

Lukas Sebastian Becker
Jonas André Johansen
Chris-Andre Framvik

Undersøkelse av generatorløsning for vertikalakslet vindturbin

Bacheloroppgave i Elkraft
Veileder: Fredrik Ege Abrahamsen
Mai 2022

Lukas Sebastian Becker
Jonas André Johansen
Chris-Andre Framvik

Undersøkelse av generatorløsning for vertikalakslet vindturbin


Bacheloroppgave i Elkraft
Veileder: Fredrik Ege Abrahamsen
Mai 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for informasjonsteknologi og elektroteknikk
Institutt for elkraftteknikk


Oppgavens tittel: Undersøkelse av generatorløsning for vertikalakslet vindturbin	Dato: 19.05.2022		
	Antall sider: 36		
	Masteroppgave:	Bacheloroppgave	<input checked="" type="checkbox"/>
Navn: Lukas Sebastian Becker, Jonas André Johansen og Chris-Andre Framvik			
Veileder: Fredrik Ege Abrahamsen			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/ veiledere: Rune Roger Johansen, Wind El Norway AS			
Sammendrag:			
<p>Bacheloroppgaven omhandler videreutviklingen av konseptet for en vertikalakslet vindturbin med navnet Vindorku, som består av tre roterende skovler og som er utviklet av Wind El Norway AS. Hovedformålet med oppgaven er å finne en generatorløsning for denne vindturbinen, i tillegg til en løsning for anvending av generert energi.</p> <p>To av skovlene på vindturbinen kobles sammen ved hjelp av et kilereimsystem. Reimsystemet ble koblet til en permanentmagnet synkrongenerator, som ble brukt til produksjon av elektrisk effekt. Den produserte effekten likerettes ved hjelp av en full-bro trefase likeretter og brukes deretter til oppladning av batteri.</p> <p>Den mekaniske effekten ble estimert til 6 W per skovl ved en vindhastighet på 4 m/s, og 93,75 W per skovl ved 10 m/s. Ved praktiske målinger av elektrisk effekt ble den målt til 2,33 W ved vind på 6,8 m/s og 5,77 W ved vindkast på 10 m/s. Senere ble både elektriske tap beregnet og mekaniske tap estimert, og det viser seg at systemet lider under forholdsvis store tap som skyldes reimsystemet. Gruppen kommer frem til at reimsystemet er en mindre god løsning for prototypen på grunn av det lave momentet i systemet. Senere ble det utført simuleringer av det elektriske systemet i Simulink for å sammenligne de simulerte elektriske tapene med beregnede elektriske tap.</p> <p>Gruppen har konkludert med at hele vindturbinen må rekonstrueres dersom Vindorku skal bli et konkurransedyktig produkt.</p>			

Stikkord:

Generatorløsning
Vertikal akslet vindturbin
Mikrogrid
Vindenergi
Forsyningssikkerhet



Lukas Sebastian Becker



Chris-Andre Framvik



Jonas André Johansen

Forord

Norge, som mange andre land, har tatt for seg store planer for utvikling, utbygging og ekspansjon av den elektriske infrastrukturen både med tanke på distribusjon og produksjon av energi. Dette for å kunne senke utslipp av klimagasser, ved å bytte ut fossile brennstoff og elektrifisere energiintensive prosesser. Økt forbruk av elektrisitet i fremtiden kombinert med eksport av energi fører til at Norge i perioder med lav nedbørsmengde vil kunne oppleve underskudd av energi dersom ikke flere former energiproduksjon bygges ut. Det kan være en løsning å øke lokal produsert og lagret energi, for å få mindre tap som oppstår i overføring av energi over lengre distanser. Mikrogrid med forsyning fra for eksempel vindkraft, kombinert med moderne former for energilagring kan være med på å forme et mer effektivt elektrisk nett. Det prognostiseres mer ekstremvær i fremtiden, mikrogrid vil her kunne være med på å øke forsyningsikkerheten i det elektriske nettet siden systemet vil kunne operere i øydrift.

Gruppen ønsket å bidra med løsninger for forsyningsikkerhet og levering av grønn elektrisk energi til alle norske husstander og fikk dermed straks en stor interesse for bacheloroppgaven presentert av Alemayehu Gebremedhin (professor ved institutt for vareproduksjon og byggtknikk v/ NTNU i Gjøvik) og levert av Rune Roger Johansen ved Wind El Norway AS. Gruppen vil dermed takke for et flott samarbeid med disse samt takke Fredrik Ege Abrahamsen for gode råd under hele oppgaven.

Gruppen håper at de kunne bidra til videre utvikling av konseptet av vindturbinen til Wind El Norway AS. Samt bidra med løsninger for bruk, lagring og omgjøring av den elektriske energien produsert av turbinen.

Abstract

This bachelor thesis is about the further development of the concept for a vertically axled wind turbine called Vindorku, which consists of three rotating blades and has been developed by Wind El Norway AS. The main purpose of the thesis is to find a generator solution suitable for this wind turbine, in addition to finding a solution for the use of the generated energy.

Two of the blades on the wind turbine are connected together using a V-belt system. The V-belt system was connected to a permanent magnet synchronous generator, which was used for the production of electrical power. The produced power is rectified using a full-bridge three phase rectifier and is then used to charge a battery.

The mechanical power was estimated to be about 6 W per blade at a wind speed of 4 m/s and 93.75 W at 10m/s. By doing practical measurements on the wind turbine, the power was measured to be about 2.33 W at a constant wind speed of 6.8 m/s and 5.77 W at gusts of 10 m/s. Later, both electrical losses were calculated and mechanical losses were estimated, and it turns out that the system suffers from a large amount of losses due to the low efficiency of the V-belt system. The group concludes that the belt system isn't a good solution for power transmission in this system because of the low torque. Thereafter, simulations of the electrical system were performed in Simulink to compare the simulated electrical losses with the calculated electrical losses.

The group has come to the conclusion that in order for Vindorku to be a competitive product, the design needs to be reconsidered.

Innhold

Figurer	vi
Tabeller	vii
1 Innledning	1
1.1 Introduksjon til oppgaven	1
1.2 Problemstilling	2
1.3 Begrunnelse	2
1.4 Avgrensninger	2
1.5 Samfunnsmessige perspektiver	3
1.5.1 Opposisjon mot vindkraft	3
1.5.2 Parisavtalen og FNs bærekraftsmål	3
1.5.3 Elektrisk energiforbruk i Norge	4
1.5.4 Forsyningssikkerhet	4
1.6 Bruksområde	4
1.7 State-of-the-art: VAWT	5
1.7.1 Forskning	5
1.7.2 Marked og dagens bruksområder	6
1.8 Oppbygging av rapporten	6
2 Teori	7
2.1 Vindkraft	7
2.2 Mekanisk effekt	7
2.3 Permanentmagnet synkrongenerator	7
2.3.1 D- og Q-akse	8
2.4 Likeretting	9
2.4.1 Rippel og dimensjonering av glattekondensator	10
2.5 Mekanisk/elektrisk effekttap	11
2.5.1 Mekanisk tap	11
2.5.2 Elektrisk tap	12
2.6 Invertering og nettilkobling	13
2.7 Smartnett	16
2.7.1 Lagring av energi	16
2.7.2 Mikrogrid	19

3	Metode	21
3.1	Effekt estimering	21
3.2	Mekanisk oppkobling	22
3.3	Elektrisk oppkobling	23
4	Resultater	24
4.1	Generatorparametre	24
4.1.1	Viklingsresistanser	24
4.1.2	D-akse induktans	24
4.1.3	Q-akse induktans	25
4.1.4	Maskinkonstanter	25
4.2	Modellering og simulering	27
4.3	Måleresultater	30
5	Diskusjon og analyse	32
5.1	Måleresultat og usikkerhet	32
5.1.1	Anemometer og ustabil vind	32
5.1.2	Effektivitet og effektkurve	32
5.2	Simulering	33
5.3	Forbedringspotensial	33
5.4	Nett-tilkobling	34
6	Konklusjon	35
7	Fremtidig arbeid	36
	Referanser	37
	Vedlegg	41

Figurer

1	Vindorku	1
2	Typer VAWT	5
3	Prinsippskisse veiturbin	6
4	PMSG	8
5	d- og q-akser, fremtrede pol PMSG	9
6	Koblingsskjema, likeretter	10
7	Spenning, likeretter	10
8	SPA effektivitet	12
9	Inverterens oppbygning	13
10	Inverter spenninger	14
11	Lavpassfilter	15
12	Elektrisk oppkobling	16
13	Pris batteri	17
14	Elbil som energilager	18
15	Duck curve	19
16	Mikrogrid	20
17	Matlab-script for estimering av effekt.	21
18	Mekanisk oppkobling	22
19	Praktisk oppkobling	23
20	Skisse av stjernekobling	24
21	Sprangrespons L_d	25
22	Linjespenning uten last	26
23	Simulink modell	27
24	Simulert rotorhastighet	27
25	Simulert linjespenning	28
26	Simulert ladespenning	28
27	Simulert ladestrøm	29
28	Simulert elektrisk effekt	29
29	Strøm og spenningsmåling	30
30	Effekt og vindhastighet	31

Tabeller

1	Krav for THD	15
2	Oversikt over målte viklingsresistanser.	24
3	Målte verdier og vindhastigheter	31

Forkortelser

WEN	Wind El Norway AS
CFD	Computational fluid dynamics
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
PMSG	Permanentmagnet synkrogenerator
MMF	Magnetomotorisk spenning
FB3FL	Fullbro trefase likeretter
RMS	Kvadratisk gjennomsnitt
VSC	Voltage source converter
FOL	Forskrift om leveringskvalitet
THD	Total harmonisk forvrengning
PWM	Puls-bredde modulasjon
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
m_f	Frequency modulation ratio
AC	Alternating current
DC	Direct current
EMF	Elektromagnetisk felt
SSB	Statistisk sentralbyrå
V2G	Vehicle-to-grid

1 Innledning

1.1 Introduksjon til oppgaven

Wind El Norway AS (WEN) er et mindre norsk oppstartsfirma som har blitt grunnlagt basert på utviklingen av et nytt design for høsting av vindenergi som har fått navnet Vindorku. WEN er et firma som konsentrerer seg på videreutviklingen av dette konseptet. De samler inn ekspertise fra både rådgivende ingeniørbedrifter samt at de har et godt samarbeid med NTNU på Gjøvik. Firmaet har utviklet et konsept for en vindturbin som er basert på tre skovler som roterer vertikalt, hvor to av skovlene roterer mot klokken mens den siste roterer med klokken. Hver av skovlene består av 12 rotorblader av typen Savonius, beskrevet nærmere i kapittel 1.7. Teorien er at disse tre skovlene skal ha et aerodynamisk samspill som har et positivt innspill på hverandre. Konseptet er at en skovl vil skape turbulenser dersom den blir påtrykt en vind. Denne turbulensen i vinden skal da kunne fanges opp av de andre skovlene og påvirke disse positivt. WEN har tidligere gitt i oppdrag til en rådgivende ingeniørbedrift om å foreta en computational fluid dynamics (CFD) analyse, som ble utført av CFD Marine. Denne analysen ble brukt for å vurdere diverse parametre for en prototype av vindturbinen. CFD analysen kunne blant annet gi svar på effektkoeffisienten til turbinen og hvor mange blader på turbinen som gir mest effekt. Dataene som kommer frem i analysen viser også at det er et samarbeid mellom de tre turbinene som fører til at de produserer mer i en gruppe enn det de ville gjort alene.



Figur 1: Prototype av vindturbinen til WEN; Vindorku

WEN har tidligere hatt samarbeid med NTNU gjennom en tidligere bacheloroppgave. Bacheloroppgaven til Øyen et al. [1] er en Konsept- og ytelsesstudie for vertikalaksede vindturbiner i trekantkonfigurasjon. Denne oppgaven ble begrenset til å finne ut av om det er påvirkning mellom skovlene, hva som er ytelsen i form av rotasjon og hva sammenlignbare studier kommer frem til. Basert på denne rapporten ble deler av beregninger for parameterne for valg av generatorløsning til Vindorku foretatt. Tidligere har et lokalt ingeniørkontor forsøkt å dimensjonere en generator

for vindturbinen, samt at den tidligere bacheloroppgaven har foretatt konsulteringer med diverse fagmiljøer på Fagskolen Innlandet og NTNU uten at disse klarte å komme frem til løsninger som kunne gi et endelig resultat. På grunn av mangel av tid hadde ikke disse mulighet til å bygge videre på det å utforme en generatorløsning.

WEN ønsker å jobbe videre med prototypen de har konstruert, samt at de vil bygge videre på kunnskapen de har samlet via tidligere bacheloroppgave og hjelp fra rådgivende ingeniørbedrifter. De har dermed gitt en videre bacheloroppgave i oppdrag, for å kunne bygge videre på Vindorku slik at denne kan testes i et reelt scenario.

1.2 Problemstilling

Oppdragsgiveren har et sterkt ønske om at konseptet for denne vindturbinen videreutvikles. WEN har interesse av at gruppen kommer frem til en løsning for hvordan turbinen kan brukes for produksjon av elektrisk energi, og hvordan denne produserte energien kan anvendes. Dermed er dette hovedformålet for denne bacheloroppgaven. Det dimensjoneres og velges en generator i tillegg til at denne kobles opp og målinger av produsert effekt foretas. Basert på ønsket til oppdragsgiver er problemstillingen til oppgaven:

- Finne en passende generatorløsning med oppkobling
- Vurdere hvordan strømmen kan benyttes og kobles opp mot det elektriske nettet
- Valg av mekanisk oppkobling

1.3 Begrunnelse

Gruppen ser på det som et viktig bidrag til den norske forsyningssikkerheten av elektrisk energi at kildene i det norske nettet diversifiseres. Forbruket av elektrisk energi i Norge er i en stigende trend [2], samtidig som at det eksporteres til land med høyere kraftpriser. En omstilling fra fossile biler til elektriske biler og elektrifiseringen av oljeplattformer og andre energiintensive prosesser fører til et fremtidig høyere strømforbruk. Dette fører igjen til at Norge vil måtte bygge ut infrastruktur for produksjon av elektrisk energi for å tilfredsstille den fremtidige etterspørselen etter elektrisk energi. EU har innført et kvotesystem for CO_2 utslipp for bedrifter. Dette systemet baseres på at bedrifter skal slippe ut mindre klimagasser ved at det blir distribuert mindre av disse for hvert år som går, samt at bedrifter skal kunne handle disse med hverandre [3]. Målet med dette er å tvinge bedrifter til elektrifisering, som fører til en økt etterspørsel etter strøm. Gruppen ønsker å bidra med løsninger for integrering av lokalt produsert grønn energi til nettet. Prototypen av vindturbinen til Wind El Norway AS kan være et bidrag til å oppnå dette.

1.4 Avgrensninger

Gruppen avgrensner bacheloroppgaven til målene oppdragsgiver har for videreutvikling av konseptet for vindturbinen samt at samfunnsmessige viktige punkt inkluderes.

- Estimering av effekt
- Dimensjonering og valg av generator
- Mekanisk oppkobling av generator
- Foreta målinger av produsert strøm og spenning samt å foreta vurderinger av oppnådd resultat
- Utrede hvordan produsert strøm kan anvendes og kobles til nettet
- Simulering av det elektriske systemet i Simulink

-
- Estimering av effektivitet

Siden bacheloroppgaven som tidligere ble skrevet ikke har tatt for seg valg av generator gjøres dette i denne oppgaven. Basert på parametre gitt av rapporten [1] som tidligere ble skrevet og utformingen til prototypen til WEN, utredes en løsning for generator og hva som kan gjøres med den produserte effekten.

1.5 Samfunnsmessige perspektiver

«Humanity has the ability to make development sustainable to ensure that it meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs».

-The World Commission on Environment and Development [4].

Disse ordene ble skrevet i det som ofte omtales som Brundtlandrapporten. Dette var rapporten som innførte begrepet bærekraftig utvikling [5], og var et forsøk på å utarbeide løsninger for verdens fattigdom og miljøproblemer [6]. Rapporten tar for seg disse problemene med en slik tilnærming at den skal fungere som et varsel og en veiledning for et internasjonalt samarbeid om å sikre nåværende og fremtidige generasjoners fremtid. Det er tydelig at begrepet var kommet for å bli, da fokuset på miljø og bærekraftig utvikling er stort i dagens samfunn. Det er nettopp derfor det er viktig at firmaer som WEN er med på å utvikle nye, gode løsninger.

1.5.1 Opposisjon mot vindkraft

Utbygging av vindkraft forekommer ikke uten motstand. Mange mener denne formen for fornybar energi ødelegger mer enn det den bidrar med ved at den tar opp store mengder areal, er ødeleggende for dyreliv, ser stygt ut og er lydforurensende. Dette fører også med seg et stort politisk engasjement og det er et viktig, men sensitivt tema for de politiske partiene. I 2019 ble konsesjonsbehandlingen for nye vindkraftverk stanset i påvente av en revidert versjon av behandlingskravene og det ble åpnet for nye søknader i april 2022 [7].

Vindkraftutbyggingen har vært spesielt merkbar for reindriften i Norge. I Fosen i Trøndelag er det bygget og driftes det to vindparker som er en del av Europas største vindkraftprosjekt på land [8]. Fosen Vind som er utbyggeren av disse parkene (Storheia og Roan), ble dømt i lagmannsretten til å betale 90 millioner kroner i erstatning til reindriften som følge av utbyggingen [9]. Saken ble anket til høyesterett i 2021 og det ble funnet at konsesjonene for utbyggingen av disse to anleggene var ugyldige i henhold til FNs konvensjon om sivile og politiske rettigheter. Det er fortsatt usikkert hva som skal gjøres med anleggene [10].

1.5.2 Parisavtalen og FNs bærekraftsmål

2 °C er den øvre grensen som ble satt for jordens temperaturstigning innen 2100 gjennom Parisavtalen i 2015 [11]. Avtalen går ut på at alle land har et ansvar om å redusere sine utslipp og det kreves at alle har en plan for hvordan de skal gjøre dette. Dersom dette skal være mulig er man, i tillegg til andre grep, nødt til å vurdere alternative, fornybare energikilder. Ved å erstatte fossile kilder med fornybar energi, vil man kunne kutte ned på utslippene knyttet til kraftproduksjon og dermed også bidra til å oppnå FNs bærekraftsmål.

De 17 bærekraftsmålene til FN ble utarbeidet etter en massiv spørreundersøkelse der nesten 10 millioner mennesker fra hele verden ble spurt om hva som var viktig for dem [12]. Hovedpoenget med disse målene er at de skal fungere som en plan for hva som skal til for å utrydde fattigdom og ulikhet, samt stanse klimaendringene. Målet er at dette skal oppnås innen 2030. Spesielt fire av målene er relevante for denne oppgaven:

- #7: Ren energi til alle
- #9: Industri, innovasjon og infrastruktur

-
- #11: Bærekraftige byer og lokalsamfunn
 - #13: Stoppe klimaendringene

Mindre vindkraft-turbiner som Vindorku, sammen med solceller, vil kunne bidra med lokalproduksjon av ren energi i områder der man til nå har måttet belage seg på kullkraft og andre fossile energikilder. Det vil også gi muligheten til å produsere energi i områder der man ikke tidligere har hatt tilgang til elektrisitet, slik som primitive landsbyer i fattige land. Dette vil være en fremgang på flere punkter, blant annet stans av klimaendringene og bedre helse og livskvalitet.

Vindorku og lignende systemer vil også kunne bidra til målet om bærekraftige byer og lokalsamfunn, samt bedre industri, innovasjon og infrastruktur. Slike systemer vil kunne fungere som en avlastning av elektrisitetsnettet og sørge for at flere bygg kan nå status som klimanøytrale, eventuelt klimapositive.

1.5.3 Elektrisk energiforbruk i Norge

I denne oppgaven ønsker gruppen å kunne bidra med å skape løsninger for fremtidige energikilder i det elektriske kraftnettet. I følge Statistisk sentralbyrå (SSB) har den gjennomsnittlige forbruken av elektrisk energi i perioden 1993 til 2016 blitt redusert fra omlag 18 000 kWh, til omlag 16 000 kWh per husholdning [13]. SSB forklarer nedgangen med at strømprisen i perioder har økt mer enn den generelle prisveksten gitt av konsumpris indeksen, kombinert med at det generelt legges mer vekt på energioverføring. Selv om strømforbruket i den gjennomsnittlige husholdning har sunket, har det totale strømforbruket i landet steget i den samme perioden med omlag 21 TWh, noe som blant annet skyldes en tilnærmet tredobling av forbruket i fritidsboliger [13]. I tillegg viser en rapport [14] fra SSB at økt velstand og befolkningsvekst har ført til økt totalforbruk av strøm i Norge. Det at ressursforbruk økes selv om komponenter effektiviseres kalles Jevons paradoks [15]. Det vil si at effektivisering av teknologi kan føre til et økt forbruk. Økt forbruk fører til at det elektriske nettet må kunne overføre mer energi. Økt energioverføring vil øke temperaturen i blant annet olje i transformatorer, noe som fører til en nedsatt forventet teknisk levealder [16]. Siden transformatoren er en av de mest verdifulle komponentene i det elektriske nettet, er det samfunnsmessig hensiktsmessig at levealderen til disse maksimeres ved å ikke utsette disse for en høy driftstemperatur.

Det forventes at det årlige forbruket av kraft i Norge økes til 146 TWh innen 2030, opp fra 133 TWh i 2016 [2]. Ifølge statnett eksporterte Norge i 2021 17,3 TWh elektrisk energi til andre land [17]. For at Norge i fremtiden skal kunne fortsette å oppnå et høyt nivå av kraftoverskudd må det bygges ut mer kraft. Dersom overskuddet av energi i Norge reduseres i fremtiden, kombinert med økte priser på CO_2 , vil strømprisen kunne økes [18]. Derfor vil det være hensiktsmessig å øke produksjonen i takt med forbruket.

1.5.4 Forsyningssikkerhet

Majoriteten av energiproduksjonen i Norge kommer fra store vannkraftanlegg [19]. Totalt sett er Norge selvforsynt med strøm fordi det blir eksportert mer enn vi importerer. Men mesteparten av vannkraften ligger på vestlandet, sørlandet og nord-Norge ifølge Norges vassdrags- og energidirektorat [20]. Så på østlandet, der det bor flest innbyggere, må det overføres elektrisk energi fra de andre lands-delene. Dette gjør østlandet avhengig av store kraftlinjer som er sårbare for både natur katastrofer, terror og krig. Derfor er det viktig med mer lokalproduksjon og diversifikasjon av det elektriske nettet for å kunne øke forsyningssikkerheten. Dette kan Vindorku bidra med på samme måte som lokale solcelle anlegg.

1.6 Bruksområde

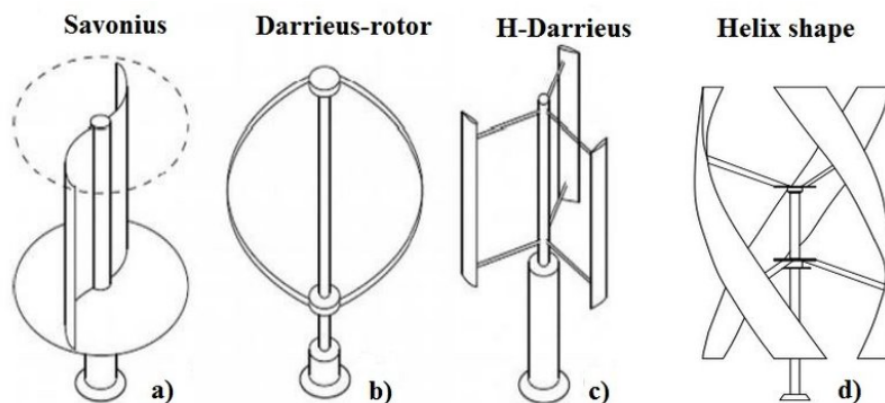
Bruksområdet til Vindorku er tiltenkt hytter og hovedsaklig grisgrendte strøk for private kunder. Den kan ha to forskjellige driftmoduser. Første alternativ er lokalt, som på en hytte uten nettilkobling

i øydrift der den produserte energien kan lade et batteri til senere bruk. Det er da mulighet for at batteriet kan brukes direkte i $12/24$ V Direct current (DC) anlegg, ellers må det kobles til en inverter for å omforme spenningen til 230 V Alternating current (AC).

Eventuelt kan Vindorku også kobles til nettet ved bruk av en inverter. Da kan overflødig energi selges tilbake til nettet. Vindturbinen kan da konfigureres slik at den også kan fungere i øydrift ved strømbrudd på nettet.

1.7 State-of-the-art: VAWT

Den første vertikalakslede turbinen (VAWT) som baserte seg på aerodynamisk løft ble utviklet av franskmannen Georges Darrieus på 1920-tallet [21]. Denne typen turbin har naturlig nok fått navnet Darrieus, og er en av fire typer rotorere som har blitt benyttet for slike turbiner. Disse kan sees i figur 2.



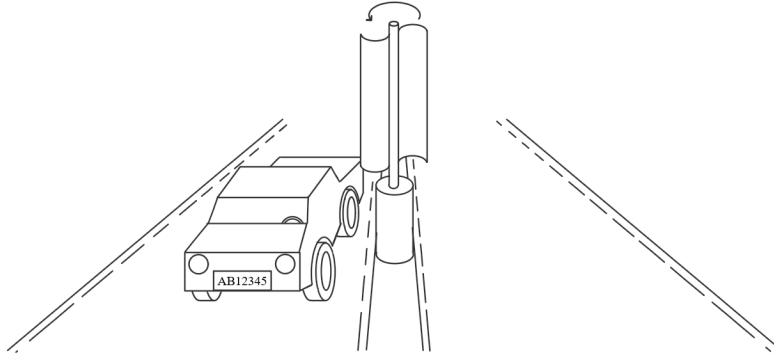
Figur 2: De fire forskjellige bladkonfigurasjonene som har vært brukt/brukes i VAWT [22].

De forskjellige konfigurasjonene har alle sine fordeler og ulemper. Savonius-konfigurasjoner har blant annet lettere for å starte rotasjonen, mer moment og er billige i drift, mens Darrieus typene har vist seg å være mer effektive for høyere hastigheter [21]. Det kan også nevnes at Savonius-rotorer baserer seg på aerodynamisk «drag», mens Darrieus-rotorene baserer seg på aerodynamisk løft. Disse prinsippene ble studert nærmere i bacheloroppgaven til Øyen et al. [1].

1.7.1 Forskning

I følge en rapport utarbeidet gjennom et samarbeid mellom Marine Innovations Research Group og Thermal Systems and Heat Transfer Research Group ved Coruna universitetet i Spania i 2015, ble det publisert 358 forskningsartikler om VAWT mellom 2010 og 2014 [23]. 97 av disse ble publisert i Europa, mens hoveddelen av artiklene ble publisert i Kina. Det er også Kina som hadde flest patenter disse årene. Til tross for at dette begynner å bli noen år siden, ser det ut til at utviklingen står noe stille. Man kan finne mange forskjellige konsepter, ideer og teorier dersom man leter, men sjeldent noe utenom konseptfasen. Hvorfor det er slik er noe uklart, men det kan ha noe med effektivitet/pris sammenlignet med horisontalakslede vindturbiner (HAWT).

Når det er sagt, finnes det mange spennende konsepter og ideer. Et konsept som er spesielt interessant ble presentert i en rapport ved Mehran University of Engineering and Technology i 2019 [24]. Der ble det undersøkt muligheten for å bruke turbulensen generert av trafikken langs motorveiene til å generere strøm med vertikalakslede vindturbiner, samt kombinere dette med solceller. Vindturbinen plasseres mellom kjørefeltene slik som skissert i figur 3.



Figur 3: Prinsskisse av konseptet presentert i rapporten ved Mehran University of Engineering and Technology [24]. Skissen er egenprodusert.

1.7.2 Marked og dagens bruksområder

Norsk småskala vindkraft brukes mye som tilleggsenergi i solcelleinstallasjoner på hytter. Per i dag selges det hovedsaklig horisontalakslede småturbiner hos de store leverandørene av fornybare energikilder, ment for småskala installasjoner [25][26]. Disse turbinene monteres i master og har en merkeeffekt mellom 200 W og 600 W. Det er åpenbart at dette markedet er klart for vertikalakslede vindturbiner. Dersom man klarer å utvikle noe som kan levere tilsvarende effekt og samtidig gjøres mindre sjenerende ved at de kan plasseres på tak, vil dette være meget attraktive løsninger for private forbrukere.

Vertikalakslede vindturbiner har til nå blitt brukt for å generere strøm til diverse småinstallasjoner som ikke krever for mye energi [23]. Eksempler på nåværende bruksområder kan være:

- Belysning
- Gårdsdrift
 - Vannforsyning
 - Automatiske vanningsystemer
- Skip
- Gatelys
- Forskningsstasjoner uten nett-tilkobling

1.8 Oppbygging av rapporten

Det tas utgangspunkt i at leseren av rapporten har en tilsvarende kunnskap innen elektrofag, kraftelektronikk, elektriske maskiner, elektriske kraftnett og fysikk som forfatterene. Dermed forventes det at grunnleggende formler for elektroteknikk og fysikk er kjente, som innebærer at disse ikke forklares i detalj. Formler som er relevante for spesifikke komponenter brukt i oppgaven beskrives nærmere.

Rapporten består av en teorigdel, kapittel 2, som tar for seg teorien bak komponenter som brukes i den praktiske delen av oppgaven. Kapitlet tar også for seg teoretisk oppkobling mot nettet, og beskriver formler for ulike beregninger. Kapittel 3, Metode, beskriver hvordan oppgaven ble løst både med praktisk oppkobling av den elektriske og mekaniske delen av oppgaven, samt illustrasjoner for hvordan dette gjøres. Kapittel 4, Resultater, viser resultatene som ble oppnådd ved målinger, samt figurer som viser hvordan målingene ble gjort. Måleresultatene som ble funnet brukes også til å utlede generatorparametre som brukes til simuleringen. Kapittel 5, Diskusjon og analyse, går videre med resultatene som ble oppnådd og resultatene sammenlignes med teoretiske verdier og analyseres videre. Til slutt konkluderes oppgaven i kapittel 6.

2 Teori

Dette kapitlet omhandler teorien som danner grunnlaget for oppgaven. Det tar for seg generell teori om vindkraft, med historie og situasjonen i Norge. Det sees også nærmere på de forskjellige komponentene og på hva som skal til for å koble Vindorku til kraftnettet. Estimering av effekt og tap er også noe som går nærmere inn på.

2.1 Vindkraft

Vindkraft har vært en viktig energikilde for mennesker i flere tusen år. Først i form av seilbåter og primitive ventilasjonssystemer fra 300 år før kristus [27]. De første vindmøllene oppsto i Asia og var vertikalakset som Vindorku, mens tradisjonelle horisontale vindmøller antas at er en Europeisk oppfinnelse [28]. I starten ble vindmøller generelt brukt til å male korn til mel.

På slutten av 1800-tallet kom de første vindturbinene for produksjon av elektrisk energi. Det var den amerikanske ingeniøren Charles F. Brush som ble første person til å produsere strøm fra vindkraft [29], og i senere tid har vindkraft blitt en populær fornybar energikilde rundt om i verden. Norge har idag 63 vindparker på til sammen 1773 MW effekt [27], og den årlige produksjonen til disse vindparkene er på 3,9 TWh [27].

Vindkraft er under kontinuerlig utvikling og har blitt mer effektiv og robust den siste tiden [27]. Dette fører til at nye vindturbiner krever mindre vedlikehold, er mer effektive og har lengre levetid [27].

2.2 Mekanisk effekt

For estimering av mekanisk effekt som kan hentes ut brukes Newtons 2. lov for rotasjon. Denne er vist i formel 1 nedenfor, og brukes for å finne summen av moment under akselerasjon. Momentet ganges så med vinkelhastigheten for å finne effekten, som vist i formel 2.

$$\sum \tau = \alpha \cdot I \quad (1)$$

$$P_{mek} = \tau \cdot \omega \quad (2)$$

$$\alpha_i = \frac{\omega_i - \omega_{i-1}}{\Delta T} \quad (3)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{t_{periode}} \quad (4)$$

Gruppen har ikke mulighet for å måle vinkelakselerasjon direkte på turbinen, så det brukes en numerisk metode for å finne en gjennomsnittsverdi over et tidsrom, vist i formel 3.

For utregning av vinkelhastighet brukes formel 4, der periodetiden til en runde brukes som inngangsverdi.

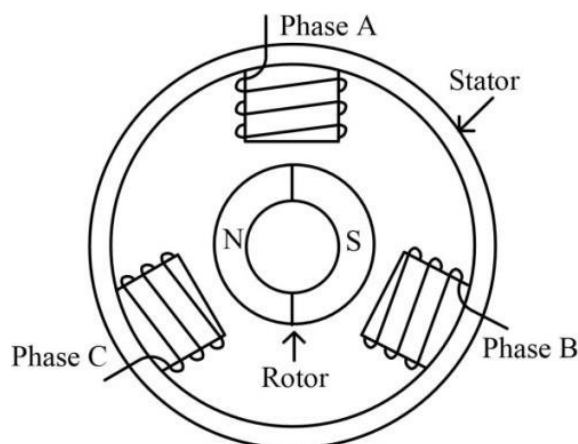
2.3 Permanentmagnet synkrongenerator

For produksjon av elektrisk effekt ved bruk av vindmølle har det de siste årene i hovedsak blitt brukt induksjonsmaskiner eller permanentmagnet synkronmaskiner (PMSG). For generatorer som er direkte tilkoblet til vindturbinen, det vil si at generatoren kobles direkte på turbinen uten større former for giring, har PMSG blitt det mest vanlige valget grunnet at denne ikke er avhengig av en fast rotasjonshastighet [30]. Siden WEN har interesse for at turbinen skal kunne levere effekt til blant annet hytter, ser gruppen på det som en god løsning å velge en slik type generator. Fordelen med å benytte seg av en PMSG er at denne vil ha lavere tap enn blant annet induksjonsmaskiner. Disse vil oppnå en lavere effektivitet grunnet magnetiseringstap, som fører til en dårligere

effektfaktor [31]. I følge en rapport utarbeidet ved Kaunas University of Technology i 2020, varierer effektiviteten til en PMSG mellom 92 % og 97 %, mens effektiviteten til en induksjonsmaskin varierer mellom 75 % og 92 % [32].

Generatorer som er basert på permanentmagneter har også som fordel at disse lettere kan begynne å levere strøm under en såkalt «black start», sammenlignet med en induksjonsmaskin. En «black start» går ut på at det oppstår et større strømbrydd i det elektriske nettet og generatoren, drevet av for eksempel vindkraft, kan være med på å få nettet igang igjen dersom slike større avbrudd skulle skje. Dette er noe som er viktig for å kunne sikre fremtidig høy driftsikkerhet ved for eksempel mer ekstremvær som følge av klimaendringer [33]. Å kunne gjennomføre en slik type «black start» vil være lettere med en PMSG, siden denne ikke trenger en ekstern kilde for magnetisering av rotorviklingene, slik som i en induksjonsmotor [34]. Dette fører til at PMSG er et godt valg for å kunne sikre leveringskvalitet og driftsikkerhet i en mer usikker fremtid, med større fare for avbrudd som følge av kraftigere ekstremvær.

De siste årene har bruken av PMSG økt betydelig på grunn av effektivitet, selv om prisen for metallene for disse magnetene har økt [35]. Tidligere ble permanentmagneter gjerne kun brukt i mer alminnelige applikasjoner som høyttalere, dynamoer og lignende. Den senere populariteten av PMSG har blitt drevet av elektriske biler og økt utbyggelse av vindenergi [36]. En stor fordel med PMSG er at disse er mindre i størrelse enn tradisjonelle induksjonsmotorer. De trenger mindre vedlikehold, siden de ikke har noen slepering og er børsteløse [37], som er en stor fordel ettersom vindturbiner ofte plasseres i områder langt unna serviceleverandører. Ved å eliminere disse delene i generatoren vil man dermed kunne redusere antall komponenter som trenger service og som eventuelt må byttes ut, noe som er en stor fordel for offshore vindkraft og mindre turbiner som kan plasseres i mer gravgrente strøk. For å kunne bruke en PMSG uten gir, vil det være nødvendig å bruke en generator med et typisk høyere antall polpar [38]. Man vil da produsere effekt ved en lavere hastighet, noe som gjør at man kan direktekoble generatoren på vindturbinen.



Figur 4: Oppbyggingen av en simpel permanentmagnet synkronmaskin [39].

Figur 4 viser prinsipielt hvordan en permanentmagnet synkronmaskin kan konstrueres. Den viser rotoren i midten av maskinen som består av permanentmagneter, i motsetning til en tradisjonell jernrotor med magnetiseringsviklinger. Disse magnetene er med på å få ned tapene i rotoren med opptil 50 % [40], i motsetning til en jernkjerne rotor. Siden rotoren består av permanentmagneter, vil denne være selvmagnetiserende i motsetning til å trenge separat magnetisering, slik som induksjonsmaskiner. Dette fører til at maskinen kan designes med et større luftgap uten at det fører til nedsatt effektivitet [41].

2.3.1 D- og Q-akse

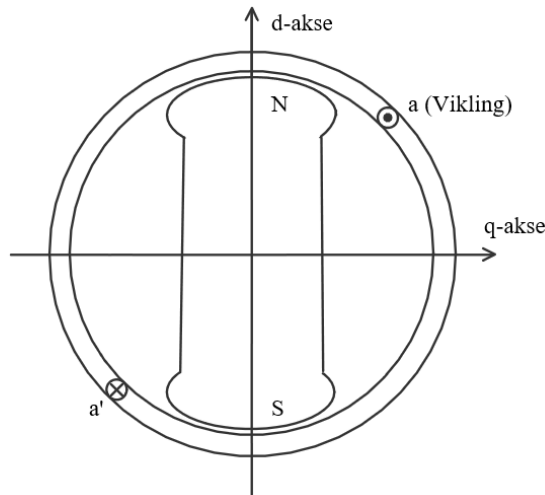
D- og Q-aksene stammer fra Blondels toreaksjonsteorem, som handler om at man dekomponerer generert magnetomotorisk kraft i en synkronmaskin i to deler [42]. En del parallelt med rotorens

poler kalt d-akse (direct axis), og en del vinkelrett på denne kalt q-akse (quadrature axis). Dette er illustrert i figur 5. Dette blir gjort for å forenkle beregningene for en «fremtredene pol» rotor, da luftgapet ikke er uniformt og man får en varierende fluks-kobling, som igjen vil gi en varierende magnetomotorisk spenning (MMF) ut ifra likning 5.

$$\mathcal{F} = \Phi \mathcal{R} \quad (5)$$

Der:

- \mathcal{F} - MMF
- Φ - magnetisk fluks
- \mathcal{R} - magnetkretsens reluktans



Figur 5: Forenklet tegning av d- og q-aksene for en fremtredene pol synkronmaskin [egenprodusert].

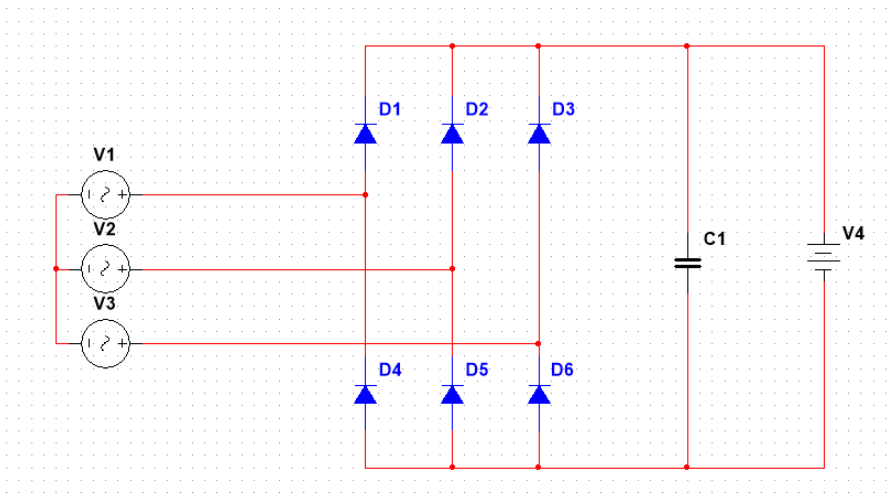
Dette gjelder som sagt for fremtredene pol rotor, da runde rotor slik som den som benyttes i denne oppgaven vil ha et uniformt luftgap og en jevnere fluks. Dette stemmer med funnene som blir beskrevet i kapittel 4.1, da d- og q-akse induktansen ble beregnet tilnærmet like.

2.4 Likeretting

Den valgte generatoren produserer 3-fas vekselspenning. Vekselspenningen som genereres vil ikke ha en konstant frekvens, siden denne vil variere ettersom den mekaniske frekvensen endres med hastigheten av vinden. Dermed vil det ikke være hensiktsmessig å mate denne effekten direkte til nettet eller bruke den til å direkte lade et batteri. Ved bruk av mindre vindturbiner som Vindorku på steder som ikke er tilkoblet nettet, for eksempel hytter eller mikrogrid, kan det være hensiktsmessig å bruke batterier for lagring og forsyning av energi. For å kunne lade batterier må vekselspenningen omgjøres til likespenning. Likeretting av vekselspenningen produsert av generatoren kan oppnås ved bruk av en fullbro trefase likeretter (FB3FL), som vist i figur 6.

Spenningen ut av denne likeretteren kan beregnes ved bruk av formel 6. Utspenningen V_{do} vil da få en amplitude som er 1.35 ganger større en RMS linje-linje spenningen som mates inn av generatoren.

$$V_{do} = \frac{3}{\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{2} \cdot V_{LL} \cdot \cos(\omega t) \cdot d(\omega t) = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} \cdot V_{LL} = 1.35 \cdot V_{LL} \quad (6)$$

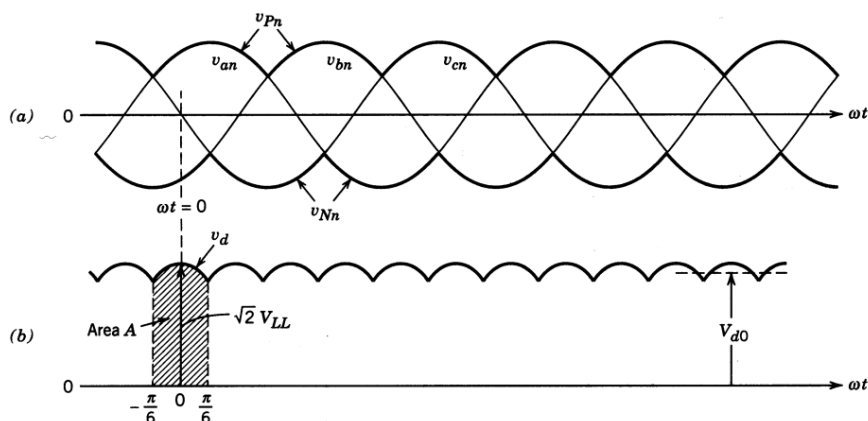


Figur 6: Koblingskjema likeretter med kondensator [egenprodusert].

Figur 6 viser hvordan en FB3FL teknisk sett bygges opp. Spenningskildene V1, V2 og V3 representerer fasespenningene som produseres av generatoren. Diodene (D1-D6) representerer selve likeretteren. Denne fungerer ved at diodene leder i par, noe som gir en utspenning med rippel som kan sees i figur 7b.

2.4.1 Rippel og dimensjonering av glattekondensator

Figur 7 viser sammenhengen mellom spenningen som sendes inn i diodelikeretteren og spenningen som kommer ut etter at den har blitt likerettet. Som nevnt viser Graf b rippelen i spenningen som kommer ut. Denne rippelen fører til at spenningen ut ikke vil være konstant. Ved bruk av denne spenningen er det ønskelig med en spenning av høyere kvalitet og dermed mindre rippel. Dette løses ved at det brukes en glattekondensator som vist i figur 6. Denne spenningen vil da være av høy nok kvalitet til å kunne brukes til lading av batteri eller videre konvertering for å kunne mates inn på det elektriske nettet.



Figur 7: Spenning inn og ut av diodelikeretter [43].

Formel 7 er formelen for beregning av strøm gjennom en kondensator. Ved omskrivning av formel 7 kan formel 8 utledes, denne kan videre brukes til dimensjonering av glattekondensatoren. Her vil en utladningsperiode være en halv periode av rippelen. Frekvensen til rippelen blir 6 ganger høyere enn for vekselspenningen før likeretteren, siden den negative halvperioden snus og blir positiv. Dette kan sees i figur 7b.

$$I_c(t) = C \frac{dV_c(t)}{dt} \quad (7)$$

$$C_{rp} = \frac{\int_0^T I(t) dt}{V_{rp}} = \frac{I(t)}{f_{ac} \cdot 2 \cdot 6 \cdot V_{rp}} \quad (8)$$

For dimensjonering av glattekondensatoren har gruppen valgt å tillate 0,5 V rippelspenning. Rippelspenningen øker lineært med strømmen, dersom strømmen dobles, dobles også rippelen. Gruppen har kommet fram til at anlegget sjeldent produserer mer enn 3 A, derfor er dette brukt som utgangspunkt for videre beregninger.

Kondensatorer fås kun i bestemte størrelser. Derfor har gruppen valgt å bruke en **33 mF** kondensator, som er stor nok til å gi en rippelspenning mindre enn 0,5 V. Beregningen for kapasitansen vises nedenfor.

$$C_{rp} = \frac{I(t)}{f_{ac} \cdot 2 \cdot 6 \cdot V_{rp}} = \frac{3A}{17.4Hz \cdot 12 \cdot 0.5v} = \mathbf{28.7mF}$$

2.5 Mekanisk/elektrisk effekttap

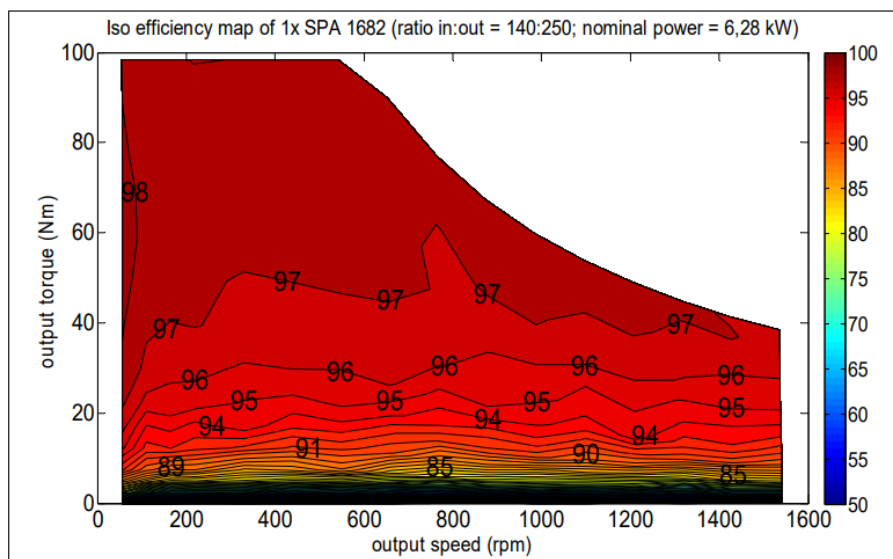
Tapene i systemet består av både mekaniske og elektriske tap. De totale tapene er differansen mellom mekanisk effekt og elektrisk effekt som vist i formel 9 nedenfor.

$$P_{tap} = P_{mek} - P_{el} \quad (9)$$

2.5.1 Mekanisk tap

De mekaniske tapene finnes i både kilereimsystemet og generatoren. Gruppen har ikke noen mulighet for å måle de mekaniske tapene, men det kan antas at de mekaniske tapene i generatoren er neglisjerbare i motsetning til kilereimsystemet, som observeres å bremse systemet betraktelig, som beskrevet i kapittel 3.2. Derfor kan man konkludere med at tapene i kilereimsystemet står for majoriteten av de mekaniske tapene.

Ifølge en rapport som har utført undersøkelser på effektiviteten til forskjellige kilereimsystemer [44], har disse store tap ved lite moment og lave effekter. Figur 8 viser effektivitet for en SPA kilereim ved forskjellige hastigheter og moment. Som man ser, påvirker ikke hastigheten effektiviteten så veldig mye men momentet har mye og si. Ved høyere moment blir effektiviteten opp mot 98 %, men ved lavere moment så synker den raskt til under 50 %.



Figur 8: SPA effektivitet [44].

2.5.2 Elektrisk tap

De elektriske effekttapene i systemet oppstår i generatoren og likeretteren. Tapene i generatoren består av statortap, virvelstrømtap (eddy current) og viklingstap. Ifølge en rapport fra Kaunas University of Technology så er en effektivitet mellom 92-98 % vanlig for en PMSG [32].

En FB3FL har 2 ledende dioder til enhver tid. Ifølge databladet til likeretteren skal man bruke 0,85 V som spenningsfall over hver diode ved beregning av effekttap [45]. Det totale spenningsfallet for likeretteren blir dermed 1,7 V. Likeretteren gir derfor et lineært tap avhengig av strømmen som man ser i formel 10.

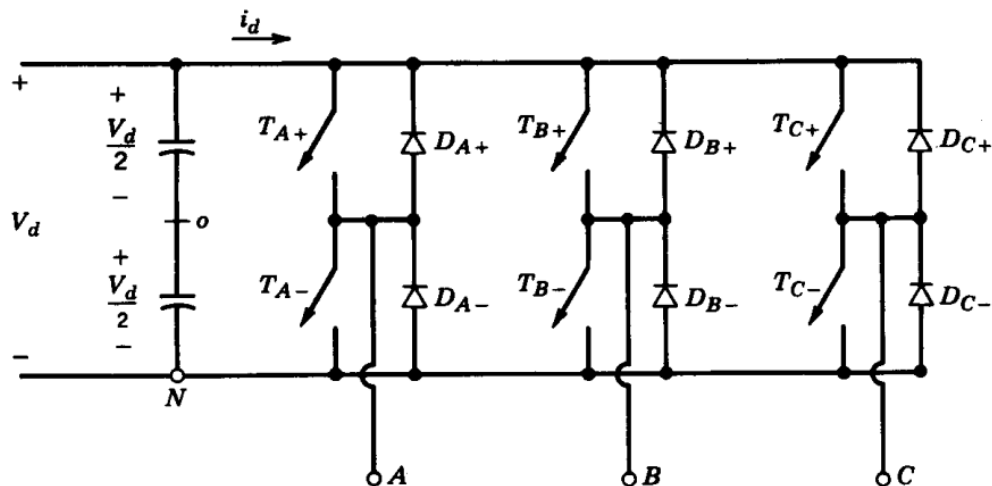
$$P_{\text{likerettertap}}(I) = 2 \cdot V_{\text{diode}} \cdot I = 1,7 \cdot I \quad (10)$$

Ladespenningen til batteriet ble funnet til å være 12,2 V i kapittel 4.3, Måleresultater. Tapsfaktoren til likeretteren blir 12,2 % som beregnet nedenfor, denne faktoren endrer seg ved temperatur og høyere ladespenning. Diodene i likeretteren får lavere spenning over seg ved høyere temperaturer ifølge databladet [45]. Derfor vil oppvarming av diodene påvirke positivt for tapene. Ved større ladestrømmer vil ladespenningen øke fra 12,2 V som også vil påvirke tapsfaktoren positivt.

$$TF_{\text{diode}} = \frac{2 \cdot V_{\text{diode}}}{2 \cdot V_{\text{diode}} + V_{\text{bat}}} = \frac{1,7}{1,7 + 12,2} = 12,2 \%$$

2.6 Invertering og nettilkobling

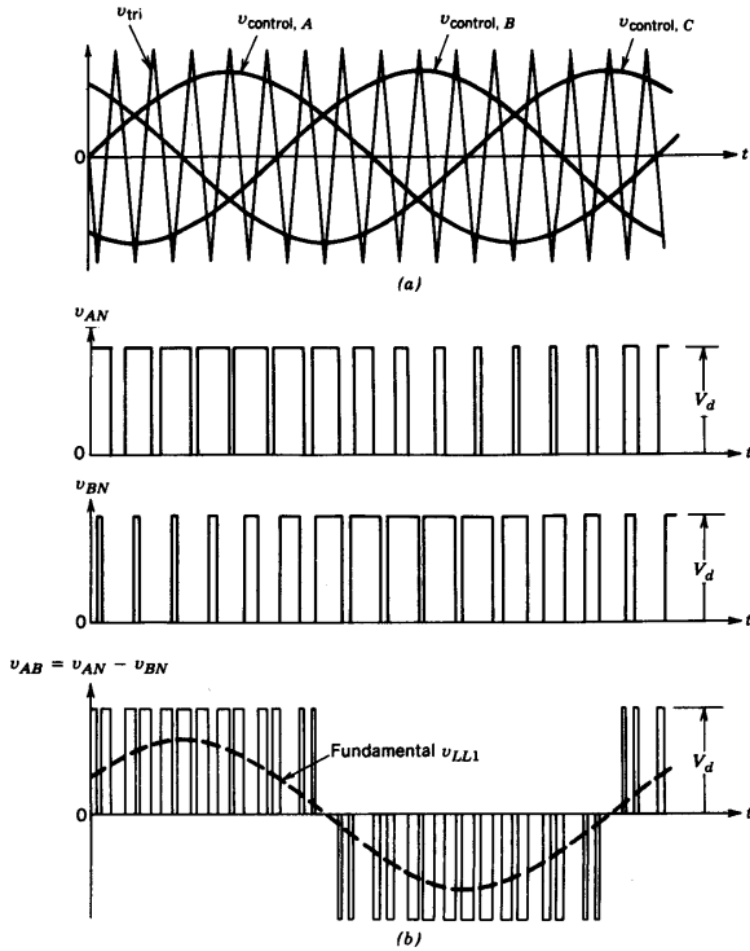
For å kunne mate effekt videre fra likeretteren og til nettet vil det være nødvendig å gjøre spenningen om til vekselspenning igjen. Dette kan gjøres ved hjelp av en trefase «voltage source converter» (VSC), også kjent som en inverter, som vist på figur 9. Ved bruk av en slik inverter vil det være hensiktsmessig å dra nytte av puls-bredde modulasjon (PWM) for å styre portsignalene til transistorene slik at disse produserer en sinusspenning.



Figur 9: Inverterens oppbygning [43].

Ved bruk av PWM i en trefaset inverter sammenlignes en trekantspenning med tre sinusformede kontrollspenninger med samme frekvens som spenningen ut av inverteren som vist i figur 10. Denne kontrollspenningen styrer svitsjenes «duty cycle», mens frekvensen til trekantspenningen bestemmer frekvensen bryterene svitsjer med [43]. Spenningen som oppstår ved utgangene av inverteren vil ikke være en perfekt sinusform, men derimot være bygd opp av en fundamental frekvens i kombinasjon med frekvenser av høyere orden. Disse frekvensene vil kunne føre til harmonisk forvrengning og er dermed ikke ønskelige. Total harmonisk forvrengning (THD) kan beregnes ved å bruke formel 11.

$$\%THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_k^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (11)$$



Figur 10: Spenninger, inverter [43].

Ved å bruke en svitsjefrekvens, f_s , som gir en modulation frequency ratio (m_f) på et oddetall ganget med en faktor på et multiplum av 3, vil man kunne eliminere de harmoniske frekvensene med partall som grunntall, samt den harmoniske på $3 \cdot n \cdot m_f$ [43]. Dette fordi faseforskjellen på m_f -harmoniske vil være lik $(120 \cdot m_f)^\circ$, noe som betyr at dersom m_f er odde og et multiplum av 3, vil disse kanselleres i linjespenningene.

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (12)$$

Formel 12 viser hvordan m_f finnes, der f_1 er frekvensen til fundamentalkomponenten til $V_{\varphi-N}$ (Output fasespenning).

De odde trippelharmoniske er noen av de mest dominante harmoniske komponentene og ved å kansellere disse vil man kunne redusere THD betydelig. Likevel vil ikke alle harmoniske komponenter kunne elimineres ved bruk av denne metoden og de vil dermed bidra til forvrengning. I tillegg setter Forskrift om leveringskvalitet (FOL) krav til THD [46]. Blant annet kreves det at nettselskap overvåker verdiene for THD og sikrer at disse ikke overstiger verdiene gitt i tabell 1 i gjennomsnitt over 10 minutter, ved spenninger mellom 230V og 35kV.

Tabell 1: Krav for THD fra FOL [46].

Odde harmoniske				Like harmoniske	
Ikke multiplum av 3		Multiplum av 3			
Orden h	U_h	Orden h	U_h	Orden h	U_h
5	6,0%	3	6,0%	2	2,0%
7	6,0%	9	1,5%	4	1,0%
11	3,5%	>9	0,5%	>4	0,5%
13	3,0%				
17	2,0%				
19,23,25	1,5%				
>25	1,0%				

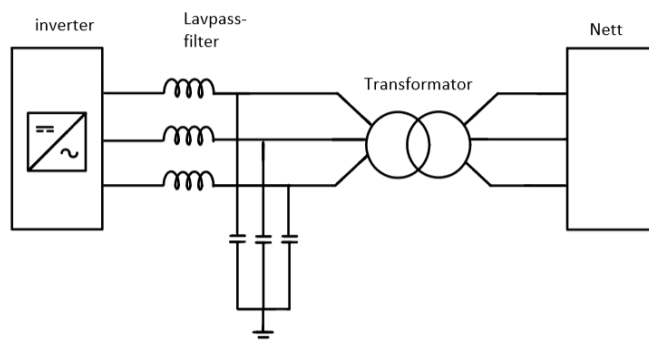
For å kunne sikre at lokale kilder som vindkraft ikke bidrar til forvrenging i nettet, vil det være hensiktsmessig å kunne fjerne alle uønskede harmoniske komponenter som kan oppstå ved bruk av kraftelektronikk som invertere.

Dette kan løses ved å bruke et filter. I disse sammenhenger er det vanlig å dra nytte av evnen spoler og kondensatorer har ved forskjellige frekvenser til å filtrere bort uønskede frekvenser. For å fjerne de harmoniske komponentene som har en høyere frekvens enn det nettet opererer på, brukes et LC-filter som vist i figur 11. Ved nærmere analyse av den visualiserte kretsen kommer det frem at filteret vil fungere som et brudd dersom det påtrykkes en frekvens av høyere orden, samtidig som den vil den kunne slippe gjennom den ønskede frekvensen. Formel 14 viser at spolene slipper gjennom lave frekvenser, mens de vil ha en høy impedans dersom frekvensen øker. Dette fører til at frekvenser av høyere orden ikke slippes igjennom. Formel 13 viser at kondensatorene slipper de høyere frekvensene til jord, mens de tvinger grunnfrekvensen videre til nettet.

$$Z_{Kondensator} = \frac{1}{j\omega C} \quad (13)$$

$$Z_{Spole} = j\omega L \quad (14)$$

Ved å bruke en slik kombinasjon av komponenter vil man kunne sikre kvaliteten på spenningen som sendes ut på nettet [47]. Ifølge FOL skal ikke graden av usymmetri i nettet være større enn 2 % over en periode på 10 minutter [46]. Det er hensiktsmessig at også lokale kilder som vindkraft bidrar til at det ikke oppstår usymmetri i nettet.

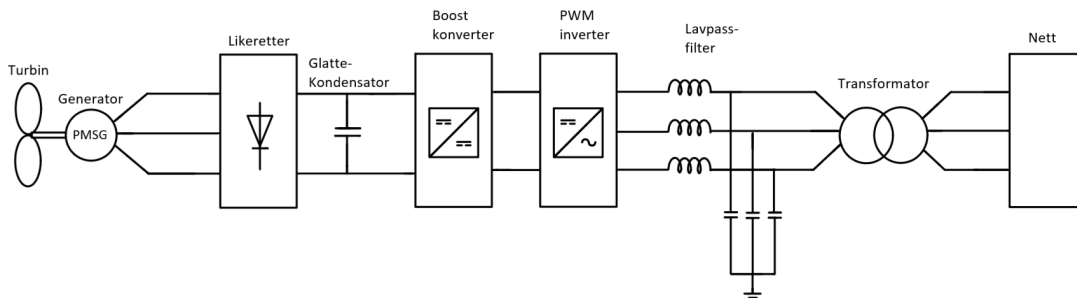


Figur 11: LC-filter [egenprodusert].

Dersom turbinen skal kunne kobles til nettet vil det være ønskelig å oppnå samme spenningsnivå som nettet opererer med. Gjerne opererer PMSG med en lavere spenning enn 230V spesielt om den har få polpar, noe som fører til at det ikke er et stort utvalg av transformatorer tilgjengelig for

å kunne heve spenningsnivået. Dette problemet kan løses ved bruk av en såkalt boost konverter, som kan øke spenningen på DC-siden, noe som ikke er mulig med en tradisjonell transformator. Denne konverteren plasseres da før inverteren. Dersom spenningen økes slik at nivået kommer på 230 V på AC siden, vil spenningsnivået ytterligere kunne heves ved hjelp av en transformator for å så kunne mate effekt videre til nettet.

På figur 12 illustreres hvordan alle komponenter som beskrives i kapittel 2 kan kombineres for tilkobling til nettet. Frekvensen på inverteren må styres til å harmonere med frekvensen nettet opererer på, siden denne vil variere ettersom forholdet mellom produksjon og forbruk av effekt i nettet forandres.



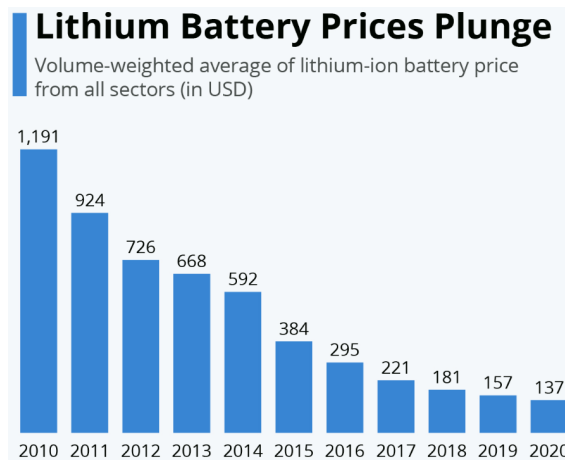
Figur 12: Elektrisk oppkobling [egenprodusert].

2.7 Smartnett

Med et samfunn i konstant utvikling og stadig flere elbiler på veiene er det allerede merkbart at det nåværende kraftnettet begynner å slite dersom utbyggingen av det elektriske nettet ikke henger med i utviklingen [48]. Derfor er det viktig å planlegge fremtidens nett på en slik måte at man kan kompensere for den enorme utviklingen uten å måtte bytte ut hele den nåværende infrastrukturen. Smartnett, eller smartgrid som det ofte kalles, er betegnelsen på det som vil bli fremtidens strømmnett. Dette innebærer en heldigitalisering og styring av strømmnettet på en slik måte at man kan utnytte kapasiteten best mulig og legge til rette for ny teknologi og et økende forbruk. For å få til dette kan man benytte seg av batterilagring og lokal energiproduksjon.

2.7.1 Lagring av energi

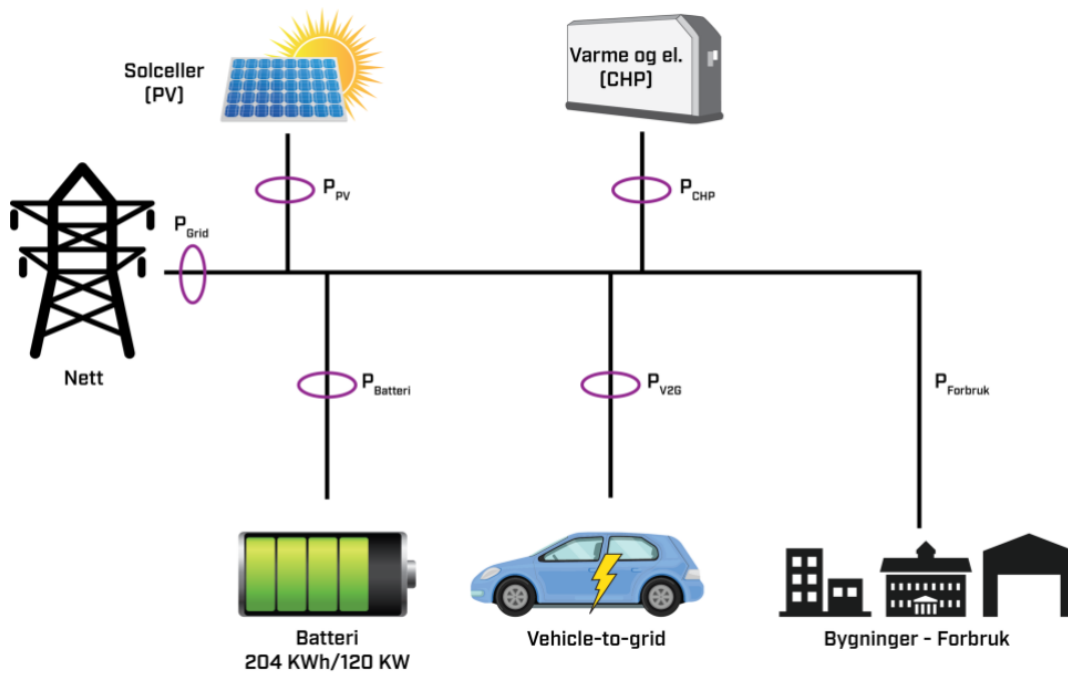
Ny teknologi for lagring av energi er under stadig utvikling. Batteriteknologi har de siste årene vært under kraftig utvikling drevet frem av hovedsakelig økt kommersiell interesse for elbiler, samt utbygging av smart grid [49]. Prisen for disse batteriene har falt betydelig per kilowattime (kWh) de siste årene, noe som har gjort det økonomisk hensiktsmessig å integrere disse i nettet. I en undersøkelse utført av Bloomberg [50] kommer det frem at prisen for litium-ion batterier i 2020 sank til nesten $\frac{1}{10}$ av prisen som var i 2010, samtidig som at energitettheten i batteripakkene har blitt mer enn 5-doblet [51]. I figur 13 illustreres hvordan prisen for denne typen batteri har utviklet seg. Også mindre batterilagransanlegg vil være teknisk hensiktsmessige i moderne smartnett, som buffere for effekt og for stabilisering av frekvens.



Figur 13: Prisutvikling for litium-ion batterier [50]

Den mest aktuelle typen batteri for lagring av energi i nettet til nå har vært og vil i nærmeste fremtid være litium-ion batterier. Dette fordi fremskritt i forskning på dette området har ført til en høy energi tetthet [51]. Den høye energi tettheten til denne type batteri har derfor også vært med på å senke kostnaden på disse. Siden kostnaden for disse batteriene har sunket betydelig, har disse blitt et reelt alternativ for lagring av energi i det elektriske nettet [52]. Et av problemene med å bruke disse litium-ion batteriene som energilager i nettet er at de degraderes ettersom de går gjennom ladesykluser. I en rapport publisert av IEEE [53] kommer det frem at kapasiteten til batteriene reduseres kjapt ettersom hvor mange ladesykluser de går gjennom. Rapporten viser at den totale kapasiteten til cellene reduseres til under 80 % allerede ved 4000 ladesykluser. Disse cellene vil degraderes enda fortere dersom de utsettes for hurtig opp- og utladning eller ved at de lades fullt opp og helt ut, noe som ofte vil være tilfellet ved bruk i et elektrisk nett. En løsning på dette kan være utviklingen av såkalte solid state batterier. Solid state batterier anses som sikre batterier, siden disse ikke er like selvtannelige som litium-ion batterier. En annen fordel med batteriene er at disse har en høy energitetthet sammenlignet med konvensjonelle batterier, samt at de har en lavere degradering ved ladesykluser. På grunn av høy mekanisk styrke på disse batteriene [54], sies disse å være de mest lovende batteriene for masseproduksjon til bruk i det elektriske nettet.

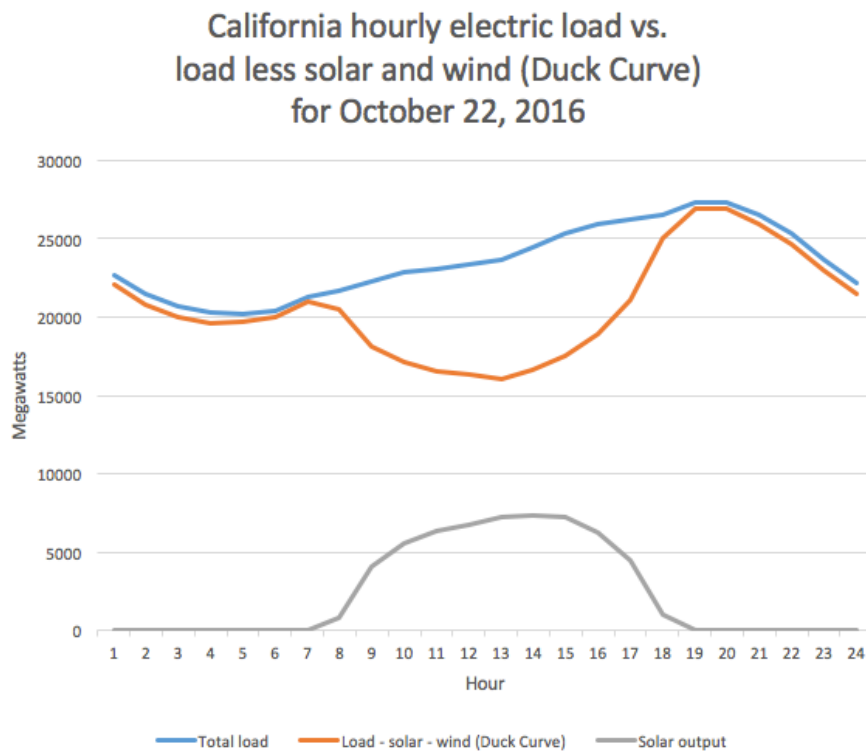
I følge E24 har elbilsalget i Norge steget voldsomt de siste årene og i 2021 var 80 % av alle nye biler som ble solgt i Norge elbiler [55]. Disse bilene lades i hovedsak opp via elbilladere direkte via nettet, og leverandører som Easee [56] har løsninger for smartladere. Disse smartladerne kan brukes av kunden for å lade elbilen når strømmen er billigst, noe som kan være med på å forhindre at det oppstår effekttopper når folk kommer hjem fra jobb [57]. Siden det stadig registreres flere elbiler i Norge, økes også mengden med batterier som finnes på norske veier. I fremtiden vil det være flere muligheter for å kunne bruke disse batteriene i nettet. Blant annet har Statsbygg installert en lader som kan levere strøm i begge retninger på Campus Evenstad [58]. Disse laderne blir ofte kalt vehicle-to-grid (V2G) ladere. Levering av strøm i begge retninger innebærer at man vil kunne lade opp batteriet til elbilen i tillegg til at den kan levere strøm tilbake til bygget/nettet igjen. Ifølge Sintef [58] har det blitt koblet en elbil til denne V2G laderen. Denne elbilen lades opp om dagen når det produseres overskuddsenergi av et solcelleanlegg, mens strømmen går motsatt retning om natten eller ved strømbrudd. Under test av dette anlegget ved strømbrudd, ble det vist at elbilen fungerte godt som backup og gjorde at anlegget kunne kjøres i øydrift som vist på figur 14. Ifølge en undersøkelse utført i Shanghai [59], ble det vist at slike V2G ladere vil kunne være med på å kunne redusere effekttopper i nettet. I tillegg vil slike V2G ladere kunne bidra til at elbiler kan balansere svingninger i energiproduksjonen til vindkraft [60].



Figur 14: Figuren viser hvordan elbil brukes som strømlager ved Campus Evenstad [58]

I det elektriske nettet oppstår det gjerne effekttopper. Disse oppstår gjerne om morgenen når store deler av befolkningen står opp og setter på større laster som kaffetrakter, varmtvannsbereder og mikroølgeovn. Dette skjer også ofte når befolkningen kommer hjem fra jobb, lager seg mat og skal lade elektrisk bil [61]. Figur 15 viser hvordan sammenhengen mellom strømproduksjon og forbruk i et lokalt nett kan se ut i løpet av et døgn, dersom det produseres store mengder energi av fornybare kilder som vind og solkraft. Figuren viser at forbruket øker på starten av dagen og synker noe i løpet av formiddagen før det kommer en topp på kvelden. Døgnet som vises på figuren kan for eksempel være et døgn med sol og mye vind, slik at produksjonen av energi overstiger forbruket. Det kommer frem at disse kildene ikke kobles ut når produksjonen er høyere enn forbruket, slik som ved tradisjonelle energikilder som vann og kullkraft. Dette fører til et overskudd av energi. Denne overskuddsenergien vil det da være hensiktsmessig å kunne lagre i batteribanker.

Nettselskap ønsker å begrense effekttoppene som oppstår om morgenen samt om kvelden, siden en økt effektoverføring kan føre til en høyere temperaturer i linjer og komponenter. Dette medfører raskere aldring av komponenter i nettet som for eksempel transformatorer [62]. Disse effekttoppene kan reduseres med metodene nevnt over for energilagring, ved at disse leverer effekt ved effekttoppene mens de lades opp ved overskudd av kraft. For at nettselskapet skal kunne ha en best mulig netto nåverdi i et nett er det hensiktsmessig at komponentene har en lang teknisk levealder. Dersom levealderen på dyre komponenter som for eksempel transformatorer kan økes ved å fjerne effekttoppene og senke driftstemperaturen, vil dette være hensiktsmessig for samfunnet. Dette fordi komponentene indirekte betales av befolkningen via nettleie. Disse metodene for lagring av energi vil være med på å begrense innvirkningen, ustabiliteten og usikkerheten forbundet med lokal energiproduksjon som vind og solkraft. Dette øker fleksibiliteten til nettselskapene, og reduserer avhengigheten av blant annet gasskraftverk for å kunne dekke effektbruken i høylast perioder.

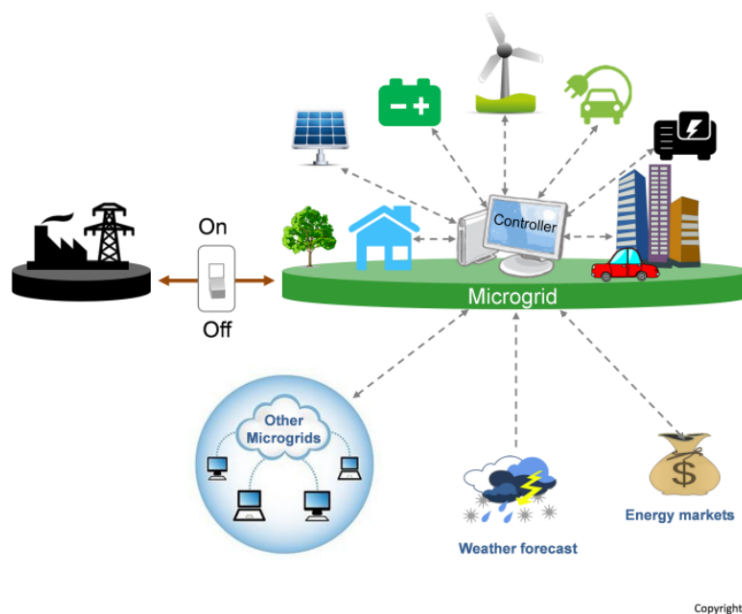


Figur 15: «Duck Curve». Viser forbruk og produksjon i nettet ved høy produksjon av fornybar energi [63].

2.7.2 Mikrogrid

Et mikrogrid er et lokalt elektrisk nett bestående av flere mindre laster og energikilder som fungerer som et kontrollert lokalt system [64]. Mikrogriden kan operere uten å være tilkoblet det resterende nettet, og dermed operere i øydrift. En stor fordel med denne type lokal produksjon og lokalt forbruk er at energikilden er meget nær kunden. Siden overføringslinjer har forholdsvis høye tap vil man kunne senke tapene dersom man unngår lange strekninger for overføring av energi. Siden et mikrogrid er et lite nett, tilpasses dette nettet gjerne etter forbrukernes behov, samtidig som at forbrukeren er med på å tilpasse seg nettet. Tidligere har mikrogrid gjerne oppstått der det ikke er hensiktsmessig med tilkobling til det resterende nettet, på grunn av tekniske årsaker som lange avstander og kostnader knyttet til tilkobling. På grunn av økonomiske årsaker har disse mikrogridene tidligere som regel blitt forsynt av fossile kilder, siden disse har vært mindre avhengig av muligheter for lagring av energi. Etersom bedre tekniske løsninger for lagring av energi har kommet på markedet, har også grønne energikilder blitt populære for forsyning av slike anlegg samtidig som disse også har blitt økonomisk fordelaktige [65]. Dette fører til at mikrogrider drevet av fornybare energikilder blir en mer og mer attraktiv løsning.

For at en mikrogrid skal kunne operere i øydrift må systemet være smart. En mikrogrid styres gjerne av software som sikrer at laster, diverse energikilder og energilagring kan kommunisere for kunne opprettholde driftssikkerheten til et konvensjonelt nett. Figur 16 viser et eksempel på hvordan en mikrogrid kan utformes.



Figur 16: Eksempel på utforming av mikrogrid [66].

Siden fornybare kilder som vind og solkraft er væravhengige, er det viktig at systemet kommuniserer slik at det oppnås høyest mulig driftssikkerhet for forbrukerne. Dersom det viser seg at det vil være lite produksjon av energi en periode, vil det være hensiktsmessig at energilagrene ikke er tappet, slik at disse kan levere energi som backup. Dersom kildene i mikrogriden ikke klarer å fylle disse energilagrene før periodene med lav produksjon, må eventuelt det konvensjonelle nettet brukes. Da kan software utformes på en slik måte at energilagrene i lades opp når strømprisene er lave, og lades ut når strømprisene er høye. På denne måten vil mikrogriden være med på å senke kostnadene for energi for forbrukerne sine, samtidig som at den kan hjelpe nettselskapet med å redusere effekttopper.

3 Metode

Dette kapitlet tar for seg måten gruppen har utført beregninger og det praktiske arbeidet. Til numerisk estimering av effekt har matlab blitt brukt som verktøy.

3.1 Effekt estimering

For estimering av effekt brukes den numeriske methoden nevnt tidligere i kapittel 2.2. To motstående blader på det ene skovlehjulet ble markert med teip, før gruppen filmet akserasjon av vindturbinen med 60 FPS fra stillestående ved en vindhastighet på $4m/s$. Vindhastigheten ble målt med et anemometer fra CEM som gir momentanverdier. Filmen ble videre analysert bilde for bilde og tidspunktet til hver halvperiode ble notert ned i en Matlab liste. Verdiene ble så brukt numerisk til å regne ut vinkelhastigheten til skovlehjulet. Fordi differansen mellom to tidspunkter i listen tilsvarer en halv periodetid så må den multipliseres med 2 for å finne periodetiden. I formlene nedfor er t_i tidspunktene i listen.

$$\omega_i = \frac{2\pi}{2 * (t_i - t_{i-1})}$$

$$\alpha_i = \frac{\omega_i - \omega_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$$

$$P_i = I \cdot \alpha_i \cdot \omega_i$$

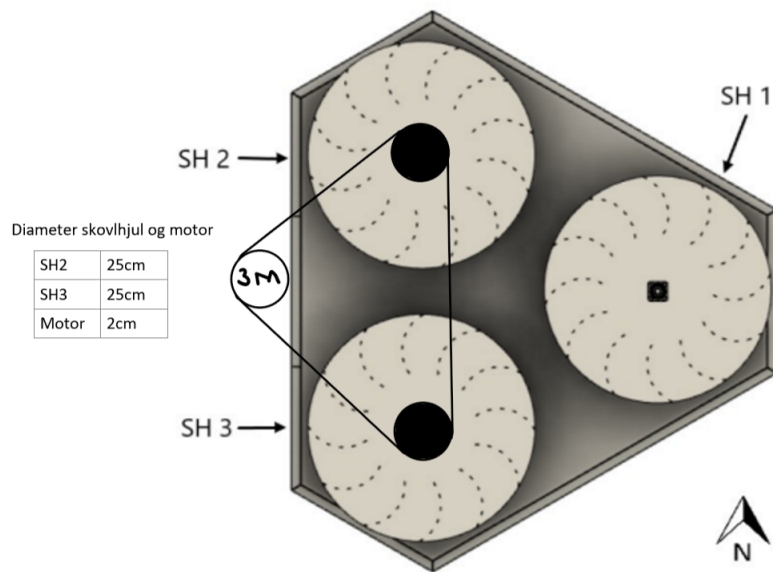
Treghetsmomentet for hvert skovlehjul, ble hentet fra bacheloroppgaven til Øyen et al. [1]. Der ble det funnet til å være $2,74kgm^2$ per hjul. Den mekaniske effekten ble funnet ved å multiplisere treghetsmomentet med vinkelakserasjon og vinkelhastighet. Nedenfor i figur 17 ser man matlab-scriptet som ble brukt til estimering av effekt per skovlehjul, der input data er en liste over tidspunktene når en halv periode har passert. Fordi vinden sjelden er helt konstant, trengs det flere målerunder for å komme fram til en estimert effekt per skovlehjul. Effekten er også avhengig av hastigheten til hjulene. Effekten blir lavere ved høyere hastigheter, fordi mindre differansehastighet mellom vind og skovlehjul innebærer mindre moment på turbinen.

Etter gjentatte målinger kunne gruppen konkludere med at den mekaniske effekten ved en vindhastighet på $4m/s$ ligger på **6 W** per skovlehjul.

```
6 - I=2.74;
7
8 - for i = 2:length(Data)
9 -     Omega(i)= pi/(Data(i)-Data(i-1));
10
11 - end
12
13 - for i=2:length(Data)
14 -     Alfa(i)=(Omega(i)-Omega(i-1))/(Data(i)-Data(i-1));
15 -     P(i)=I*Omega(i)*Alfa(i)
16
17 - end
```

Figur 17: Matlab-script for estimering av effekt.

3.2 Mekanisk oppkobling



Figur 18: Mekanisk oppkobling av vindturbin. Basert på figur hentet fra rapporten til Øyen et al.[1].

Den mekaniske oppkoblingen ble gjort ved hjelp av kilereimskiver og en SPA kilereim. Dette er en tynn reim med 8 mm bredde innerst og 13 mm ytterst. SPA kilereimen ble valgt fordi det var den minste reimen gruppen fant som var lang nok til dette formålet. Det er en fordel med liten reim for å redusere tap i systemet som følge av friksjon. Delene ble hentet ut på Grønsås vikleverksted og ble finansiert av oppdragsgiver (WEN).

Siden det ene skovlehjulet går i motsatt retning i et forsøk på å forbedre det aerodynamiske samspillet mellom hjulene, vil det være en stor mekanisk utfordring å koble alle tre hjulene sammen. Dette anses som utenfor gruppens kompetanse- og fokusområde, noe som førte til enighet med oppdragsgiver om at kun to av skovlehjulene kobles sammen på en generator. De to skovlehjulene som roterer i den samme retningen kobles da sammen med kilereimen.

For å oppnå ladespenning trengs det en frekvens på minst 4.35 Hz på generatorens rotor. Giringen mellom rotor og skovlehjulene må derfor være riktig for at den skal begynne å produsere strøm på fornuftige vindhastigheter. Ifølge bacheloroppgaven til Øyen et al. [1], så er effektiviteten høyest ved 1/3 av fri rotasjon, som ble målt til 60 rpm ved en stabil vind på 5 m/s. Derfor er en fornuftig hastighet på skovlehjulene 20 rpm ved produksjon. Diameteren på akslingen er 2 cm, så for å få riktig giring må reimskivene på skovlehjulene være 25 cm. Nedenfor ser man utregning av hastigheten på skovlehjulene for å starte produksjon, som vil starte på 20.88 rpm.

$$f_2 = \frac{d_1}{d_2} \cdot f_1 = \frac{2cm}{25cm} \cdot 4.35Hz = 0.348Hz$$

$$n_2 = f_2 \cdot 60 = \mathbf{20.88 \text{ rpm}}$$

f_1 : frekvens rotor generator

f_2 : frekvens skovlehjul

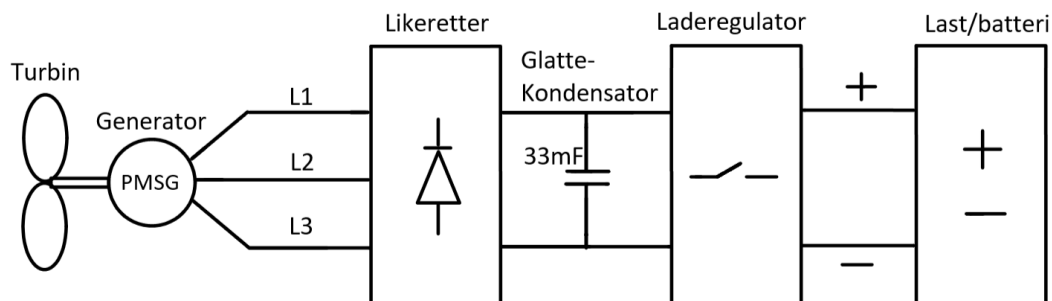
d_1 : diameter reimskive på skovlehjul

d_2 : diameter aksling rotor generator

n_2 : rpm skovlehjul

I figur 18 ser man den mekaniske oppkoblingen med plassering av generator og reimskiver. SPA reimen som ble brukt er 400 cm og kobler sammen både skovlehjulene og generatoren. Figuren er kun en illustrasjon av oppsettet og viser ikke riktige størrelsesforhold mellom skivene.

3.3 Elektrisk oppkobling



Figur 19: Hvordan generatoren i praksis har blitt oppkoblet [egenprodusert].

I figur 19 ser man den elektriske oppkoblingen av systemet. Ut ifra generatoren kommer det 3-fas vekselspanning med 120° faseforskyvning som videre går til likeretteren som gjør om vekselspanningen til likespenning. For å redusere rippelspenningen ut fra likeretteren er det koblet inn en 33mF kondensator. Laderegulatoren er koblet foran batteriet for å beskytte mot overoppladning og utladning av batteriet.

4 Resultater

Dette kapittelet tar for seg resultater som gruppen har kommet fram til. Det inneholder hvordan gruppen har kommet frem til generatorparameterene som brukes i simuleringen, og selve simuleringen av det elektriske systemet i simulink. Til slutt kommer måleresultater av produsert elektrisk effekt.

4.1 Generatorparametre

Maskinen som ble brukt som generator er plukket fra en gammel vaskemaskin. Det er en børsteløs DC-motor, noe som i prinsipp er en permanent magnet maskin. Utfordringen med dette var at det ikke finnes noe datablad for denne motoren og merkeskiltet er på kinesisk, noe som førte til at egne tester måtte gjennomføres for å bestemme generatorparameterene. Det ble funnet 8 poler, altså 4 polpar. Disse ble funnet visuelt ved å skru fra hverandre maskinen.

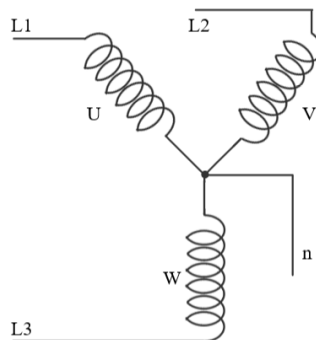
4.1.1 Viklingsresistanser

For å finne statorresistansene ble det satt DC-spenning på viklingene slik at det begynte å gå en strøm. Siden DC-strømmen er frekvensfri vil reaktansen i viklingene være 0, og man kan beregne resistansen med Ohms lov. Den beregnede resistansen deles på to, på grunn av viklingenes konfigurasjon (stjernetkobling) som kan sees i figur 20 [67]. Dette ga også to målinger per vikling, noe som vises i tabell 2.

Tabell 2: Oversikt over målte viklingsresistanser.

Statorresistanser		
Vikling	Måling 1	Måling 2
U	2,6567 Ω	2,6483 Ω
V	2,6483 Ω	2,6539 Ω
W	2,6567 Ω	2,6539 Ω

Velger for videre beregninger å anslå viklingsresistansene til 2,65 Ω .

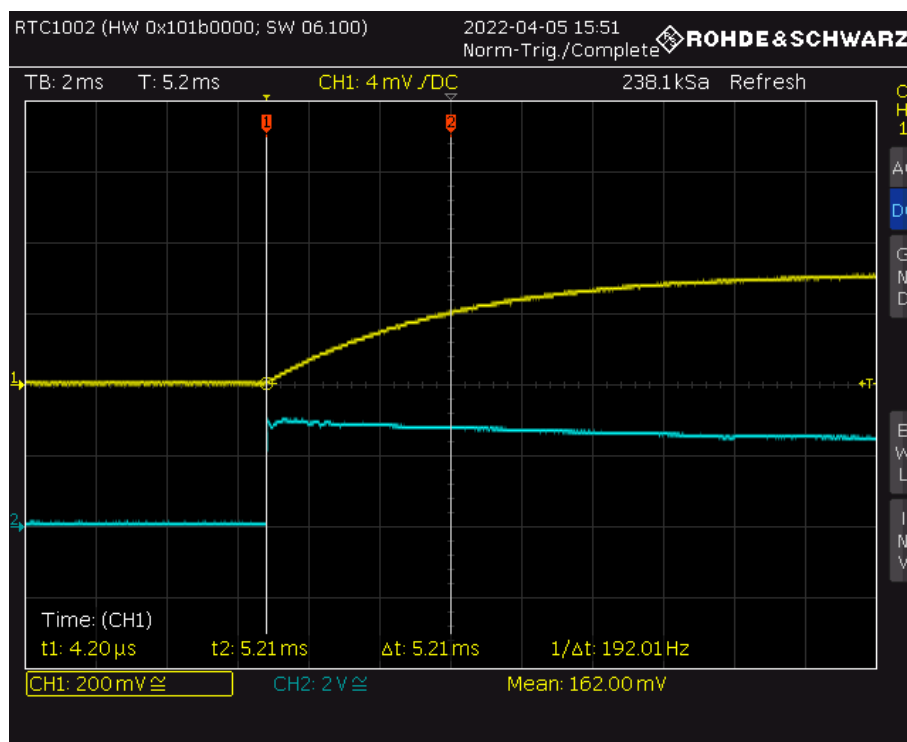


Figur 20: Skisse av stjernetkobling [egenprodusert].

4.1.2 D-akse induktans

For å finne d-akse induktansen L_d , ble det påtrykt en DC-spenning slik at rotoren orienterte seg tangentielt med d-aksen. Dette gjøres ved å koble fase A til et positivt potensiale, og fase B og C til jord. Deretter låses rotoren i samme posisjon mens det påtrykkes en negativ impuls på fase A, mens B og C er positive. Dette vil gi en sprangrespons som kan sees i figur 21. Sprangresponsen

til strømmen måles ved hjelp av spenningen over en resistans koblet i serie med viklingene. Denne ble valgt til å være $0,5 \Omega$.



Figur 21: Sprangrespons for L_d . Gul er strøm, blå er påtrykt spenning. [Skjerm bilde av oscilloskop].

Ut ifra figur 21 kan man lese av tidskonstanten τ_d , som igjen kan brukes til å beregne induktansen L_d . Her ble det funnet at $\tau_d = 5,21ms$.

$$L_x = \frac{2}{3} \tau_x R \quad (15)$$

Ut ifra formel 15 finnes det at $L_d = 9,2mH$.

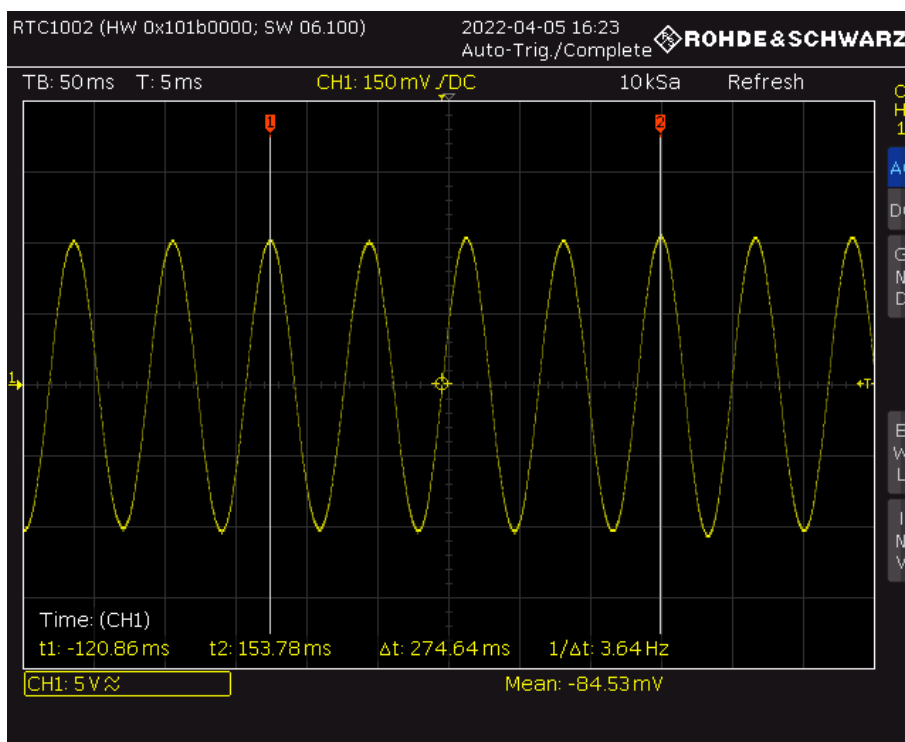
4.1.3 Q-akse induktans

Q-akse induktansen, altså induktansen til aksene der moment produseres, kan finnes på lignende måte. Her påtrykkes det en positiv DC-spenning på fase B, mens fase C jordes og fase A holdes flytende. Dette fører rotoren til en posisjon slik at den står normalt på d-aksen, altså tangentielt med q-aksen. Rotoren låses fast, og en positiv spenning påtrykkes fase A, mens fase B og C jordes. Igjen måles strømmen ved hjelp av en motstand på $0,5\Omega$. Målingen som ble gjort var tilnærmet lik målingen for L_d , noe som gir mening da $X_d = X_q$ for «non-salient» (rund rotor) synkronmaskiner. Dette forklares nærmere i kapittel 2.3.1.

4.1.4 Maskinkonstanter

Til slutt ble det foretatt målinger slik at det var mulig å beregne «back EMF» (BEMF) konstanten K_e . Denne brukes til å beregne utspenningen ut ifra den mekaniske rotasjonen. Dette gjøres ved å foreta målinger av utspenningen til generatoren og frekvensen til rotoren ved en konstant vinkelhastighet uten last. Siden generatoren har fire polpar, blir frekvensen målt over fire perioder.

Dette gjøres slik at man kan benytte frekvensen på rotoren til å beregne utspenningen. Målingen kan sees i figur 22.



Figur 22: Skjerm bilde fra oscilloskop med måling av linjespenning og frekvensmåling uten last.

Måleresultatene ga en toppverdi på $10V_{LL}$ og en mekanisk frekvens f_m på $3,64\text{Hz}$. Ut ifra dette kan utregningen av K_e referert til radianer per sekund og omdreininger per minutt sees under.

$$n_m = \frac{60}{2\pi} \cdot \omega_m = \frac{30}{\pi} \cdot 2\pi \cdot 3,64\text{Hz} = 218,4\text{rpm}$$

$$K_e(\text{rad/s}) = \frac{V_{pk(LL)}}{\omega_m} = \frac{V_{pk(LL)}}{2\pi \cdot f_m} = \frac{10\text{V}}{2\pi \cdot 3,64\text{Hz}} = 0,437 \frac{\text{V}}{\text{rad/s}}$$

$$K_e(\text{rpm}) = \frac{V_{pk(LL)}}{n_m} = \frac{10\text{V}}{218,4\text{rpm}} = 0,0458\text{V/rpm}$$

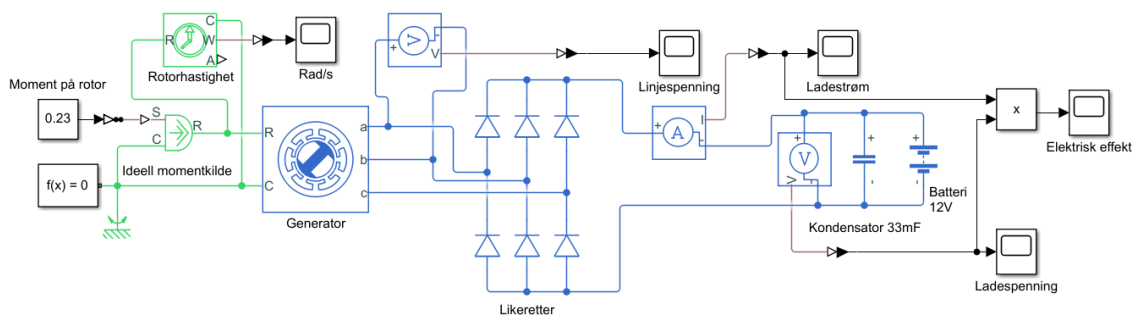
En annen konstant som kan være verdt å ta i betraktning er maskinens hastighetskonstant K_v . Den beskrives som den inverse av K_e og kan benyttes til å finne hastigheten ved ønsket spenning.

$$K_v = \frac{1}{K_e} = \frac{1}{0,0458} = 21,83\text{rpm/V}$$

$$\text{For } 12 V_{peak}: \text{rpm} = 12\text{V} \cdot 21,83\text{rpm/V} = 261,96\text{rpm}$$

Det vil i teorien si at for å få en klemmespenning på $12 V_{peak}$ er generatoren nødt til å opprettholde en hastighet på $261,96 \text{ rpm}$ eller $27,43 \text{ rad/s}$.

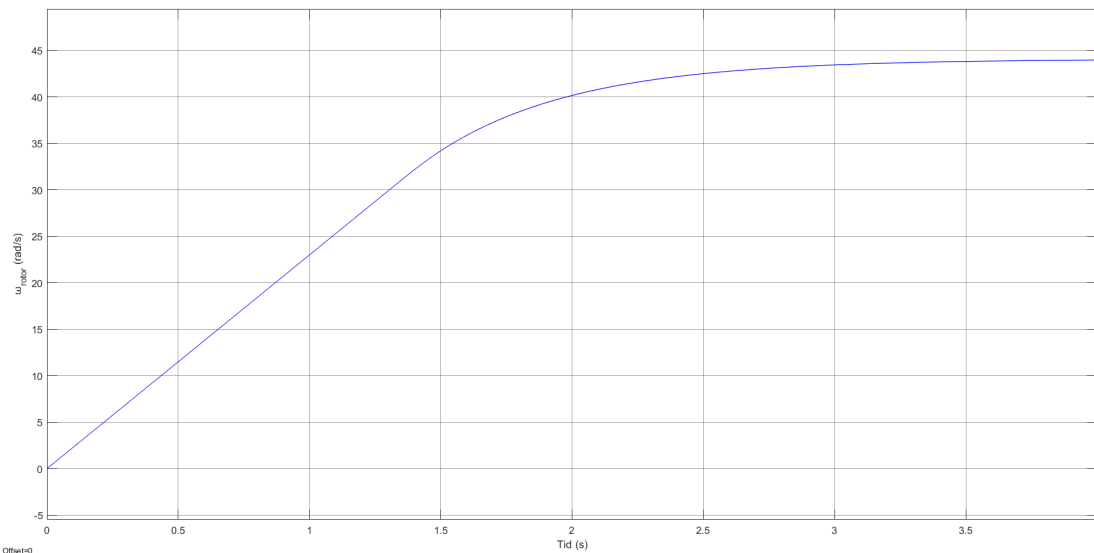
4.2 Modellering og simulering



Figur 23: Systemet modellert i Simulink.

I tillegg til den fysiske oppkoblingen ble en forenklet modell av den elektriske delen av systemet modellert i Simulink. Denne kan sees i figur 23. Generatorparameterne er justert i henhold til funnene i kapittel 4.1. Rotorens totale treghetsmoment settes til $1,1 \text{ kgm}^2$ for å unngå unaturlige sprang i bevegelsen under oppstart, og lettere se når batteriet begynner å lade. Dette er unaturlig høyt for en slik generator, men det gir et bedre bilde av ladedynamikken, noe som kan sees i figurene 24 - 28. Det måles linjespenning, ladespenning, ladestrøm og elektrisk effekt ved et konstant dreiemoment på rotoren lik $0,23 \text{ Nm}$. Det gir en vinkelhastighet ω_{rotor} som stabiliserer seg på ca. 44 rad/s (figur 24). Dette tilsvarer en mekanisk effekt på ca. 10 W .

$$\begin{aligned}
 P_{mek} &= \tau_{rotor} \cdot \omega_{rotor} \\
 &= 0,23 \text{ Nm} \cdot 44 \text{ rad/s} = 10,12 \text{ W}
 \end{aligned}$$

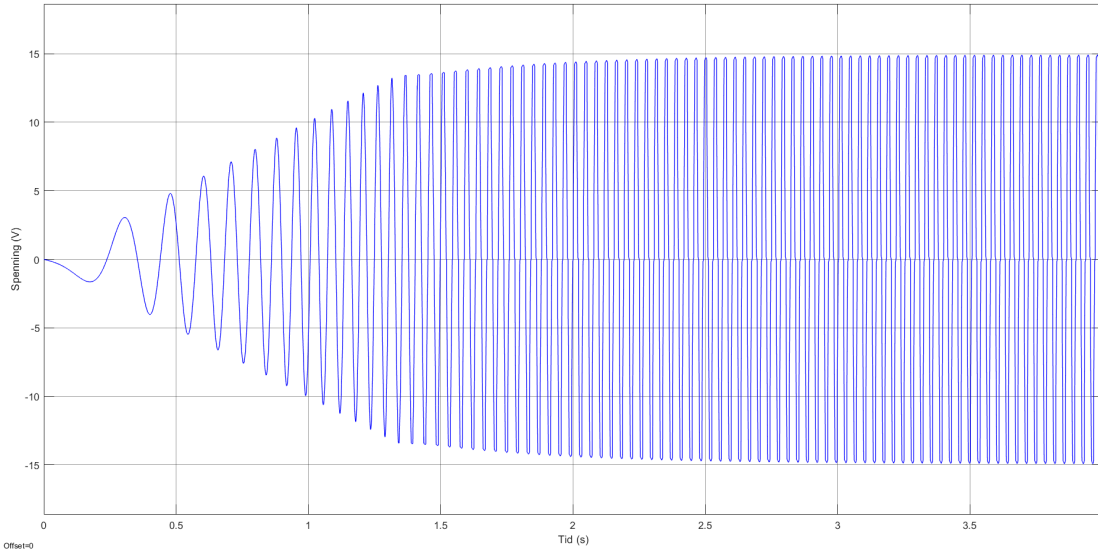


Figur 24: Simulert rotorhastighet.

Når ladestrømmen når sitt maksimum, altså når spenningen på batteriklemmene ikke vil bli høyere, vil momentet tilbake på generatoren stabilisere seg på samme verdi som momentet på rotoren og summen av moment blir 0. Dette kan sees ved at den deriverte av vinkelhastigheten ω_{rotor} , altså

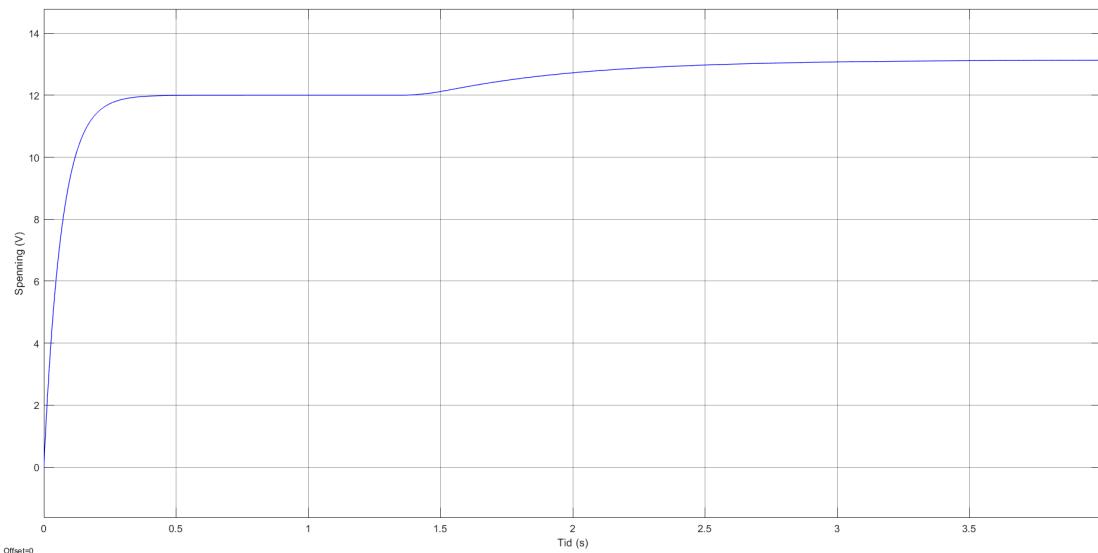
vinkelakselerasjonen α_{rotor} går mot 0.

$$\begin{aligned}\frac{d\omega_{rotor}(t)}{dt} &= \alpha_{rotor}(t) = 0 \\ \Rightarrow \sum \tau_{rotor} &= \alpha_{rotor}(t) \cdot I = 0 \cdot I = 0\end{aligned}$$



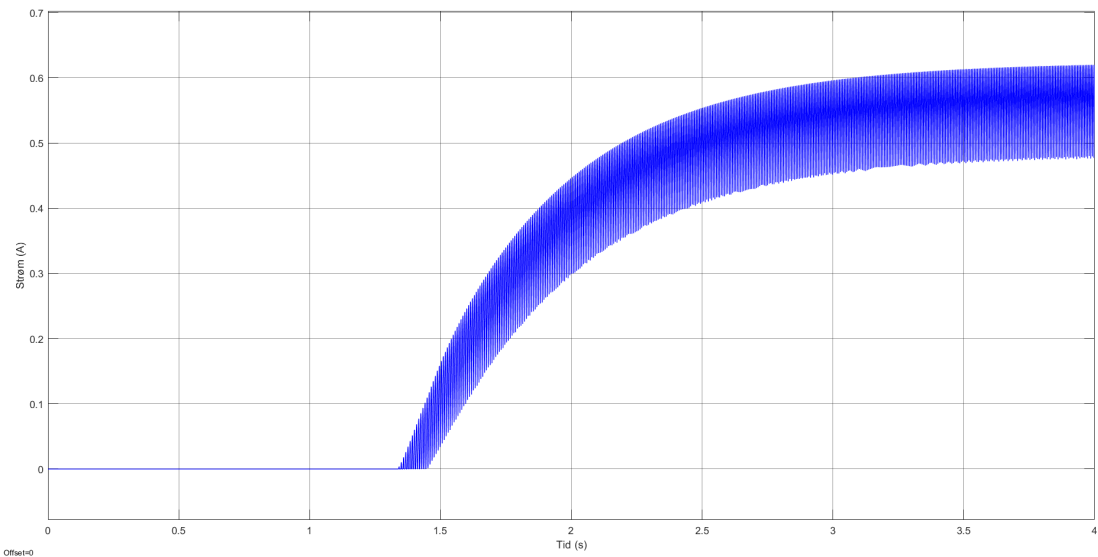
Figur 25: Simulert linjespenning.

I figur 25 kan man se den simulerte linjespenningen på generatorens klemmer. Før batteriet begynner å lade, $0 < t < 1,35$, ser det ut som spenningen skal stabilisere seg på rundt 13,4 V. Deretter går spenningen opp, og ender til slutt på ca. 15 V.



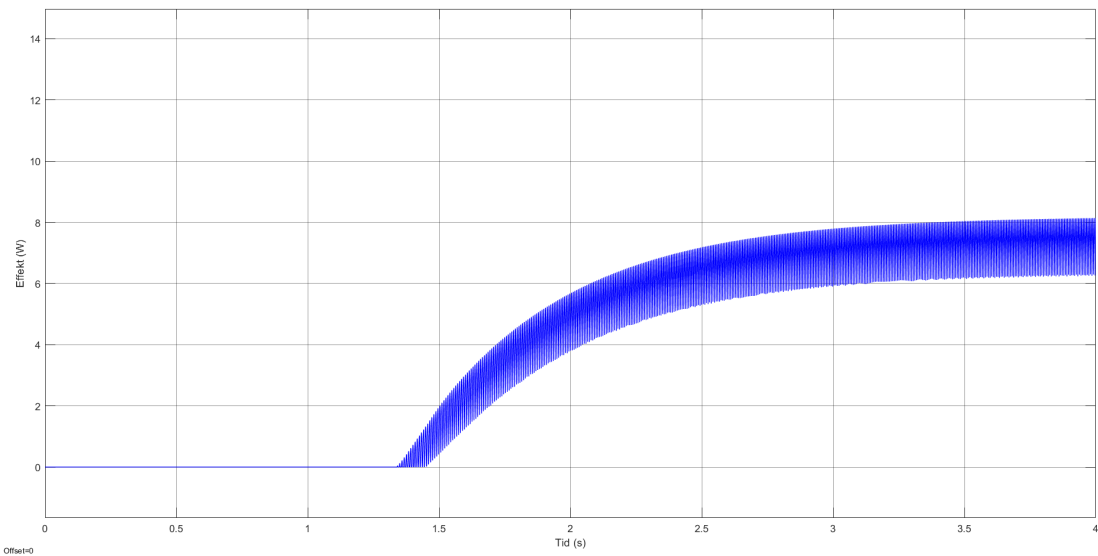
Figur 26: Simulert ladespenning.

Ved å se på klemmespenningen til batteriet i figur 26, kan man se at denne først vil legge seg lik batterispenningen når kondensatoren er fullt oppladet. Når rotorhastigheten øker og den påtrykte spenningen blir høy nok, begynner batteriet å lade. Da kan man se at spenningen på batteriklemmene øker, før batteriet brems generatoren til konstant hastighet og ender opp på å stabilisere seg på ca. 13 V.



Figur 27: Simulert ladestrøm.

Batteriets ladestrøm kan sees i figur 27. Her kan man lett se tidspunktet når ladingen begynner, da strømmen som går vil være lik 0 frem til dette skjer. Ut ifra simuleringen begynner strømmen å flyte ved $t = 1,35$ s.



Figur 28: Simulert elektrisk effekt.

Til slutt ble den elektriske effekten plottet i figur 28. Denne følger naturligvis ladestrømmen, da effekten er produktet av ladestrømmen og ladespenningen. Her er lasten kun resistiv og spenningen DC, så all effekt regnes som aktiv. I følge energibevareingslovene kan ikke energi forsvinne, kun endre form [68]. Det gir ligning 16.

$$P_{mek} = P_{el} + P_{tap} \quad (16)$$

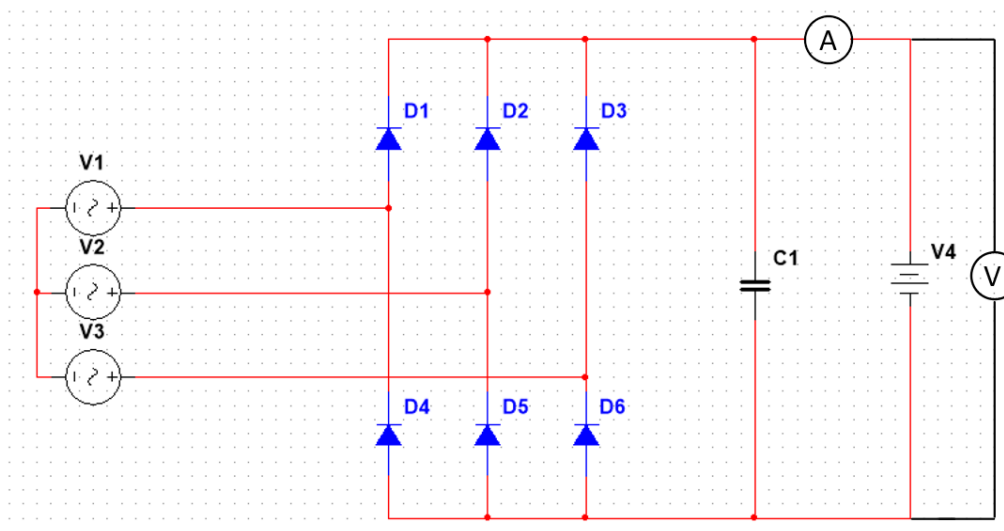
Dette gir også et simulert tap i systemet på ca. 3 W i stabil tilstand, noe som tilsvarer 30 %. Her er ikke de mekaniske tapene i reimsystemet medregnet, siden momentpådraget regnes ideelt og tapsfritt.

4.3 Måleresultater

For å kunne beregne hvor mye elektrisk effekt vindturbinen produserer, må strøm og spenning måles. Det ble koblet opp et amperemeter i serie og et voltmeter parallelt med lasten. Disse verdiene brukes så til å beregne den produserte effekten. Den letteste metoden for beregning av effekt er å bruke DC verdiene og multiplisere disse som vist i formel 17.

$$P_{DC} = V_{DC} \cdot I_{DC} \quad (17)$$

Det ble foretatt flere målinger og funnet verdier for ladestrøm og ladespenning ved forskjellige vindhastigheter. Måleresultatene kan sees i tabell 3 og i figur 30. Lasten var i dette tilfellet et 12 V bilbatteri. Det kommer frem at lasten begynner å trekke strøm dersom likespenningen ut av likeretteren overstiger spenningen som ligger over lasten, noe som stemmer godt overens med at effekt som regel går fra en node med høy spenning til en node med lavere spenning. Før lading av batteriet ble begynt, var batterispenningen 12,2 V. Det vil si at batteriet fikk påtrykt effekt dersom spenningen ut av likeretteren oversteg denne spenningen. For å videre kunne beregne effekt, ble det foretatt målinger med amperemeter og voltmeter som vist i figur 29.



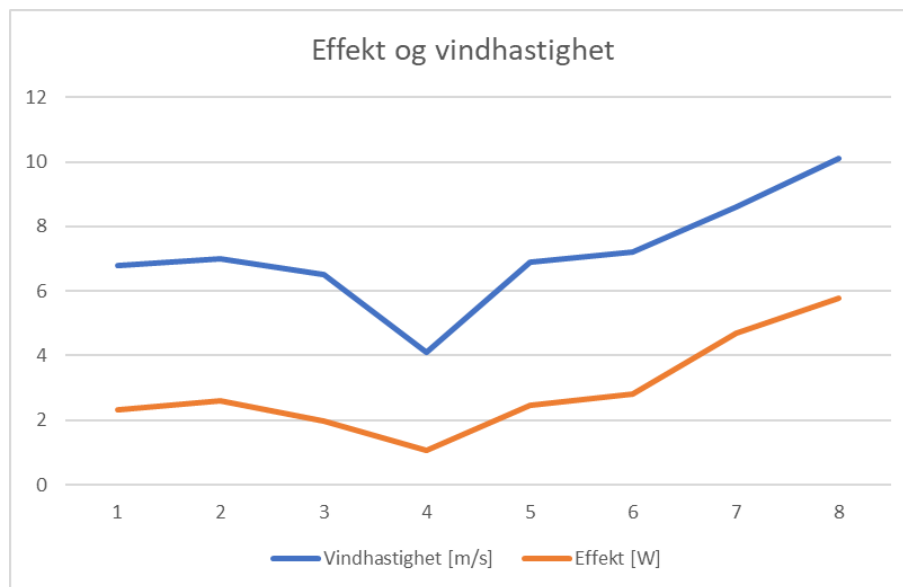
Figur 29: Oppsett for hvordan spenning og strøm i praksis måles [egenprodusert].

Ved en tilnærmet konstant vindhastighet på 6,8 m/s oppnådde turbinen en likespenning på 12,56 V og en ladestrøm på 0,186 A. Ut fra formel 17 gir dette tilnærmet en konstant effekt på **2,33 W**. Ved sterkere vindkast på 10 m/s ble det oppnådd en spenning på 12,86 V og en ladestrøm på 0,449 A, noe som fører til en effektoverføring på **5,77 W**. Ut ifra den teoretiske effektproduksjonen til vindkraft utledet i rapporten til Øyen et al. [1], kommer det frem at den teoretiske effekten øker med vindhastigheten i tredjepotens (formel 18). Dette diskuteres og sees nærmere på i kapittel 5.1, Måleresultat og usikkerhet.

$$P_{vind} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_{vind}^3 \quad (18)$$

Tabell 3: Målte verdier og vindhastigheter

Vindhastighet (m/s)	Ladespenning (V)	Ladestrøm (A)	Effekt (W)
1	12,56	0,186	2,34
2	12,62	0,206	2,60
3	12,49	0,159	1,99
4	12,37	0,086	1,06
5	12,7	0,194	2,46
6	12,7	0,222	2,82
7	12,79	0,366	4,68
8	12,86	0,449	5,77



Figur 30: Sammenhengen mellom produsert effekt og vindhastighet ved 8 forskjellige målinger.

5 Diskusjon og analyse

I dette kapittelet blir resultatene fra kapittel 4 diskutert og analysert. Det inneholder også et delkapittel angående forbedringspotensial, som ser på alternative løsninger. I siste del av kapittelet har gruppen diskutert muligheten for å koble Vindorku på strøm-nettet.

5.1 Måleresultat og usikkerhet

Det er mye usikkerhet knyttet til måleresultatene i kapittel 4.3. Det er derfor viktig at dette og kapittel 5.1 leses som en helhet.

5.1.1 Anemometer og ustabil vind

For måling av vindhastighet ble det brukt anemometer som gir momentanverdier for vindhastighet. Vindhastighet er sjelden konstant da vind ofte innebærer mange små og store vindkast, noe som gjør det vanskelig å fastsette momentanverdier for produksjonen ved bestemte vindhastigheter. Tregheten i systemet gjør at et lite vindkast på for eks. 8 m/s vil gi annen effektproduksjon enn konstant vind på 8 m/s. Dette vil knytte en usikkerhet til målingene som ble gjort i kapittel 4.3.

5.1.2 Effektivitet og effektkurve

Under måleperioden ble den høyeste elektriske effekten målt til 5,77 W inn på batteriet. Dette var under et kortvarig vindkast på 10 m/s.

I kapittel 3.1 ble det estimert en mekanisk effekt på 6 W per skovlelul ved en vindhastighet på 4m/s. Det gir en samlet mekanisk effekt på 12 W. Formel 19 er hentet fra bacheloroppgaven til Øyen et al. [1], og beskriver maksimal effekt som kan hentes ut fra vind.

$$P_{vind} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_{vind}^3 \quad (19)$$

Det er ikke fysisk mulig å hente ut 100 % av vindenergien siden det vil innebære at luften blir stillestående etter å ha truffet turbinen. Formel 19 sier at effekten øker med vindhastigheten i tredjepotens. Derfor kan vi anta at den mekaniske effekten følger en lik kurve, slik at den mekaniske effekten ved 10 m/s kan estimeres til **187.5 W** som vist nedenfor. Dette vil gi en effektivitet på 3.08 %, noe som er veldig lite.

$$P_{mek10m/s} = P_{mek4m/s} \cdot \left(\frac{10m/s}{4m/s}\right)^3 = 12W \cdot \left(\frac{10m/s}{4m/s}\right)^3 = \mathbf{187.5 W}$$

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{mek}} = \frac{5.77W}{187.5W} = \mathbf{3.08\%}$$

De kjente tapene er:

- 12,2 % i likeretteren, som ble beregnet i kapittel 2.5.
- 3-8 % er vanlig for PMSGer [32].

Det vanskeligste tapet å fastsette et tall på er kilereimsystemet som er beskrevet i kapittel 2.5. Ifølge Stockman [44] er SPA kilereimsystemet avhengig av høyere moment for å oppnå en god

effektivitet. I figur 8 i kapittel 5.1, ser man at effektiviteten synker raskt når momentet er under 20 Nm. I oppgavens tilfelle er det 0,366 Nm på rotor ved 10 W, noe som er med på å gjøre kilereimssystemet veldig ineffektivt. De kjente tapene i generatoren og likeretteren er ikke store nok til å kunne forklare den lave effektiviteten, så det kan trygt antas at reimoverføringen er hovedproblemet.

$$\tau_{rotor} = \frac{P_{mek}}{\omega_{rotor}} = \frac{10W}{2\pi \cdot 4.35Hz} = 0.366Nm$$

5.2 Simulering

I simuleringen som er beskrevet i kapittel 4.2, ble det simulert et scenario der 10,12 W mekanisk energi ble påtrykt rotoren i form av et konstant moment på 0,23 Nm. Der ble den elektriske ladeeffekten målt til 7 W, noe som fører til en effektivitet på 70 % for hele det elektriske systemet. Simuleringen tar derimot ikke hensyn til den mekaniske sammenkoblingen som ble funnet til å stå for majoriteten av effekttapet. Det dynamiske forløpet i simuleringen viser den riktige karakteristikken til forløpene, men tidsperspektivet må sees bort ifra. Dette fordi, som nevnt i kapittel 4.2, så er ikke treghetsmomentet i rotor reelt. Det ble satt en urealistisk høy verdi for å gjøre det dynamiske forløpet mer tydelig.

I simuleringen ble tapene i det elektriske systemet høyere enn beregnet i teori kapittelet 2.5.2. Simuleringen fikk et tap på 30 %, mens tapene ble funnet teoretisk til mellom 14,2-20,2 %. Det teoretiske tapet tar høyde for likeretteren med et tap på 12,2 % og mellom 2-8 % tap i generatoren. Tapet i likeretteren ble beregnet fra verdier i databladet [45], så det kan antas at det er relativt nøyaktig. Tapet i generator er derimot hentet fra en rapport for hva som er vanlig for en PMSG, og nøyaktigheten kan variere. Simuleringen fikk altså 10-16 % høyere elektriske tap, som kan skyldes at den tar høyde for flere faktorer enn gruppen gjorde i kapittel 2, Teori. Det kan derfor antas at det elektriske tapet i simuleringen er mer korrekt.

5.3 Forbedringspotensial

Fordi systemet har en lav effektivitet og at reimoverføringene mest sannsynlig er hovedproblemet, burde andre løsninger vurderes. For å slippe reimoverføring kan en mulighet være å sette en generator på hver av skovlethjulene. Dersom man velger tre generatorer istedenfor én, må det velges mindre maskiner med lavere startmoment. Dette vil også innebære tre likerettere. Man får da fordelt effekten på flere likerettere slik at man kan velge mindre og rimeligere komponenter. Gruppen har forsøkt å undersøke pris og tilgjengelighet på mindre PMSGer, men har ikke funnet noen som kan være aktuelle. En løsning med tre generatorer blir antageligvis mye dyrere enn nåværende løsning.

En annet alternativ kan være å bytte ut reimoverføringa med tannhjul, som er mindre avhengig av moment for bedre effektivitet [69]. Det vil også gjøre det enklere å koble sammen de tre skovlethjulene på samme generator, selv om en av skovlene går i motsatt retning.

En mindre effektiv løsning kan være å velge større kilereimskiver for å øke momentet i systemet, men det er usikkert hvor mye effektiviteten vil øke. Større reimskiver er også en større kostnad som må tas med i vurderingen. Man har mulighet til å doble momentet, før dimensjonene på skivene blir for store for modellen.

5.4 Nett-tilkobling

Tidligere har WEN i samarbeid med NTNU forhørt seg med Elvia om det er mulig å koble Vindorku til det eksisterende nettet ved NTNU på Gjøvik. Siden dette viste seg å føre til store kostnader, ble det bestemt at dette i første omgang ikke skulle gjøres. Gruppen har i kapittel 2 sett på hvilke løsninger for kraftelektronikk som må til for at dette skal kunne løses. Ut fra systemet som gruppen praktisk bygget opp, må det i tillegg installeres en inverter for å kunne lage en sinusspenning og eventuelt en konverter for å kunne øke spenningen før den inverteres. I kapittel 2.6 ble det beskrevet hvordan en inverter kan kobles opp for å koble Vindorku opp mot nettet. Denne inverteren vil øke den opprinnelige investeringskostnaden for vindturbinen. Gruppen har undersøkt ulike invertere for nettilkobling og ser at investeringskostnaden for en slik inverter er stor i forhold til den lave energiproduksjonen. Selv med en høy strømpris vil det ta lang tid før investeringskostnaden tjenes inn igjen.

Dersom Vindorku skal kunne kobles til eksisterende elektriske anlegg og levere effekt ut på nettet, innebærer dette at det eksisterer en strømmåler som tåler dette. Siden det i senere tid har blitt installert AMS-målere i de fleste hjem, skal ikke dette være noe problem. De fleste av disse skal kunne måle strømflyt i begge retninger.

I situasjoner der det er strømbrydd på grunn av feil på nettet eller dersom det skal jobbes på nettet i områder der det produseres lokal strøm, er det viktig at denne strømmen ikke sendes videre ut på nettet. For at det skal være sikkert for montører å jobbe på nettet er det viktig at de kan jobbe spenningsløst. Dette er noe som må tas hensyn til ved valg av inverter. I tillegg bør det også sikres at produksjonen kobles ut dersom det oppstår en feilsituasjon i nettet, slik at vindturbinen ikke leverer effekt til feilkilden.

6 Konklusjon

I denne oppgaven har gruppen sett på diverse problemstillinger rundt Vindorku. Gruppen har valgt å bruke en permanentmagnet-generator, som ser ut til å være et bra valg for vindturbinen.

For mekanisk sammenkobling ble SPA kilereim og kilereimskiver valgt, noe som viste seg å være et dårlig valg i kapittel 5.1. Problemet med kilereimsystemet er at det krever høyere moment for å ha en tolerabel effektivitet, som vist i figur 8 i kapittel 2.5. I kapittel 5.3 har gruppen sett på tre alternativer for forbedring av den mekaniske oppkoblingen, og kommet frem til at den beste løsningen vil være å bytte ut reimsystemet med tannhjul. Når det er sagt, er tannhjul en kostbar løsning og utbyttet vil være lavt iforhold til investeringskostnaden.

Den mekaniske effekten som ble estimert i kapittel 3.1 ble estimert til 6 W per skovle ved en vindhastighet på 4 m/s. Videre ble det antatt at effektiviteten holdes konstant, og beregnet en effekt ved en vindhastighet på 10 m/s til 93,75 W per skovlehjul. Effektiviteten ble funnet til 3,08 %, men dette ble diskutert i kapittel 5.1 og resultatet er delvis usikkert. Gruppen kan konkludere med at 3,08 % effektivitet er under akseptabelt nivå, selv om det er usikkerhet knyttet til målingene med anemometer. Et effektutbytte på 5,77 W ved 10 m/s gir neglisjerbar økonomisk gevinst. Siden det sjelden er så sterk vind på Østlandet, vil det føre til et lavt energiutbytte igjennom året i dette geografiske området.

Selv om den mekaniske og den elektriske oppkoblingen hadde blitt forbedret til 100 % effektivitet, ville effektutbyttet vært 12 W ved 4 m/s, og 187,5 W ved 10 m/s. Dette er lavt sett iforhold til andre løsninger i tilsvarende størrelse. Derfor kan det konkluderes med at selve Vindorku bør revurderes eller rekonstrueres, dersom den skal være et bidrag til bærekraftig utvikling og være med på å oppnå FNs bærekraftsmål, beskrevet i kapittel 1.5.2.

7 Fremtidig arbeid

Gruppen hadde ved utførelse av denne bacheloroppgaven ikke hatt mulighet til å foreta målinger for elektrisk effekt mer enn ved én anledning, siden det ikke var sterk nok vind til å utføre videre målinger. Konseptet til oppdragsgiver har vært å utvikle et prinsipp hvor skovlene har en positiv innvirkning på hverandre. Gruppen hadde ikke mulighet til å foreta målinger av effekt på hver skovl slik at dette kunne påvises. For å kunne gå videre med dette konseptet vil det være hensiktsmessig at WEN får resultater som påviser at skovlene i praksis produserer mer effekt som en gruppe enn det de gjør alene. Gruppen anbefaler at disse målingene foretas et sted der det er mer og jevnere vind, for å redusere usikkerheter i måleresultatene.

Videre anbefaler gruppen at det foretas mekaniske endringer i konseptet for vindorku, for å kunne gjøre denne mer konkurransedyktig. Det anbefales at det undersøkes en mekanisk overføring for energi til generatoren som har mindre tap, samt at selve Vindorku bør konstrueres til å produsere tilnærmet lik effekt som konkurrenter. I kapittel 1.7.2 ble det konstantert at HAWT modeller i lignende størrelser har en merkeeffekt på mellom 200 W og 600 W. Dette er noe som burde oppnås for å kunne produsere et levedyktig konsept som er modent nok til å overleve i dagens harde marked.

Referanser

- [1] L. Øyen, B. Alvestad og E. Waage, «Konsept- og ytelsesstudie for vertikalakslede vindturbiner i trekantkonfigurasjon», 2021. adresse: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2782310> (sjekket 03.01.2022).
- [2] M. Olsen, «Reduksjon av effekttopper i kontorbygg», 2018. adresse: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2560144> (sjekket 21.04.2022).
- [3] Europa kommisjonen, «EU Emissions Trading System (EU ETS)», 2022. adresse: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en (sjekket 29.04.2022).
- [4] The World Commission on Environment and Development, «Our common future, From One Earth to One World», FN, 1987, kap. I.3.27: Sustainable development. adresse: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.html> (sjekket 15.04.2022).
- [5] K. Olerud, A. Tjernshaugen og G. Andersen, «Bærekraftig utvikling», 2022. adresse: https://snl.no/b%C3%A6rekraftig_utvikling (sjekket 15.04.2022).
- [6] FN, «Bærekraftig utvikling», 2021. adresse: <https://www.fn.no/tema/fattigdom/baerekraftig-utvikling> (sjekket 15.04.2022).
- [7] NVE, «Konsesjonsbehandling av vindkraftverk på land», 2022. adresse: <https://www.nve.no/konsesjon/konsesjonsbehandling-og-oppfoelging-av-vindkraft-paa-land/konsesjonsbehandling-av-vindkraftverk-paa-land/> (sjekket 18.04.2022).
- [8] Fosen Vind, «Vindparkene», 2022. adresse: <https://www.fosenvind.no/vindparkene/> (sjekket 21.04.2022).
- [9] K. Rosvold, «Fosen Vind», 2022. adresse: https://snl.no/Fosen_Vind (sjekket 21.04.2022).
- [10] NTB, «Vindmøllene på Fosen får stå inntil videre – regjeringen vil utrede avbøtende tiltak», 2021. adresse: <https://e24.no/olje-og-energi/i/Jx3V06/vindmoellene-paa-fosen-faar-staa-inntil-videre-regjeringen-vil-utrede-avboetende-tiltak> (sjekket 21.04.2022).
- [11] FN, «Parisavtalen», 2020. adresse: <https://www.fn.no/om-fn/avtaler/miljoe-og-klima/parisavtalen> (sjekket 23.04.2022).
- [12] —, «FNs bærekraftsmål», 2022. adresse: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal> (sjekket 23.04.2022).
- [13] SSB, «Vi bruker mindre strøm hjemme», 2018. adresse: <https://www.ssb.no/energi-og-industri/artikler-og-publikasjoner/vi-bruker-mindre-strom-hjemme> (sjekket 18.04.2022).
- [14] T. Aanensen og M. Holstad, «Tilgang og anvendelse av elektrisitet i perioden 1993-2017», 2018. adresse: https://www.ssb.no/energi-og-industri/artikler-og-publikasjoner/_attachment/348783?_ts=1632600d5b8 (sjekket 18.04.2022).
- [15] B. Alcott, «Jevons' paradox», 2005. adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800905001084> (sjekket 20.04.2022).
- [16] F. Husnayain, M. Latif og I. Garniwa, «Transformer oil lifetime prediction using the Arrhenius law based on physical and electrical characteristics», s. 115–120, 2015. DOI: 10.1109/QiR.2015.7374908. adresse: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7374908> (sjekket 20.04.2022).
- [17] Statnett, «Det eksepsjonelle kraftåret 2021», 2022. adresse: <https://www.statnett.no/om-statnett/nyheter-og-pressemedlinger/nyhetsarkiv-2022/det-eksepsjonelle-kraftaret-2021/> (sjekket 22.04.2022).
- [18] R. Gogia, H. Endresen, I. Haukeli mfl., «Langsiktig kraftmarkedsanalyse», 2019. adresse: https://publikasjoner.nve.no/rapport/2019/rapport2019_41.pdf (sjekket 22.04.2022).
- [19] Olje- og energidepartementet, «FORSYNINGSSIKKERHET Norge», 2019. adresse: <https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/forsyningssikkerhet/> (sjekket 23.04.2022).
- [20] NVE, «Vannkraftanlegg i Norge», 2022. adresse: <https://www.nve.no/energi/energisystem/vannkraft/vannkraftdatabase/> (sjekket 24.04.2022).

-
- [21] E. Möllerström, P. Gipe, J. Beurskens og F. Ottermo, «A historical review of vertical axis wind turbines rated 100 kW and above», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, årg. 105, s. 1–13, 2019, ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.022>. adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118308153> (sjekket 03.05.2022).
- [22] F. Castellani, D. Astolfi, M. Peppoloni, F. Natili, D. Buttà og A. Hirschl, «Experimental Vibration Analysis of a Small Scale Vertical Wind Energy System for Residential Use», *Machines*, årg. 7, s. 35, mai 2019. DOI: 10.3390/machines7020035. adresse: https://www.researchgate.net/publication/333316757_Experimental_Vibration_Analysis_of_a_Small_Scale_Vertical_Wind_Energy_System_for_Residential_Use (sjekket 03.05.2022).
- [23] J. Damota, M. Lamas, A. Couse-Casanova og J. Rodríguez-García, «Vertical Axis Wind Turbines: Current Technologies and Future Trends», 2015. adresse: <http://hdl.handle.net/2183/22717> (sjekket 04.05.2022).
- [24] H. Murtaza, S. Daudpota, K. Shah og Z. Memon, «Highway-based, vehicle driven Vertical Axis Wind Turbine with Solar Power System», adresse: <http://www.ijeet.com/index.php/ijeet/article/view/31/67> (sjekket 09.05.2022).
- [25] Hyttetorget, «Vindturbiner», adresse: <https://www.hyttetorget.no/vindmoller> (sjekket 05.05.2022).
- [26] Sunwind, «Vindmølle», adresse: <https://sunwind.no/alle-produkter/energi/vindmolle> (sjekket 05.05.2022).
- [27] Statkraft, «Vindkraft», adresse: <https://www.statkraft.no/var-virksomhet/vindkraft/> (sjekket 09.05.2022).
- [28] SNL, «Vindmølle SNL», adresse: <https://snl.no/vindm%C3%B8lle> (sjekket 09.05.2022).
- [29] D. A. Coley, *Energy and climate change: creating a sustainable future*, first. John Wiley og Sons, Inc, 2008.
- [30] A. P. Kumar, A. M. Parimi og K. U. Rao, «Investigation of small PMSG based wind turbine for variable wind speed», 2015. adresse: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7281378> (sjekket 24.04.2022).
- [31] H. Patel, N. Raj og P. Sharang, «Performance Comparison of Permanent Magnet Synchronous Motor and Induction Motor for Cooling Tower Application», 2012. adresse: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.366.1135&rep=rep1&type=pdf> (sjekket 25.04.2022).
- [32] K. Dambrauskas, J. Vanaga, T. Zimnickas, A. Kalvaitis og M. Ažubalis, «A Method for Efficiency Determination of Permanent Magnet Synchronous Motor», 2020. adresse: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/4/1004> (sjekket 25.04.2022).
- [33] M. Panteli og P. Mancarella, «Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies», 2015. adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877961500187X> (sjekket 02.05.2022).
- [34] Y. Tang, J. Dai, Q. Wang og Y. Feng, «Frequency Control Strategy for Black Starts via PMSG-Based Wind Power Generation», 2017. adresse: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/3/358> (sjekket 02.05.2022).
- [35] T. Vaimann, A. Kallaste, A. Kilk og A. Belahcen, «Magnetic properties of reduced Dy NdFeB permanent magnets and their usage in electrical machines», 2013. adresse: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6757787> (sjekket 26.04.2022).
- [36] H. Satoshi, N. Masamichi og M. Seiji, «Perspectives for high-performance permanent magnets: applications, coercivity, and new materials», 2017. adresse: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2043-6254/aa597c/meta> (sjekket 26.04.2022).
- [37] M. Hossain og M. Ali, «Future research directions for the wind turbine generator system», 2015. adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115003962> (sjekket 05.03.2022).
- [38] F. Wang, J. Bai, Q. Hou og J. Pan, «Design features of low speed permanent magnet generator direct driven by wind turbine», 2005. adresse: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1574932> (sjekket 26.04.2022).
-

-
- [39] H. Erkol, «Optimized Field Oriented Control Design by Multi Objective Optimization», 2019. adresse: https://www.researchgate.net/figure/Basic-Structure-of-PMSM_fig1_331475481 (sjekket 26.04.2022).
- [40] S. Okamoto, N. Denis, Y. Kato, M. Ieki og K. Fujisaki, «Core Loss Reduction of an Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor Using Amorphous Stator Core», 2016. adresse: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7412730> (sjekket 27.04.2022).
- [41] M. Rahman og P. Zhou, «Analysis of brushless permanent magnet synchronous motors», 1996. adresse: <https://ieeexplore.ieee.org/document/491349> (sjekket 27.04.2022).
- [42] R. E. Doherty og C. A. Nickle, «Synchronous machines I-an extension of blondel's two-reaction theory», *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, årg. XLV, s. 912–947, 1926. DOI: 10.1109/T-AIEE.1926.5061289. (sjekket 20.03.2022).
- [43] N. Mohan, T. Undeland og W. Robbins, *Power Electronics. Converters, Applications and Design*, third. John Wiley og Sons, Inc, 2003.
- [44] K. Stockman, S. Dereyne, P. Defreyne, E. Algoet og S. Derammelaere, «An efficiency measurement campaign on belt drives», 2015. adresse: <https://core.ac.uk/download/pdf/55693235.pdf> (sjekket 15.03.2022).
- [45] IXYS, «Three phase rectifier bridge», 2000. adresse: https://www.elfadistelec.no/Web/Downloads/ta/_e/divUO25_data_e.pdf (sjekket 03.03.2022).
- [46] Olje- og energidepartementet, «Forskrift om leveringskvalitet», 2010. adresse: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-11-30-1557> (sjekket 01.03.2022).
- [47] P. Cortes, J. I. Ortiz G. and Yuz, J. Rodriguez, S. Vazquez og L. Franquelo, «Model Predictive Control of an Inverter With Output LC Filter for UPS Applications», 2009. adresse: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4796298> (sjekket 28.04.2022).
- [48] SINTEF, «SMARTGRID», 2022. adresse: <https://www.sintef.no/felles-fagomrade/smartgrids/> (sjekket 25.03.2022).
- [49] X. Hu, C. Zou, C. Zhang og Y. Li, «Technological Developments in Batteries: A Survey of Principal Roles, Types, and Management Needs», *IEEE Power and Energy Magazine*, årg. 15, nr. 5, s. 20–31, 2017. DOI: 10.1109/MPE.2017.2708812. adresse: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8011541> (sjekket 05.05.2022).
- [50] Statista, «Lithium Battery Prices Plunge», adresse: <https://www.statista.com/chart/23807/lithium-ion-battery-prices/> (sjekket 05.05.2022).
- [51] J. Li, Z. Du, R. Ruther mfl., «Toward Low-Cost, High-Energy Density, and High-Power Density Lithium-Ion Batteries», 2017. adresse: <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2404-9> (sjekket 15.03.2022).
- [52] T. Chen, Y. Jin, H. Lv mfl., «Applications of lithium-ion batteries in grid-scale energy storage systems», *Transactions of Tianjin University*, årg. 26, nr. 3, s. 208–217, 2020. adresse: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12209-020-00236-w#citeas> (sjekket 05.05.2022).
- [53] B. Xu, A. Oudalov, A. Ulbig, G. Andersson og D. Kirschen, «Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment», 2018. adresse: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7488267> (sjekket 15.03.2022).
- [54] R. Chen, Q. Li, X. Yu, L. Chen og H. Li, «Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment», 2020. adresse: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.chemrev.9b00268> (sjekket 18.03.2022).
- [55] M. E. Rustad, «Ny elbil-rekord: Over 110.000 biler solgt i 2021», adresse: <https://e24.no/det-groenne-skiftet/i/34X0Wv/ny-elbil-rekord-over-110000-biler-solgt-i-2021> (sjekket 09.05.2022).
- [56] easee, «easee elbil-lader», adresse: <https://easee.com/no/tilbehor/app/> (sjekket 09.05.2022).
- [57] A. Masoum, S. Deilami, P. Moses, M. Masoum og A. Abu-Siada, «Smart load management of plug-in electric vehicles in distribution and residential networks with charging stations for peak shaving and loss minimisation considering voltage regulation», *IET generation, transmission & distribution*, årg. 5, nr. 8, s. 877–888, 2011. adresse: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-gtd.2010.0574> (sjekket 09.05.2022).
-

-
- [58] E. Mehammer og K. Torsæter B.N og Berg, «Mikronett for å opprettholde strømforsyning i lokale strømnett», adresse: <https://blogg.sintef.no/sintefenergy-nb/mikronett-for-a-oppretholde-stromforsyning-i-lokale-stromnett/> (sjekket 09.05.2022).
- [59] X. Li, Y. Tan, X. Liu mfl., «A cost-benefit analysis of V2G electric vehicles supporting peak shaving in Shanghai», *Electric Power Systems Research*, årg. 179, s. 106 058, 2020. adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779619303773> (sjekket 09.05.2022).
- [60] W. Kempton og A. Dhanju, «Electric vehicles with V2G», *Windtech international*, årg. 2, nr. 2, s. 18, 2006. adresse: <https://grist.org/wp-content/uploads/2006/12/kemptondhanju06-v2g-wind.pdf> (sjekket 09.05.2022).
- [61] N. Kapustin og D. Grushevenko, «Long-term electric vehicles outlook and their potential impact on electric grid», *Energy Policy*, årg. 137, s. 111 103, 2020. adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421519306901> (sjekket 09.05.2022).
- [62] H. Yoshida, Y. Ishioka, T. Suzuki, T. Yanari og T. Teranishi, «Degradation of Insulating Materials of Transformers», *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, årg. EI-22, nr. 6, s. 795–800, 1987. DOI: 10.1109/TEI.1987.298942. adresse: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4081487> (sjekket 09.05.2022).
- [63] «Duck curve», adresse: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Duck_Curve_CA-ISO_2016-10-22.agr.png (sjekket 18.05.2022).
- [64] R. Lasseter, «MicroGrids», i *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)*, bd. 1, 2002, 305–308 vol.1. DOI: 10.1109/PESW.2002.985003. adresse: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/985003> (sjekket 18.03.2022).
- [65] D. Olivares, A. Mehrizi-Sani, A. H. Etemadi mfl., «Trends in Microgrid Control», *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014. adresse: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6818494> (sjekket 20.03.2022).
- [66] N-sci technologies, «Microgrids – What Are They and How Do They Work?», 2019. adresse: <https://nsci.ca/2019/11/08/microgrids-what-are-they-and-how-do-they-work/> (sjekket 02.05.2022).
- [67] V. Bobek, «PMSM Electrical Parameters Measurement», 2013. adresse: <https://www.physicsforums.com/attachments/freescale-an4680-pdf.79167> (sjekket 15.03.2022).
- [68] SNL, «Bevaringslovene», 2019. adresse: <https://snl.no/bevaringslovene> (sjekket 03.05.2022).
- [69] R. Petrescu, F. Petrescu og N. Popescu, «Determining gear efficiency», *Gear Solutions*, 2007. adresse: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3076777 (sjekket 02.05.2022).

Vedlegg

Simulink

- Simuleringsfilen er lastet opp ved siden av oppgaven.
- Simscape og Simscape Electrical er benyttet. Disse kan måtte installeres før kjøring.
- Anbefaler å bruke solveren 'ode23t' for rask kjøring av filen.

