



Konstruktion och utvärdering av ett savoniusvindkraftverk

Reglerat med en elektronisk styrenhet

MADELEINE ANDERSSON
JACOB ARVIDSSON
FREDRIK DERMAN
LISA LARSSON
JENS MEDBO
PÄR-LOVE PALM

Institutionen för signaler och system
Avdelningen för reglerteknik
Chalmers Tekniska Högskola
Göteborg, 2014-05-19

SSYX02-14-34

Förord

Först och främst tack till *Särö Dressyrstall* för lån av mark och lokal där vindkraftverket fått stå samt lån av verktyg och maskiner. Utan detta skulle ett fullskaligt vindkraftverk varit svårt att realisera. Ett stort tack riktas även till *Darri Kristmundsson* för tillåtelse att utnyttja Chalmers vindtunnel samt hjälpen vid kalibreringstillfällena, till *Jan Bragee* och *Reine Nohlborg* i Chalmers Prototypplabb för assistans och råd vid tillverkningen av vindkraftverkets mekaniska delar samt till *Chalmers Robotförening* för lokal, elektriska komponenter och verktyg. Sist men inte minst ett tack till projektets handledare *Claes Breitholtz*.

Abstract

The report is a result of a Bachelor Thesis at Chalmers University of Technology. The purpose is, by means of practical experiments, to verify that the Savonius wind turbine efficiency can be improved via electronic control. The report includes the design and testing of a Savonius wind turbine and an electronic control unit. The function of the control unit is to regulate the turbine speed using PWM (Pulse Width Modulation) to vary the power output from the alternator. The controller also handles the measurement and data collection of the parameters required for controlling the system and the verification of the system's efficiency. The control algorithm design implemented in the controller is also described.

Results from tests of the wind turbine shows a distinct increase of the produced power for different wind speeds when controlled by a Maximum Power Point Tracking algorithm, compared with tests of the wind turbine uncontrolled. The result is uncertain due to measurement errors and the difficulty in simulating identical test cycles. Further testing of the system is required to draw more specific conclusions of the system performance.

Sammanfattning

Denna rapport är resultatet av ett kandidatarbete vid Chalmers Tekniska Högskola. Syftet är att genom praktiska försök undersöka om savoniusvindkraftverkets verkningsgrad kan förbättras genom elektronisk reglering. Rapporten behandlar konstruktion och tester av ett savoniusvindkraftverk med en elektronisk styrenhet. Styrenhetens funktion är att reglera turbinens varvtal. Detta sker genom att via pulsbreddsmodellering variera strömuttaget ur kraftverkets generator. Styrenheten sköter även mätning och datainsamling av de parametrar som krävs för reglering av kraftverket och beräkning av systemets verkningsgrad. Även den i styrenheten implementerade regleralgoritmens utformning beskrivs.

Resultat från tester av kraftverket visar på en tydlig ökning av producerad effekt för olika vindhastigheter då det regleras med en Maximum Power Point Tracking-algoritm, jämfört med tester av kraftverket oreglerat. Detta resultat är dock osäkert på grund av mätfel och svårigheten att simulera identiska testcykler. För att dra mer specifika slutsatser om systemets prestanda behöver ytterligare tester av systemet göras.

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	Syfte	1
1.2	Metod och avgränsningar	2
2	Övergripande systembeskrivning	3
2.1	Mekanisk uppbyggnad	3
2.2	Elektronik och mätningar	4
3	Mekanisk konstruktion.....	5
3.1	Turbin	5
3.2	Ställning	6
3.3	Axel och lager	6
3.4	Generatorfäste	7
3.4.1	Statorfäste	8
3.4.2	Rotorfäste	8
4	Generator	10
4.1	Konduktionsförluster och vridmoment	10
4.2	Kraftverkets generator	10
4.3	Permanentmagnetiserad synkronmaskin	11
5	Elektrisk konstruktion.....	12
5.1	Styrning av generatorns moment	12
5.2	Mätningar kopplade till kretsen	14
5.3	Analoga mätningar	14
5.3.1	Signal till brusförhållande	14
5.3.2	Jordplanets utformning	15
5.3.3	Val av spänningsreferens	16
5.4	Strömmätning	17
5.4.1	Val av mätmotstånd	17
5.4.2	Analog förstärkning	19
5.4.3	Filtrering	19
5.5	Mätning av generatorns utspänning	21
5.6	Transistorer och likriktare	22
5.6.1	Inverkan av förluster i likriktarbrygga	23
5.7	Digitala ingångar	23
5.8	Externa mätningar	23
5.8.1	Varvtalsmätning	24
5.8.2	Vindmätning	24
5.8.3	Temperaturmätning	25
6	Loggning och behandling av mätdata	26
6.1	Mjukvara	27
6.1.1	Huvudprogrammet	27
6.1.2	Grafiskt användargränssnitt	28
7	Reglering av kraftverket.....	29
7.1	Matematisk modell av systemet	30
7.2	Verkningsgraden för ett oreglerat kraftverk	31
7.2.1	Verkningsgrad utan batteri	31
7.2.2	Verkningsgrad med direktladdat batteri	32
7.3	Analytisk bestämning av optimal pulskvot	33
7.4	Maximum Power Point Tracking	33

8	Tester och resultat.....	36
8.1	Teoretisk verkningsgrad	36
8.1.1	<i>Kraftverk utan batteri</i>	36
8.1.2	<i>Kraftverk med batteri</i>	37
8.2	Simulering med likströmsmotor	37
8.2.1	<i>Resultat</i>	38
8.3	Test av fullskaligt vindkraftverk.....	38
8.3.1	<i>Resultat</i>	39
9	Diskussion	42
9.1	Parametervariationer och verkningsgrad	42
9.2	Praktiska problem	42
9.2.1	<i>RAM-minne</i>	42
9.2.2	<i>Elektrisk hårdvara</i>	42
9.2.3	<i>Läsning av pulsgivare</i>	42
9.2.4	<i>Strömmätningen</i>	43
9.2.5	<i>Kopplingen mellan turbin och generator</i>	43
9.2.6	<i>Bestämning av mätosäkerheter</i>	43
9.3	Test av fullskaligt vindkraftverk.....	43
9.4	Hållbar utveckling	44
10	Slutsats.....	45
11	Rekommendationer och framtida arbete.....	46
11.1	Vindturbinen	46
11.2	Generatoren	46
11.3	Reglering.....	46
12	Referenser	47

Appendix A – Dimensioneringsberäkning axel

Appendix B – Kalibrering av vindsensor

Appendix C – Optimal pulskvot

Appendix D – Testresultat från körning med vindkraftverket på släpkärra

Appendix E – Metod för bestämning av momentkaraktäristik

1 Inledning

Energi har länge utvunnits ur vinden med olika sorters vindkraftverk. Beroende på vindkraftverkets konstruktion utnyttjas vindens kraft på olika vis. Ett tillvägagångssätt är att använda vindens dragkraft liknande ett segel vinkelrätt mot vinden medan en annan metod utnyttjar vindens lyftkraft likt en flygplansvinge (Hau, 2006). Hau kategoriserar vindkraftverk beroende på dess utformning, det vill säga som horisontal- eller vertikalaxliga. De horisontalaxliga trebladiga vindkraftverken som utnyttjar vindens lyftkraft är en vanlig syn i Sverige.

Denna rapport handlar om det mindre vanliga vertikalaxlade dragkraftsutnyttjande vindkraftverket av typ Savonius. Främsta fördelen med savoniusvindkraftverk är att turbinen har en okomplicerad konstruktion relativt andra typer av vindkraftverk. Det möjliggör användandet av återanvänt och lättillgängligt material, till exempel kasserade oljefat. Det innebär jämfört med alternativa vindkraftverk en lägre materialkostnad, kortare byggprocess och lägre kompetenskrav. Ytterligare fördelar är att alla horisontella vindriktningar kan utnyttjas utan styrning av vindkraftverkets riktning och turbinen roterar redan vid låga vindhastigheter. Anledningen till att användningen av savoniusvindkraftverk inte är mer utbredd trots dess fördelar antas bero på dess relativt dåliga verkningsgrad och höga materialåtgång för turbinens konstruktion. Om vindkraftverkets effektivitet förbättras kan kraftverkets användningspotential höjas betydligt. Lösningen är än mer intressant om turbinen konstrueras av lättillgängligt material som kasserade oljefat eller dylikt. Speciellt lämpade platser för användning kan vara där det elektriska nätet är ur funktion eller otillräckligt för att tillgodose grundläggande behov. Ett alternativ för att trygga elförsörjningen till primära faciliteter, till exempel belysning och kommunikationsutrustning, är att lokalt generera elektricitet med savoniusvindkraftverk.

Förhållandet mellan vindhastighet och turbinens periferihastighet, det så kallade löptalet, är en viktig parameter i vindkraftverks effektivitet. De flesta vindkraftverk inklusive savonius-turbinen har ett optimalt löptal där de har maximal verkningsgrad (Wortman, 1983). Det visas analytiskt i denna rapport att detta löptal generellt inte kan hållas utan någon sorts reglering och turbinverkningsgraden för en oreglerad savonius-turbin därför blir låg. Därför önskas reglering av turbinens rotationshastighet med avseende på att uppfylla det önskade löptalet och därmed ge ett högre effektuttag och verkningsgrad.

När en vindkraftverksgenerator genererar el verkar den samtidigt med ett bromsande moment på turbinen. Detta moment är proportionellt mot den genererade strömmens storlek (Hughes och Drury, 2013). Genom att reglera strömmens storlek, kan generatorns motmoment och därmed turbinens varvtal regleras. Rapporten utreder om Savoniusvindkraftverk kan regleras på detta sätt med hjälp av en elektronisk strömställare för att uppnå önskat löptal och därmed få bättre verkningsgrad.

1.1 Syfte

Möjligheten att öka verkningsgraden för ett vindkraftverk av Savonius-typ genom att reglera strömuttaget ur kraftverkets generator i ett praktikfall utreds i denna rapport.

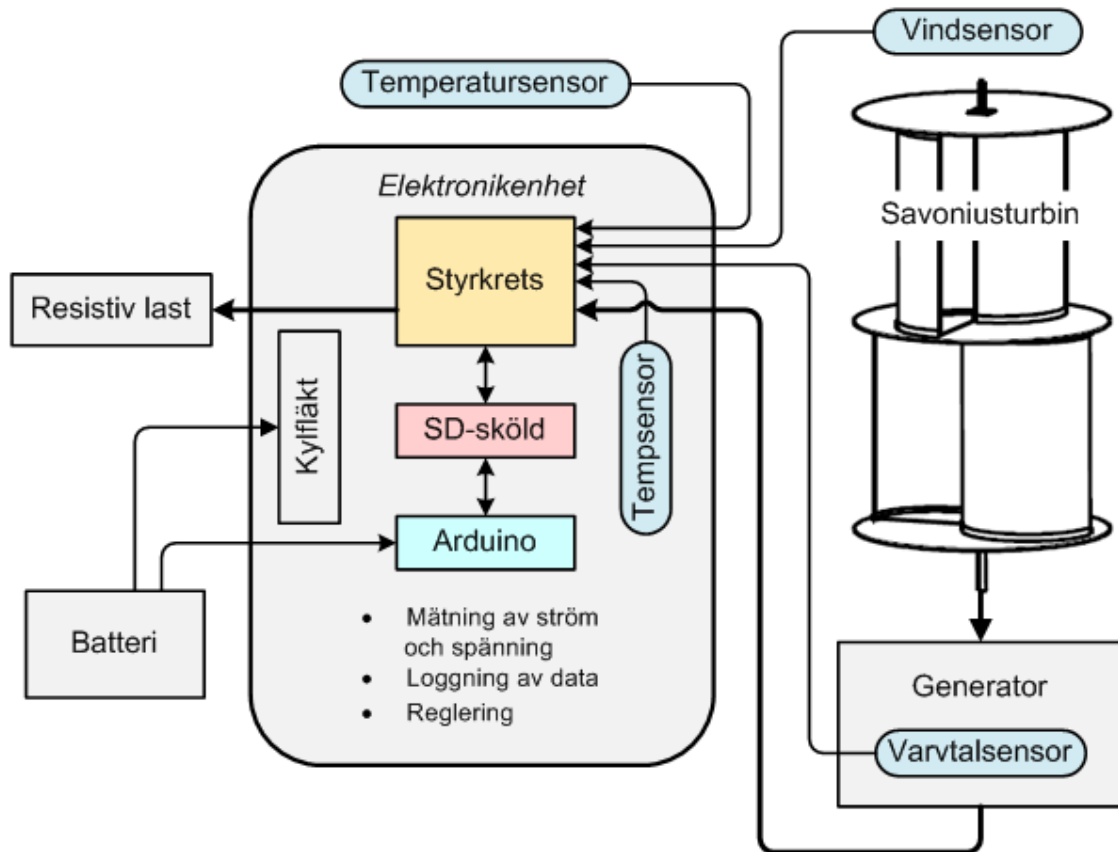
1.2 Metod och avgränsningar

Ett savoniusvindkraftverk i full skala med tillhörande elektroniskt styrsystem konstruerades för att prova de teoretiska antagandena under verkliga driftsförhållanden.

Rapporten innefattar ingen redogörelse för förbättring av savoniusturbinens mekaniska prestanda utan dessa designparametrar grundas i litteraturstudier.

2 Övergripande systembeskrivning

Ett savoniusvindkraftverk i full skala konstruerades. Detta består huvudsakligen av en savoniusturbin, en generator, styrelektronik och mätutrustning. En omslutande ställning sammanhåller och stabiliserar konstruktionen. I Figur 2.1 ges en översiktlig bild av systemets mekaniska komponenter, mätutrustning och elektronik.



Figur 2.1. Översiktlig bild av det konstruerade systemet.

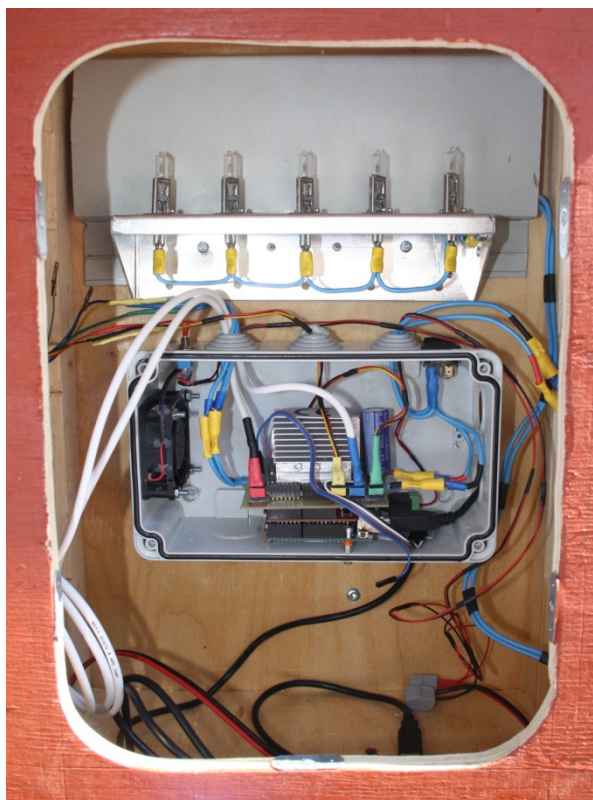
2.1 Mekanisk uppbyggnad

Vind driver savoniusturbinen till en roterande rörelse kring dess vertikala axel. Axeln som sammanlänkar turbin och generator överför det drivande momentet till generatorm som med hjälp av uppkommen rotation genererar elektricitet. En motor på 500 W avsedd att monteras i navet på en cykel används som en generator.

I Figur 2.2 ses savoniusvindkraftverket med turbinen monterad i ställningen. Vindsensorn är placerad på toppen av ställningen och elektronikenheten innesluts av ett skyddande hus som sitter monterat på ställningen. Elektronikenheten inklusive resistiv last ses i Figur 2.3.



Figur 2.2. Savoniusvindkraftverket med turbinen monterad i ställningen, vindsensorn överst samt elektronikenhetens skyddande hus ner till höger. Generatorn syns under turbinen.



Figur 2.3. Elektroniken med styrenheten och den resistiva lasten i form av fem halogenlampor högst upp.

2.2 Elektronik och mätningar

Elektronikenheten består av en styrkrets, en loggningsenhet och ett utvecklingskort av typ *Arduino UNO R3*. Denna hanterar alla mätningar och i denna implementerades en regleralgoritm för att reglera kraftverket.

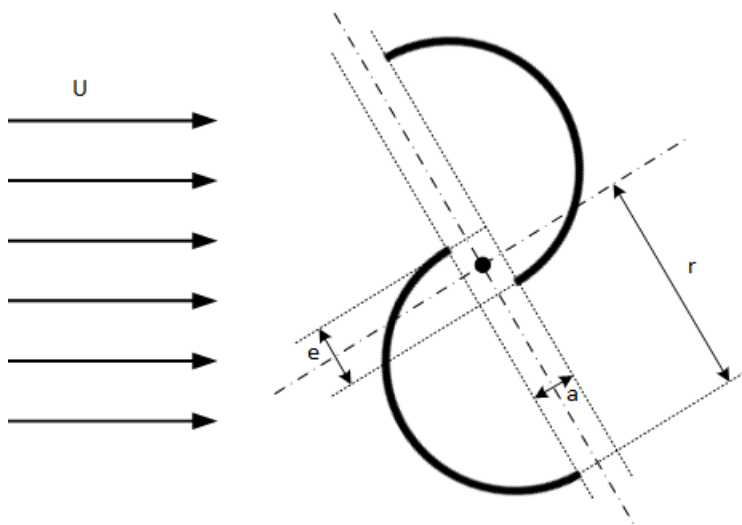
För att utvärdera systemets beteende mäts och uppskattas dess mekaniska effekt och den ingående vindeffekten. Detta görs genom mätningarna av ström, spänning, varvtal och vindhastighet. För att kunna kompensera för temperaturberoende variationer mäts omgivningstemperatur och temperaturen i elektroniklådan. I syftet att kunna göra medelvärdesbildningar och oövakade mätningar över lång tid utformades ett loggsystem till elektronikenheten. Till detta används en tilläggsenhet till utvecklingskortet, en s.k. SD-sköld. Mätvärdena som loggades användes sedan som underlag för att besvara projektets syfte. All elektronisk utrustning drivs av ett fordonsbatteri. Vid behov används en kylfläkt. Den resistiva last som förbrukar den producerade elektriciteten består av fem stycken parallellkopplade halogenlampor som har en sammanlagt märkeffekt på 500 W.

3 Mekanisk konstruktion

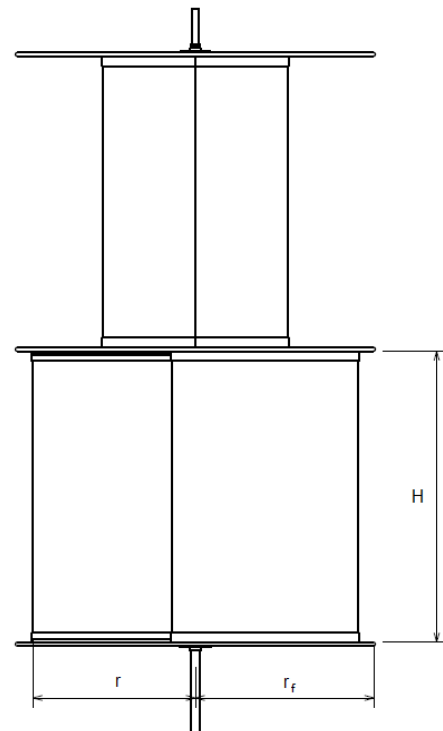
Kraftverket kan mekaniskt sett delas upp i fyra huvudsakliga delar; turbinen, ställningen, axel och lager samt generatorfästet. Dessa delar beskrivs i detta kapitel.

3.1 Turbin

Turbinen är tillverkad av kasserade oljefat som delades i halvor och sammanfogades kring en vertikal axel. I toppen, i mitten och i botten sitter halvorna fästa i cirkulära plywoodskivor. Turbinens förmåga att generera ett axelmoment från vinden beror i hög grad av turbinens utformning. Därför är de geometriska parametrarna av viktiga för konstruktionen av prototypen.



Figur 3.1. Geometrisk parametrar vid turbinutformning, sett ovanifrån.



Figur 3.2. Parametrar vid turbinutformning, sett från sidan.

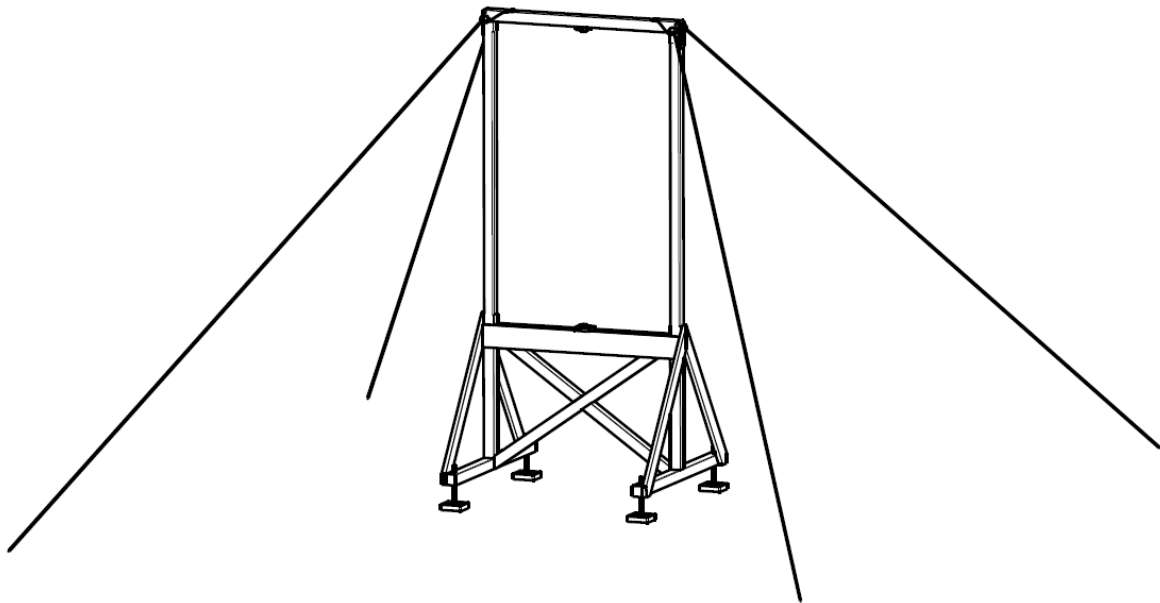
För en turbin bör, enligt definitioner i Figur 3.1, överlapp e vara av storleken 15 – 30 % av turbinens diameter $d = 2r$ och glappet a bör vara obefintligt. Vidare bör turbinen ha minst två nivåer, se Figur 3.2, där varje nivå har höjden H som fyra gånger turbinens radie r . Ändplattorna bör ha en radie r_f 1,1 gånger turbinens radie. (Menet, 2004)

Eftersom turbinen byggdes av oljefat så begränsades konstruktionen till specifika mått på höjd och rotordiameter. De oljefat som användes har höjden 890 mm samt diameter 580 mm. Turbinens geometriska parametrar är därför:

Turbinens radie	$r = 500 \text{ mm}$
En turbinvånings höjd	$H = 890 \text{ mm}$
Turbinens totala höjd	$H_{tot} \approx 1800 \text{ mm}$ (inkl. $3 \times 10 \text{ mm}$ ändplattor i plywood)
Överlapp	$e = 0.3d = 150 \text{ mm}$
Glapp	$a = 0 \text{ mm}$
Ändplattas radie	$r_f = 1.1r = 1100 \text{ mm}$

3.2 Ställning

Ställningens funktion i systemet är att hålla upp turbinen och generatoren. Den används även som fäste för vindmätare och elektronikenhet. Ställningens konstruktion utgörs av träreglar. Den totala höjden är 3000 mm och bottendelen av konstruktionen är kvadratisk i horisontalplanet med sidan 1400 mm. De vertikala reglarna, toppbalken, de horisontella balkarna i botten av konstruktionen samt krysstaget som tar upp skjuvkrafter i ställningen (se Figur 3.3) är av dimension 70×70 mm. Det nedre lagerhuset som tar upp turbinens tyngd vilar på två horisontella balkar som är fastsatta mellan de vertikala reglarna. Dessa balkar är av dimension 145×45 mm. Fyra sneda stag av trallvirke, dimension 120×28 mm, stabiliserar de vertikala reglarna mot de horisontella balkarna i botten av konstruktionen.



Figur 3.3. CAD-modell av ställningen, en träkonstruktion som stegas av spännband samt har ställbara fötter.

För att träkonstruktionen ska vara väderbeständig då vindkraftverket står ute är alla träreglar tryckimpregnerade. För att stabilisera konstruktionen och förhindra att vindkraftverket välter stegas ställningen från toppen med fyra spännband. Dessa fästes med spett i marken. Ställningen är försedd med fyra ställbara fötter för att kunna justera in kraftverket på ojämn mark. Fötterna är ställbara ca. 200 mm i vertikalled.

3.3 Axel och lager

Den vertikala axeln samt lagringen är viktiga delar i den mekaniska konstruktionen. Axeln överför momentet från vindturbinen till generatoren och lagringen håller axeln på plats med minimal friktion i rotationsrörelsen. Axeln har dimensionerats mot både utmattning och plasticering från krafter motsvarande en vindhastighet på 30 m/s. Den består av ett rör med ytterdiameter 25 mm samt innerdiameter 20 mm. Utförliga dimensioneringsberäkningar finns i Appendix A – Dimensioneringsberäkning axel.

Av konstruktionstekniska skäl i samband med inbyggnaden av lagringarna i den övriga konstruktionen används lager passande för inbyggnad i flänslagerhus. Lagerhusen fästs med skruv i ställningen. Lagren syns monterade i lagerhusen i Figur 3.4, där de är monterade på axeln. Distanser konstruerades för att passa ihop de olika diametrarna hos lagren och axeln. Det undre lagret har en större innerdiameter än axelns ytterdiameter och där sitter en distans

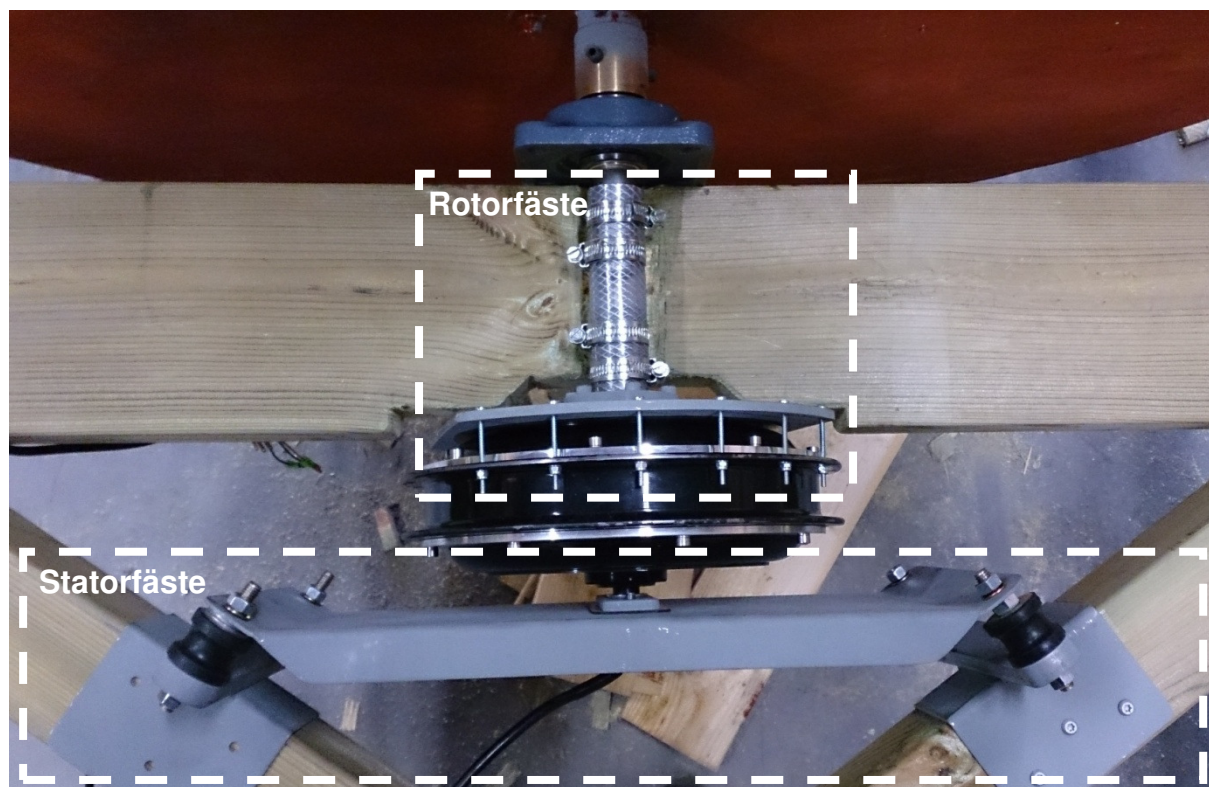
mellan axel och lager. Det övre lagret, som har en mindre innerdiameter än axelns ytterdiameter är fäst med en tapp som insats i änden av axeln, se Figur 3.4. Det under lagret är det större och syns till vänster i bilden. Det övre lagret är mindre och syns till höger i bilden.



Figur 3.4. Lagren är fästa i axeln med distanser för att passa ihop med de olika dimensionerna.

3.4 Generatorfäste

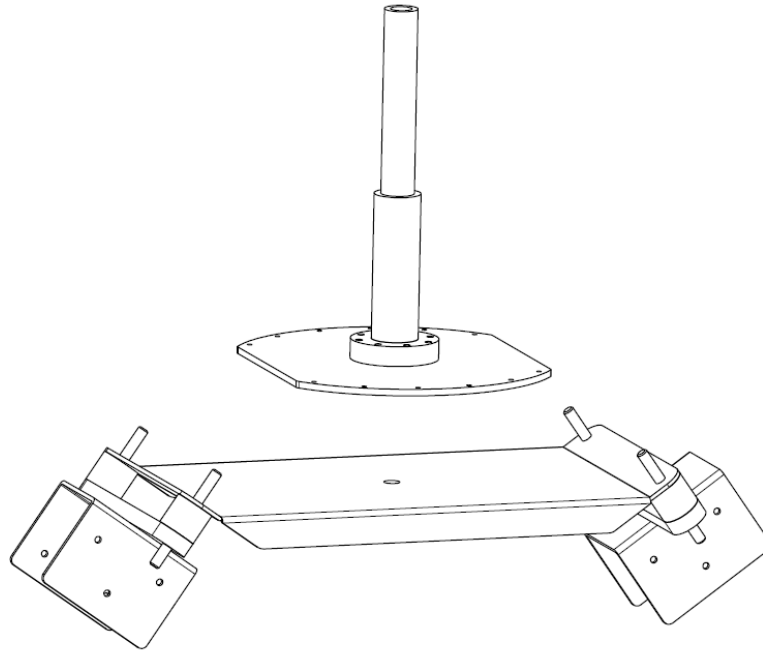
Generatorfästet är tillverkat i stål av bl.a. bockad plåt och svarvade detaljer. Alla ståldetaljer är målade med zinkspray för att skydda mot rostangrepp. Generatorfästet kan delas upp i två delar; statorfästet som fixerar generatorns stator mot kraftverkets ställning samt rotorfästet som fixerar generatorns rotor mot savoniusturbinen, se Figur 3.5. I kapitel 4 Generator beskrivs generatorns uppbyggnad och förutsättningarna för generatorfästets uppbyggnad.



Figur 3.5. Generatorns infästning i ställningen och turbinaxeln. En av de två träbalkarna som det nedre lagerhuset vilar mot är tillfälligt bortmonterad för att göra slangkopplingen tillgänglig.

3.4.1 Statorfäste

Statorfästet, se den undre delen i Figur 3.6, består av en bockad 2 mm stålplåt med måtten 200×400 mm, som navmotorns axel är fäst i. Axelns position i horisontalplanet fixeras genom ett 12 mm hål i plåten som axeln går igenom. För att ta upp statorns vridande moment låser en bit plattjärn med ett urfräst spår fast axeln genom att spåret ansluter mot de plana parallella ytor som finns på navmotoraxeln. Plattjärnsbiten är fäst mot plåten med ett skruvförband. Navmotoraxeln låses fast via en mutter på undersidan av den bockade plåten.



Figur 3.6. Generatorfästet med rotorfästet överst och statorfästet underst.

Den bockade plåten är fäst mot kraftverkets ställning via fyra gummikuddar, en i varje hörn, för att ta upp eventuella rörelser och snedställningar hos generatoren samt eventuella vibrationer i konstruktionen. Gummikuddarna är fastskruvade parvis i beslag tillverkade av bockad plåt och plattjärn. Beslagen är fastskruvade i träställningens krysstag.

3.4.2 Rotorfäste

Rotorfästet, se den övre delen i Figur 3.6, består av ett plattjärn med tvärsnittsdimensioner 5×200 mm och 250 mm långt. Plattjärnet är rundat i kanterna för att följa navmotorhusets ytterkanter. I centrum av plattjärnet finns ett svarvat hål med drygt samma diameter, 46 mm, som en av de cirkulära klackarna på navmotorn. Detta medför att plattjärnet kan träs på klacken på navmotorns ena sida (motsatt sida mot där statorfästet är monterat) och vilar mot de större plana ytorna på navmotorns sida. Klacken positionerar därmed plattjärnet centrerat över generatoren. Längs med de rundade kanterna på plattjärnet finns samma hålmönster som i navmotorns yttre flänsar (dvs. hålen för ekrarna).

På plattjärnet ansluter en svarvad axelkoppling, som invändigt har samma diameter som centrumhålet på plattjärnet. Axelkopplingen är fäst på plattjärnet med ett skruvförband. Andra änden av axelkopplingen smalnar av och har samma diameter som turbinaxeln. Den smala delen av axelkopplingen är 50 mm lång och är lättad för att ge bättre friktion mot den slangkoppling som kopplar ihop rotorfästet med turbinaxeln. Insidan av den smala delen är urborrad så att rotorfästet går fritt för den icke roterande navmotoraxeln som sticker ut på båda sidor av navmotorn.

Rotorfästet fixeras mot navmotorn genom ett skruvförband som spänner ner plattjärnet mot navmotorns yttre flänsar. 12 st. 2 mm skruv spänner mellan hålen i plattjärnets ytterkant och motsvarande ekerhål i navmotorn. En gummiduk är placerad mellan plattjärnet och de plana ytor som det vilar mot på generatoren. Det vridande momentet från turbinaxeln överförs till generatoren via friktionen mellan navmotorn, gummiduken och rotorfästet. Skruvförbandet med de 12 skruvarna säkerställer endast att friktionen via gummiduken är tillräcklig och kan inte ta upp något vridande moment.

Rotorfästet är kopplat till turbinaxeln via en armerad gummislang som är fäst mot rotorfästet och turbinaxeln med två slangklämmor på vardera sidan. Turbinaxelns anslutningsände, 50 mm lång, är räfflad för att säkerställa en tillräcklig friktion i slangkopplingen. Slangkopplingen kompenserar för eventuella snedställningar mellan turbinaxel och generator, samt skyddar generatoren vid hastiga ändringar i vridmoment från turbinen. Mellan rotorfästet och turbinaxeln finns ett glapp i vertikalled på 20 mm och eventuella rörelser i vertikalled mellan turbinaxel och generator tas därmed också upp av slangkopplingen.

4 Generator

Vindkraftverket producerar elektricitet genom att savoniusturbinen driver en generator som omvandlar den mekaniska energin i turbinen till elektrisk energi. Baserat på tillgänglighet och enkelhet stod det tidigt klart att den valda generatoren borde bli en permanentmagnetiserad likströms- eller synkronmaskin.

4.1 Konduktionsförluster och vridmoment

Preliminära beräkningar visade att savoniusturbinen skulle arbeta med ett högt vridmoment i förhållande till dess varvtal. Nedan härleds ett uttryck för konduktionsförlusterna i en likströmsmaskin som kvalitativt användes vid valet av generator.

När en ström I leds genom generatorns lindningar med resistansen R_l utvecklas en förlusteffekt

$$P_{loss,cu} = R_l I^2 \quad (4.1)$$

Strömmen I och resistansen R_l är antingen rotorns ström respektive resistans för en likströmsmaskin eller dessa ekvivalenta storheter för en synkronmaskin. Om generatoren förses med en förlustfri växel med utväxlingsförhållandet n kan momentet som generatoren verkar med på det som är anslutet till växellådans utgång, i det här fallet turbinen, uttryckas som

$$T = nk_t I \quad (4.2)$$

Här antas att generatorns momentkonstant k_t inte förändras. Om I löses ut från ekvation 4.2 och sätts in i ekvation 4.1 fås

$$P_{loss,cu} = R_l I^2 = R_l \left(\frac{T}{nk_t} \right)^2 = R_l T^2 \frac{1}{n^2 k_t^2} \quad (4.3)$$

Konduktionsförlusterna beror alltså både av den inversa kvadraten av en eventuell mekanisk utväxling samt av den inversa kvadraten av generatorns momentkonstant.

Ett önskemål för att förenkla den mekaniska konstruktionen var att en växel inte skulle behövas. Därför var en generator med ett högt värde på k_t önskvärt för att ge låga konduktionsförluster. En annan positiv effekt var att detta skulle ge en generellt högre EMK hos generatoren. Ett problem vid utvärdering av preliminära prototyper som inte beskrivs närmre i denna rapport var att generatorns EMK var för låg. Denna blev då lägre än spänningsfallet i kraftelektroniska komponenter kopplade i serie med denna vilket gjorde att ingen ström flöt förrän vid höga vindhastigheter.

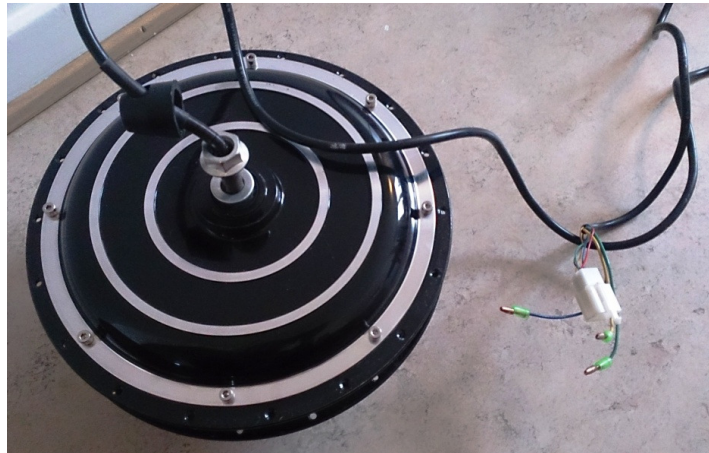
4.2 Kraftverkets generator

Det slutgiltiga valet baserades mestadels på acceptabel leveranstid och tillgänglig budget. Elektriska navmotorer för cyklar hade generellt sett ett fördelaktigt pris. Dessa hade vanligen en synkronmaskin monterad direkt i ett cykelnav.

Navmotorer för cyklar är lämpliga som generator för en savoniusturbin sett ur flera synvinklar. Dels har de generellt ett högt värde på k_t enligt de mätdata som tillverkare publicerat för olika navmotorer i sina sortiment, ofta i ett intervall runt 0,8-1,2 Nm/A. Vanligen har de sensorer monterade som kan användas för mätning av dess varvtal. Dessutom borde de rimligen vara tåliga för väta och användning utomhus.

En tolerans på att generatorns konduktionsförluster maximalt skulle få vara 5 % av turbinens energi vid 20 m/s eller totalt 100 W ställdes upp. Det var svårt att få tag på de mätdata som

krävdes för att beräkna detta exakt. Få data fanns tillgängliga för just denna motor eftersom dokumentationen som lämnades ut av tillverkaren var bristfällig. Överslagsräkningar gjordes med hjälp av data över liknande motorer. Detta visade att de uppställda kraven borde uppfyllas.



Figur 4.1. Savoniuskraftverkets generator är en navmotor till en cykel. På bilden syns bl.a. anslutningskablar och navaxeln med mutter och gummiskydd för kabelutgången.

En nackdel med att använda en navmotor som generator är att dess uppbyggnad medför att infästningen av motorn kräver vissa speciallösningar. I och med att motorns stator med tillhörande anslutningskablar är fixerad i förhållande till navmotorns infästningsaxel, så är det alltså axeln som måste hållas fixerad mot kraftverkets ställning. Infästningens uppbyggnad och dess olika delar beskrivs i kapitel 3.4 Generatorfäste.

4.3 Permanentmagnetiserad synkronmaskin

Navmotorn som valdes som generator kan mer generellt benämnas *permanentmagnetiserad synkronmaskin*. Utmärkande för sådana är högt vridmoment och hög uteffekt i förhållande till vikt och att de kan användas både som motor såväl som generator. Principiellt består denna av tre elektriska lindningar, kallade stator, placerade runtom eller inuti en permanentmagnetiserad del kallad rotor. (Hughes och Drury, 2013)

Om rotorn roteras av ett yttre tillfört moment (i detta fall turbinens moment) kommer motorns lindningar skäras av ett rörligt magnetfält. Detta inducerar en spänning kallad EMK i var och en av dessa lindningar. Den inducerade EMK-spänningen E [V] per fas, är proportionell mot rotorvarvtalet ω [rad/s] med proportionalitetskonstanten k_ω enligt följande samband (Hughes och Drury, 2013)

$$E = k_\omega \omega \quad (4.4)$$

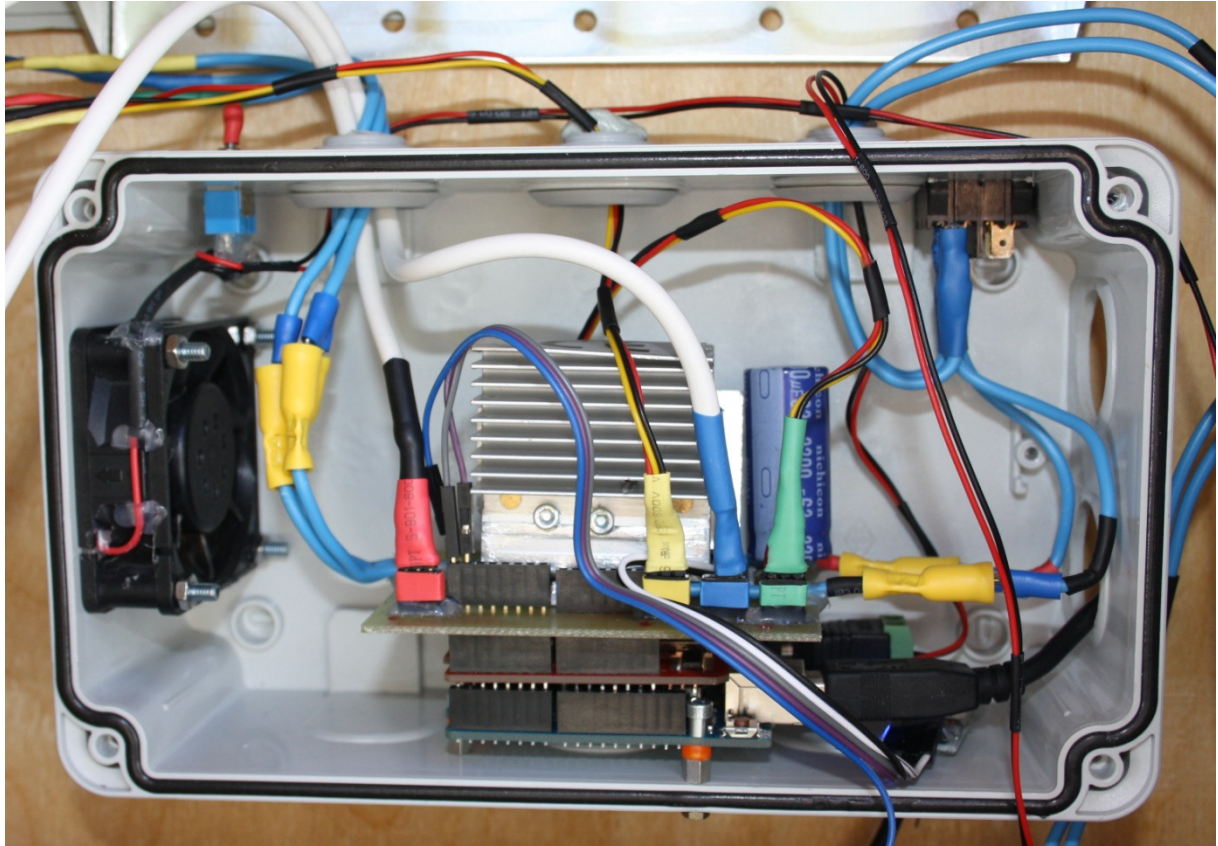
Konstanten k_ω får således enheten V/rad/s, som dock ofta inverteras och formuleras om på formen V/RPM. Den ström I [A] som tas ut från generatoren är i sin tur proportionell mot det motmoment T [Nm] som rotorn utövar på turbinaxeln med proportionalitetskonstanten k_t [Nm/A] enligt följande samband (Hughes och Drury, 2013)

$$T = k_t I \quad (4.5)$$

Hughes och Drury visar att de två konstanterna k_ω och k_t analytiskt kan skrivas som samma konstant k , när maskinsystemet analyseras per lindning.

5 Elektrisk konstruktion

Kraftverket styrs elektroniskt av en styrenhet, se Figur 5.1. Denna konstruerades från grunden för att få full kontroll över designen och dess detaljer, i kontrast mot om färdig utrustning köpts.



Figur 5.1. Elektronikenheten placerad i en skyddande låda.

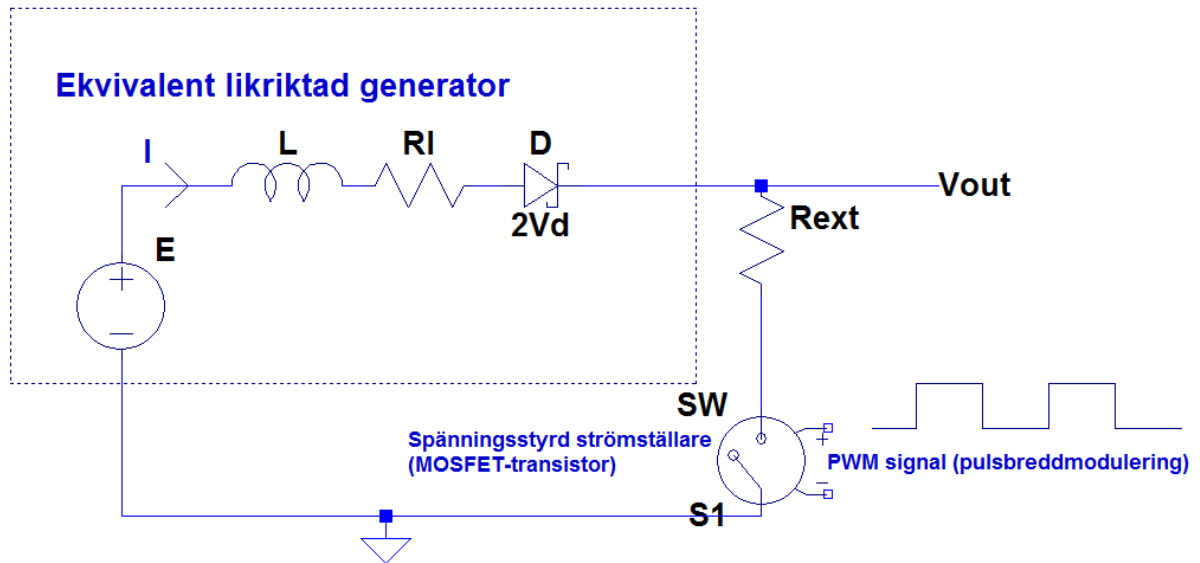
Som basenhet utnyttjas utvecklingskortet Arduino UNO R3, i vilken mjukvaran som hanterar praktisk reglering och mätningar är implementerad. Utvecklingskortet är ett kretskort med en mikrokontroller och kringkomponenter som omgärdas av stiftlistor. Stiftlisterna medger att utvecklingskortet modulärt kan byggas på med andra enheter. Dessa moduler kallas för sköldar. Mikrokontrollern är tillverkad av Atmel och har beteckningen ATmega328.

5.1 Styrning av generatorns moment

Kretsens viktigaste funktion är att styra generatorns utström I och därmed motmoment T enligt ekvation 4.5

$$T = k_t I \quad (4.5)$$

Detta görs genom pulsbreddmodulering av strömmen genom en resistiv last. Ett principiellt schema över strömstyrningen och generatören visas i Figur 5.2.



Figur 5.2. Schematisk beskrivning av generator och elektronisk strömstyrning.

Generatoren som användes levererar trefasström. För att enklare kunna styra fasernas strömmar likriktas de först med en diodbrygga. Då bildar generatoren och likriktaren med vissa förenklingar ett system ekvivalent med en likströmsmaskin med en ekvivalent diod i serie. Denna ekvivalenta diod får spänningsfallet $2V_d$ där V_d är spänningsfallet över en enda diod i likriktarbryggan. Komponenterna R_l och L är den ekvivalenta likströmsmaskinens serieresistans respektive induktans. Till kretsen kopplas en yttre förbrukare R_{ext} som i det här fallet är den tidigare beskrivna resistiva lasten bestående av halogenlampor.

I serie med kretsen sitter en spänningsstyrd strömställare som i praktiken är en MOSFET-transistor. Denna styrs av ett pulståg med pulskvoten D vilken definieras som

$$D = T_{on}/T_{off} \quad (5.1)$$

där T_{on} respektive T_{off} är tiderna pulståget har en logiskt hög respektive låg nivå under en period av pulståget. Resistanserna kan adderas till en total serieresistans enligt

$$R = R_{ext} + R_l \quad (5.2)$$

Om induktans i kretsen försummas kan medelströmmen I_{avg} för en period tecknas

$$I_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{E}{R} dt = \int_0^{DT} \frac{E}{R} dt = \frac{DE}{R} \quad (5.3)$$

där E antas till konstant i intervallet $0 \leq t \leq T$. Om den ekvivalenta serieresistansen R och strömställaren SW ersattes med en resistans Z som skulle ge samma medelström blir

$$Z = \frac{D}{R} \quad (5.4)$$

Det är den ekvivalenta resistansen Z som utnyttjas som styrparameter i systemet. Det antogs att det mekaniska systemet i övrigt skulle ha så stor tröghet i förhållande till längden på en period av den pulsbreddmodulerade signalen att det skulle vara befogat att rent reglermässigt se styrparametern Z som en varierbar resistans. Huruvida induktansen i motorn har en inverkan eller inte på Z har inte undersökts.

5.2 Mätningar kopplade till kretsen

Alla kontinuerliga mätningar som gjordes kopplades till den konstruerade kretsen. Här placerades ingångar till mätning av utetemperatur, temperatur på kretskortet, generatorns utström och spänning, vindhastighet och turbinens rotationshastighet.

Genom att mäta utström I och utspänning V_{out} kan omriktarens elektriska uteffekt P_{out} uppskattas enligt

$$P_{out} = V_{out}I \quad (5.5)$$

Genom att därefter mäta turbinens vinkelhastighet kan turbinens mekaniska uteffekt P_{turbin} uppskattas enligt

$$P_{turbin} = T\omega \approx \frac{I_{out}}{k_t}\omega \quad (5.6)$$

Uttrycket är en skattning eftersom generatorns momentkonstant k_t normalt varierar med uttagen ström. Detta kunde utläsas i datablad för olika generatorer.

Temperaturer mättes för att bättre kunna få uppfattningar om temperaturberoende variationer av mätvärden. Främst avsågs temperaturberoende variationer av luftens densitet.

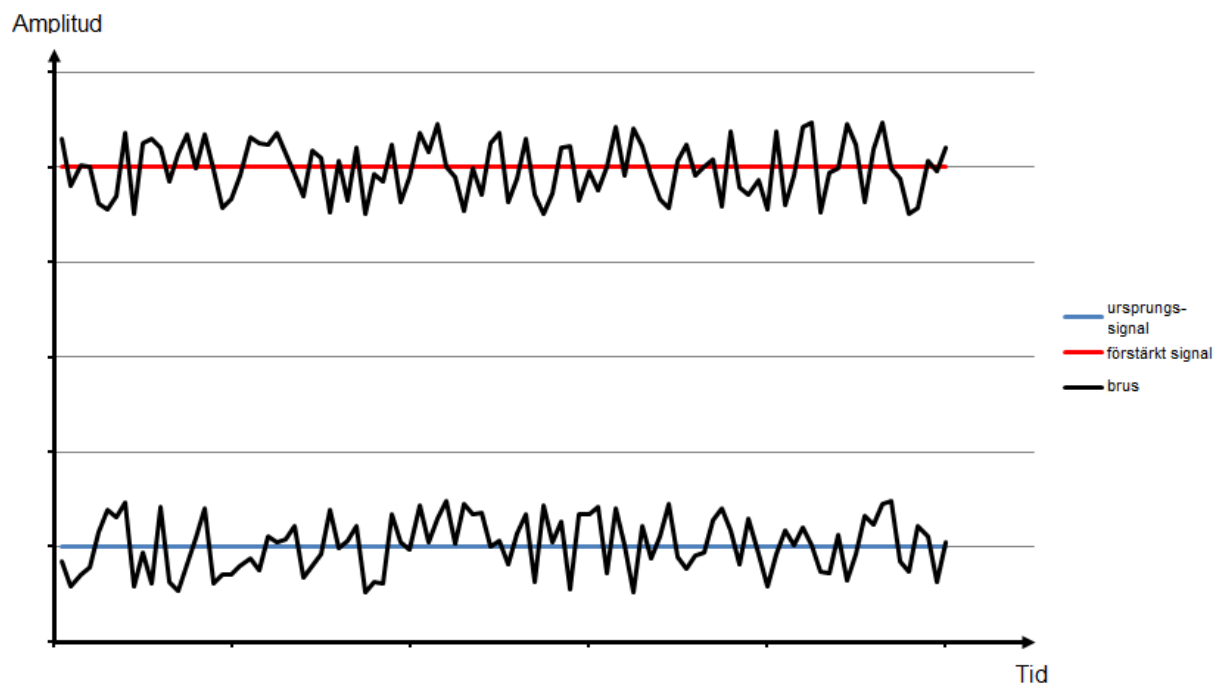
5.3 Analoga mätningar

För att kunna uppskatta kraftverkets elektriska och mekaniska effekt mättes generatorns likriktade spänning och ström. Till detta utnyttjades den integrerade A/D omvandlaren (analog till digitalomvandlare) i utvecklingskortets mikroprocessor ATmega328. Designfilosofin var att kunna göra mätningar med tillräcklig precision men med förhållandevis korta fördröjningar. Detta gjordes genom att definiera en maximal stigtid hos mättonen vid ett stegsvar på max 100 ms. Detta i kontrast mot t.ex. mätningar med en multimeter som vanligen har betydligt långsammare dynamik.

I databladet för ATmega328 (Atmel, 2014) kan utläsas att man som användare kan påverka A/D omvandlarens mätprecision på i huvudsak tre sätt. Alla mätningar görs mot en spänningsreferens. Därför måste en så stabil spänningsreferens som möjligt användas. I mjukvara kan önskad upplösning på mätningen ställas in och en hög upplösning borde generellt vara önskvärd för att få lägre avrundningsfel. Som sista och tredje åtgärd bör yttre elektriskt brus och termiska variationer minimeras.

5.3.1 Signal till brusförhållande

I praktiken förekommer alltid stora mängder brus vid analoga mätningar. Detta gäller speciellt i en miljö som denna, där strömmar snabbt slås på och av. Praktiska mätningar som gjordes på denna utrustning med hjälp av ett oscilloskop visade att det elektriska bruset i omgivningen hade en amplitud på ca 20-50 mV och med frekvenser större än 20 kHz. Därför är det önskvärt att den signal som ska mätas har hög spänningsamplitud i förhållande till störningarna.



Figur 5.3. Illustration över signal-till-brusförhållande för signaler av två olika amplituder.

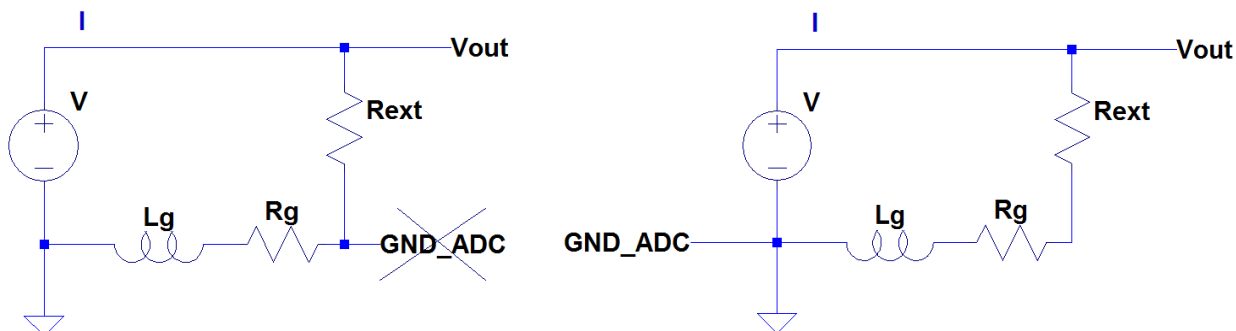
En vedertagen metod för att minska detta problem är att förstärka den spänningssignal som skall mätas med en analog metod. Bruset får då mindre betydelse i förhållande till ursprungssignalen, se Figur 5.3. Signalen förstärks vanligen analogt med hjälp av en operationsförstärkare för att uppnå ett högre signal-till-brusförhållande. (Maxim Integrated, 2001)

Precis som att det är önskvärt att signalen har hög amplitud i förhållande till det elektriska bruset, är det önskvärt att även A/D omvandlarens referens- och matningsspänning hålls på en så hög nivå som möjligt.

5.3.2 Jordplanets utformning

På kretskortet applicerades ett jordplan. Detta är ett kopparplan som läggs överallt där inga andra ledare läggs. Detta kan minska störningar genom att minska jordledningens impedans och genom att eliminera störningar från elektriska fält. (Zumbahlen, 2011)

Kretskortet designades på ett sådant sätt att det skulle få en jordning så lik ideal stjärnjordning som möjligt.



Figur 5.4. Illustration av ej önskvärd seriejordning (t.v.) och stjärnjordning (t.h.).

Idén är att potentialen för A/D omvandlarens jordpunkt inte skall störas av resistiva och reaktiva spänningsfall i jordledaren. Detta illustreras i Figur 5.4 t.v. där A/D omvandlarens lägre referenspunkt GND_ADC placerats på ett sådant sätt att dess potential kan ändras beroende av strömmen I . I återledaren finns oönskad resistans och induktans, här benämnda L_g respektive R_g . Dessa komponenter uppkommer av jordledarens utformning och kallas parasitiska. Strömmen kan skapa ett spänningsfall över dessa parasitiska komponenter så potentialen i GND_ADC ändras (Zumbahlen, 2011). Det vore istället önskvärt att GND_ADC placeras enligt Figur 5.4 t.h. för att uppnå stjärnjordning och på så sätt eliminera dessa spänningsfall.

Zumbahlen (2011) menar att det är svårt att uppnå ideal stjärnjordning i praktiken. Han föreslår att man kan komma närmre en jordning som liknar stjärnjordning genom att lägga slitsar i jordplanet. Slitsen är en yta i jordplanet som inte är belagd med koppar och därför inte ledande. På så sätt kan man i större grad undvika att virvelströmmar leds på de ställen där konstant elektrisk potential är speciellt önskvärd. I kretskortet som designades användes sådana slitsar med målet att komma närmre ett stjärnjordat system.

5.3.3 Val av spänningsreferens

Spänningsreferensen V_{ref} är direkt proportionell mot A/D omvandlarens resultat ADC_{out} och den uppmätta inspänningen V_{in} så att

$$\frac{V_{in}}{V_{ref}} \sim ADC_{out} \quad (5.7)$$

Eftersom spänningsreferensen är okänd under mätningar, måste ett konstant nominellt värde antas för V_{ref} . Om det faktiska värdet på V_{ref} sedan varierar på ett sätt som inte går att kompensera för i efterbehandling av data eller liknande, introduceras ett mätfel proportionellt mot denna variation.

Det finns en mängd integrerade kretsar som används som spänningsreferenser. Dess referensspänning varierar främst med temperatur och över lång tid. Dessutom finns ett initialfel, där referensspänningen varierar mot kretsens specificerade nominella spänning. Om initialfelet är känt kan det enkelt kalibreras bort. De termiska variationerna är dels mer eller mindre olinjärt beroende av temperatur och inverkar på utspänningen med viss hysteres. De termiska variationer som inte är beroende av hysteres specificeras ofta som linjärt beroende mot temperatur med enheten PPM/°C. (Whelan, 2009)

I processorn kan olika spänningsreferenser väljas genom inställningar i processorns mjukvara. Mjukvaran ändrar då tillståndet för en analog multiplexer. Det finns tre valbara möjligheter; en referens på 1,1 V kallad *Internal bandgap reference*, användning av processorns spänningsmatning och möjligheten att koppla in en extern referens. Den externa referensen kopplas då till en ingång på processorn kallas A_{ref} . (Atmel, 2014)

Den interna spänningsreferensen på 1,1 V har en relativt låg specificerad termisk variation på 100 PPM/°C men valdes bort med avseende på den skulle ge ett lägre signal-till-brusförhållande än om en referens närmre 5 V skulle användas. Det är också möjligt att använda processorns matningsspänning som regleras av en IC krets *MC33269D-5.0* på utvecklingskortet Arduino UNO R3. Dess datablad (Onsemi, 2013) visade dock att dess utspänning varierar så mycket som 2 % och uteslöt därför. Dessutom kan processorns ojämna strömtillförsel generera ytterligare störningar.

En toleransnivå på att spänningen maximalt skulle få variera 1 % i intervallet 5-50 °C sattes som krav. Denna tolerans antogs vara ett acceptabelt mätfel i ett temperaturområde som kretsen skulle arbeta i under mätperioden. Högre nivå på spänningsreferensen ger ett högre signal-till-brusförhållande även för spänningsreferensen. Därför önskades en utspänning på spänningsreferensen så nära A/D omvandlarens maximala referensspänning 5 V som möjligt.

För strömmätningarna användes en IC krets *MCP1541* från *Microchip* som uppfyllde ställda krav och önskemål. Dess referensspänning är 4,096 V och klarar de termiska variationerna med marginal då dess utspänning är specificerad till att variera 50 PPM/°C.

5.4 Strömmätning

Strömmen beräknas utifrån det uppmätta spänningsfallet över ett seriemotstånd. Om detta spänningsfall tecknas V_{shunt} och motståndets nominella resistans R_{shunt} kan strömmen I beräknas genom ohms lag som

$$I = V_{shunt}/R_{shunt} \quad (5.8)$$

Mätning av ström med seriemotstånd är en vanlig metod för strömmar under 100 A och är oftast mer noggrann än andra mätmetoder som exempelvis sensorer som utnyttjar halleffekt. (Semig et.al, 2012)

5.4.1 Val av mätmotstånd

På marknaden finns en mängd precisionsresistorer avsedda för främst strömmätning. Generellt är dess resistans positivt varierande med temperatur (PTC-karaktäristik). Då det är svårt att veta vilken temperatur motståndet har är det önskvärt att minimera dessa varianser eftersom de introducerar ett mätfel. Ur det perspektivet är det önskvärt att minimera resistansen så att den termiska effekten P_{term} som utvecklas över motståndet enligt

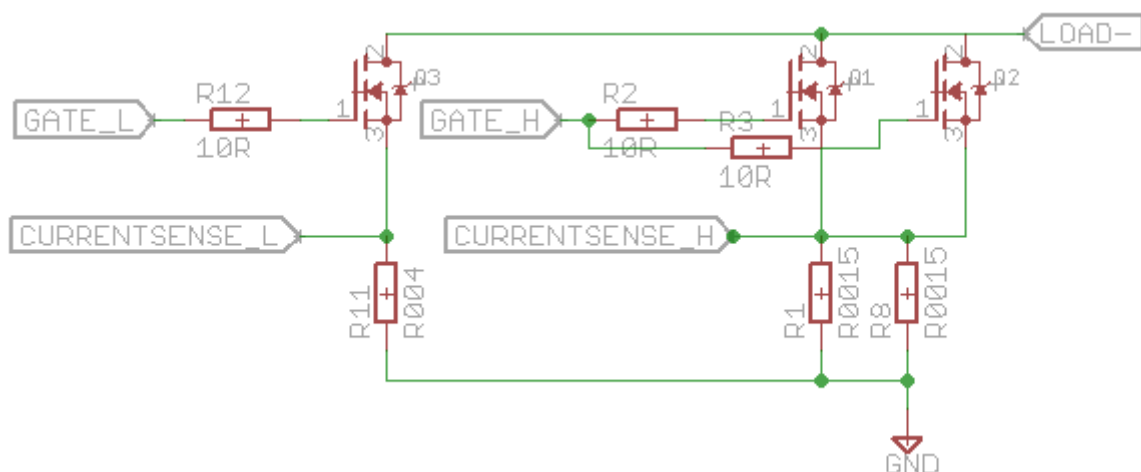
$$P_{term} = R_{shunt}I^2 \quad (5.9)$$

minimeras. Minimering av R_{shunt} innebär å andra sidan att utsignalen

$$V_{shunt} = R_{shunt}I \quad (5.10)$$

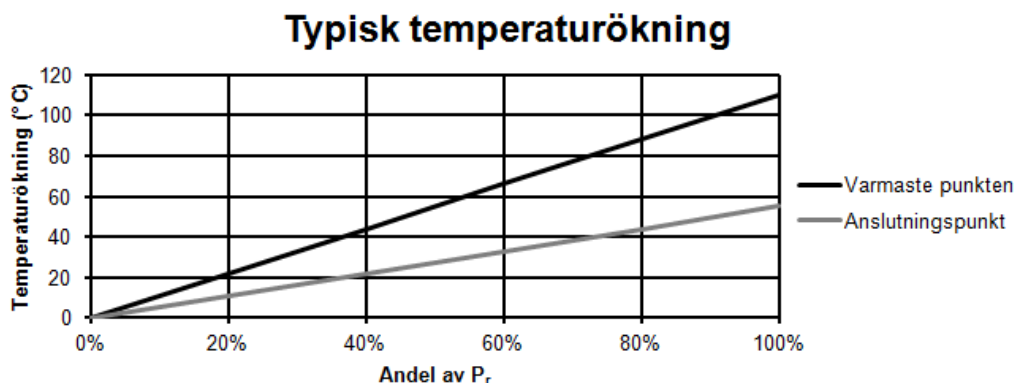
blir lägre och så även dess relation till störningar som har konstant amplitud. I detta fall togs främst hänsyn till den analoga förstärkningens offsetfel, som behandlas vidare under kapitel 5.4.2 Analog förstärkning. Slumpmässigt och högfrekvent brus antogs kunna filtreras bort.

Preliminära uppskattningar visade att strömmen skulle kunna variera mellan 0 och 60 A i turbinens tänkta arbetsområde. För att tillgodose kraven på låg effektutveckling och hög amplitud på utsignalen för alla mätområden delades mätområdet upp i två delar med två olika mätmotstånd. Därför delades transistorbryggan upp i två delar. Detta visas i Figur 5.5. Mer om transistorerna och dess konfiguration finns att läsa om i kapitel 5.6 Transistorer och likriktare.



Figur 5.5. Mätresistorernas konfiguration schematiskt.

I det lägre området valdes en resistor *LRMAT2512-R004FT4* från *TT electronics* med den ytmonterade kapseln 2512 och nominella resistansen 4 mohm. Denna användes för strömmar från 0,3 upp till 6 A. Den maximala strömmen bestämdes genom att specificera en maximal tillåten temperaturvariation över motståndet på 1 % för självupphettning. Detta beräknades genom att det i databladet stod specificerat hur mycket resistansen varierade i PPM/°C och hur mycket temperaturen skulle variera i förhållande till procent av motståndets märkeffekt P_T . Ett diagram som illustrerar detta återges i Figur 5.6.



Figur 5.6. Diagram över självupphettning av mätmotståndet *LRMAT2512-R004FT*.

Det påpekas i databladet att effektutvecklingen i anslutande ledare antas försumbar. För att uppnå detta gjordes anslutande ledare så korta som möjligt och täcktes vid den manuella lödningen med ett lager lödtenn på ca 1 mm. Inga mätningar eller beräkningar gjordes dock för att verifiera att effektutvecklingen blev försumbar. Minimiströmmen bestämdes genom att mätförstärkarens offsetfel maximalt skulle bli 0,5 %.

För mätning av strömmar 6-60 A valdes två parallella motstånd *TLR3A30ER00075FTDG* från *TE connectivity* på vardera 0,75 mohm. Dessa valdes enligt samma kriterier som motståndet för det lägre området. Skillnaden var att inget förhållande mellan effekt och självupphettning specificerades i databladet. Då motstånden liknade 4 mohm resistorn för lågströmsmätningen antogs att samma samband mellan självupphettning och termisk effekt skulle gälla för även för de motstånd som valts för högströmsmätningen. Två parallellkopplade motstånd användes för att minska effektutvecklingen över dessa.

5.4.2 Analog förstärkning

Spänningen som skall mätas vid strömmätning är ofta låg, i detta fall från ca 1 mV. Här uppstår två problem. Dels att det tidigare nämnda signal-till-brusförhållandet blir lågt. Dels påverkas A/D omvandlarens upplösning på ett sådant sätt att avrundningsfel blir stora. På ATmega328 har A/D omvandlaren 11 bitars upplösning vilket innebär att dess utvärde varierar i 1023 diskreta steg ADC_{vals} mellan jordreferensen och sin referensspänning V_{ref} . Denna mätning fick därför upplösningen ADC_{res}

$$ADC_{res} = \frac{V_{ref}}{ADC_{vals}} = \frac{4,096V}{1023} \approx 4 [mV] \quad (5.11)$$

Detta är oacceptabelt i förhållande till de spänningar på runt 1 mV som skulle mätas. En vanlig lösning på detta problem är att skapa en analog förstärkning med hjälp av en operationsförstärkare. En operationsförstärkare introducerar flera fel i sig. Det mest dominerande felet är ett så kallat offsetfel. Detta beter sig som om spänningen på förstärkarens ingång vore större eller lägre än den egentligen är, med amplituden V_{offset} . (Semig et. al, 2012)

Ett procentuellt fel $Offset_{err\%}$ introduceras då i mätningen av spänningen V_{shunt} enligt

$$Offset_{err\%} = 100 \times \frac{V_{offset}}{V_{shunt}} \quad (5.12)$$

Då det som tidigare nämnts vore önskvärt med ett mätmotstånd med så låg resistans som möjligt och därmed spänningsnivå V_{shunt} blir det också önskvärt med att ha en förstärkare med så låg offsetspänning som möjligt för ett givet specificerat offsetfel.

Det vore också önskvärt med en förstärkare som kunde ha samma jordpotential som kretsens jordplan. Eftersom strömätningen bestämdes till att göras på kretsens lågsida, skulle förstärkaren behöva arbeta med spänningsnivåer nära sin egen jordpotential på sina ingångar. Detta kallas *rail-to-rail* ingång.

Operationsförstärkaren *MCP6V01* från Microchip valdes. Denna har rail-to-rail-ingångar och en offsetspänning på 3μV. Denna nivå av offsetspänning verkade vara en av de lägsta på marknaden vid beställningstillfället.

Ett annat fel som en operationsförstärkare introducerar är ett så kallat *common mode error*. Detta är proportionellt mot den genomsnittliga spänningen på operationsförstärkarens ingångar och anges ofta som förhållandet V_{err}/V_{common} . Då V_{common} bara skulle nå som högst ca 30mV för alla mätningar, blev detta fel försumbart för alla operationsförstärkare som övervägdes. Mätningen för hög- respektive lågström förstärktes med varsin MCP6V01 förstärkare.

5.4.3 Filtrering

Då strömmen mäts på kretsens lågsida kommer den att pulsera i förhållande till transistorernas av- och påslag, förutsatt att pulskvoten D ligger i intervallet

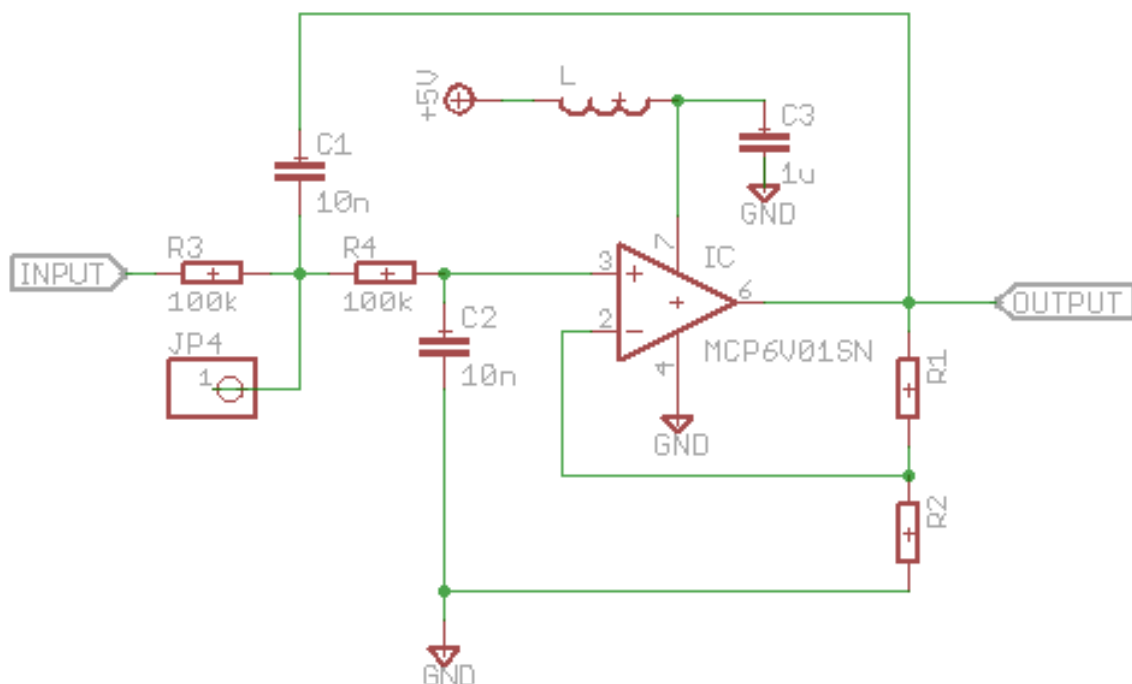
$$0 \% < D < 100 \%$$

För att mäta kraftverkets effekt, som är beroende av utströmmen I är endast medelströmmen över en period av pulståget intressant. Därför används analog lågpasfiltrering och digital medelvärdesbildning för att mäta strömmens medelvärde. En förhoppning med den digitala

lågpassfiltreringen var att dessutom minimera inverkan av omgivande högfrekvent elektriskt brus på mätningarna.

För det analoga filtret valdes initialt ett filter av typen *Sallen-Key*. Då detta konfigureras som ett lågpassfilter är det matematiskt som ett *Butterworth-filter* av andra ordningen i det ideala fallet. Detta filter kunde dessutom byggas runt den operationsförstärkare som redan valts.

Styrande designparametrar var minimal översväng i tidsdomänen och en stigtid på maximalt 10 ms vid ett stegsvar. Detta kunde uppnås genom att välja filtrets resistorer respektive kondensatorer till 100 kohm respektive 10 nF. Filtret, som användes på flera ställen, avbildas generiskt i Figur 5.7. På kretsens högströmsida satt ett likadant filter, men med annan förstärkning av likspänningsnivå.



Figur 5.7. Generisk schematisk representation av de analoga filtrens grunddesign.

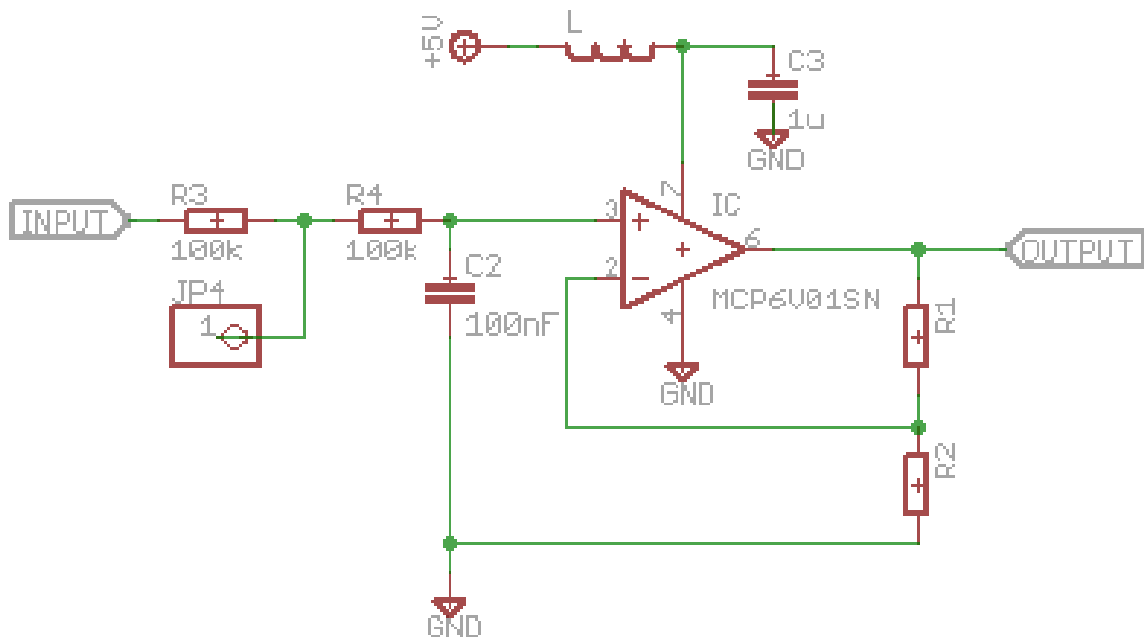
Resistorerna $R1$ och $R2$ utgör en förstärkning *Gain* av filtrets likspänningsnivå så att

$$Gain = 1 + \frac{R_1}{R_2} \quad (5.13)$$

Denna anpassades så att den nominellt högsta likspänningsnivån vid filtrets ingång skulle ge en likspänningsnivå motsvarande ca 80 % av A/D omvandlarens referensspänning. En lägre faktor än 100 % valdes för att ge utrymme åt visst rippel.

Vid provning av filtret i praktiken visade det sig dock att självsvängning vid utgången uppstod. Texas Instrument (1999) skriver i en publikation *Analyzis of the Sallen-Key Architecture* att ett icke-idealt sådant filter kan börja bete sig som ett högpasfilter vid höga frekvenser p.g.a. parasitisk induktans vid filtrets utgång. Denna självsvängning eliminerades i detta fall genom att avlägsna kondensatorn $C1$. Då filtret nu blev ett lågpassfilter av första ordningen med statisk förstärkning, byttes kondensatorn $C2$ mot en kondensator på 100nF för att bibehålla en hög branthet på filtret, mot avkall på en längre stigtid. Detta filter avbildas

schematiskt i Figur 5.8. Skillnaden mellan låg- och högströmsmätningens filter var valen av $R1$ och $R2$.

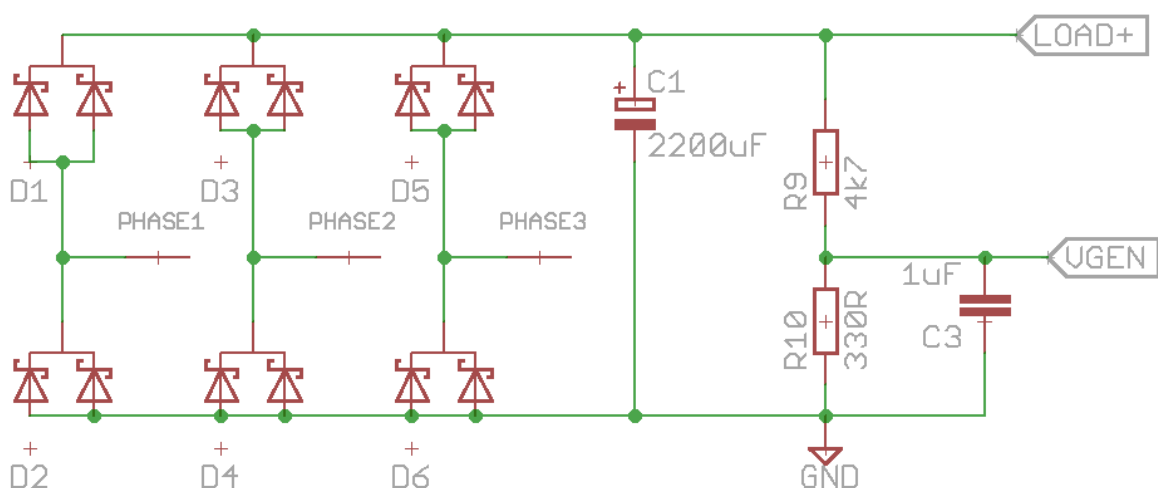


Figur 5.8. Generisk schematisk bild över de analoga filter som användes i praktiken.

Digitalt gjordes filtrering genom att anta normalfördelade fluktuationer och därefter medelvärdesbilda över 100 samplingsar.

5.5 Mätning av generatorns utspänning

Denna mätning gjordes direkt på likriktarbryggans utgång med hjälp av en spänningsdelning som lågpasfilterades med hjälp av en keramisk kondensator, se Figur 5.9.



Figur 5.9. Likriktarbryggan och spänningsdelare för spänningsmätning.

Generatorns anslutningskablar är kopplade till *PHASE1*, *PHASE2* och *PHASE3* i schemat. Utgången *VGEN* är kopplad direkt till en av ingångarna till utvecklingskortets A/D omvandlare. Den tidigare beskrivna resistiva lasten är kopplad till *LOAD +*.

Resistorn R_9 valdes till att vara lägre än 10 kohm då Atmel (2014) i sitt datablad till ATmega328 rekommenderar en maximal ingångsimpedans på detta till A/D omvandlaren.

Det kan visas analytiskt att filtret blir ett första ordningens lågpasfilter med tidskonstanten

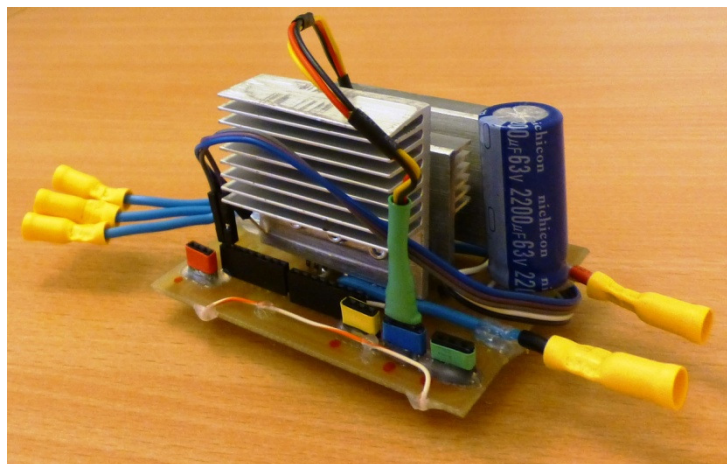
$$\tau = \frac{R_9 R_{10}}{R_9 + R_{10}} C_3 \quad (5.14)$$

Kondensatorn C_3 valdes för att ge filtret en tidskonstant lägre än 10 ms.

5.6 Transistorer och likriktare

Som strömställare i kretsen valdes *MOSFET-transistorer*. Några viktiga egenskaper hos MOSFET- transistorer är att de kräver låg ström för sin drivning och att flera transistorer kan parallellkopplas för att minska effektförluster (Dodge, 2006).

Transistorer av MOSFET-typ levereras i hål- såväl som ytmonterad kapsel. Till projektet valdes hålmonterade transistorer i kapsel *TO-220* av typen *AUIRFB3806*. Detta motiverat av att preliminära beräkningar visade att kretskortet skulle nå en så hög temperatur med ytmonterade transistorer att det skulle kunna skada omgivande temperaturkänsliga komponenter. En preliminär beräkning av detta gjordes genom data från en application note av *International Rectifier* (2012) som behandlar termisk överföring för ytmonterade transistorer.



Figur 5.10. Det designade kretskortet med kylflänsar monterade.

För den i avsnitt 5.4 Strömmätning tidigare beskrivna högströmsmätningen parallellkopplades två sådana transistorer för högre strömtålighet. Enligt standardiserade beräkningsformler som beskrivs av t.ex. Dodge (2006) dimensionerades transistorerna att hålla för minst 60 A. För detta krävdes användning av kylfläns. Kylflänsarna syns monterade i Figur 5.10.

Till likriktaren valdes sex schottkydioder av typen *MBR20L100CT*. Dessa valdes främst med avseende på tillgänglig budget då de har ett i sammanhanget högt spänningsfall. Dessa levererades också i en *TO-220* kapsel och kylflänsar monterades på dessa.

Likriktaren glättas med en eftermonterad kondensator 2200 μF som antas vara överdimensionerad.

Parallellt över transistorerna monterades en transientskyddsdiod med den nominella spänningen 50 V för att skydda för spänningstransienter som antogs kunna uppkomma av induktans i tillkopplade ledare.

5.6.1 Inverkan av förluster i likriktarbrygga

Då generatoren är av trefastyp är en trefaslikriktare av diodtyp placerad på kortet. En nackdel med denna är att den har ett relativt stort spänningsfall över sig och därför ger höga förluster vid låga spänningar. Nedan visas analytiskt hur stora dessa förluster är men att de inte påverkar uppskattningen av turbinens mekaniska effekt om turbinens vinkelhastighet mäts. Strömmen genom varje diod. I_{diode} är

$$I_{diode} = \frac{I_{DC,out}}{3} \quad (5.15)$$

där $I_{DC,out}$ är den likriktade utströmmen (Pejovic, 2007). Förlusterna över hela bryggan blir då

$$P_{loss,diode} = 6V_{diode}I_{diode} = 6V_{diode}\frac{I_{DC,out}}{3} = 2V_{diode}I_{DC,out} \quad (5.16)$$

Om diodförlusterna beskrivs som andelen av elektrisk uteffekt fås

$$P_{loss,diode,\%} = 100 \frac{P_{loss,diode}}{P_{out}} = 100 \frac{2V_{diode}I_{DC,out}}{V_{out}I_{DC,out}} = 100 \frac{2V_{diode}}{V_{out}}, 2V_{diode} < V_{out} \quad (5.17)$$

där V_{out} är generatorns huvudspänning (spänningen mellan två faser). Denna spänning måste vara dubbelt så hög som spänningsfallet över två dioder för att börja leda och effektförlusterna är alltså nästan 100 % över likriktarbryggan när dioderna precis börjar leda. Det här spelar dock ingen roll för mätningen om vinkelhastigheten hos turbinen mäts. Trots att spänningsfallen över likriktarbryggan är stora, är fortfarande vridmomentet hos turbinen proportionellt mot strömmen på samma sätt. Turbineffekten kan då uppskattas genom

$$P_{turbine} = T_{turbine}\omega = \frac{I_{DC,out}}{k}\omega \quad (5.18)$$

5.7 Digitala ingångar

På kortet finns ingångar till vind- och varvtalsmätaren samt två temperatursensorer av typen DS18B20. Dessa är fysiskt utformade som stiftlistor med tre ben var och alla använder digitala pulser. Två av benen är använda för spänningsmatning och det återstående för ingående signal. En serieresistor på 50 Ω sattes i serie med spänningsmatningen till varje givare för att förhindra fullständig kortslutning vid kabelbrott eller liknande.

Initialt användes lågpasfilter av RC typ i anslutning till de digitala ingångarna för vind- och varvtalsmätaren. Dessa var anpassade så att filtret endast skulle störa totalt 1/10 av den allra kortaste pulslängden. I praktiken gjordes dock en modifikation där dessa mätare flyttades till ingångar med möjlighet till hårdvarustyrda avbrott. Därför avlägsnades de analoga filtren.

5.8 Externa mätningar

Förutom mätning av spänning och ström som sker internt i elektronikenheten mäts vindhastighet, turbinvarvtal och temperaturer av externa sensorer. Sensorernas inkoppling beskrivs i kapitel 5.7 Digitala ingångar.

5.8.1 Varvtalsmätning

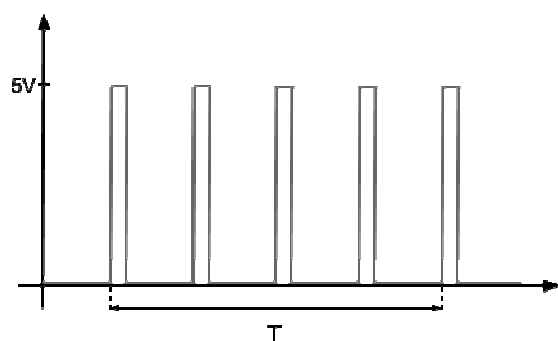
För turbinens varvtalsmätning används en i generatoren integrerad sensor, se avsnitt 4 Generator. I generatorns stator finns en halleffektsensor medan det i rotorn finns ett antal magneter. När en magnet roterar över sensorn ges en spänningshöjning. Då generatoren avger 46 sådana pulser på ett varv kan rotationstiden T bestämmas. Rotationshastigheten RPM [varv/min] beräknas enligt

$$RPM = \frac{1}{T} \times 60 \quad (5.19)$$

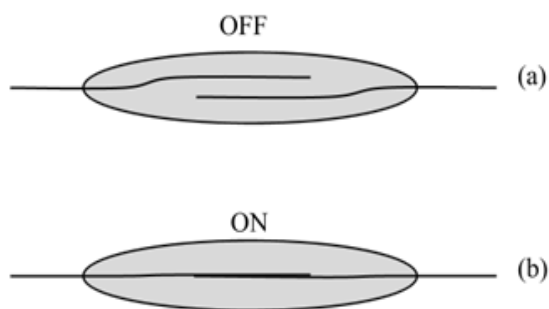
Sensorsignalen avläses av mikrokontrollen som också genomför ovanstående beräkning.

5.8.2 Vindmätning

Vindmätningen baseras på samma princip som varvtalsmätningen där vindgivarens stator har en sensor medan rotorn innehåller fyra magneter, det vill säga att då signalen gått från låg till hög fyra gånger har rotorn roterat ett varv, se Figur 5.12. Trots att sensorn ger liknande signal som för varvtalsmätaren är den av annan sort, en mekanisk reed-switch. Reed-switchen, se Figur 5.11, är normalt öppen och leder inte ström men då en magnet roterar över reed-switchen stängs den. Genom att mäta när switchen leder ström eller inte kan rotorns varvtal fastställas enligt ekvation 5.19.



Figur 5.12. Vindgivarens signal med periodtiden T för ett rotorvarv markerad.



Figur 5.11. Reed-switchens princip. I läge (a), normalt läge, är switchen öppen och leder inte ström. I läge (b) är en magnet ovanför och switchen stängs. I detta läge leder reed-switchen ström.

Vindmätarens mekaniska grund består av en vindgivare av typen skålanemometer, se Figur 5.13, som ursprungligen är avsedd att användas med en tillhörande väderstation. Då vindgivaren används utan väderstationen krävdes en kalibrering av vindgivaren för korrekt vindhastighetsmätning, se Appendix B – Kalibrering av vindsensor.



Figur 5.13. Vindgivaren som användes för att mäta vindhastigheten.

Kalibreringen resulterade i följande uttryck för vindhastigheten U , där RPM [varv/min] är vindgivarens rotationshastighet

$$U = 0,021127 \times RPM + 0,1217 \quad (5.20)$$

5.8.3 Temperaturmätning

En digital termometer av typ *DS18B20* används för att mäta utomhustemperaturen och likadant för temperaturen i elektronikenheten. Termometerns mätområde sträcker sig från $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ till $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ med en given maximal mätosäkerhet på $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Maxim, 2012). Givaren avläses med ett kommunikationsprotokoll kallat *OneWire*.

6 Loggning och behandling av mätdata

För att tester skulle kunna utföras på kraftverket utan ständig bevakning loggades mätvärden på ett minneskort kopplat till elektronikenheten. Detta medgav också möjligheten till långa mätserier över tid och möjligheten att göra olika medelvärdesbildningar för att minimera slumpmässiga mätfel. Mätdata låg till grund för utvärdering av vindkraftverkets och regleringens effektivitet.

Loggningen sker genom radvisa skrivningar till ett textdokument med ett valt tidsintervall. Före skrivningen av strömmen och spänningen görs en medelvärdesbildning internt i mikrokontrollen över 100 samplade värden. Skrivningen av värdena från temperaturgivaren, vindmätaren och varvtalsräknaren sker utan medelvärdesbildning i mikrokontrollern. Förutom dessa så noteras också tidpunkten i millisekunder från att loggningen startades och pulskvoten hos pulståget för den elektroniska strömställaren. På så vis kan regleralgoritmens styrning överblickas senare i beräkningsprogrammet.

Programmet som analyserar och visualiserar data är skrivet i MATLAB. Vid behandling av mätdata är det viktigt att hänsyn tas till så kallade utliggare (outliers). Dessa är ett fåtal extremvärden som avviker mycket till de andra värdena och kan i mätdata indikera på störning eller felmätningar. Då fel eller orimliga extremvärden misstänks är det inte lämpligt att använda sig av medelvärde (Körner och Wahlgren, 2005). Därför kontrolleras först de externa mätningarna mot sådana i fördefinierade filter som avlägsnar dessa. Mätvärdena för ström och spänning ansågs inte vara i behov av efterbehandling i form av filtrering.

För att utvärdera vindkraftverkets verkningsgrad jämförs den uppmätta generatoreffekten med den potentiella effekten i vinden. Denna effekt beräknas enligt

$$P_{vind} = \frac{\rho U^3 A}{2} \quad (6.1)$$

där P_{vind} är effekten, ρ är luftens densitet, U är vindhastigheten som mäts med vindmätaren och A är den projicerade turbinarean (Hau, 2006).

Mätning av vindkraftverkets omgivande temperatur används för beräkning av luftens densitet. Densiteten för varje uppmätt temperatur har sedan interpolerats i beräkningsprogrammet från tabellvärden för torr luft vid 1 bar (Mörstedt och Hellsten, 2010, s. 77). Förutom temperaturen så inverkar trycket och luftfuktigheten på uppskattningen av luftens densitet. Enligt allmänna gaslagen, med antagandet att luft är en ideal gas, är lufttrycket linjärt mot densiteten. Allmänna gaslagen uttryckt som en funktion mellan densiteten och trycket kan skrivas som

$$\rho = \frac{p}{R_s T} \quad (6.2)$$

där ρ är luftens densitet, p är lufttrycket, R_s är specifika gaskonstanten för torr luft och T är luftens temperatur i Kelvin. Detta styrker användningen av tabellen. Luftfuktighetens inverkan har kring de uppmätta temperaturerna mellan 5 och 20 °C har antagits försumbar då denna är marginell vid dessa temperaturer. Antagandet baseras på Mollierdigram (Mörstedt och Hellsten, 2010, s. 95).

För att uppskatta turbinens verkningsgrad kan effekten som potentiellt kan utvinnas ur vinden uppskattats genom att mäta vindhastigheten och ställa denna i relation till beräknad axeleffekt i turbinen. Axeleffekten kan beräknas genom mätningarna av generatorns varvtal och utgående elektriska effekt enligt

$$P_t = k_t I \omega \quad (6.3)$$

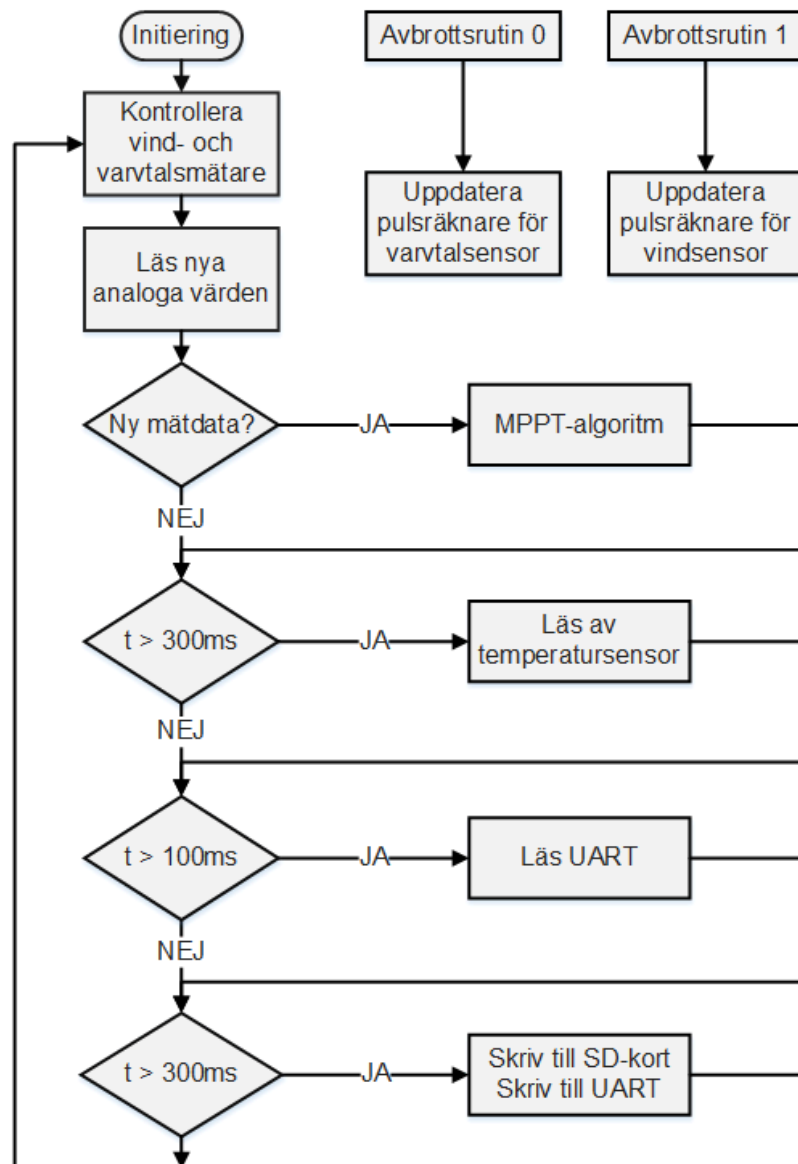
Detta kan bara göras då systemet befinner sig i stabilt jämviktstillstånd (se avsnitt 7 Reglering av kraftverket) och därför har just dessa värden på axelns effekt endast hämtats från mätdata då vindhastigheten och rotationshastigheten antagits hållit sig konstanta. Antaganden om rådande jämviktstillstånd gjordes när både vindhastighetens och varvtalets standardavvikelse var mindre än 1 m/s respektive 0,5 rad/s under tidsintervallet fem sekunder.

6.1 Mjukvara

Det utvecklades mjukvara dels till styrning av systemets hårdvara, dels för övervakning.

6.1.1 Huvudprogrammet

Mjukvaran som skötte loggning och reglering skrevs i Arduinos programmeringsspråk vilket kan sägas vara en variant av C++. Detta program beskrivs schematiskt nedan i Figur 6.1.



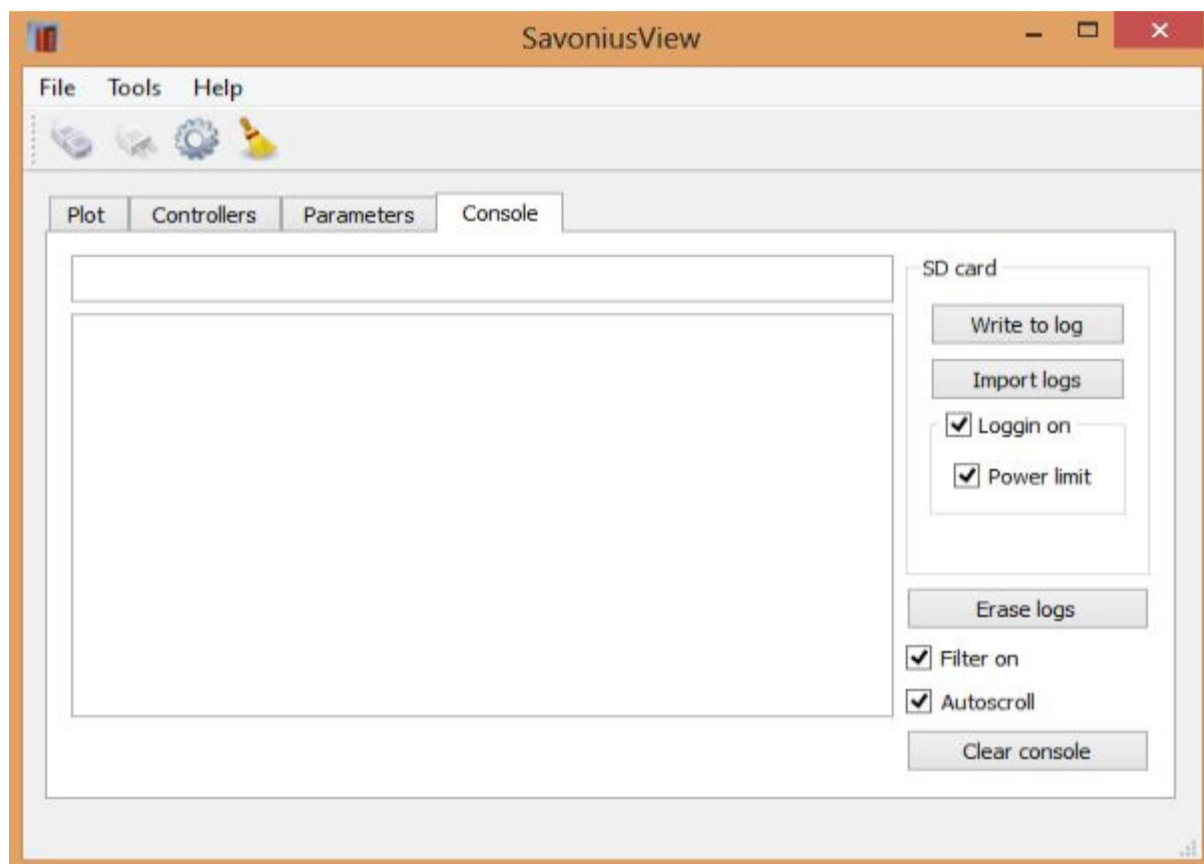
Figur 6.1. Schematisk bild av mjukvaran som loggar och reglerar, med de två avbrottsrutinerna.

I loopen avläses sensorerna och vindhastighet respektive varvtal bestäms. Om värdena skiljer sig från föregående loop används Maximum Power Point-algoritmen för att beräknas ny

referenssignal. Många av mätningarna utförs endast vid ett givet tidsintervall. Temperatur-sensorerna avläses mer sällan än övriga sensorer eftersom de tar lång tid att läsa av. Loggen uppdateras med ett intervall på nominellt 300 ms. Registrering av pulser från vind- och varvtalsmätare sker genom avbrottsrutin i hårdvaran eftersom dessa är så frekventa att pulser annars kan missas.

6.1.2 Grafiskt användargränssnitt

För att enklare kunna övervaka kraftverket utvecklades ett grafiskt användargränssnitt som kallas SavoniusView, se Figur 6.2. I detta kunde plottning av realtid av uppmätta värden göras under drift. Vissa inställningar i huvudprogrammet kunde också ändras via ett seriellt kommunikationsprotokoll som utvecklades. Ett seriellt *Bluetooth-modem* användes vilket gjorde det möjligt att göra detta trådlöst. Programvaran utvecklades i *Qt C++*.



Figur 6.2. Högnivågränssnittet SavoniusView som utvecklades.

7 Reglering av kraftverket

Ett savoniusvindkraftverks verkningsgrad är starkt beroende av förhållandet mellan hastigheten hos omgivande ostörd vind och turbinens periferihastighet. Målet med de olika reglerprinciper som provats har varit att reglera detta förhållande på ett sådant sätt att högsta verkningsgrad nås för alla arbetspunkter. Förhållandet mellan turbinens periferihastighet och vindens hastighet U kallas löptal, se ekvation 7.1 och tecknas som λ (Wortman, 1983). Turbinens periferihastighet beräknas genom att multiplicera dess vinkelhastighet ω med dess radie r .

$$\lambda = \frac{\omega r}{U}, \quad U > 0 \quad (7.1)$$

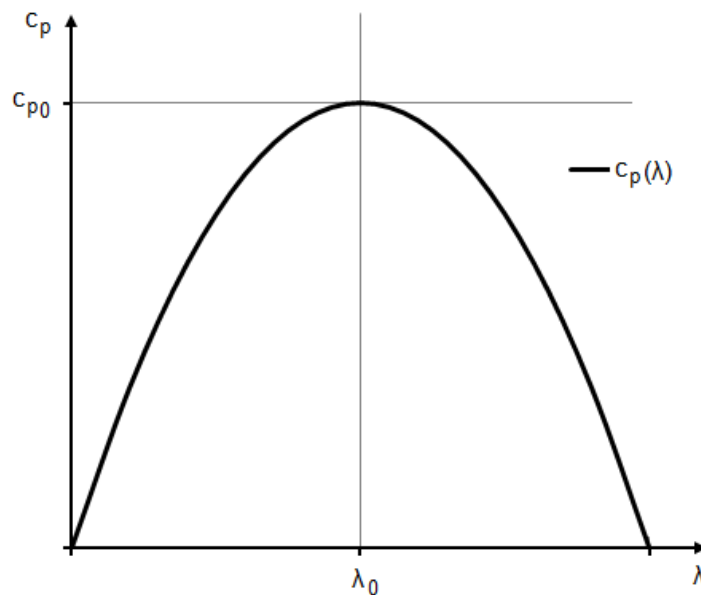
Vindeffekten P_{vind} är ett uttryck för den strömmande luftens kinetiska energi som passerar en area A , i detta fall turbinens projiceringsarea (Hau, 2006). Mängden energi beror på luftens densitet ρ och dess hastighet U . Uttrycket definieras som

$$P_{vind} = \frac{1}{2} \rho U^3 A \quad (7.2)$$

Vid en överföring utan förluster vore vindkraftverkets producerade effekt densamma som vindens effekt, men detta är i praktiken omöjligt. Fysikern Albert Betz (1919) visade analytiskt att en vindturbin maximalt kan utvinna 16/27 eller 59,3 % av vindens energi. Detta är att beakta vid validering av vindturbiner. Hau (2006) beskriver förhållandet mellan den mekaniska effekten och vindeffekten som vindturbinens verkningsgrad C_p . Enligt samma princip redovisar Wortman (1983) ett uttryck för verkningsgraden för en vindturbin av typ Savonius enligt

$$C_p = \frac{2C_{p0}}{\lambda_0} \lambda \left(1 - \frac{\lambda}{2\lambda_0}\right), \quad C_p \geq 0, \quad \lambda \geq 0 \quad (7.3)$$

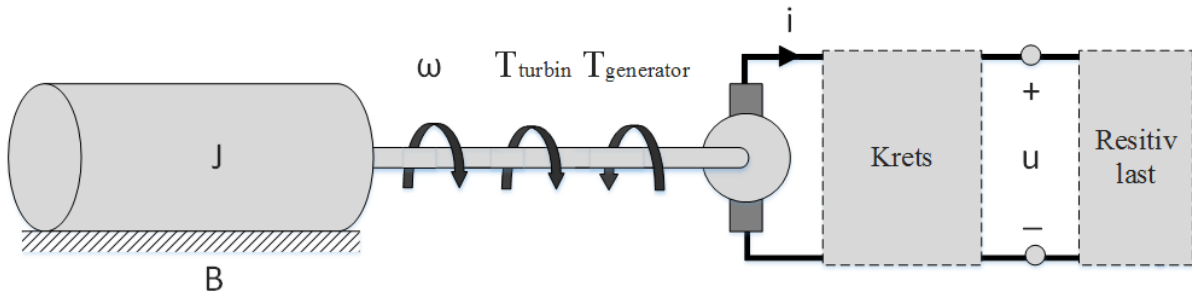
Genom ekvation 7.3 kan en parabelformad verkningsgradskurva tas fram vars storlek bestäms av de två konstanterna C_{p0} , systemets högsta verkningsgrad, och λ_0 som är det aktuella löptalet då denna högsta verkningsgrad nås. Detta bildar en kurva som illustreras i Figur 7.1.



Figur 7.1. Diagram över Savonius-turbinens verkningsgrad som funktion av löptalet med den maximala verkningsgraden och önskade löptalet markerat.

7.1 Matematisk modell av systemet

För att få bättre kvalitativ förståelse över systemets dynamiska beteende utnyttjades en approximativ matematisk modell. Här redogörs för hur denna modell togs fram. Ett antagande av stel axel som sammanlänkar turbin och generator görs för att förenkla modellen. Detta är möjligt då axeln är överdimensionerad och därmed inte påverkas nämnvärt av dess belastning. Det roterande systemet antas influeras av turbinens och generatorns tröghetsmoment och viskös friktion (Lennartsson, 2011), se schematisk bild av systemet i Figur 7.2. I detta fall antas den ansatta viskösa friktionen främst vara lagerfriktion i de lager turbinaxeln är monterad i. Denna friktion antas vara proportionell mot en konstant B och rotorns vinkelhastighet.



Figur 7.2. Schematisk bild av systemet med axelns rotationshastighet ω , turbinens moment T_{turbin} och generatorns moment $T_{generator}$ samt ström i och utspänning u markerat.

Balansekvationen för roterande system med styv axel kan uttryckas med hjälp av Newtons lag för roterande system, se ekvation 7.4 (Lennartsson, 2011).

$$\left[\begin{array}{c} \text{Ändring av rörelsemängdsmoment} \\ \text{per tidsenhet} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Drivande} \\ \text{moment} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Belastande} \\ \text{moment} \end{array} \right] \quad (7.4)$$

I vindkraftverkets fall är det drivande momentet turbinens moment, T_{turbin} , som i sin tur är driven av vindkraft. Det totala belastande momentet består av summan av den viskösa friktionen, $B\omega$, samt generatorns bromsande moment, $T_{generator}$. Då följer att systemets balansekvation kan skrivas enligt ekvation 7.5 (Lennartsson, 2011). Systemets tröghetsmoment betecknas J .

$$J\dot{\omega} = T_{turbin} - B\omega - T_{generator} \quad (7.5)$$

Enligt ekvation 4.5 kan generatorns bromsande moment skrivas som en funktion av strömmen i , där k_t är generatorns momentkonstant.

$$T_{generator} = k_t I \quad (4.5)$$

Turbinens drivande moment, T_{turbin} , definieras som en funktion av vindhastighet U och rotationshastighet ω , se ekvation 7.6, (Wortman, 1983) där C_p är effektutbytet mellan vindeffekt och turbinens mekaniska effekt, det vill säga turbinens verkningsgrad.

$$T_{turbin} = \frac{C_p \rho U^3 A}{2\omega} \quad (7.6)$$

Det totala uttrycket av systemets balansekvation kan då sammanfattas enligt följande

$$J\dot{\omega} = T_{turbin}(U, \omega) - B\omega - k_t I \quad (7.7)$$

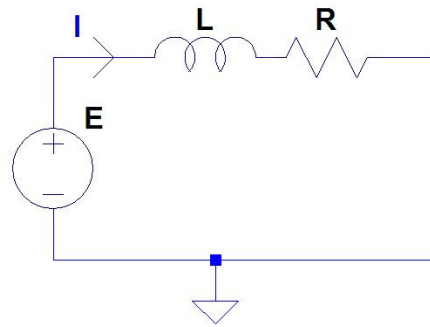
I detta system är vindens hastighet en icke påverkingsbar insignal medan strömmen är en manövrerbar insignal, det vill säga systemets störsignal respektive styrsignal. Det beteende som uppmäts är turbinens rotationshastighet, följaktligen det mekaniska systemets utsignal. Den matematiska modellen kompletteras ej av styrkretsens dynamik då den framtagna modellen ger en för regleringen tillräcklig översikt av systemets beteende. Hur strömmen I styrs i praktiken redogörs för i kapitel 5.1 Styrning av generatorns moment.

7.2 Verkningsgraden för ett oreglerat kraftverk

Savoniusturbinen kan beskrivas med förhållandevis enkla analytiska uttryck (Wortman, 1983). Sådana har använts för att i detta arbete ta fram uttryck för verkningsgraden hos oreglerade savonisturbiner. Dessa resultat skulle kunna användas för att validera och verifiera använda reglermetoder.

7.2.1 Verkningsgrad utan batteri

Uttryck för jämviktstillstånden hos en Savoniusturbin kopplad till en likströmsmaskin härleds. Denna likströmsmaskin avbildas schematiskt i Figur 7.3.



Figur 7.3. Schematisk representation av en likströmsmaskin.

Strömmen I genom generatoren beror av generatorns elektromotoriska kraft E och serieresistans R . Den elektromotoriska kraften beror av generatorns vinkelhastighet. Detta tecknas enligt

$$I = \frac{E}{R} = k_{\omega} \frac{\omega}{R} \quad (7.8)$$

Här har induktans i kretsen försumrats. Om detta kombineras med ekvation 4.5 och konstanten β definieras fås

$$T_{generator} = k_t I = \frac{k_t k_{\omega}}{R} \omega = \beta \omega \quad (7.9)$$

Konstanten B som definierades i 7.1 Matematisk modell av systemet har här approximerats till att vara noll. Detta med motivet att savoniusturbinen arbetar vid ett förhållandevis lågt varvantal med ett högt moment.

Turbinens axeleffekt P_{turbin} beror av momenten på dess axel T_{turbin} och dess vinkelhastighet som är densamma som generatorns om ingen utväxling används. Denna effekt är i sin tur beroende av vindeffekten P_{vind} och turbinens verkningsgrad C_p enligt

$$P_{turbin} = T_{turbin} \omega = P_{vind} C_p \quad (7.10)$$

Om turbinens moment löses ut från ekvation 7.10 och systemet antas vara utan mekaniska förluster, samt att momentjämvikt mellan turbinen och generatoren antas, fås

$$J\dot{\omega} = \frac{P_w C_p}{\omega} - \beta\omega = 0 \quad (7.11)$$

Om ekvation 7.3 för turbinens verkningsgrad C_p sätts in kan turbinens vinkelhastighet och löptal vid jämviktstillstånd lösas ut som

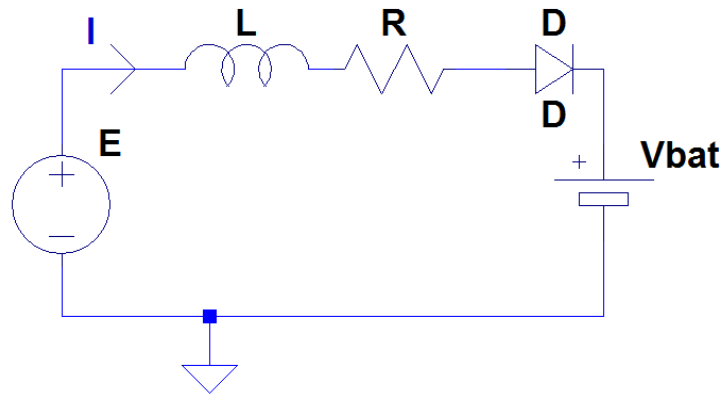
$$\omega = \frac{P_w 2 C_{p0} r \lambda_0 U}{\beta \lambda_0^2 U^2 + P_w C_{p0} r^2} \quad (7.12)$$

$$\lambda = \frac{P_w 2 C_{p0} r^2 \lambda_0}{\beta \lambda_0^2 U^2 + P_w C_{p0} r^2} \quad (7.13)$$

Om uttrycket för sätts in i ekvationen för turbinens verkningsgrad (ekvation 7.3) och alla parametrar utom vindeffekt hålls konstanta kan en verkningsgradskurva för det oreglerade kraftverket i jämviktstillstånd ritas. Då detta uttryck blir en aning klumpigt utelämnas detta sista steg här.

7.2.2 Verkningsgrad med direktladdat batteri

I praktiken är det ofta intressant att använda någon sorts energibuffert för kraftverket. Vanligast för mindre vindkraftverk är att använda ett lämpligt batteri. I detta exempel antas att generatoren är kopplad till ett batteri med spänningen V_{bat} i serie med en ideal diod (inget framspänningsfall) enligt Figur 7.4. Ingen utrustning för batteriövervakning eller liknande inkluderas. Förutsättningarna är i övrigt desamma som i avsnitt 7.2.1 Verkningsgrad utan batteri.



Figur 7.4. Generator med direktladdat batteri.

Strömmen genom generatoren kan nu tecknas

$$I = \frac{V_{bat} - k_\omega \omega}{Z}, \quad V_{bat} < k_\omega \omega \quad (7.14)$$

Så länge $V_{bat} > E$ kommer ingen ström flyta genom generatoren. Momentbalans för turbinen övergår då till

$$J\dot{\omega} = T - 0 = \frac{P_{axel}}{\omega} = \frac{P_{wind} C_p(\lambda)}{\omega} = \frac{C_p(\lambda) \rho A U^3}{2\omega} \quad (7.15)$$

Om turbinen startas från $\omega = 0$ och utsätts för en vind U kommer den accelerera tills generatorns elektromotoriska kraft E är högre än batterispänningen och en ström börjar flyta vid

$$\omega_c > \frac{V_{bat}}{k_\omega} \quad (7.16)$$

På ett liknande sätt som för systemet utan batteri kan en vinkelhastighet ω_s där turbinen bör stabilisera sig runt vid konstant vind tecknas enligt.

$$\omega_s = \frac{\frac{2P_{in}C_{p0}}{\lambda_0 U} + \frac{V_{bat}k_t}{Z}}{\beta + \frac{P_{in}C_{p0}r^2}{\lambda^2 U^2}} \quad (7.17)$$

Ett villkor för att detta ska vara giltigt är att $\omega_s > \omega_c$. Om $\omega_s < \omega_c$ bör turbinen börja retardera så fort ström börjar ledas tills $\omega < \omega_c$. Turbinen accelererar nu återigen tills $\omega > \omega_c$ och dioden börjar leda. Någon slags oscillation, beroende av dynamik hos de elektriska och mekaniska komponenterna bör kunna förväntas här. Ett antagande är att utbytet blir låg runt ω_c . För att få något utbyte av kraftverket måste i sådana fall $\omega > \omega_s > \omega_c$. Detta resultat kan sedan användas för att beräkna verkningsgraden vid insvängt jämviktstillstånd som i avsnitt 7.2.1 Verkningsgrad utan batteri med tillägget att

$$C_p = 0 \text{ då } \omega < \omega_s < \omega_c$$

Inga tester har gjorts för att verifiera detta resultat men det användes vid framtagning av teoretiska verkningsgradskurvor.

7.3 Analytisk bestämning av optimal pulskvot

Ett uttryck som relaterar teoretiskt optimal pulskvot med avseende på maximal uteffekt har tagits fram. Detta uttryck gäller för ett system enligt avsnitt 7.2.1 Verkningsgrad utan batteri. Detta skulle kunna användas för att verifiera och validera regleralgoritmer som provas med avseende på vilken pulskvot de svänger in sig på. Ekvation 7.18 relaterar pulskvoten D mot i denna rapport redan införda variabler enligt

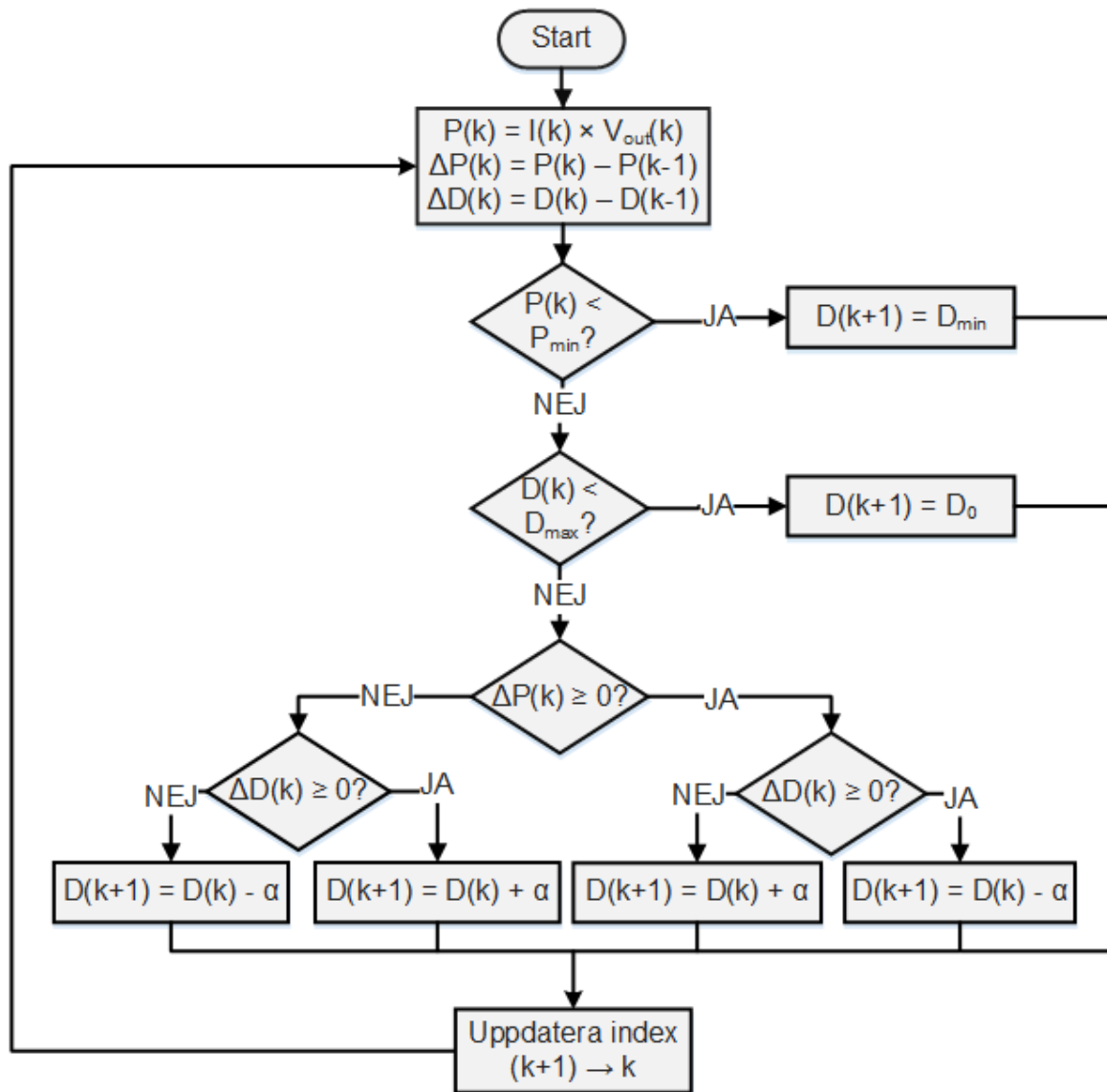
$$D = \frac{kUA r^2 \rho R}{k_t k_\omega} \quad (7.18)$$

Framtagningen av uttrycket redovisas i Appendix C – Optimal pulskvot. Intressant är att pulskvoten teoretiskt beror linjärt av vindhastigheten.

7.4 Maximum Power Point Tracking

Kraftverket reglerades med en s.k. *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) algoritm. En MPPT-algoritm är en iterativ process som bygger på att ständigt söka maximal effekt, vilket i detta fall innebär att söka systemets maximala verkningsgrad. Algoritmen prövar olika parametervärden och utnyttjar mätningar av systemets reaktion för att utreda om aktuellt värde ger positivt utslag. Som visas i Figur 7.1 har verkningsgradens kurva endast ett maximum. Detta gör reglering med MPPT särskilt gynnsam. Vid en verkningsgradskurva med flera lokala maximapunkter eller terrasspunkter skulle åtgärder behöva vidtas för att algoritmen skall fungera. För vindkraftverket är parametern som ändras pulskvoten D för styrelektronikens strömställare. Detta påverkar i sin tur styrparametern Z .

I Figur 7.5 för schematisk beskrivning över algoritmen som implementerades. P är elektrisk uteffekt, I är generatorns utström, V_{out} är generatorns utspänning, D är transistorernas pulskvot samt P_{min} , D_{max} , D_{min} och D_0 är konstanter.



Figur 7.5. Schematisk representation av MPPT-algoritmen som användes.

Generators utström I och utspänning V_{out} mäts, se kapitel 5 Elektrisk konstruktion, och den elektriska uteffekten P beräknas enligt

$$P = V_{out}I \quad (7.19)$$

Efter att den nuvarande effekten beräknats görs en jämförelse med det tidigare stegets effekt. Då effekten är lägre än den definierade konstanten P_{min} antas att vindhastigheten är låg och en näst intill obefintlig strömstorlek önskas för att turbinen ska vara lättstartad när vindstyrkan ökar. Vid simuleringen som beskrivs i kapitel 8.2 Simulering med likströmsmotor uppstod problemet att pluskvoten ibland stannade vid sitt högsta värde. Därför lades villkoret att då pulskvoten nått sitt maximala värde skall pulskvoten sättas till en experimentellt bestämd konstant D_0 . Om inget av dessa villkor uppfylls är algoritmen i normalt operationstillstånd. Om den förra ändringen av pulskvoten gav en ökad effekt görs en ändring av pulskvoten i samma riktning som det tidigare steget. Omvänt gäller att om effekten minskat görs en ändring av pulskvoten i motsatt riktning.

Att notera här är att maximal elektrisk effekt söktes. Detta gör att systemet stabiliserar sig på maximal elektrisk effekt snarare än maximal mekanisk effekt. För att undersöka turbinens verkningsgrad, som var det huvudsakliga syftet, hade förstås mekaniskt effekt varit mer intressant att använda som parameter. Anledningen till att elektrisk effekt användes var att generatorns momentkonstant k_t var okänd vid mättillfällena och för att det förekom högfrekventa störningar i mätningen av vinkelhastigheten hos turbinen. Vid ett praktiskt användningsfall är det dock mer intressant att elektrisk effekt används som reglerparameter. Detta då det maximerar hela systemets verkningsgrad.

8 Tester och resultat

Här beskrivs de viktigaste testerna och resultat som framkommit.

8.1 Teoretisk verkningsgrad

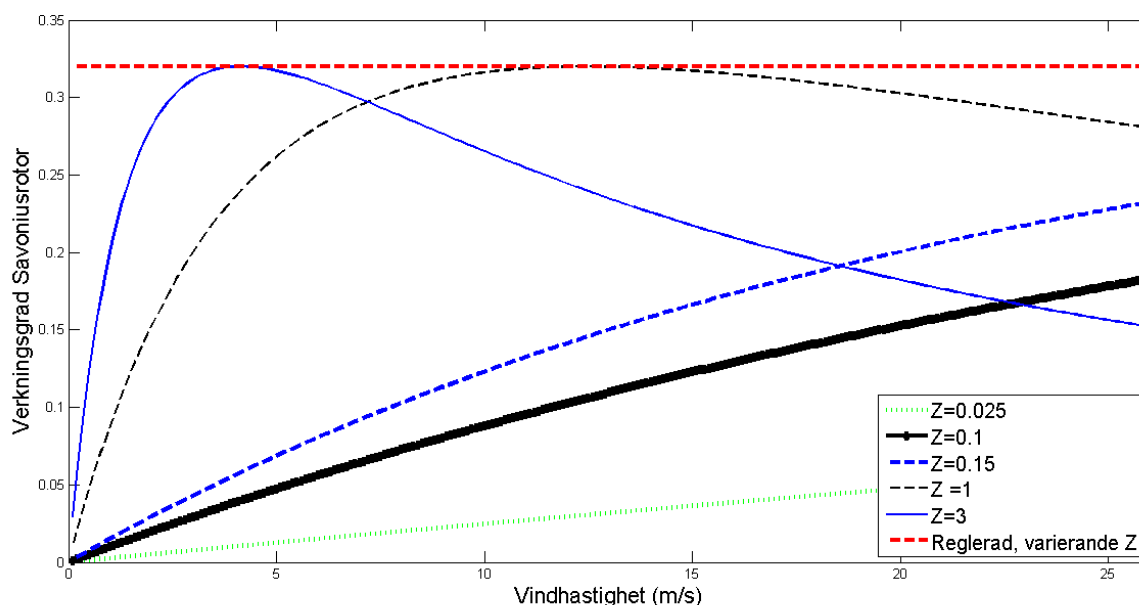
I avsnitt 7.2 Verkningsgraden för ett oreglerat kraftverk gavs analytiska uttryck för verkningsgraden vid ett jämviktstillstånd hos omgivande vind och turbinens varvtal. Kraftverket antas i båda redovisade fall vara kopplad till en permanentmagnetiserad likströmgenerator utan mekaniska förluster.

I kapitel 5 Elektrisk konstruktion infördes den praktiska styrparametern Z som antas motsvara en total serieresistans för generatorkretsen. Verkningsgrad jämförs här för olika fasta värden på parametern Z och med en teoretisk reglering som justerar in Z optimalt. Då når alltid turbinen det för den aktuella turbinkonstruktionen högsta tubinverkningsgraden C_{p0} . För kraftverket som användes mättes $Z \approx 0.1$ vid 100 % pulskvot. Huruvida Z kan antas vara konstant i verkligheten diskuteras i 9.1 Parametervariationer och verkningsgrad.

För uttrycken i avsnitt 7.2 Verkningsgraden för ett oreglerat kraftverk krävs värdena C_{p0} respektive λ_0 . För att generera diagrammen nedan användes $C_{p0} = 0,32$, $\lambda_0 = 1$ då detta verkar vara rimliga värden sett till de kurvor Wortman (1983) publicerat. Värden för generatorns konstanter har satts till $k_\omega = 1$, $k_t = 1$. Detta då det verkade överstämma väl med värden för navmotorer liknande den som användes i projekt som återfanns vid eftersökningar.

8.1.1 Kraftverk utan batteri

Generatoren är kopplad direkt till en resistiv last enligt förutsättningarna i avsnitt 7.2.1 Verkningsgrad utan batteri. Den totala serieresistansen i kretsen är $Z = R$ enligt Figur 7.3. Schematisk representation av en likströmsmaskin.



Figur 8.1. Teoretiska turbinverkningsgrader beroende av definierad styrparameter Z .

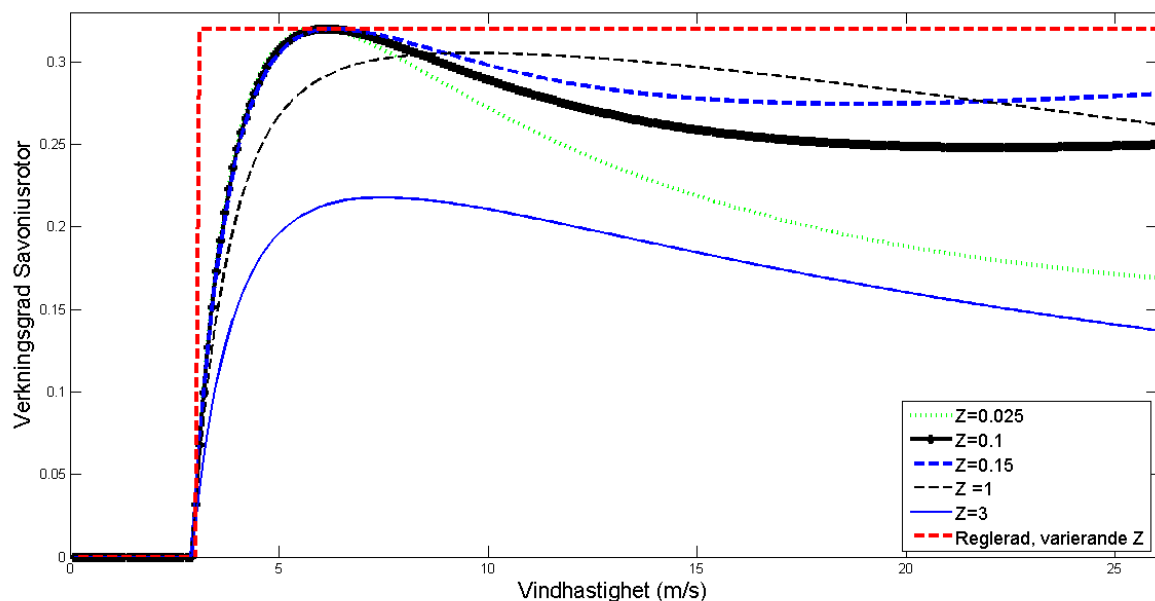
För alla kurvor syns en tydlig möjlighet till förbättring av verkningsgraden jämfört med en optimal reglering. För just detta kraftverk skulle dock en relativt god verkningsgrad dock kunna nås i ett stort vindintervall för $Z = 1$. Observera att om en förlustfri utväxling med

utväxlingsförhållandet n införs är det matematiskt ekvivalent med att reducera Z med faktor $1/n^2$. En utväxling som väljs för att till exempel reducera konduktionsförluster enligt kapitel 4.1 Konduktionsförluster och vridmoment skulle sänka turbinverkningsgraden om den inte väljs med omsorg.

8.1.2 Kraftverk med batteri

Verkningsgraden för ett Savoniuskraftverk kopplad till en ideal permanentmagnetiserad likströmsmaskin och ett batteri enligt avsnitt 7.2.2 Verkningsgrad med direktladdat batteri, men med $Z = R$.

I Figur 8.2 redovisas verkningsgraden för olika värden på Z och ett batteri med spänningen 12 V.



Figur 8.2. Teoretisk verkningsgrad för en ett savoniuskraftverk kopplat till ett batteri.

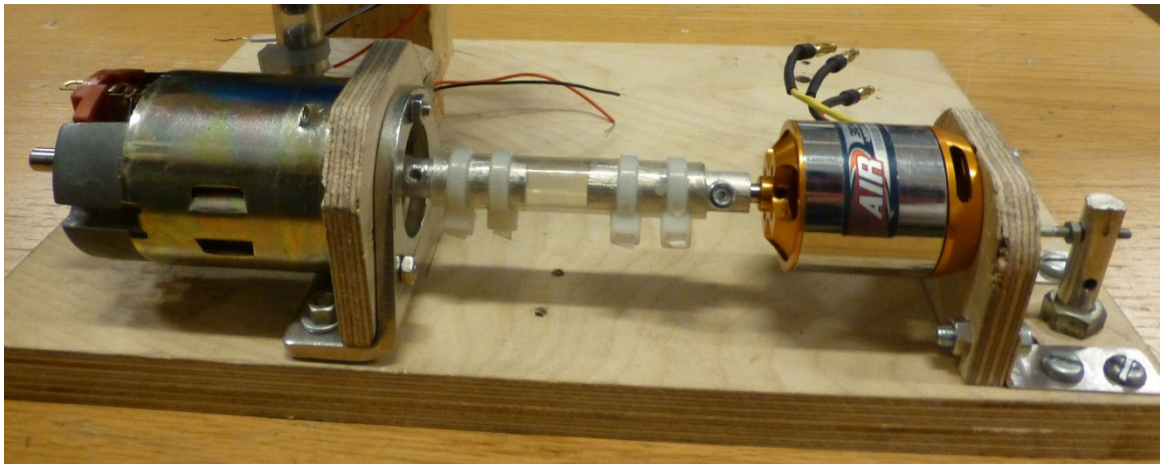
Under ca 4 m/s är inte generatorns elektromotoriska kraft tillräckligt hög för att överkomma batteriets spänning. Ingen nyttig energi tas ut och verkningsgraden har här satts till noll. Därefter är verkningsgraden förhållandevis hög för många värden på Z , men fortfarande finns en stor potential till förbättring genom en reglering.

8.2 Simulering med likströmsmotor

Enligt Wortman (1983) kan momentet T för en Savoniussturbin vid konstant vindhastighet beskrivas som

$$T = T_0 - c\omega \quad (8.1)$$

där T_0 som gäller för en given konstant vindhastighet, c en konstant beroende av turbinens utformning och ω är turbinens vinkelhastighet. Det här stämmer precis överrens med karaktäristiken för en ideal likströmsmotor. Därför simulerades ett savoniuskraftverk genom att koppla en likströmsmaskin till en mindre synkrogenerator. Detta då en synkrogenerator användes på det fullskaliga kraftverket. En testrigg byggdes för detta enligt Figur 8.3.



Figur 8.3. Testrigg med drivande likströmsmotor (t.v.) och synkrongenerator (t.h.).

Synkrongeneratoren som går under försäljningsnamnet *BLDC-motor* (borstlös DC-motor) för främst modellflygplan. Riggen gjorde det möjligt att göra tester med god repeterbarhet utan tillgång till vindtunnel eller liknande.

8.2.1 Resultat

All konstruerad hårdvara och all mjukvara testades i denna rigg innan den monterades på det konstruerade kraftverket. Algoritmen för MPPT utvecklades och verifierades med hjälp av denna utrustning. Ett konkret resultat var att det upptäcktes att algoritmen ibland oönskat fastnade på maximal pulskvot, vilket behövdes korrigeras innan styrenheten monterades på kraftverket.

8.3 Test av fullskaligt vindkraftverk

Under testperioden blåste det inte tillräckligt för att kunna testa kraftverket fullt ut. I slutet av testperioden simulerades därför vind genom att placera vindkraftverket på släpkärra som drogs av en bil. Principen för denna simulering bygger på att det är luften och turbinens hastighet relativt varandra som används vid utvinnande av vindkraft. Det innebär att då turbinen rör sig i stillastående luft vilket teoretiskt borde ge samma resultat som då luften rör sig relativt en stillastående turbin. Kraftverket lutade ca 10° då släpkärran stod på horisontellt underlag. Detta tros ha påverkat såväl kraftverkets prestanda såväl som vindmätarens utslag.

Tester gjordes vid två olika målhastigheter, 6 m/s och 10 m/s. Detta med förhoppningen att nå distinkta stabila jämviktstillstånd. Olika inställningar av styrparametrar skulle då kunna jämföras med varandra. I praktiken var det svårt att nå denna målhastighet. Framförallt vindmätningen fluktuerade kraftigt. Om detta berodde av faktiska fysiska omständigheter eller fel beroende av simuleringsmetoden är oklart.



Figur 8.4. Vindkraftverket monterat på släpkärra kopplad till en bil.

För att kunna jämföra den implementerade MPPT-algoritmen med ett oreglerat kraftverk gjordes tester med denna aktiverad såväl som med olika fasta pulskvoter. Detta fasta värden på pulskvot bör nominellt representera olika värden på presenterad styrparameter Z .

Dessa inställningar provades:

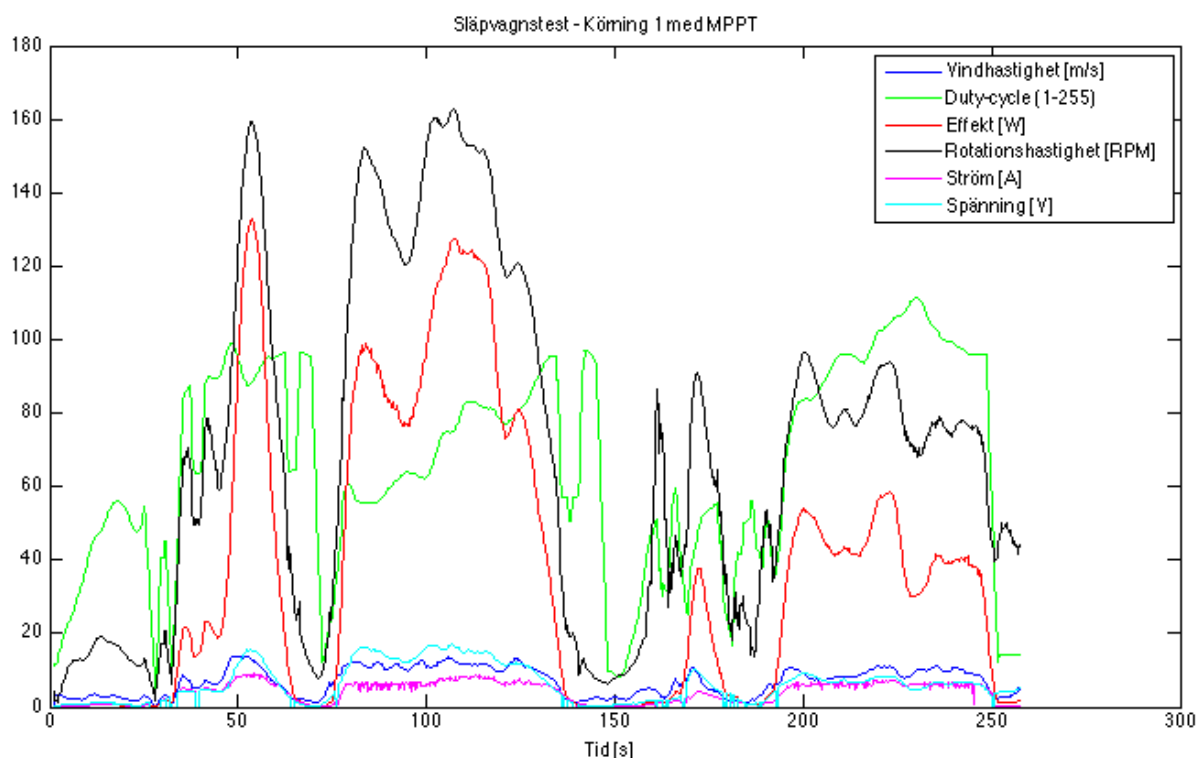
- Fall 1: Körning med MPPT-algoritm, varierande pulskvot
- Fall 2: Körning med MPPT-algoritm, varierande pulskvot
- Fall 3: Körning med fast pulskvot, $14/255 \approx 5,5 \%$
- Fall 4: Körning med fast pulskvot, $30/255 \approx 11,8 \%$
- Fall 5: Körning med fast pulskvot, $90/255 \approx 35,3 \%$
- Fall 6: Körning med fast pulskvot, $140/255 \approx 54,9 \%$
- Fall 7: Körning med fast pulskvot, $190/255 \approx 74,5 \%$
- Fall 8: Körning med fast pulskvot, $255/255 = 100 \%$

Varje inställning provades vid de två mål hastigheterna 6 m/s och 10 m/s under 5-10 minuter. Värden sparades i loggsystemet med intervallet nominellt 300 millisekunder.

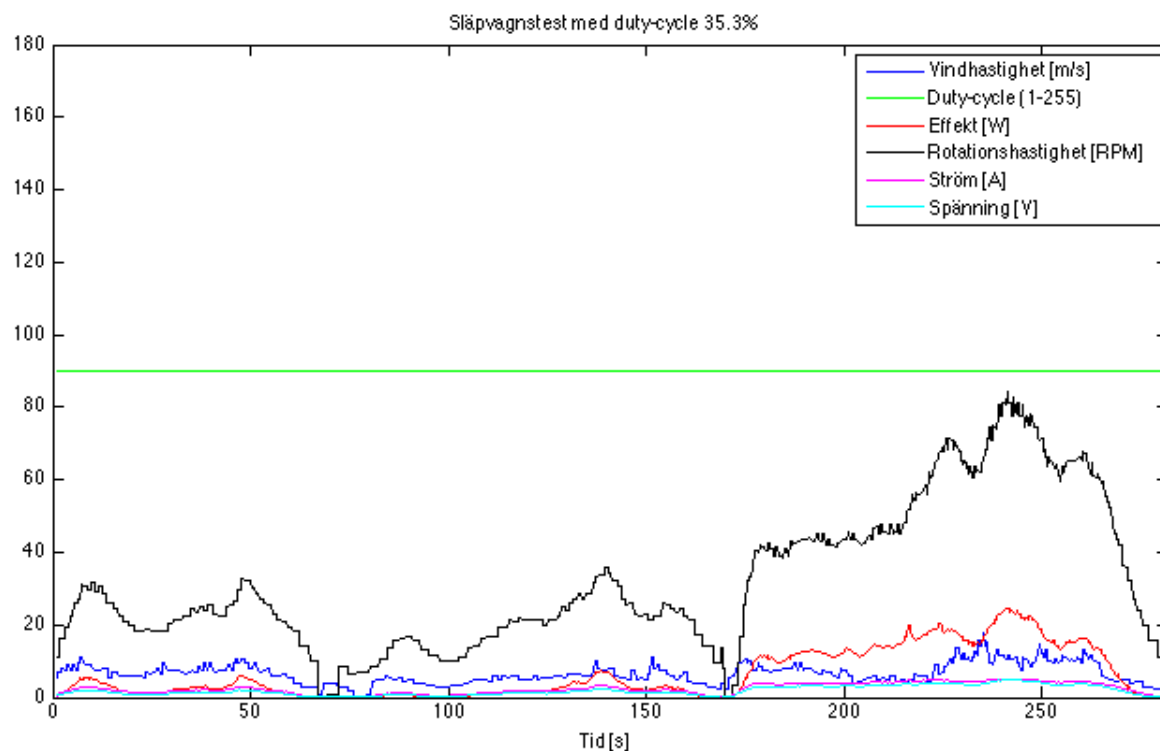
8.3.1 Resultat

Här redovisas resultatet av testen beskriven ovan. Notera att resultaten har brister som diskuteras i kapitel 9.3 Test av fullskaligt vindkraftverk. I Figur 8.7 ses ett diagram innehållande effektuttaget som funktion av vindhastigheten vid de olika körningarna. Resultat

från simuleringarna med fast pulskvot finns i Appendix D – Testresultat från körning med vindkraftverket på släpkärra. Resultat från två av testerna, den ena med MPPT-algoritm och den andra med fast pulskvot, finns visualiserade i Figur 8.5 och Figur 8.6. Data i figurerna är behandlad enligt kapitel 6 Loggning och behandling av mätdata.

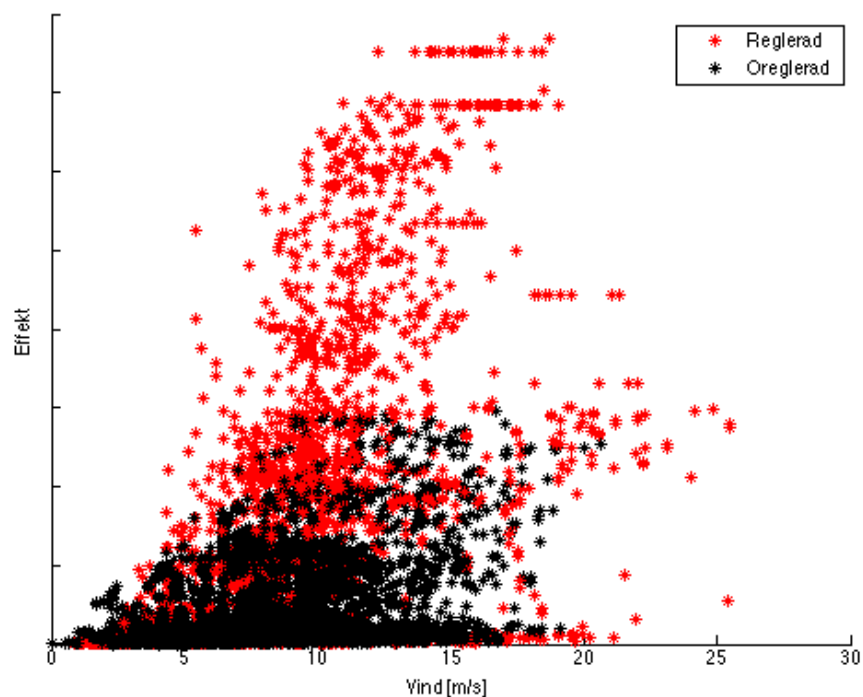


Figur 8.5. Diagram av data från testkörning 1 med MPPT-algoritm.



Figur 8.6 Diagram av data från testkörning med fast pulskvot på 90/255, dvs. 35,3 %.

Relationen mellan effekt och vind under simuleringarna finns visualiserade i Figur 8.7. Röda prickar motsvarar effekt vid en given vindhastighet för de två simuleringarna med MPPT-algoritm. De svarta prickarna motsvarar detsamma för simuleringar med fast pulskvot på 14/255, 30/255, 90/255, 140/255, 190/255 samt 255/255.



Figur 8.7. Diagram bestående av data från samtliga testkörningar. Röd = MPPT-algoritm, Svart = Fast pulskvot.

9 Diskussion

I detta kapitel diskuteras resultat från praktiska tester och teoretiska beräkningar.

9.1 Parametervariationer och verkningsgrad

I kapitel 7.2 Verkningsgraden för ett oreglerat kraftverk visades att olika värden på styrparametern Z eller förändringar i utväxling radikalt förändrade savoniusturbinens verkningsgrad. För vissa värden på Z uppnåddes dock en relativt hög verkningsgrad. Detta skulle förmodligen vara svårt att uppnå i praktiken.

Om en savoniusturbin skulle användas för att driva laster av resistiv karaktär i ett verkligt elektriskt distributionssystem är det rimligt att användarna över tid kopplar in olika laster beroende av behov. Då skulle Z variera och verkningsgraden därefter. Dessutom medför parametervariationer i t.ex. luftens densitet och kretsens temperaturberoende serieresistans att det värde på Z som är optimalt hela tiden varierar. Förmodligen är det därför svårt att uppnå de högsta nivåerna av utbyte utan att använda någon sorts reglering av turbinens löptal. Dessutom skulle användarna förmodligen vilja använda någon sorts energibuffert. Den enklaste och mest lättanvända är då att använda ett batteri. Då behövs det ändå någon sorts elektronisk batteriövervakning som lika gärna skulle kunna integreras med en reglering av själva kraftverket utan större kostnadsökningar.

9.2 Praktiska problem

Vissa praktiska problem som antingen kan vara av intresse för fortsatt arbete, eller som kan påverka detta arbetes resultat redovisas här.

9.2.1 RAM-minne

Biblioteket för skrivning till SD-kortet vid loggningen tros ha krävt mycket av processorns tillgängliga *RAM-minne*. Detta tros att vid vissa tillfällen ha orsakat s.k. stack overflow som gav omstarter av processorn. Programmet skrev ut flera textsträngar till loggning och till det grafiska användargränssnittet. Dessa strängar finns som standard i såväl RAM- som programminnet då processorn körs. Genom att instruera kompilatorn att endast placera dessa strängar i programminnet, verkade problemen försvinna. Vid fortsatt arbete är detta något att beakta. Kanske borde en processor med mer RAM-minne användas.

9.2.2 Elektrisk hårdvara

Parallellt över transistorerna placerades en transientskyddsdiod med märkspänningen 50 V. Detta för att eliminera eventuella spänningstransienter som antogs kunna orsakas av ledningsinduktanser. När testtiden för kraftverket var slut och elektroniken demonterades för fotografering, upptäcktes att denna diod var sotig, sprucken och uppenbarligen defekt. Varför detta hände är oklart. Inga av de uppmätta spänningarna hade en amplitud som översteg diodens märkspänning. Transistorena fungerade dock fortfarande trots detta haveri.

9.2.3 Läsning av pulsgivare

Inläsningarna av vindmätaren och varvtalsmätaren gjordes initialt enbart i mjukvara. Avbrottsrutiner i hårdvara för att signalera ändring i signalnivåer undveks då detta kan ge problem vid högfrekventa störningar. Initialt fungerade detta väl. När programmet sedan växte i omfattning hann inte processorn läsa de digitala ingångarna där pulsgivarna satt. Vid ungefär 4 m/s hann mjukvaran inte registrera pulser och mätvärdet stabiliserades runt detta värde oavsett hur snabbt vindmätaren roterade. Detta uppmärksammades inte förrän i slutet av en testperiod. Eftersom de inte blåste mer än ca 2-4 m/s enligt vädertjänster, upptäcktes inga fel innan testet med kraftverket på släpkärra. När felet upptäcktes kasserades periodens värden för säkerhets skull.

Pulsgivarna flyttades sedan till ingångar med möjlighet till hårdvaruavbrott och vindmätaren verkade då fungera väl. Varvtalsmätaren verkade dock sporadiskt läsa in högfrekventa pulser med okänt ursprung. Eftersom givarna i motorn som användes för att läsa pulser är av okänd specifikation, är det möjligt att de egentligen kräver en högre matningsspänning än den som användes.

9.2.4 Strömmätningen

Vid kalibrering av mätutrustningen efter testets slut visade sig strömmätningen vara en faktor 10-20 för liten. Förmodligen kan detta härledas till hårdvara som havererat. Om denna hårdvara havererade innan eller efter detta test är oklart. Om det skedde innan testet skulle är mätvärdena för reglerat respektive oreglerat kraftverk åtminstone kunna vara jämförbara med varandra.

9.2.5 Kopplingen mellan turbin och generator

Kopplingen konstruerades av en armerad gummislang enligt avsnitt 3 Mekanisk konstruktion. Lösningen utgjorde ett skydd för generatoren vid snedställning av turbinaxeln och hastiga momentförändringar. Vid praktiska tester visade den sig dock inte hålla vid höga axelmoment. En annan koppling måste dimensioneras för vidare tester.

9.2.6 Bestämning av mätosäkerheter

Alla enskilda mätningar har vissa mätosäkerheter. Grundtanken var att under lång tid spara en stor mängd data. Här skulle mätvärden som representerar jämviktstillstånd hos kraftverket kunna skiljas ut. För varje mätpunkt skulle felstaplar beräknade utifrån uppmätta mätfel hos varje enskilt mätton redovisas. Fel orsakade av den testmetod som användes antas dock vida överstiga fel hos enskilda mätton exklusive strömmätningen.

9.3 Test av fullskaligt vindkraftverk

Resultaten från den praktiska simuleringen med vindkraftverket monterat på en släpvagn är svårtolkade. Strömmätningen havererade förmodligen någon gång under testet, se kapitel 9.2.4 Strömmätningen. När detta skedde och hur många mätningar som berördes av detta är oklart. Dessutom fluktuerade värdena för vindmätningen mycket. Om detta berodde på faktiska störningar eller mätningens kvalitet är oklart. Det var även svårt att åstadkomma jämna testkörningar där systemet kunde ställa i sig i någon form av jämviktsläge. Data från testkörningarna finns visualiserad i kapitel 8.3 Test av fullskaligt vindkraftverk samt i Appendix D – Testresultat från körning med vindkraftverket på släpkärra.

I Figur 8.5 ses att pulskvoten varierar över tid, vilket är väntat med regleralgoritmen som används. Pulskvoten följer till viss del vindens hastighet, vilket är att vänta av den teori som härleds i kapitel 7.3 Analytisk bestämning av optimal pulskvot. Dock avviker pulskvoten från vinden vid vissa tillfällen av testperioden. Ett exempel är i simulering 1 med MPPT-algoritm mellan ca 130 s och 150 s. Rotationshastighet och effekt har då i princip gått ner till noll men styrenheten dröjer kvar med en pulskvot på ca 90/255. Detta kan bero på att regleralgoritmen ej fungerar helt tillfredställande eller att mätning av framförallt strömmen inte var korrekt. Kanske var det här i tidsserien som strömmätningen havererade. Detta skiljer sig från Figur 8.6 där pulskvoten var konstant. Genom att jämföra resultaten av dessa testfall kan dock en tendens till att regleralgoritmen förbättrar savoniuskraftverkets prestanda ses. Detta påstående stärks av resultatet redovisat i Figur 8.7, där en ökning av effekten ses för det reglerade fallet jämfört med det oreglerade.

Flertalet faktorer kan ha haft påverkan på simuleringsresultatet. Där ingår att luftens strömning kan ha influerats av bilen framför vindkraftverket och därmed resulterat i en mer turbulent strömning än om turbinen stått stilla på plan mark. På grund av placeringen på

släpkärran var vindkraftverkets axel inte helt vertikal under körningen utan lutade ca 10°. Det här bör ha haft inverkan på såväl vindmätningen som kraftverkets prestanda. Ojämnt väglag gav en del oönskad rörelse i vinkraftverket som kan ha stört dynamiken. Förmodligen påverkade accelerationer vindmätaren.

9.4 Hållbar utveckling

Den potentiella nyttan för ett småskaligt savoniuskraftverk med avseende på hållbar utveckling är betydande. Vindkraft är en förhållandevis ren kraftkälla som kan användas i stora delar av världen. Själva turbinen kan byggas av direkt återanvänt material, som kanske inte hade tagits tillvara på annars. Om det istället skulle återvinnas i t.ex. ett smältverk hade det förutom utsläpp och energiåtgång vid själva smältningen också krävts energi för transporter. Detta undviks om turbinen byggs och används lokalt. Lokalt skulle produktion och försäljning av förbättrade Savonius-turbiner kunna bidra till hållbar utveckling av lokala ekonomier där tillgången på elektricitet är låg. Lokala verkstäder skulle kunna bygga savoniuskraftverk och öka sina inkomster. Sedan skulle alla i närheten av dessa kraftverk kunna åtnjuta alla de fördelar som elektricitet kan ge.

Ett reglerat savoniusvindkraftverk skulle kunna användas som ett attraktivt alternativ till fossildrivna elkraftverk. Med en batteribank ansluten skulle kraftverket kunna generera energi då det blåser för att användas då den behövs. Eventuellt skulle systemet kunna utökas med solpaneler för att kunna producera energi även då det inte blåser.

Även om effekten som kraftverket levererar är förhållandevis låg kan dess fördelar med enkel mekanik vara attraktiva i många områden. De resultat som uppnås med reglering av kraftverket är svårtolkade men visar på att reglering kan göra savoniuskraftverket till ett mer attraktivt alternativ än tidigare.

10 Slutsats

Enligt teoretiska resultat bör reglering av savoniusvindkraftverket höja dess prestanda betydligt. Resultat från praktiska tester visar på en ökning av uppmätt effekt när savoniusvindkraftverket regleras. Regleringen gjordes med en *Maximum Power Point Tracking*-algoritm. De kvantitativa data som samlats in anses dock inte pålitlig av olika anledningar. Ytterligare tester behövs för att kunna säkerställa resultatet och bestämma systemets faktiska prestanda.

11 Rekommendationer och framtida arbete

I detta kapitel beskrivs hur fortsatt arbete med kraftverket skulle kunna se ut. För att kunna ta fram mer tillförlitlig data som kan användas för att dra ytterligare slutsatser behöver fler tester göras. Värden på flera parametrar som ingår i systemet behöver bestämmas mer noggrant för att förbättra den matematiska modellen av systemet samt för att bättre kunna analysera systemets förluster var för sig.

11.1 Vindturbinen

Ett test av kraftverket i en vindtunnel är önskvärt för att få bättre kontroll över förhållandena under ytterligare tester. Ett test med konstant vindhastighet över en längre tid ger möjlighet att genom att variera lasten experimentellt ta fram värden på maximal verkningsgrad och optimalt löptal för det specifika kraftverket. Dessa kan sedan användas till att ta fram ytterligare regleralgoritmer för att styra kraftverket. Ytterligare mätningar av lagerfriktion i olika hastigheter och noggrannare uppskattning av turbinens tröghetsmoment skulle kunna förbättra den matematiska modellen över systemet.

11.2 Generatoren

Det vore önskvärt att bestämma generatorns momentkaraktäristik. Genom kännedom om generatorns momentkonstant k_t [Nm/A] kan dess effekt P_{turbin} [W] uppskattas om dess ström I och vinkelhastighet ω är kända genom

$$P_{turbin} = T\omega \approx \frac{I}{k_t\omega} \quad (11.1)$$

Detta ger turbinens mekaniska effekt oberoende av spänningsfall i diodbrygga och resistenser, vilka kan vara svåra att uppskatta. P.g.a. tidsbrist mättes aldrig detta för projektets generator. Dock utformades en metod för hur detta skulle kunna göras med billig utrustning. Denna plan återges i Appendix E – Metod för bestämning av momentkaraktäristik.

11.3 Reglering

Eftersom det visat sig meningsfullt att reglera generatorns strömuttag är det intressant att testa och utvärdera olika typer av regleralgoritmer och bestämma den mest lämpade.

12 Referenser

- Atmel (2013) *ATmega328 Datasheet Complete* [Online] http://www.atmel.se/Images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet.pdf
[Hämtad 2104-05-19]
- Dodge J. (2006) *Power MOSFET Tutorial* [Online], Advanced Power Technology, http://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/14692-mosfet-tutorial
[Hämtad 2014-05-12]
- Hau E. (2006) *Wind Turbines, 2nd Edition*. Berlin: Springer-Verlag. ISBN 10 3-540-24240-6
- Hughes A., Drury B. (2013) *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types, and Applications, Fourth Edition*. Elsevier Ltd. ISBN 978-0-08-098332-5
- International Rectifier (2012) *Maximizing the effectiveness of your SMD Assemblies* (Application Note AN-0994) [Online], <http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-994.pdf>
[Hämtad 2014-05-12]
- KTH (1998). *Handbok och formelsamling i hållfasthetslära*. Stockholm: Institutionen för hållfasthetslära KTH.
- Körner, S., Wahlgren, L. (2005) *Statistiska metoder*. Upplaga 2. Lund: Studentlitteratur AB. ISBN 91-44-04420-8
- Lennartsson, B. (2011) *Reglerteknikens grunder*. Upplaga 4:9. Lund: Studentlitteratur AB. ISBN 978-91-44-02416-5
- Lundh, H. (2000) *Grundläggande hållfasthetslära*, Stockholm: Hans Lundh .
- Maxim Integrated (2001) *Defining and Testing Dynamic Parameters in High-Speed ADCs, Part I* [Online], <http://www.maximintegrated.com/app-notes/index.mvp/id/728>
[Hämtad 2014-05-08]
- Maxim Integrated (2008) *Datablad DS18B20* [Online], <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
[Hämtad 2014-05-12]
- Menet, J and Bourabaa, N (2004) *Increase in the Savonius rotors efficiency via a parametric investigation*
- Mägi, M., Melkersson, K. (2011), *Lärobok i maskinelement*, Göteborg: EcoDev.
- Mörstedt, S-E. och Hellsten, G. (2010) *Data och diagram*. Upplaga 7. Stockholm: Liber AB. ISBN 978-91-47-00805-6
- Onsemi (2013), *MC33269D-5.0 (Spänningsmatning Arduino)* [Online], http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC33269-D.PDF
[Hämtad 2014-05-19]
- Pejovic, P. (2007) *Three-Phase Diode Rectifiers with Low Harmonics*. New York: Springer. ISBN 978-0-387-29310-3

Semig P., Collin W. (2012) *A Current Sensing Tutorial* [Online], EETIMES, http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1279404 (Publicerad i fyra delar) [Hämtad 2014-05-11]

Whelan B (2009) *How to Choose a Voltage Reference* [Online], Linear Technology, <http://cds.linear.com/docs/en/lt-journal/LTMag-V19N1-03-References-BrendanWhelan.pdf> [Hämtad 2014-05-11]

White, F.M. (2011) *Fluid Mechanics*. New York: McGraw-Hill.

Wizelius T. (2002) *Vindkraft i teori och praktik*. Lund: Tore Wizelius och Studentlitteratur

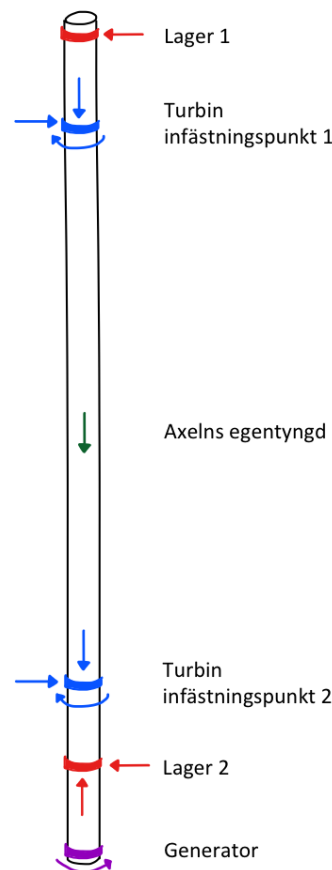
Wortman, A. (1983) *Introduction to wind turbine engineering*. Woburn: Butterworth Publisher. ISBN 0-250-40562-8

Zumbalen, H (2012), *Staying well grounded* [Online], Analog dialogue, http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/46-06/staying_well_grounded.pdf, [Hämtad 2014-05-08]

Appendix A – Dimensioneringsberäkning axel

Lagringspunkter

De krafter som verkar på axeln är dels de som orsakas av vindens kraftverkan på turbinen samt av egentygndar i systemet. Vinden ger en kraft vinkelrätt mot axeln som tas upp av lagren och ett vridande moment som överför energin i vinden till generatorn. Turbinen och axelns massa ger en tyngdkraft i axiell led på lagren. Lagringarnas placering i konstruktionen ses i Figur 1. För att minimera friktionsförluster i den mekaniska kraftöverföringen används kullager.



Figur 1. Principskiss, Lagringpunkter, turbinens infästningspunkter samt generatorns infästningspunkt

Krafter som verkar på axeln

Krafter samt moment har för dimensionering av axel och lager uppskattats enligt följande. Kraften på vindkraftverkets turbin uppskattas genom att multiplicera massflödet av luften med differensen i vindhastigheten före respektive efter turbinen (White, 2011, s.816). För att göra en överskattning av kraften har vindhastigheten efter turbinen antagits vara noll. Detta är i praktiken omöjligt men ger ett högt värde på kraften och konstruktionen blir därför inte underdimensionerad.

Friläggning samt jämviktsekvationer finns nedan. Dessa antaganden ger vid en vindhastighet av 30m/s följande krafter:

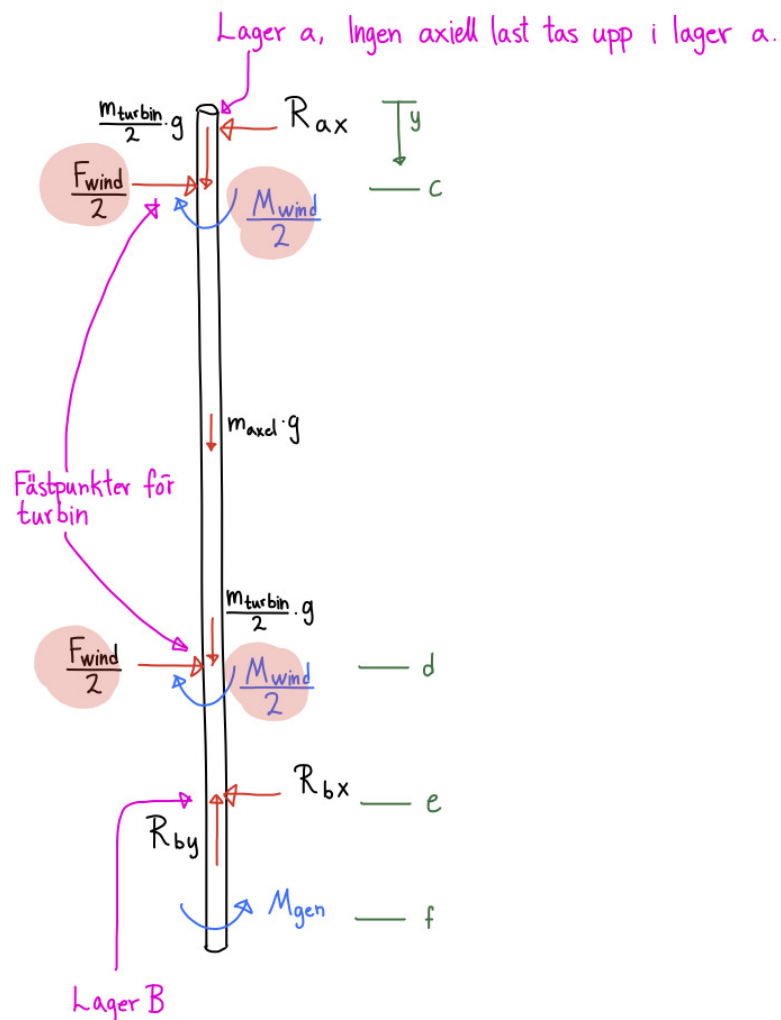
Radiell reaktionskraft lager 1: ca 500 [N]

Radiell reaktionskraft lager 2: ca 500 [N]

Av lagertekniska skäl skall endast ett av lagren ta upp krafter i axiellt led (Mägi, 2011, s.233). Turbinen samt axelns massor har uppskattats till sammanlagt 50 kg, vilket ger en axiell reaktionskraft lager 2 på 441 [N]. Denna är endast beroende av den sammanlagda massan och tyngdaccelerationen. Vinden antas angripa vinkelrät mot den vertikala turbinaxeln och ger inget axiellt tryck på turbinen.

Turbinens vridande moment på axeln uppskattas med hjälp av ett ungefärligt värde på turbinens verkningsgrad $C_p = 0.3$ (Wortman, 1983) vilket ger effekten som kan utvinnas ur vinden. Då effekten divideras med turbinens varvtal (under antagandet att förhållandet mellan turbinens periferihastighet och vindhastigheten ≈ 1), fås momentet vid en vindhastighet av 30m/s till ca 80 [Nm].

Friläggning av axel



$$c = 100mm$$

$$d = 1800mm + 100mm \text{ (två oljefat)}$$

$$e = 1800mm + 100mm + 100mm$$

$$f = 1800mm + 100mm + 100mm + 100mm$$

Jämviktsekvationer:

$$\rightarrow: F_{wind} - R_{ax} - R_{bx} = 0$$

$$\uparrow: R_{by} - m_{turbin}g - m_{axel}g = 0$$

$$\cup: M_{vind} - M_{gen} = 0$$

Reaktionskrafter i lager:

$$R_{by} = (m_{turbin} + m_{axel})g$$

$$R_{by} = F_{vind} - R_{bx}$$

$$R_{bx} = F_{vind} - R_{by}$$

Momentjämvikt kring lager a i z-led:

$$\cup: R_{bx}(c + d + e) - \frac{F_{vind}}{2}(c + d) - \frac{F_{vind}}{2}c = 0$$

Kombinerat för respektive lagerreaktionskraft:

$$\Rightarrow R_{bx} = \frac{\frac{F_{vind}}{2}(c + d) - \frac{F_{vind}}{2}c}{(c + d + e)}$$

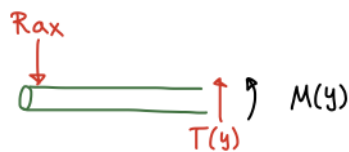
$$\Rightarrow R_{ax} = F_{vind} - \frac{\frac{F_{vind}}{2}(c + d) - \frac{F_{vind}}{2}c}{(c + d + e)}$$

Snitt:

$T(y)$ = tvärkraft i axeln

$M(y)$ = böjmoment i axeln

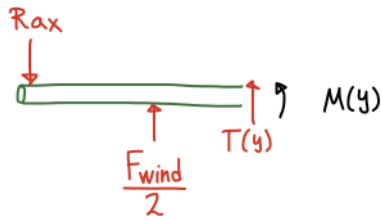
för $0 < y < c$:



$$T(y) = R_{ax}$$

$$M(y) = R_{ax}y$$

för $c < y < d$:



$$T(y) = R_{ax} - \frac{F_{vind}}{2}$$

$$M(y) = R_{ax}y - \frac{F_{vind}}{2}(y - c)$$

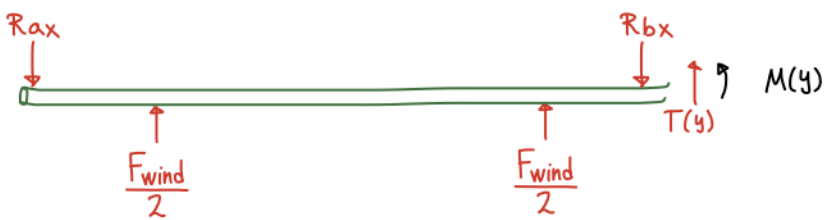
för $d < y < e$:



$$T(y) = R_{ax} - F_{vind}$$

$$M(y) = R_{ax}y - \frac{F_{vind}}{2}(y - c) - \frac{F_{vind}}{2}(y - c - d)$$

för $e < y < f$:

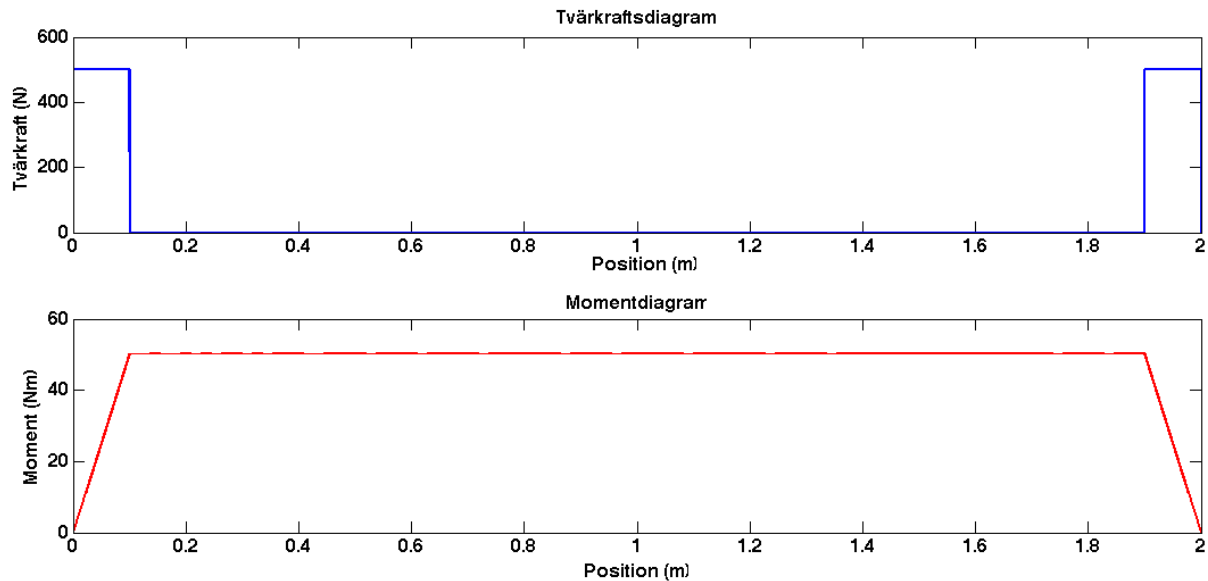


$$T(y) = R_{ax} + R_{bx} - F_{vind}$$

$$M(y) = R_{ax}y - \frac{F_{vind}}{2}(y - c) - \frac{F_{vind}}{2}(y - c - d) + R_{bx}(y - c - d - e)$$

Tvärkraft och moment i axeln

Tvärkrafter och moment i axeln, plottade i figur nedan:



Tvärkrafter samt böjmoment för snitt i axeln mellan dess infästningspunkter.

Statisk dimensionering mot plasticering

Turbinen ger ett böjande moment på axeln vilket ger en böjspänning σ_b . Axeln dimensioneras med data för axelstål med beteckning: 141650-01 (KTH, 1998).

Beräkningarna sker iterativt i MATLAB för 400 punkter längs axeln. För det statiska fallet beräknas erforderlig axelradie för varje punkt. Radien ökas successivt tills dess att effektivspänningen, σ_{eff} , inte överstiger materialets sträckgräns.

Böjspänningen σ_b ges av (Lundh, 2002):

$$\sigma_b(y) = \frac{M_b(z)}{W_b} K_{tb}$$

$$\text{där } W_b = \frac{\pi(b^4 - a^4)}{4b}$$

Skjuvspänningen τ_v ges av (Lundh, 2002):

$$\tau_v = \frac{M_v}{W_v} K_{tv}$$

$$\text{där } W_v = \frac{\pi(b^4 - a^4)}{2b}$$

Den sammanlagda spänningen σ_{eff} ges av:

$$\sigma_{eff}(z) = \sqrt{\sigma_b(y)^2 + 3\tau_v^2}$$

Dimensionering mot utmattning

Utmattningens inverkan beräknas med utmattningsvillkor från standard VDI2227 tillsammans med tabelldata för axelns yta och kärlkänslighet (Mägi, 2011). Numerisk beräkning sker iterativt i MATLAB. Axeldiametern ökas successivt tills att utmattningsvillkoret uppfylls.

Utmattningsvillkor (standard VDI2227):

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_E}\right)^2 + \left(\frac{\tau_a}{\tau_E}\right)^2 = 1$$

utmattningsvillkoret används enligt följande:

$$\left(\frac{\sigma_a K_f}{\sigma_{ub} K_d K_s}\right)^2 + \left(\frac{\tau_a K_f}{\tau_{uv} K_d K_s}\right)^2 = 1$$

där K_f, K_d, K_s är tabelldata (Mägi, 2011)

$K_s = 0.9$ (Slipad yta)

$K_d \approx 1$ Beror av diametern och beräknas för varje iteration i MATLAB

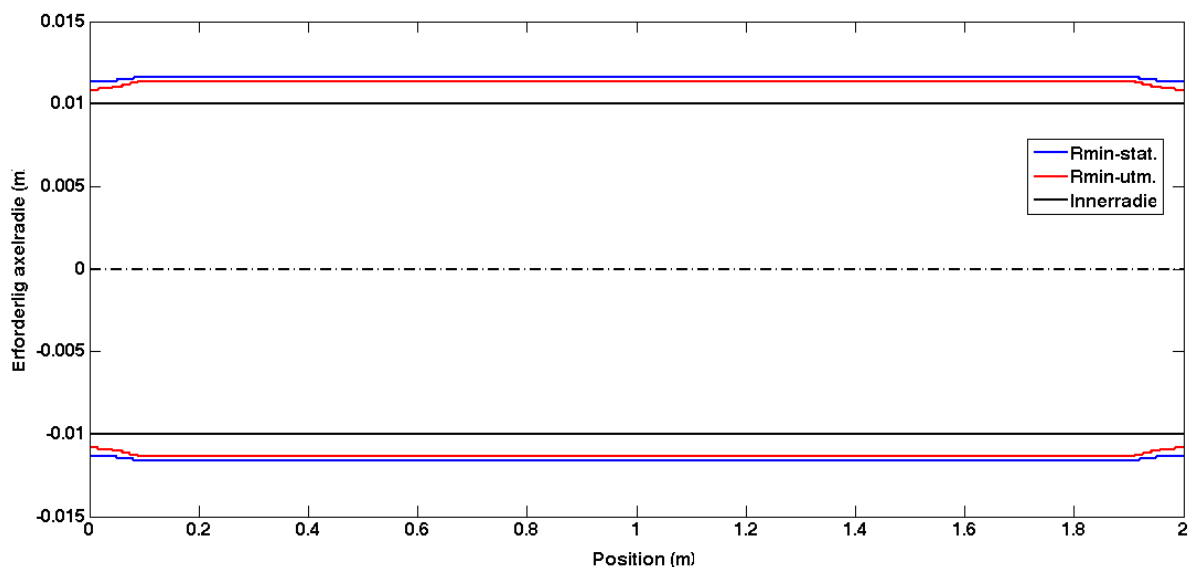
$K_f = 1 + q(K_t - 1)$ (Anvisningsfaktor)

där $q = 0.72$ (Kärlkänslighetsfaktor)

och $K_t = 2$

Erforderlig axeldiameter

Figuren nedan visar erforderlig axeldiameter som funktions av dess längd (y).



Minsta erforderlig axelradie som funktions av axelns längd. För statisk belastning samt med hänsyn till utmattning.

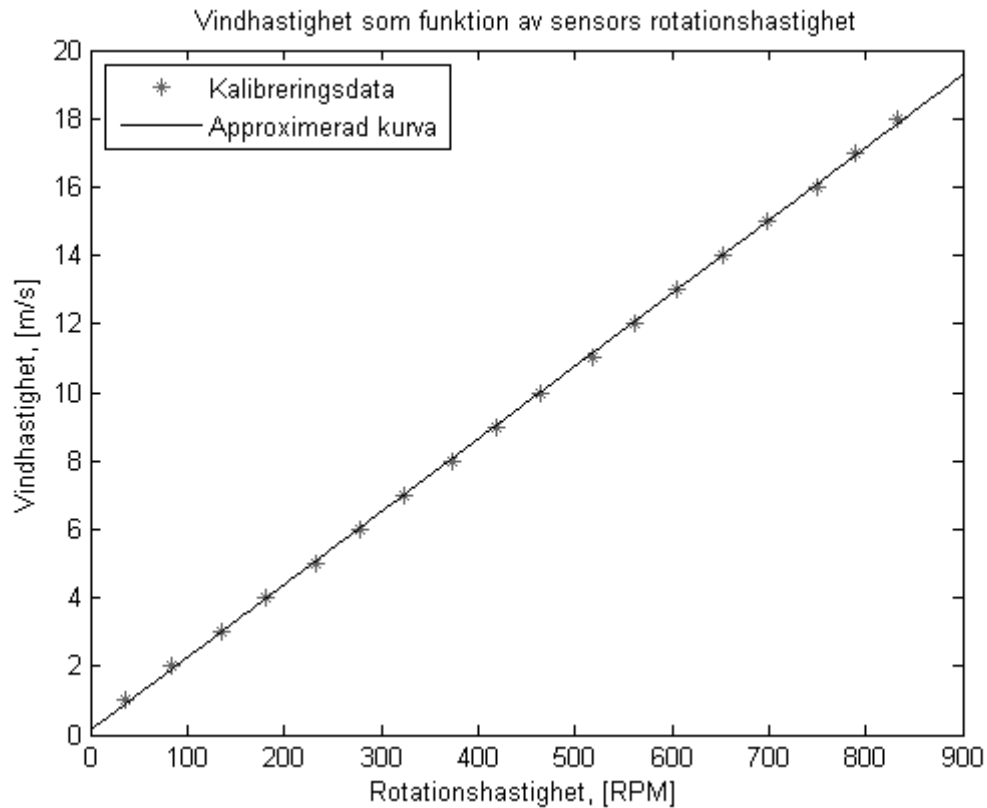
Appendix B – Kalibrering av vindsensor

Kalibrering av vindmätningen utfördes i Chalmers vindtunnel med syfte att bestämma vindhastigheten som en funktion av vindgivarens rotationshastighet. Vindgivaren monterades i mitten av vindtunneln för att undvika strömningsstörningar längs tunneln väggar. Luftflödets hastighet ökades stegvis med en meter per sekund från stillastående till 18 m/s och vindgivarens rotationsperiod mättes för de olika vindhastigheterna. I Tabell 1 ses en sammanställning av framtagen kalibreringsdata där vindhastigheten är uppmätt av vindtunnelns sensorer med fluktuationer på 0,05 m/s. Vinden i tunneln mättes med ett *Pitot-rör* kopplat till en elektronisk trycksensor. Mättonets osäkerhet är okänd men antas vara låg. Rotationshastigheten beräknades enligt ekvation 5.16.

Tabell 1. Kalibreringsdata för vindhastighetsmätaren uppmätt i Chalmers vindtunnel.

Vindhastighet, [m/s]	Tid per varv, [ms]	Rotationshastighet, [RPM]
1	1655	36,2538
2	710	84,5070
3	445	134,8315
4	333	180,1802
5	257	233,4630
6	216	277,7778
7	185	324,3243
8	161	372,6708
9	143	419,5804
10	129	465,1163
11	116	517,2414
12	107	560,7477
13	99	606,0606
14	92	652,1739
15	86	697,6744
16	80	750,0000
17	76	789,4737
18	72	833,3333

I MATLAB ordnades kalibreringsvärdena i ett diagram med vindhastighet som funktion av rotationshastighet, se Figur 1.



Figur 1. Kalibreringskurvan med vindhastigheten som funktion av rotationshastigheten. Grå markeringar är mätpunkter från kalibreringen i Chalmers Vindtunnel medan den svarta kurvan är den kurva som approximerades med hjälp av MATLAB-kommandot *fit*.

Sambandet mellan vindhastighet U och rotnors rotationshastighet RPM [varv/min] är linjärt och med hjälp av MATLAB-kommandot *fit* approximerades en kurva, se ekvation 1. Denna funktion används sedan vid mätning av vindhastigheten.

$$U = 0,021127 \times RPM + 0,1217 \quad (1)$$

Appendix C – Optimal pulskvot

Följande beräkningar ligger till grunden vid bestämning av optimal pulskvot. Det som söks är turbinens effekt som funktion av pulskvot. Ekvationerna som uträkningarna bygger på listas nedan.

$$P_{turbin} = T_{turbin}\omega \quad (1)$$

Där P_{turbin} = turbinens effekt
 T_{turbin} = turbinens moment
 ω = turbiens varvtal

$$T_{generator} = k_t I \quad (2)$$

Där $T_{generator}$ = generatorns moment
 k_t = generatorns momentkonstant
 I = ström

$$T_{turbin} = C_T \rho U^2 A r \quad (3)$$

Där C_T = momentkonstant enligt Wortmans
 ρ = luftens densitet
 U = vindens hastighet
 A = turbinens projicerade area
 r = turbinens radie

$$C_T = C_{T0} - k\lambda \quad (4)$$

Där C_{T0} = startmomentkonstant enligt Wortman
 k = propornalitetsskonstanten vilken är lika med $\frac{C_{t0}}{\lambda_0}$ där λ_0 är löptal vid maximalt C_p
 λ = löptal

$$\lambda = \frac{\omega r}{U} \quad (5)$$

$$I = \frac{ED}{R} = \frac{k_\omega \omega D}{R} \quad (6)$$

Där E = inducerad EMK
 D = pulskvot
 R = likströmsmaskinens resistans
 k_ω = generatorns varvtalskonstant

Antagande om att systemet befinner sig i stabilt jämviktstillstånd ger att $T_{generator} = T_{turbin}$.
Insättning av ekvation (2) i (1):

$$P_{turbin} = k_t I \omega \quad (7)$$

Insättning av ekvation (6) i (7) ger:

$$P_{turbin} = \frac{k_t k_\omega D \omega^2}{R} \quad (8)$$

Vill att P_{turbin} endast skall bero av D därför antas att (2) är lika med (3), det vill säga steady state råder.

$$C_T \rho U^2 A r = k_t I \quad (9)$$

Ekvation (4) och (6) kombineras med (9).

$$(C_{T0} - k\lambda) \rho U^2 A r = \frac{k_t k_\omega \omega D}{R} \quad (10)$$

Ekvation (5) sätts in i (10).

$$\left(C_{T0} - k \frac{\omega r}{U}\right) \rho U^2 A r = \frac{k_t k_\omega \omega D}{R} \quad (11)$$

ω löses ut ur ekvation (11). Det ger:

$$\omega = \frac{C_{T0} U^2 A r}{k U A r^2 \rho + \frac{k_t k_\omega D}{R}} \quad (12)$$

Insättning av ekvation (12) i (8) ger turbinens effekt som funktion av pulskvot:

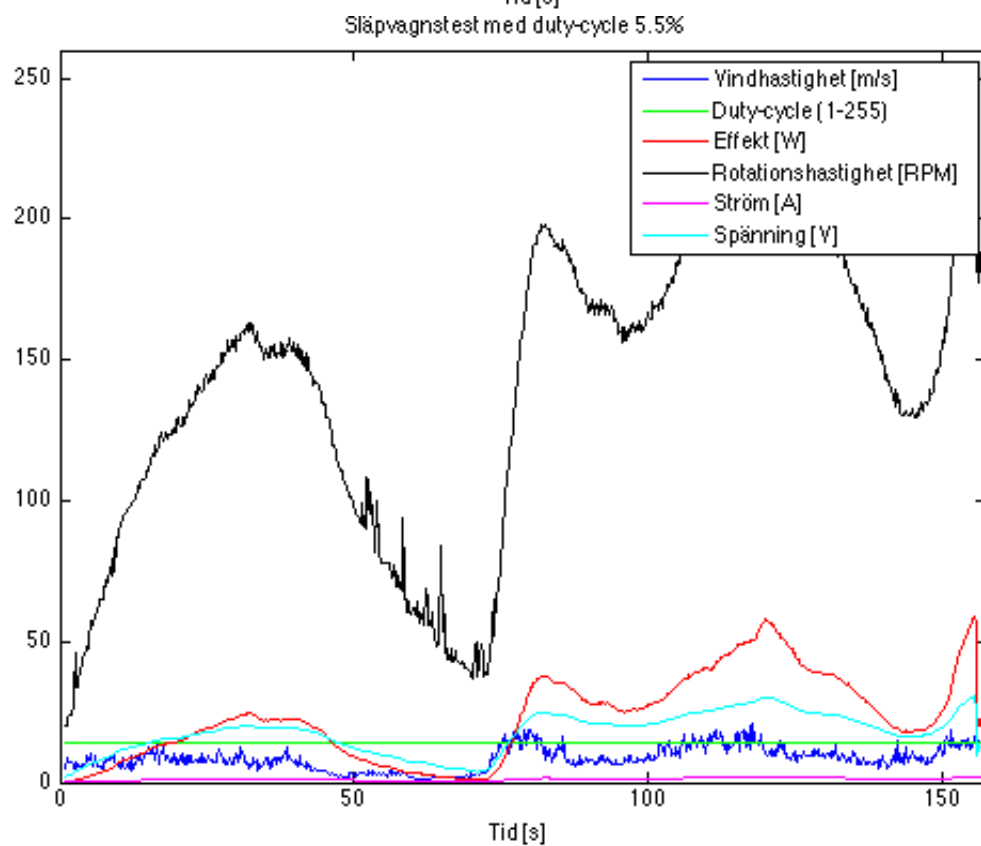
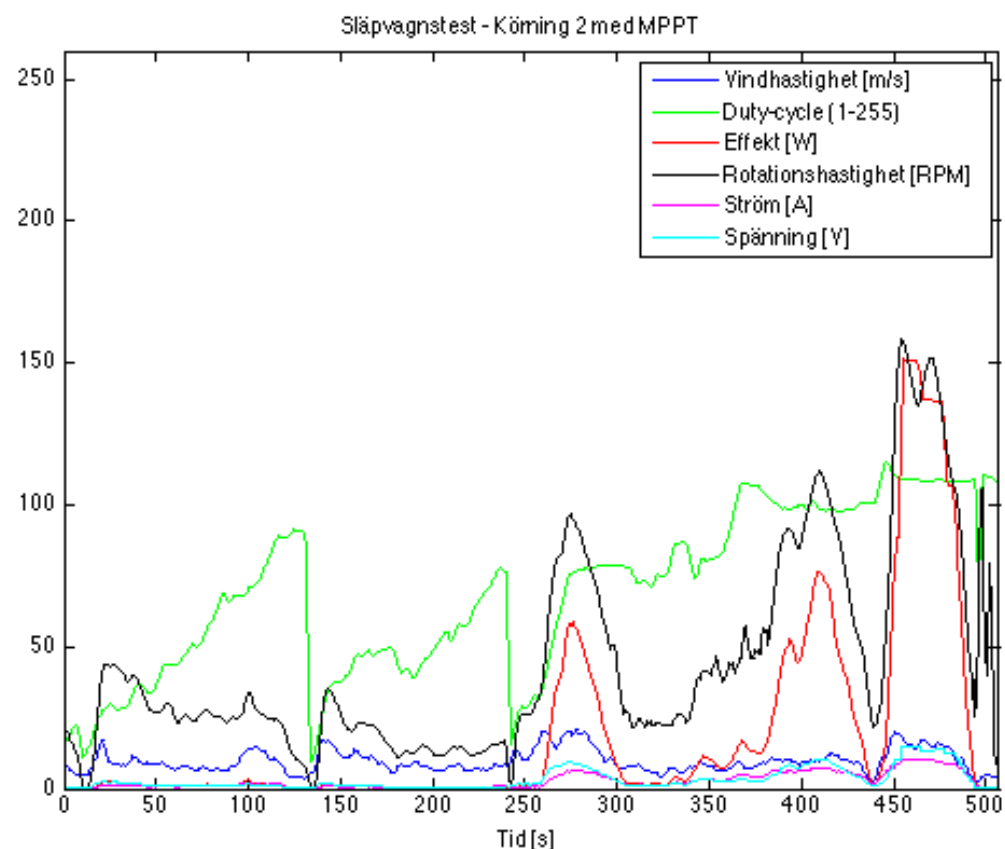
$$P_{turbin} = \frac{k_t k_\omega D \left(\frac{C_{T0} \rho U^2 A r}{k U A r^2 \rho + \frac{k_t k_\omega D}{R}} \right)^2}{R} \quad (13)$$

För att finna den pulskvot som ger maximal turbineffekt deriveras ekvation (13) med avseende på D och nollställa kontrolleras. Detta resulterar i en duty enligt:

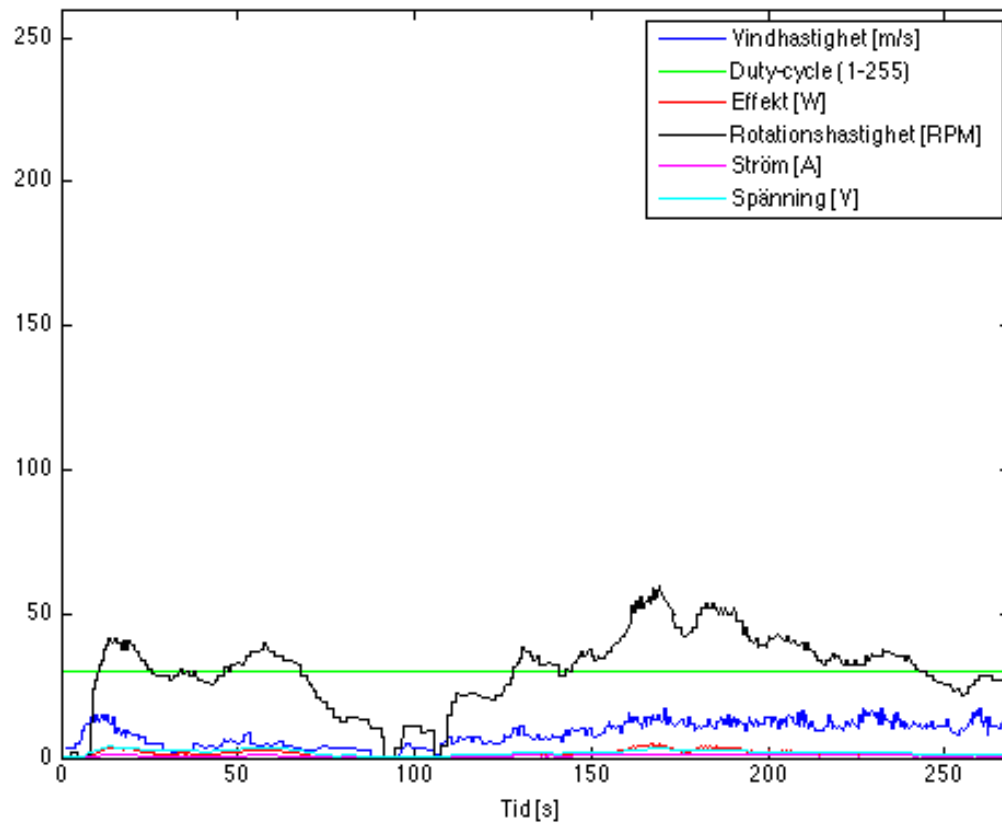
$$D = \frac{k U A r^2 \rho R}{k_t k_\omega} \quad (14)$$

Detta uttryck är det sökta och med givna parametrar ges optimal pulskvot för maximal turbineffekt.

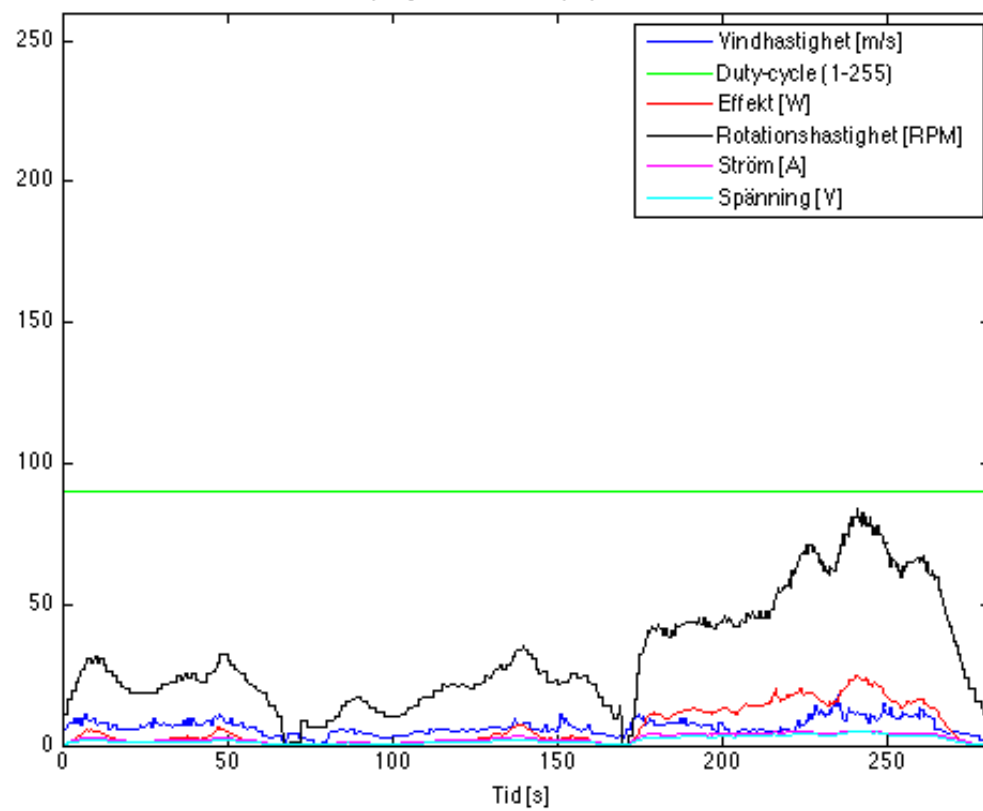
Appendix D – Testresultat från körning med vindkraftverket på släpkärra



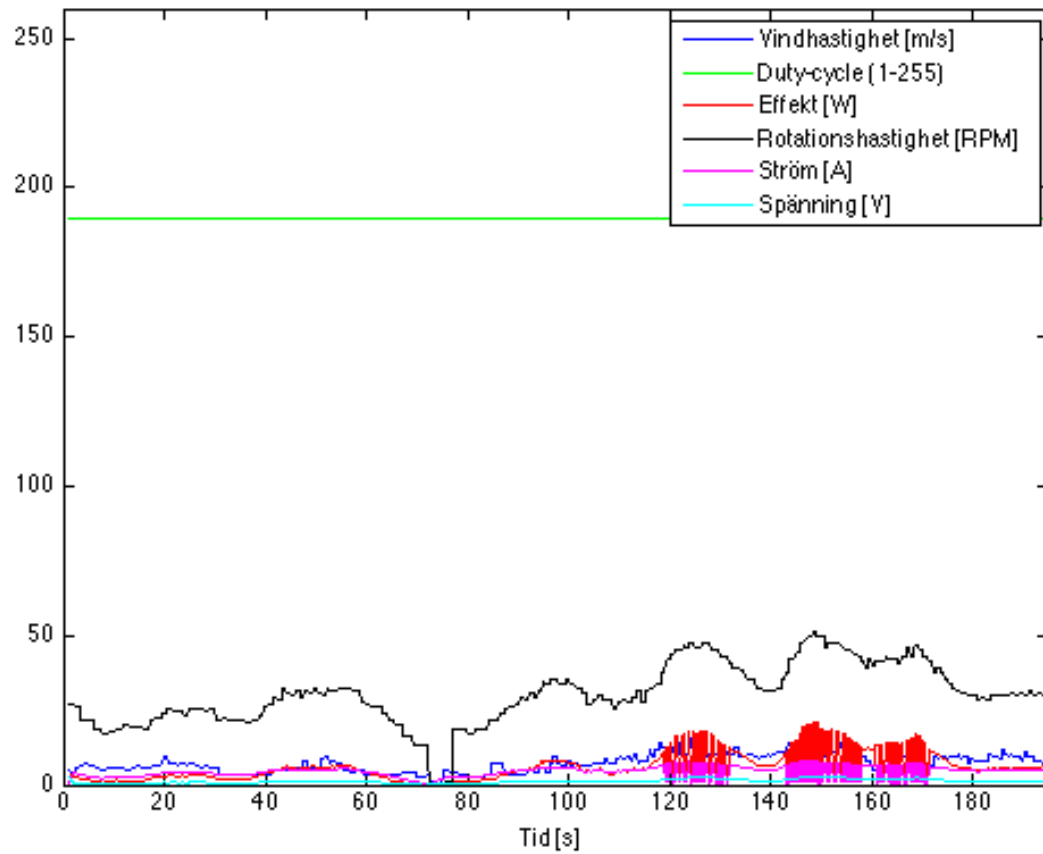
Släpvagnstest med duty-cycle 11.8%



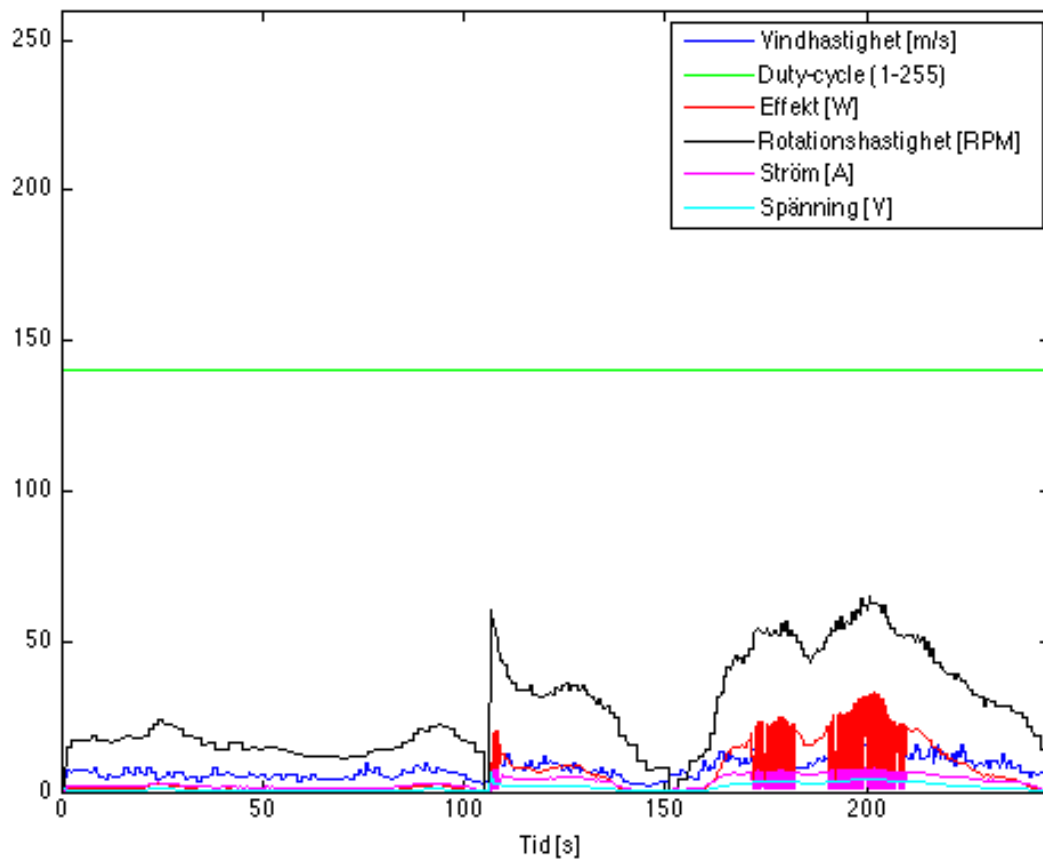
Släpvagnstest med duty-cycle 35.3%



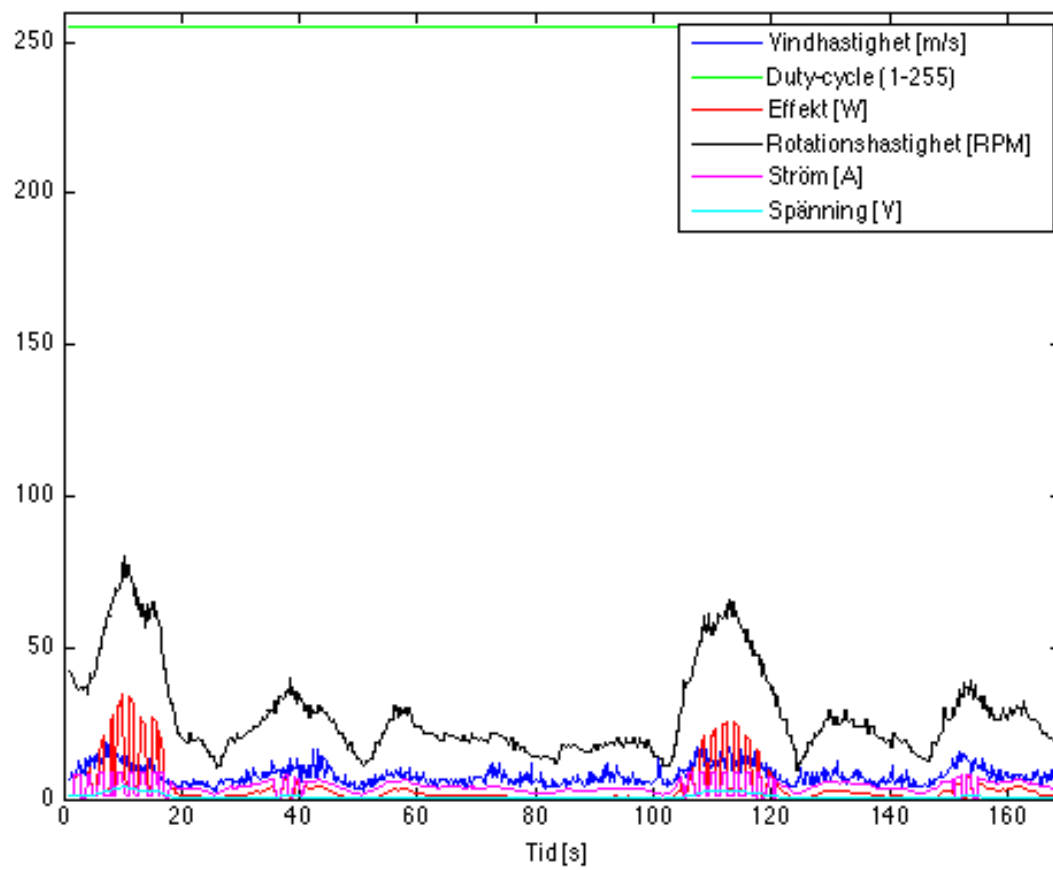
Släpvagnstest med duty-cycle 74.5%



Släpvagnstest med duty-cycle 54.9%



Släpvagnstest med duty-cycle 100%

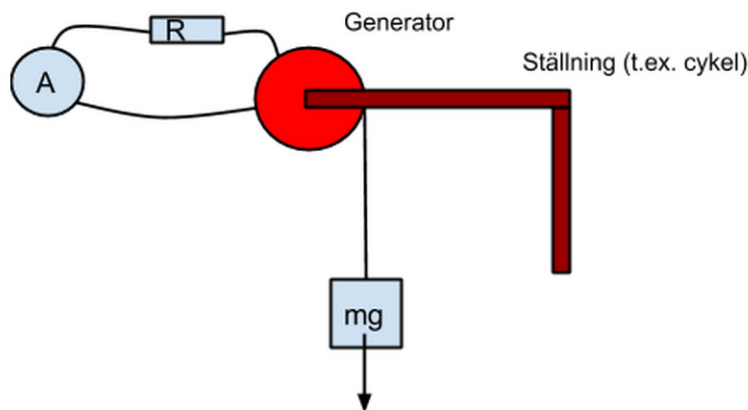


Appendix E – Metod för bestämning av momentkaraktäristik

Som det påpekats i rapporten vore det intressant att känna till generatorns moment-strömkaraktäristik. I flera litteraturkällor approximeras generatorns moment till att vara proportionellt mot strömmen gånger en konstant k_t . I flera datablad för generatorer som granskades under arbetet verkade dock inte sambandet vara så enkelt.

Följande test skulle kunna göras för en generator av typen som användes.

1. Generatorns faser likriktas (om det inte är en likströmgenerator) och likriktaren kopplas till en resistans i serie med en strömmätare. Möjligen skulle det gå att kortsluta generatormotorn utan att använda extern resistans.
2. En lätttrörlig lina med försumbar vikt lindas i ett lager varv runt generatorns nav. Till linan kopplas en hållare för tyngder, t.ex. en hink.
3. Generatormotorn placeras i ett stativ, förslagsvis direkt i en cykelram på en hög höjd. Härifrån ska vikten få fri fallhöjd.



Figur 1. Testuppställning.

4. Vikten släpps. Om generatormotorn friläggs, friktion försummas och momentbalans ställs upp fås

$$J\dot{\omega} = T - k_t(I)I = mgr - \frac{k_tE}{R} = mgr - \frac{k_t(I)k_\omega\omega}{R} \quad (1)$$

där ω är rotorns vinkelhastighet, r är navets radie och R den totala serieresistansen i kretsen. Eventuell induktans har försummats. Då kretsen nått jämvikt, dvs. då vinkelaccelerationen $\dot{\omega}$ är noll, kan moment-ström värdet lösas ut som

$$k_t(I) = \frac{T}{I} = \frac{mgr}{I} \quad (2)$$

Detta upprepas för ett antal mätpunkter.

5. Genom att variera resistansen kan den stabiliserade vinkelhastigheten ändras enligt

$$\omega = \frac{TR}{k_t k_\omega} \quad (3)$$

Då skulle ett beroende av vinkelhastighet för momentkaraktäristiken kunna utvärderas. Observera att tidigare försummade momentförluster beroende av vinkelhastighet ökar med densamma.

6. Bestämning av viktens fallsträcka och därmed lämplig maximal fallhöjd kan exempelvis göras enligt följande.

Genom Laplacetransform kan överföringsfunktionen

$$\frac{\omega(s)}{T(s)} = \frac{\tau}{\frac{J}{\tau s + 1}}, \quad \tau = \frac{JR}{k_t k_\omega} \quad (4)$$

tecknas. Generatorns elektriska konstanter måste här approximeras. Om alla ingående konstanter t.ex. är 1 utom $R = 0,1\Omega$ blir tidskonstanten $\tau = 0,1s$.

Om momentet görs som ett steg $T(s) = \frac{mgr}{s}$ ger inverstranform

$$\omega(t) = \frac{mgr\tau}{J\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)} \quad (5)$$

Vid 5τ kan detta första ordningens system antas vara insvängt. Multiplikation med r och integration ger

$$s(5\tau) = \int_0^{5\tau} v(t)dt = \int_0^{5\tau} r\omega(t)dt \approx \frac{\tau^2 mgr^2 4}{J} \quad (6)$$

Om exempelgeneratoren testas med $m = 10\text{ kg}$ blir insvängningsträckan $s \approx 0,4\text{ m}$.