

BACHELOROPPGAVE:

BO19E-55 Kraftuttak fra bølgekraftturbin

Vidar Stautland Stokka

Jonas Fotland Fænn

Gabriel Abildgaard

Omes Jawaid Bajwa

31.05.2019

Dokumentkontroll

<i>Rapportens tittel:</i> BO19E-55 Kraftuttak fra bølgekraftturbin	<i>Dato/Versjon</i> 31.05.2019
	<i>Rapportnummer:</i> BO19E-55
<i>Forfatter(e):</i> Vidar Stautland Stokka Jonas Fotland Fænn Gabriel Abildgaard Omes Jawaid Bajwa	<i>Studieretning:</i> HELK16
	<i>Antall sider m/vedlegg</i> 55
<i>Høgskolens veileder:</i> Reza Arghandeh	<i>Gradering:</i> Åpen
<i>Eventuelle Merknader:</i> Vi tillater at oppgaven kan publiseres.	

<i>Oppdragsgiver:</i> Waveco AS	<i>Oppdragsgivers referanse:</i> Inge Bakke
<i>Oppdragsgivers kontaktperson(er) (inkludert kontaktinformasjon):</i> Inge Bakke Telefon: +47 9951 9795 E-Post: ib@waveco.no Waveco AS N-6740 Selje, Norway	

Revisjon	Dato	Status	Utført av
0.1	20.05.2019	Første utkast	V.S + J.F
0.2	28.05.2019	Andre utkast	O.B + G.A
0.3	31.05.2019	Ferdig oppgave	V.S + J.F + O.B + G.A

Forord

Denne bachelorrapporten er skrevet våren 2019 som en avsluttende oppgave for linjen Elkraftteknikk ved HVL, campus Kronstad. Rapporten skal skrives om tema som er relevant til fagretningen, og har til hensikt å få anvendt kunnskaper fra tidligere semestre. I tillegg skal ytterligere kunnskap tilegnes i løpet av rapporten.

Problemstillingen for rapporten er gitt av firmaet Waveco AS, som ønsker en utredning av forskjellige konfigurasjoner for bølgekraftturbinen «Subwave». Oppgaven fra Waveco omhandler det elektriske kraftuttaket i turbinen og design av denne mekanismen.

Relevante fag fra studiet vi har brukt og tilegnet oss kunnskap i:

- ING101 (Teknologiledelse, økonomi og nyskapning)
- ING104 (Innføring i ingeniørfaglig yrkesøvelse og arbeidsmetoder)
- ELE114 (Elektriske maskiner)
- ELE119 (Kraftelektronikk)

Vi vil her benytte muligheten til å takke CEO Inge Bakke ved Waveco for en spennende oppgave, og underveis alltid vært tilgjengelig for spørsmål og samtaler. Vi vil også takke Vegard Åstebøl Larsen for et informativt besøk ved Stadt Towing Tank AS. Videre vil vi takke Reza Arghandeh og Lasse Sivertsen ved Høgskulen på Vestlandet for deres støtte og veiledning.

Sammendrag

Over de siste årene har det blitt forsket mye på forskjellige typer bølgekraftomformere. I denne rapporten har vi undersøkt den elektriske delen av en spesifikk bølgekraftsomformer. Målet er å utrede fordeler og ulemper mellom forskjellige typer generatorkonfigurasjoner som kan passe i denne bølgekraftomformeren, og gi et forslag for hvilken løsning som egner seg best. Hensikten med dette er å gi Waveco et overblikk over de forskjellige aspektene og vurderingskriteriene som ligger til grunn for utvikling av det elektriske systemet i en bølgekraftturbin. Vi har brukt eksisterende industri og teknologi som referanseramme og laget en resonerende rapport basert på litteratur som omhandler temaet.

Vi har avgrenset den oppgaven vi opprinnelig fikk utdelt, og velger derfor å fokusere på to forskjellige generatorkonfigurasjoner. I den første konfigurasjonen skal det være to generatorer med gir, i den andre skal disse være direkte-drevet.

Rapporten kan deles inn i to deler; teori og drøfting. I teoridelen legger vi til grunne den kunnskapen vi trenger for å danne oss et bilde av situasjonen og hvilken teknologi som eksisterer i dag. Videre bruker vi denne kunnskapen til å gjøre vurderinger i drøftingsdelen av rapporten.

Etter å ha lagt til grunn teori og grunnlag for hva som inngår i systemet, sammenligner vi i drøftingsdelen de aktuelle generatorene og konfigurasjonene. Mens vi sammenligner diskuterer vi de forskjellige fordelene og ulempene ved hver komponent i forhold til implementering i bølgekraftturbinen.

Vi konkluderer til slutt med at et generatorsystem for variabel hastighet med to direkte-drevne permanentmagnetiserte generatorer vil være den beste konfigurasjonen for bølgekraftturbinen.

Abstract

Over the recent years there has been a lot of research about different types of wave energy converters. In this thesis, we have examined the electrical system of a specific wave energy converter. The goal is to explain the advantages and disadvantages of different types of generator configurations that can fit in the wave energy converter, and provide a suggestion for which configuration suits best. The purpose of this is to give Wavenco an overview of the various aspects and assessment criteria that underlie the development of the electrical system in a wave energy converter. We have used existing industry and technology as a reference framework and made a resonant report based on literature that deals with the theme.

We have delimited the task we originally receive, and therefore chose to focus on two different generator configurations. One where there are two generators with gears, and one that has two generators that is directly driven.

The report can be divided into two parts; theory and discussion. In the theory part, we elaborate the knowledge that is needed to make a basic understanding of the system and technology that exists today. Furthermore, we use this knowledge to make assessments in the discussion section of the report.

Having added basic theory and basis for what is included in such a system, we proceed with a discussion section where we compare the different generators and configurations. While comparing, we discuss the various advantages and disadvantages of each component in terms of implementation in the wave energy converter.

In the end, we conclude that the ideal system for the wave energy converter will be a variable speed generator system with a directly-driven permanent magnet synchronous generator.

Innholdsliste

Dokumentkontroll	2
Forord.....	3
Sammendrag	4
Abstract.....	5
1 Innledning.....	8
1.1 Subwave.....	8
1.2 Waveco AS	9
1.3 Kravspesifikasjon	10
1.4 Problemstilling og avgrensning	11
1.5 Rapportens videre innhold.....	12
2 Metode	13
3 Generelt om bølgekraft.....	14
3.1 Potensiale.....	14
3.2 utfordringer	14
3.3 Krav for et bølgekraftverk.....	15
3.4 Kraftuttak.....	15
3.5 Bølgekraftsteknologi.....	16
3.5.1 Punktaborbator	16
3.5.2 Linjeabsorbator.....	17
3.5.3 Svingende vannsøyle.....	17
3.6 Mekanisk til elektrisk energi	18
4 Systemkomponenter	21
4.1 Generatorer	21
4.1.1 Synkrongenerator	21
4.1.2 Asynkrongenerator	23
4.1.3 Likestrømgenerator	26
4.2 Kraftelektronikk.....	27
4.2.1 Frekvensomformer	27
4.2.2 Energilagringssystem	29
4.3 Girsystem	30
4.3.1 Girkasse konfigurasjon.....	31
4.3.2 Dimensjonering av girkassen.....	32
4.4 Generatorsystemer.....	32
4.4.1 Systemer med fast hastighet.....	32

4.4.2	Systemer med variabel hastighet	35
4.4.3	Systemer med direkte drift	37
4.4.4	Sammenligning	41
4.5	Vurderingskriterier	42
4.5.1	Synkronisering	42
4.5.2	Reaktiv effekt.....	42
4.5.3	Nettforstyrrelser	43
4.5.4	Effektivitet	43
4.5.5	Kostnader	44
4.5.6	Vedlikehold og pålitelighet.....	44
4.5.8	Kontrollerbarhet og hastighetsområde	45
4.5.9	Miljø og plassering	45
5	Drøfting	46
5.1	Sammenligning.....	46
5.1.1	Generator	46
5.1.2	Gir	48
5.1.3	Frekvensomformer topologi.....	50
6	Konklusjon	52
	Referanser	53
	Figurliste.....	55

1 Innledning

I jakten på bærekraftige energikilder har mange sett til havet. Ifølge det internasjonale energibyrået IEA er potensialet på global basis for bølgekraft mellom 8000 og 80000 TWh/år. I forhold til Norges samlede vannkraftproduksjon er dette mellom 66,7 og 666,7 ganger mer.[1] IEA anslår også at havenergi totalt sett vil bidra med 51-144 TWh i år 2040, noe som er 0,4% av totalt generert elektrisitet.[2] Til tross for det store potensialet er bølgekraft en uutnyttet ressurs. Det kan derfor sies at bølgekraftverk ennå har til gode å vise at de kan bygges for å levere pålitelig og økonomisk levedyktig elektrisitet i stor skala.

Enheter som brukes til å utvinne og konvertere kraften fra bølger til elektrisk strøm kalles bølgekraftsomformere. Et stort antall bølgekraftsomformere har gjennom de seneste årene blitt designet over hele verden. Bølgekraftsomformere utvinner kraft fra bølgene med forskjellige metoder, og konverterer den mekaniske kraften til elektrisk kraft via et kraftuttak-system. Selv om de er ulike i design og størrelse er prinsippet om utvinning av energi ikke veldig ulik. Typiske design kan være for eksempel hydrauliske turbiner, roterende generatorer drevet av trykk eller direkte drevne generatorer.

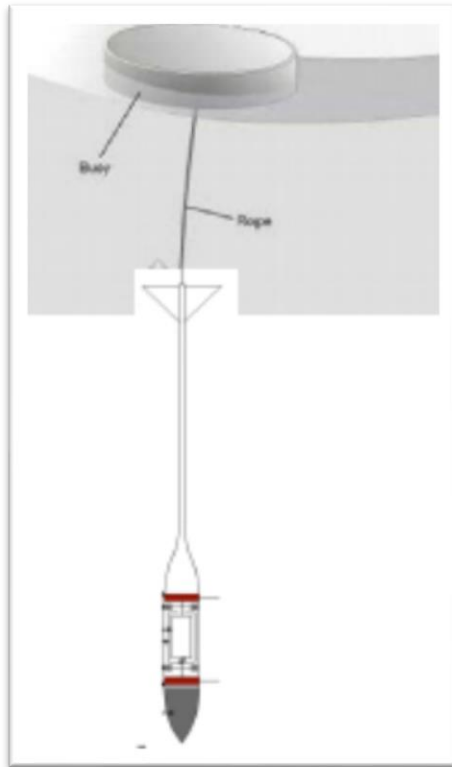
En av mange firma som ser potensialet som ligger i bølgekraft er Waveco AS. Waveco AS er et lite selskap som er dannet for nettopp å utvikle en type bølgekraftsturbin. Turbinen baserer seg på en kjent type bølgekraftsomformer som kalles punktabsorbator, men den store forskjellen er at den er utstyrt med roterende vinger.

Fokuset til Waveco har imidlertid vært på bremseanordning til turbinen. De har testet en prototype med bremses på vingene for å simulere en generator. Videre fokuserer de på det elektriske anlegget som turbinen trenger for å omgjøre rotasjonskraften til elektrisk strøm. Hensikten med denne avhandlingen er derfor å drøfte de forskjellige typene kraftuttak for «Subwave», og komme med forslag om et fullt elektrisk kraftuttak-system. En slik avhandling er interessant for å optimalisere energiutvinningen, og dermed også det kommersielle potensialet til konseptet.

1.1 Subwave

Subwave er en bølgekraftsturbin som skal ligge rundt hundre meter under havoverflaten. Tanken bak dette er å plassere turbinen der den er mest beskyttet fra været og eventuelt andre farer som kan potensielt være ødeleggende. Turbinen er festet i bøyer som flyter på

overflaten. De skal ligge flere samlet i et felt, men med nok avstand mellom slik at farkoster kan ferdes fritt mellom bøyene. Turbinen skal produsere energi ved hjelp av at den flytter seg opp og ned ved hjelp av bølgene. Turbinen har rotasjonsvinger som roterer hver sin vei for å holde seg stabil i vannet. Vingene konverterer den vertikale bevegelsesenergien til rotasjonsenergi, og er videre koblet til en generator som genererer strøm.



Figur 1 - Prinsippskisse Subwavekonsept



Figur 2 - Prototype Subwave

1.2 Waveco AS

Waveco AS er et aksjeselskap og består av seks aksjonærer. Inge Bakke er grunnleggeren av firmaet og opprettet dette 1. november i 2015. Firmaet er opprettet for å utvikle en bølgekraftturbin som senere er blitt kalt Subwave, som er Inge Bakke sin egen oppfinnelse. Inge Bakke eier 75% av alle aksjene i firmaet, og har patent på denne bølgekraftideen. Man finner Waveco AS i Selje, som ligger nordvest i Sogn og Fjordane.

Inge Bakke har utdanning innen geologi fra universitet i Oslo. Han har jobbet som geolog ved Norges geologiske undersøkelse, som foreleser i videregående skoler. I perioden 1999-2002 var Bakke ansatt på Andøya Rocket Range, nå kalt Andøya Space Center. Der var han prosjektleder for utviklingen av en lærebok i romteknologi som skulle brukes i Høyskoler. Han har også hatt sin egen virksomhet fra 1989 der han har drevet med utvikling av pedagogisk

materiale for skoler og allmennheten. I sine yngre dager jobbet Bakke som sjømann og som fisker.

1.3 Kravspesifikasjon

Waveco ønsker å få vurdert ulike alternativer for kraftuttak («Power Take-Off», PTO) fra sin bølgekraftturbin Subwave. Turbinen er ikke bygget enda, annet enn i liten skala (diameter 1 meter). Men vurderingen skal ta utgangspunkt i en fullskala turbin. Det vil si en turbin der vingenes sveipte areal har en diameter på 20 meter. Dette skal kunne gi en effektivitet (energy capture ratio) på 30% fra en bølgefront på 20 meters lengde. Basert på teoretiske beregninger i vedlagte rapport utført av dr. Karl Christian Strømsem[3], kan vi regne med et energiutbytte på 700 MWh per år i et kystnært bølgeklime utenfor kysten av Vestlandet (Bømlo). Det tilsvarer 80 kW per time året rundt. Men været er omskiftelig, slik at mesteparten av energien blir høstet i perioder med mye bølger og mye høyere effekt. Turbinens PTO må kunne håndtere dette. Basert på tabell 5-3, side 146, i vedlagte Sandiarapport[4] bør en bølgekraftomformer (wave energy converter, WEC) av denne størrelse ha en installert generatoreffekt på 300kW. Ved en utbygging av et kvadratisk felt bestående av 36 bøye/turbin-enheter regner Waveco å bygge 40 enheter, slik at de har mulighet til å erstatte enkeltturbiner som må hentes inn til service. Waveco har et stort behov for å få en forståelse for generatorkostnadene knyttet til en slik utbygging.

Som indikert i oppgaveteksten kan man tenke seg en rekke ulike PTO-løsninger. Waveco trenger hjelp til å vurdere hvilken løsning vi bør velge ut fra en vurdering som tar hensyn til:

- Kompleksitet
- Drift og vedlikehold
- Strømkvalitet
- Kostnader
- Generatortype
- Utfordringene med saltvannsmiljø
- Eventuelle andre forhold

1.4 Problemstilling og avgrensning

Prosjektet går ut på å drøfte de ulike måtene det elektriske kraftuttaket kan designes i bølgekraftsomformerer Subwave. Målet er å komme frem til en optimal løsning, med en helhetlig vurdering av hele løsningskonfigurasjonen. De forskjellige løsningene skal vurderes opp mot hverandre, og ikke minst mot en rekke andre sentrale vurderingskriterier som blant annet vedlikehold, kostnader og effektivitet.

I oppgaveteksten har vi fått presentert forslag til fire forskjellige skisser for mulige løsninger av designet. Vi har valgt å avgrense oppgaven og fokuser på to alternativ som vi kaller løsning 1 og løsning 2:

Løsning 1:

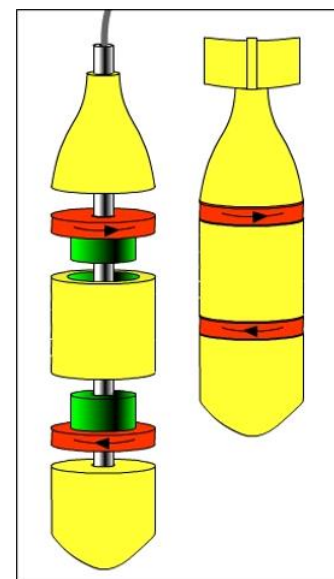
For denne løsningen har vi to rotasjonsringer som driver rotoren i hver sin generator. Dette forslaget skal ikke ha et girkassesystem, som betyr at generatorsystemet skal kun kjøres i direkte drift.

Løsning 2:

For denne løsning har det blitt foreslått å plassere to vanntette generatorer ved siden av turbinens sentrale aksling og la rotasjonsringene drive rotoren her ved hjelp av et girkassesystem.

Dermed har vi valgt å se bort ifra en ide med en generator med roterende rotor og stator. Dette tilfellet er meget interessant, men dessverre finnes det svært lite informasjon om konseptet og vi vil ha vanskeligheter med å presentere en helhetlig vurdering.

Den siste ideen vi har valgt vekk er en generator styrt av akkumulatortank med ventil på toppen, som skal produsere strøm ved hjelp av trykkforskjeller. Vi føler her at dette alternativet blir utenfor vårt fagfelt, og i tillegg ser vi for oss at oppgaven hadde blitt mye bredere enn den allerede er. Dette er på grunn av at dette systemet er veldig ulikt de tre andre, og vi hadde dermed måtte lagt frem en hel del mer komponenter og systemer.



Figur 3 - Subwaveturbinen

1.5 Rapportens videre innhold

Denne avhandlingen er delt opp i 6 kapitler: Innledning, Metode, Generelt om bølgekraft, Systemkomponenter, Diskusjon og Konklusjon.

I kapitlet Generelt om bølgekraft, vil vi presentere potensialet, utfordringene og eksisterende teknologi knyttet til et bølgekraftverk. Videre har vi satt opp noen vurderingskriterier som er viktig å diskutere i forhold til valg av et kraftuttak-system i en bølgekraftsomformer. Disse tar utgangspunkt i kravspesifikasjonen, samt ytterlige kriterier som vil være aktuelle for slike systemer.

I kapitlet om systemkomponenter vil vi belyse teorien bak de ulike komponentene som kan inngå i kraftuttaket for en bølgekraftsturbin. Vi har underveis bygget opp en kompetanse og en forståelse etter å ha lest om forskjellige turbiner som er sammenlignbare med Subwave, og deretter kommet frem til en del komponenter som er felles for de fleste systemene. Disse komponentene vil vi beskrive hver for seg før vi til slutt ser på de sammensatte systemene.

Til slutt vil vi drøfte de mest aktuelle systemene vi nevner i kapittel 4. Konklusjonen vil være preget av helheten i avhandlingen, men med tanke på hvilke vurderingskriterier som er viktigst vil vi ikke nødvendigvis konkludere med én løsning.

2 Metode

Rapporten vår bygger på kvantitativ og kvalitativ informasjon fra et mangfold av kilder. De fleste kildene er fra diverse bøker fra HVLS bibliotek, og databaser som «IEEE» og «ResearchGate». For tolkning av kvantitativ data, har vi tatt utgangspunkt i målinger fra rapporter som bygger på simulasjoner og fysiske tester av for eksempel vindmølleparker og forskjellige generatorer. For innhenting av kvalitativ data har vi vektlagt informasjon fra statlige institusjoner.

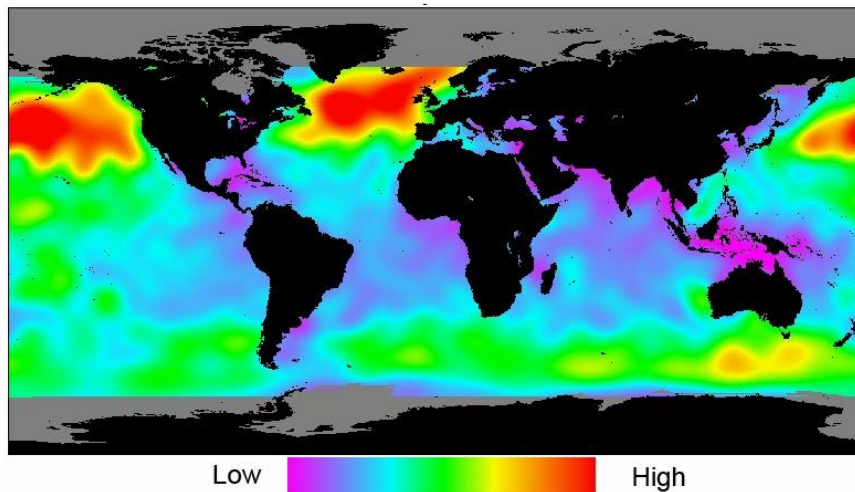
For innhenting av informasjon fra kilder utenfor de statlige institusjonene, har vi prøvd å være så kildekritisk som mulig. For å forsikre oss om troverdigheten til informasjonen vi bruker, har vi sammenlignet forskjellige kilder. Ved kilder som ikke viser konsensus, har vi valgt å vektlegge de nyeste artiklene om temaet.

Ettersom vår problemstilling tar utgangspunkt i et turbinkonsept som enda ikke eksisterer, vil kildene alene ikke kunne gi et endelig svar. Rapporten er derfor en sum av tolkninger og refleksjoner av de kildene vi har brukt. For å kategorisere og definere oppgavens natur, vil vi kalle den for en resonnerende litteraturstudie.

3 Generelt om bølgekraft

3.1 Potensiale

Bølgekraft har et enormt energipotensial sammenlignet med andre fornybare energiresurser. Energipotensialet er ca. fem ganger større enn for både solenergi og vindenergi.[5] Det internasjonale energibyrået IEA har som sagt anslått at man kan utvinne 8000 – 80000 TWh/år om man ser på hele havet.[1] Selv om bare en brøkdel av dette kan utnyttes, vil bølgekraft kunne gi et betydelig bidrag til den globale strømforsyningen. Ifølge en studie gjort i Storbritannia fant de ut at bølgeenergi er svært sesongavhengig, og det er opptil syv ganger mer energi i bølgene i vintermånedene sammenlignet med sommermånedene.[6] Dette er positivt da energibehovet er størst på vinteren.



Figur 4 - Verdenskart for energipotensialet over et år[7]

3.2 utfordringer

Bølgekraftomformere er normalt dimensjonert for å fange opp energien i de moderate bølgene. I stormer eller orkaner, som typisk inntreffer om høsten og vinteren i Norge, har bølgene mye mer energi. Dette byr på store utfordringer da anleggene må kunne håndtere disse.

Bølger oppfører seg med en langsom mekanisk bevegelse. Disse oppstår i ujevne og pulserende intervaller. utfordringen med dette er at man må absorbere denne effekten, og videre konvertere den i ett eller flere trinn til et sluttprodukt som for eksempel strøm.

Energien i en bølge forplanter seg gjennom fire faser; bølgetopp, nedgående bevegelse, bølgedal og oppadstigende bevegelse.[1] Dette er en utfordring fordi det skal mye til å kunne konstruere en turbin som klarer å fange opp energien fra alle fire fasene. Siden bølgene også varierer i størrelse og frekvens, vil man også få et ujevnt pådrag på rotor.

En annen utfordring med et bølgekraftverk er kostnadene for vedlikeholdsarbeidet som blir gjort offshore. Offshore arbeid er dyrt da lokasjonene gjerne er fjerntliggende, involverer menneskelig risiko, dyrt utstyr og dyre fartøy.

3.3 Krav for et bølgekraftverk

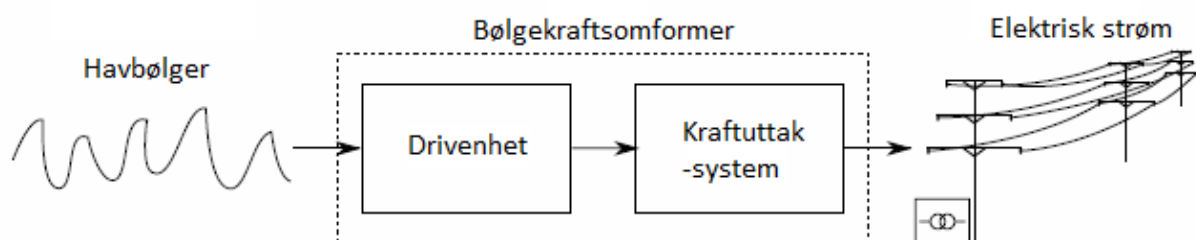
For at et bølgekraftverk skal være hensiktsmessig å bygge, kan en sette opp tre enkle krav. Det er tre opplagte kriterier, men det har vist seg ved flere anledninger at de ikke er like enkle å realisere[8]:

1. Anlegget må være tilfredsstillende rimelig å bygge, installere og vedlikeholde.
2. Anlegget må produsere nok energi.
3. Anlegget må unngå å havarere i stormer og orkaner.

3.4 Kraftuttak

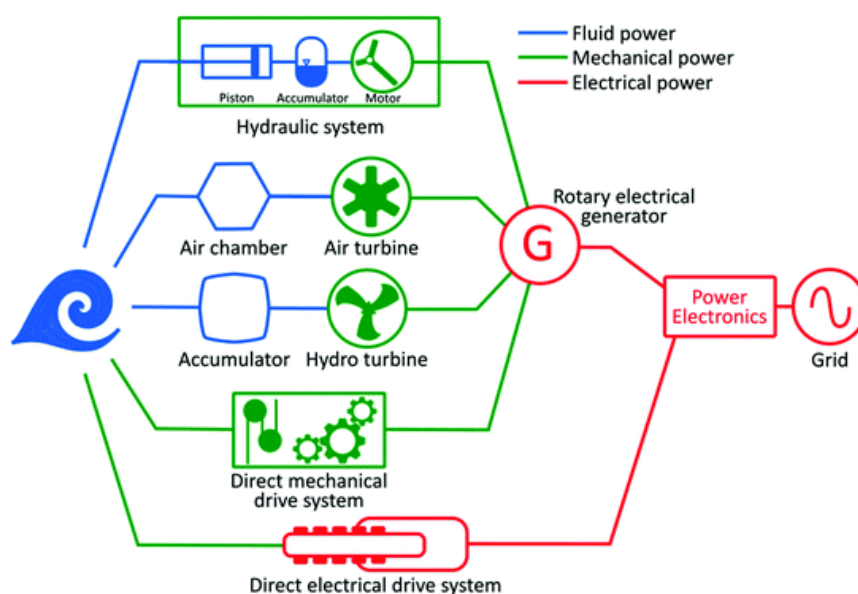
Kraftuttaket (Power Take-Off) til en bølgekraftomformer er definert som mekanismen som konverterer den mekaniske kraften absorbert av drivenheten til brukbar elektrisitet. Drivenheten kan for eksempel være et lukket kammer for en oscillerende vannkolonne eller en punktabsorberende bøye i et lineærgenerator-system.

Den mekaniske kraften som blir utvunnet fra bølger kjennetegnet lav hastighet og høye krefter med varierende form og retning. Disse kjennetegnene gjør at mange bølgekraftsomformere ikke kan benytte seg av konvensjonelle roterende generatorer. Dette blir i mange konsept typisk løst ved girsystem eller energilagringssystem.[2]



Figur 5 - "Wave-to-wire" diagram

PTO-systemet er av stor betydning i henhold til hvor effektiv den absorberte bølgekraften er konvertert til elektrisitet, men bidrar også til massen, størrelsen og den strukturelle dynamikken av bølgekraftomformeren. Ved å ha denne direkte innflytelsen på bølgekraftomformeren har PTO-systemet også direkte innvirkning på den planlagte energikostnaden.[9]



Figur 6 - Forskjellige utførelser av bølgekraftsomformere

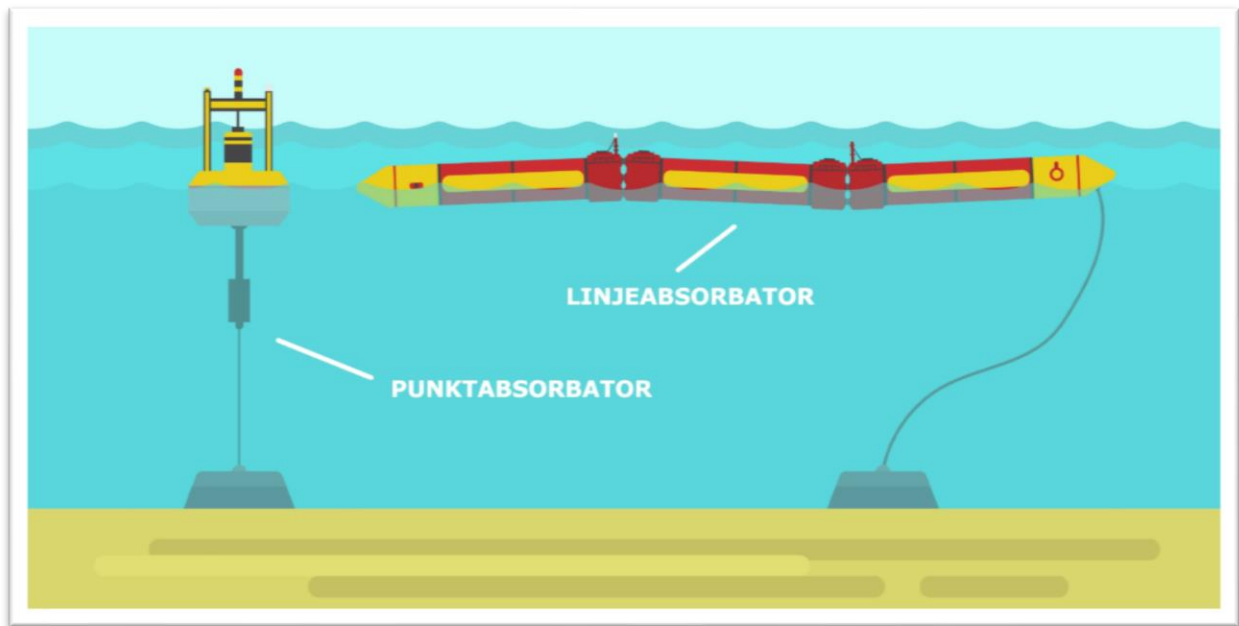
3.5 Bølgekraftsteknologi

Det finnes flere måter å utvinne energien til bølgene på. Man kan skille teknologiene med å kategorisere dem i bunnfaste og flytende, der de har en rekke underkategorier. Siden Subwave er et flytende system, vil vi her liste opp de vanligste eksemplene på eksisterende flytende turbinteknologi.

3.5.1 Punktabsorbator

Et punktabsorbator-system er et bølgekraftanlegg der kraftuttaket kan konstrueres på forskjellige måter, men bygger på de samme prinsippene.[10] Dette vertikale søyleformede systemet vil bestå av en bøye som flyter opp og ned i lag med bølgene og absorberer energi fra bølgenes bevegelser fra vannoverflaten. Videre under bøyen vil turbinen være plassert, og til slutt koblet til en forankring i bunn (eller henge med ballast i bunn). Punktabsorbatoren vil da med dette kabelspennet skape en pumpebevegelse og et stempel vil drive turbinen på grunn av bølgene. Siden selve absorbatoren er relativt liten, vil ikke bølgens retning påvirke

denne enheten nevneverdig. Subwave har store likhetstrekk med dette prinsippet der turbinen vil henge fritt med ballast i bunn.



Figur 7 - Illustrasjon av punkt- og linje-absorbator med forankring i bunn

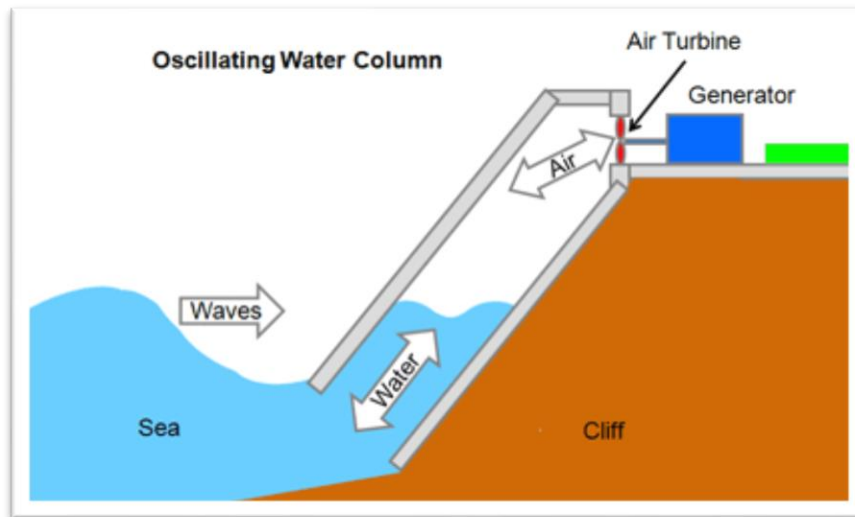
3.5.2 Linjeabsorbator

Et linjeabsorbator-system er et bølgekraftanlegg bestående av flere ledd av stålseksjoner som er koblet sammen og flyter halvveis nedsenket i havoverflaten. Når bølgene påvirker systemet rir disse stålseksjonene på bølgene og leddene vil knekke seg etter bølgene. I disse leddene finnes det stempler som driver væske gjennom en motor, som igjen driver en generator.[10] I hver av endene er det koblet en kabel som både sender strømmen videre til land eller trafostasjon, samtidig som kabelen kan fungere som forankring. Typisk eksempel er illustrert i figuren over til høyre.

3.5.3 Svingende vannsøyle

Et svingende vannsøyle-system er et bølgekraftanlegg som blir bygget langs kysten med land eller på flåter. Anlegget består typisk av en vertikal eller en skråstilt vertikal sjakt med åpning på bunnen. Når en bølge inntreffer denne sjakten vil vannet heves og senkes i en kontinuerlig syklus. Det varierende vannivået vil fungere som et stempel som komprimerer luften på toppen av sjakten. Dette skaper et trykk som driver turbinen på toppen rundt, der en generator produserer strøm. For dette konseptet er turbinen spesialdesignet for at den skal

kunne gå samme vei, uavhengig av hvilke retninger luftstempelet går. Dette gjør at energi blir produsert både når vannet beveger seg opp og når det beveger seg ned. En bakside med dette konseptet er at turbinen er mindre effektiv enn en vanlig turbin, i tillegg lager anlegget mye støy under drift.[10]



Figur 8 - Illustrasjon av svingende vannsøyle

3.6 Mekanisk til elektrisk energi

Havbølger skapes av vind som passerer overflaten til havet. Høyere bølger vil skape mer energi enn lave bølger. Størrelsen på bølgene vil være proporsjonal med varigheten og hastigheten til vinden. Dette resulterer i deformasjon og vekst av bølgene. For å kunne estimere energipotensialet som ligger i bølgene må vi vite høyden og bølgeperioden. Høyden til en bølge blir målt fra bølgebunn til bølgetopp og bølgeperioden er målt fra bølgetopp til bølgetopp. Energien til bølgene kan da beregnes med følgende formel[11]:

$$P = \frac{\rho_{vann} \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T}{32 \cdot \pi} \quad (1)$$

- P = effekt for bølgefronten. [W/m]
- g = tyngdeakslerasjonen [m/s²]
- ρ_{vann} = massetettheten til vann [kg/m³]
- H = bølgehøyden [m]
- T = bølgeperioden [s]

Subwave turbinen har mange likhetstrekk med en vindturbin. Begge turbinene har rotasjonsvinger som får generatoren til å generere strøm. Hovedforskjellen mellom disse turbinene er miljøet de opererer i. Da vindturbiner benytter seg av vind for å få rotasjonsvingene til å rotere, benytter Subwave seg av vann. Vi antar derfor at man kan sette opp de same grunnleggende formlene for kinetisk energi og for effekt, der det er tettheten til mediumet som er forskjellige.

Bølgene er dem som vil få Subwaveturbinen til å bevege seg opp og ned. Turbinen vil først ha en fart på vei oppover sammen med bølgen, og vil få en fart på vei nedover sammen med bølgen. Subwave er konstruert slik at rotasjonsvingene ikke endrer retning, dette gjør at rotasjonshastigheten vil ha det samme fortegnet hele veien. Det er vannet rundt turbinen som får rotasjonsvingene til å bevege seg, vannet vil da miste en del av sin kinetiske energi, da denne energien blir konvertert til rotasjonsenergi. Siden det totale volumet til vannet vil forbli tilnærmet konstant, må det ekspandere når det krysser rotasjonsvingene. Videre kan man si at volumet som rotasjonsvingene fanger opp vil være proporsjonalt med vingenes tverrsnitts areal og at farten turbinen beveger seg med vil være vinkelrett på rotoren[11]:

$$\frac{Q}{t} = A \cdot v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v \quad (2)$$

- $Q = \text{volumet til vann [m}^3\text{]}$
- $A = \text{arealet for rotasjonsvingene [m}^2\text{]}$
- $v = \text{turbinhastighet i y-retning [m/s]}$
- $d = \text{diametereen for rotasjonsvingene [m]}$
- $t = \text{tiden [s]}$

Videre vil den kinetiske energien for denne mengden vann bli gitt ved formelen[11]:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{vann}} \cdot Q \cdot v^2 = \frac{\pi}{8} \cdot d^2 \cdot v^3 \cdot t \quad (3)$$

- $E = \text{energi [J]}$
- $\rho_{\text{vann}} = \text{masse tettheten til vann [kg/m}^3\text{]}$
- $t = \text{tiden [s]}$
- $m = \text{masse [kg]}$
- $Q = \text{volumet til vann [m}^3\text{]}$
- $v = \text{fart [m/s]}$
- $d = \text{diametereen for rotasjonsvingene [m]}$

Effekten vil bli gitt av energi per tidsenhet, effekten blir da gitt ved formelen[11]:

$$P = \frac{\pi}{8} \cdot \rho_{\text{vann}} \cdot d^2 \cdot v^3 \quad (4)$$

- $P = \text{effekt [W]}$
- $v = \text{fart [m/s]}$
- $\rho_{\text{vann}} = \text{masse tettheten til vann [kg/m}^3\text{]}$
- $d = \text{diametereen for rotasjonsvingene [m]}$

Disse ligningene viser at farten turbinen vil ligge på, er den viktigste faktoren som påvirker effektuttaket. Dobler hastigheten seg vil den kinetiske energien firedoble seg, samtidig som dobbelt så mye vann vil gå gjennom rotasjonsvingene. Dette resulterer i at effektuttaket vil øke hele 8 ganger.

Ligning (4) antar at turbinen vil klare å fange opp all den kinetiske energien som vannet fører med seg. I praksis vil dette ikke være tilfelle da der er en rekke faktorer som fører til at noe av energien vil gå tapt. Noe av vannet vil ikke være med å øke hastigheten til rotasjonsvingene, da det vil bli skubbet vekk og avbøyet. Videre vil der være tap i energioverføringen for komponentene som turbinen er bygget opp av. Dette gjelder generatoren, girsystemet, frekvensomformerer og andre eventuelle komponenter som befinner seg i turbinen. Vi kan modifisere ligning (4) og vi får da formelen for det elektriske effektuttaket[11]:

$$P_e = \frac{\pi}{8} \cdot \rho_{vann} \cdot d^2 \cdot v^3 \cdot \eta \quad (5)$$

- P = effekt [W]
- ρ_{vann} = massetettheten til vann [kg/ m³]
- η = virkningsgrad for turbinen
- v = fart [m/s]
- d = diameteren for rotasjonsvingene [m]

4 Systemkomponenter

For å opparbeide ett godt og oversiktlig grunnlag av teknologien som trengs for å diskutere de forskjellige aspektene ved kraftuttaket til en bølgekraftturbin, vil vi her presentere de viktigste komponentene og systemene som inngår i en turbin med varierende pådrag.

Med bakgrunn i erfaringer fra bølge- og vindkraft-teknologi vil vi her se at blant annet generator, frekvensomformer og girsystem er essensielle komponenter. Dette kapitlet vil gi den nødvendige forståelsen av dette. Vi vil derfor presentere virkemåte, vanlige bruksområder og om hvorvidt systemkomponentene på fordelaktig vis kan implementeres i Subwave. Kapitlet vil i likhet med kravspesifikasjon og det kommende kapitlet om vurderingskriterier være direkte bundet til drøftingsdelen av oppgaven da vi vil bruke informasjonen som er samlet her til drøfting av de aktuelle løsningene.

4.1 Generatorer

Siden synkron- og asynkron-generatoren er de to viktigste alternatorene i industrien vil det som et utgangspunkt være nærliggende å beskrive de viktigste egenskapene til disse. Forståelse av disse er dessuten en forutsetning for å kunne forstå funksjonen av en bølgekraftsomformer. De to maskinene er i prinsippet ikke veldig ulike, da de begge har et standard design i forhold til trefaseviklingene til stator. En trefasemaskin kan bygges som en synkron eller asynkronmaskin, og med tanke på rotoren har begge maskiner den samme grunnleggende konstruksjonen. Forskjellen ligger i hvordan det elektriske feltet i rotoren skapes.

Foruten om de to vekselstrømgeneratorene som er nevnt over, finnes det også likestrømgeneratorer som kan være aktuelle. Vi vil dermed også inkludere denne type generator, og inkludere teori på like linje med de andre.

4.1.1 Synkrongenerator

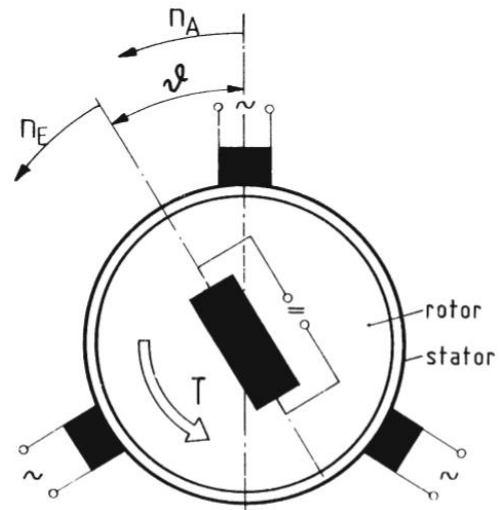
I en synkronmaskin blir rotoren vanligvis eksitert av en likestrøm ved hjelp av sleperinger. En variabel spenning blir enten; generert (generator drift) i- eller tilført (motordrift) til statorviklingene.

I motordrift vil statoren benytte seg av en vekselspanning for å rotere rotoren, i generatordrift vil det omvendte være tilfellet. Da vil rotasjonen til rotoren indusere en spenning i statorviklingene. I begge tilfeller vil statoren mest sannsynlig være koblet til et strømmnett på enten 50 eller 60 Hz. Hvis statoren er direktekoblet til nettet, må rotoren rotere i samme hastighet som nettfrekvensen for at maskinen skal kunne opprettholde synkronisering. Hastigheten til en synkronmaskin er avhengig av nettfrekvensen og antall polpar. Rotorhastigheten til en synkronmaskin er gitt ved formelen:

$$n_{syn} = \frac{f \cdot 60}{p}$$

- f = nettfrekvensen [Hz]
- p = antall polpar
- n_{syn} = rotasjonshastigheten [rpm]

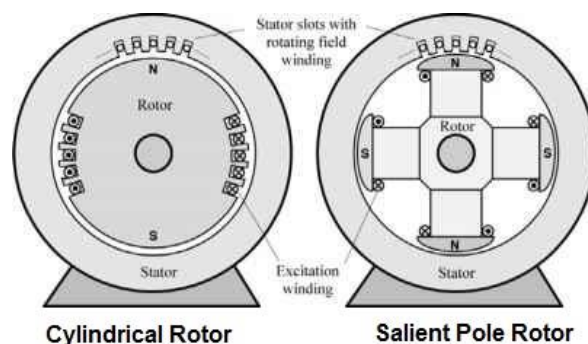
Hvis vi tar for oss en firepolet synkronmaskin vil denne ha et turtall på 1800 rpm i USA der nettet har en frekvens på 60 Hz. I Europa, der nettfrekvensen er 50 Hz, vil den samme synkronmaskinen ha et turtall på 1500 rpm.



Figur 9 - Synkrongenerator

Ved store kraftverk benyttes stort sett alltid trefase synkrongeneratorer. Den brukes også ofte som en fasekompensator der synkronmaskinen sender reaktiv effekt inn i nettet.[12]

Konstruksjonen av rotoren til en synkronmaskin har mye å si for hvilken type bruk og hastighet den passer best til. I vindturbiner brukes for eksempel som regel synkrongeneratorer med «salient-pole» rotor.



Figur 10 - Konstruksjonen av rotor i synkronmaskinen

En synkrongenerator kan bygges med en sylindrerformet eller *salient-pole* rotor. En maskin med en sylindrerformet rotor brukes ofte i dampturbiner der rotoren roterer med en hastighet mellom 1000 til 3000 rpm. Dette gjøres mulig ved å bygge synkronmaskinen med få polpar (gjerne 1 eller 2) og liten rotordiameter. En slik konstruksjon gjør synkronmaskinen stabil ved høye hastigheter. For lavere hastigheter er en *salient-pole* rotor mer vanlig. I en slik konstruksjon har rotoren separerte poler og kan derfor ha flere polpar, i motsetning til sylindrerrotoren der polene ligger rundt samme sylindrer. I tillegg til flere polpar har en *salient-rotor* også en større diameter, og er derfor mer egnet til lavere hastigheter. En slik synkronmaskin er veldig vanlig i vannturbiner som kjører ved 60 til 750 rpm.[13]

Som nevnt tidligere blir rotoren til synkrongeneratoren vanligvis eksitert ved hjelp av en likestrøm, men i løpet av de siste årene har produsenter begynt å benytte seg av en annen eksiteringsmetode. Denne metoden bruker permanentmagneter til å eksitere rotoren. Slike generatorer kalles for permanentmagnetiserte synkrongeneratorer (PMSG) og blir ofte brukt i vindkraftindustrien. De trenger ingen separat eksitasjon, så rotorens eksiteringstap – ca. 30% av totalt generatortap – elimineres.[14] Dette gir høy effektetthet og liten størrelse med høy effektivitet i alle hastigheter, og gir maksimal årlig energiproduksjon med lavest levetidskostnad.[14] Generatorer som benytter permanentmagneter krever ikke en likestrømforsyning for å generere magnetfeltet, og de har heller ikke sleperinger og kontaktbørster som krever vedlikehold. Denne maskinen vil komme igjen i slutten av kapitlet da vi legger frem teorien om de forskjellige generatorsystemene.

4.1.2 Asynkrongenerator

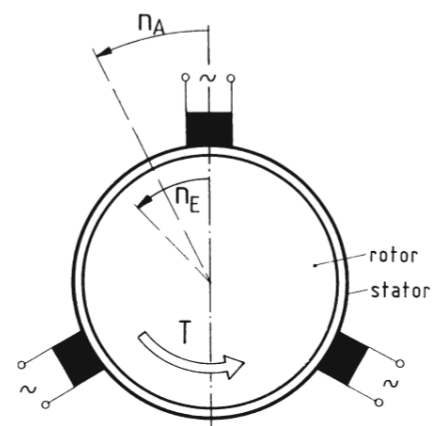
Asynkronmaskinen, også kjent som induksjonsmaskinen, er en elektrisk vekselstrømmaskin som i all hovedsak består av en fast og en roterende del, henholdsvis stator og rotor. Statoren består av en magnet med viklinger som magnetiseres eksternt. Rotoren består gjerne av en kortsluttet magnetisert leder, eller flere sleperinger. Navnet asynkronmaskin kommer av at rotoren går med et asynkront turtall med dreiefeltet fra statoren.

En asynkronmaskin kan brukes som en motor eller generator. Opprinnelig er maskinen bygget som en motor, og i dag går det omtrent en tredjedel av verdens kraftforbruk til drift av asynkronmotorer som for eksempel pumper, ventilatorer, kompressorer og som maskiner i fabrikker. I tillegg til å være en hyppig brukt motor, blir den også ofte brukt i generatordrift.

Det som skiller en slik maskin i motordrift fra å gå i generatordrift, er den relative hastigheten mellom det roterende magnetfeltet til stator, og rotor. For en firepolet asynkronmaskin i generatordrift, må rotoren rotere med en hastighet over 1500 omdreininger i minuttet. Den synkrone hastigheten til rotoren i en asynkrongenerator, er avhengig av nettfrekvensen og antall polpar:

$$n_{syn} = \frac{f \cdot 60}{p}$$

- f = nettfrekvensen [Hz]
- p = antall polpar
- n_{syn} = rotasjonshastigheten [rpm]



Figur 11 - Asynkrongenerator

For at en firepolet asynkrongenerator skal oppnå en hastighet på 1500 rpm må nettfrekvensen altså være 50 Hz.

I motordrift vil den mekaniske rotorhastigheten være et par prosent under denne verdien, og i generatordrift vil den være over. Dette er på grunn av slip, som vi kan regne ut ved:

$$s = \frac{n_{syn} - n_{mech}}{n_{syn}}$$

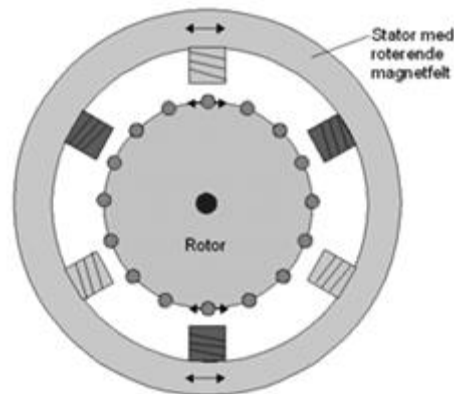
Der den mekaniske rotorhastigheten er:

$$n_{mech} = n_{syn}(1 - s)$$

En asynkrongenerator blir ofte valgt på grunn av sin pålitelighet.[15] Sammenlignet med andre generatortyper, er den også billigere. Den er derfor vanlig å se i vindmøller og småkraftverk. I småkraftverk under cirka 5 MVA benyttes slike generatorer under forutsetning av at de er tilknyttet et nett for å hente sin reaktive effekt.[15]

I motordrift skal det roterende magnetfeltet i stator rotere den kortsluttede rotoren. For at asynkronmaskinen skal være selvstartende, er rotoren som oftest formet som et «bur» av ledere. «Buret» består av et bestemt antall kobberledere som går parallelt med motorens aksling. Ringer i hver ende av buret sørger for å kortslutte den magnetiserte rotoren. Når det roterende magnetfeltet til statoren påvirker rotoren, vil det indusere et magnetfelt i rotoren.

Selve rotasjonen av rotorakslingen vil oppstå når magnetfeltene til stator og rotor påvirker hverandre. Maskinen vil være i motordrift så lenge rotoren roterer saktere enn magnetfeltet til statoren. For en motor ved full last ligger effektiviteten som oftest mellom 85%-97%. [13]



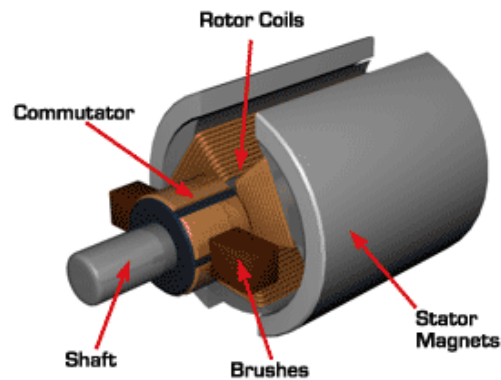
Figur 12 - Prinsippkisse trefase kortslutningsmotor

Hvis rotoren i en asynkronmotor roterer raskere enn magnetfeltet til statoren, vil motoren levere strøm til nettet, og vil da fungere som en generator. Denne type generator tillater en viss grad av varierende hastighet. Vindturbiner som ofte opplever plutselige vindpådrag er et eksempel på hvor en asynkrongenerator kan komme til nytte. Ved å utstyre generatoren med en variabel rotorresistans eller en variabel rotorspenning, kan turtallet avvike opp til 30% fra synkron hastighet. [13] Ved kraftstasjoner eller kraftanlegg blir derfor asynkronmotorer ofte brukt som en generator ved varierende energikilder.

For å kjøre en asynkrongenerator mest mulig effektiv ved varierende turbin-hastigheter, må rotoren kunne operere med en variabel rotasjonshastighet. En løsning på dette, er å koble stator direkte til nettet, og rotor til en trefase frekvensomformer ved hjelp av en slepering. Dette kalles for en dobbeltmatet asynkronmaskin (DFIG). Navnet dobbeltmatet kommer av at både rotor og stator blir matet med en vekselspenning. Vi vil komme tilbake til denne maskinen i kapittel 4.4 som handler om de forskjellige typene system av generatorer, da maskinen går under kategorien «Variabel hastighetssystem».

4.1.3 Likestrømgenerator

En likestrømgenerator er en likestrømmaskin i generatordrift. Maskinen blir som oftest brukt som en motor men kan også brukes som en generator. Denne type generator har i prinsippet en veldig enkel konstruksjon og deler fellestrekk med de fleste andre generatortyper som eksisterer på markedet.



Figur 13 - Utforming og komponenter i en konvensjonell likestrømmaskin

En likestrømgenerator har i prinsippet en lik konstruksjon som vekselstrømgeneratoren; en fast stator og roterende rotor. Det som i all hovedsak skiller likestrømgeneratoren fra vekselstrømgeneratoren er mekanismen som likeretter strømmen til likestrøm. Denne mekanismen utføres av kommutatoren. Dette er en svært viktig del av rotoren, og uten denne ville ikke strømmen kunne likerettes.

Over (figur 13) kan vi se et bilde av en generisk likestrømgenerator. Kommutatoren er den minste sylinderveformede trommelen plassert til venstre på rotoren. På kommutatoren kan vi se segmenter av kobber (kobberlamell) plassert rundt hele trommelen. Hver kobberlamell er tilknyttet rotorens viklinger. For å bringe strømmen ut til den eksterne kretsen plasseres to børster i kontakt med kommutatoren. Det er her selve likerettingen foregår, under samspillet mellom kobberlamellene på kommutatoren og børstene.[12]

Tradisjonelt sett er likestrømmaskiner bygget med børster for å videreføre likestrøm. Problemet med dette er at børstene slites ut og over tid vil børstene legge fra seg et belegg på kommutatoren, som vil føre til mer motstand.[16] For å unngå dette problemet kan en benytte seg av en børsteløs likestrømmaskin (BLDCG).

I en BLDC er rotoren permanentmagneter som roterer rundt en statorkjerne med vinklinger. Her foregår kommuteringen ved hjelp av en sensor på enden av statoren. Denne sensoren bestemmer hvilken fasevikling som leder strøm. Med en slik konstruksjon unngår en friksjon og kostnader ved vedlikehold. Uten børster forlenges levetiden. Ved å droppe børstene vil levetiden til maskinen forlenges, og levetiden vil da hovedsakelig være avhengig av eventuelle lager for rotasjon (kulelager). I tillegg kan nedkjøling foregå uten konveksjon (luftstrømmer). Dette betyr at de interne komponentene til maskinen kan isoleres fra omgivelsene og nedkjøles kun ved hjelp av konduksjon.[12]

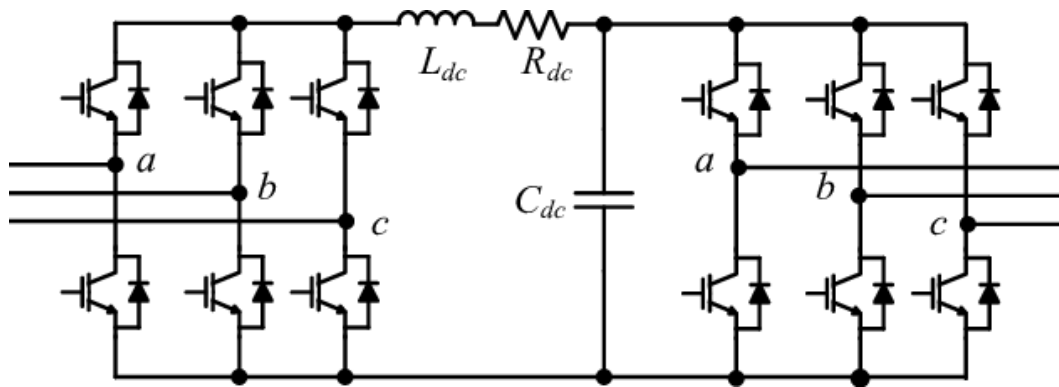
Det finnes i dag mange forskjellige likestrømgeneratorer for forskjellig bruk. Uansett, blir stort sett vekselstrømgeneratoren brukt for å mate nettet. Dette kommer av de økonomiske ulempene ved å produsere likestrøm og derav omforme denne til vekselstrøm. Ved produksjon av vekselstrøm på en stor skala vil derfor vekselstrømgeneratoren åpenbart være et mer økonomisk valg.[17]

4.2 Kraftelektronikk

Krafterlektronikk er et eget fagfelt som har åpnet opp for generatorsystem som tidligere ikke var mulig. I dette delkapittelet går vi inn på hva en frekvensomformer er og betydningen av denne komponenten. I tillegg vil vi nevne litt om batterilagringssystem. Vi vil ikke gå dypt inn på dem, men det er viktig med en grunnleggende forståelse for hva disse komponentene kan brukes til.

4.2.1 Frekvensomformer

Ved hjelp av en frekvensomformer kan man benytte seg av lavhastighetsgeneratorer. Dette gjør det mulig å la generatoren kjøre på en mye lavere frekvens, og deretter konverterer frekvensen opp til nettfrekvensen. En frekvensomformer er et apparat som omformer vekselstrøm med én frekvens til strøm med en ny frekvens. Det er viktig å få en viss forståelse på hvordan de fungerer og hvorfor de er aktuelle når det kommer til valg av generatorsystem.



Figur 14 - Back-to-back frekvensomformer

Over kan man se et bilde av en typisk (back to back) frekvensomformer. Frekvensomformere er i dag typisk en statisk omformer, bygd opp av en likeretter sammenkoblet med en vekselretter. Likeretteren er et apparat som omformer vekselstrøm til likestrøm, samtidig som vekselretteren omformer likestrøm til vekselstrøm.[18]

Frekvensomformeren er basert på bruken av halvlederkomponenter. Halvlederkomponentene har til felles at de bare slipper strøm igjennom i en retning av gangen. Disse blir med jevne mellomrom satt i forskjellige tilstander, der de enten blir elektrisk ledende eller ikke-ledende for strømgjennomgang. Nettopp dette gjør at de kan fungere som brytere. Siden disse komponentene ikke krever noen mekanisk prosess, er brytereviden veldig rask og skjer innenfor mikrosekunder.[19]

En diode er et eksempel på en slik halvlederkomponent, da disse kontinuerlig leder strømmen i en retning og blokkerer strømmen i motsatt retning. Dette er den enkleste halvlederkomponenten vi har, og er ikke styrbar slik som andre halvlederkomponenter er. Diodene kan heller ikke utsettes for større krefter og spiller derfor ikke noen rolle i kraftelektronikken når det kommer til størrelsen vi er ute etter.

Som nevnt tidligere finnes det halvlederkomponenter som kan styres, et eksempel på dette er tyristoren.[20] Denne gjør det mulig å bestemme tiden for konduktivitet, denne prosessen kalles «tenning». Tyristorer kan brukes for forskjellige formål og disse blir da produsert i forskjellige typer med forskjellige kontrollanordninger. Tyristoren er en halvlederkomponent som har muliggjort å konvertere frekvensen uten store tap, selv for effekter i megawatt-skala. Frekvensomformerne til eldre vindturbiner var basert på tyristorer, men disse krevde reaktiv effekt fra nettet. Dette medførte at kompensasjonsanordninger ble nødvendige.

For å kontrollere harmonien til tyristorene, som man måtte for å kunne mate strømmen ut på nettet, ble det nødvendig å ta i bruk spesifikke filtre for å håndtere problemet. Problemer med harmonien var et større problem tidligere, da disse omformerne opererte i 6-puls modus. Antall pulser bestemmes av overgangene fra en halvlederkomponent til en annen innen én periode. Dette er en viktig egenskap for statiske frekvensomformere.

De moderne frekvensomformerne kan i dag operere med en 12-puls krets i et tre fase system, som gir en mye bedre tilnærming av sinusformen på vekselstrømmen og som i stor grad utelukker harmoniske feil.[13]

Transistorer er den mest nylige utviklingen innen statiske frekvensomformere. Transistorene krever nesten ingen reaktiv effekt og har bedre bryteregenskaper enn det tyristoren har. Insulated gate bipolar transistor (IGBT) har nesten erstattet alle de andre halvlederkomponentene som har vært i bruk i tidligere frekvensomformere.

Uavhengig av hvilke halvlederkomponenter som brukes, er frekvensomformere implementert i forskjellige system. Noen systemer krever større frekvensomformere, da noen systemer krever at all strømmen må mates igjennom mens andre systemer bare trenger å mate noe av strømmen igjennom. Dette vil vi komme tilbake til i kapittel 4.4, som omhandler generatorsystemer. Vi vil ikke beskrive noen av de forskjellige omformerne som finnes på markedet, men vi vil se på noen sammenligninger mellom de vanligste i drøftingsdelen av oppgaven.

4.2.2 Energilagringssystem

Kraften som produseres fra en bølgekraftomformer er periodisk og variabel, noe som igjen fører til at store variasjoner i utgangseffekten på generatorsiden oppstår. Havbølger varierer vanligvis fra ett til tjue sekunder, og uten noen form for energilagring eller strømutjevning vil effektuttaket fra enheten vise samme variasjon over denne tidsperioden.[21]

Det er dermed flere grunner til at turbinen bør levere jevn strøm til nettet. Fra produsentens perspektiv; en høy effekttopp sammenlignet med gjennomsnittlig effekt, ville gi en dårlig utnyttelse av den installerte konverteringen og overføringskapasitet. I tillegg, med det økende bidraget fra distribuert generering, vil det bli mer sannsynlig at nettet blir forstyrret og kan føre til ustabil frekvens og spenningsvariasjoner. Altså en storskala integrering av bølgeenergi

eller andre fornybar-baserte ressurser til nettet vil kreve utjevning av effekten for å gjøre forstyrrelsen minimal.

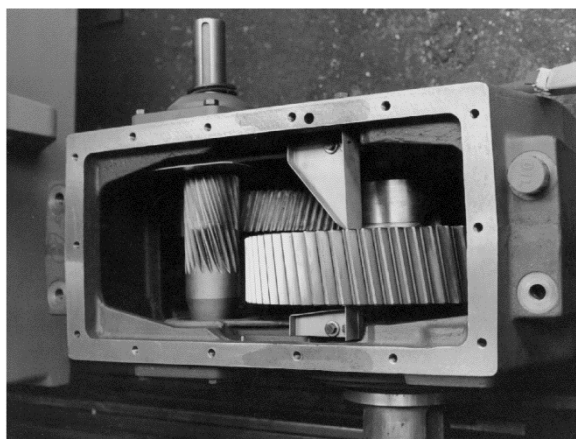
For å videre øke kvaliteten på kraften, blir integrering av et energilagringssystem vurdert. Ideelt vil energilagringssystemet levere eller absorbere aktiv effekt i henhold til effektdifferansen mellom den genererte effekten og den ønskede utgående effekten levert til nettet.

Ledende elektrisk energilagringsteknologi for offshore bølgeenergi applikasjoner inkluderer batterier, superkondensator, kondensator og superledende magnetisk energilagring (SMES)-enheter.

Ved å implementere en form for energilagringssystem vil dette hjelpe systemet på forskjellige måter. Det kan bidra til å jevne ut strømmen og det kan hjelpe turbinen i henhold til «Low-voltage ride-through» (LVRT).[22] Ikke minst vil det kunne brukes til systemer som for eksempel lys på bøyn, kommunikasjon, utstyr for overvåking og forsyning til annet utstyr.[23]

4.3 Girsystem

For å kunne benytte seg av de tradisjonelle høyhastighetsgeneratorene, må man implementere en girkasse. Disse generatorene krever høy hastighet på rotoren, flere hundre omdreininger per minutt. Rollen til girkassen er å konvertere den mekaniske energien fra lav hastighet til høy hastighet. I en turbin som benytter seg av rotasjonsvinger vil rotasjonsvingene ha lav hastighet og høyt moment, der generatoren vil kreve høy hastighet og lavt moment.



Figur 15 - To-trinns spurgear for vindmøller typisk 200-500 kW

Innenfor vindmølleteknologien har dette ført til store utfordringer. I dag har denne situasjonen endret seg på grunn av store teknologiske fremskritt. På markedet er der nå

tilgjengelig girkasser med girutveksling på 1:100 og mer.[13] Vindmølleprodusenter bruker gjerne hyllevarer, med noen tilpasninger, som kan tas fra standard produktvalg fra girkasseprodusenten.

Uavhengig av denne gunstige utviklingen er girkassen fortsatt en kilde til feil. Årsaken til disse vanlige feilene ligger som regel ikke i girkassen selv, men kommer av feil dimensjonering av girkassen med hensyn til lastspekteret den skal jobbe i.[13] Denne feildimensjoneringen har ofte blitt et problem fordi det er lett å undervurdere høye dynamiske belastningene girkassen utsettes for. Imidlertid har vellykkede produsenter utstyrt vindturbinene med stadig sterkere girkasser, og etter hvert utviklet mer riktig dimensjonering.

4.3.1 Girkasse konfigurasjon

Girkasser bygd opp av tannhjul er konstruert i to forskjellige former. Disse to er *spurgir* og *planetgir*. Et *spurgir* er bygd med et utvekslingsforhold på opp til 1:5, mens planetgir bygges med et utvekslingsforhold på 1:12 per trinn. Utvekslingsforholdene på begge disse girene er begrenset til disse forholdene, slik at forskjellen i diameter mellom det lille og det store tannhjulet ikke blir for ugunstig. Vindturbiner krever ofte mer enn et trinn.[13]

Sammenligner man disse to girsystemene er det bemerkelsesverdig at et tretrinns *planetgir* bare har en brøkdel av massen til et sammenlignbart *spurgir* og de relative kostnadene er redusert til om lag halvparten.[13] I vindturbiner som er dimensjonert i megawatt-skala, er *planetgir* derfor overlegent. I mindre skala er ikke sammenligningen så entydig. I intervaller opp til 500 kW er *spurgir* ofte foretrukket på grunn av kostnadene.[13] Det viser seg at små vindturbiner ofte er utstyrt med *spurgir* systemer. De som er mest brukt er totrinns girkasser som er kommersielt tilgjengelig fra flere produsenter.[13]

Størrelsen på tapene i en girkasse er sammenlignbart med størrelsen på tapene i en generator. Tapene i girkassen kommer av oljestrømmen og friksjonen som virker på den. Det gjennomsnittlige effekttapet avhenger av girutvekslingen og hvilken type gir som benyttes. For *spurgir* anslås det et tap på ca 2% av full effekt per trinn, og for *planetgir* anslås det ca 1% tap per trinn.[24] Dette vil i praksis si at dimensjoneringen er viktig, da tapene ikke må bli for store. Hvis ikke dimensjoneringen blir gjort riktig vil man støte på mange problemer og kostnader med tanke på drift og vedlikehold. Girkassene krever også smøring i form av olje. I vindmøller utføres dette vanligvis via en sentral oljeforsyning, denne inneholder som regel en

oljekjøler og et filter. Renheten og temperaturen på oljen har vist seg å være svært viktig for levetiden til gir-kassen. Derfor er overvåking av oljekvalitet og vedlikehold med hensyn til oljeutvekslingen svært viktig.[13]

4.3.2 Dimensjonering av gir-kassen

Dimensjoneringen av gir-kassen må vurderes etter to aspekter. Det første man skal vurdere er den eksterne last-situasjonen som påvirker gir-kassen. Det andre aspektet vedrører den «interne» gir-kassen og er først og fremst produsenten sin oppgave. Det er viktig at systemingeniørene estimerer den eksterne last-situasjonen riktig, da produsentene kun kan løse oppgaven om de har fått de riktige «eksterne» belastningene.

Dreiemomentet som skal overføres fra rotor til stator, er den viktigste belastningsparameteren som skal estimeres. I vindmøller vil ikke rotormomentet følge en konstant verdi, men den vil være underlagt mer eller mindre store variasjoner, avhengig av designkonseptet. Lastspekteret skal inneholde dreiemomentvariasjoner, uttrykt som størrelsesorden og frekvens over hele levetiden til turbinen. Basert på dette lastspekteret blir transmisjonsgiringen dimensjonert av produsentene. Denne ideelle fremgangsmåten er ikke alltid mulig å følge når gir-kassen skal designes. Dette kommer av at et komplett og pålitelig lastspektrum for gir-kassen sjeldent er tilgjengelig, før man får testet ut i større skala.

4.4 Generatorsystemer

For å designe en turbin er man nødt å danne et bilde og bestemme seg for hvordan hele generatorsystemet skal se ut; fra rotasjonsvingene og hele veien til nettet. En generell klassifisering av generatorsystemer kan vi dele opp i løsninger med fast- og variabel hastighet. Valget av system avhenger i stor grad av tilgjengelig teknologi som finnes, og hvilke krav kunden har. Vi vil her forklare disse to systemene og sette opp et system under hver av dem som et eksempel. Videre vil vi også snakke om systemer med direkte drift, dette er et system som også går med variabel hastighet, men ikke krever noen form for gir-kasse.

4.4.1 Systemer med fast hastighet

I systemer med fast hastighet er rotorhastigheten fast bestemt av frekvensen til nettet det er koblet til, og variasjonen i hastigheten er begrenset til ca. $\pm 1\%$ av nominell hastighet.[13] I vindmøllesystem blir systemet vanligvis designet slik at hastigheten til systemet har sin optimale hastighet lik den gjennomsnittlige vindhastigheten på stedet der turbinen er

plassert. Generelt sett har disse systemene en enkel og pålitelig konstruksjon av komponenter, som krever lite vedlikehold og har lavere investeringskostnader.[21]

Til tross for systemets enkelhet vil en ulempe være lav effektivitet. Når pådraget på rotor har en hastighet utover den nominelle hastigheten vil ikke generatorsystemet kunne utnytte det fulle potensialet. For Subwave sitt tilfelle vil ikke generatoren kunne utnytte hastigheten på rotasjonsvingene når de roterer i en hastighet som systemet ikke er designet for.

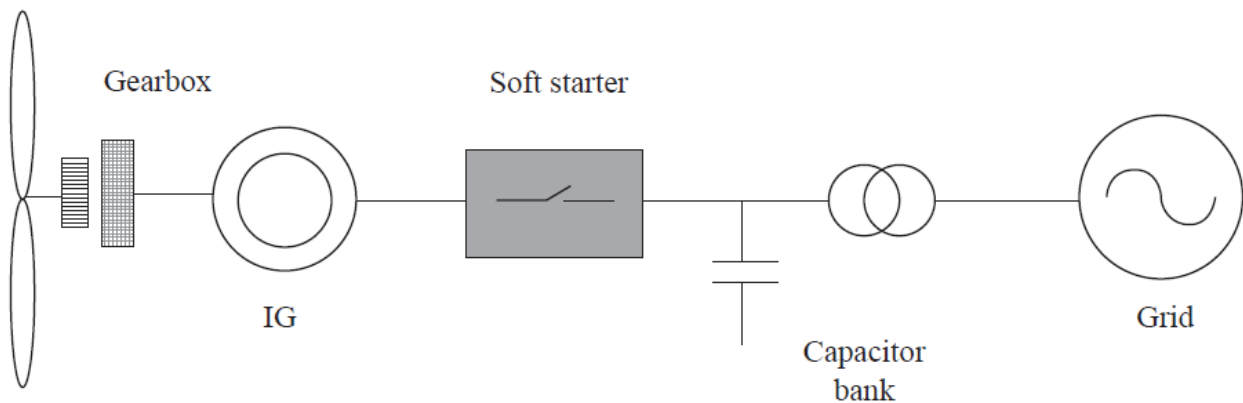
SCIG (Squirrel Cage Induction Generator) er den foretrukne og mest brukte løsningen for denne typen system, men det finnes andre alternativ. Eksempel på disse kan være synkrongenerator direkte koblet til nettet, eller variabel-slip asynkrongenerator. Begge disse er også relativt enkle system, men i hovedsak vil de bli dyrere, og dermed ikke være seriøse alternativ på grunn av fremgang i teknologien vedrørende systemer med variabel hastighet.

Selv om systemer med fast hastighet er «enklere» enn systemer med variabel hastighet, er det flere ulemper forbundet med dem, hvorav noen ulemper er som følger:

- **Lavt energiutbytte:** Kraftutvinningen er vanligvis en funksjon av rotasjons hastigheten til rotoren og havbølgen eller tidevannsstrømmene. Generelt kan en effektivitetsøkning på mellom 5% og 20% oppnås ved bruk av variable hastighetsløsninger.[21]
- **Mekanisk belastning:** Høye dynamiske laster gir store påkjenninger til det mekaniske drivverket.
- **Variabel strømkvalitet/ujevn PTO:** Store variasjoner overføres ikke bare til drivverket, men overføres også til nettet. Derfor forekommer spenningsvariasjoner som reduserer strømkvaliteten ved fast hastighet løsninger som bruker lavt treghet på drivverket.
- **Trenger reaktiv energikompensasjon:** For asynkrongeneratorer er det nødvendig med reaktive kompensasjonselementer for å kompensere for reaktiv effekt.

4.4.1.1 SCIG – Konfigurasjon

Asynkrongeneratoren blir mest brukt i systemer med fast hastighet.[21] Asynkrongeneratoren blir kategorisert i to typer, *squirrel cage* og *wound rotor*. Vi vil her gå dypere inn på SCIG-konfigurasjonen da denne er den mest brukte av disse to. SCIG – konfigurasjonen består av en flertrinns girkasse, en asynkrongenerator med *squirrel cage*, en mykstarter og en



Figur 16 - Topologi SCIG konfigurasjon

kondensatorbank. Over kan man se et blokkdiagram av hvordan den er bygd opp.

SCIG er blitt brukt i vindmølleindustrien i flere tiår.[13] Den største fordelen med denne konfigurasjonen er enkelheten med tanke på operasjon og kontroll for systemet. SCIG er også billig og enkel å konstruere. En fordel med SCIG-konfigurasjon er at man eliminerer bruken av frekvensomformer, noe som er med på å trekke kostnadene ned. Denne konfigurasjonen fremstår som den billigste å investere i av alle de forskjellige konfigurasjonene vi nevner videre i kapitlet.[21]

Siden generatoren blir konstruert for en fast hastighet vil den levere en stabil frekvens til nettet, gitt at rotasjonsvingene klarer å opprettholde denne hastigheten. Hvis rotasjonsvingene ikke klarer å opprettholde denne hastigheten vil effektiviteten bli svært dårlig. Siden vind og bølger varierer i hastighet vil det å konstruere en generator med en fast hastighet gå på bekostning av effektiviteten.[21]

SCIG – konfigurasjonen krever også en girkasse med flere trinn. Girkassen muliggjør at vi i det hele tatt kan bruke en slik høyhastighetsgenerator, men det følger med en del ulemper med denne komponenten. Blant annet krever den mye vedlikehold, noe som blir dyrt i lengden.[25]

For å starte en maskin som er direkte koblet til nettet, kreves det en høy startstrøm. Dette problemet fikses ved å benytte en mykstarter. Dette blir sett på som en ulempe da en må inn med enda en komponent. En asynkronmotor vil også trekke reaktiv effekt, så reaktiv effektkompensasjon kreves i denne konfigurasjonen.[21]

Bruken av SCIG har avtatt med tiden på grunn av forbedrede egenskaper ved andre generatorteknologier, samt tilgjengeligheten av lavpris-omformere.[21] SCIG blir mer brukt i tidevannsturbiner på grunn av den enkle rotorstrukturen som gir generatorsystemet en meget høy robusthet. Noe som også gjør den maritimvennlig er at den ikke bruker sleperinger og har typisk et vedlikeholdsintervall på 5 år.[21]

4.4.2 Systemer med variabel hastighet

Som nevnt blir systemer med fast hastighet i dag brukt stort sett på grunn av den lave prisen, men de siste årene med fremgang innen omformerteknologi har indirekte tilkobling til nettet blitt mer vanlig.[21] Ved indirekte tilkobling til nettet kan systemene kjøres med variabel hastighet, noe som utreder de fleste problem et system med fast hastighet bringer med seg.

I systemer med variabel hastighet vil en frekvensomformer være grensesnitt mellom generator og nett. Frekvensomformeren holder rotorhastigheten og nettets frekvens fra hverandre, og dermed vil det være mulig å variere rotorhastigheten uavhengig av nettfrekvensen. Dette gjør at en kan levere konstant spenning og frekvens til nettet.

De viktigste fordelene med systemer med variabel hastighet i forhold til fast hastighet er:

- **Forbedret PTO:** Bedre kraftuttak på grunn av bedre samsvar mellom energikilde og rotorhastigheten.
- **Bedre strøm kvalitet:** Rotoren og drivverket kan fungere enten som et svinghjul, eller den kan levere energi. Dette resulterer i mindre variasjoner, og strøm kvaliteten blir bedre. Effektivitasjonene blir redusert og jevnet ut.
- **Mindre mekaniske belastning:** Det blir mindre mekanisk belastet på grunn av den variable hastigheten.
- **Enkelt kontroll av effekt:** Aktiv og reaktiv effekt kan enkelt bli kontrollert.[21]

En generator med variabel hastighet genererer en alternerende strøm med varierende frekvens. Denne kan bare justeres til den nødvendige konstante nettfrekvensen ved hjelp av en back to back frekvensomformer.

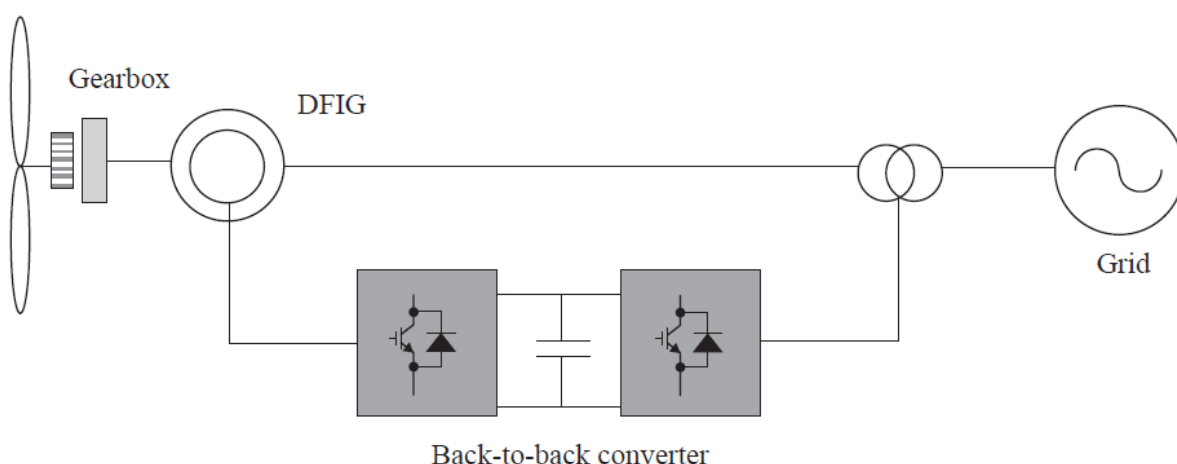
Den største ulempen med systemer med variabel hastighet er prisen på kraftelektronikken. Systemer med variabel hastighet er avhengig av generatortype og kraftelektronikk. I dag brukes vanligvis en fullt kontrollerbar back-to-back omformer både i en DFIG-konfigurasjon (figur 17) og i en PMSG-konfigurasjon (figur 20).[21]

Systemer med variabel hastighet kan implementeres enten ved hjelp av en synkrongenerator eller ved hjelp av en asynkrongenerator. I en synkrongenerator, må all strømmen som genereres bli konvertert. Asynkrongeneratoren gir ett slip som startpunkt.

Effekttapet kan mates tilbake, eller legges til effektutgangen fra statoren ved hjelp av egnede omformere. På denne måten slipper all den genererte effekten å bli sendt gjennom omformeren, kun deler av den. Imidlertid krever dette en slepering-rotor, som fører til høyere kostnader og mer vedlikehold.

4.4.2.1 DFIG-konfigurasjon

Dobbelmatet induksjonsgenerator (DFIG) er et system for variabel hastighet der både rotor og stator er koblet til nettet. Rotorviklingen til generatoren er koblet til nettet via en toveis frekvensomformer, og stator er koblet direkte. På denne måten blir deler av kraften overført fra rotorviklingene til nettet.



Figur 17 - Topologi DFIG konfigurasjon

Vanligvis benyttes en fullt kontrollerbar back-to-back frekvensomformer i denne typen konfigurasjon. Back-to-back omformeren består av én omformer på maskinsiden, en DC-krets

med kondensator, og én omformer på nett-siden. Oppgaven til maskinsiden er å kontrollere hastighet og effektfaktoren til maskinen, mens nettsiden sin oppgave er å minimere rippelspenning i kondensatoren i DC-kretsen. I tillegg gjør en slik frekvensomformer det mulig å styre aktiv og reaktiv effekt innenfor visse grenser.

Siden omformeren er koblet til rotoren trenger den bare å overføre deler av den genererte effekten, og kan dermed dimensjoneres for mye mindre enn hva installert effekt er. Typisk er størrelsen på frekvensomformeren 30-40% av generatorens installerte effekt.[21] Dette gjør at omformeren i et DFIG system dimensjoneres i samhold med det ønskede hastighetsområdet, noe som gjør systemet veldig attraktivt, da omformerkostnadene ofte er den delen av systemet som er dyrest.

En stor ulempe ved et DFIG system er at den trenger sleperinger. Dette krever mer vedlikehold og gjør systemet problematisk å bruke i offshore og undervannsapplikasjoner, da dette er en omfattende prosess som krever rolig sjø og fine forhold.

Utover dette brukes systemer med DFIG det mest komplekse kontrollsystemet med tanke på omformere, noe som gjør de lite økonomiske for mindre system.[24]

4.4.3 Systemer med direkte drift

Et system med direkte drift er en maskin av type motor eller generator, som er direkte koblet til en last uten noen form for girsystem imellom. Direkte drift er mest vanlig i motordrift, men brukes også i generatordrift. Uansett drift, er det klare fordeler ved å la være å bruke et girsystem. En stor fordel er at det vil være færre deler i bevegelse, og man slipper alle ulempene en girkasse medfører. Dette vil igjen føre til mindre friksjon og en vil dermed øke effektiviteten til prosessen i både motor- og generator-drift. Levetiden til systemet vil også økes grunnet færre deler og mindre vedlikehold. Et resultat av et direkte drevet system er at generatoren må være konstruert for å tåle turbinens lave hastighet og høye dreiemoment, noe som fører til en generator med stor diameter.[21]

Ved langsomme rotor-hastigheter i turbiner vil generatoren kreve et stort antall polpar for å være kompatibel med nettfrekvensen. For å unngå at diameteren og vekten til generatoren skal bli for stor, løses dette med effektive omformere slik at generatoren ikke trenger å være designet for 50 eller 60 Hz nettfrekvens. Dermed blir antall poler og diameteren på generatoren innenfor tolerable grenser.

Hovedargumentet til fordel for denne typen design er at girkassen blir fjernet. Selv om girkassen i et direkte drevet generatorsystem blir fjernet og ikke lenger er til stede for å skape problemer, blir det igjen dyrere å lage et mer komplekst generatorsystem.



Figur 18 - Direkte drevet synkron generator med omformer for variabel hastighet

De første til å lykkes med å implementere utformingen av en direkte drevet generator med omformer var den tyske vindmølle-produsenten Enercon. Den ble utviklet på midten av 90-tallet av typen E-40 som er en synkron generator med 84 poler med en diameter på ca. 4.8 meter med en installert effekt på 500kW. Ved nominell drift (rotasjonshastighet 20-40 rpm) danner generatoren en frekvens på 16.66 Hz, som deretter konverteres til nettfrekvensen på 50 Hz av frekvensomformeren. Generatoren og omformer er angitt med en virkningsgrad på ca. 0.94. Denne vindturbinen viste umiddelbart å være en effektiv og pålitelig maskin og banet vei for Enercon til å utvikle større turbiner av denne typen. Dette designet blir i dag brukt i Enercon sine vindturbiner opp til 7MW.[13]

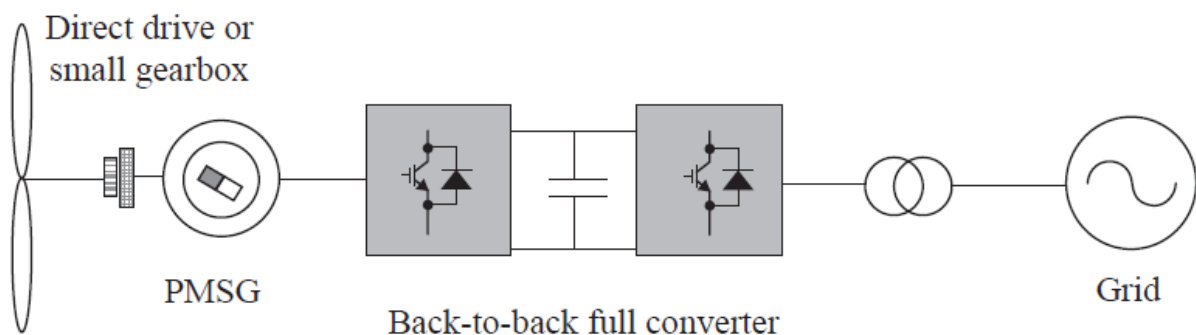


Figur 19 - Produksjon av multi-polet synkrongeneratorer av Enercon

Konseptet med en generator som drives direkte av rotoren, har blitt ett godt alternativ til standard design av en høyhastighetsgenerator med girkasse. Til tross for dette er det noen ting å legge merke til: Produksjonen av de store sleperings-generatorene med viklinger er vanskelige å mekaniseres fordi det kreves mye manuelt arbeid. Noe som gjør at produksjonskostnadene for denne type generatorer er høye. I tillegg til den store mengden kobber som er nødvendig. Prisen på kobber, samt andre materialer for samme formålet er ventet å stige betraktelig i fremtiden.[13]

4.4.3.1 PMSG-konfigurasjon

Permanent magnet synkron generator er en synkron generator som blir eksitert ved hjelp av permanentmagneter i motsetning til en vanlig synkron generator som blir eksitert ved hjelp av en DC-strøm. Med permanentmagneter vil en kunne gjøre konstruksjonen mer kompakt og dermed få en større volumetrisk effekttetthet. Generatoren krever heller ingen sleperinger, noe som gjør at vedlikeholdet blir redusert. På en annen side vil spenningen til slike maskiner være vanskeligere å kontrollere. Dette kommer av at en ikke har en magnetiseringsstrøm som en kan endre frekvensen på. Uansett, vil de største ulempene knyttet til permanentmagneter være kostnadene og deres komplekse konstruksjon.



Figur 20 - Topologi PMSG konfigurasjon

PMSG kan man koble enten direkte til rotasjonsvingene, eller man kan velge å implementere en enkel girkasse, med ett eller to trinn. Det er fordeler samt ulemper med begge disse alternativene. I en direkte koblet maskin, vil generatoren måtte være større for å håndtere arbeidsområdet da en må implementert flere polpar. Dette gjør også at selve generatoren blir dyrere å produsere sammenlignet med en generator som er koblet til rotasjonsvingene ved hjelp av en enkel girkasse. Girkassen her vil være mye enklere enn i andre konfigurasjoner som krever høyhastighetsgeneratorer. Dette er fordi man trenger kanskje bare et trinn, og det sier

seg selv at jo flere trinn desto større sjanser for feil. Fordelen ved å konvertere hastigheten opp, vil være at generatoren krever mindre poler og dette fører til en billigere produksjonskostnad. Likevel vil en så enkel girkasse kreve vedlikehold.

PMSG-konfigurasjonen krever en frekvensomformer der all den genererte strømmen må mates igjennom. Dette ble tidligere brukt som et argument mot å benytte seg av en slik konfigurasjon, da dette resulterte i store tap. Med årene står dette argumentet svakere, fordi tapene har blitt mindre og omformerteknologien har forbedret seg betraktelig.[13] Nå har frekvensomformerne en virkningsgrad helt opp til 97%.[26] En ulempe relatert til frekvensomformeren i denne typen system er at all strøm som genereres må gjennom frekvensomformeren, og gjør dermed at frekvensomformeren blir både fysisk større og dyrere sammenlignet med en frekvensomformer i for eksempel en DFIG-konfigurasjon.[21]

Når en skal konstruere slike maskiner, er man avhengig av råmaterialer for permanentmagnetene. Magneter laget av «neodymium» eller mer eksotisk materiale som «samarium-cobalt» har i løpet av de siste årene sunket i pris.[13] NdFeB, som vil være det mest aktuelle magnetmaterialet for høy-ytelses permanent magnet maskiner er veldig sensitiv mot korrosjon. Disse materialene kan bli ødelagt i løpet av dager hvis de rette formene av korrosjon slipper til.[21] Dette faktum må tas i betraktning spesielt for PMSG, men korrosjon vil selvfølgelig være problematisk for de fleste andre maskiner også. Til tross for problemet NdFeB materialet har finnes det en type epoxy kappe, for eksempel VACCOAT, som har blitt utviklet for å beskytte slike sjeldne material mot saltvannsmiljø.[21]

Prisen av dette råmaterialet er typisk 20-30% av PMSG.[13] Så lenge Kina har et slags monopol på materialet, vil det være stor usikkerhet om fremtidige prisutviklinger. Noen henviser også til miljøproblemene på gruvedriften av disse materialene i Kina.[13] Bortsett fra de elektriske egenskapene, er det et ytterligere aspekt som skal sees i sammenheng med at generatoren kjøres i direkte drift ifra rotoren, uansett type eksitasjon.

Permanentmagnetiserte maskiner har i løpet av de siste årene utviklet seg kraftig.[13] Takket være kraftigere og mer økonomiske magnetdesign kan en i dag finne permanentmagnetiserte maskiner i megawatt-klassen.

4.4.4 Sammenligning

Ut ifra tidligere kapitler har vi her satt opp en tabell med fordeler og ulemper for generatorsystemene.

System med type generator	Fordeler	Ulemper
<i>SCIG – Direkte til nett</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Enkel og pålitelig - Enkel styring - Mindre vedlikehold - Mer økonomisk - Krever ikke frekvensomformer 	<ul style="list-style-type: none"> - Fast hastighet - Lav energi-innsamling - Større mekanisk belastning - Variabel strømkvalitet - Trenger reaktiv energikompensasjon - Girkasse
<i>SG Direktdrevet med omformer</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Variabel hastighet - Ingen girkasse - Fører til mindre vedlikehold - Variabel hastighet - Effektiv og pålitelig 	<ul style="list-style-type: none"> - Kostnaden på omformer - Krever et stort antall pol-par - Problemer med luftgapet mellom rotor og stator.
<i>PMSG med Omformer</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Variabel hastighet - Mindre mekanisk belastning - Lett å kontrollere aktiv og reaktiv effekt - Kraftelektronikk mellom generator og nettet - Kan kjøres med og uten girkasse. - Stort arbeidsområde 	<ul style="list-style-type: none"> - Prisen på kraftelektronikken - All strøm må bli konvertert (Full frekvensomformer) - Krever frekvensomformere - Kostnad og tilgjengelighet på permanent magneter. - Vekt
<i>DFIG med Omformer</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Variabel hastighet - Mindre mekanisk belastning - Lett å kontrollere aktiv og reaktiv effekt - Kraftelektronikk mellom generator og nettet - Trenger ikke konvertere all strøm - Over- og subsynkron drift er mulig - Stort arbeidsområde 	<ul style="list-style-type: none"> - Prisen på kraftelektronikken - Krever frekvensomformere - Krever en slepering-rotor, fører til høyere kostnader og mer vedlikehold. - Girkasse

4.5 Vurderingskriterier

I dette kapitlet lister vi opp og utdyper vi en rekke vurderingskriterier som er viktige i forhold til realisering av en bølgekraftsomformer. Ut ifra behov vil noen kriterier være viktigere enn andre, men det trengs allikevel en vurdering av alle aspekter for å få til en optimal løsning.

4.5.1 Synkronisering

For synkronisering av en hvilken som helst generator opp mot nettet er det fire generelle krav man må tilfredsstille. Disse kravene er listet opp under.[27]

- Klemmespenning på nett og generator må være like store.
- Spenningsene må være i fase.
- Generatoren og nettet må ha lik frekvens. En tillater en liten forskjell i disse.
- Samme faserekkefølge.

Synkroniseringen presenterer to helt forskjellige problemstillinger når det gjelder bruk av en synkrongenerator opp mot bruk av en asynkrongenerator. Synkronisering av en synkrongenerator mot nettet støter på betydelige vanskeligheter for en vindturbin. I praksis kan dette for eksempel løses ved å sette inn en frekvensomformer som gjør at rotoren ikke trenger å kjøres med samme frekvens som nettet. Når det gjelder asynkrongeneratoren er denne også koblet til nettet ved hjelp av en «myk forbindelse». Denne ordningen blir gjort ved hjelp av tyristorer. Det er imidlertid mye enklere å synkronisere asynkrongeneratoren mot nettet, enn det er å synkronisere synkrongeneratoren mot nettet.[13]

4.5.2 Reaktiv effekt

I eldre litteratur blir reaktiv effekt ofte omtalt som «ubrukelig kraft». Reaktiv effekt er nødvendig for å bygge opp magnetfelt, men har ellers ingen praktisk fordel. Imidlertid tar reaktiv effekt plass i ledninger og overføringer, noe som igjen gir tap i maskiner og komponenter, og begrenser virkningsgraden for elektrisk utstyr.

Siden reaktiv kraft bygger opp magnetfelter, betyr dette at alle maskiner og apparater som trenger magnetfelt for å fungere, for eksempel transformatorer og asynkronmaskiner, trekker reaktiv effekt.[28] I asynkrongeneratorer kompenseres det reaktive effektforbruket ved å koble opp kondensatorbatterier. I synkrongeneratorer kan effektfaktoren $\cos \phi$, den reaktive effekten, kontrolleres ved å regulere spenningen ved terminalene. Foruten den høyere effektiviteten er dette en viktig fordel. For generatorsystemer med omformere, må den

reaktive effekten omformerne krever tas i betraktning, men $\cos \phi$ kan påvirkes av omformerens. Effektfaktoren er altså et uttrykk for hvordan anlegget belaster nettet med overføring av reaktiv effekt.

Normalt krever nettselskaper kun betaling for reaktivt uttak når dette uttaket overstiger 50% av målt aktiv effekt (kW), men dette kan variere noe.[29] Dermed vil bruken av reaktiv effekt ikke bare omhandle selve problemene med virkningsgraden til komponentene, men også de økonomiske kostnadene ved å forbruke denne effekten.

4.5.3 Nettforstyrrelser

Som nevnt over bidrar det å trekke reaktiv effekt fra nettet til uønskede forstyrrelser. Videre må andre forstyrrelser mot nettet tas hensyn til. Blant dem er høye startstrømmer når en asynkrongenerator blir tilkoblet, eller harmoniske strømmer som mates inn i nettet. Harmoniske strømmer som disse, genereres i liten grad av selve generatoren, men er i større grad forbundet til bruken av statiske omformere.

På eldre generatorsystemer som benyttet seg av eldre omformere var harmonisk belastning på nettet et større problem. Moderne omformere danner en vekselstrøm som er tilnærmet fri for disse harmoniske svingningene.[13]

Lastfrakobling, som i et plutselig belastningsavbrudd, grunnet for eksempel en feil på nettet eller en elektrisk feil, er alltid et kritisk øyeblikk for ethvert generatorsystem. Ser man på en vindmølle vil dette være spesielt kritisk, der tapet av generatorens dreiemoment krever en umiddelbar handling fra rotorbremsesystemet for å unngå at rotoren løper løpsk. Dette vil også gjelde for Subwaveturbinen i et lignende scenario. Grunnet denne risikoen ønsker man en generator som opprettholder det elektriske dreiemomentet en viss tidsperiode, selv etter en slik feil på nettet. For en synkrongenerator, er det relativt enkelt å benytte seg av «elektrisk bremsing». Dette gjøres ved å få generatoren til å kjøre som en ohmsk bremseresistans. I prinsippet er dette også mulig å få til i en asynkrongenerator, men grunnet kompleksiteten dette medfører blir det ikke gjort i de fleste vindturbiner.[13]

4.5.4 Effektivitet

Forskjellen i effektivitet er svært liten mellom en synkrongenerator og en asynkrongenerator (1-1,5%).[13] Effektiviteten er mer avhengig av det totale elektriske systemet, og mindre avhengig av hvilken generator en velger.

At effektiviteten er innenfor rimelighetens grenser er et veldig viktig vurderingskriterium for valg av generatorsystem. Selv om teknologien har utviklet seg mye i henhold til effektiviteten på systemene hver for seg, er det viktig at vi finner et system med best mulig effektivitet i forhold til arbeidsmiljøet. Dette vil si at noen av systemene kan ha veldig god effektivitet i ett arbeidsmiljø, men ikke i et annet. Det er viktig å huske på at kostnadene kan øke om en velger et av de dyrere systemene, men her må man se om det lønner seg i lengden.

4.5.5 Kostnader

Kostnadene for de forskjellige generatorer er nesten helt skjult innenfor den totale kostnaden for det elektriske utstyret i ferdige turbiner. Dette gjør det vanskelig å sammenligne kostnadene for de forskjellige systemene. Vi må også huske på at høyere investeringskostnader kan føre til et bedre system som krever mindre vedlikehold og høyere effektivitet som igjen kan lønne seg i lengden.

Et billigere system kan også pådra seg mer vedlikeholdskostnader, noe vi virkelig må prøve å unngå med tanke på at turbinene skal ligge på hundre meters dybde og langt i fra land. Et system som er dyrere å bygge kan få ned kostnadene sett over et større tidsperspektiv. Kostnadene er dermed avhengig av mer enn kun investeringskostnadene, der mengden vedlikehold og hvor effektive turbinene er under drift er sentrale faktorer.

4.5.6 Vedlikehold og pålitelighet

Ulike typer generatorsystem har forskjellige vedlikeholds krav, der noen av systemene vil kreve mer vedlikehold enn andre. Subwaveturbinen vil være vanskelig å utføre vedlikeholdsarbeid på fordi turbinene må heves fra hundre meters dybde og ført til land. Ifølge Waveco, er planen å erstatte de turbinene som krever vedlikehold med nye turbiner og deretter utføre vedlikeholdsarbeidet på land. På denne måten vil anlegget til enhver tid være riktig antall turbiner i feltet.

Erfaringer innenfor vindmølleteknologien viser at det er de mekaniske komponentene som fører til mest vedlikehold, og med bakgrunn fra dette kan vi anta at dette også vil gjelde for Subwaveturbinen. Vindturbiner sliter også forøvrig med elektroniske feil som hovedsaklig kommer av programvarebugs og ikke de elektroniske komponentene i seg selv.[13]

Det er ønskelig med et så vedlikeholdsfritt system som mulig uten at det går på bekostning av pålitelighet. Det er viktig med et pålitelig system som kan klare seg selv over lengre perioder

uten for mange feil. Miljøet Subwave befinner seg i blir også en faktor vedrørende vedlikehold, og systemet må bygges robust for å unngå lekkasjer og slitasje fra saltvann.

4.5.8 Kontrollerbarhet og hastighetsområde

En av de viktigste designegenskapene til en bølgekraftsturbin vil være kontroll av generatoren i forhold til variabel hastighet av rotoren. Dette er viktig for å maksimere effekten absorbert fra fornybare kilder, som i sin natur vanligvis er svært variable. Hvis arbeidsområdet til rotorhastigheten er stort nok, kan denne kontrollen gjøre det mulig å operere i det optimale hastighetsnivået. Resultatet vil være en økt energiforsyning i forhold til operasjon med fast rotorhastighet.[21]

For eksempel, i vindkraftgeneratorer økes det tilgjengelige kraftuttaket vesentlig hvis turbinens rotasjonshastighet blir kontrollert til å øke som en funksjon av vindhastigheten. Denne kontrollstrategien er kjent som "Maximum Point Tracking" og har vært ansvarlig for den gradvise overgangen av generatorteknologien i vindkraft fra fast og dobbel hastighet til maskiner med variabel hastighet. Generatorer med fast hastighet vil oppleve alvorlige sjokkbelastninger på generatorakslingen ved sterke vindkast og tøffe forhold, men om hastigheten tillates å øke, vil tregheten til systemet absorbere noe av den ekstra kraften. Denne mekaniske vurderingen førte i utgangspunktet til adopsjon av asynkrone generatorer i vindturbiner hvor slip ble brukt til å gi et lite rom for variasjon og samsvar i hastigheten. [21]

4.5.9 Miljø og plassering

Siden turbinen og generatoren vil være plassert i et maritimt miljø, vil de være utsatt for effekten fra saltvann og fuktighet. Selv om bølgeenergi ikke produserer drivhusgasser eller andre typiske forurensninger mens de produserer elektrisitet, oppstår utslipp fra andre deler av systemene. Potensielle innvirkninger ved utslipp og lekkasje av væsker ved hydrauliske systemer, smøreoljer til girkasser eller andre typer stoffer.

Plasseringen har også innvirkning i forhold til navigasjon av skip, da bølgekraftsanlegget kan være vanskelig å oppdage visuelt. Farer kan også oppstå om anleggene ikke er opplyst om natten, eller om fortøyningene brytes bort under stormer, og anlegget driver bort.

5 Drøfting

Vi har hittil i oppgaven presentert de vanligste og mest aktuelle generatorsystemene og hvilke vurderingskriterier som bør tas i betraktning ved drift og oppkobling til strømmettet. På bakgrunn av denne samlede teorien vil vi i dette kapittelet diskutere hvilken generatorkonfigurasjon vi mener passer best i Subwave. Mens diskusjonen arter seg fra fordeler og ulemper mellom forskjellige generatorer, vil vi videre diskutere om et girsystem er fordelaktig, og til slutt komme med et forslag for en generatorkonfigurasjon vi anbefaler.

5.1 Sammenligning

I kapittel 4 er det introdusert flere forskjellige generatorer. I all hovedsak dreier det seg om vekselstrømgeneratorer, i tillegg til én likestrømgenerator. Hvilken generator en velger er som oftest situasjonsavhengig og krever at en nøye analyserer hvilke forhold man planlegger å utsette generatoren for. Dette gjelder også for generatoren i Subwaveturbinen, som vil bli utsatt for varierende pådrag og et undervannsmiljø. En generator som kan håndtere variable hastigheter er derfor et viktig utgangspunkt for vår diskusjon.

5.1.1 Generator

Fra teoridelen velger vi å se på PMSG, DFIG og SCIG. Alle disse generatorene kan til en viss grad håndtere variable rotorhastigheter. Som vi kan se har vi nevnt nesten alle generatorene fra teoridelen unntatt den tradisjonelle synkrongeneratoren. Den største forskjellen mellom SG og PMSG er hvordan generatoren blir magnetisert. Ellers vil synkrongeneratoren stort sett ha de samme fordelene som PMSG, og den vil også være et billigere alternativ. Det som gjør at vi ikke vil inkludere denne videre er at PMSG ikke har børster og i tillegg er selvmagnetiserende, i motsetning til den tradisjonelle synkrongeneratoren som krever en magnetiseringsstrøm fra en ekstern kilde.

For hva gjelder asynkrongeneratorer vil vi se nærmere på DFIG og SCIG. DFIG – konfigurasjonen er et system som blir satt i kategorien under systemer med variable hastigheter. Denne generatoren er en av de mest benyttede i vindmøller og andre turbiner som går med en varierende hastighet. Samtidig er SCIG, et system som blir designet for en fast hastighet, også mye benyttet i vindmøller. SCIG kan også til en viss grad håndtere variable hastigheter, den er robust og enkel, og den er også det billigste alternativet. Til tross for dette har bruken av dem i vindmøller vist at den er lite effektiv ved lave hastigheter, men samtidig

vil den generere mer strøm enn DFIG ved sin synkrone hastighet som maskinen er designet for.[29]

Selv om SCIG produserer mer strøm ved synkrone hastigheter vil det ikke være hensiktsmessig i forhold til Subwave, da den sjelden opererer i hastigheter hvor generator kan ligge på synkront turtall. Derfor, i forhold til en PMSG og en DFIG, vil en SCIG også være et dårligere valg med tanke på de varierende rotorhastighetene. Videre vil vi derfor sammenligne DFIG og PMSG og gå ut ifra at de to systemene er mest aktuelle.

Under kan vi se en tabell som sammenligner fordeler og ulemper mellom en PMSG i direkte drift og en DFIG.[30] Tabellen tar utgangspunkt i vindturbiner, men bygger på de samme vurderingskriteriene for valg av generator i bølgekraftturbiner. Dette er kriterier som kompleksitet, vedlikehold og hastighetskontroll.

	Fordeler	Ulemper
<i>DFIG</i>	<ul style="list-style-type: none">- Mindre sårbar mot store dreiemoment på grunn av girsystem- Mindre generator og omformer- Lavere innkjøpspris	<ul style="list-style-type: none">- Mer komplisert kontrollsystem- Mer vedlikehold- Mer tap på grunn av mellomledd
<i>DDPMSG</i>	<ul style="list-style-type: none">- Færre aktive komponenter- Mer effektiv- Billigere i lengden- Mer kontrollerbar på grunn av helbro omformer	<ul style="list-style-type: none">- Komplisert å sette sammen- Fare for demagnetisering ved høye temperaturer- Dyre Permanentmagneter

Hvis en sammenligner PMSG og DFIG ser det ut til at en direktdreven PMSG vil være en bedre generator for variable rotorhastigheter og vedlikehold.[31] Girsystemet og børster har mye å si for denne sammenligningen. Fra teoridelen vet vi at det er typisk å bytte generatorbørster to ganger i året. For et nett bestående av flere Subwaveturbiner, vil en slik vedlikeholdsrutine i lengden påfølge betydelige kostander.

Det er mulig å finne en børsteløse DFIG, men det er flere ulemper tilknyttet en slik konstruksjon. Dette er ulemper som: lavere effektivitet, større generator og mer komplisert konstruksjon.[32] En ofrer da mange av de kvalitetene som gjør generatoren attraktiv. En

børsteløs PMSG deler noen av de samme ulempene, men vil fortsatt prestere bedre under variable hastigheter. Derfor, i forhold til de viktigste kriteriene som variabel rotorhastighet og vedlikehold, foreslår vi at en PMSG vil være det beste alternativet.

Vi har hittil i sammenligningen ikke fokusert på beliggenhet som en faktor, men hvis Waveco har ønsker om å dimensjonere for store avstander, der Subwavenettet ikke har direkte tilgang til samkjøringsnettet, kan det være gunstig å produsere og transportere likestrøm. Dette vil være gunstig med tanke på tapene som kommer ved transport av vekselstrøm over store avstander. En BLDCG kan i så fall være et forslag for produksjon av likestrøm.

Ut ifra det vi har lest blir BLDCG veldig lite brukt i turbiner. Den brukes som oftest i mikrovindmøller og diverse hobbyprosjekt[33], men vi har ikke sett den bli brukt i stor skala ved f.eks. vindparker. Uansett, om en ønsker å overføre likestrøm, er det fortsatt mulig å bruke en vekselstrømgenerator hvis en likeretter strømmen før en transporterer den over DC-linjen. En PMSG kan i dette tilfellet også brukes. Konstruksjonene til generatorene er dessuten nesten helt lik.

Sett bort fra dyre permanentmagneter, har den permanentmagnetiserte synkrongeneratoren hittil vist seg å være en vinner. I sammenligningen har vi ikke tatt hensyn til forskjellene mellom en PMSG og DDPMSG da dette fortsatt er samme generator. Derfor, for valg av generatortype, gjenstår det å se om et girsystem kan være fordelaktig, og hva dette har å si for Subwaveturbinen.

5.1.2 Gir

Tidligere i diskusjonen kom vi frem til at en PMSG vil være en av de bedre generatorene i forhold til variabel rotorhastighet og vedlikehold. Vi vil derfor vurdere om generatoren burde ha et girsystem og hvilke fordeler og ulemper dette medfører. Vi vil her fokusere på PMSG men det er verdt å merke seg at disse fordelene og ulempene er felles uavhengig av type generator.

Argumentet for å implementere et girsystem i en PMSG-konfigurasjon, er å redusere antall poler for maskinen. Dette gjør at generatoren både blir mindre i diameter og den blir også billigere. Vi må her huske på at ved å benytte seg av en girkasse i denne type konfigurasjon, trenger man ikke benytte seg av en fler-trinngirkasse, slik en tradisjonell

høyhastighetsgenerator krever. Her kan det være nok å bare doble rotasjonshastigheten. En girkasse med færre trinn vil også føre til mindre vedlikehold, enn en girkasse med flere trinn. Dette vil si at om man ikke vil benytte seg av en PMSG, vil girkassen i for eksempel en DFIG-konfigurasjon føre med seg mer vedlikehold.

Fordeler med direkte drift	Ulemper med direkte drift
- Lavere kostnader	- Krever flere poler for lavere hastighet
- Mindre vedlikehold	- Større diameter på generator (kan være en fordel)
- Høyere effektivitet ved variabel hastighet	- Tyngre generator (kan være en fordel)
- Enklere å kjøle (mindre brannfare)	- Ingen mulighet til å gire opp hastighet

Over kan vi se en tabell som viser fordeler og ulemper med direkte drevne generatorer.[34] Ettersom Subwaveturbinen skal ligge under vann, kan noen av ulempene i vår situasjon være en fordel. En tyngre generator vil i de fleste tilfeller være en unødvendig belastning, men kan i Subwaveturbinen fungere som ballast og holde den stabil. En større diameter på turbinen blir også ofte sett på som en ulempe i forhold til takhøyde i maskinhus, men er i vår situasjon mest bundet til effektproduksjon og stabilitet. Dette kommer av at diameteren til selve Subwaveturbinen og rotasjonsringene vil bestemme dekket volum for produksjon av strøm. Subwaveturbinen vil dessuten bare inneholde essensielle komponenter, en diskusjon om maskinhus eller lignende er derfor irrelevant. Kjøling kan også være en situasjonsavhengig faktor for turbinen.

Ettersom en direkte drevet PMSG er mer kompakt, vil det være lettere å kjøle denne. Med gir vil generatoren ha en mindre volumetrisk tetthet, i tillegg til flere bevegelige deler. Dette kan føre til høyere temperaturer ved samme hastigheter. I vindturbiner blir ofte luft brukt til å kjøle generatoren, men om en bruker vannkjøling vil en mer enn doble grensene for akseptabel strømtetthet.[35] For Subwaveturbinen vil hele systemet være omringet av vann. En kan derfor tenke seg at et girsystem ikke vil ha en betydelig effekt på temperaturen. En mer avgjørende faktor for valg av girsystem kan være tap i girsystemet.

Flertrinns girkasser er ansvarlig for mesteparten av tapet i høy-hastighet generatorer. Dette kommer an på antall trinn i girkassen. Som vi vet fra kapitel 4.3, mister giret som regel 2% av inputenergien ved hvert trinn (spur gir). I større vindturbiner kan en 3-trinns girkasse være ansvarlig for 65% av effekttapet.[35] I Subwaveturbinen vil en girkasse over tid også akkumulere en betydelig mengde tap. Uten girsystemet vil Subwaveturbinen slippe dette tapet, i tillegg til ekstra vedlikeholdsarbeid.

Vi kan se at Subwaveturbinen vil oppleve mange av de samme ulempene en vindturbin ville ha gjort. Til gjengjeld deler begge turbiner også de samme fordelene i direkte drift. De største fordelene er: økt pålitelighet, mindre vedlikehold, og lengre levetid.

5.1.3 Frekvensomformer topologi

Vi har hittil foreslått en PMSG, men generatoren alene utgjør ikke hele konfigurasjonen. Frekvensomformeren er den komponenten som muliggjør at man kan benytte seg av denne type generator. Siden frekvensomformeren er en viktig del av den komplette konfigurasjonen, vil vi utrede om hvilken topologi som kan benyttes og hva dette innebærer for resten av systemet.

I kapitel 4.2 har vi forklart hvilken rolle likerettere og omformere har i forhold til generatoren og nettet. Frekvensomformeren gjør at generatoren kan gå med en mye lavere frekvens enn hva frekvensen til nettet er. Dette gjør at vi får et stort arbeidsområde, og med dagens teknologi er det så å si ikke tap ved å sende strømmen igjennom omformeren. Uansett, er det topologien og kontrollstrategien som avgjør dette.

Det finnes flere forskjellige typer topologier for omforming av spenning. Den mest populære topologien som brukes ved en PMSG er en «back to back» frekvensomformer. Det finnes også andre type topologier som kan brukes ved en PMSG, som f.eks. «matrix»- og «B-4» omformer topologier.[25]

Som sagt «back to back» omformeren er brukt mest, fordi den gjør det lettere å styre effekten og gir høyere effektfaktor. Dette er mulig gjennom «PWM modulasjon» teknikker.[5] Men, denne måten å styre frekvensen på krever en sofistikert kontrollstrategi og er derfor ikke den billigste måten å gjøre det på. Et billigere alternativ er «B-4» omformeren. Denne omformeren er også mer effektiv men brukes mest ved mindre turbiner på grunn av størrelsen til omformeren. «Matrix» omformeren deler også denne ulempen. «Matrix» omformeren

fungerer best ved høye spenninger med lave harmonier. Men denne omformeren trenger 9 toveis-brytere, noe som gjør den komplisert.[25]

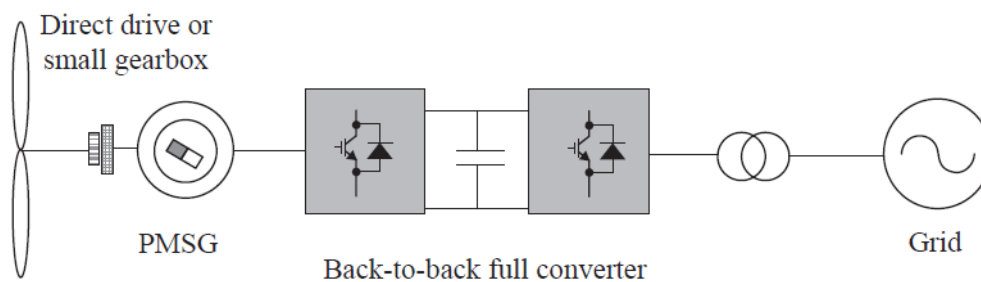
Det finnes mange forskjellige typer topologier for frekvensomformere – flere enn dem som er nevnt her - men på grunn av oppgavens avgrensing, har vi ikke gått i dybden på dem. Vi har her sett på sammenligninger mellom noen av de vanligste omformerne. «Back to back» omformeren har vist seg å være den mest brukte i eksisterende teknologi. Vi vil derfor anbefale at Subwave også vil benytte seg av en slik omformer om man benytter seg av en PMSG.

6 Konklusjon

Ut ifra drøftingen kan det se ut som at en direkte drevet PMSG vil være det beste alternativet. Vi kan ikke garantere dette, men basert på det vi har lest om lignende teknologier har det vist seg at PMSG er bedre på både vedlikehold, levetid og kostnadene over et lengre tidsperspektiv.

Spørsmålet om hvorvidt en girkasse bør implementeres må vurderes både ut ifra vedlikehold og kostnader. Hvis det viser seg å være hensiktsmessig å implementere girkasse må det i alle fall vurderes grundigere om hvor hyppige vedlikeholdsrutiner en kan vente seg.

Hvis vi plasserer PMSG i et komplett system og ser på konfigurasjonen i sin helhet, vil det se ut som på bildet under. Dette bildet er fra kapittel 4.4 og viser en PMSG-konfigurasjon for et system med variabel hastighet.



Figur 20 - Topologi PMSG konfigurasjon

Ettersom vi ikke kan teste løsningene, har vi ikke konkret data på hvordan systemene vil oppføre seg i Subwaveturbinen. Vi har derfor basert forslaget vårt på eksisterende litteratur og erfaringer fra både bølge- og vindkraft-industrien. Dette har vist seg å være en informativ metode for innhenting av informasjon som vi mener er relevant. Men, vi føler fortsatt vi ikke kan gi et fasitsvar på hvilket alternativ som passer best, selv om alternativet PMSG uten girsystem kan virke opplagt. Vi anbefaler derfor at Waveco ikke tar rapporten vår som ubestridelig fakta, men heller som et innsyn og motivasjon til videre utvikling av et svært spennende turbinkonsept som vi har hatt en fornøyelse av å være en del av.

Referanser

- [1] F. Salvesen, *Nye fornybare energikilder*. Norges forskningsråd, 2001.
- [2] L. Ulvgård, "Wave Energy Converters An experimental approach to onshore testing, deployments and offshore monitoring."
- [3] G. Maritime, "Concept Evaluation for Torpedeo Wave Turbin Short summary and recommendations," 2014.
- [4] V. S. Neary *et al.*, "Methodology for Design and Economic Analysis of Marine Energy Conversion (Mec) Technologies," 2014.
- [5] "Bølgeenergi | UngEnergi." [Online]. Available: <http://ungenergi.no/energikilder/hav-og-vannkraft/bolgeenergi/>. [Accessed: 22-May-2019].
- [6] K. Per Holmberg, Magnus Andersson, Björn Bolund and V. A. Strandanger, "Wave Power - Surveillance study of the development," 2011.
- [7] J. Blackledge, E. Coyle, R. McGuirk, and D. Kearney, "Analysis of Wind Velocity Signals for Estimating the Wave Power Density of Ireland ' s Coastal Resource," 2012.
- [8] Wikibooks, "Bølgekraft/Bølgekraftens grunnleggende utfordringer," 2019. [Online]. Available: https://no.wikibooks.org/wiki/Bølgekraft/Bølgekraftens_grunnleggende_utfordringer. [Accessed: 31-May-2019].
- [9] A. Têtu, "Power Take-Off Systems for WECs," 2017.
- [10] "Bølgeenergi – Alt om fornybar energi (Strøm.no)." [Online]. Available: <https://strøm.no/bølgeenergi>. [Accessed: 22-May-2019].
- [11] R. Toossi, *Energy and the environment: resources, technologies, and impacts*. 2009.
- [12] K. Saugstad and I. Gunvaldsen, "elektrisk maskin – Store norske leksikon." [Online]. Available: https://snl.no/elektrisk_maskin. [Accessed: 22-May-2019].
- [13] E. Hau, *Wind turbines*. 2015.
- [14] ABB, "Wind power generators High speed PM generator series for full converter concept from 1.5 MW upwards," 2012.
- [15] L. Sivertsen, "Elektriske maskiner," 2012.
- [16] B. Blix, "Hva er fordelene med børsteløs? - DinSide." [Online]. Available: <https://www.dinside.no/bolig/hva-er-fordelen-med-borstelos/61748079>. [Accessed: 22-May-2019].
- [17] "Applications of DC Generators | Electrical4U," <https://www.electrical4u.com/>. [Online]. Available: <https://www.electrical4u.com/applications-of-dc-generators/>. [Accessed: 22-May-2019].
- [18] I. Gunvaldsen, "vekselretter – Store norske leksikon." [Online]. Available: <https://snl.no/vekselretter>. [Accessed: 22-May-2019].
- [19] T. Hansen, "frekvensomformer – Store norske leksikon." [Online]. Available: <https://snl.no/frekvensomformer>. [Accessed: 22-May-2019].
- [20] K. A. Rosvold and I. Gunvaldsen, "likeretter – Store norske leksikon." [Online]. Available: <https://snl.no/likeretter>. [Accessed: 22-May-2019].

-
- [21] R. Alcom and D. O'Sullivan, *Electrical Design for Ocean Wave and Tidal Energy Systems*. 2013.
- [22] D. B. Murray, "Energy storage systems for wave energy converters and microgrids," 2013.
- [23] "Vitenarkiv i Bragekonsortiet | Unit." [Online]. Available: <https://www.unit.no/vitenarkiv-i-bragekonsortiet>. [Accessed: 22-May-2019].
- [24] N. Madani, "Design of a Permanent Magnet Synchronous Generator for a Vertical Axis Wind Turbine," 2011.
- [25] V. K. Dwivedi, M. Bajaj, and A. Kumar, "Power Electronics Converters for a Wind Energy Conversion System: Review," 2013.
- [26] "Frequency Converter Basics." [Online]. Available: <http://www.frequencyconverter.net/basics.html>. [Accessed: 24-May-2019].
- [27] Ø. Haugland, "Styring - Generator." [Online]. Available: <http://oyvind.servehttp.com/styring.htm>. [Accessed: 23-May-2019].
- [28] P. Björklund, "Compensation of reactive power in wind power application," 2000.
- [29] "Om reaktiv effekt - Skagerak Nett." [Online]. Available: <https://www.skageraknett.no/om-reaktiv-effekt/category1589.html>. [Accessed: 23-May-2019].
- [30] A. Shabani, M. Alizadeh Bidgoli, and A. Deihimi, "Comparison of DDPMSG and DFIG concepts for wind turbines," 2014.
- [31] H. Ahuja, R. Virmani, and A. Ahuja, "Performance comparison of most prevalent wind energy conversion systems," 2017.
- [32] "PMG vs . DFIG – the big generator technology debate," *Switch*, 2014.
- [33] A.-A. Laczko, "Brushless DC permanent magnet micro-wind generator modeling and optimization over long-term wind-speed cycle operation," 2018.
- [34] K. Leban, E. Ritchie, and A. Argeseanu, "Design preliminaries for direct drive under water wind turbine generator," 2012.
- [35] R. Scott Semken *et al.*, "Direct-drive permanent magnet generators for high-power wind turbines: benefits and limiting factors," 2012.

Figurliste

Figur 1 - Prinsippskisse Subwavekonsept.....	9
Figur 2 - Prototype Subwave	9
Figur 3 - Subwaveturbinen	11
Figur 4 - Verdenskart for energipotensialet over et år[7].....	14
Figur 5 - "Wave-to-wire" diagram.....	15
Figur 6 - Forskjellige utførelser av bølgekraftsomformere	16
Figur 7 - Illustrasjon av punkt- og linje-absorbator med forankring i bunn	17
Figur 8 - Illustrasjon av svingende vannsøyle.....	18
Figur 9 - Synkrongenerator.....	22
Figur 10 - Konstruksjonen av rotor i synkronmaskinen	22
Figur 11 - Asynkrongenerator.....	24
Figur 12 - Prinsippskisse trefase kortslutningsmotor	25
Figur 13 - Utforming og komponenter i en konvensjonell likestrømmaskin.....	26
Figur 14 - Back-to-back frekvensomformer.....	28
Figur 15 - To-trinns spurgear for vindmøller typisk 200-500 kW	30
Figur 16 - Topologi SCIG konfigurasjon	34
Figur 17 - Topologi DFIG konfigurasjon.....	36
Figur 18 - Direkte drevet synkron generator med omformer for variabel hastighet	38
Figur 19 - Produksjon av multi-polet synkrongeneratorer av Enercon.....	38
Figur 20 - Topologi PMSG konfigurasjon.....	39