

## Forord

---

Målet med oppgaven er å finne den transiente spenningen som en HVDC-sjøkabel blir utsatt for, samt å designe en krets som genererer denne spenningen i laboratoriet. Det skal være mulig å teste forskjellige spenningsformer på en modellkabel.

Oppgaven er en prosjektoppgave ved NTNU og er gjennomført ved instituttet for elkraftteknikk.

Jeg vil få takke veileder Frank Mauseth for at du hjalp meg å designe den endelige kretsen og ikke minst din kontinuerlig og bra veiledning og 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 at du hjalp meg i gang med prosjektoppgaven ved å tilby meg sommerjobb og har tatt deg tid til å besvare spørsmål jeg har kommet med i løpet av høsten.

Nøkkelen til suksess er å spise lunsj på samme tid som de fleste andre spiser frokost.

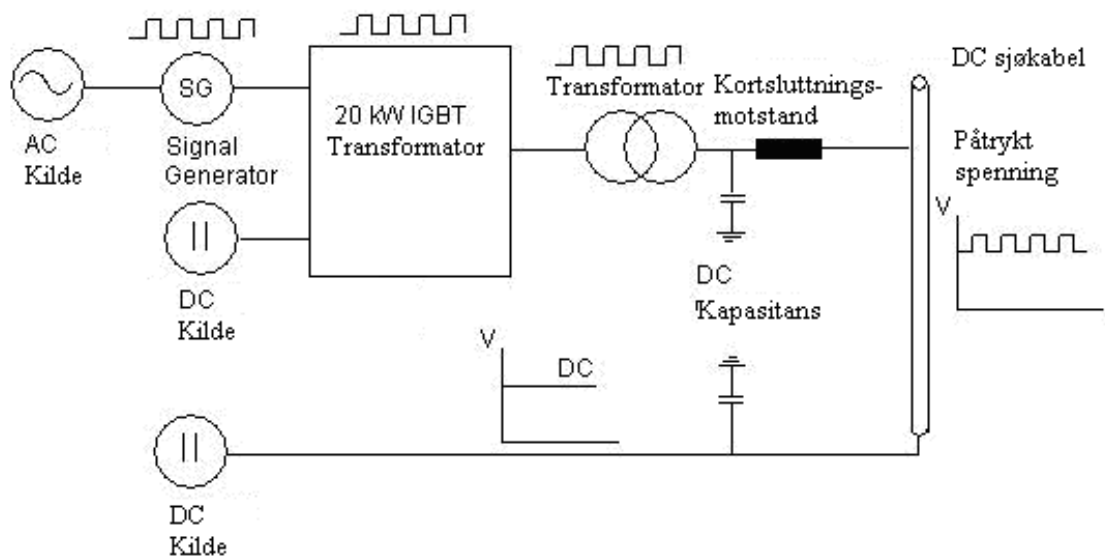
## Sammendrag

Målet med denne rapportoppgaven er å gjennomføre en litteraturundersøkelse, utvikle et testoppsett samt designe en transformator som brukes i testoppsettet. Designet av transformatoren har kommet til som et mål underveis i oppgaven som et resultat av det valgte testoppsettet.

Bakgrunnen for dette målet, er ønske om å teste innvirkningen transiente spenninger har på kryssbundne polyetylen (XLPE, på norsk PEX) kabler som opererer i et høyspent likespenningssystem (HVDC). Spenningen overføres til land fra en flytende vindmøllepark til havs.

For å finne ut hva slag spenning kabelen utsettes for ble en litteraturundersøkelse gjennomført. Denne undersøkelsen viste at spenningen vil variere i området  $\pm 0,1$  pu, med en frekvens på 1-4 kHz. Det er ønskelig å ha muligheten til å teste helt opp til 20 kHz, og testingen vil foregå på en modellkabel med en spenning på  $100 \text{ kV} \pm 10 \text{ kV}_{\text{rms}}$ .

For å generere den ønskede spenningen er det designet en krets som bruker en 100 kV DC-spenning til å produsere likespenningen. Denne spenningen settes i serie med en IGBT-omformer, styrt av en signalgenerator, hvor utgangsspenningen fra omformereren forsterkes av en selvdesignet transformator som leverer en AC-spenning på  $10 \text{ kV}_{\text{rms}}$ , som vist i figur 1.



**Figur 1 – Testoppsett til laboratorieforsøk der det skal genereres en høy spenning med en overliggende høyfrekvent transient.**

Transformatoren fra figur 1 er selvdesignet og skal produseres neste semester. Den vil bestå av en U93/152/30 kjerne laget av ferritt-materialet N87. Vindingene på både primær- og sekundærside er litztråd hhv  $15 \times 0,1 \text{ mm}$  og  $800 \times 0,071 \text{ mm}$ . Transformatoren vil, med en inngangsspenning på  $350 \text{ V}_{\text{rms}}$ , kunne levere en spenning ut på  $10 \text{ kV}_{\text{rms}}$  med en frekvens på 20 kHz.

# Innholdsfortegnelse

<b>FORORD .....</b>	<b>I</b>
<b>SAMMENDRAG.....</b>	<b>II</b>
<b>INNHALDSFORTEGNELSE .....</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
1.2 HVA ER BAKGRUNNEN FOR ARBEIDET SOM BLIR GJORT? .....	1
<b>2. HISTORIEN TIL HVDC-OVERFØRING .....</b>	<b>3</b>
2.1 HVORDAN ET HVDC-VINDMØLLESYSTEM MED SjøKABEL VIRKER .....	3
2.1.1 Fordeler med HVDC- i forhold til HVAC-overføring.....	3
2.1.2 Ulemper.....	7
<b>3. BAKGRUNN .....</b>	<b>8</b>
3.1 KABEL.....	8
3.2 KABELISOLASJON .....	8
3.3 TRE FORSKJELLIGE OVERFØRINGSTEKNOLOGIER I BRUK: .....	9
3.3.1 Høyspennings likestrøm med linjekommuterende omformere (LCC). .....	9
3.3.2 HVDC VSC (Høyspennings likestrøm med spenningskilde omformere).....	10
3.3.3 Multinivå veksling med HVDC VSC .....	12
3.3.4 Forskjellen mellom HVDC klassisk LCC og HVDC VSC.....	13
<b>4. TRANSFORMATORTEORI.....</b>	<b>14</b>
4.1 Lekkfluks.....	15
4.2 Varmemotstand.....	16
4.3 Virvelstrømtap i magnetiske kjerner.....	17
4.4 Magnetisk flukstetthet .....	17
4.5 Strømtetthet.....	18
4.6 Spenningsverdi .....	19
4.7 Vindingstype .....	20
4.8 Kjernetype.....	20
<b>5. RESULTAT FRA LITTERATURUNDERSØKELSEN .....</b>	<b>23</b>
<b>6. TESTOPPSETT .....</b>	<b>26</b>
6.1 HØYSPENNINGSOMFORMER AV TYPE TREK 20/20.....	26
6.2 TRANSFORMERT IGBT-OMFORMER I SERIE MED EN 100 kV DC-KILDE .....	28
<b>7. MÅLEUTSTYR .....</b>	<b>30</b>
7.1 5 V SIGNALGENERATOR .....	30
7.2 IGBT (INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR).....	30
7.3 HØYSPENNINGSFORSTERKER (TREK 20/20) .....	31
7.4 FØLGENDE UTSTYR ER OGSÅ BLITT BRUKT I LABORATORIET .....	31
<b>8. RESULTATER BEREGNINGER.....</b>	<b>32</b>
8.1 UTREGNING TRANSFORMATOR: .....	32
8.2 UTREGNING VINDINGSKONSTRUKSJON.....	34

<b>9. DISKUSJON</b> .....	<b>36</b>
9.1 LITTERATURUNDERSØKELSEN.....	36
9.2 VALGT KRETSOPPSETT .....	36
9.2.1 Signalgenerator som mater en høyspenningsomformer av typen TREK 20/20.....	37
9.2.2 Signalgenerator som mater en transformert IGBT-omformer i serie med en 100 kV DC-kilde .....	38
9.3 TRANSFORMATORVALG.....	39
9.3.1 Kjerne .....	39
9.3.2 Vinding .....	39
<b>10. KONKLUSJON</b> .....	<b>41</b>
<b>11. FORSLAG TIL VIDERE ARBEID</b> .....	<b>42</b>
<b>12. REFERANSELISTE</b> .....	<b>43</b>
<b>13. VEDLEGG</b> .....	<b>46</b>

## Tabelliste

TABELL 3. 1 - FORSKJELLEN MELLOM HVDC LCC OG HVDC VSC .....	13
TABELL 6. 1 – HØYSPENNINGSOMFORMEREGENSKAPER TREK 20/20 .....	26
TABELL 7. 1 - HØYSPENNINGSOMFORMEREGENSKAPER.....	31
TABELL 8. 1 - ØNSKET SPENNING OG FREKVENNS .....	32
TABELL 8. 2 - PÅTRYKT STRØM, SPENNING OG FREKVENNS .....	32
TABELL 8. 3 - SAMMENDRAG AV DE BEREGNEDE VERDIENE FOR PRIMÆR OG SEKUNDÆR SIDE AV TRANSFORMATOREN .....	33
TABELL 8. 4 - SAMMENDRAG AV ALLE UTREGNEDE TRANSFORMATORVERDIER.....	34
TABELL 8. 5 - ELEKTRISK FELTSTYRKE.....	34
TABELL 8. 6 - VINDINGSFORHOLD FOR TRANSFORMATOREN .....	35
TABELL 9. 1 – OVERSIKT OVER VINDINGENE I TRANSFORMATOREN.....	40

## Figurliste

FIGUR 1 – TESTOPPSETT TIL LABORATORIEFORSØK DER DET SKAL GENERERES EN HØY SPENNING MED EN OVERLIGGENDE HØYFREKVENT TRANSIENT.....	II
FIGUR 1. 1 – GENERELL SKISSE AV EN VINDPARK MED OVERFØRINGSSYSTEM .....	2
FIGUR 2. 1 – VSC HVDC-OVERFØRINGSSYSTEM .....	3
FIGUR 2. 2 – DC- OG AC-OVERFØRINGSKABLER.....	4
FIGUR 2. 3 – SPENNINGSKARAKTERISTIKK HVAC KONTRA HVDC.....	4
FIGUR 2. 4 – DET ØKONOMISKE LIKEPUNKTET FOR HVDC KONTRA HVAC.....	5
FIGUR 2. 5 – FORSKJELL I LEDERANTALL VED HVDC OG HVAC .....	6
FIGUR 2. 6 – OVERFØRT EFFEKT MÅLT ETTER DISTANSE .....	7
FIGUR 3. 1 - HVDC LIGHT SJØKABEL .....	8
FIGUR 3. 2 – FORENKLET BLOKKDIAGRAM AV HVDC LCC OVERFØRINGSTEKNOLOGI .....	9
FIGUR 3. 3 – EKVIVALENTKRETS AV EN HVDC LCC TRANSMISJONSTEKNOLOGI.....	9
FIGUR 3. 4 – TYRISTORKRETS MED TILHØRENDE STRØM- OG SPENNINGSKARAKTERISTIKK .....	10
FIGUR 3. 5 – FORENKLET BLOKKDIAGRAM AV HVDC VSC OVERFØRINGSKARAKTERISTIKK .....	10
FIGUR 3. 6 – DETALJERT BESKRIVELSE AV ET HVDC-OVERFØRINGSSYSTEM MED EN IGBT- SPENNINGSKILDEROMFORMER.....	11
FIGUR 3. 7 – SPENNINGSKILDE TEKNOLOGI MED PULSBREDDEMODULASJON (PWM) .....	11
FIGUR 3. 8 – UAVHENGIG KONTROLL AV AKTIV OG REAKTIV EFFEKT I ALLE FIRE KVADRANTER FOR VSC BASERT HVDC- OMFORMER.....	12
FIGUR 3. 9 – MULTINIVÅ VEKSLING .....	12
FIGUR 4. 1 – MODELL AV EN TRANSFORMATOR .....	14
FIGUR 4. 2 – SKISSE OVER LEKKFLUKSEN I EN TRANSFORMATOR.....	15
FIGUR 4. 3 – SKISSE OVER SKINNEEFFEKT I EN LEDER .....	17
FIGUR 4. 4 – TYPE 1 LITZTRÅD .....	20
FIGUR 4. 5 – SKISSE AV LEDERLENGDEN .....	20
FIGUR 4. 6 – OVERSIKT OVER KJERNEAREAL OG VINDINGSOPPSETT.....	21

FIGUR 5. 1 – SPENNINGSKARAKTERISTIKK VSC .....	23
FIGUR 5. 2 – SPENNING GENERERT AV EN VINDPARK .....	24
FIGUR 5. 3 – SPENNINGEN GITT AV EN VINDMØLLE UTEN GIR MED EN PWM VEKSLEFREKVENNS PÅ 3.6 KHZ .....	24
FIGUR 5. 4 – HARMONISKE UNDERSØKELSER I ET HVDC VSC SYSTEM VEKSLEFREKVENNS PÅ 250 HZ .....	24
FIGUR 5. 5 – SPENNINGEN OVER EN DC-KABEL I EN PCS 6000 2x5 MW VINDMØLLE MED EN ”E.ON FLICKER” .....	25
FIGUR 5. 6 – SPENNINGEN OVER EN DC-KABEL I EN PCS 6000 2x5 MW VINDMØLLE MED EN EKSTREM NETTFEIL .....	25
 FIGUR 6. 1 – ØNSKELIG SPENNING SOM SKAL PÅTRYKES SjøKABELEN .....	26
FIGUR 6. 2 – PLOTT AV UTGANGSSPENNING FRA HØYSPENNINGSSOMFORMEREN VED FORSKJELLIG FREKVENNS .....	27
FIGUR 6. 3 – PLOTT AV INNGANGSSPENNING OG UTGANGSSPENNING FRA HØYSPENNINGSSOMFORMEREN VED FORSKJELLIG FREKVENNS.....	27
FIGUR 6. 4 – SONDE FOR Å MÅLE HØY SPENNING PÅ OSCILLOSKOP .....	28
FIGUR 6. 5 – BØLGEFORMEN FRA SIGNALGENERATOREN OG IGBT-OMFORMEREN .....	28
FIGUR 6. 6 – TESTOPPSETT TIL LABORATORIEFORSØK DER DET SKAL GENERERES EN HØY SPENNING MED EN OVERLIGGENDE HØYFREKVENT TRANSIENT.....	29
 FIGUR 7. 1 – SIGNALGENERATOR.....	30
FIGUR 7. 2– BILDE AV HØYSPENNINGSFØRSTERKEREN FRA TREK .....	31
 FIGUR 8. 1 – KJERNEDIMENSJON AV TRANSFORMATOREN .....	33
 FIGUR 9. 1 – PLOTT AV INNGANGSSPENNING OG UTGANGSSPENNING FRA HØYSPENNINGSSOMFORMEREN VED FORSKJELLIG FREKVENNS.....	37
FIGUR 9. 2 – TESTOPPSETT TIL LABORATORIEFORSØK DER DET SKAL GENERERES EN HØY SPENNING MED EN OVERLIGGENDE HØYFREKVENT TRANSIENT.....	38
FIGUR 9. 3 – BØLGEFORMEN FRA SIGNALGENERATOREN OG IGBT-OMFORMEREN.....	38
 FIGUR 10. 1 – TESTOPPSETT TIL LABORATORIEFORSØK DER DET SKAL GENERERES EN HØY SPENNING MED EN OVERLIGGENDE HØYFREKVENT TRANSIENT.....	41

# 1. Innledning

---

## *1.1 Hva er formålet med arbeidet?*

Formålet med denne oppgaven er:

- Gjennomføre en litteraturstudie for å undersøke hva slags spenning en HVDC PEX sjøkabel utsettes for.
- Utarbeide et testoppsett for laboratoriet, slik at det er mulig å få testet transiente spenninger på modellkabler.
- Designe en transformator som leverer både høy spenning og høy frekvens.

I kapittel 2 og 3 er det en kort gjennomgang av teori til hhv HVDC-overføring, kabler og isolasjon. Dette gjøres for å bedre forståelsen av oppgaven og gi en forklaring til senere valg. Kapittel 4 tar for seg teorien til transformatoren som beregnes i kapittel 8.

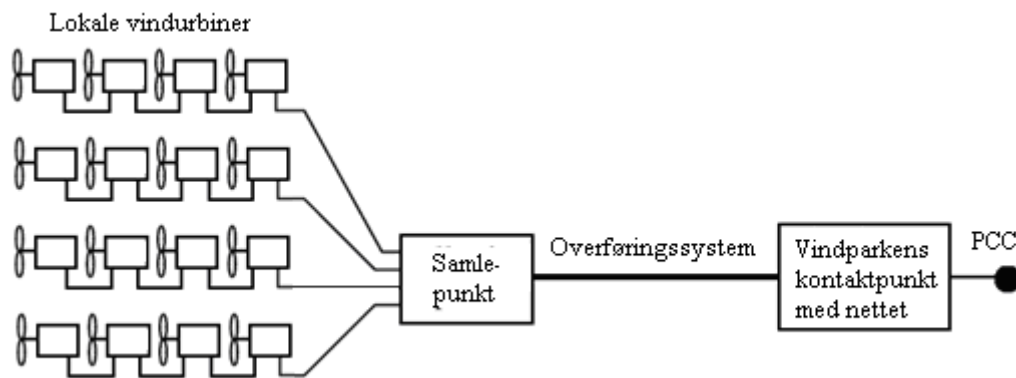
Kapittel 5 tar for seg resultatene fra forundersøkelsen og kapittel 6 viser de forskjellige oppsettene som ble testet.

I kapittel 9 diskuteres resultatene. De forskjellige resultatene blir kommentert og gjort rede for. Deretter følger konklusjonen i kapittel 10 og et kort forslag til videre arbeid blir presentert i kapittel 11. Spesielt viktig her er å se på overgangen fra å konstruere kretsen til å gjøre faktiske målinger som blir hovedformålet neste semester i forbindelse med hovedoppgaven.

Sist i oppgaven ligger det vedlagt, i vedlegg 1, en CD med det utviklede Excel-arket som brukes til å beregne alle verdiene for transformatoren. Det er også lagt ved en elektronisk versjon av oppgaven på samme CD-en.

## *1.2 Hva er bakgrunnen for arbeidet som blir gjort?*

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 distribusjonsnettet [1]. Figur 1.1 viser hvordan en skisse av den tenkte vindparken ser ut. Her er det et samlepunkt for alle møllene og et system som overfører effekten til land for å kobles til strømmettet.



**Figur 1. 1 – Generell skisse av en vindpark med overføringssystem [2]**

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 [3]. 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 å koble på vekselspenningsnettet (AC). Ved å bruke HVDC-overføring kan man dermed slippe å måtte belaste AC-nettet for mye og unngå at dette må forsterkes.

AC-kabler generer reaktiv effekt som igjen begrenser den maksimale kabellengden. Dette er kjent som den kritiske AC-kabellengden [4]. 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 [5]. Som nevnt tidligere er AC-kabelens lengde begrenset på grunn av reaktiv effekt, over en gitt lengde er det nødvendig med en kompenserende enhet. Dette er spesielt kostbart og vanskelig for sjøkabler.



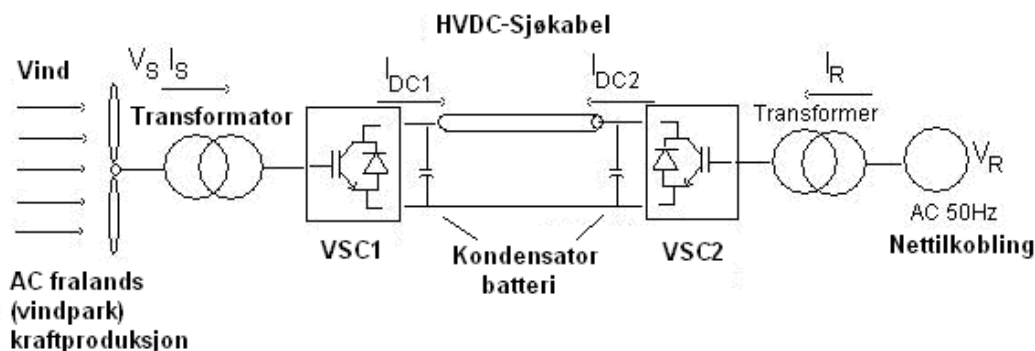
## 2. Historien til HVDC-overføring

Oscar von Miller, en tysk ingeniør, arrangerte 16. september 1882 den første elektrotekniske utstillingen i Tyskland. Sammen med partneren Marcel Deprez lyktes de for første gang i historien i å overføre en likestrømspenning på 2000 V med 2,5 kW effekt fra en dampmaskin nær Miesbach og 57 km gjennom en likestrøms luftledning til glasspalasset i München [6].

I 1889 ble en rekke DC-motorgeneratorer koblet i serie, for å produsere høyspent likestrøm. Denne likestrømmen, på 14 kV med 630 kW effekt, ble overført over en distanse på 120 km av et firma, Acquadotto de Ferrari-Gallier, som holdt til i Italia. Dette systemet ble utformet av den sveitsiske ingeniøren Rene Thury, og refereres fremdeles til som et "Thury System". I starten var det store problemer med tap, og anleggene krevde mye vedlikehold. Det var ikke før kraftelektronikkens hjelpemidler, som kvikksølvslusbueventil og senere halvlederutstyr som tyristor, MOSFET og IGBT kom på markedet, at det ble mulig med praktisk manipulasjon av likestrømmene [7]. Dette gir en liten innføring i hvordan det hele startet, nærmere forklart i artikkelen "100 years of high voltage DC links" [8].

### 2.1 Hvordan et HVDC-vindmøllesystem med sjøkabel virker

Vindmøllene produserer elektrisk kraft i form av en trefase vekselspanning. Denne spenningen konverteres til en likespenning som kan påtrykkes sjøkabelen, for så å konverteres tilbake til en vekselspanning på andre siden. Dette er vist i figur 2.1, som viser et HVDC overføringssystem.



Figur 2. 1 – HVDC-overføringssystem

I figur 2.1 vil vinden produsere en spenning som variere med vinden. Blåser det ujevnt, vil vindparken generere en ujevn spenning. Denne oppgaven tar for seg det som skjer mellom VSC1 (spenningskildeomformer 1) og VSC2 (spenningskildeomformer 2).

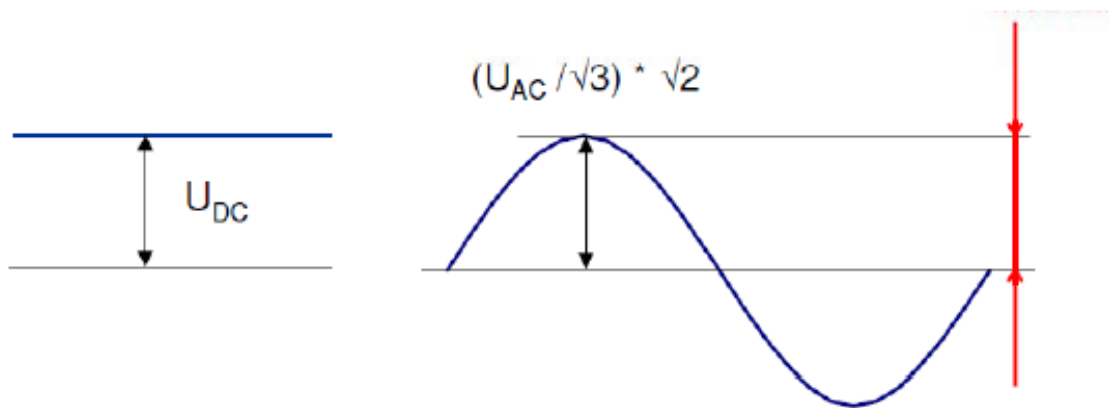
#### 2.1.1 Fordeler med HVDC- i forhold til HVAC-overføring

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 2.2. vises det at det kan overføres mer effekt med HVDC enn med HVAC.



Figur 2. 2 – DC- og AC-overføringskabler



Figur 2. 3 – Spenningskarakteristikk HVAC kontra HVDC

Fra figur 2.3 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:

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

Noe som tilsier at en kabel som kan overføre  $380 \text{ kV}_{AC}$  kan overføre  $310 \text{ kV}_{DC}$

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:

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

Likeledes effekten for HVAC:

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

Noe som gir en sammenheng av effekten på:

$$P_{DC} = \sqrt{2}P_{AC} \quad [2.4]$$

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:

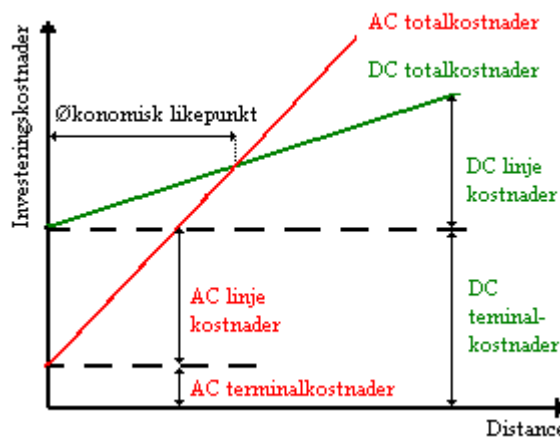
$$I_{DC} = (1/\sqrt{2})I_{AC} \quad [2.6]$$

vil det bli en tapsforskjell som følger:

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

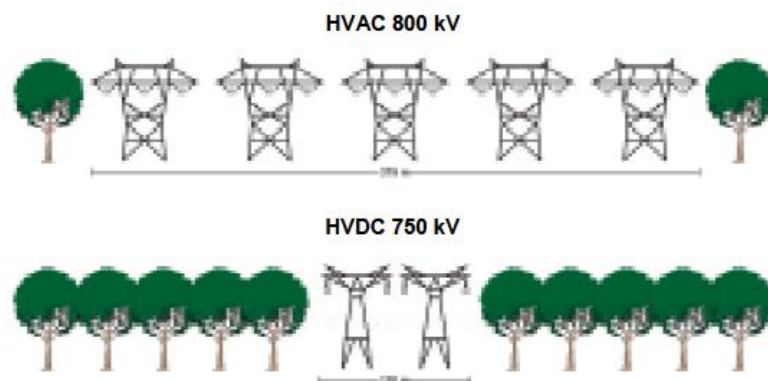
Det vil være dobbelt så mye tap i AC-kabelen som i DC-kabelen når det bare tas hensyn til kabelen alene.

Dette gir et bilde på det økonomiske likepunktet for HVAC og HVDC som kan sees i figur 2.4.



Figur 2. 4 – Det økonomiske likepunktet for HVDC kontra HVAC

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

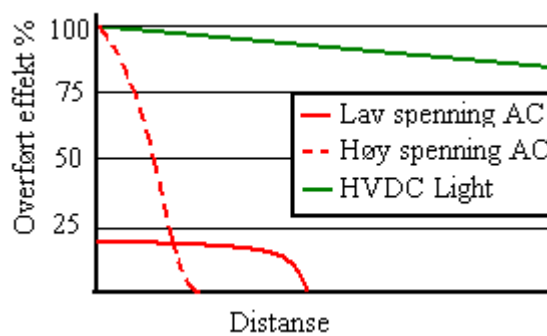


**Figur 2. 5 – Forskjell i lederantall ved HVDC og HVAC [9]**

Det finnes en rekke applikasjoner hvor HVDC er mer effektiv enn HVAC-overføring [7]:

- 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 strømnnett 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 strømnnett 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 2.5.
- Ved å koble sammen nett med forskjellig strøm 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 ikke være noen vekslende spenning, utenom på starten og slutten av kabelen. 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 2.6



Figur 2. 6 – Overført effekt målt etter distanse [10]

HVDC kan også hindre underliggende feil fra å forplante seg fra en del av et utstrakt strømmnett 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.

### 2.1.2 Ulemper

De viktigste ulempene ved HVDC ligger i omforming, vekslings, 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 veksling.
- 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 deler til få system. 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 utvindingsskurve enn HVDC

## 3. Bakgrunn

---

### 3.1 Kabel

En kabel består vanligvis av følgende deler [11]:

- En leder som skal motstå både drift og feilstrømmer.
- Isolasjon som skal motstå både operative og transiente spenninger samt termisk belastning.
- Lederskjerm og isolasjonsskjerm, som skal sikre en jevn og god kavitasjonsfri overføring, mellom lederen og isolasjonen, og mellom isolasjonen og metallskjermen.
- En jordet metallskjerm.
- Armering for å takle de vanligste formene for mekanisk påkjenning.
- En eller flere utvendige kapper, for å styrke kabelen mekanisk og forhindre fuktighet i å trenge inn.



Figur 3. 1 - HVDC light sjøkabel [12]

### 3.2 Kabelisolasjon

Helt siden starten av kabelproduksjonen har papir vært brukt som isolasjon. Fra rundt 1960 har polymerisolasjon tatt gradvis over. I starten var denne type isolasjon tilgjengelig for 12- og 24 kV systemer, men har gradvis blitt tilgjengelig for flere og flere systemer helt opp til 525 kV.

Hovedsakelig finnes det tre forskjellige kabel typer, hvor hovedforskjellen ligger i isolasjonsmaterialet.

- *Masseimpregnert kabel*  
Masseimpregnert papir isolasjon hvor impregneringen ikke er flytende ved høyeste kontinuerlige driftstemperatur.
- *Lavtrykks oljefylt kabel*

Impregnert papir isolasjon hvor papiret blir impregnert av olje fra et rør i kjernen av kabelen

- *Polymerkabel.*

Polyetylen (PE), som gjennom varmebehandling med et organisk peroksid, normalt sett dicumyl peroksid, danner PEX (kryssbundet polyetyten) [13].

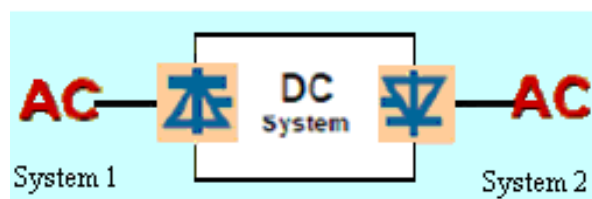
PEX-kabelen har en rekke fordeler fremfor masseimpregnerte- og PE-kabler. Den tåler høy elektrisk feltstyrke, har bedre mekanisk styrke og lengre levealder. Den er motstandsdyktig mot miljøpåvirkning, har en enkel konstruksjon og er brukervennlig. Dette er den kabelen som blir mest brukt til offshore vindparker.

### 3.3 Tre forskjellige overføringsteknologier i bruk:

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

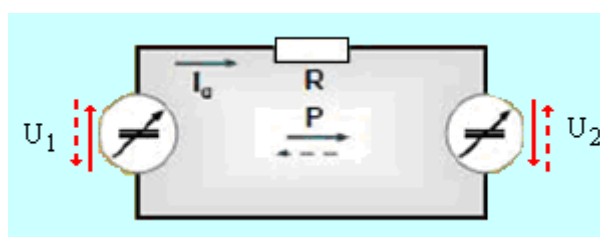
- HVAC (Høyspenning vekselstrøm)
- HVDC LCC (Høyspenning likestrøm med linjekommuterende omformere)
- HVDC VSC (Høyspenning likestrøm med spenningskildeomformere)

#### 3.3.1 Høyspennings likestrøm med linjekommuterende omformere (LCC).



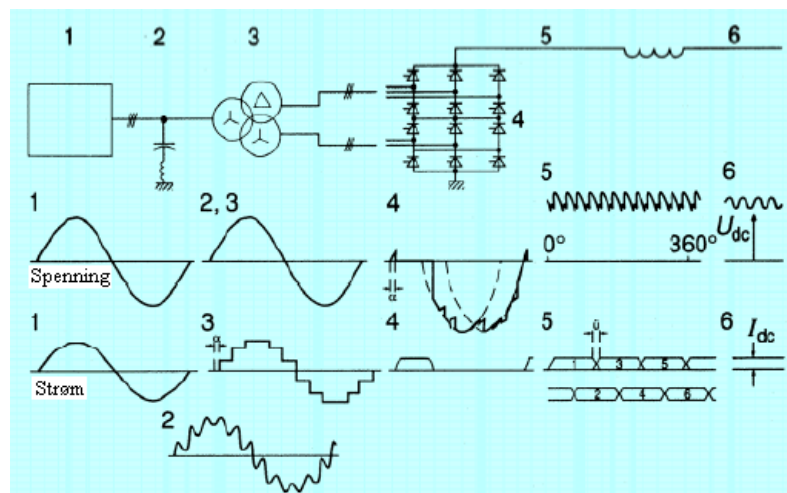
Figur 3. 2 – Forenklet blokkdiagram av HVDC LCC overføringsteknologi

Figur 3.2 viser et forenklet blokkdiagram av en HVDC LCC overføring. Her skjer omformingen ved hjelp av tyristorer som enten leder eller ikke leder, som vist i figur 3.4 (4). Figur 3.3 viser ekvivalentsskjemaet 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 3. 3 – Ekvivalentkrets av en HVDC LCC transmisjonsteknologi

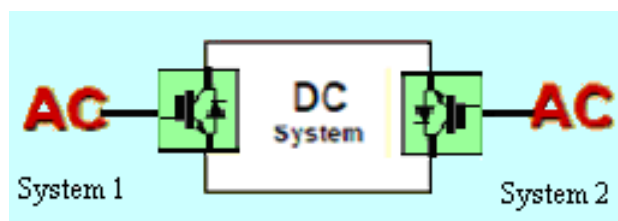
Figur 3.4 viser hvordan omformereren ser ut med alle tre fasene



Figur 3. 4 – Tyristorkrets med tilhørende strøm- og spenningskarakteristikk [14]

Fra figur 3.4 sees det hvordan den forventede spenningen ser ut etter omformereren (6), vist med en likestrømsspenning med en transient. Det er denne spenningen det fokuseres på i oppgaven.

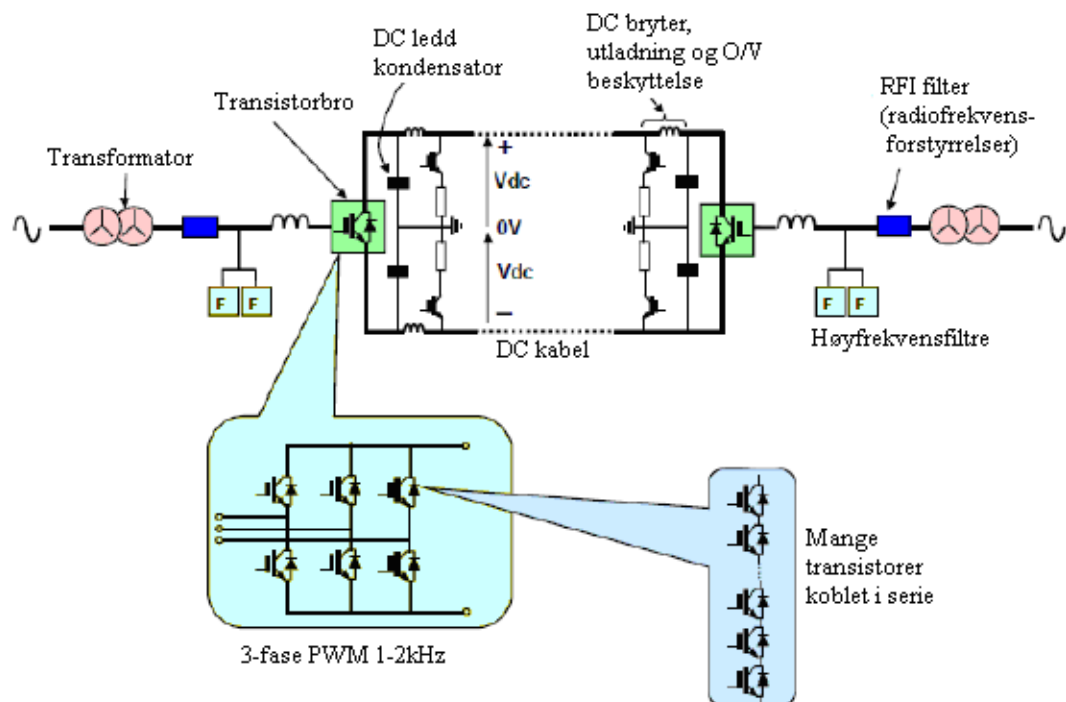
### 3.3.2 HVDC VSC (Høyspennings likestrøm med spenningskilde omformere)



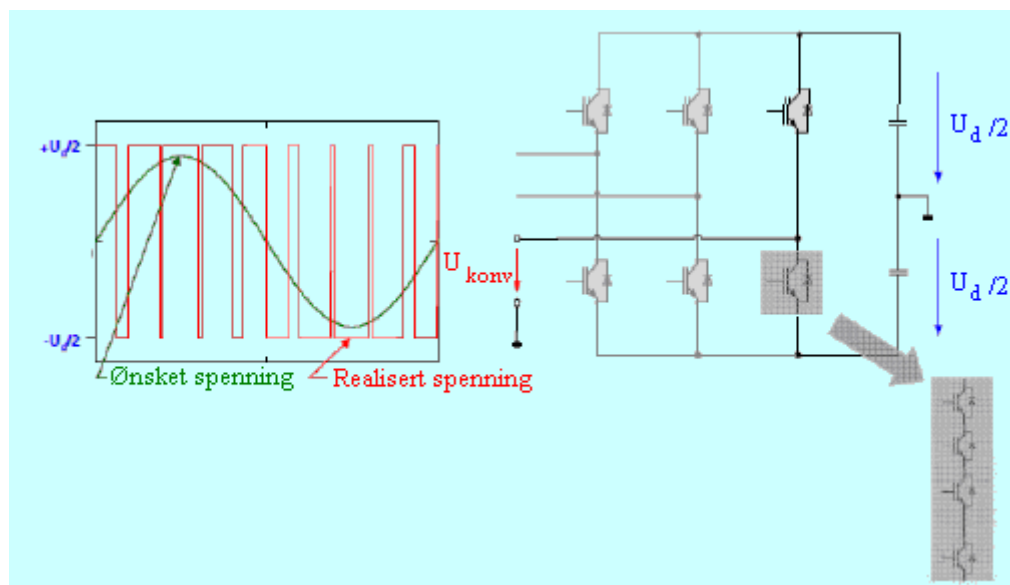
Figur 3. 5 – Forenklet blokkdiagram av HVDC VSC overføringskarakteristikk

Figur 3.5 viser et forenklet blokkdiagram av en HVDC VSC overføring. Her skjer omformingen ved hjelp av transistor broer. Figur 3.6 viser en oversikt over hvordan overføringen skjer ved hjelp VSC



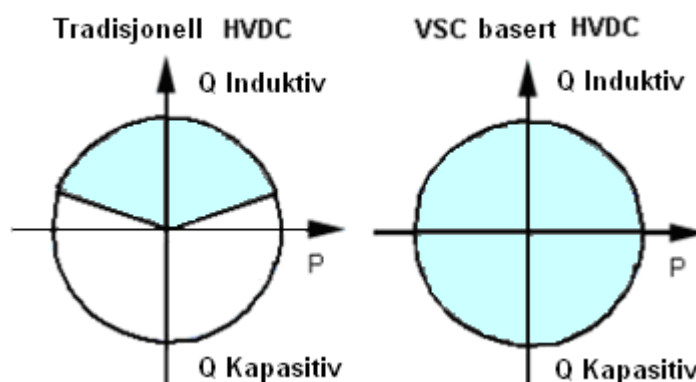


Figur 3. 6 – Detaljert beskrivelse av et HVDC-overføringssystem med en IGBT-spenningskilderomformer



Figur 3. 7 – Spenningskilde teknologi med pulsbreddemodulasjon (PWM) [15]

VSC basert HVDC bruker pulsbredde modulasjon (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 full effekt utførsel til full effekt innførsel som vist i se figur 3.8. Der forskjellen i tradisjonell og VSC basert HVDC vises.



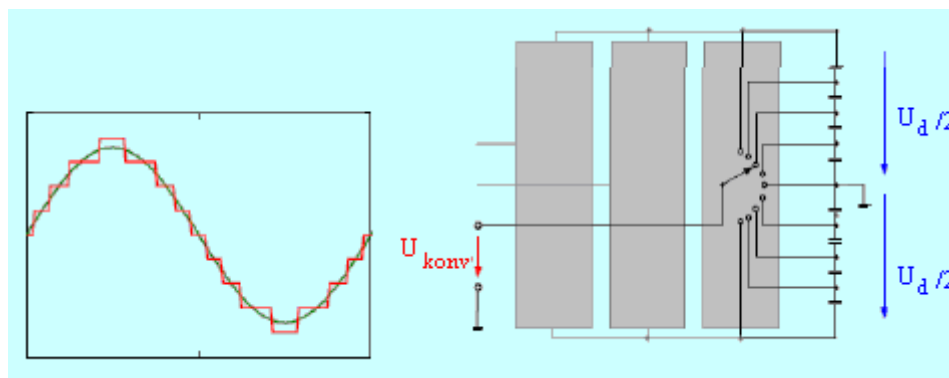
Figur 3. 8 – Uavhengig kontroll av aktiv og reaktiv effekt i alle fire kvadranter for VSC basert HVDC-omformer

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 omformer transformatoren er utstyrt med en spesiell hjelpekraftsvinding som forsyner omformerstasjonen. Ved behov kan også omformeren startes manuelt i mørkstartmodus, 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.

### 3.3.3 Multinivå veksling med HVDC VSC

Med multiveksling 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 tenkte anlegg) [16]. Den store kostnaden med HVDC-overføring er kjent som prisen på omformerne og tapene i kablene. Med flere vekslere vil prisen økes mens transientene minskes betraktelig.



Figur 3. 9 – Multinivå veksling

### 3.3.4 Forskjellen mellom HVDC klassisk LCC og HVDC VSC

Forskjellene mellom de forskjellige overføringene kan sees i tabell 3.1.

**Tabell 3. 1 - Forskjellen mellom HVDC LCC og HVDC VSC**

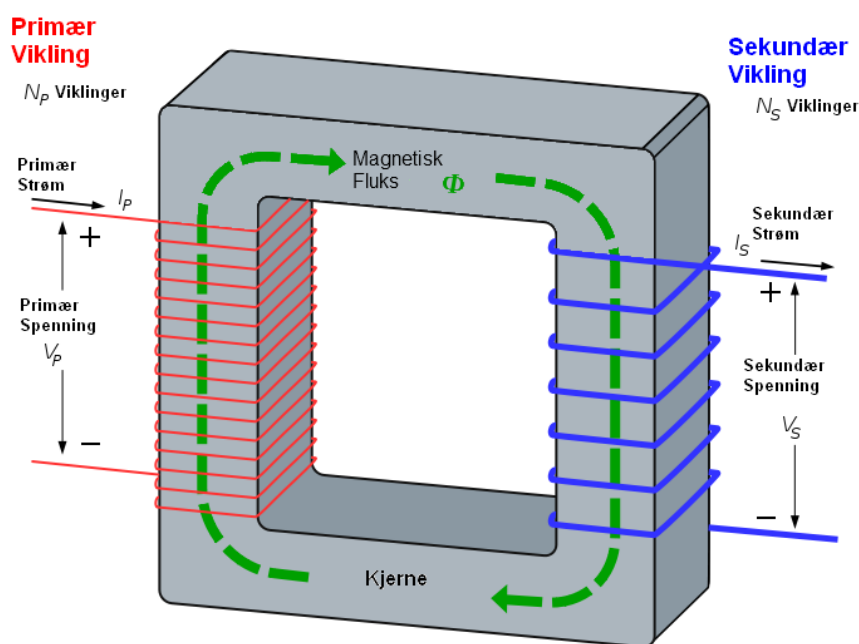
	<b>HVDC med LCC</b>	<b>HVDC med VSC</b>
Størrelse enkeltomformer	150-3000 MW	50-1200 MW
Omformer teknologi	Linjekommuterende	Selvkommuterende
Relativt volum	4-6	1
Kabeltype	Masseimpregnert	PEX/masseimpregnert
Kontrollere aktiv effekt?	Ja	Ja
Kontrollere reaktiv effekt?	Nei, bare reguleres ved omkobling	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 (vist i figur 3.8) 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 til sjøs.

Høyspennings likestrømsoverføring 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 3.7. 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 [17].

## 4. Transformorteorie

En transformator virker ved å overføre elektrisk energi fra en krets til en annen krets gjennom induktivt koblede ledere. Ved å variere strømmen som settes på den primære kretsen genereres en magnetisk fluks i kjernen, som igjen setter opp et magnetisk felt i de sekundære vindingene. Når dette magnetiske feltet forandrer seg, ved å variere strømmen i den primære kretsen, induseres en elektromotorisk energi, eller spenning, i den sekundære kretsen. Alle utregningene er her blitt gjort med utgangspunkt i boka "Power Electronics" [18], da med hovedvekt på kapittel 30.



Figur 4. 1 – Modell av en transformator

For å forstå hvordan transformatoren virker er det viktig å starte med det helt grunnleggende. Ved å ta utgangspunkt i Faraday sin induksjonslov kan det vises hvordan det hele henger sammen.

$$\begin{aligned} V_{pri} &= N_{pri} \frac{d\phi}{dt} \text{ [V] for primærsiden} \\ V_{sek} &= N_{sek} \frac{d\phi}{dt} \text{ [V] for sekundærsiden} \end{aligned} \quad [4.1]$$

Her er V spenningen på hhv primær og sekundærside. N er antall vindinger på sidene og  $\phi$  er fluksen gjennom en vinding i transformatoren.

Er vindingene lagt loddrett mht de magnetiske feltlinjene, vil fluksen være et produkt av den magnetiske feltstyrken  $B$  og arealet  $A$  den går gjennom. Arealet vil her være konstant, da det er et tverrsnitt av kjernen, mens det magnetiske feltet er tidsvarierende i henhold til magnetiseringen av den primære spolen.

I en ideell transformator vil det ikke være noen tap. Dermed vil det gå like mye fluks gjennom den primære og den sekundære vindingen, som tilsier at effekten er den samme i begge vindingene. Dette gir:

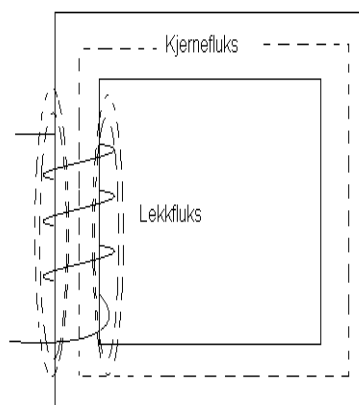
$$\begin{aligned} V_{pri} &= V_{sek} \text{ gir } N_{pri} \frac{d\phi}{dt} = N_{sek} \frac{d\phi}{dt} \\ P_{inn} &= V_{pri} I_{pri} = P_{ut} = V_{sek} I_{sek} \text{ [W]} \\ \frac{V_P}{V_S} &= \frac{N_P}{N_S} = \frac{I_S}{I_P} \text{ (antatt 100\% effektiv)} \end{aligned} \quad [4.2]$$

Ved å kombinere ligning 4.1 og 4.2 og se på den totale gjennomstrømningsenergien i kretsen er det mulig å beregne den totale effekten i transformatoren. Denne er gitt ved hvor mye energi som puttes inn i den primære kretsen, og hvor mye energi som kommer ut av den sekundære kretsen. Det er tenkt slik at transformatoren må være i stand til å tåle tapene, avgitt som varme. Antas transformatoren ideell er effekten i vindingene og tapene de samme. Varmen blir avgitt fra begge vindingene og transformatoren må dermed tåle tapene fra både primær og sekundær side:

$$P_{tot} = P_{inn} + P_{ut} = 2P_{inn} = 2P_{ut} \text{ [W]} \quad [4.3]$$

#### 4.1 Lekkfluks

En ideell transformator antar all fluks generert i primærvindingene vil gå gjennom sekundærvindingene. I praktisk er ikke dette tilfelle. På grunn av ufullkommen kobling av vindingene og lekkfluksen vil det gå en spenning på utsiden av vindingene, som vist i figur 4.2. Denne fluksen kalles lekkfluks.



Figur 4. 2 – Skisse over lekkfluksen i en transformator

Fra [18] er lekkinduktansen definert som:

$$\frac{1}{2} L_{lekk} (I_{pri})^2 = \frac{1}{2} \int_{V_v} B H dV = \frac{1}{2} \int_{V_v} \mu_0 H^2 dV \quad [4.4]$$

Hvor  $\mu_0$  er den magnetiske permeabiliteten i vakuum,  $I_{pri}$  er strømmen gjennom primærvindingen, B er Magnetfeltet (også magnetisk flukstetthet) med lukkede feltlinjer og H er H-feltet (tidligere også kalt magnetfelt), men det har i motsetning til B lukkede feltlinjene ( $B = \mu_0 H$ ). Hvor volumintegrasjonen tas over  $V_v$  som er volumet på vindingen. Det er også gitt fra [18] at det magnetiske feltet  $H_{lekk}$  er gitt ved:

$$\begin{aligned} H_{lekk} &= \frac{2N_{pri} I_{pri} x}{h_v b_v}, \text{ [A/m] hvor } 0 < x < \frac{b_v}{2} \\ H_{lekk} &= \frac{2N_{sek} I_{sek}}{h_v} \left(1 - \frac{x}{b_w}\right) \text{ [A/m], hvor } \frac{b_v}{2} < x < b_v \end{aligned} \quad [4.5]$$

Et volumelement for integralet i likning er gjengitt i likning 4.6:

$$dV = l_v h_v \quad [4.6]$$

Hvor  $l_v$  er lengden på vindingen lokalisert ved punktet x i vindingsområdet og  $h_v$  er høyden på vindingen. Kombinasjon av 4.5 med 4.6, gir følgende sammenheng:

$$\frac{1}{2} L_{lekk} (I_{pri})^2 = \frac{1}{2} 2 \int_0^{b_v} \mu_0 \left( \frac{2N_{pri} I_{pri} x}{h_v b_v} \right)^2 l_v h_v dx = \frac{\mu_0 (N_{pri})^2 l_v b_v (I_{pri})^2}{6h_v} \quad [4.7]$$

Ved å dele på  $0,5(I_{pri})^2$  på begge sider av 4.7, finnes lekkfeltet:

$$L_{lekk} \approx \frac{\mu_0 (N_{pri})^2 l_v b_v}{3h_v} \text{ [H]} \quad [4.8]$$

## 4.2 Varmemotstand

For å finne den gjennomsnittlige varmemotstanden for en gjennomsnittlig transformatorsituasjon, med konveksjonskjøling, kan det brukes en tommelfingerregel som sier [19]:

$$R_\theta = \frac{80000 \text{ [}^\circ\text{Cmm}^2/\text{Watt}]}{A_s \text{ [mm}^2\text{]}} \text{ [}^\circ\text{C/W]} \quad [4.9]$$

Ifølge [18] er det brukt en formel som sier nesten det samme:

$$R_{\theta} = \frac{130000 [\text{°Cmm}^2 / \text{Watt}]}{A_s [\text{mm}^2]} [\text{°C/W}] \quad (4.10)$$

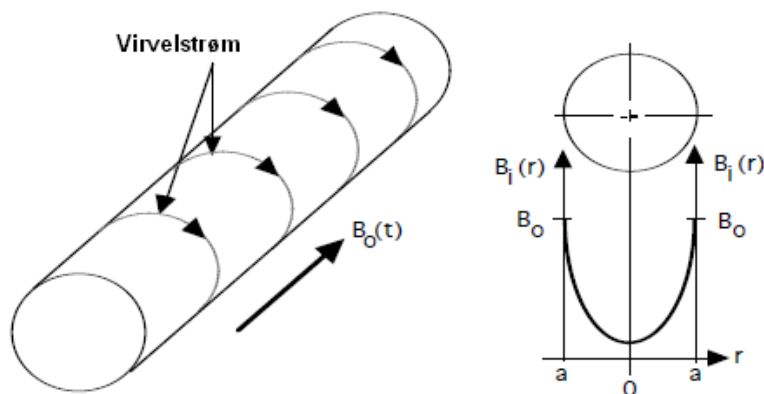
### 4.3 Virvelstrømtap i magnetiske kjerner

Dybden elektromagnetisk stråling kan trenge gjennom en ledende overflate minker med økende konduktivitet og økende frekvens. En elektromagnetisk bølge som går inn i ledende overflate blir dempet og redusert i amplitude med en faktor på  $1/e$  (ca 0,37) over en distanse gitt av:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f\mu}} [\text{m}] \quad (4.11)$$

Hvor  $\omega$  er vinkelfrekvensen og  $\sigma$  er den elektriske konduktiviteten i kopper. Avstanden  $\delta$  refereres til som inntrengningsdybden til lederen. Denne effekten skyldes elektromagnetisk induksjon i metall som motsetter seg strømmen satt opp av det elektriske feltet (E-feltet).

Ved et magnetisk felt, satt opp av vekselstrøm i et magnetisk ledende materiale, vil det bli generert en virvelstrøm som vises i figur 4.3.



Figur 4. 3 – Skisse over skinneffekt i en leder

### 4.4 Magnetisk flukstetthet

Magnetisk fluks er summen av alle feltlinjer gjennom en vinding. Tapene i kjernen og vindingene vil under bruk indusere en økning i temperatur. Denne økningen må holde seg under et maksimalt tillatt nivå for å forhindre skade på transformatoren eller resten av kretsen.

I termisk likevekt kan de totale tapene i transformatoren  $P_{sp}$  relateres til en økning i temperatur av transformatoren med en parallell til Ohms lov.

$$P_{sp} = \frac{(T_s - T_a)}{R_{\theta,sa}(V_v + V_k)} [\text{mW/cm}^3] \quad (4.12)$$

$T_s$  og  $T_a$  er temperaturen til hhv overflaten og omgivelsene.  $R_{\theta,sa}$  er gitt som dem termiske motstanden (overflaten til omgivelsene), og  $P_{sp}$  sees på som kjølemuligheten til transformatoren. Tapene i ferritt-kjernen blir målt som en funksjon av frekvensen Hz, maksimal flukstetthet T, og temperatur °C. Tettheten på kjernetapet kan tilnærmet skrives på følgende måte [20].

$$P_{sp} = K_C f^a B_{topp}^b [\text{mW} / \text{cm}^3] \quad (4.13)$$

Som gir:

$$B_{topp} = \left( \frac{P_{sp}}{K_C \cdot f^a} \right)^{\frac{1}{b}} [\text{mT}] \quad (4.14)$$

Hvor a, b,  $K_C$  er konstanter som er funnet ved hjelp av data fra kurvetilpasning av de målte effekttapene, fra [18].

## 4.5 Strømtetthet

Strømtetthet er antall amper pr kvadratmeter. Ved å vite hvor stor tverrflaten av lederen er, og hvor mye strøm som går i kretsen, kan man regne ut strømtettheten.

$$J_{rms} = \frac{I_{rms}}{A_{Cu}} [\text{A} / \text{mm}^2] \quad (4.15)$$

Der tverrflaten er gitt ved tverrsnittet av kjernen  $A_{Cu}$ . Ved å kombinere 4.15 og ohms lov kan man finne effekten som forsvinner pr enhet koppervolum i en koppervinding på grunn av DC-motstanden:

$$P_{Cu,sp} = \rho_{Cu} (J_{rms})^2 [\text{mW} / \text{cm}^3] \quad (4.16)$$

Det er ønskelig å finne effekten som forsvinner pr enhet vindingsvolum:

$$V_{Cu} = k_{Cu} V_v [\text{m}^3] \quad (4.17)$$



Hvor  $V_v$  er vindingsvolumet og  $k_{Cu}$  er kopperfyllfaktoren. Effekten som forsvinner pr volumenhet kan finnes fra:

$$P_{v,sp} = k_{Cu} \rho_{Cu} (J_{rms})^2 [mW / cm^3] \quad (4.18)$$

Ved å bruke en resistivitet på kopper ved 100 grader ( $2,2 \cdot 10^{-8} \Omega - m$ ) og  $J_{rms}$  er definert som  $A / mm^2$  finnes:

$$P_{v,sp} = 22 k_{Cu} (J_{rms})^2 [mW / cm^3] \quad (4.19)$$

Eller skrevet for strømtettheten:

$$J_{rms} = \sqrt{\frac{P_{v,sp}}{22 \cdot k_{cu}}} [A / mm^2] - \text{Strømtetthet i vindingene} \quad (4.20)$$

## 4.6 Spenningsverdi

Fra ligning 4.3 er det gitt at den maksimale gjennomstrømningen vil skje i en 100 % effektiv transformator med

$$P_{gjs} = P_{inn} + P_{ut} \text{ hvor } P_{inn} = P_{ut} \text{ gir } P_{gjs} = 2P_{inn} [W] \quad (4.21)$$

Fra formel 30-40 fra [18] finnes toppunktet til flukstapene

$$\hat{V}_{pri} = N_{pri} A_{kjerne} \omega \hat{B}_{kjerne} [V] \quad (4.22)$$

Hvor  $N_{pri}$  er antall vindinger i primærkretsen og  $A_{kjerne}$  er arealet på kjernen. Ved å kombinere 4.22 med likning 4.15 kan den maksimale effekten i transformatoren regnes ut.

$$S_{maks} = 2V_{pri} I_{pri} = \frac{2N_{pri} A_{kjerne} \omega B_{peak}}{\sqrt{2}} J_{rms} A_{Cu,pri} [VA] \quad (4.23)$$

For arealet gjelder:

$$A_{Cu,pri} = \frac{k_{Cu} A_v}{2N_{pri}} [mm^2] \quad (4.24)$$

En kombinasjon av ligning 4.23 og 4.24 gir den maksimale strøm- og spenningsraten for transformatoren.

$$\frac{2N_{pri}A_{kjerne}\omega\hat{B}}{\sqrt{2}}J_{rms}\frac{k_{Cu}A_v}{2N_{pri}} = \frac{A_{kjerne}2\pi fB_{peak}}{\sqrt{2}}J_{rms}k_{Cu}A_v \quad (4.25)$$

$$S_{maks} = 4,4 \cdot k_{Cu} \cdot f \cdot A_v \cdot A_{kjerne} \cdot J_{rms} \cdot B_{peak} \quad [VA]$$

## 4.7 Vindingstype

For å regne ut hvilken type vindinger som trengs, sjekkes tykkelsen mot skinneffekten.

$$A_v = \frac{I_{pri}}{J} \Rightarrow \text{gir diameter } D = 2r = \sqrt{\frac{A_v}{\pi}} \cdot 2 \quad [mm] \quad (4.26)$$

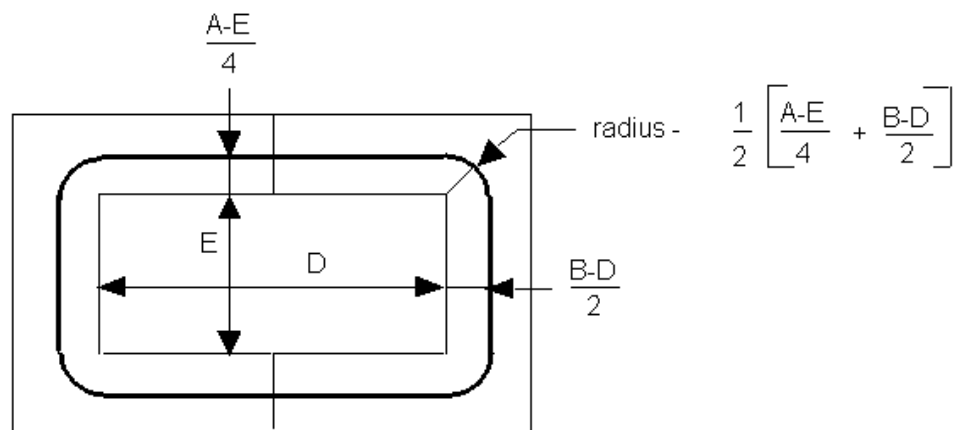
Hvis denne diameteren på vindingene er mindre enn tykkelsen på skinneffekten må det brukes flere parallelle vindinger (litztråd) som er en flere skjermede ledere koblet sammen til en leder som illustrert i figur 4.4.



Figur 4. 4 – Type 1 litztråd

## 4.8 Kjernetype

Valget falt på en kjernetype som heter U93/152/30. Dette valget blir diskutert senere i kapittel 8, men er nevnt her for å kunne beregne størrelsene på transformatoren. Kjernen er formet som en U og ved å koble sammen to av disse ser tverrsnittet ut som figur 4.5, fra [18].



Figur 4. 5 – Skisse av lederlengden

Den gjennomsnittlige lengden på kjernen kan sees ut ifra figur 4.5 og beregnes ut ifra:

$$l_m = 2D + 2E + 2\pi\{(A-E)/8 + (B-D)/4\} \quad (4.27)$$

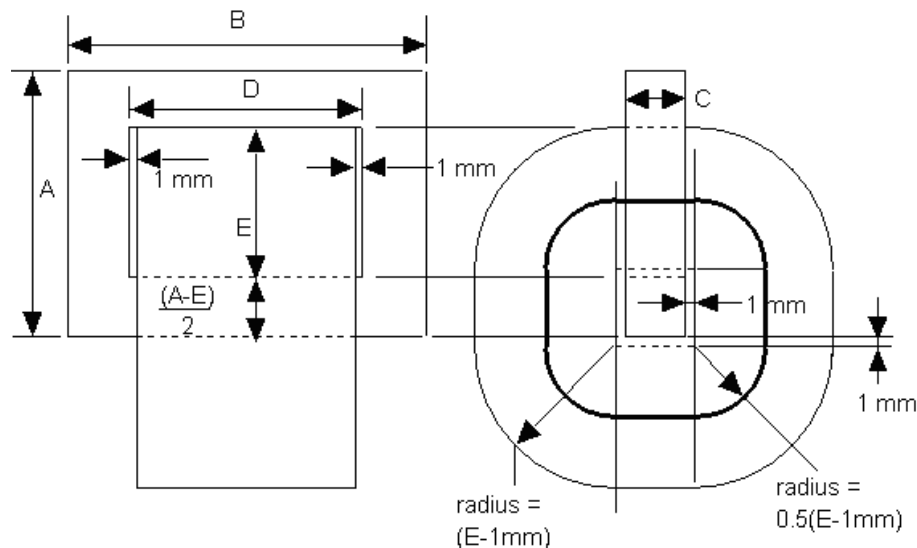
$$l_m = 2D + 2E + 0.25\pi[(A-E) + 2(B-D)] \quad [\text{mm}]$$

Kjernearealet regnes ut ved hjelp av figur 4.6:

$$A_{\text{kjerne}} = C \cdot \frac{(A-E)}{2} \quad [\text{mm}^2] \quad (4.28)$$

Kjernevolumet blir dermed volumet av en solid kjerne minus vindingsrommet i midten:

$$V_{\text{kjerne}} = BAC - DEC \approx l_m A_{\text{kjerne}} \quad [\text{mm}^3] \quad (4.29)$$



**Figur 4. 6 – Oversikt over kjerneareal og vindingsoppsett**

Figur 4.6 viser et tverrsnitt av vindingene. Her er det tatt hensyn til at det skal være med en ”boppin” som brukes for å vikle vindingene på. Dermed vil det bli mindre plass til vindingene. For å regne ut lengde, areal og volum av vindingene brukes hhv:

$$l_v = 2\pi [(E-1\text{mm})/2] + 2 \{0.5(A-E) + 2\text{mm}\} + 2(C+2\text{mm}) \quad (4.30)$$

$$= \pi(E-1\text{mm}) + (A-E) + 2C + 8\text{mm} \quad [\text{mm}]$$

$$A_v = (E-1\text{mm})(D-2\text{mm}) \quad [\text{mm}^2] \quad (4.31)$$

$$V_v \approx l_v A_v \quad [\text{mm}^3] \quad (4.32)$$

Overflateareal  $A_o$  beregnes ved å regne sammen alle de ubeskyttete områdene

*Ubeskyttet overflate bunn og topp  $A_{O,kjerne}$  :*

$$= BC + (B-D)C = 2BC - DC \text{ [mm}^2\text{]} \quad [4.33]$$

Ubeskyttet overflate venstre og høyre:

$$= 2AC \text{ [mm}^2\text{]} \quad [4.34]$$

Ubeskyttet overflate for og bakside:

$$\begin{aligned} &= 2AB - 2DE - \frac{D(A-E) \cdot 2}{2} = 2AB - 2DE - AD + DE \\ &= 2AB - DE - AD \text{ [mm}^2\text{]} \end{aligned} \quad [4.35]$$

Sum av disse tre:

$$A_{O,kjerne} = 2BC - DC + 2AB - DE - AD = 2AB - AD + 2BC - DC - DE \text{ [mm}^2\text{]} \quad [4.36]$$

*Ubeskyttet overflate for vindingene  $A_{O,vinding}$  :*

Ubeskyttet overflate for topp og bunn av vindingene:

$$\begin{aligned} &= 2 \cdot 4 \cdot 0.25\pi \cdot E^2 + 4 \cdot 0.5 \cdot (A - E)E + 2CE = E^2(6,3 - 2) + 2AE + 2CE \\ &= 2,3E^2 + 2AE + 2CE \text{ [mm}^2\text{]} \end{aligned} \quad [4.37]$$

Ubeskyttet overflate for den vertikale overflaten av vindingene:

$$\begin{aligned} &= 2\pi ED + 2 \cdot D \cdot 0.5 \cdot A - E + CD = 2\pi DE + AD - DE + CD \\ &= 6,3DE + AD + CD \text{ [mm}^2\text{]} \end{aligned} \quad [4.38]$$

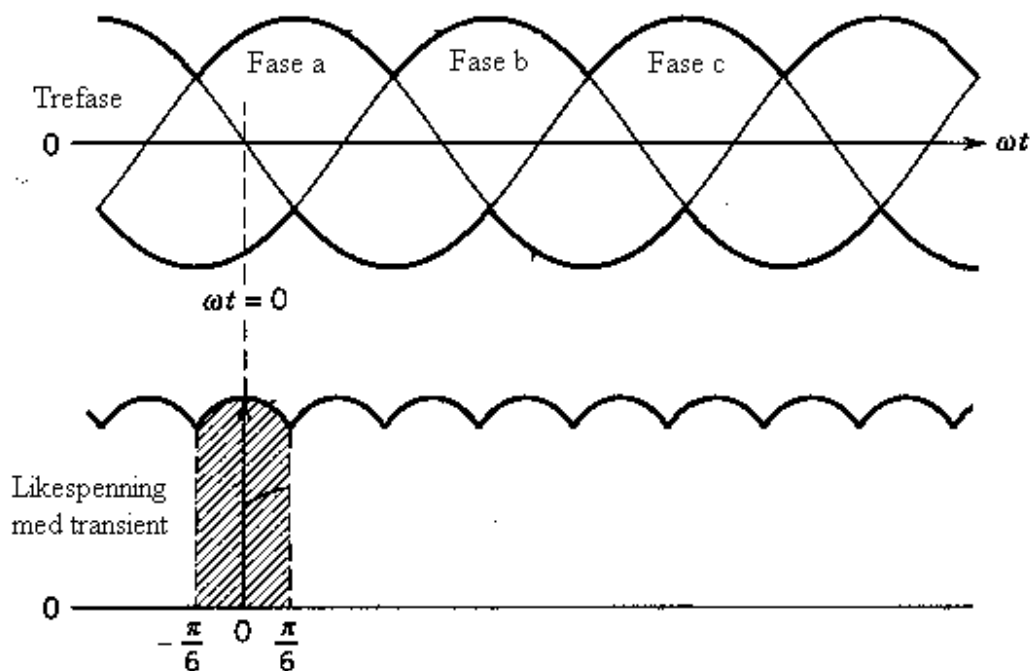
$$A_{O,viklinger} = 2,3E^2 + 2AE + 2CE + 6,3DE + AD + CD \text{ [mm}^2\text{]} \quad [4.39]$$

Ved å kombinere ligning 4.36 og 4.39 finnes det totale overflatearealet.

$$\begin{aligned} A_o &= A_{O,kjerne} + A_{O,vikling} \\ A_o &= 2AB - AD + 2BC - CD - DE + 2,3E^2 + 2AE + 2CE + 6,3DE + AD + CD \\ A_o &= 2AB + 2AE + 2BC + 2CE + 5,3DE + 2,3E^2 \text{ [mm}^2\text{]} \end{aligned} \quad [4.40]$$

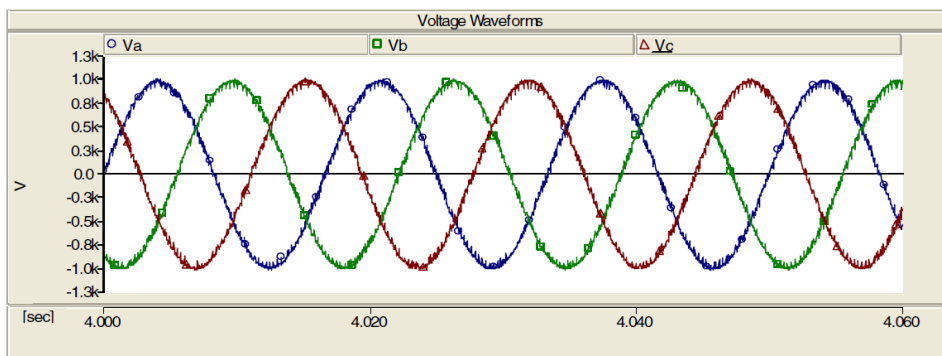
## 5. Resultat fra litteraturundersøkelsen

Prosjektet 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 [24]. 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 rundt 40x frekvensen inn [21]. Med en vindmøllefrekvens på 50 Hz vil denne ligge i området 1-4 kHz. Spenningen VSC generer har en spenningskarakteristikk som følger av figur 5.1.

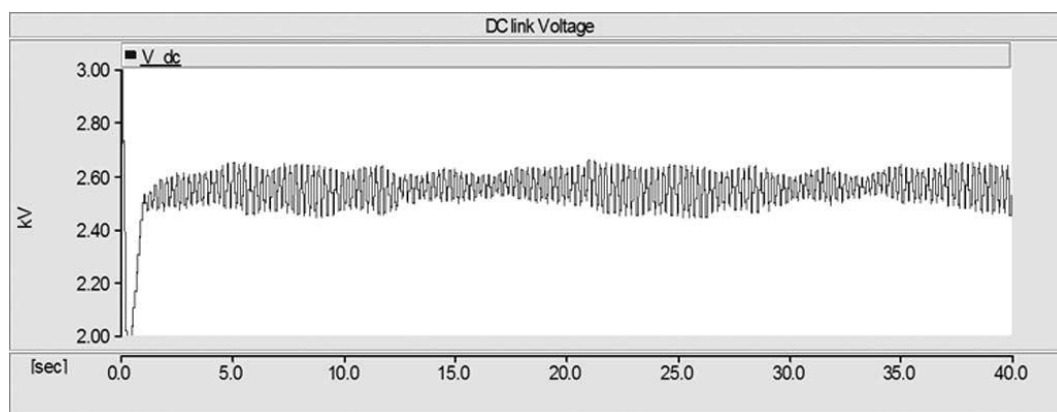


Figur 5. 1 – Spenningskarakteristikk VSC

Det er laget reguleringer som sier hvor store harmoniske det er lov å ha ved tilkobling til strømmettet. Denne reguleringen 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" [22]. For likespenningskabelen finnes det ingen reguleringer og det er opp til de enkelte produsentene hvordan de velger utgangsspenningen. En generell regel er at desto finere spenning, jo dyrere omforming og jo større plass tar omformeren. 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  $\pm 0,02p.u$  [23].

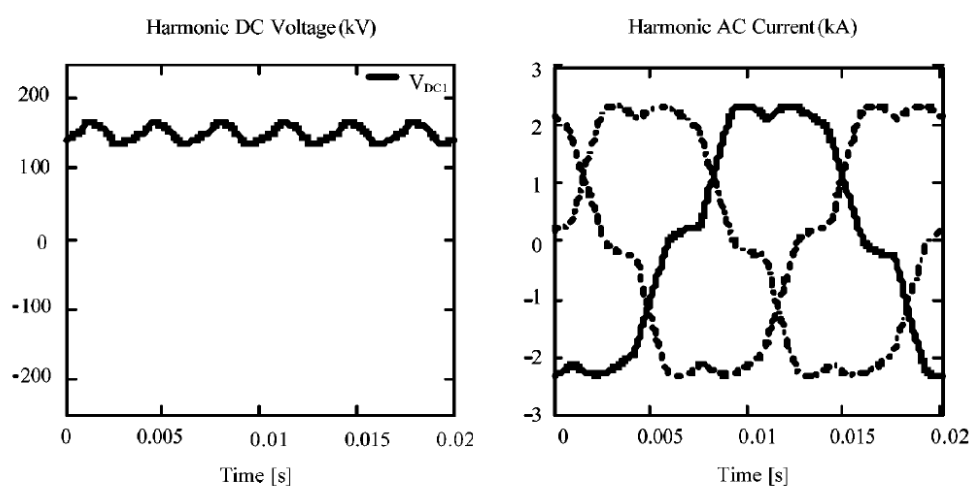


**Figur 5. 2 – Spenning generert av en vindpark**



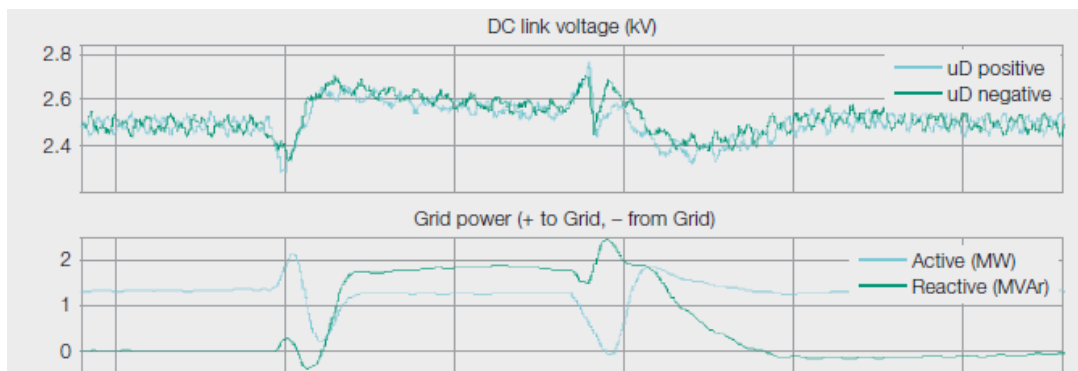
**Figur 5. 3 – Spenningen gitt av en vindmølle uten gir med en PWM vekslefrekvens på 3.6 kHz [24]**

Figur 5.3 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  $\pm 0,06 \text{ pu}$ .

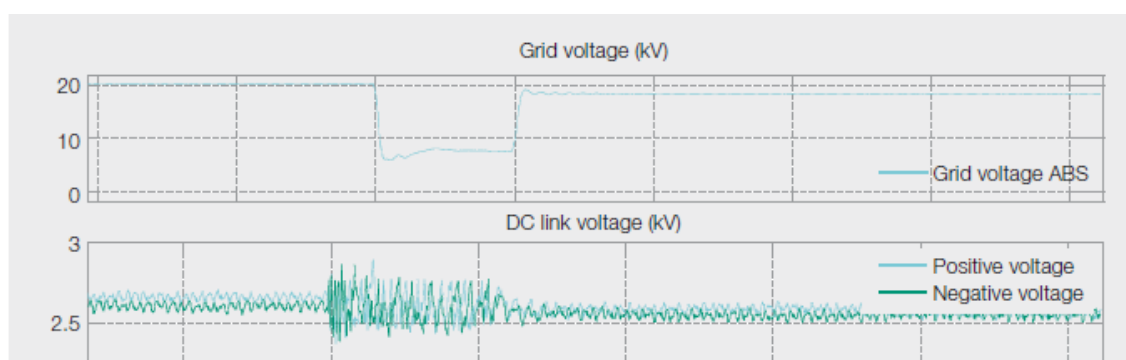


**Figur 5. 4 - Harmoniske undersøkelser i et HVDC VSC system vekslefrekvens på 250 Hz [25]**

Fra figur 5.4 og [25] oppgis grenseverdiene til å ligge på  $150 \text{ kV} \pm 10 \text{ kV}_{\text{rms}}$  eller  $\pm 0,07 \text{ pu}$ . Her er det en VSC som veksler med en frekvens på 250 Hz.



**Figur 5. 5 – Spenningen over en DC-kabel i en PCS 6000 2x5 MW vindmølle med en ”E.on flicker” [26]**



**Figur 5. 6 - Spenningen over en DC-kabel i en PCS 6000 2x5 MW vindmølle med en ekstrem nettfeil [26]**

Fra figur 5.5 og 5.6 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 nå systemet opplever en feil, men tilstanden før feilen skjer er normalt tilstand, 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  $\pm 0,04 \text{ pu}$ . Vekslefrekvensen er her ikke oppgitt.

## 6. Testoppsett

I forsøket på å generere den ønskede spenningen ble det sett på to mulige løsninger. Den løsningen som ble undersøkt først var av naturlige årsaker, den som var enklest å teste. En signalgenerator i serie med en høyspenningsomformer fra TREK ble prøvd ut for å se hva slags spenning det var mulig å generere med denne. Senere viste det seg at høyspenningsomformeren ikke klarte å holde mål og et større og mer kraftig system ble designet. Dette systemet baserer seg på den samme signalgeneratoren som tidligere. Denne brukes til å styre en IGBT-omformer som mates av en 600 V likespenningskilde. Denne spenningen blir forsterket av en egenprodusert transformator som settes i serie med en 100 kV likespenningskilde. Utstyr brukt i teksten, er nærmere beskrevet i kapittel 7.

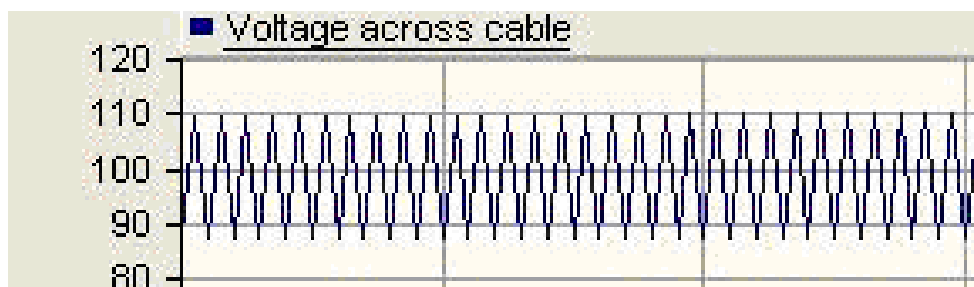
### 6.1 Høyspenningsomformer av type TREK 20/20

Blant allerede tilgjengelig utstyr i laboratoriet var det en høyspenningsomformer av typen TREK 20/20. Denne omformeren forsterker en spenning i størrelsesorden 0-15 V<sub>rms</sub> opp til en spenning på 0-20 kV<sub>rms</sub>, med en omformingskarakteristikk på 2000 V/V. I tabellen 4.1 er omformeregenskapene listet opp.

Tabell 6. 1 – Høyspenningsomformeregenskaper TREK 20/20

	DC	Topp AC
Inn:	0-10 V	0-10 V
Ut:	0-20 kV	0-20 kV
	0-20 mA	0-20 mA
Omformingskarakteristikk		
2000 V/V		

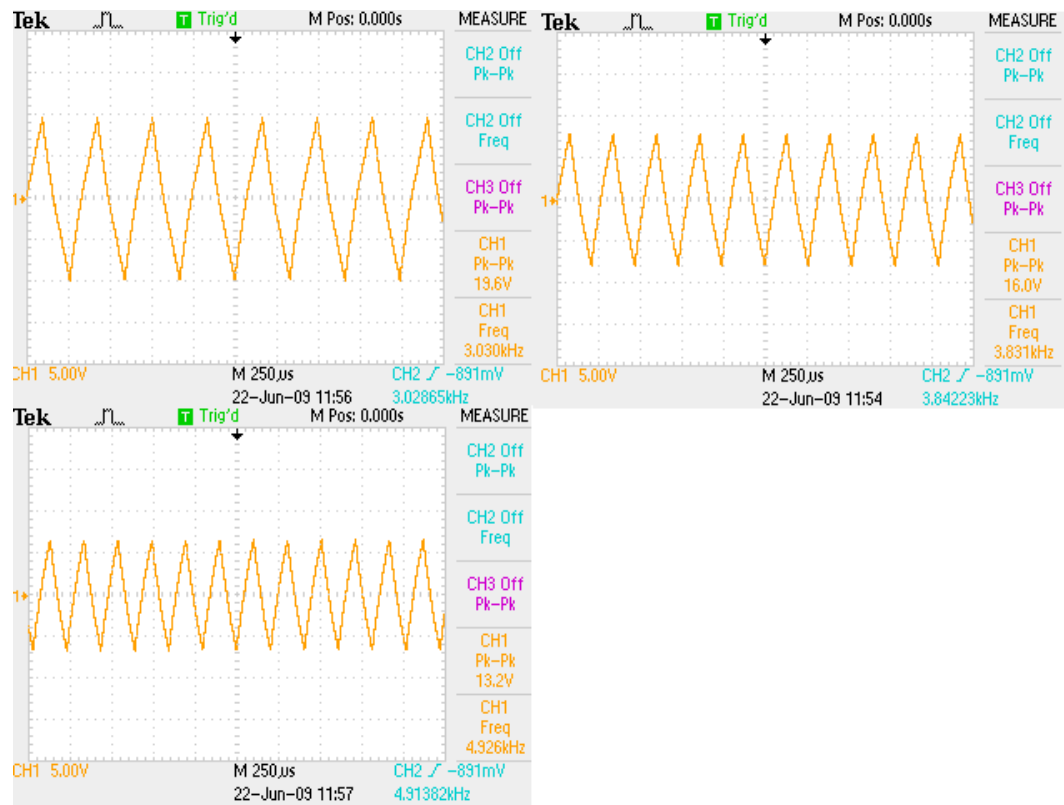
Den ønskelige spenningen skal likne på figur 6.1 i form og amplitude, med en spenning på 100 kV ± 10 kV<sub>rms</sub>. Det skal også være mulig å velge mellom forskjellige spenningsformer (firkant, trekant, sinus).



Figur 6. 1 – Ønskelig spenning som skal påtrykkes sjøkabelen

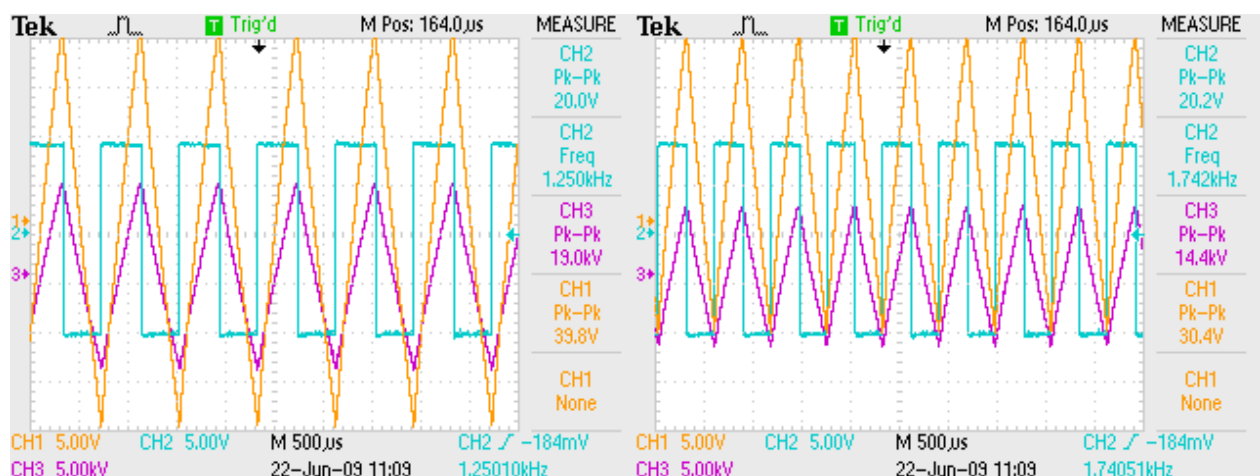


Ved å teste transformatoren i serie med generatoren og studere spenningen på et oscilloskop kan følgende sammenheng finnes. Frekvensen i figur 6.2 og 6.3 viser en tendens at ved å øke frekvensen vil transformatoren gå i metning og ikke klare å levere den ønskede spenningen.



Figur 6. 2 - Plott av utgangsspenning fra høyspenningsomformereren ved forskjellig frekvens

Fra figur 6.2 ser sees det at amplituden, ved kun å forandre på frekvensen, minker fra 19,6 kV ved 3 kHz til 13,2 kV ved 5 kHz.



Figur 6. 3 – Plott av inngangsspenning og utgangsspenning fra høyspenningsomformereren ved forskjellig frekvens

Her kan det som i figur 6.3 sees at spenningen minker med økende frekvens. Her minker den fra 19 kV til 14.4 kV med en frekvensøkning på 500 Hz. Målingene er gjort med en probe som kan sees fra figur 6.4. Ved å koble denne til oscilloskopet vises utgangsspenningen i skala 1/1000 V. Målingene til figur 6.2 er gjort uten at oscilloskopet stilt inn til automatisk til å ta høyde for at utgangsspenningen er 1000x så høy. Dette er derimot tatt høyde for i figur 6.3 og vises fra kanal 3 (CH3) som kV.

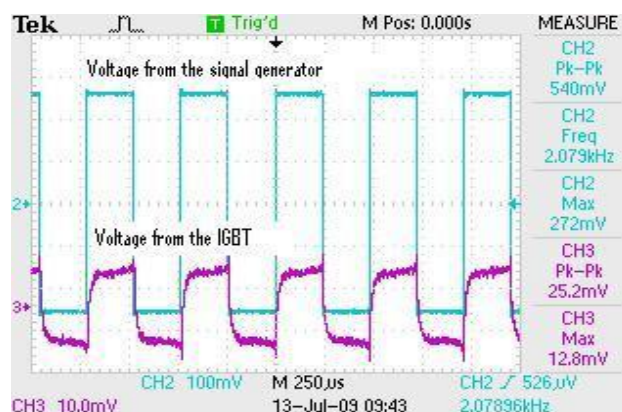


Figur 6. 4 – Probe for å måle høy spenning på oscilloskop [27]

## 6.2 Transformert IGBT-omformer i serie med en 100 kV DC-kilde

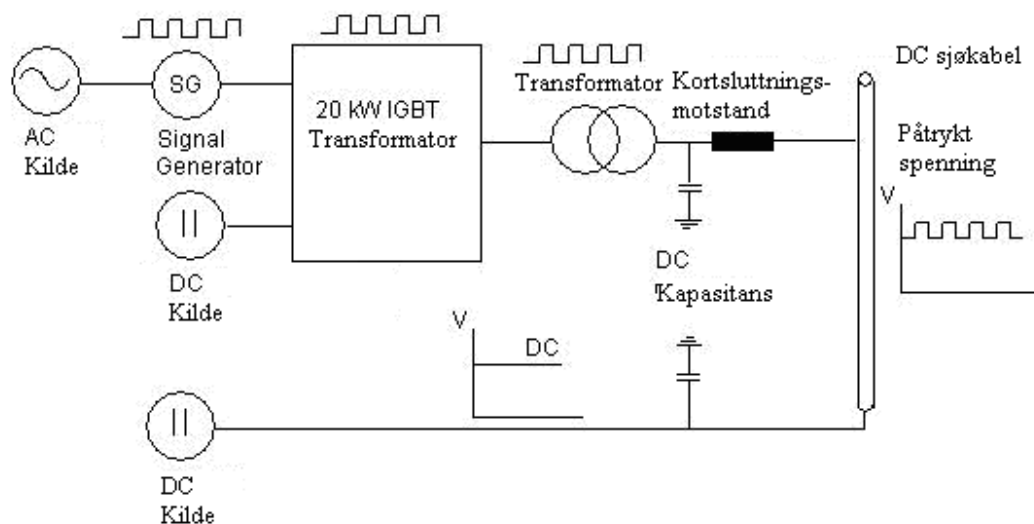
Her blir det tatt utgangspunkt i den samme signalgenerator som tidligere for å kunne variere spenningskarakteristikken. Spenningen ligger i området 0-5 V og trengs å transformeres opp til 10  $kV_{rms}$ . Signalgeneratoren blir brukt til å styre en IGBT-omformer [28] som veksler en spenningskilde på 600 V DC. Dermed oppnås en vekslende spenning i området 424  $V_{rms}$  og 2,6 A.

Dette ble funnet med å teste omformerer med en 47,5  $\Omega$  motstand. Figur 6.5 viser hvordan spenningen som kom fra signalgeneratoren og hvordan spenningen som kom fra IGBT-omformerer så ut. Her er det testet ved 2 kHz.



Figur 6. 5 – Bølgeformen fra signalgeneratoren og IGBT-omformerer

Spenningen ut ifra omformereren vil ligge i området  $0-424\text{ V}_{\text{rms}}$ . Dermed trengs det en transformator for å øke spenningen til den ønskede spenningen på 20 kV. Denne høyfrekvente høyspenningstransformatoren er ikke noe som er kommersielt lett og få tak i, og må dermed designes og bygges. Spenningen som kommer ut ifra transformatoren vil ha den ønskelige karakteristikken som vist i figur 6.1, avhengig styrespenningen fra signalgeneratoren. Deretter vil dette kobles i serie med en 100 kV DC-kilde som allerede befinner seg i laboratoriet. Modellkabelen blir påtrykt denne samlede spenningen for å undersøke de ønskede parameterne. Hele oppsettet vil se lignende ut som i figur 6.6



**Figur 6. 6 – Testoppsett til laboratorieforsøk der det skal genereres en høy spenning med en overliggende høyfrekvent transient.**

## 7. Måleutstyr

---

### 7.1 5 V Signalgenerator

For å få den ønskede spenningskarakteristikken brukes en signalgenerator. Generatoren kan stilles inn på forskjellige vekselspenninger som vist i figur 6.1. Dette er ikke nøyaktig samme type som brukt i oppgaven, men denne ville produsert den samme spenningen og er tatt med for en illustrasjon. Her er det innstillinger for trekant-, firkant- og sinusspenning. Frekvens og faseinnstilling. Spenningen som leveres fra signalgeneratoren har en amplitude på 5 V og frekvensområde 0,2 Hz – 2 MHz. Generatoren drives av vanlig 230 V vekselspenning.



Figur 7. 1 - Signalgenerator

### 7.2 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

En IGBT er et minoritetsladningsbærerapparat med høy innmatingsimpedans og en stor topols strømbærerevne. Mange designere ser på en IGBT som et apparat med MOS innmatingskarakteristikk, med en topols omformingskarakteristikk som et spenningskontrollert topolsapparat. IGBT'en ble introdusert for å kunne gjøre bruk av både Power MOSFET og BJT (bipolar transistor). Det er en praktisk integrering av Power MOSFET og BJT apparat i en massiv form. Det kombinerer de beste egenskapene ved begge to for å oppnå optimal karakteristikk. Ved å bruke signalgeneratoren til å styre omformerer vil det være mulig å få den ønskede spenningskarakteristikken som tidligere omtalt, (firkant, trekant og sinus). Den omformerer som brukes i denne oppgaven er designet for laboratoriebruk ved NTNU og SEfAS [29].

### 7.3 Høyspenningsforsterker (TREK 20/20)

En høyspenningsforsterker er en transformator som tar inn en spenning og transformerer den opp til en ønskelig spenning, alt ettersom hvordan den er laget. Den forsterkeren som ble brukt her har en karakteristikk som følger av tabell 7.1

Tabell 7. 1 - Høyspenningsomformeregenskaper

	DC	Topp AC
Inn:	0-10 V	0-10 V
Ut:	0-20 kV	0-20 kV
	0-20 mA	0-20 mA
<b>Omformingskarakteristikk</b>		
2000 V/V		

Tabell 7.1 viser at omformingen er fast, og for hver volt som mates inn i omformeren leverer den 2000 V ut. Så for å få 20 kV må det mates inn 10V.



Figur 7. 2- Bilde av høyspenningsforsterkeren fra TREK [30]

### 7.4 Følgende utstyr er også blitt brukt i laboratoriet

- Fluke: For å måle spenning ønskede steder i kretsen.
- 47,5  $\Omega$  motstand: For å måle effekten ut av IGBT-omformeren.
- Oscilloskop: Sjekke spennings form og amplitude og lage utskrift av dette.
- 300V 1A DC-kilde: To stykker i serie brukt for å mate IGBT-omformeren, i oppgaven er disse også referert til som én spenningskilde på 600 V.
- Testprobe for å kunne teste høyspenning på oscilloskopet nærmere beskrevet i 6.1.
- 100 kV DC-kilde: Denne er nevnt i oppgaven og planlagt som en del av kretsen og derfor velges det å nevne den her selv om den ennå ikke har blitt brukt.
- Diverse kabler for å koble sammen alle komponentene.

## 8. Resultater beregninger

---

### 8.1 Utregning transformator:

For å beregne hva slags transformator det er bruk for, må det sees på hva slags spenning som skal transformeres og hva denne skal transformeres til. I denne oppgaven er det tatt utgangspunkt i ønske om en transformator som gir følgende spenning og frekvens:

**Tabell 8. 1 - Ønsket spenning og frekvens**

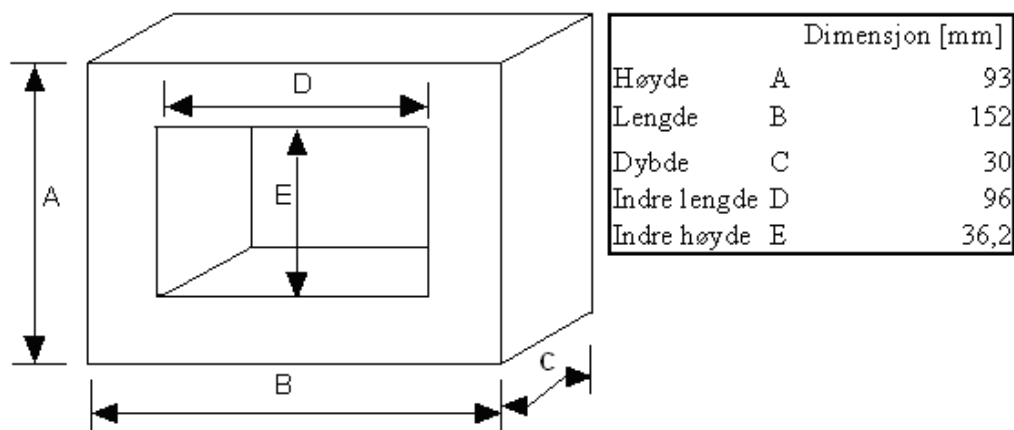
Spenning	10 kV <sub>rms</sub>
Frekvens	20kHz

Det er ikke tatt hensyn til hvor mye strøm som ønskes ut, da det ikke er av stor betydning for adferden til transformatoren. For å få den ønskede spenningen på 10 kV<sub>rms</sub> brukes en signalgenerator som forsterkes av en IGBT-omformer. Det som er av betydning her er hvordan spenningen ser ut når den forlater transformatoren. Denne ble målt til å være 600 V mens strømmen ble målt til 3,7 A. Målingen ble gjort ved å koble en variabel motstand til utgangene til transformatoren. Begrensningen som satte nivået for strømmen, var likespenningskilden som forsynte transformatoren. Denne gir hhv 2 A og 600 V. For oppsettet vårt ble det valgt en litt lavere spenning, slik at man ikke trenger å operere på den maksimale spenningen hele tiden. Det er også valgt en høyere strøm, som vil gi en økt tykkelse i vindingen, men ellers lite å si for transformatoren.

**Tabell 8. 2 - Påtrykt strøm, spenning og frekvens**

Spenning	350 V <sub>rms</sub>
Frekvens	20kHz
Strøm	5 A <sub>rms</sub>

Den kjernen som er blitt valgt har dimensjoner som følger av figur 8.1



**Figur 8. 1 – Kjernedimensjon av transformatoren**

Det er også tatt hensyn til at den maksimale overflatetemperaturen  $T_s$  ikke skal overstige 100 grader celsius. Samt at romtemperaturen  $T_a$  ikke overstiger 40 grader celsius. Ved å regne med disse gitte verdiene, kan transformatoren regnes ut. For å skape en grei oversikt over alle utregningene er disse samlet i tabell 8.3 og 8.4. Utregningene er gjort etter teorien i kapittel 4 og ikke gjengitt i detalj, det vises til CD-en i vedlegg 1 for mer detaljert forklaring.

**Tabell 8. 3 - Sammendrag av de beregnede verdiene for primær og sekundær side av transformatoren**

Primærside:	Symbol	Verdier	Benevning	Sekundærside:	Symbol	Verdier	Benevning
Frekvens	f	20 [kHz]		Frekvens	f	20 [kHz]	
Spenning	$V_{pri}$	350 [kV <sub>rms</sub> ]		Spenning	$V_{sek}$	10 [kV <sub>rms</sub> ]	
Strøm	$I_{pri}$	5 [A <sub>rms</sub> ]		Strøm	$I_{sek}$	0,18 [A <sub>rms</sub> ]	
Viklinger	$N_{pri}$	25 [#]		Viklinger	$N_{sek}$	724 [#]	
Ledertverrsnitt	$A_{Cu,pri}$	2,5 [mm <sup>2</sup> ]		Ledertverrsnitt	$A_{Cu,sek}$	0,09 [mm <sup>2</sup> ]	
Lederdiameter	$d_{pri}$	1,78 [mm]		Lederdiameter	$d_{sek}$	0,34 [mm]	

Tabell 8.3 gir en oversikt  $A_{rms}$  over hvilke verdier som er beregnet for transformatorvindingene på hhv primær- og sekundærside.

**Tabell 8. 4 – Sammendrag av alle utregnede transformatorverdier**

<b>Transformator:</b>	<b>Symbol</b>	<b>Verdier</b>	<b>Benevning</b>
Total effekt	$P_{\text{tot}}$	3500	[VA]
Inntrengningsdybden	$\delta$	0,46	[mm]
Gj.snitt lengde på kjerne	$L_m$	397	[mm]
Tverrsnitt kjerne	$A_{\text{kjerne}}$	852	[mm <sup>2</sup> ]
Kjernevolum	$V_{\text{kjerne}}$	338244	[mm <sup>3</sup> ]
Gj.snitt lengde på vinding	$L_v$	235,3	[mm]
Tverrsnitt vinding	$A_v$	3309	[mm <sup>2</sup> ]
Vindingsvolum	$V_v$	777615	[mm <sup>3</sup> ]
Overflateareal	$A_o$	67730	[mm <sup>2</sup> ]
Spesifikk energitetthet	$P_{\text{sp}}$	27,3	[mW/cm <sup>3</sup> ]
Strømtetthet i vinklingene	$J_{\text{rms}}$	2	[A/mm <sup>2</sup> ]
Magnetisk flukstetthet	$B_{\text{topp}}$	183	[mT]
Maks strømspenningsrate	$S_{\text{maks}}$	28600	[VA]

Tabell 8.4 gir en oversikt over resten av transformatoren, størrelser, effekter, fluks- og strømtetthet.

## 8.2 Utregning vindingskonstruksjon

Transformatoren må konstrueres slik at det ikke er fare for overslag mellom vindingene og kjernen, eller vindingene seg imellom. Dermed må det sees på hvor høye feltstyrker det vil bli innad i transformatoren. Kjernen regnes for å være i nullpunktet og vindingene variere fra 0-10  $kV_{\text{rms}}$ . Den høyeste feltstyrken vil ligge i toppen av den sekundære vindingen mot kjernen. Det er ønskelig med så lave tap som mulig, og for å minimere lekkfluksen velges det å vikle vindingene på samme side. Dette gjør det også enklere å bruke en vindingsform (boppin).

**Tabell 8. 5 - Elektrisk feltstyrke**

<b>Material</b>	<b>Elektrisk feltstyrke</b>			
	<b>[V/m]</b>	<b>[kV/mm]</b>	<b>[mm/kV] mm for 15 kV</b>	
Air 3kV/mm	3,00E+06	3,0	0,333	4,995
Air 2kV/mm	2,00E+06	2,0	0,500	7,500
Air 1kV/cm	2,00E+05	0,2	5,000	75,000
Epoxy 3,9kV/mm	3,94E+07	39,4	0,025	0,375
Epoxy 31,2kV/mm	3,15E+08	315,0	0,003	0,045
Mineraloil untreated	1,20E+07	12,0	0,083	1,245
Mineraloil treated	2,40E+07	24,0	0,042	0,630
Neoprene rubber	1,20E+07	12,0	0,083	1,245
Nomex	1,60E+07	16,0	0,063	0,945
Paper	1,60E+07	16,0	0,063	0,945



Ved å ta i betraktning størrelsen på vindingsarealet og størrelsen på de forskjellige kablene, kan man beregne hvor stor kabelen må være. Primærkabelen vil være på rundt 2 mm i diameter. Denne skal ha 25 turn og trenger ikke mer enn ett lag. Her vil det bli 1 kV potensial til kjerne og opp til 15 kV til sekundærvindingen, variert etter antall lag. Sekundærvindingen vil ha et potensial på 15 kV til kjernen og et totalt potensial til primærvindingen på 15 kV, samlet over alle lagene. Tabell 8.5 gir en oversikt over elektrisk feltstyrke i ulike isoleringsmaterialer. En liten oversikt over isoleringsavstand med elektrisk feltstyrke på 2 kV/mm rms er vist i tabell 8.6. Dette er et utdrag fra Excel-arket vedlagt i vedlegg 1.

**Tabell 8. 6 - Vindingsforhold for transformatoren**

	Total høyde inkl	Total bredde inkl	Potensial
Vindingslag	vindinger og isolasjon	vindinger og isolasjon	15 kV
<b>Primær vikling</b>			
1	Avhengig av sek. vinding	<b>69,8 mm</b>	Sikkerhetsmargin
<b>Sekundær vikling</b>			0 %
1	19,4 mm	307,8 mm	
2	19,8 mm	161,4 mm	
3	20,2 mm	112,6 mm	
4	20,6 mm	88,2 mm	
5	20,9 mm	73,6 mm	
6	21,3 mm	63,8 mm	
7	21,7 mm	56,8 mm	
8	22,1 mm	51,6 mm	
9	22,5 mm	47,5 mm	
10	22,8 mm	44,3 mm	
<b>Total høyde mellom viklinger</b>		<b>7,5 mm</b>	
<b>Total høyde isolasjon</b>		<b>15 mm</b>	
<b>Total lengde isolasjon</b>		<b>15 mm</b>	
<b>Isolasjonstype:</b>		Air 2kV/mm	

Her vil det bli vurdert isolasjonstype etter behov og tilgjengelighet neste semester. Utrekningen er gjort for å få en bedre oversikt over hvor mye plass vindingene vil ta med de forskjellige isolasjonsmaterialene. Regnes det med luft som isolasjonsmedium, med feltstyrke 2 kV/mm, vil det være umulig å ha mindre enn 3 lag på sekundærvindingene. Det er også mulig å legge inn potensialet og sikkerhetsmargin etter ønske.

## 9. Diskusjon

---

### 9.1 Litteraturundersøkelsen

For litteraturundersøkelsen ble internett brukt i stor grad for å søke etter relevante rapporter, og da spesielt siden [www.ieee.com](http://www.ieee.com). Det ble 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 verste mulige spenningen. 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 5.3 – 5.6.

Verdiene fra de ulike kildene varierer fra  $\pm 0,4$  til  $\pm 0,7$  pu. For å være på den sikre siden og kunne ta hensyn til det eventuelt verst tenkelige scenarioet bestemmes denne pu 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 finner flere forskjellige måter å veksle på og mange forskjellige typer omformere som igjen skaper forskjellige typer spenninger og transienter.

Dermed har oppsettet måtte overdimensjoneres for å ta hensyn til eventuelle andre fremtidige ønsker om å teste andre spenninger eller frekvenser enn de som er funnet til nå.

### 9.2 Valgt kretsoppsett

Fra litteraturundersøkelsen er det ønskelig å produsere en krets som kan generere en spenning på  $\pm 0,1$  pu 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, på grunnlag av at testene i laboratoriet vil foregå på modellkabler. Dermed vil den ønskelige spenningen ligge på  $100 \text{ kV} \pm 10 \text{ kV}_{\text{rms}}$ . Skulle det vært testet på kabler av normal størrelse ville dette skapt store problemer for testingen:

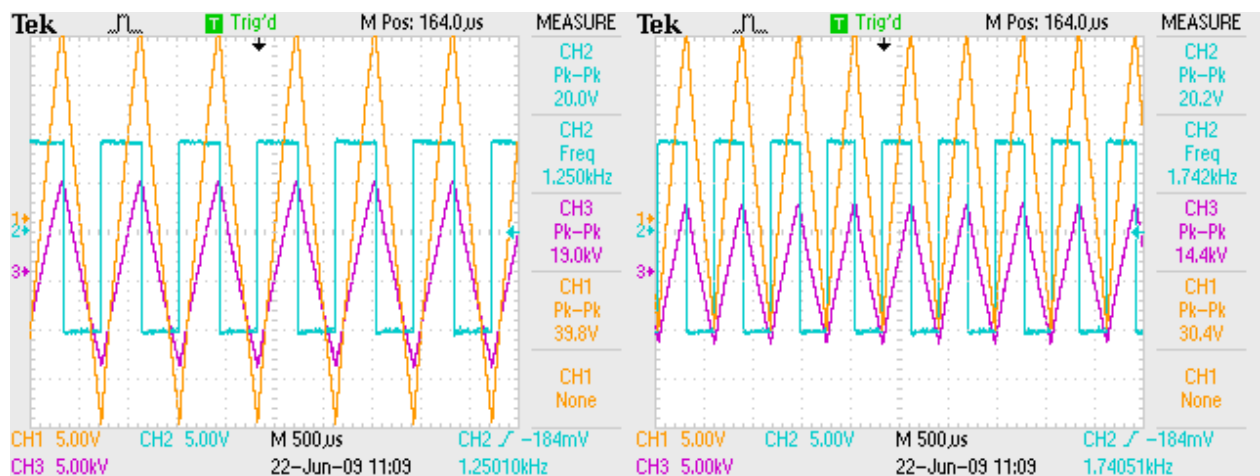
- Det vil være vanskeligere å lage endeavslutninger på kablene.
- Det vil være vanskelig å oppnå høye nok spenninger i testlabben og finne plass til å gjennomføre testingen.
- Samt tidsproblemer da det ikke vil være like lett å kompensere for forsøks tiden med å øke spenningen.

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  $20 \text{ kHz}$ ).

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

Signalgeneratoren gir en utgangsspenning på  $5 \text{ V}$ , og må dermed forsterkes til den ønskelige styrken. For å gjøre dette trengs en transformator. På lageret fantes det en høyspenningsomformer av typen TREK 20/20. 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 9.1 finnes tendensen til amplituden som funksjon av frekvensen (gitt fra CH3).

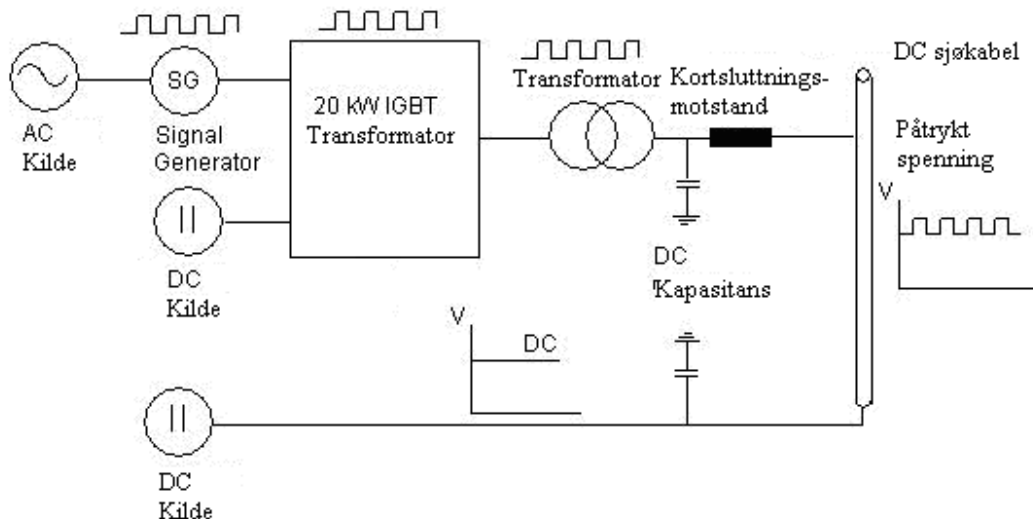


Figur 9. 1 – Plott av inngangsspenning og utgangsspenning fra høyspenningsomformerens ved forskjellig frekvens

Her er det tydelig at frekvensen har en innvirkning på amplituden. Jo høyere frekvens jo lavere blir spenningen. Det var ønskelig med en frekvens på  $20 \text{ kHz}$ , 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 et helt nytt oppsett måtte designes. Det var ikke mulig å få tak i rimelige forsterkere som ville gitt den ønskede spenningen, så et nytt oppsett ble planlagt.

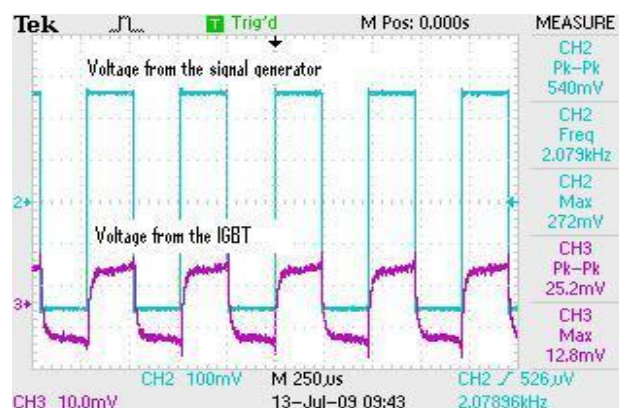
### 9.2.2 Signalgenerator som mater en transformert IGBT-omformer i serie med en 100 kV DC-kilde

Målet her var å bruke den samme signalgeneratoren fra forrige oppsett og finne en måte og forsterke denne på uten at frekvensen påvirker spenningen. Allerede tilgang på en IGBT-omformer gjorde at denne ble satt inn som en forsterker. Den planlagte kretsen kan sees fra figur 9.2.



Figur 9. 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-omformer. Det første problemet med denne kretsen var amplituden på spenningen som IGBT-omformer leverte. Dette kan sees i figur 9.3. Her må spenningen transformeres opp på ny for å få den ønskelige spenningen på 20 kV. Dermed må det 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. Det er viktig å passe på å beskytte kildene fra hverandre slik de er satt opp her. Ved et gjennomslag vil det bli en kortslutning i hele kretsen og kildene kan bli skadet. Dermed må det lages beskyttelser som tar hensyn til slike eventuelle kortslutninger. Dette vil bli tatt hånd om i neste semester.



Figur 9. 3 - Bølgeformen fra signalgeneratoren og IGBT-omformer

### **9.3 Transformatorvalg**

Ved valg av transformator ble det først bestemt hvilke spenninger transformatoren skal transformere opp, til hvilken verdi. Som tidligere nevnt vil frekvensen ligge på 1- 4 kHz. Det er valgt å lage en krets som produserer en spenning med frekvens opp mot 20 kHz. Dermed kan man ta hensyn til eventuelle fremtidige ønsker om å teste andre frekvenser, og gjør det lettere for å teste deterministiske spørsmål ("hva skjer hvis..., spørsmål"). Ved så høye frekvenser må det tas hensyn til om transformatoren går i metning eller ikke.

#### **9.3.1 Kjerne**

For kjernen velges et kjernemateriale som er egnet for høye frekvenser. Her vil det være forskjellige løsninger, og grunnen til at det her er valgt ferritt-materialet N87 [31] fra Siemens, var at den er tilpasset høye frekvenser, samt det er dette materialet den ønskede kjernetypen er produsert i og det var enkelt å få tak i. Det var andre materialer som kunne vært brukt, og er implementert i Excel-arket som ligger vedlagt. Ingen av disse var nevneverdig bedre enn det valgte materialet, og det ville ikke gitt noen spesielle fordeler ved å velge disse. Ved valg av andre kjernematerialer kunne det også oppstått problemer med å anskaffe den aktuelle delen.

Ved valg av kjerne er den største tilgjengelige ferritt-kjernen valgt, en U-kjerne av typen U93/152/30 [32]. Dette var den kjernen det var lettest og få tak i, den eneste kjernen i dette materialet på lager der det ble bestilt fra. Denne kjernen vil, ifølge utregningene, ikke være den optimale for transformatoren vår med tanke på effektivitet eller tap, matematikken ville foretrukket en mindre kjerne. For denne oppgaven er ikke hovedfokuset effektivitet og tap, men at det bare skal genereres en spenning som er gitt, uavhengig av hvordan den produseres. Det er viktig å bemerke at transformatoren vil ha små tap, i størrelsesorden 60 W, som ikke er stort mer varme enn én lyspære produserer. Ved å bestille en større kjerne enn nødvendig gir det også rom for større sikkerhetsmargin, oppgradering og utbedring ved senere tidspunkt. For en fullstendig oversikt over kjernen henvises det til kapittel 8.1

#### **9.3.2 Vinding**

I en høyfrekvent høyspenningstransformator kan det være fare for skinneffekter på lederne. Dermed er det viktig å undersøke hvor tykk lederen må være og om dette er tykkere enn den beregnede skinneffekten. Vindingstykkelsen er gitt fra tabell 9.1 mens inntrengningsdybden er gitt fra tabell 8.6 og er lik 0,46 mm.

**Tabell 9. 1 – Oversikt over vindingene i transformatoren**

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

Lederdiameteren for den primære lederen gitt fra tabell 9.1 er på 1,78 mm. Denne er større enn den beregnede inntrengningsdybden og det vil være nødvendig å bestille en leder av typen litztåd. Det ble bestilt en tråd som heter Rupalit med 800 ledere på hver 0,071 mm i diameter. Dette gir et ledertverrsnitt gitt av ligning 9.1

$$A_{real} = \pi r^2$$

$$d = 0,071 \text{ [mm]}, r = 0,0355 \text{ [mm]}, ledere = 800$$

$$A_{pri} = \pi \cdot 0,0355^2 \cdot 800 = 3,17 \text{ [mm}^2\text{]}$$

**[ 9.1 ]**

Det vil ikke være nødvendig med en leder som er delt inn i så mange ledere som den valgte tråden, men her er det tatt hensyn til tilgjengelighet og den totale tykkelsen. Det var ikke mange kommersielle ledere å velge mellom, og den tråden med total diameter større enn, men nærmest lederdiameter ble valgt, uavhengig av antallet ledere inni tråden, da det viktigste er at det ikke oppstår skinneffekt i hver enkelt leder, noe som sier at den må være mindre enn 0,46 mm. I dette tilfellet er 0,071 mm < 0,46 mm.

For den sekundære siden er den beregnede ledertykkelsen mindre enn inntrengningsdybden. Her er det allikevel valgt å bestille en leder av typen litztråd. Dette er gjort for å minske mulige feilkilder og for å være på den sikre siden da det ikke er snakk om stor forskjell i lederdiameteren og inntrengningsdybden. Den valgte lederen heter CLI med 15 ledere på hver 0,1 mm i diameter. Ved å bruke samme utregning som 9.1 finnes ledertverrsnittet til å bli:

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

**[ 9.2 ]**

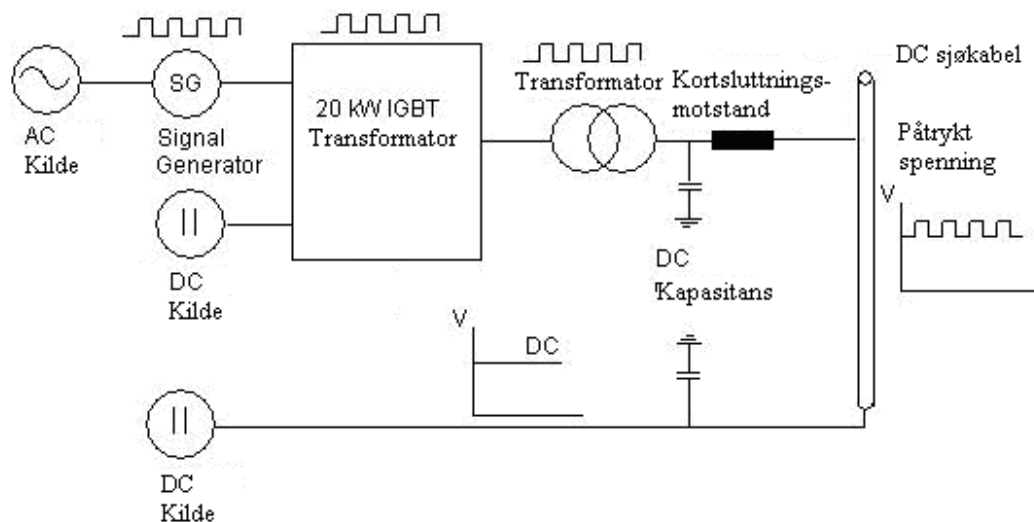
Lederne vil dermed være litt overdimensjonert, noe som er vanskelig å unngå når det bestilles lagervare. Det vil dermed være en litt større sikkerhetsmargin knyttet til overføringskapasiteten til transformatoren.

For konstruksjonen av vindingene og kjernen er det, som tidligere beskrevet, viktig å isolere godt for å unngå overslag. Dette er beskrevet i kapittel 8.2 og vil bli behandlet neste semester.

## 10. Konklusjoner

Målet med oppgaven er å gjennomføre en litteraturundersøkelse, utvikle et testoppsett samt designe en transformator som brukes i testoppsettet.

Spenningen som ble funnet i litteraturundersøkelsen vil ligge på  $\pm 0,1$  pu. Grunnet testing på modellkabler er spenningen satt til  $100 \text{ kV} \pm 10 \text{ kV}_{\text{rms}}$ . Det ble testet to forskjellige oppsett hvor det første oppsettet som bestod av en signalgenerator som genererte en spenning og ble forsterket av en TREK høyspenningstransformator. Dette oppsettet greide ikke å levere den ønskede spenningen og et nytt oppsett ble designet.



**Figur 10. 1 - Testoppsett til laboratorieforsøk der det skal genereres en høy spenning med en overliggende høyfrekvent transient.**

Testoppsettet vil se ut som figur 10.1 og bestå av en signalgenerator som styrer en IGBT-omformer. Signalgeneratoren kan generere trekant, firkant og sinusformet spenning opp til 5 V og 2 MHz. Omformerer drives av to 300 V likespenningsgeneratorer. IGBT-omformerer leverer da en spenning på  $424 \text{ V}_{\text{rms}}$ . Denne spenningen blir transformert av en transformator som skal produseres neste semester. Transformatoren vil ha en kjerne av typen U93/152/30 men en ferritt-materiale N87 fra Siemens. Den vil være i stand til å levere  $10 \text{ kV}_{\text{rms}}$ , med en frekvens på opp til 20 kHz. Vindingene vil henholdsvis bestå av litztråd av merke Rapalit med 800 ledere på hver 0,071 mm i diameter på primærsiden og litztråd av merket CLI med 15 ledere på hver 0,1 mm i diameter på sekundærsiden. Isoleringen av transformatoren er ennå ikke fastsatt og vil bli gjort i forbindelse med monteringen neste semester. Transformatoren settes i serie med en kommersielt tilgjengelig 100 kV DC-kilde som finnes på laboratoriet for å generere den ønskede spenningen på  $100 \text{ kV} \pm 10 \text{ kV}_{\text{rms}}$ . Dermed vil det være mulig, neste semester, å teste hvilken innvirkning transiente spenninger har på en HVDC-sjøkabel.

## 11. Forslag til videre arbeid

---

For videre arbeid tenkes arbeid utført i masteroppgaven neste semester. Her vil hovedfokuset være på å montere utstyret samt teste spenninger med en overliggende transient på modellkabler.

- Vindingstrådene bør testes for å beregne hvordan transformatoren må isoleres
- Montere hele transformatoren.
- Undersøke hvordan kretsen kan beskyttes ved eventuelle kortslutninger.
- Foreta beregninger på hvilke funn det forventes og finne, og hva innvirkningene kan ha på kabelen.
- Beregne hvordan testtiden kan minskes ved hjelp av spenningsøkning.
- Gjøre forsøk på modellkabel for å finne ut hvilken påvirkning spenningen har på kabelen, med fokus på innmatningsenden av systemet, da det er her transientene vil oppstå. Grunnet den indre kapasitansen i kabelen vil resten av kabelen oppleve spenningen som konstant.



## 12. Referanseliste

---

- [1] 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)
- [2] 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]
- [3] Kart over det norske distribusjonsnettet:  
[http://www.geni.org/globalenergy/library/national\\_energy\\_grid/norway/norwegiannationalelectricitygrid.shtml](http://www.geni.org/globalenergy/library/national_energy_grid/norway/norwegiannationalelectricitygrid.shtml)
- [4] K. Søbrink, 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>
- [5] T. Ackermann: “Wind Power in Power Systems” [2005]
- [6] Informasjonsside om ingeniøren Oscar von Miller:  
[http://www.absoluteastronomy.com/topics/Oskar\\_von\\_Miller](http://www.absoluteastronomy.com/topics/Oskar_von_Miller)
- [7] R.Boinne: “HVDC Submarine Cables” *Masteroppgave Norges Naturvitenskapelige Universitet* [2007]
- [8] T. Worzyk: “100 years of high voltage DC links” [www.interlinks.lt/failai/file\\_9.pdf](http://www.interlinks.lt/failai/file_9.pdf) [2007]
- [9] 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/$File/04MP0274%20Rev.%2000.pdf)
- [10] M. Molinas, TET 4525 - Elektrisk energi, fordypningsevne ELK-23 – Kraftelektronikk I fremtidens kraftsystemer: Leksjon 2, s 15 [2009]
- [11] E. Ildstad, TET 4195 – High Voltage Equipment – Cable technology [2007]
- [12] Abb.com “Cables for offshore wind farms”  
[http://library.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/d983a80ac3404eb4c1256e83003d3f25/\\$File/Cables%20for%20Offshore%20Wind%20Farms.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/d983a80ac3404eb4c1256e83003d3f25/$File/Cables%20for%20Offshore%20Wind%20Farms.pdf)
- [13] P.J. Caronia, J.M. Cogen, J. Kjellqvist. “New XLPE Insulation Materials for HV and EHV Cables”  
[http://www.dow.com/PublishedLiterature/dh\\_004b/0901b8038004b704.pdf?filepath=wire/pdfs/noreg/310-01901.pdf&fromPage=GetDoc](http://www.dow.com/PublishedLiterature/dh_004b/0901b8038004b704.pdf?filepath=wire/pdfs/noreg/310-01901.pdf&fromPage=GetDoc)
- [14] M. Molinas, TET 4525 - Elektrisk energi, fordypningsevne ELK-23 – Kraftelektronikk I fremtidens kraftsystemer: Leksjon 2, s 37 [2009]

- [15] Siemens: “The smart way, HVDC plus one step ahead”  
<http://w3.energy.siemens.com/cms/00000013/aune/Documents/HVDCPLUS.pdf>
- [16] Siemens: “Prospects of multilevel VSC converter technologies”  
[http://www.ptd.siemens.de/AEIT08\\_Pres2.pdf](http://www.ptd.siemens.de/AEIT08_Pres2.pdf)
- [17] 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>
- [18] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robins: “Power Electronics – Converters, applications, and design” Third edition [2003]
- [19] B. Dadashi: “Power transformer design”  
[http://english.irantvto.ir/%5Cuploads%5C92\\_44\\_maghaleh.pdf](http://english.irantvto.ir/%5Cuploads%5C92_44_maghaleh.pdf)
- [20] S. A. Mulder: “Fit formulae for power loss in ferrites and their use in transformer design”
- [21] P. Boonchiam, N. Mithulananthan: “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>
- [22] T. M. Blooming, D. J. Carnovale: “Application of IEEE STD 519-1992 Harmonic Limits”
- [23] 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
- [24] 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
- [25] 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
- [26] K. Eriksson ABB “Operational experience of HVDC Light”
- [27] Tektronix P6015A “High Voltage Oscilloscope Probe”: 20kV, 75MHz, X1000  
<http://www.testpath.com/Items/High-Voltage-Oscilloscope-Probe-20kV-75MHz-X1000-10-ft-long-Cable-117-551.htm>
- [28] A. H. Wenaas Kristoffersen “Sub Sea Power Electronics” Masteroppgave [2007]  
[http://daim.idi.ntnu.no/masteroppgaver/IME/ELKRAFT/2\\_007/3509/masteroppgave.pdf](http://daim.idi.ntnu.no/masteroppgaver/IME/ELKRAFT/2_007/3509/masteroppgave.pdf)
- [29] K. Ljøkelsøy, H. Kolstad: ”Arbeidsnotat 20 kW omformer. Beskrivelse” [2002]
- [30] Produktinformasjon TREK 20/20 <http://www.trekin.com/products/20-20C.asp>
- [31] 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)

- [32] Produktinformasjon feritt-kjerne U93/152/30:  
[http://www.epcos.com/inf/80/db/fer\\_07/u\\_93\\_152\\_30.pdf](http://www.epcos.com/inf/80/db/fer_07/u_93_152_30.pdf)

## 13. Vedlegg

---

### **Vedlegg 1.**

Vedlegg 1 inneholder en CD med det videreutviklede Excel-arket samt en elektronisk utgave av oppgaven.