

## Strömfördelning i tvåbrytarställverk

Modellering för utökad förståelse för hur inducerad spänning påverkar fördelning i ett tvåbrytarställverk

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet elektroteknik

Carl-Adam Ryeskog  
Markus Johansson

EXAMENSARBETE INOM HÖGSKOLEINGENJÖRSPROGRAMMET 2022

## Strömfördelning i tvåbrytarställverk

Modellering för utökad förståelse för hur inducerad spänning  
påverkar fördelning i ett tvåbrytarställverk

Carl-Adam Ryeskog  
Markus Johansson



**CHALMERS**

Institutionen för elektroteknik  
*Avdelning: Elkraftteknik*  
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY  
Gothenburg, Sweden 2022

Strömfördelning i tvåbrytarställverk modellering för utökad förståelse för hur inducerad spänning påverkar fördelning i ett tvåbrytarställverk

Carl-Adam Ryeskog  
Markus Johansson

©Carl-Adam Ryeskog, 2022.  
©Markus Johansson, 2022.

Handledare: Anders Lindskog, Svenska kraftnät  
Examinator: Torbjörn Thiringer, Professor - Elektroteknik

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet 2022  
Institutionen för elektroteknik  
Avdelning: Elkraftteknik  
Chalmers tekniska högskola  
SE-412 96 Göteborg  
Telefon +46 31 772 1000

Förstasida: Tvåbrytarställverk

# Förord

Denna rapport har utförts som examensarbete för högskoleingenjör inom Elektroteknik på Chalmers Tekniska Högskola under våren 2022. Projektet har genomförts på Chalmers Tekniska Högskola i samarbete med Svenska kraftnät.

Vi vill tacka industridoktoranden Anders Lindskog som har varit vår handledare. Han har tagit sin tid till att svara på frågor och bidragit med gedigen kunskap och inspiration. Vi vill också tacka vår examinator Torbjörn Thiringer för sina goda råd.

Carl-Adam Ryeskog & Markus Johansson, Juni 2022



## Sammanfattning

Tvåbrytarställverk är (relativt) unikt för de svenska transmissionsnäten. I ett tvåbrytarställverk fördelas strömmarna mellan samlingsskenorna. Mellan ställverkens fack bildas slingor, en för vardera fas, som tar upp inducerad spänning, vilket alstras i ställverket. Det finns misstanke om att den inducerade spänningen påverkar strömfördelningen mellan skenorna. Hur stor denna ström blir beror främst på placeringen av de inkommande och utgående ledningarna. För att ta reda på hur stor påverkan inkommande och utgående ledningar har på strömfördelningen har en beräkning genomförts i Matlab som har validerats genom att utföra praktiska tester på en miniatyrmodell av ett tvåbrytarställverk. Resultatet från studien påvisade att den inducerade ström som bildas i ett ställverk är förhållandevis liten gentemot den ström som redan flyter i ställverket, och således har den inte en inverkan på fördelningen.

Nyckelord: Tvåbrytarställverk, induktion

## Abstract

Two-breaker substation is (relatively) unique to the Swedish transmission networks. In a two-breaker substation, the currents are distributed between the busbars. Loops are formed between the substations compartments, one for each phase, which absorbs induced voltage, which is generated in the substation. The induced voltage forms a current that may influence how the distribution of the currents act. How large this current becomes depends mainly on the location of the incoming and outgoing lines. To find out how much impact incoming and outgoing lines have on the power distribution, a calculation has been carried out in Matlab which has been validated by performing practical tests on a miniature model of a two-breaker substation. The results from the study showed that the induced current formed in a substation is relatively small compared to the current already flowing in the substation, and thus it does not influence the distribution.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>2</b>
1.1	Problembakgrund . . . . .	2
1.2	Syfte . . . . .	2
1.3	Tillvägagångsätt . . . . .	3
1.4	Avgränsningar . . . . .	3
1.5	Precisering av frågeställningen . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Teori</b>	<b>4</b>
2.1	Ställverk . . . . .	4
2.1.1	Tvåbrytarställverk . . . . .	4
2.1.2	Komponenter . . . . .	6
2.2	Inducerad ström i ett ställverk . . . . .	7
2.3	Magnetfält . . . . .	8
2.4	Impedansberäkning . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Case setup</b>	<b>11</b>
3.1	Förstudie . . . . .	11
3.2	Förstudie test 1 . . . . .	11
3.3	Förstudie test 2 . . . . .	12
3.4	Slutsater förstudier . . . . .	12
3.5	Miniatyrmodellen . . . . .	13
3.6	Utrustning . . . . .	16
3.6.1	Frekvensomriktare: PowerFlex 40 . . . . .	16
3.6.2	Strömtransformator: LEM CTSR 0.3-P . . . . .	17
3.6.3	Oscilloskop: Tektronix TSD2004B . . . . .	18
3.7	Matlab - Beräkningar & Uppskalning till verkligheten . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Genomförande</b>	<b>21</b>
4.1	Testutförande . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Resultat</b>	<b>23</b>
5.1	Tabeller . . . . .	23
<b>6</b>	<b>Analys</b>	<b>26</b>
6.1	Resultaten . . . . .	26

## Innehåll

---

6.2	Diskussion . . . . .	27
<b>7</b>	<b>Slutsats</b>	<b>28</b>
7.1	Studiens utfall . . . . .	28
7.2	Etik och hållbarhet . . . . .	29
7.3	Vidare studier . . . . .	29
<b>A</b>	<b>Bilaga A</b>	<b>I</b>
A.1	Simulering av ställverk . . . . .	I
A.2	FFT . . . . .	IV

## Förkortningar

- **AA** - När både inkommande och utgående ledningar placerades i A delen av modellen.
- **AB** - När inkommande ledning placerades i A delen medan utgående placerades i B delen av modellen.
- **BB** - När både inkommande och utgående ledningar placerades i B delen av modellen.
- **BA** - När inkommande ledning placerades i B delen medan utgående placerades i A delen av modellen.

# 1

## Inledning

### 1.1 Problembakgrund

Ställverket är en central del i ett eldistributionssystem där inkommande och utgående ledningar förgrenas och underliggande nät får effekt. Det fungerar som en viktig knutpunkt för att transportera elektrisk effekt från en plats till en annan och finns i olika konstruktionsprinciper. I Sverige är den vanligaste konstruktionsprincipen tvåbrytarställverk. Denna konstruktion är ganska unik för Sverige, då det är ett fåtal andra länder som arbetar med just denna typ av ställverk. I ett tvåbrytarställverk fördelas strömmarna upp mellan samlingssskenorna, kallade A- och B-skena. Det finns misstanke om att inducerad ström påverkar fördelningen, men komponenter så som brytare, frånskiljare, ledningar, skenor och laster kan också ha en påverkan. En asymmetrisk fördelning kan leda till oönskade konsekvenser så som obefogade larm eller överbelastning i brytare.

Mellan ställverkens fack bildas det slingor, en för respektive fas, och dessa kan ses som antenner som tar upp magnetfält som inducerar en ström. Därför finns det ett intresse om att undersöka hur mycket den inducerade strömmen påverkar fördelningen mellan A-och B-skena och hur stor den inducerade strömmen blir. Faserna som inkommer till ställverket ligger i normala fall i samma ordning som utgående, men det finns fall då denna ordning är omkastad. När ordningen är omkastad blir det olika areor för slingorna, vilket bidrar till en skillnad i den inducerade strömmen jämfört med den vanliga ordningen.

### 1.2 Syfte

Syftet med detta arbete är att få en bättre förståelse för hur den inducerade strömmen påverkar strömfördelningen mellan A- och B-skena i ett tvåbrytarställverk samt hur fasernas ordning påverkar fördelningen.

### 1.3 Tillvägagångsätt

Det finns en avsaknad av mätvärden från stamnätet för att kunna studera problemet. För att kunna undersöka problemet genomförs en beräkning i Matlab. Koden valideras därefter genom att bygga en fysisk miniatyrmodell och utföra praktiska tester. När simuleringen är validerad skalas resultaten upp för att undersöka hur det hade sett ut i ett fullskaligt ställverk.

### 1.4 Avgränsningar

Rapporten kommer att förenkla teorin genom att inte ta hänsyn till den impedans som finns i brytare och fränkopplare, vilket har en påverkan på fördelningen i praktiken. För vidare förenkling kommer ingen hänsyn tas till de uppkomna magnetfält från den inducerade strömmen i slingorna utan endast till magnetfältet som produceras av de inkommande och utgående ledningarna. Magnetfältets beräkningar är förenklade med oändlig lång rak ledare i stället för specifika mått, vilket kan bidra till en felmarginal i analysen.

### 1.5 Precisering av frågeställningen

Beror den inducerade strömmen i ställverkets slingor på hur de inkommande samt utgående ledningarna placeras? Hur stor är den inducerade strömmen och kan den ha en påverkan på fördelningen mellan A- och B-skena?

# 2

## Teori

Teoridelen behandlar information som är relevant för ett tvåbrytarställverk. Vidare behandlar kapitlet grundläggande fysikteori för att skapa en förståelse om strömmar och magnetfält.

---

### 2.1 Ställverk

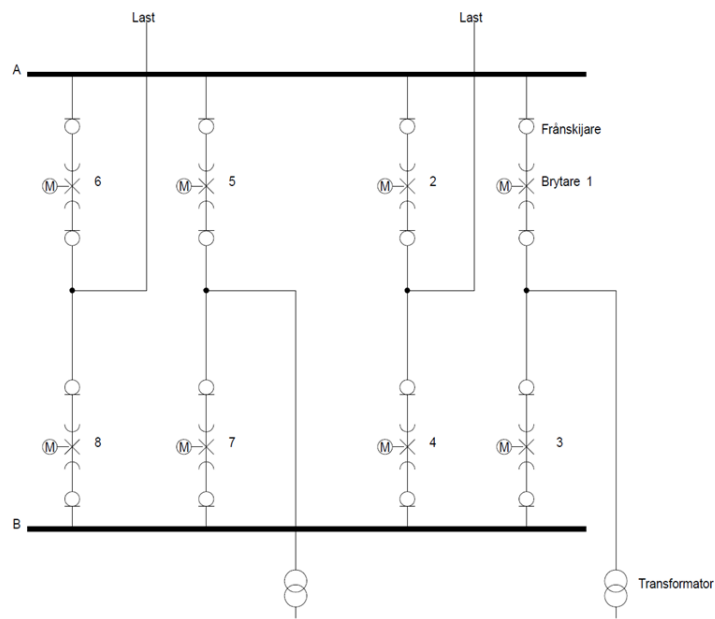
Ett ställverk är en station där elektrisk effekt samlas och fördelas. Spänningen i ett ställverk kan antingen transformeras upp eller ner, eller så kan ställverket fungera som en knutpunkt för att fördela ut samma spänningsnivå i olika riktningar. I de fall då det sker transformering kallas det ibland för transformatorstationer. Kärnan i ett ställverk är samlingskenorna. Till dessa är de inkommande och utgående ledningar anslutna, vilka är kopplade till ställverket genom en stolpe i mitten mellan samlingskenorna. Ställverk kan placeras både inomhus och utomhus, i vilka samlingskenorna kan se olika ut. I utomhusställverk för högspänning är det aluminiumrör. I inomhus för lägre spänningar är det koppar- eller aluminiumprofiler. I ett ställverk sker det kopplingar, automatiska bortkopplingar vid fel, mätningar och kommunikation med driftcentraler [1].

#### 2.1.1 Tvåbrytarställverk

Luftisolerade tvåbrytarställverk är den vanligaste förekommande konstruktionsprincipen i svenska transmissionsnät. Det är också en konstruktionsprincip som är relativt unik för svenska transmissionsnät. Tvåbrytarställverk har fördelen att vid fel snabbt kunna koppla över utgående ledningar och transformatorer till den andra samlingskenan. Genom sin konstruktion skapas det också redundans vilket gör att vissa underhållsarbeten går att genomföra utan att koppla bort. Eftersom kopplingar utförs av brytare underlättas dessutom fjärrmanövrering. Fler komponenter innefattar också en högre kostnad vilket gör tvåbrytarställverk till ett dyrare alternativ [1]. I figur 2.1 skildras ett schema över ett tvåbrytarställverk. Ur schemat syns det hur den inkommande strömmen går från transformatorn till ”en punkt” där den fördelas mot A- och B-skenan. Här syns det tydligt hur en hel skena enkelt kan tas ur bruk med hjälp av frånskiljare, samt hur mindre sektioner kan tas ur bruk för underhållsarbete.

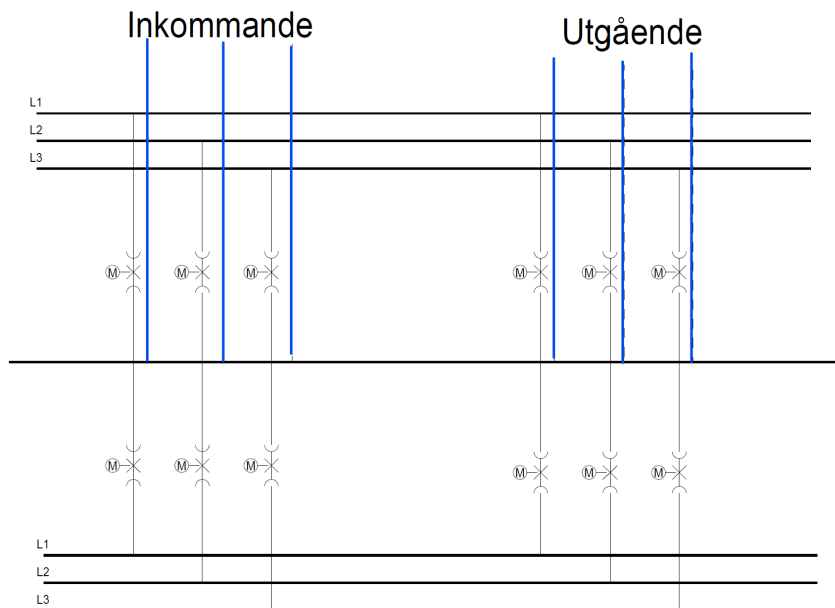


## 2. Teori



**Figur 2.1:** Egenkonstruerad bild för tydliggörande för ett tvåbrytarställverk

En samlingskena består av tre aluminiumrör och i varje rör flyter en fas, se figur 2.2. Figuren tydliggör detta genom att dela upp skenan i tre och att varje fas går till sitt tillhörande rör. Figuren visar också hur fack bildas i ett utomhus 400 kV ställverk. I detta fall går det att urskilja två fack. Ett fack tillhör en viss linje där det ingår ett antal komponenter, som beskrivs i avsnittet komponenter. Ett fack försörjer ett visst objekt med elektrisk effekt. Objekt kan vara allt från en transformator, linor eller en stad.



**Figur 2.2:** Egenkonstruerad bild för tydliggörande med tre skenor och två fack.

### 2.1.2 Komponenter

Utöver samlingsskenor och transformatorer finns det fler komponenter som ser till att ett ställverk fungerar som det ska.

#### Brytare

Brytarens funktion är som namnet antyder att bryta uppkommande strömmar. Brytaren ska klara av att bryta och sluta normala belastningsströmmar, men även ha förmågan att kunna bryta kortslutningsströmmar som kan uppstå vid fel. I brytare finns ett medium som ger dess karakteristik, namnet på brytaren är således härlett från mediet. Kravet som ställs på mediet är att det ska kunna släcka uppkommande ljusbågar. Vanligaste förekommande brytaren idag för högspänning är SF6-brytaren [1]. SF-6 är en gas som bidrar till en förstärkt växthuseffekt, trots detta har den fortsatt att användas för sina goda isoleringsegenskaper [2]. I lågspänning och mellanspänning finns idag Vakuumbrytare som ett alternativ till SF-6 brytaren men dessa används inte på högspänningsnivåer [1]. Det pågår en process för att kunna ersätta gasen, men det finns idag inget riktigt substitut.

#### Frånskiljare

Frånskiljare är uppbyggda av standardisolatorer, ledare och kapslingar. I dess enklaste form består frånskiljaren av en balk med två isolatorer med en rörlig kniv. Kniven kan i sin tur föras in eller dras ur en kontaktyta på ena isolatorn [1]. Frånskiljarens uppgift är att underlätta underhållsarbete, samt ge ett synligt brytställe i anläggningen. Idag används frånskiljande-brytare, vilka kombinerar brytarens och frånskiljarens egenskaper.

#### Jordningskopplare

Jordningskopplare används för att jorda ledarna i ställverket. Detta för att kunna utföra arbeten under säkerhet. Den finns normalt i två varianter: Långsam och Snabb. Där den långsamma varianten används vid arbeten i ställverket och används endast när det är säkert att högspänningen är frånslagen. Den snabba varianten kan däremot slå till vid full systemspänning och kortslutningseffekt. Jordningskopplare kan finnas som separata don men är också ofta kombinerad med frånskiljaren [1].

#### Ventilavledare

En ventilavledare skyddar komponenterna i en anläggning mot inkommande överspänningar, som exempelvis kan ha berott på ett åsknedslag. Grundelementet i ventilavledaren är ett motstånd som är karakteristiskt spänningsberoende. Detta för att motståndet ska sjunka vid stigande spänning [1].

#### Strömtransformator

I ställverket är det viktigt att kunna mäta den inkommande och den utgående

strömmen för att se om det skiljer sig från det normala värdet. För att möjliggöra mätning av strömmen måste den transformeras ner, då det inte går att mäta den höga ström som flyter i ställverket. Därför placeras en strömtransformator in för att transformera ner strömmen till mätbar nivå. Detta görs också i ett säkerhetssyfte.

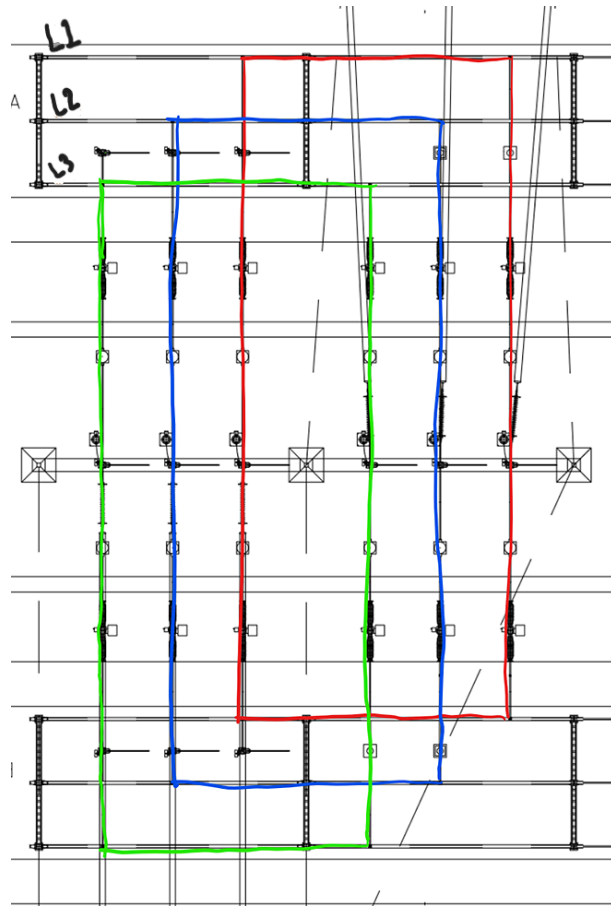
### Spänningstransformatorn

Spänningstransformatorn fyller samma funktion som strömtransformatorn.

## 2.2 Inducerad ström i ett ställverk

För att en inducerad ström ska kunna drivas så krävs det en sluten krets där den kan flyta. I ett ställverk finns det flera fack men för enkelhetens skull så kommer en sektion med två fack att undersökas, vilken har en sluten slinga per fas. Vid analysering uppifrån av ett ställverk med två fack går det att urskilja att de tre slingorna bildar olika areor, så kallade antenner, se figur 2.3. Observera att placeringen av inkommande och utgående ledningar kommer ha en betydelse för den inducerade strömmen i slingorna. Ohms lag används för att beräkna den inducerade strömmen,

$$V = RI \tag{2.1}$$



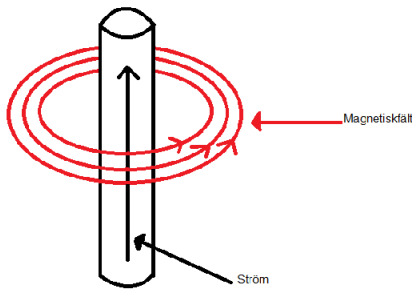
**Figur 2.3:** Visar hur slingorna bildas i ett ställverks fack. Dessa är färglagda så L1 = Röd, L2 = Blå och L3 = Grön.

## 2.3 Magnetfält

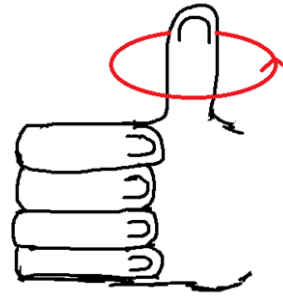
En elektrisk ström består av elektriska laddningar som förflyttar sig och när de förflyttar sig skapas det ett magnetiskt fält. Vilket medför att när en ström flyter i en ledare så kommer ett magnetfält skapas som roterar i slutna slingor runt ledaren [3], se figur 2.4. Riktningen av fältet kan bestämmas med hjälp utav högerhandsregeln, tummen ska peka i strömmens riktning, krökta fingrar ger magnetfältets riktning runt ledaren[3], se figur 2.5.

Observera att magnetfältet inte har någon start eller slutpunkt i dess slinga, endast en riktning och storlek. När strömmen är växlande så kommer även magnetfältet att växla riktning och storlek beroende på tiden. Storleken på magnetfältet kan betraktas som B-fältet, vilket har enheten tesla (T). Biot-Savart lag beskriver hur stort magnetfältet är i en punkt med avståndet  $r$  från en oändlig lång rak ledare[4],

$$B = \frac{\mu i(t)}{2\pi r} \quad (2.2)$$



**Figur 2.4:** Magnetfältet runt en ledare som leder ström.



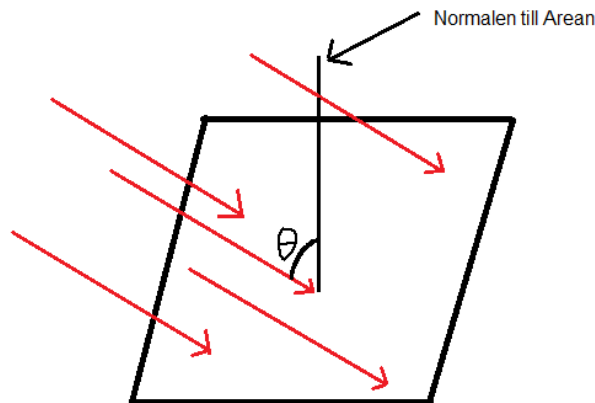
**Figur 2.5:** Tummen i strömmens riktning

Där  $\mu$  är permeabiliteten för ämnet, (förmågan hos ett ämne att uppehålla skapandet av ett magnetiskt fält i sig själv), i luft är permeabiliteten  $4\pi \cdot 10^{-7}$ .

Magnetflöde ( $\phi_B$ ) är ett begrepp som används för att mäta hur mycket magnetiskt fält som passerar en viss yta, enheten är weber ( $Wb$ ,  $T/m^2$ ). Egentligen finns det inget fysikaliskt flöde av magnetfält men då fysikaliska flöden beskrivs av vektorfält och att magnetfältet består av just vektorer så kan sammankopplingen göras [4]. Det är ett givande verktyg för att beskriva effekterna av ett magnetfält på en viss yta och beräknas enligt formeln,

$$\phi_B = BA \cos \theta \quad (2.3)$$

$\cos \theta$  beskriver med vilken vinkel B-fältet träffar ytan, eftersom B-fältet består av vektorer kan dessa delas upp i två komponenter och det är endast den komponent som är normalen till ytan som bidrar med ett flöde genom ytan [4], se figur 2.6.



**Figur 2.6:** De röda linjerna är magnetfält, den svarta linjen är normalen och  $\theta$  är vinkel mellan magnetfält och ytan.

När det magnetiska fältet är tidsvarierande så kommer även flödet att bli det, vilket i sig skapar en induktion. Faradays lag beskriver detta fenomen, vilket är en beskrivning på hur elektriska fält och tidsvarierande magnetiska fält skapar induktion. Det vill säga att ett tidsvarierande magnetfält kommer att inducera ett elektriskt fält, vilket leder till en spänning som kan driva en inducerad ström[4]. Den inducerade spänningen mäts i volt och beräknas enligt formeln,

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (2.4)$$

Faradays lag beskriver bara storleken på den inducerade spänningen, och det var Heinrich Lenz som beskrev riktningen på den ström som blir inducerad. Riktningen av den inducerande strömmen kommer alltid att vara sådan att den kommer motsätta sig förändringen av det magnetfält som skapade den. Det vill säga att varje magnetfält som skapas av en inducerad ström kommer motverka det magnetfält som skapade den[4]. Detta fenomen förhåller sig till energiprincipen, energi kan inte skapas eller förstöras.

## 2.4 Impedansberäkning

För att kunna räkna ut den inducerade strömmen krävs det värden på slingornas resistans och induktans. För att beräkna resistansen för modellens slingor har följande formel använts,

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.5)$$

Resistiviten ( $\rho$ ) för koppar är  $1,67 \cdot 10^8$  och har enheten  $\Omega m$ . I ett verkligt ställverk har slingorna en resistans på  $0,00002\Omega/m$ . För att beräkna induktansen för modellens slingor och verkligheten användes en induktanskalkylator [5]. Kalkylatorn använder sig av komplexa versioner av,

$$x = \sqrt{1 + \left(\frac{d^2}{2l}\right)} \quad (2.6)$$

$$L = 2l \left( \ln\left(\frac{l}{d}(1+x)\right) - x + \frac{\mu}{4} + \frac{d}{2l} \right) \quad (2.7)$$

# 3

## Case setup

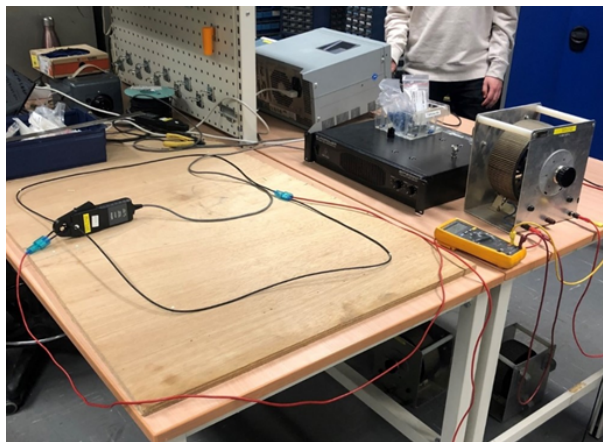
Denna del av rapporten kommer beskriva tillvägagångssättet i mer detalj.

### 3.1 Förstudie

Då arbetet utgår från en nerskalad modell, vilket medför att vissa mätvärden är svåra att mäta. För att kunna skala upp den inducerade strömmen utan att beröra de andra delarna så beräknades det fram en lämplig frekvens för att få en mätbar inducerad ström. Ström uppskattas till 1A för beräkningarna,

### 3.2 Förstudie test 1

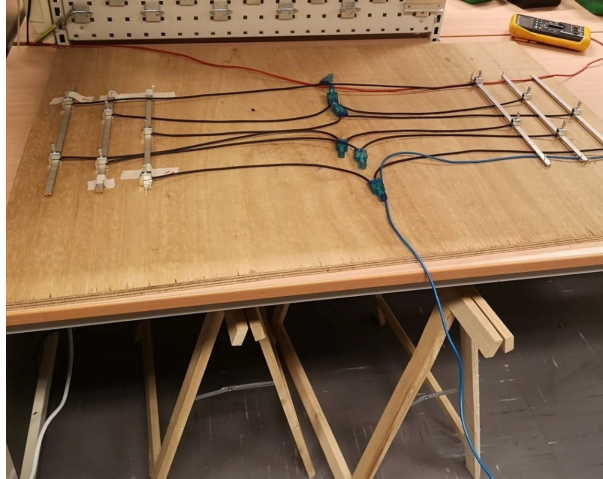
För att se om det faktiskt går att mäta hur det inducerade magnetfältet påverkar strömmarna i ledningarna konstruerades ett enklare test, se figur 3.1. En ledning placerades på en platta för att replikera en slinga i ställverket. Inkommande ledning fördelas åt två håll för att sedan ledas ut mot lasten. Proben användes för att mäta skillnaden genom att låta ledningar korsas. Inkommande och utgående ledningar placerades utmed slingan på varierande avstånd och riktning för att undersöka hur fördelningen påverkades.



*Figur 3.1:* Slinga med strömförande ledning vid sidan av för att inducera en ström i slingan

## 3.3 Förstudie test 2

Ledningar för respektive fas och skenor byggdes på en träplatta för att simulera ett ställverk med två fack, se figur 3.2. Modellen testades innan inkoppling genom att utföra liknade test som test 1 för att kunna se fall ledningar, skenor och kopplingar kunde leda en mätbar ström vid 400Hz.



*Figur 3.2:* Miniaturmodell av ställverk. Röd ledning är inkommande och blå ledning är utgående

## 3.4 Slutsater förstudier

Nedan beskrivs resultat och slutsatser från de två förstudietesterna:

### Test 1

Första testet bekräftade teorin genom att visa att den inkommande ledningens position gentemot slingan hade en påverkan på strömstyrkan som flöt i slingan. Om ledningen låg tätt intill ökade strömmen i slingan markant. Testet påvisade att för att få ett resultat som är mätbart så ska frekvensen vara på minst 400Hz.

### Test 2

Test 2 påvisade svårigheten med att mäta fördelningen mellan A- och B-skena då inkommande ledning fördelas till varsin sida. Vilket gjorde det svårt att mäta skillnaden med en strömprobe. Testet visade att det inte är nödvändigt att koppla in modellen för att få ett godtyckligt resultat av den inducerade strömmen. En version av modellen konstruerades herefter, se kap 3.4 Miniaturmodellen.



### 3.5 Miniaturmodellen

Utifrån resultaten och slutsatserna från förstudierna konstruerades den slutgiltiga modellen. Installationskablar lades på plattan för att skapa slingorna, varje slinga hade varsin strömtransformator. Inkommande och utgående ledningar placerades jämte slingorna. Genom att göra på detta vis var inte ledningarna en del av slingorna, se figur 3.3, utan den ström som uppmättes i slingorna är då endast uppkommen av induktion.



*Figur 3.3:* Miniaturmodellens ledningar på undersidan

Modellen konstruerades utifrån befintliga mått på ett 400kV ställverk med två fack, vilket har storleken 68x32m. Där längden motsvaras av längden från samlingsskena A till samlingsskena B och bredden av två fack. Skalan på modellen blev följande 1,140:68. Plattans mitt motsvarar stolpen där inkommande och utgående ledningar ansluts till ställverket, se fig 3.4. Slingorna har en bredd på 21m. Från mitten av ställverket till mittersta skena är det 29m och det är 5 meter mellan skenorna, vilket leder till att de två andra skenorna är placerade 24m respektive 34m från mitten.

### 3. Case setup

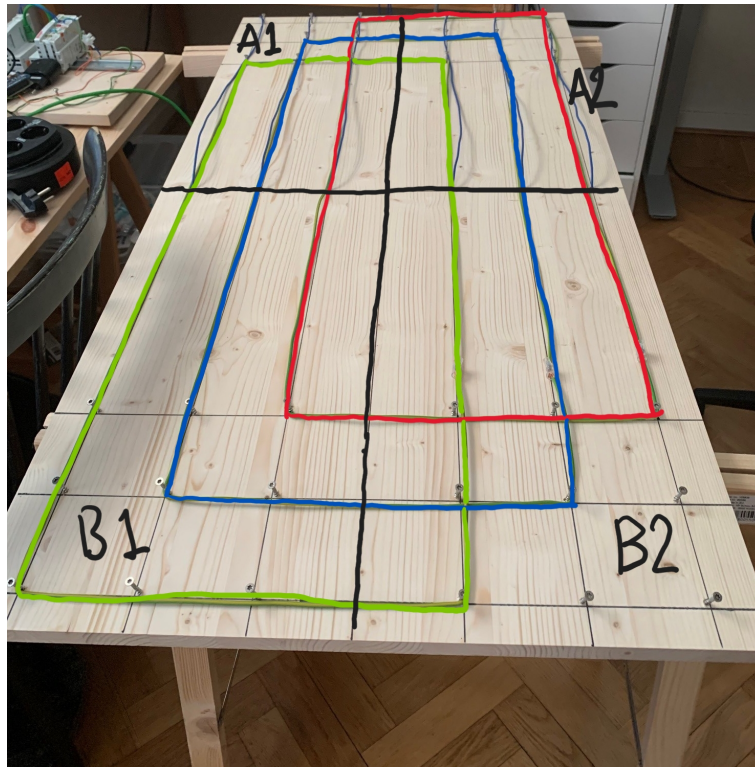
---



**Figur 3.4:** Miniaturmodellen med sina tre slingor. Blåa kablar föreställer inkommande respektive utgående kablar

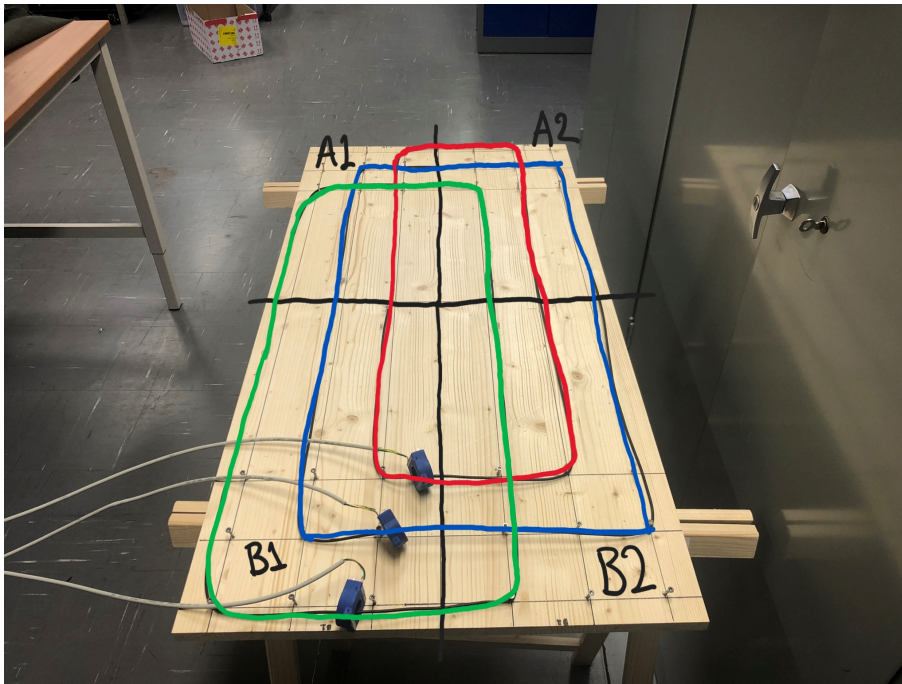
För att kunna observera om placeringen av ledningarna var av betydelse delades plattan in i två delar: A respektive B. Dessa delades ytterligare in i två delar vardera: A1 och A2 respektive B1 och B2. Inkommande ledningar befann sig i antingen A2 eller B2, vilket medförde att utgående befann sig i antingen A1 eller B1, se figur 3.5.

I ett verkligt ställverk ligger inte ledningar utmed slingorna utan de befinner sig 8m upp i luften. För att kunna testa när ledningarna befinner sig i luften användes en akrylskiva som bars upp av fyra klossar vars höjd var 7,5cm.



*Figur 3.5:* Slingorna och plattans indelning för placering av inkommande och utgående ledningar

Plattan byggdes om för att kunna testa om fasföljden har någon påverkan. Normalt sett kommer faserna i ordning L1-L2-L3, i figur 3.5 åskådliggörs detta med att L1 ligger längst ut på sida A2 och B2 och att L2-L3 ligger i följd efter. Det finns dock fall då detta inte gjorts utan då kan exempelvis ordningsföljden vara L2-L1-L3. Detta medför att det blir olika areor för slingorna i ställverket då faserna ska gå till sina respektive skenor, se figur 3.6



*Figur 3.6:* Slingorna och plattans indelning med faserna i ombytt ordning

## 3.6 Utrustning

I detta avsnitt beskrivs den elektriska utrustning som är nödvändig för att utföra studien.

### 3.6.1 Frekvensomriktare: PowerFlex 40

PowerFlex 40 (Powerflex) är en frekvensomriktare som har använts för att generera en trefassspänning över 50Hz. Den drivs av vanlig 230V enfas och använder sig utav pulse width modulation (PWM) för att skapa en utsignal av önskad frekvens. Spänning och ström går även att bestämma utifrån begränsning på respektive toppvärde. PowerFlex har använts för dess enkelhet att programmera in parametrarna samt dess säkra precision för att värdena ej ska överskridas. Märkdatan är 17A, 400Hz och 7.5kW. Alla parametrar programmeras in via den digitala displayen. När PWM-signalen programmeras om till högre frekvens så kommer strömmen att reduceras, vid 7kHz så minskas strömmen till 88%.

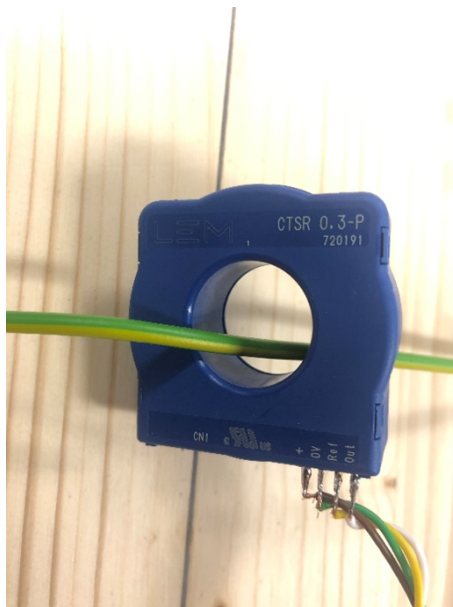




*Figur 3.7:* Teknisk apparat PowerFlex 40

#### 3.6.2 Strömtransformator: LEM CTSR 0.3-P

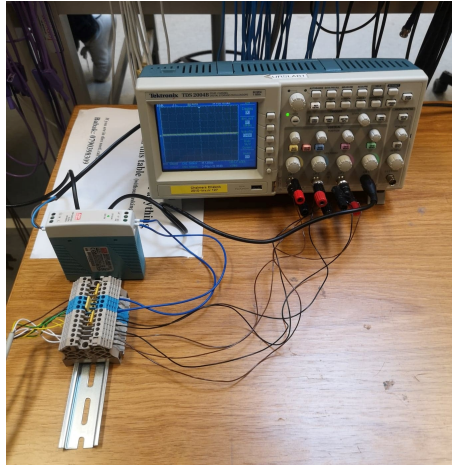
LEM CTSR 0.3-P (LEM) är en strömmätare med galvanisk isolation, vilket betyder att den inte är ihopkopplad med huvudkretsen. En strömförande ledare går igenom mätaren, se figur 3.8, ledaren inducerar en spänning i strömtransformatorn och signalen skickas vidare till ytterligare mätutrustning (oscilloskop). LEM drivs av en kraftkälla på 5V, där det sedan skapas en referenssignal som mätsignalen refererar till. Mätsignalen som skickas från LEMen till oscilloskopet har en referens på 4V/A.



*Figur 3.8:* Strömtransformatorn LEM CTSR 0.3-P

#### 3.6.3 Oscilloskop: Tektronix TSD2004B

Ett oscilloskop är en teknisk apparat som används för att grafiskt kunna studera elektriska signaler. Det kan också utföra ett flertal matematiska beräkningar samt kopplas till en dator för att skicka datan vidare för vidare användning.



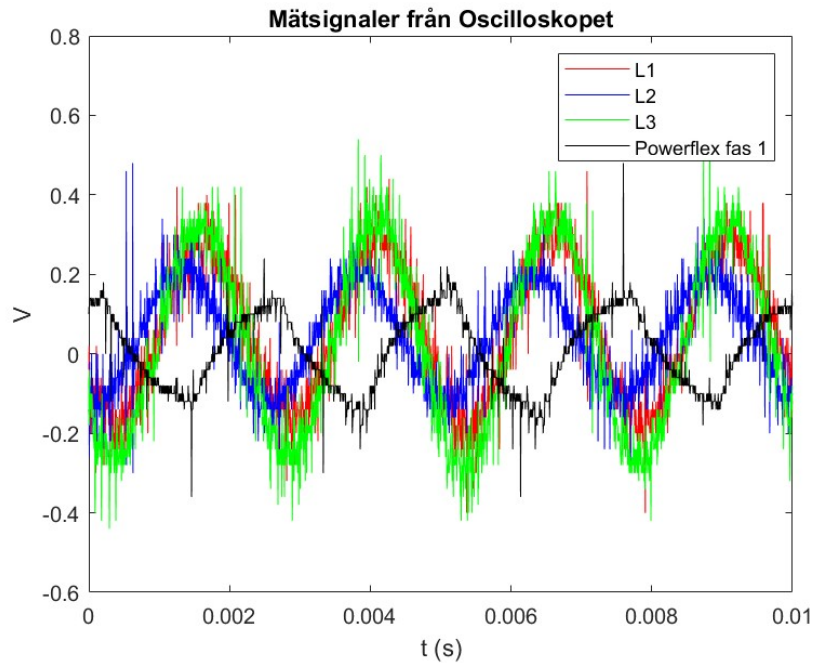
*Figur 3.9:* Oscilloskop Tektronix TSD2004B

### 3.7 Matlab - Beräkningar & Uppskalning till verkligheten

För att skapa simuleringsalgoritmen användes programmet Matlab. Detta användes för sin enkelhet och förmåga att programmera matematiska ekvationer. Två typer av program programmerades: Ställverkssimuleringen för att kunna se hur resultat blir i ett fullskaligt ställverk, se appendix A.1. Samt ett program för att utföra Fast Fourier transform (FFT) på LEMarnas utsignaler, se appendix A.2.

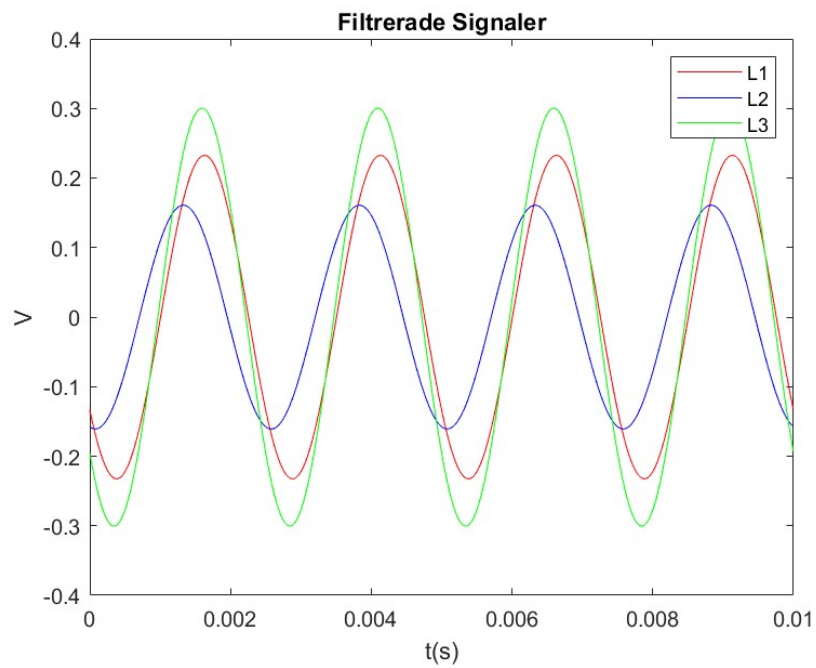
Simuleringsalgoritmen för ett ställverk beräknar avståndet från varje ledning (inkommande och utgående) till varje x-position i ställverket, samt vinkeln mellan ledningarna och x-positionerna. En positiv ström betyder att ledningen går från A-sidan av plattan och en minus ström betyder att ledningen går från B-sidan. Avståndet och vinkeln används för att beräkna hur mycket magnetfält som träffar vinkelrätt för varje x-position från vardera ledning för att få magnetflöde i varje x-position. Inkommande ledningars bidrag adderas och utgående ledningars bidrag adderas för att sedan derivera respektive bidrag. Arealen för varje slinga beräknas genom att ta slingans x-positioner multiplicerat med längden av slingan, vilket är olika om ledningen är på A eller B-sida. Derivatnan av magnetflödet multipliceras med arean för att få den inducerade spänningen för vardera slinga. Ett RMS-värde för varje slingas inducerade spänning används för att beräkna strömmen i vardera slinga. Vid uppskalning till ett verkligt ställverk används en ström på 500A och ledningars höjd från marken är 8m.

FFT används då Powerflex' utsignaler är PWM baserade, vilket medför att det blir brus i utsignalerna. Detta brus speglas i den inducerade strömmen, vilket gör det svårt att mäta amplituden på den inducerade strömmen, se figur 3.10. Mätningarna sänds från oscilloskopet till en dator som filtrerar ut signalerna vid 400Hz med hjälp av FFT. Algoritmen består av en graf på signalerna ofiltrerade, ett amplitudspektrum och en graf med den filtrerade signalen och den ofiltrerade, se figur 3.11 och 3.12.

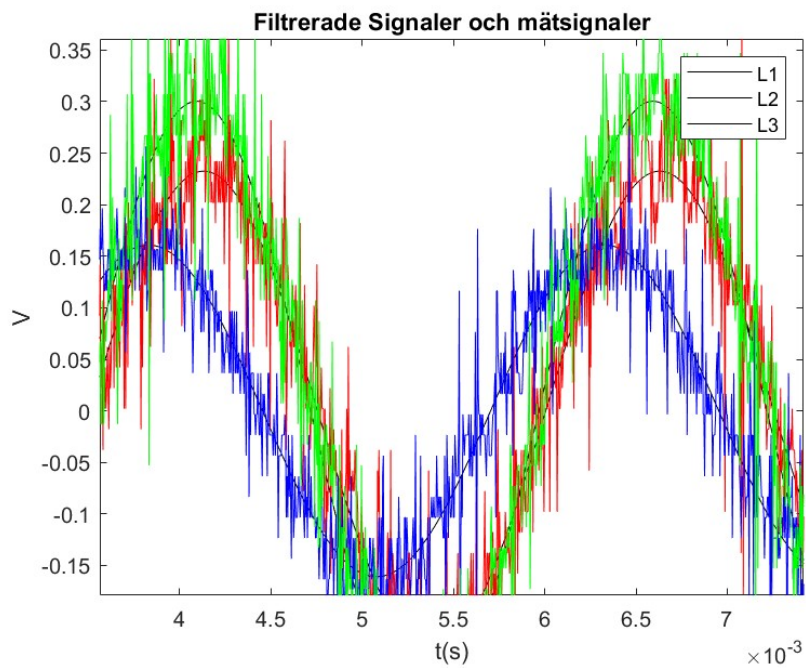


*Figur 3.10:* Mätning från strömtransformatorer och Powerflex' fas 1

### 3. Case setup



*Figur 3.11:* Återskapad signaler utan brus



*Figur 3.12:* Återskapad signal i samma graf som ordinarie mätsignal



# 4

## Genomförande

Detta kapitel beskriver hur testerna utfördes praktiskt.

---

### 4.1 Testutförande

För att filtrera den switchande signalen från frekvensomriktaren och få en bättre signal användes tre spolrar på 11mH vardera. Resistorer på  $63\Omega$  användes i serie med spolarna som ytterligare last. De strömförande ledningarna från källan placerades längst med modellens slingor. Detta gjordes i olika konstellationer för att se hur den inducerade strömmen i de olika slingorna påverkades av placeringen av inkommande och utgående ledningar. LEM-transformatorn på varje slinga skickade mätsignaler till oscilloskopet som skickade datan vidare till en dator för att analysera signalerna i FFT-programmet, se figur 4.1. För testerna har nedan parametrar använts på PowerFlex:

- 400Hz
- 230V
- 1,89A
- PWM frekvens på 7kHz

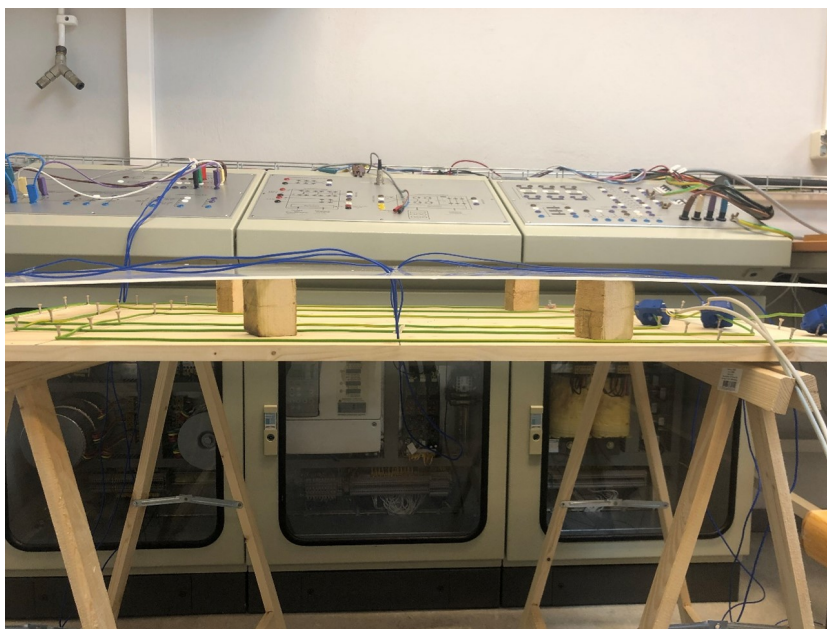
## 4. Genomförande

---



*Figur 4.1:* Stationen där testerna genomfördes

Vid testerna av luftburna ledningar vilade ledningar ovanpå akrylskivan innan de slutligen drogs ner mot plattan och sedan upp igen för att efterlikna luftburna ledningar som inkommer och utgår från ställverkets stolpe .



*Figur 4.2:* Ledningar bärs upp av akrylskivan som vilar på de fyra klossarna

# 5

## Resultat

Detta kapitel visar resultaten från testerna, beräkningarna och det uppskalade värdet för kunna koppla till verkligheten.

---

### 5.1 Tabeller

De första tabellerna visar uppmätta värden och beräkningarna från när endast en fas i taget var inkopplad utmed sin respektive slinga, med början på fas L1 utmed den röda slingan. Därefter presenteras uppmätta värden, Matlab beräkningarna och det uppskalade värdet från tester med alla tre faser. Tabell 5.10 visar resultatet när inkommande och utgående ledningar placerades i samma del av plattan. Tabell 5.11 visar resultatet om ledningarna placerades i varsin del. Tabellerna 5.12 5.13 visar om inkommande ledning placerades i B och utgående i B respektive A. Därefter visar tabellerna 5.14 och 5.15 resultatet från när fasordningen är ombytt på fas 1 och 2, med samma upplägg som ovan.

#### L1 utmed rödslinga

*Tabell 5.1:* Inkommande A & Utgående hänger i luften

Slinga	Uppmätt (mA)	Beräknad (mA)
Röd	62,92	57,46
Blå	43,28	41,68
Grön	23,98	25,88

*Tabell 5.2:* Inkommande & Utgående A

Slinga	Uppmätt (mA)	Beräknad (mA)
Röd	104,27	114,92
Blå	54,45	67,21
Grön	16,21	23,81

*Tabell 5.3:* Inkommande A & Utgående B

Slinga	Uppmätt(mA)	Beräknad (mA)
Röd	15,71	16,90
Blå	18,44	16,16
Grön	9,40	28,81

## L2 utmed blåslinga

*Tabell 5.4:* Inkommande A & Utgående hänger i luften

Slinga	Uppmätt (mA)	Beräknad (mA)
Röd	30,28	29,93
Blå	35,77	49,01
Grön	26,74	34,50

*Tabell 5.5:* Inkommande & Utgående A

Slinga	Uppmätt (mA)	Beräknad (mA)
Röd	85,21	78,80
Blå	90,61	98,02
Grön	54,32	55,62

*Tabell 5.6:* Inkommande A & Utgående B

Slinga	Uppmätt(mA)	Beräknad (mA)
Röd	67,59	4,57
Blå	48,2	0
Grön	34,95	4,57

## L3 utmed grönslinga

*Tabell 5.7:* Inkommande A & Utgående hänger i luften

Slinga	Uppmätt (mA)	Beräknad (mA)
Röd	15,34	2,93
Blå	31,37	25,53
Grön	46,08	40,56

*Tabell 5.8:* Inkommande & Utgående A

Slinga	Uppmätt (mA)	Beräknad (mA)
Röd	47,47	33,73
Blå	65,23	67,21
Grön	71,31	81,12

*Tabell 5.9:* Inkommande A & Utgående B

Slinga	Uppmätt(mA)	Beräknad (mA)
Röd	38,80	28,81
Blå	37,14	16,16
Grön	43,10	16,90

## Tre faser: Vanlig ordningsföljd på faser

*Tabell 5.10:* Inkommande & Utgående A

Slinga	Uppmätt (mA)	Beräknad (mA)	Uppskalad (A)
Röd	63,05	70,45	19,04
Blå	28,15	30,81	6,44
Grön	53,98	49,73	13,44

**Tabell 5.11:** Inkommande A & Utgående B

Slinga	Uppmätt (mA)	Beräknad (mA)	Uppskalad (A)
Röd	49,69	39,61	15,04
Blå	37,29	27,99	12,05
Grön	43,63	39,61	15,04

**Tabell 5.12:** Inkommande B & Utgående B

Slinga	Uppmätt (mA)	Beräknad (mA)	Uppskalad (A)
Röd	41,02	49,73	13,45
Blå	26,48	30,81	6,44
Grön	71,14	70,45	19,06

**Tabell 5.13:** Inkommande B & Utgående A

Slinga	Uppmätt (mA)	Beräknad (mA)	Uppskalad (A)
Röd	17,12	18,91	9,54
Blå	23,82	27,99	12,06
Grön	17,18	18,91	9,54

Tre faser: Fas 1 och 2 skiftade

**Tabell 5.14:** Inkommande & Utgående A

Slinga	Uppmätt (mA)	Beräknad (mA)	Uppskalad (A)
Röd	31,90	30,68	11,24
Blå	50,68	35,47	13,8
Grön	51,08	30,61	11,53

**Tabell 5.15:** Inkommande A & Utgående B

Slinga	Uppmätt(mA)	Beräknad (mA)	Uppskalad (A)
Röd	15,25	12,92	8,16
Blå	25,50	26,80	14,59
Grön	49,40	34,78	17,14

# 6

## Analys

I denna delen av studien kommer resultatet att analyseras och diskuteras.

### 6.1 Resultaten

Genom att göra tester med endast en fas i taget kunde det analyseras fall de praktiska testerna stämmer överens med teorin. Utifrån resultaten från testerna 5.1-5.6 kunde det konstateras att genom att använda (2.2),(2.3) och (2.4) fås ett godtyckligt resultat och att matlabkoden stämmer överens med de uppmätta värdena. Däremot blev det en skillnad mellan uppmätta värden och Matlabkoden när inkommande och utgående ledningar placerades i AB. Storleksordningen på slingorna stämmer inte överens men det sker en minskning av den inducerad strömmen i både uppmätt och beräknad. Detta påvisar att teorin och högerhandsregeln stämmer i praktiken för modellen, genom att magnetfälten motverkar varandra när ledningar placeras i samma riktning.

Denna skillnad mellan tester och beräkningar fortsatte även när alla tre faser var inkopplade, förutom att AB-konstellationen påvisade ett mer likt resultat mellan de uppmätta och beräknade värdena. Vid tre faser testades även konstellation BA och BB, vilket gav ett bättre resultat vid jämförelse med tester och beräkningar. Det går att konstantera utifrån tester och beräkningar att när inkommande ligger i B2 kommer det induceras en mindre ström i slingorna, i både fall BB och AB jämfört med AA och AB. Att det blir mindre inducerad ström när inkommande ligger i B2 går att härleda till (2.2), att det är mindre area av slingorna vid B2, se figur 3.5. Därför testades endast A2 som inkommande vid skiftade av faserna. Vid skiftande av fas ett och två blev resultaten mindre än i jämförelse med när de låg i vanlig ordning. Betydande minskning var det i den röda slingan vars area hade minskat nämnvärt medan den blåa, vars area hade ökat, ökade. Vid jämförelse mellan 5.10 och 5.14 går det att urskilja att så mycket som den röda minskar, nästan så mycket ökar den blåa. Detta går att härleda till (2.3) och (2.4), att inducerad spänning är beroende av hur stor area den verkar i. Likheten mellan Matlabkoden och testerna blev också mer lika varandra i AB-konstellationen än vid tidigare tester.

## 6.2 Diskussion

Utifrån resultaten gick det att urskilja att beräkningen och de uppmätta testvärdena inte var helt överensstämmande amplitudmässigt. Detta kan bero på ett flertal anledningar, men en stor del var noggrannheten vid mätningar. Vid utförandet av testerna upptäcktes det att resultaten påverkades av en del faktorer. Beroende på hur sträckta ledningarna var och hur dess placering var gentemot de fastmonterade slingorna på plattan påverkades den inducerade strömmens amplitud. Detta gjorde att det var svårt att upprätthålla samma struktur vid varje test. Det ska dock noteras att samtidigt som amplituderna varierade påverkades inte storleksordningarna mellan faserna utan endast dess amplituder.

Testerna där ledningarna skulle finnas i B-sidan av plattan behövdes ledningarna dras i närheten av plattan, vilket kan ha medfört att ledningarna som inte skulle vara en del av testet kom för nära och kan ha bidragit med en störning. Denna störning anses vara väldigt liten men den kan ha påverkat skillnaden mellan uppmätta och beräknade värden. Inkommande och utgående ledning var i testerna dessutom samma ledning. Detta speglar inte verkligheten och eftersom ledningen drogs under plattan och sedan upp igen fanns det ett magnetfält under plattan som kan ha påverkat mätningresultatet.

I testerna räknades det fram en vinkel mellan de inducerade strömmarna och fas 1 från PowerFlex. Vilket var planerat att användas för att beräkna fram ett exakt värde på slingornas induktans. Då det inte gick att se ett mönster i dessa mätningar kunde de inte användas. Därav har Matlabkoden en osäkerhet gällande induktansen, vilket påverkar amplituden på de beräknade strömmarna. Det finns ett liknande problem vid uppskalningen till ett verkligt ställverk, där exakta värden på induktansen inte gick att få tag på. Detta har haft en påverkan på resultatet men inte tillräckligt stor för att påverka slutsatsen.

Matlabkoden använder sig bara utav en sida av ett ställverk, det vill säga en A-sida. Det är ingen skillnad på A1 och B1 sidorna i ett ställverk, därav ska det inte vara någon skillnad mellan uppmätta värden och beräknade värden oavsett vilken sida ledningarna ligger på. I Matlab blev det dock att vissa värden blev exakt likadana, vilket de inte är i verkligheten. Detta beror på att i verkligheten så är det svårt att få till exakt likadana värden på alla delar. Den flytande strömmen i de tre faserna är inte exakt likadana, slingornas längd och därmed resistans och induktans är inte exakt likadana. Som tidigare belyst var det svårt att hålla samma struktur vid varje test, det vill säga att ledningarna var placerade på exakt samma vis i varje test. Matlabkoden använder sig av (2.2) dessutom, vilket räknar ut magnetfältet i en punkt från en oändlig lång rak ledare. Ledningar i ställverket är inte oändligt långa och de ska inte anses som oändlig lång rak ledare, detta ger också en vis felmarginal i beräkningarna kontra de praktiska testerna. Alla dessa faktorer bidrar till att det finns skillnader mellan de praktiska testerna och Matlab, vilket efterföljs i den uppskalade versionen. Trots dessa felmarginaler så anses resultatet vara ett acceptabelt resultat.

# 7

## Slutsats

I denna del kommer slutsatsen av studien, etik och hållbarhets-reflektion och idéer om framtida studier presenteras.

---

### 7.1 Studiens utfall

Vid början av studien preciserades frågor som studien skulle besvara. Dessa presenteras återigen med resultatet från studien:

*Beror den inducerade strömmen i ställverkets slingor på hur de inkommande samt utgående ledningarna placeras?*

Vid analys om placeringen av inkommande och utgående ledningar hade någon betydelse kunde det konstateras att den inducerade strömmen blev mindre om ledningarna placerades på det sätt att de inte går in och ut från samma håll. Denna skillnad var dock inte på något sätt markant. Vid skiftande av faser blir det ett skiftande av vilken slinga som upptar mest inducerad ström, men det går också att urskiljas att det överlag blev mindre ström som inducerades i slingorna.

*Hur stor är den inducerade strömmen och har den en påverkan på fördelningen mellan A- och B-skena?*

I ett fullskaligt 400kV ställverk flyter strömmar med en amplitud mellan 500A-1000A. Vid beräkning för de uppskalade värden användes en ström på 500A. Utifrån resultaten går det att se att den inducerade strömmen är liten i förhållande till den inkommande strömmen. Detta indikerar att den med hög sannolikhet inte har någon påverkan på utfallet av hur strömmarna fördelas mellan skenorna.

### Slutsats

Placeringen av inkommande och utgående ledningar har betydelse för hur stor den inducerade strömmen blir. Skillnaden mellan den vanliga ordningen och den skiftade ordningen är minimal, och de strömmar som induceras är små i förhållande till de strömmar som redan flyter i ställverket. Därför kan den inducerade strömmen uteslutas som orsaken till de oönskade konsekvenserna, så som fellarm.



## 7.2 Etik och hållbarhet

Genom att få en större förståelse för hur fördelningen av strömmarna ser ut i ställverket kan det gå att få bukt på de oönskade konsekvenserna. Detta skulle innebära färre fellarm som både sparar tid och pengar för drabbade företag. Färre felaktiga fellarm ger också en större hållbarhet för komponenterna då dessa inte slits ut i förtid. Slitaget må vara litet men då brytarna är utrustade med SF-6 gas och denna gas är miljöförstörande är det önskvärt att minska riksen för att den släpps ut i atmosfären.

## 7.3 Vidare studier

Den inducerade strömmen som skapas i ställverket ligger inte till grund för de oönskade konsekvenserna i ställverket. Förenklingarna i denna rapport har gjort det möjligt att studera om det var så att den inducerade strömmen hade en större påverkan på fördelningen mellan skenorna, men det speglar inte hela verkligheten. Det hade därför varit intressant att vidare studera vad som kan ligga till grund för problemet genom att vidareutveckla modellen så att den mer efterliknar ett ställverk med komponenter och skenor. Därefter studera hur fördelningen ser ut vid lastande av bägge skenor eller när endast en skena är lastad.

# Referenser

- [1] L. Andersson. et al., *Elkraftsystem 1*, 1.uppl., Stockholm, Liber AB, 1997.
- [2] Naturvårdsverket, *Svavelhexafluorid (SF6)*, Tillgänglig: <https://utslappisiffror.naturvardsverket.se/sv/Amnen/Vaxthusgaser/Svavelhexafluorid/>, Hämtad: 2022-06-14.
- [3] N. Ida, *Engineering electromagnetics*, 3.uppl., Springer International Publishing, 2015. [Online]. Tillgänglig: doi:10.1007/978-3-319-07806-9, Hämtad: 2022-06-14.
- [4] H. A. . Radi, J. O. Rasmussen, *Principles of Physics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. [Online], Tillgänglig: doi:10.1007/978-3-642-23026-4, Hämtad: 2022-06-14
- [5] Resources for Electrochemistry *The Inductance of Your Electrode!*, Tillgänglig: <http://www.consultrsr.net/resources/eis/induct5.htm>, Hämtad: 2022-06-14

# A

## Bilaga A

### A.1 Simulering av ställverk

```
1 close all;
2 clear
3
4 u0= 4*pi*10^-7;           %Permeabilitet
5 my=u0/(2*pi);           %Baserat på B-formeln
6 f = 400;
7 t = (0:0.0001:1/f);
8 %scale=1;                %Skala mellan verklighet och modell
9 scale = 1.15/68;
10 w=f*2*pi;
11 WireR =1*(158*scale*1.67*10^-8)/(2.5*10^-6);           %Resivitetsformel
    for koppar
12 WireX=0.0116;           %Induktans för plattans slingor
13 %WireR=0.00002*158;     Resistans för verklig kabel i ställverk
14 %WireX= 274755*10^-9*w; Induktans för verklig kabel i ställverk
15 Wireimpedance = sqrt(WireR^2+WireX^2);
16
17 %Ställverkets längd (Xpos), ledningarnas placering Xin och Xout och
18 %höjd(Z)
19 Z=8*scale;
20 Xpos = (0:0.1:32)*scale;
21 Xin =[0 5.5 11]*scale;
22 Xout=[21 26.5 32]*scale;
23
24 %In och ut-strommar. Positiv räknas som att ledning går
25 %från A-riktning och negativ som B-riktning
26 %(se plattans uppbyggnad)
27 ilin= 1.9*sqrt(2)*cos(w*t);
28 i2in= 1.9*sqrt(2)*cos(w*t-2*pi/3);
29 i3in= 1.9*sqrt(2)*cos(w*t+2*pi/3);
30
31 ilout= 1.9*sqrt(2)*cos(w*t);
```

```
32 i2out= 1.9*sqrt(2)*cos(w*t-2*pi/3);
33 i3out= 1.9*sqrt(2)*cos(w*t+2*pi/3);
34
35 %Avstand fran ledningar till alla X-punkter
36 r1in = sqrt((Xpos-Xin(1)).^2+Z^2);
37 r2in = sqrt((Xpos-Xin(2)).^2+Z^2);
38 r3in = sqrt((Xpos-Xin(3)).^2+Z^2);
39
40 r1out = sqrt((Xpos-Xout(1)).^2+Z^2);
41 r2out = sqrt((Xpos-Xout(2)).^2+Z^2);
42 r3out = sqrt((Xpos-Xout(3)).^2+Z^2);
43
44 %Vinkel for hur B-falt traffar ytan i alla X-punkter
45 alpha1in = acos((Xpos-Xin(1))./r1in);
46 alpha2in = acos((Xpos-Xin(2))./r2in);
47 alpha3in = acos((Xpos-Xin(3))./r3in);
48 alpha1out = acos((Xpos-Xout(1))./r1out);
49 alpha2out = acos((Xpos-Xout(2))./r2out);
50 alpha3out = acos((Xpos-Xout(3))./r3out);
51
52 A1in = (180/pi).*alpha1in;
53 A2in = (180/pi).*alpha2in;
54 A3in = (180/pi).*alpha3in;
55 A1out = (180/pi).*alpha1out;
56 A2out = (180/pi).*alpha2out;
57 A3out = (180/pi).*alpha3out;
58
59 %Magnetfalt for in och utgaende ledningar i alla X-punkter
60 b1in = (my * i1in./r1in).*cosd(A1in);
61 b2in = (my * i2in./r2in).*cosd(A2in);
62 b3in = (my * i3in./r3in).*cosd(A3in);
63
64 b1out = (my * i1out./r1out).*cosd(A1out);
65 b2out = (my * i2out./r2out).*cosd(A2out);
66 b3out = (my * i3out./r3out).*cosd(A3out);
67
68 btin = b1in+b2in+b3in;
69 btout= b1out+b2out+b3out;
70
71
72 %Summerar B-faltet for varje punkt dar de olika slingorna
73 %ligger, andra om faserna r omkastade
74 for i=1:length(t)
75 sumBinR(i) = sum(btin(1:211,i));
76 sumBoutR(i) =sum(btout(1:211,i));
77
```

```
78 sumBinB(i) = sum(btin(56:266,i));
79 sumBoutB(i) = sum(btout(56:266,i));
80
81 sumBinG(i) = sum(btin(111:321,i));
82 sumBoutG(i) = sum(btout(111:321,i));
83 end
84
85 skitR= sumBinR + sumBoutR;
86 skitB= sumBinG + sumBoutB;
87 skitG= sumBinG + sumBoutG;
88
89 %Derivering av all Xpos summerande over tid, multiplikation med
90 %langden for ledning, andra beroende pa vilken konstellation
91 %som ska testas
92 diff_btinR = 24*scale*0.1*scale*diff(sumBinR(1,:))./diff(t);
93 diff_btoutR = 24*scale*0.1*scale*diff(sumBoutR(1,:))./diff(t);
94
95 diff_btinB = 29*scale*0.1*scale*diff(sumBinB(1,:))./diff(t);
96 diff_btoutB = 29*scale*0.1*scale*diff(sumBoutB(1,:))./diff(t);
97
98 diff_btinG = 34*scale*0.1*scale*diff(sumBinG(1,:))./diff(t);
99 diff_btoutG = 34*scale*0.1*scale*diff(sumBoutG(1,:))./diff(t);
100
101 difftsmR = (diff_btinR+diff_btoutR);
102 difftsmB = (diff_btinB+diff_btoutB);
103 difftsmG = (diff_btinG+diff_btoutG);
104
105 RmsdFIdtBtotR=sqrt(mean(difftsmR.*difftsmR));
106 RmsdFIdtBtotB=sqrt(mean(difftsmB.*difftsmB));
107 RmsdFIdtBtotG=sqrt(mean(difftsmG.*difftsmG));
108
109 %Strom amplituden for varje slinga fran inducerad spanning
110 StromR=sqrt(2)*1000*RmsdFIdtBtotR/Wireimpedance
111 StromB=sqrt(2)*1000*RmsdFIdtBtotB/Wireimpedance
112 StromG=sqrt(2)*1000*RmsdFIdtBtotG/Wireimpedance
```

## A.2 FFT

```

1  clc;
2  close all;
3  clear;
4
5  fs = 1/(4*10^-6);    %Sampling f
6  Ts = 1/fs;          %Sampling T
7  N = 2500;           %langd av signal
8  t = (0:N-1)*Ts;     %Tids vektor
9  T=1/400;            %Period tiden for matsignal
10 Readsignal= readmatrix(3phase.xlsx);
11 Trans = transpose(Readsignal);
12 Signaltranspose1=Trans(5,2:2501);
13 Signaltranspose2=Trans(11,2:2501);
14 Signaltranspose3=Trans(17,2:2501);
15 Signaltranspose4=Trans(23,2:2501);
16 figure(1)
17 plot(t,Signaltranspose1,'r', t,Signaltranspose2,'b', t,
      Signaltranspose3,'g',t,Signaltranspose4,'k');
18 title('Mtsignaler fr n Oscilloskopet')
19 xlabel('t (s)')
20 ylabel('V')
21 legend('L1','L2','L3','Powerflex fas 1')
22 Voltage1 = fft(Signaltranspose1);
23 Voltage2 = fft(Signaltranspose2);
24 Voltage3 = fft(Signaltranspose3);
25 VoltageT = fft(Signaltranspose4);
26
27
28 %Ta fa fram Two sidiga spectrum P2, sedan ta fram singel
29 %spec baserat pa P2
30 P2 = abs(Voltage1/N);
31 P1 = P2(1:N/2+1);
32 P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
33
34 %Vinkel pa slinga
35 phaser = angle(Voltage1)*180/pi;
36
37 P4 = abs(Voltage2/N);
38 P3 = P4(1:N/2+1);
39 P3(2:end-1) = 2*P3(2:end-1);
40
41 phaseb = angle(Voltage2)*180/pi;
42
43 P6 = abs(Voltage3/N);
44 P5 = P6(1:N/2+1);

```

```
45 P5(2:end-1) = 2*P5(2:end-1);
46
47 phaseg = angle(Voltage3)*180/pi;
48
49 P8 = abs(Voltage3/N);
50 P7 = P8(1:N/2+1);
51 P7(2:end-1) = 2*P7(2:end-1);
52
53 phaseT = angle(VoltageT)*180/pi;
54
55 P10 = abs(VoltageT/N);
56 P9 = P10(1:N/2+1);
57 P9(2:end-1) = 2*P9(2:end-1);
58
59 %Definera frekvens och plotta amp spektrum
60 f = fs*(0:(N/2))/N;
61 figure(2)
62 plot(f,P1,'r',f,P3,'b',f,P5,'g')
63 xlim([0 1000]);
64 title('Singel-Sida av Amplitud Spektrum av X(t)')
65 xlabel('f (Hz)')
66 ylabel('|V|')
67 legend('L1','L2','L3')
68
69 % Ta fram amplituden av FFT:en
70
71 R=Voltage1; %spara FFT i en annan variabel
72 B=Voltage2;
73 G=Voltage3;
74 P=VoltageT;
75 %Ta bort allt brus
76 thresholdR = max(abs(Voltage1)/1); %tolerans for brus
77 thresholdB = max(abs(Voltage2)/1);
78 thresholdG = max(abs(Voltage3)/1);
79 thresholdT = max(abs(VoltageT)/4);
80
81 %Tar bort alla signaler som ar mindre an hogsta signalen
82 R(abs(Voltage1)<thresholdR) = 0;
83 B(abs(Voltage2)<thresholdB) = 0;
84 G(abs(Voltage3)<thresholdG) = 0;
85 T(abs(VoltageT)<thresholdT) = 130;
86
87 %Vinkel information
88 phaseR=atan2(imag(R),real(R))*180/pi;
89 phaseB=atan2(imag(B),real(B))*180/pi;
90 phaseG=atan2(imag(G),real(G))*180/pi;
```

```
91 phaseT=atan2(imag(T),real(T))*180/pi;
92
93 %phase vs frequencies
94 figure(3)
95 stem(f,phaseR(1:length(f)));
96 xlim([0 2000]);
97
98 figure(4)
99 stem(f,phaseB(1:length(f)));
100 xlim([0 2000]);
101
102 figure(5)
103 stem(f,phaseG(1:length(f)));
104 xlim([0 2000]);
105
106 figure(6)
107 stem(f,phaseT(1:length(f)));
108 xlim([0 9000]);
109
110 %Ta fram ratt signal vid 400hz och plotta med ordinarie
111 figure(7)
112 SignalR = ifft(R);
113 SignalB = ifft(B);
114 SignalG = ifft(G);
115 SignalT = ifft(T);
116 plot(t,SignalR,'k',t,SignalB,'k',t,SignalG,'k');
117 hold on
118 plot(t,Signaltranspose1-0.05788,'r', t,Signaltranspose2-0.043424,'b',
      t,Signaltranspose3-0.032816,'g');
119 hold off
120 title('Filtrerade Signaler och mtsignaler')
121 xlabel('t(s)')
122 ylabel('V')
123 legend('L1','L2','L3')
124
125 %Plotta filtrerad utan ordinarie
126 figure(10)
127 plot(t,SignalR,'r',t,SignalB,'b',t,SignalG,'g');
128 title('Filtrerade Signaler')
129 xlabel('t(s)')
130 ylabel('V')
131 legend('L1','L2','L3')
```



**INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK**  
**CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA**  
Göteborg, Sverige  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



**CHALMERS**