

# Design av strømforsyningsanlegg til et elektrisk oppvarmingssystem for undervanns rørledninger

**Rune Haugland**

Master i energibruk og energiplanlegging

Innlevert: Juli 2012

Hovedveileder: Eilif Hugo Hansen, ELKRAFT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for elkraftteknikk



## Oppgavetekst

Innen SINTEF/NTNU Elkraftteknikk er det utviklet et system for elektrisk oppvarming av subsea rørledninger, kalt DEH. Det er utført en rekke installasjoner med bruk av dette systemet, som har sitt primære formål å forhindre pluggdannelser (hydrater/voks) i transportrør for olje/gass, og som kan medføre produksjonsstans.

Kraftforsyningssystemet til et DEH-anlegg må designes noe spesielt, ettersom lasten utgjør en en-fase last med lav effektfaktor, der fasestrøm i den ukompenserte lasten er relativt høy, typisk cirka 1500 A.

Kandidaten skal:

- Utarbeide en forenklet modell av den elektriske kretsen for et DEH-anlegg.
- Gi en beskrivelse av et trefase-anlegg (med symmetrering) og et enfase-anlegg, og vurder alternativene sett fra elektriske systemkrav.
- Beskriv hvordan systemet dimensjoneres ut fra variasjon i effektfaktoren og ytelse.

Oppgaven gitt: 22. februar 2012

Hovedveileder: Eilif Hugo Hansen



## I Forord

Sintef energi har siden 1997 jobbet med elektrisk oppvarming av olje- og gassrør på havbunnen. Usikkerheter ved bestemmelse av lasten gjør at effekt faktorens har en viss usikkerhet. Effektfaktoren vil også endres etter hvert som røret varmes opp. Sintef ville se nærmere på virkningen av endring i effektfaktor.

Jeg har i løpet av oppgaven fått innspill og hjelp fra flere personer, og vil rette en spesiell takk til:

- Eilif Hugo Hansen, veileder NTNU
- Harald Kulbotten, SINTEF
- Jens Lervik, SINTEF
- Ingebjørg Lien, Wärtsilä



## II Sammendrag

For å forhindre pluggdannelser (hydrater/voks) i transportrør subsea for olje/gass, som kan medføre produksjonsstans har SINTEF/NTNU Elkraftteknikk utviklet et system for elektrisk oppvarming av undervanns rørløsnings. Dette systemet forkortes DEH.

Oppvarming av røret skjer ved å kjøre en stor strøm gjennom røret, hvor varme utvikles på grunn av rørets resistans. Av sikkerhetsmessige årsaker er røret jordet i begge endene. Dette fører til strømdeling mellom røret og sjøvann, hvilket reduserer effektiviteten til systemet betraktelig. Ineffektiviteten sammen med røroppvarmingens lave effektfaktor gjør at det vil gå en stor strøm i stigerkabelen ned til havbunnen. For å begrense strømmen benyttes det fasekompensering med kondensatorer og et symmetreringsanlegg etter Steinmetz' krets.

For å kunne analysere forsyningssystemet topside, er det valgt å utarbeide en forenklet krets. Kretsen er verifisert av et laboratorieforsøk og datasimuleringer i Matlab og Pscad. Resultatene viser at det aktive tapet i flere av komponentene i kretsen kan neglisjeres, noe som fører til at formlene for Steinmetz' symmetreringskrets gir god nøyaktighet. Disse formlene sier at verdiene for komponentene i symmetreringskretsen er proporsjonal med resistansen den ser.

Det er utført analyser av virkningen av lastens effektfaktor som viser at den er bestemmende for den maksimale og minimale resulterende resistansen av lasten og fasekompenseringen, hvilket er den resistansen symmetreringskretsen ser. Analysene viser også at effektfaktoren er dimensjonerende for andre komponenter.





## Innholdsfortegnelse

<b><i>I</i></b>	<b><i>Forord</i></b> .....	<b><i>I</i></b>
<b><i>II</i></b>	<b><i>Sammendrag</i></b> .....	<b><i>II</i></b>
<b>1</b>	<b>Innledning</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Teori</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Transformator</b> .....	<b>3</b>
<b>2.2</b>	<b>Symmetreringsanlegg</b> .....	<b>3</b>
<b>2.3</b>	<b>Symmetriske komponenter</b> .....	<b>6</b>
<b>2.4</b>	<b>Fasekompensering</b> .....	<b>9</b>
<b>2.5</b>	<b>Magnetisme</b> .....	<b>12</b>
<b>2.6</b>	<b>Skin effect</b> .....	<b>13</b>
<b>2.7</b>	<b>Proximity effect</b> .....	<b>14</b>
<b>2.8</b>	<b>Overharmoniske strømmer</b> .....	<b>15</b>
2.8.1	Påvirkning på kondensator og spole .....	17
<b>2.9</b>	<b>Effekt</b> .....	<b>18</b>
<b>3</b>	<b>Beskrivelse av DEH</b> .....	<b>19</b>
<b>3.1</b>	<b>Bakgrunn</b> .....	<b>19</b>
<b>3.2</b>	<b>Oppbygningen av forsyningsanlegget</b> .....	<b>20</b>
3.2.1	DEH subsea .....	21
3.2.2	Fasekompensering.....	24

3.2.3 Symmetreringsanlegg.....	24
3.2.4 Dempemotstand.....	25
3.2.5 Transformator .....	25
<b>3.3 Dimmensjoneringsgrunnlag .....</b>	<b>26</b>
<b>4 Forenklet krets.....</b>	<b>29</b>
<b>4.1 Subsea.....</b>	<b>29</b>
<b>4.2 Fasekompensering .....</b>	<b>30</b>
<b>4.3 Symmetreringsanlegget .....</b>	<b>30</b>
<b>4.4 Dempemotstand.....</b>	<b>32</b>
<b>4.5 Transformator .....</b>	<b>32</b>
<b>4.6 Fullstendig krets .....</b>	<b>33</b>
<b>5 Metodikk .....</b>	<b>35</b>
<b>5.1 Sammenligning av dataprogrammene Matlab og Pscad.....</b>	<b>35</b>
5.1.1 Matlab-programmets oppbygning .....	37
<b>5.2 Laboratorium-forsøk.....</b>	<b>39</b>
<b>5.3 Neglisjering av tap .....</b>	<b>40</b>
<b>5.4 Effektfaktorens innvirkning.....</b>	<b>41</b>
5.4.1 Symmetreringsanlegget .....	41
5.4.2 Prosjektering av Tyrihans .....	42
5.4.3 Installert anlegg på Tyrihans .....	43
<b>6 Resultat .....</b>	<b>45</b>
<b>6.1 Verifisering av modell .....</b>	<b>45</b>
6.1.1 Sammenligning av dataprogrammene Matlab og Pscad.....	45

6.1.2 Innstilling av verdi for last og fasekompensering .....	51
6.1.3 Måling av enkeltkomponenter .....	57
6.1.4 Bestemmelse av C1 og L2 .....	60
6.1.5 Gjennomføring av forsøk.....	60
6.1.6 Rekonstruksjon av forsøket i Matlab med målte verdier fra nettanalysatoren .....	65
6.1.7 Rekonstruksjon av forsøket i Matlab med verdier på kondensatorene fra RCL-meteret .....	66
6.1.9 Sannsynlige målefeil .....	68
<b>6.2 Neglisjering av tap .....</b>	<b>69</b>
6.2.1 Kondensatorene .....	69
6.2.2 Spolen.....	70
<b>6.3 Effektfaktorens innvirkning .....</b>	<b>70</b>
6.3.1 Symmetreringsanlegget .....	70
6.3.2 Prosjektering av Tyrihans .....	72
6.3.3 Installert anlegg på Tyrihans .....	76
<b>7 Diskusjon .....</b>	<b>83</b>
<b>7.1 Verifisering av forenklet krets .....</b>	<b>83</b>
7.1.1 Sammenligning av dataprogrammene Matlab og Pscad .....	83
7.1.2 Sannsynlige målefeil .....	84
7.1.3 Rekonstruksjon av forsøk i Matlab .....	86
<b>7.2 Neglisjering av tap .....</b>	<b>88</b>
<b>7.3 Dimensjonering etter variasjon i effektfaktor og effekt .....</b>	<b>89</b>
7.3.1 Stigekabel .....	90
7.3.2 Fasekompensering.....	90
7.3.3 Symmetreringsanlegg.....	91
7.3.4 Transformator .....	91

<b>7.4 To-fase kontra tre-fase.....</b>	<b>92</b>
7.4.1 Effektfaktor.....	93
7.4.2 Spenning.....	93
7.4.3 Symmetri.....	93
<b>8 Konklusjon.....</b>	<b>95</b>
<b>8.1 Videre arbeid.....</b>	<b>95</b>
<b>9 Bibliografi.....</b>	<b>97</b>
<b>Vedlegg A Lab oppsett.....</b>	<b>101</b>
<b>Vedlegg B Matlabprogram.....</b>	<b>105</b>
<b>Vedlegg C Pscad.....</b>	<b>107</b>
<b>Vedlegg D Beregning av resistansen for kondensator og spole.....</b>	<b>109</b>

## **1 Innledning**

For å forhindre pluggdannelser (hydrater/voks) i transportrør subsea for olje/gass, som kan medføre produksjonsstans har SINTEF/NTNU Elkraftteknikk utviklet et system for elektrisk oppvarming av undervanns rørledninger. Dette systemet forkortes DEH etter den engelske betegnelsen for systemet «Direct electric heating»

Kraftforsyningssystemet til et DEH-anlegg må designes noe spesielt, ettersom lasten utgjør en en-fase last med lav effektfaktor, der fasestrøm i den ukompenserte lasten er relativt høy, typisk cirka 1500 A.

Det er utarbeidet en forenklet modell for å kunne analysere forsyningsutstyret, hvor det er tatt utgangspunkt i anlegget som er installert på Tyrihans. Modellen er verifisert gjennom forsøk og datasimuleringer i Matlab og Pscad. Matlab-programmet ble videre utviklet for å undersøke effekten av endring i lastens effektfaktor.

Det er kun sett på elektriske forhold ved valg av hvordan et DEH-anlegg kan dimensjoneres.



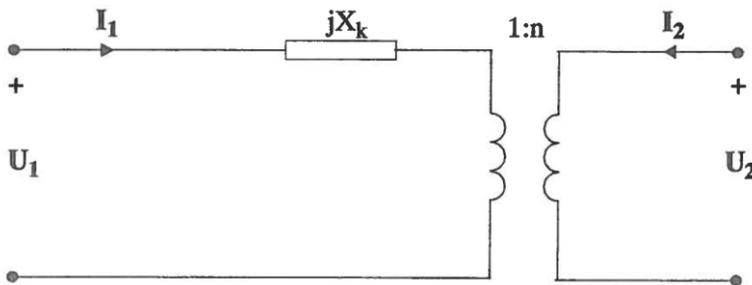
## 2 Teori

### 2.1 Transformator

Ved analyse av en krafttransformator kan en se bort fra strømtap i viklingene, virvelstrømtap og hysteresetap, samt induktansen knyttet til hovedfluksen. Tapet ( $R_k$ ) kan en neglisjere på grunn av den dominerende reaktansen  $X_k$ .

$$X_k \gg R_k \quad (X_k \approx 10 \cdot R_k) \quad [2.1]$$

Dette gjør at ekvivalentskjemaet for en krafttransformator består av  $X_k$  som er summen av lekkreaktansene for de to viklingene og den ideelle transformatoren, slik vist i Figur 2-1.

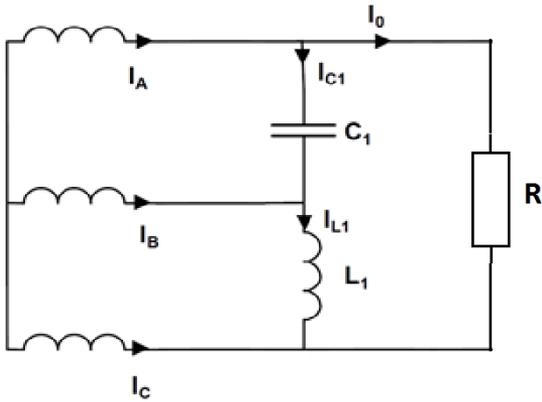


Figur 2-1 Forenklet krets for krafttransformatoren (1)

### 2.2 Symmetreringsanlegg

Steinmetz' krets er en måte å få det foranliggende nettet til å se en to-faselast som en balansert tre-faselast. Det fører til en reduksjon i fasestrømmen på opptil  $\sqrt{3}$ . Denne kretsen forutsetter ideell induktans og kapasitans, samt en ren resistiv last (2).

Figur 2-2 viser oppbygningen til et slikt symmetreringsanlegg; med kondensator ( $C_1$ ), induktansen ( $L_1$ ) og lasten ( $R$ ).



**Figur 2-2 Steinmetz krets (3)**

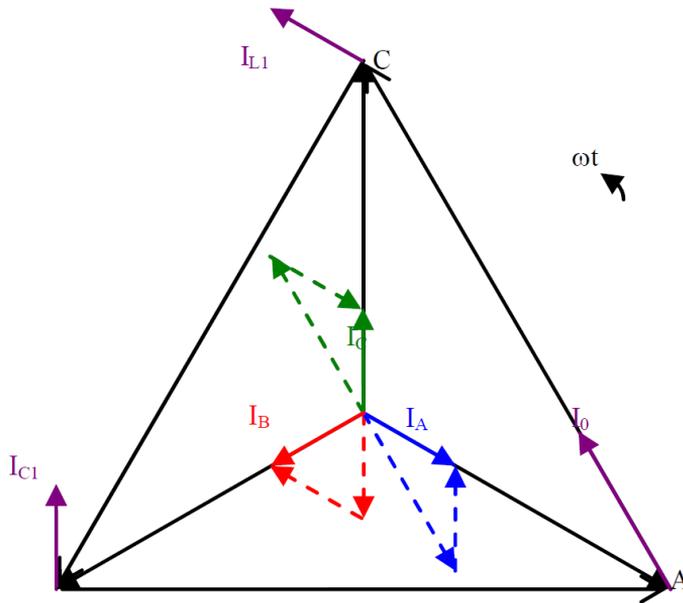
Når den reaktive effekten av induktansen og kapasitansen er lik den aktive effekten av lasten, dividert på  $\sqrt{3}$ , er systemet helt balansert (2).

Forutsatt lik spenning over alle komponentene gjelder følgende: (3)

$$I_{L1} = I_{C1} = \frac{I_0}{\sqrt{3}} \quad [2.2]$$



For et helt balansert system gjelder følgende viserdiagram:



**Figur 2-3 Viserdiagram for et helt balansert system (3)**

Ved å sette opp følgende sammenhenger for strømmene, kan en finne et uttrykk for størrelsen for kondensatoren og induktansen.

$$\frac{U}{R} = I_0 \quad [2.3]$$

$$\frac{U}{X_{C1}} = I_{C1} \quad [2.4]$$

$$\frac{U}{X_{L1}} = I_{L1} \quad [2.5]$$

For å finne kondensatorens verdi kombineres ligning [ 2.2 ], [ 2.3 ] og [ 2.4 ].

$$\frac{U}{X_{C1}} = \frac{I_0}{\sqrt{3}} \quad [ 2.6 ]$$

$$\frac{U}{X_{C1}} = \frac{U}{R \cdot \sqrt{3}} \quad [ 2.7 ]$$

$$X_{C1} = R \cdot \sqrt{3} \quad [ 2.8 ]$$

$$\frac{1}{\omega \cdot C_1} = R \cdot \sqrt{3} \quad [ 2.9 ]$$

$$C_1 = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot \omega \cdot R} \quad [ 2.10 ]$$

For å finne induktansens verdi kombineres ligning [ 2.2 ], [ 2.3 ] og [ 2.5 ].

$$\frac{U}{X_{L1}} = \frac{I_0}{\sqrt{3}} \quad [ 2.11 ]$$

$$\frac{U}{X_{L1}} = \frac{U}{R \cdot \sqrt{3}} \quad [ 2.12 ]$$

$$X_{L1} = R \cdot \sqrt{3} \quad [ 2.13 ]$$

$$\omega \cdot L_1 = R \cdot \sqrt{3} \quad [ 2.14 ]$$

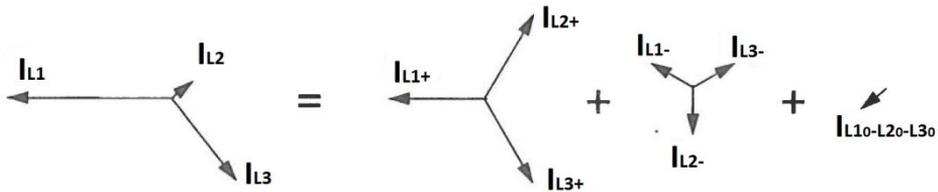
$$L_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot R}{\omega} \quad [ 2.15 ]$$

### 2.3 Symmetriske komponenter

En forutsetning for å kunne beregne pr.fase er at nettet er symmetrisk.

For å kunne beregne pr.fase på et usymmetrisk nett kan det innføres symmetriske komponenter. Figur 2-4 viser hvordan et usymmetrisk nett

kan deles opp i tre dekoblede systemer; pluss- (+), minus- (-) og nullsystemet (0). De to første systemene noteres etter positiv eller negativ etter fasefølge, mens nullsystemet noteres etter manglende fasefølge.



**Figur 2-4 Transformasjon til symmetriske komponenter (1)**

Strømmene i de ulike fasene kan uttrykkes følgende: (4)

$$I_{L1} = I_+ + I_- + I_0 \quad [ 2.16 ]$$

$$I_{L2} = h^2 \cdot I_+ + h \cdot I_- + I_0 \quad [ 2.17 ]$$

$$I_{L3} = h \cdot I_+ + h^2 \cdot I_- + I_0 \quad [ 2.18 ]$$

Med rotasjonsoperatoren lik:

$$h = 1 \angle 120 \quad [ 2.19 ]$$

Strøm i positivt roterende system:

$$I_+ = \frac{1}{3}(I_{L1} + h \cdot I_{L2} + h^2 \cdot I_{L3}) \quad [ 2.20 ]$$

Strøm i negativt roterende system:

$$I_- = \frac{1}{3}(I_{L1} + h^2 \cdot I_{L2} + h \cdot I_{L3}) \quad [ 2.21 ]$$

Strøm i null-systemet:

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}) \quad [ 2.22 ]$$

Det er ingen drivende kilder i det negative systemet og nullsystemet, kun i det positive systemet. Det vil altså ikke gå noen strøm i det negative systemet i et symmetrisk nett. Det positive systemet beskriver nettet uten usymmetri. Ved å kombinere ligning [ 2.20 ] og [ 2.21 ] kan et mål på usymmetrien uttrykkes:

$$\rho = \left| \frac{I_-}{I_+} \right| \quad [ 2.23 ]$$

$$\rho = \left| \frac{\frac{1}{3}(I_{L1} + h^2 \cdot I_{L2} + h \cdot I_{L3})}{\frac{1}{3}(I_{L1} + h \cdot I_{L2} + h^2 \cdot I_{L3})} \right| \quad [ 2.24 ]$$

$$\rho = \left| \frac{I_{L1} + h^2 \cdot I_{L2} + h \cdot I_{L3}}{I_{L1} + h \cdot I_{L2} + h^2 \cdot I_{L3}} \right| \quad [ 2.25 ]$$

Ved et fullstendig usymmetrisk nett, dvs. hvor to av fasene leder all strøm, er  $I_- = I_+$  og  $\rho = 1$ . Ved et symmetrisk nett er  $I_- = 0$ . Følgelig blir  $\rho = 0$

## 2.4 Fasekompensering

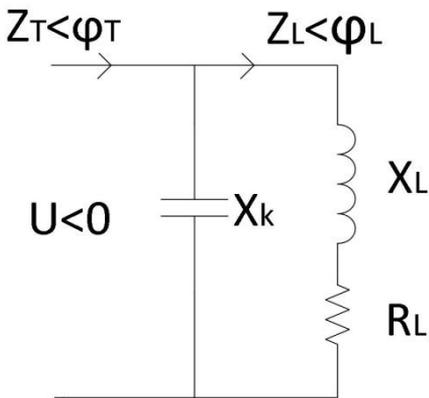
Fasekompensering er en måte å øke effekt faktoren på. En reaktiv last vil gi en faseforskyvning mellom strøm og spenning som gjør at all effekt ikke kan utnyttes. For å motvirke dette må det innføres en komponent som sørger for faseforskyvning i motsatt retning.

Full kompensering betyr at den reaktive effekten i lasten ( $Q_L$ ) er lik den reaktive effekten i fasekompenseringen ( $Q_c$ ). Det betyr også at den totale effekt faktoren ( $\cos \varphi_T$ ) er lik 1.

$$Q_L = Q_c \quad [ 2.26 ]$$

$$\cos \varphi_T = 1 \quad [ 2.27 ]$$

Gitt en krets med en induktiv last og kapasitiv fasekompensering etter Figur 2-5, hvor kondensatoren er ideell: Ved full kompensering tilføres kretsen kun aktiv effekt og den reaktive effekten flyter bare mellom kondensatoren og lasten. Dette medfører at strømmen i lasten vil være uforandret, men det oppnås en reduksjon i strømmen inn til kretsen.



Figur 2-5 Krets for fasekompensering

$X_k$  = Reaktansen til

fasekompenseringen [ $\Omega$ ]

$X_L$  = Reaktansen til lasten [ $\Omega$ ]

$R_L$  = Resistansen til lasten [ $\Omega$ ]

$Z_L$  = Impedansen til lasten [ $\Omega$ ]

$Z_T$  = Den totale impedansen [ $\Omega$ ]

Impedansen for lasten:

$$Z_L = R_L + jX_L \quad [2.28]$$

$$\sqrt{(R_L)^2 + (X_L)^2} \angle \tan^{-1} \frac{X_L}{R_L} \quad [2.29]$$

Faseforskyvningen for lasten:

$$\varphi_L = \tan^{-1} \frac{X_L}{R_L} \quad [2.30]$$

Kretsens totale impedans:

$$Z_T = \frac{-jX_k \cdot (R_L + jX_L)}{R_L + j(X_L - jX_k)} \quad [2.31]$$

$$\frac{X_C \cdot \sqrt{(R_L)^2 + (X_L)^2} \angle -90 + \varphi_L}{\sqrt{R_L^2 + (X_L - X_k)^2} \angle \tan^{-1} \frac{X_L - X_k}{R_L}} \quad [2.32]$$

Kretsens totale faseforskyvning:

$$\varphi_T = \varphi_L - 90 - \tan^{-1} \frac{X_L - X_k}{R_L} \quad [2.33]$$

Reaktansen for fasekompenseringen:

$$X_k = R_L \cdot \tan(\varphi_T + 90 - \varphi_L) + X_L \quad [2.34]$$

Kapasitansen for fasekompenseringen:

$$C_k = \frac{1}{\omega \cdot (R_L \cdot \tan(\varphi_T + 90 - \varphi_L) + X_L)} \quad [2.35]$$

Ved full fase kompensering ( $\cos \varphi_T = 1$ ) kan ligningene for reaktansen og kapasitansen forenkles:

$$X_k = \frac{R_L^2}{X_L} + X_L \quad [2.36]$$

$$C_k = \frac{1}{\omega \cdot \left( \frac{R_L^2}{X_L} + X_L \right)} \quad [ 2.37 ]$$

## 2.5 Magnetisme

Magnetisk permeabilitet er et mål for et materiales evne til å danne et magnetfelt inne i selve materialet og beskriver sammenhengen mellom den magnetiske feltstyrke H og den magnetiske flukstetthet B.

Permeabiliteten er den magnetiseringsgraden, et materiale oppnår når det blir utsatt for et magnetfelt. Magnetisk permeabilitet angis med bokstaven  $\mu$ . (5)

Relativ permeabilitet angis med symbolet  $\mu_r$  og beskriver forholdet mellom permeabiliteten av et spesifikt medium i forhold til vakuumpermeabiliteten, gitt ved den magnetiske konstant (5)

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad [ 2.38 ]$$

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad [ 2.39 ]$$

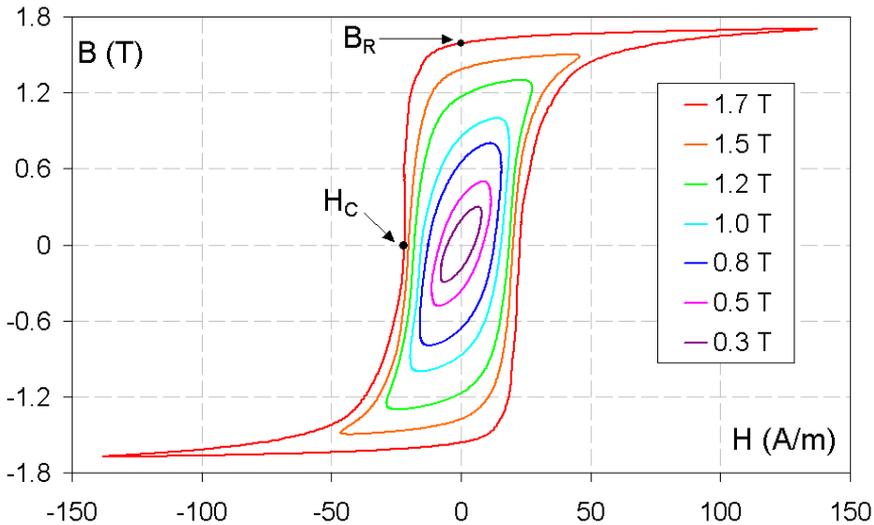
Rundt en leder oppstår et magnetisk felt som betegnes med H og enhet [A/m]. I vakuum er dette feltet lik den magnetiske fluksen.

Sammenhengen mellom magnetiske feltet og fluks er gitt av: (5)

$$B = \mu \cdot H \quad [ 2.40 ]$$

For ikke-lineære magnetiske materialer vil hysteresekurven ha en form lik Figur 2-6. Ved et økende H-felt vil B-feltet følge den nedre kurven, ved fallende H felt følges den øvre kurven av samme farge.

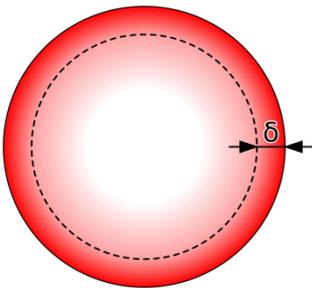




Figur 2-6 Hysteresekurve for ikke-lineære magnetiske materialer (5)

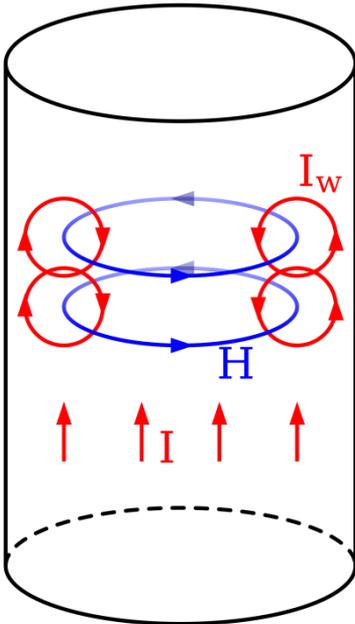
## 2.6 Skin effect

For ledere som fører en vekselstrøm vil det gå mest strøm i ytterkanten. Denne effekten kalles skin effect og fører til en forøgning av motstanden, som øker med frekvensen. Skin depth ( $\delta$ ) er vist i Figur 2-7.



Figur 2-7 Skin depth (6)

Denne effekten skyldes virvelstrømmer ( $I_w$ ) som blir satt opp av det magnetiske feltet som igjen er satt opp av vekselstrømmen ( $I$ ), vist i Figur 2-8. Dette feltet skaper et elektrisk felt som motvirker endringene i strømmen. Det elektriske feltet er sterkest i senter av lederen og presser dermed elektronene ut mot overflaten.



Figur 2-8 Virvelstrømmer satt opp av det magnetiske feltet fra vekselstrømmen (6)

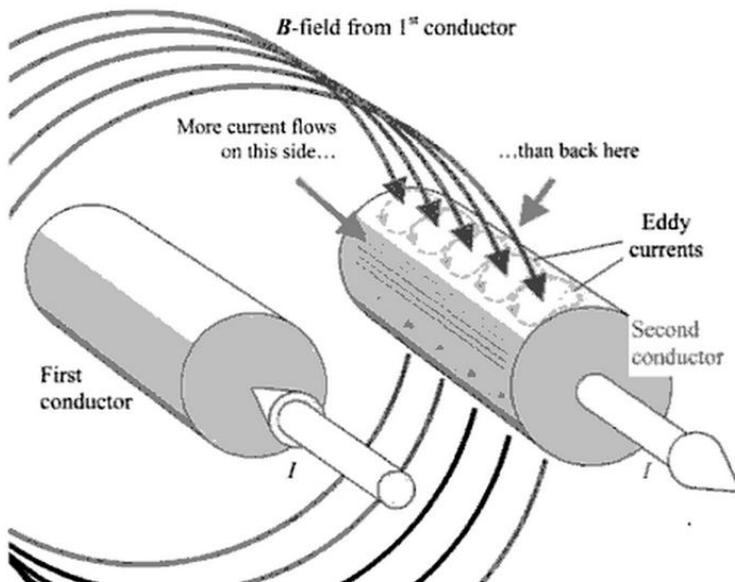
Skin depth er definert som det området hvor 63 % av strømmen går, og er avhengig av resistiviteten til lederen ( $\rho$ ), vinkelfrekvensen ( $\omega$ ) og lederebs permeabilitet ( $\mu$ ). (6)

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu}} \quad [ 2.41 ]$$

## 2.7 Proximity effect

Når en leder som fører vekselstrøm ligger ved siden av andre strømførende ledere, vil det oppstå en effekt som påvirker hvor i lederen det vil gå mest strøm. Dette fører til at mer strøm vil gå gjennom et mindre areal, noe som vil gi mer motstand og dermed også større tap. Denne endringen i strømtettheten kalles proximity effect.

En leder som fører vekselstrøm vil ha et tilhørende magnetisk felt rundt seg. Dette feltet vil så påvirke lederne i nærheten ved å induisere virvelstrømmer. For kabler som ligger i nærheten av hverandre, men som fører strømmen motsatt vei, vil det gå mest strøm i siden som ligger mot den andre kabelen slik vist i Figur 2-9.



Figur 2-9 Proximity effect på to ledere som fører strømmen motsatt vei. (7)

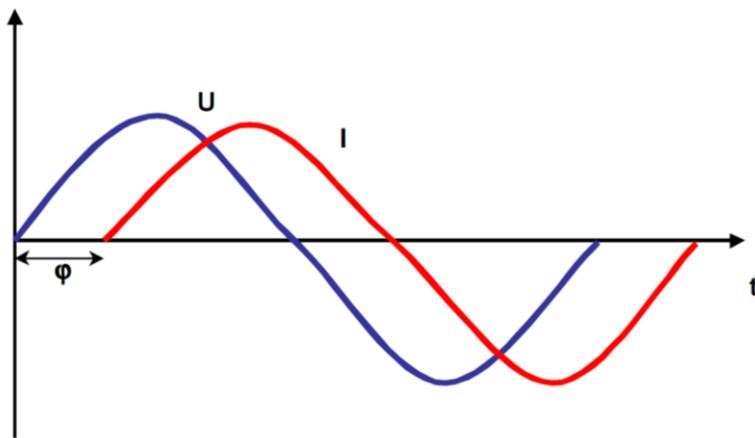
## 2.8 Overharmoniske strømmer

Overharmoniske strømmer er strømmer generert av ulineære laster. Frekvensen til disse strømmene er en multiple av grunnfrekvensen.

I økende grad benyttes apparater og utstyr som forvrenger spennings kurveform fordi strømmen som disse apparatene opptar fra nettet ikke er sinusformet. Den forvrengte spenningen vil bestå av den grunnharmonisk (50 Hz) og et antall overharmoniske spenninger. Det er ofte 3-, 5- og 7-harmoniske som er fremtredende. Kraftelektronikk i

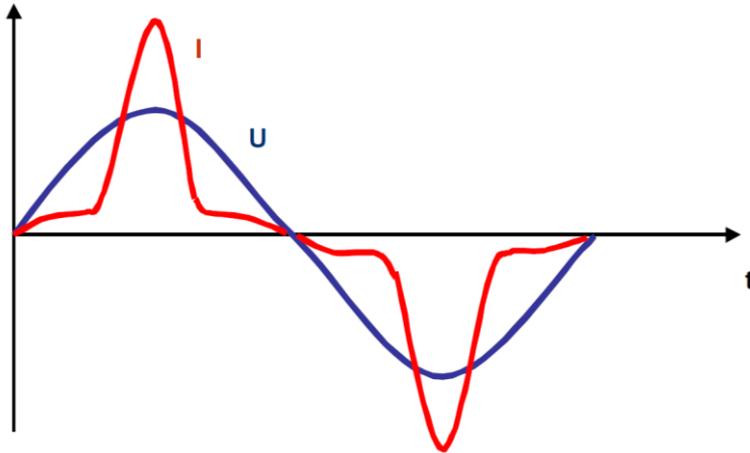
apparater, f.eks. PC'er og annet datateknisk utstyr, avbruddsfrie strømforsyninger (UPS 'er) osv. er slike ulineære laster som genererer støy på nettet. Et stort innslag av harmoniske i nettet kan gi støyproblemer for annet elektronisk utstyr. (8)

For lineære laster påtrykt en ren sinusspenning vil det gå en ren sinusformet strøm, slik vist i Figur 2-10.



**Figur 2-10 Strøm og spenning ved lineær last, hvor  $\varphi$  er faseforskyvningen (8)**

For ulineære laster påtrykt en ren sinusspenning vil det ikke gå en ren sinusformet strøm. Denne strømmen vil være en sum av de forskjellige overharmoniske strømmene, slik vist i Figur 2-11.



Figur 2-11 Strøm og spenning ved ulineær last (8)

### 2.8.1 Påvirkning på kondensator og spole

En kondensator er en lineær last som er avhengig av frekvensen.

Reaktansen til kondensatoren vil divideres proporsjonalt med frekvensen til spenningen.

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad [2.42]$$

For den syvende harmoniske frekvensen blir reaktansen ( $X_{c7}$ ) til kondensatoren:

$$X_{c7} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{grunnharmoniske} \cdot 7 \cdot C} \quad [2.43]$$

$$X_{c7} = \frac{X_c}{7} \quad [2.44]$$

Dette medfører at kondensatoren lettere slipper gjennom strømmer med en frekvens større enn den grunnharmoniske. For spoler vil dette være motsatt, ettersom reaktansen ( $X_L$ ) øker med frekvensen:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad [ 2.45 ]$$

## 2.9 Effekt

Effekt for en fase kan uttrykkes:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad [ 2.46 ]$$

Ved å løse med hensyn på spenningen og uttrykke strømmen ved spenning og impedans ( $I = \frac{U}{Z}$ ) kan uttrykket skrives om:

$$U = \sqrt{\frac{P \cdot Z}{\cos \varphi}} \quad [ 2.47 ]$$

Ved ren resistiv last kan uttrykket forenkles. ( $Z = R$  og  $\cos \varphi = 1$ )

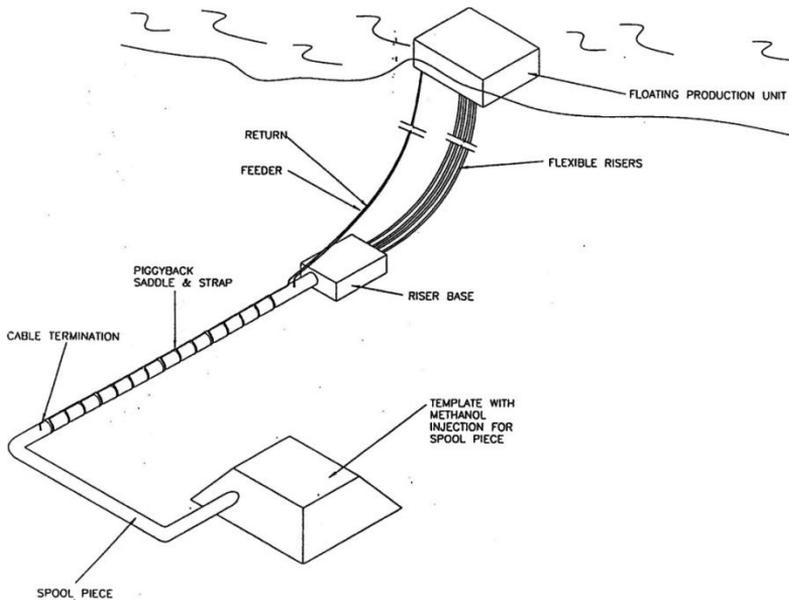
$$U = \sqrt{P \cdot R} \quad [ 2.48 ]$$

## 3 Beskrivelse av DEH

### 3.1 Bakgrunn

Ved en oljerigg går det produksjonsrør for transport av olje og gass fra brønnen på havbunnen og opp til plattformen. Oljen og gassens temperatur er høyest ved brønnen og avtar med avstanden på grunn av varmetap til kaldere sjøvann. Ved produksjonsstans eller veldig lav produksjon (hvilket det gjerne er mot slutten av brønnens levetid) vil rørenes temperatur synke ytterligere. Ved rundt 25 grader celsius kan hydrater begynne å formes, avhengig av andelen vann (10-80 %), saltinnholdet og hvilket trykk det er i røret. Hydrater ligner på iskrystaller (9). Dette vil forårsake en reduksjon i flyten og vil til slutt kunne blokkerer rørledningen helt. For å fjerne hydratene finnes det fire anerkjente metoder; mekanisk, kjemisk, smelting ved å tilføre varme og ved å redusere trykket.

Innen SINTEF Energi og NTNU er det utviklet et system for elektrisk oppvarming av undervanns rørledninger (DEH), som et alternativ til bruk av metanol. Dette systemet går ut på å kjøre en høy strøm gjennom røret som ved sin resistive motstand vil utvikle varme. Figur 3-1 viser en prinsippskisse for dette med DEH installert.



**Figur 3-1** Prinsippskisse for DEH (10)

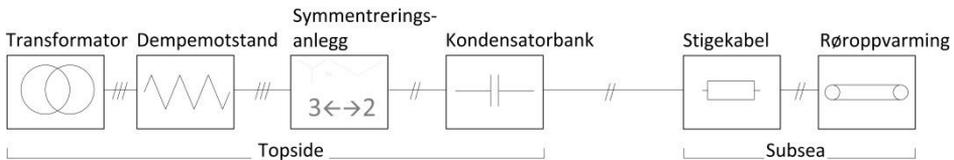
### 3.2 Oppbygningen av forsyningsanlegget

Forsyningsanlegget til DEH må konstrueres litt spesielt, fordi det er en tofase-last med en veldig lav effektfaktor.

Figur 3-2 viser hvilke komponenter som inngår i systemet og i hvilken rekkefølge de er koblet sammen på. Fra plattformen går det en stige-kabel som forsyner røroppvarmingen subsea. På grunn av lav effektfaktor er det en kondensatorbank som øker effektfaktoren opp mot 1, som vil minke strømmen med en faktor på 3 til 4. Videre er det et symmetreringsanlegg som fordeler tofase-lasten til en trefase-last. Her skjer en ytterligere reduksjon i strømmen med en faktor opp mot  $\sqrt{3}$ . Dempemotstanden er bare innkoblet ved oppstart av systemet for å begrense startstrømmen. Transformatoren har som oppgave å øke og variere spenningen. Dette fordi det er transformatoren som her bestemmer ved hvilken effekt anlegget skal kjøre på. Transformatoren er



også til for å skape et galvanisk skille. Det er avgjørende å få separert DEH-systemet fra resten av nettet, fordi hele systemet opererer med konstant jordfeil.



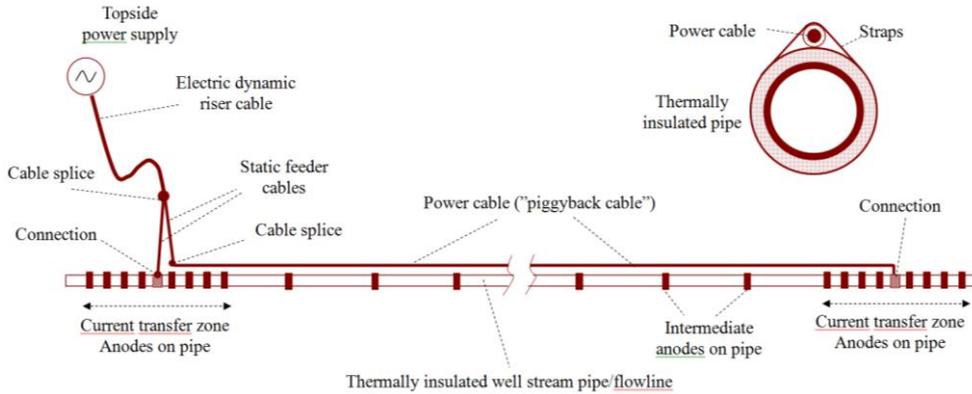
**Figur 3-2 Oversikt over DEH**

### 3.2.1 DEH subsea

For å forsyne DEH-systemet subsea er det nødvendig med stigekabler fra plattformen. Stigerkablene kobles til DEH-systemet på havbunnen i termineringsbokser. Disse boksene er igjen koblet til røret.

Den ene kablen er koblet til den ene enden av røret, mens den andre ligger festet til røret og er koblet til den andre enden. For økt sikkerhet og pålitelighet er termineringspunktene direkte jordet til sjøvann via anoder (3). Et isolert system ville vært vesentlig mer effektivt, men det anses til å være vanskelig å holde det tett i løpet av systemets levetid. En elektrisk feil grunnet alderdom eller en tilfeldig skade på isolasjonen vil kunne få store følger (11). Jordingen av systemet fører til at hele røret får samme potensial som sjøvannet, illustrert i Figur 3-4. Dette vil begrense feilstrømmer som kan oppstå ved skade på isolasjonen.

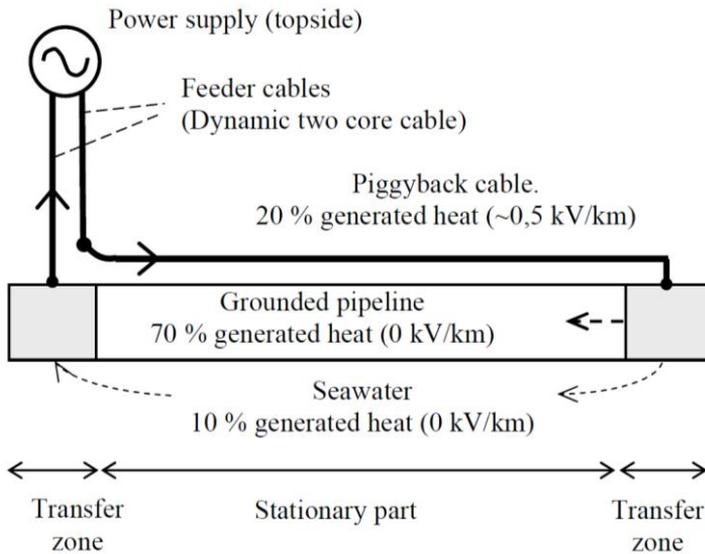
Figur 3-3 viser prinsippskjema av DEH-systemet subsea.



**Figur 3-3 DEH subsea (3)**

Når begge endene av røret er jordet vil strømmen fordele seg mellom røret og sjøvann. Strømfordelingen er avhengig av de elektriske og magnetiske egenskapene til røret, rørdimensjonen og avstanden mellom piggyback-kabelen og røret. Denne avstanden vil ikke være konstant. En økning i avstand fra 5 til 50 cm vil redusere varmen i røret med 30 % (9). Kompleks elektromagnetisk kalkulasjon er nødvendig for å bestemme strømfordelingen mellom rør og sjøvann. Disse kalkuleringene tar hensyn til proximity effect og skin effect (11).

Typisk verdi for strømfordelingen er 40 % via sjøvann og 60 % i røret (12). Dette fører også til at det oppstår en varmfordeling, vist i Figur 3-4. På de steder hvor røret er begravd vil varmen fra piggyback-kabelen bidra til en økning i temperaturen.



**Figur 3-4 Varmefordeling mellom kabel, rør og sjøvann (13)**

Den relative permeabiliteten er en kritisk faktor for bestemmelse av ac-resistansen for røret. Dette er en parameter som ikke blir opplyst fra leverandøren og må derfor finnes ved hjelp av målinger. Større relativ permeabilitet gir større motstand. Rørets permeabilitet varierer fra rør til rør innenfor samme parti. Den vil også kunne endres ved installasjon av DEH-systemet grunnet mekanisk stress. Dette fører til økt usikkerhet til systemets endelige impedans.

Disse usikkerhetene gjør at den endelige impedansen ikke kan vites med sikkerhet før anlegget er ferdig installert og det gjennomføres tester og målinger. Det fører til at utstyret som skal forsyne røroppvarmingen må dimensjoneres med en sikkerhetsfaktor gitt av usikkerheten til subseaimpedansen og varmebehovet.

### 3.2.2 Fasekompensering

Fasekompensering er her brukt av to årsaker:

- Redusere strømmen
- Muliggjøring av Steinmetz' symmetreringsanlegg

Lasten er veldig induktiv og har en effektfaktor mellom 0,25-0,32 (14). Dette er en lav effektfaktor som vil føre til at alt må overdimensjoneres, dersom det ikke fasekompenseres. Det er ikke noen krav til høy effektfaktor, men det kan tvinge seg fram ved at kapasiteten på en eksisterende plattform er presset (15). En økning i effektfaktoren fra 0,25 til 1 vil redusere strømmen med en faktor på 4.

Fasekompenseringen består av en kondensatorbank. Ved å bestemme hvor stor andel av kondensatorbanken som ligger innkoblet, endres kompenseringen. Dette gjør at kondensatorens verdi endres trinnvis.

En forutsetning for Steinmetz' symmetreringsanlegg er at lasten er ren resistiv. For å kunne fordele strømmen best mulig på de tre fasene er det derfor nødvendig med fasekompensering, for å få en effektfaktor nær 1. Med full fasekompensering vil symmetreringsanlegget se en ren resistiv last.

### 3.2.3 Symmetreringsanlegg

Med Steinmetz' krets kan man fordele strømmen til alle fasene. Det medfører at strømmen blir redusert med en faktor på opp til  $\sqrt{3}$ . Denne kretsen er ømfintlig for endringer, slik at en endring i effektfaktoren vil kunne skape usymmetri dersom verdiene på kondensatoren og spolen ikke endres. Kondensatorenes verdi endres ved å bestemme hvor stor

andel av kondensatorbanken som skal ligge innkoblet. Det samme gjelder for spolen. Dette gjør at komponentenes verdi endres trinnvis.

### **3.2.4 Dempemotstand**

Når DEH-systemet kobles til vil det oppstå en startstrøm for å magnetisere opp kretsen. For å begrense denne store strømmen etableres det en motstand i serie.

Denne motstanden vil generere mye tap og varme, slik at det ikke er hensiktsmessig å la den stå innkoblet. Etter en viss tid vil motstanden bli forbikoblet.

### **3.2.5 Transformator**

Transformatoren er til for to årsaker:

- Transformere spenningen for ønsket effekt.
- Lage et galvanisk skille mellom DEH-systemet og resten av plattformens installasjon.

I prosjekteringsfasen, når spesifikasjonene til systemet skal bestemmes, foreligge ikke alltid all nødvendig informasjon, som er nødvendig for å vurdere hvilken effekt som trengs. Impedansen til systemet er også usikker. Dette fører til en usikkerhet i hvilken spenning anlegget skal ha. Videre kan DEH-systemet også kunne ha ulike driftstilstander. Den mest kraftkrevende er å varme opp røret fra sjøtemperatur etter et lengre avbrudd, hvor hydraterne må smeltes. Den minst kraftkrevende situasjonen er på slutten av levetiden for feltet. Mindre strømning i røret fører til at det lettere kan dannes hydrater. DEH kan forhindre dette ved å varme opp røret kontinuerlig.

Alle komponentene i DEH-systemet er statiske og følgelig umulig å regulere. For å kunne stille inn ønsket effekt må altså transformatoren kunne endre spenningen. Dette gjøres ved såkalt tapping, som er å endre viklingsforholdet på transformatoren. Transformatorens sekundærspenning kan da trinnvis endres innenfor et bestemt intervall.

Transformatoren er også til for å lage et galvanisk skille. Det fordi DEH-systemet er jordet i begge ender på sjøbunnen, som skaper en kontinuerlig jordfeil. Store strømmer ville gått tilbake til plattformen via sjøvann om ikke systemet var isolert fra resten av plattformen.

### 3.3 Dimensjoneringsgrunnlag

Dimensjonering av systemet er avhengig av flere forhold, så som: (9)

- Bestemmelse av lastimpedans og strømfordeling:
  - Rørets elektriske og magnetiske egenskaper
  - Rørdimensjonen
  - Rørets lengde
  - Kabeldimensjon
  - Avstanden mellom rør og kabel
  - Sjøvann og sjøbunnens resistivitet
  - Frekvensen
- Bestemmelse av nødvendig effekt:
  - Rørisolasjonen
  - Rørets temperaturprofil ved normal produksjon
  - Sjøvannets temperatur
  - Temperaturen hydratene dannes ved
  - Ønsket oppvarmingstid

Det øverste punktet avgjør lastens impedans og strømfordelingen mellom sjøvann og røret, hvilket har en direkte sammenheng med effektfordelingen. Det er effekten som omsettes i røret som bidrar til oppvarming. Resten er rent tap.

Hvilken effekt røret trenger er avhengig av flere punkter. Flere av punktene er relatert til fysiske størrelser sjøtemperaturen og rørisolasjonen. Det siste punktet bestemmes derimot av hva formålet med røroppvarmingen skal være. Dersom systemet skal dimensjoneres for å smelte hydrater istedenfor bare å holde en jevn temperatur, vil effekten som kreves øke betraktelig. Dette har også sammenheng med ønsket smeltetid. Hvis smeltetiden er 48 timer, vil effekt til systemet være tre ganger så høy som det bare skal holde jevn temperatur. Ved en reduksjon av tiden fra 48 til 16 timer vil det være en ytterligere dobling i effekten (9). For Tyrihans varierer effekten fra 3 til 10,8 MW.





## 4 Forenklet krets

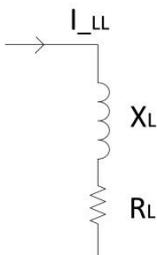
Den forenklete kretsen er laget for å dimensjonere og analysere forsyningsutstyret til DEH plassert topside. DEH-systemet subsea vil derfor bli forenklet til en impedans, mens for topside vil det være en impedans for hver komponent.

### 4.1 Subsea

Impedansen forsyningsystemet vil se er en sammenfatning av stige-kabelen, piggyback-kabelen, røret og sjøvann. Dette resulterer i en resistans i serie med en reaktans, som vist i Figur 4-1. Denne vil ha en dominerende reaktans som gir opphav til den en lave effekt faktoren. Impedansen vil endre seg noe etter hvert som røret oppvarmes og avkjøles. Impedansen for Tyrihans vises i Tabell 4-1.

Komponent	Kaldt rør	Varmt rør	Økning
$R_L$ [ $\Omega$ ]	4,245	4,5	6 %
$X_L$ [ $\Omega$ ]	13,107	13,5	3 %
$\cos \varphi_L$	0,308	0,316	2,6 %

Tabell 4-1 Impedans for subsea for Tyrihans (14)



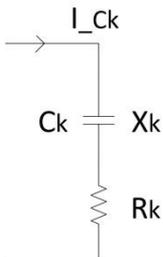
Figur 4-1 Ekvivalentkrets for røroppvarmingen

## 4.2 Fasekompensering

For å ta hensyn til tapet i kondensatoren legges det inn en resistans i serie med kondensatoren, som vist i Figur 4-2. Verdiene på komponentene for Tyrihans vises i Tabell 4-2.

Komponent	Verdi
$R_k$ [ $\Omega$ ]	$2 \cdot 10^{-4} \cdot X_k$
$C_k$ [ $\mu\text{F}$ ]	202-223
$X_k$ [ $\Omega$ ]	14,27-15,76
Intervall [ $\mu\text{F}$ ]	2

Tabell 4-2 Impedans og intervall for kondensatorbanken



Figur 4-2 Kondensator  $C_k$  med tap

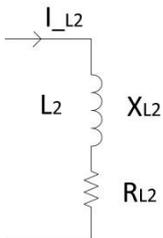
Resistansen for kondensatoren er vesentlig mindre enn reaktansen og det kan da vurderes å representere kondensatoren som ideell.

## 4.3 Symmetreringsanlegget

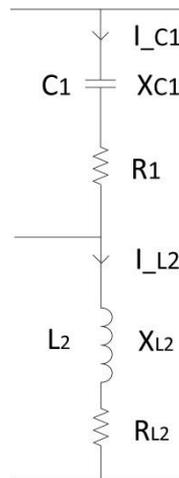
Kondensatoren i symmenteringen vil være lik som den brukt for fasekompensering og vil derfor bli representert på samme måte. For å ta hensyn til tapet i spolen legges det inn en resistans i serie med spolen, som vist i Figur 4-3. Kretsen for symmetreringen er lik Steinmetz' krets og er vist i Figur 4-4. Verdiene for komponentene for Tyrihans vises i Tabell 4-3.

Komponent	Verdi
$R_1$ [ $\Omega$ ]	$2 \cdot 10^{-4} \cdot X_k$
$C_1$ [ $\mu\text{F}$ ]	36-47
$X_1$ [ $\Omega$ ]	67,73-88,42
Intervall [ $\mu\text{F}$ ]	1
$R_2$ [ $\Omega$ ]	$R \approx 0.015 \cdot X$
$L_2$ [mH]	218-283
$X_2$ [ $\Omega$ ]	68,49-88,91
Intervall [mH]	10

Tabell 4-3 Impedanser og intervall for symmetreringsanlegget



Figur 4-3 Induktans  $L_2$  med tap



Figur 4-4 Symmetreringsanlegg

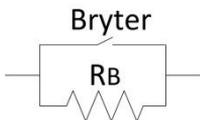
Resistansen for spolen er vesentlig mindre enn reaktansen. Det kan da vurderes å representere spolen som ideell.

## 4.4 Dempemotstand

Dempemotstanden er den enkleste komponenten i systemet og representeres med en motstand med en forbikoblingsbryter, slik vist i Figur 4-5. Verdiene for komponenten for Tyrihans vises i Tabell 4-4.

Komponent	Verdi
$R_B$ [ $\Omega$ ]	0.1

Tabell 4-4 Resistans for dempemotstanden



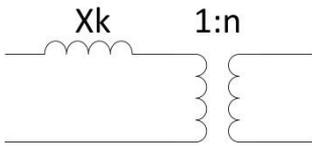
Figur 4-5 Dempemotstand

## 4.5 Transformator

En krafttransformator har en dominerende kortslutningsimpedans og kan derfor forenkles til en krets med kortslutningsimpedansen i serie med en ideell transformator. Det vesentligste bidraget til denne impedansen kommer fra kortslutningsreaktansen, som gir kretsen i Figur 4-6. Tapet i transformatoren er oppgitt til å være på 1,5 %, men er utelatt da det kan neglisjeres (1). Verdiene for komponenten for Tyrihans vises i Tabell 4-5

Komponent	Verdi
$X_k$ [ $\Omega$ ]	

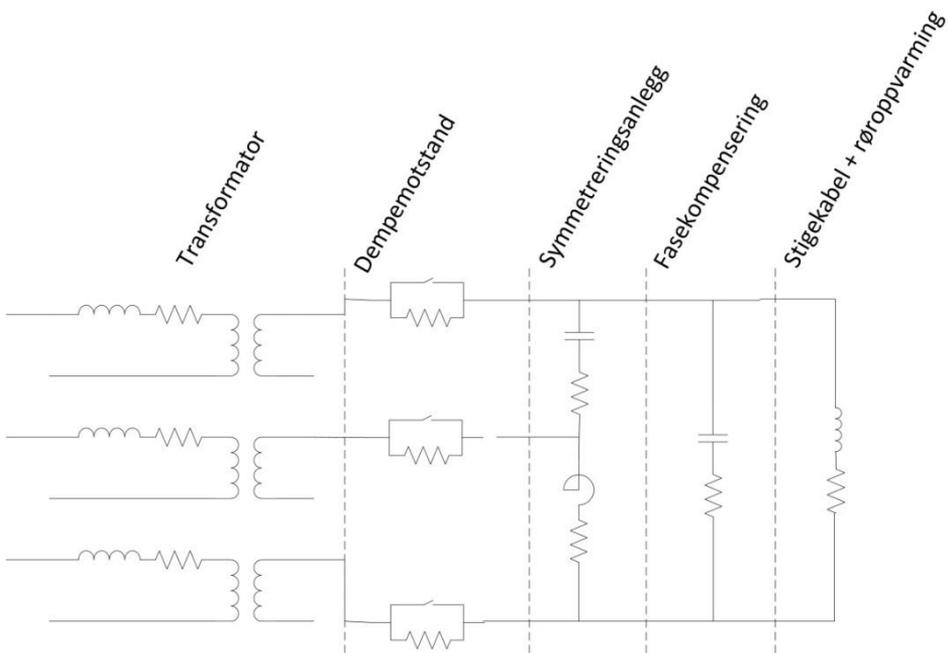
Tabell 4-5 Impedansen for transformatoren



Figur 4-6 Krafttransformator

## 4.6 Fullstendig krets

Alle komponentene beskrevet satt sammen gir den fullstendige kretsen, vist i Figur 4-7.



Figur 4-7 Komplette krets



## 5 Metodikk

For å verifisere den forenklete kretsen er det valgt å kjøre et forsøk og rekonstruere forsøket i datasimulering ved hjelp av programmene Matlab og Pscad. De to programmene testes opp mot hverandre først, fordi Matlab-programmet har en optimaliseringsfunksjon som brukes for å bestemme komponentene i symmetreringsanlegget i forsøket.

På grunn av større fleksibilitet er videre analyser utført ved hjelp av datasimuleringer. Det er valgt å utelate transformatoren og dempemetstandene. De to komponentene vil gi et spenningsstap, og i tillegg vil transformatoren gi en faseforskyvning. De to bidragene er derimot like for alle fasene, slik at det antas at de ikke vil påvirke resten av kretsens funksjon. Dette gjelder når strømmen i alle fasene er like. Det er sant for når symmetreringsanlegget er optimalisert. For de tilfellene det ikke er det, antas det at usymmetrien ikke er så stor at det vil gi spenningsforskjeller mellom fasene som vil påvirke kretsen i større grad.

Videre undersøkelser er å undersøke tapet for noen komponenter kan neglisjeres, samt å analysere hva som skjer ved en endring i lastens effektfaktor.

### 5.1 Sammenligning av dataprogrammene Matlab og Pscad

Matlab er et program brukt for matematiske beregninger, visualisering og analyser, hvor en må beskrive det som skal simuleres med programmering. Pscad er derimot et dedikert program for å beregne

elektriske transienter, hvor kretsen modelleres grafisk. Denne rapporten tar for seg det stasjonære, hvilket gjør at det er nødvendig å simulere over en viss tid i Pscad slik at de transiente strømmene har opphørt. For Matlab er programmet skrevet med stasjonære ligninger.

For å verifisere Matlab-programmet gjennomføres den samme simuleringen i Matlab og Pscad. Inngangsverdiene til Matlab er hentet fra Tyrihans, vist i Tabell 5-1. Resistansene  $R_1$ ,  $R_2$  og  $R_k$  er avhengige av den tilhørende reaktansen, utledet i Vedlegg D.

Den beregner så de optimale verdiene for  $C_1$ ,  $L_2$  og  $C_k$ , med tilhørende resistans. Dette resultatet vil være de verdiene som brukes i Pscad.

Spenning	135 – 224 [V]
$C_1$	36 – 47 [ $\mu$ F]
$R_1$	$2 \cdot 10^{-4} \cdot X_1$ [ $\Omega$ ]
$L_2$	218 – 283 [mH]
$R_2$	$0.015 \cdot X_2$ [ $\Omega$ ]
$C_k$	202 – 223 [ $\mu$ F]
$R_k$	$2 \cdot 10^{-4} \cdot X_k$ [ $\Omega$ ]
$R_L$	4,5 [ $\Omega$ ]
$X_L$	42,972 [mH]

**Tabell 5-1 Verdier for Tyrihans, hvor spenningen er nedskalert**

Under forsøket ble det målt negative resistanser for noen av komponentene. Det er ikke mulig å legge inn negative verdier for passive elementer, slik som motstander, i Pscad. Det er derfor valgt og kun å bruke Matlab under de videre simuleringene.



### 5.1.1 Matlab-programmets oppbygning

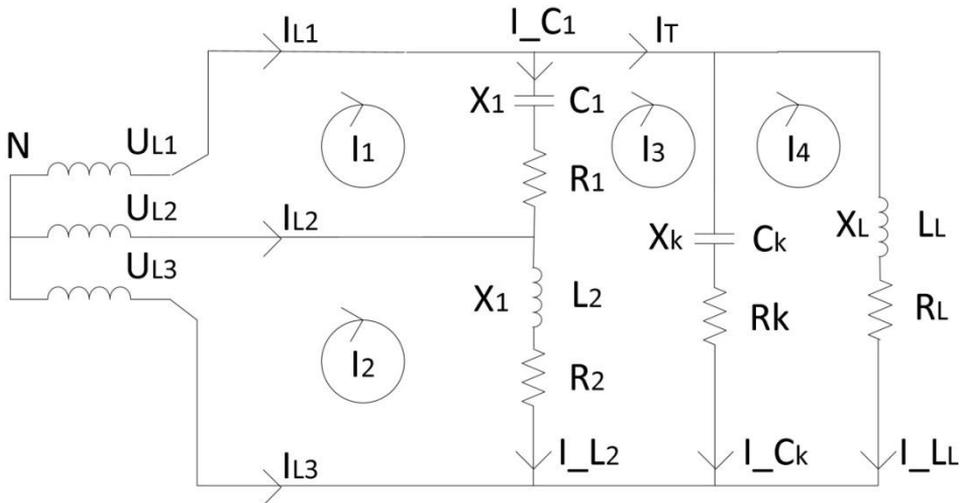
Ved å bruke Kirchoffs spenningslov kan alle kretsens strømmer finnes som funksjon av spenningen inn og motstanden for komponentene, gitt av Figur 5-1. For å forenkle uttrykket er reaktansene og resistansene for hver komponent skrevet som en impedans (Z).

$$\begin{bmatrix} u_{01} - u_{02} \\ u_{02} - u_{03} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & -Z_1 & 0 \\ 0 & Z_2 & -Z_2 & 0 \\ -Z_1 & -Z_2 & Z_1 + Z_2 + Z_k & Z_k \\ 0 & 0 & -Z_k & Z_k + Z_L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad [5.1]$$

Sammenhengen mellom strømmen i hver sløyfe og kretsens strømmer:

$$\begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \\ I_{C1} \\ I_{L2} \\ I_T \\ I_{Ck} \\ I_{Ll} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 - I_1 \\ -I_2 \\ I_1 - I_3 \\ I_2 - I_3 \\ I_3 \\ I_3 - I_4 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad [5.2]$$

k



Figur 5-1 Kretsskjema

Ønsket verdi for kompenseringskondensatoren regnes ut etter ligning [ 2.7 ]:

$$C_k = \frac{1}{\omega \cdot \left( \frac{R_L^2}{X_L} + X_L \right)}$$

Matlabprogrammet har en optimaliseringsfunksjon for å oppnå best mulig symmetri for fasestrømmene. Denne funksjonen vil bli brukt for å bestemme verdiene for kondensatoren og induktansen for symmetrikretsen.

Graden av usymmetri bestemmes av ligning [ 2.25 ]

$$\rho = \frac{|I_{L1} + h^2 \cdot I_{L2} + h \cdot I_{L3}|}{|I_{L1} + h \cdot I_{L2} + h^2 \cdot I_{L3}|}$$

Ved å minimere  $\rho(C_1, L_2)$  finnes de verdiene av  $C_1$  og  $L_2$  som gir best symmetri. For å minimere er det valgt å bruke en tilnærmet løsning for

funksjonen. Programmet vil teste optimaliseringsfunksjonen for de ulike verdiene for  $C_1$  og  $L_2$ , gitt av intervallet og oppløsningen som er satt.

Et mål for virkningsgraden ( $\eta$ ) for symmetreringsen er forholdet mellom  $I_T$  og  $I_{L1}$ ,  $I_T$  og  $I_{L2}$  samt  $I_T$  og  $I_{L3}$ . Ved optimal virkningsgrad er disse forholdene lik  $\sqrt{3}$ . Virkningsgraden defineres som:

$$\eta = \frac{I_T}{I_*} - 1, \text{ hvor } I_* \text{ er den største av } I_{L1}, I_{L2} \text{ og } I_{L3} \quad [5.3]$$

Virkningsgraden er 0 for ingen symmetri og 1 for optimal symmetri.

## 5.2 Laboratorium-forsøk

Forsøket starter ved å finne verdier for fasekompenseringen og lasten som gir optimal fasekompensering ut fra tilgjengelige komponenter. Det innebærer å bestemme antall kondensatorer som skal kobles i parallell og hvilket trinn vannmotstanden skal være på. Den reaktive delen av lasten er fast og kan dermed ikke endres.

Verdiene som gir optimal fasekompensering legges inn i Matlab som beregner for hvilke verdier for kondensatoren og induktansen i symmetreringsanlegget som gir optimal symmetri. Etersom den resistive delen for de ulike spolene varierer kraftig er det valgt å kjøre flere simuleringer i Matlab, hvor denne verdien endres.

Verdiene fra Matlab og verdi på enkeltkomponentene bestemmer så valget av hvilke kondensatorer og hvilke induktanser som skal benyttes i symmetreringsanlegget. På grunn av overharmoniske spenninger i nettet er det i tillegg foretatt målinger ved høyere frekvenser for

kondensatorene, for å se om den oppfører seg annerledes ved høyere frekvenser. Det er også tatt en kontrollmåling av spenningen ut fra skilletransformatoren for å se om de overharmoniske spenningene er stabile.

### 5.3 Neglisjering av tap

Resistansen for kondensatorene og induktansene brukt for Tyrihans er vesentlig lavere enn reaktansen. Det gjennomføres tre tester for å vurdere effekten av å neglisjere resistansen:

1. Optimaliseringen av kretsen ved å ta hensyn til tapet.
2. Optimalisering av kretsen uten å ta hensyn til tapet.
3. Optimalisering av kretsen uten å ta hensyn til tapet, men motstanden legges til kretsen etter optimaliseringen.

For test nr 2 beregnes det også etter formlene [ 2.10 ] og [ 2.15 ] for Steinmetz' krets:

$$C_1 = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot \omega \cdot R}$$

$$L_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot R}{\omega}$$

Verdier brukt i simuleringen vises i Tabell 5-2.

Urms (L-L)	230 V
$R_1$	0 eller $2 \cdot 10^{-4} \cdot X_1 \Omega$
$R_2$	0 eller $0.015 \cdot X \Omega$
$C_k$	212.21 $\mu\text{F}$
$R_k$	0 eller $2 \cdot 10^{-4} \cdot X_1 \Omega$
$R_L$	4,5 $\Omega$
$X_L$	13,5 $\Omega$
$\cos \varphi_T$	1

Tabell 5-2 Verdier brukt i Matlab og Pscad

## 5.4 Effektfaktorens innvirkning

Denne analysen av fasekompenseringen vurderer hvordan størrelsen på kondensatoren må endres for å oppnå full kompensering, ved endring i effektfaktoren i lasten. Det skal også vurderes nærmere hva endring i effektfaktoren for lasten har for effektfaktoren for fasekompenseringen.

### 5.4.1 Symmetreringsanlegget

Steinmetz' krets er basert på en ren resistiv last. For å underøke hvordan en last med en effektfaktor vil påvirke symmetreringsanlegget er det valgt å kjøre to simuleringer med varierende effektfaktor. Forskjellen på de to simuleringene er størrelsen på lastresistansen.

Effektfaktoren uttrykkes ved ligning [ 2.30 ]:

$$\cos \varphi_T = \cos \tan^{-1} \frac{X_T}{R_T}$$

Reaktansen endres som funksjon av resistansen og effektfaktoren:

$$X_T = R_T \cdot \tan \cos^{-1} \cos \varphi_T \quad [ 5.4 ]$$

Andre forutsetninger er:

- Effektfaktoren er induktiv
- $C_1$  regnes som ideell
- $C_1$  og  $L_2$  optimeres for symmetri

#### 5.4.2 Prosjektering av Tyrihans

For et anlegg under prosjektering er det oppgitt en lastimpedans med en toleranse. Denne toleransen bestemmer maksimal- og minimalverdiene for resistansen og reaktansen. Dermed også impedansen og effektfaktoren for lasten. Effekten av denne toleransen for fasekompenseringen og symmetreringsanlegget skal undersøkes videre.

Simuleringene deles inn i to tilfeller:

- For tilfelle 1 varierer lastimpedansen fra minimumsverdien for resistansen og maksimalverdien for reaktansen, til maksimalverdien for resistansen til minimalverdien for reaktansen. Dette gir lastens minimale effektfaktor opp til lastens maksimale effektfaktor.
- For tilfelle 2 varierer lastimpedansen fra minimumsverdien for resistansen og reaktansen, til maksimalverdien for resistansen og reaktansen. Dette gir lastens minimale og maksimale impedans.

Beregning av maksimal og minimal spenning for lasten kalkuleres etter ligning [ 2.48 ]

Andre forutsetninger er:

- $R_L = 3.8 \pm 5 \%$
- $X_L = 13.03 \pm 5 \%$
- $C_k$  varierer for full fasekompensering
- $R_L$  og  $X_L$  varierer lineært
- Symmetrikretsen optimaliseres kontinuerlig
- Tapet i kondensatorene og induktansen er neglisjert

### 5.4.3 Installert anlegg på Tyrihans

For installerte anlegg er lastimpedansen kjent. Den er derimot ikke konstant, ettersom den varierer med rørets temperatur. For Tyrihans øker  $R_L$  med 6 % fra kaldt til varmt rør, mens  $X_L$  øker 3 %. Ettersom komponentenes verdi ikke blir endret under drift, så vil ikke anlegget kunne være optimert hele tiden. Virkningen av dette skal undersøkes nærmere.

Simuleringen deles inn i to tilfeller:

1. Kondensator for fasekompensering er innstilt for full fasekompensering ved varmt rør. Symmetrikretsen er optimalisert for varmt rør.
2. Kondensatoren for fasekompenseringen og symmetrikretsen varierer for å optimalisere anlegget.

Andre forutsetninger er:

- Tapet i kondensatorene er neglisjert





## 6 Resultat

### 6.1 Verifisering av modell

#### 6.1.1 Sammenligning av dataprogrammene Matlab og Pscad

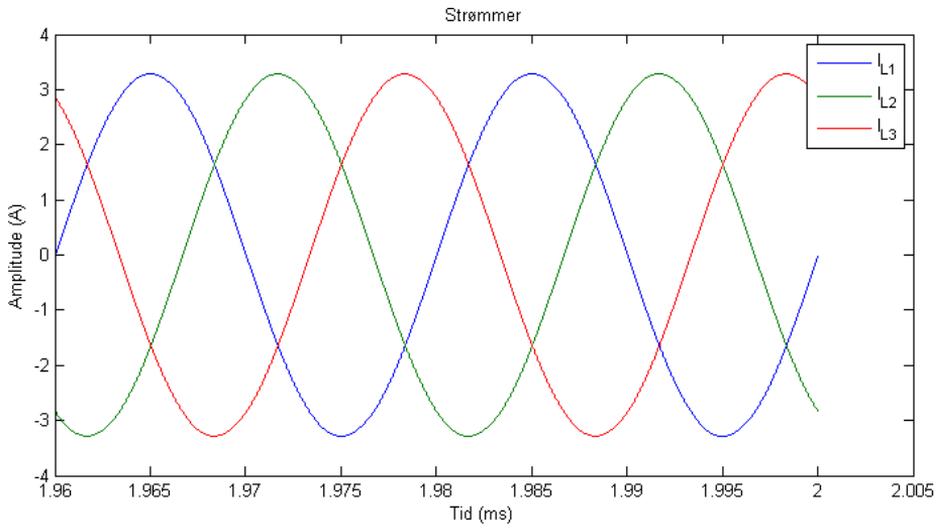
Tabell 6-1 viser resultatet fra Matlab, hvor Matlab har beregnet  $C_1$ ,  $R_1$ ,  $L_2$ ,  $R_2$ ,  $C_k$  og  $R_k$ , med hensyn på optimalisering. Det er oppnådd god symmetri og en høy virkningsgrad. Verdiene for komponentene er de som brukes videre i simuleringene.

Spenning (L-L)	179,5 [V]
$C_1$	40,18 [ $\mu$ F]
$R_1$	0,0158 [ $\Omega$ ]
$L_2$	246 [mH]
$R_2$	1.159 [ $\Omega$ ]
$C_k$	212.21 [ $\mu$ F]
$R_k$	0.03 [ $\Omega$ ]
$R_L$	4,5 [ $\Omega$ ]
$X_L$	42,972 [mH]
$\rho$	$5.4 \cdot 10^{-4}$
$\eta$	0.978

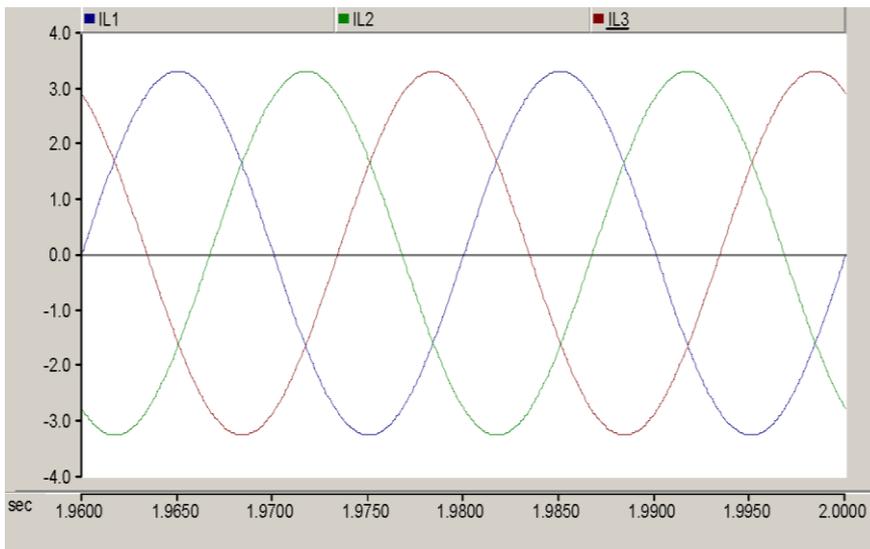
**Tabell 6-1** Resultat fra Matlab, hvor Matlab har beregnet  $C_1$ ,  $R_1$ ,  $L_2$ ,  $R_2$ ,  $C_k$  og  $R_k$  med hensyn på optimalisering av symmetri.

Figur 6-1 og Figur 6-2 viser fasestrømmene beregnet og simulert av henholdsvis Matlab og Pscad. Grafene har tilsynelatende lik amplitude og faseforskyvning. Symmetrien samsvarer med den lave verdien for andel strøm i det negative systemet på  $5.4 \cdot 10^{-4}$  i Tabell 6-1.

Amplituden følger kravene for Steinmetz' krets gitt av ligning [ 2.2 ], ved at fasestrømmene har lik amplitude som strømmene i symmetrikretsen og ved at den fasekompenserte strømmen er redusert med  $\sqrt{3}$ .

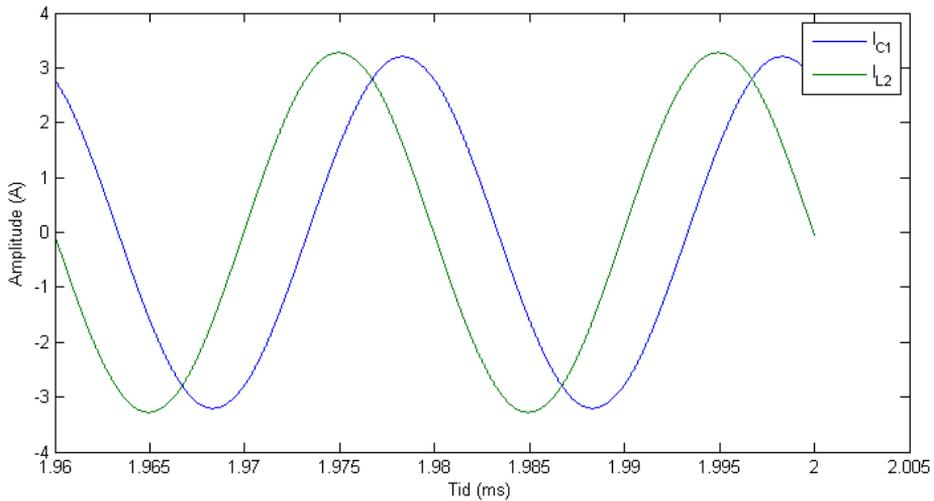


Figur 6-1 Fasestrømmene fra Matlab

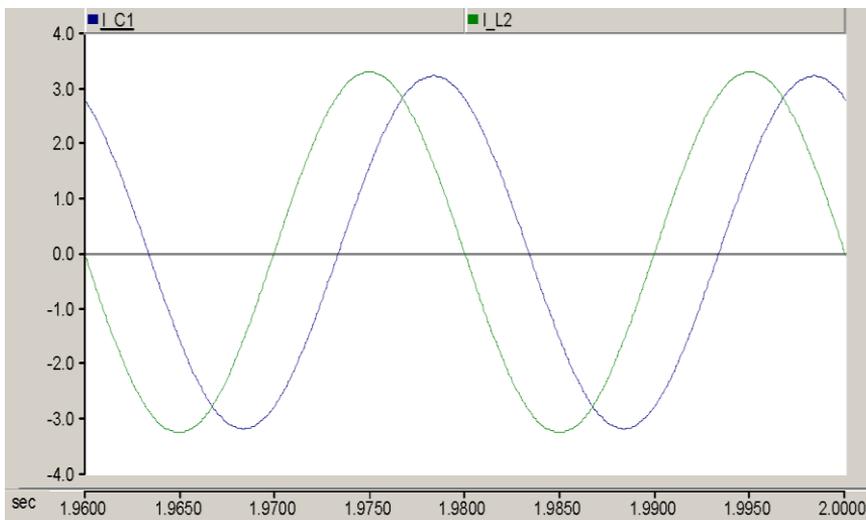


Figur 6-2 Fasestrømmene fra Pscad

Figur 6-3 og Figur 6-4 viser strømmene i symmetreringsanlegget beregnet og simulert av henholdsvis Matlab og Pscad. Grafene har tilsynelatende lik amplitude og faseforskyvning

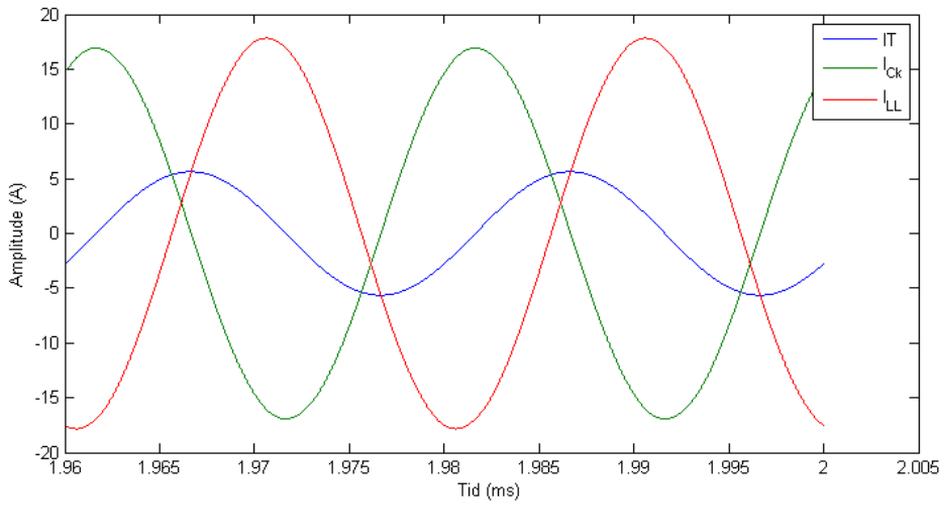


**Figur 6-3 Strømmene gjennom symmetreringsanlegget fra Matlab**

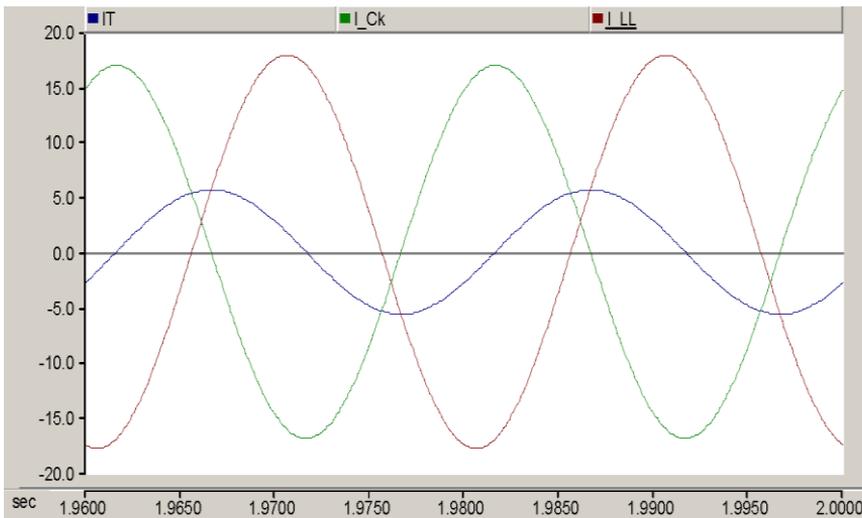


**Figur 6-4 Strømmene gjennom symmetreringsanlegget fra Pscad**

Figur 6-5 og Figur 6-6 viser strømmen før og etter fasekompenseringen, samt strømmen gjennom kondensatoren, beregnet og simulert av henholdsvis Matlab og Pscad. Grafene har tilsynelatende lik amplitude og faseforskyvning. Strømmen gjennom lasten og kondensatoren har motsatt retning, som følge av den dominerende reaktansen for lasten. Den fasekompenserte strømmen er blitt redusert med  $\cos \varphi_L$



**Figur 6-5 Strømmen gjennom lasten inn til fasekompenseringen, gjennom fasekompenseringen og lasten fra Matlab**

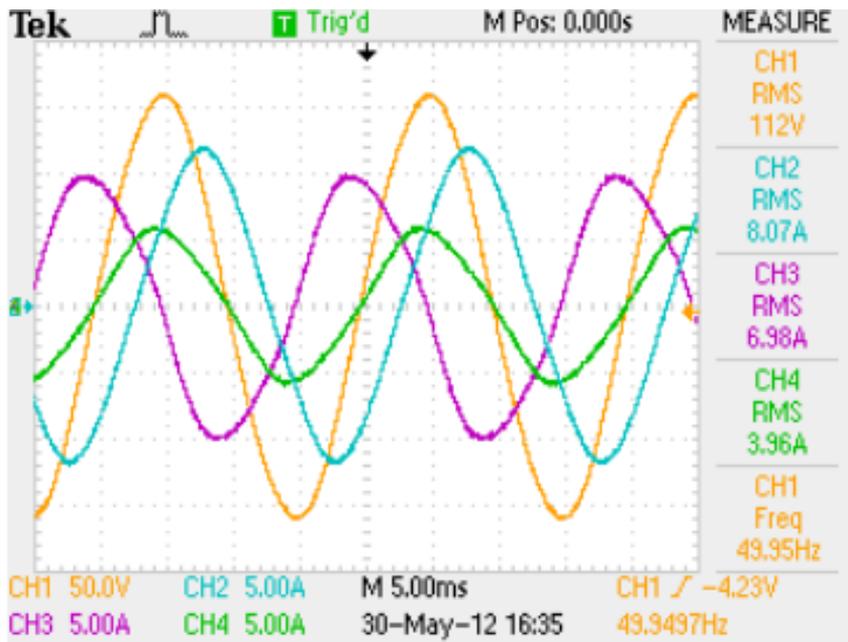


**Figur 6-6 Strømmen gjennom lasten inn til fasekompenseringen, gjennom fasekompenseringen og lasten fra Pscad**

### 6.1.2 Innstilling av verdi for last og fasekompensering

Ved innkobling av seks kondensatorer i parallell for fasekompenseringen og ved å stille inn kontaktorene K5 og K3 for vannmotstanden oppnås det ingen faseforskyvning mellom  $U_{L1\_L3}$  og  $I_T$ , som vist i Figur 6-7 og Figur 6-11.

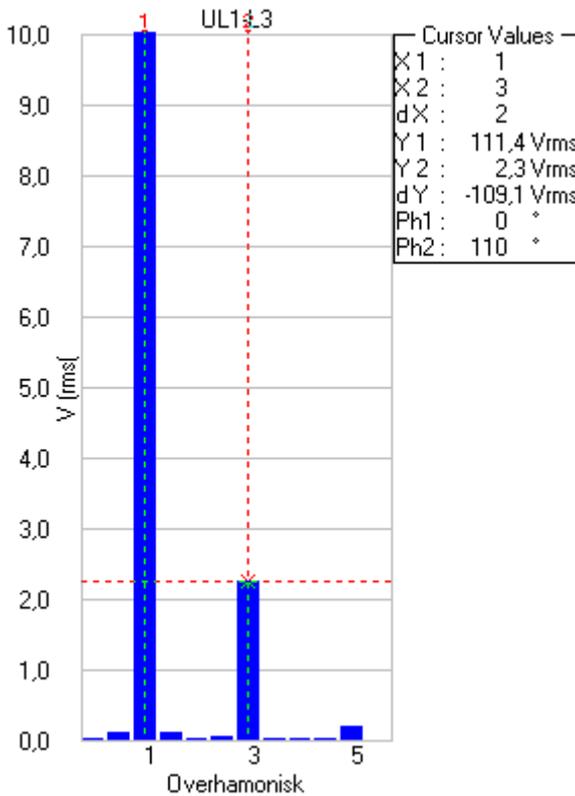
Figur 6-7 viser skjermbilde fra oscilloskopet. Strømmen gjennom lasten er induktiv og strømmen er følgelig noen millisekunder etter spenningen. Strømmen inn til fasekompenseringen ser ut til å ha samme nullgjennomgang som spenningen, hvilket gir ingen faseforskyvning. Det kan legges merke til at strømmen gjennom kondensatoren ligger over fem millisekunder. En mulig forklaring på dette fenomenet kan skyldes overharmoniske strømmer og spenninger. Ved en faseforskyvning mellom grunnfrekvensen og de overharmoniske strømmer og spenninger, vil nullgjennomgangen for den resulterende strømmen være ulik nullgjennomgangen for grunnfrekvensen.



Figur 6-7 Skjermbilde fra oscilloskop. CH1= $U_{L1-L3}$ , CH2= $I_{LL}$ , CH3= $I_{cK}$ , CH4= $I_T$ .

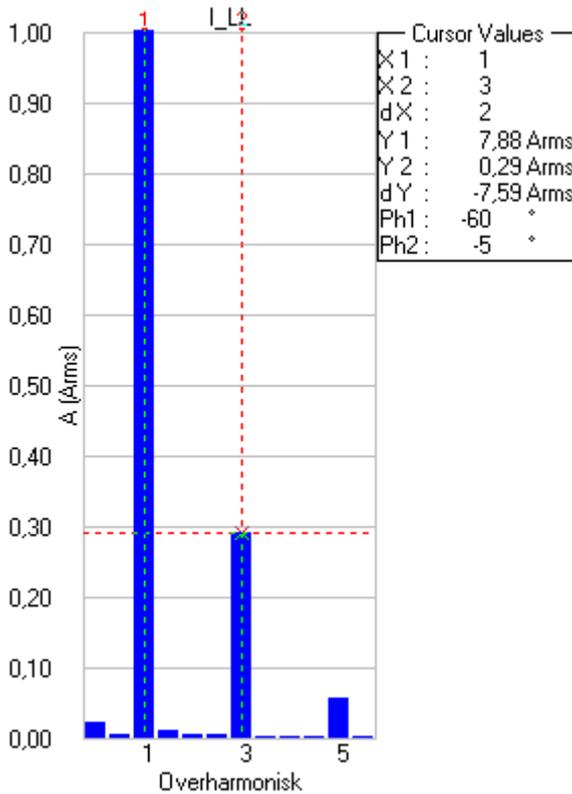


Figur 6-8 viser skjermbilde fra nettanalysatoren. Den viser en grunnharmonisk spenning på 114,4 V rms med en tilhørende tredjeharmonisk på 2,3 V rms. Dette er i god overenstemmelse med verdien fra oscilloskopet som viser rms-verdien for den resulterende spenningen. Også her vises det 0 grader i faseforskyvning.



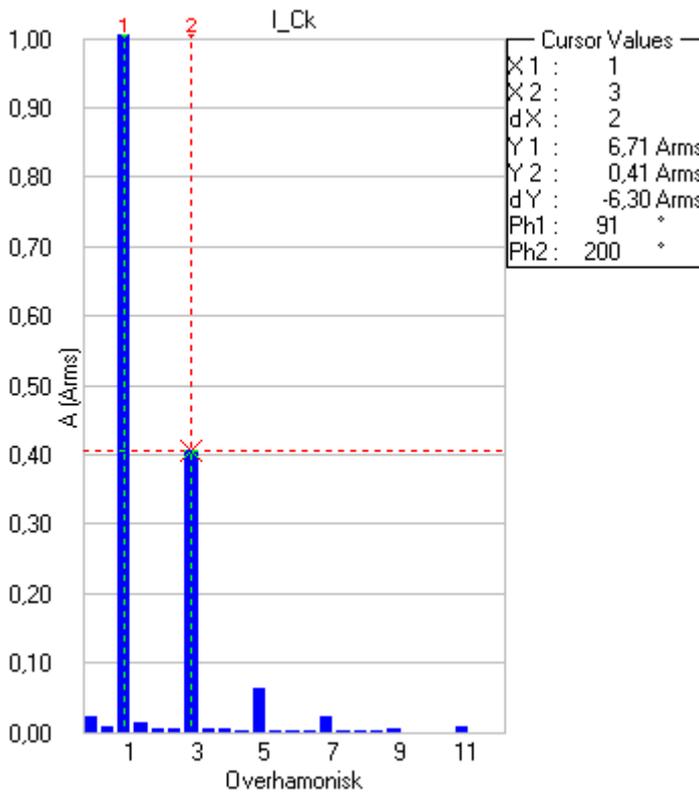
**Figur 6-8** Skjermbilde fra nettanalysator med overharmoniske spenninger. Grafen er forstørret opp for lettere å se de overharmoniske spenningene. Y=spenning, Ph=fasevinkel

Figur 6-9 viser skjermbilde fra nettanalysatoren. Den viser en grunnharmonisk strøm gjennom lasten på 7,88 A rms og en tredjeharmonisk strøm gjennom lasten på 0,29 A rms. Det er i god overenstemmelse med verdien fra oscilloskopet, som viser rms-verdien for den resulterende strømmen.



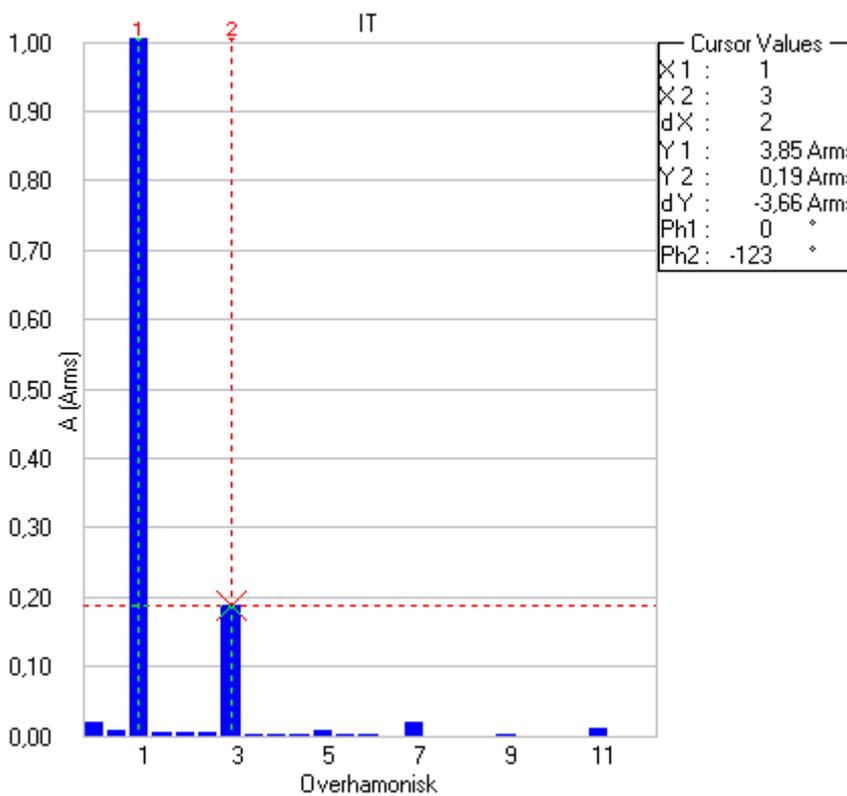
Figur 6-9 Skjermbilde fra nettanalysator med overharmoniske strømmer gjennom lasten. Grafen er forstørret opp for lettere å se de overharmoniske spenningene. Y=strøm, Ph=fasevinkel

Figur 6-10 viser skjermbilde fra nettanalysatoren. Den viser en grunnharmonisk strøm gjennom kondensatoren på 6,71 A rms og en tredjeharmonisk strøm gjennom kondensatoren på 0,41 A rms. Det er i god overenstemmelse med verdien fra oscilloskopet som viser rms-verdien for den resulterende strømmen. Nettanalysatoren viser også en faseforskyvning større enn 5 ms, i form av 91 grader.



**Figur 6-10** Skjermbilde fra nettanalysator med overharmoniske strømmer gjennom fasekompenseringen. Grafen er forstørret opp for lettere å se de overharmoniske spenningene. Y=strøm, Ph=fasevinkel

Figur 6-11 viser skjermbilde fra nettanalysatoren. Den viser en grunnharmonisk strøm gjennom kondensatoren på 3,85 A rms og en tredjeharmonisk strøm gjennom kondensatoren på 0,19 A rms. Det er i god overenstemmelse med verdien fra oscilloskopet, som viser rms-verdien for den resulterende strømmen. Nettanalysatoren viser også faseforskyvning større enn 5 ms, i form av 91 grader.



**Figur 6-11** Skjermbilde fra nettanalysator med overhamoniske strømmer før fasekompenseringen. Y=strøm, Ph=fasevinkel

Med utgangspunkt i Figur 6-8 til og med Figur 6-11 kan verdiene for enkeltkomponentene beregnes. Impedansen for induktansen og vannmotstanden er slått sammen til en lastimpedans. Resultatet vises i Tabell 6-2.

På grunn av en fasevinkel større enn 91 grader vil det bli beregnet en negativ motstand for kondensatoren. Verdien for induktansen stemmer godt overens med opplyst verdi, hvor opplyst verdi er 42,5 mH med ukjent toleranse. Det samme gjelder kondensatoren, hvor opplyst verdi er 198  $\mu\text{F}$  med en toleranse på  $\pm 10\%$ .

Komponent	Avlest		Beregnet			
	$U_{\text{rms}}$ [V]	$I_{\text{rms}}$ [A]	R [ $\Omega$ ]	X [ $\Omega$ ]	L [mH]	C [ $\mu\text{F}$ ]
Last ( $Z_L$ )	111,5 $\angle 0$	7,88 $\angle -60$	7,075	12,254	39,0	-
Kondensator ( $Z_K$ )	111,5 $\angle 0$	6,71 $\angle 91$	-0,29	-16,615	-	191,59
Resulterende ( $Z_T$ )	111,5 $\angle 0$	3,85 $\angle 0$	28,961	-	-	-

**Tabell 6-2 Beregning av impedansen for lasten, fasekompenseringen og den resulterende impedansen.**

### 6.1.3 Måling av enkeltkomponenter

Tabell 6-3 viser resultatet fra måling av kondensatorene som skal brukes i symmetreringsanlegget. Resultatene samsvarer med de oppgitte verdiene som er henholdsvis 18 og 10  $\mu\text{F}$  med en toleranse på  $\pm 10\%$ .

Resistansen i kondensatorene er veldig lave, hvilket innebærer at flere av disse kondensatorene måles som ideelle.

Kapasitans (C1)	Avlest			Beregnet	
	Z [ $\Omega$ ]	Faseforskyvning [grader]	C [ $\mu\text{F}$ ]	R [ $\Omega$ ]	$\frac{R}{X}$
1	11,31	-90	17,59	0	0
2	11,29	-89,9	17,63	0,03	0,003
3	11,31	-89,8	17,59	0,06	0,005
4	19,4	-90	10,25	0	0
5	19,75	-90	10,07	0	0
6	19,81	-89,9	10,04	0,02	0,001
7	20,53	-90	9,69	0	0
8	20,57	-90	9,67	0	0
9	20,51	-90	9,70	0	0

**Tabell 6-3 Resultat av måling av alle enkeltkapasitansene som C1 består av, målt med RCL-meter.**

Tabell 6-4 viser resultatene fra målinger av induktansene som skal brukes i symmetreringsanlegget. Størst avvik med oppgitte verdier har L2-025, hvor oppgitt verdi er 1,4 mH. Det er også denne som har minst spenning over seg, hvilket kan lede til målefeil.

Induktans (L2)	Avlest		Beregnet			
	$U_{rms}$ [V]	$I_{rms}$ [A]	R [ $\Omega$ ]	X [ $\Omega$ ]	L [mH]	$\frac{R}{X}$
L2-025	0,9	2,5 $\angle$ -76	0,09	0,35	1,1	0,26
K2-052	1,8	2,4 $\angle$ -83	0,09	0,74	2,4	0,12
K02-053	6,7	2,5 $\angle$ -83	0,33	2,66	8,5	0,12
K02-0029	51,7	2,5 $\angle$ -86	1,44	20,63	65,7	0,07
L02-0048	105,3	2,5 $\angle$ -86	2,94	42,02	133,7	0,07
Umerket	124,5	2,5 $\angle$ -88	1,74	49,77	158,4	0,01

**Tabell 6-4 Resultat av måling av alle tilgjengelige induktanser for mulig bruk for L2, målt med nettanalysator**

Tabell 6-5 viser resultatene fra måling av kondensatorene brukt i fasekompenseringen med økende frekvens. Det er ingen nevneverdig endring i kapasitans eller motstand ved større frekvenser. Disse kondensatorene har en større indre resistans enn for kondensatorene brukt for symmetreringsanlegget.

Komponent	Avlest				Beregnet
	Frekvens [hz]	Z [ $\Omega$ ]	Faseforskyvning [grader]	C [ $\mu$ F]	R [ $\Omega$ ]
$C_k$ (6 x 33 $\mu$ F)	50	16,34	-89,8	194,81	0,057
	300	2,72	-88,8	195,06	0,057
	600	1,66	-87,6	195,71	0,057

**Tabell 6-5 Måling av kapasitansene med RCL-meter**

### 6.1.4 Bestemmelse av C1 og L2

For å finne de optimale verdiene for symmetreringsanlegget for labforsøket analyseres Tabell 6-2 i Matlab. I tillegg må den resistive verdien for enkeltkomponentene analyseres. Ettersom den resistive motstanden varierer fra induktans til induktans, gjøres det flere simuleringer i Matlab med økende motstand. Motstanden for kondensatoren settes til 0. De optimale verdiene vises i Tabell 6-6.

Komponent	$R_2=2 \Omega$	$R_2=3 \Omega$	$R_2=4 \Omega$	$R_2=5 \Omega$	$R_2=6 \Omega$
C1	56,4	54,6	52,6	50,4	48,2
L2	148,9	146,5	143,8	140,8	137,8

**Tabell 6-6** Optimale verdier for symmetreringsanlegget, ved varierende motstand i spolen.

### 6.1.5 Gjennomføring av forsøk

Før forsøket ble det foretatt en kontrollmåling av spenningen ut fra transformatoren. Resultatet vises i Tabell 6-7.

Måling	Rms	Prosent av verdien for grunnfrekvensen, for ulike overharmoniske frekvenser				
		0	3	5	7	11
$U_{L1-n}$	63,74	0,10	2,57	0,29	0,09	0,03
	$\angle 0$	$\angle 0$	$\angle 26,8$	$\angle 170,5$	$\angle -150,3$	$\angle 165,6$
$U_{L2-n}$	64,27	0,02	0,87	0,40	0,33	0,10
	$\angle 0$	$\angle 0$	$\angle -160,9$	$\angle -122,7$	$\angle 154,1$	$\angle -142,7$
$U_{L3-n}$	64,29	0,02	1,68	0,17	0,25	0,04
	$\angle 0$	$\angle 0$	$\angle -152,9$	$\angle -12,7$	$\angle 93,1$	$\angle -81,2$

**Tabell 6-7** Kontrollmåling gjort i forkant av forsøket med nettanalysator



Det ble målt strømmer for mange overharmoniske frekvenser. Det er kun tatt med strømmer og spenninger for de frekvensene som ved en eller flere målinger har en eller flere overharmoniske strømmer mer eller lik 1 % av sin grunnharmoniske strøm. Resultatet vises i Tabell 6-8.

Måling	Rms	Prosent av verdien for grunnfrekvensen, for ulike overharmoniske frekvenser				
		0	3	5	7	11
U <sub>L1-n</sub>	63,67	0,01	2,46	0,44	0,06	0,03
	∠0	∠0	∠25,5	∠-178	∠-165,7	∠151,7
I <sub>L1</sub>	1,96 ∠-	1,52	17,87	3,53	0,44	0,55
	13,7	∠0	∠136,9	∠-78,9	∠-176,0	∠-79,1
U <sub>L2-n</sub>	64,26	0,01	0,87	0,49	0,15	0,11
	∠0	∠0	∠-164,1	∠-100,2	∠133	∠-159
I <sub>L2</sub>	2,18	1,46	5,33	1,98	0,72	0,68
	∠-9,8	∠0	∠-61,5	∠-20,8	∠-147,2	∠-73,5
U <sub>L3-n</sub>	64,27	0,04	1,69	0,15	0,10	0,06
	∠0	∠0	∠-151,1	∠18,7	∠86,4	∠-107,0
I <sub>L3</sub>	2,24	1,43	11,12	0,68	0,73	0,49
	∠-6,6	∠0	∠-34,2	∠-143,0	∠-170,6	∠-54,6
U <sub>L1_L2</sub>	110,42	0,01	1,95	0,6	0,18	0,08
	∠0	∠0	∠-67,6	∠48,6	∠-14,8	∠168,7
I <sub>C1</sub>	1,79	1,53	5,99	2,98	1,27	0,78
	∠91,9	∠0	∠23,9	∠137,5	∠72,4	∠254,6
U <sub>L2-L3</sub>	111,3	0,04	0,5	0,51	0,25	0,09
	∠0	∠0	∠-54,9	∠128,5	∠-79,5	∠-126,5
I <sub>L2</sub>	2,38	1,25	0,96	0,07	0,08	0,03
	∠-86,4	∠0	∠-100,9	∠10,4	∠-120,8	∠-118,1
U <sub>L1-L3</sub>	110,33	0,02	2,39	0,21	0,04	0,01
	∠0	∠0	∠116,2	∠-68,0	∠-125,3	∠-40,6

$I_T$	3,79 $\angle 0$	0,83 $\angle 0$	6,85 $\angle -124,3$	0,38 $\angle 70,7$	0,63 $\angle -9,1$	0,3 $\angle -23,1$
$U_{L1-L3}$	110,42 $\angle 0$	0,03 $\angle 0$	2,37 $\angle -116,7$	0,20 $\angle -62,6$	0,04 $\angle -110,4$	0,02 $\angle -61,2$
$I_{ck}$	6,73 $\angle 91$	0,51 $\angle 0$	7,12 $\angle 205,5$	1,03 $\angle 25,1$	0,36 $\angle -19,5$	0,18 $\angle 23$
$U_{L1-L3}$	110,48 $\angle 0$	0,01 $\angle 0$	2,35 $\angle -116,6$	0,22 $\angle -67,5$	0,05 $\angle -114,4$	0,01 $\angle -81,9$
$I_{LL}$	7,76 $\angle -59,9$	0,44 $\angle 0$	3,74 $\angle -2,1$	0,75 $\angle -168$	0,08 $\angle 60,4$	0,11 $\angle -76,0$

**Tabell 6-8 Målinger under forsøket med nettanalysator.**

Spenningsene i Tabell 6-7 og Tabell 6-8 er ikke helt sammenfallende, hvilket innebærer at spenningen ikke er konstant. Den grunnharmoniske spenningen er rimelig konstant, men særlig den 5.harmoniske spenningen  $U_{L1-n}$  er forskjellig. Størst variasjon mellom spenningene er i vinkelen (faseforskyvningen).

Som for tidligere resultater måler nettanalysatoren også nå en vinkel for fasekompenseringskondensatoren over 90 grader. Den måler en enda større vinkel for kondensatoren brukt i symmetreringsanlegget.

Ut fra Tabell 6-8 kan verdiene for enkeltkomponentene beregnes.

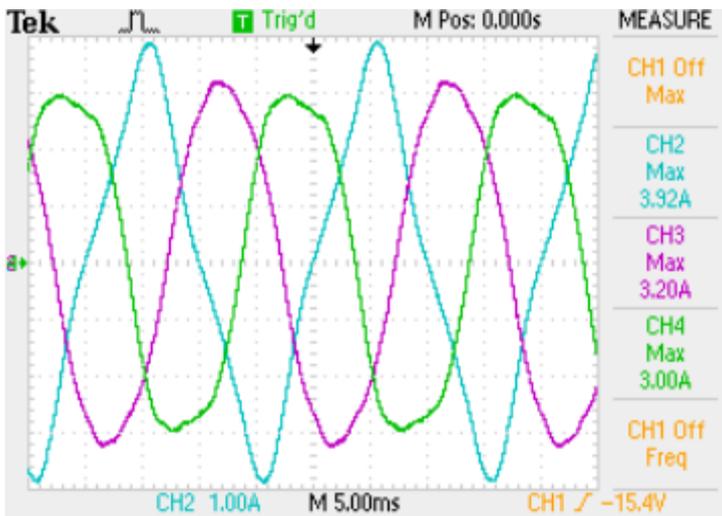
Impedansen for induktansen og vannmotstanden er slått sammen til en lastimpedans. Resultatet vises i Tabell 6-9.

På grunn av fasevinkler større enn 91 grader vil det bli beregnet en negativ motstand for kondensatorene. Verdiene av enkeltkomponentene stemmer overens med tidligere målinger.

Komponent	Beregnet verdi			
	R [ $\Omega$ ]	L [mH]	C [ $\mu$ F]	$\frac{R}{X}$
Z <sub>1</sub>	-2,05	-	51,63	-0,033
Z <sub>2</sub>	2,94	148,56	-	0,063
Z <sub>T</sub>	29,11			
Z <sub>k</sub>	-0,29	-	194,04	
Z <sub>L</sub>	7,14	39,21		-0,018

Tabell 6-9 Beregnede verdier etter Tabell 6-8

Figur 6-12 viser skjermbilde fra oscilloskopet som viser fasestrømmene. De forvrengte strømmene kommer av overharmoniske strømmer, som også nettanalysatoren måler.

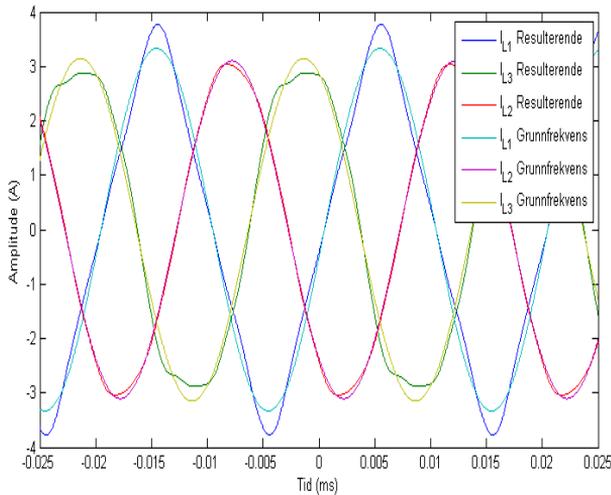


Figur 6-12 Skjermbilde fra Oscilloskop. CH2=IL1, CH3=IL2, CH4=IL3

### 6.1.6 Rekonstruksjon av forsøket i Matlab med målte verdier fra nettanalysatoren

Verdier fra Tabell 6-8 og Tabell 6-9 er brukt i Matlabsimuleringen.

Figur 6-13 viser linjestrømmene beregnet av Matlab. Grafen sammenfaller godt med skjermbildet til oscilloskopet. Det største avviket er hos  $I_{L3}$ . I Matlab har den et fall før amplituden, mens på oscilloskopet kommer den etter amplituden. Dette kan skyldes usikkerheten i fasevinkelen som kontrollmålingen viser. Det er også en mindre forskjell i amplituden, hvor Matlabsimuleringen viser litt mindre verdier.

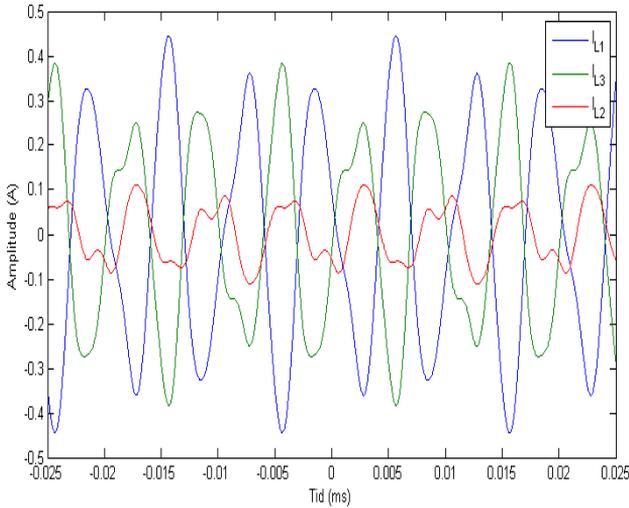


**Figur 6-13 Linjestrømmene, inklusive overharmoniske strømmer.  $I_{L1}=3,77$  A,  $I_{L2}=3,03$  A  $I_{L3}=2,88$  A.**

	Oscilloskop [A]	Matlab [A]	Differanse [%]
$I_{L1}$	3,92	3,77	3,83
$I_{L2}$	3,20	3,03	5,31
$I_{L3}$	3,00	2,88	4

**Tabell 6-10 Sammenligning av resultater fra oscilloskopet og Matlab.**

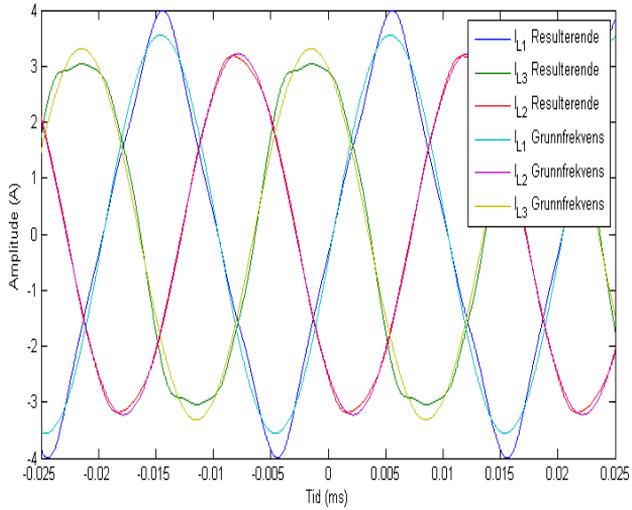
Figur 6-14 viser de overharmoniske linjestrømmene beregnet av Matlab. Det er størst strøm i  $L_1$  som er grunnen for at det er  $I_{L1}$  som er den som skiller seg ut i figurene for linjestrømmene.



**Figur 6-14 De overharmoniske linjestrømmene**

### 6.1.7 Rekonstruksjon av forsøket i Matlab med verdier på kondensatorene fra RCL-meteret

Figur 6-15 har større likhet med skjermbildet fra oscilloskopet enn Figur 6-13. Forskjellen i de to simuleringene er at absoluttverdien av resistansen til kondensatorene er redusert, hvilket medfører en større strøm.



**Figur 6-15 Linjestrømmene, inklusive overharmoniske strømmer.  $I_{L1}=3,99$  A,  $I_{L2}=3,18$  A  $I_{L3}=2,88$  A.**

	Oscilloskop [A]	Matlab [A]	Differanse [%]
$I_{L1}$	3,92	3,99	1,8
$I_{L2}$	3,20	3,18	-0,6
$I_{L3}$	3,00	2,88	-4

**Tabell 6-11 Sammenligning av resultater fra oscilloskopet og Matlab.**

### 6.1.9 Sannsynlige målefeil

Som en kontroll av målingene fra nattanlysatoren er det beregnet den resulterende impedansen for last og kondensator på tre ulike måter:

- For tilfelle 1 er resulterende impedansen lik den i Tabell 6-2
- For tilfelle 2 er den resulterende impedansen beregnet etter verdi for lasten og kondensatoren hentet fra Tabell 6-2
- For tilfelle 3 er den resulterende impedansen beregnet etter verdi for lasten hentet fra Tabell 6-2 og verdi for kondensatoren hentet fra Tabell 6-5.

Avvikene i Tabell 6-12 indikerer dimensjonen av de antatte målefeilene.

Tilfelle	Z [ $\Omega$ ]	R [ $\Omega$ ]	X [ $\Omega$ ]	$\Delta Z$ %	$\Delta \angle$ %
1	28,96 $\angle 0$	28,96	0	0	0
2	29,15 $\angle 1,73$	29,14	0,88	0,66	0,48
3	28,13 $\angle 0$	28,13	0	2,87	0

**Tabell 6-12** Beregnet verdi for den resulterende impedansen for lasten og kondensatoren.  $\Delta Z$  er i prosent av tilfelle 1.  $\angle$  beregnes ut fra at vinkelen går fra 0 til 360.

Det er et avvik mellom kontrollmålingen og målingene foretatt under forsøket, både i RMS-verdi og faseforskyvning. Tabell 6-13 viser en økning for den 5.harmoniske spenningen på 52,2 %. Det indikerer at nettspenningen og/eller målingene ikke er helt stabile.



Måling	$\Delta R_{ms}$ [%]	$\Delta$ Prosent av verdien for grunnfrekvensen, for ulike overharmoniske frekvenser [%]				
		0	3	5	7	11
$U_{L1-n}$	99,9	11,4	95,7 $\angle -0,4$	152,2 $\angle -3,2$	69,5 $\angle -4,3$	114,3 $\angle -3,9$
$U_{L2-n}$	100	83,9	99,8 $\angle -0,9$	122,3 $\angle 6,2$	47,4 $\angle -5,9$	111,1 $\angle -3,7$
$U_{L3-n}$	100	175,4	100,8 $\angle 0,5$	86,9 $\angle 8,7$	38,4 $\angle -1,9$	141,6 $\angle -3,2$

**Tabell 6-13 Sammenligning av kontrollmålingen av spenningen inn på kretsen og måling under forsøket.  $\Delta R_{ms}$  er i prosent av kontrollmålingen.  $\Delta\angle$  beregnes ut fra at vinkelen går fra 0 til 360.**

## 6.2 Neglisjering av tap

### 6.2.1 Kondensatorene

Etter Tabell 6-14 er det uvesentlig forskjell i både fasestrømmene og optimal verdi for kondensatoren ved de forskjellige tilfellene. Størst avvik er det for andel strøm i det negative systemet, men den er fortsatt vesentlig lav.

Test	Steinmetz	Matlab					
	C1 [ $\mu F$ ]	C1 [ $\mu F$ ]	L2 [mH]	I1 [A]	I2 [A]	I3 [A]	$\rho$ [ $10^{-5}$ ]
1	-	40,85	248,2	2,95	2,95	2,95	0,6
2	40,84	40,84	248,1	2,95	2,95	2,95	0,8
3	-	40,84	248,1	2,95	2,95	2,95	12

**Tabell 6-14 Resultat fra Matlab og Pscad**

## 6.2.2 Spolen

Resultatene vist i Tabell 6-15 viser en forskjell for  $L_2$  på 2,2 mH for de tre tilfellene. Avhengig av trinningen for induktansen kan dette bidraget utgjøre en forskjell. Andel strøm i det negative systemet nærmer seg 1 %

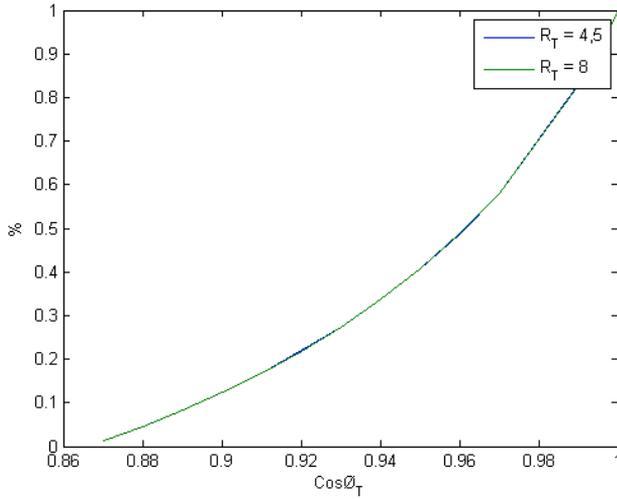
Test	Steinmetz	Matlab					
	L2 [mH]	C1 [ $\mu$ F]	L2 [mH]	I1 [A]	I1 [A]	I1 [A]	$\rho$ [ $10^{-5}$ ]
1	-	40,128	245,9	2,97	2,97	2,97	1,49
2	248,1	40,841	248,1	2,95	2,95	2,95	1,94
3	-	40,84	248,1	2,95	2,99	2,99	860

Tabell 6-15 Resultat fra Matlab og Pscad

## 6.3 Effektfaktorens innvirkning

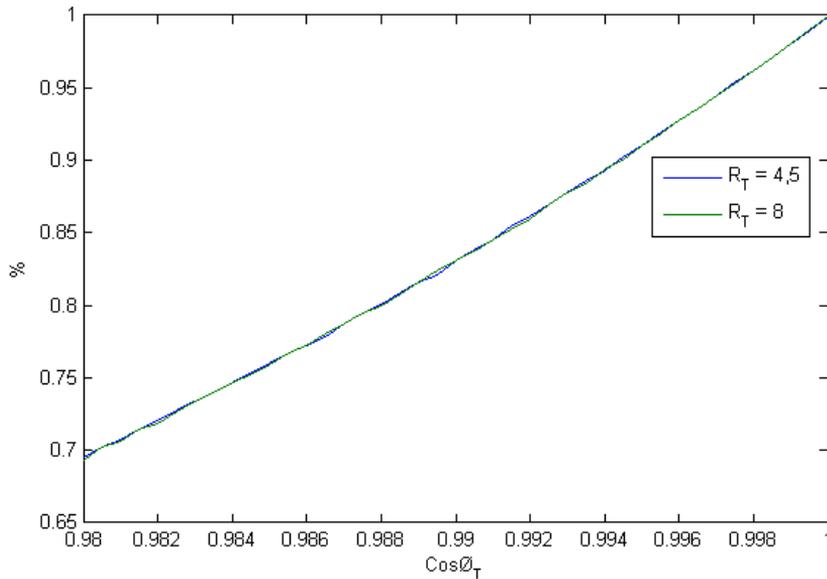
### 6.3.1 Symmetreringsanlegget

Figur 6-16 viser hvordan virkningsgraden for symmetreringsanlegget påvirkes av effektfaktoren. Virkningsgraden går kraftig ned og er halvert ved en effektfaktor på 0,96. Virkningsgraden ser ikke ut til å være avhengig av impedansens størrelse.



**Figur 6-16** Virkningsgraden for symmetreringsanlegget som funksjon av effekt faktoren den ser.

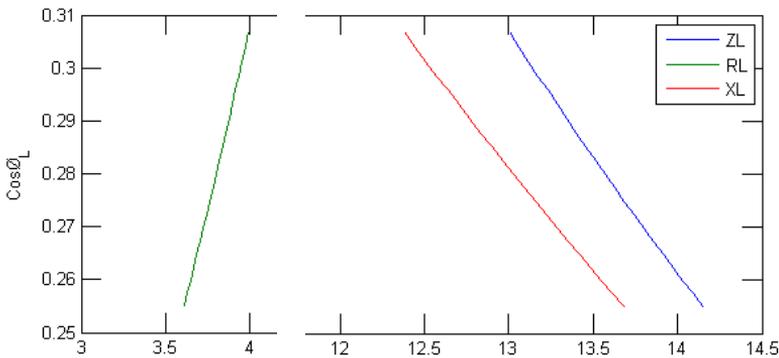
Figur 6-17 viser et forstørret bilde av Figur 6-16.



**Figur 6-17** Virkningsgraden for symmetreringsanlegget som funksjon av effekt faktoren den ser. Utsnitt av Figur 6-16.

### 6.3.2 Prosjektering av Tyrihans

Figur 6-18 viser effektfaktoren som funksjon av impedansen til lasten for tilfelle 1. For minimum- og maksimalverdien oppnås kun av tilhørende resistans og reaktans. Alle verdier i mellom kan oppnås ved flere verdier for lastens resistans og reaktans.



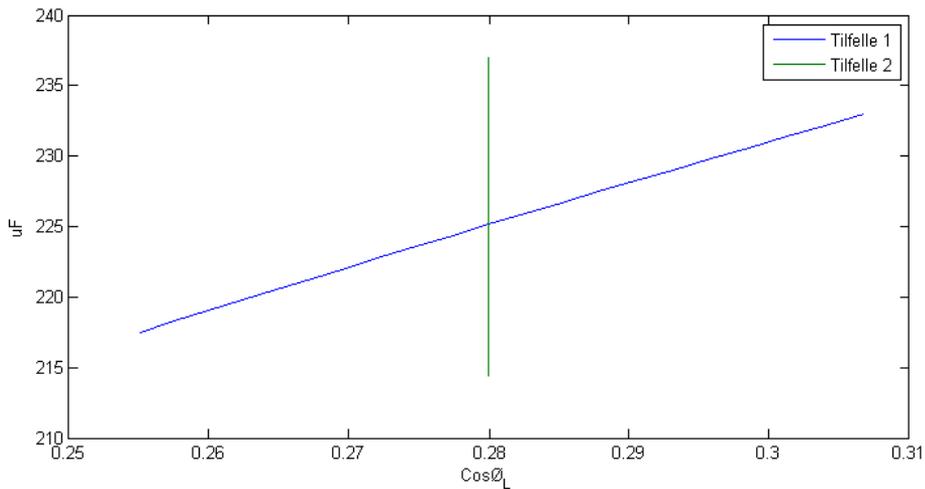
**Figur 6-18 Tilfelle 1.**  $R_L = [3,61 \ 3,99]$ .  $X_L = [13,68 \ 12,38]$ .  $Z_L = [14,15 \ 13]$   $\cos \varphi_L = [0,255 \ 0,307]$

For tilfelle 2 vil ikke effektfaktoren varieres. Resistansen og reaktansen for lasten er lik som for tilfelle 1. Impedansen har derimot en lavere minimalverdi og en høyere maksimalverdi. Effektfaktoren er konstant.

	Min	Maks
$R_L$	3,61	3,99
$X_L$	12,38	13,68
$Z_L$	12,89	14,2514
$\cos \varphi_L$	0,280	0,280

**Tabell 6-16 Tilfelle 2**

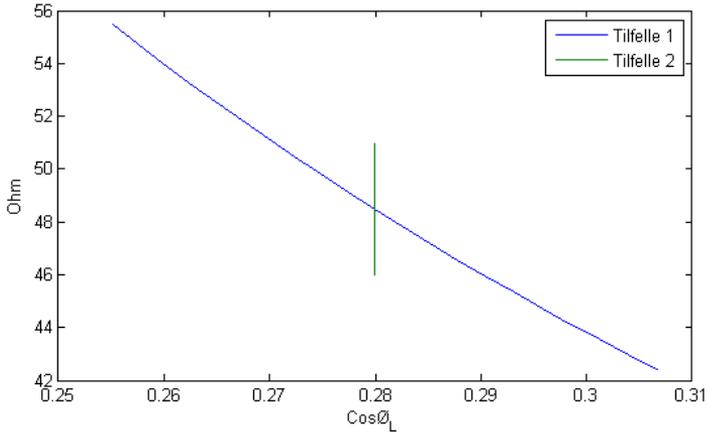
Figur 6-19 viser hvordan kapasitansen for fasekompenseringen må endres for å oppnå full symmetri, som funksjon av effekt faktoren. Kondensatoren har sin minimale og maksimale verdi ved tilfelle 2, hvilket innebærer at effekt faktoren ikke er dimensjonerende for kondensatoren.



**Figur 6-19 Tilfelle 1:  $C_k=[217,5 \ 232,9]$ . Tilfelle 2:  $C_k=[214,4 \ 237]$**

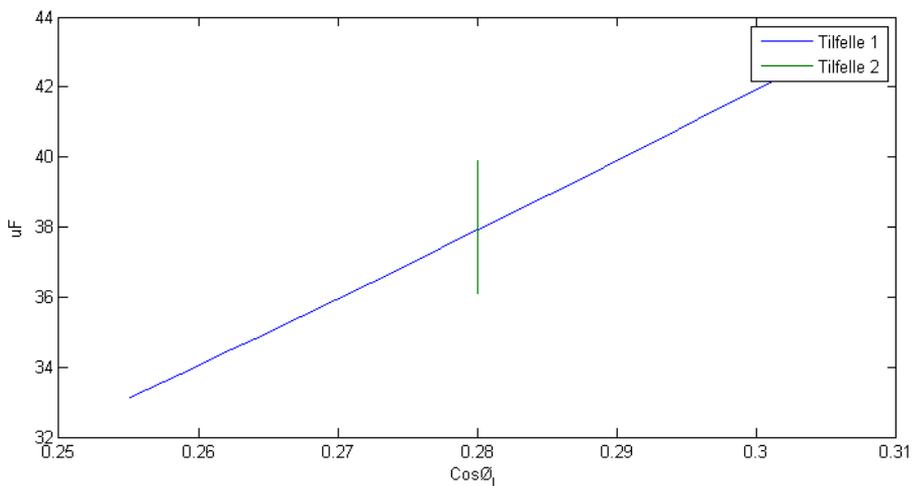
Figur 6-20 viser impedansen symmetreringsanlegget ser som funksjon av effekt faktoren for lasten. Impedansen har sin minimale- og maksimale verdi ved tilfelle 1.

Impedansen er ren resistiv, på grunn av full fasekompensering.



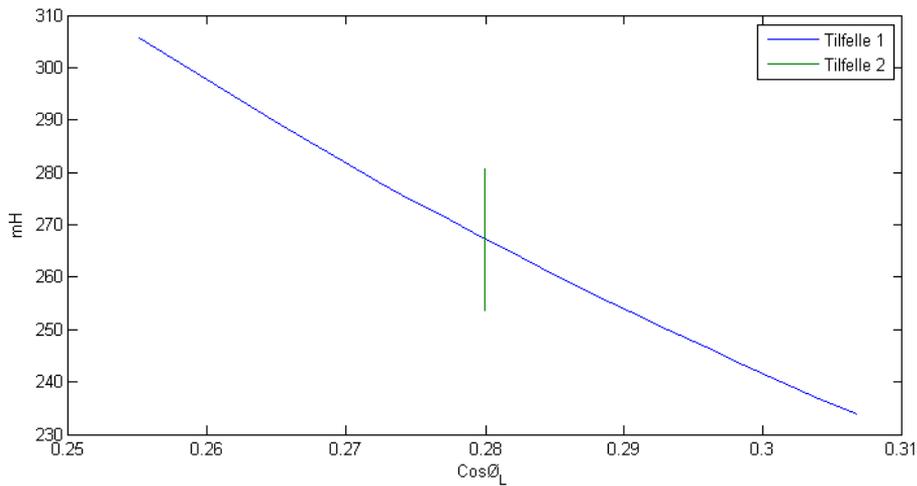
**Figur 6-20 Tilfelle 1:  $RT=[55,5 \ 42,4]$ . Tilfelle 2:  $RT=[46,1 \ 50,9]$**

Figur 6-21 viser kapasitansen for symmetrikretsen som funksjon av effekt faktoren for lasten. Kondensatoren har sin minimale- og maksimale verdi ved tilfelle 1. Kondensatoren er proporsjonal med den resistansen symmetrikretsen ser, slik at den vil følge Figur 6-20. Det forklarer hvorfor tilfelle 1 gir de minimale og maksimale verdiene, samt kurvens svake krumning.



**Figur 6-21 Tilfelle 1:  $C1=[33,1 \ 43,4]$ . Tilfelle 2:  $C1=[36,1 \ 39,9]$**

Figur 6-22 viser induktansen for symmetrikretsen som funksjon av effekt faktoren for lasten. Kondensatoren har sin minimale og maksimale verdi ved tilfelle 1. Kondensatoren er proporsjonal med den resistansen symmetrikretsen ser, slik at den vil følge Figur 6-20. Det forklarer hvorfor tilfelle 1 gir de minimale og maksimale verdiene, samt kurvens svake krumning.



**Figur 6-22 Tilfelle 1:  $L_2=[233,7 \ 305,7]$ . Tilfelle 2:  $L_2=[253,9 \ 280,6]$**

Tabell 6-17 viser for hvilket tilfelle som krever høyest og lavest spenning, samt tilhørende laststrøm. Spenningen over lasten vil være lik linjespenningen ut av transformatoren.

	Maksimum		Minimum	
	Tilfelle 1	Tilfelle 2	Tilfelle 1	Tilfelle 2
$U_{L1-L3}$ [kV]	24,48	23,45	11,28	11,76
$I_L$ [A]	1730	1646	868	912

**Tabell 6-17 Beregning av maksimal og minimal spenning og strøm.**

### 6.3.3 Installert anlegg på Tyrihans

#### 6.3.3.1 Optimalisert anlegg ved varmt rør

Matlab-programmet kjøres først for å finne de optimaliserte verdiene.

De vises i Tabell 6-18 Resultat fra optimalisering ved varmt rør Tabell 6-18.

Måling	Verdi
C1	40,127 $\mu$ F
L2	245,9 mH
Ck	212,21 $\mu$ F
$\rho$	0 %
$\eta$	98 %

Tabell 6-18 Resultat fra optimalisering ved varmt rør

#### 6.3.3.2 Fra kaldt til varmt rør

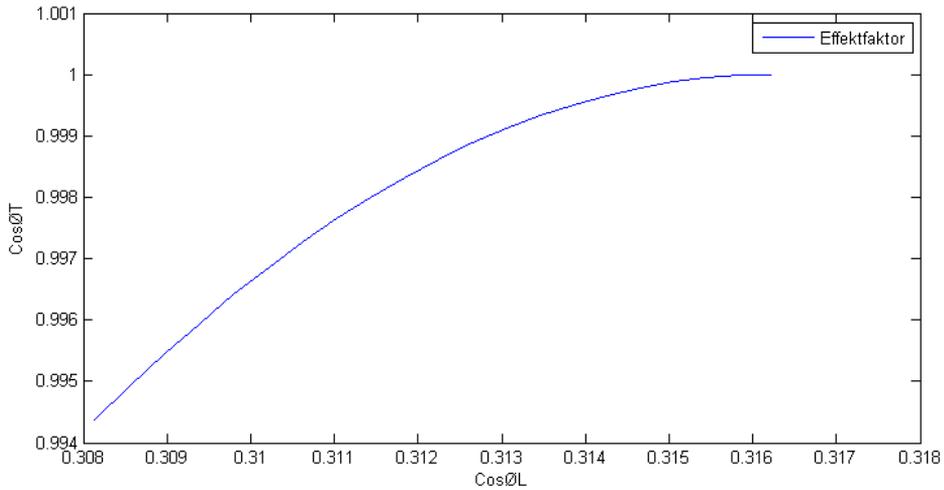
Forutsetninger:

- $R_L$  øker med 6 % fra kaldt til varmt rør, mens  $X_L$  øker 3 %
- $R_L$  varmt rør er 4,5 og  $X_L$  varmt rør er 13,5
- R og X øker lineært
- Tapet i kondensatorene er neglisjert

##### 6.3.3.2.1 Tilfelle 1

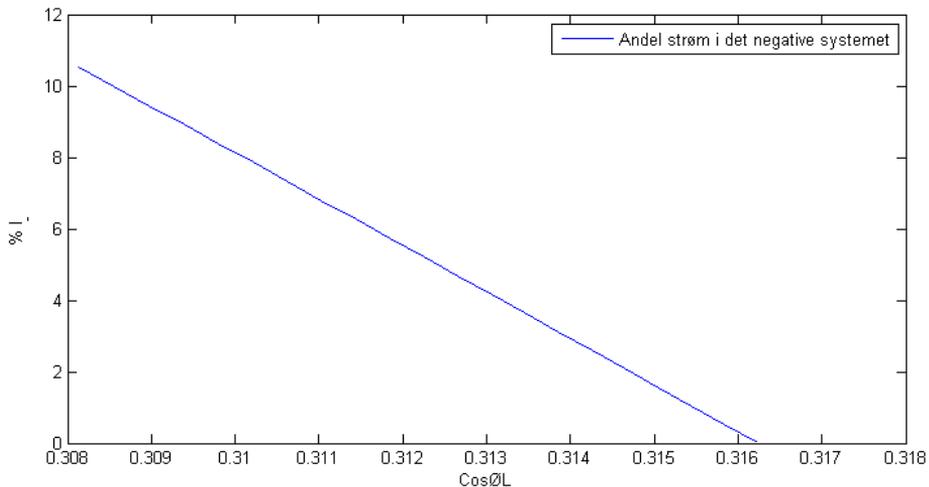
Figur 6-23 viser effektfaktoren symmetreringsanlegget ser som funksjon av effektfaktoren for lasten. Endringen i effektfaktoren er uvesentlig og utgjør kun tusendeler.





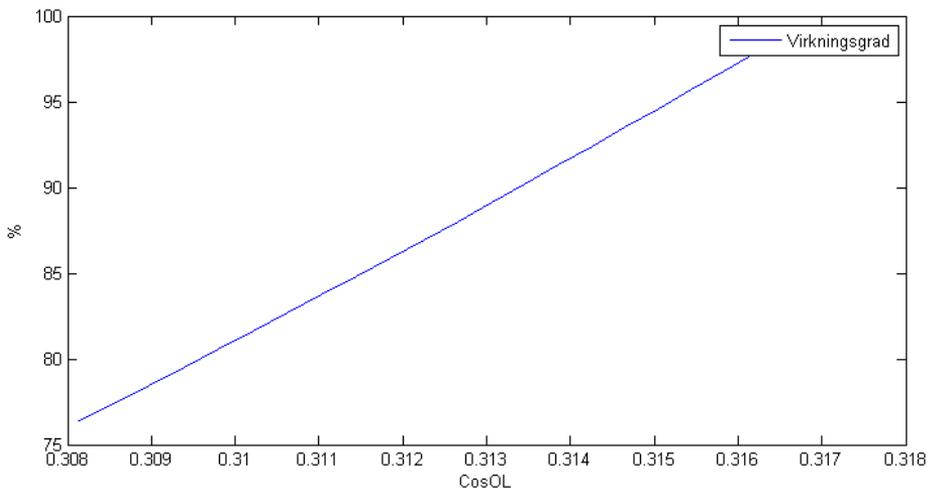
**Figur 6-23 Effektfaktoren symmetreringsanlegget ser som funksjon av effektfaktoren for lasten.**

Figur 6-24 viser andel strøm i det negative systemet som funksjon av effektfaktoren for lasten. Anlegget er optimalisert for varmt rør, som gjør at andel strøm i det negative systemet går mot null. Sammenhengen er lineær.



**Figur 6-24 Andel strøm i det negative systemet som funksjon av effektfaktoren for lasten**

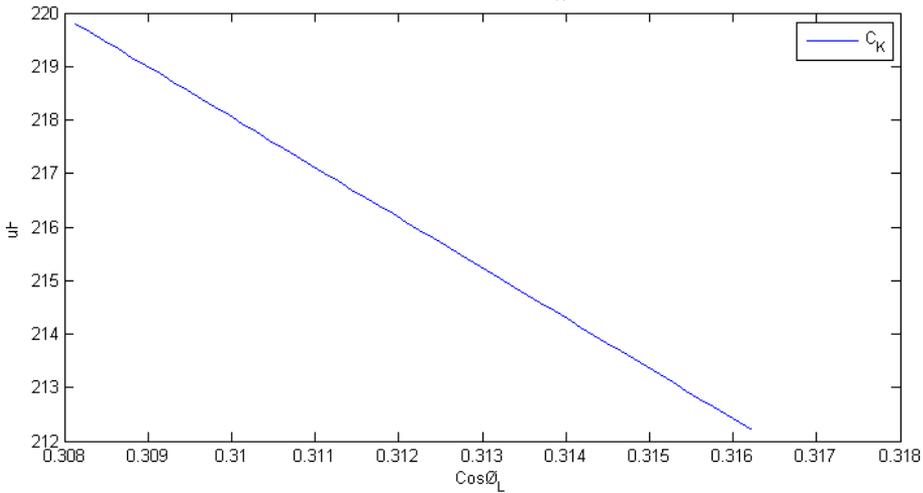
Figur 6-25 viser virkningsgraden for symmetreringsanlegget som funksjon av effektfaktoren for lasten. Virkningsgraden for anlegget går ned betraktelig etter hvert som lastens effektfaktor reduseres. Dette har sammenheng med effektfaktoren symmetrikretsen ser, hvor en effektfaktor mindre enn 1 medfører at lasten symmetrikretsen er ikke er ren resistiv. Ved varmt rør går det opp mot 100 %.



**Figur 6-25 Virkningsgraden for symmetreringsanlegget som funksjon av effektfaktoren for lasten.**

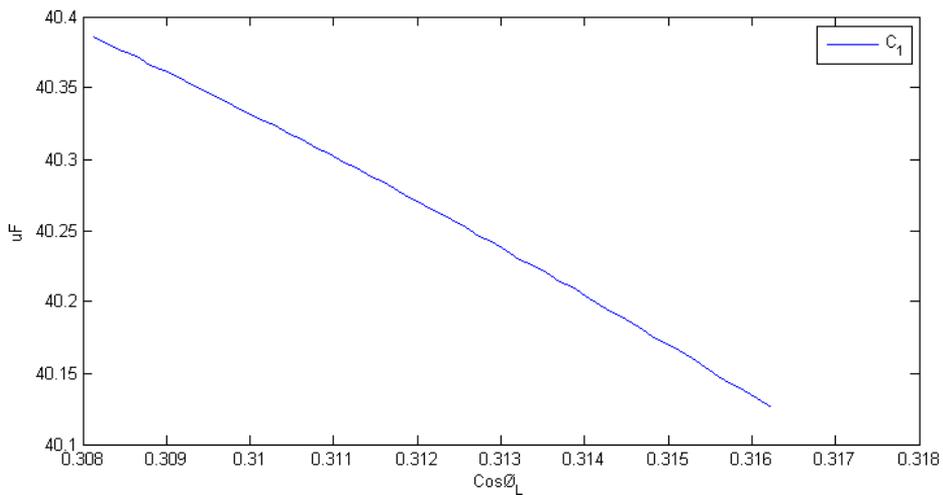
#### 6.3.3.2.2 Tilfelle 2

Figur 6-26 viser hvilken verdi kondensatoren for fasekompenseringen må ha for å oppnå full fasekompensering etter hvordan lasten endrer seg fra kaldt til varmt rør.



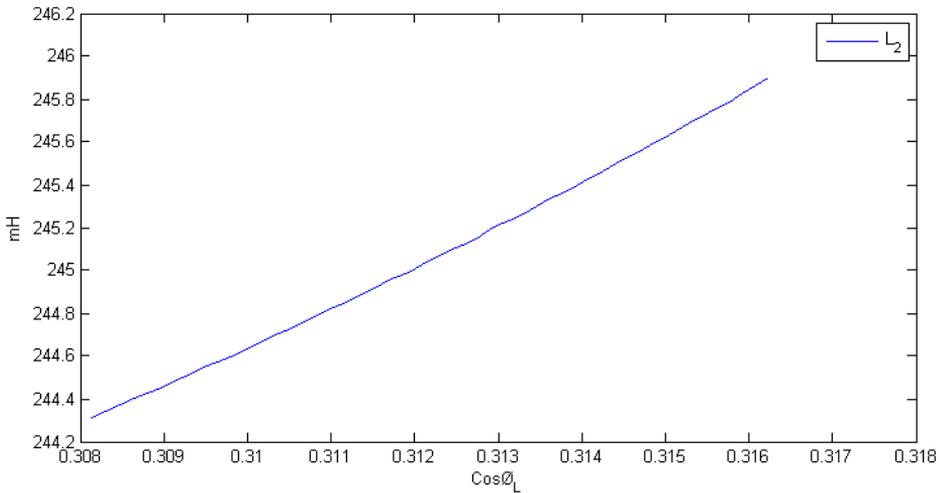
**Figur 6-26** Kapasitansen for fasekompenseringen som funksjon av effektfaktoren for lasten.

Figur 6-27 viser hvilken verdi kondensatoren for symmetrikretsen må ha for å oppnå optimalisering etter hvordan lasten endrer seg fra kaldt til varmt rør.



**Figur 6-27** Kapasitansen for symmetreringsanlegget som funksjon av effektfaktoren for lasten.

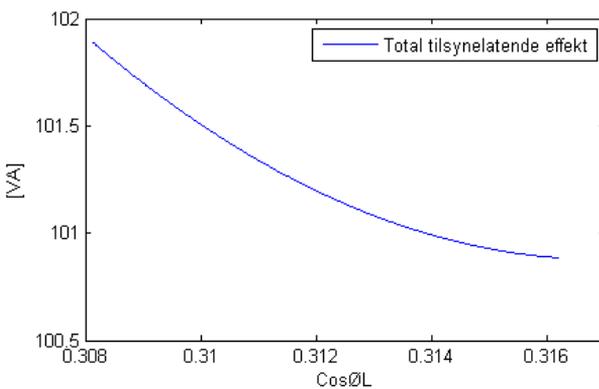
Figur 6-28 viser hvilken verdi induktansen for symmetrikretsen må ha for å oppnå optimalisering etter hvordan lasten endrer seg fra kaldt til varmt rør.



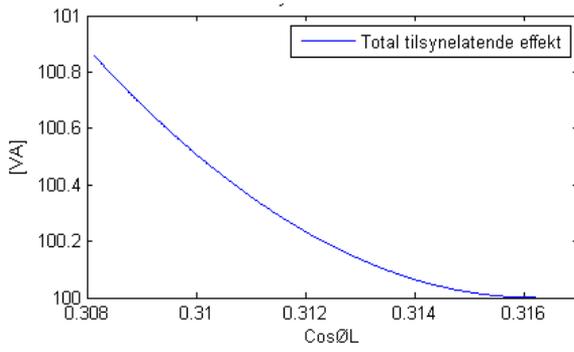
**Figur 6-28** Induktansen for symmetreringsanlegget som funksjon av effektfaktoren for lasten.

Figur 6-29 viser den totale effekten som mates inn til anlegget, i prosent av den aktive lasten, som funksjon av effektfaktoren for lasten. Når anlegget ikke er optimalisert vil den trekke en større reaktiv effekt.

Induktansen  $L_2$  gir et ta, vist i Figur 6-29



**Figur 6-29** Total tilsynelatende effekt som funksjon av effektfaktoren inklusiv tap i  $L_2$



**Figur 6-30 Total tilsynelatende effekt som funksjon av effektfaktoren eksklusiv tap i  $L_2$**



## 7 Diskusjon

### 7.1 Verifisering av forenklet krets

#### 7.1.1 Sammenligning av dataprogrammene Matlab og Pscad

Den forenklete kretsen består av enkle og kjente komponenter. Matlab-programmet er satt opp for å beregne stasjonære strømmer og spenninger, noe som fører til at kretsen kan uttrykkes av ligninger i frekvensplanet. I Pscad settes kretsen opp grafisk, med de forskjellige komponentene satt opp etter kretsskjemaet for den fullstendige kretsen.

Simuleringene i Matlab og Pscad gir tilsynelatende like resultater, hvor både amplitude og faseforskyvning er lik for alle strømmer. Resultatene er også fornuftige: Strømmen gjennom lasten og fasekompenseringen er nesten like stor; den kompenserte strømmen er redusert med en faktor på  $\cos \varphi_L$  og strømmene gjennom symmetrikretsen og strømmene inn til kretsen følger ligningene for Steinmetz' krets og er videre redusert med  $\sqrt{3}$ . Teorien støtter opp under disse simuleringene.

Matlab-programmet har en optimaliseringskrets som skal beregne de optimale verdiene for symmetrikretsen med hensyn på symmetri. Det er denne kretsen som har beregnet de verdiene som er brukt i de to simuleringene. Ved at kretsen følger Steinmetz' ligning [ 2.2 ] og med en andel strøm i det negative systemet på  $5.4 \cdot 10^{-4}$  gir det grunnlag til å ha tiltro til at optimaliseringskretsen fungerer.

De to simuleringene er så like at det er grunnlag for å likestille Matlab-programmet med Pscad.

### 7.1.2 Sannsynlige målefeil

Under forsøket er det registrert tre mulige målefeil:

- Måleunøyaktighet gitt av toleransen til måleutstyret
- Målefeil på grunn av forstyrrelser av overharmonisk støy
- Målingene er tatt opp over tid

En oppsiktsvekkende måling er at strømmen gjennom kondensatorene ligger over 90 grader før spenningen. Det fører til en negativ resistans, som igjen betyr at kondensatoren produserer energi. Dette er ikke mulig og må følgelig være en målefeil. Denne målingen vises både på oscilloskopet og nettanalysatoren. For oscilloskopet kan en mulig forklaring være faseforskyvningen mellom de overharmoniske strømmene og grunnfrekvensen (50hz). Ved en faseforskyvning så vil nullgjennomgangen for den resulterende strømmen være ulik nullgjennomgangen for grunnfrekvensen. Det oscilloskopet viser er den resulterende strømmen. Nettanalysatoren deler derimot opp strømmene for de ulike frekvensene og skal dermed ta hensyn til dette. Det er derfor usikkert hvorfor den også viser en faseforskyvning på over 90 grader.

Det er grunn til å tro at denne målefeilen ikke bare gjelder for måling av kondensatorer. Størst likhet mellom målingen av fasestrømmene av oscilloskopet og matlab-programmet oppnås når det benyttes verdier for kondensatorene målt av RCL-meteret. RCL-meteret er laget for å måle blant annet kondensatorer. Det er derfor grunnlag for å ha større tiltro til disse målingene enn målingene med nettanalysatoren. Tabell 6-12 viser en oversikt over den resulterende impedansen for fasekompenseringen



og lasten, beregnet på ulike måter. Dersom målefeilen bare gjelder for kondensatorene skulle den resulterende impedansen med verdi på kondensatorene fra RCL-meteret vært mer lik den nettanalysatoren måler. Faseforskyvningen er fremdeles 0, men impedansen har en forskjell på 2,87 %.

Ved å la 360 grader i faseforskyvning tilsvare 100 % feil er en grad forskjell 0,28 % feil. Målenøyaktigheten for nettanalysatoren er 1 grad for den grunnharmoniske og øker for de overharmoniske (16). På det meste ble det målt 91,9 grader i forskjell mellom strøm og spenning i kondensatorene med nettanalysatoren. RCL-meteret målte de som ideelle, hvilket gir 90 grader. Hvis instrumentets unøyaktighet gjør at det viser en grad for mye, så gjenstår det 0,9 grader som avvik. Det tilsvarer en målefeil på 0,25 %. Dette er ikke en vesentlig målefeil.

Induktansene burde også ha blitt kontrollmålt, men RCL-meteret leverer ikke stor nok strøm til å kunne magnetisere opp jernet og vil dermed kunne gi upresise målinger. Det samme gjelder for å undersøke effekten høyere frekvens har for komponentene. Dette ble kun utført på kondensatorene for fasekompenseringen. Kondensatorene brukt i symmetreringsanlegget er av samme type og begge er laget for motorer. Det antas at begge kondensatorenhetene oppfører seg på samme vis.

En annen mulig feilkilde er at alle målinger ikke er gjort på nøyaktig samme tid, men tatt etter hverandre. Det medfører en tidsdifferanse mellom første og siste måling. Denne tidsdifferansen vil betydning for beregning av verdien for enkeltkomponentene, fordi strøm og spenning for hver komponent fra nettanalysatoren begge er øyeblikksverdier tatt

på samme tid. Men målingene for spenning og strøm inn til kretsen er tatt etter hverandre. Det medfører at disse verdiene ikke vil stemme helt overens med hverandre og med skjermbildet fra oscilloskopet. Tabell 6-13 viser betydelig forskjell mellom en kontrollmåling av spenningen inn til kretsen tatt før forsøket og tatt under forsøket. Den grunnharmoniske spenningen er så å si lik, mens for de andre frekvensene varierer både amplituden og faseforskyvningen. Hvor stor forskjellen er for målingene tatt opp under forsøket er usikkert, men det antas at de også vil variere.

### **7.1.3 Rekonstruksjon av forsøk i Matlab**

Tidligere resultater har dessuten vist god overenstemmelse mellom de to programmene. I simuleringen er det valgt bare å ta med de overharmoniske frekvensene som har en strøm som er minst 1 % av den grunnharmoniske frekvensen. Dette fordi de vil gi et begrenset bidrag og fordi de er mer utsatt for målefeil. Utelatelse av disse kan medføre at kurvene fra Matlab ikke har de små ujevnheterne som skjermbildet fra oscilloskopet.

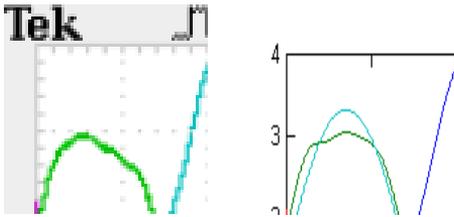
Ved å bruke verdiene av komponentene beregnet etter målingene fra forsøket i simulering i Matlab oppnås det god overenstemmelse med målingene fra forsøket. Det er derimot en viss forskjell i amplitudene og i tillegg er formen på kurven for strømmen i  $L_2$  litt annerledes ved maksimalverdiene. Disse forskjellene kan skyldes feil verdier for komponentene på grunn av målefeil og varierende spenning inn til kretsen som kontrollmålingen.

For å minimere målefeilen kjøres det også en simulering med verdier av kondensatorene etter målingene med RCL-meteret. Tabell 7-1 viser at avviket mellom oscilloskopet og Matlab reduseres, hvor det er størst forskjell for strømmen  $I_{L2}$ .

Måling	Oscilloskop [A]	Matlab 1 [%]	Matlab 2 [%]
$I_{L1}$	3,92	3,83	1,8
$I_{L2}$	3,20	5,31	-0,6
$I_{L3}$	3,00	4	-4

**Tabell 7-1 Resultat fra forsøk og simulering av forsøk.**

Strømmen i  $L_3$  viser ingen forskjell og påvirkes dermed ikke av denne målefeilen. En mulig forklaring av at den har et større avvik enn for de andre fasene kan ligge i forskjellen for når de overharmoniske strømmene har sine topp- og bunnverdier i forhold til den grunnharmoniske strømmen. Figur 7-1 viser toppen av kurven for  $I_{L3}$  for oscilloskopet og Matlab. Ingen av kurvene når opp til toppverdien til grunnfrekvensen, men for Matlab er det en liten toppverdi for den resulterende strømmen hvor grunnfrekvensen har sin maksimalverdi. Hvis de overharmoniske strømmene hadde vært forskyvet noe i tid, ville ikke denne toppen vært der og kurven hadde lignet mer på grafen fra oscilloskopet. Denne forskjellen kan skyldes målefeil av spenningen inn til kretsen.



Figur 7-1 Forstørret bilde av skjermbildet til oscilloskopet og graf fra Matlab

## 7.2 Neglisjering av tap

Når resistansen er vesentlig mindre enn reaktansen kan ofte resistansen neglisjeres. Det er gjort for krafttransformatoren hvor forholdet mellom  $R$  og  $X$  gjerne er  $0,1$ . Transformatoren er en komponent som vil gi likt bidrag til alle fasene, hvilket medfører at den bare vil gi et spenningsstap til resten av kretsen. For fasekompenserings- og symmetrikretsen vil det være annerledes. Symmetrikretsen fungerer optimalt ved ideell kondensator og induktans, samt en ren resistiv last.

For kondensatoren ble det ikke registrert noen nevneverdig forskjell for verken verdien for kondensatoren eller i andel strøm i det negative systemet ved simulering. Det har sammenheng med at resistansen bare er  $0,02\%$  av reaktansen. Tapet i kondensatoren kan med stor nøyaktighet neglisjeres.

For induktansen ble det registrert en forskjell på  $2,2\text{ mH}$  for optimalisert verdi av induktansen. Spolens resistans er  $1,5\%$  av reaktansen og vil derfor gi et større utslag enn for kondensatoren. Figur 6-22 viser at det totale spennet induktansen må dekke over ved prosjektering av et nytt anlegg er  $72\text{ mH}$ . Ved dimensjonering av anlegget kan det derfor ses bort

fra tapet i spolen, men for å finne optimal innstilling anbefales det likevel å ta den med.

### **7.3 Dimensjonering etter variasjon i effektfaktor og effekt**

Symmetreringsanlegget er konstruert etter Steinmetz' krets. Denne kretsen forutsetter ideelle induktanser og kondensatorer, samt en ren resistiv last. Kondensatorene har såpass lite tap at de kan regnes som ideelle, mens tapet i induktansene vil påvirke kretsen. En ren resistiv last oppnås ved trinnløs og kontinuerlig variasjon av kondensatoren for fasekompenseringen, som tar hensyn til endringen i lastimpedansen. Effektfaktoren for røroppvarmingen pleier å ligge mellom 0,2 og 0,32. For symmetrisanlegget så må effektfaktoren være over 0,86 for at det i det hele tatt skal ha noen virkning. Den vil oppnå symmetri, men fasestrømmene inn til symmetreringsanlegget vil ikke være mindre enn strømmene ut av anlegget. For en virkningsgrad over 80 % må effektfaktoren symmetreringsanlegget ser være over 0,9875. Dette medfører at fasekompenseringens oppgave ikke bare er å begrense strømmen, men også å oppnå en så lav effektfaktor som mulig. Kondensatoren er en statisk komponent og endring i verdi for fasekompenseringen skjer ved å velge hvor stor andel av komponentene som skal være innkoblet.

Ved dimensjonering av komponentenes verdi, må det finnes ens maksimale og minimale verdi og bestemme intervallet mellom hvert trinn. Ekstremalverdiene er gitt av de fysiske lovene, mens intervallet avgjøres av hvilken toleranse den som dimensjonerer aksepterer. Økt toleranse vil gi mulighet for økt andel strøm i det negative systemet og

en lavere virkningsgrad for symmetrikretsen. De tre komponentene i Steinmetz' krets er avhengig av hverandre, slik at det kan være uhensiktsmessig å bare dele intervallet opp i ti like store trinn for alle komponentene. Trinnet for den ene komponenten bør stå i forhold til trinnet for de andre komponentene.

### **7.3.1 Stigekabel**

En kabel må dimensjoneres for å tåle den varmen som den utvikler som følge av strømmen som går i kabelen, gitt av  $P = I^2 \cdot R$ . Det er absoluttverdien av strømmen som bestemmer dimensjoneringen av tverrsnittet av kabelen. Siden den fører den ukompenserte strømmen opp til fasekompenseringen, må den dimensjoneres for å kunne lede en stor strøm. Strømmen lasten trekker er igjen avhengig av hvilken spenning transformatoren leverer. Beregninger viser at størst strøm oppnås ved størst spenning over lasten, som igjen oppnås ved den laveste effektfaktoren. Ved prosjektering av Tyrihans må kabelen kunne tåle 1730 A.

### **7.3.2 Fasekompensering**

Kapasitansen for fasekompenseringen har sine ekstremalverdier for den minste og største lastimpedansen. De to impedansene har samme effektfaktor, hvilket innebærer at effektfaktoren ikke er den dimensjonerende størrelsen for fasekompenseringen.

Fasekompenseringen vil derimot påvirke den effektfaktoren symmetrikretsen ser.

Intervallet for kapasitansen er på 22,6  $\mu\text{F}$

### 7.3.3 Symmetreringsanlegg

Kondensatoren og induktansen for symmetreringsanlegget er avhengig av den motstanden den ser. Ekstremalverdiene for de to komponentene bestemmes derfor av den resulterende resistansen for lasten og fasekompenseringen. Denne motstanden har igjen sine ekstremalverdier for maksimum og minimum for effekt faktoren til lasten.

Intervallet for kapasitansen er på  $10,3 \mu\text{F}$ , nesten halvparten av kapasitansen for fasekompenseringen. Følgelig bør trinnene for kapasitansen i fasekompenseringen være dobbelt så stor som trinnene for kapasitansen i symmetrikretsen.

Intervallet for induktansen er  $72 \text{ mH}$ , nesten syv ganger større enn for kapasitansen i symmetrikretsen. Følgelig bør trinnene for induktansen i symmetrikretsen være syv ganger så stor som trinnene for kapasitansen i symmetrikretsen.

### 7.3.4 Transformator

Ved at fasekompenseringen fjerner det reaktive tapet for lasten vil effekten transformatoren må levere være tilnærmet lik effekten lasten trekker. Tapet i induktansen i symmetrikretsen fører derimot til et tap på nær 2 %, hvilket gjør at transformatorytelsen må være noe større enn den aktive effekten til lasten.

Spenningen ut fra transformatoren bestemmes av den resulterende impedansen for fasekompenseringen og lasten. Spennings ekstremalverdier bestemmes dermed av lastens maksimale og minimale effekt faktor. Den resulterende impedansen ved full fasekompensering er

en ren resistans. Beregningene i Tabell 6-17 gir at transformatoren må kunne levere en linjespenning på mellom 11,28 kV og 24,48 kV. For å ta hensyn til nødvendigheten av å endre spenning på grunn av toleransen til lasten og de forskjellige operasjonsmodusene DEH-systemet har er det nødvendig å kunne regulere spenningen. Intervallet mellom hvert trinn bestemmes av hvilken nøyaktighet en ønsker på effekten.

Siden tapet for kondensatoren er neglisjert, vil all effekt symmetreringsanlegget sender inn til fasekompenseringen og lasten gå til lasten. Induktansen i symmetreringsanlegget gir et tilleggstrap på litt under 2 %. Transformatoren må dermed kunne levere den effekten lasten krever, samt tapet i symmetrikretsen.

#### **7.4 To-fase kontra tre-fase**

Det er tre større forskjeller mellom et DEH-system med en to-fase- og en tre-faseløsning:

1. Fasekompenseringens rolle endres.
2. Symmetreringsanlegget eksisterer eller ikke
3. Transformatoren er to- eller tre-fase.

I et to-faseanlegg har fasekompenseringen bare en rolle, kompensere for den lave effektfaktoren til lasten for å minke tilførselsstrømmen. Mens for et tre-faseanlegg har den også som oppgave å endre lasten som symmetreringsanlegget ser mest mulig ren resistiv, ettersom virkningsgraden er sterkt avhengig av den effektfaktoren den ser. Det medfører at verdien for kondensatoren må være mer presis for å oppnå full fasekompensering, mens det ikke vil bli vesentlig forskjell i minking i



strømmen. Ved et to-fasesystem kan en effektfaktor på 0,95 være akseptabelt. For en økning i effektfaktoren fra 0,25 til 0,95 gir en minking på 3,8. En økning til 1 gir ikke vesentlig mindre strøm, med en minking på 4. Symmetreringsanleggets virkningsgrad er derimot mer enn halvert ved en effektfaktor på 0,95, kontra 1.

Symmetreringsanlegget bidrar med en reduksjon i strømmen med en faktor opp til  $\sqrt{3}$ , ved å fordele strømmen på tre faser.

Transformatoren

#### **7.4.1 Effektfaktor**

Det er ingen absolutte elektriske systemkrav til hvor høy effektfaktoren skal være. Det kan derimot være et ønske eller krav stilt av kunden, på grunn av begrenset generatorkapasitet på den aktuelle plattformen (15). På grunn av den veldig lave effektfaktore kan fasekompensering minke strømmen med en faktor opp til 4.

#### **7.4.2 Spenning**

Det er ingen elektriske systemkrav som vil kunne gjøre at et to-fasesystem ikke er gjennomførbart (15).

#### **7.4.3 Symmetri**

Det er ikke noen krav til at enkeltlaster skal fordeles tre-fase.

Et mål på usymmetri er andel strøm i det negative systemet. IEC60034-1 7.2.3 beskriver hvor mye strøm i det negative systemet en generator tåler.

En generator tåler, etter IEC60034-1 7.2.3, 10 prosent av merkestrømmen i det negative systemet,  $\frac{I_-}{I_N} < 0.1$ . For et eksisterende anlegg hvor DEH blir installert blir uttrykket følgende:

$$\frac{I_{EKS.-} + I_{DEH-}}{I_{N+}} < 0,1$$

Om det eksisterende anlegget er helt symmetrisk så er  $I_{EKS.-} = 0$ . Ved å koble DEH som en to-faselast vil  $I_{DEH-} = I_{DEH+}$ . For at kravet i IEC 60034 skal være oppfylt må da det eksisterende anlegget ha en merkestrøm på:

$$I_N > 10 \cdot I_{DEH}$$

Dette medfører at det eksisterende anlegget må ha en ytelse på ti ganger DEH. Tyrihans har to generatorer på hver 42MVA, men kun en pleier å ligge inne. Med en maksimal effekt på DEH-systemet på 11 MW, så vil dette kravet utløse krav om symmetrering.

## 8 Konklusjon

Forsøket av den forenklete kretsen viste stor overenstemmelse med datamodellen. Videre analyser viste at den forenklete kretsen kan modelleres uten tap. Det fører til at Steinmetz formler for symmetrikretsen gjelder.

Lastens minimale og maksimale effektfaktor og ikke lastens minimale og maksimale impedans er dimensjonerende for flere av komponentene. Siden forsyningsutstyret topside er statiske må de optimaliseres for en bestemt effektfaktor. Effektfaktoren vil endres litt etter hvert som røret varmes opp. For de effektfaktorene anlegget ikke er optimalisert for vil virkningsgraden for symmetreringsanlegget gå ned og andel strøm i det negative systemet gå opp. Det må derfor aksepteres en viss usymmetri.

Krav om symmetreringsanlegg kan utløses av to krav. Det ene er om det er et spesifikt krav på den aktuelle plattformen, grunn av lite ledig generatorkapasitet. Det andre går på hvor mye strøm i det negative systemet generatoren tåler.

### 8.1 Videre arbeid

Viktige aspekter ved dimensjonering av utstyr plassert for plattformer er vekt, størrelse og økonomi. Dette er det ikke tatt hensyn til i valg av to- eller trefase-system.

Andre konfigurasjoner av forsyningsanlegget kan vurderes. Eksempelvis med fasekompenseringen i serie med lasten istedenfor og flytte symmetreringskretsen før transformatoren.



## 9 Bibliografi

1. **Faanes, Hans H.** *TET 4115 Elektriske Kraftsystemer*. Trondheim : NTNU, 2004.
2. **Daniel Mayer, Petr Kropík.** *New approach to symmetriazation og three-phase network*. s.l. : Electrical Engineering, 2005. VOL. 56, NO. 5-6, 2005, 156–161.
3. **SINTEF.** *Direct electrical heating of sub sea pipelines - Technology development and operating experience*. Trondheim : SINTEF, 2005. PCIC-2005-DV-15.
4. **Hansen, Eilif Hugo.** *Elektroinstallasjoner*. Trondheim : Classica forlag AS, 2010. ISBN 82-7610-010-4.
5. Wikipedia - Magnetfelt. [Internett] [Sisert: 20 03 2012.]  
<http://no.wikipedia.org/wiki/Magnetfelt>.
6. Wikipedia - Skin effect. [Online] [Cited: 03 20, 2012.]  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Skin\\_effect](http://en.wikipedia.org/wiki/Skin_effect).
7. **Israel D. Vagner, Boris I. Lembrikov, Peter Wyder.** *Electrodynamics of magnetoactive media*. s.l. : Springer, 2004. 3-540-43694-4.
8. **InterConsult Group ASA (ICG).** *Elektrisk støy i yrkesbygg*. OSLO : ICG, 2001. 102975icg001.
9. **SINTEF.** *Direct Electrical Heating System for Preventing Wax and Hydrates in Pipelines*. Trondheim : SINTEF, 2007. 040625HK9572.

10. **EFI.** *Concept verification direct heating of oil & gas pipelines.* Trondheim : EFI, 1997. 30466-01.
11. **Statoil ASA.** *Operational Experience by Applying Direct Electrical Heating for Hydrate Prevention.* Houston : Offshore Technology Conference, 2003. OTC 15189.
12. **EFI.** *Direct Electrical Heating of Subsea Pipelines.* Trondheim : EFI, 1993.
13. **SINTEF.** *Hydrate Prevention on Long Pipelines by Direct Electrical Heating.* Trondheim : SINTEF, 2005. 2005-JSC-413.
14. **Lien, Ingebjør.** *Elektroingeniør Wärtsilä.* 03 05 2012.
15. **Hovland, Terje.** *Sjefingeniør elektro Norne (Statoil).* 03 05 2012.
16. **FLUKE.** *FLUKE 434 User Manual.* s.l. : FLUKE, 2012.
17. **SINTEF.** *Electromagnetic Modelling of Steel Pipelines for DEH Applications.* Trondheim : SINTEF, 2007. 2007-JSC-563.
18. —. *Implementation of Direct Electric Heating as Part of the Hydrate Control and Management System.* Trondheim : SINTEF, 2008. ISOPE-2008-TPC-343.
19. **Aker Kværner.** *DEH draft study Tyrihans.* 2004. C074-NB-E-RA-0003 AKPAS-AKRE-200403.
20. **SINTEF.** *Design of Anode Corrosion Protection System on Electrical Heated Pipelines.* Trondheim : SINTEF, 2004. 2004-CTS-01.

21. **Wikipedia.** Kirchhoffs lover. [Internett] [Sisert: 13 05 2012.]  
[http://no.wikipedia.org/wiki/Kirchhoffs\\_lover](http://no.wikipedia.org/wiki/Kirchhoffs_lover).
22. **Aker Kværner.** *Evaluation of transformer solution for Tyrhans FLH.* 2004.
23. **Nysveen, Arne.** *Maritime and Offshore Power Systems.* Trondheim : NTNU, 2011.
24. **Wikipedia.** Penetration effect. [Internett] [Sisert: 01 05 2012.]  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Penetration\\_depth](http://en.wikipedia.org/wiki/Penetration_depth).
25. —. Proximity effect. [Internett] [Sisert: 01 05 2012.]  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Proximity\\_effect\\_\(electromagnetism\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Proximity_effect_(electromagnetism)).
26. **SINTEF.** *Electromagnetic Modelling For Electrical Heating of Pipelines.* Trondheim : SINTEF, 2007.

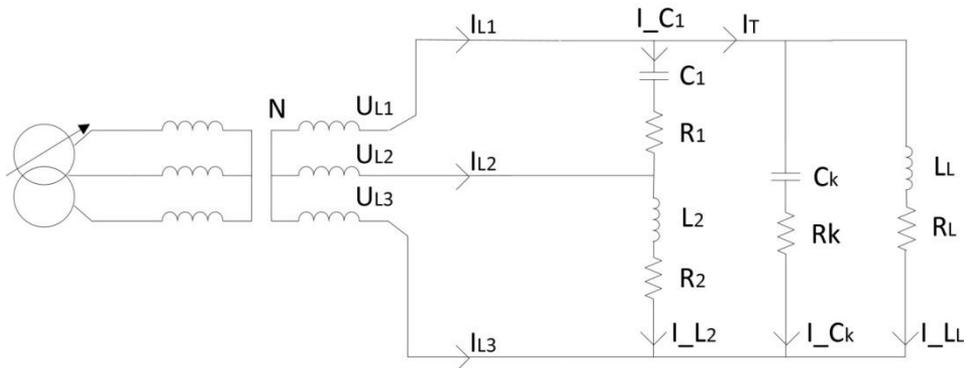




## Vedlegg A Lab oppsett

I forsøket ble det benyttet en variac for å kunne variere spenningen og en transformator for å få et galvanisk skille mellom forsøket og nettet.

Kretsskjema for forsøket er vist i Figur A-1.



Figur A-1 Kretsskjema for forsøk

Tabell A-1 viser hvilke komponenter som ble brukt i forsøket. For noen komponenter mangler det grunnleggende informasjon. For eksempel for to av induktansene vises det til Tabell 6-4, som viser resultatet av egne målinger av de to.

Type	Merke	Betegnelsen	Oppgitt verdi	Antall	NTNU nr.
Variac	Lübcke	3R54-220-H	0-220 V 3x10 A	1	B01-0400
Transformator				1	B01-0004
Kondensator (C <sub>1</sub> )	LCR	MR 10/420B	10 μF ±10 %	3	

	LCR	MR 18/440	18 $\mu$ F $\pm 10$ %	3	
	EPCOS	B25834-L5106- K009	10 $\mu$ F $\pm 10$ %	3	
Induktans ( $L_2$ )	NTNU		117 mH,	1	L02- 0048
	BBC	GNS- 7048008P2	1,4 mH	1	L02- 0025
	NTNU		2,3 mH	1	K02- 0052
	NTNU		8 mH	1	K02- 0053
	NTNU			1	K02- 0029
	NTNU			1	Umerke t
Kondensator ( $C_k$ )	Siemens	B25832- A4336-K009	33 $\mu$ F $\pm 10$ %	15	K03- 0028
Induktans ( $L_L$ )	NTNU		84 mH, 14 A	1	K2-030
	NTNU		85 mH, 14 A	1	K02- 0031
Motstand ( $R_L$ )	NTNU	Vannmotstand			

Tabell A-1 Oversikt over komponenter brukt i forsøket

Tabell A-2 viser hva slags måleutstyr det ble brukt i forsøket. Alle komponentene utenom RCL-meteret ble brukt under hele forsøket. RCL-meteret ble kun brukt for å måle kondensatorene.

Type	Merke	Betegnelse	NTNU nr.	S/N
Oscilloskop	Tektronic	TDS 2014B	G04-0349	C100800
Nettanalysator	Fluke	434	H02-0124	DM8760042
Måleprobe Strøm	Fluke	i1000s	I04-0408	9268 83751
			I04-0492	2586 2336
			I04-0407	9286 83750
Måleprobe Spenning	Tektronic	P520	I06-0468	B022466
RCL-meter	Philips	PM 6304	H01-0075	LO 634526

**Tabell A-2** Oversikt over måleutstyr brukt i forsøket



## Vedlegg B Matlabprogram

```

%Input
C1_1=36e-006;      %Kondensatorens minimale verdi
C1_2=47e-006;      %Kondensatorens maksimale verdi
L2_1=0.218;        %Induktansens minimale verdi
L2_2=0.283;        %Induktansens maksimale verdi
Intervall=200;     %Faktor for bestemmelse av oppløsningen

Cd=(C1_2-C1_1)/Intervall;      %Oppløsning for kondensatoren
Ld=(L2_2-L2_1)/Intervall;      %Oppløsning for induktansen

%Startbetingelser for løkken
Teller=0;
Cx=0;
Lx=0;
p=1;
L2=L2_1;

%LOOP
for i=1:Intervall*Intervall      %Løkken tester kretsen for alle verdier
    C1=C1_1+Cx*Cd;              %av C1 og L2 i rekkefølgen:
    Kretsen;                    %[C1.1 L2.1], [C1.2 L2.1], [C1.3 L2.1]
    if (p0<p)                   %[C1.1 L2.2], [C1.2 L2.2], [C1.3 L2.2]
        p=p0;                   %[C1.1 L2.3], [C1.2 L2.3], [C1.3 L2.3]
        C=C1;
        L=L2;
    end
    Cx=Cx+1;

    if (Cx >= Intervall)
        L2=L2+Ld;
        Cx=0;
        Lx=Lx+1;
    end
    Teller= Teller+1;
end

```

## Kretsen.m

```

%INPUT
f=50; %Frekvensen
w=2*pi*f; %Vinkelfrekvensen
U=179.5/sqrt(3); %Fasespenningen

R1=2e-004/(w*C1); %Resistans kondensator
R2=0.015*w*L2; %Resistans spole
LL=XL/w; %Induktans
CK=1/(w*(RL*RL/(w*LL)+w*LL)); %Kapasitans
RK=2e-004/(w*CK); %Resistans kondensator

%Kretstekniske egenskaper
Z1=R1+1/(1i*w*C1); %Impedans symmetreringsanlegg
Z2=R2+1i*w*L2; %Impedans symmetreringsanlegg
ZK=RK+1/(1i*w*CK); %Impedans fasekompensering
ZL=RL+1i*w*LL; %Impedans last

u01=U; %Fasespenning L1-n
u02=U*((-1/2)-1i*sqrt(3)/2); %Fasespenning L2-n
u03=U*((-1/2)+1i*sqrt(3)/2); %Fasespenning L3-n

%Kretsens ligning etter Kirchoffs spenningslov
Ux=[u01-u02; u02-u03; 0; 0];
Zx=[Z1 0 -Z1 0; 0 Z2 -Z2 0; -Z1 -Z2 Z1+Z2+ZK -ZK; 0 0 -ZK ZK+ZL];
Ix=inv(Zx)*Ux;

%Strømmene
I1=Ix(1);
I2=Ix(2);
I3=Ix(3);
I4=Ix(4);

IL1=I1; %Fasestrømmen i L1
IL2=I2-I1; %Fasestrømmen i L2
IL3=-I2; %Fasestrømmen i L3

%Optimaliserings funksjonen
h=(-1/2)+1i*sqrt(3)/2; %Rotasjonsoperatoren

p1=(IL1+h*h*IL2+h*IL3)/(IL1+h*IL2+h*h*IL3); %Optimaliseringsfunksjonen
p0=abs(p1); %Absoluttverdien av
%optimaliseringen

%Virkningsgrad
IL_maks=abs(IL1) %IL_maks settes lik IL1 og testes
if IL_maks<abs(IL2) %for de andre fasestrømmene
    IL_maks=abs(IL2);
end

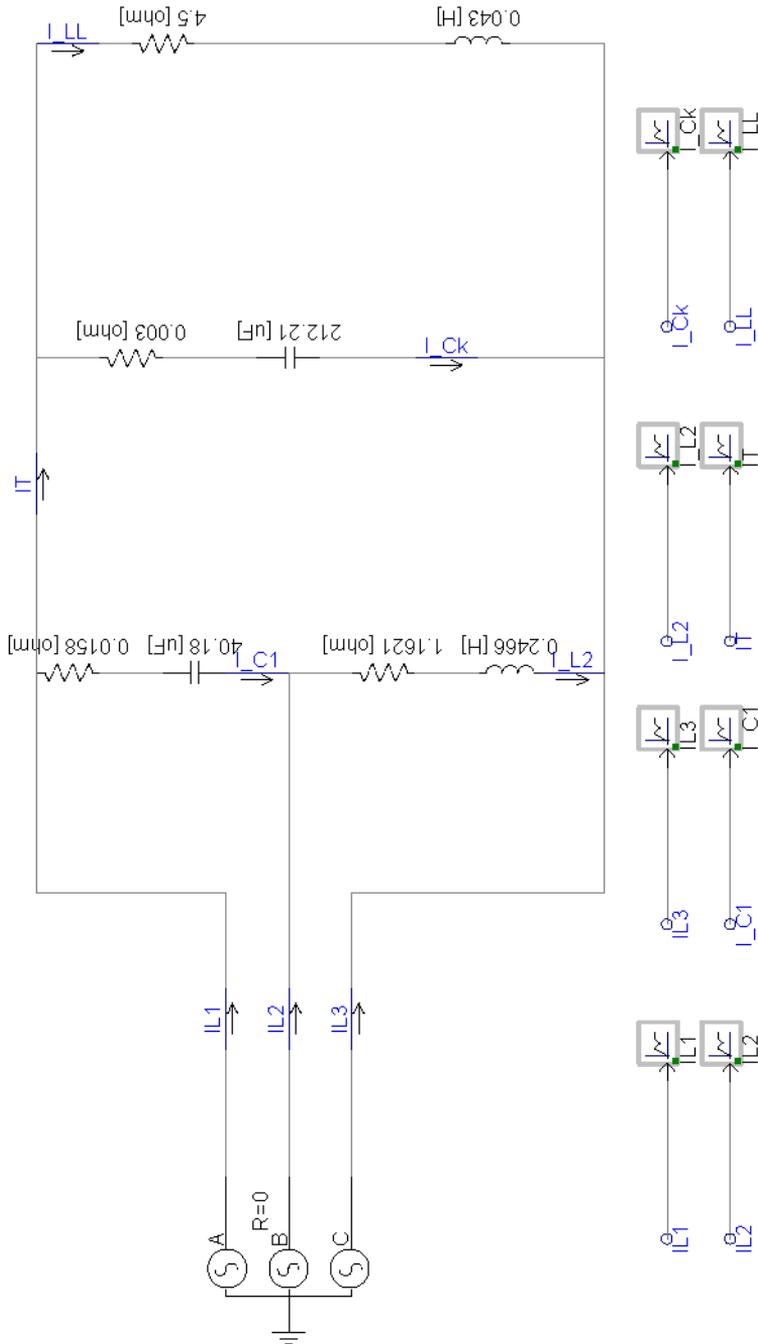
if IL_maks<abs(IL3)
    IL_maks=abs(IL3);
end

n=(abs(I3)/IL_maks-1)/(sqrt(3)-1) %Virkningsgraden

```



## Vedlegg C Pscad







## Vedlegg D Beregning av resistansen for kondensator og spole

Tapet i kondensatorene ( $P_{tap}$ ) er oppgitt til  $\frac{0,2 W}{kVA_r}$  (14). Utrykket kan skrives om til en sammenheng mellom den resistive ( $R$ ) og reaktive komponenten ( $X$ ).

$$P_{tap} = \frac{0,2 W}{kVA_r} \quad [D.1]$$

$$P_{tap} = 0,002 \cdot Q \quad [D.2]$$

$$I^2 \cdot R = 0,002 \cdot I^2 \cdot X \quad [D.3]$$

$$R = 2 \cdot 10^{-4} \cdot X \quad [D.4]$$

Spolen er oppgitt til å ha et tap ( $P_{tap}$ ) på 1,5 % ( $k$ ) av den tilsynelatende effekten ( $S$ ) (14).

	$P_{tap} = k \cdot S$	[ D.5 ]
	$I^2 \cdot R = k \cdot U \cdot I$	[ D.6 ]
	$R = k \cdot \frac{U}{I} = k \cdot Z = k \cdot \sqrt{R^2 + X^2}$	[ D.7 ]
	$R = 2 \cdot 10^{-4} \cdot X$	[ D.8 ]
	$R = \frac{k \cdot X}{1 - k^2}$	[ D.9 ]

For lave verdier av  $k$  kan uttrykket forenkles:

	$R \approx k \cdot X$	[ D.10 ]
--	-----------------------	----------