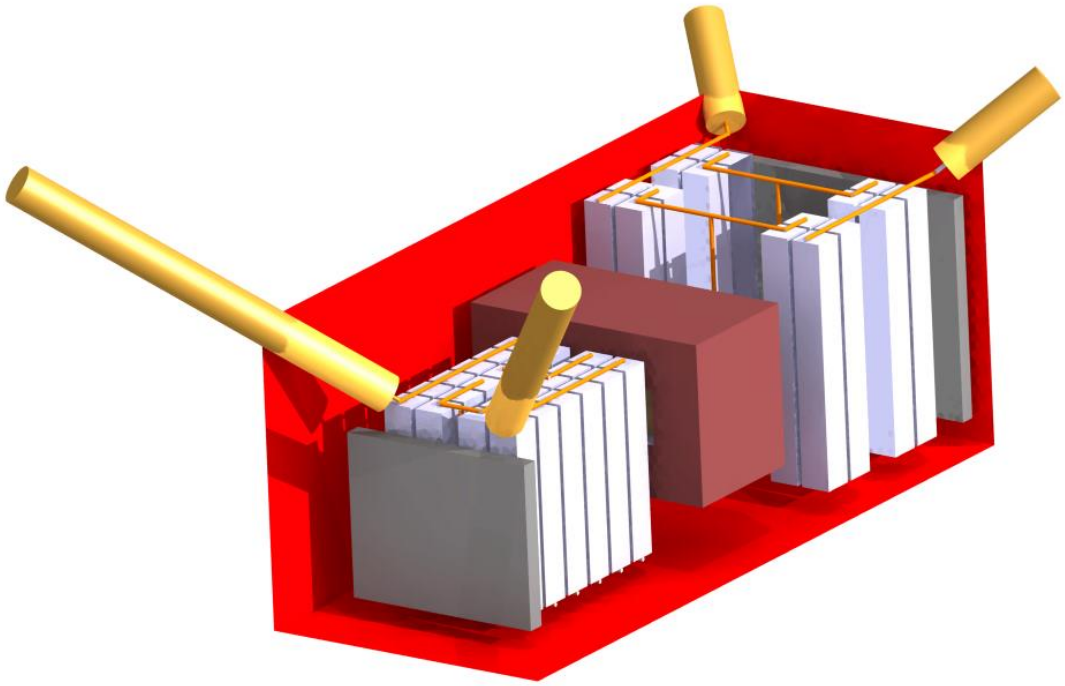
CHALMERS



Isolationsstudie av DC/DC-omriktare

Havsbaserad vindkraft

Examensarbete för högskoleingenjörsexamen inom Elektroingenjörsprogrammet

OSCAR HELLQVIST
JONAS LARSSON

Institutionen för material- och tillverkningsteknik
Avdelningen för högspänningsteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2013
Examinator: Aleksander Bartnicki

Examensarbete nr 87/2013

Isolationsstudie av DC/DC-omriktare

Havsbaserad vindkraft

OSCAR HELLQVIST
JONAS LARSSON

Institutionen för material- och tillverkningsteknik
Avdelningen för högspänningsteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2013

Isolationsstudie av DC/DC-omriktare
Havsbaserad vindkraft
OSCAR HELLQVIST
JONAS LARSSON

Rapport nr 87/2013
Institutionen för material- och tillverkningsteknik
Avdelningen för högspänningsteknik
Chalmers Tekniska Högskola
SE–412 96 Göteborg
Sverige
Telefon +46 (0)31–772 1000

Framsida:
CAD-modell av DC/DC-omriktare

Chalmers Bibliotek, Reproservice
Göteborg, Sverige 2013

Isolationsstudie av DC/DC-omriktare
Havsbaserad vindkraft
OSCAR HELLQVIST
JONAS LARSSON
Institutionen för material- och tillverkningsteknik
Avdelningen för högspänningsteknik
Chalmers Tekniska Högskola

Abstract

Förnyelsebar energi är viktigt för att minska människans negativa miljöpåverkan. Ett steg i processen är optimering av transmissionsnätet och investering i fler förnyelsebara energikällor, till exempel vinkraftparker. Vinkraftparker med enbart likströmsöverföring har lägre effektförluster än motsvarande växelström. För att ytterligare minska förluster i likströmsnät behöver spänningen ökas med DC/DC-omriktare. Syftet med studien är att uppskatta vilken effekt en DC/DC-omriktare kan uppnå om den placeras i en 20' container vid botten av ett vindkraftverk, detta under förutsättning att modern teknik används.

Studien presenterar en modell av DC/DC-omriktare i en container och beskriver hur beräkningarna har utförts. Alla beräkningar baseras kring förenklade modeller, vilket innebär att slutresultatet ger en optimistisk bild av hur omriktare kan rymmas i containerkonstruktioner. Fördelen med omriktare i container vid botten av ett vindkraftverk är att ingen separat platform behöver konstrueras för DC/DC-omriktare och därmed är mer ekonomiskt.

Modellen och beräkningarna visar att en teoretisk DC/DC-omriktare om 360 MW får plats i containern. I praktiken föreslås maximal effekt om 240 MW med förenklingarna i åtanke.

Renewable energy is important in order to reduce our negative impact of the planet. One step in reducing our impact is to optimize the power transmission and invest in renewable energy sources such as windfarms. Windfarms with direct current transmission has lower losses than for alternating current. To further reduce losses in direct current transmission networks the voltage is increased with DC/DC-converters. The purpose of this study is to estimate how much power a DC/DC-converter in a 20' container at the bottom of a windmill can handle, this is carried out under the assumption that high end technology is used.

This paper describes a model of a DC/DC-converter within a container and describes calculations regarding its size. All calculations is based on simplified models, this means that the power density of the converter will be smaller in reality. The benefits with this container converter is that no separate platform needs to be constructed for a converter station and is thus more economical.

The design and calculations show that a theoretical DC/DC-converter of 360 MW could be fitted in the container. In practice a DC/DC-converter of 240 MW is suggested due to simplifications.

Index Terms: Converters, Windfarm and HVDC.

Förord

Arbetet har utförts vid institutionen för material- och tillverkningsteknik, avdelningen för högspänningsteknik vid Chalmers tekniska högskola.

Oscar Hellqvist
Jonas Larsson
Göteborg, Sverige, 2013

Innehåll

Abstract iii

Förord v

Innehållsförteckning vii

1 Introduktion 1
- 1.1 Problembakgrund . . . 1
- 1.2 Syfte . . . 1
- 1.3 Frågeställning . . . 1

2 Variabelförteckning 3

3 Teori 7
- 3.1 Vindkraftsparker . . . 7
  - 3.1.1 Inledning . . . 7
  - 3.1.2 Effektförluster . . . 7
- 3.2 DC/DC-omriktare . . . 8
  - 3.2.1 Introduktion . . . 8
  - 3.2.2 Konfiguration . . . 9
- 3.3 Skyddsutrustning . . . 10
  - 3.3.1 Inledning . . . 10
  - 3.3.2 Brytare . . . 10
  - 3.3.3 Frånskiljare och jordningskopplare . . . 10
  - 3.3.4 Ventilavledare . . . 10
- 3.4 Genomföringar . . . 10
  - 3.4.1 Inledning . . . 10
  - 3.4.2 Geometri . . . 11
- 3.5 Transformatorer . . . 11
  - 3.5.1 Inledning . . . 11
  - 3.5.2 Geometri . . . 12
  - 3.5.3 Kärnmaterial . . . 12
  - 3.5.4 Magnetisk flöestäthet . . . 12
  - 3.5.5 Lindningar . . . 12
  - 3.5.6 Kärnarea . . . 12
  - 3.5.7 Isolering . . . 13
  - 3.5.8 Förluster . . . 13
- 3.6 Transistorer . . . 14
  - 3.6.1 Inledning . . . 14
  - 3.6.2 Serie- och parallellkoppling . . . 14
  - 3.6.3 Förluster . . . 14
- 3.7 Kondensatorer . . . 15
- 3.8 Kylning . . . 15

3.9 Strömtäthet . . . 15
3.10 Isolationskoordinering . . . 16
3.10.1 Inledning . . . 16
3.10.2 Elektriska fält . . . 16
3.10.3 Elektrisk urladdning . . . 19
3.10.4 Isolationsmaterial . . . 20

4 Studiefall **21**
4.1 Bakgrund . . . 21
4.2 Scenario . . . 21
4.3 Topologi . . . 22
4.4 Modell . . . 23

5 Analys **25**
5.1 DC/DC-omriktare . . . 25
5.1.1 Avgränsningar . . . 25
5.2 Skyddsutrustning . . . 26
5.2.1 Avgränsningar . . . 26
5.2.2 Brytare . . . 26
5.2.3 Frånskiljare och jordningskopplare . . . 26
5.2.4 Ventilavledare . . . 26
5.3 Genomföringar . . . 26
5.3.1 Avgränsningar . . . 27
5.3.2 Geometri . . . 27
5.4 Transformator . . . 28
5.4.1 Inledning . . . 28
5.4.2 Avgränsningar . . . 28
5.4.3 Val av parametrar . . . 29
5.4.4 Geometri . . . 29
5.4.5 Ledararea . . . 30
5.4.6 Lindningsvarv . . . 30
5.4.7 Isolationsmaterial . . . 30
5.4.8 Isolationstjocklek mellan primär- och sekundärlindning . . . 30
5.4.9 Isolationstjocklek mellan sekundärlindning och containeryta . . . 31
5.4.10 Förluster . . . 32
5.5 Skensystem . . . 32
5.5.1 Avgränsningar . . . 32
5.5.2 Geometri . . . 32
5.6 Transistorer . . . 33
5.6.1 Inledning . . . 33
5.6.2 Avgränsningar . . . 34
5.6.3 Geometri . . . 34
5.6.4 Förluster . . . 35
5.6.5 Kylning . . . 36
5.6.6 Frekvens . . . 36
5.7 Kondensatorer . . . 37
5.7.1 Inledning . . . 37
5.7.2 Avgränsningar . . . 37
5.7.3 Geometri . . . 37

6 Resultat **39**
6.1 Introduktion . . . 39
6.2 Geometrisk modell . . . 39
6.2.1 Sluten modell . . . 40
6.2.2 Vy över lågspänningssidan . . . 41
6.2.3 Vy över högspänningssidan . . . 42
6.3 Maximal effekt . . . 43
6.4 Modellförslag . . . 45
6.4.1 Modell A . . . 46
6.4.2 Modell B . . . 47
6.4.3 Modell C . . . 48
6.5 Diskussion . . . 48
6.6 Slutsats . . . 49
6.7 Framtida arbete . . . 49

Referenser **51**

A dcdc.m **53**

B transformator.m **69**

C genomforing.m **73**

D skensystem.m **75**

E igbt.m **79**

F kondensator.m **87**

Kapitel 1

Introduktion

1.1 Problembakgrund

Det byggs fler och fler vindparker i grunda hav, till exempel Nordsjön. Just nu används nästan bara AC som transmissionsspänning från vindkraftgenerator till AC/DC-omriktare, men i framtiden kommer förmodligen DC dominera längre sträckor. Anledningen är att DC inte ger upphov till några reaktiva effektförluster. Det fnns redan nu vindparker anslutna med DC till fastlandet, men AC används mellan ett enskilt vindkraftverk och AC/DC-omriktaren. I framtiden torde DC/DC-omriktare användas istället. Att bygga separata plattformar för dessa är mycket kostsamt, om de kan rymmas i eller vid sidan av vindkraftverket är det följdaktligen mer ekonomiskt. En lösning vore att placera omriktaren i en container vid vindkraftverkets botten. För att utreda vilken effekt en sådan omriktare kan uppnå erfordras en studie av vad som kan rymmas inom containerns tillgängliga utrymme.

1.2 Syfte

Att beräkna hur stor DC/DC-omriktare som får plats i en containerkonstruktion för att effektivisera transmissionsnätet.

1.3 Frågeställning

Kommer en 20’ container rymma en DC/DC-omriktare med kapacitet för upp till 48 st 5 MW vindkraftverk?

Kapitel 2

Variabelförteckning

P	Aktiv effekt - $[W]$
U	Spänning - $[V]$
I	Ström - $[A]$
R	Resistans - $[\Omega]$
$P_{förlust}$	Förlusteffekt - $[W]$
$L_{krypavstnd}$	Längd krypavsånd - $[m]$
$L_{genomföring}$	Längd genomföring - $[m]$
$k_{genomföring}$	Konstant för förhållandet mellan krypavstånd och genomföringslängd - $[m]$
$B(t)$	Flödestäthet - $[T]$
$A_{tråd}$	Trådarea - $[m^2]$
P_{in}	Effekt in - $[W]$
P_{ut}	Effekt ut - $[W]$
J_{Cu}	Strömtäthet - $\left[\frac{A}{mm^2}\right]$
P_{trafo}	Effekt transformator - $[W]$
U_{prim}	Spänning primärsida - $[V]$
I_{prim}	Ström primärsida - $[A]$
U_{sek}	Spänning sekundärsida - $[V]$
I_{sek}	Ström sekundärsida - $[A]$
$A_{kärna}$	Kärnarea - $[m^2]$
t	Tid - $[s]$
$\psi(t)$	Totalt magnetiskt flöde - $[Wb]$
N	Antal varv
$\varphi(t)$	Magnetiskt flöde - $[Wb]$
$\hat{B}$	Flödestäthetens toppvärde - $[T]$
ω	Vinkelhastighet - $\left[\frac{rad}{s}\right]$
e	Inducerad spänning - $[V]$
dt	Derivata m.a.p tid - $[t]$
f_{switch}	Switchfrekvens - [Hz]
l	Längd - $[m]$
r	Radie - $[m]$
$r_{lindning}$	Lindningsradie - $[m]$
$R_{lindning}$	Lindningsresistans - $[\Omega]$
ρ_{Cu}	Resistivitet för koppar - $[\Omega m]$
P_f	Total förlusteffekt $[W]$
$P_{f,lindning,prim}$	Förlusteffekt i lindning vid primärsida - $[W]$
$P_{f,lindning,sek}$	Förlusteffekt i lindning vid sekundärsida - $[W]$
A_{prim}	Primärlindningens trådarea - $[m^2]$
A_{sek}	Sekundärlindningens trådarea - $[m^2]$

N_{prim}	Varvantal för primärsida
N_{sek}	Varvantal för sekundärsida
$P_{f,kärna}$	Förlusteffekt i transformatorkärna - $[W]$
V_d	Driftspänning - $[V]$
I_0	Driftström - $[S]$
V_{on}	Spänning på-switch - $[V]$
$t_{c(on)}$	Stigtid - $[s]$
$t_{c(off)}$	Falltid - $[s]$
W_{on}	Transistorns ledande effektförlust - $[W]$
$W_{c(on)}$	Transistorns effektförlust vid på-switch - $[W]$
$W_{c(off)}$	Transistorns effektförlust vid av-switch - $[W]$
f_s	Switchfrekvens - $[Hz]$
C	Kapacitans - $[F]$
P_d	Förlusteffekt - $[W]$
T	Temperatur - $[grader\ C]$
T_1	Temperatur ytskikt - $[K]$
T_2	Temperatur kylmedium - $[K]$
R_θ	Materialets termiska resistans - $\left[\frac{K}{W}\right]$
J_{Cu_1}	Typvärde strömtäthet utan luftcirkulation - $\left[\frac{A}{m^2}\right]$
J_{Cu_2}	Typvärde strömtäthet med luftcirkulation - $\left[\frac{A}{m^2}\right]$
r_0	Ledarradie - $[m]$
r_1	Radie skikt 1 - $[m]$
r_2	Radie skikt 2 - $[m]$
r_{tot}	Total radie - $[m]$
$\mathbb{E}$	Elektrisk fältstyrka - $\left[\frac{V}{m}\right]$
Q	Laddning - $[C]$
ϵ_0	Permittivitet för vakuum - $\left[\frac{F}{m}\right]$
ϵ_r	Relativ permittivitet
dS	Derivata m.a.p yta - $[m^2]$
d	Avstånd mellan elektrodytor - $[m]$
r	Radie - $[m]$
s	Avstånd till givet objekt - $[m]$
E_{bhg}	Gränsvärde för elektriskt sammanbrott i homogen geometri - $\left[\frac{V}{m}\right]$
p	Tryck - $[bar]$
δ	Relativ lufttäthet
$E_{b,papper-olja}$	Gränsvärde för elektriskt sammanbrott i papper, olja isolering - $\left[\frac{V}{m}\right]$
$E_{b,polyetylen}$	Gränsvärde för elektriskt sammanbrott i polyetylen - $\left[\frac{V}{m}\right]$
U_{vind}	Utspänning från ett vindkraftverk - $[V]$
n_{vind}	Antal vindkraftverk per slinga
m_{vind}	Antal slingor
$U_{DC/DC}$	Utspänning DC/DC-omriktare - $[V]$
H_{cont}	Containerhöjd - $[V]$
B_{cont}	Containerbredd- $[V]$
L_{cont}	Containerlängd - $[V]$
$L_{genomföring,utomhus}$	Längd för genomföringens utomhusdel - $[m]$
$L_{genomföring,inomhus}$	Längd för genomföringens inomhusdel - $[m]$
U_{iso}	Dimensionerande spänning - $[V]$

D_{prim}	Primärlindningens tråddiameter - $[m]$
D_{sek}	Sekundärlindningens tråddiameter - $[m]$
$t_{iso,inre}$	Isolationstjocklek mellan lindningarna - $[m]$
$t_{iso,yttre}$	Isolationstjocklek mellan sekundärlindning och transformatorns utsida - $[m]$
$r_{lindning}$	Lindningsradie - $[m]$
$P_{f,lindning,prim}$	Förlusteffekt primärlindning - $[W]$
$P_{f,lindning,sek}$	Förlusteffekt sekundärlindning - $[W]$
U_{CE}	Kollektor-emitter spänning - $[V]$
I_C	Kollektorström - $[A]$
$R_{\theta_{jc}}$	Termisk resistans kärna till hölje - $\left[\frac{K}{W}\right]$
$R_{\theta_{cs}}$	Termisk resistans hölje till yta - $\left[\frac{K}{W}\right]$
$R_{\theta_{sw}}$	Termisk resistans yta till kylmedium - $\left[\frac{K}{W}\right]$
$R_{\theta_{lc}}$	Termisk resistans för vattenkylning - $\left[\frac{K}{W}\right]$
L_{IGBT}	Längd - $[m]$
B_{IGBT}	Bredd - $[m]$
H_{IGBT}	Höjd - $[m]$
H_{eff}	Tillgänglig höjd - $[m]$
B_{eff}	Tillgänglig bredd - $[m]$
L_{eff}	Tillgänglig längd - $[m]$
n	Aktuellt antal
n_{krav}	Antal som behövs
T_j	Temperatur vid IGBT-kärna - $[K]$
T_a	Temperatur av kylmedium - $[K]$

Kapitel 3

Teori

3.1 Vindkraftsparker

3.1.1 Inledning

System som generar elektrisk energi från förnyelsebara källor är ett måste för framtiden. Detta för att icke-förnyelsebara källor förr eller senare kommer sina och för att minska människans negativa miljöpåverkan. Vindkraftverk har utvecklats mycket under senare år och är en mycket potent förnyelsebar energikälla. Dessa kan placeras på land där det förekommer mycket vind eller ute till havs där vindhastigheten är jämnare [1].

Studien avser vindkraftparker till havs där avstånden är längre och undervattenskablar används. Det finns olika sätt att överföra genererad effekt. Dels kan växelström användas, vilket är vanligast bland existerande vindparker. Dessutom kan likström användas, vilket resulterar i lägre förlusteffekter. Hur vindkraftverken kopplas samman kan utföras olika, varje konfiguration har för- respektive nackdelar.

3.1.2 Effektförluster

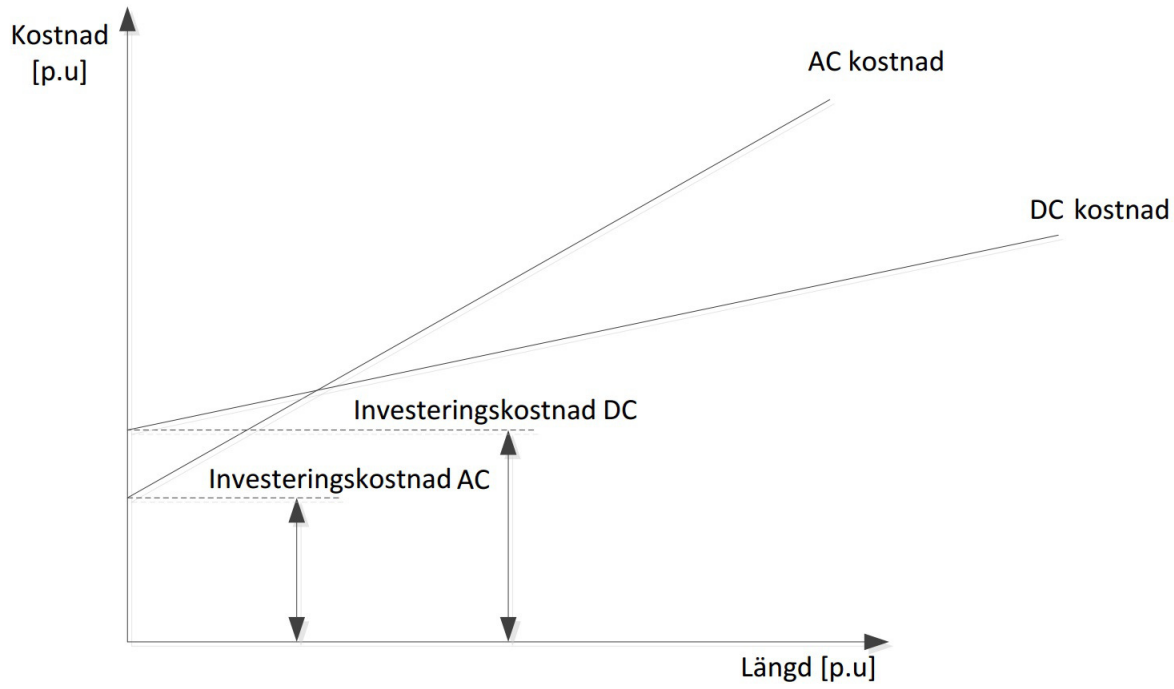
Syftet med att använda lik- istället för växelström är lägre förluster vid överföring. Anledningen till detta är att ingen reaktiv effekt överförs. Reaktiv effekt vid växelströmsöverföring kan inte utföra något arbete, därav förlusteffekt. Överföring av reaktiv effekt resulterar därmed i sänkt effektivitet [2].

För att minska effektförluster i elnät är det fördelaktigt med hög spänning. Detta kan förklaras med hjälp av ohms regel där spänningen U förhåller sig mot resistansen R och strömmen I som $U = RI$ och ekvationen för elektrisk effekt $P = UI$ enligt

$$P = UI = RI^2 \tag{3.1}$$

Följaktligen ökar förlusteffekt $P_{förlust}$ med ström I enligt förhållandet $P \sim I^2$. Efterrsom överförd elektrisk effekt kan beskrivas som $P = UI$ måste spänningen öka för att överföra samma mängd effekt med svagare ström.

Nackdelen med likströmssystem är grundinvesteringen, vilken är högre än motsvarande växelströmssystem. Anledningen är bland annat att stamnätet är uppbyggt med växelström. Detta är dock inget begränsande problem eftersom likströmssystem blir billigare per längdenhet än motsvarande växelströmssystem om avståndet är tillräckligt långt. För undervattenskablar är avståndet väsentligt mindre. figur 3.1 illustrerar kostnaden som funktion av längd för lik- respektive växelströmssystem [2].



Figur 3.1: Kostnad för AC respektive DC-nät avseende avstånd

3.2 DC/DC-omriktare

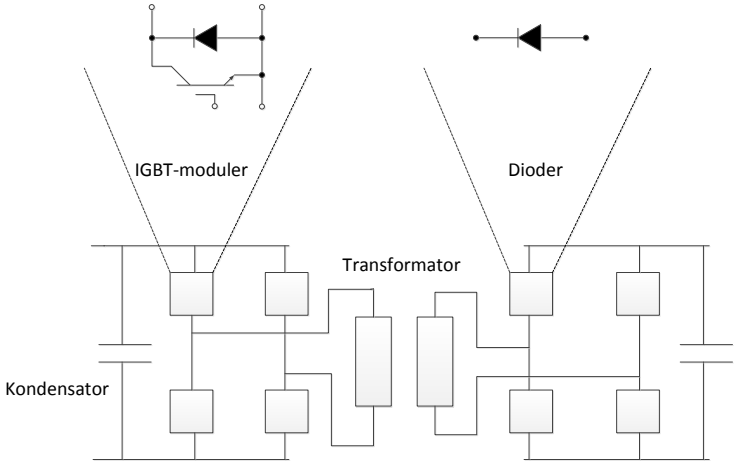
3.2.1 Introduktion

AC-system utnyttjar tidsvariationen för att skapa magnetiskt flöde vilket ger möjlighet att använda transformatorer för omvandling av spänningsnivån. Transformatorer är ej direkt kompatibla med DC-nät, för att ersätta dessa behövs DC/DC-omriktare. En DC/DC-omriktare kan delas in i en växelriktardel, en transformator med samma princip som AC, samt en likriktardel. För att skapa magnetiskt flöde till transformatorn är tidsvarierande ström en förutsättning, vilket uppnås med transistorer eller resonanskretsar. För att minska påfrestningen av transformatorn är sinusformad ström fördelaktigt då fyrkantsvåg har högt frekvensinnehåll [3].

3.2.2 Konfiguration

Single Active Bridge (SAB)

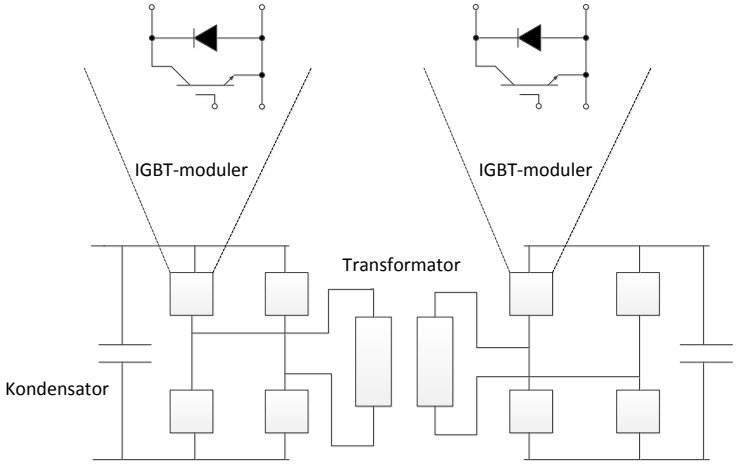
Att växelrikta strömmen kommer ge upphov till magnetisk flöde i transformatorn, till detta används transistorer vid ingången av DC/DC-omriktaren. Vid utgången av DC/DC-omriktaren används effektdioder eller tyristorer för att åter likrikta strömmen. Anledningen till att det kallas enkelbrygga är att endast en helbrygga med transistorer används vid ingången av DC/DC-omriktaren, vilket innebär att effekt bara kan överföras i en riktning. Flera faser kan användas för att minska transienter och öka effektiviteten. figur 3.2 visar kopplingsschemat i enfasigt utförande [3].



Figur 3.2: Kretsschema för Single Active Bridge Converter

Dual Active Bridge (DAB)

En utveckling av SAP-omriktaren är DAB (Dual Active Bridge Converter). Växelriktardelen och likriktardelen består av två helbryggor med transistorer som skapar en tidsvarierande ström. Anledningen att använda transistorer vid andra bryggan istället för dioder är att omriktaren möjliggör effektöverföring i två riktningar. Fler faser kan användas för att minska transienter och öka effektiviteten. figur 3.3 visar kopplingsschemat i enfasigt utförande [3].



Figur 3.3: Kretsschema för Dual Active Bridge Converter

3.3 Skyddsutrustning

3.3.1 Inledning

Kopplingsutrustning måste skyddas mot överspänning samt kortslutning. För att upprätthålla ett tillfredställande skydd bör adekvat skyddsutrustning användas. Utrustning som avses är brytare, frånskiljare, ventilavledare samt jordningskopplare. Flera faktorer avgör hur robust skyddssystemet bör vara, där största riskkällan är överspänningar av atmosfäriskt ursprung.

Flera metoder för koordinering av skyddssystemet finns, statistisk metod respektive determenistisk metod [4]. Statistisk metod lämpar sig vid koordinering av självåterställande isolation, vilket till exempel kan vara där isolationen är gas eller olja. Determenistisk metod används där isolationen vid ett elektriskt sammanbrott inte är självåterställande utan medför permanent skada.

3.3.2 Brytare

Brytarens funktion i skyddssystemet är att bryta kortslutningsströmmar, vilket tidigare varit ett problem för DC som till skillnad från AC saknar nollpunkt där ljusbågen kan släckas [5]. Dock har mycket utveckling skett de senaste åren och HVDC-brytare är inte längre begränsande faktorn för DC-nät [6]. Dimensionerande för brytaren är högsta kortslutningsström och hur snabbt strömmen skall brytas.

3.3.3 Frånskiljare och jordningskopplare

För att synligt koppla till och från en krets används frånskiljare. Dessa placeras vid in- och utgående sida av större brytare, transformatorer, inkommande kablage och annan viktig utrustning som kan behöva underhåll [7].

Jordningskopplare ansluter frånskiljd utrustning mot jord för att möjliggöra säkert arbete. Dessa placeras vanligtvis vid varje frånskiljare [7].

3.3.4 Ventilavledare

Skydd mot överspänningar uppnås genom att placera ventilavledare nära känsliga delar i elnätet. Ventilavledare byggs vanligtvis av metalloxid. En av dessa är zinkoxid med mycket olinjär impedans [8]. Impedansen hos denna typ kan anses oändlig vid normaldrift vilket medför att läckströmmar undviks. När spänningen blir tillräckligt hög närmar sig impedansen noll och ansluter ledningen till jord. Detta eliminerar många skadliga effekter från överspänningar.

3.4 Genomföringar

3.4.1 Inledning

För att ansluta ledningar genom jordat hölje används genomföringar, dessa utjämnar det elektriska fältet samt förhindrar överslag mot höljet. Det finns många typer av genomföringar för olika miljöer, då luftfuktighet, tryck, föroreningar och strålning påverkar hur starkt elektriskt fält som orsakar överslag [4]. Gasen eller vätskan som omgärdar genomföringen påverkar till stor del dess längd av samma anledning.

3.4.2 Geometri

Totalt krypavstånd för genomföringar samt isolatorer är avståndet längs alla kjolar. Högt krypavstånd är önskvärt för att minska vagabonderande strömmar, dessutom ökar den ekvivalenta sträckan som elektronerna förflyttar sig innan överslag [4]. IEC definierar fyra olika klasser för det totala krypavståndet $L_{krypavstånd}$ [9]:

- Klass 1: 16 $\frac{mm}{kV}$ för lätt förorenad miljö
- Klass 2: 20 $\frac{mm}{kV}$ för mellan förorenad miljö
- Klass 3: 25 $\frac{mm}{kV}$ för tungt förorenad miljö
- Klass 4: 31 $\frac{mm}{kV}$ för mycket tungt förorenad miljö

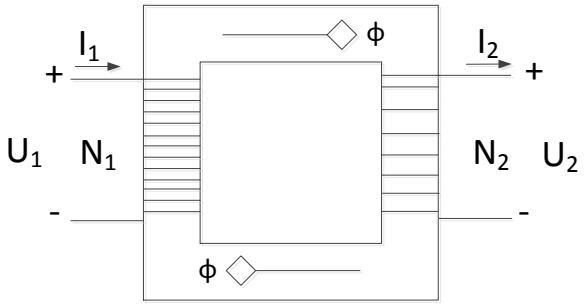
För att vidare bestämma genomföringens axiella längd, $L_{genomföring}$ används ett längdförhållande, $k_{genomföring}$, vilket är specifikt för varje modell. Denna beror av kjolarnas utformning. Axiell längd beräknas enligt

$$L_{genomföring} = \frac{L_{krypavstånd}}{k_{genomföring}} \tag{3.2}$$

3.5 Transformatorer

3.5.1 Inledning

Transformatorer är komponenter vilka används för att ändra spänningsnivåer. En tidsvarierande ström inducerar magnetiskt flöde i kärnan. Detta magnetiska flöde inducerar sedan spänning i sekundärlindningen. Spänningsnivån beror av lindningsförhållandet mellan primär- respektive sekundärlindningen. En enkel modell av transformatorns funktion illustreras i figur 3.4.



Figur 3.4: Magnetiskt flöde i transformator

Förhållandet mellan primärspänning U_1 och sekundärspänning U_2 beror av lindningsvarven N_1 och N_2 enligt

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \tag{3.3}$$

3.5.2 Geometri

Kärnkonstruktionen varierar för olika typer av transformatorer. Varje konstruktion har sina för- respektive nackdelar. Konventionella växelströmstransformatorer konstrueras ofta med tre ben, ett för varje fas, vilket bättre utnyttjar kärnans magnetiska kapacitet [10]. För mindre högfrekvenstransformatorer är E-kärnor med cylindriskt lindningsben vanliga [3]. Fördelen med dessa är att de enkelt kan lindas och är kompakta. Halva magnetiska flödet cirkulerar i sidobenen och därför behöver sidobenens area endast vara hälften av kärnarean.

3.5.3 Kärnmaterial

Kärnor för vanliga växelströmsnät tillverkas normalt av flera lager med tunna plåtar av magnetstål. Magnetstål är en legering av kisel och stål som används istället för rent stål. Resistansen av magnetstål är lägre vilket leder till lägre kärnförluster till följd av virvelströmmar [10]. Transformatorer för högre frekvenser konstrueras vanligtvis i ferritmaterial eller av kristallina partiklar då kärnförlusterna är för höga för andra material [3].

Vitroperm är ett relativt nytt material som används till transformatorkärnor vid högre frekvenser. Materialet består av kristallina partiklar som kraftigt reducerar kärnförluster till följd av virvelströmmar.

3.5.4 Magnetisk flöestäthet

För att hantera det magnetiska flöde $\hat{B}$ som krävs vid effektöverföringen måste kärnarean vara tillräckligt stor. Flödestätheten påverkar dessutom transformatorns storlek. Kärnmaterialet avgör vilken flödestäthet som är lämplig då mättnadsnivån är materialberoende. Mättnadsnivån för magnetstål, Vitroperm samt ferrit är cirka $1,6\ -\ 2,2\ T$, $1,2\ T$, $0,2\ -\ 0,5\ T$ respektive.

3.5.5 Lindningar

Fler varv lindningstråd används för att skapa högre magnetiskt flöde och följaktligen minska kärnans area. Dessa lindningar kan konstrueras som skenor kring en kärna, vilket är normalt för vanliga växelströmstransformatorer av högre effekt. Vid högre frekvenser är dock skineffekten påtaglig och i sådana applikationer används ofta knippen med litz-tråd [10].

Litz-tråd är lindningstrådar som är så små att de inte påverkas mycket av skineffekten. Dessa trådar är sedan isolerade och sammansatta i knippen för att leda högre strömmar [10].

Effektiv area av ett knippe med litztråd $A_{tråd}$ som krävs för en lindning kan beräknas genom att anta förlustfri transformator. Ineffekt P_{in} antas då vara ekvivalent med uteffekt P_{ut} och detta tillsammans med strömtätheten för koppar J_{Cu} ger följande

$$P_{in} \approx P_{ut} \Rightarrow P_{trafo} = U_{prim} * I_{prim} = U_{sek} * I_{sek} \tag{3.4}$$

$$I_{prim} = \frac{P_{trafo}}{U_{prim}},\ I_{sek} = \frac{P_{trafo}}{U_{sek}} \tag{3.5}$$

$$A_{prim} = \frac{I_{prim}}{J_{Cu}},\ A_{sek} = \frac{I_{sek}}{J_{Cu}} \tag{3.6}$$

3.5.6 Kärnarea

Kärnans area, $A_{kärna}$, måste vara tillräckligt stor för att tillåta det totala magnetiska flödet, $\psi(t)$. Totala flödet beror av antal varv N samt magnetiskt flöde $\varphi(t)$, vilket beräknas med hjälp av arean och magnetiska flödestätheten $B(t)$ enligt

$$\psi(t) = N \cdot \varphi(t) = N \cdot A_{kärna} \cdot B(t) = N \cdot A_{kärna} \cdot \hat{B} \cdot cos(\omega \cdot t) \tag{3.7}$$

Spänningen e induceras av tidsvarierande magnetiskt flöde

$$e = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d(N \cdot A_{kärna} \cdot \hat{B} \cdot cos(\omega \cdot t))}{dt} = N \cdot A_{kärna} \cdot \omega \cdot \hat{B} \cdot sin(\omega \cdot t) \tag{3.8}$$

Toppvärdet U av spänningen beräknas som

$$U = |e| = |N \cdot A_{kärna} \cdot \omega \cdot \hat{B} \cdot sin(\omega \cdot t)| = N \cdot A_{kärna} \cdot \omega \cdot \hat{B} \tag{3.9}$$

$$\tag{3.10}$$

Ur detta löses kärnarean enligt

$$A_{kärna} = \frac{U}{N \cdot \omega \cdot \hat{B}} = \frac{U}{N \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{switch} \cdot \hat{B}} \tag{3.11}$$

Följdaktligen är kärnarean omvänt proportionell mot antal lindningsvarv, frekvensen och den magnetiska flödestätheten.

3.5.7 Isolering

För att undvika läckströmmar och överslag bör primär- respektive sekundärlindning av transformatorn vara isolerade från varandra [10]. Även vart lindningsvarv skall isoleras, dock med ett tunnare skikt då spänningen mellan varje lindning inte är lika hög som den mellan primär- respektive sekundärsidan. För att skydda utrustning utanför transformatorn bör även utsidan av denna isoleras.

3.5.8 Förluster

Transformatorns förluster består främst av lindningsförluster och kärnförluster [4]. Resistiva förluster i lindningarna kan beräknas genom lindningens totala längd l. Längden kan räknas ut genom lindningarnas avstånd från kärnan $r_{lindning}$ och antal varv N med sambandet för cirkelns omkrets, $2\pi r$. Resistansen $R_{lindning}$ beräknas sedan för båda sidor genom att använda resistiviteten för koppar ρ_{Cu}, lindningstrådens area $A_{tråd}$ och varvtal N enligt

$$R_{lindning} = \rho_{Cu} \frac{l}{A_{tråd}} = \rho_{Cu} \frac{2\pi r N}{A_{tråd}} \tag{3.12}$$

För att slutligen beräkna totala lindningsförluster $P_{f,lindning}$ används sambandet för elektrisk effekt $P = UI$ och ohms regel $U = RI$:

$$\begin{aligned} &P_{f,lindning} = P_{f,lindning,prim} + P_{f,lindning,sek} = U_{prim} I_{prim} + U_{sek} I_{sek} = R_{prim} I_{prim}^2 + R_{sek} I_{sek}^2 \\ &= 2\pi \rho_{Cu} \left[\frac{(r_{lindning,prim})\, N_{prim}}{A_{prim}} I_{prim}^2 + \frac{(r_{lindning,sek})\, N_{sek}}{A_{sek}} I_{sek}^2 \right] \end{aligned} \tag{3.13}$$

Kärnförluster $P_{f,kärna}$ kan beräknas med hjälp av parametrar från datablad för vald kärna. Vanliga parametrar är förlusteffekt per kilo och förlusteffekt per volymenhet. Transformatorns totala förluster $P_{f,trafo}$ beräknas som summan av lindningsförluster och kärnförluster

$$P_{f,trafo} = P_{f,lindning} + P_{f,kärna} \tag{3.14}$$

3.6 Transistorer

3.6.1 Inledning

DC/DC-omriktaren växelriktar inkommande likström för att skapa magnetiskt flöde i transformatorn. Detta uppnås vanligen med hjälp av transistorer. Moderna IGBT-moduler (Insulated Gate Bipolar Transistor) kan switcha mycket höga spänningar och starka strömmar, vilket är anledningen att dessa används i stora DC/DC-omriktare. Transistorer är halvledarkomponenter där högre ström/spänning regleras med hjälp av lägre styrström/spänning.

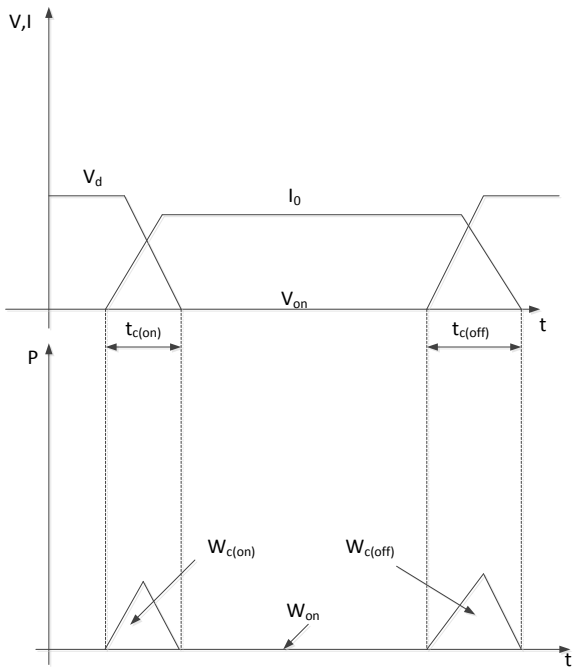
3.6.2 Serie- och parallellkoppling

För att fördela hög spänning seriekopplas IGBT-moduler, dessa sätts samman till staplar. Seriekopplade IGBT-moduler fördelar spänningen över flera moduler, detta för att varje enskild modul inte kan switcha vid för hög spänning. Lägre spänning över enskilda moduler leder till mindre switchförluster, vilka lättare kan kylas bort.

Strömmen kan fördelas genom att parallellkoppla en eller flera IGBT-staplar. Om inkommande ström är starkare än vad en modul kan switcha, behövs fler parallellkopplade IGBT-staplar. Detta innebär även fördelning av strömmen, och därmed ytterligare fördelning av switchförluster.

3.6.3 Förluster

När transistorer switchar sker detta ej omedelbart. Tidsfördröjningen mellan på- och avslagning ger upphov till förluster då spänning och ström samverkar. Switchtider för transistorer, som illustreras i figur 3.5, är därför viktiga. Dessa fördröjningar har i kraftelektroniska sammanhang minskat markant genom åren [11].



Figur 3.5: Switchkarakteristik och förluster för transistorer

Switchförlusterna P_s hos transistorer kan beräknas med hjälp av spänningen V_d, strömmen I_0, switchfrekvensen f_s, påslagningstid $t_{c,on}$ samt avslagningstid $t_{c,off}$ enligt [3]

$$P_s = \frac{V_d I_0 f_s \left(t_{c,on} + t_{c,off}\right)}{2} \tag{3.15}$$

3.7 Kondensatorer

Kondensatorer används för at upprätthålla jämn spänningsnivå i likströmsnät och för faskompensation i växelströmsnät. Kondensatorns strömkarakteristik I kan beskrivas med hjälp av dess kapacitans C samt spänningsvariation dU över tid dt enligt

$$I = C\frac{dU}{dt} \tag{3.16}$$

Detta innebär att spänningskarakteristiken kan härledeas från ovanstående enligt

$$U = \frac{1}{C}\int Idt \tag{3.17}$$

Som (3.17) antyder är oändlig kapacitans önskvärd i DC-nät då detta kommer innebära att spänningsvariationen $\Delta U \to 0$.

Spänning kan fördelas över kondensatorer genom seriekoppling för att uppnå märkspänning. Vidare kan kondensatorer parallellkopplas och högre kapacitans uppnås.

3.8 Kylning

Kylning av elektriska komponenter bör beaktas eftersom förluster ger upphov till värme som behöver transporteras bort från dessa. Hur kylsystemet bör dimensioneras beror av flertal faktorer.

Hur hög förlusteffekt P_d som uppstår avgör hur mycket kylning som krävs. Kroppens yta i kombination med hur mycket förlusteffekt som uppstår är relevant, detta eftersom effekten måste överföras till ett medium med lägre energi. Lägre temperatur T_2 behövs för att sänka temperaturen vid ytskitet T_1.

Materialets termiska resistans R_θ är av stor vikt eftersom detta avgör hur snabbt energi kan förflytta sig genom materialet. Termisk resistans skiljer sig för olika material.

Vanligtvis används ett kylmedium, som till exempel kan vara luft, olja, vatten(glykol) eller ammoniak. Val av kylmedium är främst beroende av vilken applikation som avses, hur mycket energi som behöver ledas bort samt omgivande miljö. Vissa kylmedium kan även uppfylla andra önskvärda egenskaper, till exempel isolation eller smörjning.

Enklare termiska beräkningar för hur värme avleds genom material kan göras med ekvationen [3]

$$T_1 = P_d R_\theta + T_2 \tag{3.18}$$

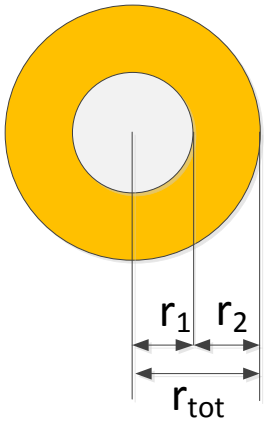
3.9 Strömtäthet

Strömtäthet avser hur stark ström som kan flyta i en ledare med viss tvärsnittsarea. Vilken miljö som avses är avgörande för hur stark ström som kan flyta i ledaren. En ledare med god ventilation har mer fördelaktig värmeavledning och kan därmed föra en starkare ström. Typvärden för strömtätheten hos koppar utan luftcirkulation J_{Cu_1} samt med luftcirkulation J_{Cu_2} ges nedan **[?]**

$$J_{Cu_1} = 4\ \frac{A}{mm^2} \tag{3.19}$$

$$J_{Cu_2} = 6\ \frac{A}{mm^2} \tag{3.20}$$

Vidare begränsas effektiv tvärsnittsarea av skineffekten som uppstår vid högre frekvens. Inducerade virvelströmmar i ledaren motverkar flödet och tvingar strömmen att flyta närmare ledarens yta, därav minskad effektiv area. figur 3.6 illustrerar hur skineffekten påverkar ledararean. r_1 avser icke strömförande del av ledaren, r_2 avser strömförande del och r_{tot} är ledarens totala radie.



Figur 3.6: Illustration av begränsad area till följd av skineffekt

3.10 Isolationskoordinering

3.10.1 Inledning

Elektrisk fältstyrka $\mathbb{E}$ är ett mått av kraft per laddning. Detta kan även uttryckas som spänningen över en given sträcka, vilket avser sträckan mellan två elektrodytor med olika potential. Fältstyrkan för homogen geometri är samma för alla punkter mellan dess elektroder. För icke-homogen geometri avtar den elektriska fältstyrkan från hög potential till låg potential. Geometrin samt vilket typ av material som omsluter geometrin är därför avgörande för hur starkt elektrisk fält som uppstår.

För att skydda utrustning skall elektriska urladdningar undvikas. Detta uppnås genom att dimensionera isoleringen så den elektriska fältstyrkan inte överstiger isolationsmaterialets krtitiska värde. Kritiska värdet påverkas av många faktorer och är svårt att bestämma exakt, speciellt för solida isolationsmaterial där isoleringen kan degraderas över tid [12].

3.10.2 Elektriska fält

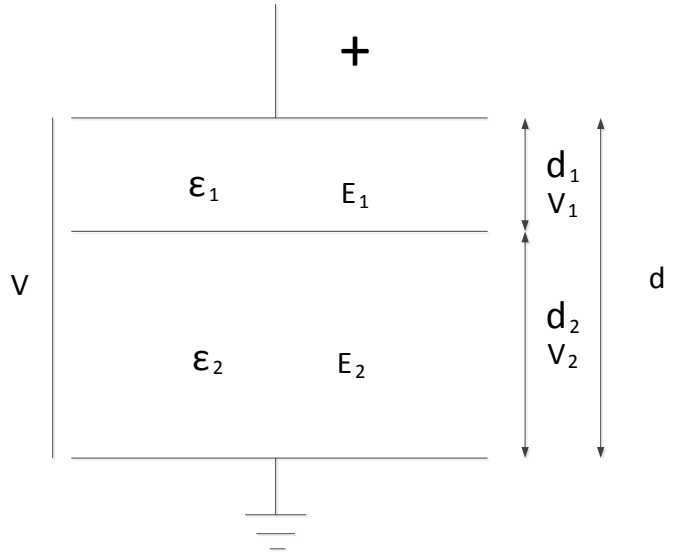
Gauss lag

Gauss lag beskriver hur den inneslutna laddningen Q av en elektrod beror av elektriska fältvektorn $\mathbb{E}$, permettiviteten för vakkum ϵ_0, relativa permettiviteten för materialet ϵ_r och avståndsvektorn $\mathbb{S}$. Gauss lag kan skrivas i integralform enligt

$$Q = \oint \mathbb{E}\epsilon_0\epsilon_r d\mathbb{S} \tag{3.21}$$

Plan-plan geometri

Plan-plan geometri avser två parallella elektrodytor av oändlig area. Mellan dessa elektrodytor finns ett eller flera material med olika permettivitet ϵ, vilket illustreras i figur 3.7.



Figur 3.7: Modell för elektriska fältkalkyler i plan-plan geometri

I homogen geometri är den elektriska fältstyrkan lika stort i varje punkt inom ett material. Total potentialskillnad U mellan elektrodytorna definieras som potentialskillnaden över varje material. Denna potentialskillnad kan beräknas genom multiplikation av elektriska fältstyrkan E och avståndet d.

$$U = E_1 d_1 + E_2 d_2 \tag{3.22}$$

Förhållandet mellan elektriska fältstyrkan i varje material och dess relativa permittivitet ϵ definieras som

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \tag{3.23}$$

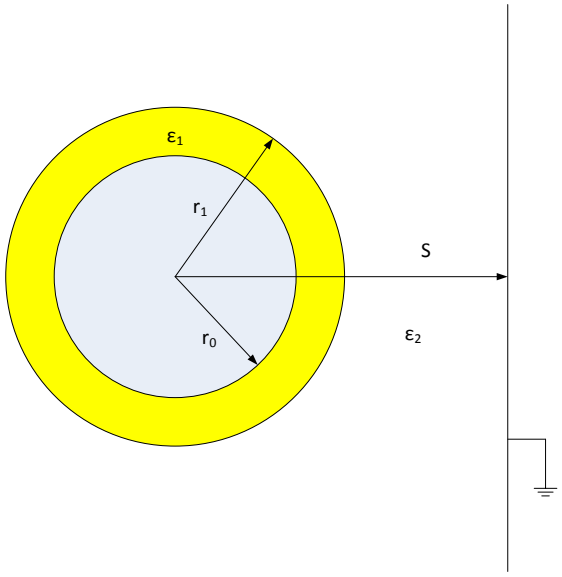
Genom kombination av (3.22) och (3.23) erhålles två ekvationer för att räkna ut den elektriska fältstyrkan E_1 och E_2 i respektive material

$$E_1 = \frac{U}{\epsilon_1 \left(\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} \right)} = \frac{U}{d_1 + d_2 \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right)} \tag{3.24}$$

$$E_2 = \frac{U}{\epsilon_2 \left(\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} \right)} = \frac{U}{d_2 + d_1 \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right)} \tag{3.25}$$

Cylinder-plan geometri

Geometrin avser cylindrisk ledare vilken är placerad med avstånd från ett plan. Mellan dessa finns ett eller flera material med olika permettivitet, vilket illustreras i figur 3.8.



Figur 3.8: Modell för elektriska fältkalkyler i cylinder-plan geometri

För att beräkna elektriska fältstyrkan med avseende på avståndet r från ledarens mitt kan avståndsvektorn beskrivas med r och elektriska fältstyrkan med E. Ytan av en cylindrisk ledare med längden l utan hänsyn till kanter är $2\pi rl$. Integrering över ytan enligt Gauss lag (3.21) leder till

$$Q = E(r)\epsilon_0\epsilon_r 2\pi rl \Rightarrow E(r) = \frac{Q}{\epsilon_0\epsilon_r 2\pi rl} \tag{3.26}$$

Potentialskillnaden U mellan den cylindriska ledaren och planet kan beräknas genom att integrera det elektriska fältet från ledarens mitt till planytan avseende sträckan r

$$\int_{r_0}^{s} E(r)dr = \int_{r_0}^{r_1} E(r)dr + \int_{r_1}^{s} E(r)dr = U(r_1) - U(s) = U \tag{3.27}$$

$$\Rightarrow \int_{r_0}^{r_1} \frac{Q}{\epsilon_0\epsilon_{r_1} 2\pi rl}dr + \int_{r_1}^{s} \frac{Q}{\epsilon_0\epsilon_{r_2} 2\pi rl}dr = U \tag{3.28}$$

$$\Rightarrow \frac{Q}{\epsilon_0 2\pi l}\left[\frac{1}{\epsilon_{r_1}}\int_{r_0}^{r_1}\frac{1}{r}dr + \frac{1}{\epsilon_{r_2}}\int_{r_1}^{s}\frac{1}{r}dr\right] = U \tag{3.29}$$

$$\Rightarrow \frac{Q}{\epsilon_0 2\pi l}\left[\frac{1}{\epsilon_{r_1}} ln\left[\frac{r_1}{r_0}\right] + \frac{1}{\epsilon_{r_2}} ln\left[\frac{s}{r_1}\right]\right] = U \tag{3.30}$$

$$\Rightarrow Q = \frac{U\epsilon_0 2\pi l}{\frac{1}{\epsilon_{r_1}} ln\left[\frac{r_1}{r_0}\right] + \frac{1}{\epsilon_{r_2}} ln\left[\frac{s}{r_1}\right]} \tag{3.31}$$

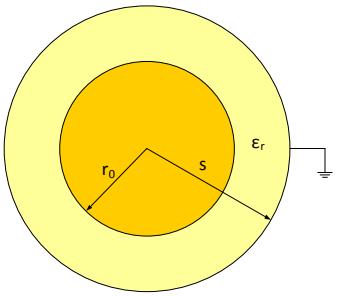
Kombination av (3.26) och (3.31) ger två uttryck för den elektriska fältstyrkan i respektive material.

$$r_0 \leq r < r_1 : \ E(r) = \frac{U\epsilon_{r_1}}{r\left(ln\left[\frac{r_1}{r_0}\right] + ln\left[\frac{s}{r_1}\right]\right)} \tag{3.32}$$

$$r_1 \leq r < s : \ E(r) = \frac{U\epsilon_{r_2}}{r\left(ln\left[\frac{r_1}{r_0}\right] + ln\left[\frac{s}{r_1}\right]\right)} \tag{3.33}$$

Koaxial geometri

Geometrin avser cylindrisk ledare med kringliggande cylindrisk återledare, vilket illustreras i 3.9. Figuren avser endast ett material mellan ledarna.



Figur 3.9: Modell för elektriska fältkalkyler i koaxial geometri

För att beräkna elektriska fältstyrkan med avseende på avståndet r från ledarens mitt kan avståndsvektorn beskrivas med r och elektriska fältstyrkan med E. Beräkningen sker enligt samma metod som cylinderplan geometri, med skillnaden att endast ett mellanliggande material avses. För att beräkna fältstyrkan kan (3.32) skrivas som

$$r_0 \leq r < s : \ E(r) = \frac{U}{r \cdot ln\left[\frac{s}{r_0}\right]} \tag{3.34}$$

3.10.3 Elektrisk urladdning

Homogen geometri i gas

Med homogen geometri avses två planelektroder med oändlig area. Det elektriska fältet mellan dessa är likformigt och fältstyrkan är lika stort vid varje punkt. Kritiska värdet för elektrisk fältstyrka E_{bhg} då elektrisk urladdning sker kan beräknas med hjälp av trycket p och avståndet d enligt

$$E_{bhg} = \frac{6.72p}{\sqrt{pd}} + 24.36p \tag{3.35}$$

$$\tag{3.36}$$

Icke-homogen geometri i gas

Med icke-homogen geometri avses all geometri som inte är homogen. Fältstyrkan för icke-homogen geometri är ej likformig. Kritiska värdet för elektrisk fältstyrka E_{bih} då elektrisk urladdning sker beror av relativa lufttätheten δ och radien r av inre ledaren enligt

$$E_{bih} = 31.35\delta + \frac{9.63\delta}{\sqrt{\delta r}} \tag{3.37}$$

Solida och flytande isolationsmaterial

Att beräkna kritisk elektrisk fältstyrka för solida material är komplicerat då det beror av många faktorer. Vid praktisk isolationskoordinering utnyttjas en bråkdel av materialets kapacitet för att upprätta god säkerhetsmarginal [13].

Två vanliga material vid isolering är oljeindränkt papper och polyetylen. Kritiskt värde för elektrisk fältstyrka när dessa material används i kablar har genom mätningar och beräkningar fastställts till följande [13].

$$E_{b,papper-olja} = 12 \ \frac{kV}{mm} \tag{3.38}$$

$$E_{b,polyetylen} = 15 \ \frac{kV}{mm} \tag{3.39}$$

3.10.4 Isolationsmaterial

Som isolationsmaterial finns en rad olika alternativ. Ett vanligt material är plast, ofta används tvärbunden polyetylen [13]. Andra vanliga material är olja, vilket kan kombineras med papper, samt gas vilket vanligtvis används i gasisolerade ställverk samt brytare. Den gas som används är svavelhexaflorid SF_6.

Polyetylen är en vanlig plast som används inom många applikationer. Plasten är vanlig som isolation för kablar. Materialet är en god isolator då olja av någon anledning inte är önskvärt, detta kan till exempel vara då en transformator placeras i vanliga byggnader och olja därför inte får användas.

Olja är ett material som har flera goda egenskaper vid användning i transformatorer. Materialet klarar avsevärt högre elektrisk fältstyrka utan urladdning jämfört med luft. Detta ökas ytterligare genom kombination med papper [13]. Vidare har olja god värmeledningsförmåga, som tidigare benämnts termisk resistans. Detta utnyttjas i konventionella transformatorer där ett expansionskärl används då volymen ökar med ökande temperatur. Vegetabilisk olja som isolation kan användas där det är svårt att kontrollera eventuella läckage eller där möjlighet till uppsamlingskärl saknas.

SF_6 som isolering har mycket hög hållfastighet avseende elektrisk fältstyrka. Detta medför att utrustning kan konstrueras mycket kompakt då kritiska avstånd för att undvika elektrisk urladdning kan undvikas. Gasisolering med hjälp av SF_6 kan anses kontroversiellt då denna är klassad som den mest potenta växthusgasen. Gasen SF_6 faller under F-gas direktivet vilket innebär att dess användning är förbjuden eller kontrollerad. För tillfället är SF_6 förbjuden i alla applikationer, dock ej för högspänningsutrustning [14].

Kapitel 4

Studiefall

4.1 Bakgrund

Eftersom förnyelsebara energikällor är allt viktigare för att uppnå bärkraftig resurshantering är ett steg att utöka vindkraften. Problematiken detta medför är att effekt förloras då sträckan är lång. Detta gäller främst växelström eftersom reaktiv effekt måste överföras om faskompensation utlämnas. Undervattenskablar är även mycket kapacitiva vilket begränsar sträckan dessa är praktiska för växelströmsöverföring.

Ett mer modernt och effektivt sätt att överföra effekt skulle därför vara likström, vilket dock introducerar andra problem. Ett av dessa är att likström inte är tidsvarierande och därav inte kan utnyttja en traditionell transformator för att ändra spänningsnivån. Ökad spänningsnivå är önskvärt för att minska resistiva förluster. En lösning på detta problem är att använda DC/DC-omriktare. Dessa växelriktar strömmen vilken sedan skapar magnetiskt flöde i en transformator och till sist likriktas.

Det är i dagsläget aktuellt att koppla samman ett stort antal vindkraftverk med hög effekt och öka spänningsnivån för att minska förlusterna. DC/DC-omriktare som är placerade vid änden av en slinga och hanterar ett flertal slingor är mindre än den centrala omriktaren som beskrivs i 4.3. Om det är möjligt att undvika byggandet av en plattform för att husera omriktaren finns stora summor att spara. Önskvärt är att placera denna vid botten av ett vindkraftverk vid änden av en slinga.

Studien undersöker om möjlighet finns att rymma en sådan DC/DC-omriktare i en container.

4.2 Scenario

Målet med studien är att undersöka om en DC/DC-omriktare kan rymmas i en 20’ container. Detta innebär att konstruktionen måste vara mycket kompakt och att potentialnivåerna vid olika delar inte leder till överslag eller urladdningar. Önskvärt är att varje omriktare kan hantera ett antal slingor med vindkraftverk. Dessa vindkraftverk antas vara utrustade med mindre DC/DC-omriktare placerade i nacellen och slingorna kopplas paralellt. Genererad effekt från varje vindkraftverk antas vara i nivå med moderna vindkraftverk. Nedan visas eftersträvade värden för DC/DC-omriktaren som skall undersökas. Dessa är antagen utspänning från vindkraftverk U_{vind}, effekt för ett vindkraftverk P_{vind}, antal vindkraftverk i en slinga n_{vind}, antal slingor m_{vind} och DC/DC-omriktarens utspänning $U_{DC/DC}$. Isolationsspänningen U_{iso} baseras enligt standard [4].

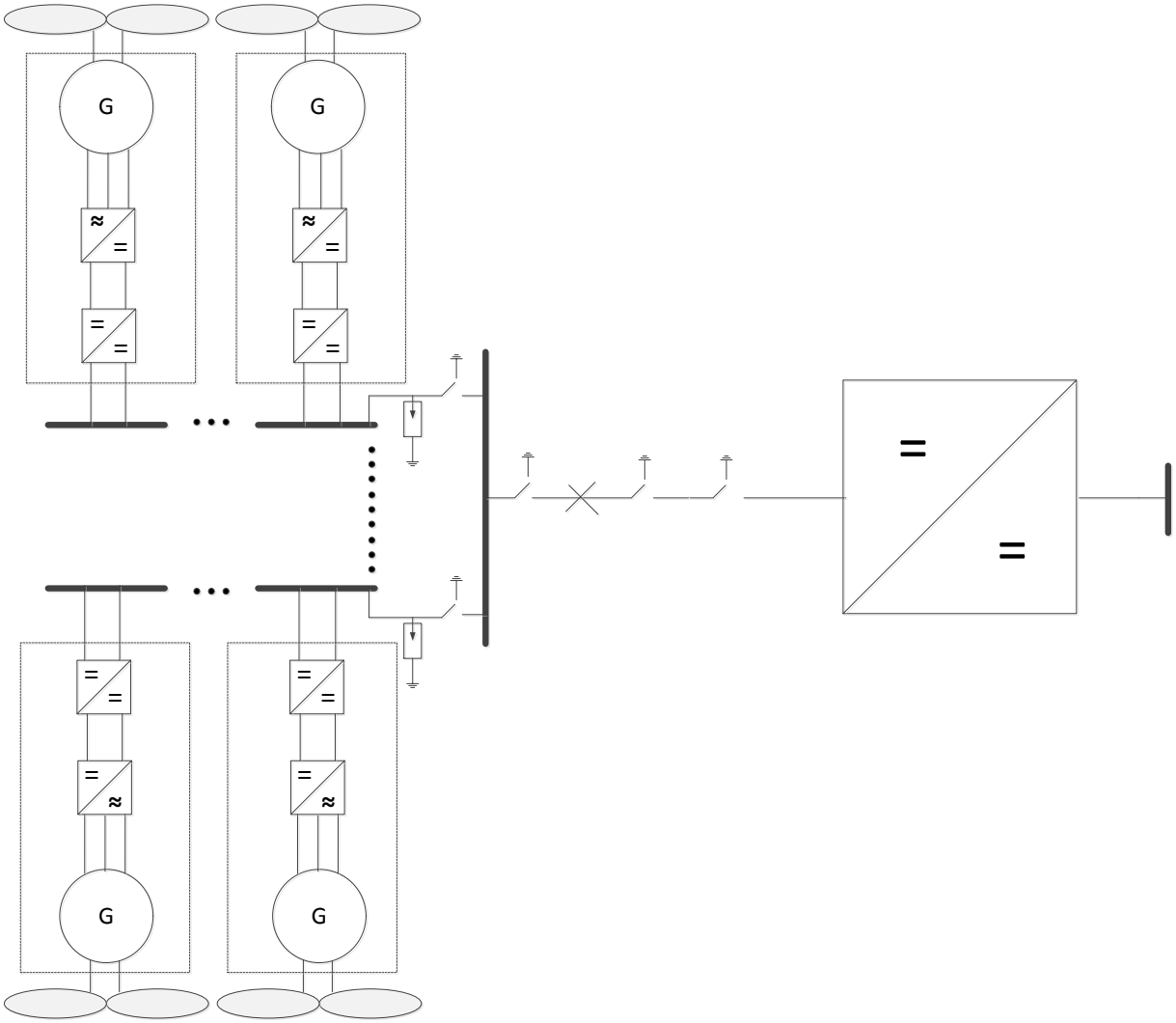
$$U_{vind} = 70\ kV \tag{4.1}$$
$$P_{vind} = 5\ MW \tag{4.2}$$
$$n_{vind} = 12\ st \tag{4.3}$$
$$m_{vind} = 4\ st \tag{4.4}$$
$$U_{DC/DC} = 240\ kV \tag{4.5}$$

20’ containerns geometri är standardiserad och dess höjd H_{cont}, bredd B_{cont} samt längd L_{cont} listas nedan

$$H_{cont} = 2.39\ m \tag{4.6}$$
$$B_{cont} = 2.35\ m \tag{4.7}$$
$$L_{cont} = 5.89\ m \tag{4.8}$$

4.3 Topologi

Studien avser en vindkraftstopologi där större vindkraftverk kopplas parallellt och bildar slingor. Dessa vindkraftverk genererar växelström vilken omformas till likström med en DC/DC-omriktare i nacellen, vilket innebär att likström används i undervattenskablaget. Ett antal slingor kopplas sedan till DC/DC-omriktaren vars placering är vid änden av en slinga. Syftet är att ytterligare öka spänningsnivån för att minska förluster. En central plattform kopplar sedan samman flera mindre kluster med slingor. Slutligen höjs spänningsnivån med större DC/DC-omriktare vid plattform innan anslutning till fastlandet. Enlinjeschemat figur 4.1 illustrerar topologin som avses.



Figur 4.1: Avsedd vindkraftstopologi med parallellkopplade slingor

4.4 Modell

En geometrisk modell av DC/DC-omriktaren konstrueras med programmet Catia V5. Storleken baseras av parameter (4.1) till (4.5).

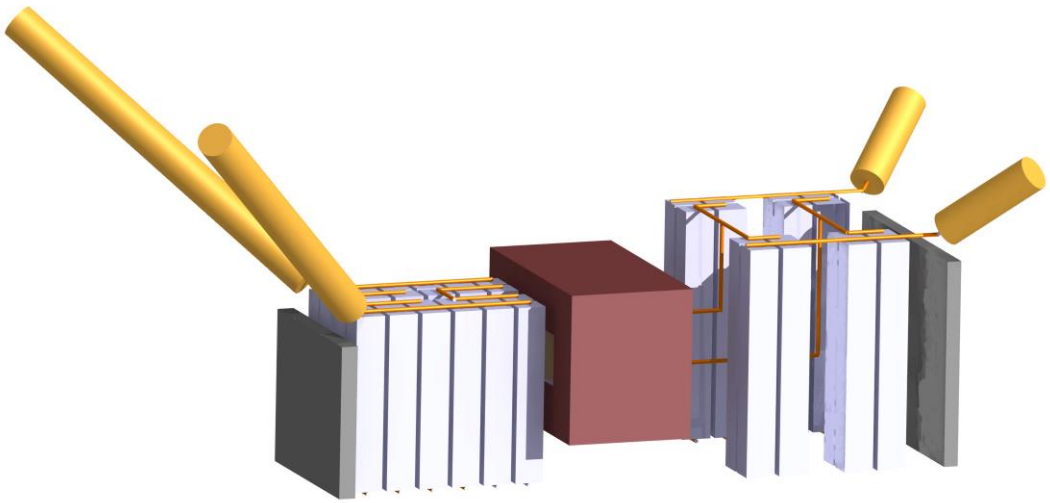
Ett matlab-script för varje del i omriktaren programmeras. Dessa delar sätts sedan samman till ett centralt script för hela omriktaren. Syftet med scriptet är att kontrollera möjligheten för omriktaren att rymmas med valda parametrar, samt beräkna dess storlek och antal komponenter. Scriptet skall även presentera resultaten i form av diagram och skall möjliggöra fler kontinuerliga körningar där en parameter ändras i intervall.

Kapitel 5

Analys

5.1 DC/DC-omriktare

Omriktaren placeras lämpligtvis i en container vid botten av ett vindkraftverk. Containerkonstruktionen är fördelaktig då detta underlättar transport och reparation. figur 5.1 visar DC/DC-omriktarens tänkta konstruktion inne i containern med tillhörande genomföringar.



Figur 5.1: Modell av DC/DC-omriktare i 20’ container

Konfigurationen som avses är DAB (Dual Active Bridge), detta då konstruktionen är enkel att modellera samt mindre utrymmeskrävande. Komponenternas placering i containern efterliknas kopplingsschemat i största mån [3].

5.1.1 Avgränsningar

Signaler för switchperiod till transistorerna och utrustning att generera dessa berörs ej. Mekaniska aspekter avseende kylning berörs ej, men förlusteffekter och möjligheten att kyla bort dessa görs. Elfältsberäkningar görs för AC, även om det för vissa områden gäller DC.

5.2 Skyddsutrustning

5.2.1 Avgränsningar

Specifika modeller av brytare, jordningskopplare, frånskiljare samt ventilavledare berörs ej i denna studie.

5.2.2 Brytare

Brytaren som avses är hybridbrytare som ännu inte finns i produktion, vilket beskrivs i 3.3.2. Eftersom brytarcellen är relativt utrymmeskrävande bedöms den inte rymmas i containern tillsammans med DC/DC-omriktaren. Containern som används för omriktaren kan bytas ut mot 40’ och husera även brytarcell. Inkommande kablar från slingor kan anslutas till en skena som hålls upp av genomföringen vid utsidan.

Alternativt vore att placera brytaren i egen 10’ container med egna genomföringar. Inkommande kablar från slingor kan anslutas till brytarcontainern med separata genomföringar. Att brytarcontainern fungerar som inkommande skena möjliggör att enbart en kabel för varje pol kopplas från brytaren till DC/DC-omriktaren.

5.2.3 Frånskiljare och jordningskopplare

Om 40’ avses bedöms frånskiljare och jordningskopplare rymmas samman med brytaren inne i containern. Avses separat brytarcontainer ryms all kopplingsutrustning i denna. DC/DC-omriktarens högspänningssida kan alternativt frånskiljas vid den centrala plattformen som omriktaren är kopplad till.

5.2.4 Ventilavledare

Ventilavledare placeras vid containerns utsida och kopplas in vid genomföringen då det är önskvärt att placera dem så nära transformatorn som möjligt.

5.3 Genomföringar

För att ansluta inkommande kablage till containern samt isolera utrustningen från salt havsluft används genomföringar. Eftersom hög spänning avses kommer genomföringarna begränsa det effektiva utrymmet i containern och det är av intresse att dessa upptar minimalt utrymme. Genomföringarnas utseende är beroende av vilken miljö de skall användas i samt vilka övriga krav som ställs.

Genomföringen vilken används som riktlinje visas i figur 5.2. Anledningen till vald genomföring är att dess parametrar bäst överensstämmer med DC/DC-omriktarens effektkapacitet.



Figur 5.2: GOEL genomföring

5.3.1 Avgränsningar

Vald genomföringsmodell är gjord för AC-applikationer, men det antas att liknande genomföring även kan användas för DC-applikationer. Vidare antas att specialanpassad genomföring kan konstrueras med möjlighet att hantera hårda krav avseende mekanisk hållfastighet.

5.3.2 Geometri

I detta studiefall finns utomhusdel samt inomhusdel av genomföringen. Värdet för $k_{genomföring}$ fås från datablad. Genomföringarna fästs med 45 graders vinkel mot containerytorna för att möjliggöra mest utrymme för DC/DC-omriktaren. Dessa dimensioneras enligt klass 4 och klass 1 respektive, vilket innebär att genomföringens totala längd för utomhusdelen $L_{genomfring,utomhus}$ samt inomhusdelen $L_{genomfring,inomhus}$ beräknas enligt

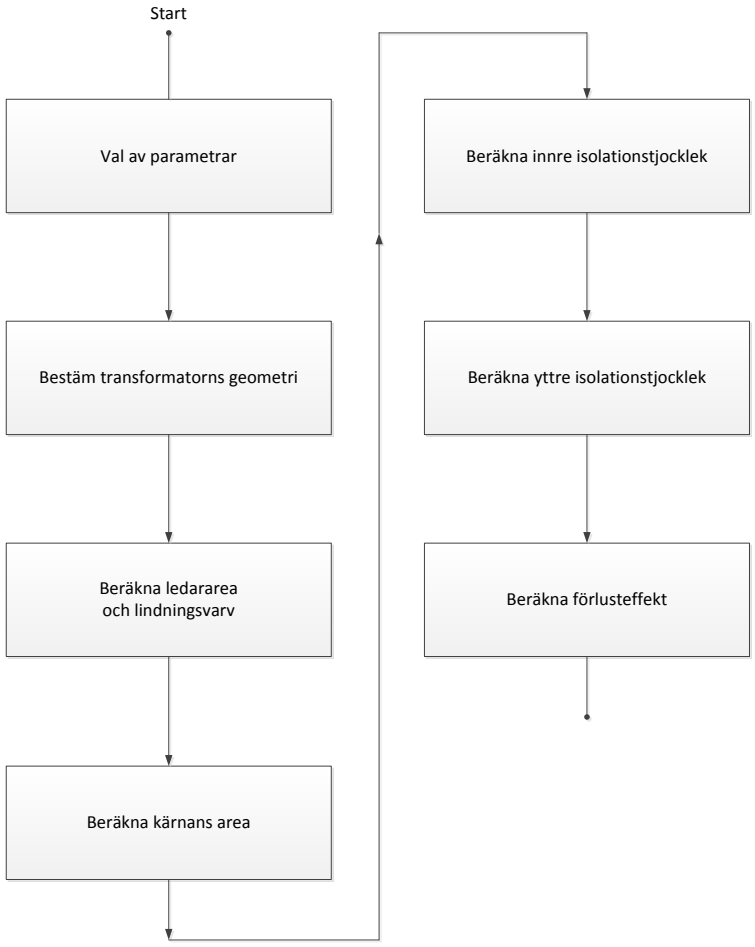
$$L_{genomfring,utomhus} = \frac{(klass\ 4)}{k_{genomföring}} = \frac{(klass\ 4)}{3.43} \tag{5.1}$$

$$L_{genomfring,inomhus} = \frac{(klass\ 1)}{k_{genomföring}} = \frac{(klass\ 1)}{3.43} \tag{5.2}$$

5.4 Transformator

5.4.1 Inledning

För att rymma en transformator med effektkapacitet 240 MW i containern behöver frekvensen ökas markant för att minska kärnarean. Detta medför andra problem som behöver beaktas. Detaljer för konstruktionen av transformatorn berörs ej i studien, men beräkningar av förenklade modeller om dess storlek utförs. Dimensioneringen av transformatorn sker stegvis enligt flödesschemat figur 5.3 [3].



Figur 5.3: Flödesschema för transformatordimensionering

5.4.2 Avgränsningar

Endast förenklade förlustberäkningar för lindningsförluster och kärnförluster görs. Förluster från inducerade strömmar i lindningarna, det vill säga virvelströmmar, kommer ej beröras eftersom dessa i sammanhanget är av mindre betydande storlek. Kraftiga elektriska fält nära eventuella skarpa kanter och anslutning av primär respektive sekundärlindningen beaktas ej.

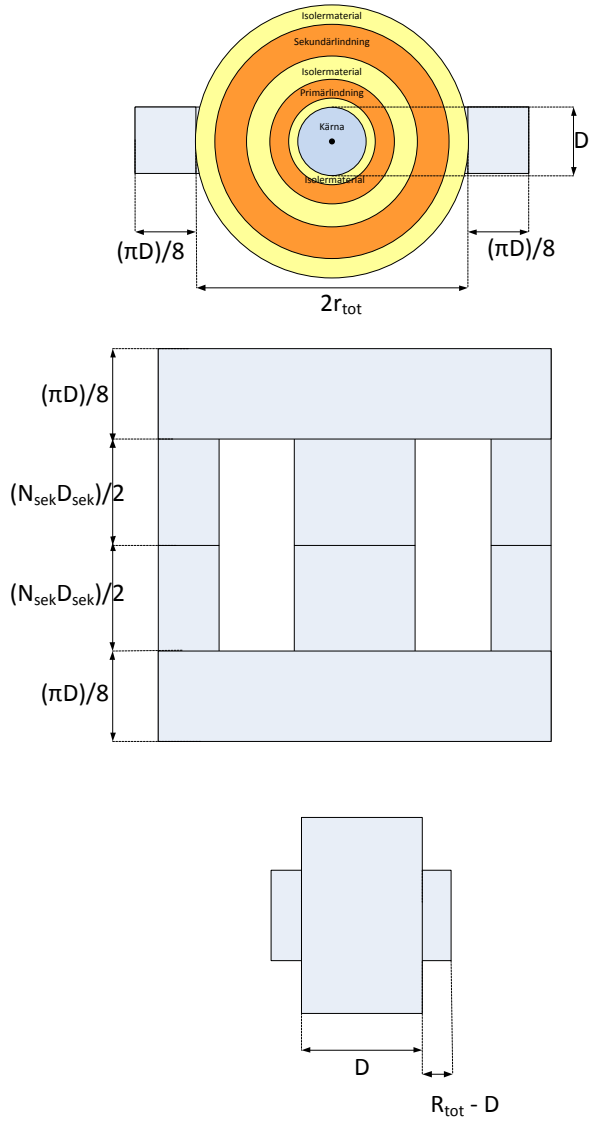
5.4.3 Val av parametrar

Vid beräkningar avseende transformatorns storlek måste nedan listade parametrar bestämmas. Dessa är primärspänning U_{prim}, sekundärspänning U_{sek}, märkeffekt P_{trafo}, switchfrekvens f_{switch} samt toppvärde för magnetisk flödestäthet $\hat{B}$.

$$U_{prim} = Primärspänning\ i\ kV \tag{5.3}$$
$$U_{sek} = Sekundärspänning\ i\ kV \tag{5.4}$$
$$P_{trafo} = Effekt\ i\ MW \tag{5.5}$$
$$f_{switch} = Switchfrekvens\ i\ kHz \tag{5.6}$$
$$\hat{B} = Magnetisk\ flödestäthet\ i\ T \tag{5.7}$$

5.4.4 Geometri

Beräkningarna förutsätter att E-kärna med cylindriskt lindningsben används. Det avsedda kärnmaterialet är Vitroperm, ty laminerad plåt av magnetstål samt ferritmaterial anses otillräckliga. Konstruktionen och avstånd illustreras i figur 5.4. r_{tot} avser totala radien av lindningar samt isolering och kärna, D avser kärnans diameter.



Figur 5.4: Transformatorns geometri med tvärsnitt samt vy från båda sidor

5.4.5 Ledararea

Ledararean för lindningarna beräknas med maximala strömdensiteten för koppar och strömmen vid primär- och sekundärsidan. Litz-tråd bör användas då dessa är mer anpassade för hög frekvens. Arean för ett knippe skall vara ekvivalent med arean som beräknas. Detta görs analogt med beräkningsgången från 3.5.5 [3].

5.4.6 Lindningsvarv

Antal lindningsvarv bör vara maximerat för givet utrymme då kärnarean minskar med antal lindningsvarv. Halva containerns höjd avsätts för sekundärsidans lindningsvarv enligt

$$N_{sek} = \frac{H_{cont}}{4r_{tråd,prim}} \tag{5.8}$$

Primärlindningens varv beräknas sedan från sekundärlindningen

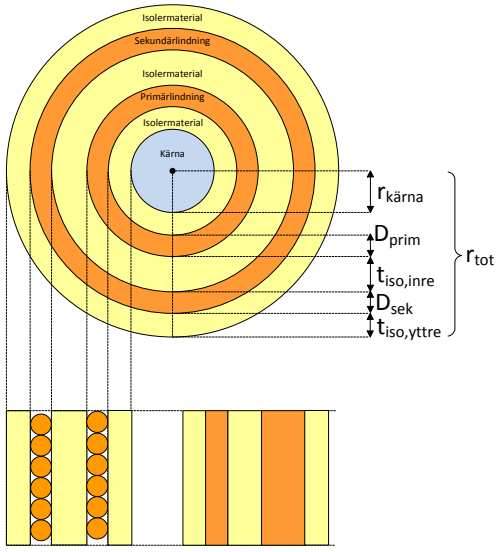
$$N_{prim} = N_{sek}\frac{U_{prim}}{U_{sek}} \tag{5.9}$$

Area

Kärnarean är omvänt proportionell mot frekvensen och den magnetiska flödestätheten, vilket visas i (3.11). Med hjälp av (3.11) beräknas arean med redan beräknade parametrar.

5.4.7 Isolationsmaterial

Isolationsmaterialet som avses mellan lindningarna är polyetylenplast, detta då tekniken redan används för ABB:s torrisolerade transformatorsortiment RESIBLOC. Hur de isolerade lagren placeras illustreras i figur 5.5. Avstånden som avses är kärnradien $r_{kärna}$, primärlindningens tråddiameter D_{prim} , innerisoleringens tjocklek $t_{iso,inre}$, sekundärlindningens tråddiameter D_{sek} samt ytterisoleringens tjocklek $t_{iso,yttre}$.



Figur 5.5: Tvärsnitt av transformatorns lindningsben med isolationsavstånd

5.4.8 Isolationstjocklek mellan primär- och sekundärlindning

Potentialskillnaden mellan primär- och sekundärlindningen kan bli tillräckligt hög för att ge upphov till överslag mellan dessa, isolationsavstånd måste därför studeras. Överslag kan kortsluta och skada transformatorn och dess isolering, detta får inte inträffa då isolationsmaterialet skadas permanent. Problemet modelleras som det elektriska fältet i koaxial geometri, vilket illustrerats i figur 3.9.

Primär respektive sekundärlindningen torde vara ingjutna i epoxiplast, vidare antas att inget luftgap förekommer mellan lindning och isolation. Störst elektrisk fältstyrka är vid gränsen mellan isolering och primärlindning, vilket kommer dimensionera isolationstjockleken $t_{iso,inre}$. (3.34) ersätts med variabler från figur 5.5 för att dimensionera isolationstjockleken enligt följande

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot ln\left[\frac{s}{r}\right]} = \begin{cases} E_r = E_{b,polyetylen} \\ U = U_{iso} \\ r = r_{kärna} + D_{prim} \\ s = r_{kärna} + D_{prim} + t_{iso,inre} \end{cases} \tag{5.10}$$

$$\Rightarrow E_{b,polyetylen} = \frac{U_{dim}}{(r_{kärna} + D_{prim}) \cdot ln\left[\frac{r_{kärna} + D_{prim} + t_{iso,inre}}{r_{kärna} + D_{prim}}\right]} \tag{5.11}$$

(5.12)

Slutligen kan isolationstjockleken beräknas genom att lösa ut den ur ekvationen

$$\Rightarrow t_{iso,inre} = (r_{kärna} + D_{prim}) \cdot e^{\left[\frac{U_{iso}}{E_{b,polyetylen} \cdot (r_{kärna} + D_{prim})}\right]} - r_{kärna} - D_{prim} \tag{5.13}$$

5.4.9 Isolationstjocklek mellan sekundärlindning och containeryta

Isolering utanför sekundärlindningen kan behövas för att undvika överslag mot containerytan eller annan utrustning. Transformatorn bör placeras med sidobenen mot containerns vägg, detta av utrymmesskäl för att uppta minimal längd av containern. Problemet modelleras som det elektriska fält mellan cylindrisk ledare och plan, vilket tidigare illustrerats i figur 3.8 [10]. För att överdimensionera ytterisoleringen placeras transformatorns yttre ben närmast containerytan, vilket bestämmer avståndet s i figur 3.8.

Elektriska fältstyrkan är störst i övergången från sekundärlindning till isolering, men fältstyrkan utanför isoleringen dimensionerar isolationstjockleken $t_{iso,yttre}$. Om avståndet mellan sekundärlindning och containeryta är stort, behövs ej isolering för att förhindra överslag. Dock är ett tunt lager isolering önskvärt ur säkerhetssynpunkt och isolationstjockleken bör vara lika tjock som isoleringen mellan lindningarna. För att beräkna isolationstjockleken ersätts variablerna från (3.33) enligt följande:

$$E(r) = \frac{U\epsilon_{r_2}}{r\left(ln\left[\frac{r_1}{r_0}\right] + ln\left[\frac{s}{r_1}\right]\right)} = \begin{cases} E(r) = E_{bih} \\ U = U_{iso} \\ \epsilon_{r_2} = \epsilon_{luft} = 1 \\ r_0 = r_{kärna} + D_{prim} + t_{iso,inre} + D_{sek} \\ r = r_1 = r_0 + t_{iso,yttre} \\ s = r_1 + \frac{r_{kärna} \cdot 2\pi}{8} \end{cases} \tag{5.14}$$

Slutligen kan isolationstjockleken beräknas genom att lösa ekvationen numeriskt. Om värdet blir negativt innebär det att isolering ej är nödvändig, dock används samma tjocklek som mellan lindningarna.

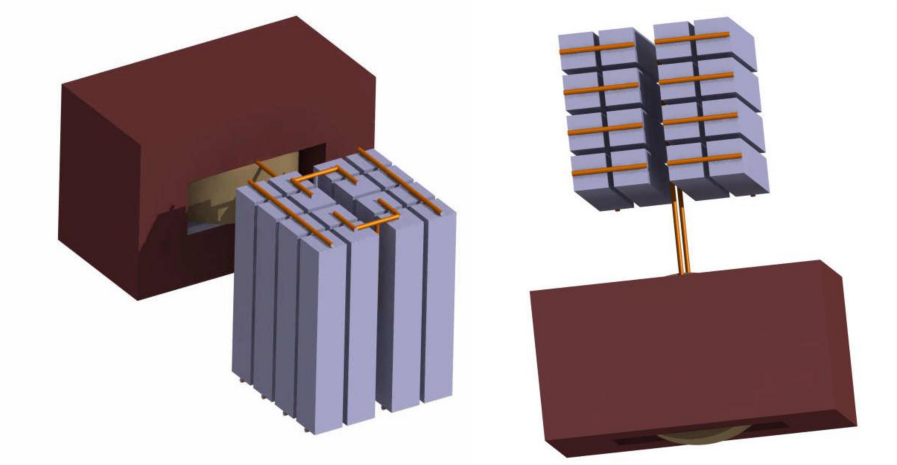
5.4.10 Förluster

Lindningsförluster beräknas analogt med metoden beskriven i avsnitt 3.5.8. Radien från kärnan $r_{lindning}$ ersätts med respektive avstånd från figur 5.5. Enligt (3.13) beräknas totala lindningsförluster som

$$P_{f,lindning} = P_{f,lindning,prim} + P_{f,lindning,sek} = U_{prim}I_{prim} + U_{sek}I_{sek} = R_{prim}I_{prim}^2 + R_{sek}I_{sek}^2$$
$$= 2\pi\rho_{Cu}\left[\frac{\left(r_{kärna} + \frac{D_{prim}}{2}\right)N_{prim}}{A_{prim}}I_{prim}^2 + \frac{\left(r_{kärna} + D_{prim} + t_{iso,inre} + \frac{D_{sek}}{2}\right)N_{sek}}{A_{sek}}I_{sek}^2\right] \tag{5.15}$$

5.5 Skensystem

För att ansluta IGBT-staplar och annan utrustning behövs ett skensystem för låg- respektive högspänningssidan. Skensystemet modelleras som cylindriska ledare av koppar. För låg- respektive högspänningssidan behövs skenor vid ovan- och undersidan av IGBT-staplarna, vilket illustreras i figur 5.6.



Figur 5.6: Vy över skensystemet med transformatoranslutning

5.5.1 Avgränsningar

Infästningen av skenorna med genomföringar samt IGBT-staplar berörs ej i denna rapport. Den elektriska fältstyrkan i dessa punkter kommer vara mycket stor och i behov av fältutjämningskomponenter, vilka inte heller berörs. Även om skenorna ej konstrueras som cylindrar bedöms dessa vara lika skrymmande.

5.5.2 Geometri

Skenornas längd beror främst av transformatorn såväl som genomföringarnas storlek. Tvärsnittsarean varierar med DC/DC-omriktarens effekt, ty strömdensiteten bör vara konstant. Önskvärd geometri för skenan är cylindrisk, detta eftersom det är fördelaktig avseende elektrisk fältstyrka.

Skenornas area är olika för låg- respektive högspänningssidan. Area beräknas analogt med lindningstråden för transformatorn enligt 3.5.5. Att veta hur nära containerns botten skenorna kan placeras är relevant för att rymma annan utrustning. Eftersom skenorna skall vara isolerade med polyetylen bestäms avståndet från skenans mitt till ytan, s, som $0,2\ m$. Problemet modelleras som det elektriska fältet mellan cylindrisk ledare och plan, vilket illustrerats enligt figur 3.8.

Den elektriska fältstyrkan är störst direkt utanför ledaren, men eftersom skensystemet vid hög- respektive lågspänningssidan är isolerade får elektriska fältstyrkan direkt utanför isoleringen inte överstiga kritiska värdet för luft. Isoleringens tjocklek beräknas med (3.33), vilken kan utvecklas till följande

$$E(r) = \frac{U\epsilon_{r_2}}{r\left(ln\left[\frac{r_1}{r_0}\right] + ln\left[\frac{s}{r_1}\right]\right)} = \begin{cases} E(r) = E_{bih} \\ U = U_{iso} \\ \epsilon_{r_2} = \epsilon_{luft} = 1 \\ r_0 = r_{skena} \\ r = r_1 = r_0 + t_{iso,skena} \\ s = 0,2\ m \end{cases} \tag{5.16}$$

Slutligen kan isolationstjockleken beräknas genom att lösa ekvationen numeriskt. Om värdet blir större än $0,2\ m$ sätts avståndet till isolationstjockleken. Skenornas effektiva längd L_{eff} som kan användas till transistorstaplar kan beräknas enligt

$$L_{eff} = \frac{L_{cont} - B_{trafo} - sin(45)L_{genomföring,högspänning} - sin(45)L_{genomföring,lågspänning}}{2} \tag{5.17}$$

5.6 Transistorer

5.6.1 Inledning

IGBT-modulen $5SNA\ 2000K451300$ vilken används som underlag för storlek och förlustberäkningar kan ses i figur 5.7. Anledningen till vald modul är för att dess parametrar bäst överensstämmer med DC/DC-omriktarens effektkapacitet.



Figur 5.7: IGBT-modulen $5SNA\ 2000K451300$

Parametrar för vald modul listas nedan. Dessa är kollektor-emitter spänning U_{CE}, kollektorström I_C, påslagningstid $t_{c,on}$, avslagningstid $t_{c,off}$, termisk resistans kärna till hölje $R_{\theta jc}$, termisk resistans hölje till kylmedie $R_{\theta cs}$, längd L_{IGBT}, bredd B_{IGBT} samt höjd H_{IGBT}.

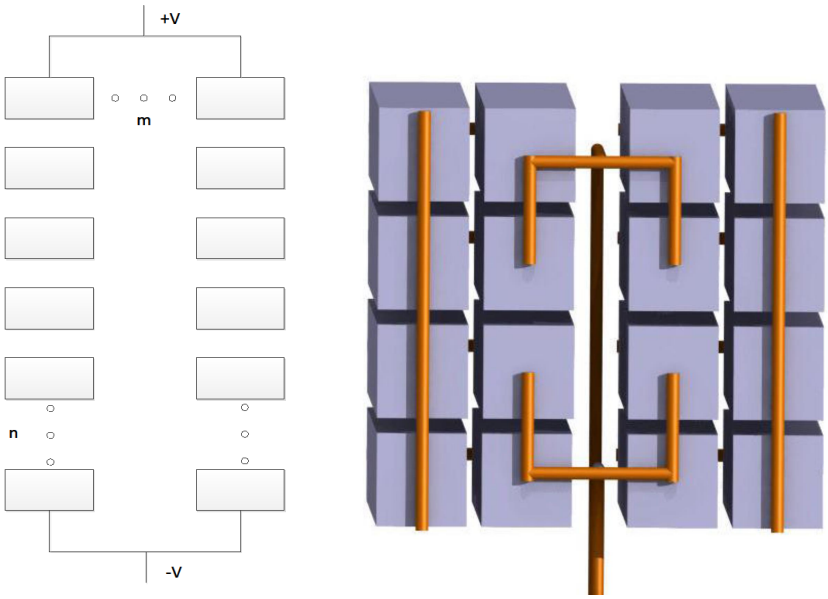
$$U_{CE} = 4,5\ kV \tag{5.18}$$
$$I_C = 2\ kA \tag{5.19}$$
$$t_{c,on} = 690\ ns \tag{5.20}$$
$$t_{c,off} = 3990\ ns \tag{5.21}$$
$$R_{\theta jc} = 0,0048\ K/W \tag{5.22}$$
$$R_{\theta cs} = 0,0011\ K/W \tag{5.23}$$
$$L_{IGBT} \times B_{IGBT} \times H_{IGBT} = 246,95 \times 237,3 \times 28,75\ mm^3 \tag{5.24}$$
$$\tag{5.25}$$

5.6.2 Avgränsningar

Värmeförluster från IGBT-modulens diod, snubberkretsar samt fältutjämningsutrustning beaktas ej i denna studie.

5.6.3 Geometri

Eftersom tillgänglig utrymme begränsas av genomföringarna och skenornas längd är det av intresse att veta antal seriekopplade IGBT-moduler och antal parallellkopplade IGBT-staplar som får plats. figur 5.8 visar hur seriekopplade IGBT-moduler bildar IGBT-staplar och hur dessa parallellkopplas.



Figur 5.8: Illustration av hur IGBT-moduler serie- och parallellkopplas

Seriekopplade moduler

För att beräkna tillgänglig höjd H_{eff} kontrolleras om två staplar får plats brevid varandra i containern. Tillgänglig bredd B_{eff} beräknas som:

$$B_{eff} = B_{cont} - 2sin(45)L_{genomfring} + B_{IGBT} \tag{5.26}$$

Eftersom antal IGBT-staplar skall vara samma för varje fasben måste detta tas med i beräkningen för tillgänglig bredd. Antal staplar måste alltså rymmas inom halva tillgängliga bredden. För att kontrollera om två staplar får plats måste följande villkor stämma:

$$B_{IGBT} \leq \frac{B_{eff}}{2} \tag{5.27}$$

Om ovanstående villkor uppfylls beräknas effektiv höjd som dubbel då utrymmet mellan skenorna är tillräckligt stort för att husera två staplar.

$$Om\ villkor\ (5.27)\ uppfyllt: \ H_{eff} = 2\left(H_{cont} - sin(45)L_{genomfring} - 2t_{iso,skena}\right) \tag{5.28}$$

$$Om\ villkor\ (5.27)\ ej\ uppfyllt: \ H_{eff} = H_{cont} - sin(45)L_{genomfring} - 2t_{iso,skena} \tag{5.29}$$

Seriekopplade moduler som ryms, n_{IGBT}, beräknas som

$$n_{IGBT} = \frac{H_{eff}}{H_{IGBT}} \tag{5.30}$$

Seriekopplade moduler $n_{krav,IGBT}$ som behövs för att hantera spänningen beräknas enligt

$$n_{krav,IGBT} = \frac{U_{iso}}{U_{CE}} \tag{5.31}$$

Antal moduler som ryms måste vara lika många eller fler än vad som behövs, alltså:

$$n_{IGBT} \geqslant n_{krav,IGBT} \tag{5.32}$$

Parallellkopplade IGBT-staplar

IGBT-staplar som ryms, m_{IGBT}, beräknas som:

$$m_{IGBT} = \frac{L_{eff}}{2 \cdot B_{IGBT}} \tag{5.33}$$

Varje IGBT-modul kan leda viss ström I_C, för att beräkna hur många parallellkopplade staplar som krävs för att leda strömmen I som kommer flyta genom dem används följande samband:

$$m_{krav,IGBT} = \frac{I}{I_C} \tag{5.34}$$

Antal parallellkopplade staplar som ryms måste vara lika många eller fler än vad som behövs, alltså:

$$m_{IGBT} \geqslant m_{krav,IGBT} \tag{5.35}$$

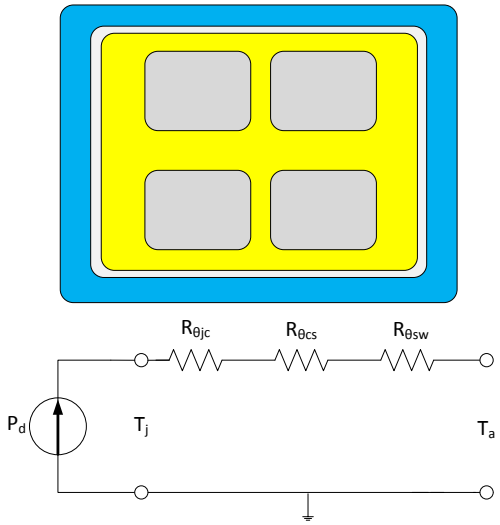
5.6.4 Förluster

När transistorerna switchar sker detta ej omedelbart. Tidsfördröjningen mellan på- och avslagning ger upphov till förluster då spänning och ström samverkar. Switchförlusterna för serie- och parallellkopplade IGBT-moduler kan beräknas genom att utveckla (3.15)

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{V_d \cdot I_0 \cdot f_s \cdot (t_{c,on} + t_{c,off})}{2} \\ &= \frac{\frac{U}{n} \cdot \frac{I}{m} \cdot f_{switch} \cdot (t_{c,on} + t_{c,off})}{2} \\ &= \frac{P_{trafo} \cdot f_{switch} \cdot (t_{c,on} + t_{c,off})}{n \cdot m \cdot 2} \end{aligned} \tag{5.36}$$

5.6.5 Kylning

En enkel termisk modell enligt figur 5.9 används för att beräkna hur stora värmeförluster som är möjligt att kyla bort med ett högeffektivt vattenkylningssystem. Här antas den termiska resistansen för det flödande vattnet vara noll, och därmed mycket effektivt. De valda IGBT-modulerna från ABB är inte konstruerade för vattenkylning, men liknande moduler med likvärdiga parametrar anpassade med kylkanaler kan troligtvis konstrueras.



Figur 5.9: Termisk modell av IGBT-modul

(3.18) beskriver det grundläggande termiska problemet, vilket kan utvecklas till

$$T_j = P_d \cdot (R_{\theta jc} + R_{\theta cs} + R_{\theta lc}) + T_a \tag{5.37}$$

$$\Rightarrow P_d = \frac{T_j - T_a}{R_{\theta jc} + R_{\theta cs} + R_{\theta lc}} \tag{5.38}$$

5.6.6 Frekvens

Eftersom switchförlusterna ökar med frekvensen, och dessa förluster måste kylas bort, är det av intresse att beräkna maximal switchfrekvens som kan uppnås med givet antal seriekopplade moduler och parallellkopplade staplar. Detta kan beräknas genom kombination av (5.38) och (5.36):

$$P_d = P_s \Rightarrow \frac{T_j - T_a}{R_{\theta jc} + R_{\theta cs} + R_{\theta lc}} = \frac{P_{trafo} \cdot f_{switch} \cdot (t_{c,on} + t_{c,off})}{n \cdot m \cdot 2} \tag{5.39}$$

$$\Rightarrow f_{switch} = \frac{2 \cdot n \cdot m \cdot (T_j - T_a)}{(R_{\theta jc} + R_{\theta cs} + R_{\theta lc}) \cdot P_{trafo} \cdot (t_{c,on} + t_{c,off})} \tag{5.40}$$

5.7 Kondensatorer

5.7.1 Inledning

Spänningen till IGBT-staplarna vid ingången av kretsen upprätthålls genom att seriekoppla kondensatorer mellan polerna eller använda en stor specialdesignad kondensator. Detta används även vid kretsens utgång för att filtrera utsignalen. Eftersom in- och utgående kablage är kapacitiva, spänningströga, är kravet av tillförd reaktiv effekt inte stort [15]. Beräkningarna baseras efter B2562 ur EPCOS modellserie. Parametrar nedan beskriver kondensatorn. Dessa är märkspänning U_R, kapacitans C_R, diameter D_{kond} samt höjd H_{kond}.

$$U_R = 1980\ V \tag{5.41}$$
$$C_R = 40\ \mu F \tag{5.42}$$
$$D_{kond} = 85\ mm \tag{5.43}$$
$$H_{kond} = 70\ mm \tag{5.44}$$

5.7.2 Avgränsningar

Beräkningar avseende behov av kapacitans görs ej. Istället fylls tillgängligt utrymme med kondensatorer då oändlig kapacitans är önskvärt vilket beskrivs i 3.7.

5.7.3 Geometri

Specialdesignad kondensator vid primär respektive sekundärsidan baseras från kraftkondensatorns parametrar (5.41) till (5.44). Tillförd kapacitans är beroende av hur mycket utrymme som finns vid respektive sida av omriktaren, detta beror av genomföringarnas längd och hur nära containerns yta kondensatorn kan placeras. Elektriska fältstyrkan E modelleras som två plattor med avstånd d_{kond} och potentialskillnad U vilket beskrivs under 3.10.2. Här avses endast ett material, vilket förenklar (3.24) och närmaste avståndet kan beräknas enligt

$$E = \frac{U}{d} \Rightarrow d_{kond} = \frac{U}{E_{bhg}} \tag{5.45}$$

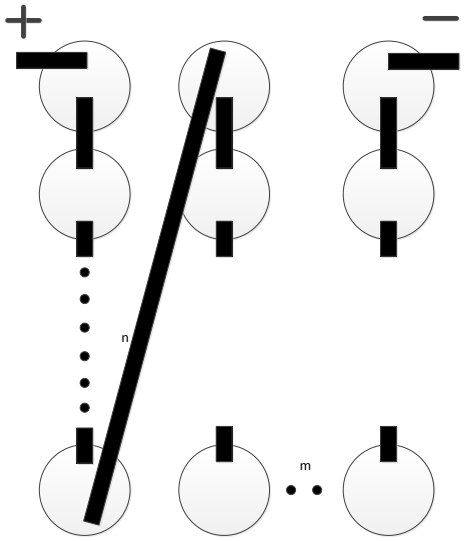
Volymen beräknas med tillgänglig höjd H_{eff}, bredd B_{eff}, längd L_{eff} samt antagandet att kondensatorenheten skall placeras minst $5\ cm$ från IGBT-stapeln närmast genomföringen vid lågspänningssidan respektive $10\ cm$ från IGBT-stapeln närmast genomföringen vid högspänningssidan

$$V_{prim} = H_{eff,prim} B_{eff,prim} d_{kond,prim} \left(L_{eff,prim} - 0,05\right) \tag{5.46}$$
$$V_{sek} = H_{eff,sek} B_{eff,sek} d_{kond,sek} \left(L_{eff,sek} - 0,1\right) \tag{5.47}$$

Dessa värden räknas sedan om för att ge en riktlinje om hur stor kapacitans dessa kondensatorer levererar per volymenhet. Förenklingen antar att kapacitansen förhåller sig linjärt mot volymen. Vidare görs antagandet att en specialdesingad kraftkondensator som utnyttjar allt givet utrymme kan konstrueras. Tillförd kapacitans C är en funktion av tillgängligt utrymme V enligt

$$C(V) = \frac{40 \cdot 10^{-6}}{2\pi 42,5 \cdot 70 \cdot 10^{-6}} V \approx 2 \cdot 10^{-5} V \tag{5.48}$$

Ett alternativ till ovanstående är att stapla mindre kondensatorer på varandra, vilket illustreras i figur 5.10. Varje stapel skall placeras med tillräckligt avstånd till nästa för att inte överslag skall ske. Eftersom utrymmet är begränsat tillåts endast en rad med kondensatorer.



Figur 5.10: Illustration av hur mindre kondensatorer serie- och parallellkopplas

Stapling av kondensatorer förutsätter att tillräckligt många kondensatorer i_{kond} seriekopplas för att fördela spänningen, vilket kan beskrivas med

$$i_{kond} = \frac{U}{U_R} \tag{5.49}$$

Antal kondensatorer n_{kond} som ryms i varje stapel kan beräknas från höjden H_{eff} och kondensatorns diameter D_{kond} enligt

$$n_{kond} = \frac{H_{eff}}{D_{kond}} \tag{5.50}$$

$$\tag{5.51}$$

Spänningsfallet över varje kondensatorstapel ger upphov till högt elektrisk fält mellan varje stapel. Detta hanteras genom att placera staplarna med tillräckligt avstånd $t_{iso,kond}$ från varandra. Problemet modelleras som det elektriska fältet mellan två plattor, vilket förenklar (3.24) till följande

$$t_{iso,kond} = \frac{n \cdot U_R}{E_{bhg}} \tag{5.52}$$

$$\tag{5.53}$$

Antal staplar m_{kond} som ryms kan beräknas från bredden B_{eff} kondensatorns diameter D_{kond} och isolationsavståndet $t_{iso,kond}$ enligt

$$m_{kond} = \frac{B_{eff}}{D + t_{iso,kond}} \tag{5.54}$$

$$\tag{5.55}$$

Totalt antal kondensatorer $n_{kond}m_{kond}$ måste minst vara lika många som behövs, därför måste följande villkor uppfyllas

$$n_{kond} \cdot m_{kond} \geq i_{kond} \tag{5.56}$$

Kapitel 6

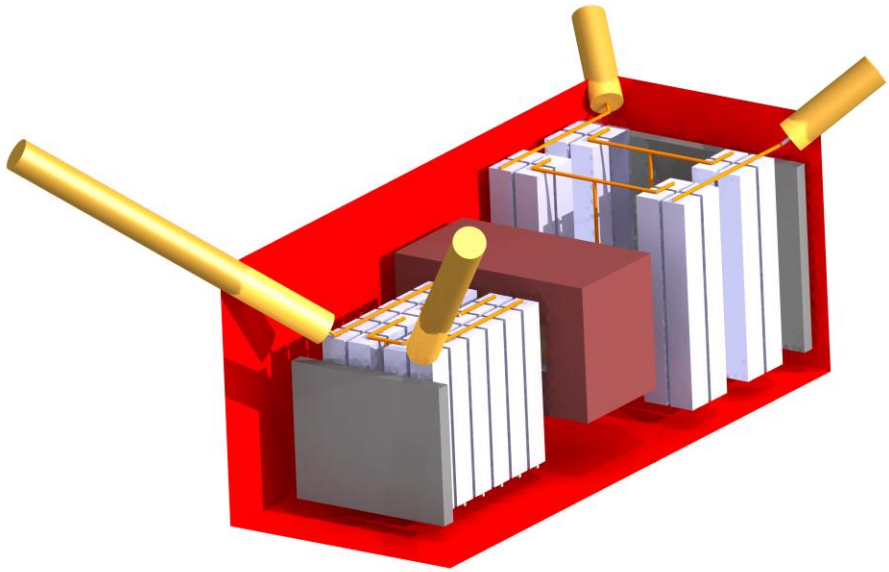
Resultat

6.1 Introduktion

Analys av DC/DC-omriktaren har gjorts med MATLAB-scripten som programmerats för studien. Koden för de olika scripten finns bifogade i bilaga A.

6.2 Geometrisk modell

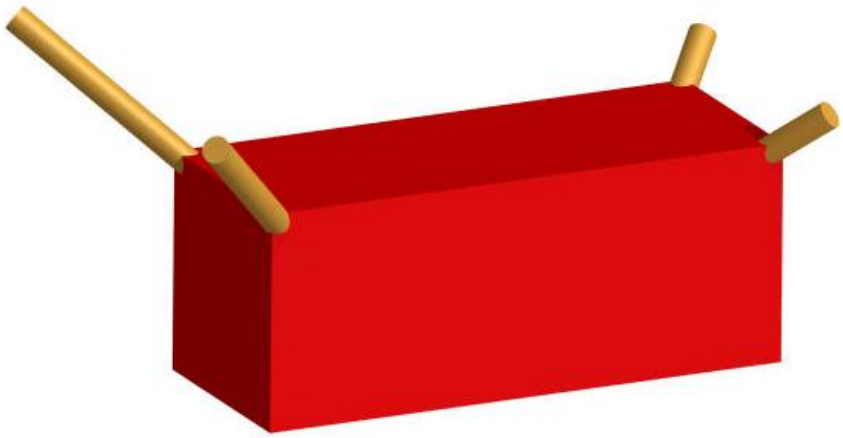
Modellen är baserad efter givna värden, dessa återfinns under kapitel 4. Underlag till antal moduler i modellen fås från körningar av matlab programmet. Ingående komponenters placering fastställs under kapitel 5, detta kapitel behandlar bland annat avstånd till containerhöljet samt komponenter med annan potential. Övergripande modell illustreras i figur 6.1.



Figur 6.1: Övergripande modell av DC/DC-omriktare i 20’ container

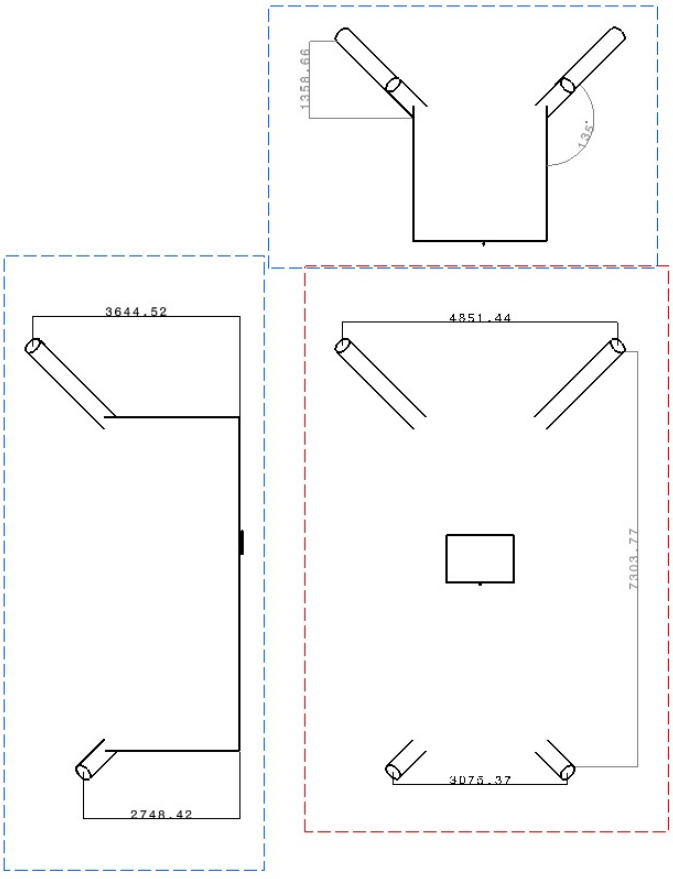
6.2.1 Sluten modell

Containerns utförande illustreras enligt figur 6.2. Detta från containerns utsida där genomföringarna för låg respektive högspänningssidan kan ses.



Figur 6.2: Sluten modell av DC/DC-omriktare i 20’ container

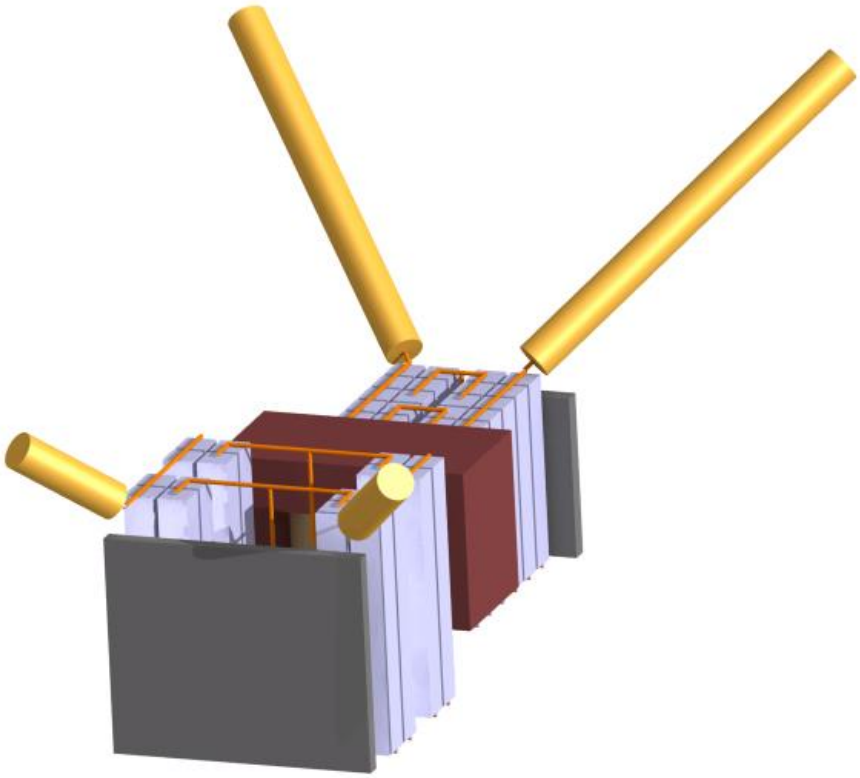
Genomförningarnas axiala längd skiljer sig för låg- respektive högspänningssidan. Anledningen till detta beskrivs under avsnittet för genomförningar 5.3. Vidare kan vinkeln med vilka genomförningarna är infästa ses i figur 6.3.



Figur 6.3: Ritning av genomförningarnas vinklar mot containern

6.2.2 Vy över lågspänningssidan

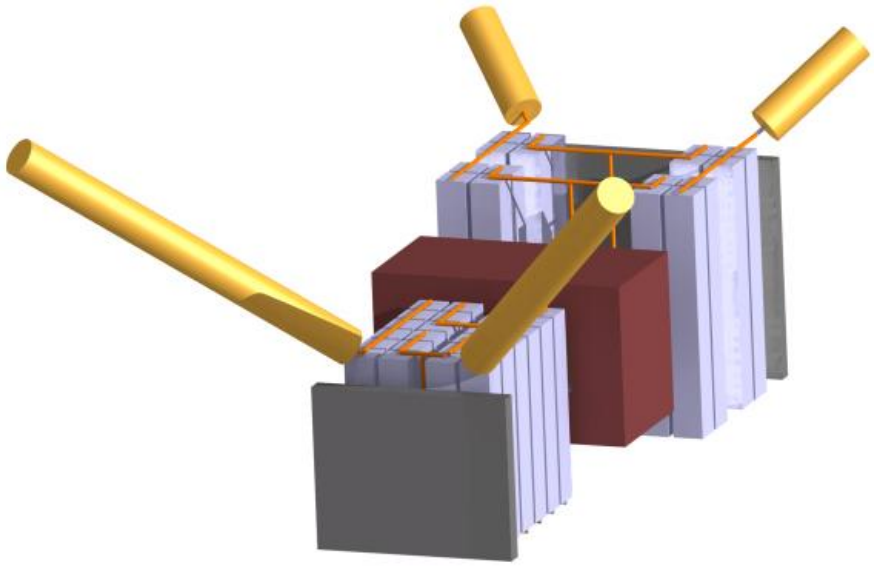
figur 6.4 illustrerar lågspänningssidan. På bilden syns IGBTmoduler, skenor, kondensatorer samt transformatorn i bakgrunden. Beräkningar samt resonemang till placering och inbördes avstånd utreds under avsnittet för transistorer 5.6.



Figur 6.4: Vy över lågspänningssidan av DC/DC-omriktaren

6.2.3 Vy över högspänningssidan

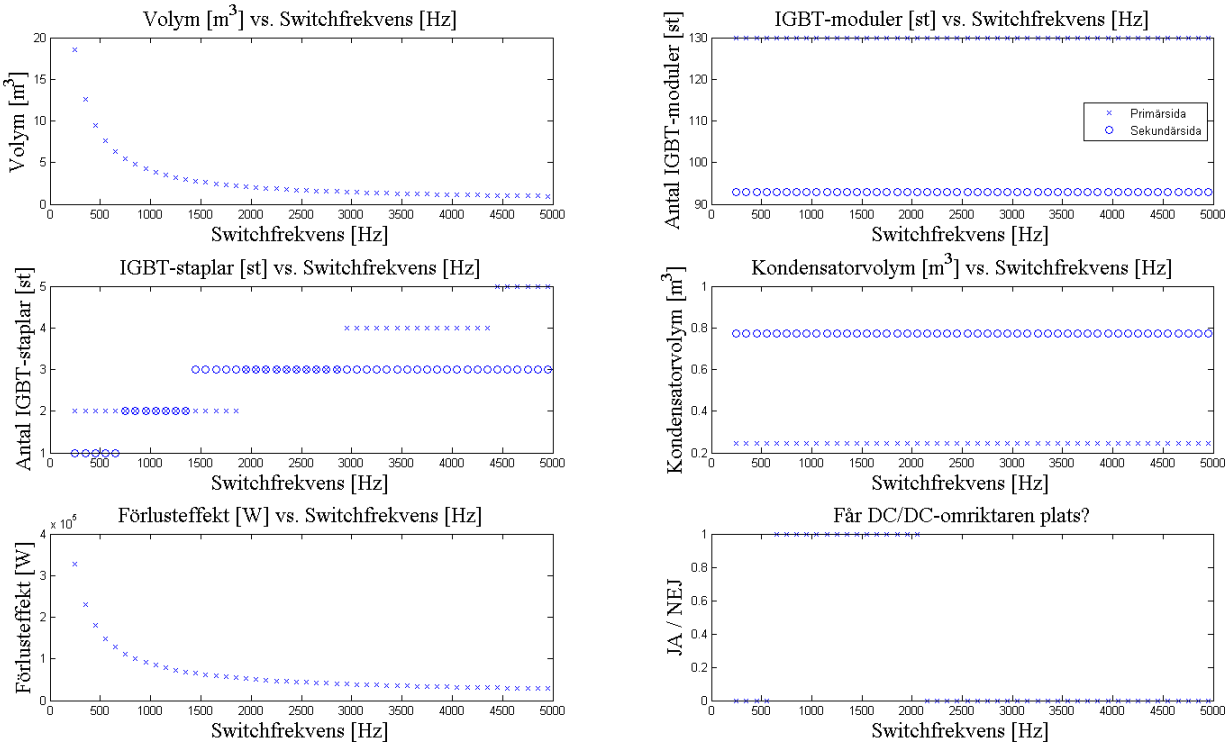
Högspänningssidan illustreras i figur 6.5. Placering av komponenter vid hög- respektive lågspänningssidan är nästan identisk. Vad som främst skiljer är placeringen av kondensatorerna som här staplas bakom genomföringarna, detta finns beskrivet under avsnittet för kondensatorer 5.7. IGBT-modulerna är placerade efter samma metod som för lågspänningssidan.



Figur 6.5: Vy över högspänningssidan av DC/DC-omriktaren

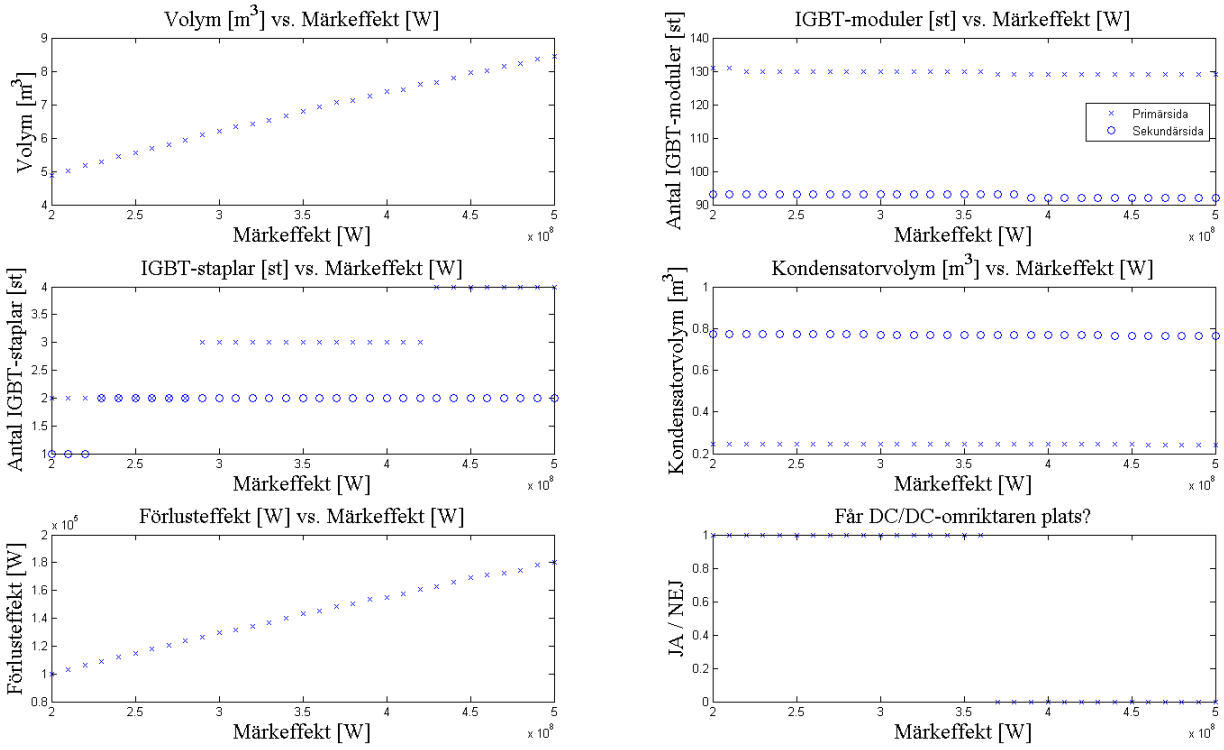
6.3 Maximal effekt

För att beräkna maximal effekt för DC/DC-omriktaren används matlab-scripten. Dessa script utnyttjar ekvationerna ur analysen för att beräkna storleken hos komponenter och om de får plats. Ursprungliga parametrar från kapitel 4 användes och frekvensen testades i ett intervall från $0.25\ kHz$ till $5\ kHz$ för att se vilka frekvenser som är lämpliga. Resultatet från scriptet presenteras i figur 6.6 nedan.



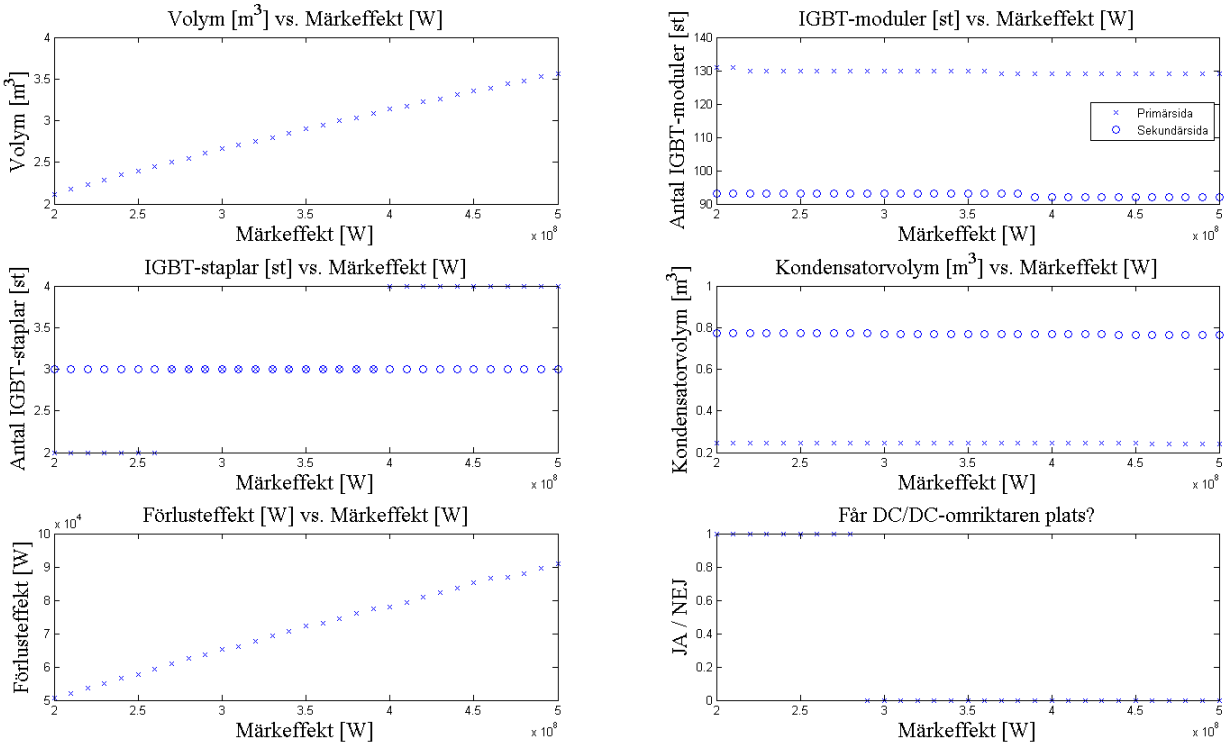
Figur 6.6: Beräkningsresultat avseende DC/DC-omriktaren med varierande frekvens

Maximal effekt testades sedan i intervall från 200 MW till 500 MW med två olika värden för frekvensen. Första omgången för 0.75 kHz presenteras i figur 6.7 nedan.



Figur 6.7: Beräkningsresultat för att undersöka maximal effekt vid frekvensen 0.75 kHz

Andra omgången för 1.75 kHz presenteras i figur 6.8 nedan.



Figur 6.8: Beräkningsresultat för att undersöka maximal effekt vid frekvensen 1.75 kHz

Graferna visar tydligt att lägre frekvens möjliggör högre effektuttag. Anledningen är att högre frekvens inte gör transformatorn tillräckligt mycket mindre för att rymma fler IGBT-staplar. Dessa staplar behövs för att fördela strömmen och hantera värmeförluster. Maximal teoretisk effekt för DC/DC-omriktaren enligt modellen är 360 MW.

6.4 Modellförslag

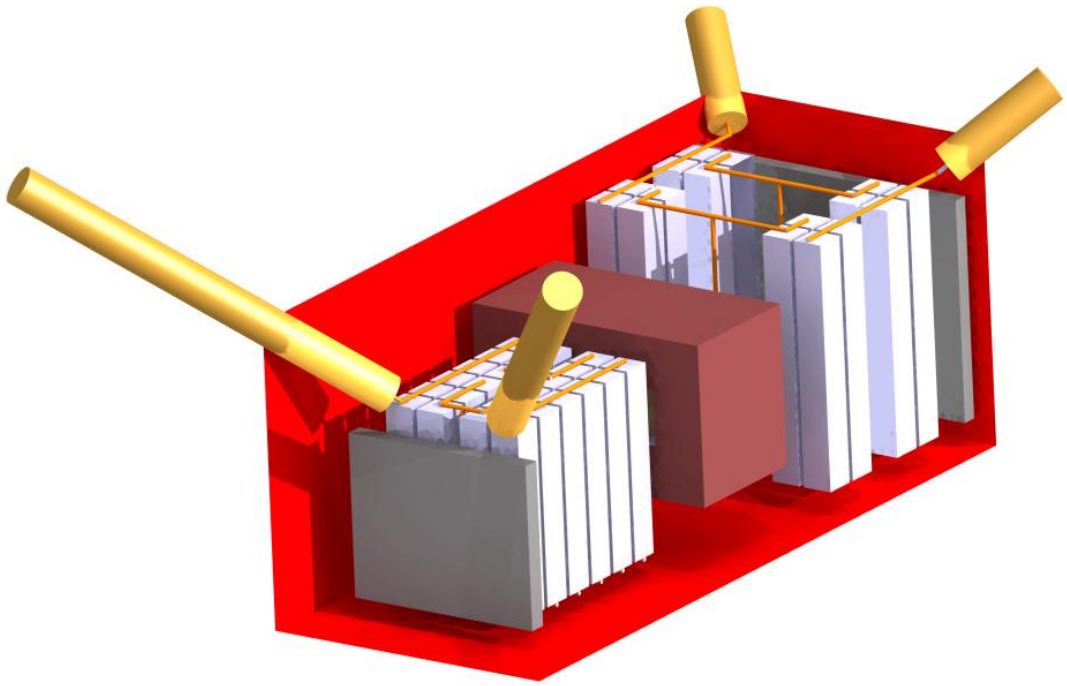
Med utgång från beräkningarna för maximal effekt har tre förslag för DC/DC-omriktare tagits fram. Modell A avser omriktare med de ursprungliga parametrar som givits under kapitel 4. Modell B är mer maximerad avseende effekt och utgår från vilken maximal teoretisk effekt som beräknats. Modell C är mer rimlig ur konstruktionssynpunkt då magnetiseringen är lägre för att minska förlusterna i kärnan.

Tabell 6.1: Parametrar för tre modellförlsag av DC/DC-omriktare

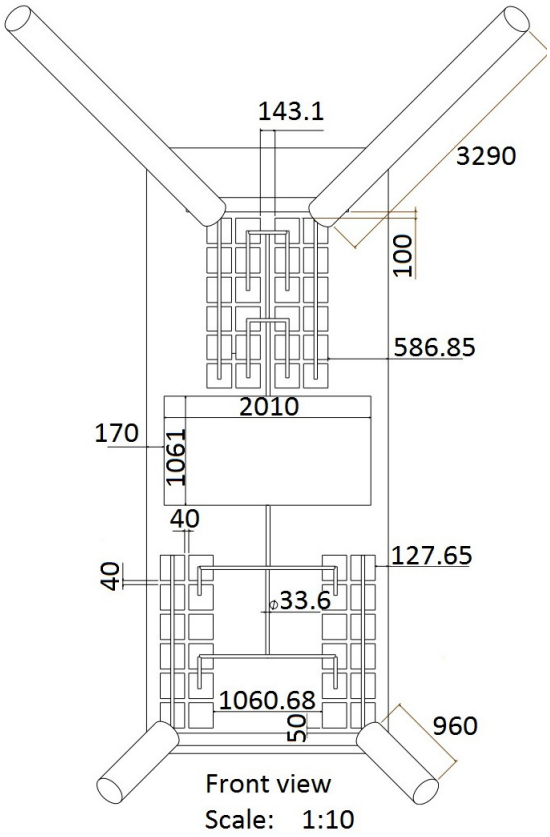
Huvudparametrar	**Modell A**	**Modell B**	**Modell C**
Inspänning [kV]	70	70	70
Utspänning [kV]	240	240	240
Effekt [MW]	240	340	240
Switchfrekvens [kHz]	1.5	1.0	1.5
Kylvattnets temperatur [$grader\ C$]	98	90	95
Transformator	**-**	**-**	**-**
Volym [m^3]	2.72	4.94	4.88
Magnetisk flödestäthet [T]	0.9	0.9	0.5
Förluster [kW]	63.57	33.55	30.79
Primärsida DC/DC	**-**	**-**	**-**
Seriekopplade IGBT-moduler [st]	131	130	131
Paralellkopplade IGBT-staplar [st]	2	3	2
Switchförluster i enskilt fasben [kW]	7.01	4.45	7.01
Kondensatorvolym [m^3]	0.25	0.25	0.25
Kapacitans [mF]	24.70	24.55	24.70
Skenradie [mm]	16.52	19.66	16.52
Skenans isolationstjocklek [mm]	2.52	1.93	2.52
Genomföringarnas ytter/innerlängd [cm]	63/33	63/33	63/33
Sekundärsida DC/DC	**-**	**-**	**-**
Seriekopplade IGBT-moduler [st]	94	93	94
Paralellkopplade IGBT-staplar [st]	3	2	2
Switchförluster i enskilt fasben [kW]	6.51	9.32	9.77
Kondensatorvolym [m^3]	0.78	0.77	0.78
Kapacitans [mF]	77.69	77.32	77.69
Skenradie [mm]	8.92	10.62	8.92
Skenans isolationstjocklek [mm]	3.46	3.34	3.46
Genomföringarnas ytter/innerlängd [cm]	217/112	217/112	217/112
Förluster	**-**	**-**	**-**
Förlusteffekt [kW]	63.62	109.62	102.56

Illustration av modellförslagen ges under nedanstående sektioner. Detaljritningen visar avstånd mellan komponenter och hur många IGBT-staplar som är sammankopplade, detta syns mer tydligt i 3D-modellen och tabellen ovan.

6.4.1 Modell A

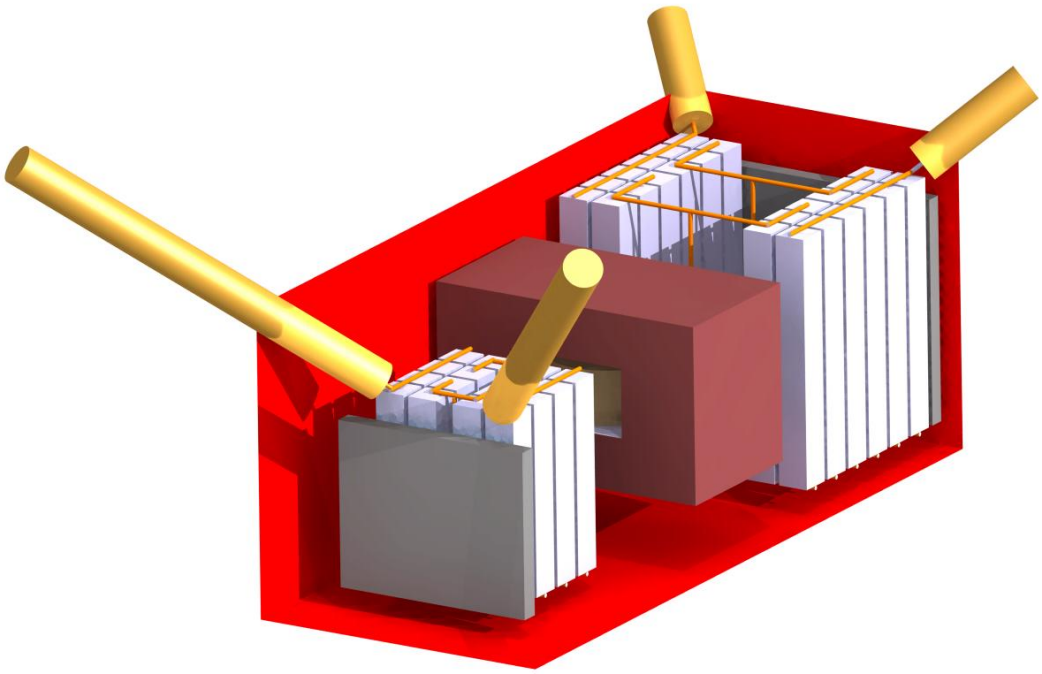


Figur 6.9: Modell A

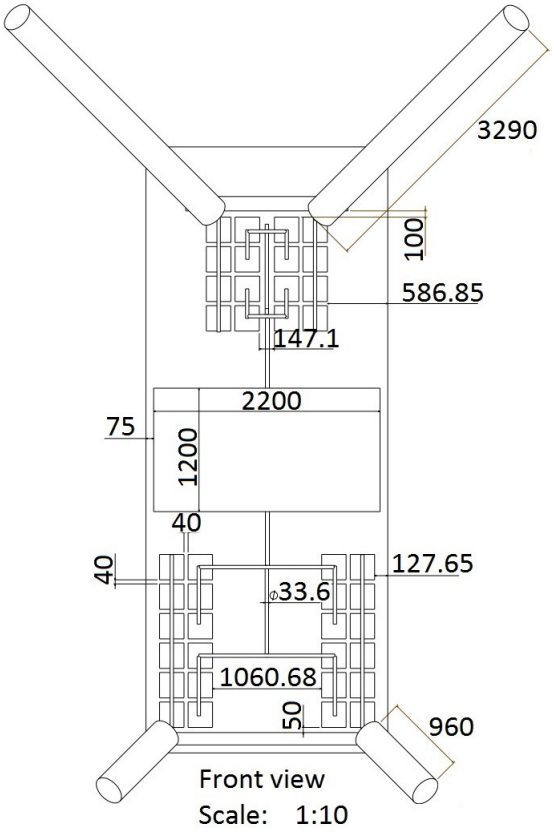


Figur 6.10: Ritning med komponentavstånd i mm för modell A

6.4.2 Modell B

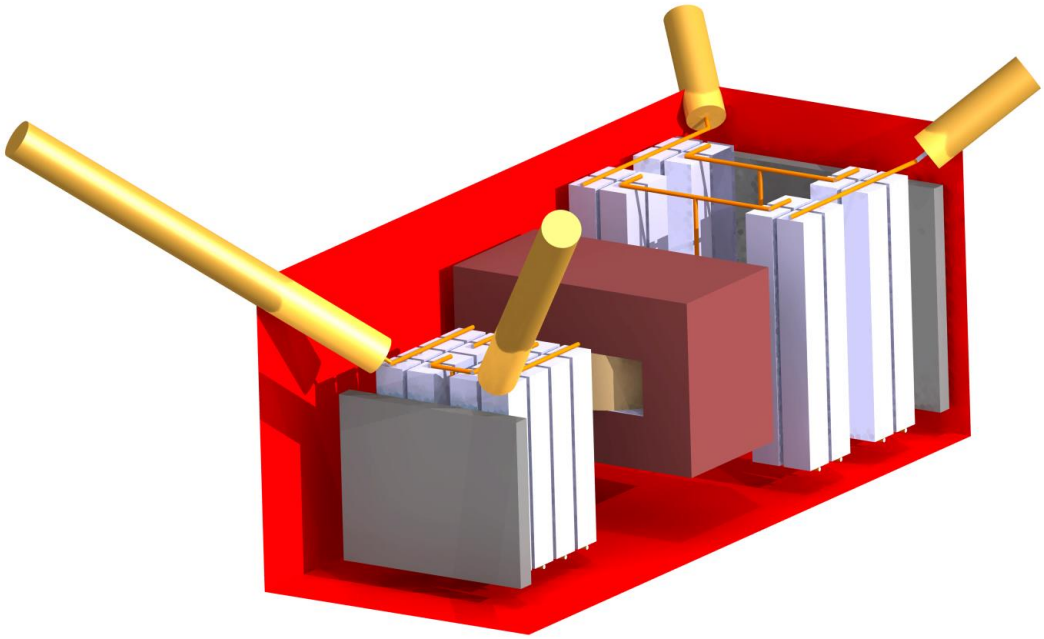


Figur 6.11: Modell B

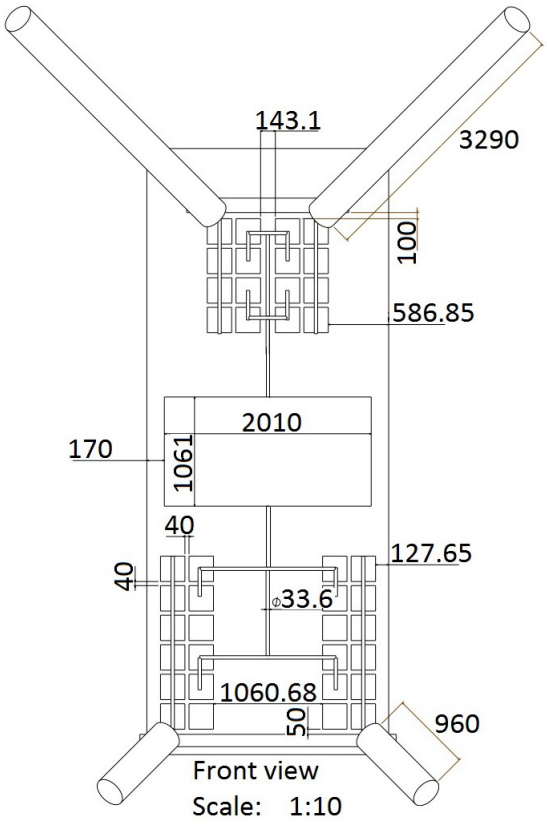


Figur 6.12: Ritning med komponentavstånd i mm för modell B

6.4.3 Modell C



Figur 6.13: Modell C



Figur 6.14: Ritning med komponentavstånd i mm för modell C

6.5 Diskussion

Beräkningarna för maximal teoretisk effekt påvisar att största möjliga omriktare med in- respektive utspänning 70 samt 240 kV är 360 MW. Dessa beräkningar är utförda med kraftigt förenklade modeller, vilket

innebär att många eventuellt begränsande problem har frånsetts. Tanken med studien är att ge en övergripande bild av vad som skulle kunna göras avseende DC/DC-omriktare i vindkraftparker. Det är på grund av dessa förenklingar som vi anser att det är orimligt att rymma $360\ MW$ DC/DC-omriktare i containern. Dock anser vi att det bör vara rimligt att rymma en mindre omriktare om $240\ MW$, förutsatt att ingående komponenter för fallet studeras i detalj.

6.6 Slutsats

DC/DC-omriktare med effektkapacitet upp till $240\ MW$ ryms i en 20' container. Teoretisk maximal effekt är $360\ MW$, detta bedöms dock vara orimligt högt ty magnetiseringen av kärnan är orimligt hög. 40' container rymmer även brytare och frånskiljare. IGBT-modulernas switchförluster är mest begränsande för omriktarens effektkapacitet i givet utrymme.

6.7 Framtida arbete

Detaljerade studier behövs innan en riktig DC/DC-omriktare kan konstrueras. Främst avser detta elektriska fält vid kanter och anslutningar, mekanisk hållfastighet, genomföringarnas konstruktion och infästning, transformatorns isolering och kylning, IGBT-staplarnas kylning, styrsystem för generering av switchsignaler, statistiska studier för blixtnedslag och överspänningar samt kapacitansbehov.

Referenser

[1] P.E Morthorst, ”Capacity development and profitability of wind turbines,” Energy Policy, vol. 27, nr. 13, pp 779-787, 1999.

[2] D. M. Larruskain, I. Zamora *et al.,* ”Transmission and Distribution Networks: AC versus DC,” Dept. Elect. Eng., Univ. Basque Country, Bilbao, Spanien, 2003.

[3] N. Mohan, T.M. Undeland *et al., Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, 3e utg., John Wiley & Sons, 2003.

[4] E. Kuffel, W. S. Zaengl *et al., High Voltage Engineering Fundamentals*, 2a utg., Elsevier Ltd., 2000.

[5] E. Stefan, H. Balan *et al.,* ”Study of the DC voltage circuit breakers commutation with emtpworks software simulations,” Tech. Univ. Cluj-Napoca, Grekland, 2010.

[6] M. Callavik, A. Blomberg *et al.,* ”The Hybrid HVDC Breaker: An innovation breakthrough enabling reliable HVDC grids,” ABB Grid Syst., 2012.

[7] *SEK Handbok 444,* 2010.

[8] *Zinc-Oxide Arrester Design and Characteristics,* Hubbell, 1999.

[9] *IEC Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions,* 2008.

[10] S.V. Kulkarni och S.A. Khaparde, *Transformer Eng: Desig, Technology, and Diagnostics*, 2a utg., Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2013.

[11] G. Majumdar och T. Minato, ”Recent and Future IGBT Evolution,” Power Device Works, Mitsubishi Elect. Corporation, 2007.

[12] W. Pfeiffer, ”High-frequency Voltage Stress of Insulation: Methods of Testing,” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 26, nr. 2, 1991.

[13] R. Arora och W. Mosch, *High Voltage and Electrical Insulation Engineering*, 1a utg., Inst. of Elect. and Elects. Eng., John Wiley & Sons, 2011.

[14] *EEA Fluorinated greenhouse gases: Aggregated data reported by companies on the production, import and export of fluorinated greenhouse gases in the European Union,* 2012.

[15] R.U. Lenke, *A Contribution to the Design of Isolated DC-DC Converters for Utility Applications*, Inst. for Power Generation and Storage Syst., E.ON Energy Research Center, Aachen, Tyskland, 2012.

Bilaga A

dcdc.m

```
%DCDC.m
%Script för beräkning av DC/DC-omriktarens kapacitet
%Av Oscar Hellqvist & Jonas Larsson

%Filerna skensystem.m, genomforing.m, igbt.m, kondensator.m och
%transformator.m måste ligga i samma mapp!

%Initiering ----------
%Rensning
clear all
close all
clc

%Presentation
disp('#Script för beräkning av DC/DC-omriktarens kapacitet')
disp('#Av Oscar Hellqvist & Jonas Larsson')
disp('---------------------------------------')

%Variablerdeklaration
H_cont = 2.39;
B_cont = 2.35;
L_cont = 5.89;
t_c_on = 690 * 10^(-9);
t_c_off = 4410 * 10^(-9);
B_IGBT = 0.2373;
fail = 0;
i = 0;
%----------

%Välj parametrar----------
%Automatisk körning med ändring av variabel?
while(1)
    disp('Välj programalternativ:')
    disp('1 - Mata in parametrar manuellt')
    disp('2 - Mata in parametrar manuellt och låt en parameter variera
        inom ett intervall')
    val = input('?');
    if(val == 1)
        break;
```

```
39      elseif(val == 2)
40          break;
41      end
42  end
43
44  if(val == 1)
45
46      %Primärspänning
47      while(1)
48          disp('Mata in primärspänning [i kV]:')
49          U_prim = 1000*input('?');
50          if(U_prim > 0)
51              break;
52          end
53      end
54
55      %Sekundärspänning
56      while(1)
57          disp('Mata in sekundärspänning [i kV]:')
58          U_sek = 1000*input('?');
59          if(U_sek > 0)
60              break;
61          end
62      end
63
64      %Märkeffekt
65      while(1)
66          disp('Mata in märkeffekt [i MW]:')
67          P_trafo = 1000000*input('?');
68          if(P_trafo > 0)
69              break;
70          end
71      end
72
73      %Switchfrekvens
74      while(1)
75          disp('Mata in switchfrekvens [i kHz]:')
76          f_switch = 1000*input('?');
77          if(f_switch > 0)
78              break;
79          end
80      end
81
82      %Magnetisk flödestäthet
83      while(1)
84          disp('Mata in magnetiska flödestäthetens toppvärde [i T]')
85          disp('[För vitroperm 0 < x <= 1.2]:')
86          B_top = input('?');
87          if((B_top > 0) && (B_top <= 1.2))
88              break;
89          end
90      end
91
```

```
92      %Temperatur på kylmedium
93      while(1)
94          disp('Mata in kylmediets temperatur [i grader C]')
95          disp('(20 - 110 grader C):')
96          T_a = 273 + input('?');
97          if(293 <= T_a <= 383)
98              break;
99          end
100     end
101 end
102
103 if(val == 2)
104
105     %Vilken variabel?
106     while(1)
107         disp('Välj variabel som skall ändras i intervall:')
108         disp('1 - Primärspänning')
109         disp('2 - Sekundärspänning')
110         disp('3 - Märkeffekt')
111         disp('4 - Switchfrekvens')
112         disp('5 - Kylmediets temperatur')
113         varval = input('?');
114         if(varval == 1)
115             break;
116         elseif(varval == 2)
117             break;
118         elseif(varval == 3)
119             break;
120         elseif(varval == 4)
121             break;
122         elseif(varval == 5)
123             break;
124         end
125     end
126
127     %start/slutvärde
128     while(1)
129         if(varval == 1)
130             disp('Mata in startvärde [kV]:')
131             start = input('?') * 1000;
132             disp('Mata in slutvärde [kV]:')
133             slut = input('?') * 1000;
134             disp('Mata in intervall [kV]:')
135             intervall = input('?') * 1000;
136         elseif(varval == 2)
137             disp('Mata in startvärde [kV]:')
138             start = input('?') * 1000;
139             disp('Mata in slutvärde [kV]:')
140             slut = input('?') * 1000;
141             disp('Mata in intervall [kV]:')
142             intervall = input('?') * 1000;
143         elseif(varval == 3)
144             disp('Mata in startvärde [MW]:')
```

```
145             start = input('?') * 1000000;
146             disp('Mata in slutvärde [MW]:')
147             slut = input('?') * 1000000;
148             disp('Mata in intervall [MW]:')
149             intervall = input('?') * 1000000;
150         elseif(varval == 4)
151            disp('Mata in startvärde [kHz]:')
152             start = input('?') * 1000;
153             disp('Mata in slutvärde [kHz]:')
154             slut = input('?') * 1000;
155             disp('Mata in intervall [kHz]:')
156             intervall = input('?') * 1000;
157         elseif(varval == 5)
158             disp('Mata in startvärde [grader C]:')
159             start = input('?') + 273;
160             disp('Mata in slutvärde [grader C]:')
161             slut = input('?') + 273;
162             disp('Mata in intervall [grader C]:')
163             intervall = input('?');
164         end
165         if(start >= 0)
166             if(slut >=0)
167                 break;
168             end
169         end
170     end
171
172     %Primärspänning
173     while(varval ~= 1)
174         disp('Mata in primärspänning [i kV]:')
175         U_prim = 1000*input('?');
176         if(U_prim > 0)
177             break;
178         end
179     end
180
181     %Sekundärspänning
182     while(varval ~= 2)
183         disp('Mata in sekundärspänning [i kV]:')
184         U_sek = 1000*input('?');
185         if(U_sek > 0)
186             break;
187         end
188     end
189
190     %Märkeffekt
191     while(varval ~= 3)
192         disp('Mata in märkeffekt [i MW]:')
193         P_trafo = 1000000*input('?');
194         if(P_trafo > 0)
195             break;
196         end
197     end
```

```
198
199     %Switchfrekvens
200     while(varval ~= 4)
201         disp('Mata in switchfrekvens [i kHz]:')
202         f_switch = 1000*input('?');
203         if(f_switch > 0)
204             break;
205         end
206     end
207
208     %Magnetisk flödestäthet
209     while(1)
210         disp('Mata in magnetiska flödestäthetens toppvärde [i T]')
211         disp('[För vitroperm 0 < x <= 1.2]:')
212         B_top = input('?');
213         if((B_top > 0) && (B_top <= 1.2))
214             break;
215         end
216     end
217
218     %Temperatur på kylmedium
219     while(varval ~= 5)
220         disp('Mata in kylmediets temperatur [i grader C]')
221         disp('(20 - 110 grader C):')
222         T_a = 273 + input('?');
223         if(293 <= T_a <= 383)
224             break;
225         end
226     end
227 end
228 %-----------
229
230 %Kör script normalt----------
231 if(val == 1)
232     %Beräkna isolationsspänning
233     x = [3.6 7.2 12 17.5 24 36 52 72.5 123 145 170 245 300 362 420 525
            765];
234     y = [20 40 60 75 95 145 250 325 450 450 550 650 850 950 1050 1175
            1675];
235     p = polyfit(x, y, 1);
236
237     U_iso = U_sek * p(1) + p(2);
238
239     %Rensa
240     clc
241     disp('KÖR SCRIPT...')
242
243     %Transformator
244     disp('TRANSFORMATOR.M')
245     [L_trafo, B_trafo, H_trafo, N_prim, N_sek, t_iso_inre, t_iso_yttre,
            r_prim, r_sek, P_f_trafo] = transformator(num2str(U_prim),
            num2str(U_sek), num2str(P_trafo), num2str(f_switch), num2str(
            B_top), num2str(U_iso));
```

```
246
247     %Genomföringar
248     disp('GENOMFORING.M')
249     [L_prim_utomhus, L_prim_inomhus, L_sek_utomhus, L_sek_inomhus] =
            genomforing(num2str(U_prim), num2str(U_sek));
250
251     %Skensystem
252     disp('SKENSYSTEM.M')
253     [r_skena_prim, r_skena_sek, t_container_prim, t_container_sek,
            t_iso_prim, t_iso_sek] = skensystem(num2str(U_prim), num2str(
            U_sek), num2str(P_trafo), num2str(U_iso));
254
255     %IGBT
256     disp('BERÄKNAR PARAMETRAR...')
257     H_eff_prim = (H_cont - cosd(45) * L_prim_inomhus - 4 * r_skena_prim
            - t_container_prim);
258     H_eff_sek = (H_cont - cosd(45) * L_sek_inomhus - 2 * (r_skena_sek +
            t_iso_sek) - 2 * r_skena_sek - t_container_sek);
259     L_skena_prim = (L_cont - B_trafo) / 2 - sind(45) * L_prim_inomhus;
260     L_skena_sek = (L_cont - B_trafo) / 2 - sind(45) * L_sek_inomhus;
261     B_eff_prim = B_cont - 2 * sind(45) * L_prim_inomhus + B_IGBT;
262     B_eff_sek = B_cont - 2 * sind(45) * L_sek_inomhus + B_IGBT;
263     disp('IGBT.M')
264     [n_igbt_prim, n_igbt_sek, m_igbt_prim, m_igbt_sek, f_max,
            n_fail_igbt_1, n_fail_igbt_2, m_fail_igbt_1, m_fail_igbt_2] =
            igbt(num2str(U_prim), num2str(U_sek), num2str(P_trafo), num2str
            (H_eff_prim), num2str(H_eff_sek), num2str(L_skena_prim),
            num2str(L_skena_sek), num2str(T_a), num2str(B_eff_prim),
            num2str(B_eff_sek), num2str(f_switch));
265
266     %Kondensatorer
267     disp('BERÄKNAR PARAMETRAR...')
268     L_eff_prim = L_prim_inomhus * cosd(45);
269     L_eff_sek = L_sek_inomhus * cosd(45);
270     disp('KONDENSATOR.M')
271     [vol_kond_prim, vol_kond_sek, C_prim, C_sek, fail_kond] =
            kondensator(num2str(U_prim), num2str(U_sek), num2str(H_eff_prim
            ), num2str(H_eff_sek), num2str(B_eff_prim), num2str(B_eff_sek),
             num2str(L_eff_prim), num2str(L_eff_sek), num2str(U_iso));
272
273     %Verkningsgrad
274     disp('BERÄKNAR VERKNINGSGRAD...')
275     P_totloss = P_f_trafo + 4 * (P_trafo * f_switch * (t_c_on + t_c_off
            ) / (n_igbt_prim * m_igbt_prim)) / 1000 + 4 * (P_trafo *
            f_switch * (t_c_on + t_c_off) / (n_igbt_sek * m_igbt_sek)) /
            1000;
276     verkningsgrad = (P_trafo - P_totloss) / P_trafo;
277
278     %Kontrollera om allt fungerar tillsammans
279     disp('KONTROLLERAR...')
280
281     %Frekvens
282     if(f_max < f_switch)
```

```
283         fprintf('Switchfrekvensen som kan uppnås är för låg!\n')
284         fprintf('Maximal switchfrekvens %0.1f kHz < Transformatorns
                switchfrekvens %0.1f kHz\n\n', f_max / 1000, f_switch /
                1000)
285         fail = 1;
286     end
287
288     %Transformatorlängd
289     if(L_trafo > B_cont)
290         fprintf('Transformatorn får inte plats på bredden!\n')
291         fprintf('Trafolängd %0.2f > Containerbredd %0.2f\n\n', L_trafo,
                B_cont)
292         fail = 1;
293     end
294
295     %Plats för IGBTer
296     if(n_fail_igbt_1 == 1)
297         fprintf('Utrymmet för seriekopplade IGBT-moduler på lågspä
                nningssidan är för litet!\n');
298         fail = 1;
299     end
300     if(m_fail_igbt_1 == 1)
301         fprintf('Utrymmet för parallellkopplade IGBT-staplar på lågspä
                nningssidan är för litet!\n');
302         fail = 1;
303     end
304     if(n_fail_igbt_2 == 1)
305         fprintf('Utrymmet för seriekopplade IGBT-moduler på högspä
                nningssidan är för litet!\n');
306         fail = 1;
307     end
308     if(m_fail_igbt_2 == 1)
309         fprintf('Utrymmet för parallellkopplade IGBT-staplar på högspä
                nningssidan är för litet!\n');
310         fail = 1;
311     end
312
313     %Plats för kondensatorer
314     if(fail_kond == 1)
315             fprintf('Utrymmet för kondensator vid primärsidan är för
                    litet!\n');
316             fail = 1;
317     end
318     if(fail_kond == 2)
319             fprintf('Utrymmet för kondensator vid sekundärsidan är för
                    litet!\n');
320             fail = 1;
321     end
322
323     %OK
324     if(fail == 0)
325         fprintf('OK!\n')
326     end
```

```
327
328     %Presentation
329     if(fail == 0)
330         %Avgränsa
331         disp('-----------------------------------------')
332
333         %Inparametrar
334         fprintf('#### Huvudparametrar ####\n')
335         fprintf('Inspänning = %0.1f kV\n', U_prim / 1000)
336         fprintf('Utspänning = %0.1f kV\n', U_sek / 1000)
337         fprintf('Märkeffekt = %0.1f MW\n', P_trafo / 1000000)
338         fprintf('Switchfrekvens = %0.1f kHz\n\n', f_switch / 1000)
339
340         %Transformator
341         fprintf('#### Transformator ####\n')
342         fprintf('Material = Vitroperm\n')
343         fprintf('Primärvarv = %0.0f st\n', N_prim)
344         fprintf('Sekundärvarv = %0.0f st\n', N_sek)
345         fprintf('Primärlindningens trådradie = %0.2f mm\n', r_prim *
                1000)
346         fprintf('Sekundärlindningens trådradie = %0.2f mm\n', r_sek *
                1000)
347         fprintf('Innerisoleringens tjocklek = %0.2f mm\n', t_iso_inre *
                 1000)
348         fprintf('Ytterisoleringens tjocklek = %0.2f mm\n', t_iso_yttre
                * 1000)
349         fprintf('Längd = %0.2f m\n', L_trafo)
350         fprintf('Bredd = %0.2f m\n', B_trafo)
351         fprintf('Höjd = %0.2f m\n', H_trafo)
352         fprintf('Volym = %0.2f m^3\n', L_trafo * B_trafo * H_trafo)
353         fprintf('Förluster = %0.2f kW\n\n', P_f_trafo / 1000)
354
355         %Genomföringar
356         fprintf('#### Genomföringar ####\n')
357         fprintf('Primärsidans ytterlängd = %0.2f m\n', L_prim_utomhus)
358         fprintf('Primärsidans innerlängd = %0.2f m\n', L_prim_inomhus)
359         fprintf('Sekundärsidans ytterlängd = %0.2f m\n', L_sek_utomhus)
360         fprintf('Sekundärsidans innerlängd = %0.2f m\n\n',
                L_sek_inomhus)
361
362         %Skensystem
363         fprintf('#### Skensystem ####\n')
364         fprintf('Primärskenornas radie = %0.2f mm\n', r_skena_prim *
                1000)
365         fprintf('Sekundärskenornas radie = %0.2f mm\n', r_skena_sek *
                1000)
366         fprintf('Primärskenornas isoleringstjocklek = %0.2f mm\n',
                t_iso_prim * 1000)
367         fprintf('Sekundärskenornas isoleringstjocklek = %0.2f mm\n\n',
                t_iso_sek * 1000)
368
369         %IGBT-moduler
370         fprintf('#### IGBT-staplar ####\n')
```

```
371         fprintf('Seriekopplade IGBT-moduler i varje fasben på primä
                rsidan = %0.0f st\n', n_igbt_prim)
372         fprintf('parallellkopplade IGBT-staplar i varje fasben på primä
                rsidan = %0.0f st\n', m_igbt_prim)
373         fprintf('Seriekopplade IGBT-moduler i varje fasben på sekundä
                rsidan = %0.0f st\n', n_igbt_sek)
374         fprintf('parallellkopplade IGBT-staplar i varje fasben på
                sekundärsidan = %0.0f st\n', m_igbt_sek)
375         fprintf('Switchförluster för varje fasben på primärsidan = %0.2
                f kW\n', (P_trafo * f_switch * (t_c_on + t_c_off) / (
                n_igbt_prim * m_igbt_prim)) / 1000)
376         fprintf('Switchförluster för varje fasben på sekundärsidan =
                %0.2f kW\n\n', (P_trafo * f_switch * (t_c_on + t_c_off) / (
                n_igbt_sek * m_igbt_sek)) / 1000)
377
378         %Kondensatorer
379         fprintf('#### Kondensatorvolym ####\n')
380         fprintf('Volym vid primärsidan = %0.2f m^3\n', vol_kond_prim)
381         fprintf('Volym vid sekundärsidan = %0.2f m^3\n', vol_kond_sek)
382         fprintf('Kapacitans vid primärsidan = %0.2f mF\n', C_prim *
                1000)
383         fprintf('Kapacitans vid sekundärsidan = %0.2f mF\n\n', C_sek *
                1000)
384
385         %Verkningsgrad
386         fprintf('#### Verkningsgrad ####\n')
387         fprintf('Förlusteffekt = %0.2f kW\n', P_totloss / 1000)
388         fprintf('Teoretisk verkningsgrad = %0.4f %%', verkningsgrad)
389     end
390 end
391 %-----------
392
393 %Kör script med intervall-----------
394 if(val == 2)
395     clc
396     while(1)
397         if(varval == 1)
398             U_prim = start + i * intervall;
399             nu = start + i * intervall;
400             if(nu > slut)
401                 break;
402             end
403         elseif(varval == 2)
404             U_sek = start + i * intervall;
405             nu = start + i * intervall;
406             if(nu > slut)
407                 break;
408             end
409         elseif(varval == 3)
410             P_trafo = start + i * intervall;
411             nu = start + i * intervall;
412             if(nu > slut)
413                 break;
```

```
414             end
415         elseif(varval == 4)
416             f_switch = start + i * intervall;
417             nu = start + i * intervall;
418             if(nu > slut)
419                 break;
420             end
421         elseif(varval == 5)
422             T_a = start + i * intervall;
423             nu = start + i * intervall;
424             if(nu > slut)
425                 break;
426             end
427         end
428
429         %Beräkna isolationsspänning
430         x = [3.6 7.2 12 17.5 24 36 52 72.5 123 145 170 245 300 362 420
                525 765];
431         y = [20 40 60 75 95 145 250 325 450 450 550 650 850 950 1050
                1175 1675];
432         p = polyfit(x, y, 1);
433
434         U_iso = U_sek * p(1) + p(2);
435
436         %Transformator
437         [L_trafo, B_trafo, H_trafo, N_prim, N_sek, t_iso_inre,
                t_iso_yttre, r_prim, r_sek, P_f_trafo] = transformator(
                num2str(U_prim), num2str(U_sek), num2str(P_trafo), num2str(
                f_switch), num2str(B_top), num2str(U_iso));
438
439         %Genomföringar
440         [L_prim_utomhus, L_prim_inomhus, L_sek_utomhus, L_sek_inomhus]
                = genomforing(num2str(U_prim), num2str(U_sek));
441
442         %Skensystem
443         [r_skena_prim, r_skena_sek, t_container_prim, t_container_sek,
                t_iso_prim, t_iso_sek] = skensystem(num2str(U_prim),
                num2str(U_sek), num2str(P_trafo), num2str(U_iso));
444
445         %IGBT
446         H_eff_prim = (H_cont - cosd(45) * L_prim_inomhus - 4 * (
                r_skena_prim + t_iso_prim) - t_container_prim);
447         H_eff_sek = (H_cont - cosd(45) * L_sek_inomhus - 4 * (
                r_skena_sek + t_iso_sek) - t_container_sek);
448         L_skena_prim = (L_cont - B_trafo) / 2 - sind(45) *
                L_prim_inomhus;
449         L_skena_sek = (L_cont - B_trafo) / 2 - sind(45) * L_sek_inomhus
                ;
450         B_eff_prim = B_cont - 2 * sind(45) * L_prim_inomhus + B_IGBT;
451         B_eff_sek = B_cont - 2 * sind(45) * L_sek_inomhus + B_IGBT;
452         [n_igbt_prim, n_igbt_sek, m_igbt_prim, m_igbt_sek, f_max,
                n_fail_igbt_1, n_fail_igbt_2, m_fail_igbt_1, m_fail_igbt_2]
                 = igbt(num2str(U_prim), num2str(U_sek), num2str(P_trafo),
```

```
        num2str(H_eff_prim), num2str(H_eff_sek), num2str(
        L_skena_prim), num2str(L_skena_sek), num2str(T_a), num2str(
        B_eff_prim), num2str(B_eff_sek), num2str(f_switch));
453
454     %Kondensatorer
455     L_eff_prim = L_prim_inomhus * cosd(45);
456     L_eff_sek = L_sek_inomhus * cosd(45);
457     [vol_kond_prim, vol_kond_sek, C_prim, C_sek, fail_kond] =
        kondensator(num2str(U_prim), num2str(U_sek), num2str(
        H_eff_prim), num2str(H_eff_sek), num2str(B_eff_prim),
        num2str(B_eff_sek), num2str(L_eff_prim), num2str(L_eff_sek)
        , num2str(U_iso));
458
459     %Kontrollera om allt fungerar tillsammans
460     %Frekvens
461     if(f_max < f_switch)
462         fprintf('Switchfrekvensen som kan uppnås är för låg!\n')
463         fprintf('Maximal switchfrekvens %0.2f kHz < Transformatorns
              switchfrekvens %0.2f kHz\n\n', f_max / 1000, f_switch
            / 1000)
464         fail = 1;
465     end
466
467     %Transformatorlängd
468     if(L_trafo > B_cont)
469         fprintf('Transformatorn får inte plats på bredden!\n')
470         fprintf('Trafolängd %0.2f > Containerbredd %0.2f\n\n',
            L_trafo, B_cont)
471         fail = 1;
472     end
473
474     %Plats för IGBTer
475     if(n_fail_igbt_1 == 1)
476         fprintf('Utrymmet för seriekopplade IGBT-moduler på lågspä
            nningssidan är för litet!\n');
477         fail = 1;
478     end
479     if(m_fail_igbt_1 == 1)
480         fprintf('Utrymmet för parallellkopplade IGBT-staplar på lå
            gspänningssidan är för litet!\n');
481         fail = 1;
482     end
483     if(n_fail_igbt_2 == 1)
484         fprintf('Utrymmet för seriekopplade IGBT-moduler på högspä
            nningssidan är för litet!\n');
485         fail = 1;
486     end
487     if(m_fail_igbt_2 == 1)
488         fprintf('Utrymmet för parallellkopplade IGBT-staplar på hö
            gspänningssidan är för litet!\n');
489         fail = 1;
490     end
491
```

```
492         %Plats för kondensatorer
493         if(fail_kond == 1)
494             fprintf('Utrymmet för kondensator vid primärsidan är för
                    litet!\n');
495             fail = 1;
496         end
497         if(fail_kond == 2)
498             fprintf('Utrymmet för kondensator vid sekundärsidan är för
                    litet!\n');
499             fail = 1;
500         end
501
502         %Förlusteffekt
503         P_totloss = P_f_trafo + 4 * (P_trafo * f_switch * (t_c_on +
                t_c_off) / (n_igbt_prim * m_igbt_prim)) / 1000 + 4 * (
                P_trafo * f_switch * (t_c_on + t_c_off) / (n_igbt_sek *
                m_igbt_sek)) / 1000;
504
505         %Presentation
506         if(varval == 1)
507             if(fail == 0)
508                 fprintf('För U_prim = %0.0f kV OK!\n', nu / 1000)
509             else
510                 fprintf('För U_prim = %0.0f kV MISSLYCKAT!\n', nu /
                        1000)
511             end
512         elseif(varval == 2)
513             if(fail == 0)
514                 fprintf('För U_sek = %0.2f kV OK!\n', nu / 1000)
515             else
516                 fprintf('För U_sek = %0.2f kV MISSLYCKAT!\n', nu /
                        1000)
517             end
518         elseif(varval == 3)
519             if(fail == 0)
520                 fprintf('För %0.0f MW OK!\n', nu / 1000000)
521             else
522                 fprintf('För %0.0f MW MISSLYCKAT!\n', nu / 1000000)
523             end
524         elseif(varval == 4)
525             if(fail == 0)
526                 fprintf('För %0.1f kHz OK!\n', nu / 1000)
527             else
528                 fprintf('För %0.1f kHz MISSLYCKAT!\n', nu / 1000)
529             end
530         elseif(varval == 5)
531             if(fail == 0)
532                 fprintf('För %0.0f K OK!\n', nu)
533             else
534                 fprintf('För %0.0f K MISSLYCKAT!\n', nu)
535             end
536         end
537
```

```
538         %Skika in variabler
539         if(i == 0)
540             y_vol = [(L_trafo * B_trafo * H_trafo)];
541             y_n_igbt_prim = [(n_igbt_prim)];
542             y_n_igbt_sek = [(n_igbt_sek)];
543             y_m_igbt_prim = [(m_igbt_prim)];
544             y_m_igbt_sek = [(m_igbt_sek)];
545             y_n_kond_prim = [(vol_kond_prim)];
546             y_n_kond_sek = [(vol_kond_sek)];
547             y_loss = [(P_totloss)];
548             fail_list = [~(fail)];
549         else
550             y_vol = [y_vol (L_trafo * B_trafo * H_trafo)];
551             y_n_igbt_prim = [y_n_igbt_prim (n_igbt_prim)];
552             y_n_igbt_sek = [y_n_igbt_sek (n_igbt_sek)];
553             y_m_igbt_prim = [y_m_igbt_prim (m_igbt_prim)];
554             y_m_igbt_sek = [y_m_igbt_sek (m_igbt_sek)];
555             y_n_kond_prim = [y_n_kond_prim (vol_kond_prim)];
556             y_n_kond_sek = [y_n_kond_sek (vol_kond_sek)];
557             y_loss = [y_loss (P_totloss)];
558             fail_list = [fail_list ~(fail)];
559         end
560
561         %Förbered för nästa varv
562         i = i + 1;
563         fail = 0;
564     end
565
566     %Generera plottitel
567     if(varval == 1)
568         vartitle = 'Primärspänning [V]';
569     elseif(varval == 2)
570         vartitle = 'Sekundärspänning [V]';
571     elseif(varval == 3)
572         vartitle = 'Märkeffekt [W]';
573     elseif(varval == 4)
574         vartitle = 'Switchfrekvens [Hz]';
575     elseif(varval == 5)
576         vartitle = 'Temperatur av kylmedium [K]';
577     end
578
579     %Skapa matris
580     x = [start: intervall: slut];
581
582     %Generera titelnamn
583     volumetitle = sprintf('Volym [m^3] vs. %s', vartitle);
584     nigbttitle = sprintf('IGBT-moduler [st] vs. %s', vartitle);
585     migbttitle = sprintf('IGBT-staplar [st] vs. %s', vartitle);
586     nkondtitle = sprintf('Kondensatorvolym [m^3] vs. %s', vartitle);
587     plosstitle = sprintf('Förlusteffekt [W] vs. %s', vartitle);
588
589     %Volym
590     subplot(3, 2, 1);
```

```
591     plot(x, y_vol, 'x')
592     title(volumetitle,'FontName','times','Fontsize',18,'
            HorizontalAlignment','center');
593     xlabel(vartitle,'FontName','times','Fontsize',18,'
            HorizontalAlignment','center');
594     ylabel('Volym [m^3]','FontName','times','Fontsize',18,'
            HorizontalAlignment','center');
595
596     %Antal IGBT-moduler
597     subplot(3, 2, 2);
598     plot(x, y_n_igbt_prim, 'x')
599     title(nigbttitle,'FontName','times','Fontsize',18,'
            HorizontalAlignment','center');
600     xlabel(vartitle,'FontName','times','Fontsize',18,'
            HorizontalAlignment','center');
601     ylabel('Antal IGBT-moduler [st]','FontName','times','Fontsize',18,'
            HorizontalAlignment','center');
602     hold on
603     plot(x, y_n_igbt_sek, 'o')
604     legend('Primärsida', 'Sekundärsida');
605     legend('Location','East');
606
607     %Antal IGBT-staplar
608     subplot(3, 2, 3);
609     plot(x, y_m_igbt_prim, 'x')
610     title(migbttitle,'FontName','times','Fontsize',18,'
            HorizontalAlignment','center');
611     xlabel(vartitle,'FontName','times','Fontsize',18,'
            HorizontalAlignment','center');
612     ylabel('Antal IGBT-staplar [st]','FontName','times','Fontsize',18,'
            HorizontalAlignment','center');
613     hold on
614     plot(x, y_m_igbt_sek, 'o')
615
616     %Antal kondensatorer
617     subplot(3, 2, 4);
618     plot(x, y_n_kond_prim, 'x')
619     title(nkondtitle,'FontName','times','Fontsize',18,'
            HorizontalAlignment','center');
620     xlabel(vartitle,'FontName','times','Fontsize',18,'
            HorizontalAlignment','center');
621     ylabel('Kondensatorvolym [m^3]','FontName','times','Fontsize',18,'
            HorizontalAlignment','center');
622     hold on
623     plot(x, y_n_kond_sek, 'o')
624
625     %Förlusteffekt
626     subplot(3, 2, 5);
627     plot(x, y_loss, 'x')
628     title(plosstitle,'FontName','times','Fontsize',18,'
            HorizontalAlignment','center');
629     xlabel(vartitle,'FontName','times','Fontsize',18,'
            HorizontalAlignment','center');
```

```
630     ylabel('Förlusteffekt [W]','FontName','times','Fontsize',18,'
            HorizontalAlignment','center');
631
632     %Får den plats?
633     subplot(3, 2, 6);
634     plot(x, fail_list, 'x')
635     title('Får DC/DC-omriktaren plats?','FontName','times','Fontsize'
            ,18,'HorizontalAlignment','center');
636     xlabel(vartitle,'FontName','times','Fontsize',18,'
            HorizontalAlignment','center');
637     ylabel('JA / NEJ','FontName','times','Fontsize',18,'
            HorizontalAlignment','center');
638 end
639 %-----------
640 %EOF
```

Bilaga B

transformator.m

```
1 %TRANSFORMATOR.m
2 %Script för beräkning av transformatoregenskaper
3 %Av Oscar Hellqvist & Jonas Larsson
4
5 %Initiering ----------
6 %Definiera som funktion
7 function [L_trafo, B_trafo, H_trafo, N_prim, N_sek, t_iso_inre,
      t_iso_yttre, r_prim, r_sek, P_f_trafo] = transformator(a, b, c, d,
      e, f)
8
9 %Presentation
10 if(nargin == 0)
11     disp('#Script för beräkning av transformatoregenskaper')
12     disp('#Av Oscar Hellqvist & Jonas Larsson')
13     disp('---------------------------------------')
14 end
15
16 %Variablerdeklaration
17 U_prim = 0;
18 U_sek = 0;
19 P_trafo = 0;
20 B_top = 0;
21 r_1 = 0;
22 r_2 = 0;
23 syms t_iso_yttre_num;
24 e_luft = 1 * 8.85 * 10^(-12);
25 e_epoxi = 3.6 * 8.85 * 10^(-12);
26 space = 0;
27 H_eff = 2.39;
28 E_b_polyetylen = 15 * 10^6;
29 %----------
30
31 %Välj parametrar----------
32 if(nargin == 0)
33
34     %Primärspänning
35     while(1)
36         disp('Mata in primärspänning [i kV]:')
37         U_prim = 1000*input('?');
```

```
38          if(U_prim > 0)
39              break;
40          end
41      end
42
43      %Sekundärspänning
44      while(1)
45          disp('Mata in sekundärspänning [i kV]:')
46          U_sek = 1000*input('?');
47          if(U_sek > 0)
48              break;
49          end
50      end
51
52      %Märkeffekt
53      while(1)
54          disp('Mata in märkeffekt [i MW]:')
55          P_trafo = 1000000*input('?');
56          if(P_trafo > 0)
57              break;
58          end
59      end
60
61      %Switchfrekvens
62      while(1)
63          disp('Mata in switchfrekvens [i kHz]:')
64          f_switch = 1000*input('?');
65          if(f_switch > 0)
66              break;
67          end
68      end
69
70      %Magnetisk flödestäthet
71      while(1)
72          disp('Mata in magnetiska flödestäthetens toppvärde [i T]:')
73          disp('[För vitroperm 0 < x <= 1.2]:')
74          B_top = input('?');
75          if((B_top > 0) && (B_top <= 1.2))
76              break;
77          end
78      end
79
80      %Dimensionerande spänning
81      while(1)
82          disp('Mata in dimensionerande spänning [i kV]:')
83          U_iso = input('?') * 1000;
84          if(U_iso > 0)
85              break;
86          end
87      end
88
89  %Lägg in parametrar som följt med
90  else
```

```
91      U_prim = str2num(a);
92      U_sek = str2num(b);
93      P_trafo = str2num(c);
94      f_switch = str2num(d);
95      B_top = str2num(e);
96      U_iso = str2num(f);
97  end
98  %-----------
99
100 %Beräkna primär- och sekundärlindningens area och radie----------
101 A_prim = (P_trafo / U_prim) / 4000000;
102 A_sek = (P_trafo / U_sek) / 4000000;
103
104 r_prim = sqrt(A_prim / pi);
105 r_sek = sqrt(A_sek / pi);
106 %-----------
107
108 %Beräkna antal lindningsvarv----------
109 N_sek = floor(H_eff / (4 * r_sek));
110 N_prim = floor(U_prim * N_sek / U_sek);
111 %-----------
112
113 %Beräkna kärnans area och radie----------
114 A_karna = U_sek / (N_sek * 2 * pi * f_switch * B_top);
115
116 r_karna = sqrt(A_karna / pi);
117 %-----------
118
119 %Beräkna isolationstjocklek mellan primär- och sekundärlindning
      ----------
120 r_0 = r_karna + 2 * r_prim;
121
122 t_iso_inre = r_0 * exp((U_iso) / (E_b_polyetylen * r_0)) - r_0;
123 %-----------
124
125 %Beräkna isolationstjocklek mellan sekundärlindning och containeryta
      ----------
126 r_0 = r_karna + r_prim * 2 + t_iso_inre + r_sek * 2;
127 r_1 = r_0 + t_iso_yttre_num;
128 s = r_1 + r_karna * 2 * pi / 8;
129
130 t_iso_yttre = double(vpa(solve(((31.35 + 9.63 / sqrt(r_0)) * (1000 /
      10^(-2)) - U_iso / (r_1 * (log(r_1 / r_0) + log(s / r_1)))),
      t_iso_yttre_num)));
131
132 if(t_iso_yttre <= 0)
133     t_iso_yttre = t_iso_inre;
134 end
135 %-----------
136
137 %Beräkna transformatorns storlek----------
138 L_trafo = 2 * (r_karna + 2 * r_prim + t_iso_inre + 2 * r_sek +
      t_iso_yttre) + pi * r_karna / 2;
```

```
139 B_trafo = 2 * (r_karna + 2 * r_prim + t_iso_inre + 2 * r_sek +
      t_iso_yttre);
140 H_trafo = N_sek * 2 * r_sek + pi * r_karna / 2;
141
142 V_trafo = L_trafo * B_trafo * H_trafo;
143 %-----------
144
145 %Beräkna totala förluster-----------
146 P_lind_trafo = 2 * pi * 1.72 * 10^(-8) * (((r_karna + r_prim) * N_prim
      * (P_trafo / U_prim)^2) / A_prim + ((r_karna + r_prim * 2 +
      t_iso_inre + r_sek) * N_sek * (P_trafo / U_sek)^2) / A_sek);
147 P_karna_trafo = V_trafo * 7350 * 2;
148
149 P_f_trafo = P_lind_trafo + P_karna_trafo;
150 %-----------
151
152 %Presentation av resultat
      ------------------------------------------------------
153 if(nargin == 0)
154
155     %Inparametrar
156     fprintf('TRANSFORMATOR %0.0f/%0.0f kV, %0.0f MW @ %0.1f kHz (%0.1f
          T) - VITROPERM\n\n', U_prim/1000, U_sek/1000, P_trafo/1000000,
          f_switch/1000, B_top);
157     fprintf('(Isolationsspänning = %0.2f kV)', U_iso / 1000);
158
159     %ï¿½Krna
160     fprintf('Kärnarea = %0.2f cm^2\n', A_karna * 10000);
161     fprintf('Kärnradie = %0.2f cm\n\n', r_karna * 100);
162
163     %Lindningsvarv
164     fprintf('Lindningsvarv på primärsidan = %0.0f st\n', N_prim);
165     fprintf('Lindningsvarv på sekundärsidan = %0.0f st\n', N_sek);
166     fprintf('Primärlindningens trådradie = %0.2f cm\n', r_prim*100);
167     fprintf('Sekundärlindningens trådradie = %0.2f cm\n\n', r_sek*100);
168
169     %Isolering
170     fprintf('Mellanisoleringens tjocklek = %0.2f cm\n', t_iso_inre*100)
          ;
171     fprintf('Ytterisoleringens tjocklek = %0.2f cm\n\n', t_iso_yttre
          *100);
172
173     %Storlek
174     fprintf('Längd = %0.2f m\n', L_trafo);
175     fprintf('Bredd = %0.2f m\n', B_trafo);
176     fprintf('Höjd = %0.2f m\n', H_trafo);
177     fprintf('Volym = %0.2f m^3\n\n', V_trafo);
178
179     %Lindningsförluster
180     fprintf('Lindningsförluster = %0.2f kW\n\n', P_f_trafo / 1000)
181 end
182 %-----------
183 %EOF
```

Bilaga C

genomforing.m

```
1  %GENOMFORING.m
2  %Script för beräkning av genomföringslängd
3  %Av Oscar Hellqvist & Jonas Larsson
4
5  %Initiering ----------
6  %Definiera som funktion
7  function [L_prim_utomhus, L_prim_inomhus, L_sek_utomhus, L_sek_inomhus]
       = genomforing(a, b)
8
9  %Presentation
10 if(nargin == 0)
11     disp('#Script för beräkning av genomföringslängd')
12     disp('#Av Oscar Hellqvist & Jonas Larsson')
13     disp('----------------------------------------')
14 end
15
16 %Variablerdeklaration
17 U_prim = 0;
18 U_sek = 0;
19 P_trafo = 0;
20 %----------
21
22 %Välj parametrar----------
23 if(nargin == 0)
24
25     %Primärspänning
26     while(1)
27         disp('Mata in primärspänning [i kV]:')
28         U_prim = 1000 * input('?');
29         if(U_prim > 0)
30             break;
31         end
32     end
33
34     %Sekundärspänning
35     while(1)
36         disp('Mata in sekundärspänning [i kV]:')
37         U_sek = 1000 * input('?');
38         if(U_sek > 0)
```

```
39                 break;
40             end
41         end
42
43 %Lägg in parametrar som följt med
44 else
45         U_prim = str2num(a);
46         U_sek = str2num(b);
47 end
48 %------------
49
50 %Beräkna längd------------
51 L_prim_utomhus = (31 * (U_prim / 1000) / 3.43) * 10^(-3);
52 L_prim_inomhus = (16 * (U_prim / 1000) / 3.43) * 10^(-3);
53
54 L_sek_utomhus = (31 * (U_sek / 1000) / 3.43) * 10^(-3);
55 L_sek_inomhus = (16 * (U_sek / 1000) / 3.43) * 10^(-3);
56 %------------
57
58 %Presentation av resultat------------
59 if(nargin == 0)
60
61     %Inparametrar
62     fprintf('INSPÄNNING / UTSPÄNNING = %0.0f/%0.0f kV\n\n', U_prim,
           U_sek);
63
64     %Längd på primärsidan
65     fprintf('Genomföringslängd utomhus för primärsidan = %0.2f mm\n',
           L_prim_utomhus * 1000);
66     fprintf('Genomföringslängd inomhus för primärsidan = %0.2f mm\n\n',
           L_prim_inomhus * 1000);
67
68     %Längd på sekundärsidan
69     fprintf('Genomföringslängd utomhus för sekundärsidan = %0.2f mm\n',
           L_sek_utomhus * 1000);
70     fprintf('Genomföringslängd inomhus för sekundärsidan = %0.2f mm\n',
           L_sek_inomhus * 1000);
71 end
72 %------------
73 %EOF
```

Bilaga D

skensystem.m

```
1 %SKENSYSTEM.m
2 %Script för beräkning av skensystemet
3 %Av Oscar Hellqvist & Jonas Larsson
4
5 %Initiering ----------
6 %Definiera som funktion
7 function [r_prim, r_sek, t_container_prim, t_container_sek, t_iso_prim,
      t_iso_sek] = skensystem(a, b, c, d)
8
9 %Presentation
10 if(nargin == 0)
11     disp('#Script för beräkning av skensystemet')
12     disp('#Av Oscar Hellqvist & Jonas Larsson')
13     disp('----------------------------------------')
14 end
15
16 %Variablerdeklaration
17 %syms r_2_num real;
18 syms t_iso_prim_num;
19 syms t_iso_sek_num;
20 e_luft = 1 * 8.85 * 10^(-12);
21 e_epoxi = 3.6 * 8.85 * 10^(-12);
22 %----------
23
24 %Välj parametrar----------
25 if(nargin == 0)
26
27     %Primärspänning
28     while(1)
29         disp('Mata in primärspänning [i kV]:')
30         U_prim = 1000 * input('?');
31         if(U_prim > 0)
32             break;
33         end
34     end
35
36     %Sekundärspänning
37     while(1)
38         disp('Mata in sekundärspänning [i kV]:')
```

```
39          U_sek = 1000 * input('?');
40          if(U_sek > 0)
41              break;
42          end
43      end
44
45      %Märkeffekt
46      while(1)
47          disp('Mata in märkeffekt [i MW]:')
48          P_trafo = 1000000*input('?');
49          if(P_trafo > 0)
50              break;
51          end
52      end
53
54      %Dimensionerande spänning
55      while(1)
56          disp('Mata in dimensionerande spänning [i kV]:')
57          U_iso = input('?') * 1000;
58          if(U_iso > 0)
59              break;
60          end
61      end
62
63 %Lägg in parametrar som följt med
64 else
65      U_prim = str2num(a);
66      U_sek = str2num(b);
67      P_trafo = str2num(c);
68      U_iso = str2num(d);
69 end
70 %-----------
71
72 %Beräkna skenarea-----------
73 A_prim = (P_trafo / U_prim) / (4 * 10^6);
74
75 A_sek = (P_trafo / U_sek) / (4 * 10^6);
76 %-----------
77
78 %Beräkna skenradie-----------
79 r_prim = sqrt(A_prim / pi);
80
81 r_sek = sqrt(A_sek / pi);
82 %-----------
83
84 %Beräkna minsta avstånd till containerytan på primärsidan----------
85 %t_container_prim = r_prim * exp(U_prim / (E_bd_luft * r_prim)) -
       r_prim;
86 r_0 = r_prim;
87 r_1 = r_0 + t_iso_prim_num;
88 s = r_1 + 0.2;
89
```

```
90 t_iso_prim = double(vpa(solve(((31.35 + 9.63 / sqrt(r_0)) * (1000 /
       10^(-2)) - U_iso / (r_1 * (log(r_1 / r_0) + log(s / r_1)))),
       t_iso_prim_num)));
91
92 t_container_prim = t_iso_prim + 0.2;
93 %------------
94
95 %Beräkna minsta avstånd till containerytan på sekundärsidan----------
96 r_0 = r_sek;
97 r_1 = r_0 + t_iso_sek_num;
98 s = r_1 + 0.2;
99
100 t_iso_sek = double(vpa(solve(((31.35 + 9.63 / sqrt(r_0)) * (1000 /
       10^(-2)) - U_iso / (r_1 * (log(r_1 / r_0) + log(s / r_1)))),
       t_iso_sek_num)));
101
102 t_container_sek = t_iso_sek + 0.2;
103 %------------
104
105 %Presentation av resultat----------
106 if(nargin == 0)
107
108     %Inparametrar
109     fprintf('INSPÄNNING / UTSPÄNNING / EFFEKT = %0.0f/%0.0f kV/%0.0f MW
          \n\n', U_prim/1000, U_sek/1000, P_trafo/1000000);
110
111     %Primärsidan
112     fprintf('PRIMÄRSIDAN----------\n')
113     fprintf('Skenarea = %0.0f mm^2\n', A_prim * 10^6);
114     fprintf('Skenradie = %0.0f mm\n', r_prim * 10^3);
115     fprintf('Minsta avstånd till containeryta = %0.0f mm\n\n',
          t_container_prim * 10^3);
116
117     %Sekundärsidan
118     fprintf('SEKUNDÄRSIDAN----------\n')
119     fprintf('Skenarea = %0.0f mm^2\n', A_sek * 10^6);
120     fprintf('Skenradie = %0.0f mm\n', r_sek * 10^3);
121     fprintf('Minsta avstånd till containeryta = %0.0f mm\n',
          t_container_sek * 10^3);
122     fprintf('Isolermaterialets tjocklek = %0.0f mm\n\n', t_iso_sek *
          10^3);
123 end
124 %------------
125 %EOF
```

Bilaga E

igbt.m

```
1 %IGBT.m
2 %Script för beräkning av maximal switchfrekvens och antal IGBT-staplar
3 %Av Oscar Hellqvist & Jonas Larsson
4
5 %Initiering ----------
6 %Definiera som funktion
7 function [n_prim, n_sek, m_prim, m_sek, f_max, n_fail_1, n_fail_2,
      m_fail_1, m_fail_2] = igbt(a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k)
8
9 %Presentation
10 if(nargin == 0)
11     disp('#Script för beräkning av maximal switchfrekvens och antal
          IGBT-staplar')
12     disp('#Av Oscar Hellqvist & Jonas Larsson')
13     disp('---------------------------------------')
14 end
15
16 %Variablerdeklaration
17 U_CE = 4500;
18 I_C = 2000;
19 t_c_on = 690 * 10^(-9);
20 t_c_off = 4410 * 10^(-9);
21 B_IGBT = 0.2373;
22 H_IGBT = 0.02875;
23 R_jc = 0.0048;
24 R_cs = 0.0011;
25 T_j = 398;
26 n_fail_1 = 0;
27 n_fail_2 = 0;
28 m_fail_1 = 0;
29 m_fail_2 = 0;
30 fail = 0;
31 %----------
32
33 %Välj parametrar----------
34 if(nargin == 0)
35
36     %Primärspänning
37     while(1)
```

```
38          disp('Mata in primärspänning [i kV]:')
39          U_prim = 1000 * input('?');
40          if(U_prim > 0)
41              break;
42          end
43      end
44
45      %Sekundärspänning
46      while(1)
47          disp('Mata in sekundärspänning [i kV]:')
48          U_sek = 1000 * input('?');
49          if(U_sek > 0)
50              break;
51          end
52      end
53
54      %Märkeffekt
55      while(1)
56          disp('Mata in märkeffekt [i MW]:')
57          P_trafo = 1000000*input('?');
58          if(P_trafo > 0)
59              break;
60          end
61      end
62
63      %Tillgänglig höjd på primärsidan
64      while(1)
65          disp('Mata in tillgänglig höjd vid primärsidan [i m]:')
66          H_eff_prim = 2 * input('?');
67          if(H_eff_prim > 0)
68              break;
69          end
70      end
71
72      %Tillgänglig höjd på sekundärsidan
73      while(1)
74          disp('Mata in tillgänglig höjd vid sekundärsidan [i m]:')
75          H_eff_sek = 2 * input('?');
76          if(H_eff_sek > 0)
77              break;
78          end
79      end
80
81      %Tillgänglig skenlängd på primärsidan
82      while(1)
83          disp('Mata in primärsidans tillgängliga skenlängd [i m]:')
84          L_skena_prim = input('?');
85          if(L_skena_prim > 0)
86              break;
87          end
88      end
89
90      %Tillgänglig skenlängd på sekundärsidan
```

```
91      while(1)
92          disp('Mata in sekundärsidans tillgängliga skenlängd [i m]:')
93          L_skena_sek = input('?');
94          if(L_skena_sek > 0)
95              break;
96          end
97      end
98
99      %Temperatur på kylmedium
100     while(1)
101         disp('Mata in kylmediets temperatur [i grader C]')
102         disp('(20 - 110 grader C):')
103         T_a = 273 + input('?');
104         if(293 <= T_a <= 383)
105             break;
106         end
107     end
108
109     %Tillgänglig bredd på primärsidan
110     while(1)
111         disp('Mata in tillgänglig bredd på primärsidan [i m]')
112         B_eff_prim = input('?');
113         if(B_eff_prim > 0)
114             break;
115         end
116     end
117
118     %Tillgänglig bredd på sekundärsidan
119     while(1)
120         disp('Mata in tillgänglig bredd på sekundärsidan [i m]')
121         B_eff_sek = input('?');
122         if(B_eff_sek > 0)
123             break;
124         end
125     end
126
127     %Önskad switchfrekvens
128     while(1)
129         disp('Mata in önskad switchfrekvens (om ingen specifik önskas,
                mata in 0) [i kHz]')
130         f_switch = 1000 * input('?');
131         if(f_switch >= 0)
132             break;
133         end
134     end
135
136 %Lägg in parametrar som följt med
137 else
138     U_prim = str2num(a);
139     U_sek = str2num(b);
140     P_trafo = str2num(c);
141     H_eff_prim = str2num(d);
142     H_eff_sek = str2num(e);
```

```
143     L_skena_prim = str2num(f);
144     L_skena_sek = str2num(g);
145     T_a = str2num(h);
146     B_eff_prim = str2num(i);
147     B_eff_sek = str2num(j);
148     f_switch = str2num(k);
149 end
150 %----------
151
152 %Kontrollera om igbt-staplar får plats på bredden----------
153 if(B_eff_prim >= 4 * B_IGBT)
154     H_eff_prim = H_eff_prim * 2;
155 end
156
157 if(B_eff_sek >= 4 * B_IGBT)
158     H_eff_sek = H_eff_sek * 2;
159 end
160 %----------
161
162 %Beräkna seriekopplade moduler
      ----------
163 n_krav_prim = ceil(U_prim / U_CE);
164 n_prim = floor(H_eff_prim / H_IGBT);
165 if(n_prim < 0)
166     n_prim = 0;
167 end
168
169 n_krav_sek = ceil(U_sek / U_CE);
170 n_sek = floor(H_eff_sek / H_IGBT);
171 if(n_sek < 0)
172     n_sek = 0;
173 end
174 %----------
175
176 %Beräkna parallellkopplade moduler----------
177 m_krav_prim = ceil((P_trafo / U_prim) / I_C);
178 if(f_switch > 0)
179     m_krav_prim_f = ceil(f_switch * (R_jc + R_cs) * P_trafo * (t_c_on +
          t_c_off) / (2 * n_prim * (T_j - T_a)));
180 else
181     m_krav_prim_f = 0;
182 end
183 if(m_krav_prim > m_krav_prim_f)
184     if(floor(L_skena_prim / (2 * B_IGBT)) >= m_krav_prim)
185         m_prim = m_krav_prim;
186     else
187         m_prim = floor(L_skena_prim / (2 * B_IGBT));
188     end
189 else
190     if(floor(L_skena_prim / (2 * B_IGBT)) >= m_krav_prim_f)
191         m_prim = m_krav_prim_f;
192     else
193         m_prim = floor(L_skena_prim / (2 * B_IGBT));
```

```
194     end
195 end
196 if(m_prim < 0)
197     m_prim = 0;
198 end
199
200 m_krav_sek = ceil((P_trafo / U_sek) / I_C);
201 if(f_switch > 0)
202     m_krav_sek_f = ceil(f_switch * (R_jc + R_cs) * P_trafo * (t_c_on +
        t_c_off) / (2 * n_sek * (T_j - T_a)));
203 else
204     m_krav_sek_f = 0;
205 end
206 if(m_krav_sek > m_krav_sek_f)
207     if(floor(L_skena_sek / (2 * B_IGBT)) >= m_krav_sek)
208         m_sek = m_krav_sek;
209     else
210         m_sek = floor(L_skena_sek / (2 * B_IGBT));
211     end
212 else
213     if(floor(L_skena_sek / (2 * B_IGBT)) >= m_krav_sek_f)
214         m_sek = m_krav_sek_f;
215     else
216         m_sek = floor(L_skena_sek / (2 * B_IGBT));
217     end
218 end
219 if(m_sek < 0)
220     m_sek = 0;
221 end
222 %----------
223
224 %Kontrollera om det räcker----------
225 %Primärsidan
226 if(n_prim < n_krav_prim)
227     if(nargin == 0)
228         fprintf('Utrymmet för seriekopplade moduler på lågspä
            nningssidan är för litet!\n');
229         fprintf('Antal moduler som får plats = %0.0f st\n', n_prim);
230         fprintf('Antal moduler som behövs = %0.0f st\n', n_krav_prim);
231     end
232     n_fail_1 = 1;
233     fail = 1;
234 end
235
236 if(m_prim < m_krav_prim)
237     if(nargin == 0)
238         fprintf('Utrymmet för parallellkopplade staplar på lågspä
            nningssidan är för litet!\n');
239         fprintf('Antal staplar som får plats = %0.0f st\n', m_prim);
240         fprintf('Antal staplar som behövs = %0.0f st\n', m_krav_prim);
241     end
242     m_fail_1 = 1;
243     fail = 1;
```

```
244 end
245 if(f_switch > 0)
246     if(m_prim < m_krav_prim_f)
247         if(nargin == 0)
248         fprintf('Utrymmet ï¿½fr parallellkopplade staplar på lågspä
                nningssidan är för litet!\n');
249         fprintf('Antal staplar som får plats = %0.0f st\n', m_prim);
250         fprintf('Antal staplar som behövs = %0.0f st\n', m_krav_prim);
251     end
252     m_fail_1 = 1;
253     fail = 1;
254     end
255 end
256
257 %Sekundärsidan
258 if(n_sek < n_krav_sek)
259     if(nargin == 0)
260         fprintf('Utrymmet för seriekopplade moduler på högspä
                nningssidan är för litet!\n');
261         fprintf('Antal moduler som får plats = %0.0f st\n', n_sek);
262         fprintf('Antal moduler som behövs = %0.0f st\n\n', n_krav_sek);
263     end
264     n_fail_2 = 1;
265     fail = 1;
266 end
267 if(m_sek < m_krav_sek)
268     if(nargin == 0)
269         fprintf('Utrymmet för parallellkopplade staplar på högspä
                nningssidan är för litet!\n');
270         fprintf('Antal staplar som får plats = %0.0f st\n', m_sek);
271         fprintf('Antal staplar som behövs = %0.0f st\n\n', m_krav_sek);
272     end
273     m_fail_2 = 1;
274     fail = 1;
275 end
276 if(f_switch > 0)
277     if(m_sek < m_krav_sek_f)
278         if(nargin == 0)
279         fprintf('Utrymmet för parallellkopplade staplar på lågspä
                nningssidan är för litet!\n');
280         fprintf('Antal staplar som får plats = %0.0f st\n', m_prim);
281         fprintf('Antal staplar som behövs = %0.0f st\n', m_krav_prim);
282     end
283     m_fail_2 = 1;
284     fail = 1;
285     end
286 end
287 %----------
288
289 %Beräkna högsta switchfrekvens----------
290 %För båda sidor
291 if(f_switch == 0)
```

```
292     f_switch_prim = (2 * n_prim * m_prim * (T_j - T_a)) / ((R_jc + R_cs
            ) * P_trafo * (t_c_on + t_c_off));
293     f_switch_sek = (2 * n_sek * m_sek * (T_j - T_a)) / ((R_jc + R_cs) *
             P_trafo * (t_c_on + t_c_off));
294
295     %Kontrollera vilken sida som begränsar
296     if(f_switch_prim < f_switch_sek)
297         f_max = f_switch_prim;
298     else
299         f_max = f_switch_sek;
300     end
301 else
302     f_max = f_switch;
303 end
304 %-----------
305
306 %Presentation av resultat-----------
307 if(fail == 0)
308     if(nargin == 0)
309
310         %Inparametrar
311         fprintf('INSPÄNNING / UTSPÄNNING = %0.0f/%0.0f kV\n\n', U_prim,
                U_sek);
312
313         %Primärsidan
314         fprintf('Antal seriekopplade IGBT-moduler vid primärsidan =
                %0.0f\n', n_prim);
315         fprintf('Antal parallellkopplade IGBT-moduler vid primärsidan =
                %0.0f\n\n', m_prim);
316
317         %Sekundärsidan
318         fprintf('Antal seriekopplade IGBT-moduler vid sekundärsidan =
                %0.0f\n', n_sek);
319         fprintf('Antal parallellkopplade IGBT-moduler vid sekundärsidan
                = %0.0f\n\n', m_sek);
320
321         %Maximal switchfrekvens
322         fprintf('Maximal switchfrekvens = %0.0f\n\n', f_max);
323     end
324 end
325 %-----------
326 %EOF
```

Bilaga F

kondensator.m

```
1 %KONDENSATOR.m
2 %Script för beräkning av antal kondensatorer
3 %Av Oscar Hellqvist & Jonas Larsson
4
5 %Initiering ----------
6 %Definiera som funktion
7 function [vol_kond_prim, vol_kond_sek, C_prim, C_sek, fail] =
      kondensator(a, b, c, d, e, f, g, h, i)
8
9 %Presentation
10 if(nargin == 0)
11     disp('#Script för beräkning av antal kondensatorer')
12     disp('#Av Oscar Hellqvist & Jonas Larsson')
13     disp('----------------------------------------')
14 end
15
16 %Variablerdeklaration
17 syms t_iso_kond_num;
18 B_IGBT = 0.2373;
19 fail = 0;
20 %----------
21
22 %Välj parametrar----------
23 if(nargin == 0)
24
25     %Primärspänning
26     while(1)
27         disp('Mata in primärspänning [i kV]:')
28         U_prim = 1000 * input('?');
29         if(U_prim > 0)
30             break;
31         end
32     end
33
34     %Sekundärspänning
35     while(1)
36         disp('Mata in sekundärspänning [i kV]:')
37         U_sek = 1000 * input('?');
38         if(U_sek > 0)
```

```
39              break;
40          end
41      end
42
43      %Tillgänglig höjd på primärsidan
44      while(1)
45          disp('Mata in tillgänglig höjd vid primärsidan [i m]:')
46          H_eff_prim = input('?');
47          if(H_eff_prim > 0)
48              break;
49          end
50      end
51
52      %Tillgänglig höjd på sekundärsidan
53      while(1)
54          disp('Mata in tillgänglig höjd vid sekundärsidan [i m]:')
55          H_eff_sek = input('?');
56          if(H_eff_sek > 0)
57              break;
58          end
59      end
60
61      %Tillgänglig bredd på primärsidan
62      while(1)
63          disp('Mata in tillgänglig bredd vid primärsidan [i m]:')
64          B_eff_prim = input('?');
65          if(B_eff_prim > 0)
66              break;
67          end
68      end
69
70      %Tillgänglig bredd på sekundärsidan
71      while(1)
72          disp('Mata in tillgänglig bredd vid sekundärsidan [i m]:')
73          B_eff_sek = input('?');
74          if(B_eff_sek > 0)
75              break;
76          end
77      end
78
79      %Tillgänglig längd på primärsidan
80      while(1)
81          disp('Mata in tillgänglig längd på primärsidan [i m]:')
82          L_eff_prim = input('?');
83          if(L_eff_prim > 0)
84              break;
85          end
86      end
87
88      %Tillgänglig längd på sekundärsidan
89      while(1)
90          disp('Mata in tillgänglig längd på sekundärsidan [i m]:')
91          L_eff_sek = input('?');
```

```
92          if(L_eff_sek > 0)
93              break;
94          end
95      end
96
97      %Dimensionerande spänning
98      while(1)
99          disp('Mata in dimensionerande spänning [i kV]:')
100         U_iso = input('?') * 1000;
101         if(U_iso > 0)
102             break;
103         end
104     end
105
106 %Lägg in parametrar som följt med
107 else
108     U_prim = str2num(a);
109     U_sek = str2num(b);
110     H_eff_prim = str2num(c);
111     H_eff_sek = str2num(d);
112     B_eff_prim = str2num(e);
113     B_eff_sek = str2num(f);
114     L_eff_prim = str2num(g);
115     L_eff_sek = str2num(h);
116     U_iso = str2num(i);
117 end
118 %----------
119
120 %Beräkna tillgänglig volym----------
121 t_iso_kond = double(vpa(solve((t_iso_kond_num - U_iso / ((6.72 / sqrt(
        t_iso_kond_num) + 24.36) * 1000 / 10^(-2))), t_iso_kond_num)));
122
123 if((L_eff_prim - 0.05) <= t_iso_kond)
124     vol_kond_prim = 0;
125     vol_kond_sek = 0;
126     fail = 1;
127 elseif((L_eff_sek - 0.1) <= t_iso_kond)
128     vol_kond_prim = 0;
129     vol_kond_sek = 0;
130     fail = 2;
131 else
132     vol_kond_prim = (L_eff_prim - 0.05 - t_iso_kond) * H_eff_prim * (
          B_eff_prim);
133     vol_kond_sek = (L_eff_sek - 0.1 - t_iso_kond) * H_eff_sek * (
          B_eff_sek);
134 end
135 %----------
136
137 %Kontrollera fel----------
138 if(fail == 1)
139     if(nargin == 0)
140         fprintf('Volymen på primärsidan är för liten!\n');
141     end
```

```
142 end
143
144 if(fail == 2)
145     if(nargin == 0)
146         fprintf('Volymen på sekundärsidan är för liten!\n');
147     end
148 end
149 %------------
150
151 %Beräkna uppnådd kapacitans------------
152 C_prim = 0.1 * vol_kond_prim;
153
154 C_sek = 0.1 * vol_kond_sek;
155 %------------
156
157 %Presentation av resultat------------
158 if(fail == 0)
159     if(nargin == 0)
160
161         %Inparametrar
162         fprintf('INSÄï¿½NNING / UTSPÄNNING / DIMENSIONERANDE SPÄNNING=
                %0.0f/%0.0f/%0.0f kV\n\n', U_prim/1000, U_sek/1000, U_iso
                /1000);
163
164         %Primärsidan
165         fprintf('PRIMÄRSIDAN----------\n')
166         fprintf('Volym för primärsidan = %0.2f m^3\n', vol_kond_prim);
167         fprintf('Kapacitans för primärsidan = %0.2f mF\n\n', C_prim *
                1000);
168
169         %Sekundärsidan
170         fprintf('SEKUNDÄRSIDAN----------\n')
171         fprintf('Volym för sekundärsidan = %0.2f m^3\n', vol_kond_sek);
172         fprintf('Kapacitans för sekundärsidann = %0.2f mF\n\n', C_sek *
                1000);
173     end
174 end
175 %------------
176 %EOF
```