

KANDIDATARBETE 2016

Projektrapport

Undersökning av det elektriska systemet för tidvattenkraftverket
Deep Green i spänningsintervallet 500V till 3,3kV

Daniel Antonsson

Andreas Ellström

Petter Engström

Rasmus Karlsson

Simon Nilsson

Andreas Rydgård



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Institutionen för energi och miljö
CHALMERS TEKNISKA UNIVERSITET
Göteborg, Sverige 2016

Abstract

With today's need for renewable energy new technologies needs to be developed to meet this demand. Minestos concept for the tidal power plant Deep Green is one such technology. Deep Green is a power plant that with its unique movement pattern extracts energy from tidal currents that previously have been untapped. In this project the electrical system of Deep Green is studied and what the effects are for a rise in operating voltages from $500V$ to $690V$, $1kV$ and $3,3kV$. The procedure for this project is a literature study in connection with simulations with the programs Matlab, Comsol and Pspice. The results show that an increased voltage to $690V$ will lead to the power loss being reduced by half in the submarine cable. The higher voltage leads to a fractional change of the power electronics in the system. The conclusion of this study is that a heightened voltage level that gives lower losses is favorable. To implement the voltages $1kV$ and $3,3kV$ further investigations are required because several components needs to be replaced or modified at these voltage levels.

Sammandrag

Med dagens behov av förnyelsebar energi behöver nya teknologier utvecklas för att möta denna efterfrågan. Minestos koncept för tidvattenskraftverket Deep Green är en sådan teknologi. Deep Green är ett kraftverk som med sitt unika rörelsemönster utvinner energi från tidvattenströmmar som tidigare varit outnyttjade. I detta projekt studeras Deep Greens elektriska system och vad påföljderna blir av en ökning av arbetsspänning från $500V$ till $690V$, $1kV$ och $3,3kV$. Tillvägagångsättet för detta projekt är litteraturstudie i samband med simulationer med programmen Matlab, Comsol och Pspice. Resultatet visar att en ökad spänning till $690V$ leder till en halvering av effektförluster i undervattenskabel. Den högre spänningen medför en marginell förändring av kraftelektronik i systemet. Slutsatsen av denna studie är att en höjd spänningsnivå som ger lägre förluster är gynnsamt. För att implementera arbetsspänning $1kV$ och $3,3kV$ krävs vidare undersökning då flera komponenter behöver ersättas eller modifieras vid dessa spänningsnivåer.

Nyckelord: Undervatten, Deep Green, tidvattenkraftverk, drake, Permanent Magnetiserad Synkron Maskin, PWM, Generator, Kraftelektronik, Undervattenskabel, rörelsemönster, förnyelsebar, energikälla,

Speciellt tack till

Yujing Liu
Magnus Eriksson
Pehr Brunnegård
Per Salomonsson
Eric Singhroy
Georgios Mademlis
Jimmy Ehnberg
Thomas Hammarström
Junfei Tang

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Beskrivning av konceptet för Deep Green, Minesto	2
1.3	Syfte	4
1.4	Avgränsningar	4
2	Metod	5
2.1	Simuleringar	5
2.2	Designprocess	7
3	Teori	8
3.1	Generator	8
3.2	Kraftelektronik	18
3.3	Undervattenskabel	23
4	Resultat och analys	30
4.1	Generator	30
4.2	Kraftelektronik	35
4.3	Undervattenskabel	40
5	Diskussion	46
6	Slutsats och vidare undersökningar	48
6.1	Slutsats	48
6.2	Vidare undersökningar	48

1 Inledning

Elproduktion är en av de stora frågorna i debatten angående global uppvärmning och människans miljöpåverkan. Under många år har stora delar av elproduktionen skett genom förbränning av fossila bränslen. Teknik för detta är välutvecklad och kostnadseffektiv. Denna teknik har medfört stora negativa effekter på miljön och dessutom används resurser med begränsad tillgång. På senare år har flertalet tekniker för utvinning av förnyelsebar energi utvecklats där olika förnyelsebara resurser används.

Ett stort problem för de flesta förnyelsebara energikällorna är att energiresurserna är oförutsägbara och okontrollerbara, kraftverken kan endast generera energi om vädret tillåter. För att skapa stabilitet i elnäten behövs stabila källor med hög predikterbarhet. Havet är en resurs med stora möjligheter som ännu inte har utnyttjats med avsikt att generera elektrisk energi i någon större utsträckning. Innan el-generation från havet är möjligt behöver pålitliga tekniker för detta utvecklas. Tidvattenkraft är en intressant naturresurs eftersom den är förutsägbar och beräknelig.

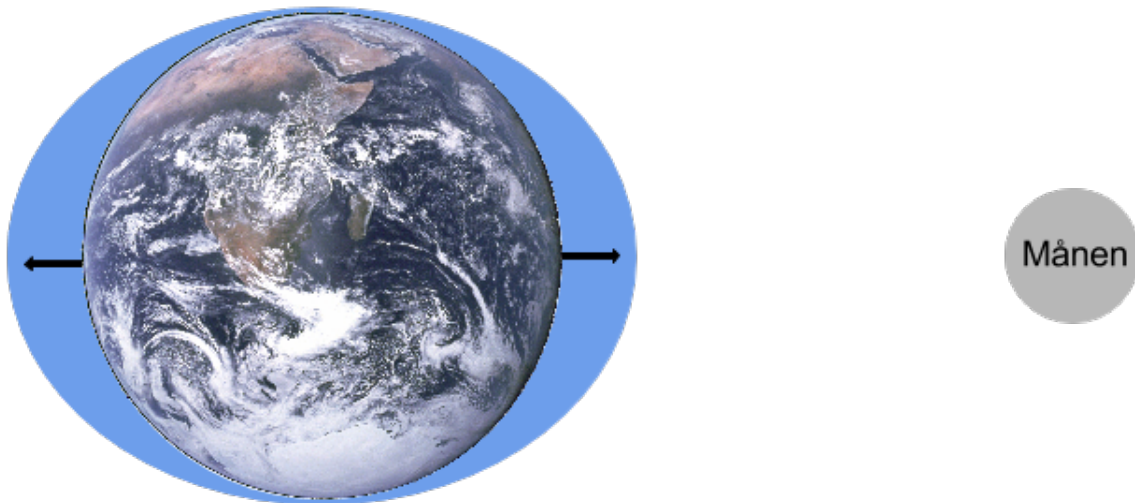
1.1 Bakgrund

Tidvatten är ett globalt fenomen som påverkar höjden på havsvattenytan. När månen och solen, relativt till jorden rör sig följer vattenmassorna i haven efter. Dragningkraften från himlakropparna gör att haven får två utbuktningar, som kan ses i figur 1, en utbuktning mot månen och en bort från månen. Havens utbuktningar gör alltså jorden något oval där utbuktningarna är högvatten och de andra sidorna, som ligger vinkelrätt mot månen, har lågvatten. Månen har större påverkan på jordens tidvatten än vad solen har på grund av att månen är mycket närmare.

Detta fenomen är förutsägbart och det går att räkna ut när det kommer vara högt respektive lågt tidvatten. Dessutom går det att förutse när och hur vattnet rör sig under dessa förändringar. Vid hög och lågvatten står vattenmassorna stilla, i förändringen emellan dessa perioder är tidvattenströmmarna som störst. Vattenflödet beror på utseendet av havsbotten och utformningen av kringliggande landmassor, vattenströmmarna är som starkast vid smala passager samt kring halvöar.

Det är i situationer med höga tidvattenhastigheter som det är gynnsamt att generera elektricitet. Dessa hög- och lågvatten skiftar nästan fyra gånger per dag vilket ger mycket tid till effektiv energiutvinning. När tidvattenflödet är som lägst genereras ingen energi. Under dessa tidsspann är det fördelaktigt att göra installationer, reparationer och underhållsarbete. Dessa faktorer, att det finns tid för el-generation och att det finns tid för arbete på utrustningen gör att tidvattenströmmar lämpar sig utmärkt som resurs för utvinning av förnybar energi.

Det finns redan idag tidvattenkraftverk i bruk men nuvarande teknik kräver höga vattenhastigheter, på ca 2-4 m/s, och stora rotorspann för att vara gångbara. Tid-



Figur 1: Illustration av månens påverkan på jordens hav med högvatten och lågvatten. Figuren är skapad med en bild som är allmän egendom.

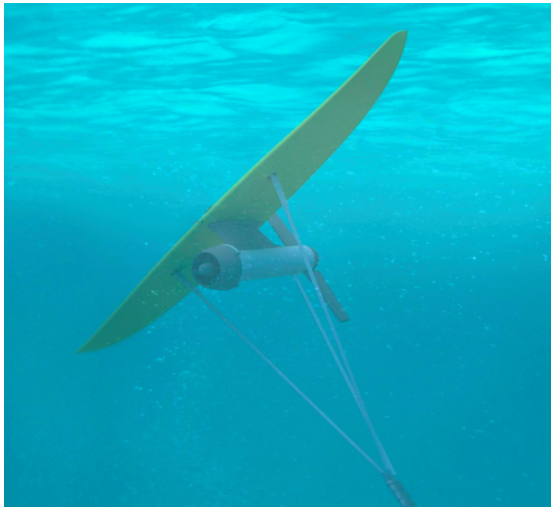
vattenströmmar i dessa hastigheter är ovanliga vilket gör att tidvattenkraftverk är plats specifika [1]. Det höga vattenflödet kräver tunga och slitstarka konstruktioner vilket också ger höga konstruktions- och installationskostnader. Höga hastigheter på tidvattnet medför dessutom svårigheter vid montering av kraftverken eftersom perioderna då strömmarna är tillräckligt svaga för installation endast är några timmar långa.

1.2 Beskrivning av konceptet för Deep Green, Minesto

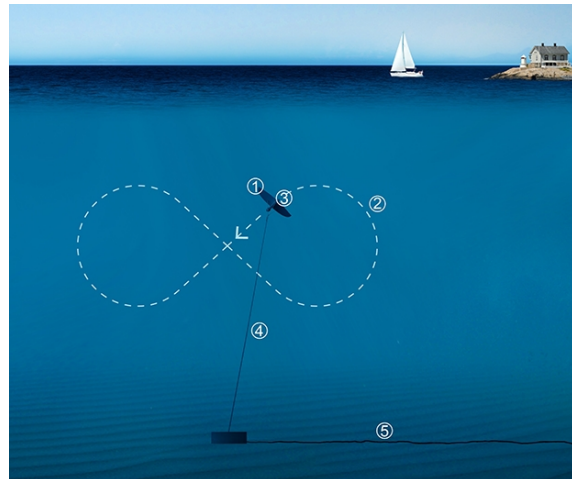
Deep Green är ett koncept som kan generera el vid vattenströmmar som är lägre än vad de andra typerna av kraftverk behöver. Deep Green använder sig av teknik som ingen annan tidigare har testat, nämligen att låta kraftverket röra sig i vattnet. Figur 2 visar hur kraftverket antagligen kommer se ut.

Principen bakom Deep Green liknar den av en flygande drake, som visas i figur 2 [2]. Draken lyfts av tidvattenströmmen och får därmed rörelseenergi. Genom att styra draken så den rör sig i ett mönster som påminner om en åtta, som kan ses i figur 3, är det möjligt att öka den relativa hastighet på kraftverket i förhållande till tidvattenströmmen upp till en faktor 10 [3]. Om tidvattenströmmen är på 1,5 m/s skulle alltså vattnet genom turbinen röra sig med 15 m/s. Det ger Deep Green en fördel jämfört med andra tidvattenkraftverk eftersom den är ensam om att generera el i områden där hastigheten på tidvattenströmmen ligger runt 1,5 m/s. Deep Green är just nu under utveckling för att börja användas i stor skala om endast några år. Nu testas prototyper i $\frac{1}{4}$ skala [3].

Deep Green är fäst i ett fundament, med ett kraftigt dyneemarep, som är fixerat i havsbotten. Längs repet går det kraftkablar för transport av den genererade elekt-



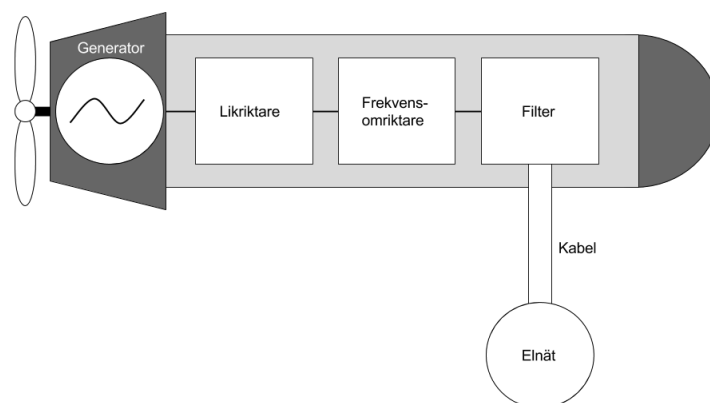
Figur 2: Koncept för hur Deep Green kommer ser ut. Figur används med tillåtande från Minesto.



Figur 3: Rörelsemönster för undervattensdraken. 1 drakens vinge. 2 drakens rörelsemönster. 3 turbinen. 4 den dynamiska biten av kabeln samt vijern. 5 bottenkabel för transport av den genererade energin. Figur används med tillåtande från Minesto.

riska energin samt en optisk fiberkabel för styr signaler, dessa är inneslutna i ett strömlinjeformat plastskal för god rörelse genom vattnet.

En drake i full skala kommer att vara byggd för att aktivt arbeta i vattenhastigheter på ca 1,5 m/s och då generera ungefär 500kW. Det elektriska systemet som används för att omvandla den mekaniska energin till elektrisk sitter på drakens undersida. De tre olika delarna i systemet är; generator, kraftelektronik samt kraftkabel, vilket kan ses i figur 4. Dessa tre delar är i sin tur uppbyggda av flera delar som kommer förklaras senare i rapporten.



Figur 4: Blockschema som grovt beskriver Minestos elektriska system i sin helhet.

1.3 Syfte

Syftet med denna rapport är att omarbete en förenklad design av det elektriska systemet baserat på företaget Minestos koncept för tidvattenkraftverk, Deep Green. Det som undersöks är effektförluster och svårigheter med systemet vid konstant varvtal och konstant ineffekt för kontinuerlig drift i ett växelspännings-system. Undersökningen görs för spänningsnivåer i intervallet mellan $500V$ till $3,3kV$ där målet är att ta fram vilken spänningsnivå som är mest gynnsam för kraftverkets elektriska design.

1.4 Avgränsningar

Alla delar av det elektriska systemet kommer, på grund av den höga energidensiteten, att behövas kylas. Hur komponenterna behöver kylas, alltså kylningssystemet, kommer inte att undersökas i denna rapport.

Kraftverkets tre delar har undersökts separat i denna rapport. Kopplingarna mellan dessa tre delar i systemet och hur de styrs har ej undersökts.

Tryckkänsligheten för komponenterna undersöks inte i denna rapport. Gas under högt tryck, som t.ex. under vatten, blir komprimerad. Effekterna på komponenterna av att gasfyllda utrymmen i kraftverket utsätts för högt tryck och komprimeras, undersöks inte.

Deep Green är ett koncept som är gjort för att byggas som ett nätverk av kraftverk för att det ska vara lönsamt. Detta projekt ämnar att minska förlusterna för detta system men med fokus på varje enskild generator och därmed kommer tekniken för ett sådant nätverk inte att undersökas vidare.

Projektet undersöker ej oljeinpregnerad papperskabel utan endast plastextrud kraftkabel. Aluminium och koppar är de enda två ledarmaterialen som undersöks eftersom de är det två absolut mest använda ledarmaterialen för kraftkablar.

Fenomenet ankarreaktion (armature reaction) kommer inte att ingå i den analytiska modellen för generatorn. För att uppnå resultat med simuleringar som överensstämmer med den analytiska modellen kommer simuleringarna att göras utan last.

Det finns många metoder för att uppnå sinusformad spänning ut ur generatorn om i detta projekt inte kommer behandlas. Istället görs antagandet att spänningen ut ur generatorn är sinusformad.

Minesto har av beslutat att använda sig av en permanentmagnetiserad synkron-generator med ytmonterade magneter. Eftersom detta projekt undersöker Minestos system kommer all teori och alla beräkningar att utgå från en sådan generator.

2 Metod

Detta är ett projekt som är baserat på litteraturstudier och ett samarbete med företaget Minesto. Resultatet har tagits fram genom simuleringar i program som Comsol, Pspice samt MATLAB för beräkningar. Projektet har delats upp i tre mindre delar för att ge en bättre översikt över hela systemet. De tre områden som valdes att fokusera på är generatoren, kraftelektroniken och kraftkabeln och projektgruppen har indelats i tre mindre grupper för att fördjupa sig i respektive ämne. I slutet av rapporten sammanställs resultatet från varje grupp för att dra slutsatser om målsättningen i syftet.

Projektet började med att samla in information inom varje del genom akademiska artiklar, rapporter och läroböcker samt samtal med handledare och andra kunniga inom ämnet. Dessutom har gruppen under projektets gång fört en dialog med Minesto med jämna mellanrum. Projektet gick sedan vidare med att modellera systemen i respektive simuleringsprogram.

2.1 Simuleringar

2.1.1 Simulering - MATLAB

MATLAB har använts till att beräkna stora delar av generatordesignen. Det har även använts för beräkningar av bland annat spänningsfall och effektförluster i andra delar.











2.1.2 Simulering - Pspice

Programmet Pspice, från OrCAD 16.6 Lite har använts för att göra beräkningar på kraftelektroniken. Pspice är ett simuleringsprogram som används mest för att simulera elektroniskakretsar vilket passar för kraftelektroniken, det är möjligt att dela upp och ta varje komponent var för sig. Eftersom Pspice inte har använts innan så kommer fokuset först vara att få en förståelse om programmet. Då kommer det läggas tid på enklare kretsar för att se hur simuleringarna sker och hur det fungerar. När mer kunskap finns, kommer designen på kraftelektroniken att påbörjas. Vilket byggs på den teori som har hämtas under projektes gång.

Med figur 5 visas alla komponenter som har använts under simulationerna. Dessa komponenter justeras utefter vad teorin grundas i och vad som passar situationen. Analog beteende modellering (ABM) är en modul som används för att matcha två signaler för att sedan ge ut en [4]. Ändringar i systemet som att sätta två likspänningskällor gjordes för att det är lättare för programmet. Dessa spänningskällor är också den spänningen som kommer från likspänninglänken, som förklaras i teorin vad det är.

2.1.3 Simulering - Comsol

Comsol är ett program som har använts för att simulera värmedistribution, induktans och elektriskt fält för undevattenskabel. Med Comsol så är det möjligt att

	Resistor
   a) Likspänningskälla b) Sinusvåg c) Pulsvåg (triangelvåg)	
	Induktans
	Kondensator
  a) Diod b) Jord	
	ABM
	IGBT

Figur 5: Komponenterna och delarna som användes i Pspice.

designa en geometrisk figur i en till tre dimensioner. Sedan kan ett antal områden från fysiken appliceras på figuren så som elektrostatik, magnetiska och elektriska fält samt värmeöverföring. Det kan dock tillkomma osäkerheter från simulationen så beräkningar för hand bör användas för att stärka de ekvationer som används av Comsol.

Värmedistributionen i kabeln simulerades med fysiken "Heat Transfer in Solids" i två dimensioner. För att kontrollera den termiska simulationen i Comsol utförs en beräkning av värmedistribution för hand på en kabel. Denna jämförs sedan med en simulation i Comsol. Dessa värden stämmer med varandra. Då kan Comsol användas för att simulera vår kabeldesign.

Kabelns självinduktans beräknades med fysiken "Magnetic and Electric Fields" i tre dimensioner. För att verifiera modellen så utförs beräkningar av induktans analytiskt och jämförs sedan med en simulation av samma modell. Från simulationen i Comsol beräknas värdet på induktansen. Detta jämförs mot en analytisk beräkning och de anses tillförlitliga. Comsol kan därmed appliceras på vår fulla modell.

Det elektriska fältet simuleras med fysiken "Electrostatics". För att bekräfta att simulationen i Comsol är korrekt görs först ett test med en ledare som jämförs analytiskt med en simulation i Comsol. Från simulationen överensstämmer det elektriska fältet med beräkningarna. Modellen i Comsol anses därför tillförlitlig och kommer appliceras på den verkliga kabeln.

2.1.4 Simulering - Maxwell2D

Maxwell2D är ett simuleringsprogram som använder sig av FEM (Finit Elemental Method) vid beräkningar och används inom många designområden. I detta projekt har alla bilder och värden som beräknats från detta program gjorts av en mer erfaren

doktorand med värden från våra modeller. Detta program användes för att bekräfta trovärdigheten i beräkningar av förlusterna som gjordes för generatormodellerna i MATLAB.

2.2 Designprocess

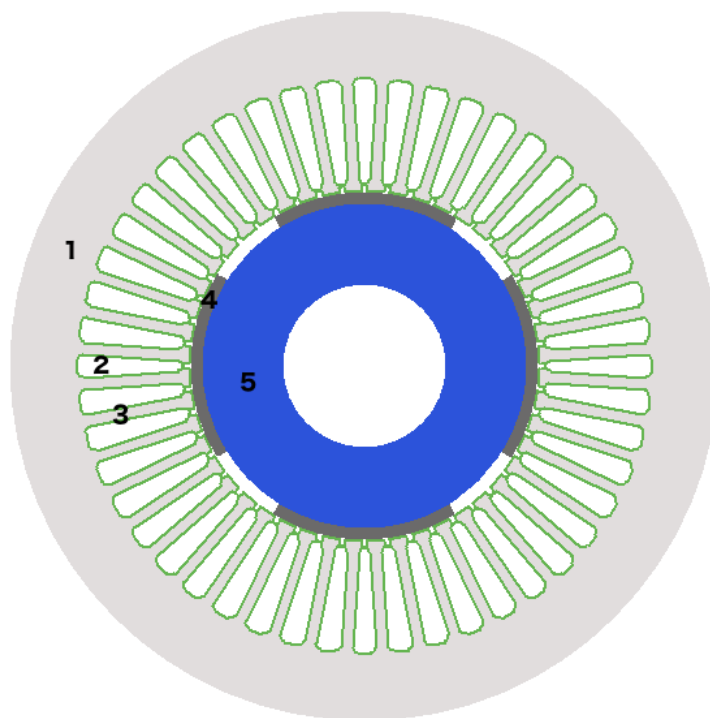
Det första steget för att designa generatorn var att utgå ifrån de begränsningar som sätts på systemets enligt Minesto och de specifikationer som gäller för internationella standarder. Efter detta valdes lämpligt material för designen utifrån förutsättningar och materialens egenskaper matades in i modellen. Sedan påbörjades processen att välja geometrierna, vars grundvärden valdes utifrån rekommenderade ekvationer från litteratur [5] för att sedan anpassa parametrarna tills eftersträvat resultat uppnåts.

3 Teori

I detta kapitel kommer teorin bakom utförandet av detta projekt att förklaras i detalj. Kapitlet är uppdelat för att behandla först generatorn, sedan kraftelektroniken och till sist undervattenskabel. Ekvationer som används för att komma fram till resultaten som presenteras i kapitel fyra, presenteras här.

3.1 Generator

Generatorns roll är att omvandla mekanisk energi till elektrisk energi. Det finns många olika sorters maskiner som vanligen delas upp i två grupper: synkronmaskin och asynkronmaskin. Även om många av principerna som förklaras i detta kapitel även kan appliceras på andra maskiner kommer förklaringar och figurer vara direkt förknippade med permanentmagnetiserade synkrongeneratorer. Figur 6 illustrerar hur en permanentmagnetiserad generator kan se ut och introducerar även namn på några av dess delar.



Figur 6: Tvärrsnitt av en permanentmagnetiserad synkronmaskin. **1** statorns rygg, **2** ett av maskinens spår där lindningarna läggs. **3** en av statorns tänder. **4** permanentmagneter som är monterade på rotorn. **5** rotorn. Mellan rotorn och statorn finns ett litet tomrum som kallas luftgap, även om det är svårt att urskilja i denna figur.

Att generera ström i en generator bygger på den grundläggande principen för hur ett magnetfält inducerar spänning i en ledare när det finns rörelse mellan dem. På samma sätt fungerar lindningarna i statorn som får en spänning inducerade av ett

roterade magnetfält. För att designa en generator krävs bland annat kunskaper om hur magnetiska flöden uppför sig, hur mätnad uppstår i ferromagnetiska material, vilka förluster som förekommer och hur generatoren kyls.

3.1.1 Designprocess av magnetisk krets

För att förstå vad som händer mellan rotorn och statorn är det användbart att representera det i magnetiska kretsar. Med utgångspunkt att all önskad märkdata till generatoren har bestämts är det första steget för designen av den magnetiska kretsen i en maskin att välja maskinens material. Sedan ska dimensioner fastställas, så som rotorns diameter, statorns diameter, längden på luftgapet och så vidare. Den första gången dimensionerna bestäms är det bra att kunna utgå från erfarenhet för att välja dimensioner som inte kommer visa sig leda till en design med allt för stora brister.

När dimensionerna är bestämda är det dags att analysera det magnetiska flödet genom denna krets. Beräkningar på magnetiska kretsar kan jämföras med beräkningar på elektriska kretsar. Ohm´s lag,

$$V = IR, \quad (1)$$

kan enkelt jämföras med dess magnetiska motsvarighet,

$$\mathcal{F} = \Phi \mathcal{R}, \quad (2)$$

där \mathcal{F} är magnetomotorisk kraft (MMK) vilket motsvarar spänning, Φ är magnetiskt flöde vilket motsvarar ström och \mathcal{R} är reluktansen vilket motsvarar resistans i en elektrisk krets.

Sambandet mellan magnetiskt fält och strömmen som producerar det är enligt Ampères lag

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{net}, \quad (3)$$

där \mathbf{H} är det magnetiska fältet producerat av strömmen I_{net} över den infinitesimala sträckan $d\mathbf{l}$ [6]. Med antagandet att allt flöde går genom det ferromagnetiska materialet (och inte läcker genom luften) är integralkurvan den genomsnittliga flödesvägen genom materialet, l_c , och ekvation (3) kan skrivas

$$Hl_c = I_{net} \Rightarrow H = \frac{I_{net}}{l_c}. \quad (4)$$

I_{net} motsvarar i detta fall MMK, \mathcal{F} . Eftersom

$$B = \mu H \quad (5)$$

kan ekvation (4) skrivas om

$$B = \frac{\mu \mathcal{F}}{l_c}, \quad (6)$$

där B är magnetisk flödestäthet och μ är permeabiliteten. Slutligen kan det magnetiska flödet erhållas genom ekvationen

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}, \quad (7)$$

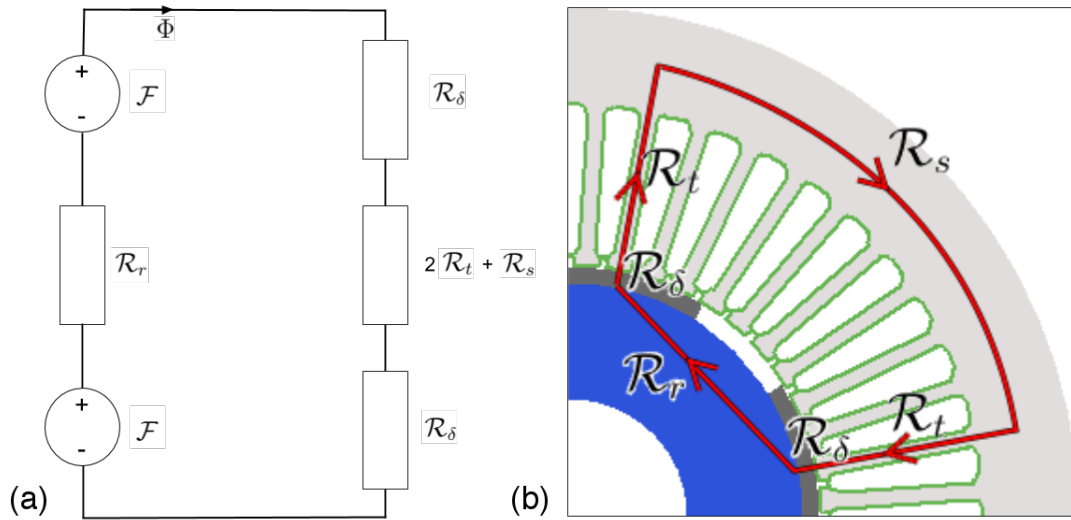
som också kan förenklas, den här gången med antagandet att den magnetiska flödestätheten, \mathbf{B} , är vinkelrät mot ytan, \mathbf{A} . Med detta antagande erhålls

$$\Phi = BA = \frac{\mu \mathcal{F} A}{l_c}, \quad (8)$$

vilket kan kombineras med ekvation (2) och skrivs om till

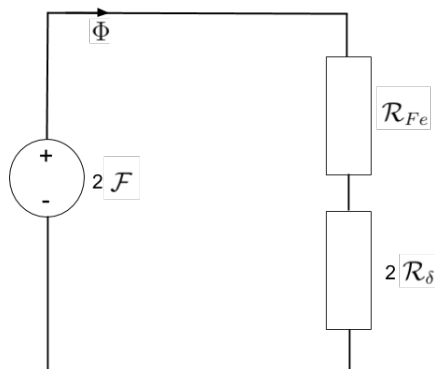
$$\mathcal{R} = \frac{\mathcal{F}}{\Phi} = \frac{l_c}{\mu A}. \quad (9)$$

Nästa steg är att approximera en genomsnittlig flödesväg, approximera genomsnittlig area vid dessa flöden och till sist räkna ut reluktanserna med ekvation (9).



Figur 7: (a) Denna bild föreställer den motsvarande magnetiska kretsen för maskinen. Reluktanserna i maskinens olika delar är uppdelade i kretsen för att med hjälp av figur 7 (b) tydligt illustrera vart ifrån maskinen de kommer. Kretsen kan även ritas enligt figur 8. (b) Denna bild föreställer en fjärdedel av ett tvärsnitt av generatoren från figur 6. Den röda linjen representerar en grov approximation för den genomsnittliga flödesvägen.

Vid detta steg är det lämpligt att dela upp beräkningar på reluktanser i fem delar: statorns rygg, \mathcal{R}_s ; statorns tänder, \mathcal{R}_t ; luftgap, \mathcal{R}_δ ; rotor, \mathcal{R}_r ; magneter, \mathcal{R}_m . Den genomsnittliga flödesvägen och de fem olika delarna illustreras i figur 7 (b).



Figur 8: Bilden föreställer en förenklad variant av kretsen som visas i figur 7, där $\mathcal{R}_{Fe} = 2\mathcal{R}_t + \mathcal{R}_r + \mathcal{R}_s$. Luftgapets reluktans och järnets reluktans särskiljs fortfarande av den anledning att kvoten mellan dessa två värden är intressant att betrakta.

När reluktanserna sedan summerats, \mathcal{R}_{tot} , kan en önskvärd flödestäthet, B_δ , väljas i luftgapet vilket kräver ett flöde enligt ekvation (8), då arean redan är fastslagen. Förhållandet mellan flödet, MMK och reluktans illustreras i figur 7 och 8.

Med detta flöde kan slutligen den MMK som krävs för den valda flödestätheten erhållas enligt

$$\mathcal{F} = \Phi \mathcal{R}_{tot}, \quad (10)$$

vilket är information som behövs för att veta hur starka magneterna som krävs.

3.1.2 Relativ permeabilitet och magnetsik mättnad

Något som komplicerar beräkningar på magnetiska kretsar är att permeabilitet i magnetiska material, μ , beror olinjärt på den magnetiska fältstyrka, H , som ligger över materialet [6]. Denna olinjära permeabilitet kan erhållas med ekvation (6) och förhållandet mellan B och H . Detta förhållande måste däremot tas fram experimentellt för varje enskilt material. Ett exempel på ett sådant förhållande kan observeras i figur 17, där flödestätheten kan ses först öka snabbt för att sedan avta i ökning vid högre fältstyrka. Detta beror på att järnet mättnas på magnetiskt flöde.

När permeabilitet anges för ett material anges den ofta som relativ permeabilitet, μ_r :

$$\mu = \mu_r \mu_0, \quad (11)$$

där $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ är permeabiliteten i vakuum [7].

Med denna information är det möjligt att ta reda på vilken fältstyrka som råder i olika delar av maskinen och därmed erhålla en relativ permeabilitet från detta. Reluktansen kommer vid mättnad att öka enligt ekvation (9) eftersom den relativa

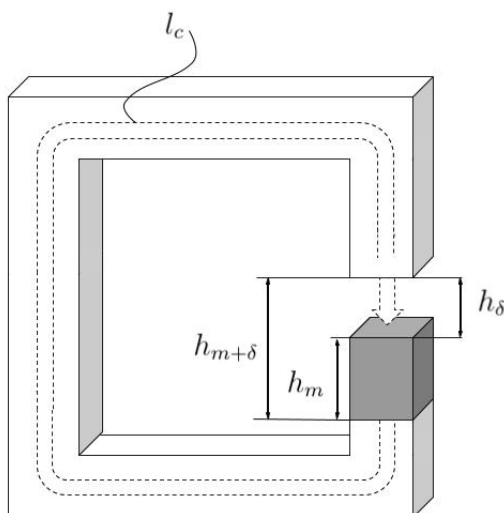
permeabiliteten μ_r kommer att minska så som illustrerat i figur 18.

3.1.3 Permanentmagneter

Från förgående avsnitt erhöles en MMK som krävs för att uppnå den önskade flödestätheten i luftgapet. Den MMK en magnet producerar beskrivs med Ampères lag, se ekvation (3), som i det här fallet, med samma förenklande antagande som för ekvation (4), reduceras till

$$H_m h_m + H_\delta h_\delta = 0, \quad (12)$$

där H_m är magnetens kohesionskraft, h_m är magnetens längd, H_δ är fältstyrkan över luftgapet och h_δ är luftgapets längd [5]. Figur 9 visar en förenklad representation av den magnetiska kretsen i generatoren.



Figur 9: Denna bild föreställer en järnkärna med ett luftgap och en magnet. Kretsen magnetiseras av en permanentmagnet med höjden h_m . Den genomsnittliga flödesvägen illustreras av den streckade linjen. Figuren är avsedd som en liknelse med den magnetiska kretsen i generatoren. I denna liknelse motsvarar järnkärnan rotorn, statorn och tänderna. Den gråfärgade klossen motsvarar en av magneterna monterade på rotorn.

Enligt ekvation (12) är magneternas längd proportionerligt mot det MMK de produceras i kretsen, alltså magnetisk spänning. En MMK kunde erhållas från ekvation (10) och eftersom $H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0}$ och h_δ är kända sedan tidigare måste ett lämpligt magnetiskt material väljas för att uppnå det MMK som behövs och samtidigt inte ändra luftgapets längd. Senare i designprocessen kan det visa sig blir nödvändigt att på nytt överväga valet av magnetmaterial om temperaturer i generatoren visar sig bli för höga; magneter avmagnetiseras vid för höga temperaturer.

3.1.4 Design av elektrisk krets

I en trefasgenerator beskrivs den inducerade spänningen i en av statorns faser med ekvationen

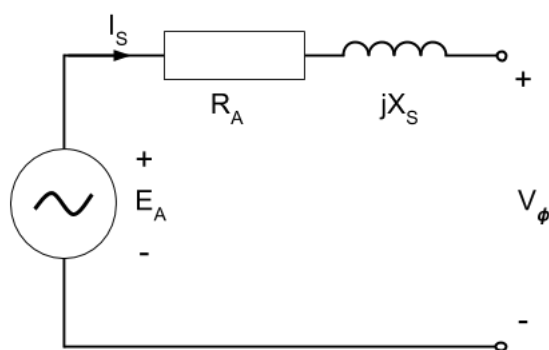
$$E_A = \sqrt{2}\pi N_C \phi f, \quad (13)$$

där N_C är antalet lindningsvarv per fas, ϕ är det magnetiska flödet som bestäms i den magnetiska kretsen, och f är rotorns frekvens [6].

Frekvensen på rotorn beräknas enligt

$$f = \frac{np}{120}, \quad (14)$$

där n är hastigheten i varv per minut och p är antal poler. Den inducerade spänning skiljer sig från generatorns terminalspänning, V_ϕ på grund av ankarresistans, R_A , och induktans i lindningarna, X_A samt ett fenomen som kallas ankarreaktion, X_{AR} . Detta samband brukar beskrivas med ett elektriskt schema, enligt figur 10 och sambandet tecknas enligt



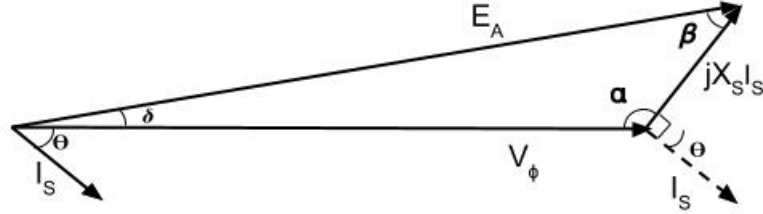
Figur 10: Kretsen illustrerar skillnaden mellan E_A och V_ϕ .

$$V_\phi = E_A - jX_S I_A - R_A I_A, \quad (15)$$

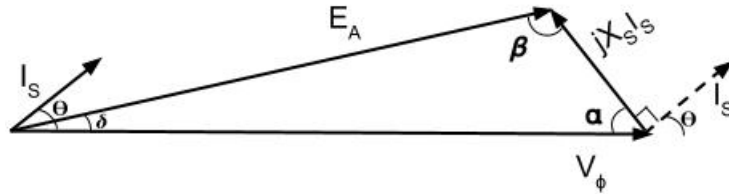
där $X_S = X_{AR} + X_A$ kallas för den synkrona reaktansen och R_A är resistansen i lindningarna [6]. X_S kommer orsaka ett spänningsfall över lindningarna och R_A kommer orsaka förluster kopparförluster i lindningarna. R_A orsakar också ett spänningsfall, men det anses försumbart jämfört med X_S . Dessa två värden är viktiga att känna till för att kunna analysera skillnader mellan märkspänningar på generatorn.

E_A , V_ϕ och I_S bestäms normalt experimentellt genom tomgångs- och kortslutningsprov. Dessa parametrar gör det möjligt att bestämma X_S utifrån antagandet att R_A är försumbart liten jämfört med X_S . Eftersom experiment inte kan utföras i denna studie görs istället antaganden.

Sambandet mellan parametrarna i ekvation (13) illustreras i ett visardiagram enligt figur 11 och 12. Enligt Electric Machinery Fundamentals tenderar vinkeln δ att ligga mellan $20 - 30^\circ$ vid full last [6]. Detta är ett annat sätt som möjligt att räkna ut X_S och E_A antaget att två av tre vinklar i fasdiagrammet är känt.



Figur 11: Figuren visar ett fasdiagram för induktiv last. Resistansen R_A har i detta visardiagram försummats.



Figur 12: Figuren visar ett fasdiagram liknande det i figur 11 fast för en kapacitiv last.

Ankarresistansen, R_A , bestäms oftast genom mätningar över maskinen då ingen last ligger över den men som beskrivs i ekvation i (17) [6]. Med geometrin av kopparledningen känd kan den elektriska resistansen för en lindning bestämmas med hjälp av definitionen för elektrisk resistivitet,

$$\rho_{Cu} = R \frac{A_{lindning}}{l} \quad (16)$$

Ekvation 16 kan modifieras för att inkludera antalet lindningsvarv för att ge de totala resistansen per fas enligt

$$R_A = N_C \rho_{Cu} \frac{l}{A_{lindning}}, \quad (17)$$

där N_C är antalet lindningsvarv, l är lindningens längd och $A_{lindning}$ är lindningens tvärsnittsarea.

En begränsning som sätts på systemet som associeras med lindningarna och dess varvantal är strömtäthet, J . Detta motsvarar hur mycket ström som rör sig över en lindnings area och kan tecknas,

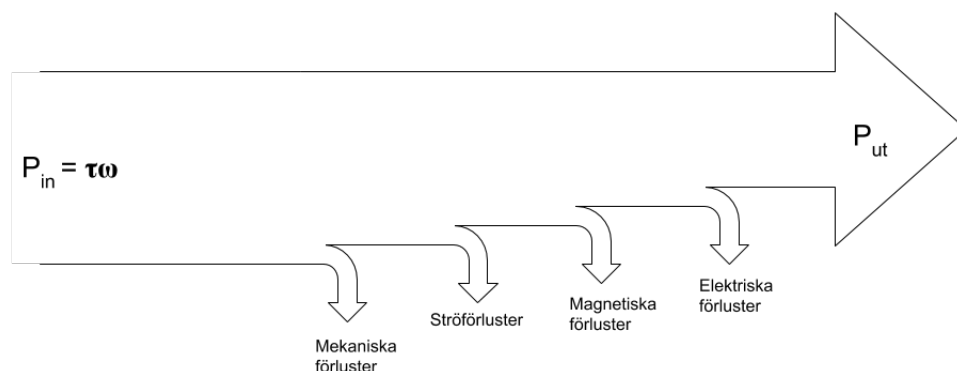
$$J = I_S / A_{lindning} \quad (18)$$

Eftersom statorspåret har en begränsad yta kommer arean för varje lindning att minska då varvtalet ökar vilket leder till en högre strömtäthet. Hur hög strömtätheten får vara sätts efter standarder som beror på vilken typ av kylning och maskin som används. Om detta inte följs finns det risk för brand eller degradation av materialet.

3.1.5 Förluster

I alla system där det finns omvandlingar av energiformer finns det alltid förluster och läckage som inte går att undvika och som behöver tas hänsyn till. Oavsett vilken typ av energi som förlusterna utvecklas i, om det är mekaniska eller elektriska, så blir slutprodukten värme som behöver kompenseras med kylning för att systemet inte ska skadas. De förluster som blir aktuella i detta projekt är de som kan påverkas av geometrier och val av material samt motsvarar de största delarna av förluster.

Den ingående energin i systemet genomgår flera omvandlingar och tappar delar av sin energi i olika moment. De huvudsakliga förlusterna beskrivs i figur 13 och påverkas av mekaniska, magnetiska som såväl elektriska egenskaper hos materialen och val av dimensioner.



Figur 13: Bilden illustrerar de olika typerna av förluster i en synkrogenerator.

Mekaniska förluster kommer från friktion i och med rotorns rotation. Dessa förluster fås från kullager och friktions motståndet mellan rotorn och luften i luftgapet. Då mekaniska förluster kommer att vara relativt små i förhållande till övriga förluster försummas de vid beräkning av verkningsgraden [6].

De magnetiska förlusterna är en av de två mest aktuella förlusterna i design av systemet. Det finns flertal typer av förluster som kan förknippas med magnetismen men de som utgör de största mängderna är hysteres och virvelströms(eddy-current) förluster som både är starkt knutna till den magnetiska flödestätheten B och dess frekvens f .

När ett magnetiskt fält appliceras på en järnkärna förändras dess inre atomära struktur för att lägga sig i fältets riktning. Denna effekt kallas hysteres och det inre mönstret kvarstår även när fältet tas bort. När ett nytt fält läggs på med en annan riktning krävs det en viss mängd energi för att ändra den inre strukturen igen. Denna energi är hysteres förluster och är proportionerliga enligt

$$W_{hysteres} \propto B^{1.6-2.3} f, \quad (19)$$

där B :s potensen beror på materialets egenskaper [6].

Virvelström uppkommer i järnkärna på samma sätt som spänning induceras i en lindning som har en magnetiskt flöde gående genom sig. Detta förhållande beskrivs enligt Faraday's lag,

$$e_{ind} = -N \frac{d\Phi}{dt}. \quad (20)$$

På liknande sätt induceras en spänning i järnkärnan som ger upphov till en ström som flödar genom kärnan vilket leder till förluster i det resistiva materialet. För att motverka dessa kan till exempel material

$$W_{eddy} \propto B^2 f^2 d^2 \quad (21)$$

där d är tjockleken på lamineringarna [6]. Exakta beräkningar av förluster i järnkärnan är mycket komplicerat eftersom de beror på den magnetiska flödestätheten som varierar i styrka enligt figur 21.

Den andra typen av förlust som kommer att spela stor roll i designen av systemet är kopparförlusterna i statorlindningarna. Denna för uppstår när strömmen färdas genom de tunna resistiva koppartrådarna och beror av strömmens styrka I och kopparlindningen resistans R enligt

$$W_{Cu} = I^2 R. \quad (22)$$

Det kommer dock alltid finnas förluster som inte går att beräkna. Dessa brukar summeras som strö-förluster och det finns standarder för hur dessa borde estimeras. Denna brukar sammanlagt ligga runt 0,5% av märkeffekten [5].

3.1.6 Kylning

Det finns flera grundläggande principer bakom hur värme rör sig genom och mellan olika typer av element, men termodynamikens andra huvudstats, Värme flödar från varm till kallt, aldrig från kallt till varmt utan hjälp, ligger alltid om grund. I detta projekt kommer vattenkylning att användas i form att ledare av vatten på utsidan om stator yoken.

De två typer av värmeöverföring som är relevanta är konvektion och konduktion [8].

Konvektion

Värmeöverföring mellan en gas eller vätskor och en yta kallas för konvektion. Flöden om färdas över en ytan har olika egenskaper att överföra energi beroende på dess hastighet och en mängd andra variabler om tillsammans bestämmer mediets värmeöverförings koefficient, h ($W/m^2/K$). Att bestämma denna är komplicerat eftersom det blandas in en mängd dimensionslösa tal som bestäms från experimentellt framtagna tabeller. Konvektion är den vanligaste typen av kylning som används för att reducera temperaturer i maskiner och är vad som sker i vår design mellan statoryoken och vattnet som pumpas på utsidan om den.

Konduktion

Värmeöverföring genom ett medie kallas för konduktion. Detta medie kan vara massa i alla stadier, alltså gas, vätska och fastform och är beroende på materialets geometri och dess värmekonduktivitet, k ($W/m/K$). Konduktion sker i vår maskin då värme som bildas från förluster och rör sig genom generatoren mot svalare delar.

Beräkningar av temperaturer i olika delar av generatoren görs genom användandet av följande ekvation,

$$q_x = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{tot}} \quad (23)$$

där q_x är värmeöverföringshastigheten, alltså förlusterna, T_1 och T_2 motsvarar temperaturskillnaden (potentialen) mellan olika delar och R_{tot} är den sammanlagda termiska resistansen mellan dessa delar.

På liknande sätt som ett elektriskt schema kan tecknas kan även termiska göras. Resistans i denna typ av schema motsvarar svårigheten för värme att färdas genom eller mellan olika delar av systemet, alltså vilken typ av värmeöverföring som sker. Den typ av termisk resistans som förekommer vid konvektion beskrivs enligt följande,

$$R_{konv} = \frac{1}{hA} \quad (24)$$

där A är flödets kontaktyta och h är mediets värmeöverförings koefficient som bestäms via korrelationer [8].

Vid beräkning av resistans vid konduktion används istället ekvationen,

$$R_{kond} = \frac{L}{kA} \quad (25)$$

där L är längden värmen färdas genom materialet, A tvärsnittsytan och k är materialets värmekonduktivitet, alltså dess förmåga att leda värme.

En för hög temperatur i generatoren påverkar både dess livslängd och prestationsförmåga avsevärt då många delar förknippade med magnetism är mycket värme känsliga. Konsekvenserna som följer om kylningen inte klarar av att motverka denna värmebildningen blir inte en direkt kollaps av systemet utan istället en dramatiskt

förkortad livslängd.

De två huvudsakliga anledningarna till att systemet går sönder är nedbrytning av statorlindningarna och att magneterna tappar sina magnetiska egenskaper. I fallet med lindningarna klarar inte isolationsmaterialt av allt för höga temperaturer utan börjar då brytas ner och det finns risk för kortslutning. Det finns dock mängder av olika material som idag används för isolering och som klassificeras efter standarder, beroende på dess förmåga att motstå värme, som är satta av NEMA (The National Electrical Manufacturers Association) [6].

Andra effekter som höga temperaturer har på systemet är att de permanenta magneternas styrka minskar eller helt förloras, denna typ av effekt kallas avmagnetisering.

3.2 Kraftelektronik

För att få tillåtelse till att koppla systemet till kraftnätet finns det flera kriterier på spänningen som ska uppfyllas. För det första behöver spänningen ha rätt frekvens, för det andra ska spänningen besitta det fasläge som nätet har och för det tredje ska spänningen ha rätt amplitud. Spänningen behöver dessutom vara kontrollerad och anpassad genom hela systemet så att möjliga transienter inte skadar komponenterna [9].

För att en generator ska kunna leverera energi till nätet krävs att spänningen är av hög kvalitet. Detta innebär att spänningen som kommer från det elektriska systemet är så lik som möjligt den i nätet den kopplas till [10].

Kraftverket kommer att röra sig med höga hastigheter, som nämns i kapitel 1.2, vilket kommer betyda att systemet utsätts för stora g-krafter. För att göra ett sådant system möjligt krävs det då att komponenterna ska klara av detta. Dessutom måste komponenterna vara små nog för att få plats på draken och lätta för att inte hämma dess rörlighet. [3].

De vanligaste komponenterna som används i en krets för att styra spänningens egenskaper är induktanser och kapacitanser. I ett system gjort för att omvandla en typ av spänning till en annan krävs även komponenter med halvledaregenskaper.

3.2.1 Omriktare

Omriktare är samlingsnamnet på elektroniska komponenter som förvandlar en typ av spänning till en annan. Omvandlingen från växelspanning till likspänning kallas likriktning och omvandlingen från likspänning till växelspanning kallas frekvensomriktning. I detta system genereras växelspanning av generatoren och då den ej ger en utspänning på 50Hz kan den inte direkt kopplas till kraftnätet utan att först omvandla spänningen. Genom att omvandla den från generatoren genererade växelspanningen till likspänning blir det möjligt att sedan omvandla spänningen ännu en

gång tillbaka till växelspänning, och det är vid detta andra steg det blir det möjligt att styra hur växelspänningen ska se ut och då se till att den passar för att kopplas till kraftnätet.

De teknologier som beskrivs här är alla kiselbaserade, men är anpassade för olika frekvensområden och spänning; vissa klarar av höga frekvenser men endast låga spänningar, vissa arbetar bäst vid låga frekvenser och klarar då av höga spänningar. En teknologi som klarar höga spänningar kallas tyristorer och är väl anpassad för applikationer med överföring av stora mängder elektrisk energi på låg frekvens. En negativ aspekt med tyristorer är att dess låga frekvens är svår att kontrollera och ger mycket övertoner. MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor) kan, i motsättning till tyristorer, arbeta med väldigt höga frekvenser men endast låga spänningar. En teknologi som mer balanserar dessa två egenskaper är IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistor). IGBT lämpar sig bra då applikationen kräver frekvenser upp till 80kHz men samtidigt en spänning upp till 2kV [9]. IGBT är en väl utvecklad teknologi som används och som också utvecklas vidare. Vid spänningar högre än 2kV finns det ingen teknologi som arbetar med högra frekvenser. Den teknologi som har en möjlig arbetsspänning näst efter IGBT vid ökad spänning är GTO (Gate-Turn-Off Thyristor). En potentiellt intressant teknologi men som ännu inte är passande för detta projekt är MCT (MOSFET Controlled Thyristor). MCT är en teknologi som är under utveckling och har potential till att kunna arbeta inom ett större frekvens- och spännings-område än IGBT [9].

3.2.2 Likriktare

För att omvandla en växelspänning till en likspänning krävs en likriktare. En likriktare tvingar en växelström att bara flöda åt ett håll och därmed bli en likström, vilket åstadkoms med dioder. Det finns två typer av likriktare: passiva och aktiva. Passiva likriktare har inte någon spänningskontroll och kan endast släppa igenom energi åt ett håll. Aktiva omriktare har tvärriktat energiflöde och kan arbeta som både likriktare och frekvensomriktare.

En så kallad likspänningslänk används för att koppla ihop en likriktare med en frekvensomriktare. Detta kan vara i form av en kondensator som är kopplad parallellt mellan fasen och jord. Detta förhindrar transienter (höga amplitudspikar i spänningen) från lastsidan att vandra tillbaka till distributörsidan och släktar även ut ojämnheter i den nyligen likriktade likspänningen, vilket förhindrar kortslutningar [11].

3.2.3 Frekvensomriktare

För att omvandla likspänningen till växelspänning behövs en frekvensomriktare. Frekvensomriktare är uppbyggda av halvledare och impedanser, vilka kontrolleras av styrenheter för att i sin tur styra utspänningen.

En frekvensomriktares uppgift är att ge spänningen en så ideal sinusform som möjligt genom att styra frekvensomriktarens transistorer på ett sätt som kallas pulsbreddsmodulation (PWM). PWM innebär att frekvensomriktarens utspänning, som kan anta värdena $+V$, 0 eller $-V$, styrs så att den resulterande medelspänningen får en sinusform. I praktiken får inte spänningen en ideal sinusform då transistorerna vid på- och avslag av inte direkt leder med maxström, vilket beror på dess stigtid och falltid. Dessa fenomen skapar förluster som går under benämningen switchingförluster [9].

Det andra problemet med frekvensomriktare är dess övertoner. Vid på- och avslagen av transistorerna skapas ojämnheter som medför att spänningen inte blir ideal utan får extra svängningar i amplituden. Om dessa svängningar blir periodiska är de så kallade övertoner. Dessa övertoner beror på att spänningen och därmed strömmen av ovanstående anledningar inte är ideala. En frekvensomriktare som har hög switchfrekvens har därför övertoner med lägre amplitud och frekvens jämfört med en som har lägre switchfrekvens [9].

För att åstadkomma en sinusform från frekvensomriktare får en vågformad styrsignal som har den önskade frekvensen interferera med en triangelvåg. När referensvågens (sinusvågen) amplitud är högre än triangelvågen är utspänningen från frekvensomriktaren noll. Om referensvågen har positiv amplitud men lägre än triangelvågen ges en positiv utspänning. Då referensvågen är negativ och lägre än triangelvågen ges en negativ utspänning. Triangelvågens frekvens och amplitud är konstanta och frekvensen är lika med frekvensomriktarens switchingfrekvens. I figur 14 visas en styrsignal med frekvensen 50 Hz och en amplitud som kan justeras.

Att finna ett lämpligt värde för switchingfrekvensen är väldigt viktigt. Detta värde kan bestämmas med ekvation

$$m_f = \frac{f_s}{f_1}, \quad (26)$$

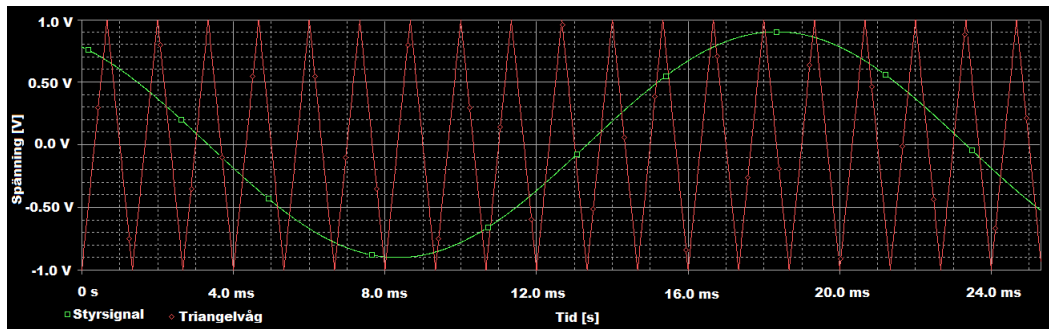
där m_f är frekvens modulationskvot, f_s är switchfrekvensen och f_1 är den önskade spänningens frekvens. Vilket m_f som ska eftersträvas varierar beroende på situationen [9]. I figur 15 visas hur utspänningen från en frekvensomriktare ser ut när den aktivt applicerar PWM.

Med hjälp av följande ekvation beräknas det effektiva värdet på växelspanningens huvudspänning:

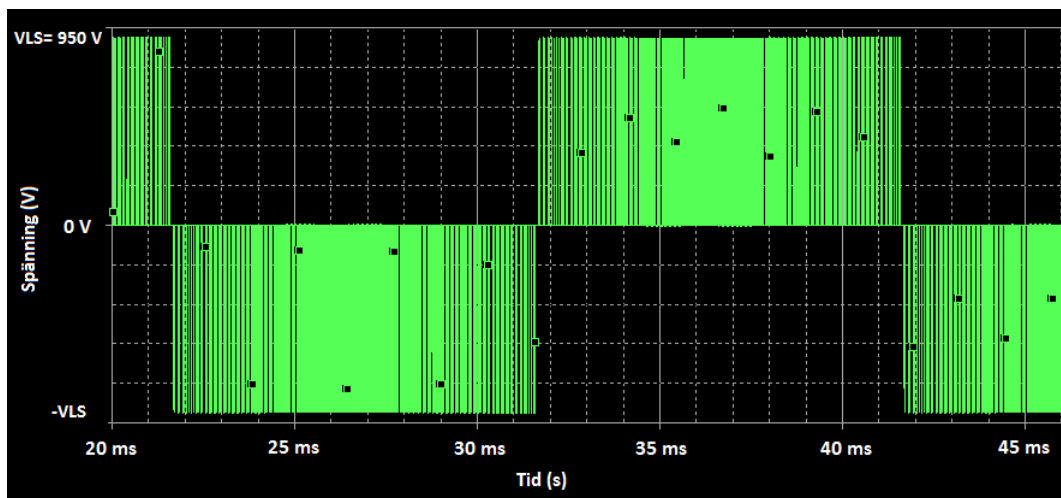
$$V_{hs} = 0.612m_aV_{LS}, \quad (27)$$

där m_a är amplitud modulation som bestämmer styrsignalens amplitud, V_{LS} är den likspänning som frekvensomriktaren matas med och 0.612 är en konstant. Här ska $m_a \leq 1$ eftersträvas [9].

I ekvation (27) syns det att både m_a och V_{LS} påverkar den nya växelströmmen. Det är denna spänning som sedan matas till nätet efter att övertonerna tagits bort.



Figur 14: Triangelvåg (röd) matchas med en styrsignal (grön). Värdena har modifierats för att tydligare visualisera matchningen.



Figur 15: PWM utsignalen från frekvensomriktaren, huvudspänning.

En 3-fas frekvensomriktare består av 3 ben, ett ben för varje fas. Varje ben består av en diod och en transistor kopplade mot den positiva polen och en diod och transistor kopplade till den negativa spolen (se figur 27). Kopplingen för dioderna vid detta sätt kallas antiparallell koppling och medför att omriktaren kan leda åt båda hållen. Detta betyder att det alltid kommer leda från ett ben för att det alltid finns en switch öppen. I Figur 15 visas huvudspänningen från frekvensomriktaren.

3.2.4 Filter

För att spänningen som går ut ur systemet ska tillåtas matas ut på kraftnätet måste spänningen vara av hög kvalitet. För att en spänning ska vara av hög kvalitet ska den ha en jämn sinusform, och för detta behöver spänningen filtreras.

Ett filter är uppbyggt av induktanser och kapacitanser med värden uträknade för att åstadkomma ett filter som filtrerar bort de relevanta övertonerna. För det svenska elnätet är ett lågpasfilter med brytfrekvens på 50 Hz passade i och med att det inte släpper igenom övertonerna som har en frekvens som är högre än 50 Hz. För att skapa ett lågpas filter behövs en kapacitans i lämplig storlek. Låga frekvenser

kommer då passera via kondensatorn medans höga frekvenser laddar upp den och därmed elimineras.

Ett bandpassfilter som släpper igenom endast 50 Hz filtrerar bort övertoner med frekvenser över 50 Hz men dessutom filtrerar det också bort likspänningskomponenter och eventuella spänningar med frekvenser under 50 Hz.

3.2.5 Vibrationers påverkan på kraftelektronik

Eftersom kraftelektroniken sitter fast i en farkost som rör sig och utsätts för vibrationer och mekaniska krafter behöver kraftelektroniken klara av dessa påfrestningar. Komponenterna måste vara ordentligt fästa så de inte kastas omkring och slås sönder och även kunna uthärda dessa påfrestningar utan att tappa sina elektriska egenskaper. Genom att isolera komponenterna med stöttåliga material och bygga in dem i ett paket är det möjligt att ge komponenterna möjlighet att uthärda stora påfrestningar.

3.2.6 Förluster och kylning

I varje komponent som leder ström finns det förluster, även i filter då energin i övertoner filtreras bort.

En del av förlusterna kommer från de elektriska komponenternas egenskaper, som switchingfrekvensen. Switchingförluster i frekvensomriktaren ökar proportionellt mot switchfrekvensen och kan beräknas med ekvationen

$$P_s = \frac{1}{2} V_{LS} I_0 f_s (t_{c(på)} + t_{c(av)}), \quad (28)$$

där V_{LS} är spänningen från likspänningslänken, I_0 är strömmen switcharna matas med, f_s är switchingfrekvensen, $t_{c(på)}$ är tiden det tar för switchen att öppnas och $t_{c(av)}$ är tiden switchen det tar för switchen att stängas [9]. I ekvation 28 syns det tydligt att även spänningen ändrar förlusterna proportionellt mot vad den har för värde [9].

En låg frekvens innebär alltså lägre förluster medans en hög frekvens innebär färre övertoner och brus. Avgörandet i denna övervägning beror därmed på filtret och dess egenskaper; blir filtret för stort behöver frekvensen ökas och om förlusterna blir för stora behöver frekvensen minskas.

3.2.7 Isolering från vatten

Ett kraftverk som befinner sig under havsytan måste vara mycket väl isolerat från vatten. Första skyddet är skrovet, men insidan av det bör dessutom vara trycksatt av en gas för att hålla vatten borta från skarvarna. Utöver detta ska de elektriska komponenternas inpackning förstärkas innan det sista lagret, som är lamineringen på komponenterna, läggs på.

3.3 Undervattenskabel

Utformningen av en undervattenskabel skiljer sig på flera fronter från en vanlig kraftkabel då många utmaningar uppkommer på grund av den krävande miljön som råder på havsbotten. Kabeln utformas för att dess livslängd skall bli så lång som möjligt då det är både kostsamt och komplicerat att byta ut och skarva undervattenskablar. En undervattenskabel består likt många andra kablar av en ledande kärna skyddad av ett hölje isolerande material. Runt detta isolerande material läggs ofta armering i form av metalltråd för att ge kabeln ytterligare hållbarhet så att skador på kabeln minimeras då den vilar på havets botten. Det yttersta lagret på kabeln består av ett hölje plast eller metall som är till för att avgränsa kabelns insida från vatten och mekaniskt skydd. Avgränsning av havsvatten är dock komplicerat eftersom skador kan uppkomma och vatten kan tränga igenom detta hölje. [12]

3.3.1 Utgångspunkt

Utgångspunkten för undervattenskabeln för denna rapport är den lägsta av spänningsintervallet som undersöks, alltså 500V med 50Hz.

Den dynamiska delen av kabeln (nr 4 i figur 3) från botten till draken består av fyra trefaskablar samt en optisk kabel för datakommunikation. Den består också av ett lastbärande dyneema rep som håller draken förankrad i botten. Alla dessa komponenter är inbyggda i ett strömlinjeformat hölje. Detta hölje är utformat för att minska förluster skapade av vattenströmmar på kabeln samt motverka vridning av kabeln. Dyneema repet är mycket slitstark men degraderas i temperaturer över $50^{\circ}C$. Anledningen till att fyra parallella kablar används är för att minska värmeutvecklingen i kabeln genom att minska den överförda strömmen per kabel.

Den dynamiska kabeln måste vara flexibel och tillräckligt stark för att inte gå sönder efter upprepade sträckningar och vridningar. Bottenbiten däremot ska vara tillräckligt tung för att ligga stilla på havsbotten och armerad för att stå emot skador som kan uppkomma från kontakt med hårda föremål.

3.3.2 Ledare

Ledaren är kärnan i kabeln. Den befinner sig i den innersta delen av kabeln och skyddas av isolation. Ledaren består oftast av metallerna koppar, aluminium eller en aluminiumlegering.

En av materialskillnaderna mellan koppar och aluminium är densiteten. Koppar har densiteten $8,96 \text{ ton}/m^3$ och aluminium har densiteten $2,70 \text{ ton}/m^3$ vilket betyder att massan för aluminium är $2,70/8,96 = 0,3$, alltså nästan en tredjedel av massan för koppar per volymenhet vid $300^{\circ}K$ [13].

Materialens resistivitet är $\rho_{CU} = 1,67 * 10^{-8} \Omega m$ vid $300K$ och $\rho_{Al} = 2,65 * 10^{-8} \Omega m$ vid $300K$ [13]. Från relationen $\rho_{Al}/\rho_{CU} = 1,58$ fås att för att uppnå lika låg resistans för en aluminiumkabel som för en kopparkabel så behöver aluminiumkabelns area ökas med 58%. Detta gäller dock bara för ren aluminium och vanligtvis används en

legering där resistiviteten är högre än för ren aluminium, det medför krav på högre ökning av area än 58%. Med en ökning av arean med 1.58 för att få samma resistans på båda ledare kommer aluminiumkabelns vikt att vara $0.3 * 1.58 = 0.48$, alltså hälften så tung som kopparledaren vid samma kabelresistans.

En tyngre kabel kan vara fördelaktigt när kabeln skall ligga på botten och inte påverkas av havsströmmar då detta kan skada kabeln. Ett ökat tvärsnitt medför konsekvenser som ökad kostnad för isolering och armering av kabel. En bredare kabel kommer också att agera mindre strömlinjeformat i vatten. Kostnaden för aluminium per viktenhet är lägre än för koppar men det ökade kabeltvärsnittet gör att det kan bli mer prisvärt med kopparkabel. [14]

Ledaren kan designas på olika sätt för att ge olika mekaniska egenskaper. Den typ som ger bäst platseffektivitet är att ha en solid ledare. En solid ledare gör dock att kabeln får låg dynamisk flexibilitet. Det andra alternativet är att ha en trådad ledare, en trådad ledare har mindre effektiv yta vilket gör att de yttre dimensionerna blir större. Däremellan kan man välja att pressa en trådad ledare för att få ökad effektivgrad, eller att varje tråd är valsad så att den passar bättre med de andra. [12]

3.3.3 Isolering

Att förhindra att den elektriska strömmen gör överslag eller tar en annan väg till jord än genom kabeln är isoleringens viktigaste uppgift. I nedgrävda kablar och sjökablar krävs ett relativt tjockt lager isolering eftersom jord befinner sig så pass nära kabeln. Isoleringens andra syfte är att skydda ledaren mot yttre påfrestningar [15]. De mekaniska kraven på kabeln är väldigt skiftande beroende på vad kabeln ska användas till.

Som isoleringsmaterial är det vanligt att material av syntetiska eller naturliga polymerer används. Alla isoleringsmaterial är till för att skydda mot elektriskt överslag men de kan också ha olika mekaniska egenskaper som brandskyddande, flexibilitet, tålighet mot dragand eller roterande påfrestning med mer [15].

Isolering och ledare måste kemiskt passa ihop om de ligger emot varandra. För att de inte ska reagera med varandra och brytas ner. Om det finns problem kan det lösas med att ändra sammansättning av isolatorn, använda en legering av koppar eller aluminium eller ha ett annat material emellan [15].

De vanligaste isoleringsmaterial som används idag är Polyvinylklorid (PVC), Polyethylene (PE), Crosslinked polyethene (XLPE) och pappersisolerad kabel (som ej undersöks i rapporten). PVC är det mest använda på grund av att det är billigt, lättillgängligt och lätthanterligt [15]. PVC används framförallt i lågspänningsapplikationer men kan också användas som ett yttre mekaniskt skydd på för högre spänningsnivåer. PE har lägre dielektriska förluster än PVC men är dock känsligt mot vatteninträning vid höga spänningsnivåer. XLPE är en typ av PE som har behandlats mer för att ge fler bindningar mellan de olika PE kedjorna för att skapa

en mer sammanvävda och starkare kedjor. XLPE har högre dielektriska förluster än PE men bättre motståndskraft mot vatteninträngning för högre spänningar. XLPE används framförallt för högre spänningsnivåer [15].

Genombrottsspänning är den maximala spänning som ett material kan klara av innan det uppstår permanenta skador i materialet. Det elektriska fältet får alltså ej överstiga genombrottsspänningen på någon punkt i isoleringen. Om tjockare isolering används sprids det elektriska fältet och spänningen över isoleringen per längdenhet blir mindre. Om det elektriska fältet aldrig överstiger genombrottsspänningen är isolationen tjock nog för den spänningsnivå som förekommer i ledaren. [16]

$$E(r) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (29)$$

I ekvation (29) är λ den elektriska laddningen i enheten Coulomb per meter i ledare. Vidare så gäller permittiviteten, ϵ_0 , gäller för vakuum och r är den radie från ledaren till den punkt där magnetfältet undersöks. Ledaren i (29) har infinitesimal radie och oändlig längd.

3.3.4 Kabelsköld

Kabelskölden är ett lager av metall runt kabelns isolering. Den används för att innersluta de elektromagnetiska fält som en spänningssatt ledare ger upphov till. I denna sköld kommer en ström att uppstå på grund av magnetfältets inverkan. Denna ström är en av de olika förluster av effekt som uppkommer i en kabel. För att inte spänning skall byggas upp i kabelskölden då detta kan vara skadligt för isoleringen måste den jordas i en eller två ändrar. Jordning bestäms av spänning och längd av kabeln, hög spänning och lång kabel kräver jordning i två ändrar för att undvika hög spänning i kabelsköld. Det uppkommer vid sådan jordning en ström som flyter mellan de båda jordade ändarna av kabelskölden vilket bidrar till ökade förluster. Jordning i en ände är därför att föredra när möjlighet finns vid lägre spänning. [17]

Kabelskölden används också för att blockera vatten från att tränga in i isolationen. På grund av att den elektriska potentialen ändras med frekvensen $50Hz$ i ledaren kommer vatten att diffundera igenom kabelns yttre hölje och in i isoleringen. Detta kommer att orsaka en ökad ledningsförmåga i delar av isoleringen med förhöjda vattenmängder. Detta i sin tur leder till att isolationen bryts ner fortare och skapar ledande kanaler vilket gör kabeln obrukbar. Kabelsköld brukar ej vara nödvändigt för spänningar under $50kV$, då kan istället ett vattenabsorberande material under kabelns yttre hölje användas för att erhålla samma effekt. [12]

3.3.5 Armering

Armering används i kabel för att höja motståndskraften mot torsionskrafter (krafter som ger vridning av kabel), sträckande krafter samt vertikala krafter. Dessa krafter

kan uppkomma då kabeln skall läggas på botten, då den kommer i kontakt med ankare eller vrids av strömmar på botten. Armeringen består av metalltrådar som ligger virade runt den inre delen av kabeln under kabelns yttersta hölje. Metalltrådarna läggs tätt intill varandra och de viras i en spiral runt kabeln. Genom att använda olika lång längd för tråden att omsluta kabeln ett varv kan armeringens motståndskraft mot olika krafter styras. Om trådarna på kort längd omsluter ledaren så kommer kabeln att vara böjbar men kommer att ha låg motståndskraft mot torsion och sträckand krafter. Då trådarna på längre avstånd omsluter ledaren så kommer kabeln att vara styv och svår att böja. Dock så kommer kabeln att ha hög motståndskraft mot torsion och sträckande krafter. Med inklusion av ytterligare ett lager armering kan torsionskrafter på kabeln undvikas helt, dock kommer kabelns dynamiska flexibilitet att minska drastiskt. [12]

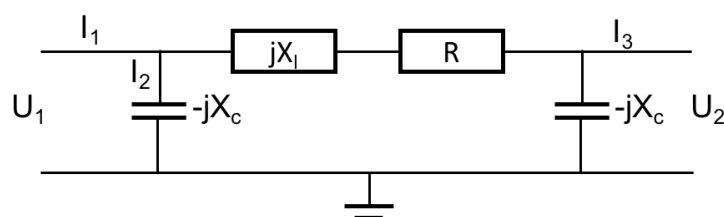
3.3.6 Kabelmantel

Kabelmanteln är det yttersta lagret på kabeln. Beroende på applikation används många olika material. Manteln är till för att skydda kabeln mot yttre mekaniska krafter. Vanliga egenskaper hos manteln är att ge kabeln skydd mot brand, pressande, skärande krafter. För sjökabel är skydd mot vatteninträngning väldigt viktigt [15].

3.3.7 Spänningsfall

Eftersom ingen ledare är ideal sker alltid ett spänningsfall från den ena sidan av ledaren till den andra. I kraftkablar blir impedansen, Z , tillräckligt stor för att spänningsfallet ska ge upphov till onödiga effektförluster om man inte tar hänsyn till dem vid designen av kabeln. Impedansen beror av resistansen, R , och reaktansen, X . Kabelns resistans uppkommer från resistiviteten i materialet och den effektiva tvärsnittsytan medans reaktansen beror på induktansen och kapacitansen i kabeln [18].

Kabeln kan betraktas i ett så kallat pi-schema enligt figur 16, där kabelns impedans betraktas som två parallella shuntimpedanser mellan fas och jord, en serieinduktans och en serie resistans [19]. Om shuntkapacitansen är mycket större än serieimpedansen kommer strömmen I_2 ner genom kondensatorn att bli försumbar och shuntkapacitanserna kan försummas.



Figur 16: Pi-schema. Illustrerar hur impedansen för en fas kan betraktas i en kabel.

Shuntkapacitansen beräknas enligt

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (30)$$

där f är frekvensen och C är halva den totala kapacitansen. Serieinduktansen bestäms på liknande sätt enligt

$$X_l = 2\pi f L \quad (31)$$

där L är impedansen. Serieresistansen ges enligt

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (32)$$

där ρ är resistiviteten, l är längden på kabeln och A är tvärsnittsarean.

Den totala strömmen per fas som går igenom kablarna ges enligt

$$I_f = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_h} \quad (33)$$

där S_n är den skenbara effekten och U_h är huvudspänningen.

För att sänka strömmen per ledare så används parallellkopplade ledare. Ström per fas och kabel blir då

$$I_{fk} = \frac{I_f}{n} \quad (34)$$

där n är antalet kablar.

Spänningsfallet över kabeln ges enligt

$$U_{h\Delta} = \sqrt{3}I_{fk}Z_{tot} \quad (35)$$

där Z_{tot} är den totala impedansen.

Spänningsfallet över kabeln beror enligt ekvation (35) på impedansen och strömmen genom kabeln och kan därmed styras på flera sätt, till exempel genom att sänka strömmen eller öka den effektiva ledararean. Strömmen kan sänkas genom att öka spänningsnivån. Den effektiva ledararean kan ökas genom att öka kabelns tvärsnittsarean eller att öka antalet kablar [15].

Spänningen, på sidan mot nätet av kabeln, blir då

$$U_{hut} = U_h - U_{h\Delta} \quad (36)$$

För att beräkna spänningsfallet behöver kabelns induktans bestämmas. Ekvation (37) beskriver induktansens samband med andra geometrier enligt

$$L = \frac{\mu}{\pi} \ln\left(\frac{d-a}{a}\right). \quad (37)$$

Induktansen L beror på permeabiliteten för materialet runt ledaren μ samt ledarens radie a och sträckan mellan ledarna d .

3.3.8 Aktiva effektförluster

Effektförlusterna i kabeln beror på strömen i kabeln samt dess resistans och reaktans. Denna förlust ger upphov till en värmeutveckling i kabeln som skall minimeras för att undvika skador på kabelns komponenter.

När växelström används i kablar så uppstår ett fenomen kallat skinneffekt. Skinneffektens inverkan driver elektronerna i ledaren mot ledarens yttre skikt vilket resulterar i mindre effektiv kabelyta och högre ledar-resistans. Skinneffekten blir mer märkbar för höga frekvenser samt stor tvärsnittsarea. För tvärsnittsarean av ledarna i undervattenskabeln, 50mm^2 , så kommer skinneffekten att vara försumbar. [12]

Effektförlusten över hela kabeln beräknas enligt,

$$P_{förl.} = n\sqrt{3}U_{h\Delta}I_{fk}\cos(\varphi) \quad (38)$$

där n motsvarar antalet kablar.

Effektförlusten per meter beräknas enligt

$$P_{förl./meter} = \frac{P_{förl.}}{L}, \quad (39)$$

där L är den totala längden på kabeln.

3.3.9 Termisk design

Termisk design för en kabel utförs för att de termiska begränsningar satta för kabeln skall hållas. Hög kabeltemperatur leder till en kortare livslängd för dess olika komponenter. För att styra hur höga förluster i form av värme som avges i kabeln så ändras tvärsnittet av ledaren till en storlek vars förluster ligger inom de förbestämda gränserna. [12]

Genom simulering i programmet Comsol så kan värmedistributionen i kabeln analyseras. Detta görs för att kontrollera att alla delar av kabeln hålls under den maximala temperatur de är designade för. För att kunna simulera kabelns värmedistribution så behöver förlusterna i kabeln anges samt den termiska konduktivitet hos materialen i kabeln. Vattenflödet runt kabeln kommer att uttrycka sig som en värmeöverföringskoefficient i de termodynamiska beräkningarna vilket beror av hur vattenflödet runt kabeln ser ut. I beräkningarna så approximeras den till ett värsta fall, då vattnet kring ledaren är stillastående.

Formel för avgiven energi i watt

$$q = \frac{2\pi L(T_1 - T_2)}{\frac{\ln(\frac{r_o}{r_i})}{k} + \frac{1}{r_o h}} \quad (40)$$

Ekvationen är anpassad för cirkulär geometri och kan appliceras på kabelns tvärsnitt. I formeln så är q värmeöverföringen i watt per meter, det vill säga värmeförlusten i kabel per meter. Värmeöverföringen i kabeln beror enligt ekvationen av skillnaden i temperatur mellan de punkter som används i uträkningen, det vill säga T_1 och T_2 vid radie r_o och r_i . Konstanten k kommer ifrån materialets termiska konduktivitet och h är en värmeöverföringskoefficient för avgiven värme till vattnet utanför kabeln.

För att få ut T_1 görs omskrivningen:

$$T_1 = \frac{q(\frac{\ln(\frac{r_o}{r_i})}{k} + \frac{1}{r_o h})}{2\pi L} + T_2 \quad (41)$$

4 Resultat och analys

Minestos koncept med att använda en drake för att generera elektrisk energi skapar nya tekniska problem eftersom den till skillnad från etablerad teknik inte är stilla utan förflyttar sig i vattnet. Denna förflyttning medför stora påfrestningar på draken och dess komponenter samt ställer krav på vikt och rörlighet [2].

4.1 Generator

4.1.1 Märkdata

De begränsningar som varit utgångspunkten i projektet och som givits av Minesto kan ses i tabell 1. Dessa har fungerat som riktmärken under projektets gång.

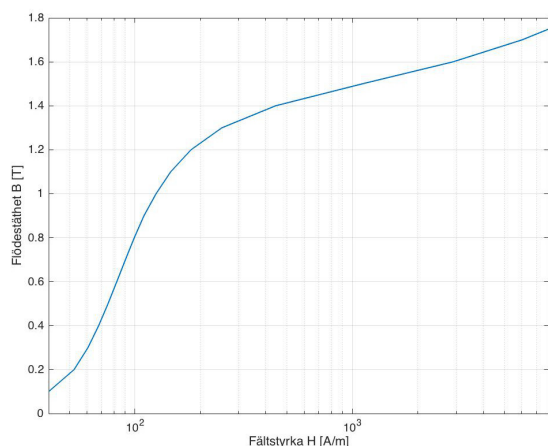
Tabell 1: Utgångsdata givet av Minesto

	Storhet	Värde
Märkeffekt	P_{out}	500 kW
Effektfaktor	–	0.9
Frekvens	f	100 Hz
Hastighet	n	3000 rpm
Antal poler	p	4
Antal spår	–	48
Eftersträvad Verkningsgrad	η	96%
Typ av Kylning	–	<i>Vatten</i>
Generatorns Längd	L	0,5m
Generatorns Bredd	B	0.6m

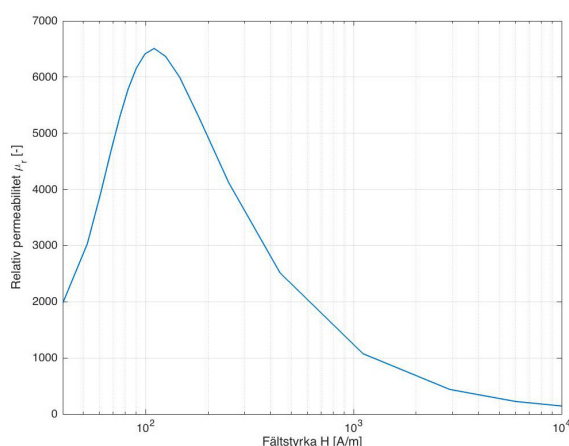
4.1.2 Material

För stator och rotor valdes stålet av typen M400-50A, vilket är ett vanligt material att använda för en maskin av denna storlek. Materialet tillverkas av företaget Cogent, som tillhandahåller datablad som beskriver materialets magnetiska egenskaper, bland annat förhållandet mellan B och H , förluster per kilogram samt densitet [20]. Med hjälp av MATLAB kunde denna data bearbetas och räknas om enligt ekvation 6 för att erhålla förhållandet mellan μ_r och H . Dessa två förhållanden illustreras i figur 17 respektive 18.

Valet av magnet gjordes utifrån de krav på temperatur och behov av producerat magnetiskt flöde som ställs av modellerna. Ett vanligt material som används i många av dagens generatorer och som har bland de bästa magnetiska karaktärstragen på marknaden är neodymium. Egenskaperna för neodymium typen N40H valdes för beräkningar av magnetiska kretsen då den typ är avsedd att klara av temperaturer upp mot 120°C.



Figur 17: Förhållandet mellan B och H för materialet M400-50A.



Figur 18: Förhållandet mellan μ och H för materialet M400-50A.

Valet av isolering görs utifrån uträknad temperatur på lindningarna. Med avseende på värdena i tabell 6 föreslås en isolering av klass H [6] som ska klara av en temperatur upp mot 125°C .

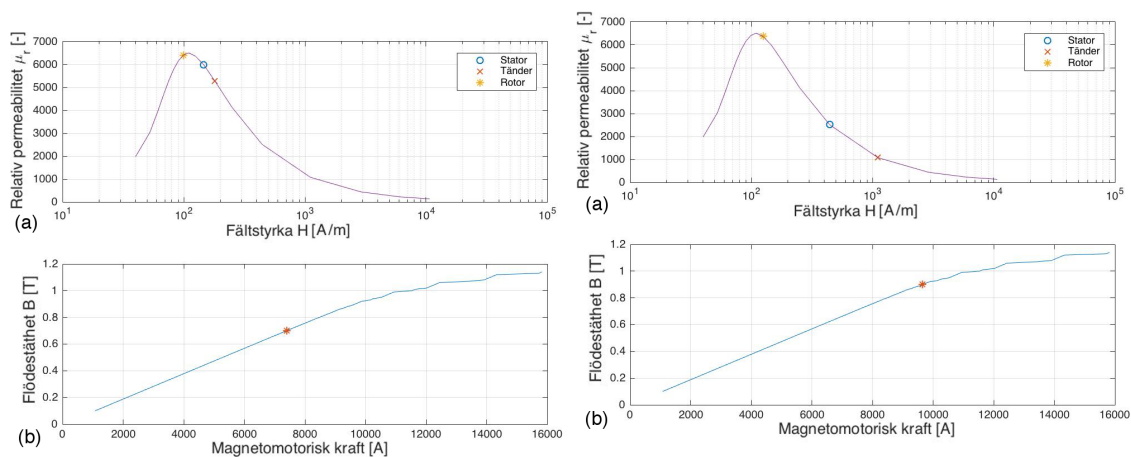
4.1.3 Design av magnetisk krets

Baserat på teorin som beskrivs i avsnitt 3.1.1 har en analytisk modell för maskinens magnetiska krets utvecklats i MATLAB resultatet illustreras i tabell 2. I figur 19 (a) kan det urskiljas att delar av generatoren börjar mättas vid flödestätheten 0,7 T i luftgapet och att mättnad framför allt inträffar i tänderna; det är rimligt att mättnad i första hand sker där flödet har minst material att flöda genom. Vid 0,9 T i luftgapet har betydande mättnad inträffat i några av generatoren delar och det märks även i figur 20 (b) att flödestätheten som resultat av detta inte längre ökar lika mycket vid ökning av MMK. Med denna information valdes ett B_{δ} på 0,8 T som optimalt för designen. Efter detta har dimensionerna justerats åtskilliga gånger för att närmare stämma överens med riktlinjerna från tabell 2, vilket till slut gett resultatet som presenteras i kolumnen Resultat".

Tabell 2: Flödestätheter i generators olika delar

Magnetisk flödestätheten i:	Beteckning	Riktlinje(T)	Resultat(T)
luftgapet	B_{δ}	(0, 2 – 1, 2)	0, 8
stators ryg	B_s	(1, 1 – 1, 5)	1, 52
tänderna	B_t	(1, 5 – 2, 0)	1, 6
rotorn	B_r	(1, 3 – 1, 6)	1, 49

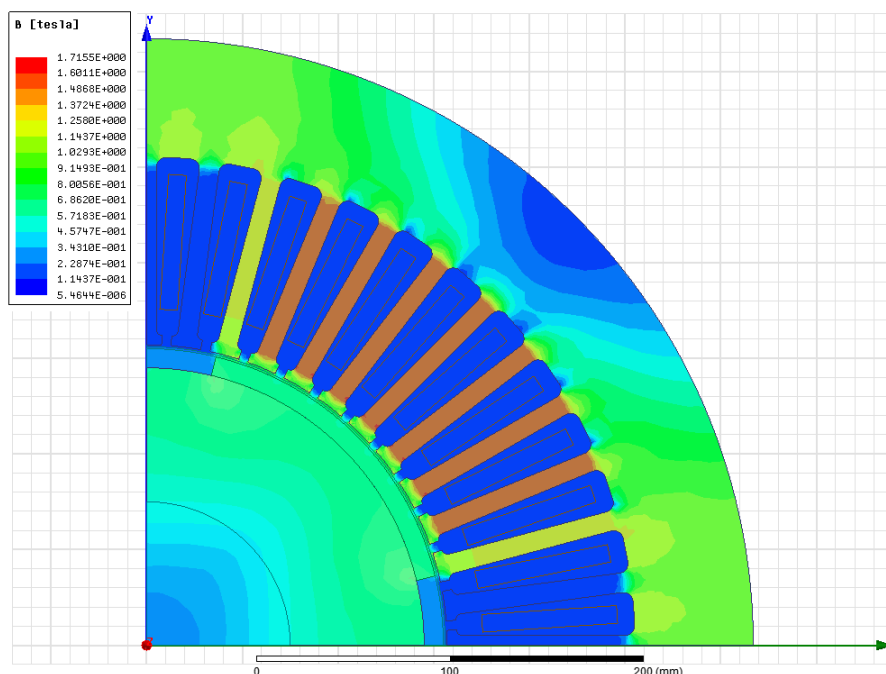
När modellerna senare överfördes till Maxwell 2D visade det sig att beräkningarna av det magnetiska flödestätheten inte riktigt stämde överens med de analytiska värdena (se figur 21 och jämför med tabell 2). Detta kan tros bero på att delar av



Figur 19: (a) Denna figur visar förhållandet mellan μ_r och H och även vilket värde för μ_r olika delar av generatoren har vid 0,7T. (b) Denna figur visar förhållandet mellan MMK och B. Den röda asterisken markerar 0,7T

Figur 20: (a) Denna figur visar förhållandet mellan μ_r och H och även vilket värde för μ_r olika delar av generatoren har vid 0,9T. Tänder och stator har börjat mättas. (b) Denna figur visar förhållandet mellan MMK och B. Den röda asterisken markerar 0,9T.

det magnetiskt flöde som går genom luftgapet istället för genom statorn.



Figur 21: Tvärsnitt av generatoren som visar den magnetiska flödestätheten i dess olika delar. De röda regionerna visar områden där mättnad inträffar. Materialet mätts först i tänderna, som tidigare observerat med analytiska metoder.

4.1.4 Design av elektrisk krets

Strömmen och strömtätheten sjunker allteftersom spänningen höjs. Detta är i sig positivt då hög ström och strömtäthet leder till mer förluster. För den typ av kylning som används i denna design får ett maximalt värde på 14 A/mm^2 förekomma [5].

Notera att vi har valt att öka antalet varv i lindningarna för att höja spänningen. Det är också möjligt att öka det magnetiska flödet eller öka generatorns rpm för att höja spänningen, vilket dock inte har undersökts vidare.

Tabell 3: Lindningsparametrar

V_Φ [V]	E_A [V]	N_C [-]	$A_{lindning}$ [mm ²]	I_S [A]	J [A/mm ²]
500V	261,17	7	71,1	641,5	9,03
690V	360,41	9	55,27	464,85	8,41
1kV	522,33	13	38,26	320,75	8,38
3.3kV	1723,7	40	12,46	97,2	7,82

4.1.5 Förluster och verkningsgrad

Beräkningar av förlusterna i järnkärnan görs genom att räkna ut förlusterna i varje del och sedan summera dem. Förlusten i en del kan beräknas genom att räkna ut den genomsnittliga magnetiska flödestätheten, B , i delen tillsammans med frekvensen. Med databladet för M400-50A, som anger total förlust per kilo, bestäms förluster genom att räkna ut volymen som delen tar upp och multiplicera den med stålets densitet.

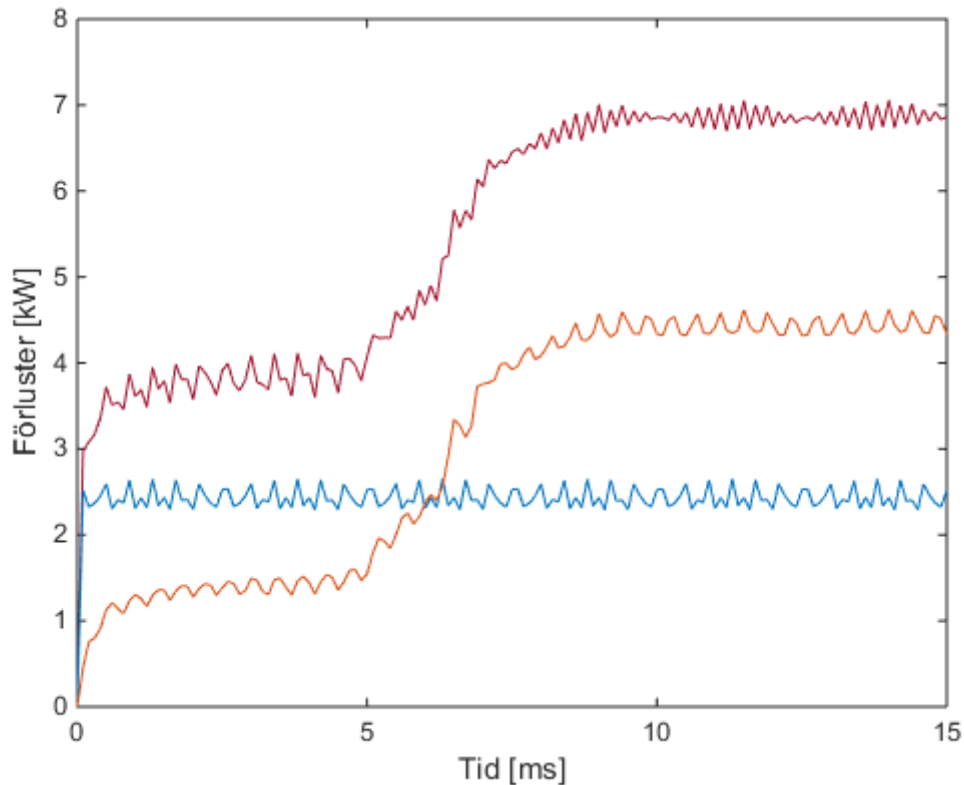
Kopparförluster beräknas enligt ekvation (22) där resistansen uträknad med ekvation (17) används. Resultatet presenteras i tabell 4 för respektive spänningsnivåer.

Tabell 4: Förluster och verkningsgrad beräknade från egen modeller

Spänning [V]	W_{Cu} [W]	W_{Fe} [W]	$W_{strö}$ [W]	W_{tot} [W]	η [%]
500V	4047,5	6841,5	2500	13389,0	97,39
690V	3513,3	6841,5	2500	12854,8	97,45
1kV	3489,9	6841,5	2500	12831,4	97,50
3,3kV	3034,0	6841,5	2500	12375,5	97,58

Jämförelsen mellan de magnetiska förlusterna i tabell 4 och de totala förlusterna i figur 22 antyder att modellen för förlustberäkning som gjordes i MATLAB gjordes korrekt.

Förlusterna i järnkärnan ändras inte eftersom ankarreaktionen inte tas hänsyn till i systemet magnetiska del. Med den skulle följderna bli att ett magnetfält skapas av lindningar, beroende på antal varv, som motverkar det fält som byggs upp i kretsen och minska Φ i kärnan. Detta kommer att behövas kompenseras för i vidare studier men förlusterna borde inte ändras mycket eftersom designen eftersträvar liknande



Figur 22: Järnförluster beräknade från Maxwell2D utan last. Den röda linjen är de totala förlusterna som är summan av virvelströmen (blå) och hysteresen (orange).

värden som används för beräkning av dessa, se tabell 2, antaget att geometrin ändras allt för mycket.

4.1.6 Termisk analys

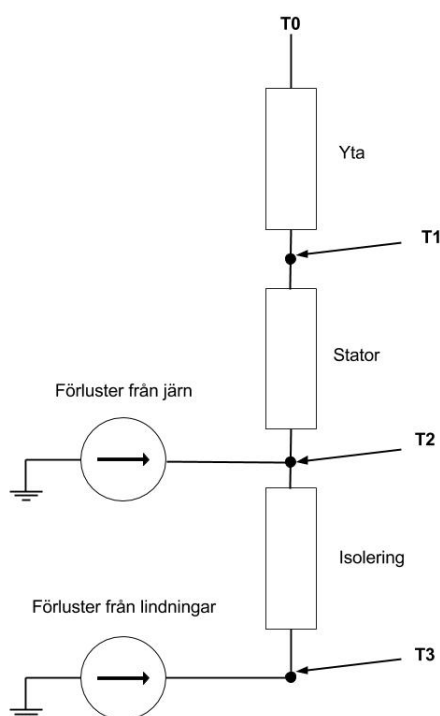
Den termiska representationen av generatorns vid beräkning av kylning kan ses i figur 23. Uträkningarna för de termiska resistanserna görs utifrån antagandena som beskrivits i metoden och ekvationerna i teorikapitlet och presenteras i tabell 5.

Tabell 5: Termisk resistans beräknad i olika delar av generator

Index	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
R_1, Yta	$0,223 * 10^{-3}$
$R_2, Stator$	$10,5 * 10^{-3}$
$R_3, Isolering$	$10,4 * 10^{-3}$

Resistanerna beskrivs enligt följande,

- R_1 , konvektion mellan pumpvatten och statorns utsida.
- R_2 , konduktion genom statorn och tänderna.
- R_3 , konduktion genom isoleringen till tänder och stator.



Figur 23: Termiskt schema av generatoren

Med resistansen uträknat och med förlusterna som tagits fram i tabell 4 bestäms temperaturen i respektive del av generatoren beroende på V_Φ enligt tabell 6. Pumpvattnet antas ha en temperatur på 10°C .

Tabell 6: Temperaturen i olika delar av generatoren beroden på spänningsnivå

V_Φ	Yta ($^\circ\text{C}$)	Stator ($^\circ\text{C}$)	Lindningar ($^\circ\text{C}$)
500V	12.1	109.2	123.2
690V	11.9	103.5	115.6
1kV	11.9	103.2	115.2
3.3kV	11.8	98.4	108.8

Alla temperaturer sjunker med ökad spänning, vilket är ett förväntat och därmed rimligt resultat. Temperaturerna i lindningarna är förhållandevis höga och i fallet för 500V på gränsen till skadlig för magneterna och isoleringen. Vid ytan verkar temperaturerna däremot väldigt låga, vilket möjligen indikerar ett felaktigt begynnelsevillkor.

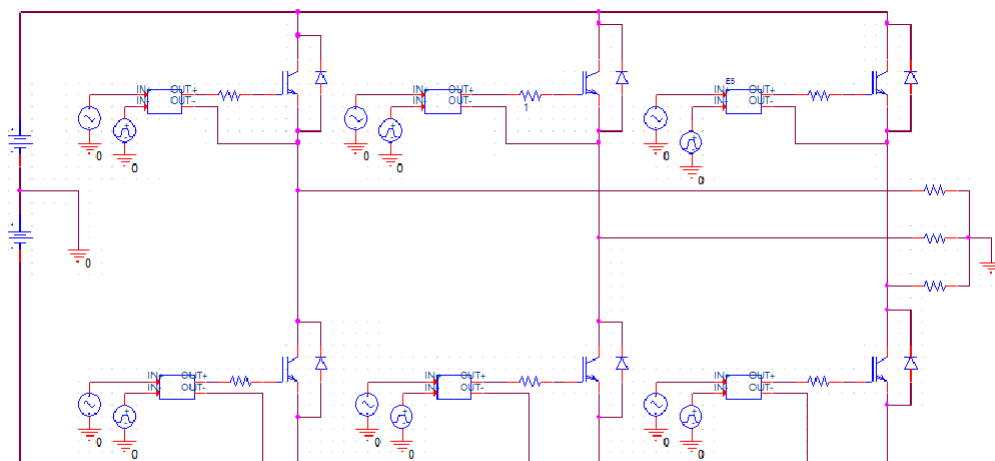
4.2 Krafterlektronik

Krafterlektroniken designas för att uppfylla de krav som ställs på komponenterna för att kraftverket ska kunna leverera den genererade energin till nätet. I detta kapitel presenteras resultatet från denna studie för krafterlektronikens del.

4.2.1 Frekvensomriktare

Ett av de större problemen vid design av frekvensomriktaren för ett tidvattenkraftverk är först och främst att se till så komponenterna inte går sönder, varken av vattenskador eller av vibrationer. För att förebygga dessa problem är det av stor vikt att de delarna som står för att skydda de elektriska komponenterna är av hög kvalitet.

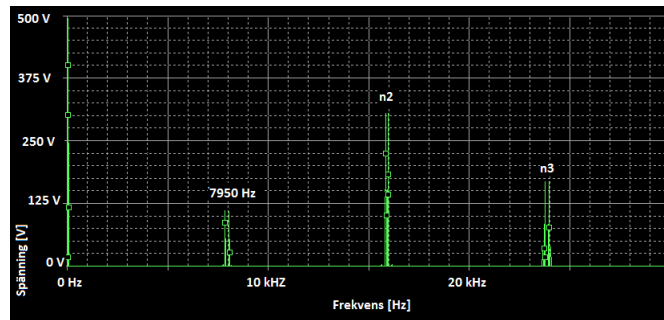
Teknologin som frekvensomriktaren bör bygga på vid de lägre spänningarna är IGBT. När spänningen höjs till nivåer högre än 2kV blir GTO en mer passande teknologi. Frekvensomriktaren kommer fungera på samma sätt med PWM som reglering för spänningen i båda fallen med de olika teknologierna. I figur 24 visas hur frekvensomriktaren har simulerats.



Figur 24: Kretsschema för frekvensomriktaren. Kretsen är gjord i simuleringsprogrammet Pspice.

Med ekvation (27) får man ut det kvadratiska medelvärdet av huvudspänningen efter filtret. Den matas med likspänning från likspänningslänken vilket är 950V i det första fallet. När 500V önskas så justeras värdet på m_a utefter det, i detta fall är $m_a = 0.608$. Spänningen på likspänningslänken kan förbli detsamma även för när 690V önskas, då får $m_a = 0.839$. Ekvation (26) används för att få ut ett bra värde på switch-frekvensen, vilket önskas högt för att det ger lägre övertoner. Eftersom m_f ska vara udda används 7950 Hz som är värde för switch-frekvensen [9]. Detta kommer inte att ändras även när högre spänning testas.

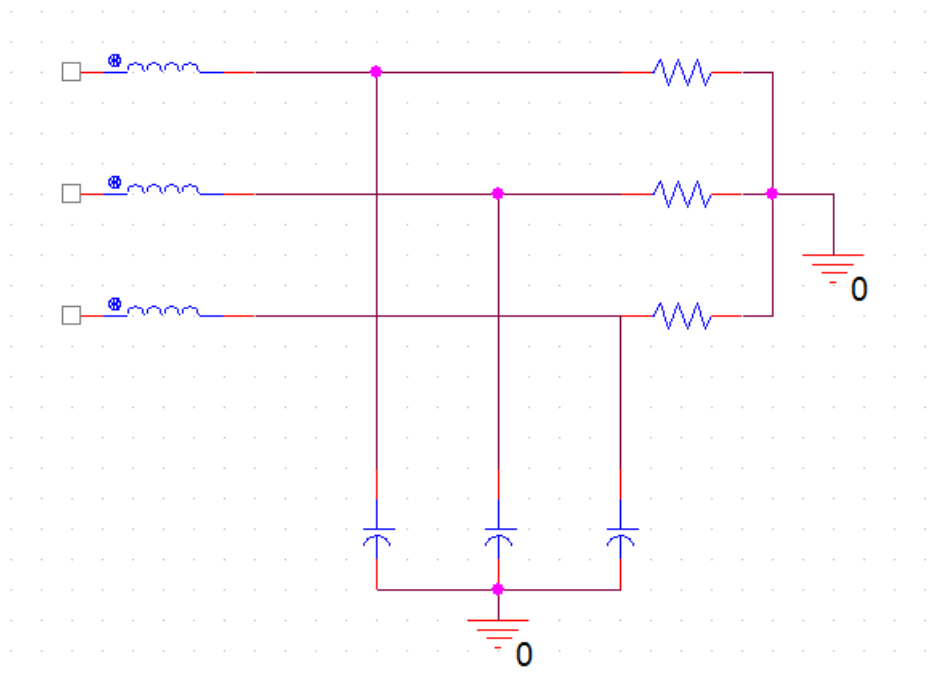
Övertoner är ett problem när likspänning omvandlas till växelspanning på grund av att det är endast spänningen med frekvensen 50 Hz som får levereras ut till nätet. Som kan ses i figur 25 så finns det övertoner i alla heltalsmultiplar av switchingfrekvensen. Både switchingfrekvensen och m_a påverkar övertoner, dessa justeras utefter att få så små övertoner som möjligt.



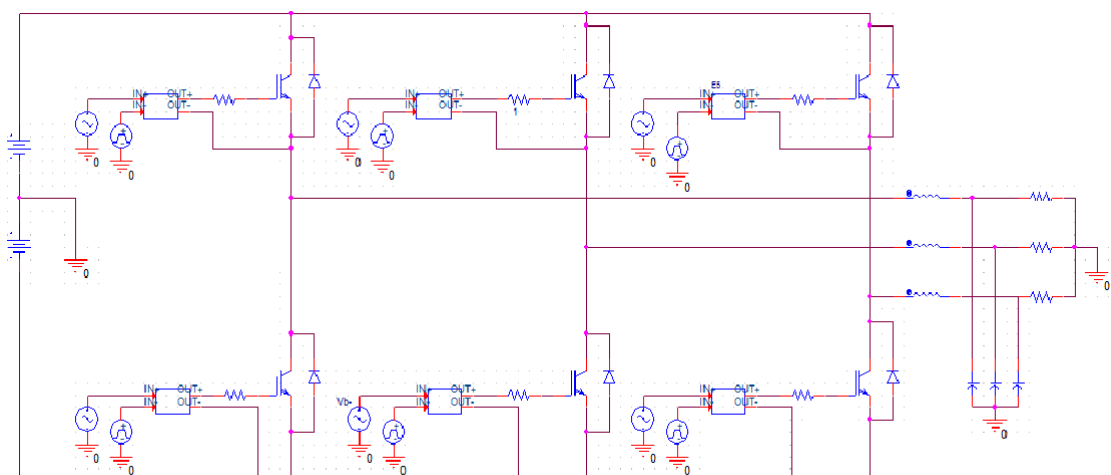
Figur 25: FFT (Fast Fourier Transform) av ut-signalen från frekvensomriktaren. Här syns övertoner, påverkas av switchfrekvensen.

4.2.2 Filter

För att inte överstiga de gränser för övertoner som finns för att koppla upp ett kraftverk mot elnätet behövs ett filter. När övertonerna är lokaliserade är det passade att designa ett. Det filtret som har undersökts i denna rapport är ett LC-filter. Ett LC-filter är, med tillräckliga komponenter, ett gott alternativ som reducerar övertonerna till acceptabla nivåer. Filtret bestäms genom att bestämma kapacitanserna och induktanserna. Där används kondensatorn för att ta bort övertonerna och sen induktansen används för att minska spänningsförlusterna som sker i frekvensomriktarens switchar. Med hjälp av Pspice har det gått att ta fram värden på induktanserna och kapacitanserna, $C = 0,4mF$ och $L = 0,2mH$ som används i både 500V och 690V. Designen på filter förbli detsamma och det visas med figur 26.



Figur 26: Kretsschema för ett LC-filter med laster.



Figur 27: Kretsschema för frekvensomriktaren med tillhörande LC-filtret.

I figur 28 och 29 visas utspänningen medan i figur 30 är det FFT av utspänningen. Detta är det som sker efter filtret, där spänningen ska vara en sinusliknande våg med 50 Hz som frekvens och med inga övertoner. Det här ska ut i draken, vilket betyder att viktigt att det är värden som stämmer. I tabell 7 visas de två olika spänningarna och hur mycket filtret reducerar övertonerna. Både rippels och övertonerna är tillräckligt små för att detta filtret ska godkännas. Detta visas också med en jämförelse mellan FFT innan och efter filtret syns det att övertonerna har reducerats till försumbart små, i båda fallen.

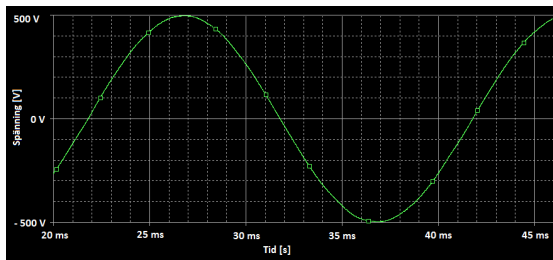
Tabell 7: I båda spänningsfallen är det samma filter, som har värdena $C = 0,4mF$ och $L = 0,2mH$. Här är de tre första heltalmutiplar av övertonerna innan och efter filtret, även hur stor utspänningens rippel är.

	500V			$m_a = 0,608$	690V			$m_a = 0,839$
Övertoner	1	2	3		1	2	3	
Innan filter	110V	304V	167V		199V	244V	167V	
Efter filter	550mV	379mV	100mV		1V	300mV	70mV	
Rippel	1,7V				1,02V			

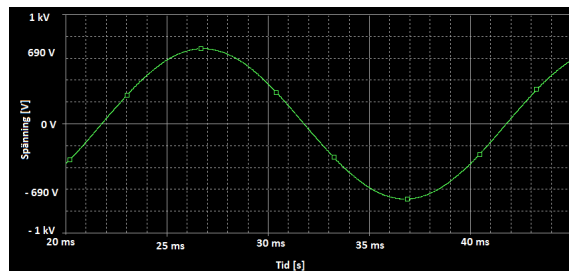
Genom att sätta en stor kapacitans i likspänningslänken minskas det rippel som finns i likspänningen till så lång som möjligt för att andra steget. I figur 28 och 29 syns det att periodtiden är 20 ms, det betyder att utspänningen har frekvensen 50 Hz. Vilket är det som önskas.

4.2.3 Vibrationers påverkan på kraftelektronik

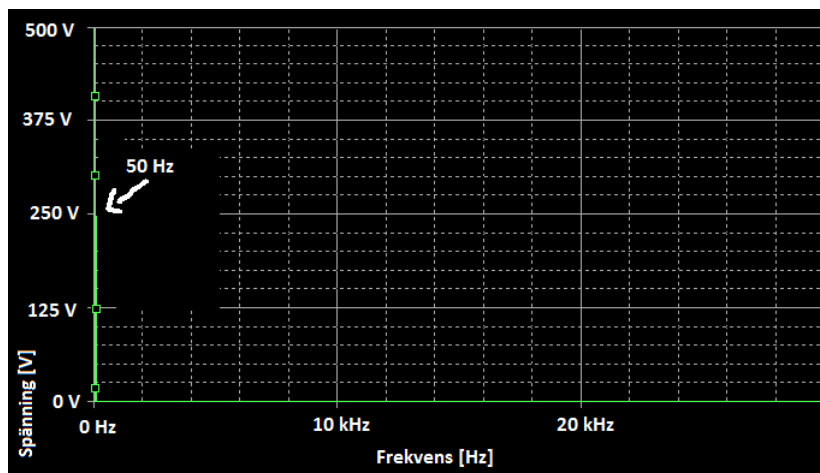
För att de elektriska komponenterna i kraftverket inte ska skadas av den ovänliga situationen som de kommer finnas i är det nödvändigt att isolera och kapsla in dem. Genom att kapsla in komponenterna i stöttåliga material kommer de att kunna



Figur 28: Utspänningen efter att ett filter är insatt, för 500V. Denna spänning är det som går ut från draken.



Figur 29: Likt 28, är detta utspänningen fast när det är för 690V.



Figur 30: FFT på utspänningen efter det att ett filter är påkopplat. Här har spänningen endast grundfrekvensen 50 Hz och övertonerna som var med tidigare är bortfilterade.

vara funktionella. Ett problem som uppstår är att kylningen komponenterna blir försvårad.

4.2.4 Förluster och kylning

Den energi som går till förlust i de elektriska komponenter omvandlas från elektrisk till termisk energi, vilket resulterar i att även kraftelektroniken behöver kylas. Då kraftverket är i rörelse under vatten är kylning med hjälp av fläktar undermåligt. Luftflödet kommer inte vara tillräckligt för att hålla nere temperaturen på komponenterna. Krafterlektroniken kommer utsättas för hög energidensitet, utrymmet är begränsat vilket betyder att komponenterna görs så små som möjligt. Små komponenter medför i ett sådant läge att temperaturen behöver kylas bort med någonting kraftigare än luft. En möjlig lösning är att använda sig utav ett vattenkylningssystem där vattnet i kylningssystemet har en termisk växling med havsvattnet utanför kraftverket. Ett annat alternativ är att montera de krafterlektriska komponenterna mot ytterväggen på nacellen och låta havsvattnet direkt kyla komponenterna.

Ekvation (28) säger att likspänningen som frekvensomriktaren matas med påverkar

förlusterna i brytarna. Likspänningen är densamma vid både 500V och 690V vilket även gäller även för de andra värdena i ekvationen. Detta betyder att förlusterna i brytarna är oförändrade.

4.2.5 Isolering från vatten

För att se till att produkter håller de krav de lovar finns IP kod (International Protection Marking). I fallet med elektriska komponenter för ett tidvattenkraftverk bör de, efter de externa skydden, ha en minimum märkning på IP67. Då ska komponenterna fungera att användas även fast de är helt under vatten samt klara av att täckas med damm.

4.3 Undervattenskabel

Undervattenskabeln utformas för att klara absolutbeloppet av strömmen som skall gå i kabeln. Därför designas den med avseende på den skenbara effekten, $S_n = 443kVA$, ska överföras över kabeln. Ledararean är $A = 50mm^2$ och kabelns totala längd är $L = 420m$.

4.3.1 Isolation

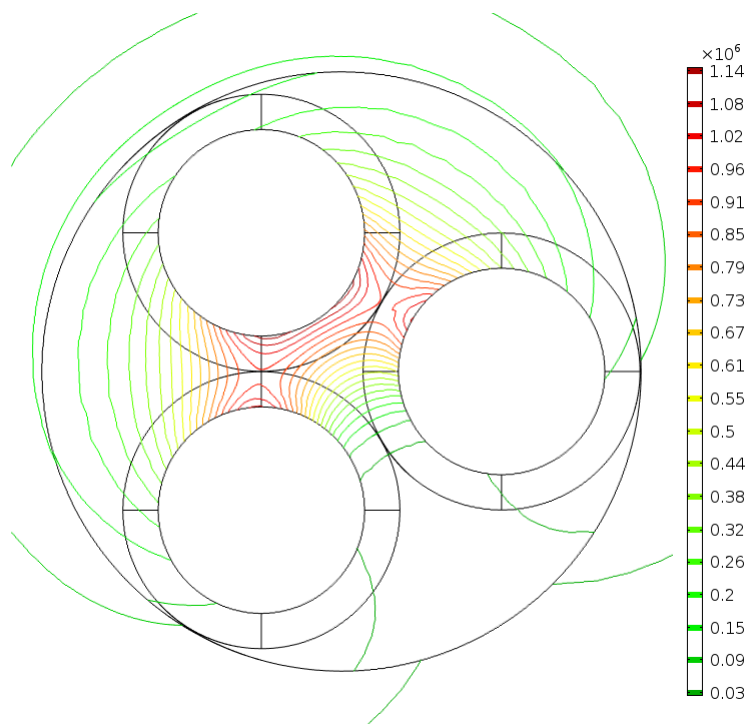
Tjockleken på isoleringen bestäms framförallt av spänningsnivån och ledararean [21]. Enligt del ett, 1kV till 3,0kV, av den internationella industristandarden IEC60502 för kablar i spänningsområdet mellan 1kV och 30kV bestäms tjockleken för det isolerande lagret för olika material vid olika spänningar och ledardiametrar. De relevanta tjocklekarna kan ses i tabell 8. Som visas i tabellen behövs väldigt lite isolering för dessa spänningsnivåer och skillnaden är endast en millimeter mellan 1kV och 3,0kV. Ett rimligt antagande är att tjockleken inte ökar speciellt mycket vid den relativt lilla ökning i spänning upp till 3,3kV. Tjockleken varierar inte mycket mellan de två valda materialen.

Tabell 8: Isolationens tjocklek för olika ämnen och spänningsnivåer. För en ledar area på $50mm^2$ [21]

Material	Isolations tjocklek [mm]	
	$U_h = 1kV$	$U_h = 3kV$
PVC	1,4	2,2
XLPE	1,0	2,0

De mest lämpliga materialen för denna applikation samt dessa spänningsnivåerna är PVC och PE. Eftersom standarden inte tar upp PE har PVC valts som isolationsmaterial eftersom det har bra isolatoregenskaper, är vattentåligt, billigt och välbeprövat. Standarden går inte under 1kV för att vara säkra på att isolationen är tillräckligt tjock väljs en tjocklek på 1,4mm för spänningsnivåerna 500V, 690V och 1kV. För 3,3kV väljs en tjocklek på 3mm.

Programmet Comsol användes för att simulera det elektriska fältet i en trefaskabel så att inte genombrottsspänningen överstigs. Isolationsmaterialet som valts är PVC vilket har genombrottsspänningen $12 - 16MV/m$ [16]. Kabeln med PVC som isolering simuleras i Comsol för att kontrollera det elektriska fältet.



Figur 31: Elektriskt fält i en trefaskabel med huvudspänning $3,3kV$.

I figur 31 visas att det elektriska fältets högsta värde är $1.14 * 10^6$ vilket ej överstiger genombrottsspänningen för PVC, $12 - 16MV/m$. Isolationsmaterialet samt dess tjocklek är där med tillräckligt för denna spänning.

4.3.2 Spänningsfall

I tabell 9 visas den simulerade kapacitansen för en respektive fyra kablar med $500V$ spänningsnivå. Kabelns självinduktans per fas simulerad med Comsol visas också.

Tabell 9: Simulerad kapacitans beroende på antalet kablar och självinduktans i [F]

Kapacitans		Självinduktans
1 kabel	4 kablar	
$1,1 * 10^{-7}$	$7,44 * 10^{-8}$	$4,616 * 10^{-4}$

Shuntkapacitansen X_c blir enligt ekvation (30) extremt stor i förhållande till serieinduktansen X_l enligt ekvation (31). Detta gör att strömmen I_2 enligt figur 16 blir

försumbar. De två shuntkapacitanserna kan därmed försummas och Z_{tot} blir därmed serieresistansen och serieinduktansen.

Absolutbelopet av spänningsfallet över en kabel enligt ekvation (35) blir då 198V vid 500V systemspänning. Om serieimpedansen försummas blir spänningsfallet endast 137V vilket starkt tyder på att serieimpedansen bör hanteras för att minska spänningsfallet.

Enligt resultaten i tabell 9 uppvisar kabeln induktiv karaktär eftersom induktansen i kabeln har mycket större inverkan än kapacitansen. Därmed bör kabeln shuntkompenseras för att få ner de reaktiva bidragen så mycket som möjligt. Normalt är dock att nedgrävda- och undervattenskablar är kapacitiva medans hängande luftledningar är induktiva. Om kabeln uppvisat kapacitiv karaktär skulle kabeln istället behöva generatorkompenseras [19]. Detta resultatet skulle kunna bero på felaktiga simuleringar eller bero på kabelns geometri.

I fortsatta beräkningar tas endast hänsyn till den aktiva delen i impedansen. Vilket gör att endast den aktiva delen av spänningsfallet och effektförlusten betraktas i fortsättningen.

Med kopparledare ges spänningsfallen enligt ekvation (35) i tabell 10 beroende på systemspänning och antalet kablar .

Tabell 10: Spänningsfall[%] beroende på spänning och antal kablar. $S_n = 500VA$, $A = 50mm^2$, $L = 420m$, kopparledare

	0,5kV	0.69kV	1kV	3,3kV
4	6,5	3,4	1,6	0,1
3	8,7	4,6	2,2	0,2
2	13,0	6,8	3,3	0,3
1	26,0	13,7	6,5	0,6

4.3.3 Effektförluster

Effektförlusterna i kabeln beräknas med ekvation (38). Detta ger effektförlust per kabel enligt tabell11. Från detta ser vi att effektförlusten per kabel starkt beroende på antalet kablar i systemet och spänningsnivå. Det finns alltså möjlighet att minska antalet kablar och fortfarande ha samma förluster om spänningsnivån höjs.

4.3.4 Kabelns design

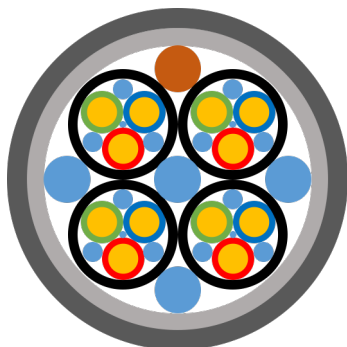
För bottenbiten av kabeln läggs armering samt en kabelmantel för att paketera ihop och skydda kablarna mot mekanisk påfrestning enligt figur 32 till 35. Denna paketering ger kabeln ökad massa vilket reducerar dess rörelse på havsbotten. För den

Tabell 11: Effektförlust i Watt per meter beroende på spänningsnivå och antal kablar.

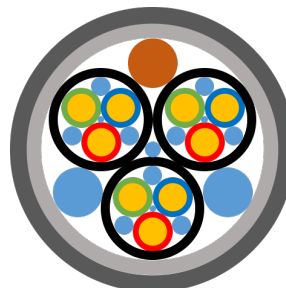
	0,5kV	0.69kV	1kV	3,3kV
4	68,7	36,1	17,2	1,6
3	916	48,1	22,9	2,1
2	137,4	72,1	34,3	3,2
1	274,8	144,3	68,7	6,3

dynamicska biten av kabeln skalas manteln och armeringen bort och kablarna löper separat inuti det skyddande höljet enligt figur 36 till 39.

I figur 32 ser vi fyra kablar med sina tre faser tillsammans en röd fiberledare och blå utfyllnads material för att skapa en rund form. Dessa är omgiven av ett eller flera lager armering som illustreras i grått samt en kabelmantel som är det yttersta lagret. I kärnan av en kabel visas de tre faserna i gult. Ledarna omsluts av isolering som skyddar mot spänningsöverslag. Tillsammans med de tre ledarna ligger en fiberkabel som markeras med en röd cirkel. De blå cirklarna är även här till för att fylla ut tomrummet för att ge kabeln en rund form.



Figur 32: Designförslag fyra trefas-kablar och en fiberkabl

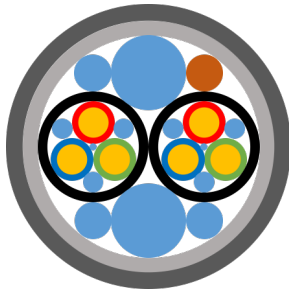


Figur 33: Designförslag tre trefas-kablar och en fiberkabel

Eftersom gränsen på maximal effektförlust har satts till $69W/m$ kan kabeln designas olika beroende på vilken spänningsnivå som valts. Eftersom vi undersöker ledarean $50mm^2$ krävs minst fyra kablar vid $500V$ som illustreras i figur ??, för att sprida ut lasten tillräckligt mycket för att klara av värmeutvecklingen. Med samma resonemang ger detta att vid $690V$ krävs minst tre kablar som illustreras i figur ??, vid $1kV$ och $3,3kV$ krävs minst en kabel som illustreras i figur ??.

4.3.5 Termisk design

I kabeln så är det lastbärande dyneema repet mest känsligt för värme. Därför får den maximala temperaturen vid repet inte överstiga $50^{\circ}C$. Den maximala effektförlusten i kabeln har satts av Minesto och är $69W/m$. Detta ger enligt tabell 12 det



Figur 34: Designförslag, två trefaskablar och en fiberkabel

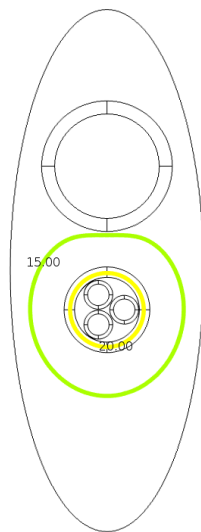


Figur 35: Designförslag en trefaskabel och en fiberkabel

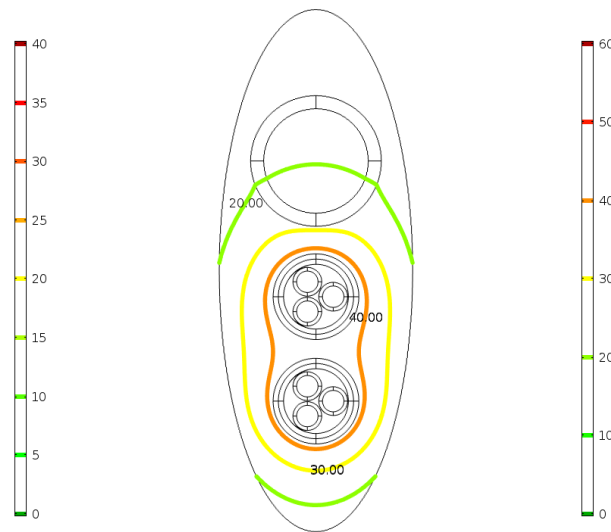
minimala antalet ledare per spänningsnivå nödvändig för att förlusterna per kabel skall understiga $69W/m$.

Tabell 12: Minimalt antal ledare per spänningsnivå nödvändigt för att förlusterna per kabel skall understiga $69W/m$

	0,5kV	0.69kV	1kV	3,3kV
Antal ledare	4	3	1	1

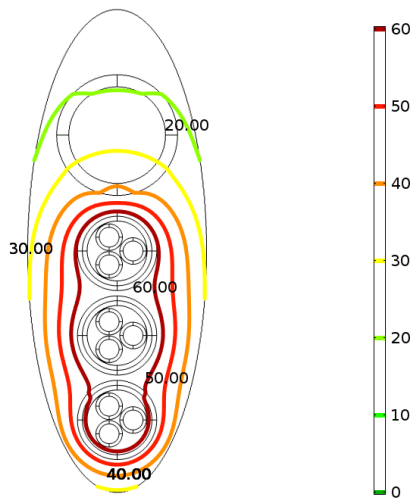


Figur 36: Värmedistribution i tvärsnitt av dynamisk kabel. 1 trefaskabel upp till drake vid spänning 3,3kV.

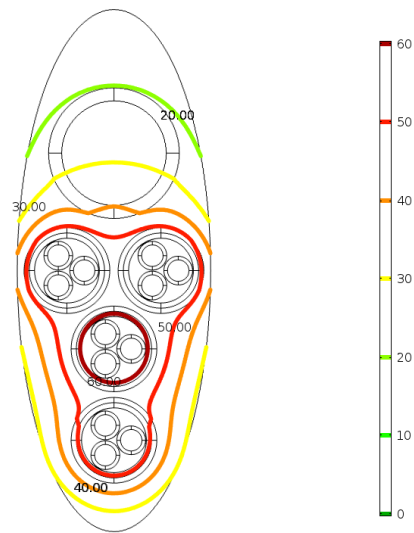


Figur 37: Värmedistribution i tvärsnitt av dynamisk kabel. 2 trefaskablar upp till drake vid spänning 1kV.

I figur 36-39 så är det lastbärande repet cirkeln i övre delen av kabelns tvärsnitt. Värmedistributionen i kabel upp till drake för 1 – 4 trefaskablar överstiger enligt figur 36-39 ej temperaturen $50^{\circ}C$ vid dyneema repet då temperaturen som högst är $40^{\circ}C$. Därför är ledarens tvärsnittsarea acceptabel för denna spänning.



Figur 38: Värmedistribution i tvärsnitt av dynamisk kabel. 3 trefaskablar upp till drake vid spänning $0,69kV$.



Figur 39: Värmedistribution i tvärsnitt av dynamisk kabel. 4 trefaskablar upp till drake vid spänning $0,5kV$.

5 Diskussion

Vissa delar av systemet stöter på större problem än andra när spänningsnivån ökas. Resultaten antyder att det finns tillräckligt utvecklad teknologi för alla delsystem för att implementera en ökning av arbetsspänningen.

I rapporten har flera antaganden gjorts för materialkonstanter och externa förhållanden i miljön. Antaganden gör att beräknade värden kan avvika från verkliga värden men eftersom syftet är att undersöka skillnaden mellan olika spänningsnivåer är detta inte ett stort problem eftersom samma fel förekommer i alla spänningsnivåer.

Lösningen som studeras för att ge en högre spänningsnivå från generatoren är att öka antalet varv i lindningarna. Där avgränsades dock den resulterade effekten från ankarreaktionen i beräkningarna av det magnetiska flödet. I verkligheten motverkas det magnetiska flödet av ankarreaktionen, som beror på antal lindningsvarv och strömmen i dem. Detta kan kompenseras med en större magnetisk flödestäthet, alltså större magneter, vilket kräver en omdimensionering av generatoren. Detta kan därmed leda till större järnförluster när spänningen höjs om volymen på järnkärnan ökar. Kopparförlusterna i lindningarna kommer däremot fortfarande att sjunka vid ökad spänning enligt tabell 4. Dessa två effekter visar att när kopparförlusterna går ner så ökar järnförlusterna vilket medför att de totala förlusterna är oförändrade och därför bör ingen markant skillnad ses i verkningsgraden. Det är svårt avgöra den optimala nivån på spänningen eftersom generatorns dimensioner begränsas av kraftverkets storlek vilket är avgörande för hur stora förlusterna blir. Dock ligger många av dessa problem i materialets egenskaper men med dagens utveckling och framsteg inom materialforskning kan detta bli ett mindre problem i framtiden.

Kraftelektroniken kan byggas om och förbättras så de passar de spänningarna i intervallet som undersökts. En jämförelse mellan spänningarna 500V och 690V kan göras relativt utförligt. Där den högre spänningen har mycket lika värden på dess komponenter till ett resultat som uppnår samma kvalitet och effektförluster. När spänningen ökas till 2kV eller högre är det nödvändigt att byta teknologin för omriktarna till, förslagsvis, GTO. Problemet för kraftelektroniken kommer, oavsett spänning, vara att kapsla in komponenterna så den kan arbeta under de krävande förhållandena som Deep Green förutsätter. En möjlig lösning för att undgå detta problem skulle vara att flytta ut komponenterna ur draken. Genom att placera komponenterna på t.ex. havsbotten skulle problemen med de påfrestande förhållandena underlättas. Däremot uppstår då nya problem, varav mest nämnvärt är att underhåll av dessa komponenter blir mycket svårare.

De stora effektförlusterna som uppstår i undervattenskabeln vid 500V beror framförallt på den stora strömmen. Med en ökad spänning minskar strömmen och därmed minskar förluster. För spänningsnivån 3,3kV räcker en kabel för att säkert överföra energin; det skulle till och med vara möjligt att minska tvärsnittsarean. Från tabell 10 går det att utläsa de olika effektförlusterna från 500V till 3,3kV och därmed kan de procentuella skillnaderna uträknas. Vid en ökning från 500V till 3,3kV med fyra

kablar minskar förlusterna med 97,67%. Vid en ökning från 500V till 3,3kV och en minskning av antal kablar till bara en minskar förlusterna med 90,83%. Det första alternativet kommer alltså vara lönsamt över tid medans det andra alternativet kommer innebära en reducerat initial kostnad, i och med att antalet kabelmeter minskar drastiskt. Ett system med endast en kabel kan däremot medföra nackdelar. I Minestos design går kabeln in i vardera vinge på draken, vilket skulle medföra problem med symmetrin. Dessutom betyder ett minskat antal kablar en minskad redundans i systemet.

Induktansen som gavs i tabell 9 är högre än kapacitansen från samma tabell. Detta väcker frågor då induktansen i undervattenskabel vanligtvis är lägre än kapacitansen, vilket indikerar att ett fel kan ha gjorts i simulationen som används för att räkna ut kabelns induktans. I fallet att induktansens värde är felaktigt behöver kabelns kapacitans tas hänsyn till då denna kommer att dominera. Kapacitansen kan i det fallet kompenseras med en induktans och på så sätt blir spänningsfallet över ledaren helt beroende på resistansen.

6 Slutsats och vidare undersökningar

6.1 Slutsats

Denna rapport har studerat det elektriska systemet i Minestos tidvattenskraftverk. För generatoren leder en ökad arbetspänning till en relativt liten förbättring i verkningsgrad. Ökningen till $690V$ ändrar kraftelektroniken marginellt. Med samma filter, likadana förluster i brytarna och att värdet från likspänningslänken kan förbli detsamma medför att spänningshöjningen är möjlig. I kraftkabeln sänks förlusterna vid höjd arbetspänning. Redan vid spänningen $690V$, blir det ca en halvering av effektförlusterna i kabeln och antalet kablar förblir fyra. Vilket betyder att en slutsats kan dras med att arbetsspänningen $690V$ rekommenderas före $500V$. För att förlusterna minskar samtidigt som att inga nya komplikationer tillkommer i systemet.

För spänningar över $2kV$ behöver teknologin i kraftelektroniken bytas från IGBT, vilken teknologi som då medför minst förluster kunde det inte dras någon slutsats om. För de högre spänningarna får undervattenskabeln minskade effektförluster samtidigt som det skulle bli möjligt att använda färre kablar.

Höjd arbetspänning i systemet innebär att systemet måste designas om för att göra den nya spänningensnivån möjlig. Detta är teoretiskt möjligt för alla delsystem som behandlats i rapporten eftersom tekniken för dessa spänningsnivåer existerar. Däremot är det då inte säkert att kraftelektroniken får plats i draken med designen för de högre spänningsnivåerna.

Att $3,3kV$ är den optimala spänningsnivån är emellertid inte säkert med hänsyn till en del outforskade parametrar. Till exempel kan storleken på generator behöva ökas med en ökad spänningsnivå, vilket inte undersökts vidare. Slutsatsen blir därför att en höjd spänningsnivå verkar lovande för systemet, men att vidare undersökning är nödvändiga för att fastslå en optimal nivå.

Det framtagna resultatet anses rimligt eftersom antaganden och möjliga modellfel påverkar samtliga spänningsnivåer på samma sätt. Detta skulle betyda att till exempel förlusterna kan vara fel men att den inbördes jämförelsen håller.

6.2 Vidare undersökningar

För att förbättra modellen för generatoren är nästa steg att utveckla modellen så att den även kan analyseras vid full last. Då kommer det också bli viktigt att utveckla en modell för ankarreaktionen.

I simuleringsprogrammet PSpice och designen för kraftelektroniken är nästa steg att utveckla modellen som finns, arbeta vidare för att reducera övertonerna och minska förlusterna. Efter det är det fördelaktigt att hitta den optimala switchfrekvensen och optimera designen. Vidare borde systemet för hela kraftelektroniken simuleras, med generatoren som ineffekt fram till transformatorstationen för att se effekterna hela

systemet har på den genererade energin. Storleken på komponenterna vid de högre spänningarna borde undersökas vidare för att se om de får plats i kraftverket.

Detta projekt har fokuserat på att designa en undervattensgenerator med existerande teknologier samt undersökt om det finns teknologier under utveckling som skulle kunna bli aktuella för liknande projekt i framtiden. Kommande arbete kan vara att undersöka vidare de teknologier som är under utveckling för att se om de passar bättre för applikationer som denna i framtiden.

Referenser

- [1] O. Carlson, "HARNESSING ENERGY FLOWS : TECHNOLOGIES FOR PRODUCTION," pp. 32–45, 2014.
- [2] M. Landberg, "Submersible plant," Patent US2011 266 805 (A1), 11 03, 2011. [Online]. Available: http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=US&NR=2011266805A1&KC=A1&FT=D&ND=3&date=20111103&DB=&locale=en_EP
- [3] Minesto. (2016) Deep green, technical data. [Online]. Available: <http://minesto.com/wordpress/wp-content/uploads/2014/09/dgtechnical-data-sheet11.pdf>
- [4] A. D. Pspice and P. A. D. Basics, "P Spice ® User's Guide," no. July, 2006.
- [5] K. J. Pyrhönen, T. Jokinen, and V. Hrabovoco, *Design of rotating electrical machines, 2nd ed.* McGraw-Hill, 2005.
- [6] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals, 4th ed.* John Wiley Sons, Ltd., 2014.
- [7] D. Cheng, *Field and wave electromagnetics, 2nd ed.* John Wiley Sons, Ltd., 1989.
- [8] F. I. och DP. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer.* John Wiley Sons, 2007.
- [9] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics. Converters, Applications and Design,* 3rd ed. John Wiley and Sons, Inc, 2003.
- [10] M. Prodanovi and T. C. Green, "Control and filter design of three-phase inverters for high power quality grid connection," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, no. 1 II, pp. 373–380, 2003.
- [11] W. J. Lee and S. K. Sul, "Dc-link voltage stabilization for reduced dc-link capacitor inverter," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 1, pp. 404–414, Jan 2014.
- [12] T. Worzyk, *Submarine Power Cables.* Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [13] C. Nordling and J. Österman, *Physics Handbook for Science and Engineering,* 8th ed. Studentlitteratur AB.
- [14] B. B. Larry Pryor, Rick Schlobohm. A comparison of aluminum vs. copper as used in electrical equipment. [Online]. Available: <http://apps.geindustrial.com/publibrary/checkout/Alum-Copper?TNR=White%20Papers%7CALum-Copper%7Cgeneric>
- [15] W. Thue, *Electrical Power Cable Engineering,* 2005.
- [16] P. Stuart, *Practical Guide to Polyvinyl Chloride.* Smithers Rapra, 2005.
- [17] J. Parmar. (2011) EHV/hv cable sheath earthing. [Online]. Available: <https://electricalnotes.wordpress.com/2011/12/21/ehvhv-cable-sheath-earthing/>
- [18] F. W. Grover, *Inductance calculations: Working Formulas and Tables.* Mineola, N.Y: Dover Publications inc, 2004.
- [19] A. Grauers, "Elteknik," 2002, 174.
- [20] Cogent. (2016) Typical data for sura@ m400-50a. [Online]. Available: <http://cogent-power.com/cms-data/downloads/m400-50a.pdf>
- [21] *Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2 \text{ kV}$) up to 30 kV ($U_m = 36 \text{ kV}$), ISO IEC Standard 60 502-1,* 2004.