

## Forord

---

Denne oppgaven er en avsluttende masteravhandling i sivilingeniørstudiet Energi og Miljø med fordypningsområdet Elektrisk Energiteknikk, og er full studiebelastning i tiende semester. Målet med oppgaven er å produsere transformatoren som ble designet i prosjektoppgaven, ferdigstille testoppsettet og teste spenningsformer på forskjellige kabeltyper.

Jeg vil få takke veileder Frank Mauseth for at du hjalp meg å designe den endelige kretsen, for din kontinuerlige veiledning og positive tilbakemelding. Det er ikke mange veiledere som bruker så mye tid og krefter på sine studenter, noe jeg har satt stor pris på. Jeg vil også få takke seniorforsker Hallvard Faremo for moralsk støtte askefast eller ei.

Jeg vil rette en spesiell takk til Bård Almaas og Vladimir Klubicka, for hjelp til å ferdigstille kretsen, gode forslag og ideer når ting ikke har virket helt etter teorien. Til sist vil jeg takke alle på kontoret, ikke minst Kabelgjængen for en fantastisk tid, både faglig og sosialt. Uten dere hadde ikke skoledagen vært den samme.

Trondheim, juni 2010



Petter Instefjord Nodeland

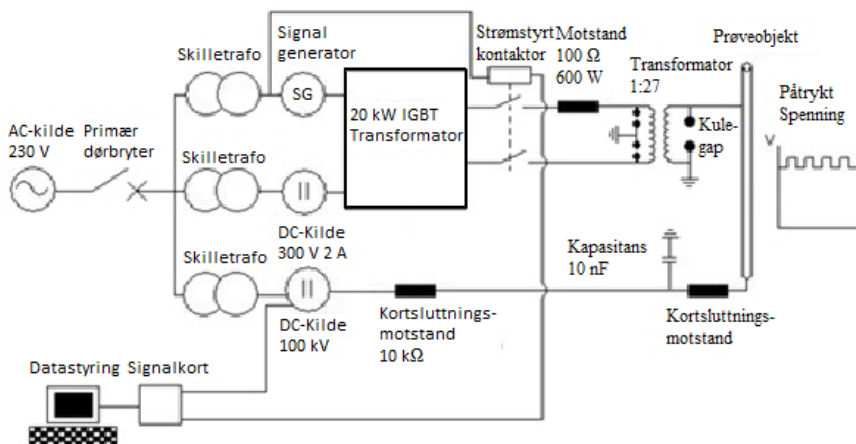
Bak enhver suksessrik mann står en STOR kvinne

## Sammendrag

Målet med masteroppgaven er å bygge en allerede planlagt transformator, samt videreutvikle et påbegynt testoppsett. Det arbeidet som tidligere er gjort kan finnes i prosjektoppgaven [1] (denne ligger vedlagt i vedlegg 1). Testoppsettet skal brukes til å teste den planlagte likespenningen med en overlagret transient, samt en AC-kilde brukes for å teste kabelen slik at resultatene kan sammenlignes.

Bakgrunnen for målet stammer fra prosjektoppgaven og lyder: "ønske om å teste innvirkningen transiente spenninger har på kryssbundne polyetylen (PEX) kabler som opererer i et høyspent DC-system (HVDC).

For å generere den ønskede spenningen på  $100 \text{ kV} \pm 10 \text{ kV}_{\text{rms}}$  er det uarbeidet en krets som vist i figur 1.



**Figur 1:** Testoppsett for testing av DC med overliggende transienter. En 100 kV DC-kilde blir koblet til lederen av et prøveobjekt og  $\pm 10 \text{ kV}$  vekselspenning blir koblet til jord. Ved hjelp av en radielt innstukket nål i kabelen kan isolasjonstykkelsen bestemmes. Hele testoppsettet styres av et dataprogram.

Det har vist seg at testoppsettet fungerer bra til gjennomslaget skjer. Gjennomslaget fører til at AC-kilden får for høy spenning, som resulterer i at IGBT-omformerens ødelegges. De testede spenningene gir et gjennomslag på  $70 \text{ kV} \pm 7 \text{ kV}_{\text{rms}}$  ved bruk av en nåleavstand som gir en isolasjonstykkelse lik 0,9 mm. Tiden var i gjennomsnitt 3,5 min, noe som tilsvarer en gjennomslagsspenning lik 15 til 17 kV AC, med samme kabeloppsett.

# Innholdsfortegnelse

---

<b>Forord.....</b>	<b>I</b>
<b>Sammendrag.....</b>	<b>II</b>
<b>Innholdsfortegnelse.....</b>	<b>III</b>
<b>Tabelliste .....</b>	<b>V</b>
<b>Figurliste.....</b>	<b>V</b>
<b>1 Innledning.....</b>	<b>1</b>
1.1 Hva er formålet med arbeidet? .....	1
<b>2 Introduksjon.....</b>	<b>2</b>
2.1 Bakgrunn. ....	2
2.2 Hvordan et HVDC-vindmøllesystem med sjøkabel virker .....	3
2.2.1 Fordeler med HVDC- i forhold til HVAC-overføring.....	3
2.2.2 Ulemper .....	7
2.3 Tre forskjellige overføringsteknologier i bruk: .....	8
2.3.1 HVDC med linjekommuterende omformere (LCC).....	8
2.3.2 HVDC med spenningskildeomformer (VSC) .....	9
2.3.3 Flernivåveksling med HVDC VSC .....	11
2.3.4 Forskjellen mellom HVDC LCC og HVDC VSC.....	12
<b>3 Resultat fra litteraturundersøkelsen .....</b>	<b>13</b>
3.1 Tidligere forsøk med DC-kilde og 60 Hz kilde .....	15
3.2 Forskjell ved forsøkene .....	16
<b>4 Teori .....</b>	<b>18</b>
4.1 Hvordan DC-delen av kretsen ser ut før gjennomslag. ....	18
4.2 Hvordan DC-delen av kretsen ser ut etter gjennomslag. ....	19
<b>5 Testoppsett .....</b>	<b>21</b>
5.1 Vern av AC-siden .....	23
5.1.1 Kulegap på sekundærsiden .....	23
5.1.2 Gasskulegap i parallell med en diode på primærsiden .....	24
5.1.3 Motstand .....	24
5.1.4 Bruk av strømmåling og kontaktor på primærsiden av transformatoren. ....	26
<b>6 Måleutstyr .....</b>	<b>27</b>
6.1 Dataprogram for styring av kretsen .....	27
6.2 Dørkontakt.....	29
<b>7 Resultater .....</b>	<b>30</b>

7.1 – Test ved 50 V og 50 Hz påtrykt sekundærsiden av transformatoren.....	30
7.2 – AC-Levetidsforsøk på 12 kV kabelobjekt med nål. ....	33
7.3 Levetidsforsøk av 12 kV kabelobjekt som ble påtrykt DC-spenning med en overliggende transient ved hjelp av en nål. ....	35
<b>8     Diskusjon .....</b>	<b>36</b>
8.1 Litteraturundersøkelsen.....	36
8.2 Valgt kretsoppsett.....	37
8.2.1 Signalgenerator som mater en høyspenningsomformer av typen TREK 20/20. ....	37
8.2.2 Signalgenerator som mater en transformert IGBT-omformer i serie med en 100 kV DC-kilde.....	38
8.3 Transformatoren.....	40
8.4 Testoppsettet.....	41
8.4.1 Spenning fra DC-kilden trenger inn i AC-kilden.....	41
8.4.2 Økning i jordpotensialet/grunnpotensialet. ....	42
8.4.3 Mulige løsninger for å få oppsettet til å fungere. ....	43
<b>9     Konklusjon .....</b>	<b>44</b>
<b>10    Forslag til videre arbeid .....</b>	<b>45</b>
<b>11    Referanseliste .....</b>	<b>46</b>
<b>12    Vedlegg .....</b>	<b>49</b>

## Tabelliste

---

Tabell 2-1: Forskjellen mellom HVDC LCC og HVDC VSC .....	12
Tabell 4-1: Spesifikasjoner for kabler brukt til forsøk .....	18
Tabell 4-2: Kapasitans i kabler brukt til forsøk .....	19
Tabell 7-1: Tid til gjennomslag ved ulik spenning fra AC-kilde med 0,9 mm avstand .....	35
Tabell 7-2: Tid til gjennomslag 12 kV kabel med nål. ....	35
Tabell 8-1: Oversikt over vindingene i transformatoren .....	40

## Figurliste

---

Figur 1: Testoppsett for testing av DC med overliggende transienter. En 100 kV DC-kilde blir koblet til lederen av et prøveobjekt og en $\pm 10$ kV vekselspenning blir koblet til jord. Ved hjelp av en radielt innstukket nål i kabelen kan isolasjonstykkelsen bestemmes. Hele testoppsettet styres av et dataprogram. ....	II
Figur 2-1: Generell skisse av en vindpark med overføringssystem [] .....	2
Figur 2-2: HVDC-overføringssystem .....	3
Figur 2-3: DC- og AC-overføringskabler .....	3
Figur 2-4: Spenningskarakteristikk HVAC kontra HVDC .....	4
Figur 2-5: Det økonomiske likepunktet for HVDC kontra HVAC .....	5
Figur 2-6: Forskjell i lederantall ved HVDC og HVAC [] .....	6
Figur 2-7: Overført effekt målt etter distanse [] .....	7
Figur 2-8: Forenklet blokkdiagram av HVDC LCC overføringsteknologi .....	8
Figur 2-9: Ekvivalentkrets av en HVDC LCC transmisjonsteknologi .....	8
Figur 2-10: Tyristorkrets med tilhørende strøm- og spenningskarakteristikk [] .....	9
Figur 2-11: Forenklet blokkdiagram av HVDC VSC overføringskarakteristikk .....	9
Figur 2-12: Detaljert beskrivelse av et HVDC-overføringssystem med en IGBT- spenningskildeomformer .....	10
Figur 2-13: Pulsbreddemodulasjon (PWM) [] .....	10
Figur 2-14: Uavhengig kontroll av aktiv og reaktiv effekt i alle fire kvadranter for VSC basert HVDC-omformer .....	11
Figur 2-15: Flernivå veksling .....	12
Figur 3-1: Spenningskarakteristikk VSC .....	13
Figur 3-2: Spenning generert av en vindpark .....	14
Figur 3-3: Spenningen gitt av en vindmølle uten gir med en PWM vekslefrekvens på 3.6 kHz [] .....	14
Figur 3-4: Harmoniske undersøkelser i et HVDC VSC system vekslefrekvens på 250 Hz [] .....	14
Figur 3-5: Spenningen over en DC-kabel i en PCS 6000 2x5 MW vindmølle med en "E.on flicker" [] .....	15

Figur 3-6: Spenningen over en DC-kabel i en PCS 6000 2x5 MW vindmølle med en ekstrem nettfeil [21].....	15
Figur 3-7: Testoppsett .....	16
Figur 3-8: Spenningsform .....	16
Figur 3-9: Tverrsnitt kabel med nål .....	16
Figur 4-1: Kretsskjema for DC-siden.....	19
Figur 4-2: Kretsskjema for DC-siden etter gjennomslag .....	20
Figur 5-1: Testoppsett for testing av DC med overliggende transienter.....	21
Figur 5-2: Kulegapet brukt for å lede gjennomslagsspenningen til jord. ....	23
Figur 5-3: Veien strømmen tar ved gjennomslag.....	25
Figur 5-4: Inkluderer motstand for å begrense kortslutningsstrøm.....	25
Figur 5-5: Spenningsdeling som funksjon av motstand. Prøveobjekt 30 cm, Nåleavstand 0,9 mm, Frekvens 20kHz .....	26
Figur 5-6: Spenningsforløp ved gjennomslag i kabel .....	26
Figur 6-1: Blokkdiagram av dataprogram brukt for å bryte kretsen ved gjennomslag .....	28
Figur 6-2: Bruker grensesnittet av dataprogrammet som kobler ut kildene ved gjennomslag .....	28
Figur 6-3: Blokkdiagram av holdekretsen brukt for å bryte spenningen på 300 V spenningskildene ved gjennomslag.....	29
Figur 7-1: Høyfrekvent transformator for bruk til å forsterke en spenning på opptil 20 kHz 600 V, til 20 kHz 20 kV. ....	30
Figur 7-2: Test 1, 50 Hz 30 V, Figur 7-3: Test 2, 50 Hz 50 V .....	31
Figur 7-4: Test 3, 50 Hz 71,5 V Figur 7-5: Test 4, 50 Hz 84,6 V .....	32
Figur 7-6: Test 5, 50 Hz 30 V 120 mA, Figur 7-7: Test 6, 50 Hz 50 V 202 mA .....	32
Figur 7-8: Test 7, 50 Hz 68,5 V 1,94 A .....	32
Figur 7-9: Bilde av testoppsett med en 12 kV kabel med en nål.....	34
Figur 7-10: Skisse av testoppsett med en 12 kV kabel med nål .....	34
Figur 7-11: Mikroskopbilde av avstanden fra nål til indre halvleder, lik 0,9 mm .....	34
Figur 7-12: Bilde av nåleverktøy for kabel .....	34
Figur 7-13: Gjennomsnittlig tid til gjennomslag ved ulike spenning fra AC-kilde med 0,9 mm avstand .....	35
Figur 8-1: Plott av inngangsspenning og utgangsspenning fra høyspenningsomformerer ved forskjellig frekvens .....	38
Figur 8-2: Testoppsett til laboratorieforsøk der det skal genereres en høy spenning med en overliggende høyfrekvent transient. ....	39
Figur 8-3: Bølgeformen fra signalgeneratoren og IGBT-omformerer.....	39
Figur 8-4: Forslag til hvordan utladningen etter et gjennomslag skjer. ....	42
Figur 9-1: Testoppsett for testing av DC med overliggende transienter.....	44

# 1 Innledning

---

## ***1.1 Hva er formålet med arbeidet?***

Formålet med denne oppgaven er:

- Ferdigstille den designede høyfrekvenstransformatoren [1], og teste denne.
- Sette opp testoppsettet og sørge for at dette virker.
- Teste DC-spenning med en overlagret transient på modellkabler.
- Teste DC-spenning med en overlagret transient på 12 kV kabel hvor det brukes et spesialprodusert nåleutstyr for å føre en nål delvis inn i kabelisolasjonen. Dette for å kontrollere hvor gjennomslaget finner sted, samt bestemme tykkelsen på isolasjonen.
- Teste AC-spenning på 12 kV kabel for å sammenligne med DC-spenningen med den overlagrede transienten.

I kapittel 2 og 3 er det en kort gjennomgang av bakgrunn og teori til HVDC-overføring. Dette gjøres for å bedre forståelsen av oppgaven og gi en forklaring til senere valg. Kapittel 4 tar for seg resultatene fra litteraturundersøkelsen og kapittel 5 viser det endelige testoppsettet med forklaring til de ulike elementene.

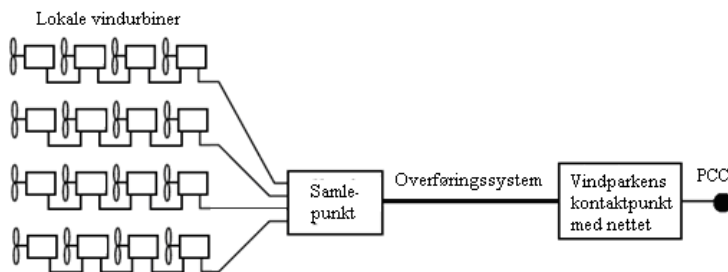
Kapittel 6 lister måleutstyret som er brukt i oppgaven, mens resultatene er beskrevet i kapittel 7, for så å diskuteres i kapittel 8. De forskjellige resultatene blir kommentert og gjort rede for. Deretter følger konklusjonen i kapittel 9, samt et forlag til videre arbeid i kapittel 10. Spesielt viktig her er det å se på hvordan målinger kan gjøres uten fare for ødeleggelse av utstyret.

Sist i oppgaven ligger det vedlagt, i vedlegg 1, en cd med de Excel-arkene som er brukt for å utvikle og beregne de ulike elementene i oppgaven, en elektronisk versjon av oppgaven, samt en kopi av prosjektoppgaven.

## 2 Introduksjon

### 2.1 Bakgrunn.

I dagens samfunn fokuseres det mer og mer på store vindparker i størrelsesorden flere hundre MW. Miljøkrav med hensyn til lydforurensing, at anlegget kan være sjenerende for synet samt motstridende interessert i skjærgården (rekreasjon, militæret, kystfart, fiske osv) fører til økt avstand mellom vindparker til sjøs og det landliggende distribusjonsnett [2]. Figur 2.1 viser hvordan en skisse av den tenkte vindparken ser ut. Her er det et samlepunkt for alle møllene og et system som overfører elektrisk energi til land for å kobles til strømmettet.



Figur 2-1: Generell skisse av en vindpark med overføringssystem [3]

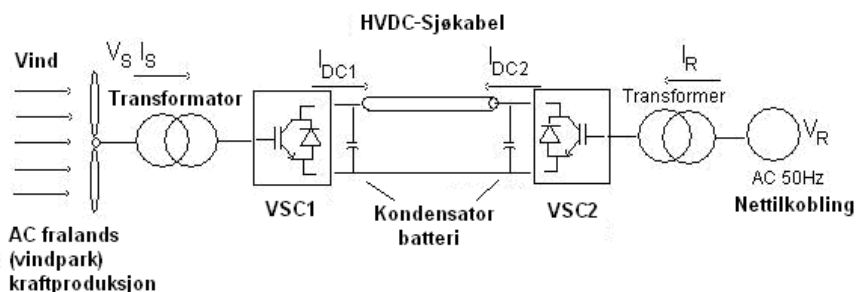
Norge er et stort land med relativt liten og spredt befolkning og tilhørende lite og spredt distribusjonsnett. Nettet er sterkt rundt de store byene, mens det er svakere ellers [4]. En faktor som øker overføringslengden til vindparken, er nødvendigheten av et sterkt kontaktpunkt med nettet, med en vesentlig kortslutningsevne. Det kreves ofte en lang innenlands overføringslinje for å nå et egnet punkt for tilkobling på vekselspanningsnett (AC).

AC-kabler generer reaktiv effekt som igjen begrenser den maksimale kabellengden. Dette er kjent som den kritiske AC-kabellengden [5]. Det er vanskelig å oppgi denne kritiske lengden nøyaktig. Den varierer for alle individuelle prosjekt og er gitt av økonomiske og tekniske restriksjoner. Grensen for hvor det lønner seg å bytte HVDC med AC-kabler ligger på ca 100km [6]. Som nevnt tidligere er AC-kabelens lengde begrenset på grunn av reaktiv effekt, over en gitt lengde er det nødvendig med en kompensere enhet. Dette er spesielt kostbart og vanskelig for sjøkabler som vist i figur 2.5.



## 2.2 Hvordan et HVDC-vindmøllesystem med sjøkabel virker

Vindmøllene produserer elektrisk energi i form av trefase vekselspanning. Denne spenningen konverteres til likestrøm som kan påtrykkes sjøkabelen. Spenningen konverteres tilbake til vekselspanning på andre siden. Dette er vist i figur 2.2, som viser et HVDC-overføringssystem.



Figur 2-2: HVDC-overføringssystem

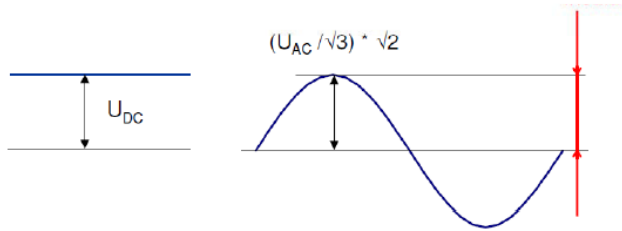
I figur 2.2 vil vinden produsere en spenning som variere med vinden. Blåser det ujevnt, vil vindparken generere en ujevn spenning. I denne oppgaven er det sett nærmere på det som skjer mellom VSC1 (spenningskildeomformer 1) og VSC2 (spenningskildeomformer 2).

### 2.2.1 Fordeler med HVDC- i forhold til HVAC-overføring

Fordelen med HVDC er muligheten til å overføre store mengder effekt over lange distanser med en lavere kostnad og lavere tap enn HVAC. Ved å ta utgangspunkt i samme mengde kabel, tykkelse, isolasjon og antall som vist i figur 2.3. vises det at det kan overføres mer effekt med HVDC enn med HVAC.



Figur 2-3: DC- og AC-overføringskabler



**Figur 2-4: Spenningskarakteristikk HVAC kontra HVDC**

Fra figur 2.4 vil HVAC-spenningen ha en amplitude lik HVDC-spenningen. HVAC-spenningen er trefase slik at for de samme seks overføringskablene med hhv HVAC eller HVDC vil den overførte effekten bli:

$$\begin{aligned}
 U_{AC} &= \sqrt{3} \cdot U_{AC,amp} \\
 U_{AC} &= \sqrt{3} \cdot U_{DC} / \sqrt{2} \\
 U_{AC} &= 1,22 \cdot U_{DC}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Noe som tilsier at en kabel som kan overføre 380 kV<sub>AC</sub> kan overføre 310 kV<sub>DC</sub>

Effekten i kabelen vil også være forskjellig for de to typene. Ved å bruke ohms lov kan effektforskjellen beregnes. Fra figur 2.3, med samme antall ledere vil effekten for HVDC være:

$$P_{DC} = 3 \cdot (2 U_{DC} \cdot I) \tag{2.2}$$

Likeledes effekten for HVAC:

$$P_{AC} = 2 \cdot (U_{AC} \cdot I \cdot \sqrt{3}) \tag{2.3}$$

Noe som gir en sammenheng av effekten på:

$$P_{DC} = \sqrt{2} P_{AC} \tag{2.4}$$

Det vil at det kan gå  $\sqrt{2}$  mer effekt i DC-kabelen enn i AC-kabelen.

For tapene sin del antas det:

$$P_{DC}=P_{AC} , \quad [2.5]$$

som gir:

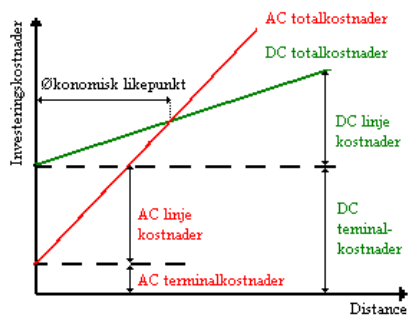
$$I_{DC}=(1/\sqrt{2})I_{AC} \quad [2.6]$$

vil det bli en tapsforskjell som følger:

$$P_{Tap,DC}=(1/\sqrt{2})^2 P_{Tap,AC} \Rightarrow P_{Tap,DC}=0,5P_{Tap,AC} \quad [2.7]$$

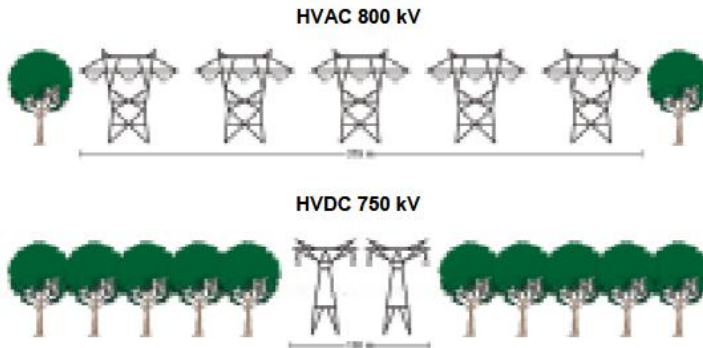
Det vil være dobbelt så høye tap i AC-kabelen som i DC-kabelen når det bare tas hensyn til kabelen alene.

Dette gir et bilde på det økonomiske likepunktet for HVAC og HVDC som kan sees i figur 2.5.



Figur 2-5: Det økonomiske likepunktet for HVDC kontra HVAC

Det vil dermed være gunstig å bruke HVAC-kabler for kortere lengde på grunn av tapene i omformerer i HVDC-kretsen er vesentlig høyere enn HVAC-terminalkostnader.

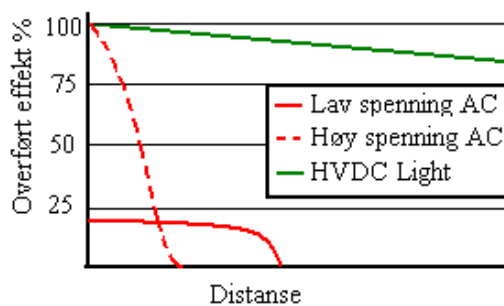


Figur 2-6: Forskjell i lederantall ved HVDC og HVAC [7]

Det finnes en rekke applikasjoner hvor HVDC er mer effektiv enn HVAC-overføring [8].

- Undersjøiske kabler, hvor kapasitansen fører til ytterlige HVAC-tap.
- Endepunkt til endepunkt langdistanse bulk-overføring av effekt kan gi store tap i f. eks avsidesliggende områder.
- For å øke kapasiteten i et allerede eksisterende strømmnett hvor det kan være vanskelig eller spesielt kostbart å installere nye linjer.
- Kraftoverføring og stabilisering av usynkroniserte HVAC-distribusjonssystem.
- Koble sammen en fjerntliggende produksjonsenhet til distribusjonsnettet.
- Stabilisere et strømmnett som hovedsakelig består av HVAC, uten å øke en eventuell kortslutningsstrøm.
- Redusere linjekostnadene. HVDC trenger færre ledere, trenger ikke å støtte flere faser, kan også se bort ifra skinneffektene og bruke tynnere ledere se figur 2.6.
- Ved å koble sammen nett med forskjellig faser eller frekvens, f. eks mellom naboland.
- Hjelp til med å synkronisere HVAC, produsert ved hjelp av fornybare energikilder. F. eks vindmøller.

De lange undersjøiske kablene har en høy kapasitans. Dette gjør det vanskelig å bruke AC uten å kompensere for de reaktive tapene. Med HVDC vil det være transienter ved endene av kabelen der likerettingen skjer. Utover i kabelen vil den indre kapasitansen sørge for å jevne ut spenningen. Dermed vil det ikke være gitt grense for hvor lang kabelen kan være, men det er naturligvis tap i ledere og den vil ikke kunne lede uendelig langt. Dette er derimot et stort problem ved bruk av AC-kabler, hvor den reaktive effekten bruker mer av den aktive effekten jo lenger kabelen blir. Se figur 2.7.



Figur 2-7: Overført effekt målt etter distanse [9]

HVDC kan også hindre underliggende feil fra å forplante seg fra en del av et utstrakt strømnnett til en annen. Forandringer i last som forårsaker at deler av et AC-nettverk blir ustabilt vil ikke ha samme effekt på et DC-kabelen. Energiflyten gjennom kabelen vil stabilisere AC-nettverket. Dette fordi størrelsen og retningen på strømflyten i et DC-kabelen kan styres direkte, og forandres etter behov.

## 2.2.2 Ulemper

De viktigste ulempene ved HVDC ligger i omforming, veksling, styring, tilgjengelighet og vedlikehold.

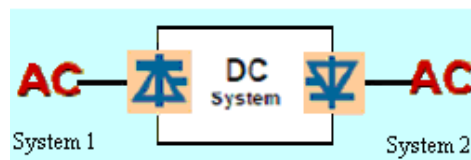
- De obligatoriske statiske vekselretterne er dyre og har en begrenset overbelastningsevne.
- Ved korte distanser er tapene i de statiske vekselretterne større enn i en AC-transmisjonslinje.
- Det er ikke nødvendigvis slik at den høye kostnaden på vekselretterne utlignes av lavere produksjonskostnad og mindre tap i linjene.
- Det er vanskelig å bygge HVDC-strømbrytere, fordi det må inkluderes en mekanisme som tvinger strømmen til null. Uten dette ville lysbuedanning og kontaktslitasjen bli for høy til å tillate pålitelig på og avslag.
- Et HVDC-system krever at man har mange reservedeler for å unngå for lang nedetid. Fordi HVDC ikke er like standardisert som HVAC blir det ofte til at man må ha mange reservedeler. Teknologien forandres også forttere i et HVDC- enn et HVAC-system. Dermed må man påberegne en ekstrakostnad for reservedeler som ikke nødvendigvis blir brukt. Dette på grunn av at HVAC ligger lenger fremme i utvindingen og har en slakere utvindingskurve enn HVDC

## 2.3 Tre forskjellige overføringsteknologier i bruk:

For dagens HV-sjøkabler brukes det i hovedsak tre typer transmisjonsteknologier. Hvorav to er for likespenning og en for vekselspanning. De tre forskjellige teknologiene er:

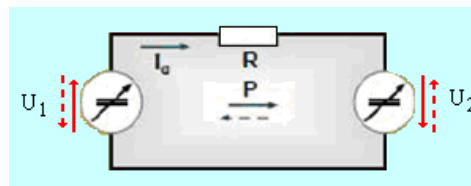
- HVAC (Høyspenning vekselstrøm)
- HVDC LCC (Høyspenning likestrøm med linjekommuterende omformere)
- HVDC VSC (Høyspenning likestrøm med spenningskildeomformere)

### 2.3.1 HVDC med linjekommuterende omformere (LCC).



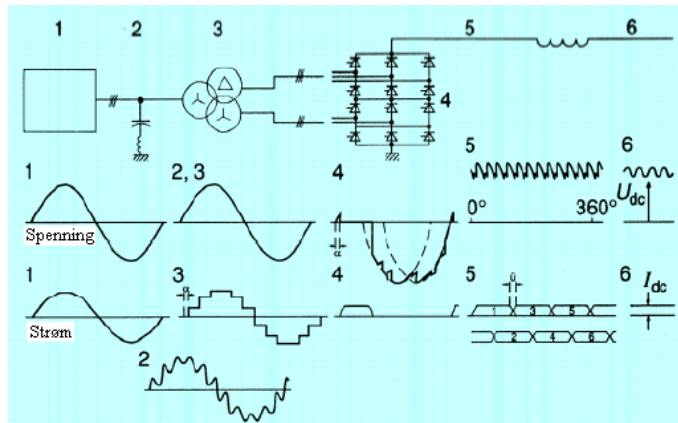
Figur 2-8: Forenklet blokkdiagram av HVDC LCC overføringsteknologi

Figur 2.8 viser et forenklet blokkdiagram av en HVDC LCC overføring. Her skjer omformingen ved hjelp av styrbare tyristorer, som vist i figur 2.10 (4). Figur 2.9 viser ekvivalentskjemaet til kretsen og viser hvordan størrelsen av  $P$  og  $I_d$  kontrolleres ved hjelp av forskjellen i terminalspenning ( $U_1$ ,  $U_2$ ). Retningen på effekten ( $P$ ) bestemmes ved hjelp av polariteten på terminalspenningene.



Figur 2-9: Ekvivalentkrets av en HVDC LCC transmisjonsteknologi

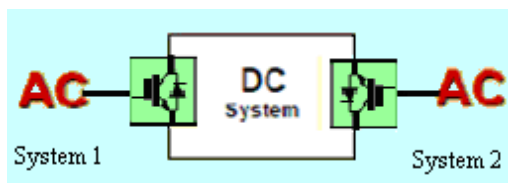
Figur 2.10 viser hvordan omformerene ser ut med alle tre fasene



Figur 2-10: Tystorkrets med tilhørende strøm- og spenningskarakteristikk [10]

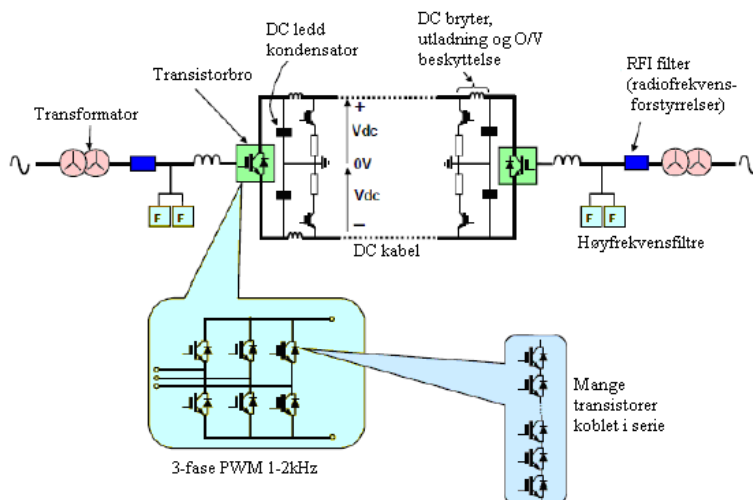
Fra figur 2.10 sees det hvordan den forventede spenningen ser ut etter omformeren (6), vist med en likestrømsspenning med en transient. Det er denne spenningen det fokuseres på i oppgaven.

### 2.3.2 HVDC med spenningskildeomformer (VSC)

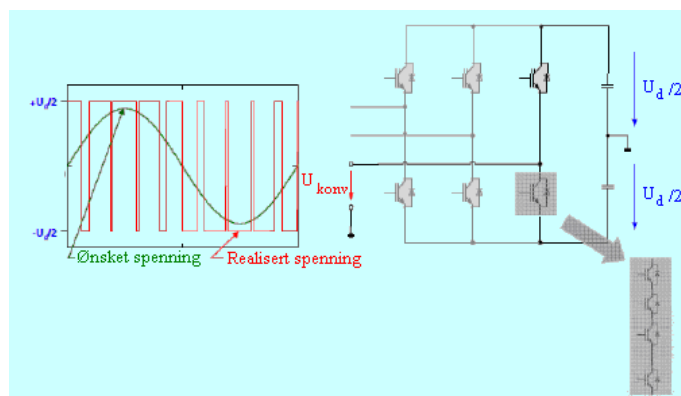


Figur 2-11: Forenklet blokkdiagram av HVDC VSC overføringskarakteristikk

Figur 2.11 viser et forenklet blokkdiagram av en HVDC VSC overføring. Her skjer omformingen ved hjelp av transistor broer. Figur 2.12 viser en oversikt over hvordan VSC-overføringen er bygd opp.



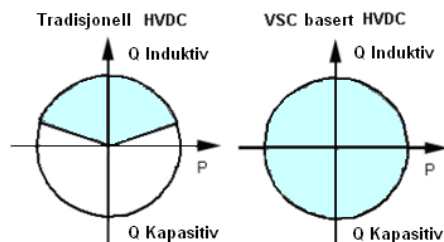
Figur 2-12: Detaljert beskrivelse av et HVDC-overføringssystem med en IGBT-spenningskildeomformer



Figur 2-13: Pulsbreddemodulasjon (PWM) [11]

VSC basert HVDC bruker pulsbreddemodulasjon (PWM) for å generere den grunnleggende spenningen. Dermed kan størrelsen og fasen på spenningen fritt, og nesten øyeblikkelig kontrolleres ved hjelp av systemets modelleringsgrenser. Den aktive effekten kan kontrolleres kontinuerlig og kan skiftes fra fulleffekt utførelse til fulleffekt innførsel som vist i se figur 2.14, der forskjellen i tradisjonell og VSC basert HVDC vises.





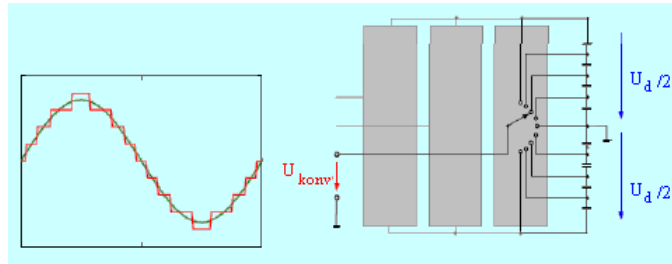
Figur 2-14: Uavhengig kontroll av aktiv og reaktiv effekt i alle fire kvadranter for VSC basert HVDC-omformer

I VSC-system oppnås ikke effektbalanse gjennom telekommunikasjon, slik den gjør i et LCC-system, men ved å bruke DC-spenningsmålinger. En stasjon brukes til å kontrollere DC-spenningen ved å justere effekten, mens den andre stasjonen vilkårlig justerer den overførte effekten innen grensene til HVDC-systemet.

På liknende måte kan en HVDC-tilslutning brukes for å gjenopprette et nettverk etter en mørkelegging har skjedd. Når en mørkelegging skjer, vil omformeren automatisk koble seg selv fra nettet og fortsette å operere. Dette er mulig fordi omformertransformatoren er utstyrt med en spesiell hjelpekraftsvinding som forsyner omformerstasjonen. Ved behov kan også omformeren startes manuelt i mørkestartmodus, som vil si at systemet ikke er avhengige av nettet for å fungere, og kan hjelpe til med å få nettet opp å gå igjen etter en kollaps.

### 2.3.3 Flernivåveksling med HVDC VSC

Med flerveksling kan man minimere transientene i stor grad. Da får man små spenningssteg og en liten stigning på stegene. Dermed vil det genereres mindre transienter, lavere høyfrekvens støy og lavere vekslingstap. Dette er en teknologi som er ganske ny på markedet. De første anleggene som bruker denne typen veksling er tenkt bygd av Siemens i 2009-2011 (7 planlagte anlegg) [12]. Kostnader for HVDC-overføring ligger først og fremst i prisen på omformerne og tapene i kablene. Med flere vekslinger, og mer utstyr, vil prisen økes mens transientene minskes betraktelig.



Figur 2-15: Flernivå veksling

### 2.3.4 Forskjellen mellom HVDC LCC og HVDC VSC

Forskjellene mellom de forskjellige overføringene kan sees i tabell 2.1.

Tabell 2-1: Forskjellen mellom HVDC LCC og HVDC VSC

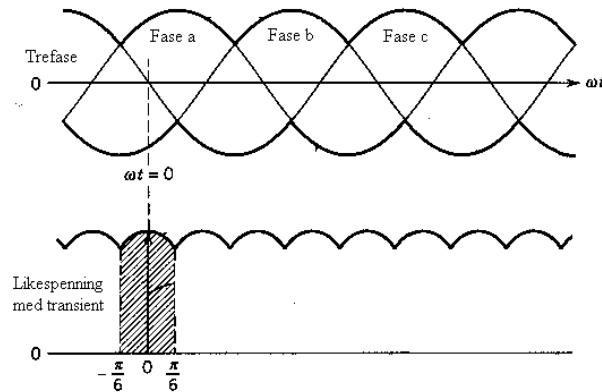
	HVDC med LCC	HVDC med VSC
Størrelse enkeltomformer	150-3000 MW	50-1200 MW
Omformer teknologi	Linjekommuterende	Selvkommuterende
Relativt volum	4-6	1
Kabeltype	Masseimpregnert	PEX/masseimpregnert
Kontrollere aktiv effekt?	Ja	Ja
Kontrollere reaktiv effekt?	Nei, bare reguleres ved omkobling	Ja, kontinuerlig
Spenningskontroll	Begrenset	Stor
Overleve kortslutning	Nei	Ja
Dødstart mulighet	Nei	Ja
Minimums kortslutningsevne i et vekselstrømnett	>2x merkeeffekt	Ingen krav
Krafreservering uten avbrudd	Nei	Ja
Minimum DC kraftflyt	5-10 % av merkeeffekt	Ingen minste krav
Typiske tap pr omformer	0,80 %	1,60 %
Erfaring til sjøs?	Nei	Ja

HVDC med VSC har større mulighet for å manipulere spenningen (se figur 2.14) gjennom uavhengig kontroll av reaktiv og aktiv effekt. Den har også mulighet til å overleve kortslutninger og gjennomføre en såkalt død start (starte i mørkstartmodus). Systemet med VSC vil også være i størrelsesorden 1:5 sammenlignet med LCC, noe som gjør at det opptar mye mindre plass. Ved overføring av store effekter over lang avstand vil LCC være den beste løsningen. Den har også bare halvparten av tapet pr omformer. Det er ikke tidligere erfaring med LCC omformere for sjøkabler.

HVDC-overføring som bruker spenningskildeomformer er en relativt ny teknologi for å koble vindparker til strømmettet. ABB sin HVDC-omformermodell er basert på en toplans bro, som er jordet via en midtpunkts kondensator, se figur 2.13. Dette sikrer både stabile forhold og dynamisk drift, med ekstremt lave induserte jordstrømmer, noe som er veldig viktig hvis HVDC-systemet skal implementeres i en vindpark til havs [13].

### 3 Resultat fra litteraturundersøkelsen

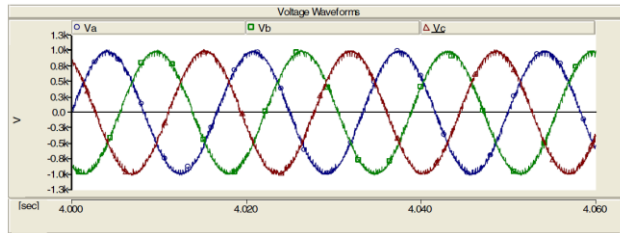
Masteroppgaven, med utgangspunkt i prosjektoppgaven ble startet med å prøve å finne ut hva slags spenning en vindpark til havs generer og hvordan denne spenningen ser ut når den påtrykkes en sjøkabel. Det ble tatt utgangspunkt i en spenningskildeomformer og spenningskarakteristikken til denne. Vindmøller med variabel fart generer i snitt 20-30 % mer energi, eller er 20-30 % mer effektive enn stive vindmøller [17]. Derfor tas det utgangspunkt i vindmøller med variabel fart. I en omformer som baserer seg på pulsbreddemodulasjon trengs det en høy vekslefrekvens for å få en fin spenningskarakteristikk. Denne frekvensen er normalt 40 x frekvensen inn [14]. Med en vindmøllefrekvens på 50 Hz vil denne ligge i området 1-4 kHz. Spenningen VSCen generer har en spenningskarakteristikk som følger av figur 3.1.



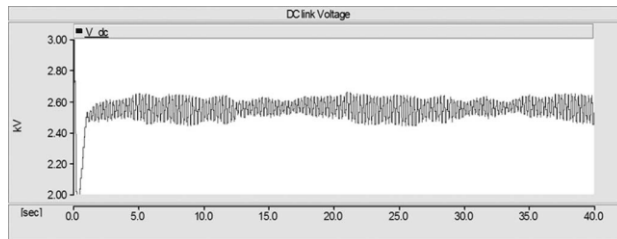
Figur 3-1: Spenningskarakteristikk VSC

Det er laget standarder som sier hvor store harmoniske det er lov å ha ved tilkobling til strømnettet. Denne standarden gjelder ved tilkobling til det eksisterende spenningsnettet ved et såkalt punkt for vanlig tilkobling (PPC) og sier: "Det er ikke lov til å ha THD (total harmonisk uorden) høyere enn 5 % opp til 69 kV, samt 2-3 % for høyere spenning" [15]. For DC-kabelen finnes det ingen standarden og det er opp til de enkelte produsentene hvordan de velger utgangsspenningen. En generell regel er at desto glattere likespenning, jo dyrere omforming og jo større plass tar omformerene.

Noen systemer inneholder også et høypassfilter (HFF) for å eliminere de høye frekvensene og få en glattere spenning. Er det installert filtre vil ikke spenningen variere like mye, men ligge rundt  $\pm 0,02p.u$  [16].

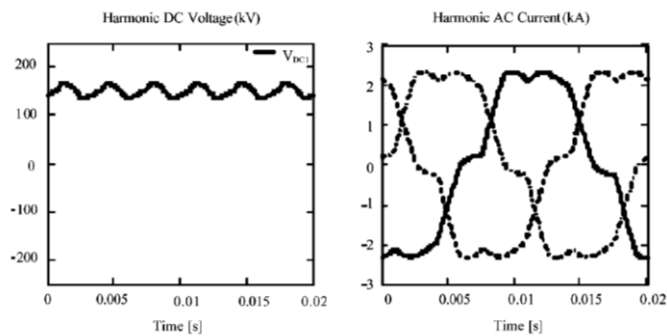


Figur 3-2: Spenning generert av en vindpark



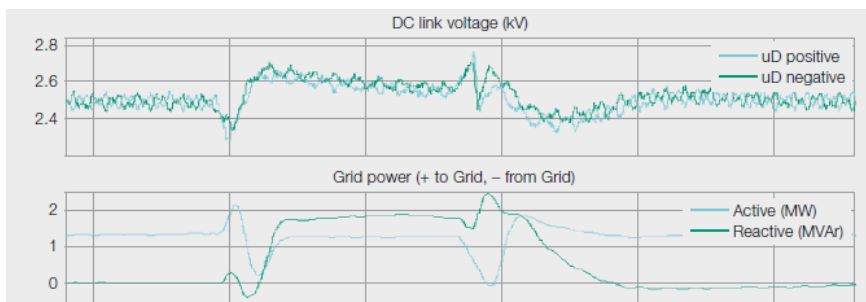
Figur 3-3-3: Spenningen gitt av en vindmølle uten gir med en PWM vekslefrekvens på 3.6 kHz [17]

Figur 3.3 viser en spenning generert av en vindmølle uten gir, vekslet med en frekvens på 3.6 kHz. Spenningen varierer grunnet variasjon i vinden, og ligger mellom 2.4 kV - 2.7 kV. Dette er et avvik på  $2.55 \text{ kV} \pm 0.15 \text{ kV}$  eller  $\pm 0.06 \text{ p.u.}$

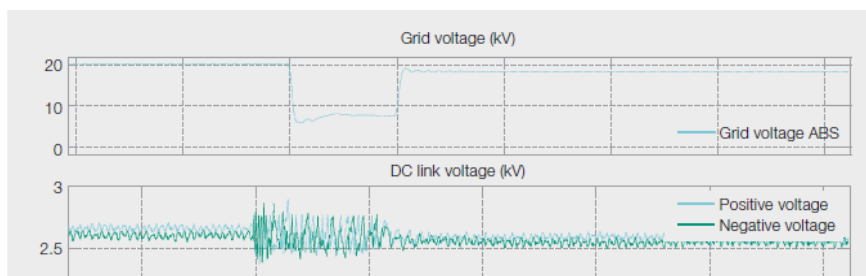


Figur 3-4: Harmoniske undersøkelser i et HVDC VSC system vekslefrekvens på 250 Hz [18]

Fra figur 3.4 og [18] oppgis grenseverdiene til å ligge på  $150 \text{ kV} \pm 10 \text{ kV}_{\text{rms}}$  eller  $\pm 0.07 \text{ p.u.}$  Her er det en VSC som veksler med en frekvens på 250 Hz.



Figur 3-5: Spenningen over en DC-kabel i en PCS 6000 2x5 MW vindmølle med en "E.on flicker" [19]



Figur 3-6: Spenningen over en DC-kabel i en PCS 6000 2x5 MW vindmølle med en ekstrem nettfeil [19]

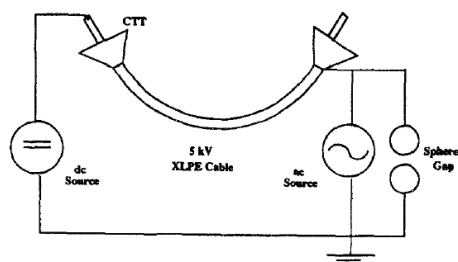
Fra figur 3.5 og 3.6 ser man hva ABB har målt spenningen til å være over en DC-kabel for en vindmølle på 2x5 MW. Her er det målt hva som skjer når systemet opplever en feil, men tilstanden før feilen skjer er normaltilstand, og fra denne kan det leses hvordan spenningen varierer. Spenningen varierer her fra ca 2,4 – 2,6 kV eller  $2,5 \text{ kV} \pm 0,1 \text{ kV}$  eller  $\pm 0,04 \text{ p.u.}$  Vekslerefrekvensen er her ikke oppgitt.

### 3.1 Tidligere forsøk med DC-kilde og 60 Hz kilde

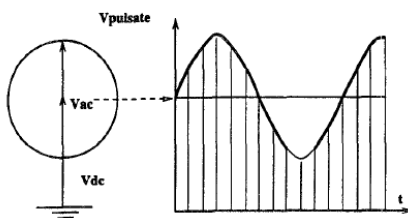
Det blitt gjort liknende forsøk tidligere med en DC-kilde og en 60 Hz AC-kilde [20]. I dette forsøket ble lederen på kabelen påsatt likespenning, mens jordskjermen ble påtrykt en vekselspenning av varierende størrelse.

De fleste gjennomslagene skjedde på enden av halvlederen hvor halvleder møter isolasjonen. For å løse dette problemet (som skyldes feltforsterkning hvor halvleder slutter) brukes konusformede skjermingsutstyr ved halvledergrensen, der denne kuttes vekk fra isolasjonen. Her er det viktig å unngå skader, som kan føre til uønskede utladninger og gjennomslag.

Oppsettet til forsøket har store likheter med oppsettet i denne oppgaven og kan sees i figur 3.7, mens spenningsformen sees i figur 3.8.

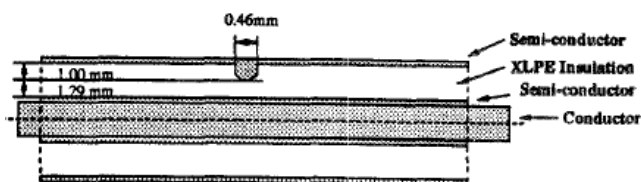


Figur 3-7: Testoppsett



Figur 3-8: Spenningsform

Det ble gjort gjennomslagsforsøk på kabel med og uten svakheter. Først ble holdfastheten målt på en 5 kV kabel med hhv AC- og så DC-spenning påtrykt, før det ble gjort andre tester. Den testen som er mest interessant for oppgaven her er testing ved hjelp av en radielt innstukket nål i isolasjonen. Nålen ble stukket inn, slik at det gjensto 1,29 mm isolasjon. Som vist i figur 3.9.



Figur 3-9: Tverrsnitt kabel med nål

Sammenhengen som ble funnet mellom gjennomslag var at det måtte mye høyere spenning til for å få gjennomslag ved bruk av DC-spenning. Det trengtes 4 ganger spenningen for å få gjennomslag. Ved bruk av nål var forskjellen 7 ganger. I dette forsøket oppsto det ikke problemer med at DC-spenningen hadde negativ innvirkning på AC-kilden ved gjennomslag.

### 3.2 Forskjell ved forsøkene

Hovedforskjellen ved dette eksperimentet og det oppgaven tar for seg er frekvensen. I tidligere forsøk har det blitt brukt vanlig nettfrekvens 60 Hz, mens i denne oppgaven

sees det på frekvenser helt opp mot 20 kHz. Dermed kommer det inn andre problemstillinger. Problemene oppstår ved gjennomslag i kabelen. Det vil da gå en spenning fra høyspentsiden til AC-siden av kretsen. Det er viktig å stoppe denne, før den når elektronikken på lavspentsiden av transformatoren, ellers oppstår det en fare for at utstyret kan ødelegges.

Etter prøving av kretsen ble det funnet ut at kulegapet ikke fungerer raskt nok i forhold til å avlede spenningen før den rekker å bli transformert gjennom transformatoren. Kjernen i transformatoren er optimal for 10 – 500 kHz [21], så den slipper gjennom veldig raske pulser. Det at transformatoren er optimal for frekvenser opp til 500 kHz, betyr ikke det samme som at den ikke er i stand til å slippe gjennom også høyere frekvenser.

$$f = \frac{\text{Antall svingninger}}{\text{sekund}} \Rightarrow \text{En svingning} = \frac{1}{500\text{kHz}} = 2\mu\text{s} \quad [3.1]$$

Dette kan sammenlignes med den typiske fronttiden til et lynnedslag som er på 1,2  $\mu\text{s}$  [22].

Primærsiden av transformatoren er beskyttet ved begge fasene av hhv en gassavleder og en diode til jord. Dette er primært for å hindre at det blir påtrykt høyere spenning enn transformatoren tåler fra primærsiden, men virker også som en beskyttelse hvis spenningen kommer fra transformatoren. Fra databladet til gassavlederen har den en avledningsevne på 100 kV /  $\mu\text{s}$ , noe som tilsier at den leder vekk 200 V i løpet av pulsen. Ved verste tilfelle vil spenningen være som vist i ligning 3.2

$$\begin{aligned} 100\text{kV} + 0,1\text{pu} &= 110\text{kV} \\ \text{Transformatoren } 1:27 & \\ 110\text{kV} / 27 &= 4,1\text{kV} \end{aligned} \quad [3.2]$$

Gjennomslaget kan dermed skape en spenning på 4,1 kV på primærsiden av transformatoren. Gjennomslaget tar litt tid, noe som gir muligheten for at vekselspenningen har nådd høyeste verdi og legges til spenningsbølgen.

Verste tilfelle vil også være topp, og ikke rms verdien. Dermed kan det i verste tilfelle oppstå en spenning som følger av likning 3.3.

$$\left(100\text{kV} + \left(0,1 \cdot 100\text{kV} \cdot \sqrt{2}\right) \cdot 2\right) / 26,7 = 4,8\text{kV} \quad [3.3]$$

## 4 Teori

### 4.1 Hvordan DC-delen av kretsen ser ut før gjennomslag.

Teorien tar for seg hvordan kretsen ser ut før og etter gjennomslag. Her er det valgt å se på det faktiske oppsettet som er brukt i forsøkene, da ikke regnet med den planlagte motstanden i serie med prøveobjektet.

Fra "Electric Power Engineering" [23] er kapasitansen i en kabel beregnet som vist i ligning 4.1.

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{q \cdot l}{U} = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0 \cdot l}{\ln \frac{r_y}{r_i}} [F] \quad [4.1]$$

Hvor  $\epsilon$  er permittiviteten,  $l$  er lengden og  $r$  angir hhv ytre og indre radius.

Spesifikasjonen til modellkabelen finnes fra [24], mens for 12 kV kabelen er det gjort fysiske mål av prøveobjektet. Spesifikasjonene for de respektive kablene kan sees i tabell 4.1.

Tabell 4-1: Spesifikasjoner for kabler brukt til forsøk

Lag	Tykkelse (mm)	Ytre diameter (mm)	Radius (mm)
<b>Modellkabel</b>			
Leder	-	1,38	
Indre halvleder	0,7	2,8	1,4
Isolasjon	1,5	5,8	2,9
Ytre halvleder	0,15	6,1	
<b>12 kV strippbar kabel</b>			
Leder	-	11,7	
Indre halvleder		13,2	6,6
Isolasjon	3,3	15	7,5
Ytre halvleder			

For testoppsettet er det ønskelig at kapasitansen i systemet er størst mulig i forhold til kapasitansen i kabelen. Ved hjelp av likning 4.1 kan da kapasitansen til modellkabelen regnes ut, disse vises i tabell 4.2.



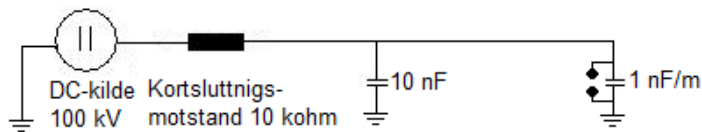
Tabell 4-2: Kapasitans i kabler brukt til forsøk

Kapasitans	F/m	0,3 meter
Modellkabel	$1,76 \cdot 10^{-10}$	52,8 pF
12 kV	$10 \cdot 10^{-10}$	0,3 nF

Her vil det gå være en betydelig høyere kapasitans i 12 kV kabelen, noe som resulterer i mer lagret energi som lades ut i gjennomslagsøyeblikket.

#### 4.2 Hvordan DC-delen av kretsen ser ut etter gjennomslag.

DC-delen av kretsen ser ut som vist i figur 4.1 før det har skjedd et gjennomslag.



Figur 4-1: Kretsskjema for DC-siden

Hvis kretsen regnes som tapsfri vil det etter en tid vil det ligge 100 kV over hver av kapasitansene, og det vil ikke gå noe strøm i kretsen. I praksis vil kretsen ikke være tapsfri og det vil gå en liten strøm i kretsen for å motvirke eventuelle tap, som oftest i form av varme. Denne strømmen er så liten at den blir sett bort i fra i beregningen, da disse er gjort for å få en helhetlig forståelse for oppsettet.

Den lagrede energien i kretsen kan da finnes fra likning 4.2.

$$W = \frac{1}{2} U^2 C \quad [4.2]$$

Noe som for en 0,3 meter kabel gir:

$$W = \frac{1}{2} (100kV)^2 \cdot 10nF + \frac{1}{2} (100kV)^2 \cdot 0,3nF \quad [4.3]$$

$$W = 50J + 1,5J = 51,5J = 51,5Ws$$

Brukes derimot modellkabelen vil denne ha en enda mindre kapasitans og den samlede energien i driftstilsand vil være:

$$W = \frac{1}{2} (100kV)^2 \cdot 10nF + \frac{1}{2} (100kV)^2 \cdot 52,8pF \quad [4.4]$$

$$W = 50J + 0,26J = 50,26J = 50,26Ws$$

Ved en kortslutning av kabelen vil kretsen få en ny tilstand som kan sees i figur 4.2.



Figur 4-2: Kretsskjema for DC-siden etter gjennomslag

Kondensatoren lades ut og inngår ikke lenger inngår i kretsen, da den vil være jordet på begge sider. DC-kilden vil lades ut over kortslutningsmotstanden og det vil, med en slik krets, gå en strøm på 10 A fra kilden til jord. Forutsatt at spenningskilden klarer å levere en slik strøm. Alt tapet vil her ligge over motstanden på 10 kΩ i form av varme. Hvis kretsen blir stående på vil det være viktig å passe på at motstanden er dimensjonert for å tåle varmen produsert. I dette tilfelle vil ikke kilden klare å levere nok strøm slik at det ikke vil være et problem med for mye varme hvis kilden blir stående å gå.

Det som kan bli et problem er at kulegapet, som vist i figur 4.1, vil slukke hvis spenningen bli lav nok, for så å tennes igjen når kondensatoren blir ladet opp.

Akkurat i det gjennomslaget skjer, vil det ikke gå noen strøm i motstanden og all spenningen som ligger over kondensatoren vil lades ut gjennom kulegapet til jord. Dette vil generere en stor strøm, gitt av tiden den bruker på å lades ut.

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \quad [4.6]$$

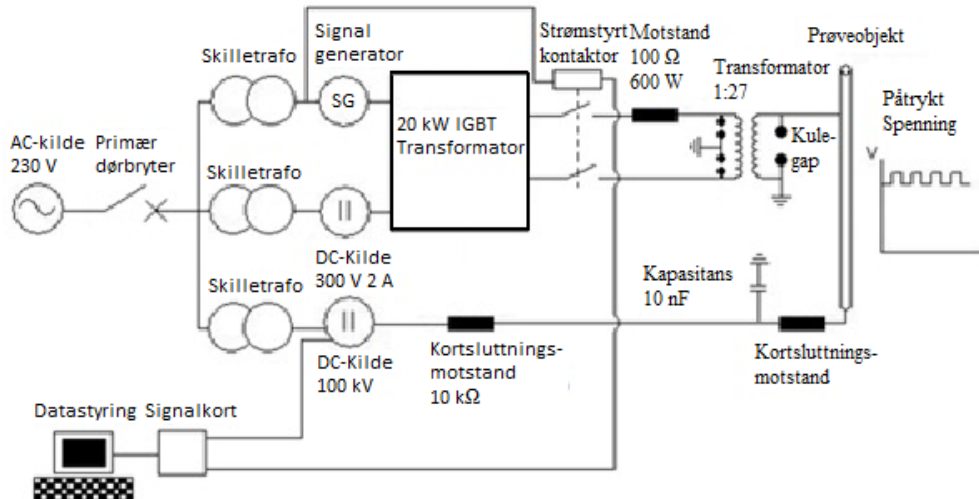
Hvis en tar utgangspunkt i en lynpuls, eller en frekvens på 500 Hz. Gir dette en strøm lik 500 A, som vist i likning 4.6.

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \Rightarrow i = C \cdot V / t \quad [4.6]$$

$$i = 10nF \cdot 100kV / 2\mu s = 500A$$

## 5 Testoppsett

Figur 5-1 viser testoppsettet.



Figur 5-1: Testoppsett for testing av DC med overliggende transienter.

Testoppsettet består av følgende deler:

- AC-Kilde 230 V 50 Hz, fra stikk i veggen.
- 1 x Primær dørbryter, som sørger for at det ikke er mulig å sette på spenning uten at døren til oppsettet er lukket og jordingsstav er hengt på plass
- 3 x skilletrafo for å eliminere jord fra nettet
- 1x Signalgenerator, for å generere den ønskede spenningen
- 2 x DC-kilder på 300 V og 1 A.
- 1 x DC-kilde på 100 kV av typen Spellemann SL150
- 1 x 20 kW IGBT transformator for å veksle 300 V DC-kildene med signalet gitt av signalgeneratoren
- 1 x Strømstyrt kontaktor for å bryte kretsen ved gjennomslag i kabelen
- 1 x Motstand på 100 Ω og 600 W brukes for å øke strømmen på primærsiden av transformatoren
- 1 x Egenprodusert høyspenningstransformator med vindingstall 1:27
- 2 x Gasskulegap av typen SRC CG2470L for å beskytte transformatoren ved høye spenninger
- 2 x Dioder av typen 1,5ke400ca for å beskytte transformatoren ved høye spenninger
- 1 x Kulegap for å spare transformatoren ved gjennomslag

- 1 x Kondensator på 10 nF til jord, for å spare høyspenningskilden ved gjennomslag
- 1 x kortslutningsmotstand på 10 kΩ for å begrense strømmen ved gjennomslag
- 1 x kortslutningsmotstand på 5 kΩ for å begrense strømmen ved gjennomslag
- Et dataprogram som styrer kontaktoren og 100 kV kilden og slår dem av ved gjennomslag
- Et signalkort for å styre kontaktoren og 100 kV kilden
- En strømtang for å måle strømmen på primærsiden av kretsen
- Et relé for å koble ut 100 kV kilden
- Et relé som sier fra hvis strømmen i måletangen går over ett valg nivå.
- Diverse ledninger

Oppsettet er koblet til 230 V AC-nettet, gjennom en skilletransformator slik at jordingen til kretsen blir adskilt fra nettet. Dette gjør at man unngår eventuelle potensialforskjeller som kan oppstå ved bruk av samme jordingspunkt.

IGBT-omformerer, styrt av en 300 V 2 A spenningskilde og en signalgenerator, kobles til en motstand på 100 Ω. Viklingene i transformatoren har så liten motstand at det må være en motstand i serie for å få det til å gå noe strøm i kretsen. Den indre motstanden i vikingene på transformatoren er målt til 0,2 Ω, som er tilnærmet kortslutning. Dermed må det være en motstand i serie for å få opp strømmen i kretsen, noe som vil gi en deling av effekten, som vist i likning 5.1.

$$P = UI = RI^2 = 100\Omega \cdot (2A)^2 = 400W \quad [5.1]$$

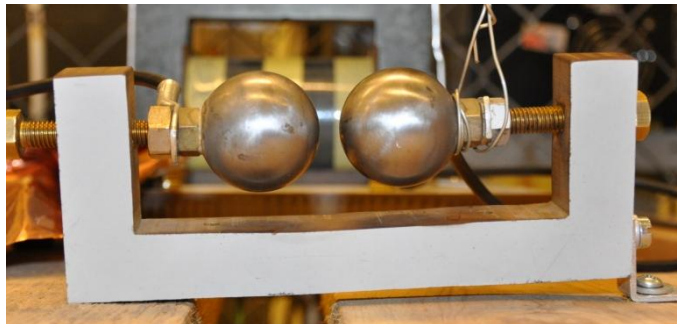
$$U = RI = 100\Omega \cdot 2A = 200V$$

Ved 400 V spenning vil dermed halve spenningen ligge over transformatoren. Ved høy frekvens, viste det seg vanskelig å få en fin sinusspenning ut fra omformerer. Denne ble mer lik en trekantspenning som vist i figur 6.7. Dette gjorde at det ikke var like enkelt å regne ut hva  $V_{rms}$  og  $V_{peak}$  ville bli. Dette ble bestemt ved hjelp av måling på primærsiden av transformatoren, for så å multiplisere med forholdstallet til transformatoren. Denne ble funnet til å gi ut 10 kV<sub>peak</sub> ved påtrykk av 300 V og 2A.

På primærsiden av transformatoren er det koblet inn to gasskulegap og to dioder for å beskytte transformatoren mot overspenning. Kulegapene og diodene er koblet mellom fase og jord, på hver sin fase. Dette gjøres for å beskytte transformatoren for varig overspenning, hvor den vil kunne bli ødelagt av for høy varmeproduksjon, eller høye transiente spenninger.

Etter transformatoren er det også koblet inn et kulegap hvor spenningen skal gå til jord ved gjennomslag. Dette er et luftkulegap med en avstand som er innstilt til å slå over

ved en spenning større enn 12,5 kV, men mindre enn 17,5 kV. Ved gjennomslag blir spenningen rundt 70 kV, mens i driftstilstand ligger spenningen på  $\pm 10$  kV. Et bilde av kulegapet kan sees i figur 5.1.



Figur 5-2: Kulegapet brukt for å lede gjennomslagsspenningen til jord.

På andre siden av prøveobjektet er det en 100 kV DC-kilde. Denne kilden styres av et dataprogram som må være i gang for at det skal være mulig å spenningssette kilden. Etter kilden er det to motstander, som brukes for å begrense strømmen ved gjennomslag, i serie med kilden. Det er også en kondensator på 10 nF til jord, som sørger for å holde spenningen tålig stabil akkurat i det gjennomslaget skjer for å beskytte 100 kV kilden, samt at AC-strømmen har en vei å gå i driftstilstand.

For best mulig å beskytte kildene samt logge gjennomslag brukes det forskjellig typer måleutstyr. Dette utstyret blir nærmere forklart i kapittel 6.

### **5.1 Vern av AC-siden**

Foreløpig er det fire forskjellige tiltak som er gjort for å verne AC-kilden. Hvor av alle utenom en motstand mellom kondensatoren og prøveobjektet er testet i praksis. Tiltakene som er blitt gjort er:

1. Kulegap på sekundærsiden av transformatoren
2. Gasskulegap i parallell med en diode på primærsiden av transformatoren
3. Motstand for begrensnig av overspenninger på likestrømssiden.
4. Bruk av strømmåling og kontaktor på primærsiden av transformatoren.

#### **5.1.1 Kulegap på sekundærsiden**

Ideen med et kulegap i parallell med transformatoren var at dette skulle føre til at spenningen slo over i kulegapet og tok enkleste vei til jord, og dermed ikke gikk i transformatoren. Her var det ikke tatt hensyn til hvor rask transformatoren var, da tidligere forsøk med samme oppsettet har vist seg å begrense spenning ved

gjennomslag bra. Kulegapet fører også til at jordpotensialet øker i det gjennomslaget skjer, noe som kan være en av årsakene til oppsettet ikke har fungert.

### 5.1.2 Gasskulegap i parallell med en diode på primærsiden

Formålet med gasskulegapene er å beskytte transformatoren for høye spenninger på primærsiden. Slik at påtrykt spenning ikke overstiger verneverdien på gapene. Gapene som er valgt og bruke er av typen SRC CG2470L, som består av to elektrode med gass imellom. Hvor CG2 sier hvilken type gap det er, 470 tilsier vernenivået i volt og L står for at den skal lede ved gjennomslag. [25] Som tidligere nevnt har gasskulegapene en avledningsevne på  $100V / \mu s$ , noe som tilsvarer noen på hundre volt i løpet av en lynimpuls. Gasskulegapet er satt i parallell med en diode laget for å beskytte sensitivt elektronisk utstyr ved spenninger induisert av lyn og andre transiente spenningsforløp. Den dioden som er brukt er en 1.5ke400ca [26]. Denne har et vernenivå på 400 V og tåler en effekt på 1500 W.

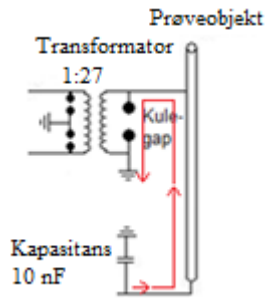
Tanken her er at dioden tar all spenning når bølgen kommer til gasskulegapet har fått tid til å tenne, etter hvert vil spenningen ligge over gasskulegapet og ikke lenger dioden.

### 5.1.3 Motstand

Ved testing er det funnet ut at det går en for høy strøm til jord ved gjennomslag. Skal kretsen overleve gjennomslag er det viktig å begrense denne strømmen. Denne strømmen kan også beregnes som vist i likning 5.2. Måten denne strømmen kan beregnes på er ved å sette inn en strømbegrensende motstand i serie med prøveobjektet.

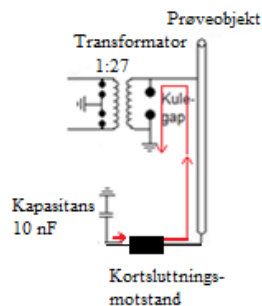
$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \Rightarrow i = C \cdot V / t \quad [5.2]$$
$$i = 10nF \cdot 100kV / 2\mu s = 500A$$

Her er det regnet med at spenningen synker fra 100 kV til 0 i løpet av 2  $\mu s$ . Den opplagrede energien i kretsen ligger i kondensatoren, og det gir strøm lik 500 A.



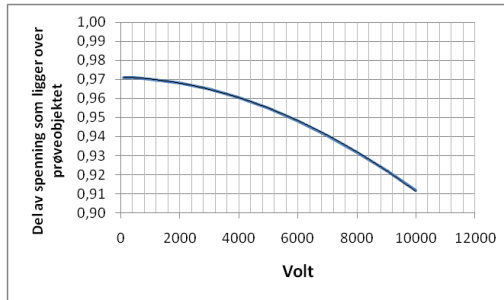
Figur 5-3: Veien strømmen tar ved gjennomslag

Figur 5.3 viser at strømmen som oppstår ved gjennomslag er begrenset av de indre motstandene i kabelen og kulegapet. Disse motstandene vil være svært små, som igjen resulterer i en høy spenning. Det vil være ønskelig å begrense denne strømmen for å forhindre at utstyret på andre siden av transformatoren går i stykker. Måten dette gjøres på er ved å legge en motstand i serie for å få opp den totale kortslutningsmotstanden. Det er ønskelig at så mye som mulig av spenningen ligger over kabelen og at motstanden er størst mulig for å minimere strømmen ved kortslutning. Stor motstand resulterer i stort spenningsfall. Det er blitt gjort en spenningsdelingsberegning som vist i vedlegg 1. Her er det konkludert med at den ideelle motstanden ligger i området 5 k $\Omega$ . En motstand på 5 k $\Omega$  begrenser kortslutningsstrømmen til 20 A ved 100 kV spenning. Motstanden blir satt i serie som vist på figur 5.4.



Figur 5-4: Inkluderer motstand for å begrense kortslutningsstrøm

Ved en omsetning fra transformatoren på 1:27 blir strømmen på primærsiden da ikke større enn 1 A. Dermed vil det ikke oppstå problem med for høy strøm inn på omformeren. Spenningsdeling som funksjon av motstanden kan sees fra figur 5.5.



Figur 5-5: Spenningsdeling som funksjon av motstand. Prøveobjekt 30 cm, Nåleavstand 0,9 mm, Frekvens 20kHz

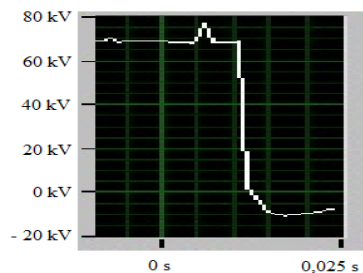
#### 5.1.4 Bruk av strømmåling og kontaktor på primærsiden av transformatoren.

En kontaktor brukes normalt for å bryte en krets. Denne bryter helst i nullgjennomgang, noe som ikke nødvendigvis skjer med en gang. Det kan fort gå en eller flere perioder før kretsen blir brutt, noe som fører til at det går for lang tid før kretsen blir brutt.

Fra 5.6 kan spenningsforløpet ved gjennomslag sees. Her skjer gjennomslaget på 10 ms i grafen og synker til null i løpet av 1,25 ms, noe som tilsvarer en utladning som følger av likning 5.3.

$$50Ws, 1,25ms \Rightarrow \frac{50W}{1,25 \cdot 10^{-3}} = 40kW \quad [5.3]$$

Som tilsier at det lades ut 40 kW i det gjennomslaget skjer. Noe som gir en strøm som følger av  $40 kW / 100 kV = 0,4 A$ . Dette tilsier at det ikke burde by på noen problemer med oppsettet.



Figur 5-6: Spenningsforløp ved gjennomslag i kabel



## 6 Måleutstyr

---

Det ble brukt en rekke forskjellig utstyr for å komme frem til den ønskede kretsen, herunder temperaturmåler wattmeter, multimeter osv, men dette regnes mer som verktøy i løpet av prosessen og vil ikke bli nevnt videre. Det utstyrt som er nevnt under dette kapitlet er begrenset til det utstyret som brukes til måling ved kjøring av oppsettet:

- Dataprogram av typen labview 9.02 for måling og styring
- Dørkontakt
- Strømtang med spesiallaget målekrets

### ***6.1 Dataprogram for styring av kretsen***

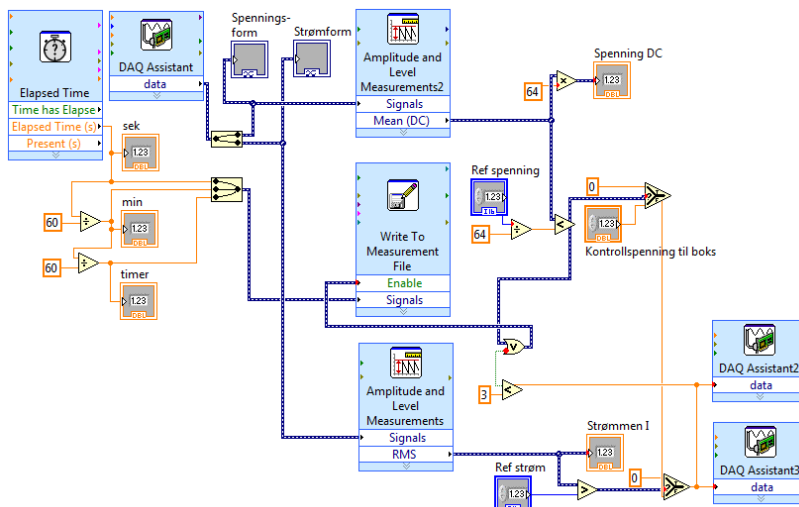
En datamaskin ble installert med programmet labview 9.02, og brukt for å styre spenningskildene og logge dataene. Programmet virker på følgende måte:

1. Et kretskort kobles til datamaskinen for å lese og sende datasignaler.
2. Programmet mottar signal fra to forskjellige målinger
3. Målingene registreres og programmet slås av hvis målingene tilsier det, ellers kjører det som normalt
4. Forsøket times og det logger automatisk ved stopp.
5. Programmet slår av begge utgangene ved stoppsignal fra en eller begge kilder.

Programmet leser inn to typer data.

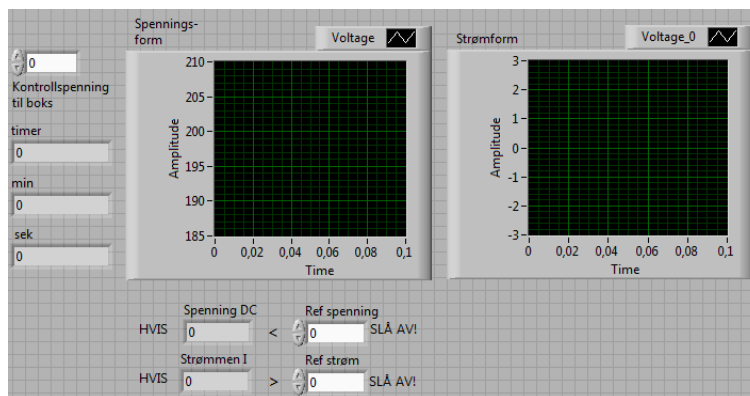
1. Fra 100 kV spenningskilden i forhold 1/10000, slik at ved 100 kV gir kilden ut en spenning på 10 V. Ved et gjennomslag vil spenningen ut fra 100 kV kilden synke på grunn av strømbegrensning. Dette registrerer dataprogrammet som så slår av kilden og lar den lade seg ut. For å styre kilden brukes et relé, som holdes lukket når kilden skal være på, og åpnes når kilden skal slås av. Dette styres ved hjelp av et kretskort tilkoblet datamaskinen. Kretskortet gir ut en valgfri spenning (0-5V) for en valgt situasjon. Her er det valgt at kortet gir ut 5 V i normal drift og 0 V når det ikke er i drift.
2. Fra en strømtang som er montert på primærsiden av transformatoren. Denne inneholder en spesiallaget krets som sender ut en spenning når strømmen overgår et valgt nivå. Kretskortet registrer en eventuell forandring og utfører den tiltenkte handlingen. Det valgte nivået som har vært brukt for denne oppgaven var på 3 A.

Programmet som ble installert har to nivåer, et blokkdiagram og et brukergrensesnitt. Blokkdiagrammet er vist i figur 7.1, mens brukergrensesnittet kan sees i figur 7.2.



Figur 6-1: Blokkdiagram av dataprogram brukt for å bryte kretsen ved gjennomslag

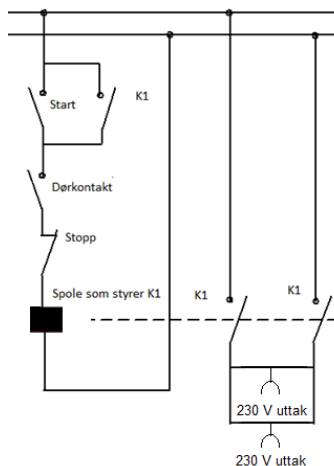
Brukergrensesnittet brukes for å styre når spenningen skal slås av. Her er det valgt å bruke to betingelser, hvor den ene stopper programmet hvis spenningen synker under en gitt verdi, mens den andre stopper hvis strømmen stiger over en gitt verdi. Strømmen vil her enten være stor eller lik null. Dette fordi den leses av en spesiallaget krets som stilles inn på det ønskede nivået, slik at dette er ikke mulig å gjøre i programmet, men er en fysisk innstilling på kontrollboksen.



Figur 6-2: Brukergrensesnittet av dataprogrammet som kobler ut kildene ved gjennomslag

## 6.2 Dørkontakt

Dørkontakten, som vist i Figur 6-3, består av en start- og stoppknapp, samt en kontakt som styres ved hjelp av en fysisk kobling i døren og på jordingsstaven. Spenningen slås automatisk av hvis døren åpnes under forsøk. Dette brukes ikke direkte i forsøket, men fungerer som en ekstra sikkerhet om noen skulle prøve å lukke opp testburet under forsøk.



Figur 6-3: Blokkdiagram av holdekretsen brukt for å bryte spenningen på 300 V spenningskildene ved gjennomslag

For å kunne måle strømmen i primærkretsen av transformatoren er det laget en målekrets som tar inn en spenning fra en strømtang. Målekretsen registrerer hva strømmen er, og sender ut et signal hvis strømmen overstiger det valgte nivået, som for denne oppgaven er nivået satt til 3 A.

Strømtangen som er brukt tåler en spenning på 600 V og måler opp til 1000 A. Hvor det er mulig å stille inn utgangssignalet på tre nivåer.

1, 10 og 100 mV/A. I denne oppgaven er det brukt en innstilling på 100 mV/A, som gir en spenning ut på 300 mV ved 3 A, som var satt som grenseverdi. Tangen gir maksimalt ut  $2 V_{\text{peak}}$ .

## 7 Resultater

---

Dette kapittelet er delt opp i tre deler som følger:

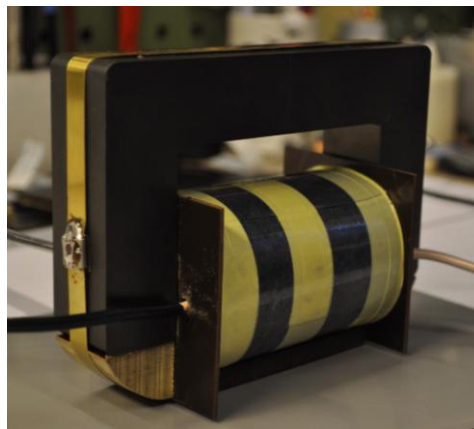
- 1.) Test av transformator laget etter spesifikasjoner fra prosjektoppgaven.
- 2.) Levetidsforsøk av 12 kV kabelobjekt påtrykt AC-spenning samtidig som den jordes ved hjelp av en nål.
- 3.) Levetidsforsøk av 12 kV kabelobjekt påtrykt DC-spenning med en overliggende transient ved hjelp av en nål.

Målet med forsøkene var å verifisere at transformatoren fungerte som prosjekter, samt å teste kabelen til gjennombrudd for å se på sammenhengen mellom AC og DC med en overliggende transient.

### ***7.1 – Test ved 50 V og 50 Hz påtrykt sekundærsiden av transformatoren***

Transformatoren som ble beregnet i prosjektoppgaven hadde følgende spesifikasjoner: Den vil bestå av en U93/152/30 kjerne laget av ferritt-materialet N87. Vindingene på både primær- og sekundærside er litztråd hhv 15x0,1 mm og 800x0,071 mm. Transformatoren vil, med en inngangsspenning på 350 V<sub>rms</sub> og inngangsstrøm på 5 A, kunne levere en spenning ut på 10 kV<sub>rms</sub> med en frekvens på 20 kHz.

Transformatoren ble bygget og ble seende ut som vist på Figur 7-1



**Figur 7-1: Høyfrekvent transformator for bruk til å forsterke en spenning på opptil 20 kHz 600 V, til 20 kHz 20 kV.**

Til testingen ble det brukt en variabel 50 Hz kilde kalt en variac (variabel AC). Denne kilden ble brukt for å sette spenning på sekundærsiden av kretsen. Ved å sammenligne med hva kjernen skal tåle før den går i metning ble det beregnet at den ved 50 V skal levere spenningen tilsvarende viklingsforholdet på primærsiden.

$$\hat{V}_{sek} = N_{sek} A_{kjerne} \omega \hat{B}_{kjerne} \quad [7.1]$$

$$\hat{B}_{kjerne} = \frac{\hat{V}_{sek}}{N_{sek} A_{kjerne} \omega} \quad [7.2]$$

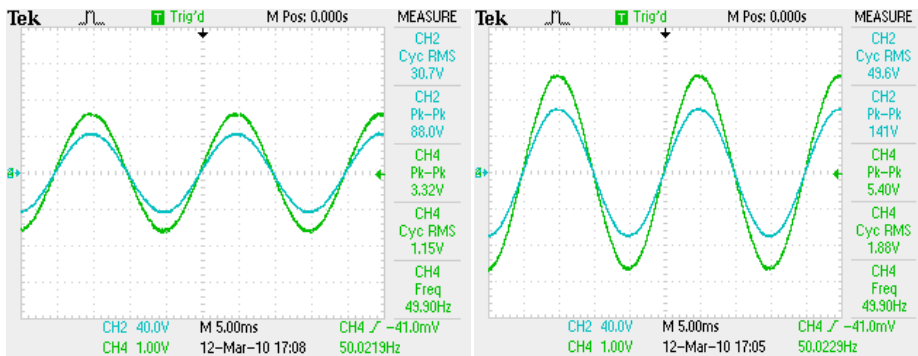
Med  $\hat{B}_{kjerne}$  konstant gir dette:

$$\hat{B}_{kjerne} = \frac{\hat{V}_{sek,1}}{N_{sek} A_{kjerne} 2\pi f_1} = \frac{\hat{V}_{sek,2}}{N_{sek} A_{kjerne} 2\pi f_2}$$

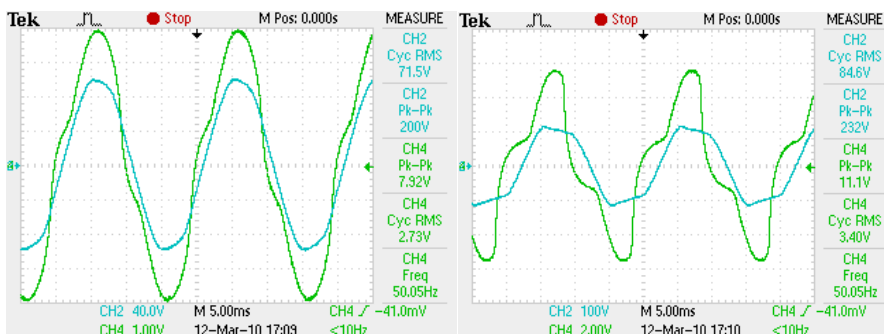
$$\hat{B}_{kjerne} = \frac{\hat{V}_{sek,1}}{f_1} = \frac{\hat{V}_{sek,2}}{f_2} = \frac{20kV}{20kHz} = \frac{50V}{50Hz} \quad [7.3]$$

Dette tilsier at det er mulig å sjekke omsettingsforholdet med hjelp av en 50 Hz kilde som yter 50 V, gitt at metningsforholdet i kjernen er det samme.

Fra figurene under kan spenningskarakteristikken sees. Her viser den blå grafen sekundærsiden som blir påtrykt AC spenningen, mens den grønne grafen viser spenningen målt på primærsiden.

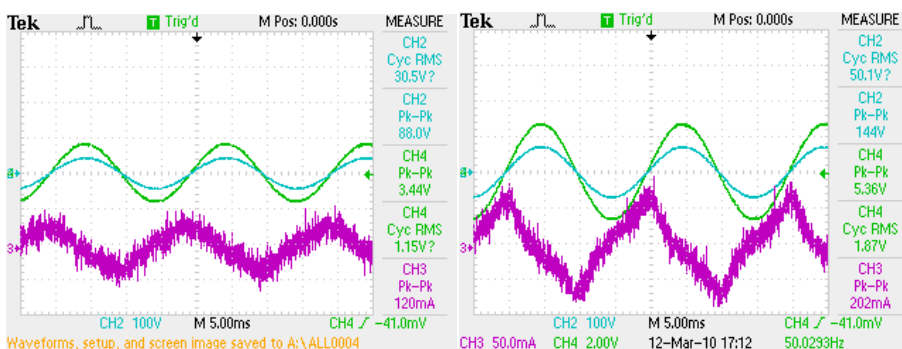


Figur 7-2: Test 1, 50 Hz 30 V, !Uventet slutt på formelen

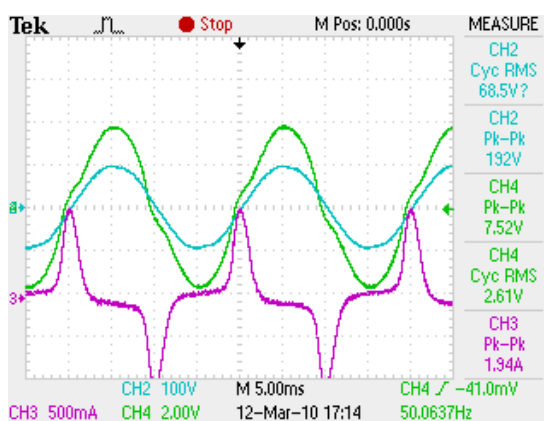


Figur 7-3: Test 3, 50 Hz 71,5 V, Figur 7-4: Test 4, 50 Hz 84,6 V

Primærsiden følger kurveformen til pådraget veldig fint opp til den dimensjonerte  $\hat{B}_{kjerne}$ , og grafene viser en tydelig tendens til at kjernen går i metning ved verdier over 50 V, som fører til at spenningen forvrenges.



Figur 7-5: Test 5, 50 Hz 30 V 120 mA, Figur 7-6: Test 6, 50 Hz 50 V 202 mA



Figur 7-7: Test 7, 50 Hz 68,5 V 1,94 A

I figur 7,8 er i tillegg strømmen i kretsen målt. Strømmen er sinusformet opp til  $\hat{B}_{kjerne}$ , for så å gå over til en trekantformet strøm når spenningen øker. Fra figur 7.7 finnes topp til toppverdien av strømmen til 202 mA, ved å regne om, gir dette i rms verdi:

$$202mA \cdot x = \frac{202mA}{2\sqrt{2}} = 71mA_{rms} \quad [7.4]$$

Omsettningsforholdet i transformatoren begregnes ved hjelp av verdier funnet i figur 7.3 og vises i likning 7.5:

$$\frac{50V_{rms}}{1,87V_{rms}} = 26,7 \approx 27 \quad [7.5]$$

Ved å bruke svarene fra likning 7.4 og likning 7.5 kan dermed strømmen på primærsiden beregnes som vist i likning 7.6

$$71mA_{rms} \cdot 26,7 = 1,9A_{rms} \quad [7.6]$$

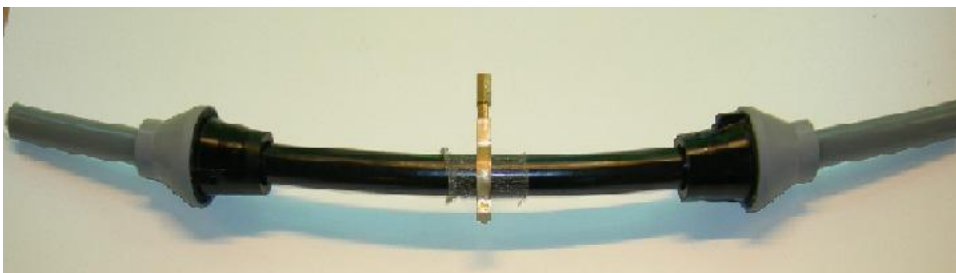
Her må det legges til at målingene er gjort etter øyemål på oscilloskop, og nok ikke er helt nøyaktige, men funnet gode nok til å verifisere transformatoren.

Optimalt oppsett for kilden ved 20 kHz:

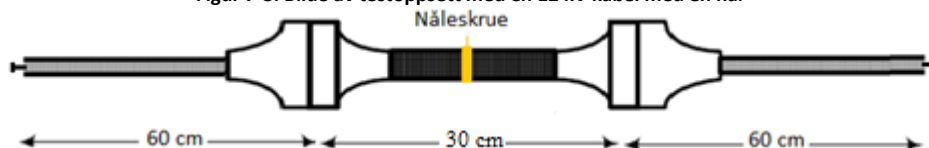
- Spenning 350 V<sub>rms</sub>
- Strøm 1,9 A<sub>rms</sub>
- Gir en effekt på 665 W

## **7.2 – AC-Levetidsforsøk på 12 kV kabelobjekt med nål.**

Det ble valgt en 12 kV strippbar kabel med aluminiumskjerne til forsøket. Kabelen ble i stykker i biter à 1 meter og 30 centimeter hvor 60 cm ble strippet av hver ende. Midt på den ustrippede delen av kabelen plasseres en nål som festes ved hjelp av en ring med gjenger laget av kopper. Her kobles nålen til jord mens endene på kabelen kobles sammen og til spenningskilden. Spenningskilden som blir brukt på dette forsøket er en variabel 50 Hz AC kilde.

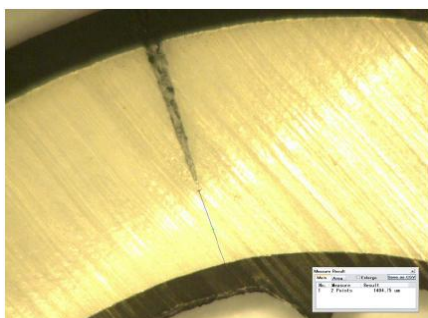


Figur 7-8: Bilde av testoppsett med en 12 kV kabel med en nål



Figur 7-9: Skisse av testoppsett med en 12 kV kabel med nål

Avstanden fra nålen til indre halvleder var på 0,9 mm som vist i figur 7.11. Nålene ble undersøkt i mikroskop før og etter spenningsprøving for å undersøke at nålen hadde riktig avstand og ikke tatt skade av gjennomslaget. Ved avvik ble nålen justert til igjen å være 0,9 mm. Dette ble gjort ved bruk av et mikroskop og skiver med forskjellig tykkelse som ble lagt imellom skruen og basen på nåleverktøyet. Slik at når nålen ble skrudd helt inn, ville den ha den gi den ønskede isolasjonstykkelsen. For fininnstilling bruktes også et pussepapir på skivene, slik at det i alle prøvene var nøyaktig samme avstand. En liten feilkilde som bør nevnes er at ringen ble skrudd på prøveobjektet etter at riktig avstand var funnet. For å få den avstanden må ringen skrues på med nøyaktig samme styrke. Ved prøving på bit av kabel ble det funnet små avvik (opp til 0,1 mm) ved å skru med forskjellig styrke. Ved hjelp av måling i mikroskopet ble de avstanden til kjernen målt rundt hele objektet. Denne avstanden ble funnet til å være tilnærmet konstant rundt hele kabelen.



Figur 7-10: Mikroskopbilde av avstanden fra nål til indre halvleder, lik 0,9 mm



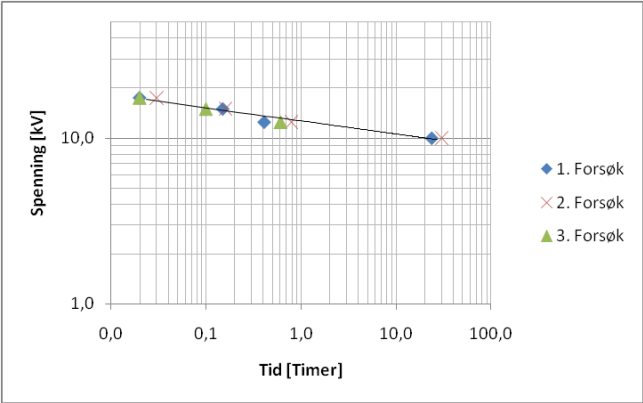
Figur 7-11: Bilde av nåleverktøy for kabel



Resultatet av spenning mot tid til gjennomslag kan sees i grafen i figur 7.13 og ut ifra tabell 7.1. Her er det også lagt til en lineær trendlinje som viser hva forventet tid til gjennomslag vil være. Grafen er oppgitt i kV pr time, og vi ser her at på 17,5 kV er tid til gjennomslag i overkant av 0,02 timer, som tilsvarer ca 1 minutt og 20 sekunder. For 10 kV derimot tar det i gjennomsnitt 27 timer før gjennomslag finner sted.

Tabell 7-1: Tid til gjennomslag ved ulike spenninger fra AC-kilde med 0,9 mm avstand

Spenning kV	Tid til overslag i timer			
	1. Forsøk	2. Forsøk	3. Forsøk	Gjennomsnitt
10,0	23,8	30,1	-	26,9
12,5	0,41	0,79	0,61	0,60
15,0	0,15	0,16	0,10	0,14
17,5	0,02	0,03	0,02	0,02



Figur 7-12: Gjennomsnittlig tid til gjennomslag ved ulike spenninger fra AC-kilde med 0,9 mm avstand

### 7.3 Levetidsforsøk av 12 kV kabelobjekt som ble påtrykt DC-spenning med en overliggende transient ved hjelp av en nål.

Oppsettet som ble brukt kan sees fra figur 5.1, som viser testoppsettet for å generere en høyspenning med en overliggende transient. Her brukes samme kabelkonfigurasjon som i kapittel 7.2, og nåleavstanden er den samme. Det ble utført to tester, hvor begge ga gjennomslag på 70 kV DC  $\pm$  7 kV AC. Tid til gjennombrudd kan sees fra tabell 7.2.

Tabell 7-2: Tid til gjennomslag 12 kV kabel med nål.

	Test 1	Test 2	Gjennomsnitt
Tid til overslag	2 min	5 min	3,5 min

## 8 Diskusjon

---

Diskusjonen er delt opp i flere kapitler for å få bedre oversikt over de forskjellige delene av forsøket. Først diskuteres litteraturundersøkelsen, deretter det valgte oppsettet før det sees på hvordan den produserte transformatoren oppfører seg. Resultatene av testingen diskuteres i et eget delekapittel før det til slutt er en diskusjon av hvilke muligheter det kan være for å forbedre oppsettet, og hvilke feil som oppstår.

### **8.1 Litteraturundersøkelsen**

For litteraturundersøkelsen ble internett brukt i stor grad, spesielt IEEE ([www.ieee.org](http://www.ieee.org)), for å søke etter relevante rapporter. Det meste av litteraturundersøkelsen ble utført i prosjektet, men dette har vært en pågående prosess og nytt materiale ble funnet gjennom arbeid med masteroppgaven. Det mest interessante resultatet fra masteroppgaven var tidligere forsøk med nærmest samme oppsett som denne oppgaven tar for seg, dog med 60 Hz AC.

I prosjektet ble det funnet flere kilder som viste hvordan spenningen så ut etter omforming men ingen rapporter som direkte tok for seg problemet med transiente spenninger på starten og slutten av en DC-kabel. Kildene viste variasjon i både spenning, frekvens og transienter.

Flere kilder ble sammenlignet for å finne den spenningen med størst transient. De fleste kildene besto av simuleringer på problemet og det hadde vært ønskelig å ha konkrete tall på hvordan spenningen ser ut i en virkelig situasjon for å verifisere funnene bedre. Spenningene det ble tatt utgangspunkt i kan sees i figur 4.3 – 4.6.

Verdiene fra de ulike kildene varierer fra  $\pm 0,4$  til  $\pm 0,7$  p.u. For å være på den sikre siden og kunne ta hensyn til det eventuelt verst tenkelige scenarioet bestemmes denne p.u.-verdien til  $\pm 0,1$ . Det er vurdert på en slik måte: Det er bedre å overdimensjonere transformatoren og heller operere på lavere ytelse, med mulighet for å øke ytelsen ved behov, enn å dimensjonere slik at den ønskelige ytelsen er den maksimale ytelsen transformatoren kan gi. Dette henger også sammen med at det finnes flere forskjellige måter å veksle på og mange forskjellige typer omformere som igjen skaper forskjellige typer spenninger og transienter.

Oppsettet er overdimensjonert for å ta hensyn til eventuelle andre fremtidige ønsker om å teste andre spenninger eller frekvenser enn de som er funnet til nå.

## 8.2 Valgt kretsoppsett

Fra litteraturundersøkelsen er det ønskelig å produsere en krets som kan generere en spenning på  $\pm 0,1$  p.u. med en frekvens som skal ligge i området 1-4 kHz. For å være på den sikre siden har det blitt satt en ønskelig frekvens på 20 kHz for å takle eventuelle fremtidige undersøkelser. Det er også lettere å teste en frekvens på 4 kHz på et oppsett som takler 20 kHz, enn en frekvens på 20 kHz på et oppsett dimensjonert for 4 kHz. Den valgte spenningen ligger på 100 kV DC, med bakgrunn i at testene i laboratoriet vil foregå på to typer kabler, en modellkabel og en 12 kV strippbar kabel. På den strippbare kabelen reduseres isolasjonstykkelsen ved hjelp av et nåleutstyr. Den ønskelige spenningen ligger på  $100 \text{ kV} \pm 10 \text{ kV}_{\text{rms}}$ . Skulle det vært testet på kabler av normal størrelse, uten reduksjon av isolasjonsavstand, ville dette skapt store problemer for testingen. Det ville:

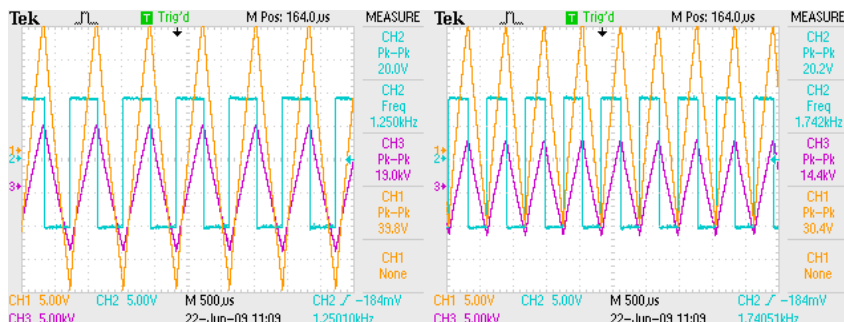
- Vært vanskeligere å lage endeavslutninger på kablene.
- Vært vanskelig å oppnå høye nok spenninger i testlabben.
- Vært vanskeligere å finne plass til å gjennomføre testingen.
- Skapt tidsproblemer da det ikke ville vært like lett å kompensere for forsøks tiden med å øke spenningen.

Etter at spenningen var bestemt ble det sjekket hva slags utstyr som allerede var tilgjengelig i laboratoriet og som kunne testes relativt enkelt. Der ble det blant annet funnet en signalgenerator som gav den ønskede spenningskarakteristikken. Denne ble brukt som utgangspunkt for de videre valgene. Det er viktig å presisere her at man ikke nødvendigvis er ute etter den best mulige løsningen, men en løsning som fungerer tilfredsstillende og genererer den ønskede spenningen med det ønskede frekvensnivået ( $100 \text{ kV} \pm 10 \text{ kV}_{\text{rms}}$  og 20 kHz). Etter testing har det vist seg at oppsettet fungerer veldig bra helt til gjennomslaget skjer, noe som til nå har resultert i at enkelte komponenter i oppsettet har blitt ødelagt. 1. gangen det var gjennomslag ble alt utstyret på primærsiden av transformatoren ødelagt. 2. gangen, etter en del flere tiltak var satt inn, var det bare IGBT-omformerer som ikke tålte gjennomslaget. Dermed gjenstår det bare en metode, for å beskytte også omformerer ved gjennomslag, for at oppsettet skal fungere som ønskelig.

### 8.2.1 Signalgenerator som mater en høyspenningsomformer av typen TREK 20/20.

Signalgeneratoren gir en utgangsspenning på 5 V, og må dermed forsterkes til den ønskelige styrken. For å gjøre dette trengs en transformator. En høyspenningsforsterker av typen TREK 20/20 ble brukt. Denne ble koblet i serie med signalgeneratoren for å se om denne kunne virke etter planen.

Det var vanskelig å oppnå den ønskede spenningen med dette oppsettet. Dette viste seg best ved å øke frekvensen og se hvordan utgangsspenningen gikk i metning. Ved å studere frekvensen i figur 8.1 finnes tendensen til amplituden som funksjon av frekvensen (gitt fra CH3).

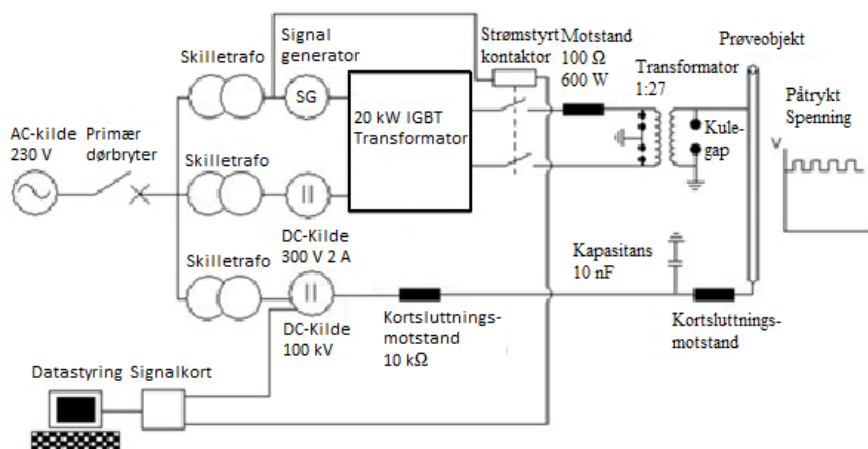


Figur 8-1: Plott av inngangsspenning og utgangsspenning fra høyspenningsomformereren ved forskjellig frekvens

Her er det tydelig at frekvensen har en innvirkning på amplituden. Jo høyere frekvens dess lavere blir spenningen. Det var ønskelig med en frekvens på 20 kHz, og en spenning på  $\pm 10 \text{ kV}_{\text{rms}}$ . Med dette oppsettet vil det ikke være mulig å oppnå dermed måtte et nytt oppsett designes. Enten måtte det ordnes en forsterker som taklet høyere spenning, eller så måtte et helt nytt oppsett designes. Det var ikke mulig å få tak i rimelige forsterkere som ville gitt den ønskede spenningen, så et nytt oppsett ble planlagt.

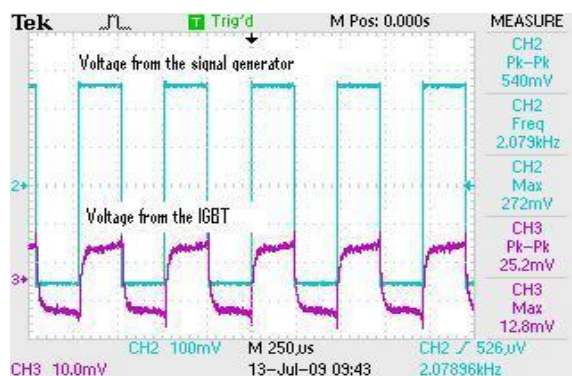
## 8.2.2 Signalgenerator som mater en transformert IGBT-omformer i serie med en 100 kV DC-kilde

Målet her var å bruke signalgeneratoren fra forrige oppsett og finne en måte og forsterke denne på uten at frekvensen påvirker spenningen. Enkel tilgang på en IGBT-omformer gjorde at denne ble satt inn som en forsterker. Den planlagte kretsen kan sees fra figur 8.2.



Figur 8-2: Testoppsett til laboratorieforsøk der det skal genereres en høy spenning med en overliggende høyfrekvent transient.

Utstyr som allerede var tilgjengelig i laboratoriet var alle kildene samt IGBT-omformerer. Det første problemet med denne kretsen var amplituden på spenningen som IGBT-omformerer leverte. Dette kan sees i figur 8.3. Her må spenningen transformeres opp på ny for å få den ønskelige spenningen på 20 kV. Det måtte dermed lages en høyfrekvent- og høyspenttransformator som kan gjøre dette, noe som er en tidkrevende prosess. Det er allikevel valgt å bruke dette oppsettet da det regnes for å være det best tenkelige alternativet. Transformatoren ble laget etter utregningene fra prosjektet og fungerte som tiltenkt, med et omsetningsforhold på 1:27.



Figur 8-3: Bølgeformen fra signalgeneratoren og IGBT-omformerer

### 8.3 Transformatoren

Transformatoren er beregnet i rapporten og består av følgende deler, som vist i tabell 9.1.

**Tabell 8-1: Oversikt over vindingene i transformatoren**

<b>Vinding primær side: Rupalit 800x0.071mm</b>			
Ledertverrsnitt	$A_{Cu,pri}$	2,50	[mm <sup>2</sup> ]
Lerdiameter	$d_{pri}$	1,78	[mm]
Antall vindinger	$N_{pri}$	25	[#]
<b>Vinding sekundær side: CLI 15x0,1 mm</b>			
Ledertverrsnitt	$A_{Cu,sek}$	0,09	[mm <sup>2</sup> ]
Lerdiameter	$d_{sek}$	0,34	[mm]
Antall vindinger	$N_{sek}$	724	[#]

Viklingstråden på primærsiden består av en tråd som heter Rapalit med 800 ledere på hver 0,071 mm i diameter. Dette gir et ledertverrsnitt gitt av ligning 8.1

$$\begin{aligned}
 A_{real} &= \pi r^2 \\
 d &= 0,071 \text{ [mm]}, \quad r = 0,0355 \text{ [mm]}, \quad \text{ledere} = 800 \\
 A_{pri} &= \pi \cdot 0,0355^2 \cdot 800 = 3,17 \text{ [mm}^2\text{]}
 \end{aligned}
 \tag{8.1}$$

For sekundærsiden er viklingstråden av type CLI med 15 ledere på hver 0,1 mm i diameter. Ved å bruke samme utregning som 8.1 finnes ledertverrsnittet til å bli:

$$A_{sek} = \pi \cdot 0,05^2 \cdot 15 = 0,12 \text{ [mm}^2\text{]} \tag{8.2}$$

Transformatoren ble produsert ved hjelp av verkstedet på huset. Ved testing ble det verifisert at transformatoren fungerte som planlagt. Den transformerte opp spenningen med et forholdstall på 27. Det planlagte var 29, som avviker litt fra det målte forholdet. Dette kan komme av at produksjonen av transformatoren ga mekaniske utfordringer som gjorde at viklingstallet ikke ble nøyaktig slik som i teorien. Her var det tatt høyde for at transformatoren ikke ville bli nøyaktig som planlagt, og dette utgjør ikke noe problem. Det eneste problemet som oppsto etter at den var bygget var motstanden i viklingene i det den blir spenningssatt. Fra forarbeidet var det beregnet med en motstand på 47,5  $\Omega$ , mens den målte motstanden i transformatoren lå på 0,2  $\Omega$ . Det var ikke nok motstand til å få opp spenningen, og det måtte settes inn en motstand i serie for å oppnå ønsket spenningsnivå. Denne motstanden kan kobles ut når

magnetiseringen av spolen har nådd ønsket nivå, og dermed oppnådd en større motstand. Dette kan enkelt løses ved en kortslutning over motstanden. Dette ble ikke gjort i denne oppgaven, men kunne vært en tanke hvis man skal gjøre forsøk over lengre tid, eller ønsker å minske effektbruken og optimalisere kretsen.

## **8.4 Testoppsettet**

Det har vist seg at testoppsettet fungerer bra til gjennomslaget skjer. Det ga gjennomslag på begge typer kabler som ble testet. Modellkabelen ga gjennomslag ved  $80 \pm 8$  kV, mens 12 kV kabelen ga gjennomslag ved  $70 \pm 7$  kV. På 12 kV kabelen ble isolasjonsavstanden redusert ved hjelp av et nåleverktøy, slik at denne kunne sette til en fornuftig verdi, her valgt 0,9 mm.

Til sammenligning er det gjort forsøk med en annen type kabel, (modellkabel med samme avstand som den brukt i denne oppgaven, 1,5 mm isolasjon) med ren DC-spenning. Denne er testet til 200 kV uten å gi gjennomslag [27]. Dermed blir det en betydelig reduksjon av holdfastheten på kabelen når den overlages med en transient.

Ved å teste 12 kV kabelen med AC-spenning på 50 Hz, ble det funnet en sammenheng mellom gjennomslag ved AC-spenning vs DC-spenning med transient. Et gjennomslag ved  $70 \pm 7$  kV tilsvarer en AC-spenning på 15 – 17,5 kV, i løpet av samme tid. Tiden som ble brukt var i gjennomsnitt 3,5 minutter fra testobjektet ble spenningspåsett til gjennomslag.

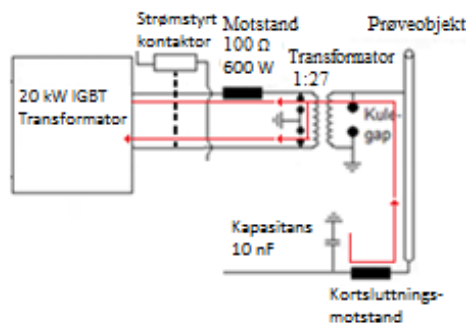
Etter gjennomslag har AC-kilden blitt utsatt for et så stort spenningspåtrykk at den har blitt ødelagt. Dette utgjør et problem for den type testing som er ønsket i denne oppgaven. Det kan være flere grunner til at dette skjer og flere løsninger. Her listes det opp mulig feil og løsninger.

- Spenning fra DC-kilden trenger inn i AC-kilden, fordi den opplevde motstanden i viklingen er mindre enn motstanden i kulegapet i det gjennomslaget skjer. Noe som henger sammen med det er en høyfrekvenstransformator.
- Hopp i jordpotensialet i det gjennomslaget skjer.

### **8.4.1 Spenning fra DC-kilden trenger inn i AC-kilden**

Problemet oppstår ved gjennomslag i kabelen. En spenningsbølge på 100 kV bryter da gjennom prøveobjektet og går til kulegapet. Her ville det vært ønskelig at spenningen la seg over kulegapet, mens transformatoren ikke så noe til den. Dette er ikke tilfelle og transformatoren opplever en spenning som blir transformert til primærsiden som vist i likning 3.3. Denne spenningen vil i følge utregningene bli så høy som 5 kV på

primærsiden, med en strøm som er deretter. Spenningen vil da ta en vei som vist i figur 8.4.Ω



Figur 8-4: Forslag til hvordan utladningen etter et gjennomslag skjer.

Her vil IGBT-omformerer oppleve en spenning inn på utgangene, med en frekvens helt annerledes enn hva den sender ut. Dette kan være det som fører til at elektronikken i omformerer ødelegges.

#### 8.4.2 Økning i jordpotensialet/grunnpotensialet.

Det kan forekomme et hopp i jordpotensialet når en stor strøm flyter til jord gjennom en jordingsimpedans. Potensialet relativt til et punkt som ligger lengre vekk i jordingen, er høyest ved det punktet strømmen entrer jordingen og minker med avstanden til kilden. Økning i jordpotensialet kan utgjøre en fare for mennesker eller utstyr. Den potensielle gradienten kan bli så høy at en person kan bli skadet på grunn av spenningsdannelse mellom to ben, eller mellom jorden som personen står på og et metallobjekt som berøres.

Jordmotstanden er konstant, så strømmen som flyter til jord ved jordingspunktet vil produsere en økning i potensial, med respekt til et avsidesliggende referansepunkt. Kan sees fra ohms lov i likning 8.1, hvis  $I$  øker, må også  $U$  øke.

$$U = R \cdot I \Rightarrow R = konst \quad [8.1]$$

Det som skjer ved et gjennomslag er at potensialet i gjennomslagsområdet øker over en minimal tidsperiode. Dette gjør at alle andre elementer som er jordet i dette punktet plutselig opplever at jorden ikke lenger er den samme. Hvis jord løftes med 100 V, opplever alle element i umiddelbar nærhet til jordingen at jord ikke lenger er 0, men 100 V. Dette gjelder alle element som er koblet til jord inne i testburet, og kan føre til store overspenninger.



### 8.4.3 Mulige løsninger for å få oppsettet til å fungere.

Det finnes flere forslag til å få kretsen til å beskytte kildene.

- Motstand i serie med prøveobjektet for å redusere strømmen i gjennomslagsøyeblikket.
- Slå av styrestrømmen til IGBT-omformeren.
- Oppgradere målekortet til et kort med raskere samplingshastighet.
- Legge egen jording fra kulegapet, for å minske hopp i jordpotensialet.
- Gjøre kapasitansen i jordingen minst mulig.

Den første løsningen for at oppsettet skal fungere er allerede implementert i oppgaven, uten å være prøvd ut i praksis. Det er å sette en motstand i serie med prøveobjektet mellom kondensatoren og prøveobjektet. Dette fører til at det vil bli en reduksjon av strøm i det gjennomslaget skjer. Det vil også bli en spenningsdeling hvor en del av spenningen vil legge seg over motstanden. I gjennomslagsøyeblikket vil det ligge en spenning på 100 kV over kabelen. Denne spenningen vil ikke begrenses av motstanden, men påfølgende bølger vil dempes.

En mulig løsning vil være å slå av styrestrømmen til IGBT-omformeren i gjennomslagsøyeblikket. Dette kan gjøres elektronisk og kan skje momentant, ikke nødvendig å vente på null gjennomgang.

Ved å få tak i et kretskort til dataprogrammet med høyere samplingshastighet kan tiden det tar fra gjennomslaget skjer til kretsen blir brutt reduseres. Det kortet som er brukt nå har en samplingsfrekvens på 10 kHz. Dette gjør, ved en frekvens på 20 kHz, tas det bare måling hver 2. periode, dermed kan det gå to perioder før kretsen finner ut at det er en kortslutning, noe som kan være i seneste laget.

Ved å legge en egen jording fra kulegapet til jord kan jordpotensialet begrenses for resten av kretsen. Slik skapes en lengre avstand som strømmen må gå før den eventuelt kan gå tilbake i kretsen igjen.

Kapasitansen i overgangen til jord er blitt gjort så liten som mulig, ved hjelp av blant annet kopperfolie. Dette gjøres for å minimere overgangsmotstanden til jord og hindre hopp i jordpotensialet.

Utenom disse forslagene kommer det i tillegg forslag som å bruke utstyr som tåler mer overspenning, da spesielt IGBT-omformeren, forandre på oppsettet, slik at det kanskje ikke inneholder så mye elektronikk. Dette er da forslag som viker en god del fra det originale oppsettet og er ikke lagt vekt på her.



Det endelige oppsettet har en motstand i serie med spenningskilden for å dempe strømmen ved gjennomslag, dette hadde ikke den opprinnelige kretsen.

## 10 Forslag til videre arbeid

---

Forslag til videre arbeid tar for seg emner og oppgaver det ikke ble tid til å gjøre gjennom denne rapporten. Det gir også en god pekepinne på hvor det kan være lurt å starte hvis det er ønskelig å videreutvikle oppgaven til senere bruk.

- Den endelig designede kretsen virker foreløpig bare i teorien da det ikke er gjort forsøk med denne.
- Sørge for at alle kilder er tilstrekkelig beskyttet slik at utstyret tåler påkjenning ved gjennomslag.
- Finne en metode for å slå av IGBT-omformerer i gjennomslagstidspunktet. Denne kan slås av elektronisk som igjen åpner for at det kan skje momentant.
- Gjøre flere forsøk på forskjellige kabler for å finne sammenhenger, slik at flere konklusjoner, om hvordan AC-spenning og DC-spenning med transient hører sammen, kan trekkes.
- Eventuelt gjør forsøk som ikke fører til gjennomslag, noe den opprinnelige kretsen fungerer bra til.

## 11 Referanseliste

---

- [1] P. I. Nodeland "Design av en høyfrekvent transformator for testing av HVDC kabler for flytende vindturbiner." Prosjektoppgave NTNU [2009]
- [2] S. Merier, S. Norrga, H. -P. Nee: "New voltage source converter topology for HVDC grid Connection of offshore Wind Farms", *Publikasjon fra Royal Institute of Technology Department of Electrical Engineering* [2004]  
[http://www.ee.kth.se/php/modules/publications/reports/2004/IR-EE-EME\\_2004\\_013.pdf](http://www.ee.kth.se/php/modules/publications/reports/2004/IR-EE-EME_2004_013.pdf)
- [3] L. P. Lazaridis: "Economic comparison of HVAC and HVDC solutions for large offshore wind farms under special consideration of reliability". *Masteroppgave. Royal Institute of Technology, Stockholm* [2005]
- [4] Kart over det norske distribusjonsnett:  
[http://www.geni.org/globalenergy/library/national\\_energy\\_grid/norway/norwegian\\_nationalelectricitygrid.shtml](http://www.geni.org/globalenergy/library/national_energy_grid/norway/norwegian_nationalelectricitygrid.shtml)
- [5] K. Sørbrink, P. L. Sørensen, E. Joncquel, D. Woodford: "Feasibility study regarding integration of the Læsø syd 160 MW wind farm using VSC transmission" [2002]  
<http://www.electranix.com/Papers/CIGRE-2001-VSCWind.pdf>
- [6] T. Ackermann: "Wind Power in Power Systems" [2005]
- [7] L. Weimers: "Bulk power transmission at extra high voltages, a comparison between transmission lines for HVDC at voltages above 600 kV DC and 800 kV AC"  
[http://library.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/56aef360ec16ff59c1256fda004aeaec/\\$File/04MP0274%20Rev.%2000.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/56aef360ec16ff59c1256fda004aeaec/$File/04MP0274%20Rev.%2000.pdf)
- [8] R. Boinne: "HVDC Submarine Cables" Masteroppgave NTNU [2007]
- [9] M. Molinas, TET 4525 - Elektrisk energi, fordypningsevne ELK-23 – Kraftelektronikk I fremtidens kraftsystemer: Leksjon 2, s 15 [2009]
- [10] M. Molinas, TET 4525 - Elektrisk energi, fordypningsevne ELK-23 – Kraftelektronikk I fremtidens kraftsystemer: Leksjon 2, s 37 [2009]
- [11] Siemens: "The smart way, HVDC plus one step ahead"  
<http://w3.energy.siemens.com/cms/00000013/aune/Documents/HVDCPLUS.pdf>
- [12] Siemens: "Prospects of multilevel VSC converter technologies"  
[http://www.ptd.siemens.de/AEIT08\\_Pres2.pdf](http://www.ptd.siemens.de/AEIT08_Pres2.pdf)

- 
- [13] ABB: "ABB review 3/2008 – The corporate technical journal of the ABB group" <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK104295D2810&LanguageCode=en&DocumentPartID=&Action=Launch&IncludeExternalPublicLimited=True>
- [14] P. Boonchiam, N. Mithulanathan: "Diode-clamped Multilevel Voltage Source Converter for Medium Voltage Dynamic Voltage Restorer" <http://www.energy-based.nrct.go.th/Article/Ts-3%20diode-clamped%20multilevel%20voltage%20source%20converter%20for%20medium%20voltage%20dynamic%20voltage%20restorer.pdf>
- [15] T. M. Blooming, D. J. Carnovale: "Application of IEEE STD 519-1992 Harmonic Limits"
- [16] L. Xu, L. Yao, C. Sasse "Grid integration of large DFIG-Based wind farms using vsc transmission" *IEEE Transactions on Power Systems*, vol 22. issue 3. Aug. 2007
- [17] S-K Kim, E-S. Kim, J-Y. Yoon, H-Y Lim "PSCAD/EMTDC Based Dynamic Modeling and Analysis of a Variable Speed Wind Turbine" IEEE
- [18] C. H. Chien, R. W. G. Bucknall "Analysis of Harmonics in Subsea Power Transmission Cables Used in VSC–HVDC Transmission Systems Operating Under Steady-State Conditions" IEEE
- [19] K. Eriksson ABB "Operational experience of HVDC Light"
- [20] S. Grzybowski, J. Fan, Electrical breakdown characteristics of the xlpe cables under AC, DC and pulsating voltages  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=617618>
- [21] Produktinformasjon ferritt-materiale N87:  
[http://www.epcos.com/web/generator/Web/Sections/ProductCatalog/Ferrites/Materials/PDF/PDF\\_\\_N87,property=Data\\_\\_en.pdf;/PDF\\_N87.pdf](http://www.epcos.com/web/generator/Web/Sections/ProductCatalog/Ferrites/Materials/PDF/PDF__N87,property=Data__en.pdf;/PDF_N87.pdf)
- [22] Arne Nysveen, Tet 4195 - High Voltage Equipment "Power transformers" kapittel 4
- [23] E. Ilstad, TET 4160 - Electric Power Engineering.
- [24] U. H. Nilsson: "The use of model cables for evaluation of the electrical performance of polymeric power cable materials". IEEE

- 
- [25 ] <http://datasheet.octopart.com/CG2-470L-SRC-Devices-datasheet-1946.pdf>
- [26] [Http://download.siliconexpert.com/pdfs/2009/01/15/pemco\\_a/manual/ltf/ds/littelfuse\\_tvs-diode\\_1.5ke.pdf](Http://download.siliconexpert.com/pdfs/2009/01/15/pemco_a/manual/ltf/ds/littelfuse_tvs-diode_1.5ke.pdf)
- [27] F. Mauseth, E. Ildstad "Quality Control of Extruded HVDC Cables: Low Frequency Endurance Testing of Model Cables with Contaminations" Planlagt publisert ICHVE 2010, New Orleans 10-14. Okt 2010.

## 12 Vedlegg

---

Vedlegg 1: En cd med følgende innhold:

- Excel-arket brukt for å beregne transformatoren.
- Dataprogrammet brukt for å styre oppsettet.
- Excel-arket brukt for å beregne motstanden i kretsen.
- En kopi av prosjektoppgaven.
- En digital kopi av masteroppgaven.