

Automatik för avstämning av Petersenspole



Andreas Jönsson
Christoffer Örndal

Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation
Lund University

Automatik för avstämning av Petersenspole

Examensarbete av:

Andreas Jönsson

Christoffer Örndal

För

Industriell Elektronik och Automation, LTH

E.ON Elnät Sverige AB

Lund November 2009

Abstract

The forceful storms and the stricter regulations from the government within the last years have forced E.ON to start a project called "Krafttag". The goal of the project is to ensure uninterrupted power supply to the customers by investing in underground cables. A problem with the underground cables is the high natural capacitance that contributes to an enlarged current in the case of an earth fault. The increase will among other things make the earth fault detection more complicated.

To compensate for the capacitive fault current caused by the cables, a coil in the neutral point of the transformer could be installed. The coil creates an inductive current that if correctly tuned will balance out the capacitive fault current. In systems with mostly overhead lines a change of the net will have a minor effect on the needed compensation and tuning is less critical. But with underground cables this is no longer the case, this introduces demands on systems that could tune the coils inductance quickly and effectively.

This master thesis focuses on evaluating the different methods for automatic tuning that are available on the market today and evaluate how they can be improved. Those improvements are then implemented, and a new method is created. The different methods are evaluated in DLAB, a lab model of a 10 kV distribution net. Tests have been performed on four different net sizes in both symmetrical and unsymmetrical conditions.

The evaluation focus on how well the different methods tune the system and how essential input parameters should be set. The two main parameters evaluated are trig level and detuning.

The result shows that all the evaluated methods works but have room for improvements in both speed and precision. The tests also confirm some of the problems that E.ON encountered when setting the trig level.

Sammanfattning

Under de senaste åren har kraftiga stormar och ökade myndighetskrav föranlett E.ON att starta projektet Krafttag. Projektets målsättning är att kablifiera stora delar av mellanspänningsnätet i riskområden. Ett problem med kablifierade nät är dock den stora kapacitansen som naturligt uppstår. Kapacitansen bidrar till att strömmen vid ett eventuellt jordfel kommer att öka, vilken bland annat kan försvåra detektering av jordfelet.

För att motverka den kapacitiva felström som orsakas av kablarna kan en spole användas för att skapa en motverkande induktiv ström. Då friledningarna hade stor majoritet i mellanspänningsnätet krävde en omkoppling ingen större förändring i kompenseringsbehov. Men vid omkoppling av kablifierade nät blir skillnaden stor och en snabb korrigerande behövs. Detta har skapat ett större behov av automatisk korrigerande som är både snabb och effektiv.

Detta examensarbete ämnar belysa och utvärdera de automatavstämningssmetoder som finns på marknaden idag. Men även skapa en egen metod utifrån de kriterier som anses viktiga. Metoderna testas i DLAB som är en laborationsuppställning som modellerar ett 10 kV distributionsnät. I DLAB har metoderna testats för distributionsnät där både storleken och symmetrin förändras.

Testerna innefattar både hur bra metoderna lyckas ställa in sig på den optimala inställningspunkten samt de parametrar som är relevanta för inställningen. De parametrar som belyses i rapporten är trignivå och snedavstämning.

Resultaten visar att även om de olika metoderna fungerar finns relevanta förbättringar att göra både i precision och i snabbhet. Testerna bekräftar också de problem E.ON har erfarenhet med inställningen av trignivåerna.

Förord

Detta examensarbete är den avslutande delen av vår civilingenjörsutbildning vid Lunds Tekniska Högskola (LTH). Arbetet har genomförts på avdelningen för Industriell Elektroteknik och Automation (IEA) i samarbete med E.ON Elnät Sverige AB. Under arbetets gång har vi fått mycket stöd från både E.ON och institutionen och de vi vill ge ett särskilt tack till är:

Magnus Akke, vår handledare på institutionen för sitt stora engagemang och alltid tagit sig tid att svara på våra frågor.

Victor Bagge, vår handledare på E.ON för all hjälp med information om dagens system samt vägledning under projektets gång.

Pelle Steen, från National Instruments för att han ställde upp och hjälpte oss med LabVIEW när det behövdes.

Tack!

Andreas Jönsson
Christoffer Örndal

Lund, November 2009

Innehåll

1	Inledning.....	7
1.1	Bakgrund	7
1.2	Syfte	7
1.3	Avgränsningar	7
1.4	Disposition.....	8
2	Teori	9
2.1	Ledningskapacitans	9
2.2	Kapacitiva strömmar	10
2.3	Enfasigt jordfel	11
2.4	Spoljordning	13
2.4.1	Kompensering	13
2.4.2	Varierbar kompensering	14
2.4.3	Lokalkompensering	14
2.5	Symmetriska komponenter.....	14
2.5.1	Motiv för att använda symmetriska komponenter.....	14
2.5.2	Ekvivalent schema för att analysera jordfel i DLAB	15
2.6	Befintliga metoder för automatavstämning	18
2.6.1	Resonanskurva	18
2.6.2	Trench ströminjicering, deltaberäkning.....	20
2.6.3	Trench ströminjicering, inverse mode	20
2.6.4	CDC metoden	21
3	DLAB.....	23
3.1	Omvandling DLAB – E.ON.....	23
3.2	DLAB uppställningen	24
3.2.1	Nollpunktsreaktorn	24
3.2.2	Nollpunktsmotstånd.....	26
3.2.3	Ströminjicering.....	26
3.2.4	Ledningsmodell	26
3.2.5	Jordfel.....	27
3.2.6	Mät- och styrutrustning	28
3.3	Mjukvara – LabVIEW	29

3.3.1	Dataloggning	30
4	Utvärderingsmetoder för avstämningautomatik	31
4.1	Utvärdering av de olika metoderna	31
4.1.1	Kontrollmätning och nätkonfiguration	31
4.1.2	Identifiering av optimal inställning	31
4.2	Snedavstämning	32
4.3	Triggnivå	32
5	Resultat	33
5.1	Inställningspunkt	33
5.1.1	Resonanskurva	34
5.1.2	Trench ströminjicering, deltaberäkning	36
5.1.3	Trench ströminjicering, inverse mode	38
5.1.4	CDC metoden	39
5.1.5	Jämförelse av metoder	40
5.2	Snedavstämning	41
5.3	Triggnivå	42
6	Slutsatser	44
6.1	Metoder för automatavstämning	44
6.2	Parameterinställningar	45
7	Förbättring av nollpunktsreaktorn	46
7.1	Implementering	46
7.2	Resultat	48
7.2.1	Inställningspunkt	48
7.2.2	Triggnivå	49
7.3	Slutsatser	50
7.3.1	Metoder för automatavstämning	50
7.3.2	Parameterinställningar	50
8	Vidare arbeten	51
9	Referenser	52
10	Bilagor	53
10.1	Användarinterface - LabVIEW	53

1 Inledning

Detta kapitel presenterar bakgrunden till varför detta examensarbete behövs i dagsläget. Kapitlet innehåller även de frågeställningar som behandlas i rapporten samt de avgränsningar av arbetet som görs.

1.1 Bakgrund

E.ON Elnät Sverige AB (hädanefter kallat E.ON i texten) är en av de stora aktörerna inom eldistribution. I dagsläget ansvarar E.ON för distribution av el till cirka en miljon slutkunder och omsätter runt 630 miljoner euro. Under de senaste åren har kraftiga stormar såsom Gudrun och Per drabbat Sverige. De medförde stora skador på elnätet och resulterade i att många kunder blev strömlösa. I kombination med ökade myndighetskrav på avbrottsfri elleverans har detta föranlett E.ON att starta projektet Krafttag, som syftar till att kablifiera stora delar av de friledningar som finns i riskområden. Detta minskar kraftigt risken för elavbrott.

Med ökad andel kabel i mellanspänningsnätet uppstod nya problem som inte tidigare har blivit belysta och utredda. Ett av dessa problem är att kablarna jämfört med luftledning orsakar en högre kapacitiv ström, vilket vid ett jordfel resulterar i stora felströmmar. Den stora felströmmen försvårar detekteringen av jordfelet och kan i vissa lägen bidra till att myndighetskraven för bortkoppling av jordfel inte längre uppfylls. Ett sätt att lösa detta problem är att använda sig av en centralt placerad Petersenspöle, som kompenserar den kapacitiva ström som ledningarna orsakar.

När nätet förändras genom in- eller urkoppling av nätsektioner förändras även behovet av kompenseringen. Då friledningar används orsakar dessa omkopplingar inga större förändringar av kompenseringsbehovet och någon korrigering av Petersenspölen har sällan varit nödvändig. Men med kablifierade nät är påverkan större vilket innebär att en korrigering av Petersenspölen nu är nödvändig. För att klara myndighetskraven krävs att korrigeringen kan göras snabbt och tillförlitligt. Detta har skapat ett större behov av automatik för avstämning av Petersenspölar.

1.2 Syfte

Det övergripande syftet med examensarbetet är att teoretiskt och praktiskt granska de automatavstämningmetoder som används av E.ON i dagsläget. Granskningen är tänkt att belysa de olika metodernas eventuella begränsningar och möjligheter för att eventuellt utveckla en bättre metod.

Utöver detta har fokus även lagts på att granska ett par viktiga parametrar runt automatavstämningen. De parametrar som E.ON anser är viktiga att utreda är snedavstämning och triggnivåer.

1.3 Avgränsningar

För att hålla arbetet överskådligt och inom den utsatta tidsramen har vissa avgränsningar gjorts. Här nämns några av de mest betydande avgränsningar som gjorts under arbetets gång.

- På grund av otillräckligt underlag har inte Swedish Neutrals automatavstämning kunnat utvärderas, det samma gäller för Trench senaste metod.
- Hur metoderna hanterar system med lokalkompensering har inte utretts.
- Resistansen hos transformatorn i nollpunktsreaktorn är förhållandevis stor och kan därför påverka andra delar av systemet, så som de riktade strömskydden. Någon hänsyn till detta har inte tagits i arbetet.

1.4 Disposition

Nedan visas rapportens disposition som speglar den arbetsgång som projektet följer.

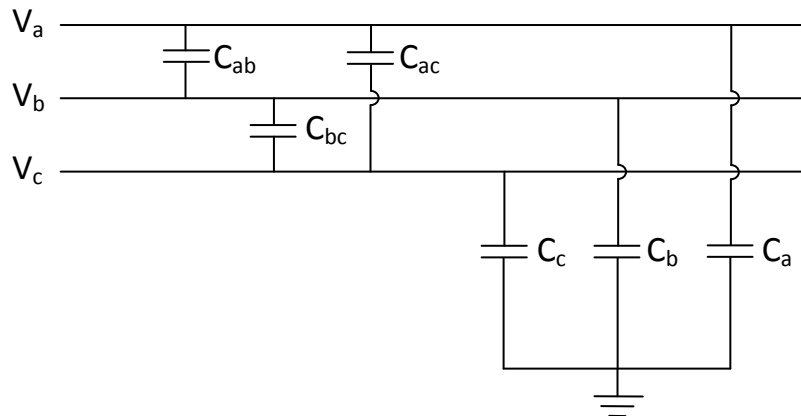
- **I kapitel 2** introduceras den grundläggande teori som är nödvändig för att förstå de frågeställningar som rapporten syftar att belysa. Här presenteras också den teoretiska bakgrunden till de lösningar som utvärderas under arbetet.
- **Kapitel 3** beskriver DLAB som är den labbuppställning som används för att praktiskt utvärdera de olika metoderna. Här beskrivs även de omvandlingar som görs för att ett mellanspänningsnät ska kunna modelleras i labbmiljö.
- **Kapitel 4** presenterar tillvägagångssätten som används för att testa de olika avstämningsmetoderna och parametrarna i DLAB.
- **I kapitel 5** redovisas de resultat som erhålls från de tester som genomförs under arbetet.
- **Kapitel 6** innehåller de slutsatser som dras under arbetets gång. Dessa grundar sig på den bakomliggande teorin samt de genomförda testerna.
- **Kapitel 7** beskriver hur en större vridtransformator i nollpunktsreaktorn, med lägre resistans ger bättre resultat i DLAB. Kapitlet innefattar även de skillnader i resultat och slutsatser som är en följd av bytet av nollpunktsreaktorns vridtransformator.
- **I kapitel 8** diskuteras ett flertal frågeställningar som dykt under arbetets gång och som inte har kunnat besvaras inom den utsatta tidsramen. Dessa presenteras här tillsammans med funderingar om hur arbetet i detta examensarbete skulle kunna fortsätta.

2 Teori

Detta kapitel introducerar den grundläggande teori som är nödvändig för att förstå de frågeställningar som rapporten syftar att belysa. Slutligen presenteras också den teoretiska bakgrunden till de lösningar som utvärderas under arbetet.

2.1 Ledningskapacitans

En strömledare interfererar med dess omgivning på ett sätt som kan modelleras med kapacitanser mellan ledningen och dess omgivning. I både luftburna och kablfierade distributionsnät uppstår därför en kapacitiv koppling mellan fas och jord. En kapacitiv koppling kommer även uppstå mellan faserna, Figur 2.1. För kabel där varje fas har jordad skärm kan dessa kapacitanser försummas. För trefaskabel med gemensam skärm är kapacitansen mellan faserna i samma storleksordning som kapacitanserna mot jord. Nollföljdskapacitansen, kapitel 2.5, är direkt proportionell mot kapacitansen mellan fas och jord men påverkas inte av kapacitansen mellan faserna. Därför är kapacitansen mellan fas och jord den viktiga parametern i beräkningarna under projektet.



Figur 2.1 - Kapacitanser i distributionsnät

Storleken på kapacitanserna till jord bestäms på olika sätt beroende på om luftledning eller jordkabel avses. Skillnaden består i olika modelleringsätt, där en jordkabel kan approximeras som en cylinderkondensator, medan luftledningens kapacitans beräknas med hjälp av spegling. För beräkning av kapacitanserna för en meter ledning används följande formler.

$$C_{Kabel} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\ln\left(\frac{d_{kabel}}{d_{ledare}}\right)} \quad (2.1)$$

$$C_{Luftledning} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\ln\left(\frac{2 \cdot h}{r}\right)} \quad (2.2)$$

Där ϵ_0 är kapacitiveteten i vakuum och ϵ_r är en materialkonstant benämnd dielektricitetsstal. Produkten av dessa utgör materialets kapacitivet ϵ . Avståndet mellan ledaren och jord, h respektive d_{kabel} , tillsammans med det mellanliggande materialets kapacitivet bestämmer storleken på den kapacitiva kopplingen till jord.

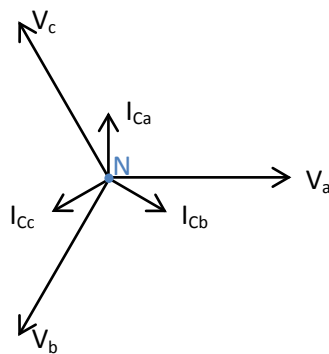
En jämförelse mellan kabel och luftledning visar på en betydligt större kapacitans för kabel. Den större kapacitansen är en följd av det korta avståndet mellan kabelns ledare och dess jordade mantel, samt isoleringens höga kapacitivet. [1]

2.2 Kapacitiva strömmar

i spänningssatta kablar går en reaktiv ström igenom kapacitanserna. Strömmen benämns ofta som ledningens laddström, I_c , och beräknas enligt följande.

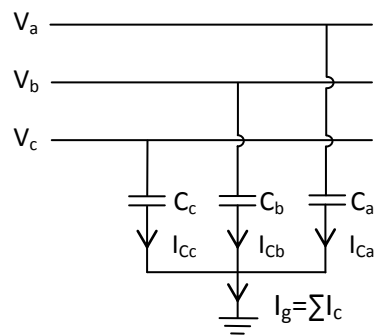
$$I_c = V \cdot j \cdot \omega \cdot C \quad (2.3)$$

Ekvation (2.3) beskriver den kapacitiva strömmen i en fas och är förskjuten 90° före spänningen i samma fas. Fasernas laddningsströmmar är därför likt spänningen fasförskjutna 120° i förhållande till varandra.



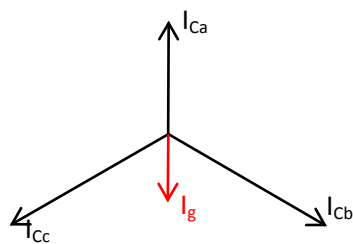
Figur 2.2 - Vektorer i symmetriskt system

Om fasernas kapacitanser är lika stora kommer vektorsumman av de kapacitiva strömmarna bli noll i jordpunkten det vill säga $I_g = I_{ca} + I_{cb} + I_{cc} = 0$. Detta kallas för ett symmetriskt system och eftersträvas i varje nät. Även om symmetri råder kommer fortfarande en reaktiv effekt genereras som kommer att begränsa kabelns överföringskapacitet för aktiv effekt. En modell av kapacitanser och kapacitiva strömmar visas i Figur 2.3.



Figur 2.3 - Kapacitiva strömmar i nätet

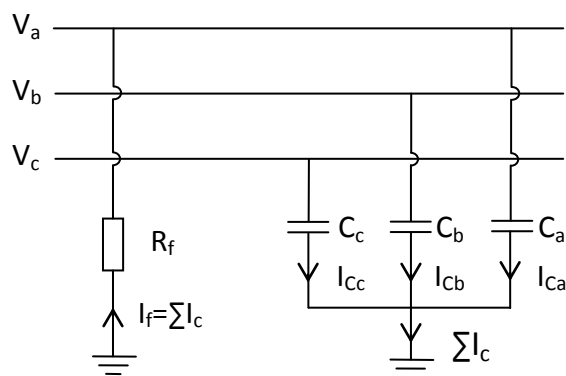
Ett verkligt nät har oftast inte perfekt symmetri på grund av ojämnheter och variationer hos kablarna. Till följd av kapacitansernas skillnad kommer faserna att belastas med laddströmmar av olika amplitud. Vid summeringen i jordpunkten blir summan inte längre noll vilket innebär att en liten ström, I_g , kommer att flyta till jord, Figur 2.4. Strömmen kommer att flyta via transformatorns jordkoppling till dess nollpunkt som då kommer få en potentialskillnad mot jord.



Figur 2.4 - Strömvektorer i osymmetriskt system

2.3 Enfasigt jordfel

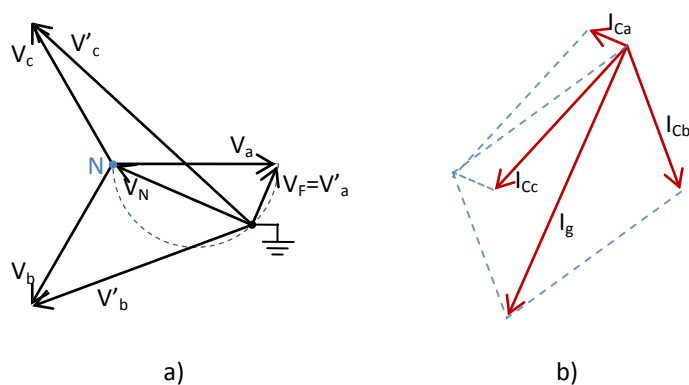
När ett enfasigt jordfel uppstår kan kopplingen betraktas som en resistans mellan fas och jord, Figur 2.5. En sådan resistans, R_f , kan anta värden från 0Ω vid ett stumt jordfel till värden så stora att felet inte påverkar systemet. Vid ett stumt jordfel erhåller den jordslutna fasen samma potential som jord, detta innebär att kapacitansen för den felbehäftade fasen blir kortsluten.



Figur 2.5 - Enfasigt jordfel

Med en kapacitans kortsluten kommer nätet att uppträda som ett kraftigt osymmetriskt system. Ett jordfel med felresistans i ett icke direktjordat system, ger potentialförändring mellan fasen och jord. Detta ger en kapacitiv ström mot jord genom fasens kapacitans. Strömmen kommer dock inte vara lika stor som ledningens laddström och systemet kommer därmed fortfarande ha en osymmetri som är omvänt proportionell mot felresistansen, R_f .

Jordslutningen påverkar även de friska faserna genom att systemets nollpunkt, N, inte längre är på jordpotential. Som en följd kommer spänningarna mellan fas och jord, V'_b och V'_c att öka och fasvinklarna att minska, Figur 2.6a.

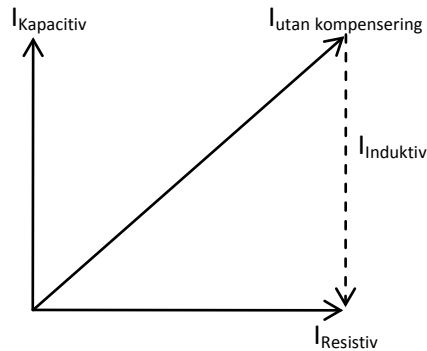


Figur 2.6 - (a) Spänningsvektorer, (b) Strömvektorer

Förändringen av fasernas spänning kommer leda till en proportionell förändring av fasernas laddströmmar. Summering av laddströmmarna i jordpunkten kommer inte längre att vara noll utan kommer resultera i strömmen I_g , Figur 2.6b. Detta kan jämföras med ett system med kraftig osymmetri. En väsentlig skillnad vid jordfel är dock att I_g kommer att återledas via felstället och felströmmens belopp blir stor även om den aktiva delen är liten. [2][3]

2.4 Spoljordning

För att begränsa strömmen i jordslutningen kan den reaktiva komponenten kompenseras bort. Om kompensering är fullständig blir jordfelsströmmen rent aktiv och därmed blir den resulterande strömmen lägre. Den reaktiva strömmen i felstället är kapacitiv och ligger enligt kapitel 2.2 därmed 90° före spänningen. För att kompensera denna ström behövs därför en ström som ligger 90° efter spänning, vilket innebär en induktiv ström. Detta visas i Figur 2.7.



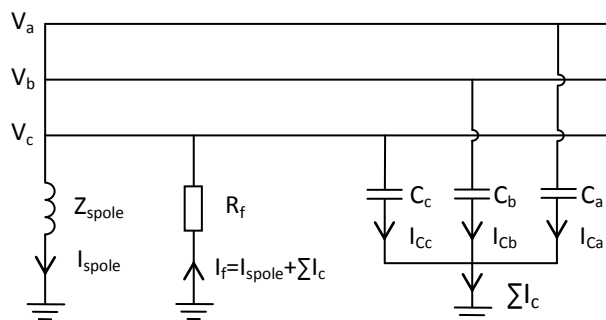
Figur 2.7 - Strömvektorer vid spoljordning

2.4.1 Kompensering

En induktiv kompensering kan genereras genom en nollpunktsreaktor även kallad Petersenspole det vill säga en spole kopplad mellan transformatorns nollpunkt och jord. För en fast spole bestäms dess kompenseringsström av nollpunktsspänningen, V_n , enligt ekvation (2.4).

$$I_{spole} = \frac{V_N}{Z_{spole}} = \frac{V_N}{j\omega L} = -\frac{jV_N}{\omega L} \quad (2.4)$$

Ur ekvation (2.4) kan spolens nominella kompensering, I_{nom} , beräknas genom insättning av den maximala nollpunktsspänningen, $V_{N,max}$. Den nominella strömmen motsvarar kompenseringsströmmen vid ett stumt jordfel och är därmed ett bra mått på hur stort nät som kan kompenseras med den aktuella spolen. Därför är det brukligt att ange nollpunktsreaktors storlek i nominell ström.



Figur 2.8 - Reaktiva strömmar vid jordfel

Då nollpunktsreaktorns reaktiva ström exakt motsvarar den kapacitiva strömmen från nätet har systemet uppnått så kallad resonans.

2.4.2 Varierbar kompensering

Då det ständigt sker förändringar i nätet påverkar detta kompenseringsbehovet, för att undvika att behöva byta ut nollpunktsreaktor vid varje större förändring är en reaktor med varierbar kompensering att föredra. Normalt används nollpunktsreaktorer som varieras med hjälp av en glidkärna. Detta innebär att spolens induktans kan förändras genom att förflytta kärnan in och ut ur spolens mitt och därmed förändra reluktansen för magnetfältets banor.

Ett annat alternativ för reglering av kompenseringsströmmen är att installera en stor fast spole och sedan parallellkoppla kondensatorer för att minska den induktiva strömmen. Flera kondensatorer finns då tillhanda för att kunna justera kompenseringen till önskad nivå. Detta fungerar då systemet endast har grundfrekvens. Vid transienter kan oväntade effekter uppstå, som bör analyseras innan denna teknik används i verkliga nät.

För att kunna uppfylla de krav som ställs på ett modernt elnät krävs att förändringarna i kompenseringsbehovet inom några minuter kan detekteras och en reglering av nollpunktsreaktor genomförs. Detta har skapat ett behov av system som automatiskt kan hålla rätt kompenseringsnivå.

2.4.3 Lokalkompensering

I nät med stort kompenseringsbehov kan det vara svårt att kompensera fullt ut med en centralt placerad nollpunktsreaktor. Ett fel i slutet på en lång ledning gör att spolens reaktiva kompenseringsström blir stor och transporteras lång sträcka. Detta orsakar aktiva förluster i nätet vilket försämrar känsligheten hos NUS, nollpunktsspänningskydd. En fördel med aktiva förluster är att känsligheten hos riktade jordfelskydd förbättras. Genom att ha mindre nollpunktsreaktorer utplacerade lokalt i de mindre transformatorstationerna kan de bidra med en egen kompenseringsström, detta kallas för lokal kompensering. Fördelen är att denna kompenseringsström transporteras kortare sträcka och att kompenseringsbehovet från den centrala nollpunktsreaktor minskar. Med lokal kompensering minskar också behovet av att ändra inställningen på den centrala Petersenspölen vid omkoppling av nätet.

2.5 Symmetriska komponenter

Detta kapitel motiverar först användning av symmetriska komponenter. Därefter härleds det ekvivalenta kretsschemat som används för att analysera jordfel i DLAB. För utförligare information om symmetriska komponenter se referens [4].

2.5.1 Motiv för att använda symmetriska komponenter

Några av de skäl som finns till att använda symmetriska komponenter anges nedan:

- Symmetriska komponenter gör det lättare att analysera olika elektriska fel. Fördelen är att trefasnätet istället beskrivs med sekvensnät som är

särkopplade. Endast i felstället är sekvensnäten ihopkopplade, [5]. Detta gör att olika feltyper kan beskrivas med ekvivalenta scheman som ger skalära ekvationer, med andra ord undviks matrisekvationer när sambanden mellan strömmar och spänningar beskrivs.

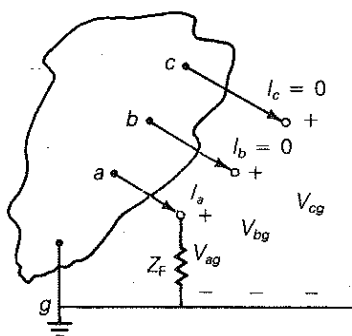
- För reläskydd och felbortkoppling är symmetriska komponenter ett mycket användbart verktyg för att identifiera olika feltillstånd.
- Nollföljdsstorheter är nästintill nödvändiga för att analysera och förstå hur systemjordning och olika transformatorkopplingar påverkar nätets egenskaper.

2.5.2 Ekvivalent schema för att analysera jordfel i DLAB

Härledningen av det ekvivalenta schemat görs i fyra steg:

1. Utgå från fasekvationerna vid ett jordfel.
2. Översätt fasekvationerna till symmetriska komponenter.
3. Beskriv komponentekvationerna med ett generellt kopplingschema.
4. Beskriv det aktuella sekvensnätet med lämplig noggrannhet.

Figur 2.9 är hämtad från [5] och illustrerar ett generellt jordfel i fas *a*.



Figur 2.9 - Enfasigt jordfel sett från felstället [5]

Genom att betrakta felstället fås fasekvationerna:

$$\begin{aligned} I_a &\neq 0 \\ I_b &= I_c = 0 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Spänningen i fas *a* vid felet är (beteckning V_a motsvaras av V_{ag} i figuren, och R_F motsvaras av Z_F)

$$V_a = R_F \cdot I_a \tag{2.6}$$

Ekvationen i fasström översätts direkt till symmetriska komponenter motsvarande plus-, minus- och nollföljd som representeras av indexering 1, 2 och 0.

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} I_a \tag{2.7}$$

Där $\alpha = e^{i\frac{2}{3}\pi}$, vilket motsvarar en 120° förskjutning. Ekvation (2.7) ger följande samband för strömmarna:

$$\begin{aligned} I_0 &= I_1 = I_2 \\ I_a &= 3I_0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Ekvationen för spänningen i fas a utnyttjas genom att använda första raden i sambandet:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Detta ger:

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2 = R_F \cdot I_a = 3R_F \cdot I_0 \quad (2.10)$$

Sammanfattningsvis har två ekvationer erhållits för symmetriska komponenter som ska beskrivas med ett ekvivalent schema:

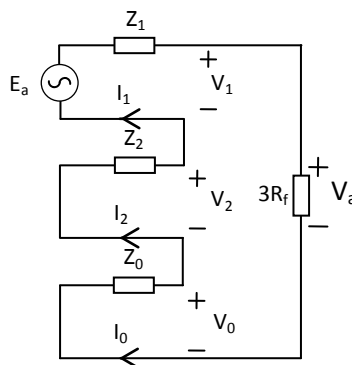
$$\begin{aligned} V_0 + V_1 + V_2 &= 3R_F \cdot I_a \\ I_0 &= I_1 = I_2 \end{aligned} \quad (2.11)$$

Sambanden för de symmetriska storheterna kan skrivas enligt följande:

$$\begin{aligned} V_0 &= Z_0 \cdot I_0 \\ V_1 &= E_a + Z_1 \cdot I_1 \\ V_2 &= Z_2 \cdot I_2 \end{aligned} \quad (2.12)$$

där Z_0 , Z_1 och Z_2 är Theveninimpedanser för matande nät, betraktat från felstället. Spänningskällan E_a representerar matande generator som vid källan antas vara perfekt symmetrisk.

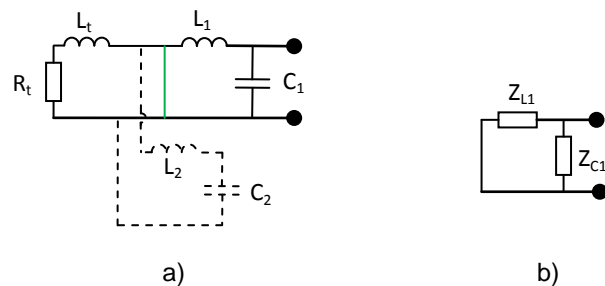
Dessa ekvationer kan också beskrivas med ett ekvivalent schema. Detta är ett alternativt sätt att beskriva samma fysiska fenomen, i detta fall ett jordfel i fas a . Det är viktigt att komma ihåg att härledningen av ekvationerna har gett kopplingsschemat, och inte vice versa. Det ekvivalenta schemat visas i Figur 2.10.



Figur 2.10 - Ekvivalent schema för jordfel med generella Theveninimpedanser

Kopplingsschemat ovan är användbart för att bestämma storheter i felstället. För att förstå hur nätet beter sig i andra delar krävs en mer detaljerad beskrivning av nätimpedanserna. Nästa steg är därför att bestämma vad Theveninekvivalenterna består av i detta specifika fall.

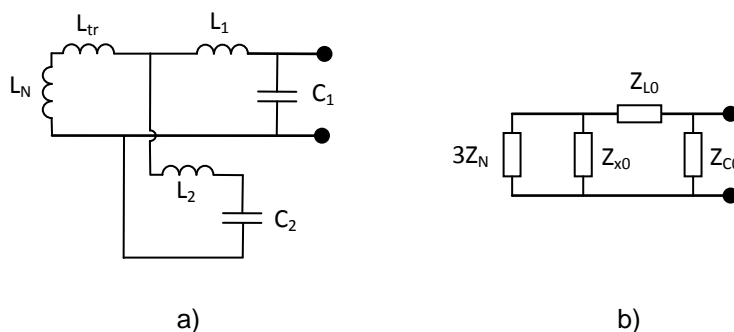
I system med enbart passiva komponenter, som distributionsnät, är plus- och minusföljdsimpedanserna lika stora. Storleken av dessa bestäms av den impedans som upplevs från felstället om matningstransformatorn ses som en kortsluten spänningskälla. Detta resulterar i en krets enligt Figur 2.11a. Den streckade biten beskriver här en eller flera extra distributionsledningar.



Figur 2.11 - Impedans för plus och minus följd

Den totala impedansen för R_{tr} och L_{tr} är lågohmig och kan ses som en kortslutning, Figur 2.11a. Denna förenkling resulterar i kretsen som illustreras i Figur 2.11b. Då den kapacitiva delen, Z_{C1} , är mycket större än den induktiva, Z_{L1} , kan man approximera impedansen för minus och plusföljd till Z_{L1} .

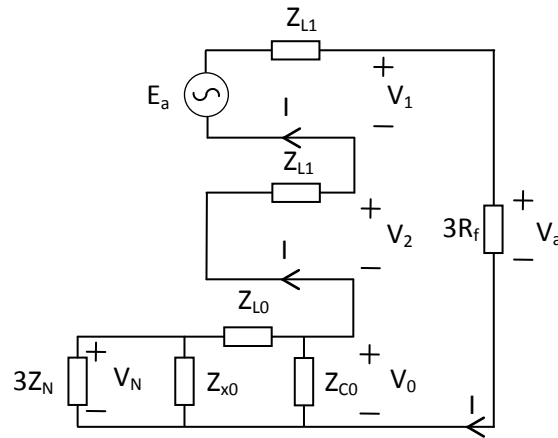
Vid beräkning av nollföljdsimpedansen Z_0 måste jordningen i Figur 2.12a, beaktas på grund av att transformatorn inte längre ses som en spänningskälla. Detta resulterar i att antalet ledningar påverkar systemets nollföljdsimpedans kraftigt. Dessa parallella ledningar beskrivs med impedansen Z_x , Figur 2.12b.



Figur 2.12 - Impedans för nollföljd

Vidare antas transformatorns induktans, L_{tr} , vara försumbar. Omvandlingen från L_N till $3Z_N$ kan sedan visas på liknande sätt som för jordfelsresistansen, ekvation (2.11). Den

slutgiltiga representationen av symmetriska komponenter vid enfasigt jordfel visas i Figur 2.13.



Figur 2.13 - Symmetriska komponenter vid enfasigt jordfel

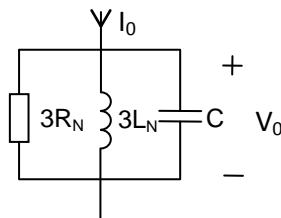
För nollföljden antas spänningsfallet över Z_{L0} vara mycket mindre än V_0 vilket får till följd att V_N kan approximeras som V_0 . Om jordfelet inträffar i början av ledningen behövs ingen approximation då V_N och V_0 hamnar i samma punkt.

2.6 Befintliga metoder för automatavstämning

I dagsläget finns ett antal tillverkare som producerar produkter för automatisk reglering av Petersenspolar. Under arbetet har fokus lagts på att främst analysera de system som används inom E.ON, med inriktning på systemen från Trench och Transfix [6][7]. Under denna rubrik presenteras utvalda befintliga metoder samt en egen lösning.

2.6.1 Resonanskurva

I ett nät med osymmetri går det en ström genom nollpunkten som bildar en nollpunktsspänning, se kapitel 2.2. Genom att använda symmetriska komponenter kan det visas att denna spänning blir beroende av förhållandet mellan kapacitanserna och nollpunktsreaktorn i systemet, se Figur 2.14.



Figur 2.14 – Symmetriska komponenter i nollpunkten

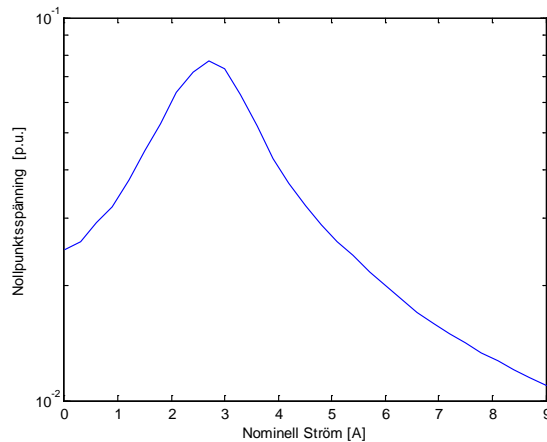
Den största nollpunktsspänningen, V_0 , fås när ersättningsimpedansen för komponenterna i Figur 2.14, det vill säga nollpunktsimpedansen, Z_0 , är maximal. Detta sker vid resonans, det vill säga då nätets kapacitiva ström och nollpunktsreaktors induktiva ström exakt motverkar varandra, ekvation (2.13).

$$j\omega 3L + \frac{1}{j\omega C} = 0 \Rightarrow \omega 3L = \frac{1}{\omega C} \quad (2.13)$$

För Figur 2.14 blir då ersättningsimpedansen Z_0 :

$$Z_0 = \left(j\omega 3L // \frac{1}{j\omega C} \right) // 3R_0 = \left(\frac{1}{\frac{1}{j\omega 3L} + \frac{1}{j\omega C}} \right) // 3R_0 = \left(\frac{1}{-j\omega C + j\omega C} \right) // 3R_0 = 3R_0 \quad (2.14)$$

För att hitta resonanspunkten görs en så kallad svepning av nollpunktsreaktorn. Detta innebär att nollpunktsspänningen mäts över hela nollpunktsreaktorns kompenseringintervall. Detta leder till en så kallad resonanskurva, Figur 2.15.



Figur 2.15 - Resonanskurva

Efter svepningen ställs reaktorn in på resonanspunkten eller med en viss snedavstämning. Möjligheten till snedavstämning behövs på grund av att resonanspunkten inte alltid motsvarar lägsta jordfelsström. Efter korrigering av reaktorn mäts nollpunktsspänningen kontinuerligt för att detektera förändringar som överskrider givna trignivåer.

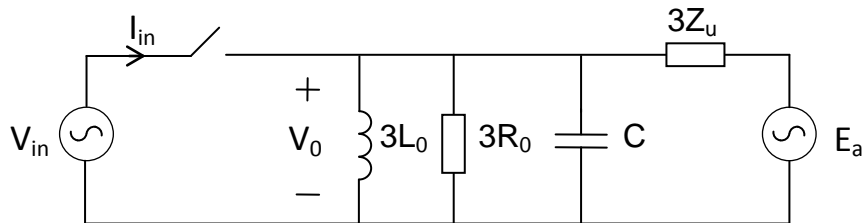
De tre viktigaste nivåerna är V_{\min} , V_{earth} och V_{trigg} som avgör hur och när automatiken ska arbeta.

- V_{\min} avgör om nollpunktsspänningen är för låg för att styrutrustningen ska kunna bestämma en resonansstopp. I detta läge ställer styrutrustningen in reaktorn på ett förutbestämt värde. V_{\min} är angivet som procent av nominell nollpunktsspänning och är i Trench förinställt till 0.2 %.
- V_{earth} är gränsen för när styrutrustningen detekterar ett jordfel. Styrutrustningen avbryter då en eventuellt pågående svepning och låser all förflyttning av reaktorn. V_{earth} är angivet som procent av nominell nollpunktsspänning och är i Trench förinställt till 50 %. Denna inställning är dock betydligt lägre i E.ONs nät (12 %).

- V_{trigg} är gränsen för när styrutrustningen ska genomföra en ny korrigerig och därmed åter svepa nollpunktsreaktorn. V_{trigg} anges i procent av aktuell nollpunktsspänning och förändras därför vid korrigerig. Denna nivå gäller för både minskning och ökning av nollpunktsspänningen. I Trench är denna nivå förinställd till 15 %.

2.6.2 Trench ströminjicering, deltaberäkning

En annan metod för att ställa in nollpunktsreaktorn är att matematiskt direkt räkna ut den optimala inställningen. Metoden bygger på att en ström injiceras i nollpunkten och därmed förändrar nätets symmetri. Betraktas detta utifrån symmetriska komponenter kan jordfelet ersättas med den osymmetri som finns i systemet, Z_u , detta leder till en modell enligt Figur 2.16. Z_u motsvarar den impedansskillnad som finns mellan faserna på grund av osymmetrin.



Figur 2.16 – Ströminjicering

Genom att mäta ström och spänningsförändring vid injiceringen kan nollföljdsimpedansen beräknas enligt ekvation (2.15).

$$Z_0 = \frac{dV_0}{dI_{inj}} \quad (2.15)$$

För avstämt system gäller som tidigare att induktansen och kapacitansen skall motverka varandra och kretsen upplevas som helt resistiv. Detta innebär att den imaginära komponenten av Z_0 är 0 vid avstämningen. En positiv imaginärdel innebär att Z_0 är induktiv, det vill säga att nätet är överkompenserat. Motsvarande för negativ imaginärdelen är en underkompensering och Z_0 upplevs kapacitiv. Storleken av imaginärdelen avgör hur mycket nollpunktreaktorn behöver förändras för att uppnå optimal kompensering.

En begränsning med denna metod är att osymmetrin måste vara liten, det vill säga Z_u måste vara stor. Är inte detta uppfyllt ger ströminjiceringen ingen mätbar spänningsförändring.

Denna metod använder fortfarande nollpunktsspänningen och de nivåer som presenterades i kapitel 2.6.1 för att trigga och detektera jordfel.

2.6.3 Trench ströminjicering, inverse mode

För helt symmetriska system blir Z_u väldigt stor och kan ses som ett avbrott. I Figur 2.16 resulterar detta i att V_0 blir noll, vilket innebär att någon detektering av trigg nivåerna

inte är möjlig. Genom att köra ströminjiceringen kontinuerligt kan nollpunktsspänningen höjas till en nivå där triggning är möjlig. Vid denna tillämpning återgår systemet till att använda resonanskurvemetoden för att bestämma den optimala inställningen.

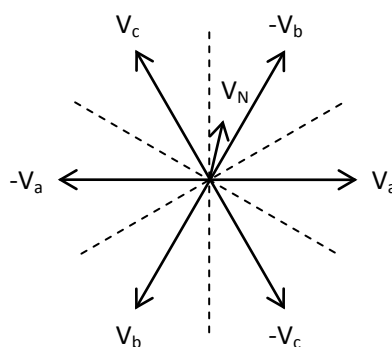
2.6.4 CDC metoden

Metoden bygger på en egen vidareutveckling av Trench delta metod som ska klara alla typer av system, symmetriska såväl som osymmetriska. Den grundläggande teoretiska modellen och ekvationerna kommer från Magnus Akke. CDC står för Compensated Direct Calculation som beskriver metodens arbetssätt. Förändringen från Trench metod kan delas upp i tre bitar:

- Ströminjicering med sex injiceringsspänningar.
- Fler parametrar i modellen.
- Beräkning av kretsens kapacitans.

Då ströminjiceringen sker med en spänningskälla, V_{inj} , finns risken att denna spänning är motriktad nollpunktsspänningen vilket resulterar i en kraftig minskning av den samma. Detta i sin tur leder till att beräkningarna blir felaktiga med en felinställning av nollpunktsreaktorn som följd. Genom att vid varje injicering matcha V_{inj} mot den befintliga nollpunktsspänningen, med avseende på vinkel, kan detta fel nästintill elimineras.

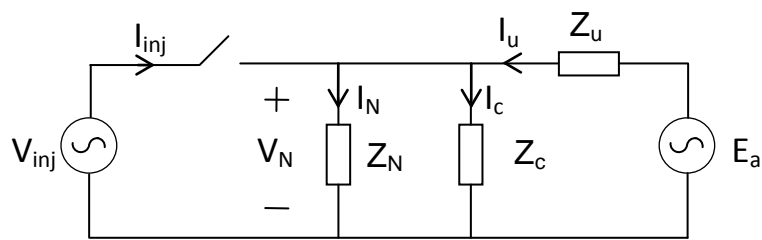
För enkel implementering begränsas de möjliga injiceringsspänningarna till 6 stycken, dessa kan skapas utifrån de tre fasspänningarna i systemet, Figur 2.17.



Figur 2.17 - Vektorer och gränser för ströminjicering

Figur 2.17 illustrerar injiceringsvektorerna, gränserna (streckade linjer) för vilken spänningsvektor som ska användas samt en nollpunktsspänning, V_N . I Figur 2.17 kommer därför injiceringen ske med $-V_b$ då denna är närmst V_N .

För att få en större noggrannhet och mindre känslighet för osymmetrin skapas en ny modell där fler strömmar beaktas. Den nya modell som används i denna metod visas i Figur 2.18.



Figur 2.18 - Ny modell för beräkning av avstämning

Genom mätning av nollpunktsspänningen och nollpunktsströmmen före och under injicering samt injiceringsströmmen kan nya uttryck för avstämningen ställas upp. I stället för att beräkna det aktuella Z_0 (ersättningsimpedansen för Z_N och Z_C) och därmed den förändring av nollpunktsreaktor som krävs, syftar metoden till att direkt beräkna det Z_c som finns i kretsen, ekvation (2.16).

$$Z_c = \frac{V_N^{on} - V_N^{off}}{I_{inj} \left(1 - \frac{V_N^{off}}{E_a} \right) - (I_N^{on} - I_N^{off})} \quad (2.16)$$

Utifrån Z_c kan då nollpunktsreaktorns optimala inställning beräknas. För att få den kompenseringström som behövs, nyttjas att imaginärdelen av Z_n skall vara lika stor som Z_c fast med omvänt tecken. Den kompenseringström, I_{nom} , som behövs kan då beräknas enligt:

$$I_{nom} = -Im \left(\frac{V_N^{nom}}{Z_c} \right) \quad (2.17)$$

Från resultatet i ekvation (2.17) ställs nollpunktsreaktor in på den inställning som ger motsvarande kompenseringström.

3 DLAB

I ett försök att belysa eventuella problem som uppstår vid ökad kablifiering av distributionsnät har LTH och E.ON ingått ett samarbete i DLAB, där DLAB är en akronym för Distribution LABORatory. Målsättningen är att skapa såväl teoretisk som praktisk kunskap inom området. I detta projekt har DLAB använts för att praktiskt testa och utvärdera de metoder för avstärningsautomatik som presenteras i kapitel 2.6.

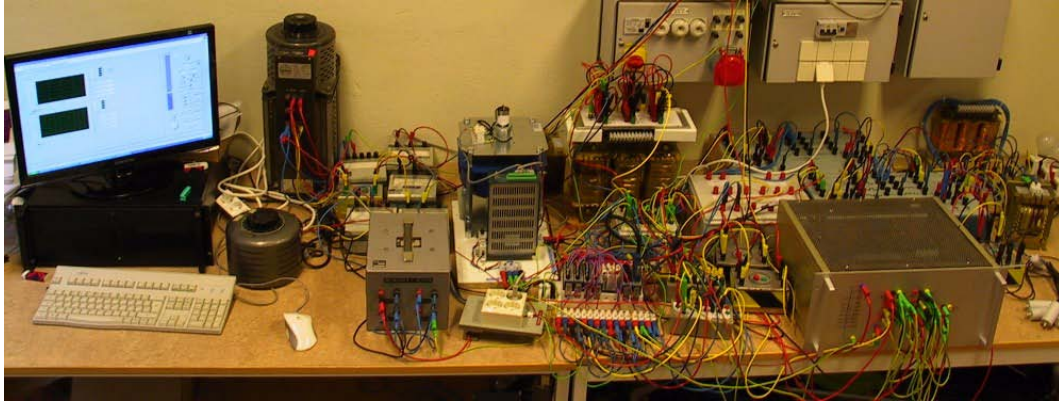


Bild 3.1 - Översiktsbild av DLAB

3.1 Omvandling DLAB – E.ON

Att genomföra praktiska test på mellanspänningsnivå är svårt och medför stora risker, därför har storheterna fått skalas ner i DLAB. För att bestämma lämpliga nivåer i DLAB har vissa regler betraktats.. E.ON använder en mättransformator för att mäta nollpunktsspänning. Denna har ofta 110 V sekundärspänning. Nominell spänning i DLAB har valts så att nollpunktsspänningen blir 100 V, vilket ligger nära 110 V. En annan anledning till valet av spänningsnivå är att regelverket för nollpunktutrustning dikterar att spänningsutsatt del inte får överstiga 100 V. Om ett stumt jordfel skulle inträffa i DLAB läggs hela fasspänningen på 100 V över nollpunkten, vilket är samma som händer vid ett stumt jordfel i det verkliga nätet.

För att skala ner nätet valdes DLABs ström till 5 A för att kunna använda kablar av klenare dimensioner samt att ledningsmodellerna är dimensionerade för den strömmen.

Basimpedansen i DLAB är en följd av neddimensionering av ström och spänning och impedansbasen kan beräknas enligt (3.1).

$$Z_{bas} = \frac{\text{Nätspänning}}{\sqrt{3} \cdot \text{Ström}} \quad (3.1)$$

För att kunna återkoppla labbresultaten till det verkliga nätet används omvandlingsfaktorer. Omvandlingsfaktorer och basstorheter sammanfattas i Tabell 3.1.

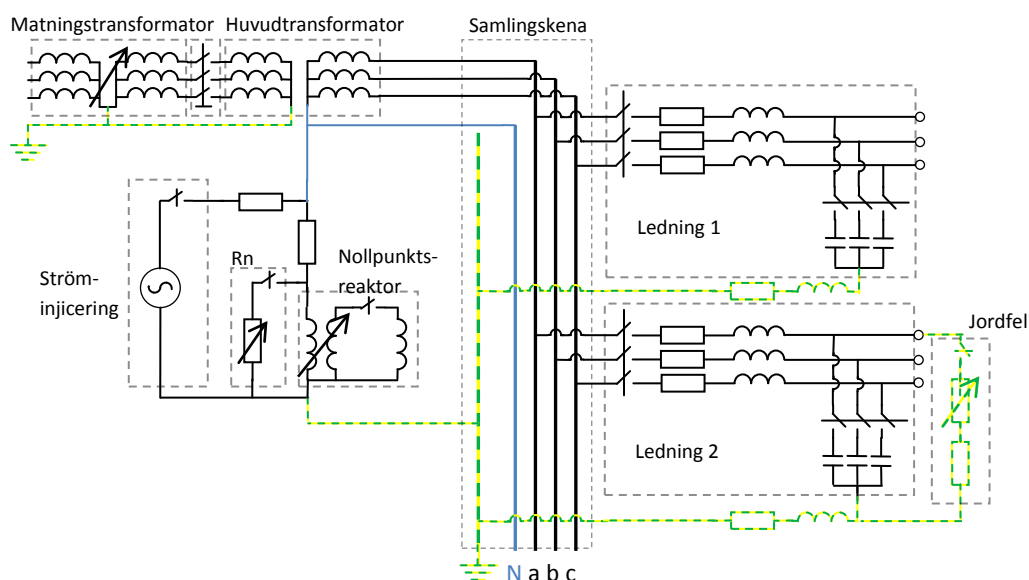
	DLAB	E.ON	Omvandlingsfaktor DLAB - E.ON
Ström	5 A	100 A	20
Nätspänning	173 V	10 kV	58
Nollpunktsspänning	100 V	110 V	1.1
Impedans	20 Ω	58 Ω	2.9

Tabell 3.1 - Omvandling DLAB - E.ON

Om inget annat anges är de storheter som omnämns i rapporten angivna i DLAB värden.

3.2 DLAB uppställningen

Uppkoppling av DLAB kan delas upp i två huvuddelar, den första är de komponenter, transformatorer, spolar m.m. som utgör själva kopplingen som representerar nätet. Den andra delen är den utrustning som används för att göra diverse mätningar och styra olika delar av uppkopplingen. Uppkopplingen som representerar nätet är gjord enligt Figur 3.1 där de streckade rutorna utgör olika väsentliga delar.

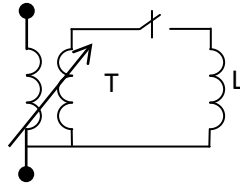


Figur 3.1 – Kopplingsschema, DLAB

Matningstransformatoren och huvudtransformatoren representerar i det verkliga nätet fördelningstransformatoren som nollpunktsutrustningen är kopplad på. Här används matningstransformatoren för att kunna reglera matningsspänningen. Huvudtransformatoren är en 1:1 transformator med galvaniskt isolerade nollpunkter för att möjliggöra inkoppling av nollpunktsutrustningen på sekundärsidan.

3.2.1 Nollpunktsreaktor

I DLAB används som nollpunktsreaktor en fast spole, L, samt en transformator, T, kopplat enligt Figur 3.2. Styrningen av nollpunktsreaktors spolvärde sker genom förändring av transformatorns omsättning.



Figur 3.2 - Nollpunktsreaktor

Omsättningen för transformatorn i uppkopplingen styrs med en dc- motor som regleras med en styrenhet. Styrenheten styrs i sin tur med hjälp av en analog signal på 0 - 10 V.

Nollpunktsreaktors möjliga kompensering har uppmätts genom mätning av ström och spänning samt dess mellanliggande vinkel. Mätningarna har gjorts genom hela transformatoromsättningens styrintervall. Ur dessa mätdata beräknas reaktorns impedans enligt (3.2).

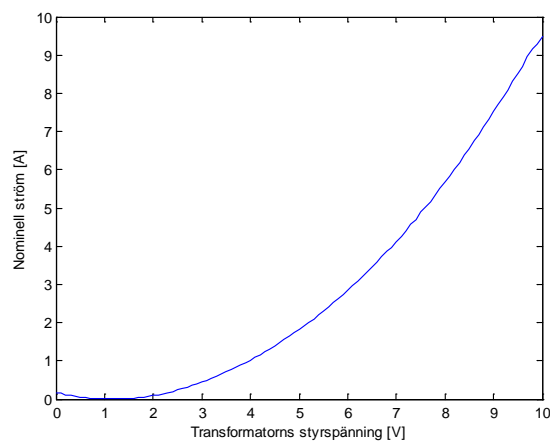
$$Z_{Spole} = \frac{V_{Spole}}{I_{Spole}} \quad (3.2)$$

Nominella kompenseringsströmmen beräknas sedan genom:

$$I_{nom} = Im \left(\frac{V_{nom}}{Z_{Spole}} \right) \quad (3.3)$$

Dessa beräkningar är gjorda med hänsyn till vinkeln mellan ström och spänning för att enbart ta hänsyn till kompenseringsströmmen. Vinkeln uppgår till 75-85° vilket ger en relativt stor aktiv ström. Detta visar på att vridtransformatorn med 6 A märkström inte är optimal för denna tillämpning.

Svepning av transformatoromsättningen resulterar i Figur 3.3 som visar den nominella strömmen för de styrspänningar som kontrollerar omsättningen.

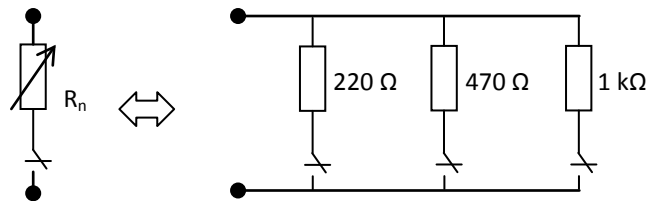


Figur 3.3 - Samband mellan transformatorns styrspänning och nominell ström

Ovanstående figur illustrerar att nollpunktsreaktorn ger en maximal kompenseringström på ca 9 A. Spolens storlek anges därför vara 9 A. Styrningen av transformatorn är i LabVIEW konverterad till nominell ström enligt Figur 3.3.

3.2.2 Nollpunktsmotstånd

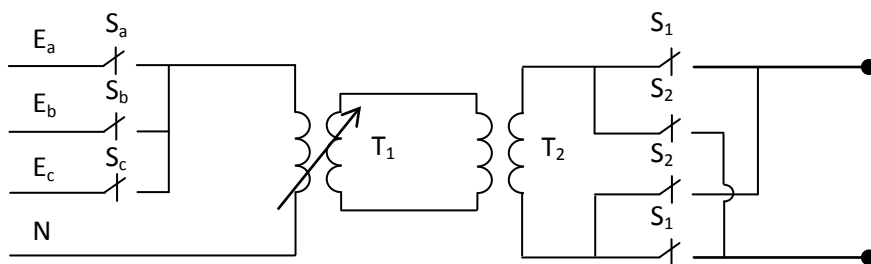
Nollpunktsmotståndet är kopplat parallellt med nollpunktsreaktorn och utgörs av tre parallellkopplade motstånd av olika storlek, Figur 3.4. Dessa kan kopplas till och från individuellt med hjälp av tre reläer och skapar då ett varierbart motstånd med åtta steg.



Figur 3.4 - Nollpunktsmotstånd

3.2.3 Ströminjicering

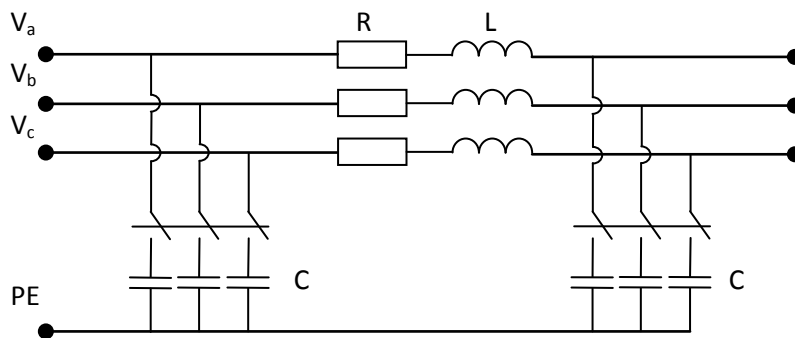
För att skapa ströminjicering med sex olika spänningsvektorer, se kapitel 2.6.4, används reläerna S_a , S_b och S_c för att välja vilken fas som ska nyttjas, Figur 3.5. Brytarna är åtskilda och kan med hjälp av LabVIEW implementeringen aldrig vara slutna samtidigt för att undvika kortslutning mellan två faser. För att inte påverka systemet för mycket och riskera att trigga nollpunktsspänningsskydden transformeras spänningen ner från 100 V till 2 V i transformator T_1 . Transformator T_2 har omsättning 1:1 och används som en avskiljning mellan T_1 och resten av systemet. Slutligen används de tvåpoliga reläerna S_1 och S_2 för att bestämma vektorns polaritet. Implementeringen i LabVIEW förhindrar reläerna från att vara slutna samtidigt.



Figur 3.5 – Ströminjicering

3.2.4 Ledningsmodell

I DLAB används två färdiga pi-länkar för att representera två ledningar. Dessa är konstruerade enligt Figur 3.6. Med brytarna vid kapacitanserna fås möjligheten att representera två storlekar på ledningarna, detta approximativt då både R och L är oförändrade då extra kapacitans kopplas på. För att få möjligheten att testa fler ledningslängder finns även möjligheten att manuellt koppla in ytterligare någon parallell kapacitans.



Figur 3.6 – Ledningsmodell

Storleken på de ingående komponenterna i ledningsmodellerna är ca: $C=16 \mu\text{F}$, $R=1,6 \Omega$ och $L=7 \text{ mH}$. I projektet benämns de fyra olika konfigurationerna av pi-länkarna med mängden inkopplad kapacitans, det vill säga 16, 32, 48 och $64 \mu\text{F}$.

För att teoretiskt beräkna nätets kompenseringsbehov i nominell ström beräknas först impedansen sett från anslutningspunkterna, $Z_{ledning}$. Från symmetriska komponenter kan sambandet (3.4) härledas.

$$Z_{spole} = \frac{Z_{ledning}}{3} \quad (3.4)$$

Den nominella kompenseringsström som erfordras beräknas enligt ekvation (3.3) och resulterar i Tabell 3.2.

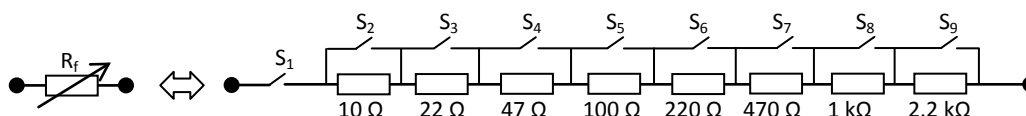
Ledningskapacitans [μF]	Inställning [A]
16	1.52
32	3.02
48	4.55
64	6.05

Tabell 3.2 - Beräknade inställningsvärden

Motsvarande längd på verkliga kablar kan approximeras till en km per 0.1 A kompenseringsström i DLAB.

3.2.5 Jordfel

Det varierbara jordfelsmotståndet representeras av åtta seriekopplade resistorer, Figur 3.7. Reläerna $S_2 - S_9$ kopplar förbi respektive motstånd och kan därför förändra den totala jordfelsresistansen i 256 steg från 0 – 4069Ω . Relä S_1 används för att bortkoppla jordfelet helt.



Figur 3.7 - Jordfel

3.2.6 Mät- och styrutrustning

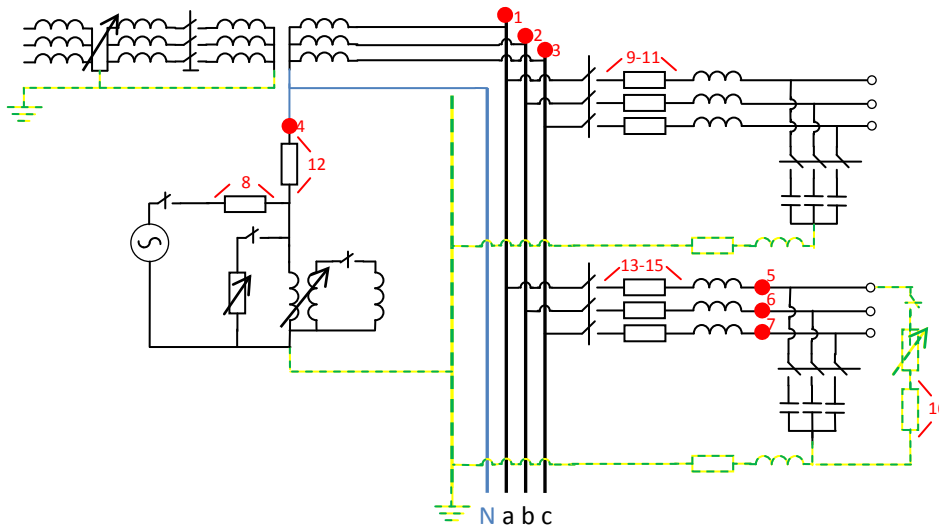
För att med en dator kunna mäta olika värden i systemet och utföra olika styrningar används utrustning från National Instruments. Utrustningen består av ett antal moduler och mjukvaran LabVIEW. Modulerna sitter samlade i ett chassi, NI cDAQ-9172, som via USB kommunicerar med LabVIEW i datorn. De moduler som används i projektet är:

- **NI 9239**, en modul med fyra ingångar för mätning av analoga signaler mellan ± 10 V. Med en maximal samplingshastighet på 50 kHz och en upplösning på 24-bitar täcker den mycket väl projektets behov. Totalt används fyra sådana moduler för att kunna mäta 16 signaler parallellt. [8]
- **NI 9264**, en modul med 16 analoga utgångar. Utsignalen kan varieras mellan ± 10 V. I projektet används denna för att styra omsättningen på transformatorn som bestämmer nollpunktsreaktorns kompensering. [9]
- **NI 9477**, en modul med 32 digitala utgångar. Dessa används för att styra samtliga reläer. [10]

För att mäta systemets fasspänningar som i normaldrift har en toppspänning på 140 V måste spänningarna skalas ner för att passa in i mätmodulens intervall på ± 10 V. Detta är gjort med en spänningsdelningsmodul, innehållande ett 2 k Ω motstånd och ett 100 k Ω motstånd i serie. Mätning över 2 k Ω motståndet ger en nedskalning till ca 2 %, detta gör att även spänningar vid jordfel kan mätas utan problem.

Vid strömmätning används mätmotstånd i serie för att få en mätbar spänning. En avvägning av storleken på motstånden görs för att få tillräckligt hög spänning för att göra en noggrann mätning men samtidigt inte påverka systemet. Ström- och spänningsmätningarna kalibreras sedan i LabVIEW för att ge korrekta värden.

Av de 16 implementerade mätpunkterna, Figur 3.8, behövs inte alla för att kunna implementera avstämningssystemet. En del av mätpunkterna är dessutom av den karaktären att mätningen kan göras i labbet men det är omöjligt i verkliga nät, som till exempel att mäta strömmen i ett jordfelsställe. Dessa punkter används enbart i kontrollsyfte och inte för att styra någon utrustning.



Figur 3.8 - Mätpunkter i kopplingschemat

Tabell 3.1 visar en förteckning av mätpunkterna illustrerade i Figur 3.8.

Kanal #	Fysisk kanal	Beteckning	Beskrivning
1	Mod 1 – AI00	V_a	Spänning på samlingsskenan, fas a
2	Mod 1 – AI01	V_b	Spänning på samlingsskenan, fas b
3	Mod 1 – AI02	V_c	Spänning på samlingsskenan, fas c
4	Mod 1 – AI03	V_n	Nollpunktsspänning
5	Mod 2 – AI00	V_{a_fel}	Spänning i felstället, fas a
6	Mod 2 – AI01	V_{b_fel}	Spänning i felstället, fas b
7	Mod 2 – AI02	V_{c_fel}	Spänning i felstället, fas c
8	Mod 2 – AI03	I_{inj}	Injiceringsström
9	Mod 3 – AI00	I_a (Ledning 1)	Ström i ledning 1, fas a
10	Mod 3 – AI01	I_b (Ledning 1)	Ström i ledning 1, fas b
11	Mod 3 – AI02	I_c (Ledning 1)	Ström i ledning 1, fas c
12	Mod 3 – AI03	I_N	Nollpunktsström
13	Mod 4 – AI00	I_a (Ledning 2)	Ström i ledning 2, fas a
14	Mod 4 – AI01	I_b (Ledning 2)	Ström i ledning 2, fas b
15	Mod 4 – AI02	I_c (Ledning 2)	Ström i ledning 2, fas c
16	Mod 4 – AI03	I_f	Jordfelsström

Tabell 3.3 - Förteckning över mätpunkter

3.3 Mjukvara - LabVIEW

I projektet används LabVIEW vilket är ett grafiskt programmeringsverktyg från National Instruments. Programmeringen i LabVIEW består av två delar och görs i två gränssnitt. Det första är programmeringsgränssnittet som är blockbaserat och innehåller själva programmet. Detta innehåller ett stort bibliotek av färdiga block men det är även enkelt att implementera egna funktioner.

Det andra är användargränssnittet som bland annat innehåller grafer, indikatorer och kontroller som används för att övervaka och styra programmet. I ett färdigt program är

det detta användaren möts av och använder. Det användargränssnitt för DLAB som används i projektet visas i bilaga 10.1.

3.3.1 Dataloggning

Förutom styrningen och realtidspresentation av mätsignalerna, har en viktig funktion implementerats i användargränssnittet. Detta är möjligheten att göra en dataloggning, det vill säga spara undan mätvärdena. I en dataloggning stegar programmet igenom nollpunktsreaktorn i steg som användaren väljer, mellan 0.1 A till 3 A. I varje steg sparas ett antal värden undan till en *.lvm-fil, en textfil som sedan kan behandlas av till exempel Matlab eller Excel. När dataloggningen är färdig innehåller filen mätvärden för hela nollpunktsreaktorns kompenseringintervall, 0 – 9 A.

4 Utvärderingsmetoder för avstämningsautomatik

För att kunna jämföra de olika metoderna för automatavstämning med varandra behövs någon form av testmetod. Utvärderingen av metoderna behandlas ur olika aspekter och resultatet redovisas sedan i kapitel 5.

4.1 Utvärdering av de olika metoderna

I utvärderingen av de olika metoderna har stor vikt lagts på att kontrollera hur väl de ställer in sig, det vill säga hur nära resonanspunkten automatavstämningen hamnar. Övriga parametrar som används för att utvärdera metoden är korrigeringshastighet och hur svår metoden är att implementera.

4.1.1 Kontrollmätning och nätkonfiguration

För att testa hur väl inställningen sker i de olika metoderna görs först en kontrollmätning. Denna består av svepning av nollpunktsreaktorn för olika konfigurationer på distributionsnätet. Under svepningen har ett lågohmigt ($32\ \Omega$) jordfel använts för att efterlikna ett stumt jordfel. Utifrån dessa mätningar kan den optimala inställningen identifieras som den punkt där inställningen av nollpunktsreaktorn ger den minsta jordfelsströmmen. Varje svepning är gjord i 31 steg, där stegen motsvarar en förändring av nominell kompensering på 0.3 A. För att få bättre upplösning interpoleras mätdatan innan minpunkten bestäms.

För mätningarna används fyra olika stora distributionsnät, representerat av två ledningsmodeller där antalet totalt inkopplade kapacitanser per fas varieras från en till fyra, Figur 3.6. Distributionsnäten modifieras på olika sätt för att representera verkliga nät av olika karaktär. De modifieringar som gjorts är följande:

- **Oförändrat**, det vill säga att näten är symmetriska.
- **Liten kapacitans**, en kapacitans på $2\ \mu\text{F}$ som parallellkopplas med befintlig kapacitans i en fas. Detta görs i syfte att skapa en liten osymmetri.
- **Stor kapacitans**, en kapacitans på $8\ \mu\text{F}$ som parallellkopplas med befintlig kapacitans i en fas. Detta görs i syfte att skapa en stor osymmetri.

I de osymmetriska näten utförs kontrollmätningen både med jordfel i den fasen med extra kapacitans och med jordfelet i en av de övriga faserna. Detta för att se eventuell skillnad på den optimala inställningspunkten beroende på i vilken fas jordfelet inträffar.

4.1.2 Identifiering av optimal inställning

I analysen används olika sätt för att få fram den inställningspunkt som de olika metoderna resulterar i. För resonanskurvemetoden görs en dataloggning och från dessa mätdata identifieras punkten med högsta nollpunktsspänningen, vilket i teorin motsvarar resonanspunkten. Detta har gjorts för de olika nätkonfigurationerna.

I Trench stöminjiceringsmetod har tre nya mätserier använts, dessa kommer från dataloggning gjord med olika spänningar applicerade för ströminjiceringen. De tre spänningarna som använts är ca 10 V men fasskiljda 120°. Tillsammans med mätserierna för resonanskurvan kan nu systemets impedans räknas ut enligt ekvation (2.15), beräkningarna leder till kurvor, där nollgenomgången ska motsvara optimala inställningspunkten.

Metoden Inverse mode som Trench använder testas på samma sätt som resonanskurvemethoden, dock med skillnaden att ströminjiceringen är aktiv. Testet med inverse mode är bara gjort för nätkonfigurationerna med symmetri. Anledningen till det är att metoden bara kan användas för symmetriska system.

För utvärderingen av CDC metoden görs först en kontroll av att teorin stämmer, det vill säga att oavsett startpunkt fås direkt den optimala inställningspunkten av beräkningen enligt ekvation (2.16). Detta är kontrollerat genom att plotta resultatet för ett flertal startpunkter. För de olika nätkonfigurationerna har sedan startpunkterna begränsats till tre stycken, 0, 4.5 och 9 A. Slutligen har ett medelvärde beräknats utifrån dessa tre mätpunkter.

4.2 Snedavstämning

När det gäller snedavstämning har under arbetet ett par frågeställningar utretts. Det som har kontrollerats är:

- Problem med att ligga i resonanspunkten. Fås oönskade svängningar eller andra oönskade effekter.
- Behovet av snedavstämning för att nå en fullständig kompensering.
- Dynamisk eller fast snedavstämning beroende på nätkonfiguration.

Dessa frågor har besvarats utifrån de mätningar som är gjorda för att kontrollera de olika metoderna. Främst behovet av snedavstämning och storleken av den, är resultat av de avvikelser som de olika avstämningsmetoderna ger upphov till. För att se om det innebär problem att ligga i resonanspunkten har ström och spänningskurvorna för olika resonanspunkter betraktats.

4.3 Triggnivå

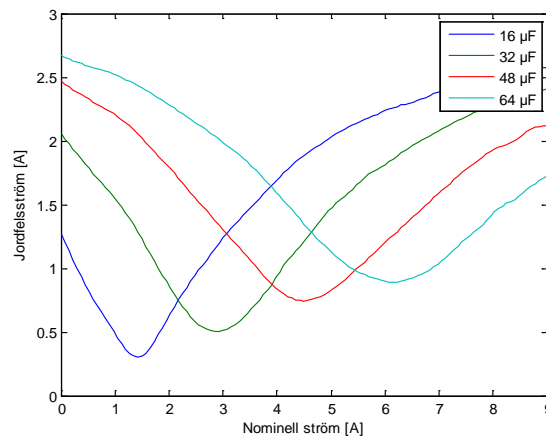
E.ON accepterar en felkompensering på max 5 A innan autokompenseringen måste reagera. Detta motsvarar i DLAB 0.25 A men då detta är en maxgräns används istället 0.2 A som gräns. För att kontrollera lämplig triggnivå görs först en avstämning av det befintliga nätet och nollpunktsspänningen mäts. Därefter utökas nätet med kapacitanser som höjer behovet av kompenseringström med 0.2 A och förändringen i nollpunktsspänning mäts. Förändringen presenteras som procent av nollpunktsspänningen före utökningen.

5 Resultat

I detta kapitel presenteras resultatet av de tester som är gjorda under arbetet. Indelningen har gjorts efter den prioritet som har lagts på de olika momenten.

5.1 Inställningspunkt

Från kontrollmätningen av den optimala inställningspunkten fås ett antal strömkurvor, Figur 5.1 visar resultatet för de fyra olika distributionsnäten i symmetri. Liknande kurvor fås för de modifieringar som görs på nätet.



Figur 5.1 - Kontrollmätning av resonanspunkt

Från strömkurvorna identifieras den optimala inställningspunkten för de olika nätkonfigurationer som testas. Resultatet presenteras i Tabell 5.1.

Ledningskapacitans [μF]	Osymmetri i fas a [μF]	Inställningspunkt [A]	
		Fel i fas a	Fel i fas b
16	0	1,42	
32	0	2,85	
48	0	4,50	
64	0	6,15	
16	2	1,42	1,50
32	2	2,92	3,00
48	2	4,50	4,57
64	2	6,22	6,37
16	8	1,42	1,72
32	8	2,92	3,30
48	8	4,57	4,95
64	8	6,15	6,60

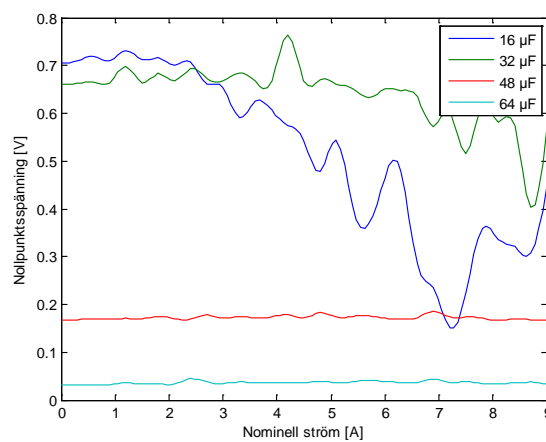
Tabell 5.1 - Optimal inställningspunkt för olika nät

Resultaten visar att ett nät med en given ledningskapacitans kan ha olika optimala inställningspunkter beroende på osymmetrin. Inställningspunkten då jordfel inträffar i fasen med osymmetri är i stort sett identisk med inställningen vid symmetri. Detta är en

följd av att osymmetrin kortsluts vid ett stumt jordfel och därför inte påverkar systemet. Då jordfelet inträffar på en av de andra faserna kommer osymmetrin påverka systemets optimala inställning. Systemet kan i detta läge kräva mer eller mindre kompensering beroende på om osymmetrin består av mer eller mindre kapacitans i förhållande till de andra faserna. Storleken på osymmetrin kommer att avgöra hur stor skillnaden blir.

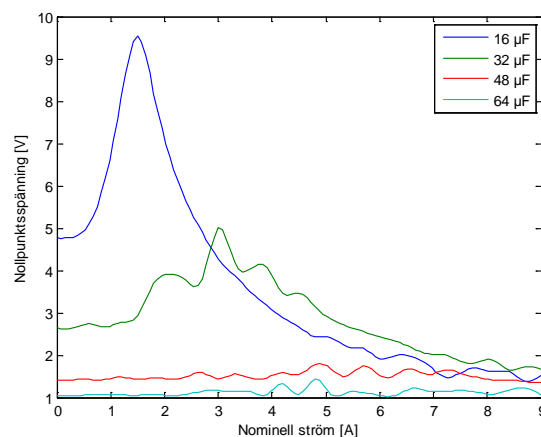
5.1.1 Resonanskurva

Nollpunktsspänningen som uppmäts under dataloggningarna har olika karaktär beroende på nätkonfigurationen. Resultatet presenteras därför i tre grafer som representerar de fyra olika stora distributionsnäten i symmetri, med $2 \mu\text{F}$ osymmetri och med $8 \mu\text{F}$ osymmetri.



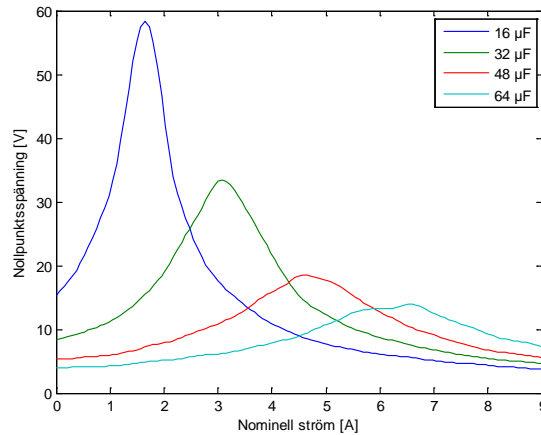
Figur 5.2 - Nollpunktsspänning i nät med symmetri

Figur 5.2 visar nollpunktsspänningen för de fyra distributionsnäten vid symmetri. Nivån på kurvorna är här i samma storleksordning som brusets och utgör därför ingen bra grund för att bestämma resonanspunkten.



Figur 5.3 - Nollpunktsspänning i nät med $2 \mu\text{F}$ osymmetri

Kurvorna i Figur 5.3 visar nollpunktsspänningarna vid 2 μF osymmetri. Resultatet visar att för de mindre näten blir osymmetrin mer signifikant och resonanspunkten blir lättare att identifiera. De två stora näten har så lite osymmetri att ingen resonanspunkt med säkerhet kan fastställas. Enligt tillverkarna av utrustningen borde resonanspunkten kunna fastställas för dessa spänningsnivåer i verkliga nät.



Figur 5.4- Nollpunktsspänning i nät med 8 μF osymmetri

I Figur 5.4 är osymmetrin på 8 μF stor även för de största näten och resulterar i en stor nollpunktsspänning. På dessa nivåer är resonanspunkten lätt att detektera men spänningarna är så höga att nollpunktsspänningsskydden skulle ha löst ut i samtliga fall.

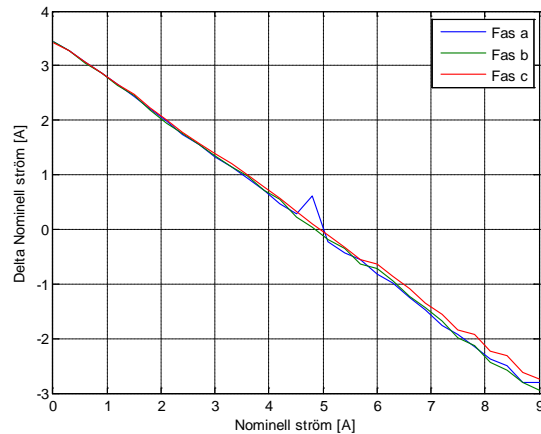
Ledningskapacitans [μF]	Osymmetri [μF]	Inställningspunkt [A]
16	0	(1,20)
32	0	(4,20)
48	0	(6,90)
64	0	(2,40)
16	2	1,50
32	2	3,00
48	2	(4,87)
64	2	(4,80)
16	8	1,65
32	8	3,07
48	8	4,57
64	8	6,60

Tabell 5.2 – Resonanspunkt

I Tabell 5.2 redovisas de inställningspunkter som metoden resulterar i vid olika distributionsnät och modifikationer. Inställningspunkterna som är inom parantes är resultatet från en resonanskurva med så låg nollpunktsspänning att inte resonanspunkten med säkerhet kan fastställas, det vill säga att nätkonfigurationen upplevs som symmetrisk.

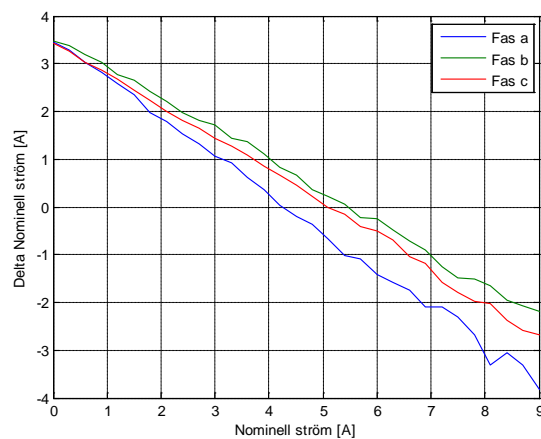
5.1.2 Trench ströminjicering, deltaberäkning

Utifrån ekvation (2.15) fås i varje spolposition ett värde på den förändring som krävs för att komma till den optimala inställningspunkten. Genom plottning av dessa värden fås grafer som Figur 5.5 och Figur 5.6. Figurerna är två exempel på hur resultatet ser ut, de övriga nätkombinationerna har liknande utseende fast med andra nollgenomgångar.



Figur 5.5 – Deltaberäkning för 48 µF nät vid symmetri

Figur 5.5 illustrerar deltaberäkningen för ett 48 µF stort distributionsnät vid symmetri. Då nätet är symmetriskt ger injicering i samtliga faser likartade resultat, i detta fall är nollgenomgången vid ca 5 A. Från kurvans lutning kan det fastställas att det kan krävas flera korrigeringar för att nå den optimala inställningspunkten. En optimal kurva hade haft den negativa lutningen ett.



Figur 5.6 - Deltaberäkning för 48µF nät vid 2µF osymmetri

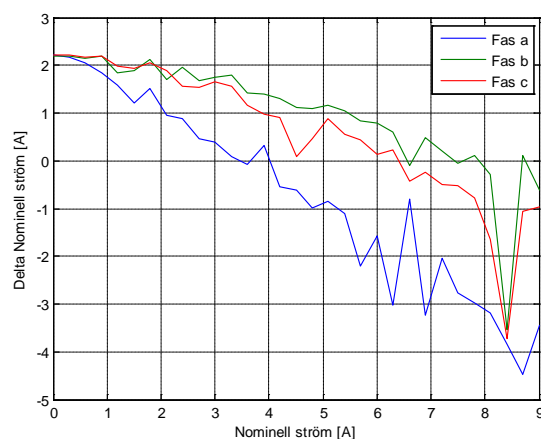
Vid osymmetri blir resultatet beroende av vilken fas som används vid injiceringen, vilket kan ses i Figur 5.6. Jämförs värdena mot den kontrollmätning som är gjord tidigare ger injicering i fas *a* bäst resultat. Detta är ett viktigt resultat då osymmetrin under mätningen är kopplad i fas *a*.

Ledningskapacitans [μF]	Osymmetri fas a [μF]	Inställningspunkt [A] vid Injicering i		
		Fas a	Fas b	Fas c
16	0	1.54	1.8	1.84
32	0	2.51	3.79	3.94
48	0	5.02	4.84	4.95
64	0	6.6	6.52	6.64
16	2	1.68	1.69	1.84
32	2	2.81	3.16	3.56
48	2	4.24	5.44	5.1
64	2	5.81	7.24	6.75
16	8	1.5	1.46	1.42
32	8	3.11	2.96	2.89
48	8	4.87	4.65	4.57
64	8	6.71	6.41	6.37

Tabell 5.3 - Inställningspunkt vid deltaberäkning

Tabell 5.3 visar en sammanställning över de inställningspunkter som fås för de olika nätkonfigurationerna.

Resultaten ovan är för injicering med 10 V, vilket egentligen är en för hög spänning i förhållande till skyddens utlösningstränser. En mätserie har därför gjorts med den injicerade spänningsnivån sänkt till 3 V. Resultatet för 48 μF nätet vid symmetri visas nedan.

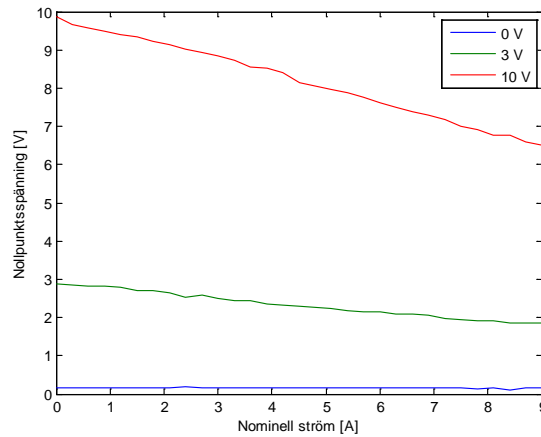


Figur 5.7 - Ny beräkning av delta för injicering med 3 V

Skillnaden är markant jämfört med att injicera med 10 V vilket syns tydligt vid jämförelse med Figur 5.5. Resultaten vid 3 V injicering är så dåliga att de inte kan användas för att göra någon bra inställning i DLAB.

5.1.3 Trench ströminjicering, inverse mode

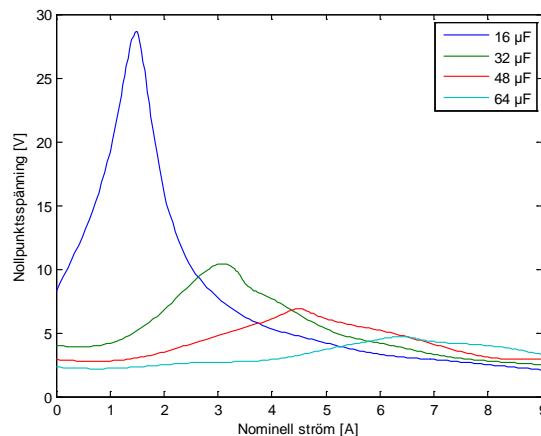
Mätningen av nollpunktsspänning i de symmetriska näten med permanent injicering resulterar i resonanskurvor med följande utseende.



Figur 5.8 - Nollpunktsspänning vid inverse mode i 48 μ F nät

Figur 5.8 visar tydligt att någon topp i spänningen inte fås med hjälp av denna metod. Därför kan ingen optimal inställningspunkt bestämmas utifrån detta. Anledningen till detta är att konstant injiceringsspänning har använts som strömkälla. Då nollpunktsimpedansen förändras kommer därför den injicerade strömmen variera.

Genom att variera injiceringsspänningen så kan en konstant injiceringsström bibehållas. Detta skapar beteendet av en osymmetri och en resonanskurva kan nu bildas av nollpunktsspänningen. Resonanskurvorna för de symmetriska distributionsnäten illustreras i Figur 5.9. Den injicerade strömmen är i detta exempel 0.1 A.



Figur 5.9 - Nollpunktsspänning vid inverse mode i de symmetriska näten, konstant ström

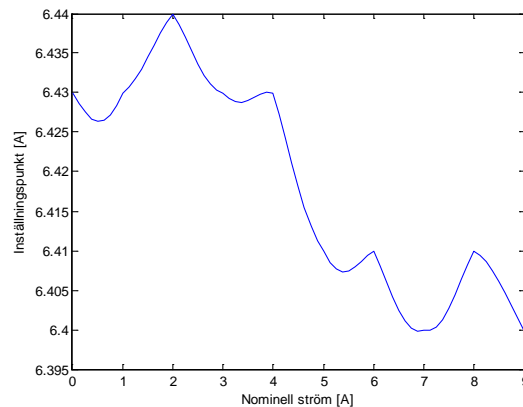
Likt resonanskurvemethoden kan den optimala punkten bestämmas utifrån nollpunktsspänningens resonansstopp. Resultatet från inverse mode i de system som i DLAB upplevs som symmetriska presenteras i Tabell 5.4.

Ledningskapacitans [μF]	Inställning [A]
16	1.48
32	3.09
48	4.5
64	6.41

Tabell 5.4 - Inställningspunkt vid inverse mode

5.1.4 CDC metoden

Beräkningen av den optimala inställningspunkten för start i olika spolinställningar illustreras i Figur 5.10. Som grafen visar så ligger alla punkter inom ett spann på 0.04 A vilket kan approximeras till en rak linje. Den deviation som förekommer kan tillskrivas brus.



Figur 5.10 - Inställningspunkt för CDC metoden, 64 μF symmetriskt nät

Den beräknade inställningspunkten för de olika nätkonfigurationerna och startpunkter som testas presenteras i Tabell 5.5.

Ledningskapacitans [μF]	Osymmetri fas a [μF]	Inställning [A] för startpunkt:			Medelinställning [A]
		0 A	4.5 A	9 A	
16	0	1.58	1.58	1.55	1.57
32	0	3.12	3.13	3.13	3.13
48	0	4.83	4.82	4.8	4.82
64	0	6.44	6.43	6.44	6.44
16	2	1.59	1.6	1.61	1.60
32	2	3.17	3.18	3.15	3.17
48	2	4.83	4.83	4.77	4.81
64	2	6.41	6.44	6.45	6.43
16	8	1.63	1.64	1.52	1.60
32	8	3.14	3.09	3.17	3.13
48	8	4.78	4.63	4.78	4.73
64	8	6.4	6.49	6.37	6.42

Tabell 5.5 - Inställningspunkt vid CDC metoden

5.1.5 Jämförelse av metoder

För att utvärdera hur väl metoderna gör sina inställningar har avvikelsen från de uppmätta kontrollpunkterna beräknats. Beräkningen har gjorts i förhållande till båda kontrollmätningarna, det vill säga med jordfelet både i och ur fas med osymmetrin. Avvikelsen från kontrollpunkterna sammanställs i Tabell 5.6 och Tabell 5.7. Värdena markerade N/A är de som med den aktuella metoden inte går att fastställa.

Ledningskapacitans [μF]	Osymmetri fas a [μF]	Resonans [A]	Delta [A]	Inverse [A]	CDC [A]
16	0	N/A	0.31	0.06	0.15
32	0	N/A	0.56	0.24	0.28
48	0	N/A	0.44	0.00	0.32
64	0	N/A	0.44	0.26	0.29
16	2	0.08	0.32	N/A	0.18
32	2	0.08	0.26	N/A	0.25
48	2	N/A	0.43	N/A	0.31
64	2	N/A	0.38	N/A	0.21
16	8	0.23	0.04	N/A	0.18
32	8	0.15	0.07	N/A	0.21
48	8	0.00	0.13	N/A	0.16
64	8	0.45	0.35	N/A	0.27

Tabell 5.6 – Inställningspunktens avvikelse från kontrollmätningen, jordfel i fas a

Utifrån tabellen kan det ses att både resonans- och inverse metoden har begränsningar då de inte kan fastställa den optimala punkten för alla typer av system. Dock kan de, om metoderna implementeras tillsammans, göra en bra avstämning av systemet.

När det gäller deltametoden och CDC metoden klarar de av att fastställa den optimala punkten för alla de nätkonfigurationer som har testats i DLAB. För att avgöra vilken av dessa som ger bäst resultat har två viktiga faktorer beaktats.

- **Injiceringsspänningen** är betydligt högre för deltametoden än för CDC metoden. Detta för att kunna klara av alla nätkonfigurationer.
- **Avvikelsen** är för CDC metoden jämnare och har en lägre maximal nivå.

Faktorerna antyder att det bästa resultatet uppnås med CDC metoden. Dock är avvikelsen fortfarande ganska stor, ca 0.25 A vilket i det verkliga nätet skulle motsvara 5 A. Då avvikelsen är ganska jämn skulle ytterligare en korrigering av inställningspunkten kunna göras genom att använda en snedavstämning. Möjligen är denna avvikelse en följd av osäkerheten i kontrollmätningen av I_{nom} för nollpunktsreaktorn.

Ledningskapacitans [μF]	Osymmetri fas a [μF]	Resonans [A]	Delta [A]	Inverse [A]	CDC [A]
16	2	0.00	0.24	N/A	0.10
32	2	0.00	0.18	N/A	0.17
48	2	N/A	0.36	N/A	0.24
64	2	N/A	0.23	N/A	0.06
16	8	-0.07	-0.26	N/A	-0.12
32	8	-0.23	-0.31	N/A	-0.17
48	8	-0.38	-0.25	N/A	-0.22
64	8	0.00	-0.10	N/A	-0.18

Tabell 5.7 - Inställningspunktens avvikelse från kontrollmätningen, jordfel i fas b

Tabell 5.7 visar avvikelser mot kontrollpunkten som fås när jordfelet ligger ur fas med osymmetrin. Resultatet är likt det som fås med jordfelet i fas med osymmetrin. Det behövs här göras en avvägning om vilket fall som skall försöka kompenseras. För osymmetriska nät är chansen att jordfelet är ur fas 67 % och i fas 33 % medan för de symmetriska näten upplevs alla jordfel som om de ligger i fas.

5.2 Snedavstämning

Under mätningarna som är gjorda för att identifiera de optimala inställningspunkterna, har inte någon typ av självsvängning kunnat konstateras. Detta tyder på att det inte i DLAB skulle innebära några problem att ligga i resonanspunkten och att det av denna anledning inte är nödvändigt med någon snedavstämning.

Däremot visar resultaten i kapitel 5.1.5 att en snedavstämning är lämplig för vissa metoder för att verkligen uppnå en minimal ström vid jordfel. Speciellt de två metoderna Delta och CDC kan förbättras med hjälp av en snedavstämning. Med en snedavstämning på -0.31 respektive -0.23 A fås följande avvikelser.

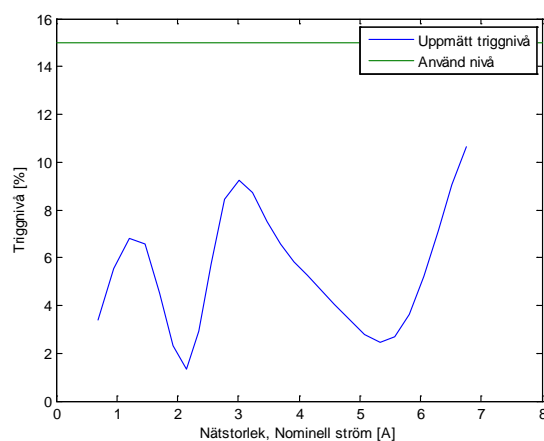
Ledningskapacitans [μF]	Osymmetri fas a [μF]	Delta [A]	CDC [A]
16	0	0.00	-0.08
32	0	0.25	0.04
48	0	0.13	0.08
64	0	0.13	0.05
16	2	0.01	-0.05
32	2	-0.05	0.01
48	2	0.12	0.08
64	2	0.07	-0.02
16	8	-0.27	-0.06
32	8	-0.24	-0.02
48	8	-0.18	-0.07
64	8	0.04	0.04

Tabell 5.8 - Inställningspunktens avvikelse från kontrollmätningen, snedavstämmt

Nivån på snedavstämningen ovan är de respektive avvikelsernas medelvärde. Resultatet visar nu att CDC metoden har en maximal avvikelse på 0.08 A vilket motsvarar 1.6 A i verkliga nätet. Det argumenterar även för att en fast snedavstämning kan användas, det vill säga en snedavstämning oberoende av nätconfiguration.

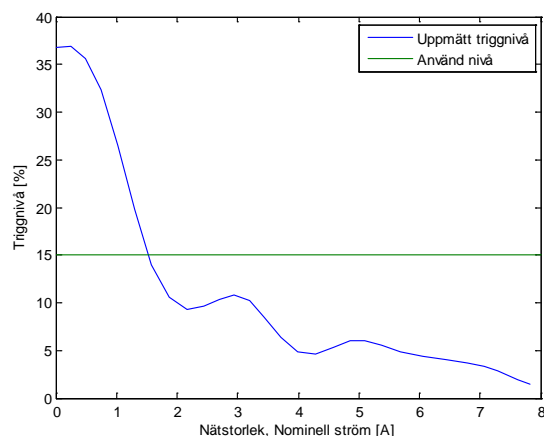
5.3 Trignivå

Resultaten för den trignivå som krävs för att detektera en 0.2 A förändring i kompenseringsbehov illustreras i Figur 5.11 och Figur 5.12. I figurerna visas även den trignivå som E.ON använder sig av. Den nominella strömmen representerar olika stora distributionsnät.



Figur 5.11 - Trignivå vid symmetriskt nät

Nollpunktsspänningen vid symmetri bör i ett idealt nät vara noll och den spänning som uppmäts är resultatet av brus och att DLAB s ledningsmodeller inte är helt symmetriska. Detta innebär att beteendet som visas i Figur 5.11 inte kan beskriva trignivåns karakteristik.



Figur 5.12 - Trignivå vid osymmetriskt nät

I Figur 5.12 visas motsvarande trignivåer för nät som är osymmetriska. Nivåerna här är fullt detekterbara men visar tydligt att det blir svårare ju större nät som är inkopplat. Detta visar att när det är möjligt att trigga på nollpunktsspänningen är det lämpligt att använda sig av dynamiska trignivåer, alternativt en väldigt låg gräns.

Då trigging på nollpunktsspänningen är svår att få stabil och i symmetriska nät i teorin omöjlig, är ett lämpligt alternativ att använda tidsstyrda korrigeringar. Förslagsvis används intervaller på tre till fem minuter då detta i nuvarande system är väntetiden från trigging till åtgärd.

6 Slutsatser

Målet med examensarbetet var att studera olika automatavstämningmetoder och väsentliga konfigurationer av dessa. Det har under arbetets gång visat sig att DLAB är en bra plattform för att göra dessa typer av praktiska försök och har stor potential för vidare försök i distributionsnät. Dock skall det vid läsning av detta kapitel beaktas att slutsatserna är dragna utifrån de resultat som har uppnåtts i DLAB och kanske inte alltid helt korrekt återspeglar det verkliga nätet.

6.1 Metoder för automatavstämning

Som tillverkarna säger så fungerade resonansmetoden bra vid tillräcklig osymmetri men inte alls eller väldigt dåligt då symmetri rådde. Detta innebär att metoden kan fungera väl med friledningar men med kablifierade nät kan symmetrin orsaka svårigheter. Eftersom metoden kräver att spolens position måste svepas igenom tar det lång tid att fastställa rätt inställningspunkt, även om olika tekniker kan användas för att optimera detta och minimera svepintervallet.

Att använda inverse mode ökar tillämpningen av resonansmetoden till att även fungera vid symmetriska nät. Dock fungerar inverse mode dåligt vid osymmetri och måste därför kombineras med en annan metod. Även denna metod är långsam och arbetar i samma tidsram som resonansmetoden. Den största nackdelen med metoden är att en kontinuerlig ström injiceras i systemet vilket kan påverka övrig utrustning såsom skydd.

Deltametoden möjliggör en snabbare korrigerings och fungerar relativt bra i både symmetriska och osymmetriska system. Dock behövdes i DLAB en relativt hög injiceringsspänning för att erhålla en bra inställningspunkt. Denna nivå överskred i vissa fall nollpunktsskyddets spänningsgräns, men då injiceringstiden är kortare än väntetiden för skyddsutrustningen orsakade detta ingen utlösning. För att nå optimal inställningspunkt krävdes ofta två eller fler injiceringar.

CDC metoden var väldigt konsekvent när det gällde inställningspunkten och hittade denna efter första injiceringen. Metoden är därför väldigt snabb och tiden för korrigerings varierar endast beroende på den spolförflyttning som behövs. Likt deltametoden fungerar denna bra för såväl osymmetriska som symmetriska distributionsnät. En stor fördel med denna och deltametoden är att ingen förflyttning av spolpositionen är nödvändig för att beräkna den optimala inställningen. Ett problem med metoden har varit att inställningspunkten ligger strax över den uppmätta kontrollinställningen. Om detta kan tillskrivas metoden eller DLAB är inte säkert, men felet kan lätt korrigeras med en fast snedavstämning.

Även om alla metoderna gav tillfredställande resultat visade sig CDC metoden vara snabbast och påverka systemet minst. Implementering av den här metoden skulle för dagens tillverkare inte innebära några större problem då den största förändringen ligger i mjukvaran.

6.2 Parameterinställningar

Då inga resultat i DLAB har visat att det skulle innebära några problem att ligga i resonanspunkten, är det i DLAB inte nödvändigt att ha någon snedavstämning av systemet. Däremot har det visat sig att några av metoderna har en konstant avvikelse mot den uppmätta kontrollpunkten, vilket skulle kunna avhjälpas genom att införa en snedavstämning. Eftersom DLAB kan ha mer resistiva förluster än ett verkligt system, finns en osäkerhet om resultaten gäller fullt ut för ett verkligt distributionsnät.

När det gäller trignivåer har det visat sig att det är svårt att använda sig av nollpunktsspänningen för att detektera omkopplingar i distributionsnätet. Inte minst vid symmetri där nollpunktsspänningen teoretiskt är obefintlig. För nät med osymmetri har det visat sig att nivån för trigging med fördel kan vara dynamisk, även här blir det i stora nät svårt att använda nollpunktsspänningen. Slutsatsen är att andra metoder för trigging bör övervägas.

Föslagsvis kan schemalagda avstämningar användas i system där ingen förflyttning är nödvändig för att bestämma inställningspunkten. Eftersom trignivån i dagsläget måste överskridas i tre till fem minuter innan korrigeringen sker skulle denna tid vara lämplig för de schemalagda korrigeringarna. Detta skulle innebära att systemet alltid snabbare uppnår optimal avstämning än dagens system. En aspekt som borde beaktas är om systemet klarar att korrigera med så täta mellanrum utan att det ger för stor påfrestning på utrustningen.

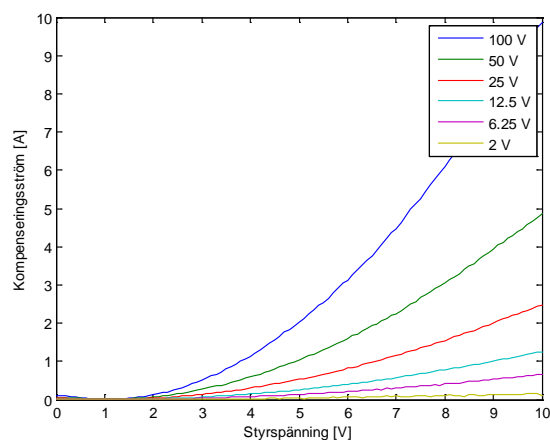
7 Förbättring av nollpunktsreaktorn

Under arbetet har det förekommit resultat som tyder på att uppmätningen av nollpunktsreaktors impedans inte är helt korrekt. Tidigare mätningar tyder på att det finns ett samband mellan nollpunktsreaktors impedans och den spänning som läggs över den. Detta skulle innebära att den nominella strömaxel som används för reaktorn är felaktig. Möjligen kan detta vara orsaken till att CDC metoden hamnar lite fel.

Vidare är vridtransformatorns märkström 6 A vilket innebär att hela kompenseringintervalliet inte kan användas utan att skada utrustningen. För att belysa hur detta påverkar resultatet av arbetet har den använda transformatorn ersatts med en större. Den nya vridtransformatorn har en märkström på 20 A vilket betyder att lindningarna har grövre koppartråd och därmed också lägre resistans.

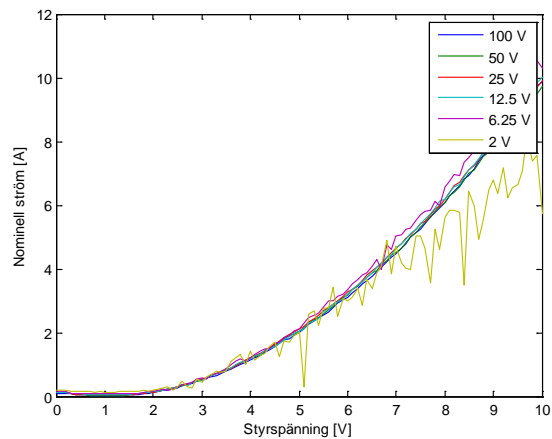
7.1 Implementering

Den nya vridtransformatorn har tillräckligt hög märkström för att nominell spänning ska kunna läggas över den. Därför kan en bättre mätning av nominell ström göras direkt utan att behöva göra impedansberäkningar. För att bestämma nollpunktsreaktors styrsänning som funktion av den nominella strömmen kopplas en spänningskälla med nominell spänning över nollpunktsreaktorn. Genom att mäta nollpunktsströmmen med vinkel kan kompenseringströmmen för olika styrsänningar beräknas.



Figur 7.1 - Kompenseringsström som funktion av transformatorns styrsänning

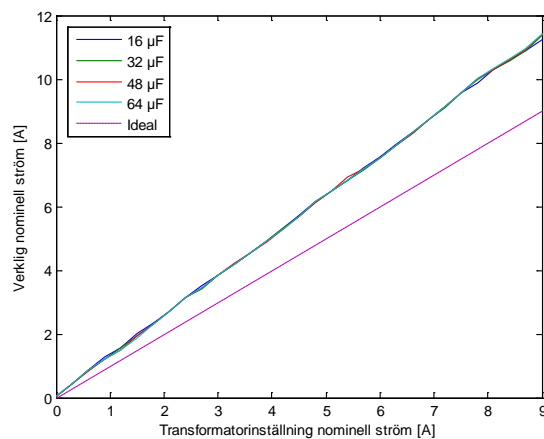
Figur 7.1 illustrerar kompenseringströmmen för sex olika spänningar över nollpunktsreaktorn. För att avgöra om kompenseringströmmen, den reaktiva strömmen, är linjärt beroende av spänningsförändringen multipliceras den med kvoten av nominell spänning och pålagd spänning. Denna beräkning resulterar i den nominella strömmen och illustreras i Figur 7.2.



Figur 7.2 - Samband mellan transformatorns styrsänning och nominell ström

Som Figur 7.2 visar är den nominella strömmen, förutom vid låg spänning är oberoende av den pålagda spänningen. Denna linjäritet gör att en inställning av transformatorn verkligen ger den kompenseringsström som efterfrågas.

Då nollpunktsreaktorn kopplas samman med resten av DLAB orsakar detta en förändring i den verkliga kompenseringsströmmen. Den nominella kompenseringsströmmen uppmäts genom att applicera ett stumt jordfel i modellen, nominell spänning ligger då över nollpunktsreaktorn.



Figur 7.3 - Samband mellan verklig och inställd nominell ström

Figur 7.3 visar förhållandet som finns mellan den eftersträvade strömmen och den ström som verkligen erhålls i nätet. I figuren är den streckade linjen den ström som borde ha uppmätts vid varje inställning. För att kompensera för denna avvikelse används ett polynom för att beskriva kurvan och använda den för kalibrering.

7.2 Resultat

För att kontrollera hur stor inverkan transformatorbytet har repeteras de utvärderingsmetoder som introduceras i kapitel 4 för den nya nollpunktsreaktorn.

7.2.1 Inställningspunkt

Kontrollmätningarna är baserade på mätningar med stumt jordfel som är möjligt på grund av den högre märkströmmen. Kontrollmätningen har bara gjorts med jordfel som inte ligger i samma fas som osymmetrin. Detta då jordfel i samma fas som osymmetrin upplevs precis som ett symmetriskt nät vid stumt jordfel. Vidare har mätningarna begränsats till att inte innefatta inverse mode, eftersom det bara är en specialtillämpning av resonanskurvemethoden.

Ledningskapacitans [μF]	Osymmetri fas b [μF]	Kontroll [A]	Resonans [A]	Delta [A]	CDC [A]
16	0	1.46	1.39	1.49	1.52
32	0	3.00	2.81	3.49	3.04
48	0	4.72	(5.40)	4.93	4.68
64	0	6.34	(6.07)	6.43	6.27
16	2	1.69	1.50	1.55	1.63
32	2	3.15	2.85	2.88	3.16
48	2	4.87	(3.94)	4.59	4.81
64	2	6.41	(5.40)	6.61	6.36
16	8	1.99	1.80	1.81	1.85
32	8	3.49	3.30	3.63	3.35
48	8	5.17	4.87	5.53	5.11
64	8	6.60	7.20	6.86	6.66

Tabell 7.1 - Inställningspunkt för kontrollmätning samt olika metoder

Tabell 7.1 visar de punkter som är resultatet av testerna. Värden inom parantes är osäkra då spänningsnivån är för låg för att med säkerhet fastställa inställningspunkten.

Vad gäller mätningarna för deltametoden är dessa genomförda med den injicerade spänningen 3 V. Det ska här beaktas att det för de osymmetriska näten blir allt större avvikelser från de rätta linjer som eftersträvas och kan därför kräva flera korrigeringar. Metoden funkar dock bra med 3 V för symmetriska nät.

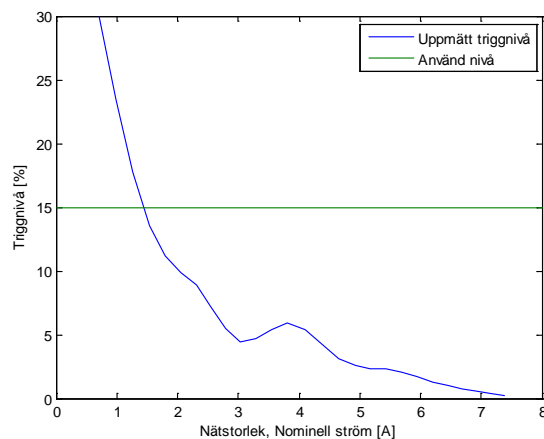
Ledningskapacitans [μF]	Osymmetri fas b [μF]	Resonan s [A]	Delta [A]	CDC [A]
16	0	-0.07	0.02	0.06
32	0	-0.19	0.49	0.04
48	0	N/A	0.21	-0.04
64	0	N/A	0.09	-0.07
16	2	-0.19	-0.14	-0.06
32	2	-0.30	-0.27	0.01
48	2	N/A	-0.28	-0.06
64	2	N/A	0.20	-0.05
16	8	-0.19	-0.19	-0.14
32	8	-0.19	0.14	-0.14
48	8	-0.30	0.36	-0.06
64	8	0.60	0.26	0.06

Tabell 7.2 - Inställningspunkten avvikelse från kontrollpunkten

I Tabell 7.2 presenteras de avvikelser från kontrollinställningen som metoderna resulterar i. Testerna visar att när transformatorn har lägre resistans räcker den osymmetri som finns naturligt även för att bestämma inställningspunkten i 16 μF och 32 μF näten. Från resultaten kan det även avläsas att inställningen för CDC metoden i majoriteten av testerna avviker minst från kontrollmätningen och en snedavstämning är inte längre aktuell.

7.2.2 Triggnivå

För att utvärdera om transformatorbytet har någon inverkan på hur triggnivån skall ställas, utfördes testet av triggnivån igen. Resultatet visas i Figur 7.4 för osymmetriska nät. Karakteristiken är samma som tidigare och dynamisk nivå är lämplig. För symmetriskt nät är nollpunktsspänningen och dess förändring för liten för att göra en bra detektering.



Figur 7.4 - Triggnivå vid osymmetriskt nät

7.3 Slutsatser

De slutsatser som redovisas i detta kapitel belyser de förändringar som upplevs vid bytet av vridtransformatorn.

7.3.1 Metoder för automatavstämning

Med den nya transformatorn bildas fortfarande tydliga resonanstoppar i de osymmetriska näten. Dock bidrar den lägre resistansen i transformatorn till att det även framträder en resonanstopp för 16 och 32 μF näten vid symmetri. Detta visar på att dessa nät inte är helt symmetriska. För alla topparna kan det konstateras att dessa ligger något längre ifrån kontrollmätningen.

Deltametoden är enbart testad med injiceringen satt till 3 V, då detta är en rimlig nivå på injiceringen. Resultatet visar att metoden fungerar betydligt bättre med den nya transformatorn. Men likt tillverkarens uppgifter blir osäkerheten större med ökad osymmetri.

För CDC metoden erhålls i stort sett samma inställningspunkter som innan transformatorbytet. Detta är ett väntat resultat då beräkningarna som görs inte skall påverkas av nollpunktsreaktorn. Kontrollmätningen visar sig nu ligga närmre resultatet för CDC metoden. Detta bekräftar misstankarna om att den nominella strömaxeln inte var helt korrekt innan transformatorbytet.

7.3.2 Parameterinställningar

Den tidigare slutsatsen om snedavstämning gäller fortfarande och inga problem ses med att ligga helt avstämt. Dock behöver resonansmetoden nu en viss snedavstämning för att uppnå minimal jordfelsström medan CDC metoden nu direkt uppnår rätt inställning. Den erforderade snedavstämningen för resonansmetoden är underkompensering med cirka 0.2 A eller motsvarande 4 A i det verkliga nätet, vilket kan jämföras med 5 A som används av E.ON.

Några större skillnader i trignivåerna upptäcktes inte då det är spänningsförändringar som mäts och inte absolut spänningsnivå.

8 Vidare arbeten

Under arbetet har ett flertal frågeställningar dykt upp som inte har kunnat besvaras inom den utsatta tidsramen. Dessa presenteras här tillsammans med funderingar om hur arbetet i detta examensarbete skulle kunna fortsätta.

- De avstämningsapparaturer som har varit förebild för de testade metoderna, är ett par år gamla. Genom sökning på respektive tillverkares hemsida har det framkommit att nyare modeller finns att tillgå. Någon precis information om hur dessa arbetar har inte kunnat hittas men det antyds att metoderna har utvecklats. Det vore därför intressant att ta reda på hur dessa fungerar och om det finns några liknelser med CDC metoden. Kanske finns en liknande metod redan på marknaden idag.
- Vidare tester med lokal kompensering skulle kunna vara fördelaktigt. Dels för att kontrollera strömmarnas beteende och dels för att kontrollera hur metoderna hanterar det.
- Det hade varit intressant att göra en studie om hur automatiken används och konfigureras i befintliga system. Frågan är om utrustningens fulla kapacitet utnyttjas idag.
- För att göra modellen mer noggrann skulle det kunna vara intressant att kartlägga huvudtransformatorns plus- och nollföljdsimpedans. En kontroll av detta skulle kunna klargöra om antagandet, att dessa är försumbara, är korrekt.
- DLAB skulle kunna förbättras genom att hårdvaran för styrning från LabVIEW utökas. Detta skulle möjliggöra implementering av fler funktioner såsom skydd och intermitterenta jordfel. I sin tur skulle detta bättre kunna utvärdera avstämningsmetodernas påverkan i ett verkligt system.

9 Referenser

- [1] Svensk Energi AB , "Kapacitiva jordfelsströmmar i kabelnät på landsbygden, B 17:09," Stockholm, 2009.
- [2] Reinhold Rüdenberg, *Transient Performance of Electric Power Systems*. New York, USA: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1950.
- [3] Matti Lehtonen and Tapio Hakola, *Neutral Earthing and Power System Protection*. Vaasa: ABB Transmit Oy, 1996.
- [4] C. F. Wagner and R. D. Evans, *Symmetrical Components*. New York and London, USA: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1933.
- [5] J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, and Thomas J. Overbye, *Power System Analysis and Design, Fourth Edition*. Toronto, Canada: Thomson, 2008.
- [6] Trench, "User Manual, Earthfault Compensation Controller EFC20i," Leonding, Dokument nummer: 60-3_EFC20i_en, 2007.
- [7] Transfix, "User Manual, Arc Suppression Coil Controller," Toulon, Dokument nummer: w4063590 rev. 0, 2007.
- [8] National Instruments , "Operating instructions and specifications, NI USB-9229/9239," Austin, Dokument nummer: 374184E-01, 2007.
- [9] National Instruments , "Operating instructions and specifications, NI 9264," Austin, Dokument nummer: 374404D-01, 2008.
- [10] National Instruments , "Operating instructions and specifications, NI 9477," Austin, Dokument nummer: 374182C-01, 2009.

10 Bilagor

10.1 Användarinterface - LabVIEW

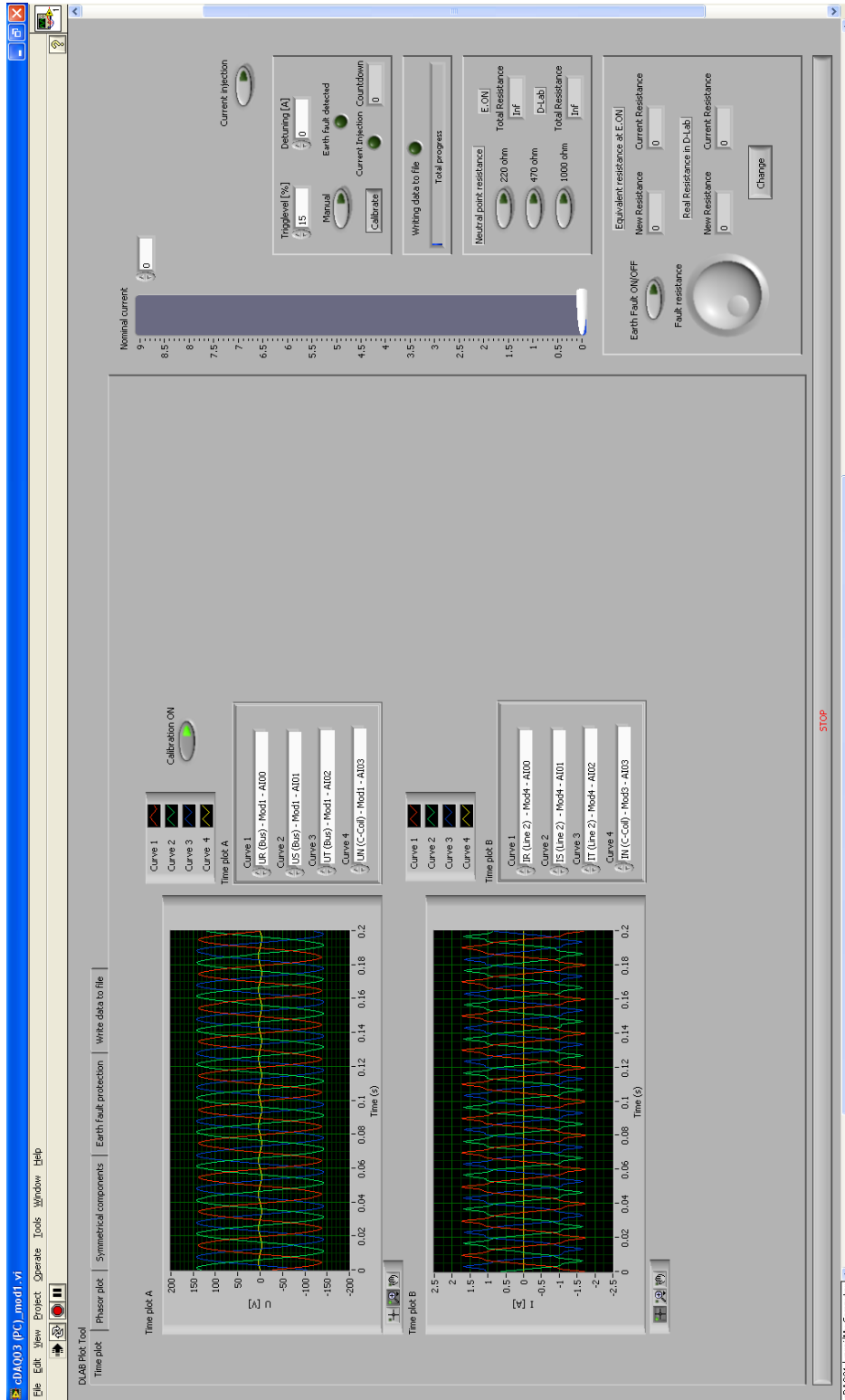


Bild 10.1 - Tidsplot

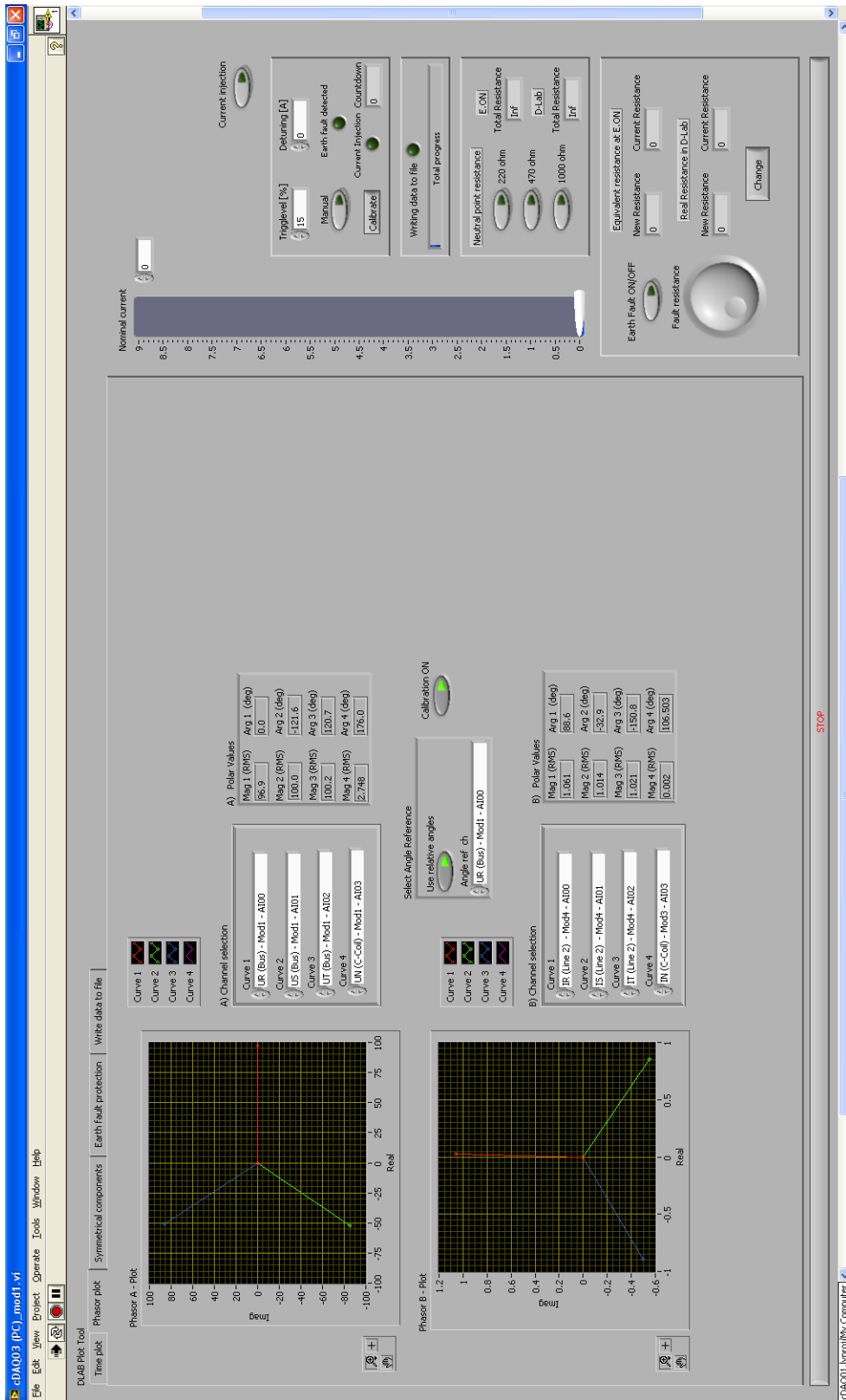


Bild 10.2 - Plot av vektorer

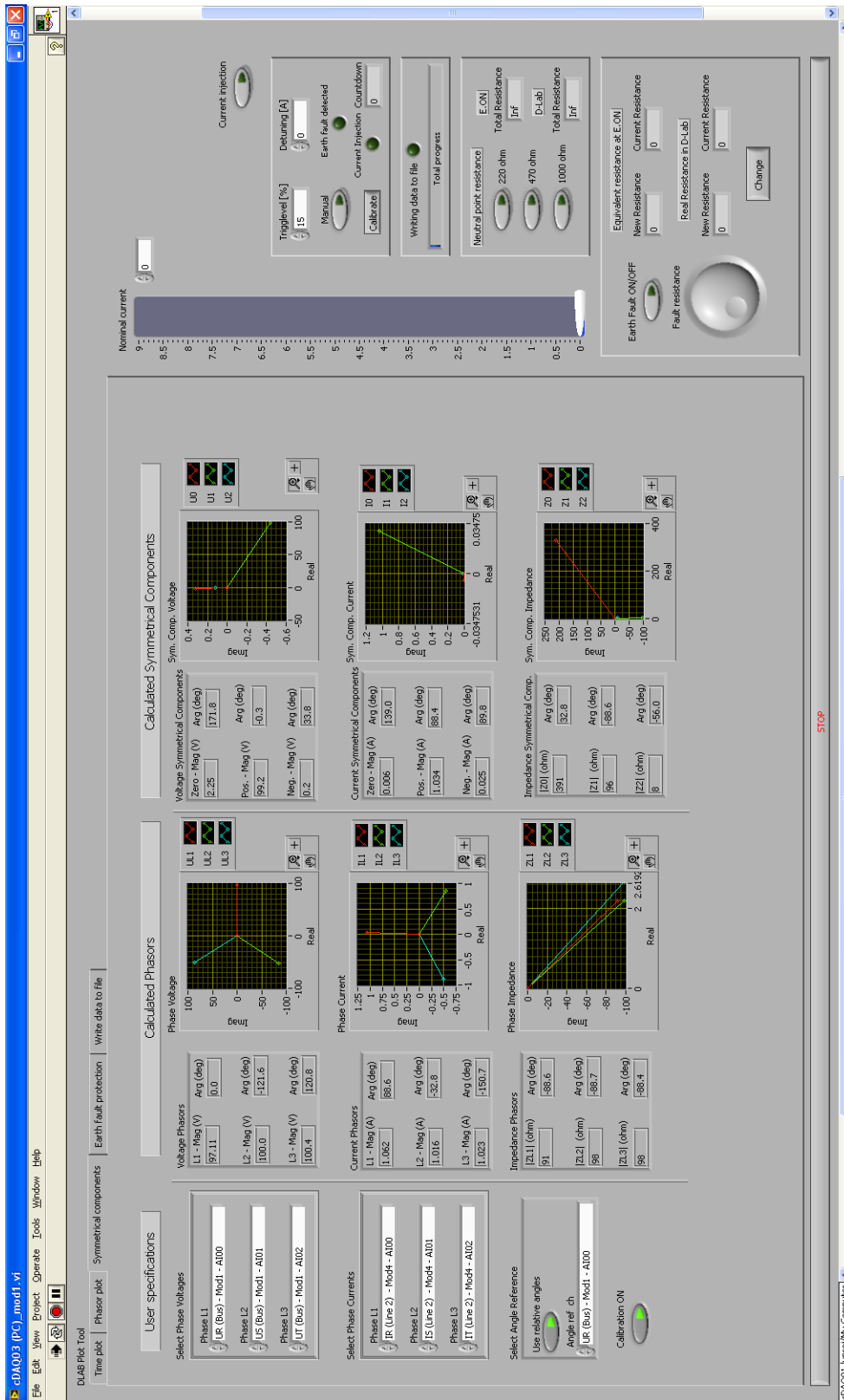


Bild 10.3 - Symmetriske komponenter

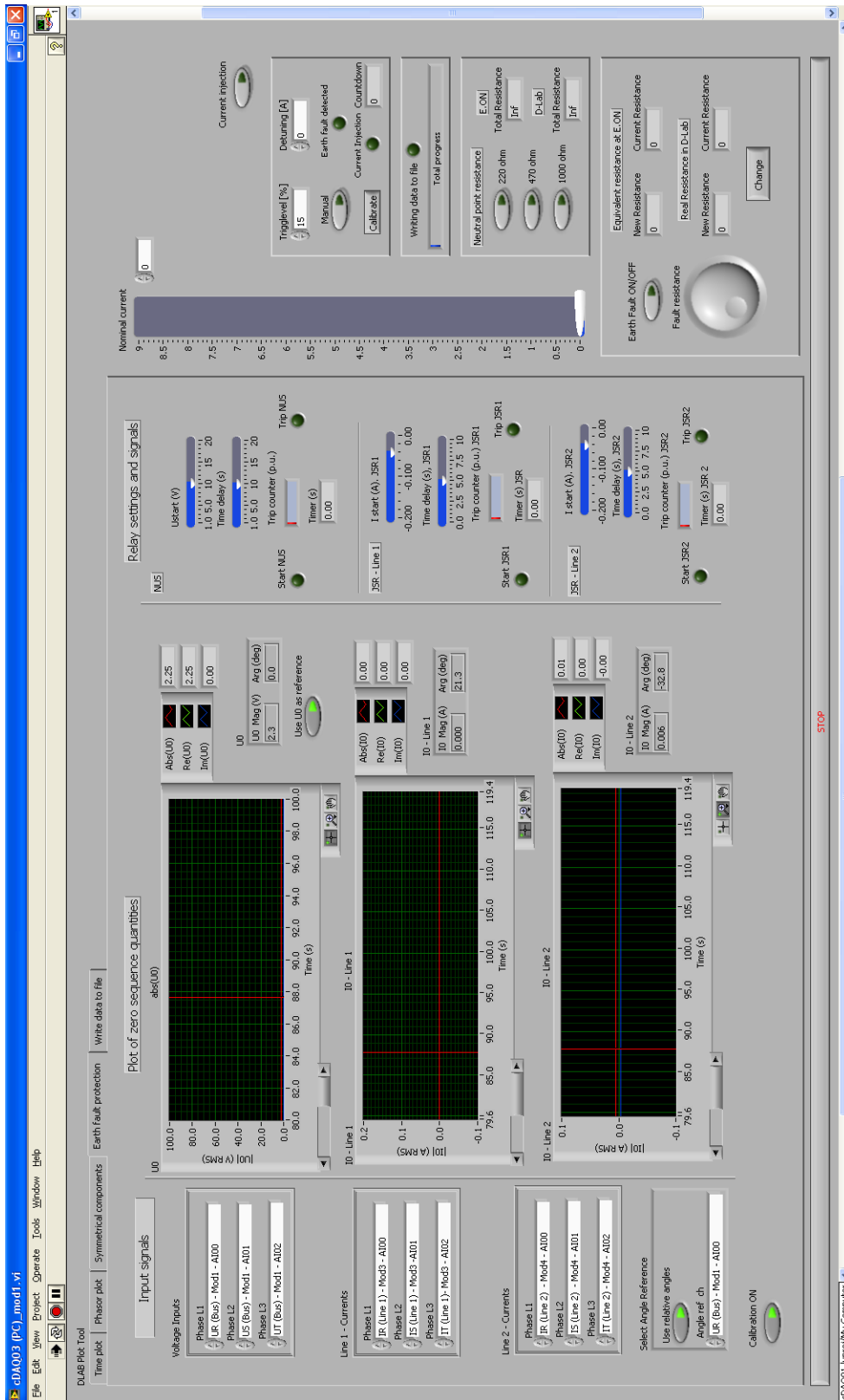


Bild 10.4 - Jordfelsskydd

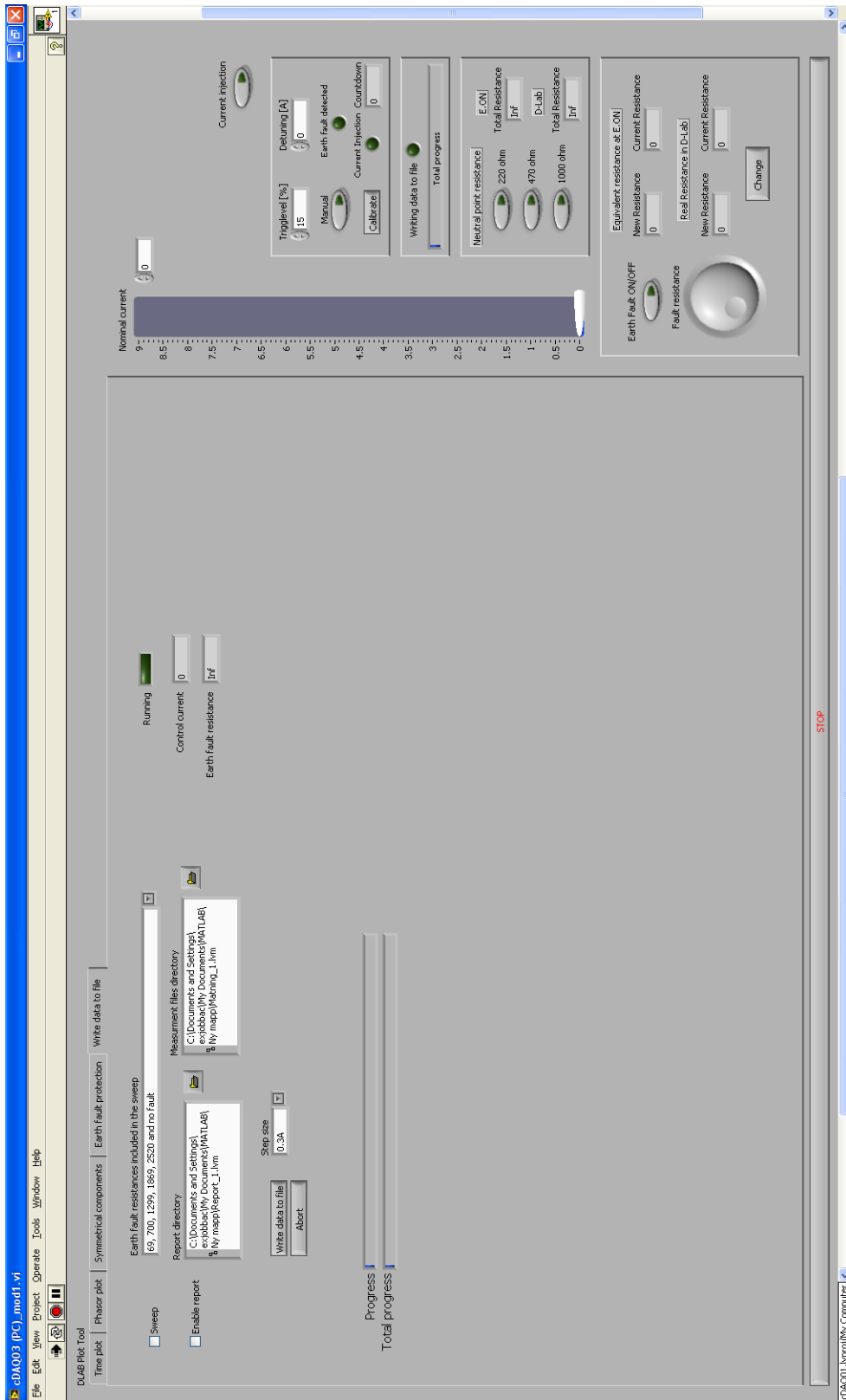


Bild 10.5 - Logging av data