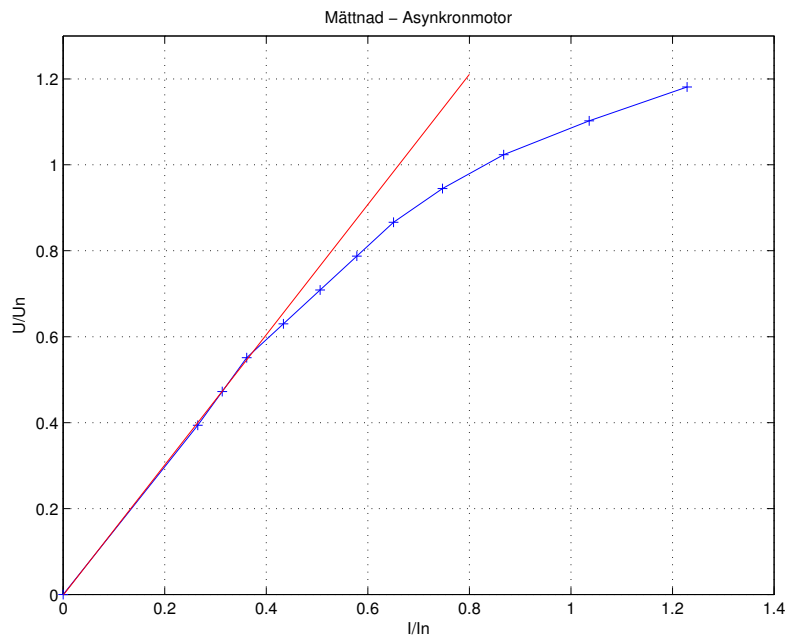
Beräkning av parametrar

Ur mätningarna och antagandena ovan kan nu motorns parametrar lösas ut enligt nedan, där \Re och \Im anger real- respektive imaginärdel:

$$\begin{aligned} R_s &\approx \Re(Z_{+,idle}) &= 5,44 \Omega & (= 0,17 \text{ p.u.}) \\ R'_r &\approx \Re(Z_{+,SC}) - R_s &= 1,16 \Omega & (= 0,04 \text{ p.u.}) \\ X_l &\approx \Im(Z_{+,SC}) &= 5,87 \Omega & (= 0,20 \text{ p.u.}) \\ X_m &\approx \Im(Z_{+,idle}) - \frac{X_l}{2} &= 33,89 \Omega & (= 1,11 \text{ p.u.}) \end{aligned}$$

4.2.2.2 Mättningskurva för asynkronmotorn

För att ta fram motorns magnetiska mättningskurva anslöts motorn till en vidtransformator och med motorn på tomgång applicerades en serie succesivt ökande spänningar. Den pålagda spänningen såväl som den resulterande strömmen mättes upp med två stycken Gossen-Metrawatt MetraHit 16s multimetrar. Mätpunkterna är redovisade i figur 4.1 med kvoten mellan den pålagda spänningen och märkspänning på Y-axeln och kvoten mellan den uppmätta strömmen och märkström på X-axeln. En linjär regression finns anpassad till de tre lägsta mätvärdena och origo för att tydliggöra effekten av mätning (avvikelsen från den linjära kurvan). Det bör noteras att fasspänningen på elnätet (som alltså använts konsekvent genom testerna) var 138 V och inte 127 V som är motorns märkspänning (10 % skillnad). Motorn befinner sig alltså ganska långt ut i mättnadsområdet, något som kan förklara den stora reaktiva effekt som kan ses om effektmätning vid tomgång görs.



Figur 4.1: Mättnadskurva för asynkronmotorn

4.3 Mätresultat

I detta avsnitt presenteras mätresultaten för alla de transformatorkonfigurationer som testats inom ramen för examensarbetet. För varje konfiguration presenteras först fallet då en matande fas kopplats bort, dels med resistiv last och dels med asynkronmotorlast. Därefter presenteras fallet med två matande faser bortkopplade, återigen för både resistiv last och asynkronmotorlast.

4.3.1 Tre enfastransformatorer Yd-lre

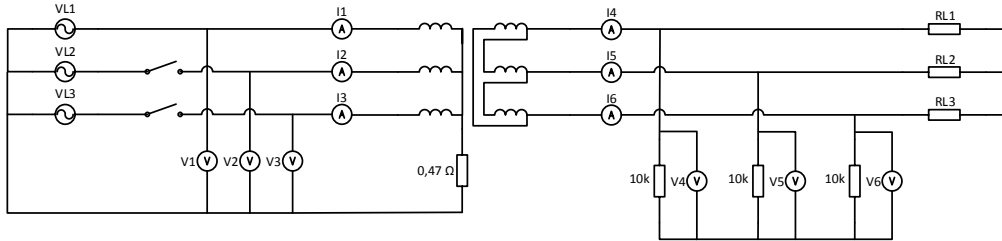
De mätupställningar som används kan ses i figur 4.2 (resistiv last) och figur 4.3 (asynkronmotorlast). Som spänningsreferens visas i figur 4.4 fasspänningarna för mätupställningen med alla matande faser inkopplade och resistiv last.

4.3.1.1 En fas bortkopplad

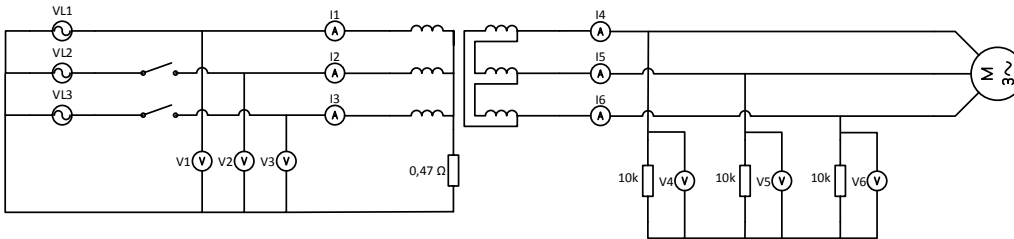
Resistiv last

Den på primärsidan bortkopplade fas c spänningssätts i princip perfekt, se figur 4.5. Endast enstaka volt skiljer på amplituden och fasläget är perfekt. Motsvarande gäller på sekundärsidan.

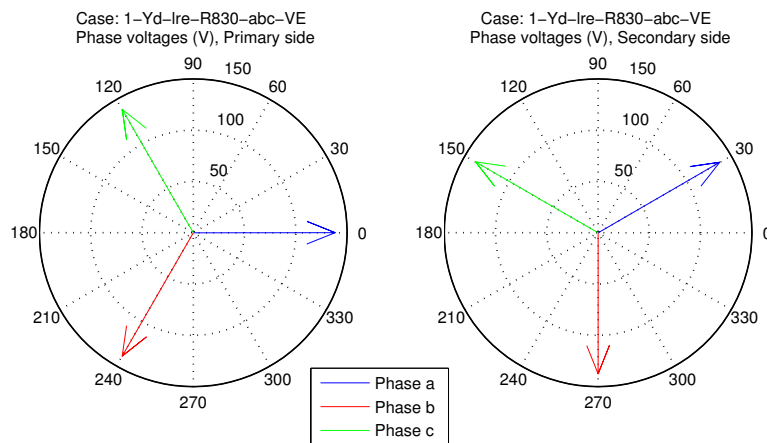
Strömmarna på transformatorns sekundärsida följer på grund av den resistiva lasten spänningarna och är alltså i princip oförändrade. Detta får till följd att strömmarna i de kvarvarande faserna på primärsidan ökar för att ersätta effekten som tidigare kom från den nu urkopplade fasen.



Figur 4.2: Mätupställning för konfigurationen 1-Yd-ire med resistiv last.



Figur 4.3: Mätupställning för konfigurationen 1-Yd-ire med asynkronmotorlast.



Figur 4.4: Fasspänningar för 1-Yd-ire med resistiv last och alla matande faser inkopplade.

Värdena på sekvensstorheterna är i stort oförändrade, med undantaget att en nollföljdsström med i princip samma amplitud som plusföljdsströmmen uppkommer på transformatorns primärsida. Se figur 4.7.

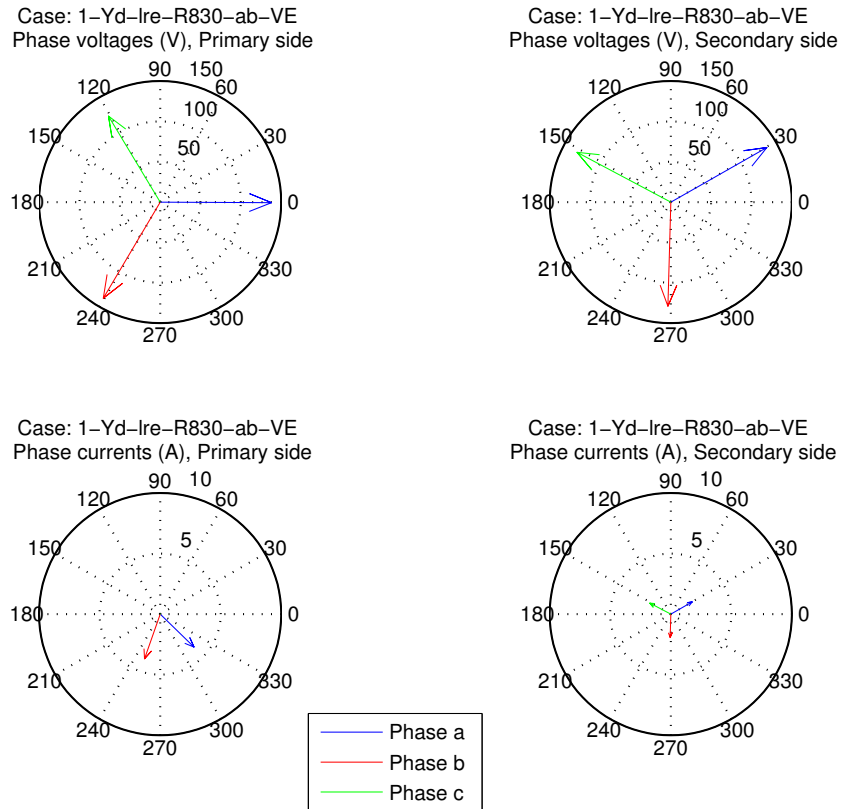
Detekteringsmöjligheterna för detta fall tycks alltså primärt vara nollföljdsströmmen på primärsidan om lasteffekten är tillräckligt stor för att denna ska kunna detekteras. På sekundärsidan tycks detekteringsmöjligheterna vara små.

Asynkronmotorlast

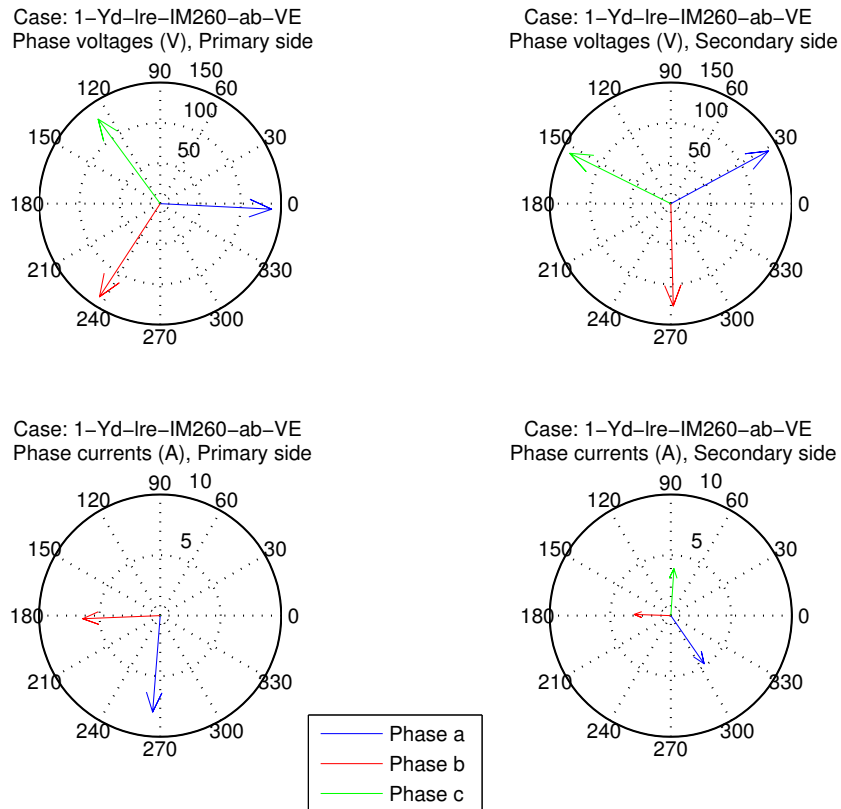
Liksom i fallet med resistiv last sker spänningssättning i princip perfekt, endast en liten vinkelförändring kan anas för den bortkopplade fasens spänning, se figur 4.6.

På primärsidan beter sig strömmarna liknande fallet med resistiv last, bortsett från den naturliga vinkelförskjutning som uppkommer beroende på motorns induktiva komponent. Fasströmmarna på sekundärsidan har dock ett betydligt mer osymmetriskt utseende nu, något som även syns som en tydlig minusföljdsström i figur 4.8. Minsföljdsströmmen är dock fortfarande förhållandevis liten i relation till plusföljdsströmmen, så detekteringsmöjligheterna på sekundärsidan är tveksamma men förmodligen möjliga.

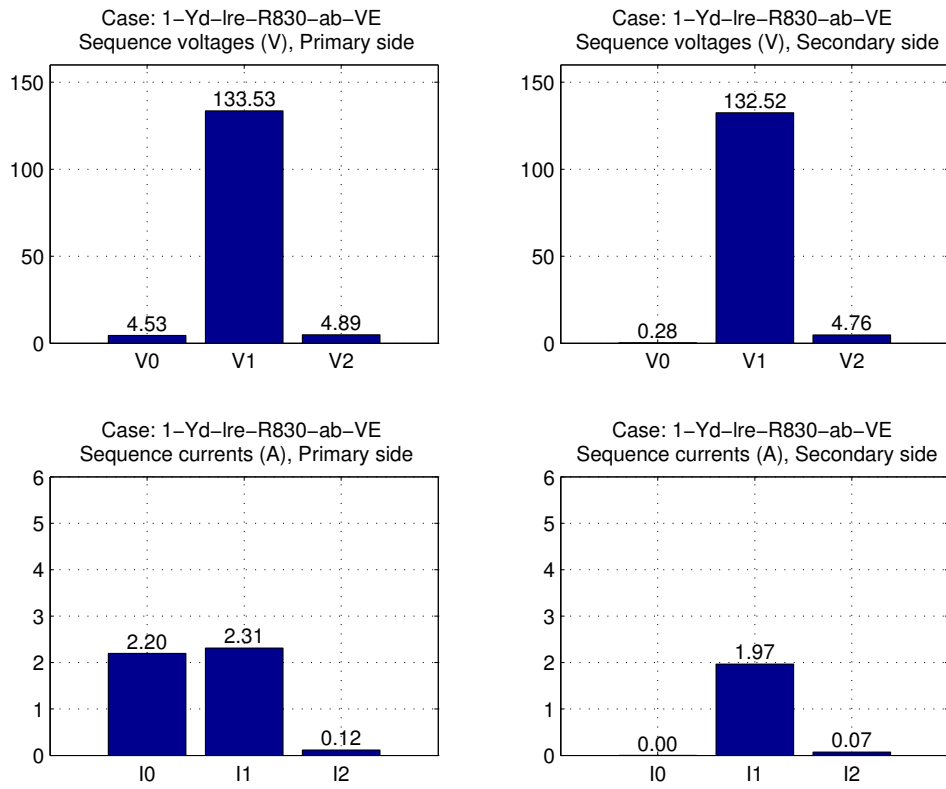
Sekvensspänningarna är fortfarande i princip opåverkade på både primär- och sekundärsidan.



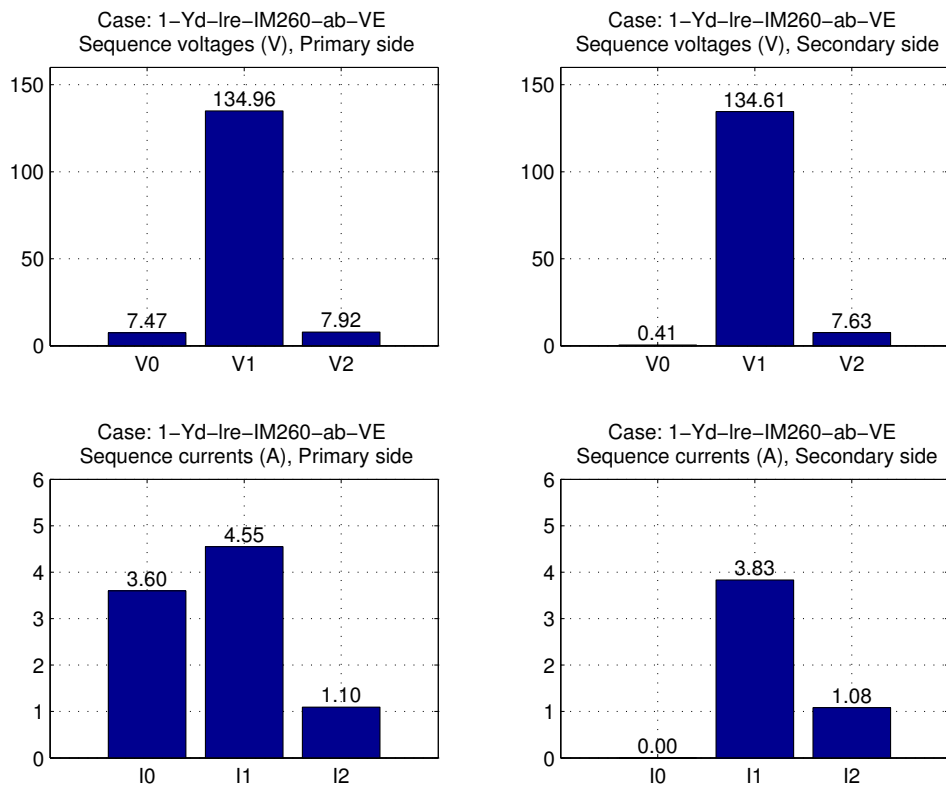
Figur 4.5: Fasspänningar och fasströmmar för fallet med tre enfastransformatorer kopplade i Y/d-lre med resistiv last och en matande fas bortkopplad.



Figur 4.6: Fasspänningar och fasströmmar för fallet med tre enfastransformatorer kopplade i Y/d-lre med asynkronmotorlast och en matande fas bortkopplad.



Figur 4.7: Sekvensspänningar och sekvensströmmar för fallet med tre enfastransformatorer kopplade i Y/d-lre med resistiv last och en matande fas bortkopplad.



Figur 4.8: Sekvensspänningar och sekvensströmmar för fallet med tre enfastransformatorer kopplade i Y/d-lre med asynkronmotorlast och en matande fas bortkopplad.

4.3.1.2 Två faser bortkopplade

Resistiv last

De två bortkopplade faserna, fas b och fas c, spänningssätts på primärsidan till halva fasspänningen i fas a. Faserna b och c är i fas med varandra och 180° förskjutna i förhållande till fas a. Se figur 4.9. Sekundärt är endast fas a och fas c spänningssatta med lite mindre än den ursprungliga fasspänningen. Dessa två spänningar ligger 180° isär.

Eftersom lasten är rent resistiv följer fasströmmarna på transformatorns sekundärsida motsvarande fasspänningar.

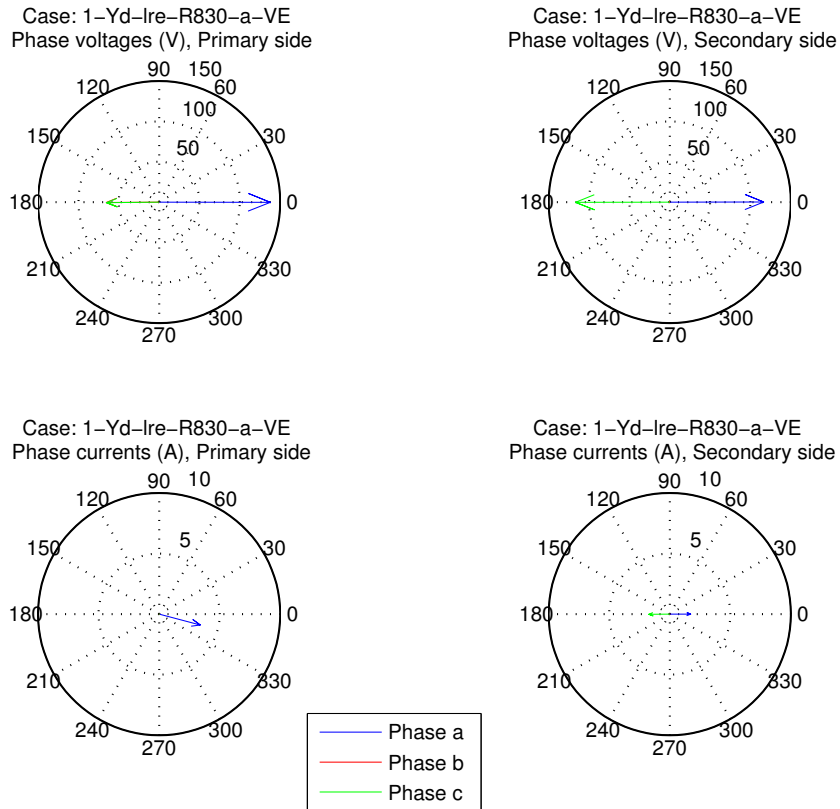
På både primär- och sekundärsidan fås plusföljds- och minusföljdsspänningar som motsvarar hälften av spänningen hos den matande fasen (se figur 4.11). På primärsidan kan vidare ses att alla sekvensströmmar blir lika stora, och på sekundärsidan är plusföljds- och minusföljdsströmmen lika stora. Detta felfall borde enkelt gå att detektera då flera sekvensstorheter indikerar osymmetri. Ett alternativ är att reagera på att nollföljds- och minusföljdsströmmen är av samma storleksordning, som nämndes ovan. Ett annat alternativ är att reagera på den låga plusföljdsspänningen, och även minusföljdsspänningen som är av samma storleksordning, vilket tyder på osymmetri.

Asynkronmotorlast

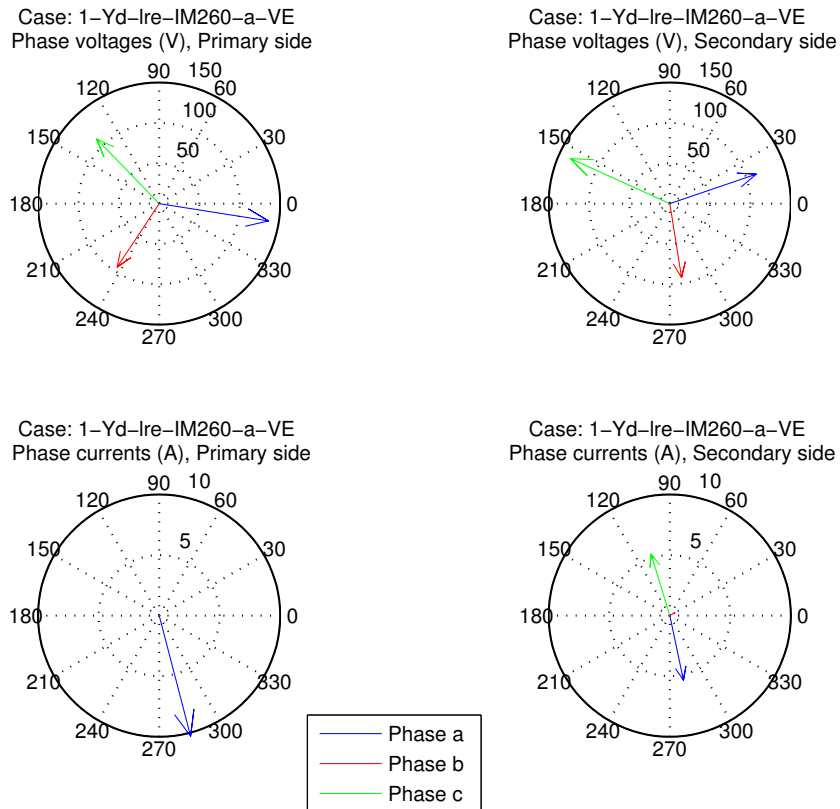
Med asynkronmotorlast spänningssätts de bortkopplade faserna till fasvinklar som ligger nära det felfria fallet. Amplituden sjunker något och vinklarna är inte exakt 120° isär, men jämförs resultatet med motsvarande felfall med resistiv last (jämför figur 4.10 med figur 4.9) så tycks systemet nu spänningssättas väldigt bra eftersom trefaskarakteräen behålls.

Fasströmmarna är påfallande lika felfallet med resistiv last, bortsett från den fasförskjutning som uppkommer på grund av motorns induktiva komponenter. Det går fortfarande (i princip) bara en ström genom fas a och fas c på sekundärsidan eftersom det är mellan dessa faser lindningen som hör till den inkopplade fasen sitter i deltakopplingen. Genom de andra två sekundärlindningarna kan det ju inte gå någon ström eftersom motsvarande lindningar på Y-sidan är brutna.

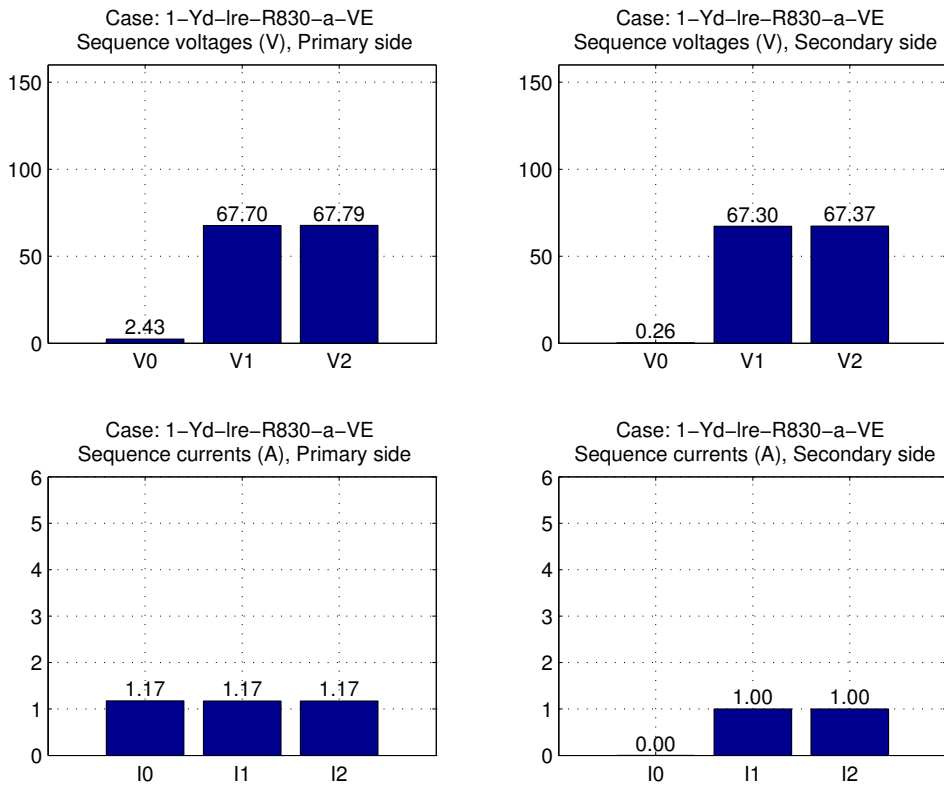
Tittar man på sekvensspänningarna (figur 4.12) är nu minusföljdskomponenterna mycket lägre jämfört med fallet med resistiv last. Detta eftersom faserna spänningssätts av asynkronmotorn bättre. Däremot är minusföljdströmmen på både primär- och sekundärsidan fortfarande stor, på sekundärsidan till och med större än plusföljdsströmmen. På primärsidan är nollföljdsströmmen naturligtvis fortfarande lika stor som plusföljds- och minusföljdsströmmen eftersom matningen belastas rent enfasigt.



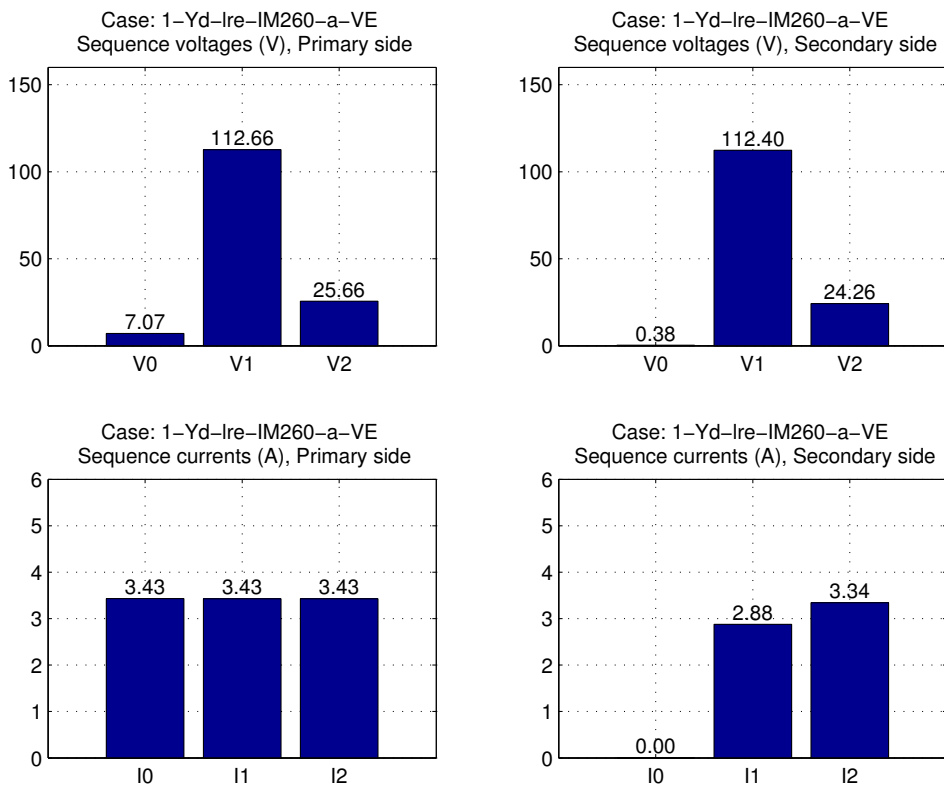
Figur 4.9: Fassungspänningar och fasströmmar för fallet med tre enfastransformatorer kopplade i Y/d-Ire med resistiv last och två matande faser bortkopplade.



Figur 4.10: Fassungspänningar och fasströmmar för fallet med tre enfastransformatorer kopplade i Y/d-Ire med asynkronmotorlast och två matande faser bortkopplade.



Figur 4.11: Sekvensspänningar och sekvensströmmar för fallet med tre enfastransformatorer kopplade i Y/d-Ire med resistiv last och två matande faser bortkopplade.



Figur 4.12: Sekvensspänningar och sekvensströmmar för fallet med tre enfastransformatorer kopplade i Y/d-Ire med asynkronmotorlast och två matande faser bortkopplade.

4.3.2 Trebent trefastransformator Yd-de

De mätuppställningar som används kan ses i figur 4.13 (resistiv last) och figur 4.14 (asynkronmotorlast). Som spänningsreferens visas i figur 4.15 fasspänningarna för mätuppställningen med alla matande faser inkopplade och resistiv last.

4.3.2.1 En fas bortkopplad

Resistiv last

Med den trebenta trefastransformatoren med direktjordad neutralpunkt på primärsidan spänningssätts den urkopplade fasen väl både primärt och sekundärt, vilket kan ses i figur 4.16. Även fasvinklarna för spänningarna är i stort sett oförändrade jämfört med fallet där alla faser är inkopplade.

Fasströmmarnas belopp bibehålls på sekundärsidan, vilket får till följd att strömmarna ökar i de kvarvarande faserna på transformatorns primärsida.

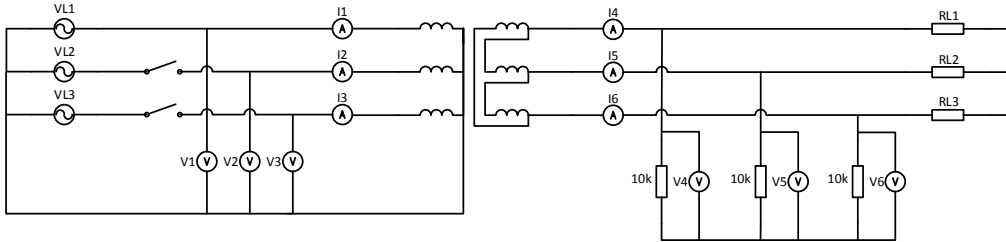
För både primär- och sekundärsidan utgörs sekvensspänningarna främst av plusföljdsspänningar, medan nollföljds- och minusföljdsspänningarna är såpass låga att det för ses som orimligt att detektera detta felfall utifrån dessa storheter (se figur 4.18). Då fasströmmarna är symmetriskt fördelade på sekundärsidan fås endast en plusföljdsström. På primärsidan går endast ström mellan två faser och nolledaren, vilket resulterar i både nollföljds- och plusföljdsströmmar som båda är av samma storleksordning. Således torde detta felfall kunna detekteras genom att mäta nollföljdsströmmen på transformatorns primärsida.

Asynkronmotorlast

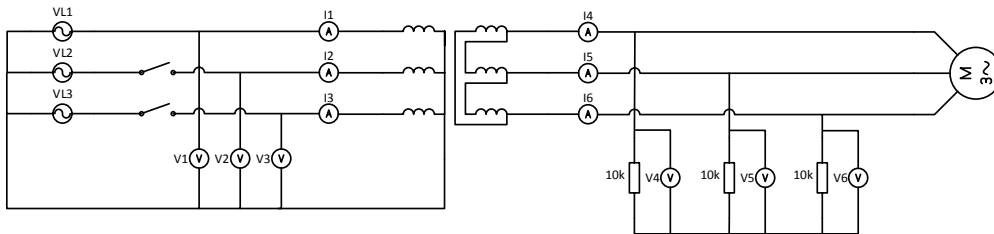
På samma sätt som för motsvarande fall med resistiv last spänningssätts både primär- och sekundärsida relativt väl för detta fall med asynkronmotorlast, både sett till amplitud och fas (se figur 4.17).

För fasströmmarna kan man jämfört med fallet med resistiv last nu notera en viss fasvridning på sekundärsidan och en mer markant fasvridning på primärsidan, samt att amplituden skiljer sig något mellan faserna.

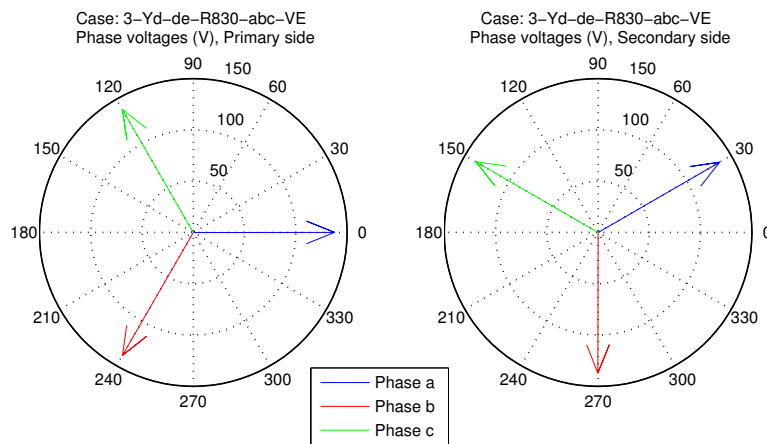
Liksom i fallet med resistiv last är nollföljds- och minusföljdsspänningarna fortfarande så låga att de svårigen kan detekteras (se figur 4.19). Däremot framträder en minusföljdsström på 0,5 A på både primär- och sekundärsidan som möjligen skulle kunna detekteras. Nollföljdsströmmen på primärsidan är fortsatt hög, endast lite lägre än plusföljdsströmmen och kan troligen detekteras.



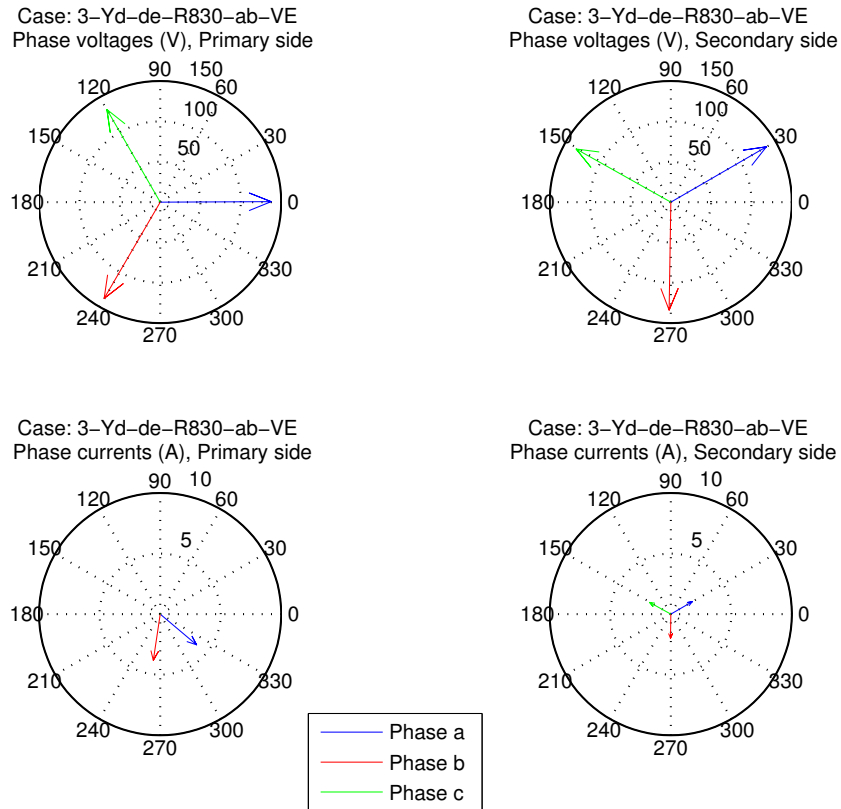
Figur 4.13: Mätupställning för konfigurationen 3-Yd-de med resistiv last.



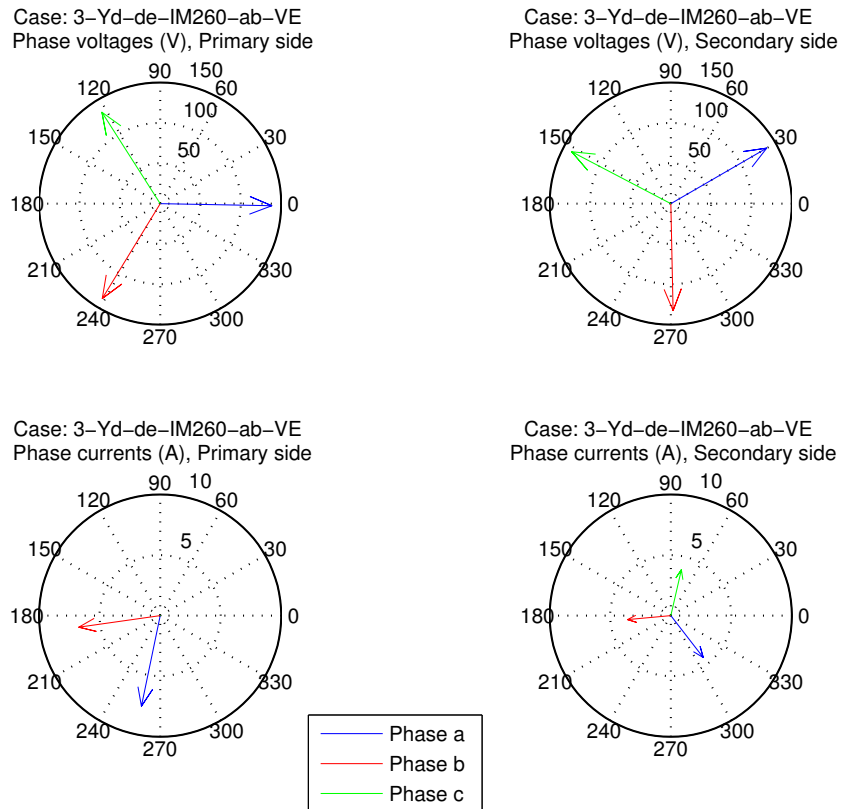
Figur 4.14: Mätupställning för konfigurationen 3-Yd-de med asynkronmotorlast.



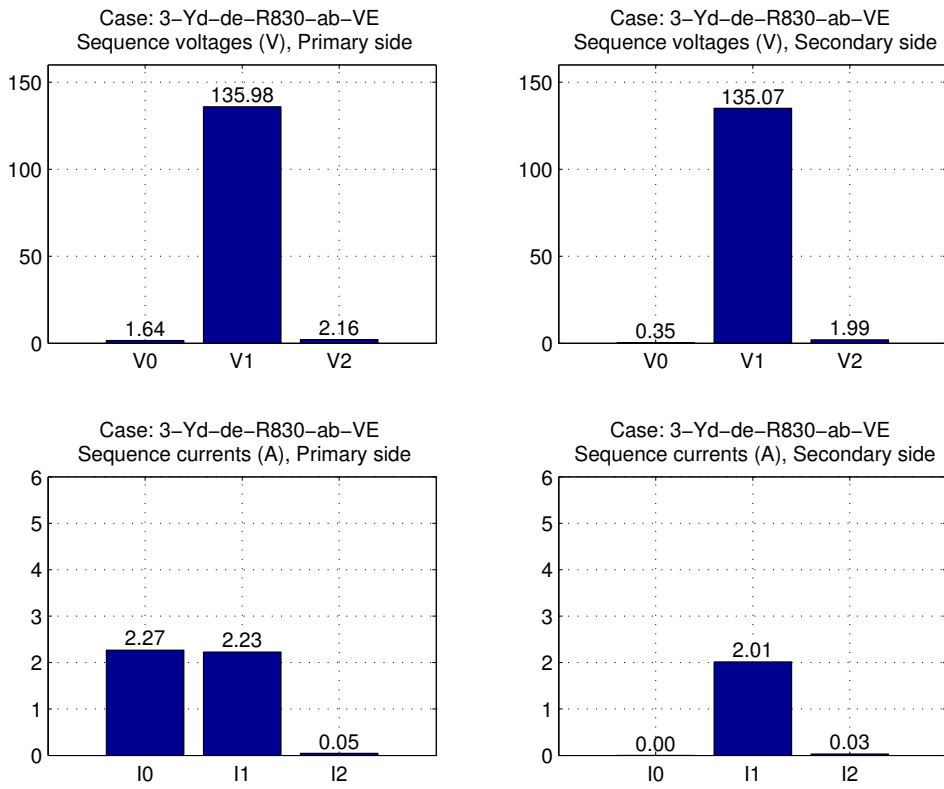
Figur 4.15: Fasspänningar för 3-Yd-de med resistiv last och alla matande faser inkopplade.



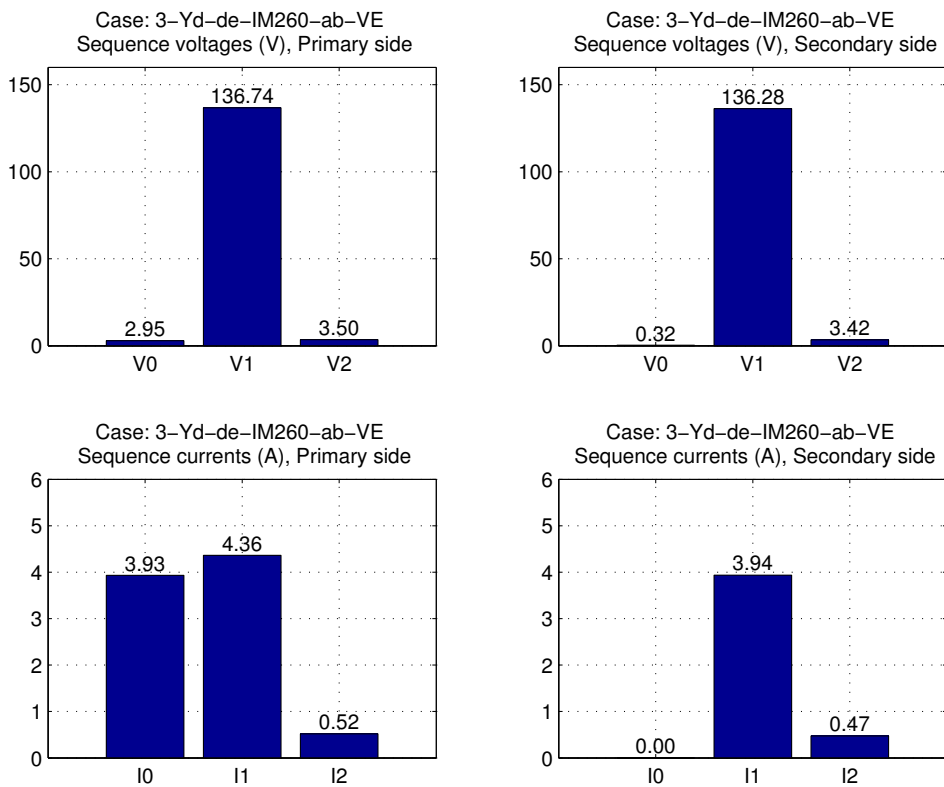
Figur 4.16: Fasspänningar och fasströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/d-de med resistiv last och en matande fas bortkopplad.



Figur 4.17: Fasspänningar och fasströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/d-de med asynkronmotorlast och en matande fas bortkopplad.



Figur 4.18: Sekvensspänningar och Sekvensströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/d-de med resistiv last och en matande fas bortkopplad.



Figur 4.19: Sekvensspänningar och sekvensströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/d-de med asynkronmotorlast och en matande fas bortkopplad.

4.3.2.2 Två faser bortkopplade

Resistiv last

När matningen till fas b och c kopplas bort för denna koppling spänningssätts dessa faser primärt till halva amplituden av spänningen i den kvarvarande fasen, fas a. Fas b och fas c är 180° ur fas i förhållande till fas a. På sekundärsidan är på grund av deltakopplingen endast fas a och fas c spänningssatta, men dessa är också 180° ur fas i förhållande till varandra.

För fasströmmarna gäller att det på sekundärsidan går en ström genom fas a och fas c, medan det på primärsidan så klart endast går en ström i fas a.

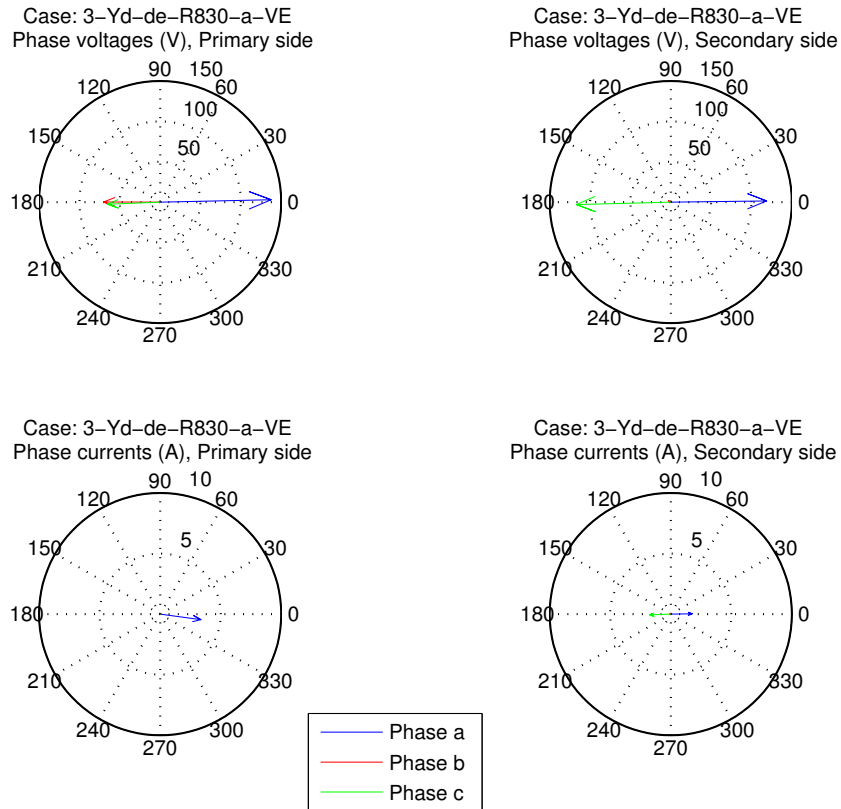
Både primärt och sekundärt fås plusföljds- och minusföljdsspänningar som motsvarar halva spänningen hos den matande fasen. Detta bör nog ses som ett tydligt tecken på osymmetrisk matning och beaktas vid detektering av fasavbrott. På primärsidan är dessutom alla sekvensströmmar av samma storleksordning, och på sekundärsidan är plusföljds- och minusföljdsströmmen av samma storleksordning. Nollföljdsströmmen på primärsidan borde alltså kunna användas för detektering av bortfall för denna koppling, medan det kan vara möjligt att nyttja minusföljdsströmmen för detektering på både primär- och sekundärsidan.

Asynkronmotorlast

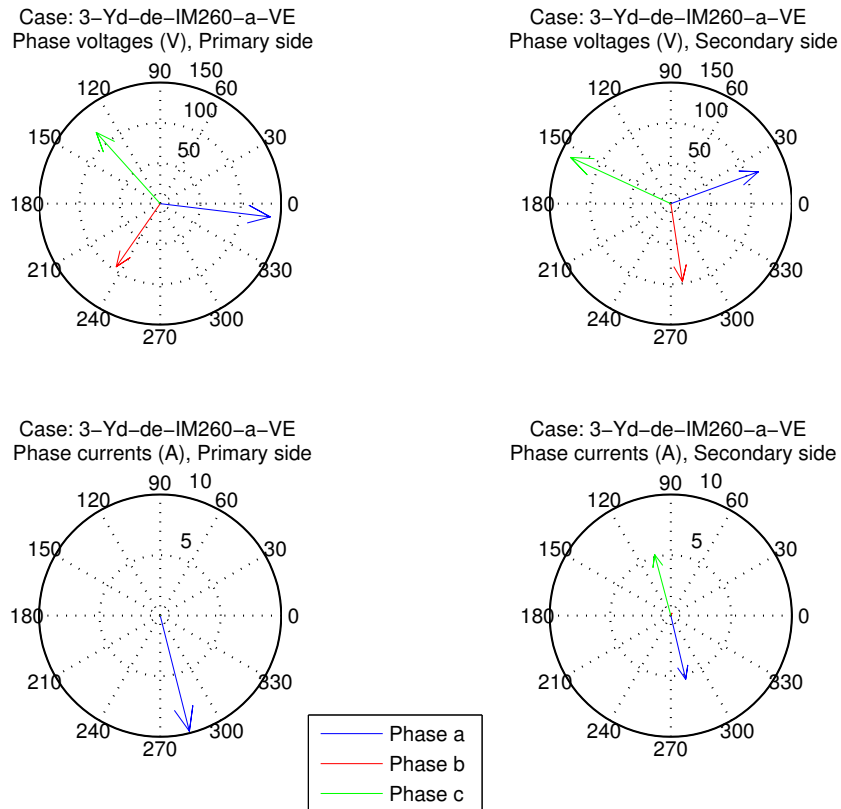
Till skillnad från fallet med rent resistiv last får nu fasspänningarna på både primär- och sekundärsida viss trefaskaraktär. Amplituden skiljer dock något mellan faserna, och fassvinklarna är inte riktigt 120° mellan alla faser.

Fasströmmarna är däremot mer lika fallet med rent resistiv last, med en ström som går genom fas a och fas c på sekundärsidan, och endast en ström i fas a på primärsidan. Det är värt att notera att strömmarna är större med asynkronmotorlasten, uppemot 10 A på primärsidan.

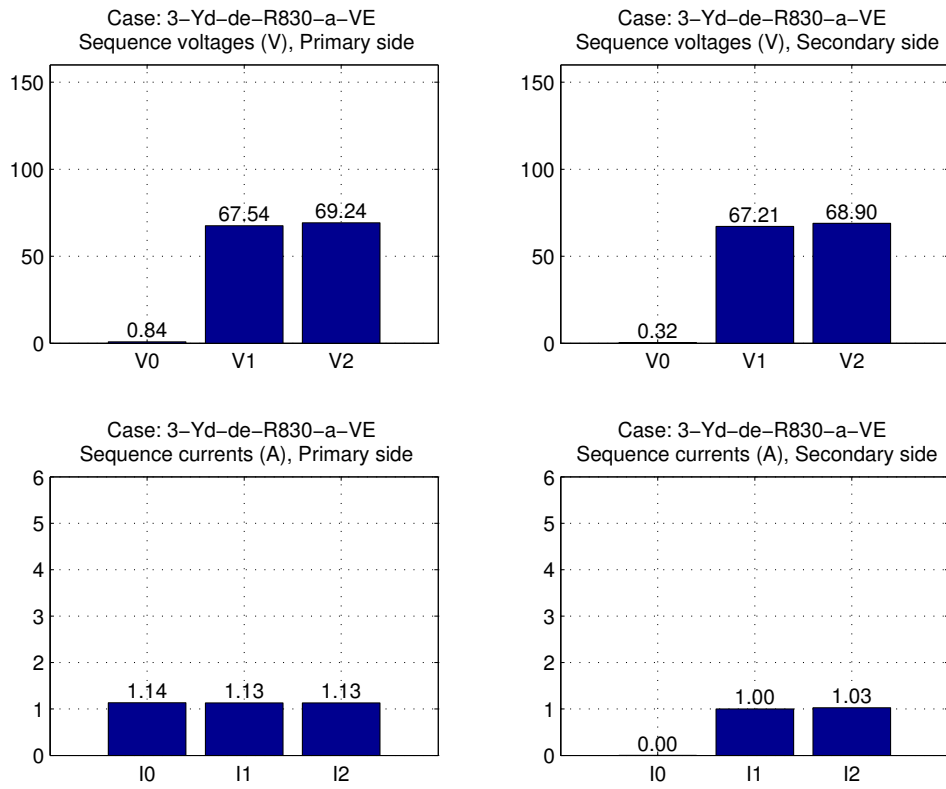
Med detta kopplingsfall fås plusföljdsspänningar om cirka 116 V och minusföljdsspänningar i storleksordningen 23-24 V både primärt och sekundärt. Med detta förhållande mellan minusföljd och plusföljd är det möjligt att det går att använda dessa storheter för detektering av detta fasbortfall. På primärsidan är alla sekvensströmmar av samma storleksordning, medan det på sekundärsidan finns en plusföljds- och minusföljdsström som båda är av samma storleksordning. Således borde antingen nollföljdsströmmen på primärsidan eller minusföljdsströmmen på antingen primär- eller sekundärsidan kunna användas för detektering av fasbortfallet.



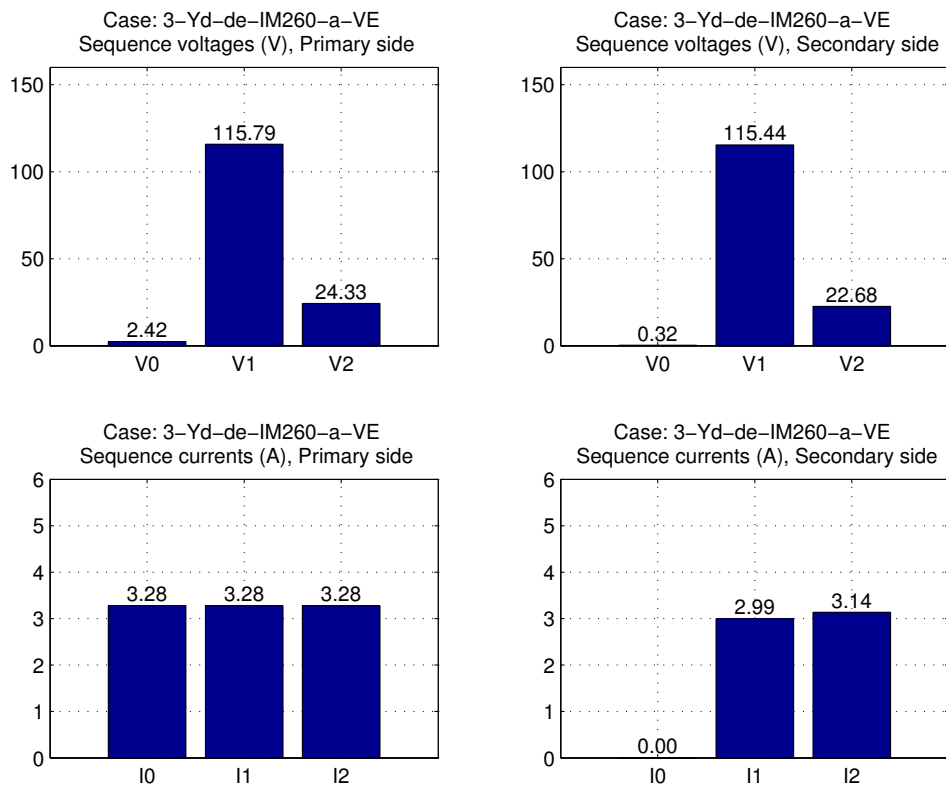
Figur 4.20: Fassungspänningar och fasströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/d-de med resistiv last och två matande faser bortkopplade.



Figur 4.21: Fassungspänningar och fasströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/d-de med asynkronmotorlast och två matande faser bortkopplade.



Figur 4.22: Sekvensspänningar och sekvensströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/d-de med resistiv last och två matande faser bortkopplade.



Figur 4.23: Sekvensspänningar och sekvensströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/d-de med asynkronmotorlast och två matande faser bortkopplade.

4.3.3 Trebent trefastransformator Dy-hre

De mätuppställningar som används kan ses i figur 4.24 (resistiv last) och figur 4.25 (asynkronmotorlast). Som spänningsreferens visas i figur 4.26 fasspänningarna för mätuppställningen med alla matande faser inkopplade och resistiv last.

4.3.3.1 En fas bortkopplad

Resistiv last

Som man kan se i figur 4.27 spänningssätts den bortkopplade fasen på primärsidan till hälften av den amplitud den tidigare hade. Fasläget ändrar sig med 180° jämfört med tidigare, det vill säga vinkeln ligger nu mitt emellan de två inkopplade fasernas vinklar. På sekundärsidan är endast fas b spänningssatt korrekt. Fas a och fas c ligger i fas med varandra, 180° från fas b och med halva spänningen av fas b.

Strömmarna i de två inkopplade faserna på primärsidan ligger 180° från varandra och är av samma storlek. På sekundärsidan följer strömmarna motsvarande spänningar eftersom lasten är rent resistiv.

Plusföljdsspänningen sjunker till hälften på både primärsidan och sekundärsidan samtidigt som det uppkommer en minusföljdsspänning som är lika stor. På primärsidan uppkommer dessutom en nollföljdsspänning som också är lika stor som plusföljdsspänningen. Se figur 4.29.

Både på primär- och sekundärsidan uppkommer en minusföljdsström som är lika stor som plusföljdsströmmen. Ingen nollföljdsström kan finnas i denna koppling eftersom transformatorn är deltalindad på primärsidan och den inkopplade lasten saknar nolledare.

Sammantaget torde detta felfall vara enkelt att detektera på såväl transformatorns primär- som sekundärsida eftersom både sekvensspänningar och sekvensströmmar ligger klart utanför det normala arbetsområdet där i princip enbart plusföljdskomponenter existerar.

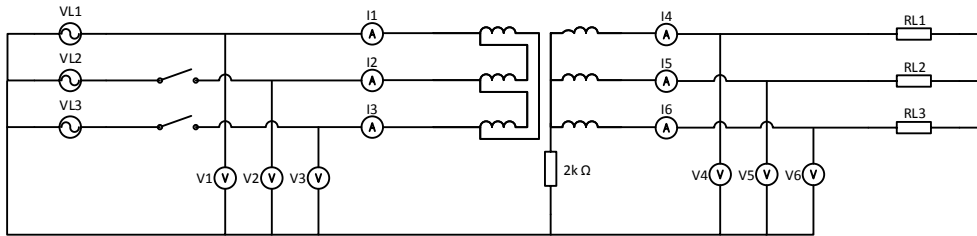
Asynkronmotorlast

Jämfört med då lasten var rent resistiv spänningssätts nu fas c på primärsidan med en nästan korrekt fasvinkel även om den fortfarande har en lägre amplitud jämfört med de övriga fasspänningarna; se figur 4.28. På sekundärsidan är spänningarna ännu mer lika det felfria fallet även om deras amplitud är något lägre och den dessutom skiljer lite mellan de olika faserna.

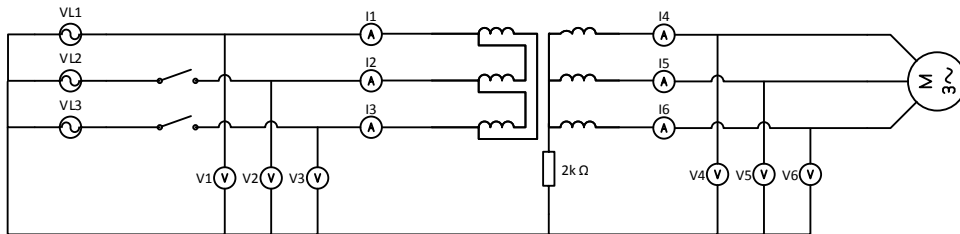
Strömmarna är påfallande lika fallet med resistiv lasts strömmar, om än med en viss fasförskjutning på grund av motorns induktiva komponent.

Även i detta fall uppkommer det klart detekterbara minusföljdsspänningar på både primär- och sekundärsidan av transformatorn, även om de ligger markant lägre än för fallet med resistiv last (se figur 4.30). Motsvarande gäller nollföljdsspänningen på primärsidan. Däremot är plusföljdsspänningen betydligt högre, vilket kan försvåra underspänningsdetektering.

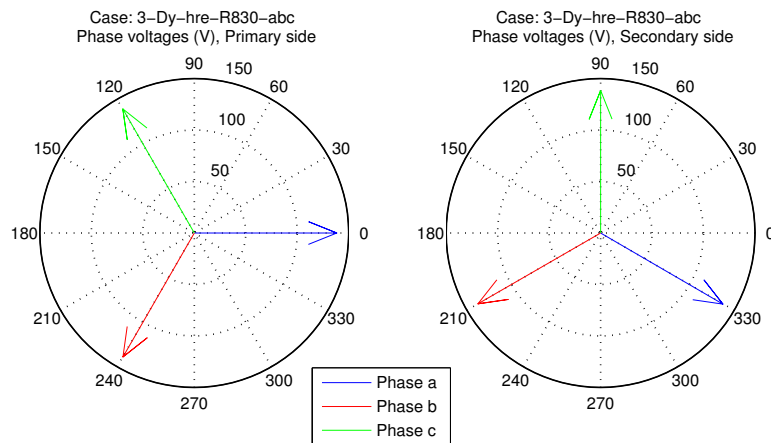
Förhållandet mellan de olika sekvensströmmarna är väldigt likt fallet med resistiv last, även om minusföljdsströmmen på sekundärsidan nu faktiskt är ännu större än plusföljdsströmmen. Även med asynkronmotorlast är detta felfall lättet detekterat på både primärsidan och sekundärsidan, även om spänningssättningen sker med mer "korrekt trefaskaraktär" än med resistiv last.



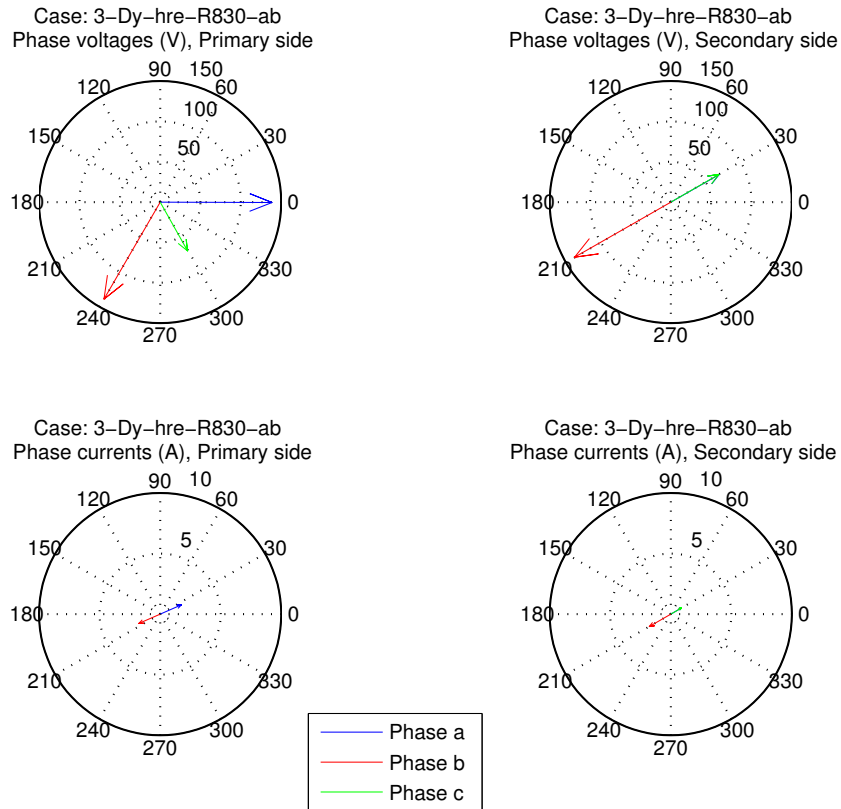
Figur 4.24: Mätupställning för konfigurationen 3-Dy-hre med resistiv last.



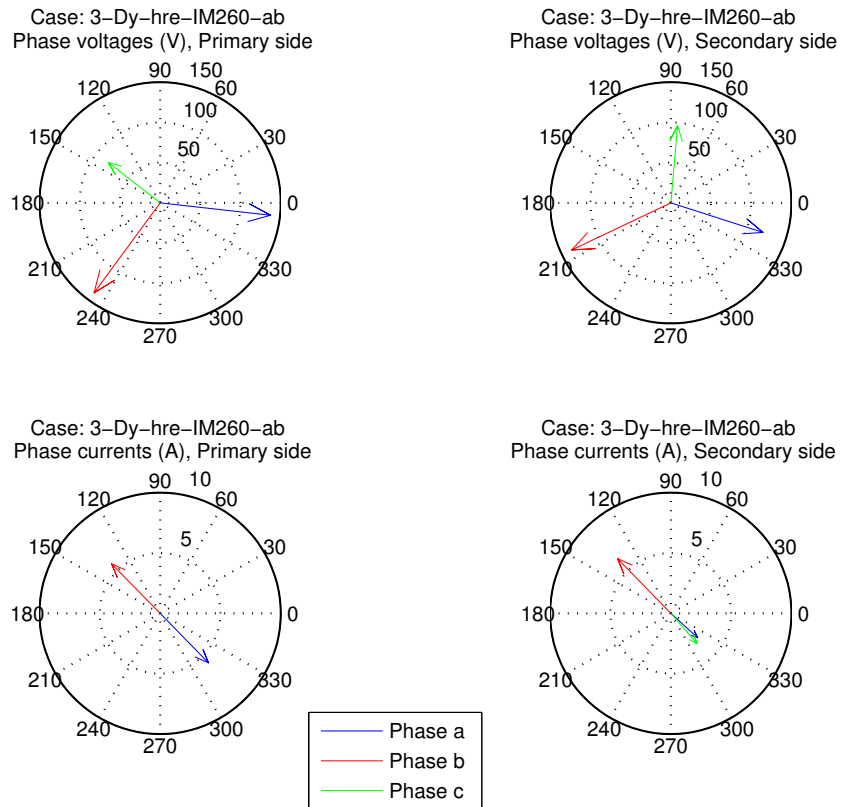
Figur 4.25: Mätupställning för konfigurationen 3-Dy-hre med asynkronmotorlast.



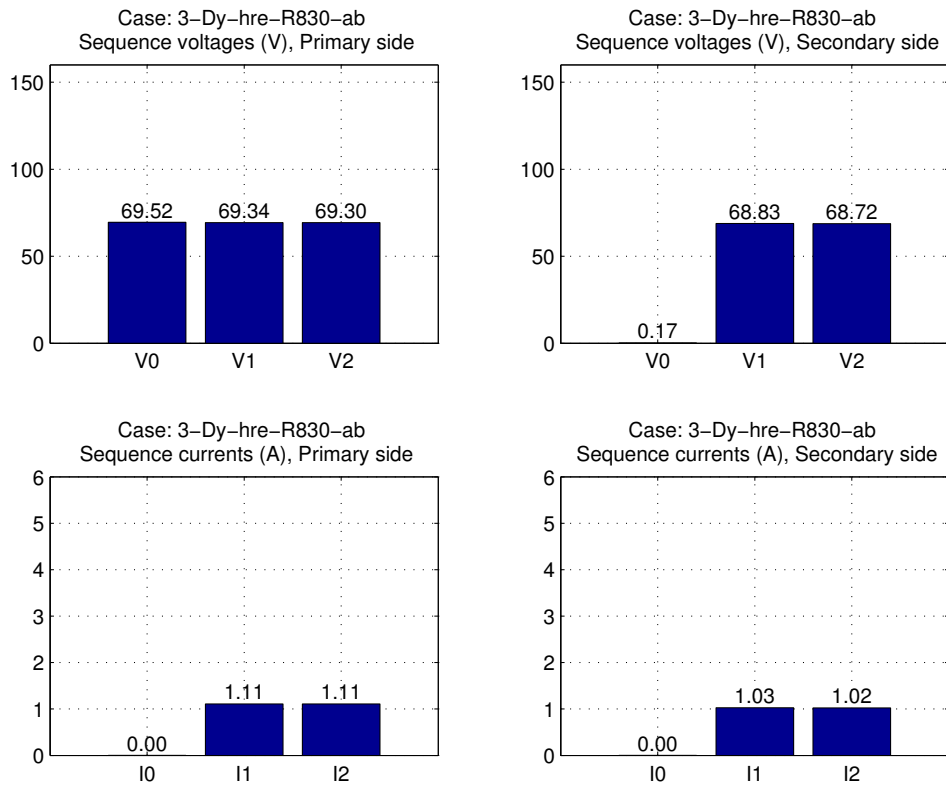
Figur 4.26: Fasspänningar för 3-Dy-hre med resistiv last och alla matande faser inkopplade.



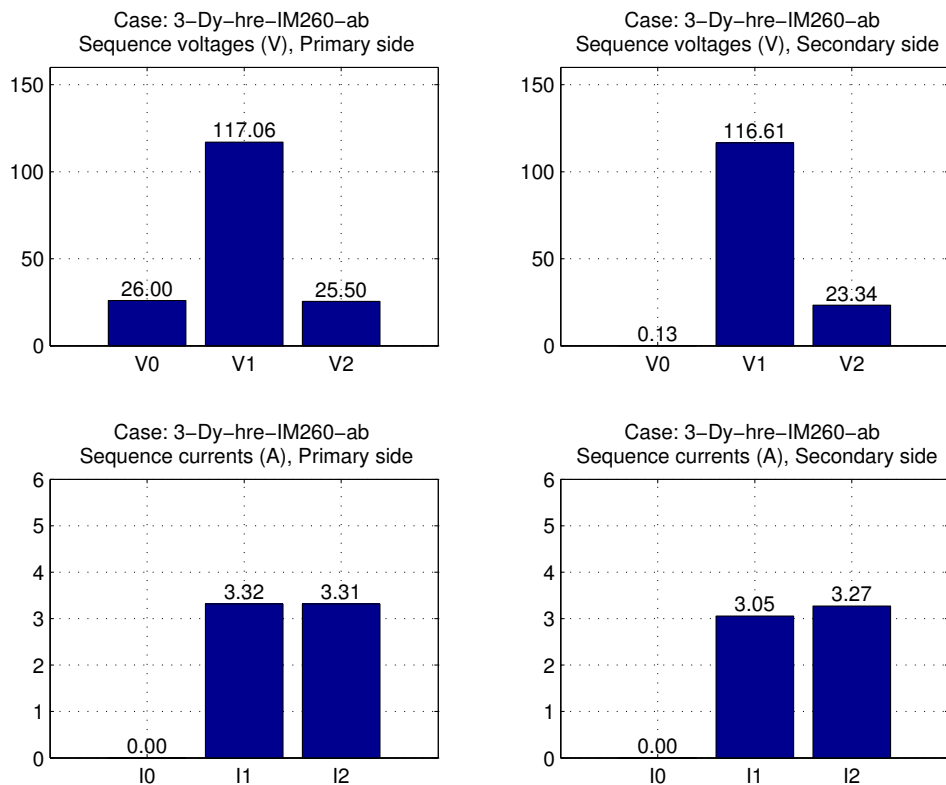
Figur 4.27: Fasspänningar och fasströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i D/y-hre med resistiv last och en matande fas bortkopplad.



Figur 4.28: Fasspänningar och fasströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i D/y-hre med asynkronmotorlast och en matande fas bortkopplad.



Figur 4.29: Sekvensspänningar och Sekvensströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i D/y-hre med resistiv last och en matande fas bortkopplad.



Figur 4.30: Sekvensspänningar och sekvensströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i D/y-hre med asynkronmotorlast och en matande fas bortkopplad.

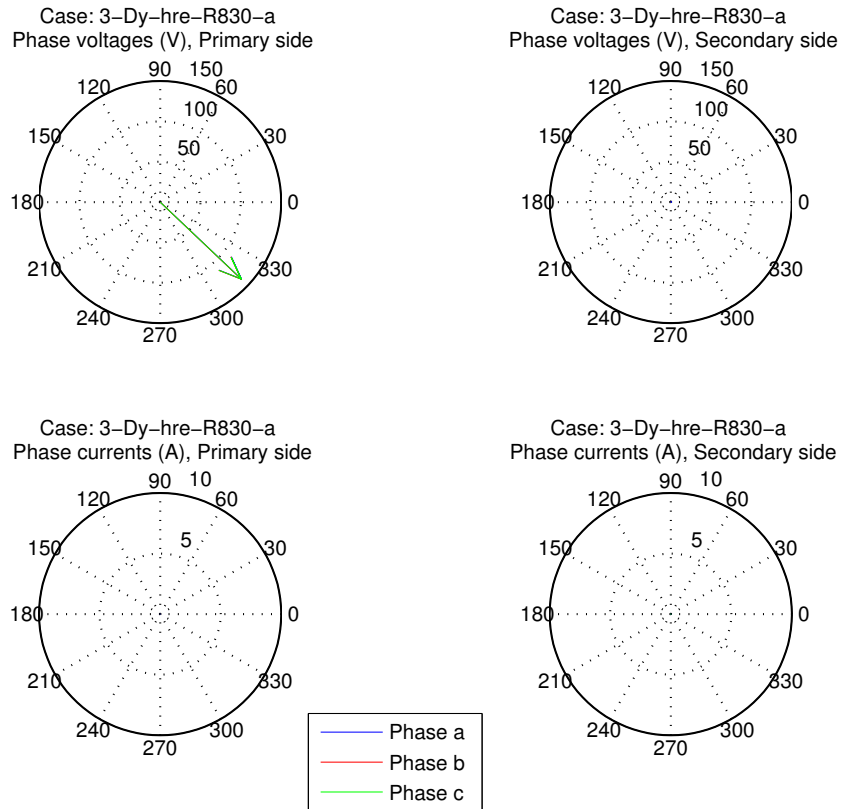
4.3.3.2 Två faser bortkopplade

Resistiv last

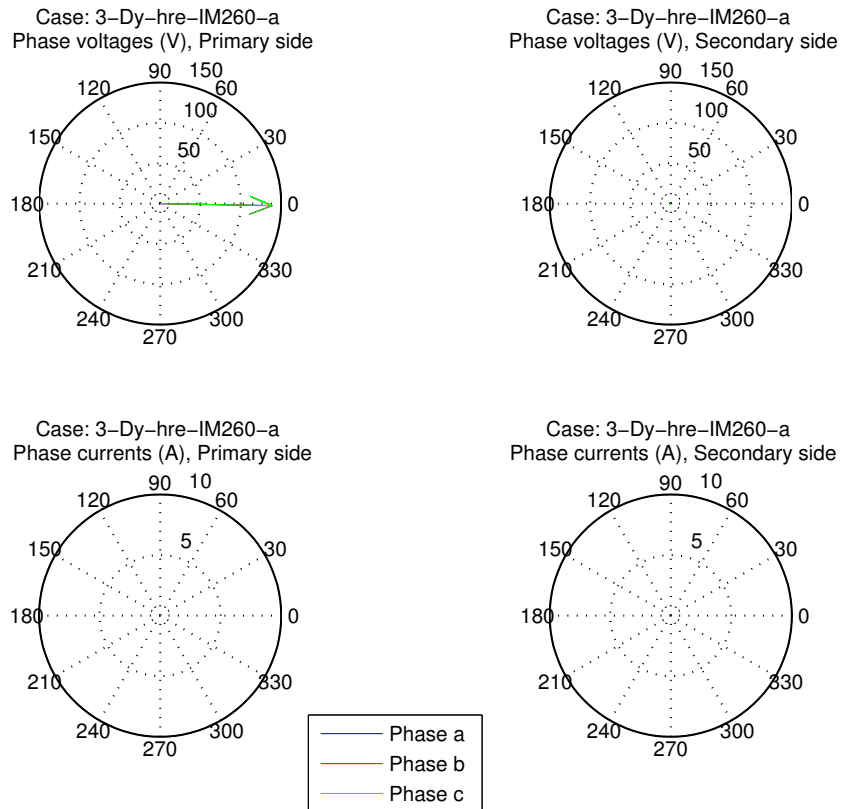
Eftersom transformatorns primärsida är deltakopplad kan ingenting drivas med enbart en fas. Alla faser på primärsidan antar alltså samma potential som den ensamma matande faser och ingenting transformeras till sekundärsidan. Detta fenomen syns tydligt i figur 4.31 och transformeras till att den enda sekvensstorhet som uppkommer är en nollföljdsspänning på primärsidan (se figur 4.33).

Asynkronmotorlast

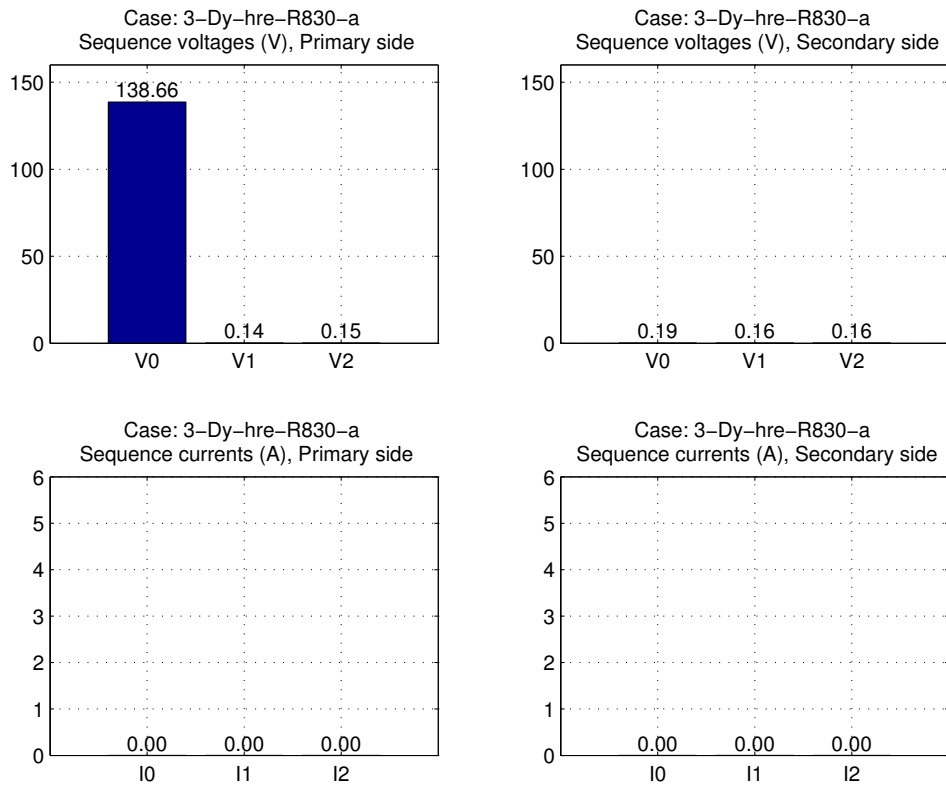
Samma fenomen som vid rent resistiv last uppkommer. Se figur 4.32 och 4.34.



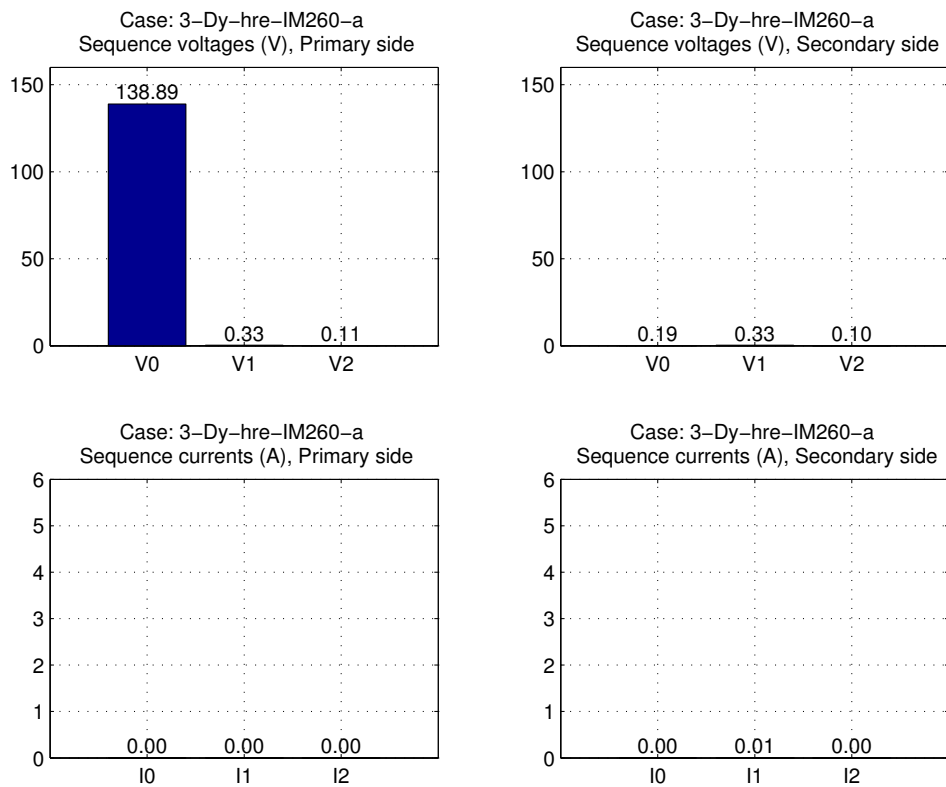
Figur 4.31: Fasspänningar och fasströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i D/y-hre med resistiv last och två matande faser bortkopplade.



Figur 4.32: Fasspänningar och fasströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i D/y-hre med asynkronmotorlast och två matande faser bortkopplade.



Figur 4.33: Sekvensspänningar och sekvensströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i D/y-hre med resistiv last och två matande faser bortkopplade.



Figur 4.34: Sekvensspänningar och sekvensströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i D/y-hre med asynkronmotorlast och två matande faser bortkopplade.

4.3.4 Trebent trefastransformator Yy-de-hre

De mätuppställningar som används kan ses i figur 4.35 (resistiv last) och figur 4.36 (asynkronmotorlast). Som spänningsreferens visas i figur 4.37 fasspänningarna för mätuppställningen med alla matande faser inkopplade och resistiv last.

4.3.4.1 En fas bortkopplad

Resistiv last

Med fas c bortkopplad och rent resistiv last spänningssätts den bortkopplade fasen väl på både primär- och sekundärsidan av transformatorn. En marginell färförskjutning i förhållande till de andra faserna kan ses jämfört med fallet med symmetrisk matning. Se figur 4.38.

Lika stor ström dras på sekundärsidan i alla faser, och fasavståndet är 120° . På primärsidan blir strömmarna större i de kvarvarande faserna a och b, samtidigt som avståndet mellan dessa faser krymper till knappt 60° .

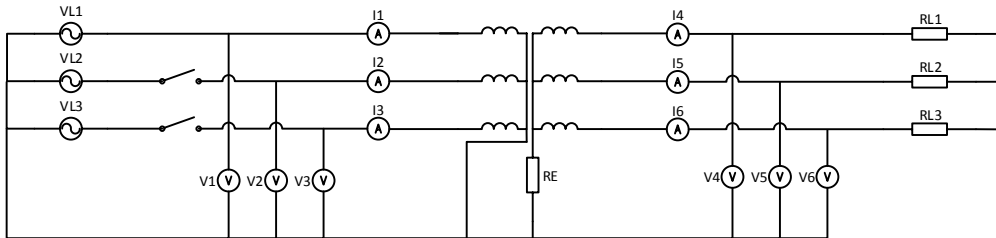
Sekvensspänningarna domineras både på primär- och sekundärsidan av plusföljdsspänningen, och endast små nollföljds- och minusföljdsspänningar uppvisas (se figur 4.40). På primärsidan kan en nollföljdsström av samma storleksordning som plusföljdsströmmen ses, medan det på sekundärsidan endast förekommer en plusföljdsström. Det tycks som att den enda rimliga möjligheten att detektera detta fasbortfall utifrån sekvensstorheterna är genom att mäta nollföljdsströmmen på transformatorns primärsida.

Asynkronmotorlast

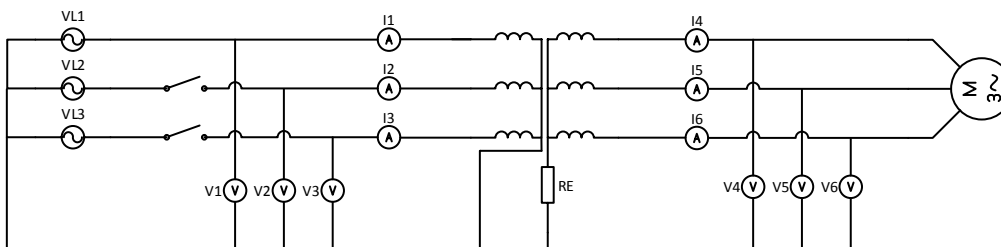
På samma sätt som för fallet med rent resistiv last spänningssätts den bortkopplade fasen väl både på primär- och sekundärsidan; se figur 4.39. Det blir endast en marginell sänkning av fasspänningen i fas c, och fasvinklarna är oförändrade jämfört med fallet med alla matande faser inkopplade.

Jämfört med fallet med resistiv last är alla fasströmmar vridna, och amplituden är olika stor för de tre faserna.

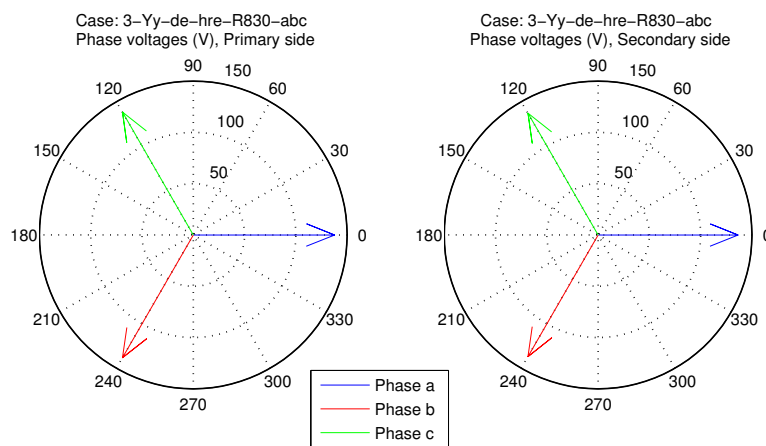
Nollföljds- och minusföljdsspänningarna är något större med asynkronmotorlast än med resistiv last på både primär- och sekundärsidan, men plusföljdsspänningarna är även i detta fall så pass mycket större att det troligen inte är möjligt att detektera detta fasbortfall utifrån sekvensspänningarna (figur 4.41). När det gäller sekvensströmmarna finns det däremot en tydlig skillnad mot det rent resistiva fallet, och det är att det förekommer tydliga minusföljdsströmmar på både primär- och sekundärsidan. För att detektera detta fasbortfall bör således antingen nollföljdsströmmen på primärsidan eller minusföljdsströmmen på antingen primär- eller sekundärsidan hos transformatorn kunna användas.



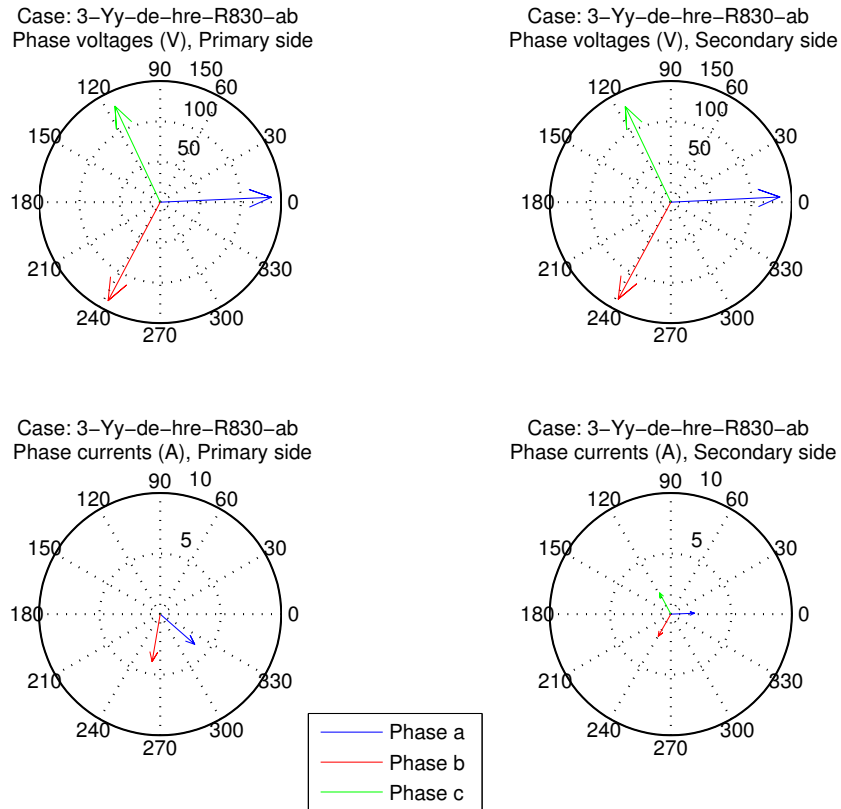
Figur 4.35: Mätupställning för konfigurationen 3-Yy-de-hre med resistiv last.



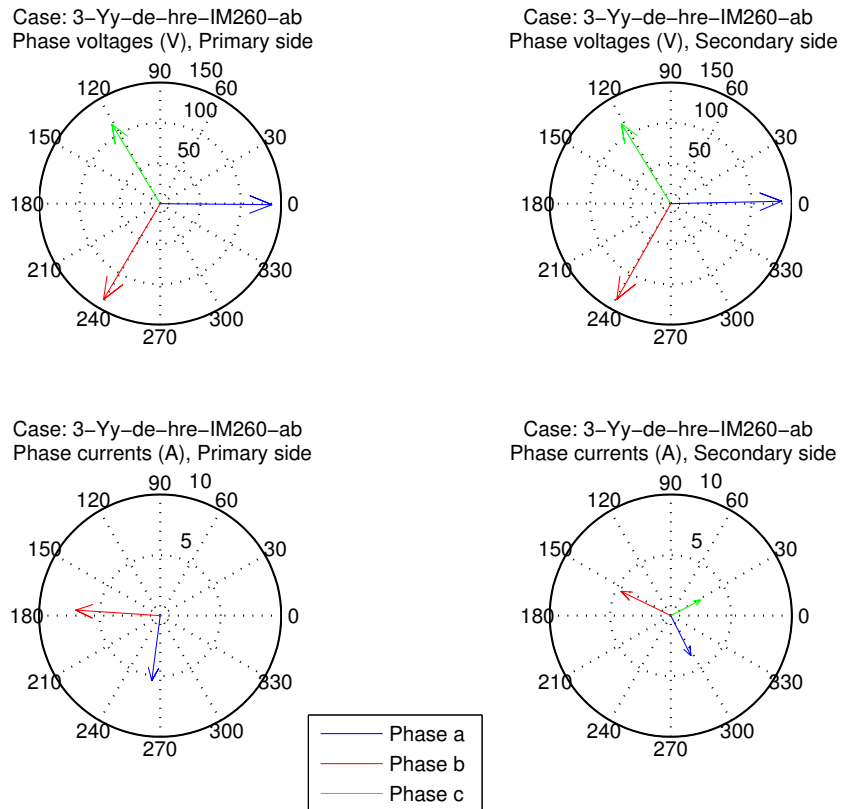
Figur 4.36: Mätupställning för konfigurationen 3-Yy-de-hre med asynkronmotorlast.



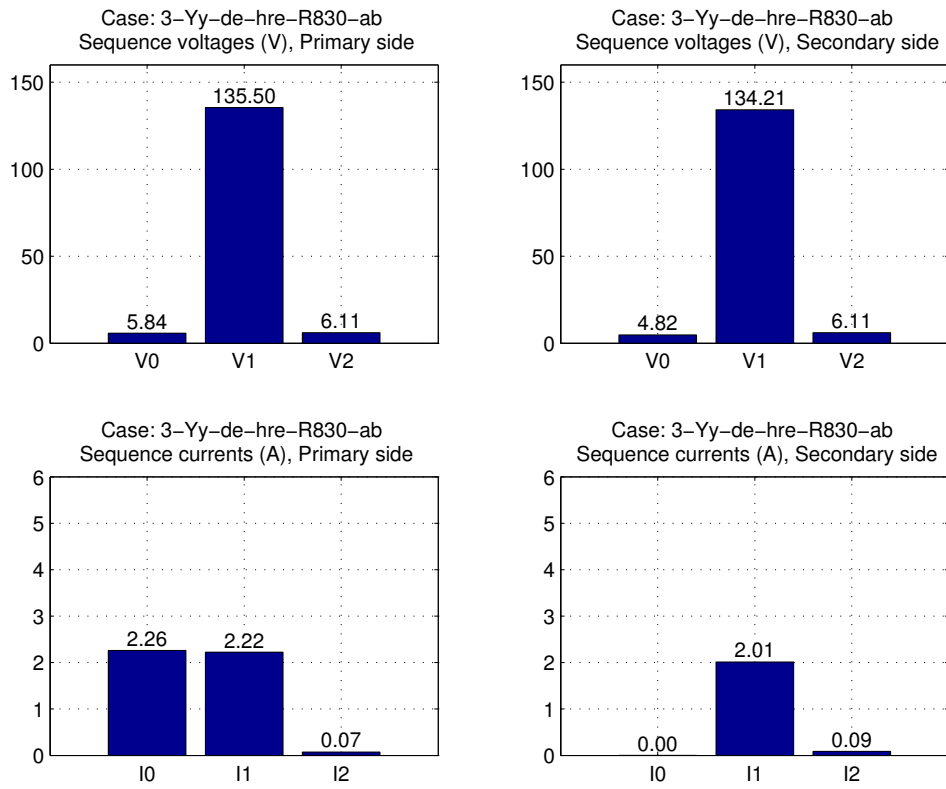
Figur 4.37: Fasspänningar för 3-Yy-de-hre med resistiv last och alla matande faser inkopplade.



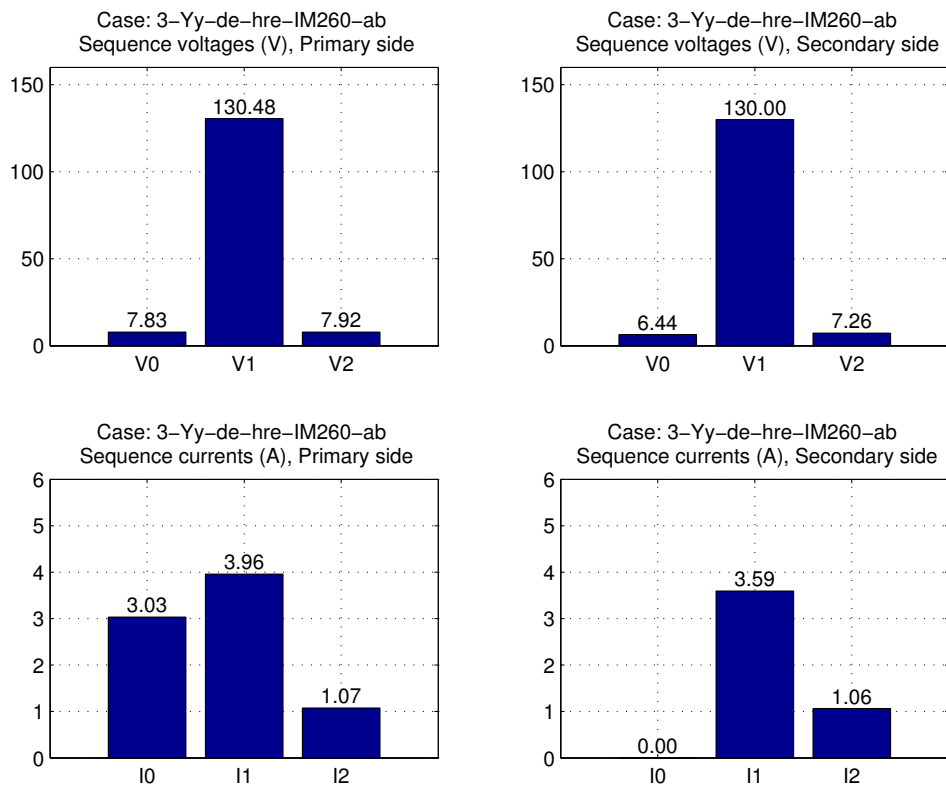
Figur 4.38: Fassungspänningar och fasströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/y-de-hre med resistiv last och en matande fas bortkopplad.



Figur 4.39: Fassungspänningar och fasströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/y-de-hre med asynkronmotorlast och en matande fas bortkopplad.



Figur 4.40: Sekvensspänningar och sekvensströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/y-de-hre med resistiv last och en matande fas bortkopplad.



Figur 4.41: Sekvensspänningar och sekvensströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/y-de-hre med asynkronmotorlast och en matande fas bortkopplad.

4.3.4.2 Två faser bortkopplade

Resistiv last

Med två matande faser bortkopplade och rent resistiv last blir fasbortfallet relativt tydligt. Den matande fasen (fas a) har full spänning på både primär- och sekundärsida, medan fas b och fas c har halverade spänningar och är 180° ur fas i förhållande till fas a. Se figur 4.42.

För strömmarna på sekundärsidan gäller att strömmarna i fas b och c är hälften så stora som den i fas a samt motriktade.

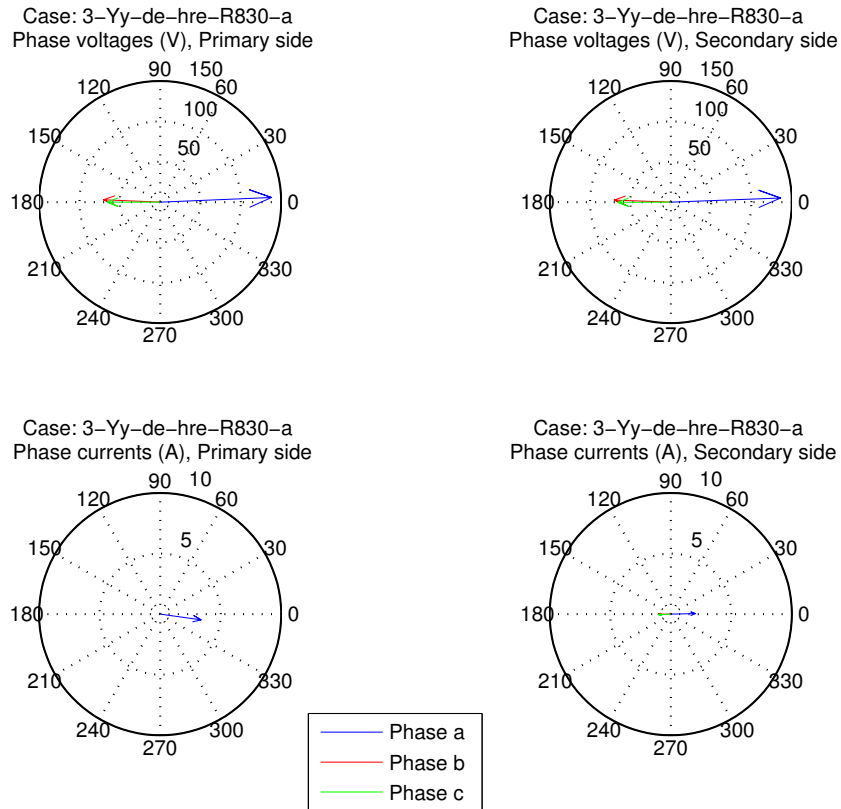
Både plusföljds- och minusföljdsspänningar på primär- och sekundärsida är av samma storleksordning, vilken svarar mot hälften av fasspänningen hos den matande fasen (se figur 4.44). Detta utgör en god grund för detektering av detta fasbortfall. På primärsidan är alla sekvensströmmar lika stora eftersom belastningen på elnätet blir rent enfasig, och på sekundärsidan är plusföljds- och minusföljdsströmmen av samma storleksordning. Detta innebär att nollföljdsströmmen på primärsidan eller minusföljdsströmmen på antingen primär- eller sekundärsidan hos transformatorn borde vara lämpliga kandidater för detektering av detta fasbortfall.

Asynkronmotorlast

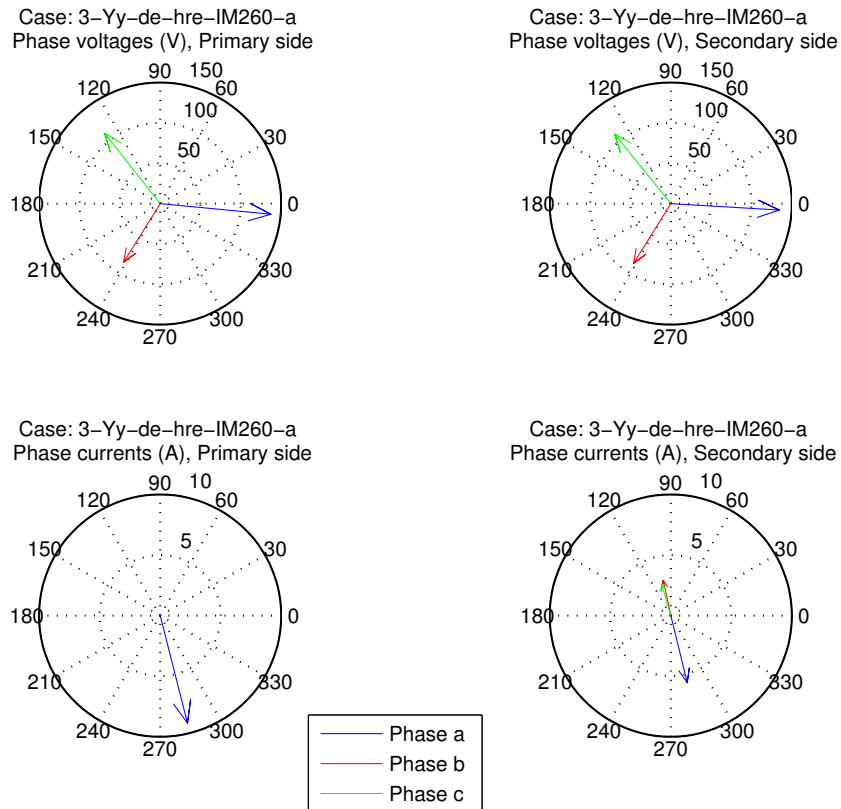
Med asynkronmotorlast får man till skillnad från fallet med rent resistiv last en spänningssättning av de urkopplade faserna b och c med tydlig trefaskaraktär på både primär- och sekundärsidan. Amplituden skiljer något mellan faserna. Se figur 4.43.

Fasströmmarna är inte jämnt fördelade på transformatorns sekundärsida, utan i fas b och c går strömmar som vardera motsvarar halva amplituden hos fas a och är helt i motfas mot denna. På primärsidan går nästan 10 A i fas a, och det är värt att notera att detta är klart över transformatorns märkström.

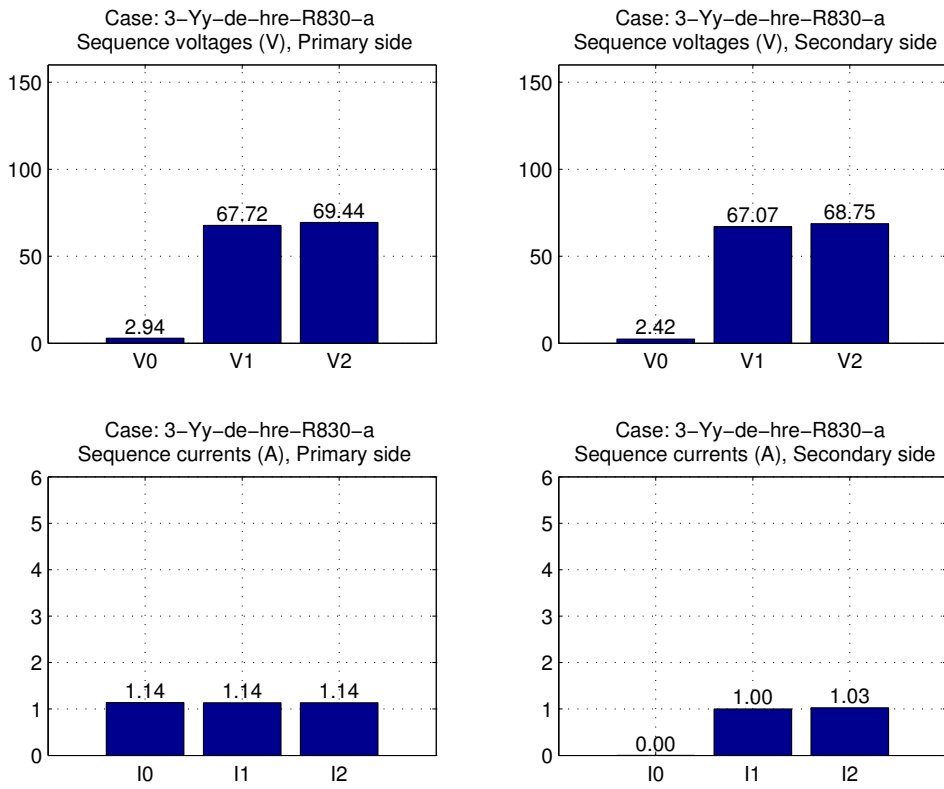
På både primär- och sekundärsidan är plusföljdsspänningarna cirka 111 V och minusföljdsspänningarna cirka 22 V (figur 4.45). Förhållandet mellan dessa gör att det är ett gränsfall om minusföljdsspänningen säkert går att använda för detektering av fasbortfallet. Precis som för fallet med resistiv last är alla sekvensströmmar på primärsidan av samma storleksordning för detta fall, med skillnaden att de är nästan tre gånger större. På sekundärsidan finns plusföljds- och minusföljdsströmmar som är av samma storleksordning. Här gäller alltså precis som med resistiv last att det bör gå att använda nollföljdsströmmen på primärsidan eller minusföljdsströmmen på antingen primär- eller sekundärsidan för att detektera fasbortfallet för två av de matande faserna.



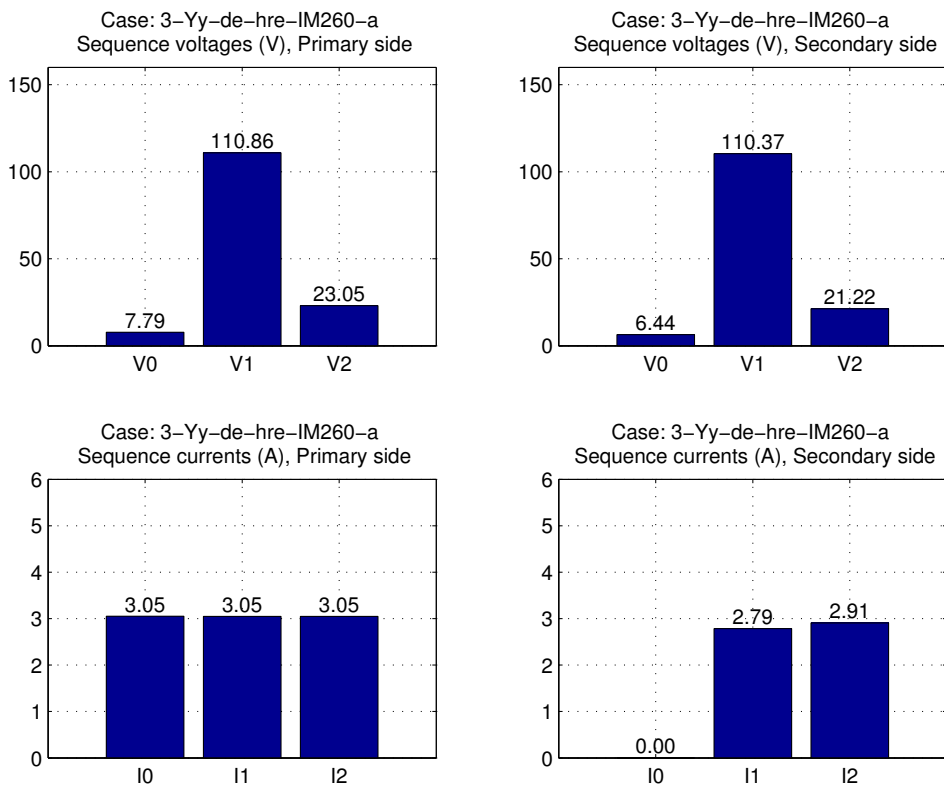
Figur 4.42: Fasspänningar och fasströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/y-de-hre med resistiv last och två matande faser bortkopplade.



Figur 4.43: Fasspänningar och fasströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/y-de-hre med asynkronmotorlast och två matande faser bortkopplade.



Figur 4.44: Sekvensspänningar och sekvensströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/y-de-hre med resistiv last och två matande faser bortkopplade.



Figur 4.45: Sekvensspänningar och sekvensströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/y-de-hre med asynkronmotorlast och två matande faser bortkopplade.

4.3.5 Trebent trefastransformator Yy-in-hre

De mätuppställningar som används kan ses i figur 4.46 (resistiv last) och figur 4.47 (asynkronmotorlast). Som spänningsreferens visas i figur 4.48 fasspänningarna för mätuppställningen med alla matande faser inkopplade och resistiv last.

4.3.5.1 En fas bortkopplad

Resistiv last

Den bortkopplade fasen på primärsidan spänningssätts till halva den tidigare spänningen, men ligger 180° förskjuten från sin tidigare fasvinkel. Den nya vinkeln ligger alltså mitt emellan de två inkopplade fasernas vinklar, se figur 4.49. På sekundärsidan är enbart faserna a och b spänningssatta med strax under nominell amplitud och 180° ifrån varandra.

Fasströmmarna på sekundärsidan följer motsvarande fasspänningar eftersom lasten är rent resistiv, och på primärsidan följer fasströmmarna sekundärsidans fasströmmar utan någon större förskjutning.

På både primärsidan och sekundärsidan sjunker plusföljdsspänningen till halva sitt tidigare värde samtidigt som en lika stor minusföljdsspänning uppkommer. På primärsidan uppkommer även en lika stor nollföljdsspänning. Se figur 4.51.

Minusföljdsströmmen är lika stor som plusföljdsströmmen på både primärsidan och sekundärsidan. Ingen nollföljdsström uppkommer eftersom varken transformatorns primärsida eller belastningsresistorn har inkopplad nolledare.

Sammantaget är fallet förmodligen lättdetekterat på både primärsidan och sekundärsidan av transformatorn eftersom kraftiga minusföljdsströmmar uppkommer samtidigt som plusföljdsspänningarna sjunker till halva sitt tidigare värde och minusföljdsspänningarna antar samma storlek som plusföljdsspänningarna.

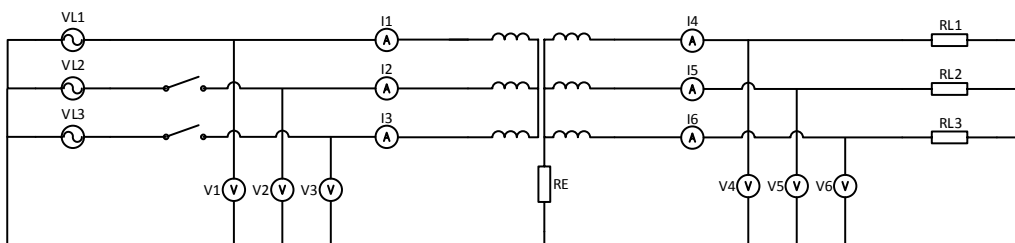
Asynkronmotorlast

Med asynkronmotorn spänningssätts den bortfallna fasen på framför allt sekundärsidan, men även primärsidan, med mycket större ”trefaskaraktär” jämfört med fallet med resistiv last. Vinkelavståndet mellan faserna ligger lika de ”korrekta” 120° som de hade innan fasbortfallet. Se figur 4.50.

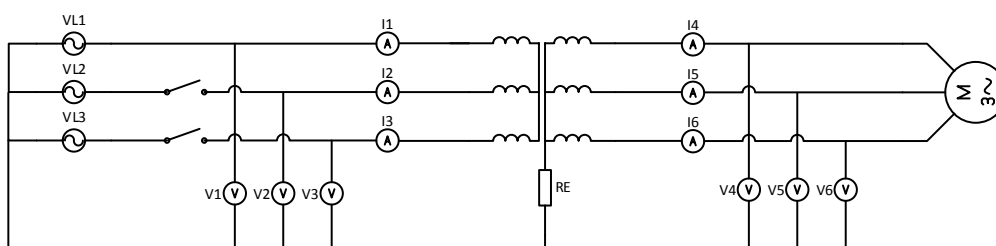
Fasströmmarna är på både primärsidan och sekundärsidan lika fallet med resistiv belastning, bortsett från storleksskillnaden och den vinkelförskjutning som motorns induktiva lastkomponent innebär.

Jämfört med det resistiva fallet minskar inte plusföljdsspänningen lika mycket och, även om de fortfarande är klart detekterbara, så är nollföljds- och minusföljdsspänningen mycket mindre än med resistiv last. Se figur 4.52.

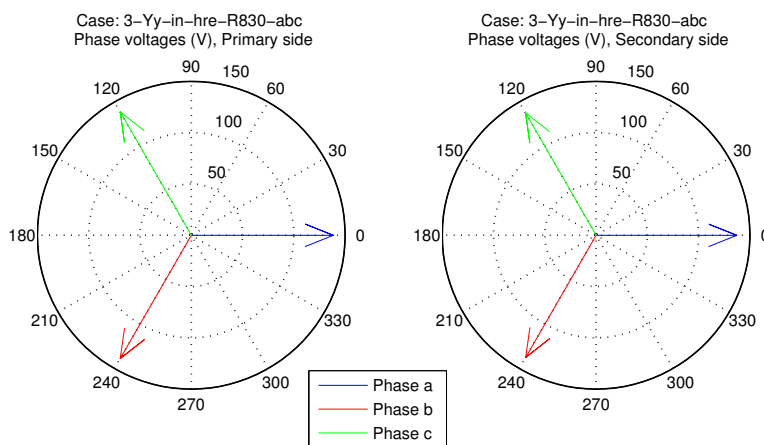
På primärsidan är minusföljdsströmmen, liksom för fallet med resistiv last, lika stor som plusföljdsströmmen och på sekundärsidan är den till och med större. Fortfarande kan det inte gå någon nollföljdsström i uppställningen, men minusföljdsströmmens storlek gör ändå felet lättdetekterat på både primärsidan och sekundärsidan av transformatorn.



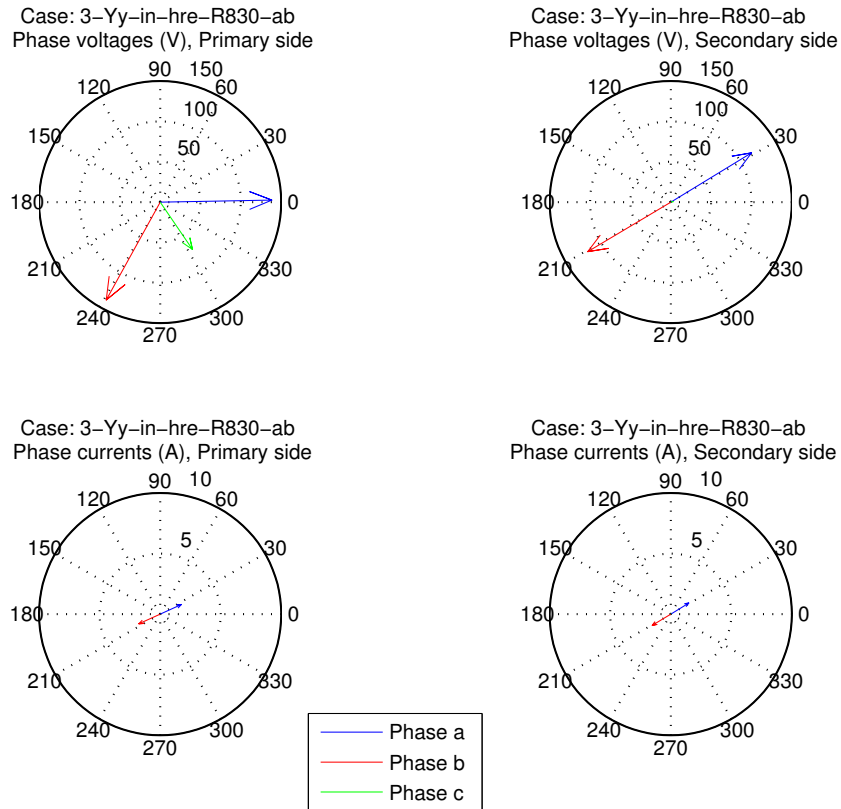
Figur 4.46: Mätupställning för konfigurationen 3-Yy-in-hre med resistiv last.



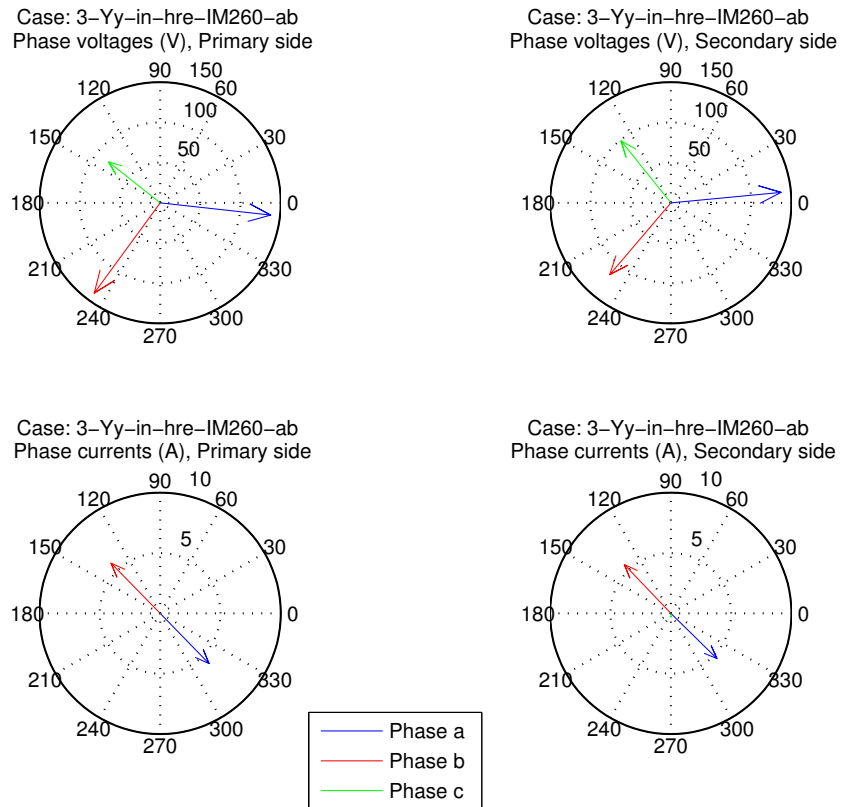
Figur 4.47: Mätupställning för konfigurationen 3-Yy-in-hre med asynkronmotorlast.



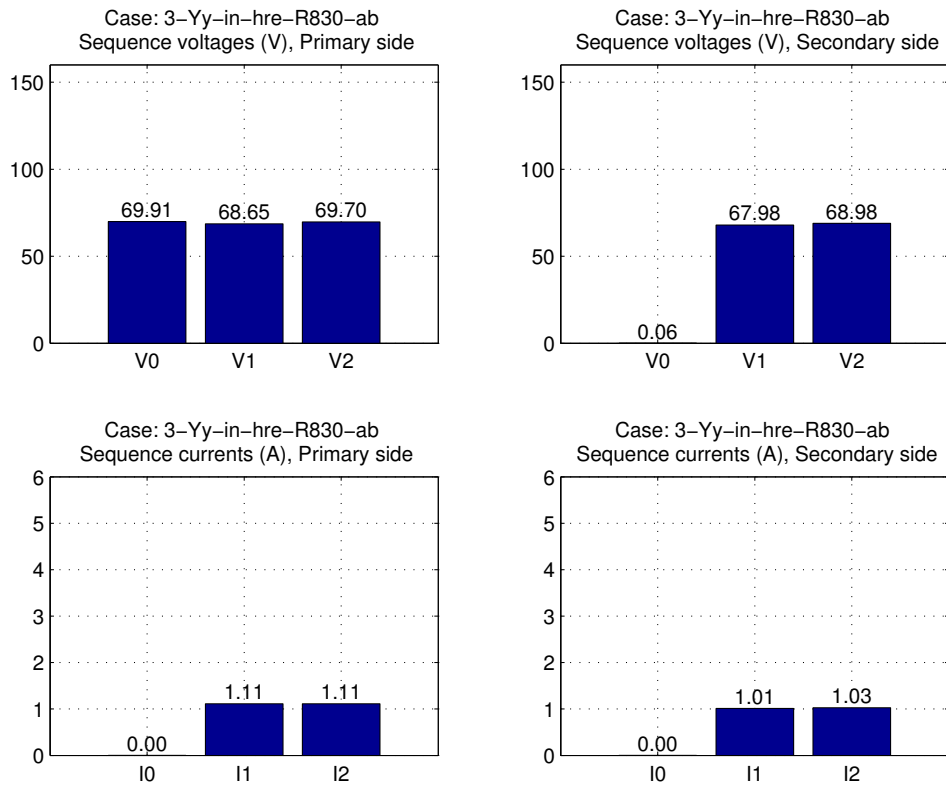
Figur 4.48: Fasspänningar för 3-Yy-in-hre med resistiv last och alla matande faser inkopplade.



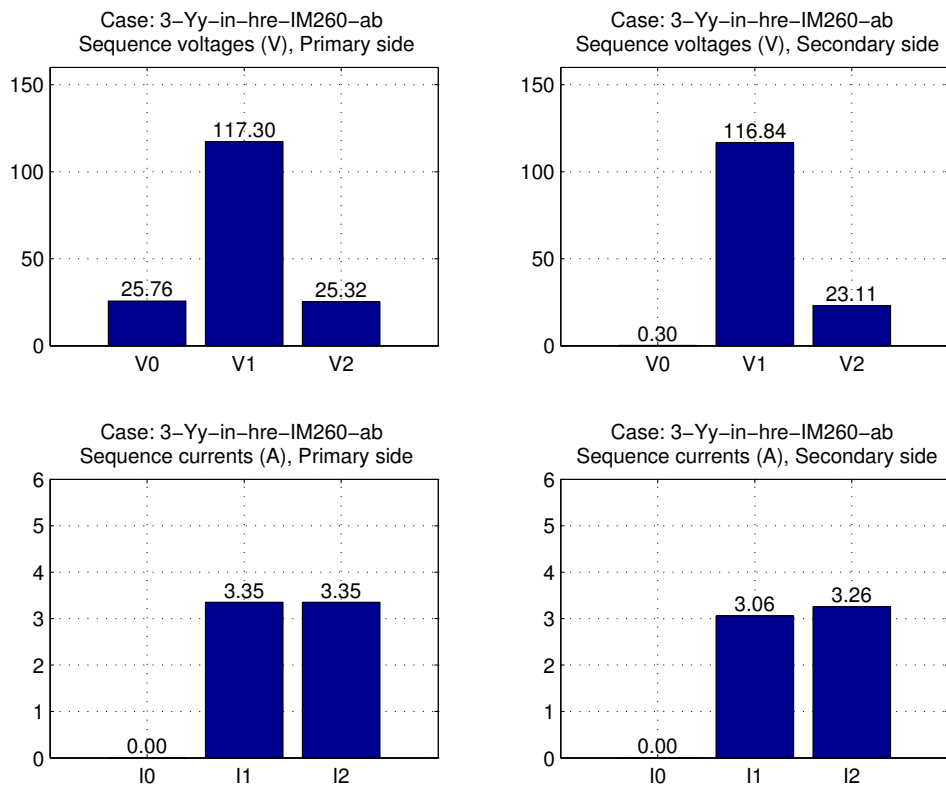
Figur 4.49: Fassungspänningar och fasströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/y-in-hre med resistiv last och en matande fas bortkopplad.



Figur 4.50: Fassungspänningar och fasströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/y-in-hre med asynkronmotorlast och en matande fas bortkopplad.



Figur 4.51: Sekvensspänningar och sekvensströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/y-in-hre med resistiv last och en matande fas bortkopplad.



Figur 4.52: Sekvensspänningar och sekvensströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/y-in-hre med asynkronmotorlast och en matande fas bortkopplad.

4.3.5.2 Två faser bortkopplade

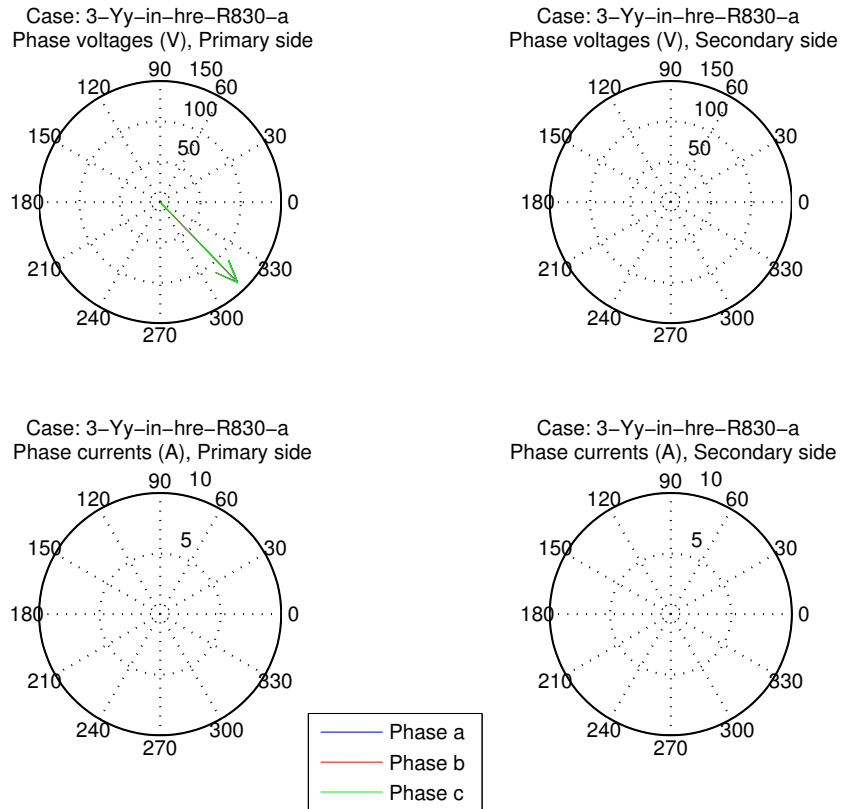
Resistiv last

Eftersom transformatorns primärsida har isolerad nollpunkt kan ingen ström dras med enbart en fas inkopplad. Alla faser på primärsidan antar alltså samma potential och ingenting transformeras till sekundärsidan, se figur 4.53.

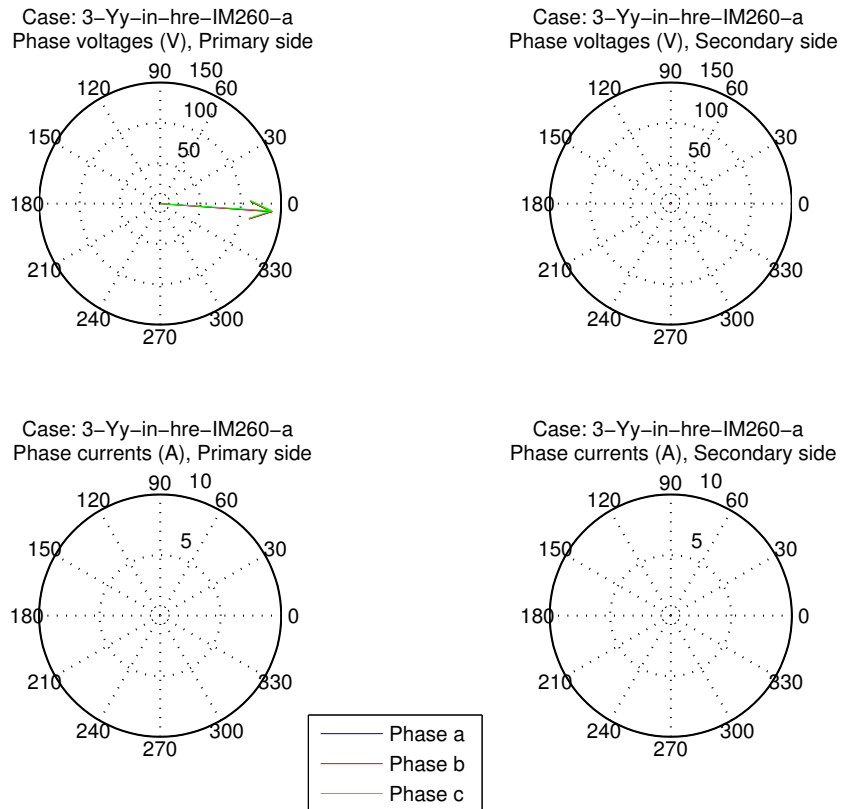
Fenomenet syns tydligt på sekvensstorheterna för felfallet, där det endast finns en nollföljdsspänning lika stor som fasspänningen i den inkopplade fasen, och ingenting annat. Se figur 4.55

Asynkronmotorlast

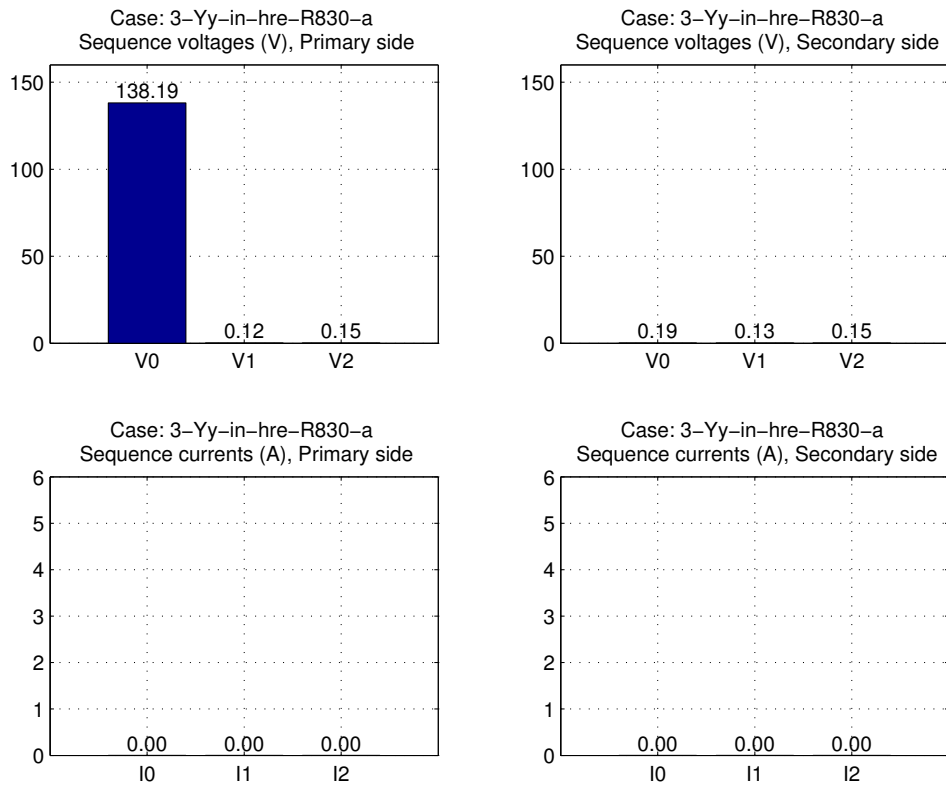
Eftersom ingenting transformeras till sekundärsidan blir resultatet detsamma med asynkronmotorlast som för rent resistiv last. Se figur 4.54 och 4.56.



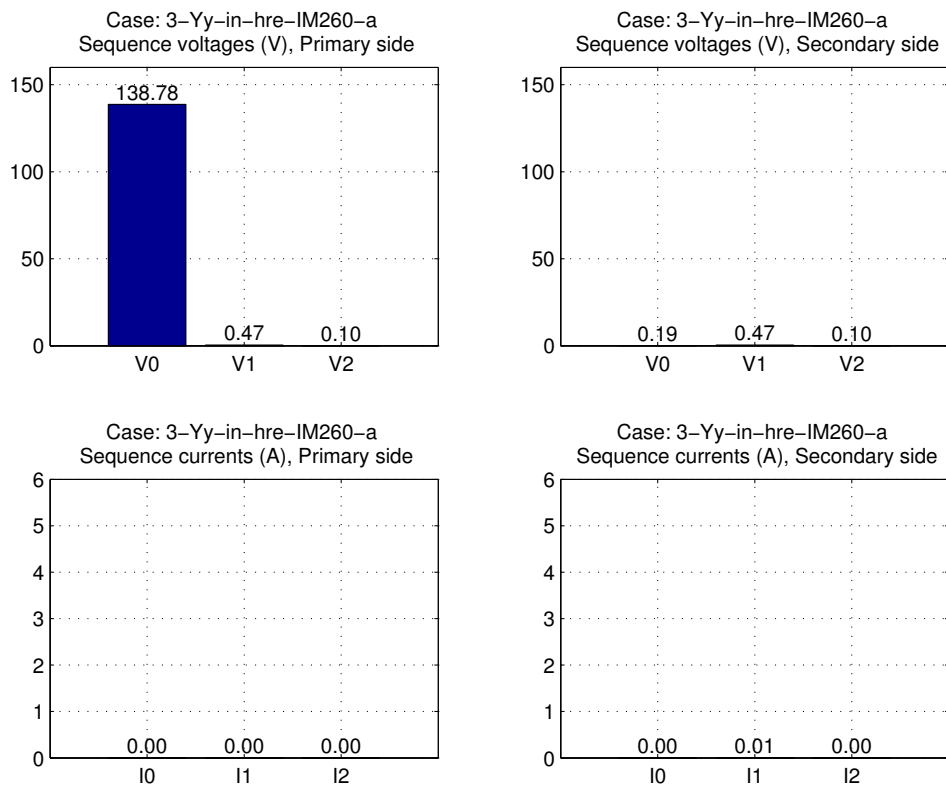
Figur 4.53: Fasspänningar och fasströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/y-in-hre med resistiv last och två matande faser bortkopplade.



Figur 4.54: Fasspänningar och fasströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/y-in-hre med asynkronmotorlast och två matande faser bortkopplade.



Figur 4.55: Sekvensspänningar och sekvensströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/y-in-hre med resistiv last och två matande faser bortkopplade.



Figur 4.56: Sekvensspänningar och sekvensströmmar för fallet med en trebent transformator kopplad i Y/y-in-hre med asynkronmotorlast och två matande faser bortkopplade.

4.3.6 Fembent trefastransformator Yd-de

De mätuppställningar som används kan ses i figur 4.57 (resistiv last) och figur 4.58 (asynkronmotorlast). Som spänningsreferens visas i figur 4.59 fasspänningarna för mätuppställningen med alla matande faser inkopplade och resistiv last.

4.3.6.1 En fas bortkopplad

Resistiv last

Den bortkopplade fasen spänningssätts på både primärsidan och sekundärsidan till i princip samma amplitud som tidigare och med bibehållen fasvinkel. Se figur 4.60.

Eftersom lasten är rent resistiv följer strömmarna spänningarna och ligger alltså kvar som tidigare på sekundärsidan.

Sekvensspänningarna består i princip endast av en plusföljdskomponent (se figur 4.62), och det är alltså svårt att detektera felet på dessa.

På primärsidan har det uppkommit en nollföljdsström som är lika stor som plusföljdsströmmen och därmed enkelt detekterbar medan det på sekundärsidan i princip enbart finns en plusföljdsström.

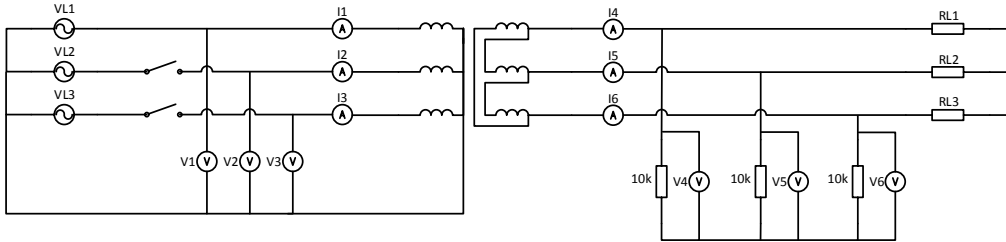
Sammantaget kan felfallet enkelt detekteras på primärsidan med hjälp av nollföljdsströmmen, men svårigen på sekundärsidan.

Asynkronmotorlast

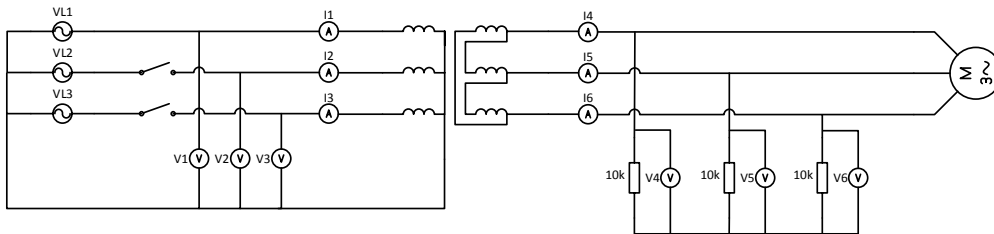
Liksom för fallet med den rent resistiva lasten spänningssätts den bortkopplade fasen i princip ”perfekt”.

Även fasströmmarna uppträder ungefär som vid det resistiva fallet bortsett från deras storlek och den fasvridning som asynkronmotorns induktiva komponent innebär. Som kan ses i figur 4.61 finns det dock en liten storleksskillnad mellan de olika fasströmmarna.

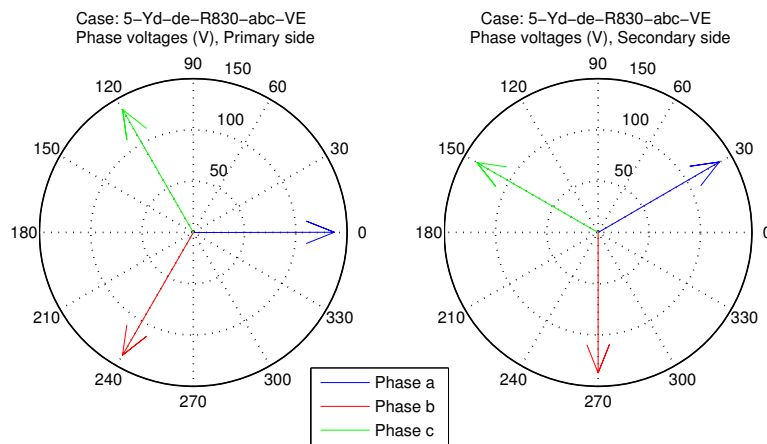
De noll- och minusföljdsspänningar som uppkommer är mycket svaga och förmodligen svåra att detektera. Däremot uppkommer på både primär- och sekundärsidan en minusföljdsström som borde kunna detekteras och på primärsidan uppkommer även en nollföljdsström som är i samma storleksordning som plusföljdsströmmen. Se figur 4.63.



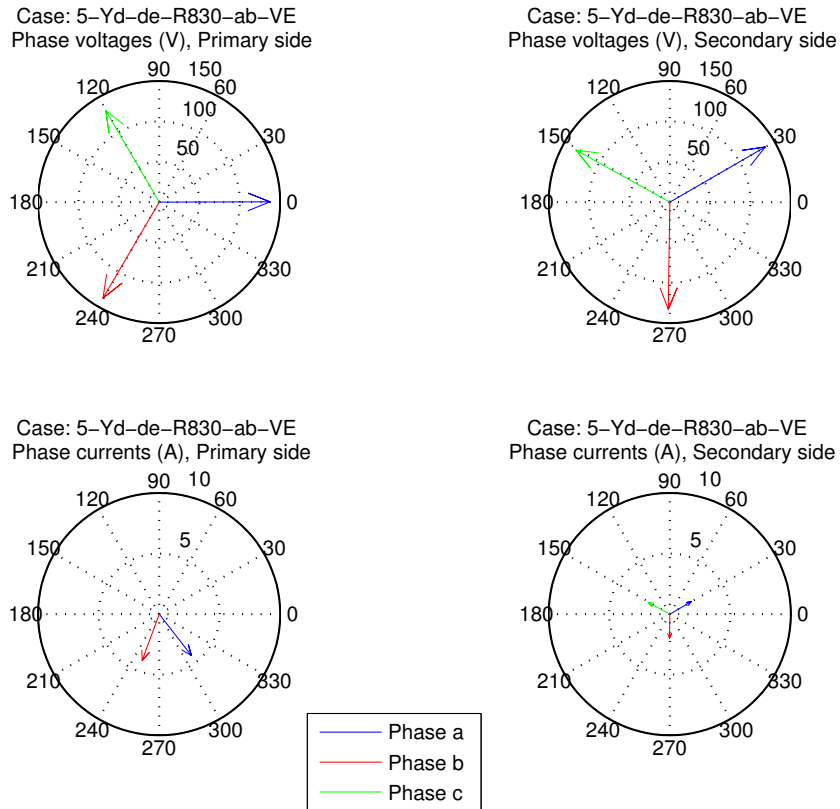
Figur 4.57: Mätupställning för konfigurationen 5-Yd-de med resistiv last.



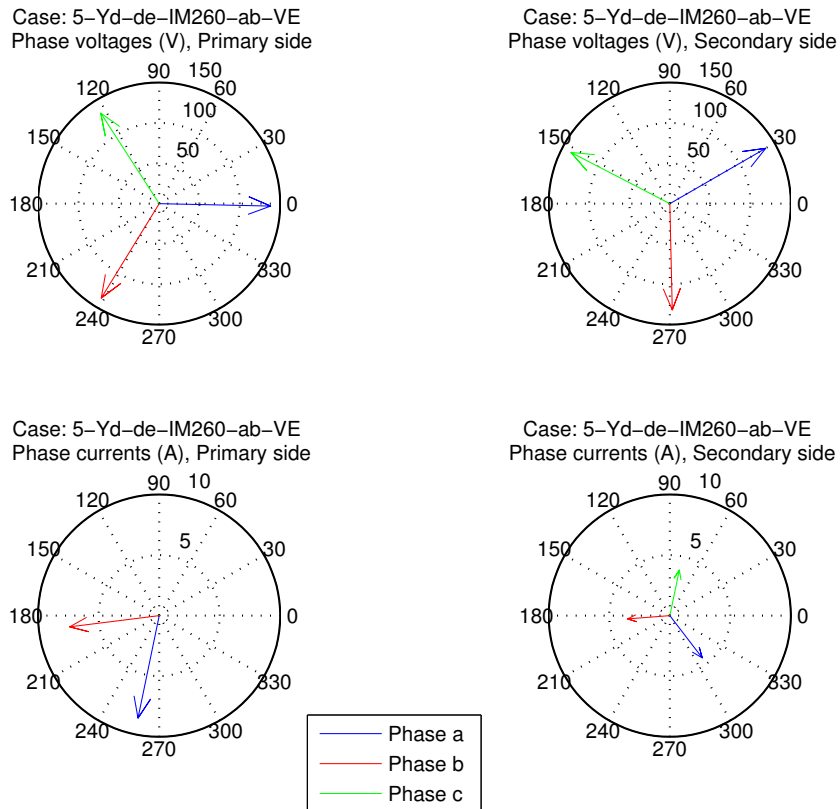
Figur 4.58: Mätupställning för konfigurationen 5-Yd-de med asynkronmotorlast.



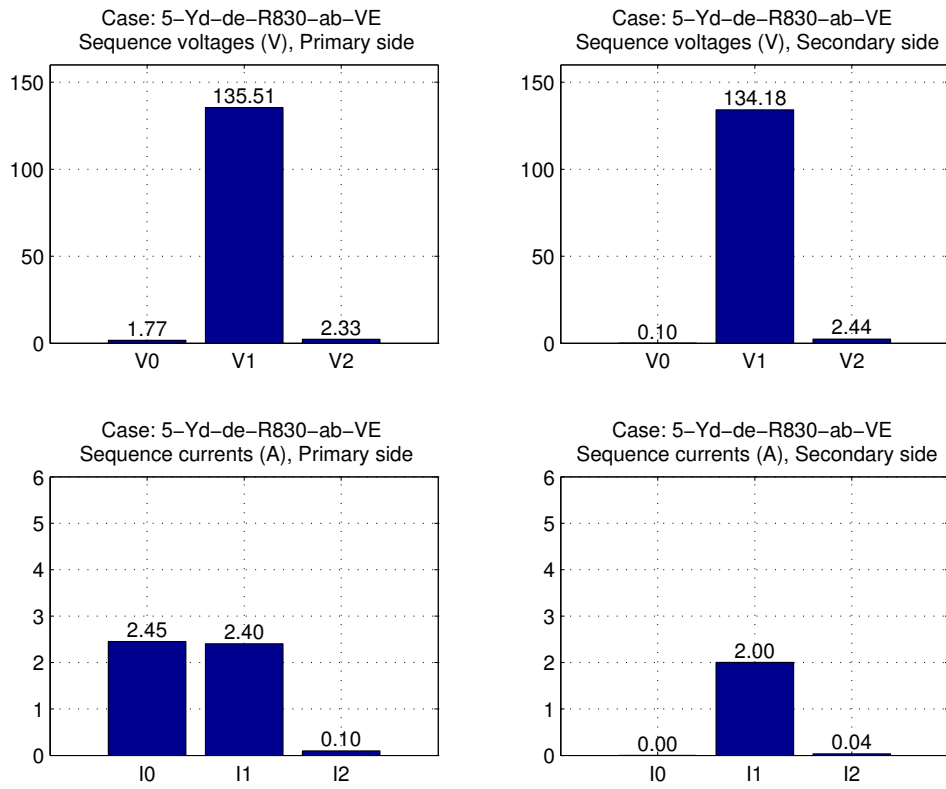
Figur 4.59: Fasspänningar för 5-Yd-de med resistiv last och alla matande faser inkopplade.



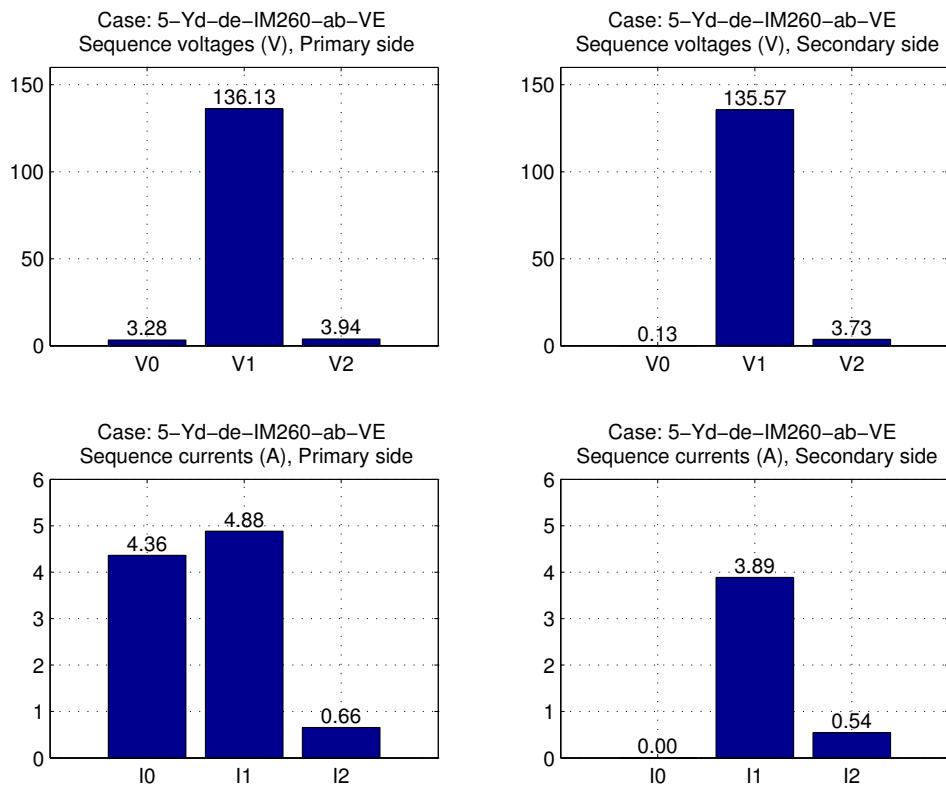
Figur 4.60: Fassungspänningar och fasströmmar för fallet med en fembent transformator kopplad i Y/d-de med resistiv last och en matande fas bortkopplad.



Figur 4.61: Fassungspänningar och fasströmmar för fallet med en fembent transformator kopplad i Y/d-de med asynkronmotorlast och en matande fas bortkopplad.



Figur 4.62: Sekvensspänningar och sekvensströmmar för fallet med en fembent transformator kopplad i Y/d-de med resistiv last och en matande fas bortkopplad.



Figur 4.63: Sekvensspänningar och sekvensströmmar för fallet med en fembent transformator kopplad i Y/d-de med asynkronmotorlast och en matande fas bortkopplad.

4.3.6.2 Två faser bortkopplade

Resistiv last

De bortkopplade faserna b och c spänningssätts på primärsidan till halva den inkopplade fasens amplitud och med en vinkel som ligger 180° från denna. På sekundärsidan är på grund av deltakopplingen endast fas a och c spänningssatta, båda med samma amplitud och 180° från varandra. Se figur 4.64.

Fasströmmarna på sekundärsidan följer på grund av den rent resistiva lasten motsvarande fasspänningar och på primärsidan dras naturligt enbart en ström i fas a eftersom de andra är urkopplade.

På både primär- och sekundärsidan sjunker plusföljdsspänningen till hälften av sitt tidigare värde samtidigt som en minusföljdsspänning i samma storleksordning som plusföljdsspänningen uppkommer. Se figur 4.66.

Samma fenomen gäller sekvensströmmarna, med tillägget att det dessutom dras en nollföljdsström på primärsidan lika stor som plus- och minusföljdsströmmen eftersom belastningen på nätet är rent enfasig.

Felfallet kan alltså enkelt detekteras på såväl transformatorns primärsida som sekundärsida.

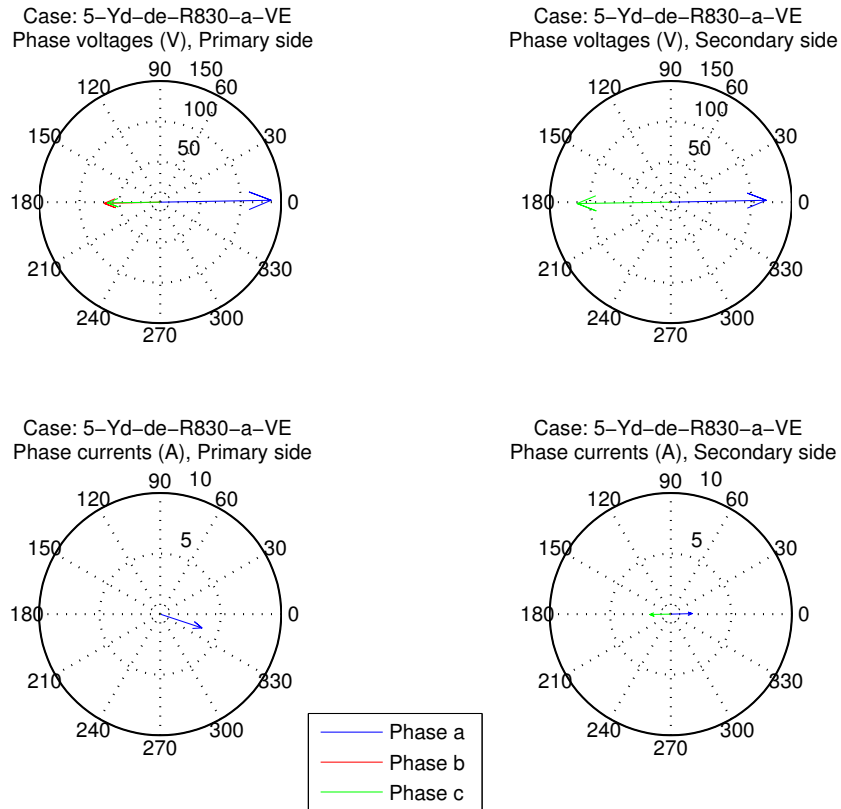
Asynkronmotorlast

Till skillnad från då transformatorns lastades rent resistivt fås nu mer "tre-fasliknande" fasspänningar på både primärsidan och sekundärsidan som ligger ungefär 120° ifrån varandra om än inte perfekt, och med en liknande amplitud. Se figur 4.65.

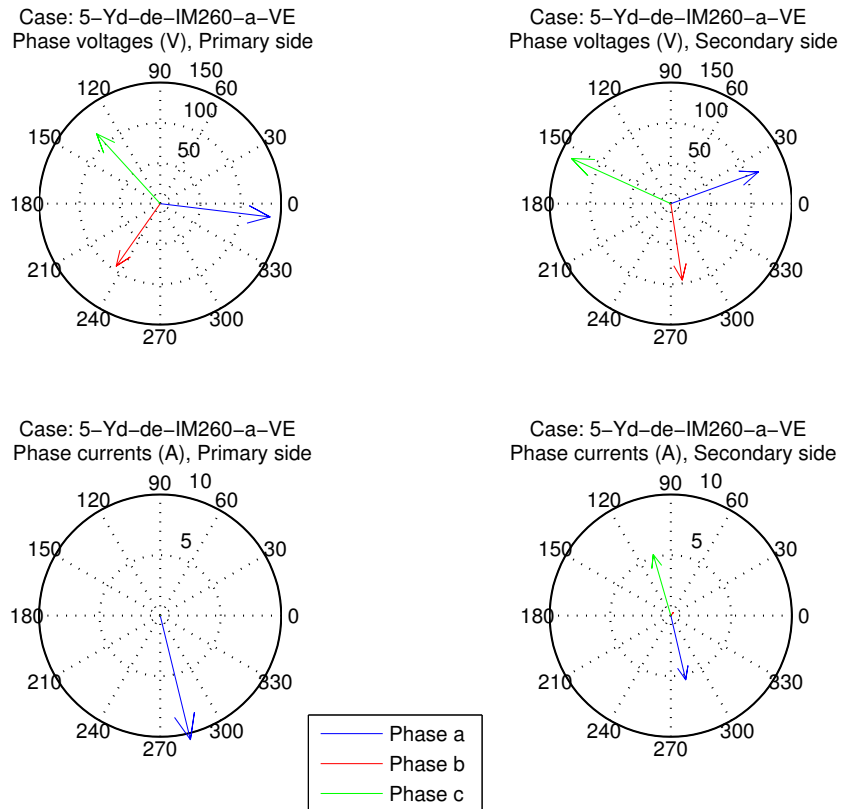
Fasströmmarna är fortfarande lika fallet med rent resistiv last bortsett från amplituden och den naturliga fasvridning som uppkommer på grund av motorlastens induktiva komponent.

Plusföljdsspänningen på både primär- och sekundärsidan är betydligt högre än för fallet med rent resistiv last, men ligger fortfarande klart under sitt ursprungliga värde (se figur 4.67). Även här uppkommer en detekterbar minusföljdsspänning på transformatorns bägge sidor, även om den till skillnad från fallet med resistiv last är betydligt lägre än plusföljdsspänningen.

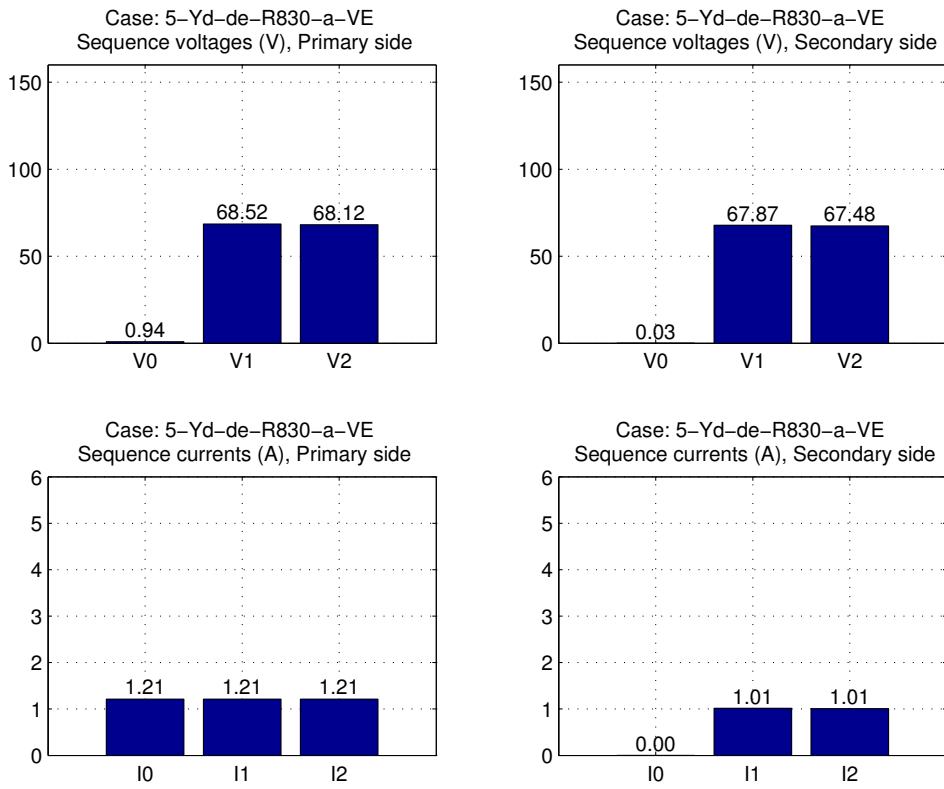
På transformatorns sekundärsida är nu minusföljdsströmmen större än plusföljdsströmmen och på primärsidan dras, precis som för fallet med rent resistiv last, lika stora nollföljds-, plusföljds- och minusföljdsströmmar. Felströmmarna kan alltså enkelt detekteras på antingen primär- eller sekundärsidan av transformatorn.



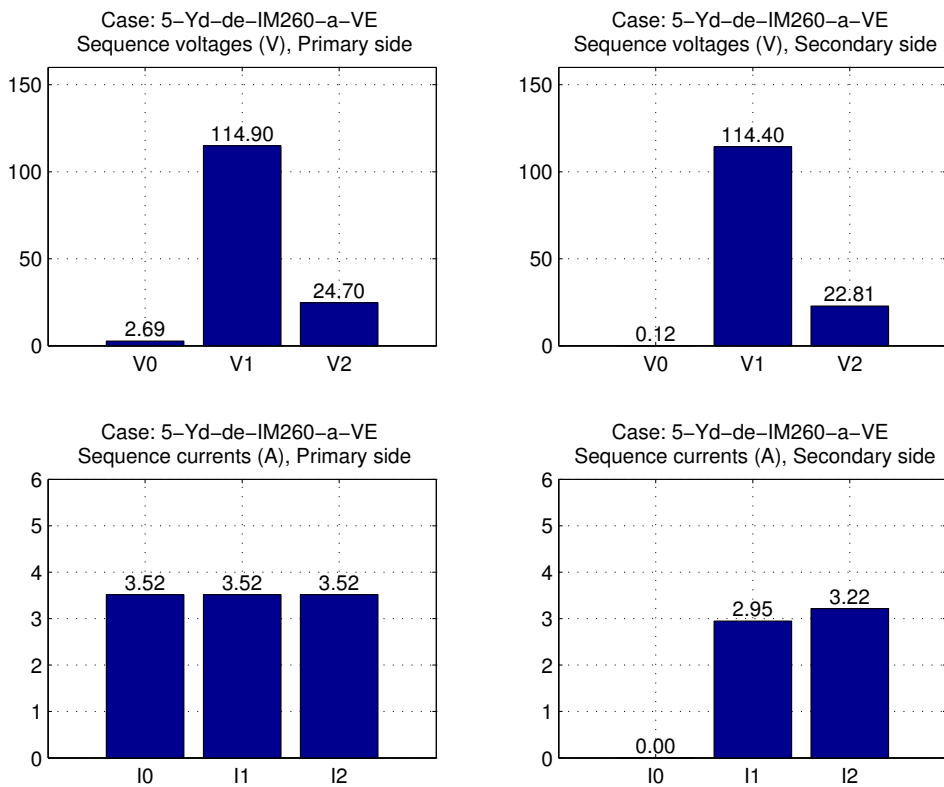
Figur 4.64: Fassungspänningar och fasströmmar för fallet med en fembent transformator kopplad i Y/d-de med resistiv last och två matande faser bortkopplade.



Figur 4.65: Fassungspänningar och fasströmmar för fallet med en fembent transformator kopplad i Y/d-de med asynkronmotorlast och två matande faser bortkopplade.



Figur 4.66: Sekvensspänningar och sekvensströmmar för fallet med en fembent transformator kopplad i Y/d-de med resistiv last och två matande faser bortkopplade.



Figur 4.67: Sekvensspänningar och sekvensströmmar för fallet med en fembent transformator kopplad i Y/d-de med asynkronmotorlast och två matande faser bortkopplade.

4.4 Transientmätningar

Mätning av själva urkopplingsförloppet har utförts på den trebenta transformatorn kopplad i Y/Δ och resultaten redovisas i nedanstående avsnitt. Det bör noteras att den kontaktor som användes vid urkopplingen inte kunde styras tillräckligt noggrant för att bryta strömmen på samma position i perioden vid varje mätning. Urkopplingen sker därför mellan 20 och 40 ms i figurerna (den exakta tidpunkten framgår tydligt av primärsidans fasströmmar; strömmen i den brutna fasen går ju till noll direkt vid bryttillfället).

4.4.1 Trebent trefastransformator Yd-de

4.4.1.1 En fas bortkopplad

Resistiv last

Transientförloppet där en fas kopplas bort kan ses i figur 4.68. Notera den snabba övergången, det enda som skvallrar om att något hänt är fasströmmarna på primärsidan där fasströmmarna i de faser som fortfarande är inkopplade ökar kraftigt när den urkopplade fasens ström går till noll. Någon direkt insvängningsförlopp kan dock inte urskiljas, omställningen sker i princip direkt efter avbrottstillfället.

Asynkronmotorlast

Resultatet vid asynkronmotorlast (figur 4.69) blir snarlikt fallet med resistiv last. Övergången är fortfarande i princip omedelbar, med det enda undantaget att strömmarna i de återstående faserna på primärsidan har en något lägre amplitud i den första perioden efter avbrottet än i de efterföljande.

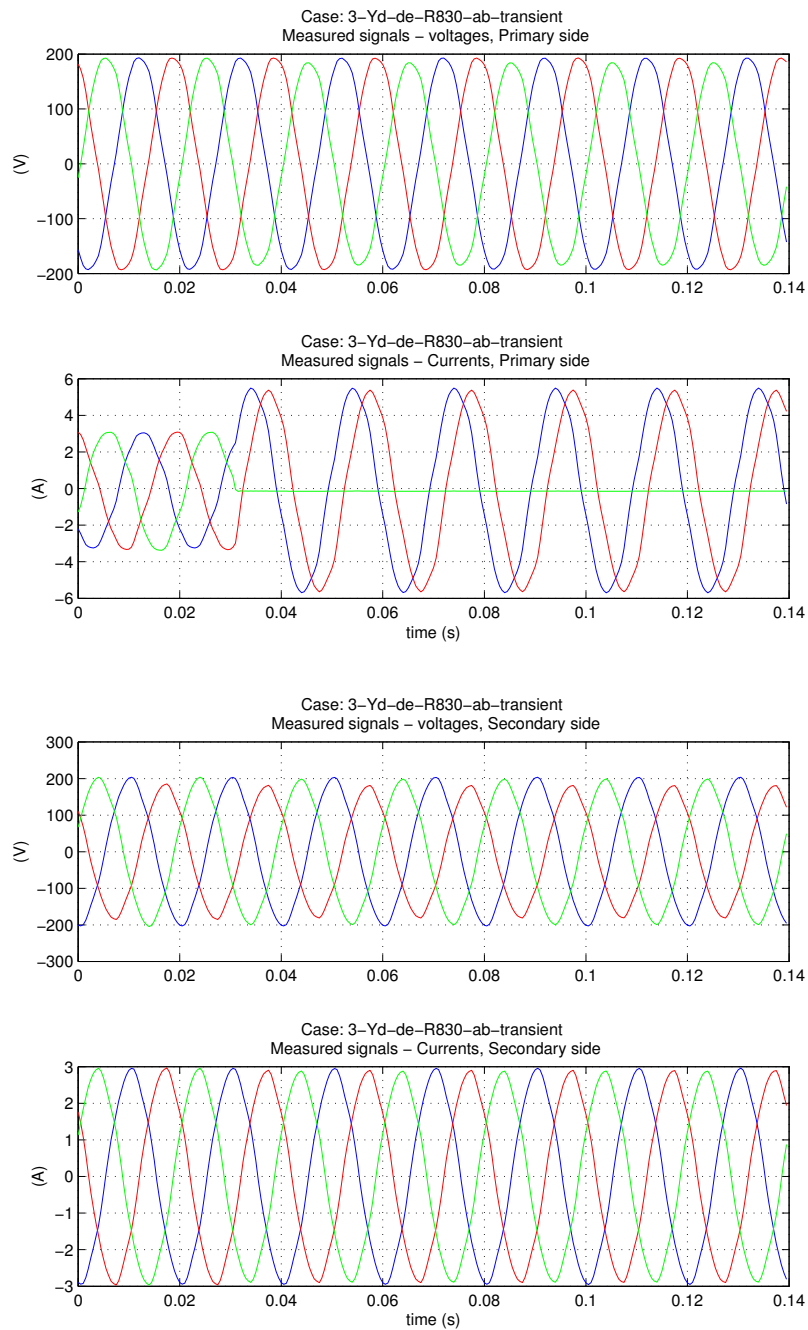
4.4.1.2 Två faser bortkopplade

Resistiv last

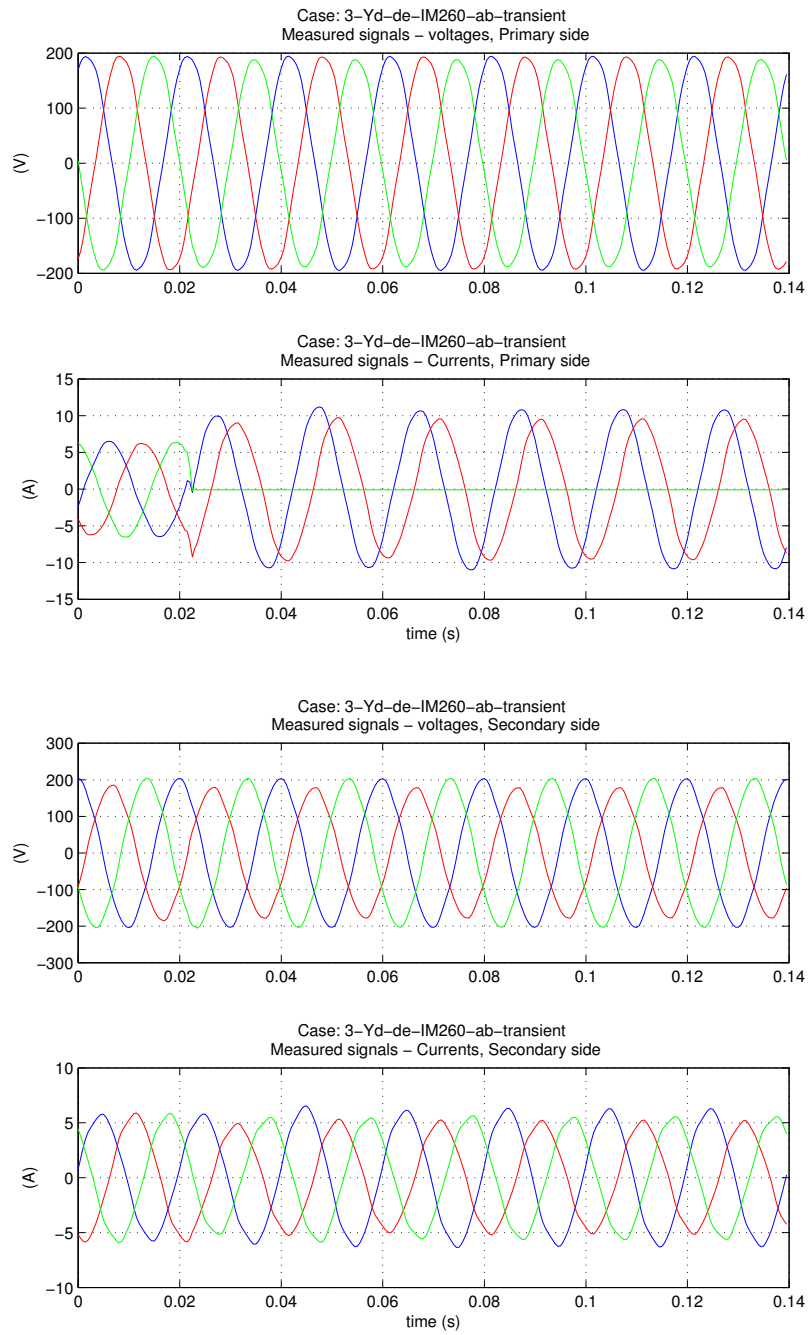
I stationäritet skiljer sig både spänningar och strömmar kraftigt från det symmetriska fallet, men själva transientförloppet är fortfarande mycket snabbt, i princip sker omställningen omedelbart. Se figur 4.70.

Asynkronmotorlast

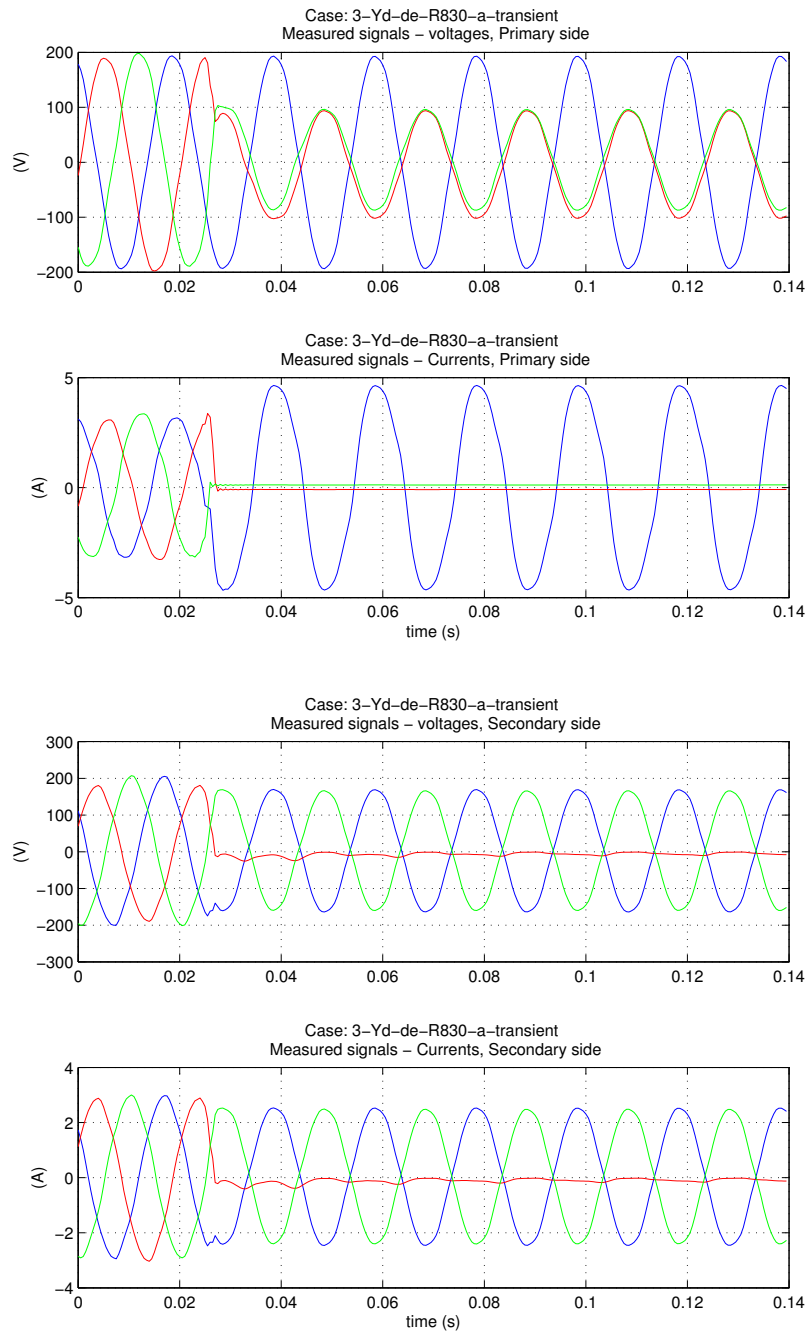
Liksom i de tidigare fallen går omställningen mycket snabbt (se figur 4.71). Däremot syns (liksom i fallet där en fas kopplades bort) att den återstående fasens ström på primärsidan av transformatorn tar ungefär en period på sig innan den når full amplitud.



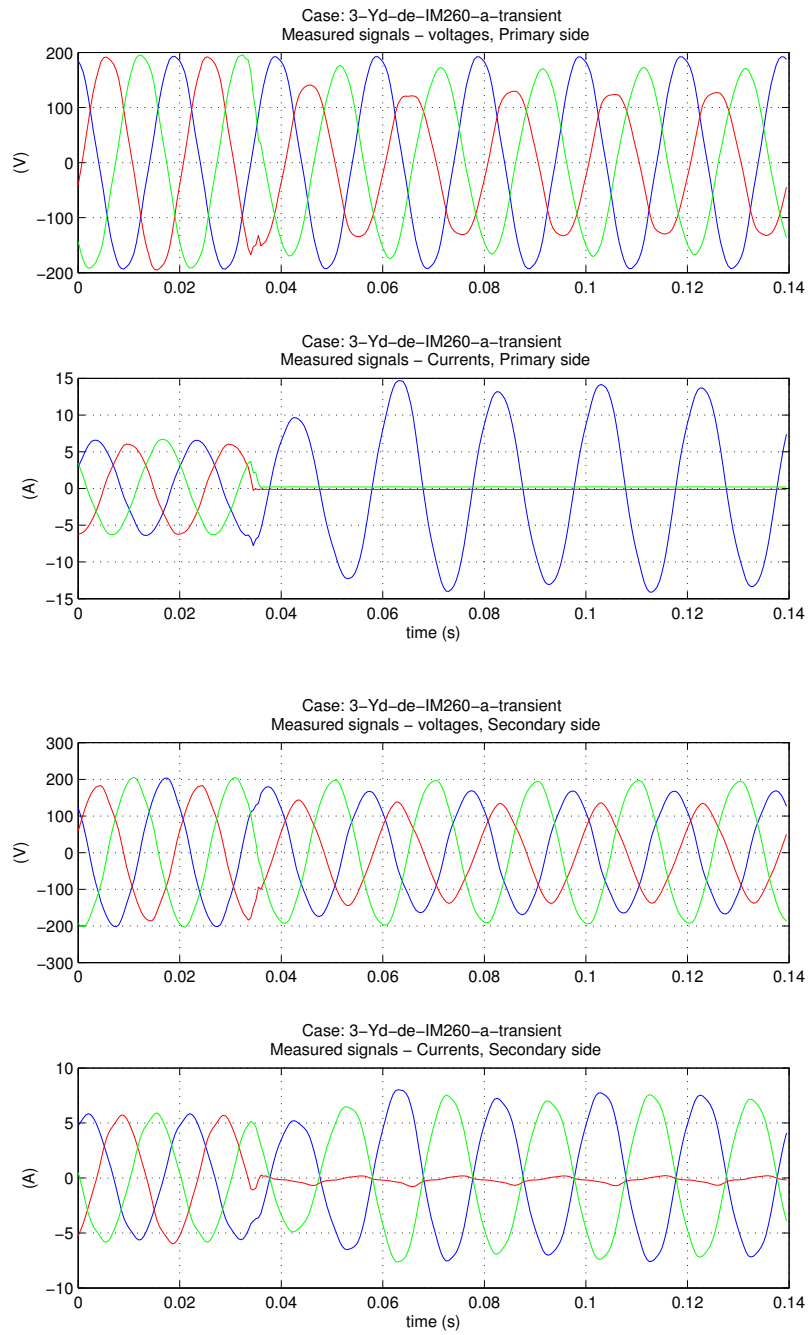
Figur 4.68: Transientförlopp vid bortfall av en fas med rent resistiv last.



Figur 4.69: Transientförlopp vid bortfall av en fas med asynkronmotorlast.



Figur 4.70: Transientförlopp vid bortfall av två faser med rent resistiv last.



Figur 4.71: Transientförlopp vid bortfall av två faser med asynkronmotorlast.

5 Diskussion

5.1 Jämförelser mellan kopplingsarter

Följande jämförelse gäller kopplingarna nedan för den trebenta trefastransformatorn:

- Yd-de
- Dy-hre
- Yy-de-hre
- Yy-in-hre

Dessa fall går att dela upp i två par där paren inbördes svarar väldigt lika på bortkoppling av en eller två matande faser. Det ena paret är Yd-de och Yy-de-hre, medan det andra paret utgörs av de andra två kopplingarna, Dy-hre och Yy-in-hre.

5.1.1 Yd-de & Yy-de-hre

Med en matande fas bortkopplad spänningssätts denna fas väl för dessa kopplingsarter med både rent resistiv last och asynkronmotorlast. Det tycks som att strömmarna fördelas något mer osymmetriskt mellan faserna för Yy-de-hre-kopplingen på sekundärsidan med asynkronmotorlast. I övrigt skulle det vara svårt att skilja dessa kopplingar åt utifrån fasspänningar eller fasströmmar. Även sekvensspänningarna och sekvensströmmarna är i princip identiska för de två kopplingarna.

När två matande faser kopplats bort skiljer sig kopplingsarterna åt något mer. Med rent resistiv last har fas b och c hälften så stor amplitud som fas a på sekundärsidan för både spänning och ström för kopplingen Yy-de-hre. För den andra kopplingen, Yd-de, är amplituden istället lika stor för fas a och fas c medan fas b har amplitud 0 (för både spänning och ström). Samma förhållande gäller för de olika kopplingarna med asynkronmotorlast, med skillnaden att de båda spänningssätts relativt väl för alla faser på sekundärsidan. Sekvensspänningarna och sekvensströmmarna blir mycket lika för de två kopplingarna.

5.1.2 Dy-hre & Yy-in-hre

Med en matande fas bortkopplad och resistiv last spänningssätts detta par av kopplingsarter inte lika väl som det andra paret. Primärt får fas c endast hälften så stor amplitud som de andra faserna, och sekundärt fås ingen spänning alls i

fas c för kopplingen Yy -in-hre, medan fas b och fas c får hälften så stor spänning som fas a för kopplingen Dy -hre. Samma förhållande gäller för fasströmmarna sekundärt. Med asynkronmotorlast spänningssätts de två kopplingarna relativt väl (och lika), men fasströmmarna fördelas precis som med resistiv last. Sekvensstorheterna blir i princip identiska för de två olika kopplingsarterna med både rent resistiv last och asynkronmotorlast.

När två matande faser kopplas bort går inga strömmar i kretsarna, och följderna blir att alla faser spänningssätts av och ligger i fas med fas a. När det gäller sekvensstorheterna fås endast nollsekvensspänning på primärsidan.

5.2 Jämförelse mellan transformator typer

Utifrån de likheter i mätresultaten som uppvisats mellan de olika kopplingsarterna för trefastransformatoren i avsnitt 5.1 ska det visa sig att det är möjligt att utvidga jämförelsen till att även omfatta konfigurationerna där de två andra transformator typerna används.

De två andra transformator typerna, fembent trefastransformator och tre enfasenheter, har båda testats med Y/d som kopplingsart. Därför kan det vara lämpligt att jämföra dessa var för sig med den trebenta trefastransformatoren med just Y/d -koppling.

5.2.1 3-Yd-de & 5-Yd-de

Det enda som skiljer transformator konfigurationerna 3-Yd-de och 5-Yd-de är att den ena baseras på en trebent transformator, medan den andra baseras på en fembent transformator. I båda konfigurationerna är neutralpunkten direktjordad.

Likheten i konfiguration återspeglar sig i mätresultaten, och vid en jämförelse mellan fasstorheterna för både resistiv last (figur 4.16 och 4.60) och asynkronmotorlast (figur 4.17 och 4.61) med en matande fas bortkopplad ses en slående likhet för alla storheter. Denna likhet återspeglar sig även vid jämförelse mellan sekvensstorheterna för resistiv last (figur 4.18 och 4.62) och asynkronmotorlast (figur 4.19 och 4.63), där skillnaderna är högst marginella.

På samma sätt finns endast marginella skillnader mellan den trebenta och den fembenta transformatorn med två matande faser bortkopplade, vilket precis som innan tydligt ses vid en jämförelse av fasstorheterna för fallen med resistiv last (figur 4.20 och 4.64) och asynkronmotorlast (figur 4.21 och 4.65). Självfallet återspeglar sig de lika resultaten även för sekvensstorheterna, återigen dels för rent resistiv last (figur 4.22 och 4.66) och dels för asynkronmotorlast (figur 4.23 och 4.67).

Den stora likheten mellan dessa två konfigurationer tyder på att skillnaden i kärnkonstruktion dem emellan endast har en marginell inverkan på deras beteende vid bortfall av en eller två matande faser.

5.2.2 3-Yd-de & 1-Yd-lre

Skillnaderna mellan konfigurationerna 3-Yd-de och 1-Yd-lre är att medan den första är baserad på en trebent trefastransformator med direktjordad neutral-

punkt, är den andra uppbyggd av tre enfastransformatorer och har neutralpunkten kopplad via ett lågresistivt motstånd till jord.

Det visar sig att mätresultaten för de två konfigurationerna blir mycket lika trots ovan nämnda skillnader. Fasstorheterna skiljer sig till att börja med mycket lite åt med en matande fas urkopplad, vilket ses vid jämförelser av både fallen med resistiv last (figur 4.16 och 4.5) och asynkronmotorlast (figur 4.17 och 4.6). Likheter återfinns även för sekvensstorheterna för resistiv last (figur 4.18 och 4.7) och asynkronmotorlast (figur 4.19 och 4.8). Den skillnad som eventuellt kan vara värd att notera för fallet med asynkronmotorlast är en något större minusföljdsström på både primär- och sekundärsida för konfigurationen med tre enfasenheter.

Likheter mellan resultaten för de två konfigurationerna fortsätter för fallen med två matande faser urkopplade. Fasstorheterna uppvisar återigen mycket stora likheter för både resistiv last (figur 4.20 och 4.9) och asynkronmotorlast (figur 4.21 och 4.10), vilket så klart visar sig även för sekvensstorheterna. Jämförelsen görs återigen för resistiv last (figur 4.22 och 4.11) och asynkronmotorlast (figur 4.23 och 4.12) var för sig.

Skillnaderna mellan den trebenta trefastransformatorn med direktjordning och konfigurationen med tre enfasenheter och lågresistiv jordning, båda Y/d-kopplade, tycks sammantaget vara i stort sett försumbara både med en och två matande faser bortkopplade.

5.3 Gruppering av transformatorkonfigurationer

Som en följd av de jämförelser som gjorts mellan de testade transformatorkonfigurationerna i avsnitt 5.1 och avsnitt 5.2, visar det sig vara möjligt att dela in de olika konfigurationerna i två grupper baserat på deras beteende vid fasbortfall. För tydlighets skull tilldelas dessa grupper namnen *grupp 1* och *grupp 2*, och indelningen blir:

Grupp 1

- 1-Yd-lre
- 3-Yd-de
- 5-Yd-de
- 3-Yy-de-hre

Grupp 2

- 3-Dy-hre
- 3-Yy-in-hre

Vilka transformatorer konfigurationerna ovan är tänkta att motsvara visas tydligare i tabell 5.1.

5.3.1 Gruppernas karaktäristik

Det som huvudsakligen skiljer grupp 1 från grupp 2 är att det för konfigurationerna i grupp 1 kan gå en ström i nolledaren på primärsidan, medan så ej

Grupp 1

<i>Transformator</i>	<i>Kopplingsart</i>	<i>Kärnkonstruktion</i>	<i>Jordningsart</i>
Aggregattransformator O1, T1	Y/ Δ	Fembent	Direktjordad
Aggregattransformator O2, T2	Y/ Δ	Trebent	Direktjordad
Aggregattransformator O3, T3	Y/ Δ	3 x Enfasenheter	Nollpunktsmotstånd
Starttransformator O1, T12	Y/y	Trebent	Direktjordad / Nollpunktsmotstånd
Starttransformator O3, T32	Y/y	Trebent	Direktjordad / Nollpunktsmotstånd

Grupp 2

<i>Transformator</i>	<i>Kopplingsart</i>	<i>Kärnkonstruktion</i>	<i>Jordningsart</i>
Stationstransformator O1, T11	Δ /y	Trebent	Nollpunktsmotstånd
Stationstransformator O2, T21	Δ /y	Trebent	Nollpunktsmotstånd
Stationstransformator O3, T31/T33	Δ /y	Trebent	Nollpunktsmotstånd
Starttransformator O2, T22	Y/y	Trebent	Isolerad nollpunkt / Nollpunktsmotstånd

Tabell 5.1: Gruppindelning av transformatorer baserat på mätresultat.

är fallet för konfigurationerna i grupp 2. Ur ett sekvensperspektiv kan detta ses som att det inte går någon nollföljdsström till/från transformatorns primärsida vid osymmetrisk matning. I följande avsnitt diskuteras hur mätresultaten blir för respektive grupp.

5.3.1.1 Grupp 1

För att sammanfatta de egenskaper som uppvisas vid bortfall av en matande fas för konfigurationerna i grupp 1 kan sägas att de spänningssätts med god symmetri för både rent resistiv last och asynkronmotorlast. Ur detekteringssynpunkt innebär detta att den enda storhet som antyder att ett fasbortfall ägt rum är nollföljdsströmmen på transformatorns primärsida. Det är viktigt att notera att förhållandet mellan nollföljdsströmmen och plusföljdsströmmen kommer att skilja beroende på storleksförhållandet mellan lasteffekt och märkeffekt hos den aktuella transformatorn.

Med två matande faser bortkopplade fås med resistiv last tydlig osymmetri i både spänning och ström på både primär- och sekundärsida. Här visar det sig att lasttypen har en viktig inverkan, för med asynkronmotorlast uppvisar motsvarande konfigurationer god spänningssättning med tydlig symmetri.

Vilka storheter som kan användas för att detektera detta bortfall av två matande faser skiljer således beroende på vilken sorts last som är ansluten. Asynkronmotorlasten gör fasbortfallet svårare att detektera, men alla storheter som kan användas för att detektera bortfallet i detta fall går även att använda i fallet med rent resistiv last. Lämpliga storheter för detektering är minusföljds-

strömmen på transformatorns primär- eller sekundärsida, och eventuellt minusföljdsspänningen på primär- eller sekundärsida. Det är möjligt att en asynkronmotorlast med andra parametrar än den som används i aktuell mätuppställning skulle kunna medföra lägre minusföljdsspänning, vilket i så fall skulle omöjliggöra detektering utifrån denna storhet.

5.3.1.2 Grupp 2

Som konstaterats vid tidigare genomgång av transformatornkonfigurationerna i grupp 2 har lasttypen stor inverkan på följderna av att en matande fas kopplas bort. Med rent resistiv last fås stor osymmetri för både spänning och ström, medan relativt god spänningssymmetri fås med asynkronmotorlast.

Det är återigen fallet med asynkronmotorlast som ger snävast svängrum vad gäller detekteringsmöjligheter. Den säkraste detekteringsmöjligheten tycks ges av minusföljdsströmmen på primär- eller sekundärsidan, och eventuellt kan även minusföljdsspänningen på primär- eller sekundärsida användas. För minusföljdsspänningen är det återigen viktigt att notera att asynkronmotorns parametrar sannolikt kan avgöra om denna storhet går att använda för detektering eller ej.

Då två matande faser kopplats bort bryter spänningen samman på sekundärsidan för konfigurationerna i grupp 2 för både resistiv last och asynkronmotorlast, och följaktligen går inte heller några strömmar på primär- eller sekundärsidan. Den enda sekvensstorheten som fås är nollföljdsspänning på primärsidan, vilken skulle kunna användas för detektering av detta fasbortfall. Ett annat alternativ torde vara att helt sonika mäta fasspänningen på transformatorns sekundärsida.

5.4 Jämförelse med simuleringsresultat

I följande avsnitt görs korta jämförelser med resultatet av tidigare genomförda simuleringar av fasbortfall för uppställningar liknande den som använts för detta arbete.

5.4.1 ”Bortfall av en eller två faser på uppspänningssidan av aggregattransformatorn”

De simuleringar som utförts i Lindahl och Svensson (2013) omfattar den kopplingsart som återfinns hos aggregattransformatorerna (T1, T2 och T3) vid Oskarshamnsverket, Y/d-koppling. Resonemang förs också kring enfasig matning av starttransformatorerna (T22, T12 och T32), vilka är Y/y-kopplade. T22 skiljer sig från T12 och T32 genom att ha isolerad nollpunkt på primärsidan, medan de andra två istället är direktjordade. Simuleringarna görs endast med rent resistiv last.

Några slutsatser som dras i rapporten är i korthet att det endast blir små osymmetrier vid tvåfasig matning av aggregattransformatorerna, medan enfasig matning av desamma resulterar i stora osymmetrier. Man understryker dock att det är troligt att andelen asynkronmotorlast kan påverka resultatet vid enfasig matning. Dessa påståenden styrks av de mätningar som gjorts för motsvarande uppställning till denna rapport, och värt att notera är att det för mätningarna syntes en tydlig skillnad mellan rent resistiv last och asynkronmotorlast.

I rapporten konstateras vidare att tvåfasig matning av starttransformator T22 ger betydande osymmetri med resistiv last. Även för detta fall understryks att asynkronmotorlast kan inverka på resultatet. För enfasig matning konstateras att spänningen kommer att bryta ihop på sekundärsidan. Återigen överensstämmer dessa slutsatser med vad som setts vid mätningar för motsvarande uppställning.

För enfasig matning av starttransformatorerna T12 och T32 konstateras att god symmetri för strömmar och spänningar bibehålls på sekundärsidan för respektive transformator. Vid enfasig matning fås däremot en betydande andel osymmetri för spänning och ström, men återigen ges kommentaren att andelen asynkronmotorlast påverkar strömmar och spänningar. Även i detta fall stämmer den karaktäristik som konstateras för fasbortfall i rapporten överens med de mätresultat här erhållits för motsvarande konfiguration.

5.4.2 "Initial Studies of Open Phase Detection at Oskarshamn NPP"

I presentationen av Jönsson m.fl. (2014) ges en sammanställning av simuleringresultat för bortfall av en eller två matande faser för aggregattransformator T3 vid Oskarshamnverket. De simuleringar som är jämförbara med de mätningar som gjorts här är dels med rent resistiv last, dels med asynkronmotor i tomgång. Värt att notera är att simuleringarna inkluderar hjälpkraftsystemet (10 kV) som kopplas till 25 kV-skenan via stationstransformatorerna T31 och T33. Lastobjekten är anslutna på 10 kV-sidan. Det som är meningsfullt att jämföra mellan simuleringarna och mätningarna är inte i första hand de exakta värdena, utan snarare vilka fenomen som uppvisas.

Med en matande fas bortkopplad på uppspänningssidan av T3 visar simuleringarna att fasspänningarna bibehålls väl med både resistiv last och asynkronmotorlast i tomgång. Följaktligen fås i princip enbart plusföljdsspänning. Den osymmetriska matningen framträder dock för sekvensströmmarna på transformatorns primärsida, där en nollföljdsström av samma storleksordning som plusföljdsströmmen kan ses. Allt detta överensstämmer väl med vad som kan ses i mätningarna som här utförts med motsvarande mätuppställning (1-Yd-lre).

Då två matande faser kopplas bort skiljer sig resultatet av simuleringarna åt beroende på lasttyp. Med resistiv last halveras spänningen i fas b och c på uppspänningssidan, medan endast fas a och c spänningssätts (med något sänkt spänning) på sekundärsidan. Osymmetrin återspeglas för sekvensstorheterna, där plusföljds- och minusföljdsspänningar som motsvarar hälften av plusföljdsspänningen i det symmetriska fallet kan ses både primärt och sekundärt. På primärsidan är alla tre sekvensströmmar av samma storleksordning, hälften av plusföljdsströmmen i det symmetriska fallet. På sekundärsidan ses samma sak, med skillnaden att ingen nollföljdsström förekommer. Mätningarna som utförts för motsvarande uppställning uppvisar samma effekter som ses i resultatet av denna simulering.

När asynkronmotorlast i tomgång istället används uppvisar simuleringarna relativt god spänningssättning för alla faser på både primär- och sekundärsida. Detta gör att plusföljdsspänningen dominerar, och endast en svag minusföljdsspänning ses (plusföljd cirka 19 gånger större än minusföljd). Här finns en viss skillnad mot vad som ges av laboratoriemätningarna, där plusföljdsspänningen är cirka 4,5 gånger större än minusföljdsspänningen. För strömmarna ger

simuleringarna tydlig osymmetri, vilket visar sig genom att alla tre sekvensströmmar är av samma storleksordning på primärsidan. På sekundärsidan fås i simuleringarna en minusföljdsström som är ungefär 50% större än plusföljdsströmmen. Samma fenomen ses i mätresultaten från laboratorieuppställningen, med skillnaden att minusföljdsströmmen för denna endast är cirka 16% större än plusföljdsströmmen. Asynkronmotorlastens egenskaper har troligen en viktig inverkan på dessa skillnader.

6 Slutsatser

En välfungerande laboratoriemiljö har åstadkommit, med möjlighet att registrera strömmar och spänningar för alla tre faser på transformatorns primär- och sekundärsida samtidigt. I denna laboratoriemiljö är det möjligt att ansluta olika transformator typer och till dessa olika lasttyper. Vidare är det möjligt att kontrollera antal matande faser, manuellt eller med datorstyrd kontaktor. Sammantaget medger laboratoriemiljön undersökning av hur nedskalade varianter av de transformator konfigurationer som återfinns vid Oskarshamns kärnkraftverk svarar på bortfall av en eller två matande faser antingen med rent resistiv last eller asynkronmotorlast.

Undersökningarna som gjorts tyder på att transformator konfigurationerna lite grovt kan delas in i två grupper, där konfigurationerna i respektive grupp har liknande mätresultat för både resistiv last och asynkronmotorlast. Den första gruppen utgörs av de konfigurationer som ska motsvara transformatorerna T1, T2, T3, T12 och T32. Vid tvåfasig matning uppvisar dessa konfigurationer stor symmetri för både resistiv last och asynkronmotorlast. Vid enfasig matning fås tydlig osymmetri med resistiv last, medan asynkronmotorlast ger god spänningssymmetri.

Den andra gruppen utgörs av de transformator konfigurationer som ska motsvara transformatorerna T11, T21, T31/T32 och T22. Vid tvåfasig matning av dessa konfigurationer fås tydlig osymmetri för både spänning och ström med resistiv last, medan relativt god spänningssymmetri fås med asynkronmotorlast. Vid enfasig matning bryter spänningarna samman på sekundärsidan och inga strömmar fås.

Det är tydligt att lasttypen kan ha en viktig inverkan på hur väl bortkopplade faser spänningssätts, där asynkronmotorlast tycks ge mer symmetrisk spänningssättning än rent resistiv last.

Bortfall av en matande fas för någon av transformatorerna T1, T2, T3, T12 eller T32 kan vara svårt att detektera beroende på laststorlek. Det enda som indikerar fasbortfall för detta fall är att ingen ström går i den bortkopplade faser på primärsidan, vilket ger upphov till en nollföljdsström.

Transientmätningarna som utfördes påvisade att eventuella insvägningsförlopp vid fasbortfall av en eller två faser sker mycket snabbt.

7 Fortsatt arbete

I detta arbete har fokus varit att genomföra mätningar på laboratorietransformatorer för att identifiera vilka fenomen som uppkommer vid fasbortfall. I följande avsnitt listas några områden som kan vara lämpliga att studera för att vidare förstå och hantera dessa fenomen.

7.1 Flödesmätning

Mätning av magnetflöden i olika delar av transformator kärnan kan utföras för att noggrannare ge svar på hur flödet fördelar sig för olika kärntyper vid fasbortfall. På så vis hade eventuell mätnad i någon del av järnkärnan kunnat studeras.

7.2 Osymmetrisk matning av asynkronmotor

Kartläggning och modellering av asynkronmotorns beteende vid osymmetrisk matning behövs för att ordentligt förklara varför de fenomen som ses i mätresultaten förekommer.

7.3 Metoder för detektering

Det är i elkraftsammanhang viktigt att upptäcka när ofrivilliga fasavbrott inträffat. Då mätresultaten indikerar att fasbortfall kan vara svåra att detektera för vissa transformator- och lastkonfigurationer behöver olika metoder för att detektera fasbortfall för de aktuella konfigurationerna utredas.

7.4 Ytterligare transformatorkonfigurationer

Mätningarna har avgränsats till ett urval av de transformatorkonfigurationer som återfinns vid Oskarshamns kärnkraftverk. Det kan vara lämpligt att även undersöka hur fasbortfall påverkar andra transformator typer (såsom sparkopplade transformatorer) och kopplingsarter (till exempel Z-koppling).

8 Referenser

- Anderson, Paul M. *Analysis of Faulted Power Systems*. IEEE Press, 1995.
- Evenson, Orvar. *Kompendium i reläteknik för högspänningsanläggningar - Del 2: Inställning och provning*. Kungliga Vattenfallsstyrelsen, 1961.
- Glover, J. Duncan, Sarma, Mulukutla S., och Overbye, Thomas J. *Power system analysis and design*. Cengage Learning, 5 utgåvan, 2011.
- Heathcote, Martin J. *The J & P Transformer Book*. Newnes, 12 utgåvan, 1998.
- Jönsson, Jonas, Heyman, Fredrik, och Bojrup, Martin. *Initial Studies of Open Phase Detection at Oskarshamn NPP*. OKG, Gothia Power, Januari 2014.
- Lindahl, Sture och Svensson, Bertil. *Rapport OKG AB, Oskarshamn 1, 2 och 3. Bortfall av en eller två faser på uppspänningssidan av aggregattransformatorn*. Gothia Power, 2013.
- Phadke, Arun G. och Thorp, James S. *Computer Relaying for Power Systems*. Research Studies Press Ltd., 1988.

A DFT

Lite förenklat kan sägas att man med fouriertransformen beskriver frekvensinnehållet i en signal som en summa av sinusfunktioner som representerar grundton och eventuella övertoner. Den *diskreta fouriertransformen* (DFT) kan således appliceras på en mätserie med ett begränsat antal mätvärden för att matematiskt beskriva frekvensinnehållet för den funktion som mätserien inhämtats från. En metod för att implementera denna funktionalitet beskrivs i Phadke och Thorp (1988), och man hjälps här av att göra några förenklingar. En sådan är att med hjälp av viss efterbehandling av mätdatan avlägsna eventuell DC-offset. Om signalen som ska transformeras samplas så att det finns ett jämnt antal mätvärden för varje period förenklas uttrycket för den diskreta fouriertransformen ytterligare genom att kunna skrivas på rektangulär form. För ett jämnt antal mätvärden N per period gäller att $\frac{N}{2} - 1$ övertoner kan beräknas, men för den aktuella tillämpningen har valet att endast beräkna grundtonen gjorts och med antagandet att den uppmätta signalen är sinusformad. Grundtonen ges då på komplex form av

$$S = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N s_k e^{-j\theta k}$$

där $\theta = \frac{2\pi}{N}$ och s_k är det aktuella mätvärdet i mätserien.

B Symmetriska komponenter

Analysmetoden med symmetriska komponenter som utvecklades av amerikanen Charles L. Fortescue 1918 och bland annat finns beskriven i Glover m.fl. (2011) lämpar sig väl för analys av obalanserade trefassystem. I korthet innebär metoden att en linjärtransformation görs från trefaskomponenter till det man kallar *symmetriska komponenter*, och fördelen med att göra denna transformation är att de resulterande ekvationerna för ett balanserat system är linjärt oberoende. Detta underlättar i sin tur analys av obalanserade system.

Transformationen från trefaskomponenter till symmetriska komponenter definieras som

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{B.1})$$

där $a = 1/\underline{120}^\circ = e^{j\frac{2\pi}{3}}$. Omvänt gäller att transformationen från symmetriska komponenter till trefaskomponenter fås genom

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}. \quad (\text{B.2})$$

De symmetriska komponenterna kallas noll-, plus- och minusföljdskomponenter och anges vanligtvis med respektive index 0, 1 och 2. Nollföljdskomponenterna är i trefasfallet tre fasvektorer med samma amplitud och utan fasförskjutning, medan plusföljdskomponenterna har samma amplitud men 120° inbördes fasförskjutning. På samma sätt har minusföljdskomponenterna samma amplitud och 120° inbördes fasförskjutning, med skillnaden (som namnen antyder) att där fasvektorerna för plusföljdskomponenterna kommer i positiv följd (moturs), medan fasvektorerna för minusföljdskomponenterna kommer i negativ följd (medurs).

Ekvation B.1 och B.2 visar uttrycken omräkning mellan fasspänningar och sekvensspänningar, men samma uttryck gäller även för omräkningar mellan fasströmmar och sekvensströmmar.

C Mätvärden

C.1 Fasspänning

	Va_p (V)	Va_p (°)	Vb_p (V)	Vb_p (°)	Vc_p (V)	Vc_p (°)	Va_s (V)	Va_s (°)	Vb_s (V)	Vb_s (°)	Vc_s (V)	Vc_s (°)
1-Yd-lre-IM260-abc-VE	138,11	-0,02	138,52	-119,91	138,72	119,93	137,48	31,16	137,90	-88,87	138,63	151,02
1-Yd-lre-IM260-ab-VE	138,35	-2,85	137,74	-123,07	129,94	126,29	137,39	28,27	126,91	-88,61	139,84	153,58
1-Yd-lre-IM260-a-VE	137,38	-9,01	94,41	-123,44	111,42	134,12	113,20	18,79	92,98	-80,93	134,94	155,59
1-Yd-lre-R830-abc-VE	138,35	0,02	138,73	-119,95	138,81	119,94	137,02	30,08	137,52	-89,98	138,00	149,96
1-Yd-lre-R830-ab-VE	137,95	-0,29	138,30	-120,58	124,38	120,96	136,96	29,62	129,15	-91,60	131,60	152,05
1-Yd-lre-R830-a-VE	137,87	-0,12	65,56	-179,52	65,18	-179,38	116,35	0,07	0,24	-	116,89	-179,88
3-Yd-de-IM260-abc-VE	137,77	0,03	138,23	-119,94	138,21	119,92	137,28	31,29	137,51	-88,80	138,28	151,19
3-Yd-de-IM260-ab-VE	138,53	-1,10	137,73	-121,33	134,14	122,50	137,48	30,02	132,77	-88,74	138,64	152,39
3-Yd-de-IM260-a-VE	137,43	-6,91	95,34	-124,78	118,48	131,92	115,70	19,96	97,41	-81,53	136,56	155,25
3-Yd-de-R830-abc-VE	137,84	0,04	138,28	-119,96	138,24	119,92	136,80	30,04	137,02	-90,07	137,59	149,93
3-Yd-de-R830-ab-VE	137,62	0,23	138,11	-120,12	132,19	119,89	136,86	30,06	133,88	-90,89	134,48	150,73
3-Yd-de-R830-a-VE	137,60	1,17	69,90	-179,90	65,21	-177,60	118,72	0,68	3,17	149,24	116,99	-178,48
3-Dy-hre-IM260-abc	138,54	-0,05	138,87	-119,89	139,19	119,94	138,12	-28,91	138,07	-148,72	139,50	91,31
3-Dy-hre-IM260-ab	138,27	-6,47	138,96	-126,22	81,62	142,03	120,45	-17,78	136,56	-154,51	96,27	84,99
3-Dy-hre-IM260-a	138,84	-1,02	138,87	-1,08	138,96	-1,04	0,39	-	0,36	-	0,36	-
3-Dy-hre-R830-abc	138,53	-0,02	138,91	-119,93	139,09	119,95	137,49	-30,16	137,55	-150,00	138,37	89,99
3-Dy-hre-R830-ab	138,59	-0,23	138,91	-120,08	69,48	-60,61	68,98	29,68	137,39	-150,18	68,88	29,84
3-Dy-hre-R830-a	138,81	-43,41	138,54	-43,58	138,63	-43,54	0,44	-	0,18	-	0,19	-
3-Yy-de-hre-IM260-abc	138,18	-0,01	138,57	-119,96	138,69	119,97	137,62	1,25	137,99	-118,72	138,50	121,23
3-Yy-de-hre-IM260-ab	138,43	-0,54	138,06	-120,58	114,99	121,35	137,62	1,17	136,01	-119,37	116,40	121,77
3-Yy-de-hre-IM260-a	137,91	-5,45	85,56	-121,92	110,95	128,27	134,70	-3,43	87,16	-121,91	110,80	128,88
3-Yy-de-hre-R830-abc	137,80	-0,01	138,11	-119,95	138,24	119,96	136,42	-0,04	136,85	-119,97	137,06	119,94
3-Yy-de-hre-R830-ab	137,86	2,41	138,08	-117,85	131,23	115,20	135,40	2,68	136,80	-118,40	131,05	115,48
3-Yy-de-hre-R830-a	138,05	2,33	70,20	-177,66	65,29	-179,98	136,08	2,14	70,06	-177,97	65,32	-179,70
3-Yy-in-hre-IM260-abc	138,49	0,01	138,81	-119,95	138,85	119,94	137,73	1,25	138,09	-118,69	139,18	121,22
3-Yy-in-hre-IM260-ab	138,43	-6,31	139,12	-126,11	81,68	141,56	137,77	5,38	117,50	-130,35	98,85	128,73
3-Yy-in-hre-IM260-a	138,80	-4,13	138,77	-4,19	138,76	-3,75	0,51	-	0,49	-	0,48	-
3-Yy-in-hre-R830-abc	138,51	-0,01	138,76	-119,93	138,90	119,94	137,09	-0,05	137,49	-119,94	137,80	119,92
3-Yy-in-hre-R830-ab	138,32	1,04	138,53	-118,81	71,06	-55,66	117,26	31,31	119,91	-149,14	2,95	10,60
3-Yy-in-hre-R830-a	138,30	-46,01	138,08	-46,17	138,19	-46,13	0,45	-	0,12	-	0,09	-
5-Yd-de-IM260-abc-VE	137,79	0,01	138,07	-119,96	138,21	119,95	137,28	31,37	137,33	-88,67	137,50	151,28
5-Yd-de-IM260-ab-VE	138,14	-1,25	137,16	-121,49	133,34	122,83	137,21	29,97	131,76	-88,61	137,80	152,60
5-Yd-de-IM260-a-VE	137,18	-6,94	94,62	-125,12	117,00	132,35	115,52	19,84	95,93	-81,53	135,19	155,60
5-Yd-de-R830-abc-VE	137,59	0,07	138,09	-119,95	138,24	119,89	136,76	30,15	136,92	-89,98	136,29	150,01
5-Yd-de-R830-ab-VE	137,41	0,11	137,68	-120,31	131,45	120,21	136,66	29,99	132,96	-90,79	132,95	150,99
5-Yd-de-R830-a-VE	137,55	0,91	69,41	-178,61	65,37	-179,18	118,41	1,09	2,38	-169,14	115,98	-179,09
3-Dy-hre-IM100-abc-100V	100,02	-0,08	100,08	-119,90	99,56	119,99	99,36	-29,04	99,53	-149,00	99,79	90,96
3-Dy-hre-IM100-ab-100V	98,64	-6,39	100,69	-125,09	58,93	139,75	85,95	-18,71	97,70	-153,83	71,32	84,95
3-Dy-hre-IM100-a-100V	101,22	-13,76	101,14	-13,82	101,14	-13,78	0,20	-	0,15	-	0,17	-
3-Dy-hre-R435-abc-100V	99,87	0,01	100,34	-119,92	99,92	119,92	98,79	-30,15	99,10	-149,97	99,15	89,87
3-Dy-hre-R435-ab-100V	100,26	-0,53	100,42	-119,76	50,71	-60,58	49,67	29,70	98,91	-150,20	49,30	29,82
3-Dy-hre-R435-a-100V	101,36	-41,08	101,13	-41,26	101,17	-41,22	0,32	-	0,13	-	0,14	-

C.2 Fasström

	la_p (A)	la_p (°)	lb_p (A)	lb_p (°)	lc_p (A)	lc_p (°)	la_s (A)	la_s (°)	lb_s (A)	lb_s (°)	lc_s (A)	lc_s (°)
1-Yd-Ire-IM260-abc-VE	4,70	-78,82	4,81	162,31	4,87	41,13	3,99	-50,14	4,06	-169,55	4,06	69,33
1-Yd-Ire-IM260-ab-VE	7,98	-94,50	6,39	-177,74	0,00	-	4,84	-55,31	3,02	177,99	3,88	86,17
1-Yd-Ire-IM260-a-VE	10,28	-75,38	0,00	-	0,00	-	5,46	-78,11	0,49	32,25	5,31	106,84
1-Yd-Ire-R830-abc-VE	2,39	-16,03	2,46	-137,70	2,39	101,98	2,05	30,08	2,05	-89,70	2,05	150,12
1-Yd-Ire-R830-ab-VE	3,91	-44,12	3,91	-109,20	0,00	-	2,04	29,60	1,92	-91,31	1,95	152,22
1-Yd-Ire-R830-a-VE	3,52	-14,84	0,00	-	0,00	-	1,73	0,22	0,00	-	1,73	-179,74
3-Yd-de-IM260-abc-VE	4,48	-79,71	4,40	161,53	4,51	42,29	3,99	-49,92	4,06	-169,81	4,03	69,35
3-Yd-de-IM260-ab-VE	7,64	-101,63	6,78	-171,95	0,00	-	4,38	-52,12	3,59	-174,74	3,88	76,93
3-Yd-de-IM260-a-VE	9,84	-75,76	0,00	-	0,01	-	5,39	-76,81	0,22	63,84	5,22	104,76
3-Yd-de-R830-abc-VE	2,24	-12,25	2,22	-128,73	2,35	110,15	2,05	30,03	2,05	-89,80	2,05	150,07
3-Yd-de-R830-ab-VE	3,93	-40,14	3,85	-98,44	0,00	-	2,04	30,03	2,00	-90,61	2,00	150,88
3-Yd-de-R830-a-VE	3,40	-7,69	0,00	-	0,00	-	1,78	0,82	0,04	-	1,74	-178,35
3-Dy-hre-IM260-abc	4,48	-79,92	4,45	162,75	4,65	41,76	4,09	-110,46	4,03	130,11	4,10	10,51
3-Dy-hre-IM260-ab	5,74	-45,61	5,74	134,40	0,00	-	3,01	-42,22	6,33	134,20	3,32	-49,09
3-Dy-hre-IM260-a	0,01	-	0,00	-	0,00	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
3-Dy-hre-R830-abc	2,20	-10,80	2,32	-128,39	2,34	107,82	2,06	-30,16	2,05	-149,72	2,07	90,13
3-Dy-hre-R830-ab	1,92	23,44	1,92	-156,50	0,00	-	1,02	29,86	2,05	-150,04	1,03	30,01
3-Dy-hre-R830-a	0,01	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-
3-Yy-de-hre-IM260-abc	4,55	-79,12	4,41	161,38	4,58	42,09	4,04	-80,23	4,06	160,40	4,09	39,82
3-Yy-de-hre-IM260-ab	5,41	-97,28	6,98	176,26	0,00	-	3,69	-63,41	4,57	153,91	2,76	27,77
3-Yy-de-hre-IM260-a	9,15	-75,75	0,00	-	0,01	-	5,69	-76,12	2,98	101,88	2,70	106,11
3-Yy-de-hre-R830-abc	2,25	-12,07	2,21	-128,46	2,37	109,45	2,05	-0,06	2,05	-119,68	2,06	120,07
3-Yy-de-hre-R830-ab	3,79	-41,06	3,98	-99,61	0,00	-	1,96	2,09	2,10	-119,50	1,98	117,72
3-Yy-de-hre-R830-a	3,41	-7,83	0,00	-	0,00	-	2,03	1,26	1,05	-179,91	0,98	-177,46
3-Yy-in-hre-IM260-abc	4,55	-79,43	4,45	161,66	4,58	42,19	4,04	-80,22	4,08	160,56	4,11	39,75
3-Yy-in-hre-IM260-ab	5,81	-45,68	5,81	134,32	0,00	-	5,35	-44,43	5,58	133,54	0,30	-85,68
3-Yy-in-hre-IM260-a	0,01	-	0,00	-	0,00	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
3-Yy-in-hre-R830-abc	2,24	-12,47	2,23	-128,63	2,36	109,81	2,05	-0,06	2,05	-119,66	2,06	120,06
3-Yy-in-hre-R830-ab	1,93	24,24	1,93	-155,70	0,00	-	1,75	31,46	1,79	-148,99	0,04	-
3-Yy-in-hre-R830-a	0,01	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-
5-Yd-de-IM260-abc-VE	5,10	-81,87	5,07	161,13	4,99	42,71	3,99	-49,83	4,03	-169,87	4,00	69,65
5-Yd-de-IM260-ab-VE	8,64	-101,62	7,44	-172,88	0,00	-	4,40	-52,49	3,49	-175,61	3,84	78,07
5-Yd-de-IM260-a-VE	10,55	-76,25	0,00	-	0,01	-	5,44	-76,89	0,33	51,21	5,24	105,99
5-Yd-de-R830-abc-VE	2,39	-27,00	2,45	-143,26	2,60	99,07	2,04	30,15	2,04	-89,73	2,05	150,19
5-Yd-de-R830-ab-VE	4,34	-51,96	4,08	-110,11	0,00	-	2,04	29,97	1,98	-90,53	1,99	151,19
5-Yd-de-R830-a-VE	3,64	-18,26	0,00	-	0,00	-	1,77	1,23	0,03	-	1,74	-178,95
3-Dy-hre-IM100-abc-100V	2,50	-78,97	2,48	162,31	2,54	41,97	2,33	-111,07	2,34	129,51	2,36	8,92
3-Dy-hre-IM100-ab-100V	3,55	-45,27	3,55	134,73	0,00	-	1,88	-43,18	3,97	133,76	2,09	-49,04
3-Dy-hre-IM100-a-100V	0,01	-	0,00	-	0,00	-	0,01	-	0,00	-	0,00	-
3-Dy-hre-R435-abc-100V	1,59	-5,43	1,64	-123,30	1,67	113,96	1,48	-30,17	1,49	-149,69	1,49	90,01
3-Dy-hre-R435-ab-100V	1,39	25,80	1,39	-154,15	0,00	-	0,74	29,87	1,48	-150,05	0,74	29,97
3-Dy-hre-R435-a-100V	0,01	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-

C.3 Sekvensspänning

	V0_p (V)	V0_p (°)	V1_p (V)	V1_p (°)	V2_p (V)	V2_p (°)	V0_s (V)	V0_s (°)	V1_s (V)	V1_s (°)	V2_s (V)	V2_s (°)
1-Yd-lre-IM260-abc-VE	0,07	-	138,45	0,00	0,29	-	0,33	-	138,01	31,10	0,37	-
1-Yd-lre-IM260-ab-VE	7,47	-128,32	134,96	0,00	7,92	-7,40	0,41	-	134,61	31,09	7,63	-36,83
1-Yd-lre-IM260-a-VE	7,07	-73,34	112,66	0,00	25,66	-35,09	0,38	-	112,40	30,98	24,26	-62,61
1-Yd-lre-R830-abc-VE	0,08	-	138,63	0,00	0,23	-	0,29	-	137,52	30,02	0,30	-
1-Yd-lre-R830-ab-VE	4,53	-74,64	133,53	0,00	4,89	48,84	0,28	-	132,52	30,03	4,76	15,54
1-Yd-lre-R830-a-VE	2,43	-12,24	67,70	0,00	67,79	0,19	0,26	-	67,30	30,11	67,37	-29,91
3-Yd-de-IM260-abc-VE	0,06	-	138,07	0,00	0,27	-	0,36	-	137,69	31,23	0,26	-
3-Yd-de-IM260-ab-VE	2,95	-125,79	136,74	0,00	3,50	-4,31	0,32	-	136,28	31,23	3,42	-34,98
3-Yd-de-IM260-a-VE	2,42	-66,61	115,79	0,00	24,33	-35,99	0,32	-	115,44	31,10	22,68	-63,23
3-Yd-de-R830-abc-VE	0,07	-	138,12	0,00	0,23	-	0,30	-	137,14	29,96	0,19	-
3-Yd-de-R830-ab-VE	1,64	-	135,98	0,00	2,16	67,27	0,35	-	135,07	29,97	1,99	-
3-Yd-de-R830-a-VE	0,84	-	67,54	0,00	69,24	2,27	0,32	-	67,21	30,08	68,90	-27,92
3-Dy-hre-IM260-abc	0,06	-	138,86	0,00	0,32	-	0,35	-	138,56	-28,77	0,61	-
3-Dy-hre-IM260-ab	26,00	-96,67	117,06	0,00	25,50	23,71	0,13	-	116,61	-28,96	23,34	56,95
3-Dy-hre-IM260-a	138,89	-1,05	0,33	-	0,11	-	0,19	-	0,33	-	0,10	-
3-Dy-hre-R830-abc	0,07	-	138,84	0,00	0,26	-	0,19	-	137,80	-30,05	0,40	-
3-Dy-hre-R830-ab	69,52	-60,38	69,34	0,00	69,30	59,77	0,17	-	68,83	-30,17	68,72	89,78
3-Dy-hre-R830-a	138,66	-43,51	0,14	-	0,15	-	0,19	-	0,16	-	0,16	-
3-Yy-de-hre-IM260-abc	0,11	-	138,48	0,00	0,27	-	0,23	-	138,03	1,25	0,33	-
3-Yy-de-hre-IM260-ab	7,83	-69,13	130,48	0,00	7,92	49,41	6,44	-60,17	130,00	1,16	7,26	52,56
3-Yy-de-hre-IM260-a	7,79	3,39	110,86	0,00	23,05	-36,03	6,44	12,59	110,37	1,06	21,22	-32,83
3-Yy-de-hre-R830-abc	0,06	-	138,05	0,00	0,27	-	0,12	-	136,78	-0,02	0,32	-
3-Yy-de-hre-R830-ab	5,84	8,10	135,50	0,00	6,11	125,38	4,82	17,28	134,21	-0,03	6,11	125,70
3-Yy-de-hre-R830-a	2,94	73,53	67,72	0,00	69,44	2,31	2,42	84,87	67,07	-0,02	68,75	2,24
3-Yy-in-hre-IM260-abc	0,04	-	138,72	0,00	0,22	-	0,39	-	138,33	1,26	0,50	-
3-Yy-in-hre-IM260-ab	25,76	-96,22	117,30	0,00	25,32	24,25	0,30	-	116,84	1,11	23,11	26,98
3-Yy-in-hre-IM260-a	138,78	-4,16	0,47	-	0,10	-	0,19	-	0,47	-	0,10	-
3-Yy-in-hre-R830-abc	0,04	-	138,72	0,00	0,24	-	0,10	-	137,46	-0,02	0,34	-
3-Yy-in-hre-R830-ab	69,91	-57,84	68,65	0,00	69,70	62,26	0,06	-	67,98	-0,06	68,98	62,22
3-Yy-in-hre-R830-a	138,19	-46,11	0,12	-	0,15	-	0,19	-	0,13	-	0,15	-
5-Yd-de-IM260-abc-VE	0,07	-	138,02	0,00	0,19	-	0,10	-	137,37	31,32	0,08	-
5-Yd-de-IM260-ab-VE	3,28	-126,38	136,13	0,00	3,94	-5,34	0,13	-	135,57	31,32	3,73	-32,43
5-Yd-de-IM260-a-VE	2,69	-68,76	114,90	0,00	24,70	-34,75	0,12	-	114,40	31,16	22,81	-61,53
5-Yd-de-R830-abc-VE	0,15	-	137,97	0,00	0,30	-	0,09	-	136,65	30,06	0,29	-
5-Yd-de-R830-ab-VE	1,77	-	135,51	0,00	2,33	55,89	0,10	-	134,18	30,06	2,44	28,20
5-Yd-de-R830-a-VE	0,94	-	68,52	0,00	68,12	1,96	0,03	-	67,87	29,99	67,48	-27,99
3-Dy-hre-IM100-abc-100V	0,25	-	99,89	0,00	0,11	-	0,10	-	99,56	-29,03	0,16	-
3-Dy-hre-IM100-ab-100V	18,51	-94,99	84,59	0,00	16,79	26,34	0,13	-	84,28	-29,09	15,37	59,70
3-Dy-hre-IM100-a-100V	101,17	-13,78	0,12	-	0,06	-	0,13	-	0,11	-	0,06	-
3-Dy-hre-R435-abc-100V	0,12	-	100,04	0,00	0,22	-	0,05	-	99,01	-30,08	0,22	-
3-Dy-hre-R435-ab-100V	50,74	-60,34	49,99	0,00	49,96	59,76	0,03	-	49,49	-30,09	49,43	89,66
3-Dy-hre-R435-a-100V	101,22	-41,19	0,12	-	0,11	-	0,13	-	0,11	-	0,12	-

C.4 Sekvensström

	I0_p (A)	I0_p (°)	I1_p (A)	I1_p (°)	I2_p (A)	I2_p (°)	I0_s (A)	I0_s (°)	I1_s (A)	I1_s (°)	I2_s (A)	I2_s (°)
1-Yd-lre-IM260-abc-VE	0,02	-	4,79	-78,46	0,08	-	0,00	-	4,04	-50,12	0,05	-
1-Yd-lre-IM260-ab-VE	3,60	-130,47	4,55	-78,25	1,10	-44,38	0,00	-	3,83	-49,98	1,08	-74,39
1-Yd-lre-IM260-a-VE	3,43	-75,36	3,43	-75,41	3,43	-75,37	0,00	-	2,88	-47,18	3,34	-104,37
1-Yd-lre-R830-abc-VE	0,01	-	2,41	-17,26	0,05	-	0,00	-	2,05	30,17	0,00	-
1-Yd-lre-R830-ab-VE	2,20	-76,68	2,31	-16,64	0,12	44,71	0,00	-	1,97	30,17	0,07	-
1-Yd-lre-R830-a-VE	1,17	-14,82	1,17	-14,86	1,17	-14,85	0,00	-	1,00	30,26	1,00	-29,78
3-Yd-de-IM260-abc-VE	0,01	-	4,46	-78,63	0,08	-	0,00	-	4,03	-50,13	0,04	-
3-Yd-de-IM260-ab-VE	3,93	-134,36	4,36	-78,40	0,52	-50,15	0,00	-	3,94	-49,95	0,47	-70,30
3-Yd-de-IM260-a-VE	3,28	-75,74	3,28	-75,79	3,28	-75,75	0,00	-	2,99	-47,69	3,14	-104,45
3-Yd-de-R830-abc-VE	0,00	-	2,27	-10,27	0,08	-	0,00	-	2,05	30,10	0,00	-
3-Yd-de-R830-ab-VE	2,27	-68,96	2,23	-9,65	0,05	-	0,00	-	2,01	30,10	0,03	-
3-Yd-de-R830-a-VE	1,14	-7,67	1,13	-7,69	1,13	-7,69	0,00	-	1,00	30,20	1,03	-27,77
3-Dy-hre-IM260-abc	0,00	-	4,53	-78,47	0,12	159,32	0,00	-	4,07	-109,95	0,04	-
3-Dy-hre-IM260-ab	0,00	-	3,32	-75,63	3,31	-15,57	0,00	-	3,05	-107,50	3,27	15,76
3-Dy-hre-IM260-a	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,01	-	0,00	-
3-Dy-hre-R830-abc	0,00	-	2,29	-10,46	0,09	-	0,00	-	2,06	-29,91	0,01	-
3-Dy-hre-R830-ab	0,00	-	1,11	-6,54	1,11	53,48	0,00	-	1,03	-30,06	1,02	89,96
3-Dy-hre-R830-a	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-
3-Yy-de-hre-IM260-abc	0,03	-	4,51	-78,55	0,08	-	0,00	-	4,07	-80,00	0,04	-
3-Yy-de-hre-IM260-ab	3,03	-147,26	3,96	-78,35	1,07	7,77	0,00	-	3,59	-80,09	1,06	13,07
3-Yy-de-hre-IM260-a	3,05	-75,72	3,05	-75,78	3,05	-75,73	0,00	-	2,79	-77,78	2,91	-74,52
3-Yy-de-hre-R830-abc	0,02	-	2,27	-10,38	0,09	-	0,00	-	2,05	0,11	0,01	-
3-Yy-de-hre-R830-ab	2,26	-71,12	2,22	-9,50	0,07	-	0,00	-	2,01	0,10	0,09	-
3-Yy-de-hre-R830-a	1,14	-7,81	1,14	-7,83	1,14	-7,83	0,00	-	1,00	0,24	1,03	2,27
3-Yy-in-hre-IM260-abc	0,00	-	4,53	-78,53	0,08	-	0,00	-	4,08	-79,97	0,04	-
3-Yy-in-hre-IM260-ab	0,00	-	3,35	-75,71	3,35	-15,65	0,00	-	3,06	-77,64	3,26	-13,43
3-Yy-in-hre-IM260-a	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,01	-	0,00	-
3-Yy-in-hre-R830-abc	0,00	-	2,28	-10,43	0,09	-	0,00	-	2,06	0,11	0,01	-
3-Yy-in-hre-R830-ab	0,00	-	1,11	-5,74	1,11	54,28	0,00	-	1,01	0,10	1,03	62,34
3-Yy-in-hre-R830-a	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-
5-Yd-de-IM260-abc-VE	0,14	-176,45	5,05	-79,36	0,11	-134,27	0,00	-	4,01	-50,02	0,02	-
5-Yd-de-IM260-ab-VE	4,36	-134,18	4,88	-79,19	0,66	-54,11	0,00	-	3,89	-49,97	0,54	-70,60
5-Yd-de-IM260-a-VE	3,52	-76,23	3,52	-76,29	3,52	-76,24	0,00	-	2,95	-47,43	3,22	-103,69
5-Yd-de-R830-abc-VE	0,08	-	2,48	-23,65	0,11	-122,14	0,00	-	2,04	30,21	0,00	-
5-Yd-de-R830-ab-VE	2,45	-80,03	2,40	-22,11	0,10	-	0,00	-	2,00	30,21	0,04	-
5-Yd-de-R830-a-VE	1,21	-18,24	1,21	-18,27	1,21	-18,27	0,00	-	1,01	30,25	1,01	-27,96
3-Dy-hre-IM100-abc-100V	0,00	-	2,51	-78,23	0,03	-	0,00	-	2,34	-110,88	0,02	-
3-Dy-hre-IM100-ab-100V	0,00	-	2,05	-75,30	2,05	-15,24	0,00	-	1,93	-108,01	2,04	15,41
3-Dy-hre-IM100-a-100V	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-
3-Dy-hre-R435-abc-100V	0,00	-	1,63	-4,92	0,05	-	0,00	-	1,49	-29,95	0,01	-
3-Dy-hre-R435-ab-100V	0,00	-	0,80	-4,18	0,80	55,84	0,00	-	0,74	-30,07	0,74	89,95
3-Dy-hre-R435-a-100V	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-