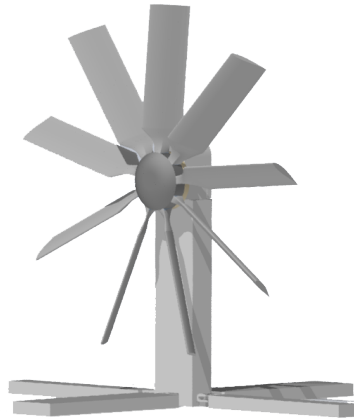




CHALMERS



Prototyputveckling av litet portabelt vindkraftverk för användning vid låga vindhastigheter

EENX15-19-30

Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet i elektroteknik

Usman Ghani Hamza Khalil
Oskar Johansson
John Magnusson
Walter Vojić Frankmar
Rasmus Westergren

KANDIDATARBETE 2019

**Prototyputveckling av litet portabelt
vindkraftverk för användning vid låga
vindhastigheter**

Usman Ghani Hamza Khalil

Oskar Johansson

John Magnusson

Walter Vojić Frankmar

Rasmus Westergren



CHALMERS

Institutionen för elektroteknik
Avdelningen för elkraftteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2019

Prototyputveckling av litet portabelt vindkraftverk för användning vid låga vindhastigheter

Usman Ghani Hamza Khalil
Oskar Johansson
John Magnusson
Walter Vojić Frankmar
Rasmus Westergren

© Usman Ghani Hamza Khalil, Oskar Johansson, John Magnusson, Walter Vojić Frankmar, Rasmus Westergren, 2019.

Handledare: Robert Karlsson, avdelningen för elkraftteknik
Examinator: Jimmy Ehnberg, avdelningen för elkraftteknik

Kandidatarbete 2019
Institutionen för elektroteknik
Avdelningen för elkraftteknik
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 (0) 31 772 1000

Omslag: Översiktsbild på den framtagna prototypen.
Göteborg, Sverige 2019

Prototyputveckling av litet portabelt vindkraftverk för användning vid låga vindhastigheter

Usman Ghani Hamza Khalil

Oskar Johansson

John Magnusson

Walter Vojić Frankmar

Rasmus Westergren

Institutionen för elektroteknik

Avdelningen för elkraftteknik

Chalmers tekniska högskola

Sammandrag

Utvinning av förnyelsebar energi är ett område som ständigt utvecklas och förbättras. Stor del av forskningen fokuseras dock på storskaliga vindkraftverk, vilket medför att flera småskaliga möjligheter potentiellt går miste om. Den här studien syftar till att studera hur vindenergi kan utvinnas på liten skala genom att utveckla en prototyp av ett småskaligt vindkraftverk. Målet var att prototypen bland annat skulle kunna alstra elektricitet vid låga vindhastigheter, vara nedmonterbar samt ha kapacitet att ladda en powerbank via USB. Inom studien designades olika modeller av vindkraftverk, vars egenskaper jämfördes baserat på CFD-analyser. Dessas resultat visade att horisontalaxlade modeller har högre vridmoment än vertikalaxlade. Två små generatortyper testades även för att avgöra vilken som var bäst lämpad för prototypen. Slutligen testades prototypens funktion i ett laminärt luftflöde. Prototypen som togs fram är ett horisontalaxlat vindkraftverk med nio rotorblad, vars rotorbladsprofil har utformningen NACA 63-415 och en infallsvinkel på 35° . Generatoren som används är en BLDC-generator, som sedan kopplas till en likriktare och en step-down omvandlare. Denna prototyp levererar 1,5 W vid ett luftflöde på 8,8 m/s och har en högsta verkningsgrad på 3,3 %. Prototypen är nedmonterbar på så vis att den har avtagbara rotorblad och infällbara stödben. Slutsatsen är att det går att utvinna elektrisk energi för ett småskaligt vindkraftverk. Verkningsgraden för studiens prototyp är dock låg och vidare studier hade kunnat belysa vart förlusterna finns samt effektivisera prototypen.

Nyckelord: Vindkraft, vindkraftverk, HAWT, VAWT, BLDC, småskaligt, horisontalaxlat vindkraftverk

Prototype development of a small portable wind turbine for use at low wind speeds

Usman Ghani Hamza Khalil
Oskar Johansson
John Magnusson
Walter Vojić Frankmar
Rasmus Westergren

Department of Electrical Engineering
Division of Electric Power Engineering
Chalmers University of Technology

Abstract

The extraction of renewable energy is a research field which is steadily developing and improving. However, most of research primarily focuses on larger scale energy extraction, which means that several small scale opportunities might be lost. The purpose of this study is to analyse how electrical power is generated from the wind on a small scale by making a prototype of a smaller wind turbine. The prototype should, among other things, generate power at low wind speeds, be easily disassembled and be able to charge a power bank over USB. In this study several wind turbine models were designed and tested using CFD-analysis, so that they could be easily compared to each other. Two smaller types of generators were also analysed in order to determine which was most suitable for the prototype. Finally physical tests were performed on the prototype in a laminar airflow in order to assess the performance of the prototype. The final prototype was made as a horizontal axis wind turbine with nine wings, with blade profile NACA 63-415 and a 35° angle of attack. The generator used is a BLDC generator, which was connected to a rectifier followed by a step-down converter. The prototype has the capacity to generate 1.5W of power in a laminar airflow with the velocity 8.8 m/s, and at most reached an efficiency of 3.3%. The prototype is fully disassemblable with detachable wings and foldable support legs. The conclusion is that it is possible to extract electrical energy from a small scale wind turbine. The efficiency of the prototype is however low and further studies might be able to determine where these losses occur and increase the efficiency of the prototype.

This report is written in Swedish.

Keywords: Wind Power, Wind Turbine, HAWT, VAWT, BLDC, Small Scale, Horizontal Axis Wind Turbine

Innehåll

Figurer	ix
Tabeller	xi
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.2.1 Mål	1
1.3 Avgränsningar	2
2 Teori	3
2.1 Vindenergi	4
2.1.1 Simulering av vindenergi	5
2.2 Olika slags rotordesigner	5
2.3 Olika slags generatorer och kraftelektronik	7
2.3.1 Modellering av BDC-generator	8
2.3.2 Modellering av BLDC-generator med likriktare	8
2.3.3 Likspänningsomriktare	10
3 Metod	12
3.1 Simuleringsanalys av rotordesigner	12
3.2 Val av generator och kraftelektronik	13
3.3 Prototypernas tekniska design och tillverkning	14
3.4 Fysiska tester av den slutgiltiga prototypen	14
4 Resultat	15
4.1 Simuleringsresultat	15
4.1.1 HAWT	15
4.1.2 VAWT	16
4.1.3 Jämförelse av HAWT och VAWT	17
4.2 Resultat gällande tester av generatorer och kraftelektronik	18
4.3 Den slutgiltiga prototypens design och konstruktion	20
4.3.1 Montering av prototyp	21
4.4 Fysiska testernas resultat	22
4.4.1 Verkningsgrad	23

5	Diskussion	25
5.1	Metoddiskussion	25
5.2	Resultatdiskussion	25
5.3	Designdiskussion	26
5.4	Vidare forskning	27
6	Slutsats	29

Förkortningar

BDC	Brushed Direct Current
BLDC	Brushless Direct Current
CAD	Computer-Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
HAWT	Horisontal Axis Wind Turbine
LS	Lik-Spänning
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine

Figurer

2.1	Förenklad bild av ett vindkraftverks beståndsdelar.	3
2.2	Två typer av HAWT. Från [1], omarbetad, CC-BY.	6
2.3	Bladprofil för NACA 63-415 i heldragen blå linje. Streckad svart linje försedd med pilar avser vindriktningen. Vinkeln α är rotorbladets infallsvinkel. Observera att NACA 63-415 ej avser en viss infallsvinkel.	6
2.4	Vänster: VAWT av Savonius-typ. Från [2], CC-BY-SA. Höger: VAWT av Darrieus-typ. Från [3], CC0.	7
2.5	Ekvivalent krets för BDC-generator.	8
2.6	Ekvivalent krets för BLDC-generator sammankopplad med kraftelektronik som genererar en stabil DC-spänning.	8
2.7	Ekvivalent krets för BLDC-generator med diodlikriktare.	9
2.8	BLDC-generators verkningsgrad som funktion av R_{last} , då $R_{fas} = 10 \Omega$	10
2.9	Illustrativt exempel på en ideal step-down omvandlares spänningsreglering över tid vid föränderlig inspänning, med maximal utspänning ställd till 5,25 V.	11
2.10	Illustrativt exempel på en ideal step-up omvandlares spänningsreglering över tid vid föränderlig inspänning, med minimal utspänning ställd till 4,75 V.	11
2.11	Illustrativt exempel på en ideal flyback omvandlare spänningsreglering över tid vid föränderlig inspänning, med maximal utspänning ställd till 5,25 V och minimal utspänning ställd till 4,75 V.	11
4.1	Simulerat vridmoment vid olika infallsvinklar av HAWT med tre rotorblad och bladprofil NACA 63-415.	16
4.2	Simulerat vridmoment av HAWT med olika antal rotorblad med bladprofil NACA 63-415 och 35° infallsvinkel.	16
4.3	Simulering VAWT, Version 1, med luftflödet riktat från höger till vänster i bild.	17
4.4	Simulering VAWT, Version 2, med luftflödet riktat från höger till vänster i bild.	17
4.5	BDC- (cirkel) och BLDC-generatorns (kryss) utspänning utan last vid olika varvtal.	19
4.6	Översikt över prototypens generator och kraftelektronik samt last.	20
4.7	Prototypen i dess helhet.	20

4.8	Prototypens dimensioner.	21
4.9	Exploderad vy av prototypens rotor med växellåda avbildad från sidan.	21
4.10	Montering av prototyp steg 1: Rotorbladen monteras i navet.	21
4.11	Montering av prototyp steg 2: Navet med rotorblad skruvas på växellådan.	22
4.12	Montering av prototyp steg 3: Nedfällning av stativbenen.	22
4.13	Montering av prototyp steg 4: Rotorenheten monteras på stativet.	22

Tabeller

3.1	Parametrar för mesh vid simulering.	12
3.2	Parametrar för flöde vid simulering.	13
4.1	Simulerat vridmoment för VAWT.	17
4.2	Specifikationer för Turnigy HD 3508 Brushless Gimbal Motor.	18
4.3	Specifikationer för Cutting Edge Mini 12 Volt Wind Turbine Generator Motor.	18
4.4	Resultat från fysiskt test av HAWT-prototyp utan last med endast likriktare.	23
4.5	Resultat från fysiskt test av HAWT-prototyp, utan last, med likriktare och step-down omvandlare.	23
4.6	Resultat från fysiskt test av HAWT-prototyp, med olika laster, samt med likriktare och step-down omvandlare.	23
4.7	Jämförelse av den tillgängliga energin i förhållande till av prototypen utvunnen energi.	24

1

Inledning

1.1 Bakgrund

Förnyelsebara energikällor är idag en snabbt växande del av vår energisektor. Mycket forskning görs på området vilket har lett till stora förbättringar av teknologierna så som ökad effektivitet och pålitlighet [4]. Medan utvecklingen på liten skala primärt har fokuserat på solenergi förblir vindkraft en teknologi för stora effekter. Samtidigt ökar användningen av laddningsbara enheter med förhållandevis låga effektbehov. Här finns en möjlighet att skapa en produkt som kan ta till vara på vindenergi på liten skala, energi som annars går till spillo.

Inom exempelvis friluftsliv finns god anledning till att kunna ladda små mobila enheter. Det rör sig om både en säkerhetsfråga och en bekvämlighetsfråga att kunna ladda till exempel mobiltelefoner och ficklampor på ett tillförlitligt sätt, oavsett väder eller vindhastighet. Därför är portabla vindkraftverk ett bra komplement till dagens portabla solcellsladdare.

1.2 Syfte

Studien syftar till att studera hur elektrisk energi kan utvinnas ur vindenergi på liten skala.

1.2.1 Mål

Målet med studien är att utveckla en prototyp av ett småskaligt vindkraftverk. Prototypen ska...

- i. ...börja alstra elektrisk energi vid vindhastigheter lägre än 5 m/s. Gäller enbart vindflöden ortogonala mot prototypens svepyta.
- ii. ...balansera stabilt, även i vindhastigheter mellan 5 och 10 m/s.
- iii. ...vara portabel. Montering och nedmontering ska ske enkelt.
- iv. ...leverera ström via USB.
- v. ...ha kapacitet nog att ladda en så kallad powerbank, vars märkdata anger en matningsspänning på 5 V och en matningsström på 1 A.

1.3 Avgränsningar

Studien är utformad för att resultera i en prototyp som når målen i avsnitt 1.2.1 och inte en färdig produkt. Med detta menas att olika typer av konstruktionsmaterial och tillverkningsmetoder ej vägts mot varandra. Istället byggdes prototypen med hjälp av additiv tillverkning och därmed av de plaster som 3D-skrivare nyttjar (PLA, ABS och nylon). Utformning av produktförpackning eller dylikt innefattas heller inte av studien.

I studien utreds enbart två typer av rotordesigner: horisontalaxlade vindkraftverk och vertikalaxlade vindkraftverk av Savonius-typ. De parametrar som undersökts är enbart antal rotorblad samt rotorbladens utformning hos respektive design. Hållbarhetssimuleringar i samband med designernas utveckling har ej genomförts.

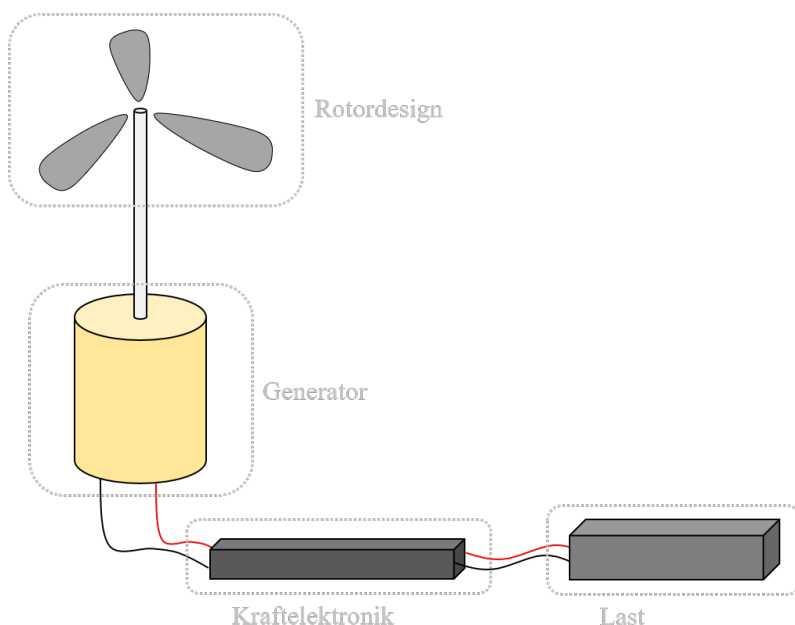
I de fysiska tester som genomfördes placerades prototypen inomhus, i ett laminärt luftflöde ortogonalt mot rotorns svepyta. Prototypen är tänkt att placeras på flackt underlag; inga alternativa monteringslösningar utreds. Luftflödes hastigheten varierades mellan 4 och 8 m/s. Studien begränsas till laminära vindar, turbulent vind beaktas ej. Vidare anses väderbeständigheten främst att vara ett kriterium för färdiga produkter, och därför har inga tester gällande prototypens tolerans mot regn och väta genomförts. Exempelvis har den inte IP-klassats. Däremot har konstruktionen utformats med täckande plast kring alla elektroniska komponenter för att underlätta vidareutveckling i det väderbeständiga avseendet.

I och med att studien fokuserats på att ta fram en prototyp som når målen i avsnitt 1.2.1 har ingen livscykelanalys eller liknande genomförts. Den teknologiska inriktningen medför dessutom att prototypens ekonomiska lönsamhet inte har analyserats. Diskussion angående prototypens etiska aspekter förekommer, men in mycket liten utsträckning.

2

Teori

Åtskilliga typer av vindkraftverk har med åren utvecklats, i försök att ta tillvara på så stor del av luftpartiklarnas kinetiska energi, vindenergi, som möjligt. Vindenergin har sitt ursprung i solens energi, som skapar cirkulation av varm och kall luft i jordens atmosfär. Hur stor del av vindenergin som ett vindkraftverk förmår att överföra till rotorn och därefter omvandla till elektrisk energi, beror på rotorbladens utformning och effektförlusterna i mekaniken och elektroniken. Baserat på rotorbladens utformning delas vindkraftverk in i olika kategorier, men gemensamt för alla typer är att rotorn driver en generator som omvandlar dess kinetiska energi till elektrisk energi. Generatoren kan vara av olika typ, beroende på vindkraftverkets storlek och vad det är syftat till att driva. Om den rotationshastighet som vinden åstadkommer är för låg för att generatoren ska kunna leverera krävd effekt, kan en växellåda kopplas i länken mellan rotor och generator. Om vindkraftverket slutligen levererar en alltför varierande utspänning kan den stabiliseras med hjälp av likspänningsomriktare. En översiktsbild av ett vindkraftverks beståndsdelar presenteras i Figur 2.1.



Figur 2.1: Förenklad bild av ett vindkraftverks beståndsdelar.

2.1 Vindenergi

Vindenergi uppkommer som ett resultat av infallande solstrålning som värmer upp jordens atmosfär. I och med att varm luft stiger relativt kall luft uppstår en cirkulation där uppvärmd luft rör sig mot kallare områden. Detta genererar ett lågtrycksområde, samtidigt som den kallare luften rör sig mot det nya lågtrycksområdet [5]. Jordens rotation bidrar till hur globala vindar rör sig medan skillnader i jordens topografi, såsom bergskedjor, bergspass och slätter, påverkar vindar lokalt. Förutom topografin påverkar även områdets olika värmekapacitet lokala vindar. Det är orsaken till att vatten bidrar till lokala vinduppkomster eftersom vatten har betydligt högre värmekapacitet än land.

Vindkraftverk är designade för att omvandla vindenergi till elektrisk energi. Vindenergin, E , beräknas enligt

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}Atv\rho v^2 = \frac{1}{2}At\rho v^3 \quad (2.1)$$

där A är svepytan som vinden flödar genom, t är tiden, ρ är luftens densitet och v är vindens hastighet [6]. Vindriktningen antas vara vinkelrät mot svepytan. Från Ekvation 2.1 syns att energin som finns tillgänglig främst beror på vindhastigheten, som har en kubisk inverkan, samt arean av svepytan som vinden flödar genom vilket betyder att radien har en kvadratisk inverkan på vindenergin. Luftens densitet är relativt konstant över jordklotet och varierar minimalt. Baserat på Ekvation 2.1 beräknas tillgänglig effekt i vinden som

$$P = \frac{E}{t} = \frac{1}{2}A\rho v^3. \quad (2.2)$$

Det finns dock en gräns för hur stor del av den kinetiska energin i vinden som kan utnyttjas, denna gräns kallas Betz lag. Eftersom de luftpartiklar som passerar en viss area skulle avstanna helt om ett vindkraftverk absorberade all deras kinetiska energi, och därmed blockera nästkommande partiklar, är det inte möjligt att överföra all kinetisk energi. Denna fysikaliska gräns har beräknats till 59 %, eller mer exakt $16/27$ [6]. Betz lag säger att den elektriska energin som ett vindkraftverk skulle kunna utvinna ur vindenergin kan uttryckas som

$$E = k\left(\frac{1}{2}A\rho v^3\right) \quad (2.3)$$

där k är en koefficient som motsvarar vindkraftverkets verkningsgrad, vilken inte kan överstiga 59 %. Moderna vindkraftverk når idag som bäst en verkningsgrad på mellan 35 % och 45 % innan förluster i elektronik och mekanik [7]. Den totala energin som omvandlas till användbar elektrisk energi ligger dock på en nivå runt 10 % till 30 %. Enligt [8] har en av Siemens senaste modeller, Siemens SWT-2.3-108, en verkningsgrad på 27 % vid optimala vindförhållanden.

2.1.1 Simulering av vindenergi

En vanlig metod för att beräkna gasflöden är med så kallade beräkningsströmningsdynamiska analyser (Computational Fluid Dynamics, CFD) [9]. Dessa beräkningar baseras på finita volymmetoden, i vilken geometrin som utreds bryts upp i ett antal celler där varje cell utgör en kontrollvolym. Nätverket av dessa celler kallas för mesh. Sedan beräknas en energibalans mellan cellerna i ett flertal iterationer tills en konvergerande lösning erhålls. Antalet iterationer är ofta mycket stort, vilket medför att beräkningarna till stor fördel utförs av en dator. Utifall att den geometri som utreds är mycket komplex, eller att geometrin delas in i ett mycket stort antal celler för att generera ett mycket noggrant beräkningsresultat, kommer även datorutförda beräkningar ta lång tid. Det är därför viktigt att uppskatta hur många celler som faktiskt behövs för att få ut ett pålitligt resultat.

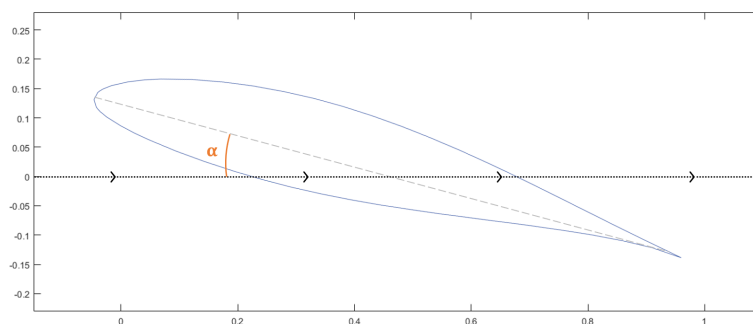
2.2 Olika slags rotordesigner

Grundprincipen för ett vindkraftverk är att kinetisk energi överförs från vinden till rotorbladen, vilka då sätts i rörelse. Dessa driver en generator som i sin tur alstrar elektrisk energi. Hur vindkraftverkets konstruktion sätts i rörelse av vinden varierar mellan olika modeller. Vindkraftverk delas grovt in i två kategorier som tillsammans inkluderar de flesta av dagens utvecklade modeller. Dessa kategorier är horisontalaxlade vindkraftverk (Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT) och vertikalaxlade vindkraftverk (Vertical Axis Wind Turbine, VAWT).

HAWT är vindkraftverk vars rotorblad roterar kring en axel som monterats horisontellt. I Figur 2.2 ses två exempel på sådana vindkraftverk, ett med tre rotorblad och ett med 18 rotorblad, ett så kallat vindhjul. Det finns dock otaliga HAWT-modeller, vilka har utvecklats genom att variera rotorbladens antal, infallsvinkel, profil och dimensioner. Infallsvinkeln syftar på vinkeln mellan vindens flödesriktning och bladprofilens centerlinje och benämns som α i Figur 2.3. Exempelvis ger längre rotorblad vindkraftverket en större svepyta och därmed erhålls större mängd elektrisk energi i enlighet med Ekvation (2.3). För små vindkraftverk har rotorbladsprofilen NACA 63-415, som visas i Figur 2.3, visat sig fungera väl [10, 11]. HAWT-konceptet kräver att rotornavet upprätthåller en viss vinkel gentemot vindriktningen om optimal elektrisk energi ska kunna alstras i varje tidpunkt. Hos fast installerade vindkraftverk uppnås detta vanligen genom att med hjälp av motorer och vindmätare, alternativt ett roder, rikta rotornavet i rätt riktning.



Figur 2.2: Två typer av HAWT. Från [1], omarbetad, CC-BY.



Figur 2.3: Bladprofil för NACA 63-415 i heldragen blå linje. Streckad svart linje försedd med pilar avser vindriktningen. Vinkeln α är rotorbladets infallsvinkel. Observera att NACA 63-415 ej avser en viss infallsvinkel.

VAWT är vindkraftverk med axeln monterad vertikalt som dess rotorblad sedan roterar runt. Två vanliga underkategorier av VAWT är Savonius och Darrieus, se Figur 2.4. Savonius-modeller har rotorblad med stor mantelarea som, likt segel, fångar vinden. Darrieus, däremot, har rotorblad snarlika de hos HAWT, men dock lodrät monterade med hjälp av balkar kring den vertikala axeln.



Figur 2.4: Vänster: VAWT av Savonius-typ. Från [2], CC-BY-SA. **Höger:** VAWT av Darrieus-typ. Från [3], CC0.

HAWT har generellt sett avsevärt högre verkningsgrad än VAWT [12], till följd av dess fördelaktiga egenskaper. För det första är svepytan enklare att göra stor hos HAWT- än VAWT-modeller, vilket möjliggör att mer elektrisk energi kan utvinnas enligt Ekvation (2.3). För det andra väger VAWT-modeller ofta mer eftersom de är mer materialkrävande; Savonius kräver mer material per rotorblad än HAWT och Darrieus kräver balkar som rotorbladen fästs vid. För det tredje rör sig respektive rotorblad i VAWT-konstruktioner emot vindriktningen hälften av tiden, vilket motverkar rotationen. (denna nackdel väger generellt tyngre gällande Savonius- än Darrieus-konstruktioner). Följaktligen är HAWT-modellerna dominerande på marknaden. Undantaget urbana miljöer, där VAWT ofta anses vara bättre lämpade eftersom rotornavet hos dem inte behöver vändas efter vindriktningen och därför bättre utnyttjar turbulenta vindar och skiftande vindriktning.

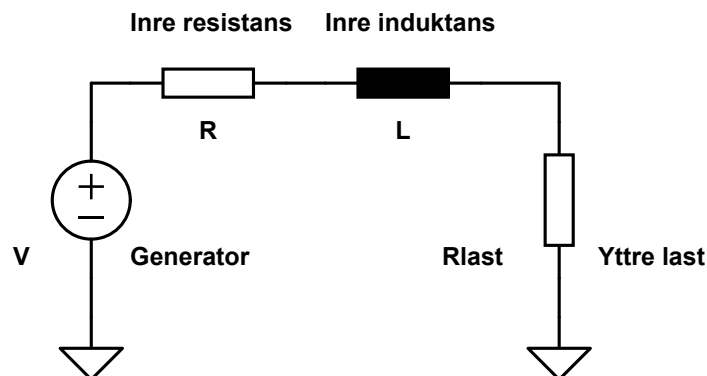
2.3 Olika slags generatorer och kraftelektronik

Till rotorn länkas en generator, se Figur 2.1, som omvandlar den kinetiska energi som rotorbladen absorberat till elektrisk energi. Borstade DC-generatorer (BDC) och borstlösa DC-generatorer (BLDC) är två bland många olika slags generatorer. En BDC-generator ger ut en DC-spänning. Däremot ger en BLDC-generator inte ut en DC-spänning, utan en trefas sinus- eller trapetsformad spänning [13]. BLDC-generatorer behöver därav kopplas till någon form av kraftelektronik för att ge ut en likspänning. Gentemot BDC-generatorer har de dock flera fördelar; de är effektivare, tystare och kräver mindre underhåll då de saknar borstar som emellanåt behöver bytas på grund av slitage [14].

BDC- och BLDC-generatorer kan beskrivas med ett Kv-värde [15]. Detta Kv-värde motsvarar inversen av back-emf konstanten och har enheten RPM / V. Det är förhållandet mellan rotationshastigheten och den inducerade spänningen. Om en generator har ett Kv-värde på 100, behöver generatoren rotera med 100 varv per minut för att 1 V skall genereras då den är olastad. Med hjälp av ett Kv-värde är det enkelt att veta vilken spänning som en generator kommer ge vid ett visst varvtal.

2.3.1 Modellering av BDC-generator

En BDC-generator kan modelleras med en resistans och induktans i serie. Figur 2.5 visar en ekvivalent krets av en BDC-generator [16].



Figur 2.5: Ekvivalent krets för BDC-generator.

Den genererade spänningen, back-emf, kan beskrivas som

$$V = e = k_e \omega_m \quad (2.4)$$

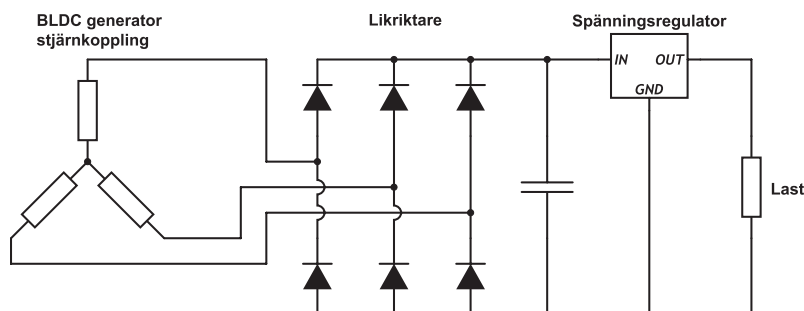
där e är back-emf, k_e är back-emf konstanten och ω_m är rotationshastigheten [16]. De elektriska förlusterna i en BDC-generator blir till värme i den inre resistansen. Verkningsgraden, η , kan beskrivas som förhållandet mellan inre resistansen och lasten som

$$\eta = \frac{P_{last}}{P_{last} + P_{inre}} = \frac{R_{last} \cdot I^2}{R_{last} \cdot I^2 + R_{inre} \cdot I^2} = \frac{R_{last}}{R_{last} + R_{inre}} \quad (2.5)$$

där P_{last} är effekten över lasten, P_{inre} är effekten över generatorns inre resistans, R_{last} är lastens resistans, I är den genererade strömmen och R_{inre} är generatorns inre resistans.

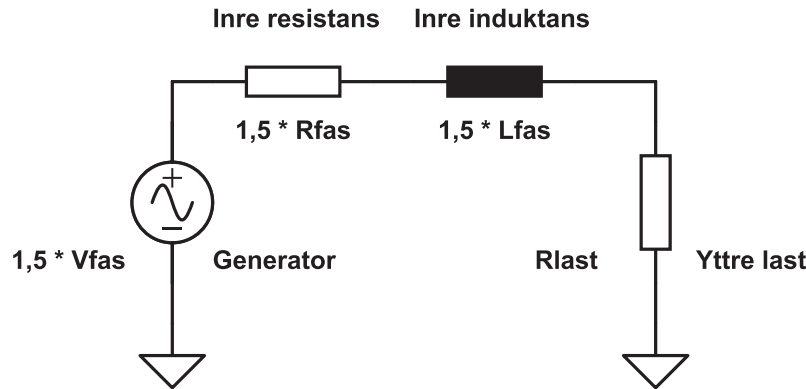
2.3.2 Modellering av BLDC-generator med likriktare

En BLDC-generators [13] utspänning kan enkelt likriktas med hjälp av en diodlikriktare. Tillsammans med en likspänningsomriktare kan spänningen regleras till ändamålet, se Figur 2.6.



Figur 2.6: Ekvivalent krets för BLDC-generator sammankopplad med kraftelektroelektronik som genererar en stabil DC-spänning.

Vid modellering av en BLDC-generator med diodlikriktare kan dess ekvivalenta krets med fördel nyttjas, se Figur 2.7 [13]. I jämförelse modelleras BDC-generatorer som en inre resistans i serie med en inre induktans.



Figur 2.7: Ekvivalent krets för BLDC-generator med diodlikriktare.

Medeleffekten, \bar{P}_{last} , över lasten R_{last} i Figur 2.7 kan beskrivas som

$$\bar{P}_{last} = \frac{3\omega_e}{\pi} \cdot \int_{-\frac{\pi}{6\omega_e}}^{\frac{\pi}{6\omega_e}} R_{last} (I_{fas}(t))^2 dt = \frac{9(3\sqrt{3} + 2\pi) R_{last} k_e^2 \omega_e^2}{\pi p^2 (9(R_{fas}^2 + L_{fas}^2 \omega_e^2) + 12R_{fas} R_{last} + 4R_{last}^2)} \quad (2.6)$$

där R_{fas} är resistansen i en av faserna, L_{fas} är induktans i en av faserna, I_{fas} är strömmen i en av faserna, ω_e är generatorns elektriska rotationshastighet och p är generatorns antal poler [13].

Det är generatorns kopparlindningar som ger upphov till den inre resistansen R_{fas} [13]. Dessa kommer medföra förluster i form av värme. Medeleffekten av dessa inre förluster, \bar{P}_{inre} , kan beräknas som

$$\bar{P}_{inre} = \frac{3}{2} \cdot R_{fas} |I_{fas}(t)|^2 = \frac{54R_{fas} k_e^2 \omega_e^2}{p^2 (9(R_{fas}^2 + L_{fas}^2 \omega_e^2) + 12R_{fas} R_{last} + 4R_{last}^2)}. \quad (2.7)$$

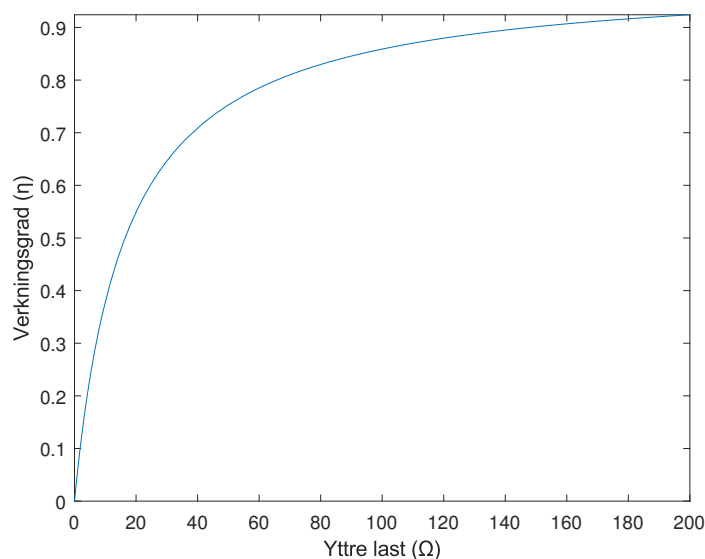
Utifrån Ekvation 2.6 och 2.7 kan generatorns verkningsgrad beräknas som

$$\eta = \frac{\bar{P}_{last}}{\bar{P}_{last} + \bar{P}_{inre}} = \frac{(3\sqrt{3} + 2\pi) R_{last}}{(3\sqrt{3} + 2\pi) R_{last} + 6\pi R_{fas}} \quad (2.8)$$

Verkningsgraden ökar med den yttre lasten R_{last} och hög verkningsgrad ges då $R_{last} \gg R_{fas}$ i samband med att $\bar{P}_{last} \gg \bar{P}_{inre}$, se Figur 2.8. Figuren tydliggör även hur resistansen R_{last} ökar kvadratisk för ett konstant \bar{P}_{last} om spänningen över resistansen stiger, då sambandet mellan effekt, spänning och resistans är

$$P_{last} = \frac{U_{last}^2}{R_{last}} \rightarrow R_{last} = \frac{U_{last}^2}{P_{last}}. \quad (2.9)$$

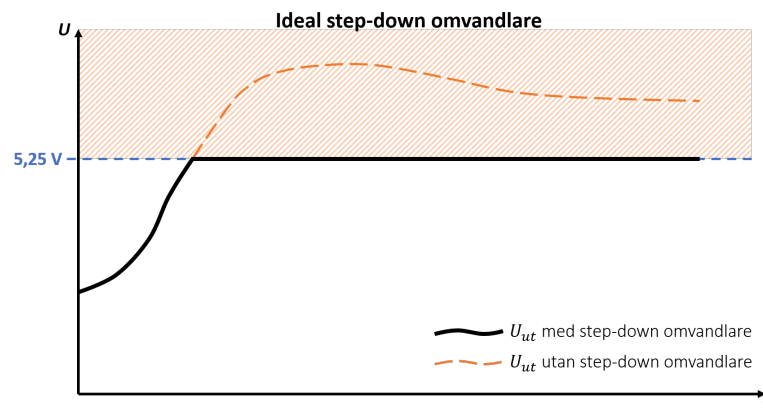
där U_{last} är spänningen över över lasten.



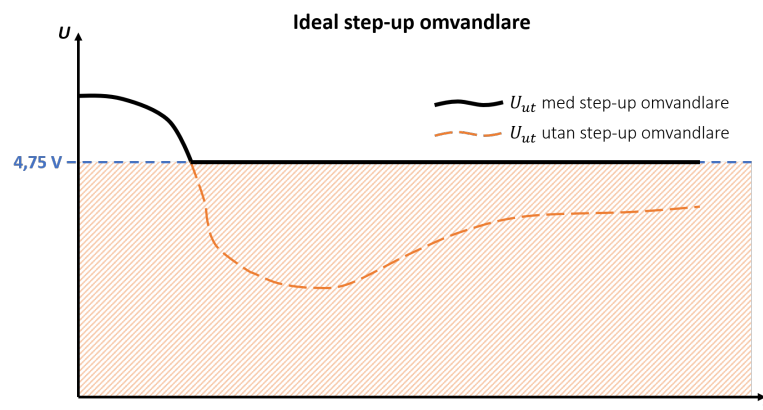
Figur 2.8: BLDC-generators verkningsgrad som funktion av R_{last} , då $R_{fas} = 10 \Omega$.

2.3.3 Likspänningsomriktare

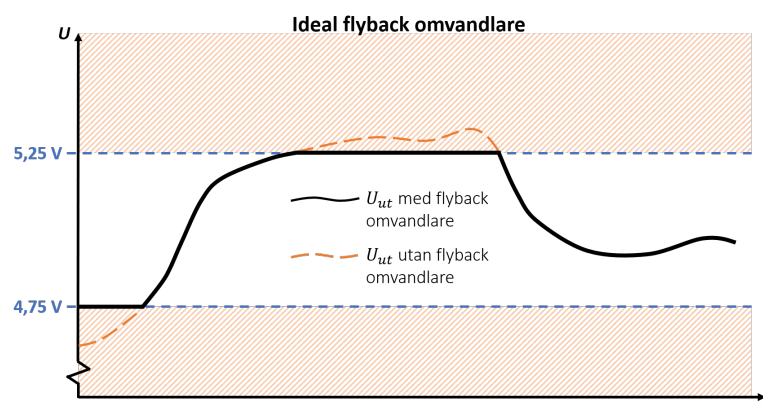
Eftersom vindhastigheten är föränderlig, och därmed även rotorns rotationshastighet, kommer generatoren leverera en varierande utspänning över tid. Den vanligaste versionen av USB, USB 2.0, kräver en spänning på $5 \pm 0,25$ V [17]. Temporärt klarar den dock att spänningen sjunker med 0,6 V. För att reglera DC-spänningsnivåer används så kallade likspänningsomriktare (LS-omriktare), som finns i många olika varianter. Om utspänning från generatoren överstiger 5,25 V kan den sänkas med en så kallad step-down omvandlare, vilket är en typ av LS-omriktare, se Figur 2.9. Om generatorns utspänning understiger 4,75 V kan en annan typ av LS-omriktare, så kallad step-up omvandlare, se Figur 2.10, höja den. Om generatorns utspänning har tendens att över tid både överstiga 5,25 V och understiga 4,75 V kan således en step-up omvandlare kopplas i serie med en step-down omvandlare. Alternativt finns en tredje typ av LS-omriktare som kombinerar dem två, en så kallad flyback omvandlare, se Figur 2.11, vilken både höjer spänningen när den är för låg och sänker spänningen när den är för hög.



Figur 2.9: Illustrativt exempel på en ideal step-down omvandlars spänningsreglering över tid vid föränderlig inspänning, med maximal utspänning ställd till 5,25 V.



Figur 2.10: Illustrativt exempel på en ideal step-up omvandlars spänningsreglering över tid vid föränderlig inspänning, med minimal utspänning ställd till 4,75 V.



Figur 2.11: Illustrativt exempel på en ideal flyback omvandlars spänningsreglering över tid vid föränderlig inspänning, med maximal utspänning ställd till 5,25 V och minimal utspänning ställd till 4,75 V.

3

Metod

I detta kapitel presenteras studiens tillvägagångssätt. Avsnitt 3.1 beskriver simuleringen av olika rotordesigner och avsnitt 3.2 hur generator och kraftelektronik testades och valdes. I avsnitt 3.3 beskrivs hur prototypen konstruerades och tillverkades och avsnitt 3.4 beskriver hur den slutgiltiga prototypen testades.

3.1 Simuleringsanalys av rotordesigner

För att minimera antalet 3D-utskrifter utreddes olika rotordesigner först genom simuleringar, från vilka numeriska resultat erhöles som enkelt gick att jämföra. Simuleringsresultaten är baserade på vissa förenklingar av designerna och de fysikaliska modellerna, vilket är anledningen till att även fysiska tester utfördes i efterföljande steg för att få en komplett bild av funktionen. Simuleringarna, som utfördes i mjukvaran STAR CCM+, beräknade ett approximativt vridmoment runt rotoraxeln för respektive rotordesign baserat på CFD-analyser [18]. För att tidseffektivisera simuleringarna tillämpades en relativt grov mesh på cirka 650.000 celler för HAWT och 350.000 celler för VAWT. Parametrarna bakom denna mesh anges i Tabell 3.1.

Tabell 3.1: Parametrar för mesh vid simulering.

Parameter	Värde
Mesh Type	Polyhedral mesh
Base Size	0.02 m
Target surface Size	100 %
Minimum surface size	0.05 %
Surface Growth Rate	1.3
Auto-Repair Minimum Proximity	0.01
Number of Prism Layers	6
Prism Layer Stretching	1.5
Prism Layer Total Thickness	33.33 % of base size

Simuleringen av respektive rotordesign begränsades över en cylinderformad domän vars radie var cirka tre gånger längre än rotordesignens radie. På så sätt blev domänen stor nog för att det turbulenta gränsskikt som bildas inte skulle påverkas av domänens gränser, men liten nog för att vara tidseffektiv.

Valet av fysikaliska modeller för simuleringen spelade stor roll för simuleringstiden samt resultatets trovärdighet. De parametrar som valdes för dessa simuleringar syns i Tabell 3.2. I denna studie valdes Spalart-Allmaras turbulensmodell då denna är väl anpassad för luftflöden [19].

Tabell 3.2: Parametrar för flöde vid simulering.

Three Dimensional
Gas
Ideal Gas
Steady
Segregated Flow
Segregated Fluid Enthalpy
Turbulent Flow
Reynolds-Averaged Navier-Stokes
Spalart-Allmaras Turbulence
Standard Spalart-Allmaras

Simuleringen mellan HAWT och VAWT skiljde sig även till viss del från varandra. Vid simulering av HAWT var geometrin stationär eftersom luftflödet har samma träffyta oavsett vilken vinkel vindkraftverket har runt sin rotationsaxel. Detta stämde dock inte för VAWT vars träffyta varierar vid rotation, vilket ledde till att geometrin även behöver rotera i simuleringen. Vid simuleringen av VAWT skapades därför en intern domän runt vindkraftverket, som roterade med 10 rad/s. De simuleringar som utfördes beräknade hur olika infallsvinklar, antal blad samt olika bladprofiler påverkar vridmomentet. Samtliga simuleringar utfördes med ett luftflöde på 4 m/s.

3.2 Val av generator och kraftelektronik

Valet av generator och kraftelektronik baserades på de effektmål som specificerats i avsnitt 1.2.1, alltså bland annat en effekt på 5 W. Från tester av generatorns karakteristik kunde sedan kraftelektroniken utformas. Två olika generatorer testades, en BDC- samt en BLDC-generator, för att utreda vilken karakteristik de hade och vilken som lämpade sig bäst för att implementeras i ett småskaligt vindkraftverk.

För att karakterisera generatorerna och få en uppfattning om vilken matningsspänning som kraftelektroniken kommer få vid ett givet varvtal mättes deras Kv-värde. Vid mätningen användes en BLDC-motor, KEDA 63-64 190KV, med en tillhörande BLDC-kontroller, Flispky VESC v4.12, för att styra motorn till ett visst varvtal. Genom att fästa motorns rotoraxel i generatorns rotoraxel får dessa samma varvtal. Utifrån detta kan utspänningen på generatormätas. Gällande BDC-generatorn sker denna mätning direkt på utgångarna och gällande BLDC-generatorn sker den efter en likriktare.

Baserat på resultaten från testerna på generatormätning valdes vilken typ av kraftelektronik som behövdes för att få ut en stabil spänning på 5 V.

3.3 Prototypernas tekniska design och tillverkning

Bortsett från generatorn och kraftelektroniken designades prototypens delar i CAD-mjukvaran Autodesk Inventor och skrevs sedan ut med två olika 3D-skrivare, Ultimaker S5 och Sinterit Lisa. Delarna inspekterades och testades sedan och om fel upptäcktes justerades designen för att sedan skrivas ut på nytt. De delar som skrevs ut anpassades efter vald generator och kraftelektronik för att få en så välfungerande prototyp som möjligt.

Prototypen designades uppifrån och ner; först designades och tillverkades rotorblad och rotornav. Dessa designades så att rotorbladen enkelt skulle kunna monteras på och av. Därefter designades och tillverkades en växellåda och generatorfästen. Efter att dessa bekräftades fungera formgavs en inkapslande hållare för de komponenterna. Slutligen designades och tillverkades stativ och stödben.

3.4 Fysiska tester av den slutgiltiga prototypen

Vid de därpå följande fysiska testerna av prototypen användes en stor fläkt för att skapa ett laminärt luftflöde. Styrkan på detta flöde reglerades dels genom att variera effekten på fläkten, dels genom att variera avståndet mellan prototyp och fläkt. Vindhastigheten mättes med en anemometer, Extech EN300, och rotorns rotationshastighet mättes med en tachometer, PeakTech P2790. Med hjälp av ett oscilloskop, Rohde and Schwarz RTB2004, utlästes spänningen över olika delar av kretsen. Slutligen lastades utgången med en variabel last, EA-EL 9080-45, som justerades för att undersöka hur hög effekt som prototypen levererar i aktuella vindhastigheter.

4

Resultat

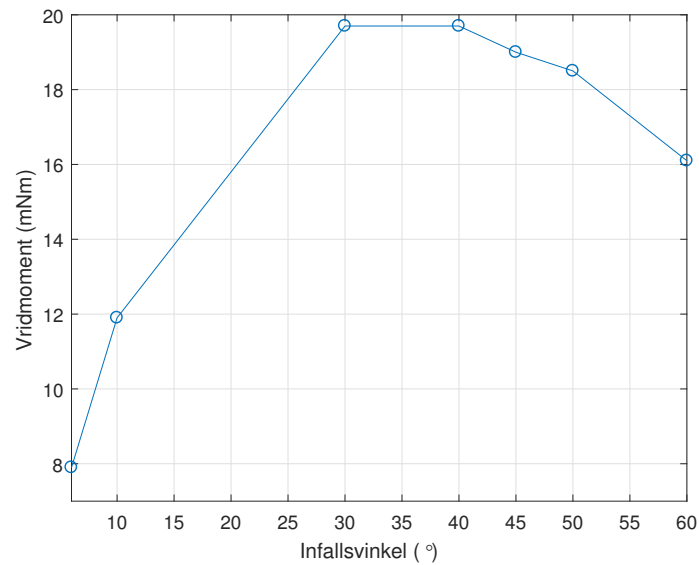
I detta kapitel presenteras resultaten av de metoder som togs upp i kapitel 3. I avsnitt 4.1 presenteras resultaten från simuleringarna. I avsnitt 4.2 visas resultaten från testerna av generatorerna och motivering till vilken som valdes ut. Avsnitt 4.3 går igenom prototypens olika beståndsdelar samt hur dessa monteras ihop för att få en fungerande prototyp. Slutligen i avsnitt 4.4 presenteras resultaten från de fysiska tester som utfördes på prototypen.

4.1 Simuleringsresultat

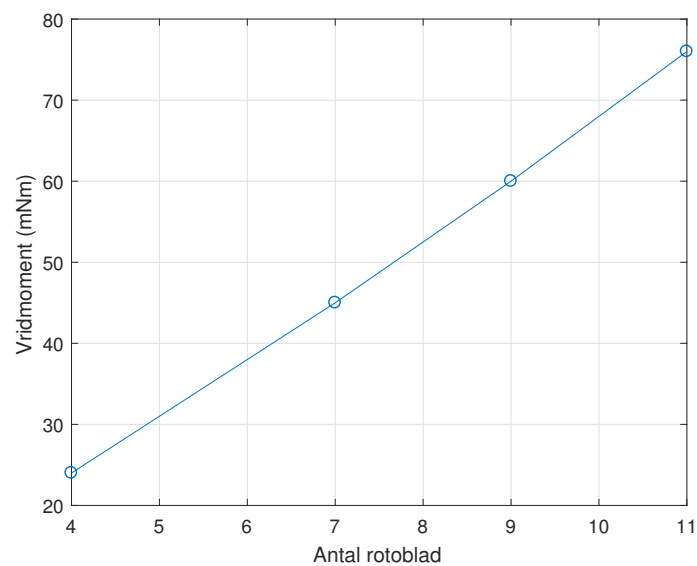
Här presenteras resultaten från simuleringarna av HAWT och VAWT individuellt för att sedan jämföras med varandra.

4.1.1 HAWT

I Figur 4.1 och Figur 4.2 presenteras hur olika infallsvinklar respektive olika antal blad påverkar vridmomentet. Dessa visar att en optimal infallsvinkel fås mellan 30° och 40° samt att fler blad leder till ett linjärt ökat vridmoment. Dessa resultat, tillsammans med litteraturstudien, lade grunden för att prototypen valdes till att ha så många rotorblad som möjligt, med en infallsvinkel på runt 35° samt bladprofil NACA 63-415. Infallsvinkeln togs som ett medelvärde av de två vinklar som gav bäst resultat enligt simuleringen.



Figur 4.1: Simulerat vridmoment vid olika infallsvinklar av HAWT med tre rotorblad och bladprofil NACA 63-415.



Figur 4.2: Simulerat vridmoment av HAWT med olika antal rotorblad med bladprofil NACA 63-415 och 35° infallsvinkel.

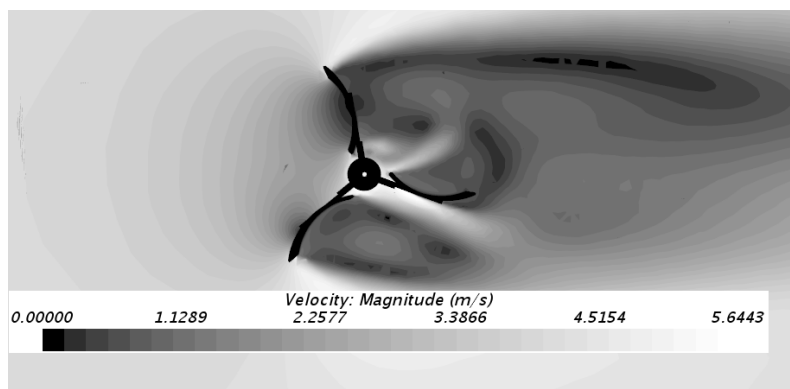
4.1.2 VAWT

Totalt simulerades tre olika VAWT-modeller av Savonius-typ. Resultaten av dessa finns i Tabell 4.1. Den första modellen som simulerades, version 1, hade ett tomrum mellan rotorbladen och rotornavet. Figur 4.3 visar en simuleringsmodell över version 1, där den absoluta hastigheten av luftflödet renderas med lägre hastigheter som en mörkare nyans. Här ses att ett luftflöde träffade baksidan av det ena rotorbladet vid

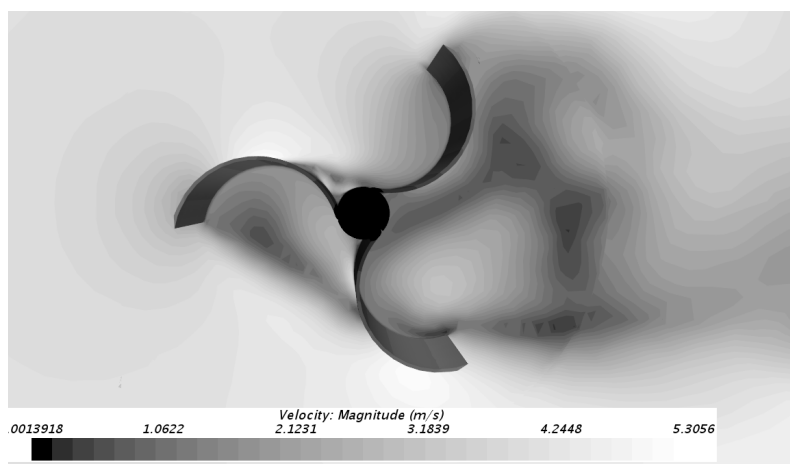
vissa vinklar vilket minskade vridmomentet avsevärt. Den andra versionen, version 2, utvecklades därför för att ha rotortyperna inbyggda direkt i rotornavet, se Figur 4.4. Denna modell simulerades både med tre och fyra rotorblad.

Tabell 4.1: Simulerat vridmoment för VAWT.

Modell	Version 1	Version 2, 3 blad	Version 2, 4 blad
Vridmoment	0.74 mNm	4.89 mNm	3.74 mNm



Figur 4.3: Simulering VAWT, Version 1, med luftflödet riktat från höger till vänster i bild.



Figur 4.4: Simulering VAWT, Version 2, med luftflödet riktat från höger till vänster i bild.

4.1.3 Jämförelse av HAWT och VAWT

Simuleringsresultaten tydde på en stor skillnad mellan HAWT och VAWT vad gäller deras vridmoment. HAWT med enbart tre rotorblad antyddes få ett nästan fyra gånger större vridmoment än det största som erhöles för VAWT. På grund av denna avsevärda skillnad i effektivitet fattades beslutet att enbart gå vidare med fysiska tester för HAWT.

4.2 Resultat gällande tester av generatorer och kraftelektronik

BLDC-generatorn som testades var Turnigy HD 3508 Brushless Gimbal Motor, vars specifikationer kan ses i Tabell 4.2. Den valdes på grund av sitt specificerade låga Kv-värde och sin kompakta storlek. Det uppmätta Kv-värdet är derivatan av kurvan i Figur 4.5.

Tabell 4.2: Specifikationer för Turnigy HD 3508 Brushless Gimbal Motor.

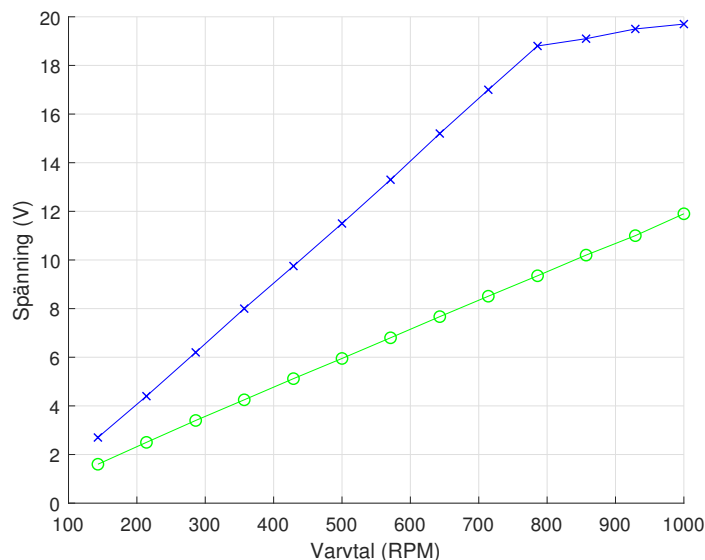
Namn	Symbol	Värde	Enhet
Inre resistans	R_{fas}	13,8	Ohm
Specificerat Kv-värde	Kv	41	RPM/V
Uppmätt Kv-värde	Kv	44	RPM/V
Poler	p	14	-

BDC-generatorn som testades, Cutting Edge Mini 12 Volt Wind Turbine Generator Motor, var specificerad att fungera som en generator för just småskaliga vindkraftverk. Dess specifikationer kan ses i Tabell 4.3.

Tabell 4.3: Specifikationer för Cutting Edge Mini 12 Volt Wind Turbine Generator Motor.

Namn	Symbol	Värde	Enhet
Inre resistans	R_{fas}	55	Ohm
Uppmätt Kv-värde	Kv	84	RPM/V

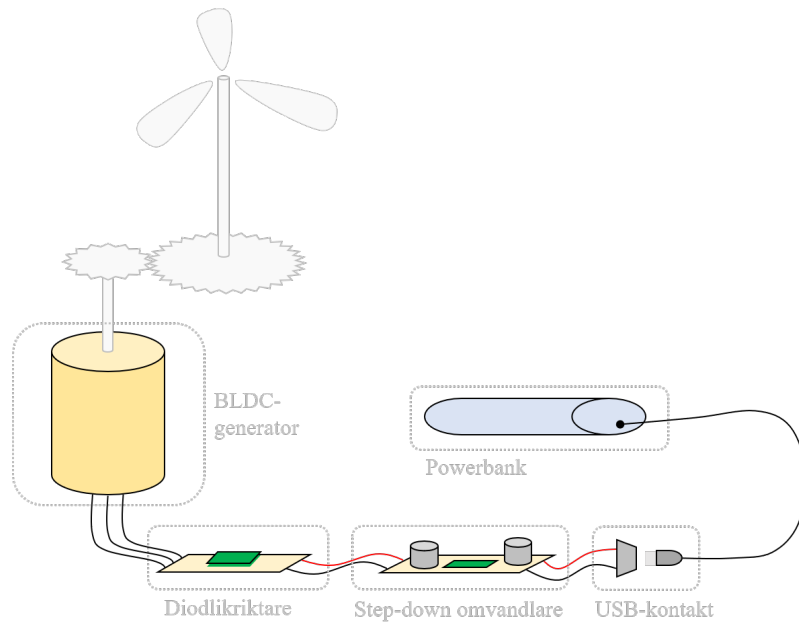
I Figur 4.5 presenteras de testade generatorernas utspänning som funktion av varvtal. BLDC-generatorn alstrar en markant högre spänning än BDC-generatorn vid ett givet varvtal.



Figur 4.5: BDC- (cirkel) och BLDC-generatorns (kryss) utspänning utan last vid olika varvtal.

Den generator som valdes är BLDC-generatorn. Dess lägre inre resistans och lägre Kv-värde gör den till en mer lämplig generator än BDC-generatorn. Utöver detta är en BLDC-generator tystare och mer underhållsfri, se avsnitt 2.3. Följdaktligen behöver prototypens kraftelektronik inkludera en likriktare, se avsnitt 2.3.2. Figur 4.6 åskådliggör den kraftelektronik, likriktare och step-down omvandlare som krävs för att kunna ge ut 5 V till en powerbank.

Generatorns inre förluster minskar dock med ökad rotationshastighet. För att öka rotationshastigheten konstruerades därför en kuggväxellåda till generatorn. Växellådan utformades så kompakt som möjligt med en utväxling på 5:1, vilket innebär att generatoraxeln får en fem gånger högre rotationshastighet än rotnavet. Den ökade rotationshastigheten ger trivialt även en högre alstrad spänning. Med andra ord förskjuts kurvan i Figur 4.5 uppåt i y-led.

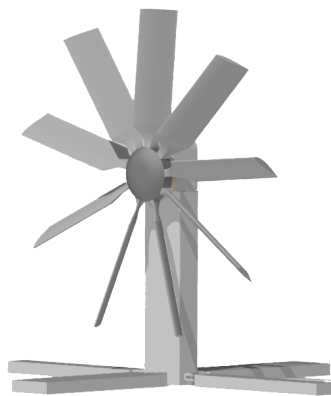


Figur 4.6: Översikt över prototypens generator och kraftelektronik samt last.

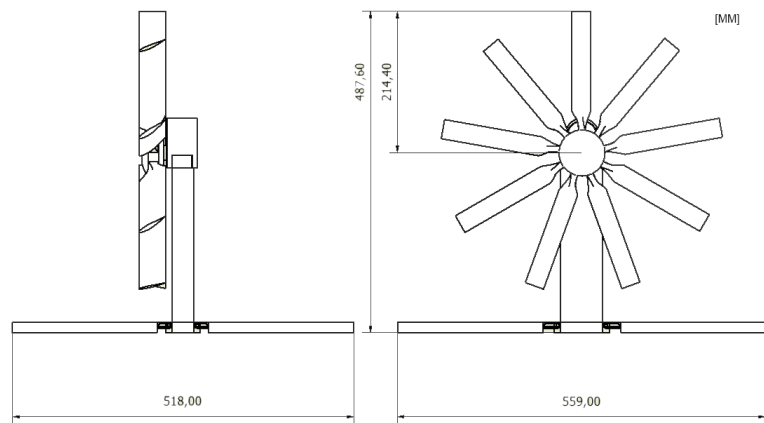
4.3 Den slutgiltiga prototypens design och konstruktion

Prototypens konstruktion består av fem 3D-utskrivna delar; rotornav, rotorblad, växellåda, stativ samt stödben. I Figur 4.7 ses en översiktsbild av den slutgiltiga prototypen, och en ritning med dimensioner ses i Figur 4.8. Kraftelektroniken tillsammans med USB-utgången placerades i stativet.

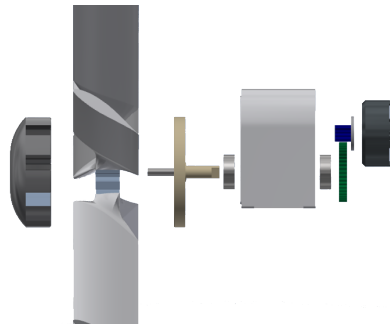
En exploderad vy över rotornavet tillsammans med rotorblad och växellåda ses i Figur 4.9. Från vänster till höger i denna figur syns navet, rotorbladen, fästplatta med skruv mellan nav och växellåda, kullager, växellåda, kullager, kugghjul för växel och generator. Skruven på fästplattan är en helgängad sexkantsskruv M5x12 mm och håller ihop navet med rotorbladen och växellådan.



Figur 4.7: Prototypen i dess helhet.



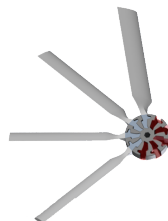
Figur 4.8: Prototypens dimensioner.



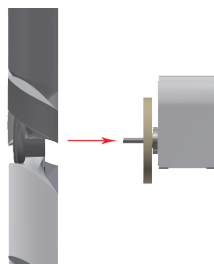
Figur 4.9: Exploderad vy av prototypens rotor med växellåda avbildad från sidan.

4.3.1 Montering av prototyp

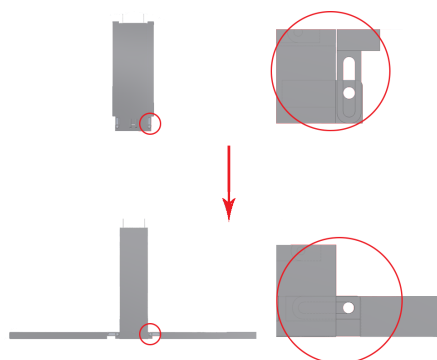
Prototypen monteras i fyra steg. Först monteras rotorbladen i navet enligt Figur 4.10. Sedan skruvas navet med rotorbladen fast på växellådan enligt Figur 4.11. Därefter fälls stödbenen ut genom att först dra dem uppåt, sedan fälla ut dem, och slutligen trycka in dem i stativet enligt Figur 4.12. Slutligen fästs rotorenheten på stativet enligt Figur 4.13 och kablarna från växellådan och stativet kopplas samman.



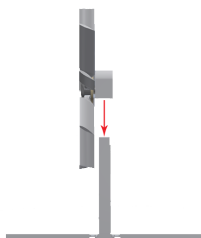
Figur 4.10: Montering av prototyp steg 1: Rotorbladen monteras i navet.



Figur 4.11: Montering av prototyp steg 2: Navet med rotorblad skruvas på växellådan.



Figur 4.12: Montering av prototyp steg 3: Nedfällning av stativbenen.



Figur 4.13: Montering av prototyp steg 4: Rotorenheten monteras på stativet.

4.4 Fysiska testernas resultat

Fysiska tester genomfördes på den färdiga HAWT-prototypen för mäta den effekt som genereras vid olika vindhastigheter. Resultat från mätningar av HAWT presenteras nedan.

Prototypen testades inledningsvis med endast likriktare för att bepröva konstruktionens stabilitet samt funktion vid ökande vindhastigheter. Resultaten beträffande det sist nämnda återges i Tabell 4.4. Därefter kopplades även step-down omvandlaren in och testet upprepades, dessa resultat återges i Tabell 4.5. Konstruktionen stod stabilt utan att välta i samtliga av dessa vindhastigheter.

Tabell 4.4: Resultat från fysiskt test av HAWT-prototyp utan last med endast likriktare.

Vindhastighet	Varvtal	Spänning, likriktare
4,0 m/s	125 RPM	13 V
5,7 m/s	181 RPM	19 V
6,7 m/s	192 RPM	20 V

Tabell 4.5: Resultat från fysiskt test av HAWT-prototyp, utan last, med likriktare och step-down omvandlare.

Vindhastighet	Varvtal	Spänning, likriktare	Utspänning
4,2 m/s	125 RPM	11 V	5,1 V
5,7 m/s	161 RPM	16 V	5,1 V
6,7 m/s	223 RPM	20 V	5,1 V

Slutligen upprepades testet med last. Vid en viss vindhastighet ökades lasten tills dess att vindkraftverket inte klarade av att leverera den effekten. Resultatet av testet återges i Tabell 4.6.

Tabell 4.6: Resultat från fysiskt test av HAWT-prototyp, med olika laster, samt med likriktare och step-down omvandlare.

Last	Vindhastighet	Varvtal	Spänning, likriktare	Utspänning
0,25 W	5,0 m/s	86 RPM	5 V	5,0 V
0,50 W	6,5 m/s	193 RPM	17 V	5,0 V
0,70 W	6,5 m/s	81 RPM	12 V	5,0 V
1,00 W	7,0 m/s	185 RPM	17 V	5,0 V
1,25 W	8,5 m/s	209 RPM	18 V	5,1 V
1,50 W	8,8 m/s	230 RPM	19 V	5,1 V

4.4.1 Verkningsgrad

Den tillgängliga effekten i vinden som prototypen sveper över beräknas enligt Ekvation 2.2, där svepytan A beräknas baserat på Figur 4.8 i vilken svepradien utläses till 0,214 m. Denna effekt presenteras i Tabell 4.7 för olika vindhastigheter v , tillsammans med prototypens uppmätta effekter. Verkningsgraden ges som kvoten mellan uppmätt effekt och beräknad tillgänglig effekt.

Tabell 4.7: Jämförelse av den tillgängliga energin i förhållande till av prototypen utvunnen energi.

Vindhastighet	Total effekt i vinden	Prototypens last	Verkningsgrad
5,0 m/s	11,1 W	0,25 W	2,3 %
6,5 m/s	24,4 W	0,70 W	2,9 %
7,0 m/s	30,5 W	1,00 W	3,3 %
8,5 m/s	54,6 W	1,25 W	2,3 %
8,8 m/s	60,6 W	1,50 W	2,5 %

5

Diskussion

I detta kapitel diskuteras studien. Diskussionen är uppdelad i fyra olika delar. Metoddiskussionen tar upp hur metodvalet kan ha påverkat slutresultatet och hur alternativa metoder kunde gett andra resultat. Resultatdiskussionen tar upp hur resultatet kan tolkas och hur det kan ha påverkats av olika faktorer. Tredje delen diskuterar huruvida prototypens design är optimal och hur den kunde ha påverkats av andra tillvägagångssätt. Slutligen diskuteras hur studien ger utrymme för vidare forskning och vilka andra områden som kan vara utav intresse.

5.1 Metoddiskussion

Metoderna som användes i studien var av praktisk och experimentell karaktär, där mycket av datan som användes för att nå slutresultatet togs fram via tester under studiens gång. Beslutet om detta tillvägagångssätt kan markant ha påverkat hur prototypen utformades jämfört med om ett mer teoretiskt tillvägagångssätt hade nyttjats.

Metodvalen bygger på målen och avgränsningarna som nämns i avsnitt 1.2.1 och 1.3 och anpassades för att dessa skulle uppnås. Även om en viss litteraturstudie genomfördes i början av studien hade ett mycket mer teoretiskt tillvägagångssätt kunnat användas. Resultat från flera olika studier hade kunnat jämföras för att dra nya slutsatser utifrån dem. Studien hade även kunnat fokuseras mer på andra aspekter av prototypen, såsom användarvänlighet och ergonomi i prototypen. Detta innebär att rapportens resultat eventuellt inte täcker alla aspekter som kan vara relevanta för studien. Därmed finns gott om utrymme för vidare forskning.

5.2 Resultatdiskussion

I Tabell 4.7 ges ett mått på prototypens verkningsgrad, det vill säga andelen vindenergi som omvandlades till elektrisk energi. En verkningsgrad på drygt tre procent kan tyckas vara väldigt låg, men som förklaras i avsnitt 2.1 är det svårt att nå höga verkningsgrader vid utvinnandet av vindenergi och moderna vindkraftverk har som bäst en verkningsgrad på cirka 10-30 %. Den maximala effekt som prototypen levererade var 1,5 W vid en vindhastighet på 8,8 m/s. Genom att justera dimensionerna på prototypens rotorblad och/eller växellåda hade möjligtvis en högre effekt kunnat erhållas.

Felmarginalen för mätresultaten är relativt stor och kan ha påverkat resultaten. Mätningen av vindhastigheten är beroende av på vilken höjd över marken samt på vilket avstånd från fläkten som anemometern hålls. Variationer i mätningen påverkar drastiskt den energi som finns tillgänglig i vinden, i enlighet med Ekvation 2.1, och därmed även prototypens beräknade verkningsgrad. Prototypen kan dock inte förväntas ha en lika hög verkningsgrad som moderna vindkraftverk som utvecklats under längre tid och med mer resurser. En annan viktig iakttagelse är att tidigare nämnda verkningsgrader generellt gäller för betydligt större vindkraftverk än den utvecklade prototypen, samt att det kan vara lättare att nå en högre verkningsgrad med vindkraftverk på större skala. Detta eftersom förhållandet mellan rotorblad och rotornav blir mer gynnsamt samt att slitage och små produktionsfel potentiellt påverkar vindkraftverket mindre.

I Figur 4.5 visas resultatet från mätningen av de båda generatorernas utspänning i förhållande till varvtal. Mätresultaten från BLDC-generatorn tyder på en avtagande ökning av spänningen vid de högre varvtalen trots att resultatet borde visa på ett linjärt samband enligt avsnitt 2.3.2. Vad detta beror på är inte klarlagt och det är inte säkert att samma resultat erhållits om testet upprepats. BLDC-generatorn visar trots detta ett markant bättre förhållande i spänning till varvtal än BDC-generatorn och valdes därför att användas i prototypen.

Prototypen tillverkades till stor del i en 3D-skrivare i plast, bland annat växellådan tillverkades på detta sätt. Det är möjligt att en växellåda i annat material, tillverkad med ännu större precision, hade gett mindre förluster. Fler rotorblad hade också säkerligen resulterat i en högre verkningsgrad, i enlighet med resultaten i avsnitt 4.1, men det uppkom ett flertal hinder beträffande hur många rotorblad som var möjliga att montera och därför valdes slutligen nio stycken till prototypen. Mer om detta i avsnitt 5.3.

En källa till förluster som möjligtvis påverkat verkningsgraden är de elektriska komponenter som användes, specifikt generator, likriktare och step-down omvandlare. Dessa komponenter kan ha inbyggda förluster som är svåra att upptäcka. Utöver det är de inte specifikt designade för att användas i småskaliga vindkraftverk och hade antagligen kunnat optimeras för att fungera bättre om de designats specifikt för den applikationen.

5.3 Designdiskussion

Det är svårt att få definitiva och jämförbara resultat vad gäller designval av den färdiga prototypen och därmed att avgöra hur pass väl designad den färdiga prototypen är. Den slutgiltiga designen utformades istället genom en iterativ process med målet att balansera behoven av en så hög effektutveckling som möjligt och möjligheten att montera ned prototypen relativt snabbt och enkelt. Förmodligen är det möjligt att förbättra prototypen i bägge avseendena.

Ett exempel på svårigheter med avvägningen mellan portabilitet och effektutveckling var valet av antalet rotorblad hos prototypen. I avsnitt 4.3 framläggs att den slutgiltiga prototypen har nio rotorblad men samtidigt syns tydligt i Figur 4.2 att ännu fler blad hade resulterat i ett högre vridmoment och därför möjligtvis bättre effektutveckling. Hade inte rotorbladen behövt vara avtagbara hade det varit betydligt enklare att komma upp i ett högre antal rotorblad, men med den nuvarande portabla designen åstadkoms inte fler än nio, såvida rotornavet inte förstordes avsevärt.

Samtidigt är det även svårt att avgöra huruvida den slutgiltiga designen är optimal för portabiliteten. Exempelvis hade avsevärda funktionella förbättringar sannolikt kunnat åstadkommas genom ett teleskopiskt stativ eller teleskopiska stödben. Det går troligtvis även att förbättra designen i avseendet att kombinera hopfällbarhet och robusthet. Slutligen råder osäkerhet kring prototypens användarvänlighet då inga användartester har utförts.

Kabeldragningen från prototypen är en annan aspekt av hur designen kan förbättras. Ett mer robust alternativ till att kablarna dras utanpå prototypen vore ett kontaktdon kopplat inuti fästordningen mellan generatorhuset och stativet, eftersom kablar är relativt känsliga och lätt kan skadas vid felhantering om de är ej inkapslade. Denna konstruktion hade även givit ett extra stöd för generatorhuset.

5.4 Vidare forskning

Studien lämnar stort utrymme för vidare forskning. Som diskuterades i avsnitt 5.3 finns flera potentiella fokusområden inom designen av prototypen. Enligt studiens avgränsningar undersöktes enbart stödben för helt plana ytor. Ett område för framtida forskning skulle därför vara alternativa monteringslösningar, möjligtvis för att anpassa prototypen för friluftslivsapplikationer. Av samma anledning kan möjligtvis också resurser läggas på att göra en mer väderbeständig prototyp, med en eventuell IP-klassning.

Det finns också möjliga forskningsområden som bygger vidare på det här studiens slutgiltiga HAWT-prototyp. Fler rotorbladprofiler och andra konstruktionsmaterial är exempel på områden som hade kunnat utredas. Då studien ej innefattat några hållfasthetsberäkningar finns det en risk att prototypen är överdimensionerad. Ifall olika konstruktionsmaterial studeras i vidareutveckling av prototypen bör hållfastheten i dessa beräknas för att kunna effektivisera designen och minska vindkraftverkets storlek.

Ett av de större problemen hos HAWT är att deras effektivitet är väldigt beroende av att de vinklas direkt mot luftflödet. Prototypen kräver att detta görs av en person. Det finns dock möjlighet att vidareutveckla fästet för rotornavet så att det kan rotera runt sin fästaxel och regleras för att alltid ställas mot luftflödets riktning. Vidareutveckling av detta kan garantera att prototypen fungerar så effektivt som möjligt med minimal mänsklig påverkan.

Beträffande elektronikområdet vore det av intresse att utveckla en prototyp som kan reglera sin uteffekt beroende på vindhastighet och tillgänglig last. Det hade hindrat prototypen från att riskera att stanna vid höga laster, utan istället begränsat effekten när vindenergin inte varit tillräcklig. Även bromsar och andra skydd mot hög vind hade varit intressanta forskningsområden.

Avslutningsvis hade det varit intressant att analysera och utreda förlusterna i prototypen. Verkningsgraden i Tabell 4.7 beräknades endast baserat på den teoretiskt tillgängliga vindenergin och den elektriska energin som lasten matades med. Genom att analysera vart de största förlusterna finns, i rotorbladen, i växellådan, i generatorn eller i kraftelektroniken, skulle det troligtvis vara möjligt att förbättra verkningsgraden.

6

Slutsats

Syftet med denna studie var att studera hur elektrisk energi kan utvinnas ur vindenergi på liten skala. Genom att designa, simulera och fysiskt testa olika modeller av vindkraftverk, både horisontal- och vertikalaxlade, utvecklades en prototyp. Baserat på testresultaten drogs slutsatsen att horisontalaxlade vindkraftverk bättre utvinnet kinetisk energi ur laminell vind än vertikalaxlade vindkraftverk. Fler rotorblad gav större träffyta, vilket resulterade i ett högre vridmoment.

Den slutgiltiga prototypen omvandlade runt tre procent av all tillgänglig vindenergi till elektrisk energi. Maximalt klarade prototypen att utvinna en elektrisk effekt på 1,5 W vid en vindhastighet på 8,8 m/s. Detta kan jämföras med de mål som fastslogs i avsnitt 1.2.1, där en effektutveckling på upp till 5 W var önskvärt, vilket vindkraftverket inte lyckades producera. För att nå projektets utsatta mål om 5 W hade prototypens dimensioner behövts justeras och rotorbladens längd ökats. Utöver det uppnådde prototypen målen om att börja rotera vid låga vindhastigheter och strömleverans via USB.

Prototypen är portabel på så vis att större delen av konstruktionen kan monteras ned utan hjälp av verktyg, samt innefattar stödben som går att fälla ut och låsa. Slutligen klarade prototypen stabilitetskravet då den stod stadigt vid samtliga vindhastigheter som den testades i.

Referenser

- [1] D. Rickard, “Wind Power,” 2015, [Elektronisk bild]. Tillgänglig: <https://www.flickr.com/photos/45243265@N00/21752850878>, hämtad: 2019-05-02.
- [2] Popolon, “Granville Twisted Savonius,” 2014, [Elektronisk bild]. Tillgänglig: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Granville.twisted_Savonius.jpg, hämtad: 2019-05-02.
- [3] Aeolus88, “Vawt,” 2008, [Elektronisk bild]. Tillgänglig: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vawt.jpg>, hämtad: 2019-02-02.
- [4] Vattenfall. (2016) Vindkraft i framtiden. [Online]. Tillgänglig: <https://corporate.vattenfall.se/om-energi/el-och-varmeproduktion/vindkraft/vindkraft-i-framtiden/>, hämtad: 2018-02-08.
- [5] T. Ishugah, Y. Li, R. Wang, och J. Kiplagat, “Advances in wind energy resource exploitation in urban environment: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 37, ss. 613–626, sep. 2014. doi: 10.1016/J.RSER.2014.05.053. [Online]. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114003785?via%3Dihub>, hämtad: 2019-03-29.
- [6] K. Sunderland, T. Woolmington, J. Blackledge, och M. Conlon, “Small wind turbines in turbulent (urban) environments: A consideration of normal and Weibull distributions for power prediction,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 121, ss. 70–81, okt. 2013. doi: 10.1016/J.JWEIA.2013.08.001. [Online]. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610513001748?via%3Dihub>, hämtad: 2019-03-29.
- [7] “Betz Limit | REUK.co.uk.” [Online]. Tillgänglig: <http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/betz-limit/>, hämtad: 2019-05-09.
- [8] “SWT-2.3-108 Technical specifications,” 2019. [Online]. Tillgänglig: www.siemensgamesa.com, hämtad: 2019-05-09.
- [9] H. Versteeg och W. Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamics*, 2a uppl. Pearson Education, 2007.
- [10] U. Chaudhary, P. Mondal, P. Tripathy, S. K. Nayak, och U. K. Saha, “Modeling and optimal design of small HAWT blades for analyzing the starting tor-

- que behavior,” i *2014 Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC)*. IEEE, dec. 2014, ss. 1–6. doi: 10.1109/NPSC.2014.7103886. [Online]. Tillgänglig: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7103886> , hämtad: 2019-05-04.
- [11] S. Zafar, M. Gadalla, och S. M. Hashemi, “An Investigation into a Small Wind Turbine Blade Design,” i *Progress in Sustainable Energy Technologies: Generating Renewable Energy*. Springer International Publishing, 2014, ss. 483–497. doi: 10.1007/978-3-319-07896-0_29. [Online]. Tillgänglig: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-07896-0_29 , hämtad: 2019-04-04.
- [12] M. M. M. Saad och N. Asmuin, “Comparison of Horizontal Axis Wind Turbines and Vertical Axis Wind Turbines,” i *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, aug. 2014, vol. 04, nr. 8, ss. 27–30. doi: 10.9790/3021-04822730. [Online]. Tillgänglig: [http://www.iosrjen.org/Papers/vol4_issue8%20\(part-2\)/E04822730.pdf](http://www.iosrjen.org/Papers/vol4_issue8%20(part-2)/E04822730.pdf) , hämtad: 2019-05-10.
- [13] A. Hartman och W. Lorimer, “Design Equations for BLDC Permanent Magnet Generators,” [Online]. Tillgänglig: http://performancemagnetics.com/images/BLDC_Generator_Design_Methodology_Performance_Magnetics_revI-2.pdf , hämtad: 2019-05-07.
- [14] P. Yedamale, “Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals,” , 2003. [Online]. Tillgänglig: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00885a.pdf> , hämtad: 2019-05-07.
- [15] “Brushless Motor Kv Constant Explained • LearningRC.” [Online]. Tillgänglig: <http://learningrc.com/motor-kv/> , hämtad: 2019-05-12.
- [16] S. Baldursson, “BLDC Motor Modelling and Control-A Matlab ® /Simulink ® Implementation,” Chalmers tekniska högskola, masteruppsats, 2005. [Online]. Tillgänglig: <http://webfiles.portal.chalmers.se/et/MSc/BaldurssonStefanMSc.pdf> , hämtad: 2019-05-07.
- [17] “Universal serial bus specification,” 2000. [Online]. Tillgänglig: <https://usb.org/document-library/usb-20-specification> , hämtad: 2019-05-11.
- [18] *Simcenter STAR-CCM+ v13.04 User Guide*. Plano, Texas: Siemens PLM Software, 2018.
- [19] P. Spalart och S. Allmaras, “A one-equation turbulence model for aerodynamic flows,” i *30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, jan. 1992, ss. 5–21. doi: 10.2514/6.1992-439. [Online]. Tillgänglig: <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.1992-439>