Indhold

Kapitel 1

Nomenklatur

β	–	Vingernes drejning om længdeaksen	$[^\circ]$
ϵ	–	Vridet i akslen	$[rad]$
$\dot{\epsilon}$	–	Hastigheden af vridet i akslen	$[rad/s]$
λ	–	Forholdet mellem vindhastigheden og hastigheden af vingespidsen	
ρ	–	Luftens densitet	$[kg/m^3]$
ω_0	–	Netfrekvensen	$[rad/s]$
ω_r	–	Omløbstal for rotoren	$[rad/s]$
ω_g	–	Omløbstal for generatoren	$[rad/s]$
τ	–	Tidskonstant	$[s]$
D_g	–	Generatorens dæmpning	$[Nm \cdot s]$
D_s	–	Akslens dæmpning	$[Nm \cdot s]$
J_g	–	Inertimomentet for generatoren	$[kg \cdot m^2]$
J_r	–	Inertimomentet for rotoren i del I dog ækvivalent inertimoment for rotor og generator	$[kg \cdot m^2]$
K_s	–	Fjederkonstant for akslen	$[Nm]$
N	–	Antallet af poler i generatoren	
N_{gear}	–	Gearforholdet mellem ω_r og ω_g	
P_e	–	Vindmøllens udgangseffekt	$[W]$

P_r	–	Den effekt rotoren optager fra vinden	$[W]$
R	–	Vingernes radius	$[m]$
T_g	–	Det modmoment generatoren yder	$[Nm]$
$T_{g,e}$	–	Generatorens elektriske modmoment som er forskelligt fra T_r p.g.a. generatorens poltal N	$[Nm]$
$T_{g,mod}$	–	Generatorens modmoment i model II	$[Nm]$
T_r	–	Det moment rotoren overfører til gear/generator	$[Nm]$
T_{sg}	–	Momentet rotoren yder på gearets generatorside	$[Nm]$
T_{sr}	–	Momentet generatoren yder på gearets rotorside	$[Nm]$
V	–	Vindens hastighed	$[m/s]$
c_p	–	Aerodynamisk effektivitetsfaktor for rotoren	
s	–	Slippet. Defineret ved forskellen mellem ω_g og ω_0	$[rad/s]$

I anden afdeling af rapporten omtales fire forskellige regulatorer. Hvilken regulator der er aktiv vises i grafer hvor hver regulator har fået tildelt et nummer.

1	P,ω Regulatoren
2	P Regulatoren
3	$c_p$maks-Regulatoren
4	ω Regulatoren

Kapitel 2

Abstract

The main subject of this thesis is bumpless transfer. In the context of control theory this means the transfer from one controller to another as smooth as possible. The experiments with controllers and bumpless transfer is carried out on a wind turbine. The thesis is divided in two parts.

A simple model for the windturbine is made in the first part. A controller is designed to control the pitch angle of the blades at wind speeds above the critical windspeed. Below the critical windspeed the pitch angle is constant. The theory of bumpless transfer is applied to make the transfer between the two controllers smooth.

In the second part the model is extended. The wind turbine is now with variable speed as opposed to the simple model. A complete suite of controllers is designed for the windturbine. Each controller has its own individual goals. These are dependent on the wind speed. The goal is to make make a bumpless transfer between the controllers.

When the windspeed is above the critical windspeed the controller limits the power to the rated power of the windturbine. If the wind drops below the critical windspeed the output power of the windturbine also drops . Another goal of the control strategy is to investigate the possibility of smoothing or maintaining the output power in these situations. The means by which this should be done is by extracting the kinetic energy of the rotor.

In the first part a bumpless transfer was made between the two controllers. In the second part a suite of controllers was made to the windturbine. The transfer between these were smooth. Power smoothing was implemented by breaking down the rotor and thereby extracting kinetic energy from the rotor.

Kapitel 3

Indledning

3.1 Forord

Rapporten dokumenterer et eksamensprojekt udført af Ole Horsbøl. Det er lavet ved Institut for Informatik og Matematisk Modellering (IMM) på Danmarks Tekniske Universitet (DTU) i Lyngby og Vindenergi afdelingen ved Risø's forskningscenter. Vejledere er Niels Kjølstad Poulsen (DTU) og Henrik Bindner (Risø). Eksamensprojektet er afslutningen på civilingeniør studiet. Projektet har taget 5 måneder, og er lavet i efteråret 2002.

Jeg vil gerne benytte lejligheden til at takke mine vejledere: Niels Kjølstad Poulsen og Henrik Bindner for at have været inspirerende, motiverende og hjælpsomme.

3.2 Indledning

Eksamensprojektet ligger inden for området reguleringsteknik. Hovedemnet for rapporten er som titlen antyder bumpless transfer, som er en diciplin inden for hovedområdet. I denne sammenhæng betyder udtrykket 'bumpless transfer' et skift fra en regulator til en anden med så bløde overgange og så få transienter som muligt.

Styrestrategien for en vindmølle kan have vidt forskellige mål, afhængigt af vindhastigheden den er udsat for. Dette faktum gør at det kan være fordelagtigt at realisere den samlede styring med op til flere forskellige regulatorer. Dermed kan det være både relevant og nødvendigt, at undersøge om princippet for bumpless transfer kan bruges til at skifte mellem regulatorerne på en hensigtsmæssig måde. Samtidigt undersøges det, om andre relevante problemer for vindmøller kan løses.

Projektet laves i to dele. I den første laves eksperimenter med bumpless transfer på en simpel model. I den anden opstilles en samlet styring af en vindmøllemodel.

Modellen i del I er med fast omløbstal og med regulering af bladvinklen. For vindhastigheder under den kritiske vindhastighed er den optimale bladvinkel konstant. Når vindhastigheden når over den kritiske vindhastighed, skal vingen drejes væk fra vinden for stigende vindhastigheder. Det skal i del I undersøges, hvordan skiftet mellem disse to styringer foregår mest hensigtsmæssigt.

I del II udbygges modellen ved at vridet i akslen også modelleres. Desuden skal den rettes til, så møllen kan køre med et variabelt omløbstal. Det gøres ved at styre generatorens modmoment. Nu er der altså to styresignaler nemlig bladvinklen og generatorens modmoment. Det variable omløbstal indføres for at kunne optimere møllens effektoptag under mærkevinden, og for at undgå effektdyk der tiltider optræder (beskrives herunder). Der skal opstilles styrestrategier for møllen, hvor der tages højde for de forskellige vindhastigheder møllen udsættes for. Skiftet mellem disse skal udføres i henhold til principperne for bumpless transfer.

For en vindmølle der opererer over den kritiske vindhastighed, opstår der tiltider det problem, at der kommer dyk i udgangseffekten. De optræder, når vindhastigheden kortvarigt kommer under den kritiske vindhastighed. I forbindelse med den samlede styrestrategi der skal opstilles for vindmøllen, skal en løsning på det problem inkorporeres.

Til modellering og simulering bruges Matlab og Simulink i vidt omfang. Det forudsættes, at læseren har kendskab til disse programmer.

3.3 Læsevejledning

Resultater der er beregnet direkte i Matlab, er skrevet med en speciel type. Eksempelvis ser de beregnede egenværdier for en matrix sådan ud.

```
eig(Am2over) =
   -0.16
   -7.06 +36.89i
   -7.06 -36.89i
```

Som separator mellem heltalsdelen og brøkdelen af et tal bruges punktum.

Der har været lidt problemer i Matlab med at plotte grafer med momentane skift. Det har blandt andet vist sig ved, at en trinfunktion ind imellem er blevet skrå istedet for lige. Problemet er kun gældende ved momentane skift.

Appendix er ikke trykt i denne version af rapporten. For at se denne kontakt Niels Kjølstad Poulsen.

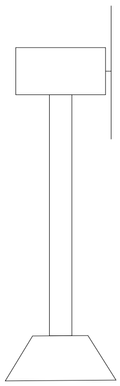
Lyngby, februar, 2003,

Ole Horsbøl, studie nummer: c000021 ________________________________

Kapitel 4

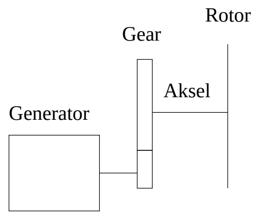
Basisviden om vindmøller

Den type vindmøller der behandles i projektet, er med horisontal aksel og med tre vinger. Møllen består af et tårn, der står på et fundament. På tårnet sidder et maskinhus. Maskinhuset kan drejes i forhold til vindretningen. På figur 4.1 ses en skitse over vindmøllen.



Figur 4.1: Skitse over en vindmølle.

I kontrolmæssig henseende er det mest interessante vingerne, og det der er i maskinhuset. Vingerne er monteret på en aksel. Da man ikke er interesseret i at, de store vinger drejer rundt med for stor hastighed, bruges et gear mellem rotor akslen og generatoren. Ved høje vindhastigheder kan det være en fordel at begrænse den effekt vindmøllen optager. Derfor kan vingerne drejes mere eller mindre væk fra vinden. For en vindmølle kan den kritiske vindhastighed beregnes. Den er defineret som den laveste vindhastighed hvor det er muligt at opnå nominel effekt. På figur 4.2 ses en skitse over komponenterne i et vindmøllehus.



Figur 4.2: Skitse over komponenterne i et maskinhus.

Generatoren kan være synkron eller asynkron. En generator består af en stator og en rotor. Statoren på en synkron og en asynkron maskine er ens. Her er en eller flere viklinger indlejret. Forskellen mellem de to generatortyper ligger i konstruktionen af rotoren.

I en synkron maskine er en eller flere viklinger indlejret i rotoren, og de er forbundet til terminaler uden for maskinen via kulbørster eller lignende. Der sendes jævnstrøm gennem rotor viklingerne, og dermed dannes et magnetfelt, der altid ligger det samme sted i forhold til rotoren. Når rotoren drejer rundt, induceres der således en spænding i statorviklingerne. Det roterende rotorfelt er foran statorfeltet, og denne forskel skyldes det moment, rotoren yder. De to felter løber synkront.

I en asynkron maskine laves der ikke et fast magnetfelt i rotorviklingerne med jævnstrøm. Rotorviklingerne er ofte slet ikke forbundet til omverdnen, men er en lukket kreds i rotoren. Som for synkronmaskinen løber rotorfeltet synkront foran statorfeltet. Forskellen er, at rotoren fysisk har et slip i forhold til disse. Dette slip genererer en strøm i rotorviklingerne, og dermed er det muligt at inducere strøm i statoren. Matematisk er slippet givet ved følgende.

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad [rad/s] \tag{4.1}$$

Her er n rotorens hastighed, og n_1 er hastigheden af statorfeltet. Slippet er således et udtryk for rotorens relative hastighed i forhold til statorfeltet. [1]

4.1 Basisviden om vind

Når vinden skal beskrives i forbindelse med vindmøller, opdeles den ofte i en middelvindhastighed og en turbulent vindhastighed. Forskellen mellem de to er den hastighed, med hvilken vinden ændrer sig. Middelvindhastigheden ændrer sig så langsomt, at den tilnærmes med en konstant, mens den turbulente vindhastighed er små ændringer omkring middelvindhastigheden. Den samlede vindpåvirkning er givet ved summen af de to bidrag.

Den frie punktvind kan matematisk beskrives ved et effektspektrum. Denne måles i et helt upåvirket vindfelt. Vinden der påvirker vindmøllerotoren, er ikke den frie punktvind. Når en vindmølle sættes op i et vindfelt, ændres vindfeltet. Ved at regne effektspektret gennem et bestemt filter opnås den effektive vind på rotoren.

Man kan altså modellere en vindpåvirkning ved at generere et signal med et effektspektrum magen til det for den frie punktvind, og så køre den gennem et bestemt filter.

I dette projekt bruges primært almindelige testpåvirkninger som trin påvirkninger.

[1] Beskrivelsen af synkron og asynkron maskiner er læst i [Kingsley 83]

Del I

Bumpless transfer: Indledende eksperimenter

I del 1 opbygges en simpel model for vindmøllen. Først beskrives aerodynamikken, der bestemmer, hvor stor effekt der trækkes ud af vinden. Den er blandt andet afhængig af den eneste styrevariabel for denne model nemlig bladvinklen β. Modellen har een tilstand, og det er generatorens omløbstal ω_g. Den er med fast omløbstal, idet generatoren er koblet direkte til elnettet.

Efter modelopbygningen beskrives en LQG-styring af møllen for vindhastigheder over den kritiske vindhastighed.

Den sidste afdeling af afsnittet omhandler bumpless transfer. Først beskrives forskellige Bumpless transfer metoder. Dernæst afprøves den mest relevante på den opbyggede model. Som nævnt styres β med en LQG-regulator over den kritiske vindhastighed. Under den kritiske vindhastighed sættes den til en fast værdi. Det er disse to strategier, der skal kobles sammen ved at bruge bumpless transfer metoden.

Kapitel 5

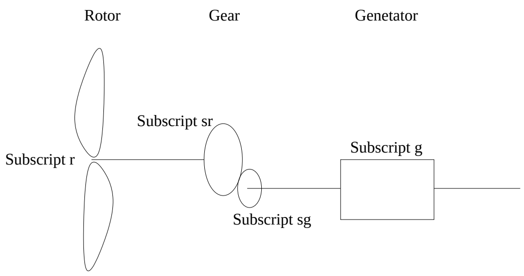
Modelbeskrivelse: Model I

5.1 Modelligninger

Til beregningerne i kapitel 5 hører en matlabfil $model1m.m$, som er vedlagt i appendix.

I dette kapitel skal der laves en simpel model for vindmøllen. De basale fysiske ligninger for systemet bruges til at lave et blokdiagram udfra, hvilket det er muligt at opskrive en tilstandsmodel for vindmøllen. Disse ligninger er ulineære, og for at de kan lineariseres, skal der bestemmes et stationært punkt. Når det er gjort, lineariseres ligningerne ved brug af blyant og papir. Udfra blokdiagrammet er det også muligt at linearisere i Matlab og Simulink. Den manuelle linearisering og den nummeriske kan så samenholdes. Til sidst i afsnittet laves nogle simuleringer i Matlab/Simulink, for at se om modellen opfører sig, som den skal.

På figuren herunder kan man se, hvor forskellige subscripts for forskellige variable hører hjemme.



Figur 5.1: Skitse med de subscripts der benyttes.

Forkortelserne står for.

r	–	rotor
s	–	shaft
g	–	generator
sr	–	på rotorsiden
sg	–	på generatorsiden

Vindens kinetiske energi omdannes til mekanisk energi af vingerne. Den effekt man kan trække ud af vinden, er givet ved følgende formel.

$$P_r = \frac{1}{2}\pi\rho R^2 V^3 c_p(\lambda, \beta) \quad [W] \tag{5.1}$$

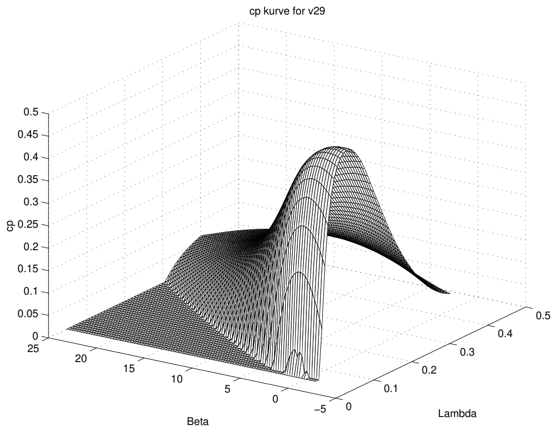
Hvor

ρ	–	luftens densitet $[kg/m^3]$
R	–	vingernes radius $[m]$
V	–	vindens hastighed $[m/s]$
c_p	–	aerodynamisk effektivitetsfaktor der er afhængig af bladvinklen β og λ (se formel 5.2).
β	–	vingernes drejning om deres længdeakse $[\,^\circ]$.

og hvor λ er givet ved.

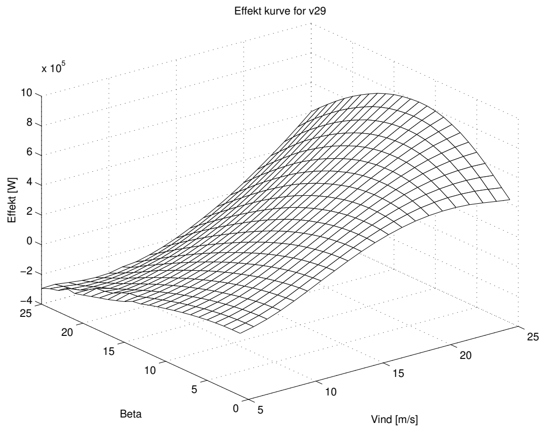
$$\lambda = \frac{V}{\omega_r R} \tag{5.2}$$

På figur 5.2 ses et plot af c_p kurven. Den er fremkommet ved ikke trivielle aerodynamiske beregninger på vingeprofilerne.



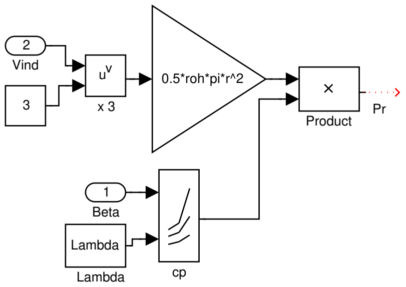
Figur 5.2: c_p kurve for Vestas v29. Værdier under nul er skåret væk.

Det er også interessant at se på effektkurven (formel 5.1) for et arbejdspunkt givet ved ω_g.



Figur 5.3: Effekt kurve for Vestas v29 ($\omega_g = 106.18$).

Formel 5.1 kan beskrives ved et blokdiagram.



Figur 5.4: Blokdiagram for formel 5.1.

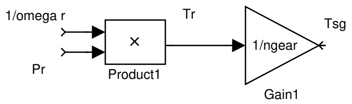
Det resulterende moment er afhængigt af rotorens omløbstal, og den effekt rotoren optager.

$$T_r = \frac{P_r}{\omega_r} \quad [N \cdot m] \tag{5.3}$$

Hele den mekaniske side at vindmøllen betragtes som værende stift. Det betyder, at det kun er gearet, der ændrer på momentet og omløbstallet.

$$\omega_g = \omega_r N_{gear} \quad [rad/s] \tag{5.4}$$

De to foregående ligninger kan også beskrives ved blokke.

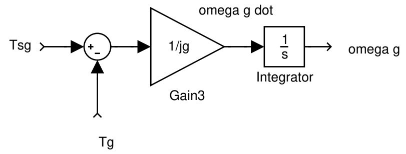


Figur 5.5: Blokdiagram for formel 5.3 og 5.4.

Newtons anden lov for roterende legmer kan opskrives for akslen fra gearet til generatoren.

$$J_g \dot{\omega}_g = T_{sg} - T_g \quad [Nm] \tag{5.5}$$

Inertimomentet J_g $[kg \cdot m^2]$ er det ækvivalente inertimoment for både rotoren og generatoren, men der er transformeret over på generatorsiden. Transformeringen af rotorinertien foregår ved at dividere med det kvadrerede gearforhold.
Formel 5.5 beskrives ved blokke.



Figur 5.6: Blokdiagram for formel 5.5.

Generatoren modellers som et system med dæmpning.

$$T_g = D_g s \quad [N \cdot m] \tag{5.6}$$

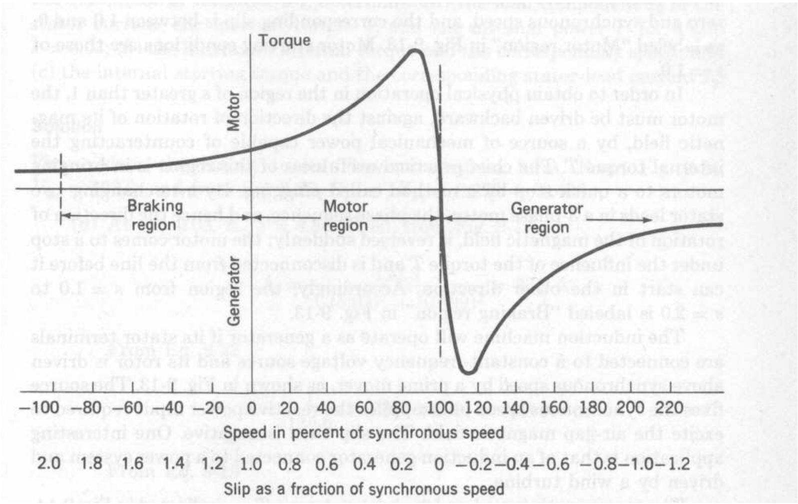
Hvor

D_g	–	generatorens dæmpning $[N \cdot m \cdot s]$
s	–	slippet $[rad/s]$

Slippet er forskellen mellem rotorens hastighed og netfrekvensen.

$$s = \omega_g - \frac{\omega_0}{N} \quad [rad/s] \tag{5.7}$$

Sammenhængen mellem slippet og generatorens moment er givet ved kurven i figur 5.7 (bemærk at slippet på kurven er defineret med modsat fortegn, af det der bruges i dette projekt).



Figur 5.7: Moment-slip graf for en asynkron generator fra [Kingsley 83].

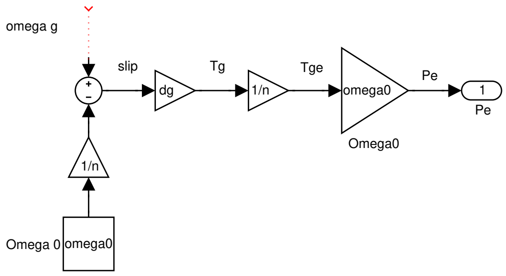
For vindmøllen arbejdes der kun på den lineære del af kurven og på generatorsiden. D_g kan derfor tilnærmes med en ret linie. Liniens hældning beregnes ud fra to kendte punkter på den lineære del. Det ene er $(0,0)$, og det andet er det punkt, hvor møllen kører med nominelt omløbstal og nominel effekt. Ud fra netfrekvensen og omløbstallet kan slippet beregnes, og ud fra effekten og omløbstallet kan momentet beregnes. I matlab filen i appendix $model1m.m$ er D_g beregnet til.

```
dg = 2365.4
```

Generatormomentet er det modmoment, der virker på rotoren som følge af slippet. Rotoren er foran statorfeltet, magnetfeltet fra statoren vil derfor søge at trække rotorfeltet til sig, og det skaber dermed et modmoment. Størrelsen af dette er bestemt af størrelsen af slippet, og det er proportionalt med generatorens dæmpning. Det er muligt at styre dette modmoment ved at styre de elektriske forhold på statorsiden. Det giver store fordele for vindmøller med variabelt omløbstal.

For at beregne det elektriske moment skal generatormomentet divideres med poltallet for generatoren.

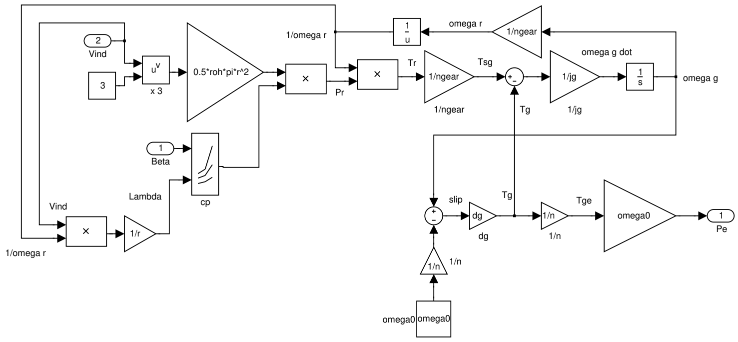
Ved at gange det elektriske moment med netfrekvensen fås vindmøllens udgangseffekt. Enheden er watt idet $(N \cdot m)/s = W$



Figur 5.8: Blokdiagram for formel 5.6-5.7 og for udgangen.

Vindmøllen er altså koblet direkte til el-nettet.

Ved at samle alle de små blokke kan et samlet blokdiagram opstilles.



Figur 5.9: Blokdiagram for vindmøllen.

Udfra blokdiagrammet opstilles en ulineær tilstandsbeskrivelse, hvor ω_g vælges som tilstand.

$$\dot{x} = \frac{\frac{T_r}{N_{gear}} - (x - \frac{\omega_0}{N})D_g}{J_g} \quad [rad/s^2] \tag{5.8}$$

Formel 5.1, 5.2 og 5.3 sættes ind, og der omskrives.

$$\dot{x} = \frac{\rho \pi R^2 V^3 c_p(\beta, \frac{V N_{gear}}{x R}) N_{gear}}{2 N_{gear} J_g x} - \frac{D_g}{J_g} x + \frac{D_g \omega_0}{N J_g} = f(x, V, \beta) \tag{5.9}$$

Udgangsligningen opskrives også[1].

$$y = (x - \frac{\omega_0}{N}) \frac{D_g \omega_0}{N} = g(x) \quad [W] \tag{5.10}$$

Der er opstillet en ulineær tilstandsmodel for en vindmølle med regulering af bladvinklen og med fast omløbstal.

5.2 Linearisering i hånden

Når der regnes på små afvigelser (Δx) fra en stationær tilstand ($\tilde{x}$), kan en lineær model benyttes til at beskrive afvigelsen.

$$x = \tilde{x} + \Delta x \tag{5.11}$$

Først bestemmes en stationær tilstand for 5.9. V_0 og β_0 er stationære input, og de definerer det stationære udgangspunkt. Ved at sætte den afledede til nul, og så løse for x opnås en komplet beskrivelse af det stationære punkt.

$$0 = \frac{\rho \pi R^2 V_0^3 c_p(\beta_0, \frac{V_0 N_{gear}}{x_0 R}) N_{gear}}{2 N_{gear} J_g x_0} - \frac{D_G}{J_G} x_0 + \frac{D_g \omega_0}{N J_g} \tag{5.12}$$

Dette nulpunkts problem løses ved at bruge Newton-Raphson's metode.

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n, \beta_0, V_0)}{f'(x_n, \beta_0, V_0)} \tag{5.13}$$

Det er altså nødvendigt at bestemme den afledede til ligning 5.9

$$\left. \frac{\partial f(x, V_0, \beta_0)}{\partial x} \right|_{x=x_0} = \frac{\rho \pi R^2 V_0^3}{2 J_g} \left[\frac{x_0 \frac{dc_p}{dx} - c_p}{x_0^2} \right] - \frac{D_g}{J_g} \Leftrightarrow \tag{5.14}$$

$$\left. \frac{\partial f(x, V_0, \beta_0)}{\partial x} \right|_{x=x_0} = \frac{\rho \pi R^2 V_0^3}{2 J_g} \left[\frac{x_0 \frac{dc_p}{d\lambda} \frac{V_0}{R x_0^2} - c_p}{x_0^2} \right] - \frac{D_g}{J_g} \tag{5.15}$$

[1] Ligningerne for vindmøllen der er brugt i dette kapitel, er primært taget fra [XIN 93]

Ligning 5.13 løses i Matlab ved hjælp af en simpel *while* løkke. Se appendix *model1m.m* for kildeteksten. c_p er givet ved en tabel. og afledede af c_p er bestemt efter følgende princip.

$$\frac{dc_p}{d\lambda} = \frac{c_p(\beta_0, \lambda_i) - c_p(\beta_0, \lambda_{i-1})}{\lambda_i - \lambda_{i-1}} \tag{5.16}$$

Ved at bruge disse konstanter kan en stationær tilstand beregnes [2].

$\rho = 1.225[kg/m^3]$	$R = 29/2[m]$	$V_0 = 14[m/s]$
$N_{gear} = 24.6$	$J_g = 158.72[kg \cdot m^2]$	$D_g = 2365.4[Nm \cdot s]$
$N = 3$	$\omega_0 = 50 \cdot 2 \cdot \pi[rad/s]$	$\beta_0 = 11.2$

Den stationære β bestemmes udfra en valgt vindhastighed. For denne vindhastighed findes der en værdi for c_p, der giver nominel effekt. Den kan omsættes til en værdi for β, idet λ er konstant. λ er konstant, fordi vinden er fastlagt, og fordi møllen kører med nominelt omløbstal. Der skrues så på β, til den ønskede c_p findes, og dermed vil møllen optage nominel effekt. Beregningerne findes i matlabfilen i appendix *model1m.m*.

Den stationære tilstand er beregnet til.

```
x_n = 105.6219
```

Med det resultat kan den stationære udgang beregnes. Det gøres ved at bruge ligning 5.10.

```
y = 223.46e+03
```

Ved at rækkeudvikle ligning 5.11, hvor kun første led i udviklingen bruges, fås denne ligning.

$$\dot{\Delta x} = \left.\frac{\partial f(x,\tilde{u},\tilde{v})}{\partial x}\right|_{x=\tilde{x}} \cdot \Delta x + \left.\frac{\partial f(\tilde{x},u,\tilde{v})}{\partial u}\right|_{u=\tilde{u}} \cdot \Delta u + \left.\frac{\partial f(\tilde{x},\tilde{u},v)}{\partial v}\right|_{v=\tilde{v}} \cdot \Delta v \tag{5.17}$$

Her er de partielle afledede matricerne i en tilstandsmodel. På den måde kan en tilstandsmodel hurtigt beregnes. Den afledede med hensyn til x er allerede bestemt i 5.15, og beregnes til.

```
A = -15.0618
```

[2] Konstanterne er taget fra Risø's vindmølle model for Vestas v29

Den afledede med hensyn til β bestemmes.

$$\left.\frac{\partial f(x_0, V_0, \beta)}{\partial \beta}\right|_{\beta=\beta_0} = \frac{\rho\pi R^2 V_0^3}{2J_g x_0}\frac{dc_p}{d\beta} \tag{5.18}$$

Ved at indsætte fås B matricen.

```
B = -1.3991
```

Den afledede med hensyn til V giver en B_v matrice.

$$\left.\frac{\partial f(x_0, V, \beta_0)}{\partial V}\right|_{V=V_0} = \frac{\rho\pi R^2 V}{2J_g x_0}\left[3V^2 c_p + V^3\frac{dc_p}{d\lambda}\frac{N_{gear}}{\omega_g R}\right] \tag{5.19}$$

B_v beregnes til

```
Bv = 3.1188
```

C matricen bestemmes ved at tage den afledede af 5.10 med hensyn til tilstanden x.

$$\left.\frac{\partial g(x)}{\partial x}\right|_{x=x_0} = \frac{D_g\omega_0}{N} \tag{5.20}$$

C beregnes til.

```
C = 247.71e+03
```

Der er bestemt en stationær tilstand for den ulineære tilstandsmodel, og den er lineariseret [3].

5.3 Linearisering i Matlab

Stationære tilstande og tilstandsmatricer kan også bestemmes i Matlab og Simulink. Et diagram til det formål er allerede opstillet i simulink (figur 5.9). For at bestemme den stationære tilstand påtrykkes de ønskede stationære input. Der gættes på en realistisk startværdi for integratoren (tilstanden). Herefter bruges følgende Matlab kommando til at bestemme en stationær tilstand.

```
[X,U,Y,DX]=trim('model1')
```

[3] Lineariseringsformlerne og principperne er læst i [Jannerup 00 et.al.]

Inputtet er simulinkmodellen, og outputtet er et stationært punkt defineret ved tilstanden X indgangen U og udgangen Y. Det sidste output DX er den afledede, som trim algoritmen søger at minimere ved at skrue på X,U og Y. Resultatet er.

```
X = 105.6219
U =  0
     0
Y = 2.2346e+05
DX = 2.5815e-10
```

Den stationære tilstand X og den stationære udgang Y er nøjagtig magen til dem, der er beregnet ovenfor. En anden Matlab kommando kan linearisere systemet.

```
[A,B,C,D]=linmod('model1',X,U)
```

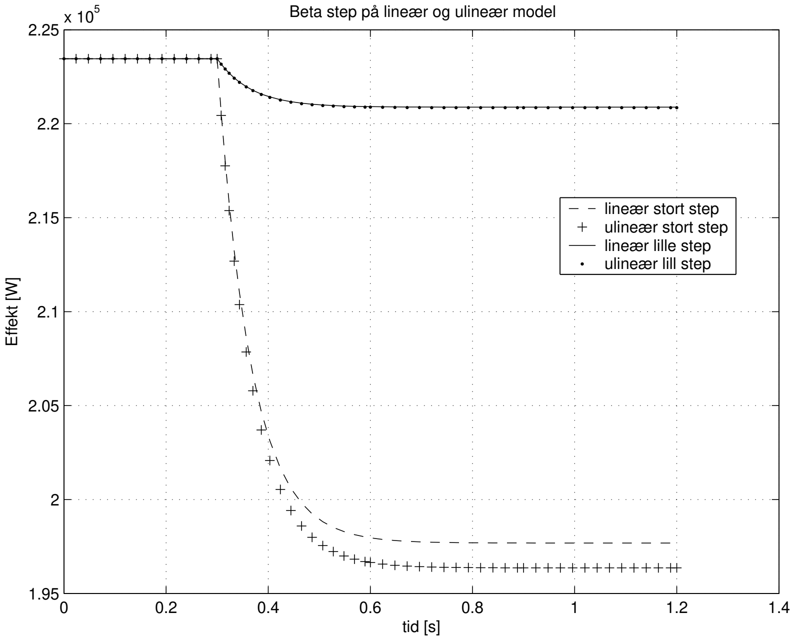
Inputtet er simulinkmodellen, den stationære tilstand og det stationære input. Outputtet er en tilstandsmodel for vindmøllen.

```
A = -15.0573
B = -1.4013    3.0848
C = 2.4771e+05
D =  0     0
```

Der er fin overensstemmelse mellem de beregnede og de nummerisk bestemte tilstandsmatricer. Grunden til de små forskelle må skyldes, at der grundlæggende er tale om to forskellige metoder. Beregningerne i hånden er baseret på analytiske principper, mens dem i Matlab er baseret på nummeriske.

5.4 Simulationer

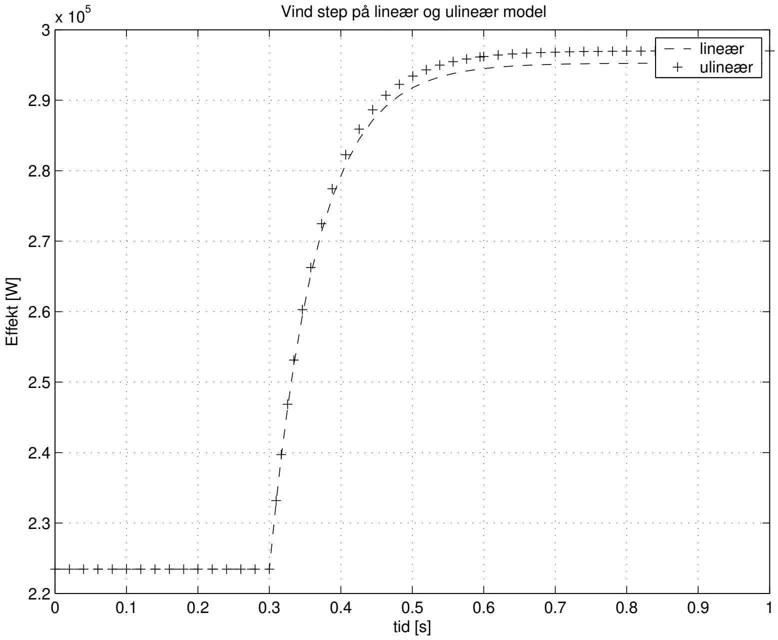
For lige at få en fornemmelse for modellen gennemføres et par simulationer. Den lineære model er fundet ved et stationært input på $u = [11.2, 14] = [\beta, V]$. Først påtrykkes et trin på beta væk fra den stationære værdi på 11.2 °. Der laves et lille trin på 11.2·0.01 ° og et stort trin på på 11.2·0.1 °



Figur 5.10: Trinpåvirkning på Beta.

Den lineære og den ulineære model følges fint ad. For det lille trin væk fra stationærtilstanden er forskellen mellem de to modeller mindre end for det store trin. Altså jo længere væk fra stationærtilstanden der opereres, jo dårligere en tilnærmelse er den lineære model. Desuden ses det som forventet, at udgangseffekten falder, når beta bliver større, altså jo mere vingen drejes væk fra vinden.

Den næste simulation er et trin på vindindgangen fra 14 m/s til 14·0.1 m/s.



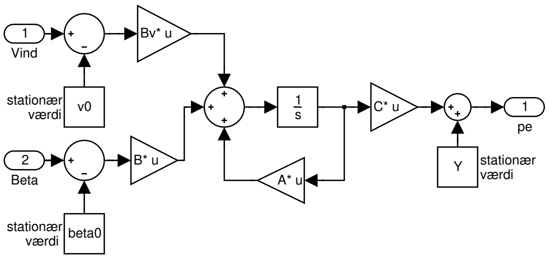
Figur 5.11: Trinpåvirkning på vindindgangen.

Som ventet er resultatet større udgangseffekt. Desuden er der også fin overensstemmelse mellem den lineariserede model og den ulineære model.

Kapitel 6

Regulering

Til beregningerne i dette og det næste kapitel hører en matlabfil. Den er vedlagt i appendix *observerm1m.m*.
Til den opbyggede model fra forrige kapitel laves en LQG-regulator baseret på en observer. Grunden til at der indføres en observer, er at en af de bumpless transfer metoder, der foreslås i litteraturen, netop bygger på en observerbaseret regulator. Som reguleringsobjekt bruges en lineær model af vindmøllen. Den ulineære model bruges ikke, og det gør den ikke for at holde simuleringsmodellen så simpel som muligt. Så bliver man ikke forstyrret af forskellige uvedkommende fænomener, når man skal undersøge virkningerne af bumpless transfer. For at få signaler der svarer til virkeligheden, skal de forskellige stationære værdier lægges til og trækkes fra på passende steder. På figuren ses den lineariserede udgave af vindmøllen med stationære værdier. Modellen er lineariseret ved de stationære input $u = [\beta, V] = [0.7, 11]$.



Figur 6.1: Tilstandsmodel for vindmøllen +/- stationære værdier.

LQG-regulatoren er givet ved en forstærknings matrix K_{obs}. Denne bestemmes, så $u = -K_{obs}(x - x_0)$ mimimerer kostfunktionen.

$$J = \int x'Qx + u'Ru + 2 * x'Nu \quad dt \tag{6.1}$$

Her er Q og R vægte, der kan bruges til at straffe enten styresignalet eller tilstanden i kostfunktionen. De indstilles, så styresignalet ikke ændrer sig hurtigere, end de $10\,^\circ/s$ som er grænsen for ændringen af bladvinklen. N vægten er en diagonalvægt, der ikke bruges, og den sættes derfor til 0.

```
Q=1;
R=0.01;
N=0;
```

Kostfunktionen kan også formuleres som en Riccati ligning, og det er ved løsningen af den, at K_{obs} fremkommer. I praksis gøres alt dette i Matlab ved følgende kald.

```
[Kobs,S,E] = lqr(A,B,Q,R,N);
```

Her er E lukketsløjfe egenværdier, og S er løsningen til Riccati ligningen. I tilfældet her bliver forstærkningen og egenværdien.

```
Kobs = -3.9279
E = -20.5574
```

Der skal laves en observer til møllen. Den laves ved at tage en kopi af systemet fra figur 6.1 og udbygge den. Det betyder, at der benyttes en perfekt estimation af vinden, og det gøres for at få et så klart billede af problematikken, nemlig bumpless transfer, som muligt. Systemet udbygges med en tilbagekobling af forskellen mellem udgangen og den estimerede udgang for at implementere observeren. Denne tilbagekobling føres igennem en forstærkningsmatrix, som skal beregnes. Ved en analyse af en observers dynamik viser det sig, at den er bestemt ved A og C matricerne. For at få et stabilt sytem må man lave en polplacering udfra de to matricer. Det gøres i Matlab ved kommandoen.

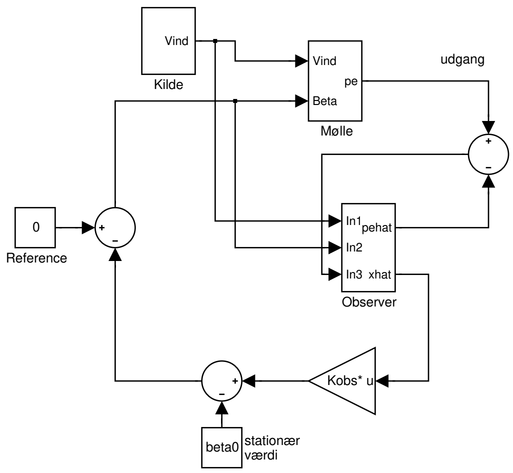
```
Lobs=place(A,C,5*E)
```

Som det ses vælges observerens poler 5 gange så langt ude som systemets. Jo hurtigere observerens poler er, jo hurtigere er den til at estimere tilstandene i reguleringsobjektet. Forstærkningen og polen beregnes til.

```
Lobs = 3.5415e-04
egenlqgobs = -102.7870
```

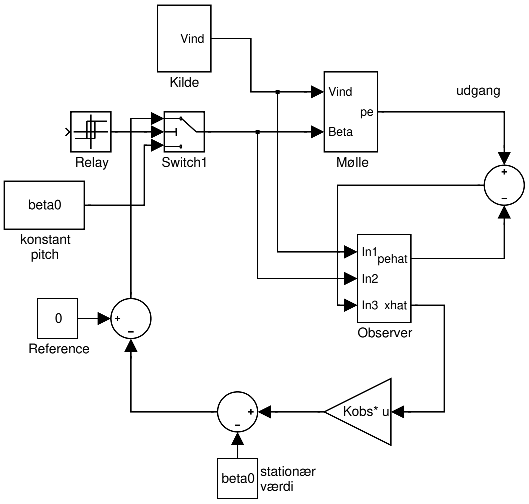
Som det ses er forstærkningen ikke særligt stor. Da systemet og observeren er nøjagtige kopier af hinanden, er det sådan set heller ikke nødvendigt med denne tilbagekobling.

Modellen og observeren kan samles i et blokdiagram.



Figur 6.2: Diagram for reguleringsobjekt og regulator.

Den nu beregnede regulering, kommer til at indgå i en overordnet styrestrategi for møllen. Når vindhastigheden er høj bruges LQG-regulatoren. Når vindhastigheden er lav gælder det om at få så megen effekt ud af vinden som muligt, og derfor drejes vingen helt op i vinden. Den optimale vinkel ligger lige under 0°, men i praksis bruges ofte 0.5°. Ved den højere vinkel reduceres den tid, det tager at dreje vingen væk fra vinden. Denne (konstante) regulator bygges nu ind i systemet, sammen med en mekanisme der kan skifte mellem de to regulatorer.



Figur 6.3: Diagram med to regulatorer.

Skiftet mellem de to reguleringer diskuteres nærmere i kapitel 7.

Kapitel 7

Bumpless transfer

For at lave skiftet mellem for eksempel to regulatorer så smertefrit som muligt eksisterer der forskellige teknikker. Disse går ind under fællesbetegnelsen *Anti windup og Bumpless transfer*. Grunden til at de to er slået sammen, er at der er mange lighedspunkter både i problematikkerne og i løsningerne. Den bumpless transfer teknik der afprøves her, er blandt andet beskrevet i artiklen [Åström og Rundqwist 89] og i bogen [Åström 97] (ses også i tidligere udgaver). Metoden er bygget op omkring tilstandsbeskrivelser og tilstandsobservere.

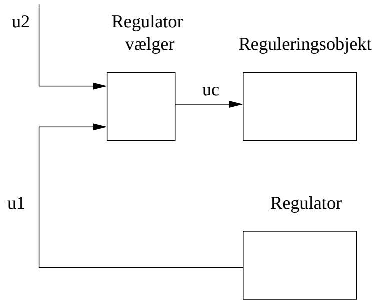
Ideen bygger egentlig på et "integrator anti-windup"princip. Det vil sige at hovedformålet er at undgå at tilstandene i regulatoren løber løbsk, hvis en aktuator går i mætning. Det viser sig, at det ikke er nok til at undgå transienter i skiftet, men at der er brug for yderligere modifikationer.

Målet med bumpless transfer teknikken kan formuleres således: "Udgangen på den latente eller passive regulator skal til alle tider være lig det aktive styresignal, der påvirker reguleringsobjektet". På den måde er den latente regulator hele tiden klar til at blive skiftet ind, og det vil ske uden transienter. Det er selvfølgelig en optimal og måske urealistisk situation, men det er det mål, der arbejdes hen imod.

Der beskrives tre bumpless transfer metoder. Det skal bemærkes, at det er den først beskrevne, der er benyttet i kapitlets afsluttende simulationer.

7.1 Regulator med eksplicit observer

Først ses på tilfældet, hvor regulatoren er baseret på en observer. På figur 7.1 er der en forklarende skitse. Hvis styresignalet der fødes tilbage til observeren, er $u1$, kan der ske det, at observeren og reguleringsobjektet ikke får det samme styresignal. Det vil ske, hvis det aktive styresignal er $u2$. Derved bliver observerens tilstande ikke er lig reguleringsobjektets. Man risikerer, at at observertilstandene løber løbsk. Det undgås ved at føre det faktiske styresignal uc tilbage til observeren. Så vil observeren nemlig fungere efter hensigten.



Figur 7.1: Skitse over styresignaler.

På figuren (7.1) ses et eksempel, hvor det aktuelle styresignal uc ikke nødvendigvis er det som regulatoren producerer. Eksemplet kan fortolkes som en aktuatormætning, hvor det andet styresignal $u2$ er konstant og kobles ind ved en vis grænse. Men styresignalet $u2$ kunne også komme fra en anden regulator. Det ses, at Anti windup og Bumpless transfer er tæt beslægtede.

I [Åström 97] er følgede ligninger givet til beskrivelsen af en anti windup algoritme. Som det ses, bygger de på en observerbaseret tilstandsregulering. Det man skal lægge mærke til er, at det er det begrænsede signal, der kobles tilbage, og bruges til beregningen af den næste observer tilstand. Modellen er diskret, men princippet er også gældende for kontinuerte systemer.

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + K\Big(y(k) - \hat{y}(k|k-1)\Big) \tag{7.1}$$

$$u_c(k) = sat\Big[L\Big(x_m(k) - \hat{x}(k|k)\Big) + L_c u_c(k)\Big] \tag{7.2}$$

$$\hat{x}(k+1|k) = \Phi\hat{x}(k|k) + \Gamma u_c(k) \quad (7.3)$$

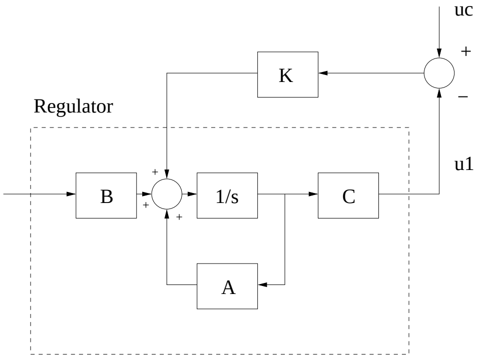
$$x_m(k+1) = f\Big(x_m(k), u_c(k)\Big) \quad (7.4)$$

$$\hat{y}(k+1|1) = C\hat{x}(k+1|k) \quad (7.5)$$

x_m og u_c udgår fra en reference model. De er dermed en slags reference signaler, x_m for tilstandene og u_c for styresignalet.

7.2 Regulator uden eksplicit observer

I det tilfælde hvor regulatoren ikke har en eksplicit observer, indbygges en observer mekanisme. Regulatoren opskrives på tilstandsform.



Figur 7.2: Diagram over bumpless transfer strategi for regulator uden eksplicit observer.

Der laves en tilbagekobling af fejlen på styresignalet. I den situation hvor de to styresignaler er forskellige, vil denne tilbagekobling få styresignalet u1 til, at arbejde hen imod det styresignal der aktueres. Hvis regulatoren er latent, vil den dermed stå i den rigtige tilstand parat til at blive koblet ind. Hvis der er risiko for Anti windup, vil tilbagekoblingen sørge for at regulatortilstandene ikke løber løbsk.

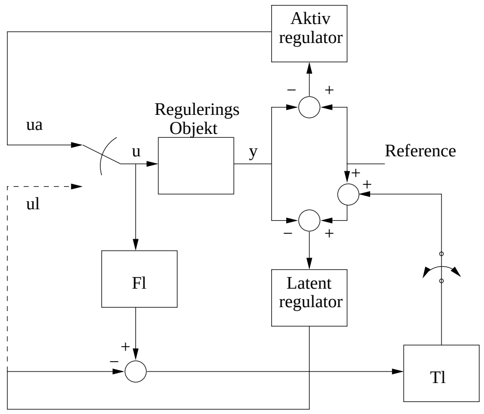
Dynamikken er, som ved en observer, givet ved matricerne A og C, og forstærkningsmatricen beregnes, så det samlede system er stabilt. Det vil sige at (A-KC) skal have egenværdier i venstre halvplan. Det garanterer, at systemet vil svinge ind til nul, og dermed at styresignalfejlen vil være nul. Systemet er dog ikke en observer i stringent forstand, idet tilstandsbeskrivelsen af regulatoren ikke er en tilstandsbeskrivelse af reguleringsobjektet.

Man skal være opmærksom på, at denne metode fungerer dårligt med en observerbaseret regulering. Her vil man have en observer, der prøver at hale regulatortilstandene i retning at reguleringsobjektets tilstande. Samtidigt vil den ovenfor introducerede styresignal-observer forsøge at trække i en anden retning. De to observere kommer altså til at stå og arbejde mod hinanden. Det er som udgangspunkt en uheldig egenskab for en regulator.

7.3 Tracking loop

Metoden er blandt andet beskrevet i [Graebe og Ahlén 96]. Den bygger på overføringsfunktioner og regulatorer som PID-regulatoren. Metoden ligger egentligt uden for dette projekt, men nævnes for en god ordens skyld, idet den har givet udemærkede resultater.

På figuren (7.3) ses tracking algoritmen. For overskuelighedens skyld er trackingen kun vist for den ene regulator, men det er selvfølgeligt muligt at gøre for begge. Som det ses er der to regulatorer en aktiv og en latent. Den aktive indgår på helt normal vis i en reguleringssløjfe med reguleringsobjektet. Den latente indgår i sin egen sløjfe, der via Fl og Tl som regulatorer skal holde den latente regulators udgang lig den aktive regulators udgang. Referencen til denne sløjfe er dermed det aktive styresignal u. Når der skiftes regulator, ændrer de to kontakter position. Så kommer forbindelserne til at stå, så den nye aktive sløjfe ligner en helt normal reguleringssløjfe blot med en ny regulator.



Figur 7.3: Bumpless transfer med PID tracking.

Den indkoblede regulator vil have en korrekt startværdi, og der vil altså komme en glidende overgang mellem de to regulatorer.

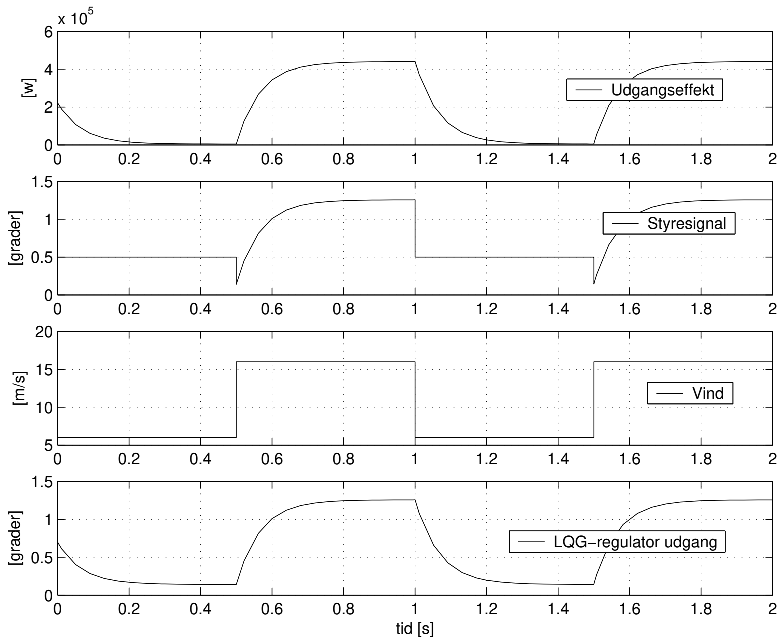
7.4 Simulationer

I kapitel 6 er der lavet en reguleringsmetode bestående af en observerbaseret tilstandsregulering og en konstant regulering. Systemet skal skrues sammen ved hjælp af princippet beskrevet under 7.1 *Regulator med eksplicit observer*. Der skal altså skiftes mellem de to regulatorer på en intelligent måde.

7.4.1 Skift bestemt af vinden

I forsøget her skiftes der regulator, når vindhastigheden passerer 12 m/s.

På figur 6.3 ses, hvordan regulatorskiftet kan implementeres. Det bemærkes, at det er det aktive styresignal, observeren har som input. Vindsignalet er i simulationen et firkant signal.

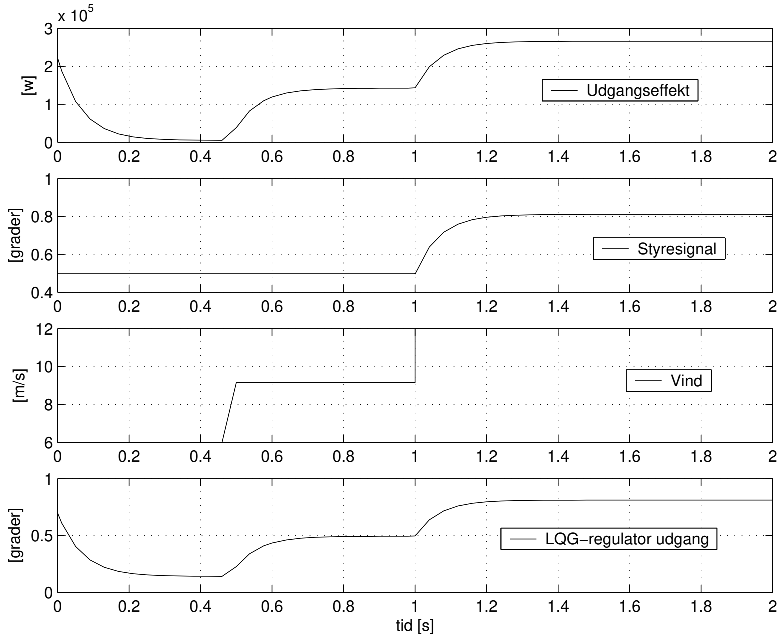


Figur 7.4: Det aktive styresignal sendes til observeren.

Det er konstateret, at observeren virker efter hensigten. Det vil sige ,at mølle tilstandene og observertilstandene er fuldstændigt ens. Til gengæld kan man på plottet af styresignalet se, at der er noget galt. Der er et uønsket dyk ved skiftet fra den konstante bladvinkel til den LQG regulerede bladvinkel. Det skyldes, at LQG regulatoren ikke står i den ønskede tilstand på det tidspunkt, hvor den kobles ind. Regulatoren er lavet som en tilstandsregulering, der bygger på de estimerede tilstande. Det betyder, at regulatoren følger de rigtige tilstande, der igen følger indgangene. Der er altså ikke nogen eksplicit tracking mekanisme, der sørger for, at udgangen af den latente LQG regulator står på $0.5\,^{\circ}$. Det ville være den optimale situation for en bumpless transfer strategi.

Grunden til at der kommer et dyk, er at observerens tilstande, har indstillet sig på den noget lavere vindhastighed, og dermed har regulatoren skruet ned for bladvinklen. Ved det hurtige spring til den høje hastighed skrues igen op for bladvinklen, men observerens dynamik er ikke synkroniseret med den mekanisme, der bestemmer skiftetidspunktet. Derfor er LQG udgangen, stadig på en værdi der er langt under de ønskede 0.5 °, på det tidspunkt hvor der skiftes.

Der prøves med et blødere skift for at illustrere den ovenforstående forklaring. I eksperimentet her starter vinden med at være 6 m/s, så skifter den til 9.15 m/s, hvor den bliver et øjeblik, før den endligt skifter op til 12 m/s.

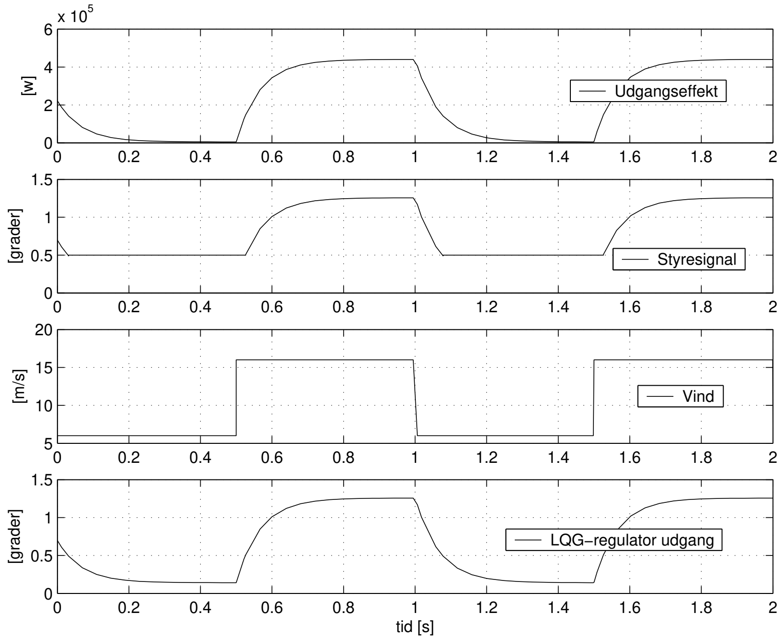


Figur 7.5: Vindsignal der giver en transientfri overgang.

På grafen for LQG-regulatorens udgang kan man nu se, at udgangen når at stabilisere sig på den stationære værdi efter det første skift. Ved det næste skift står regulatoren rigtigt, og der kommer ingen transienter i styresignalet. Situationen er selvfølgelig noget akademisk, men i næste afsnit benyttes den opnåede viden til at forbedre metoden.

7.4.2 Skift bestemt af tilstandsregulatorens udgang

Som vist i forrige sektion er det ikke optimalt at bruge vindhastigheden til at bestemme, hvornår der skal skiftes regulator. Desuden blev det konstateret, at regulatorens tilstand har stor betydning for, hvordan skiftet kommer til at forløbe. Det er derfor nærliggende at forsøge at bruge regulatorens udgang til at bestemme skiftetidspunktet. Figur 7.6 viser udfaldet af det eksperiment. Når vinden vokser fra under den kritiske vindhastighed og op, skiftes der regulator i det øjeblik hvor den latente regulatorudgang passere de $0.5\,°$. Omvendt når vinden er over den kritiske vindhastighed og falder til under, så skiftes der regulator, når den aktive LQG-regulator passerer $0.5\,°$ på vej nedad.



Figur 7.6: Udgangen af regulatoren bruges til at bestemmet skiftetidspunktet.

Som det ses på graferne, giver det et fuldstændigt transientfrit styresignal. Her er målsætningen for bumpless transfer nemlig delvist opfyldt. Den latente regulator skal have samme værdi på sin udgang som den aktive. Det har den ikke til alle tider, men i det øjeblik hvor der skiftes, har den, og det er nok.

7.5 Opsummering

I del I er en simpel vindmøllemodel opstillet. Der er designet en LQG-regulator og en konstant regulator til den. I sidste afdeling er der eksperimenteret med at få skiftet mellem de to til at gå så pænt som muligt. Det er påvist, at når styresignalerne krydser hinanden, er det et godt tidspunkt at skifte regulator på.

Del II

Bumpless transfer: Vindmølle model

I del II udbygges modellen fra del I. For det første medberegnes akslens stivhed, så der kan være forskellige hastigheder i akslens to ender. Det giver et mere realistisk billede at vindmøllen. For det andet kobles generatoren fra el-nettet, så møllen ikke længere kører med fast omløbstal. Det signal der påtrykkes generatoren på statorsiden, bruges til at styre modmomentet. Generatorens modmoment er således sammen med β en styrevariabel.

Måden man styrer vindmøllen på ved forskellige vindhastigheder, er ikke uvæsentlig. Det kan godt betale sig at opstille forskellige strategier ved forskellige vindhastigheder. Der opstilles fire forskellige styringer, som forklares og implemteres.

Efter at de er lavet hver for sig, opstilles en algoritme, der kan skifte mellem dem på fornuftig vis. Hvis man ikke er omhyggelig i den fase, risikerer man at få grimme styresignaler, der enten kan belaste mekanisk eller give et grimt udgangssignal. Erfaringerne fra del I med bumpless transfer bruges til at løse det problem.

Som nævnt tidligere kan der opstå dyk i udgangseffekten, når møllen opererer over den kritiske vindhastighed. Disse skyldes midlertidige fald i vindhastigheden. En af de fire ovennævnte styringer er indført netop for at løse det problem. Når rotoren kører rundt, har den oplagret en mængde kinetisk energi. Ved at bremse rotoren ned undersøges om den dermed frigjorte kinetiske energi, kan bruges til at udglatte de før omtalte effektdyk.

Blandt andet for at afprøve den ide er der indført variabelt omløbstal. En anden grund er at det så er muligt at optimere rotorens effektoptag for vindhastigheder under mærkevinden. Mere om det under c_p-maks. regulatoren.

Kapitel 8

Modelbeskrivelse: Model II

Som sagt udbygges modellen fra del I. Udbygningen består i, at vridet i akslen moddeleres. Desuden modelleres møllen med variabelt omløbstal. Hele den aerodynamiske del fra model I kan adopteres, og bruges direkte. For en god ordens skyld gentages de beskrivende ligninger. Se eventuelt figur 5.4.

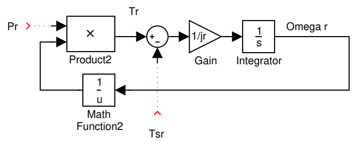
$$P_r = \frac{1}{2}\pi\rho R^2 V^3 c_p(\lambda, \beta) \quad [W] \tag{8.1}$$

$$T_r = \frac{P_r}{\omega_r} \quad [N \cdot m] \tag{8.2}$$

Resten af modellen for vindmøllen er ny, og beskrives herefter. Omløbstallet for rotoren og generatoren (regnet om på den ande side at gearet) kan nu være forskelligt, på grund af at akslen ikke længere er stiv. Derfor indføres ω_r og ω_g. Newton's anden lov for roterende legmer bruges til at opstille en ligning for rotorsiden.

$$J_r \dot{\omega}_r = T_r - T_{sr} \quad [Nm] \tag{8.3}$$

Endheden for inertimoment er $[Kg \cdot m^2]$. T_{sr} er det modmoment, der virker på rotoren som følge af generatorens moment og som følge af akslens vred. Ligningen kan beskrives ved følgende blokdiagram.



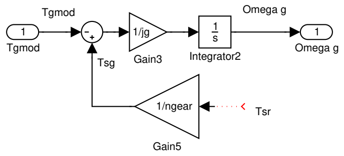
Figur 8.1: Blokdiagram for ligning 8.3.

Det variable omløbstal indføres ved at lave generatorens modmoment om til en styrevariabel. Det gøres ved, at styre det elektriske signal der påtrykkes generatoren istedet for at bruge signalet fra el-nettet. Ved at fastlægge frekvensen, spændingen, fasen o.s.v. for det signal er det muligt at bestemme generatorens modmoment. Det er helt oplagt at bruge PWM teknikker til at generere et sådant signal. Firkantsignalets bredde,højde og frekvens justeres let, og ved lavpas filtrering laves det om til et sinussignal. Når møllen kører ensrettes udgangen af generatoren, og derefter laves den om til en veksel spænding, der passer til det elektriske net, som møllen skal tilkobles. Det er praktisk, da det signal møllen så leverer til elnettet, er mere stabilt. Et sådant system til generering af et modmoment er baseret på elektriske signaler, og er derfor væsentligt hurtigere end en vindmølles dynamik. Af den grund modelleres modmoment uden nogen dynamik, det påtrykkes direkte på møllen som beskrevet i det følgende.

På samme måde som for rotoren kan en ligning opstilles for omløbstallet på generatorsiden. Her indføres den parameter, der moddelerer det variable omløbstal direkte nemlig generatorens modmoment. Fortegnet for modmomentet er modsat af rotormomentet, idet de to er modsatrettede.

$$J_g \dot{\omega}_g = -T_{g,mod} + T_{sg} \quad [Nm] \tag{8.4}$$

Ligningen kan også beskrives ved et blok diagram.



Figur 8.2: Blokdiagram for ligning 8.4.

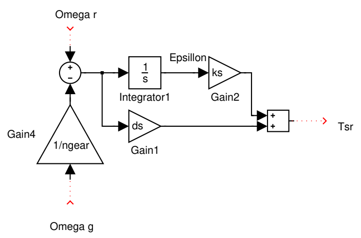
Da akslen ikke længere er stiv, men kan vrides, indføres følgende ligning.

$$T_{sr} = D_s \dot{\epsilon} + K_s \epsilon \quad [Nm] \tag{8.5}$$

D_s [Nm·s] er dæmpningen, og K_s [Nm] er stivheden af akslen. Akslen er vredet med vinklen ϵ, og $\dot{\epsilon}$ er hastigheden det foregår med.

$$\dot{\epsilon} = \omega_r - \frac{\omega_g}{N_{gear}} \quad [rad/s] \quad \epsilon = \theta_r - \frac{\theta_g}{N_{gear}} \quad [rad] \tag{8.6}$$

Ligningen kan igen beskrives ved et blokdiagram.



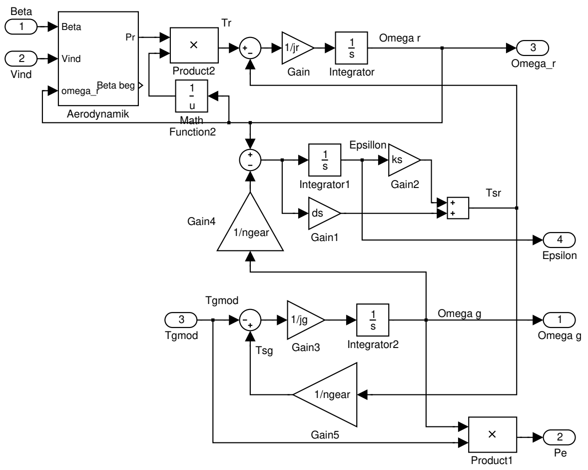
Figur 8.3: Blokdiagram for ligning 8.5.

Ligningen giver også det modmoment, der virker på generatoren som følge af rotorens moment og vridet af akslen (det skal dog transformeres om på den anden side af gearet).

Udgangseffekten beregnes som i 8.2 nemlig ved at gange generatorens modmoment med dens omløbstal. Der vil være et tab i konverteringen til DC og tilbage igen, og den beregnede effekt er altså ikke den, der leveres til el-nettet, men den der teoretisk kan trækkes fra generatoren.

$$P_e = T_{g,mod} \cdot \omega_g \quad [W] \tag{8.7}$$

Ved at sætte de beskrevne blokke sammen opnås en model for hele vindmøllen.



Figur 8.4: Blokdiagram for hele vindmøllen.

Herefter er det muligt at opstille tilstandsligninger for modellen. Som tilstande vælges de to omløbstal og akslens vrid. Altså de tre værdier på udgangene af systemets integratorer.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \omega_r \\ \epsilon \\ \omega_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

Tilstandsligningerne.

$$\dot{x_1} = \frac{\frac{P_r}{x_1} - (\dot{x_2} D_s + x_2 K_s)}{J_r} \quad [rad/s^2] \tag{8.8}$$

$$\dot{x_2} = x_1 - \frac{x_3}{N_{gear}} \quad [rad/s] \tag{8.9}$$

$$\dot{x_3} = \frac{-T_{g,mod} + \frac{\dot{x_2} D_s + x_2 K_s}{N_{gear}}}{J_g} \quad [rad/s^2] \tag{8.10}$$

Udgangen er givet ved.

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \omega_g \\ P_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_3 \\ T_{g,mod} x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \tag{8.11}$$

Til senere brug omskrives og indsættes der i tilstandsligningerne.

$$\dot{x_1} = \frac{\rho \pi R^2 V^3 c_p(\frac{V}{\omega_r R}, \beta)}{2 x_1 J_r} - \frac{x_1 D_s}{J_r} + \frac{x_3 D_s}{J_r N_{gear}} - \frac{x_2 K_s}{J_r} = f_1(\mathbf{x}, v, \mathbf{u}) \quad (8.12)$$

$$\dot{x_2} = x_1 - \frac{x_3}{N_{gear}} = f_2(\mathbf{x}, v, \mathbf{u}) \quad (8.13)$$

$$\dot{x_3} = -\frac{T_{g,mod}}{J_g} + \frac{x_1 D_s}{J_g N_{gear}} - \frac{x_3 D_s}{{N_{gear}}^2 J_g} + \frac{x_2 K_s}{N_{gear} J_g} = f_3(\mathbf{x}, v, \mathbf{u}) \quad (8.14)$$

Kapitel 9

Linearisering

Den nye vindmøllemodel lineariseres. Det foregår som i den foregående afdeling, hvor det første punkt var at bestemme et stationært punkt for vindmøllen. Det gøres ved at sætte ligning 8.12 til 8.14 lig nul. De omskrives så man får en ligning, hvor kun en tilstand indgår. Ligning 8.13 omskrives. Stationære værdier får tilføjet et 0 som subscript.

$$o = x_{10} - \frac{x_{30}}{N_{gear}} \Leftrightarrow x_{30} = x_{10} N_{gear} \tag{9.1}$$

Dette resultat indsættes i ligningen for den tredie tilstand 8.14.

$$0 = -\frac{T_{g,mod,0}}{J_g} + \frac{x_{10} D_s}{J_g N_{gear}} - \frac{x_{10} D_s}{N_{gear} J_g} + \frac{x_{20} K_s}{N_{gear} J_g} \Leftrightarrow \tag{9.2}$$

$$0 = -\frac{T_{g,mod,0}}{J_g} + \frac{x_{20} K_s}{N_{gear} J_g} \Leftrightarrow \tag{9.3}$$

$$x_{20} = \frac{T_{g,mod,0} N_{gear}}{K_s} \tag{9.4}$$

I ligning 8.12 kan disse to udtryk indsættes (stadig med venstresiden lig nul).

$$0 = \frac{\rho \pi R^2 V_0^3 c_p(\frac{V_0}{x_{10} R}, \beta_0)}{2 x_{10} J_r} - \frac{x_{10} D_s}{J_r} + \frac{x_{10} D_s}{J_r} - \frac{\frac{T_{g,mod,0} N_{gear}}{K_s} K_s}{J_r} \Leftrightarrow \tag{9.5}$$

$$0 = \frac{\rho \pi R^2 V_0^3 c_p(\frac{V_0}{x_{10} R}, \beta_0)}{2 x_{10} J_r} - \frac{T_{g,mod,0} N_{gear}}{J_r} = g(x_{10}) \tag{9.6}$$

Denne ligning skal nu løses for x_1, og til det bruges Newton-Raphsons metode (formel 5.13). Det er altså nødvendigt at bestemme den afledede af 9.6.

$$\left.\frac{\partial\big(g(x_1)\big)}{\partial x_1}\right|_{x_1 = x_{10}} = \frac{\rho \pi R^2 V_0^3}{2 J_r} \cdot \frac{x_{10} \frac{\partial c_p}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial x_1} - c_p}{x_{10}^2} \Leftrightarrow \tag{9.7}$$

$$\left.\frac{\partial\big(g(x_1)\big)}{\partial x_1}\right|_{x_1 = x_{10}} = \frac{\rho \pi R^2 V_0^3}{2 J_r} \cdot \frac{x_{10} \frac{\partial c_p}{\partial \lambda} \Big(- \frac{V_0}{R x_{10}^2} \Big) - c_p}{x_{10}^2} \tag{9.8}$$

Som tidligere kan den afledede af c_p med hensyn til λ bestemmes med en nummerisk algoritme (se ligning 5.16)

Med en stationær værdi for x_1 bestemmes stationære værdier for x_2 og x_3 hurtigt ved at indsætte i formlerne 9.1 og 9.4. Når de stationære tilstande er velkendte, kan en tilstandsmodel opstilles for vindmøllen. Matricerne bestemmes ud fra afledede af tilstandsligningerne.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \tag{9.9}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\rho \pi R^2 V_0^3}{2 J_r} \frac{\partial}{\partial x_1} \Big(\frac{c_p}{x_1} \Big) - \frac{D_s}{J_r} & -\frac{K_s}{J_r} & \frac{D_s}{J_r N_{gear}} \\ 1 & 0 & -\frac{1}{N_{gear}} \\ \frac{D_s}{J_g N_{gear}} & \frac{K_s}{N_{gear} J_g} & -\frac{D_s}{J_g {N_{gear}}^2} \end{bmatrix}$$

Problemet på plads (1,1) i A matrixen er allerede løst i ligning 9.7 og 9.8. Idet styresignalerne er givet ved.

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta \\ T_{g,mod} \end{bmatrix}$$

Kan B matrixen bestemmes ved følgende udtryk.

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1}{\partial u_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2}{\partial u_2} \\ \frac{\partial f_3}{\partial u_1} & \frac{\partial f_3}{\partial u_2} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \tag{9.10}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\rho\pi R^2 V_0^3}{2x_{10}J_r}\frac{\partial c_p}{\partial \beta} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_g} \end{bmatrix}$$

Differentationen på plads (1,1) ordnes med en nummerisk algoritme, idet c_p ikke er givet analytisk men nummerisk (se eventuelt 5.16). Vinden betragtes som en forstyrrelsesindgang, der ikke kan reguleres, og dermed er der også en B_v matrix.

$$\mathbf{B_v} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_v} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_v} \\ \frac{\partial f_3}{\partial u_v} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \tag{9.11}$$

$$\mathbf{B_v} = \begin{bmatrix} \frac{\rho\pi R^2}{2x_{10}J_r}\frac{\partial}{\partial V}\left(c_p V^3\right) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Differentationen på plads (1,1) i B_v matrixen beregnes.

$$\frac{\partial}{\partial V}\left(c_p V^3\right)\Bigg|_{V=V_0} = c_p 3V_0^2 + V_0^3\frac{\partial c_p}{\partial V} =$$

$$3c_p V_0^2 + V_0^3\frac{\partial c_p}{\partial \lambda}\frac{\partial \lambda}{\partial V} = 3c_p V_0^2 + V_0^3\frac{\partial c_p}{\partial \lambda}\frac{1}{x_{10}R} \tag{9.12}$$

Igen ordnes differentationen af c_p nummerisk. C matrixen findes udfra udgangsligningen.

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial x_1} & \frac{\partial y_1}{\partial x_2} & \frac{\partial y_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial y_2}{\partial x_1} & \frac{\partial y_2}{\partial x_2} & \frac{\partial y_2}{\partial x_3} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \tag{9.13}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & T_{g,mod} \end{bmatrix}$$

Endeligt skal D matrixen beregnes.

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial u_1} & \frac{\partial y_1}{\partial u_2} \\ \frac{\partial y_2}{\partial u_1} & \frac{\partial y_2}{\partial u_2} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \tag{9.14}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & x_{30} \end{bmatrix}$$

Alle matricer er beregnet, og det er således muligt at designe reguleringen.

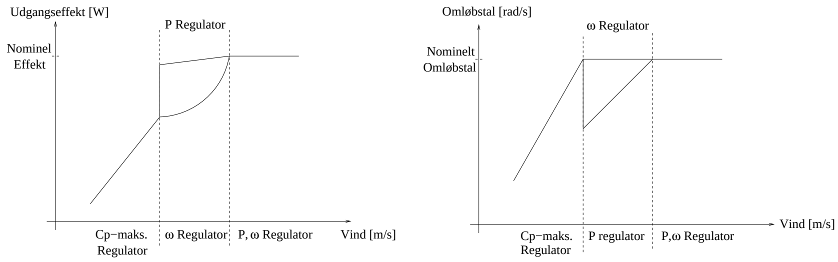
Kapitel 10

Styrestrategi

Der bruges LQG-regulatorer til at styre vindmøllen. Regulatorerne skal senere arbejde sammen. Det skal der tages højde for allerede under designet.

10.1 Beskrivelse af regulatorer

De forskellige regulatorers arbejdsområder er skitseret i figur 10.1, og deres karakteristika beskrives derefter i teksten.



Figur 10.1: De forskellige regulatorers arbejdsområder. tv. Effektmæssigt. th. Omløbstalsmæssigt.

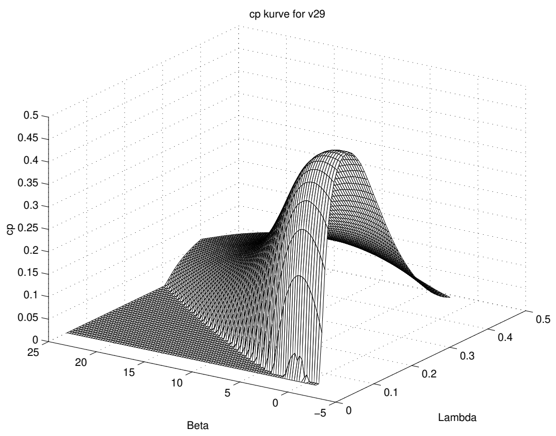
Som udgangspunkt skal der for vindstyrker over den kritiske vindhastighed, laves en regulering der skal begrænse effekten til den nominelle effekt samt holde omløbstallet på det nominelle omløbstal. Det vil sige at den ved stigende vindhastigheder skal skrue vingen væk fra vinden. Modmomentet skal holdes nogenlunde konstant, idet omløbstallet holdes konstant, og udgangseffekten er givet ved netop de to (se eventuelt 8.7). Regulatoren benævnes fremover effekt og omløbstals regulatoren eller P,ω-regulatoren, da det er de parametre, der skal holdes konstante.

For at løse problemet med dyk i udgangseffekten indføres en regulator, der kan operere under den kritiske vindhastighed. Regulatorens primære funktion skal være at holde mærkeeffekten på trods af korte fald i vindhastigheden. Det skal den gøre ved at tillade et fald i omløbstallet. På den måde frigøres rotorens opsparede kinetiske energi, og bruges som konventionel udgangseffekt. Man håber, at vinden stiger igen, så rotoren kan accelereres op igen. Hvis den ide virker, slår et mindre vindudfald ikke igennem til udgangeffekten. Faren er, at vinden ikke kommer igen, og man må så skifte til c_p-maks. regulatoren, og dermed får men en noget lavere udgangseffekt. Men hvis vinden faldt så lavt, ville det nok være nødvendigt alligevel. Regulatoren kaldes herefter P-regulatoren.

c_p-maks. regulatoren skal sørge for, at der hentes maksimal effekt ud af vinden. Det gøres ved at optimere møllens aerodynamiske effektivitets faktor c_p. Populært sagt skal c_p hele tiden være på toppen af kurven i figur 10.2. På grafen ses det af β skal være relativt lav. Praktisk erfaring viser, at der ikke er noget at hente ved at styre på β, den kan blot holdes konstant på $0.5\,°$. Lambda er givet ved formlen.

$$\lambda = \frac{V}{\omega_r R} \tag{10.1}$$

Den har en værdi der giver et maksimalt c_p.



Figur 10.2: c_p kurve for Vestas v29. Værdier under nul er skåret væk.

Af de tre parametre der bestemmer λ, er det kun omløbstallet, der kan reguleres. Opgaven for regulatoren er således at styre omløbstallet sådan, at λ ender på den optimale værdi. Regulatoren benævnes fremover c_p-maks. regulatoren.

Der opstår i forbindelse med c_p maksimeringen et problem. Allerede ved vindhastigheder der er cirka 3 m/s lavere end den kritiske vindhastighed, resulterer strategien i nominelt omløbstal. Hvis c_p maks. regulatoren forbliver aktiv, for vindhastigheder der er større end denne nye nedre kritiske vindhastighed, vil omløbstallet stige over det nominelle. Derfor indføres en mellemregulator, der skal forbinde c_p maks. regulatoren med regulatoren over den øvre kritiske vindhastighed. Den skal holde omløbstallet på det nominelle, samtidigt skal modmomentet styres så udgangseffekten maksimeres. Når den nominelle udgangseffekt er opnået, kan regulatoren over den øvre kritiske vindhastighed overtage. For dette vindinterval er der heller ikke meget at hente ved at styre på β, og den kan holdes konstant på $0.5\,°$. Denne regulator kaldes fremover for ω-regulatoren. Begreberne øvre og nedre kritisk vindhastighed indføres i forlængelse af det ovenstående.

10.2 Skift mellem regulatorernes modmomenter

Som nævnt skal der allerede under designet af regulatorerne tages højde for, at de senere skal kobles sammen. Det vil sige, at der under indstilningen af dem fremkommer en ekstra parameter. Regulatorerne skal indstilles, så de opfylder de reguleringsmæssige krav, men de skal også indstilles, så der kommer en glat overgang når, der skiftes fra den ene til den anden.

P regulatoren skal kunne bremse rotoren ned ved at skrue op for modmomentet. Det vil sige, at den regulator skal tillade et stort udsving i modmomentet. Ved at begrænse modmomentet for P,ω regulatoren vil det have mindre udsving end modmomentet for P regulatoren. Skiftet mellem de to kan så ordnes, når de to momenter krydser hinanden.

For c_p-maks. regulatoren er modmomentet i et så lavt leje, at det ikke krydser det for P regulatoren. Derfor må man acceptere et abrupt skift, når der skiftes fra P til c_p-maks. regulatoren.

For ω regulatoren gælder det om at holde omløbstallet konstant og optimere effekten. Modmomentet må gerne variere så meget, at det når ned på det niveau, c_p-maks. regulatorens modmoment befinder sig på. Dermed kan de skifte, når de to styresignaler krydser hinanden.

Ved stigende vindhastigheder vil modmomentet for ω regulatoren stige kraftigt, og ved at bestemme hvor meget det varierer, er det muligt at få det op på samme niveau som det for P,ω regulatoren. Dermed kan også dette skift foregå uden problemer.

10.3 Skift mellem regulatorernes β'er

Skiftene mellem β'erne er ikke så komplicerede som for modmomenterne. Det er praktisk talt kun over den øvre kritiske vindhastighed, at det giver mening at styre på bladvinklen. For lavere vindstyrker skal vingen drejes helt op i vinden.

Derfor bruges kun β signalet fra P,ω regulatoren. Den skal indstilles, så bladvinklen ikke ændrer sig hurtigere end tilladt. Når bladvinklen kommer under $0.5\,^\circ$, skiftes der til c_p-maks. regulatoren, der holder bladvinklen konstant på $0.5\,^\circ$.

10.4 Regulatorernes arbejdsområder

Regulatorerne arbejder ikke mere inden for et fast defineret vindinterval. De kobles ud og ind i forhold til, hvilken tilstand de og de andre regulatorer er i. Hvis man gerne vil ændre på det vindinterval, hvor en regulator arbejder, må man altså ændre på regulatorens parametre. Man kan for eksempel tillade et modmoment at ændre sig hurtigere og dermed opnå, at en anden regulator skiftes ind ved en ny vindhastighed. En anden design parameter er nu også lineariseringspunkterne. Ved at ændre på disse er det også muligt at ændre på arbejdsområderne.

Kapitel 11

P,ω Regulator

Beregningerne for dette kapitel er lavet i Matlab, og er vedlagt i appendix *model2mover.m*.

Denne regulator skal være aktiv, når vindhastigheden er over den øvre kritiske vindhastighed. Den skal holde udgangseffekten og omløbstallet på de nominelle værdier. Det vil sige at den primært skal dreje vingerne væk fra vinden, når vindhastigheden stiger. Desuden er der den begrænsning på β, at den ikke må ændre sig hurtigere end 10 °/s

11.1 Model beregninger

Der vælges et lineariseringspunkt givet ved en vindhastighed lidt over den øvre kritiske vindhastighed.

```
v0over=14;
```

De variable der bruges til denne regulator, har benævnelsen *over* som efternavn i Matlab. Det stationære modmoment kan beregnes.

$$T_{g,mod} = \frac{P_{nominel}}{\omega_g} \quad [Nm] \tag{11.1}$$

og det giver

```
tgmod0over = 2.1303e+03
```

En stationær værdi for β skal også bestemmes. Når møllen er i stationaritet, skal den effekt rotoren optager være lig den nominelle effekt. Ved en given vindhastighed kan det omformuleres til en bestemt værdi for c_p. Det ses udfra formlen for rotoreffekten.

$$P_r = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 v^3 c_p(\lambda,\beta) \quad [W] \tag{11.2}$$

Vinden er givet i det stationære punkt, og omløbstallet er det også (nominelt omløbstal), hvilket betyder, at λ er fikseret. Man må altså skrue på β, til den ønskede c_p er opnået. Den ønskede β beregnes i Matlab, og kan ses øverst i appendix *model2mover.m*.

```
beta0over = 11.2000
```

Med disse stationære input kan de stationære tilstande samt en tilstandsmodel for modellen beregnes ud fra formlerne i afsnit 9.
Da der er flere forskellige regulatorer, er der også flere stationære tilstande. For P,ω-regulatoren kaldes de tre stationære tilstande for $[x16\ x17\ x18]$. Den første, $x16$, beregnes ved at bruge en Newton-Raphson søgerutine. Se formlen herunder. Ligningen for f og dens afledede ses henholdsvis i ligning 9.6 og i ligning 9.8.

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n,\beta_0,V_0)}{f'(x_n,\beta_0,V_0)} \tag{11.3}$$

Med $x16$ beregnet findes $x17$ og $x18$ ved at bruge ligning 9.1 og 9.4.

```
x16 = 4.2994
x17 = 0.0066
x18 = 105.7644
```

Møllens nominelle omløbstal er i appendix A opgivet til 4.3 [rad/s] og gear forholdet til 24.6, så de stationære tilstande ser fornuftige ud. Den stationære udgang er beregnet til.

```
yover(1) = 105.7644
yover(2) = 225.31e+03
```

Den nominelle udgangseffekt er opgivet til 225 [kW], så det ser også fint ud.

For en god ordens skyld bruges matlabs *trim*-rutine til at bestemme de stationære tilstande og de stationære udgange. På den måde kan de to metoder verificere hinnanden. De stationære input sættes ind i simulinkdiagrammet på figur 8.4. Der indsættes realistiske startgæt i integratorerne. Matlab finder de stationære tilstande til.

```
X = 105.7644
    4.2994
    0.0066
```

Og det stationære udgangssignal til.

```
Y(1) = 105.7644
Y(2) = 225.31e+03
```

Det stemmer overens med beregningerne. Matricerne for en tilstandsbeskrivelse af vindmøllen skal bestemmes. I afsnit 9 er formlerne allerede opstillet, og det er altså blot et spørgsmål om at lade Matlab beregne dem.

```
Am2over =                       Bm2over =          Bvm2over =
  -1.1       -88.9    0.036        -0.061   0          0.14
   1           0     -0.041         0       0          0
   325.2   32520.3    -13.2         0     -0.1         0

Cm2over =                       Dm2over =
   0           0        1           0       0
   0           0     2130.3         0  105.76
```

Igen bruges Matlabs nummeriske rutiner til at beregne det samme for at tjekke resultatet. Kommandoen til at linearisere i matlab hedder *linmod*. Her skal de korrekte stationære tilstande indsættes som startværdier i integratorerne.

```
A =                             B =
  -1.06      -88.9    0.036        -0.061   0.14      0
   1           0     -0.041         0          0      0
   325.2   32520.3    -13.2         0          0   -0.1

C =                             D =
   0          0         1           0          0      0
   0          0      2130.3         0          0  105.8
```

Det bemærkes at den B-matrix som matlab beregner, er en sammenlægning af *Bm2over* og *Bvm2over*. Desuden at D matrixen er 2x3 istedet for 2x2, som den skal være, da der er 2 indgange og to udgange. Det skyldes, at Simulink ikke ser vindindgangen som en forstyrrelsesindgang men som en almindelig indgang. Bortset fra det er de beregnede og de simulerede matricer fuldstændigt ens.

Ved at beregne rangen af kontrollerbarheds og observerbarheds matricerne kan det tjekkes, om systemet er kontrollerbart og observerbart.

```
>> rank(ctrb(Am2over,Bm2over)) = 3
>> rank(obsv(Am2over,Cm2over)) = 3
```

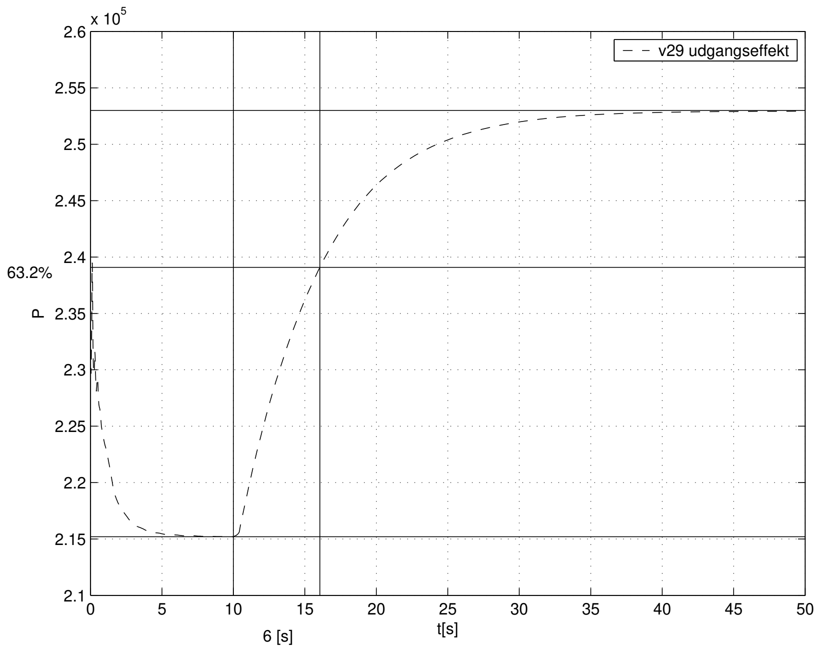
Systemets egenværdier bestemmes til.

```
eig(Am2over) =
   -0.16
   -7.06 +36.89i
   -7.06 -36.89i
```

Her en reel egenværdi og to komplekse der er konjugerede. Den reele egenværdi svarer til en tidskonstant for systemet på.

$$\tau = -\frac{1}{-0.16} = 6.25 \quad [s] \tag{11.4}$$

For at verificere denne værdi køres en åbensløjfe simulation på en af Risø's modeller for samme mølle. Se dokumentation for den i kapitel 17.1. Der påtrykkes et trin på 1 m/s på vindindgangen væk fra stationærtilstanden. Det gøres til tiden 10 s, og tidskonstanten bestemmes på normal vis (se grafen).



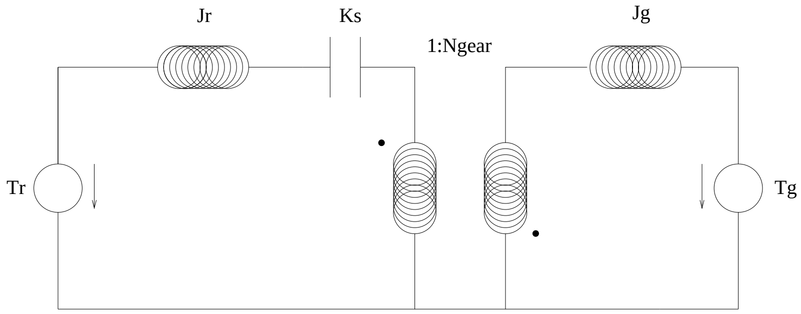
Figur 11.1: Udgangseffekt for Vestas v29 ved et trin på 1 m/s på vindindgangen.

Risø tidskonstanten aflæses til cirka 6 [s]; tæt på den beregnede.

For at kontrollere de to komplekse egenværdier må resonansfrekvensen for møllens inertier undersøges. Et fysisk system med en masse og en stivhed har en resonansfrekvens, der er givet ved.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{J}} \quad [rad/s] \tag{11.5}$$

Stivheden K er opgivet i appendix A. Den ækvivalente inerti, J, skal beregnes udfra rotor og generator inertierne. Herunder opstilles et elektrisk diagram, der er ækvivalent med møllen. Inertierne modelleres med spoler og stivheden med en kondensator.



Figur 11.2: Ækvivalentdiagram for inertier og for stivhed.

For at beregne den samlede inerti kortsluttes kilderne, dermed kommer de to inertimomenter til at sidde i parallel. Samtidigt skal generatorinertien transformeres over på den anden side af gearet[1]. Resonansfrekvensen bliver dermed.

$$\omega = \sqrt{\frac{K_s}{\left(J_r^{-1} + (J_g * N_{gear}{}^2)^{-1}\right)^{-1}}} \quad [rad/s] \Leftrightarrow \tag{11.6}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{8e6}{\left(90000^{-1} + (10 * 24.6^2)^{-1}\right)^{-1}}} = 37.561 \quad [rad/s] \tag{11.7}$$

I det lineariserede tilfælde er egenfrekvensen givet ved absolutværdien af en af de komplekse egenværdier, og den beregnes til.

$$\omega = abs(-7.06 + 36.89i) = 37.559 \quad [rad/s] \tag{11.8}$$

Dermed er oprindelsen af de komplekse egenværdier også forklaret.

11.2 Regulator

Som tidligere nævnt benyttes LQG-regulatorer. For en standard LQG-regulator kan man vægte styresignalerne og tilstandene. Vi ønsker imid-

[1] Denne analogimetode er beskrevet i [Rasmussen 94]

lertidigt at vægte parametrene i vektoren y_{reg}.

$$\mathbf{y}_{reg} = \begin{bmatrix} \omega_r \\ \epsilon \\ \omega_g \\ P_e \\ \beta \\ T_{g,mod} \end{bmatrix} \tag{11.9}$$

Integralet der skal minimeres bliver således.

$$\int y^T O\, y\, dt = \int \begin{bmatrix} x^T & u^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C^T \\ D^T \end{bmatrix} O \begin{bmatrix} C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} dt \tag{11.10}$$

Vægtmatricerne Q,R og N bestemmes udfra H matrixen.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} C^T \\ D^T \end{bmatrix} \cdot \mathbf{O} \cdot \begin{bmatrix} C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{N} \\ \mathbf{N^T} & \mathbf{R} \end{bmatrix} \tag{11.11}$$

C og D matricerne skal konstrueres, så udgangsvektoren indeholder signalerne der er listet i 11.9. Det kan gøres, hvis C og D ser ud som herunder. Det understreges at disse matricer er konstruerede til designet af regulatoren. De har altså ikke noget med det fysiske system at gøre.

$$\mathbf{C}_{reg} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & T_{g,mod} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad \mathbf{D}_{reg} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \omega_{g0} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{11.12}$$

O matrixen er en 6x6 matrix, hvor det er muligt at vægte de 6 signaler i 11.9. Vægtene indsættes i diagonalen. Udgangspunktet for disse er den reciprokke af den kvadrerede stationære værdi for den enkelte parameter. Hvis de skal ændres, påganges en faktor for eksempel 0.1, 10 eller 20. I første omgang sættes vægtene på omløbstallet og udgangseffekten. De skrues helt op, så der tillades minimal variation på disse to. For styresignalerne vægtes primært β, der begrænses, så hastighedsgrænsen for β ikke overstiges.

```
oover = [0 0 0 0 0 0
         0 0 0 0 0 0
```

```
        0 0 (x18^-2)*600  0 0 0
        0 0 0 (pnom^-2)*100 0 0
        0 0 0 0 (beta0over^-2)*9 0
        0 0 0 0 0 (tgmod0over^-2)*1];
```

Følgende Matlab-kald bruges til at beregne LQG-regulatoren.

```
[Kover,S,E] = lqr(Am2over,Bm2over,Qover,Rover,Nover);
```

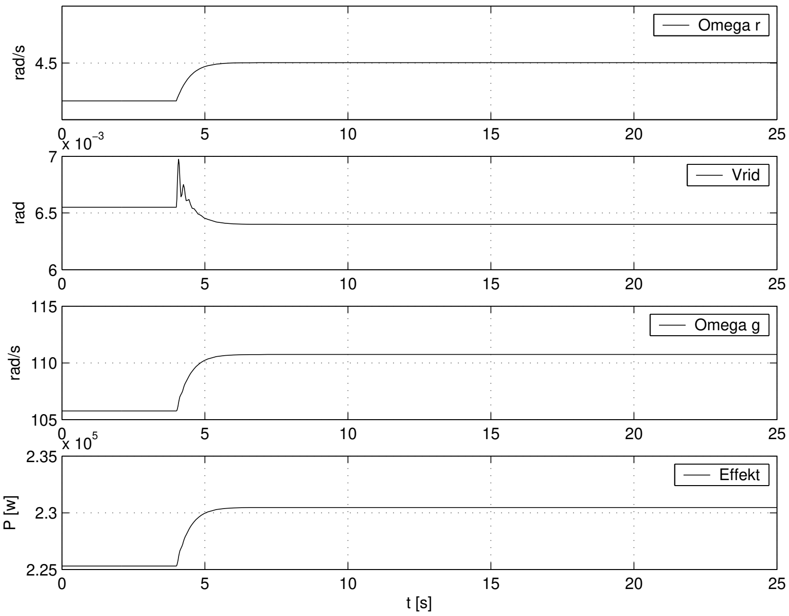
Her er Kover forstærkningsmatrixen. Den bruges til at lave en almindelig tilstandstilbagekobling. Med de ovenstående vægte bliver Kover.

```
Kover =

  -19.7499  -28.3701   -0.0138
  -72.7095 -413.9362   10.8549
```

Her er en forstærkning på 414, der er lidt høj. Der er derfor en risiko for, at systemet bliver støjfølsomt. Hvis det bliver et problem, må man vende tilbage til dette punkt og så finde en anden måde at lave denne regulator på. Egenværdierne for den lukkede sløjfe bliver.

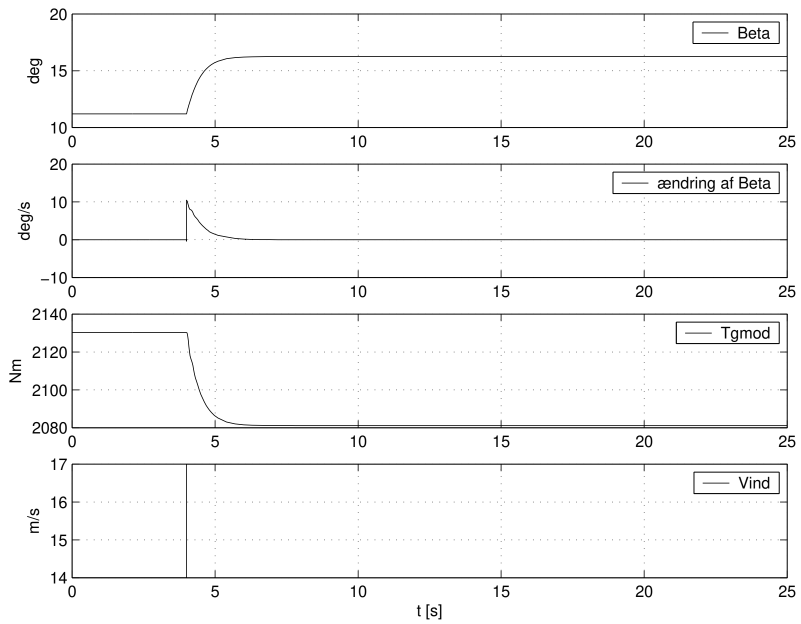
```
egenlqgover =
  -1.25
  -6.57 +36.98i
  -6.57 -36.98i
```

De ligger alle i venstre halvplan, så den lukkede sløjfe er stabil.
For at teste om regulatoren virker efter hensigten laves et par simulationer. Der påtrykkes et trin i vindhastigheden, der går fra det stationære punkt på 14 m/s til 17 m/s. Først plottes tilstandene og udgangseffekten.



Figur 11.3: Tilstandene og udgangseffekten for P og ω regulatoren ved et trin i vindhastigheden fra 14 m/s til 17 m/s.

Herefter kommer styresignaler og vindsignalet.



Figur 11.4: Styresignaler og vindsignalet.

Man kan se på styresignalerne, at vingen drejes væk fra vinden. Ændringen af β går ikke hurtigere end $10\,^{\circ}/\mathrm{s}$, som er det hurtigste, den må ændre sig. Det passer fint overens med kravene til denne regulator. Hvad tilstandene og udgangene angår så stiger både omløbstallet og udgangseffekten. Det er ikke muligt at gøre denne tilvækst mindre med vægtene, uden at hastighedsgrænsen for β overskrides. Hvis det ikke kan tillades, at de vokser så meget, kan endnu en regulator med et højere lineariseringspunkt indføres.

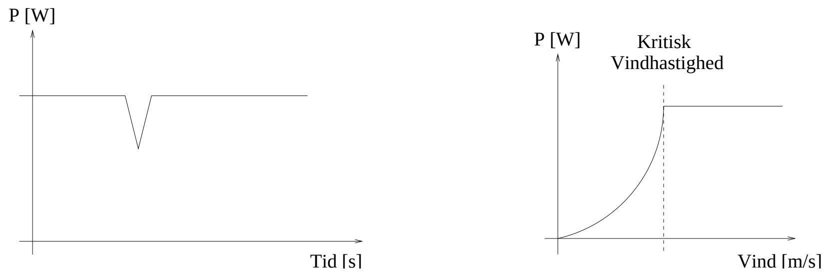
En anden mulighed for at løse det problem er at indføre integraltilstande i reguleringen. Der er ikke brugt integraltilstande i dette projekt for at lave reguleringen simpel. Så er det lettere at arbejde med skiftene mellem de forskellige regulatorer på et senere tidspunkt.

Kapitel 12

P-Regulator

12.1 Motivation for at indføre P-Regulatoren

I forbindelse med reguleringen over den øvre kritiske vindhastighed opstår der tiltider nogle uønskede effektdyk (se figur 12.1 til venstre).



Figur 12.1: Til venstre: Dyk i udgangseffekt. Til højre: effekt som funktion af vind.

Effektdykkene skyldes sammenhængen mellem vind og udgangseffekt for en vindmølle, som ses på figur (12.1) til højre. Den effekt rotoren kan optage fra vinden, stiger kubisk med vindhastigheden. Der er selvfølgelig en grænse for, hvor megen effekt møllen kan klare. Disse to faktorer betyder, at sammenhængen mellem vind og optaget effekt ser ud som på figur 12.1 til højre. Når vinden kortvarigt dykker under den øvre kritiske vindhastighed, går udgangseffekten fra at være konstant og uafhængig af vindhastigheden til at falde drastisk for fald i vindstyrken. Det er denne ulineære sammenhæng, der er skyld i effektdykkene. Dykkkene er selvfølgelig uønskede, mest fordi de modarbejder vindmøllens primære funktion, som er at producere så megen energi som muligt.

For at løse eller minimere dette problem undersøges forholdene angående rotorens kinetiske energi. Rotoren har en stor inerti, og når den kører med nominelt omløbstal, har den oplagret en del bevægelses energi. Den kan enten optage energi fra vinden eller afgive energi til generatoren. Ved konstant omløbstal vil rotorens kinetiske energi være konstant. Det vil sige, at når rotoren accelererer, så optager den energi fra vinden, og når den decelerere, så afgiver den energi til generatoren. Dette er forudsat, at møllen er ideel tabsfri o.s.v.

Denne energi kan bruges til at udfylde hullet i grafen ovenfor (fig. 12.1 til venstre). Omløbstallet må altså gå ned, mens rotorens kinetiske energi overføres til generatoren. Rotoren skal efter dykket accelereres op igen, og vinddykket må derfor ikke vare for længe. Hvis det varer for længe, skal styresystemet hellere skifte til c_p-maks. reguleringen, ellers sættes møllen helt i stå.

For en god ordens skyld gives formlen for et roterende legemes kinetiske energi.

$$E_{kin} = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad [J] \tag{12.1}$$

Rotorens energitilvækst per tid er det samme som den effekt den optager eller afgiver. Det vil sige at.

$$\Delta P = \frac{dE_{kin}}{dt} = I \omega \dot{\omega} \quad [W] \tag{12.2}$$

Med disse ligninger er det muligt at monitere rotorens kinetiske energi og tilvæksten af rotorens kinetiske energi, altså effekten.

12.2 Løsningsforslag

For at implementere denne strategi laves endnu en LQG-regulator. Vægtene for den skal indstilles, så effekten holdes konstant, mens omløbstallet får lov til at variere frit. Samtidigt får modmomentet også lov at variere frit, så regulatoren via dette kan sænke omløbstallet. Hvis der kommer et vinddyk, skal regulatoren kobles ind. Hvis vinden kommer igen, kan P,ω-Regulatoren tage over.

Vindmøllen må som sagt ikke sættes helt i stå, derfor skal den foreslåede styestrategi kun forsætte så længe omløbstallet er over en vis grænse. Hvis den kommer under, må der tages en anden styring i brug.

12.3 Regulator

Hele proceduren med at beregne P-Regulatoren minder meget om den for P,ω-regulatoren. Beregningerne er vedlagt i appendix *model2mved.m*. Vinden der lineariseres ved, vælges til den øvre kritiske vindhastighed.

```
v0ved = 11
```

Der benyttes efternavnet *ved* i Matlab til P-Regulatoren. Den stationære β bestemmes igen ved at finde den c_p, der giver mærkeeffekten ved den valgte vind. I lineariseringspunktet er omløbstallet og vinden konstante, og dermed er λ det også. Derfor skal der skrues på β, til den ønskede c_p er opnået.

```
beta0ved = 0.7000
```

Det stationære modmoment bestemmes udfra nominel effekt og omløbstal.

$$T_{g,mod} = \frac{P_{nominel}}{\omega_g} \quad [Nm] \tag{12.3}$$

Og beregnes til.

```
tgmod0ved = 2.1303e+03
```

Stationære tilstande beregnes som tidligere udfra de stationære indgange.

```
x13 = 4.2825
x14 = 0.0066
x15 = 105.3493
```

Den stationære udgang bliver.

```
yved(1) = 105.3493
yved(2) = 224.42e+03
```

De stationære tilstande og udgange er fundet nummerisk i Matlab med *trim*-rutinen. De to resultater er nøjagtigt ens.
Til at bestemme matricerne bruges formlerne fra kapitel 9.

```
Am2ved =                          Bm2ved =               Bvm2ved =
   -0.91   -88.89    0.036          -0.00817   0            0.114
       1        0   -0.041             0         0              0
   325.2  32520.3    -13.2             0      -0.1              0


Cm2ved =                         Dm2ved =
   0   0   1                        0   0
   0   0   2130.27                  0   105.35
```

Disse stemmer overens med matricerne, som Matlab bestemmer nummerisk med rutinen *linmod*. Egenværdierne ligger alle i venstre halvplan.

```
>> eig(Am2ved) =

  -0.02
  -7.05 +36.89i
  -7.05 -36.89i
```

Beregninger af kontrollerbarhed og observerbarhed giver.

```
>> rank(ctrb(Am2ved,Bm2ved)) = 3
>> rank(obsv(Am2ved,Cm2ved)) = 3
```

Designet af LQG-regulatoren foregår som beskrevet i starten af afsnit 11.2. Vægtmatrixen der bruges kaldes *oved*

```
oved = [0 0 0 0 0 0
        0 0 0 0 0 0
        0 0 0 0 0 0
        0 0 0 (pnom^-2)*1e10 0 0
        0 0 0 0 (beta0ved^-2)*1 0
        0 0 0 0 0 0];
```

I henhold til kravene til regulatoren vægtes effekten så meget som muligt, mens β vægtes så ændringen af denne, ikke går for hurtig. Forstærkningsmatrixen der kommer ud af denne vægtning er.

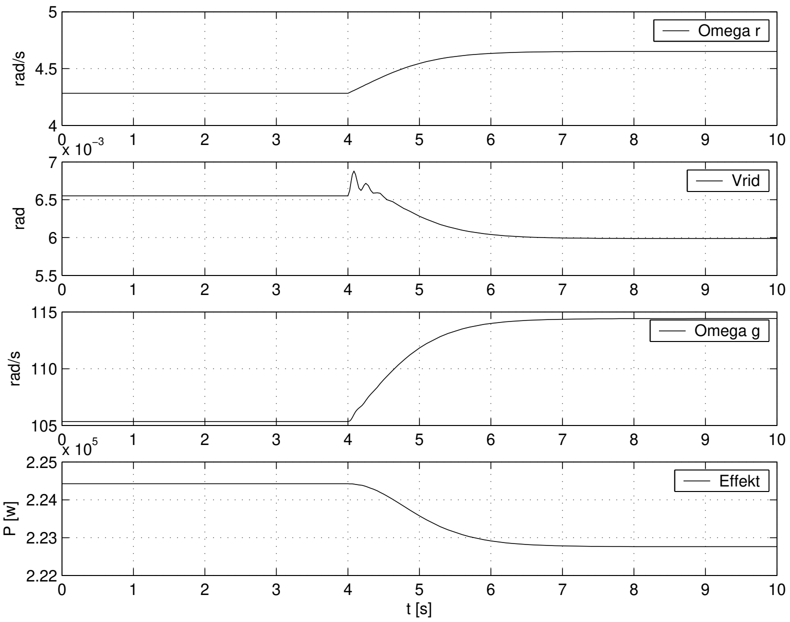
```
Kved =
```

```
  -26.2587   -3.3777   -0.0718
   -0.0008   -0.0001   20.2210
```

Forstærkningerne er alle inden for et realiserbart område.
Lukketsløjfe egenværdierne.

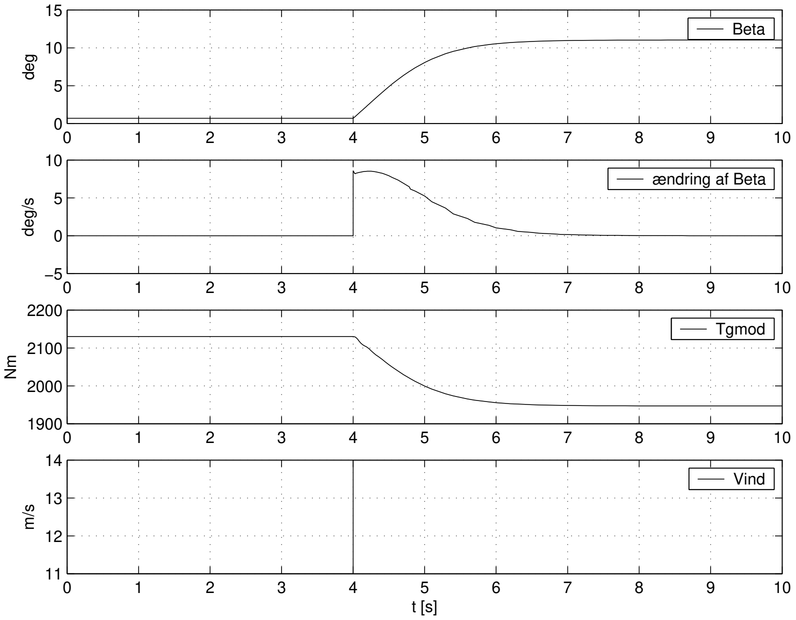
```
egenlqgved =
  -0.1073
  -6.1076 +37.0581i
  -6.1076 -37.0581i
```

Som alle ligger i det stabile venstre halvplan.
For at demonstrere regulatoren påtrykkes et testsignal.



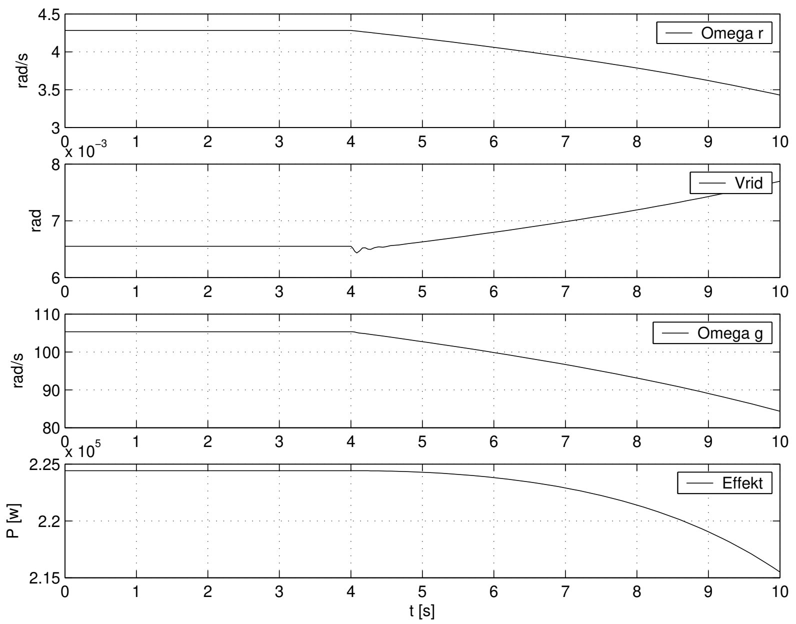
Figur 12.2: Tilstandene og udgangseffekten for P regulatoren ved en trinpåvirkning på vindhastigheden fra 11 m/s til 14 m/s.

Herefter kommer styresignaler og vindsignalet.



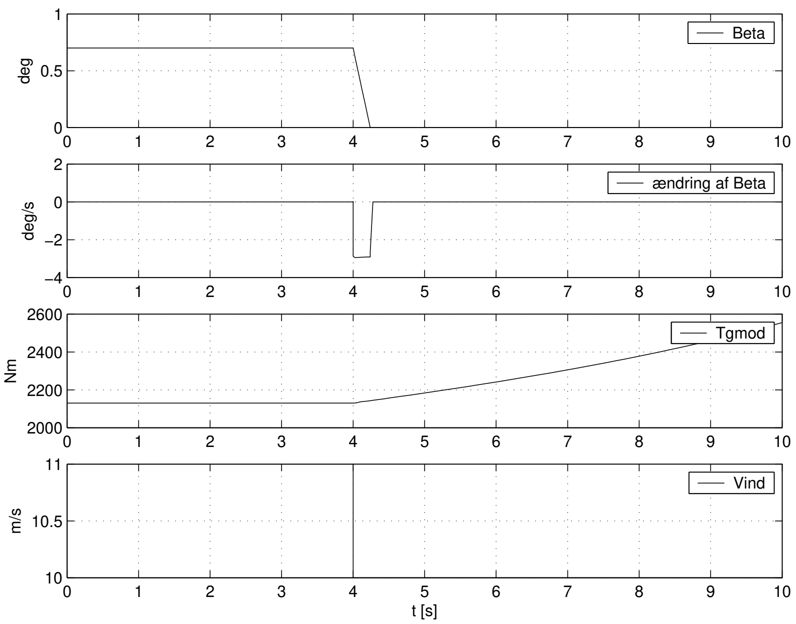
Figur 12.3: Styresignaler og vindsignalet for P regulatoren ved en trinpåvirkning på vindhastigheden fra 11 m/s til 14 m/s.

Regulatoren holder variationen på effekten meget lille, mens praktisk alt andet får lov at sejle. Omløbstallet stiger, vingen drejer væk fra vinden og modmomentet falder. Dog ændrer β sig ikke mere end 10 $^\circ$/s. Reguleringen indfrier dermed de krav, der blev stillet til den.
Da regulatoren skal håndtere dyk i vinden, påtrykkes også et trin nedad.



Figur 12.4: Tilstandene og udgangseffekten for P regulatoren ved en trinpåvirkning på vindhastigheden fra 11 m/s til 10 m/s.

Herefter kommer styresignaler og vindsignalet.



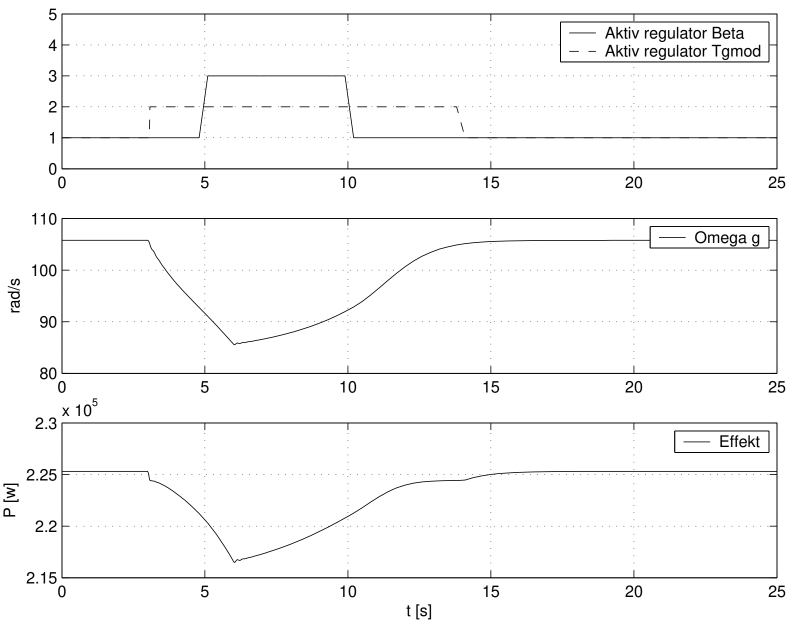
Figur 12.5: Styresignaler og vindsignalet for P regulatoren ved en trinpåvirkning på vindfastigheden fra 11 m/s til 10 m/s.

Ved denne påvirkning falder modellen ikke ind til en stationær tilstand. Det skyldes, at vinden efter trinnet er under den øvre kritiske vindhastighed. Der kan møllen ikke opretholde nominel effekt. Regulatorens arbejdspunkt er netop omkring nominel effekt. Disse to modstridende fakta gør, at møllen går ind i en destruktiv sløjfe, hvor den skruer mere og mere op for modmomentet, mens omløbstallet falder mere og mere. Heldigvis er det netop denne effekt, vi ønsker, regulatoren skal have for en kortere periode (jvf. afsnit 12.1).

Kapitel 13

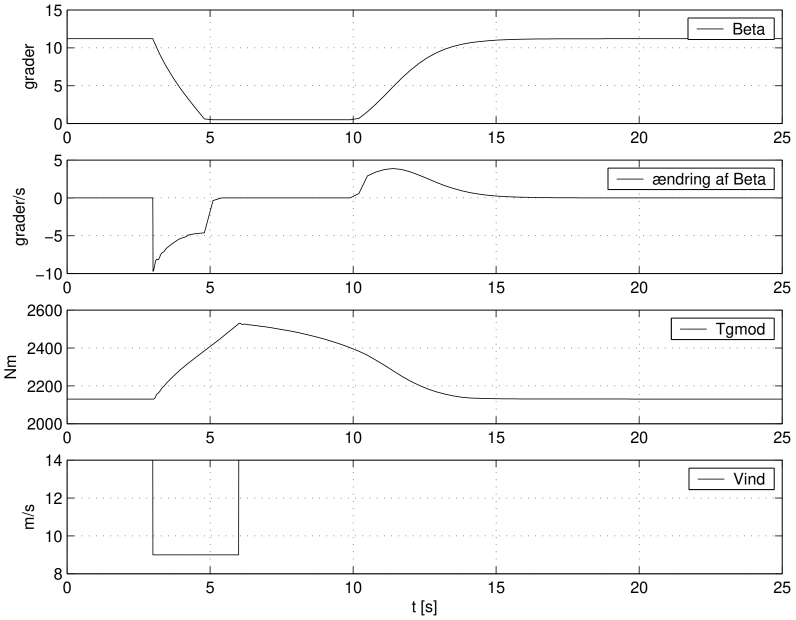
P,ω og P-Regulatorerne sammen

I forbindelse med problemet med effektdyk er det selvfølgeligt interessant at se på, hvordan det opstillede løsningsforslag virker. Derfor kobles P,ω- og P-Regulatorerne sammen. De kan så testes med et vindsignal, der har et kortvarigt dyk. Skiftet mellem de to regulatorer foregår som tidligere beskrevet, når styresignalerne krydser hinanden. Dette beskrives mere udførligt i kapitel 16. Vindsignalet der bruges starter i 14 m/s, da det er P,ω-Regulatorens lineariseringspunkt. Så kommer der et dyk til 9 m/s, der varer i 3 s.



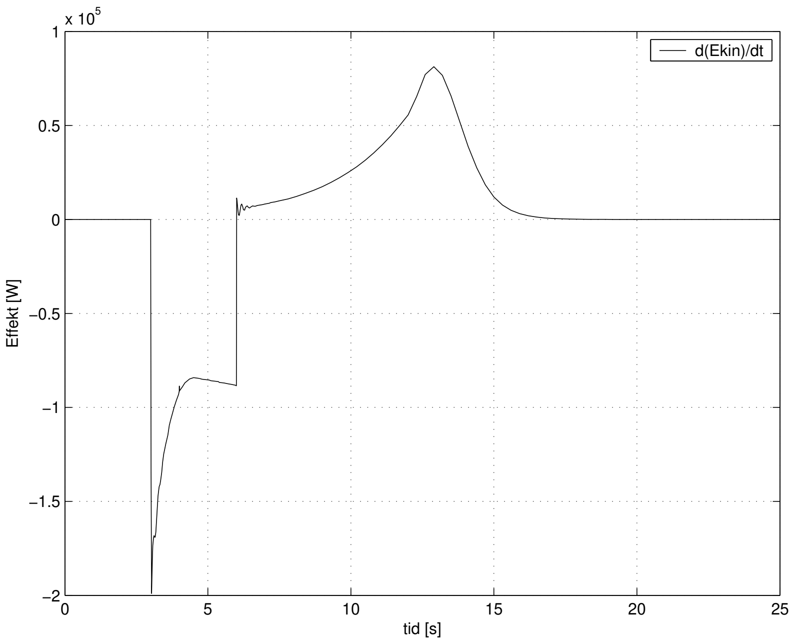
Figur 13.1: Udgangene og skiftene ved et vinddyk fra 14 m/s til 9 m/s og op til 14 m/s igen.

Herefter kommer styresignaler og vindsignalet.



Figur 13.2: Styresignaler og vindsignalet.

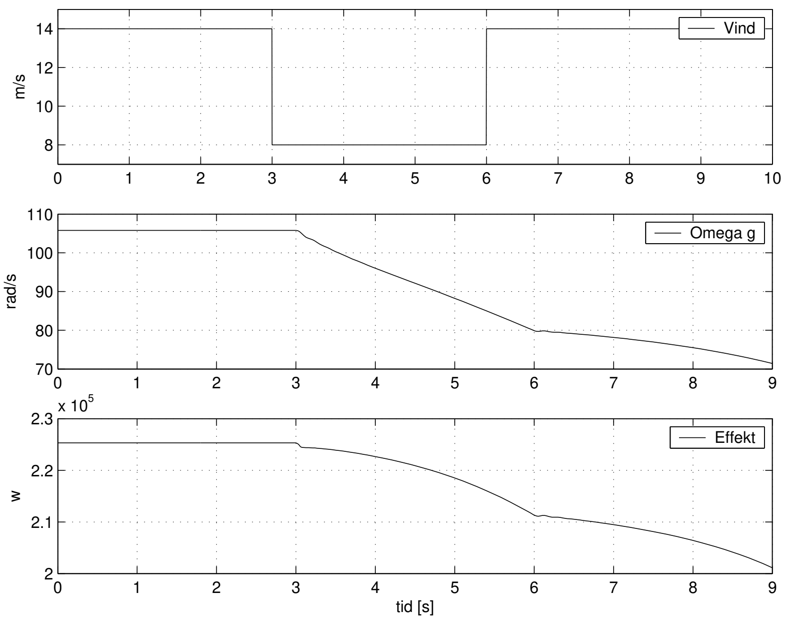
Ideen virker. Vinden forsvinder kortvarigt. Mens den er væk, bremses rotoren ned, ved at modmomentet øges. Idet vinden kommer igen, accelereres rotoren op igen. Effekten dykker kun ned med 10 kW. Som følgende plot viser, bruges rotorens bevægelses energi til dette.
Rotorens kinetiske effekt moniteres i henhold til ligning 12.2



Figur 13.3: Tilvæksten i rotorens kinetiske energi.

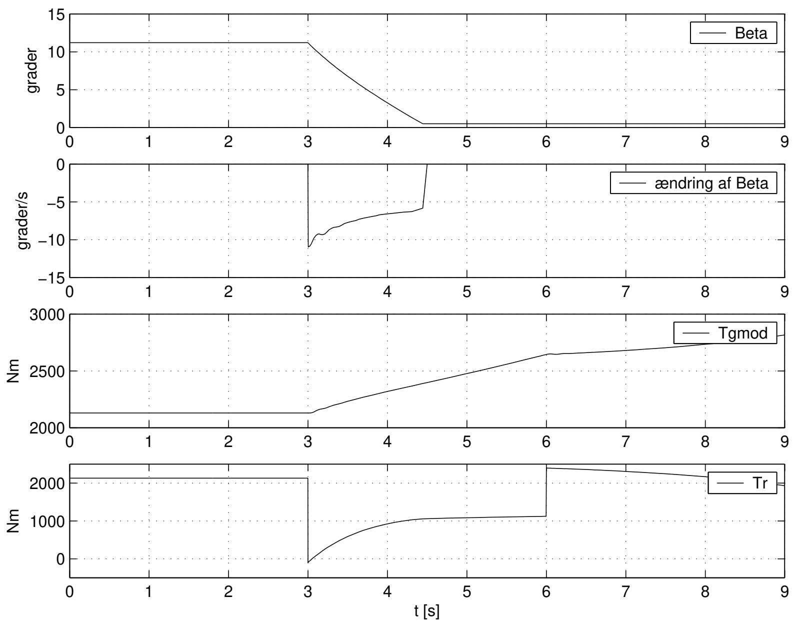
I første omgang hentes der energi ud af rotoren, men idet vinden vender tilbage, leveres bevægelses energien tilbage til rotoren igen.

Der er en grænse for, hvor længe denne strategi går godt. Det illustreres ved et sæt simulationer.



Figur 13.4: Vindsignal og udgange ved et vinddyk fra 14 m/s til 8 m/s og op til 14 m/s igen.

Herefter kommer styresignaler og rotormomentet.



Figur 13.5: Styresignaler og rotor moment.

Selvom vinden kommer igen til tidspunktet 6 s, kan rotoren ikke accelereres op. Generatorens modmoment er kommet højere op, end det moment rotoren kan levere. Rotormomentet bliver relativt lavt, fordi λ bliver højere ved et spring opad i vindhastighed. Dermed falder værdien for c_p, og dermed den effekt rotoren optager. Ved at operere vindmøllen ved et lavt omløbstal mens vindhastigheden er relativt høj risikerer man altså, at rotoren ikke kan accelereres op, eller at den går i stå. Det er er risiko, der er tilstede, når man arbejder med vindmøller med variabelt omløbstal.

Det er et mindre godt forhold ved den valgte strategi, at den ikke er istand til at få møllen på ret køl igen, på trods af at vinden er der. Det er et oplagt sted at se på en forbedring af styrestrategien.

Det er også muligt at vindhastigheden forbliver lav, og så er der brug for en ny regulator. Det leder hen til næste kapitel, hvor c_p-maks. regulatoren beskrives.

Kapitel 14

c_p-maks. Regulator

Regulatoren der beskrives i dette kapitel, skal operere ved lave vindhastigheder. Det vil sige fra 'cut-in' til cirka 8 m/s. Her er det ikke muligt at få den nominelle effekt ud af vindmøllen. Regulatoren skal opnå størst mulig udgangseffekt for møllen ved den givne vindhastighed. Det gøres ved at sørge for, at møllen er i en optimal aerodynamisk tilstand. Det er den nemlig ikke altid. Regulatoren over den kritiske vindhastighed drejer for eksempel vingen væk fra vinden. Derved minimeres den effekt, der trækkes ud af vinden ved at sætte vindmøllen i en aerodynamsik tilstand, der ikke er optimal.

Regulatoren bruges desuden til at accelerere rotoren op, hvis omløbstallet er lavt som følge af den netop beskrevne P-regulering.

Møllens aerodynamiske effektivitet er matematisk beskrevet ved parameteren $c_p(\lambda, \beta)$, som har direkte indflydelse på, hvor megen effekt rotoren trækker ud af vinden (se formel 5.1). Regulatoren skal altså sørge for at holde c_p på den størst mulige værdi.

På figur 10.2 ses et plot af c_p som funktion af β og λ. Der er ikke så stor variation i den β, der giver den største c_p for en given λ, og det viser sig også i praksis, at der ikke er nogen effekt af betydning at hente ved at regulere på β. Derfor er den næsten altid konstant, og det er den også her nemlig på $0.5°$.

For λ derimod kan det betale sig at gøre noget for at holde en optimal værdi. Formlen for λ gentages for en god ordens skyld.

$$\lambda = \frac{V}{\omega_r R} \tag{14.1}$$

Da man ikke kan ændre på hverken vinden eller vingeradius (R), må det altså være omløbstallet, der reguleres. For den fastsatte β findes der en optimal λ. Ved at styre omløbet i forhold til vinden er det muligt at styre hen mod den optimale λ og dermed mod maksimum for c_p kurven. Med den netop beskrevne strategi er det altså muligt at sætte møllen i en tilstand, hvor den opnår optimal udgangseffekt for en given vindhastighed.

For at løse problemet antages det, at middelvinden kan estimeres. Da omløbstallet ikke kan ændre sig i samme takt som vinden, vil c_p tallet for møllen variere omkring det optimale. Derfor er det ikke nødvendigt med et estimat, der har variationer med, der er hurtigere end de variationer, der kan være i møllens omløbstal. Det er så at sige et estimat af middelvindhastigheden, der er brug for. Det vurderes at det er muligt at lave et sådant enten ud fra modellen eller udfra en selvstændig estimator.

14.1 Regulator

For hver vindhastighed vil der altså være et optimalt omløbstal. En LQG-regulator arbejder hen mod det stationære punkt, den er beregnet ved. Derfor er det nødvendigt med en hel række af LQG-regulatorer, der skal arbejde hen mod hvert deres omløbstal. Vindhastigheden bruges så til at bestemme hvilken regulator, der skal være aktiv.

Der beregnes regulatorer svarende til vindhastigheder fra 4 m/s til 20 m/s. Dette område vurderes til at være et normalt arbejdsområde for vindmøllen. Regulatoren skal kun være aktiv for vindhastigheder under cirka 8 m/s. Grunden til at der regnes med vindhastigheder op til 20 m/s, er at styresignalet, skal være velkendt, også når c_p-maks. regulatoren ikke er aktiv

I appendix *model2munder.m* er .m-filen med beregningerne til denne regulator, og den hedder *model2munder.m*. Mange af de følgende variable vil have en værdi svarende til hver vindhastighed, og vil derfor være repræsenteret ved en vektor eller en tabel. Disse fylder en del, og de vigtigste er at finde i appendix *Tabeller i forbindelse med c_p-maks. reguleringen.*

Den optimale λ for β=0.5 samt den tilhørende værdi for c_p bestemmes udfra c_p-kurven.

```
lambda_opt = 0.1285
cpmax = 0.4841
```

Udfra den optimale λ og vindhastighederne er det muligt at beregne et ønsket omløbstal for hver vindhastighed ved at bruge formlen for λ (formel 14.1). For en given vindhastighed og for c_p-maks. er det muligt at beregne den effekt møllen kan optage ved at bruge formlen for rotoreffekt (formel 5.1). Se

```
p_r_tabel
```

i appendix. Da man således kender effekt og omløbstal for en vindhastighed, kan det tilsvarende modmoment beregnes. Se

```
tgmod0under
```

i appendix. Hvis det modmoment påtrykkes, og indgangseffekten er det beregnede, vil det ønskede omløbstal være resultatet. Med disse stationære input beregnes de stationære tilstande som i de foregående kapitler. En tabel med de stationære tilstande kan ses i appendix.

```
tilstands_tabel
```

Som tidligere beregnes også alle matricerne, men da de ville fylde for meget, er blot egenværdierne for A-matricerne listet i appendix under variabelnavnet `egenaaben`. Alle ligger ganske tæt på de tidligere beregnede egenværdier. De komplekse ligger lige oveni de tidligere bestemte. Den reelle pol varierer mest, idet den går fra -0.0292 til -0.1460, mens vinden går fra 4 m/s til 20 m/s. Den er for P,ω-regulatoren bestemt til -0.16, og det er ganske tæt på.

For alle lineariseringspunkter gælder det at systemerne er styrbare og observerbare.

Da β ikke længere er et styresignal, er der nogle ændringer i systemmatricerne. De matricer der er lineariserede ved afledede med hensyn til styresignalerne, er B og D matricerne (se formel 9.10 og formel 9.14). Der forsvinder som følge af dette en søjle i hver af de to matricer.

Ved beregning af forstærkningsmatrixen til tilstandstilbagekoblingen er der ændringer i forhold til de to tidligere regulatorer på grund af de nye systemmatricer. Der bruges samme metode som i formel 11.9 til 11.12. Blot er β pillet ud, og det betyder, at der er en række mindre i de C og D maticer, der konstrueres. Det betyder igen ,at der er en dimmension mindre i O-matrixen.

```
ounder=[0 0 0 0 0
        0 0 0 0 0
        0 0 (x12^-2)*30 0 0
        0 0 0 0 0
        0 0 0 0 (tgmod0under(k)^-2)*10];
```

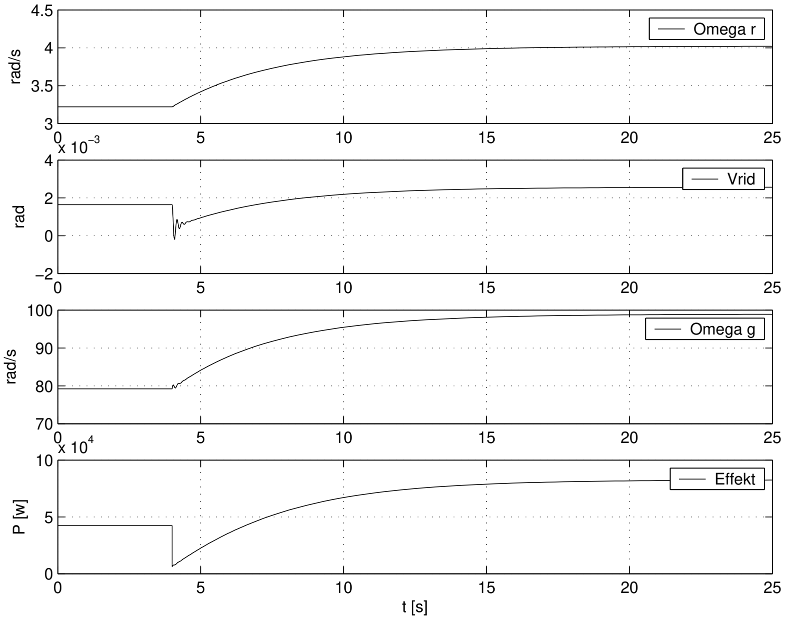
Vægtene er indstillet, så der er relativt stor vægtning på omløbstallet, idet målet for reguleringen er at opnå det omløbstal, regulatoren er lineariseret ved. Til hvert lineariseringspunkt beregnes en regulator udfra en tilstandsmodel og en vægtmatrix. I appendix *Tabeller i forbindelse med c_p-maks. reguleringen.* ses en tabel med forstærkningerne under navnet `regulator_tabel`. De beregnede forstærkninger, ligger alle inden for et realiserbart område.

Det undersøges, om alle lukketsløjfe egenværdier ligger i det stabile område. De er alle beregnet, og ses i appendix under navnet `egenlukket`. Alle ligger i venstre halvplan.

Da lineariseringspunkterne og forstærkningerne ligger pænt på en kurve, bruges en interpolationsalgoritme til at beregne værdier mellem lineariseringspunkterne. På den måde kommer der ikke nogen abrupte skift mellem de forskellige regulatorer men en glidende overgang. Vindhastigheden bruges til at styre, hvilken regulator og hvilket lineariseringspunkt der bruges.

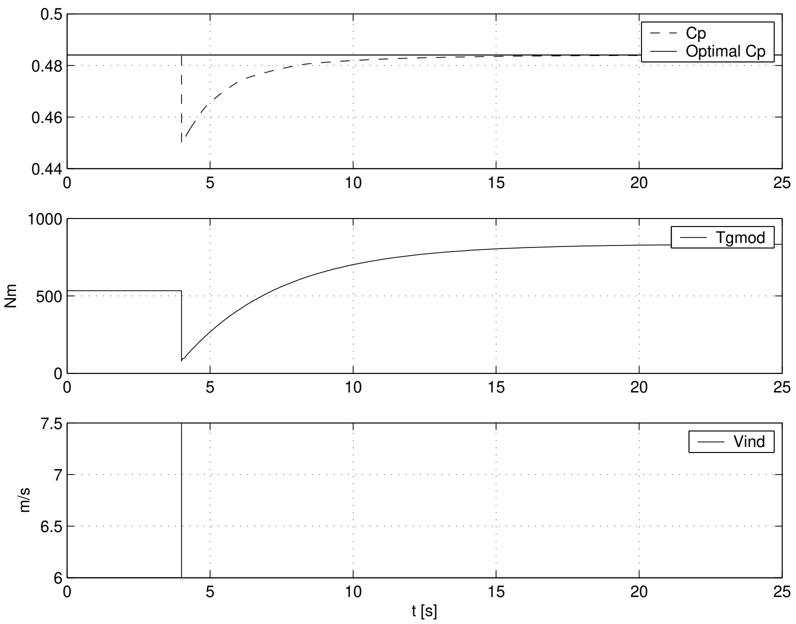
Se figur B.3 i appendix for et blokdiagram over regulatoren.

Ved at gennemføre simulationer undersøges det, om regulatoren virker efter hensigten.



Figur 14.1: Tilstandene og udgangseffekten for c_p maks. regulatoren ved en trinpåvirkning på vindhastigheden fra 6 m/s til 7.5 m/s.

Herefter kommer styresignaler og vindsignalet samt c_p.



Figur 14.2: Styresignaler og vindsignalet for c_p maks. regulatoren ved en trinpåvirkning på vindhastigheden fra 6 m/s til 7.5 m/s.

På grund af vindens abrupte skift skifter styresignalet også abrupt. Som simulink diagrammet viser, bestemmes de stationære bidrag til tilstandene, regulatorforstærkningerne og det stationære bidrag til styresignalet af vinden. Alle disse laver et abrupt skift, og det gør styresignalet dermed også.

Da vindhastigheden stiger, skal omløbstallet også gøre det for at holde λ konstant. På figur 14.1 viser grafen for omløbstallet, at det også er tilfældet. På figur 14.2 er der et plot af c_p sammen med den optimale c_p. Det viser, at reguleringen af omløbstallet resulterer i det ønskede, nemlig at c_p bevæger sig henimod sin optimale værdi.

Kapitel 15

ω-Regulator

Den sidste regulator er ω- regulatoren. Ved brug af c_p-maks. strategien vil møllen køre med nominelt omløbstal ved en vindhastighed på cirka 8 m/s. Det kan man se i tabellen for de stationære tilstande for c_p-maks. regulatoren. Tilstandene ved en vindhastighed på 8 m/s svarer netop til det nominelle omløbstal. Tabellen ses i appendix *Tabeller i forbindelse med c_p-maks. reguleringen* under navnet *tilstands_tabel* i række 5.

Udgangseffekten vil ikke være nominel, det kan den ikke være ved så lav en vindhastighed. Hvis c_p-maks. reguleringen bruges ved vindhastigheder på over 8 m/s, vil omløbstallet komme over det nominelle. Derfor indføres en LQG-regulator for området fra den nedre kritiske vindhastighed (8 m/s) til den øvre (11 m/s). Regulatoren skal indstilles, så omløbstallet holdes nominelt, samtidigt er målet at opnå maksimal udgangseffekt. Disse egenskaber kan opnås ved en kombination af en bestemt vægtning for regulatoren og et bestemt valg af det lineariseringspunkt, som regulatoren beregnes ved. Iøvrigt designes regulatoren nøjagtigt som i de foregående kapitler.

Det stationære punkt der lineariseres ved, vælges ved møllens nominelle effekt og dens nominelle omløbstal. I det aktuelle vindområde vil det ikke være muligt at opnå nominel effekt, men ved at lade regulatoren arbejde derhen imod opnås de egenskaber, der ønskes for regulatoren. Modmomentet vil holde omløbstallet på den nominelle værdi, idet det skrues op og ned i forhold til vindhastigheden. Ved en høj vindhastighed vil modmomentet være højt, og dermed vil udgangseffekten være høj. Ved den øvre kritiske

vindhastighed vil udgangseffekten være på sin nominelle værdi, og dermed kan P,ω-Regulatoren tage over.
Der lineariseres ved den lavest mulige vindhastighed, hvor der kan opnås nominel effekt, og det er ved den øvre kritiske vindhastighed.

```
v0vedop=11;
```

Når omløbstallet er fikseret, og vindhastigheden stiger, er det ikke længere muligt at fastholde den optimale λ. For β's vedkommende betyder det ikke store ændringer i forhold til c_p-maks. regulatoren. Det viser sig, at den β der giver den optimale c_p for vindhastigheder mellem 8 m/s og 11 m/s, ligger nogenlunde konstant lige under 0. Det vil man også kunne overbevise sig om ved at se på c_p kurven (figur 10.2). Derfor holdes β konstant og på samme værdi som c_p-maks. regulatoren.

```
beta0vedop=0.5;
```

Det modmoment der reguleres omkring er bestemt af det nominelle omløbstal, den effekt der kommer ind på rotoren ved nominelt omløb og den givne vind (meget tæt på nomineleffekt).

$$T_{g,mod} = \frac{P_r}{\omega_{g,nom}} \quad [Nm] \tag{15.1}$$

Modmomentet beregnes til

```
tgmod0vedop = 2135.9
```

Ved disse stationære indgange beregnes de stationære tilstande.

```
x19 = 4.2935
x20 = 0.0066
x21 = 105.6203
```

og de stationære udgange

```
yvedop(1) = 105.6203
yvedop(2) = 225.59e+03
```

Det lineariserede system kan beskrives ved et sæt tilstandsmatricer.

```
Am2vedop =                         Bm2vedop =     Bvm2vedop =
   -0.910  -88.89    0.0361          0              0.115
   1          0     -0.0407          0              0
   325.20  32520.33  -13.22         -0.1            0
```

```
Cm2vedop =              Dm2vedop =
   0  0        1          0
   0  0   2135.9          105.62
```

Egenværdierne for A matrixen er.

```
eig(Am2vedop) =
 -0.0201
 -7.05 +36.89i
 -7.05 -36.89i
```

De ligger alle i venstre halvplan, og er dermed stabile.
Der tjekkes for styrbarhed og observerbarhed.

```
>> rank(obsv(Am2vedop,Cm2vedop)) = 3
>> rank(ctrb(Am2vedop,Bm2vedop)) = 3
```

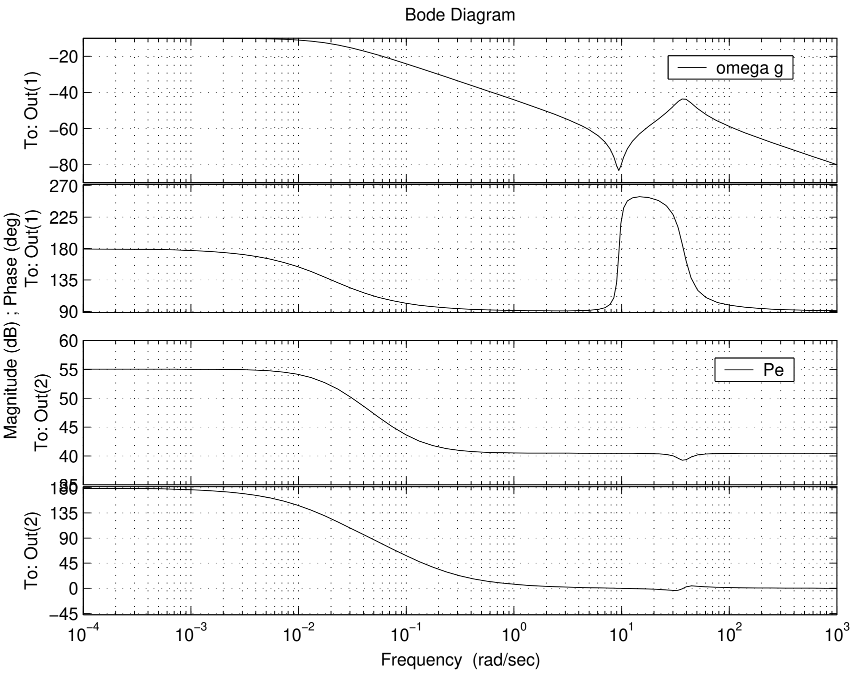
For at lave en LQG-regulering defineres en vægtmatrix, der vægter omløbstallet.

```
ovedop=[0 0 0 0 0
        0 0 0 0 0
        0 0 (x21^-2)*10 0 0
        0 0 0 (prvedop^-2)*1 0
        0 0 0 0 0];
```

Udfra de beregnede systemmatricer og vægtmatrixen bestemmes en forstrærkningsmatrix, der bruges til tilstandstilbagekobling.

```
Kvedop =
   -1575.8   -0703.3    0001.1
```

Det viser sig desværre, at de er meget høje. Det kan forklares med et bodeplot fra modmomentet til omløbstallet.



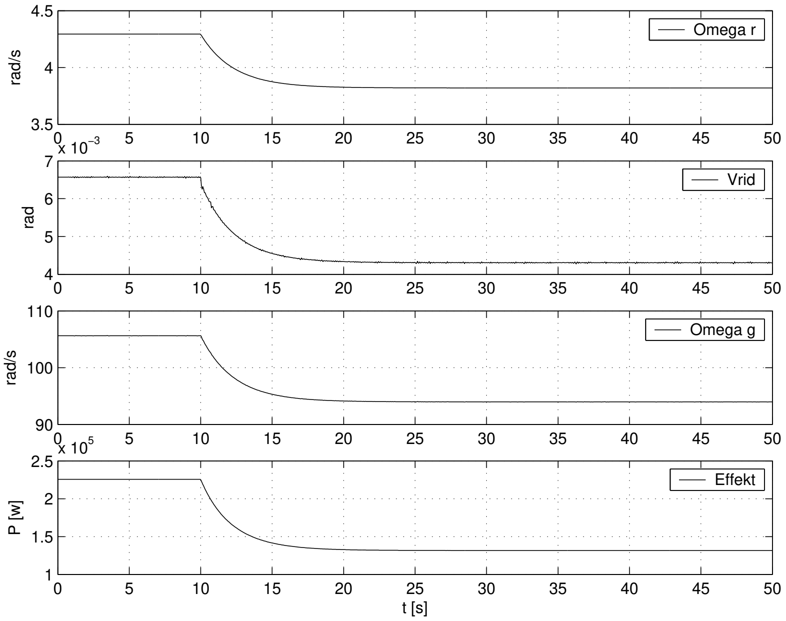
Figur 15.1: Bodeplot fra modmoment til ω_g og udgangseffekt for ω regulatoren.

Forstærkningen fra modmomentet til omløbstallet starter i -10 dB, og falder for højere frekvenser. Derfor kræver det en høj forstærkning at påvirke omløbstallet ved at bruge modmomentet. Overføringen fra β til omløbstallet er langt højere. Desuden har de tilstande, fra hvilke der er store forstærkninger i forvejen, relativt lave værdier. Det drejer sig om omløbstallet for rotoren og vredet af akslen. Af den grund må forstærkningerne også være store.
Egenværdierne for den lukkede sløjfe beregnes.

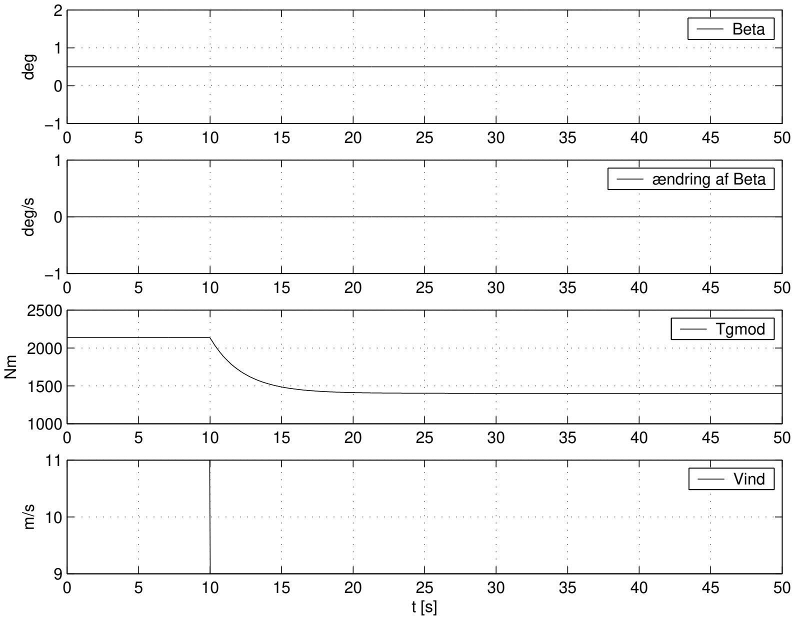
```
egenlqgvedop =
  -0.41
  -6.80 +36.90i
  -6.80 -36.90i
```

De ligger også alle i venstre halvplan og ganske tæt på dem for den åbne

sløjfe.
For at være sikker på at regulatoren fungerer efter hensigten, gennemføres et par simulationer.



Figur 15.2: Tilstande og udgangseffekt for ω regulatoren for en trinpåvirkning på vindhastigheden fra 11 m/s til 9 m/s



Figur 15.3: Styresignaler og vind for ω regulatoren for en trinpåvirkning på vindhastigheden fra 11 m/s til 9 m/s

Faldet i vindhastighed betyder, at udgangseffekten falder drastisk mens, omløbstallet også falder men ikke så voldsomt. Det ville være ønskeligt med et endnu mere konstant omløbstal, men det ville kræve endnu højere forstærkninger. Dette respons demonstrerer at regulatoren fungerer efter hensigten.

Kapitel 16

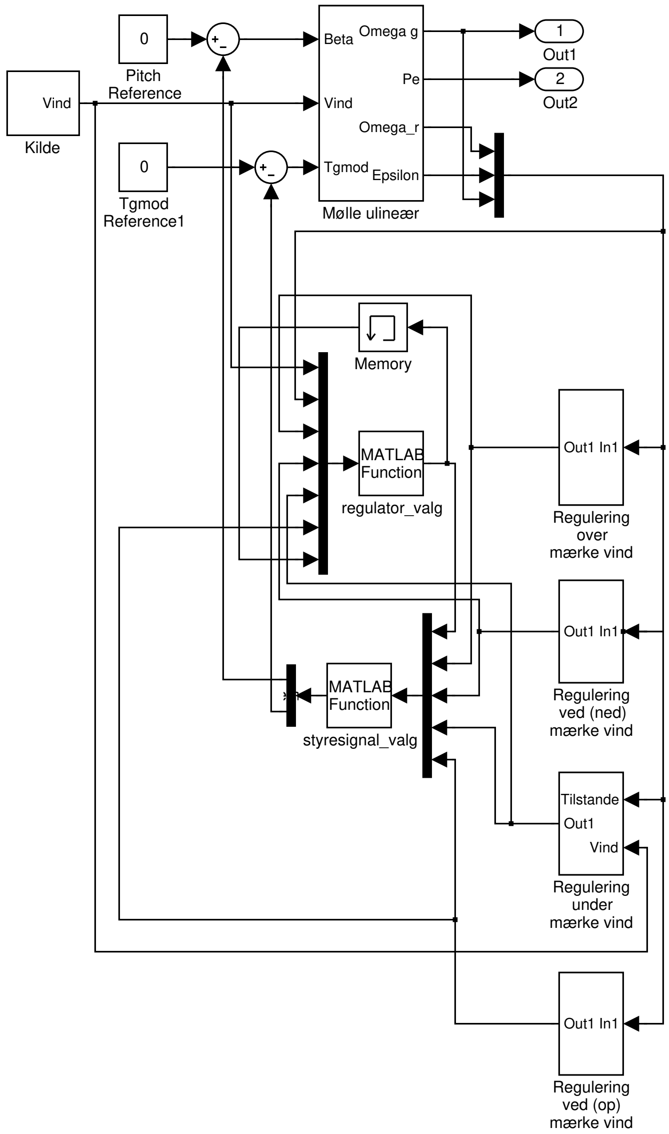
Bumpless transfer

I første del af projektet er der opstillet en metode til sammenkobling af forskellige regulatorer. Problemet med sammenkoblingen af de 4 netop beskrevne regulatorer kan løses ved at bruge samme metode. Konklusionen fra første del var, at styresignalernes værdier skulle bruges til at bestemme, hvornår der skulle skiftes fra en regulator til en anden. Styresignalerne moniteres derfor grundigt under problemløsningen, og hvis de ikke opfører sig hensigtsmæssigt, kan det blive nødvendigt at ændre på regulatorerne eller lineariseringspunkterne.

Den samlede regulering er opbygget i simulink, se figur 16.1. Diagrammet kan i første omgang se lidt forvirrende ud. Øverst i midten er den ulineære vindmøllemodel. Indgangene er de to styresignaler samt vindhastigheden, og udgangene er de tre tilstande og udgangseffekten. I højre side er der 4 blokke, der ligner hinanden, det er de 4 regulatorer. De midterste blokke er dem, der styrer skiftene mellem regulatorerne.

Skiftemekanismen er delt i to blokke. Den ene hedder $styresignal\_valg$. Indgangene til den er styresignalerne fra de 4 regulatorer samt et kontrolsignal. Udgangene er de styresignaler, der skal være aktive, og det bestemmes af kontrolsignalet. Boksen fungerer altså som en simpel kontakt mellem de fire regulatorer, der styres af kontrolsignalet.

Den anden del af skifte mekanismen findes i boksen $regulator\_valg$. Den producerer kontrolsignalet til $styresignal\_valg$ udfra en vifte af indgangssignaler. Det er i $regulator\_valg$, den intelligente del af algoritmen ligger.



Figur 16.1: Overordnet Simulink diagram for den samlede regulering

De signaler der bruges til at bestemme skiftene er: tilstandene, styresignalerne fra de fire regulatorer samt den forrige tilstand. Vindsignalet går også ind i boksen, men det bruges kun til forskellige tests.

Algoritmen der bestemmer disse kontrolsignaler, bygges op som en tilstandsmaskine. Den har fire tilstande en for hver regulator. Den tilstand, som maskinen er i, bestemmer hvilken regulator, der er aktiv på det pågældende tidspunkt. Det gør den ved at udskrive et kontrolsignal svarende til den pågældende regulator. De logiske sætninger der bruges til at skifte mellem tilstandene og dermed regulatorerne, opstilles i de følgende underafsnit.

Algoritmen er vedlagt i appendix *regulator_valg.m*. For hver simulink iteration beregner algoritmen den næste tilstand. For at bevare overblikket beskrives algoritmen først i et flowchart, som kan ses på figur 16.2. Ved at sørge for at ændringerne først laves i dette diagram og dernæst i .m-filen, er der mindre risiko for, at der opstår fejl, idet det logiske overblik i diagrammet er betydeligt bedre end for .m-filen.

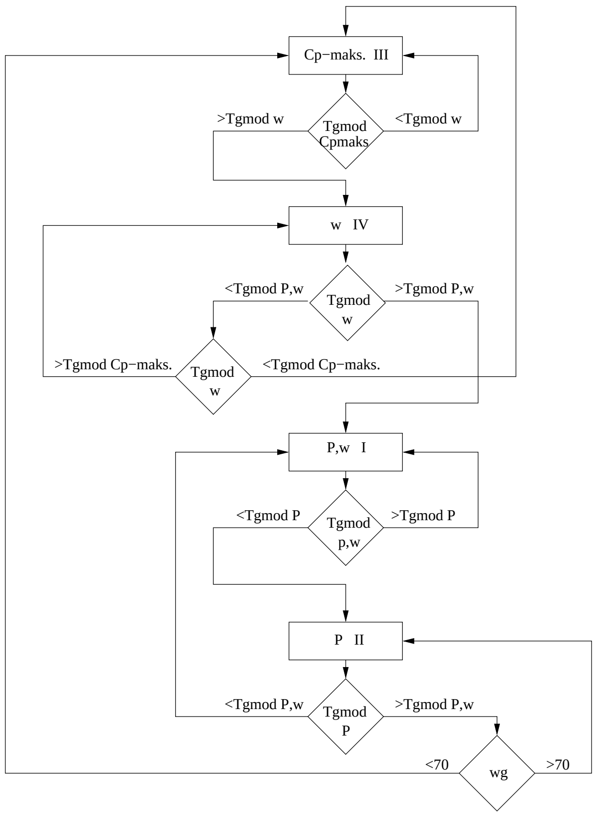
Som det måske er bemærket, gælder diagrammet kun for modmomentet. I figur 16.3 er der opstillet et diagram for bladvinklen. De to styresignaler kan altså komme fra to forskellige regulatorer. Da regulatorerne så kan komme til at køre på kryds af hinanden, skal stabiliteten undersøges i de tilfælde, hvor der er overlap.

16.1 Skift for modmomenterne

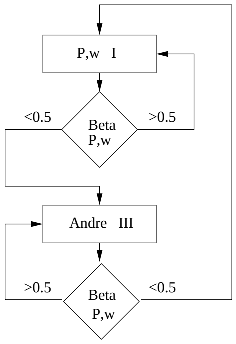
16.1.1 Skift fra P,ω til P Regulatoren

Modmomenterne for P,ω og P Regulatorerne opfører sig hensigtsmæssigt i forhold til hinanden. Ved høje vindhastigheder er modmomentet for P,ω regulatoren størst og omvendt ved lave vindhastigheder. Det skyldes, at modmomentet for P regulatoren ikke er vægtet overhovedet. Derfor reagerer den regulator altid med det største udsving.

Ved et dyk i vindhastigheden kommer der et respons som på figur 16.4. På grafen, der viser hvilken regulator der er aktiv, har hver regulator fået et nummer. Nummereringen kan ses i figur 16.2 og i nomenklaturlisten. Modmomentet for P regulatoren bryder så at sige op gennem modmomentet for

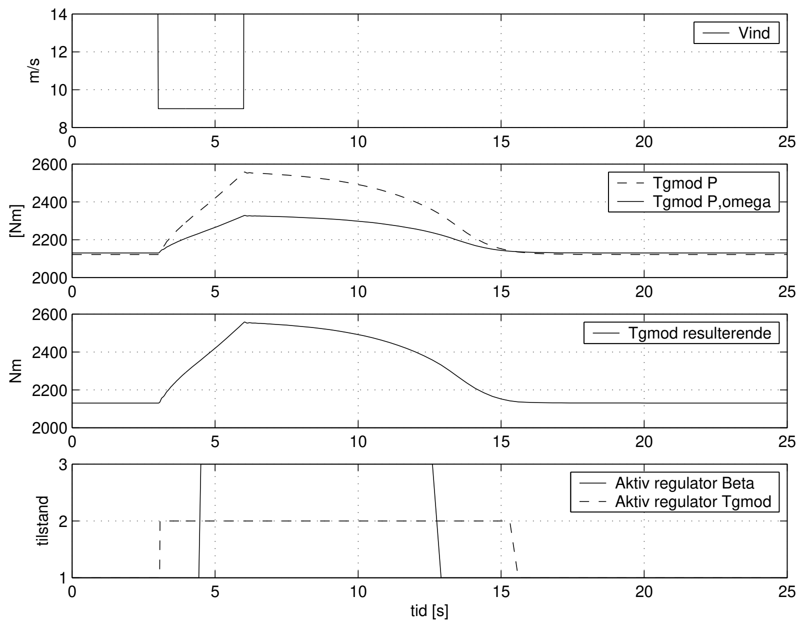


Figur 16.2: Flowchart for skiftealgoritmen for modmomentet.



Figur 16.3: Flowchart for skiftealgoritmen for bladvinklen.

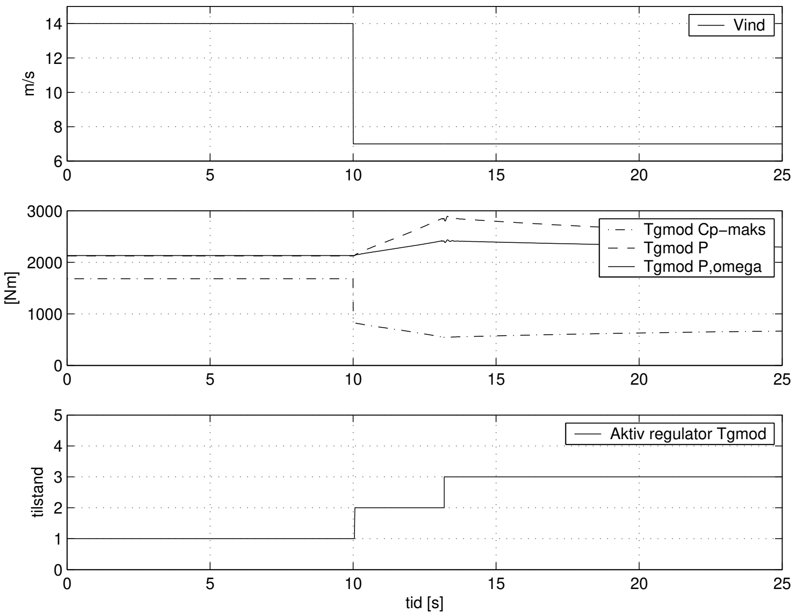
P,ω regulatoren. Det passer fint med den tidligere beskrevne effektdykstrategi. For den skal modmomentet skrues op ved et dyk i vindhastigheden. Men responset er også hensigtsmæssigt, fordi skiftet mellem de to regulatorer kan foretages, idet styresignalerne krydser hinanden. På den måde vil P,ω regulatoren være aktiv ved høje vindhastigheder, mens P regulatoren vil tage over ved lave vindhastigheder. Overgangen mellem de to regulatorer foregår uden abrupte skift, som det ses ved det resulterende modmoment.



Figur 16.4: Modmomenterne for P,ω regulatoren og for P regulatoren.

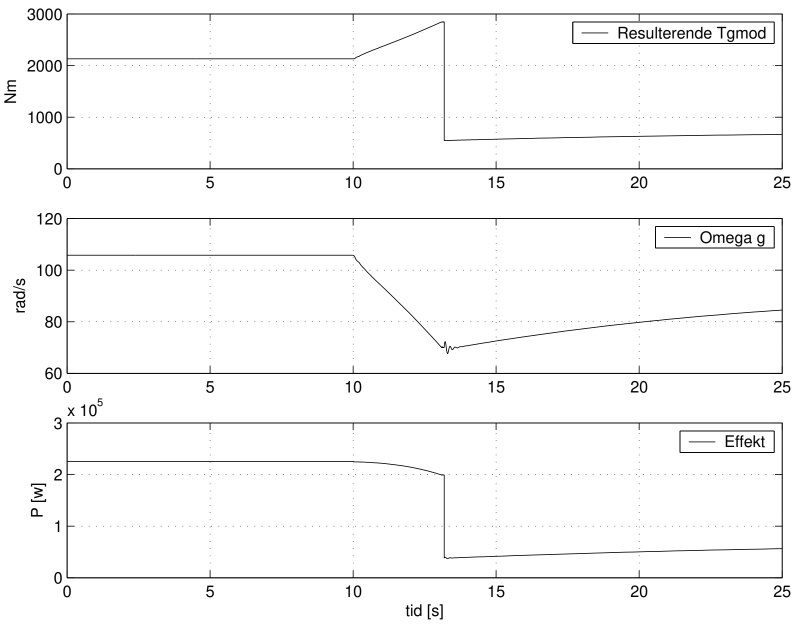
16.1.2 Skift fra P til c_p-maks. Regulatoren

Det er svært, at undgå at skiftet mellem P regulatoren og c_p-maks. regulatoren bliver abrupt. Det skyldes, at P regulatoren skruer op for modmomentet for faldende vindhastigheder, mens c_p-maks. regulatoren gør det modsatte. P regulatoren bremser møllen ned for at holde udgangseffekten konstant. Hvor langt ned den bremses, før der skiftes strategi, er en designparameter. Jo lavere omløbstallet er, jo mere skal der til at accelerere møllen op igen, og det kræver et lavt modmoment og dermed en lav udgangseffekt. Det vil sige, at jo længere tid man prøver at holde udgangseffekten oppe, jo lavere må man acceptere, at den falder ved skiftet til c_p-maks. regulatoren. Som det ses i flowchartet (figur 16.2), tillader reguleringen i dette projekt, at omløbstallet for generatoren falder til 70 rad/s, hvilket er et fald på cirka 2/3 i forhold til det nominelle omløbstal. Skiftet illustreres med de to grafudskrifter 16.5 og 16.6.



Figur 16.5: Vindtrin fra 14 m/s til 7 m/s.

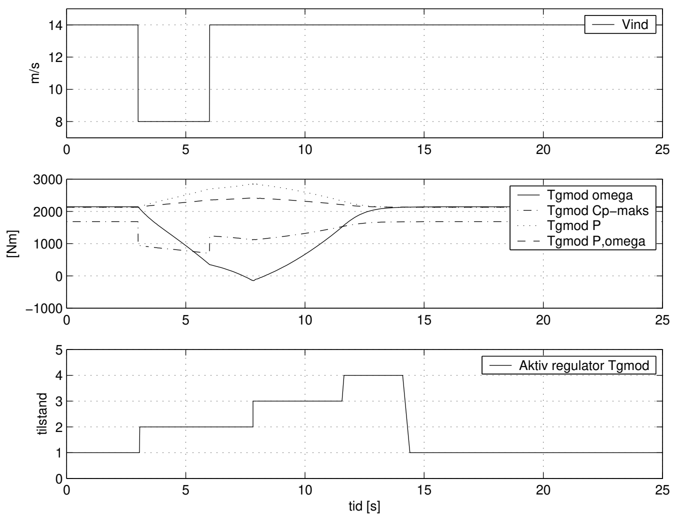
Modmomenterne for de tre første regulatorer ses på 16.5. P,ω regulatoren er aktiv, men så falder vindhastigheden. Modmomentet for P regulatoren vokser over det for P,ω regulatoren, og derfor aktiveres P regulatoren. Den skruer op for modmomentet, og på 16.6 viser grafen for ω_g, at omløbstallet falder. På det tidspunkt hvor omløbstallet når under 70 rad/s, skiftes c_p-maks. regulatoren ind. På figur 16.5 viser den nederste graf, præcist hvornår skiftene kommer, og idet c_p-maks. regulatoren skiftes ind, er modmomentet for P regulatoren på cirka 2800 Nm, mens modmomentet for c_p-maks. regulatoren er på 550 Nm. Det skift i størrelsen af modmomenterne slår igennem til udgangseffekten, og det er en af de uheldige sider ved reguleringen.



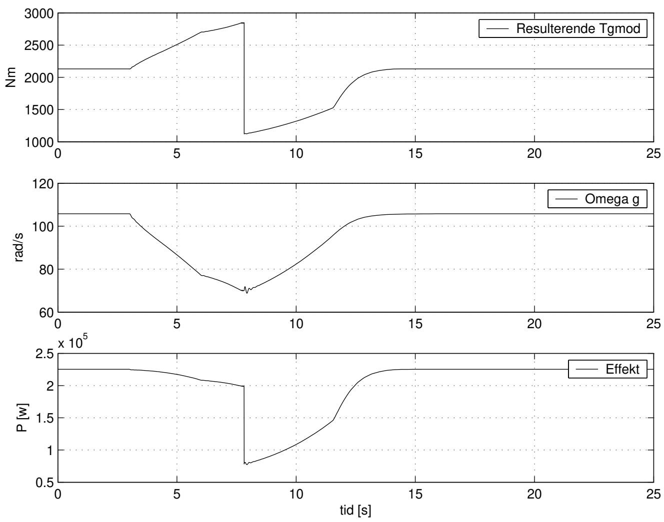
Figur 16.6: Vindtrin fra 14 m/s til 7 m/s

16.1.3 Skift fra c_p-maks. til ω og til P,ω Regulatoren

Det sidste led der mangler i kæden for at få lukket hullet mellem c_p-maks. regulatoren og P,ω regulatoren, er ω-regulatoren. Arbejdsområdet for modmomentet for c_p-maks.regulatoren og for P,ω regulatoren ligger langt fra hinanden. For at få en pæn overgang mellem de to kræver det altså, at modmomentet for ω regulatoren har et stort arbejdsområde. Regulatoren er indstillet på nominelt omløb, og det er altså ikke nødvendigt at vægte modmomentet. Derfor viser det sig, at modmomentet faktisk har et stort arbejdsområde, og ved den rette vægtning kan det variere så meget, at det både når ned på samme niveau som det for c_p maks. regulatoren og op på det samme niveau som for P,ω regulatoren. Dette illustreres med en simulation.



Figur 16.7: Skift mellem alle regulatorerne.

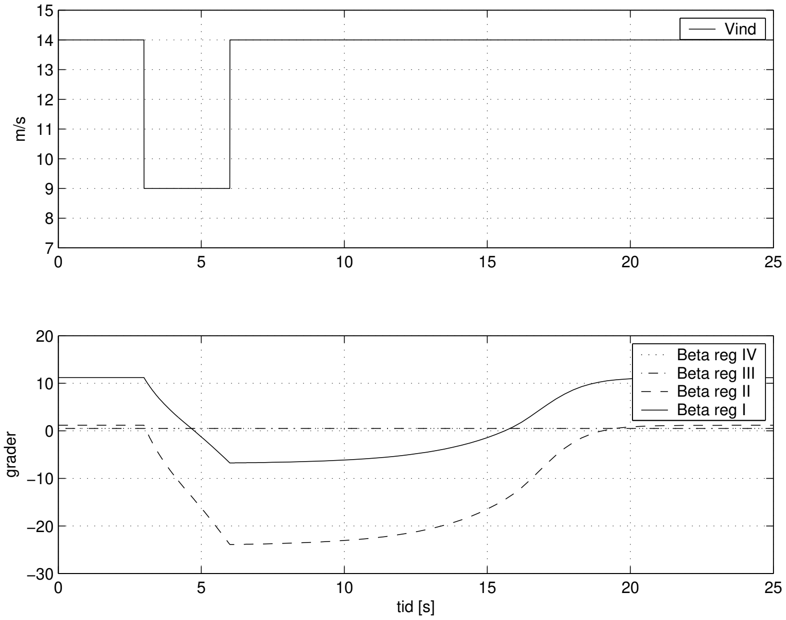


Figur 16.8: Skift mellem alle regulatorerne.

På den treje graf på figur 16.7 vises hvilken regulator, der er aktiv. Ved at se på de fire modmomenter ovenover kan man se, hvordan det resulterende modmoment er stykket sammen. Sammenkoblingen af regulatorerne er vellykket. Det eneste sted der ikke er en glat overgang, er fra P regulatoren til c_p-maks. regulatoren.

16.2 Skift for bladvinklerne

For bladvinklen bruges en mere simpel algoritme til at bestemme det resulterende styresignal. For c_p-maks. og for ω regulatorerne er bladvinklen konstant 0.5 °. For de to andre regulatorer kører styresignalerne for bladvinklen helt synkront blot forskudt. Se figur 16.9



Figur 16.9: Bladvinklen for et dyk i vinden

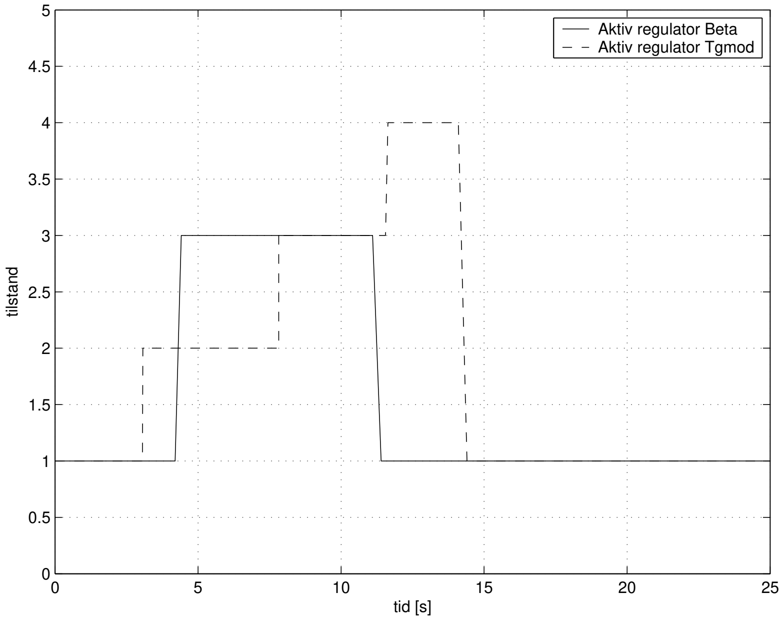
Da de to egentlige styresignaler aldrig kommer til at krydse hinanden, vil det ikke være muligt at skifte mellem dem, uden der kommer et abrupt skift. Af den grund bruges kun styresignalet fra P,ω regulatoren. Det lyder lidt voldsomt bare at ignorere P regulatoren, men der er et par grunde til, at det går godt.

- P regulatoren skal kun være aktiv i en relativt kort periode.
- Hvis vindsignalet ændrer sig så hurtigt som i tilfældet her, må β alligevel ikke ændre sig hurtigere, end styresignalet fra P,ω regulatoren gør. Det at bruge P,ω regulatorens styresignal giver således det bedst mulige resultat.

På den anden side risikerer man, at vingen begynder at dreje væk fra vinden for tidligt ved en stigende vindhastighed. Det problem kan løses ved at lave lidt om på P,ω regulatorens lineariseringspunkt.

16.3 Stabilitet

I visse tilfælde vil de aktive styresignaler komme fra to forskellige regulatorer. Det vil sige, at den aktive forstærkningsmatrix er en hybrid mellem to forskellige forstærkningsmatricer. Derfor undersøges det, om det giver anledning til ustabilitet ved at se på lukketsløjfe egenværdierne for hybridmatrixen og de berørte system matricer. Dette garanterer ikke stabilitet, da systemet er ulineært, men det giver et fingerpeg. På figur 16.10 vises en sekvens af skift.



Figur 16.10: Skiftetidspunkter for de to styresignaler.

Ved et skift ned fra P,ω til P vil der komme et overlap. Styresignalet for modmomentet vil komme fra P, og det for bladvinklen vil komme fra P,ω. Det giver følgende forstærkningsmatrix.

```
Kover_ved_1 =
  -19.7499  -28.3701   -0.0138
   -0.0008   -0.0001   20.2210
```

Sammen med tilstandsbeskrivelsen for P,ω regulatoren giver det egenværdier i venstre halvplan.

```
egen_ov_1_over =
  -1.1746
  -6.1422 +37.0711i
  -6.1422 -37.0711i
```

For tilstandsbeskrivelsen for P regulatoren er egenværdierne også stabile.

```
egen_ov_1_ved =
```

```
 -0.0462
 -6.1115 +37.0602i
 -6.1115 -37.0602i
```

På et tidspunkt kommer styresignalet for bladvinklen fra P,ω regulatoren under 0.5. Indtil da styrer P,ω regulatoren bladvinklen, men efter er det c_p-maks. regulatoren, der styrer bladvinklen. Det vil sige, at den er konstant. Dette skift kan komme, endnu mens P regulatoren er aktiv, og vil virke som en begrænsning af dennes styresignal for bladvinklen, idet den holdes konstant uanset, hvad styresignalet fra P regulatoren gør. Der har ikke været nogen symtomer på integrator windup. Desuden bliver styresignalet for β fra P regulatoren aldrig aktivt. Derfor vurderes dette overlap ikke til at være noget problem.

Det næste problem der kan opstå, er at bladvinklen for P,ω regulatoren aktiveres, mens c_p-maks. eller ω regulatoren stadig er aktiv. Det vil sige at β for P,ω regulatoren vokser over 0.5 °. Der kommer dermed en ny hybrid-matrix.

```
>> K_under_over = [Kover(1,:);regulator_tabel(5,:)] =

  -19.7499  -28.3701   -0.0138
 -185.5295  -35.0016   -1.3097
```

Den forstærkningsmatrix skal være stabil for en systembeskrivelse, der er lineariseret i det område, hvor matrixen kommer til at være aktiv. Dette område vurderes til at være ved vindhastigheder omkring 8 m/s. Derfor bruges tilstandsbeskrivelsen for c_p-maks reguleringen for 8 m/s. B matrixen får tilføjet en søjle, da β nu kan styres. Den beregnes som under P,ω regulatoren blot med det nye lineariseringspunkt (se matrixen 9.10). Egenværdierne for det system beregnes.

```
>> egen_under_over=eig(Am2under-Bm2under*K_under_over) =

 -4.7755
 -7.2175 +36.9451i
 -7.2175 -36.9451i
```

Alle er stabile. Som nævnt kan det samme problem opstå for ω regulatoren og P,ω regulatoren. Hybrid forstærkningsmatrixen er for dette tilfælde.

```
>> K_vedop_over=[Kover(1,:);Kvedop] =
   1.0e+03 *
```

```
   -0.0197   -0.0284   -0.0000
   -1.5758   -0.7033    0.0011
```

Stabiliteten for denne forstærkningsmatrix testes igen i det arbejdsområde, hvor den typisk vil være aktiv. Det område vurderes til at passe meget godt overens med lineariseringspunktet for ω regulatoren. Igen skal B matrixen have tilføjet en søjle.

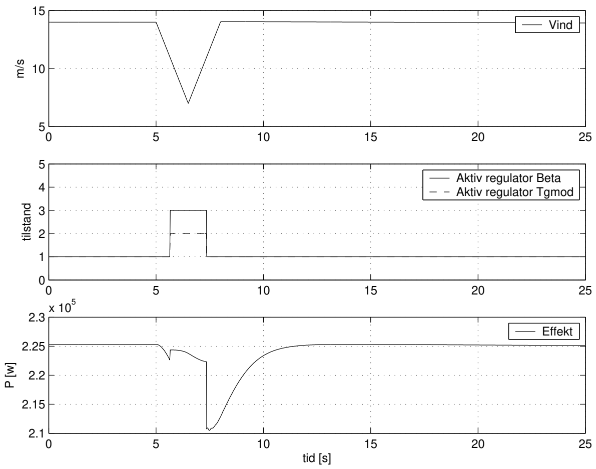
```
>> egen_vedop_over=eig(Am2vedop-Bm2vedop*K_vedop_over) =

  -2.5499
  -6.8513 +36.9417i
  -6.8513 -36.9417i
```

Disse beregninger giver en kraftig indikation af, at den designede regulering er stabil.

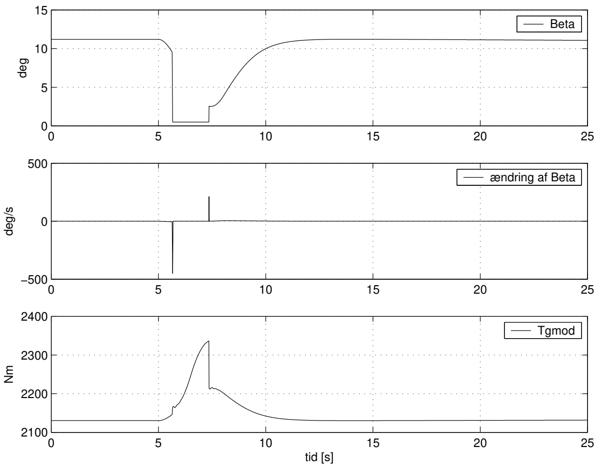
16.4 Skift bestemt af vinden

Hvis skiftetidspunktet ikke vælges med omhu, kan resultatet blive noget anderledes. For at give en ide om hvordan det kan se ud, ændres skifte algoritmen.

- β reguleringen træder ikraft når vindhastigheden er over 11 m/s, og sættes til 0.5 °, når den er under
- Skiftet mellem P,ω regulatorens og P regulatorens modmomenter foretages, når vinden passerer 11 m/s.



Figur 16.11: Signaler for model II ved en forringet skiftealgoritme.



Figur 16.12: Styresignaler for model II ved en forringet skiftealgoritme.

Det giver dårlige styresignaler. Det er tydligt at ændringen af bladvinklen bliver for hurtig. Desuden slår transienterne på modmomentet igennem til udgangseffekten. Det understreger vigtigheden af at lave bumpless transfer, når flere regulatorer er i brug. Skifte algoritmen er bare ændret på to punkter. Resultatet ville blive tilsvarende ringe, hvis der slet ikke var nogen gennemtænkt skiftealgoritme.

Kapitel 17

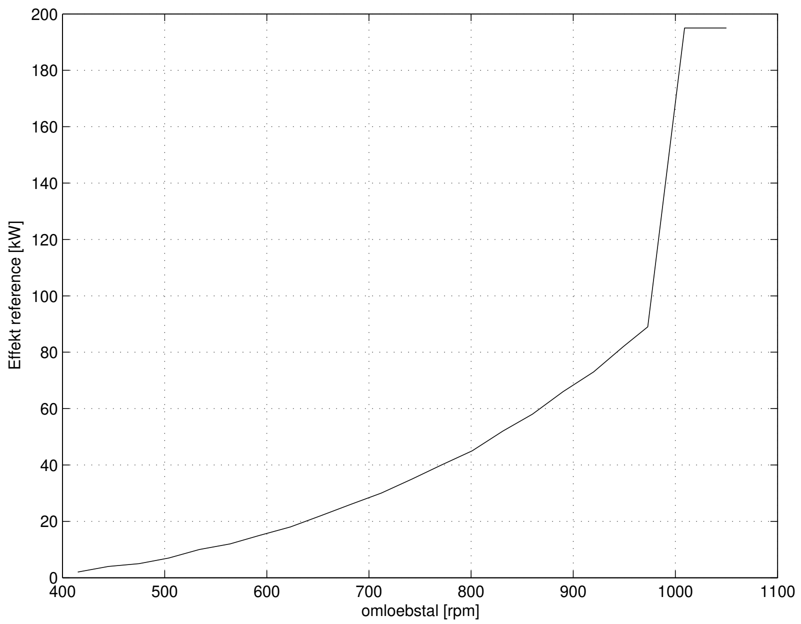
Simulationer

I dette kapitel indgår den samlede regulering i en række tests og sammenligninger.

17.1 Risø model

Man har på Risø's forskningscenter også opstillet en model for Vestas v29. Den er forskellig fra den, der er opstillet i dette projekt. Desuden er den udstyret med en dobbelt PI regulering; en for bladvinklen og en for modmomentet. Den bruges til at lave nogle sammenlignende simulationer på. I appendix C er et par Simulink diagrammer vedlagt for Risø-modellen.

For Risø systemet er problemet med effektdyk udtalt. Det kan skyldes den måde, hvorpå modmomentet bestemmes for c_p-maks. reguleringen. Til det bruges omløbstallet, som det ses på grafen for effektreferencen i figur 17.1.



Figur 17.1: Effekt reference for Risø modellen.

Problemet med at bruge omløbstallet er, at referencen bliver meget stejl på den sidste del af kurven.

Ved c_p-maks. strategien følges omløbstal og udgangseffekt ad fra 'cut-in' til 8 m/s. Ved 8 m/s kører møllen med nominelt omløbstal men ikke med nominel udgangseffekt. Hvis man vil bruge denne omløbstal-effekt kurve, må man acceptere, at der kommer et spring i effektreferencen, fra den effekt man kan opnå ved 8 m/s til nominel effekt; ved det nominelle omløbstal.

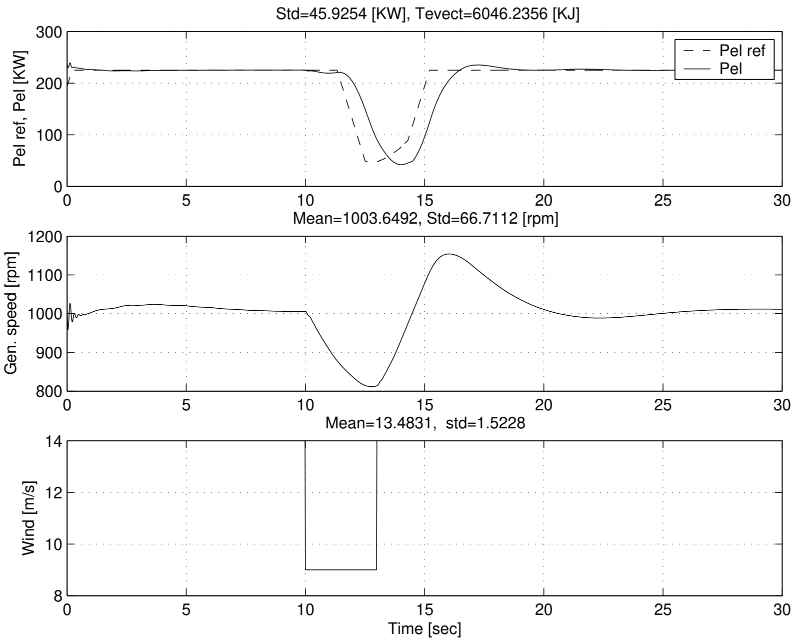
Hvis omløbstallet kortvarigt falder under det nominelle, vil det resultere i et drastisk fald i referencen for modmomentet. Det giver et fald i modmomentet og dermed i udgangseffekten.

Hvis effektreferencen var baseret på et vindestimat, ville det være muligt at lave en kurve, der ikke havde dette stejle spring. Forbedringen for kurven ville altså ligge i vindområdet fra 8 m/s til 11 m/s. Her ville effekt referencen være indstillet med det faktum for øje, at den effekt det er muligt at optage fra vinden, ikke stiger abrupt men kubisk med vindhastigheden.

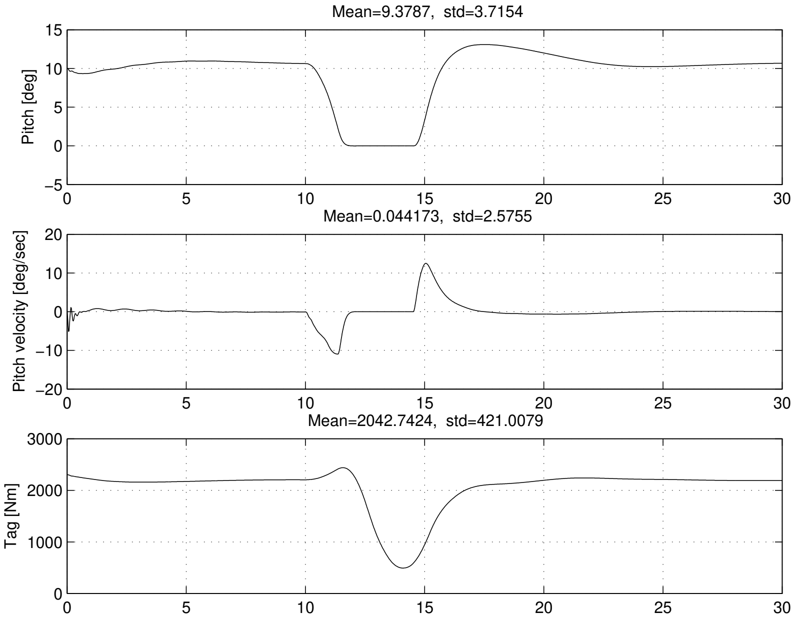
Dette løsningsforslag ville kræve et estimat af vindhastigheden.

17.2 Vinddyk på Risø-model

Den beskrevne LQG regulering er blandt andet designet til at modstå et dyk i vindhastigheden. Det signal der er arbejdet med, er ganske vist urealistisk, men for at lave en sammenligning påtrykkes det på Risø-modellen.



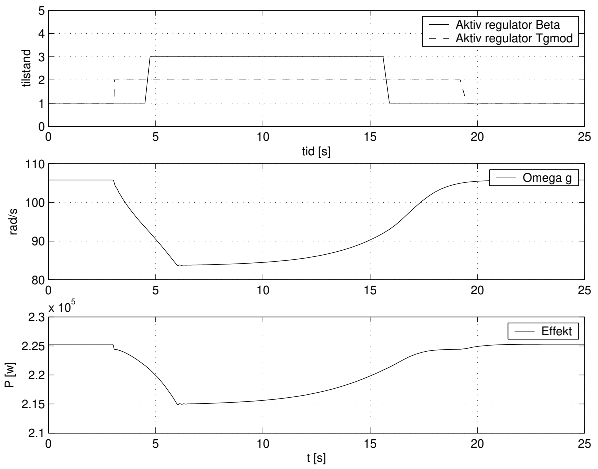
Figur 17.2: Udgangseffekt for Risø modellen.



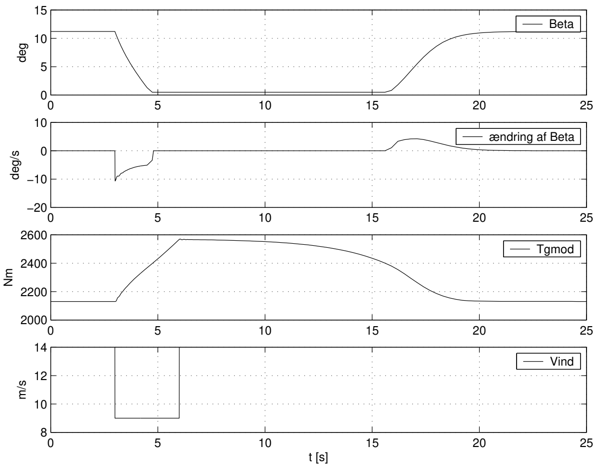
Figur 17.3: Styresignaler for Risø modellen.

Styringen af Risø modellen forsøger ikke at undgå effektdyk på samme måde, som reguleringen for model II gør det. Derfor slår dykket i vindhastigheden direkte igennem til udgangseffekten. Til gengæld kommer udgangen hurtigt op igen, efter at vinden er blevet høj igen. Responset for et dyk hvad enten det er dybere eller ej, har samme form som i figur 17.3 og 17.2. Det er blot dybere eller lavere afhængigt af påvirkningen.

Den samme påvirkning påtrykkes model II. Se figur 17.4 og 17.5.

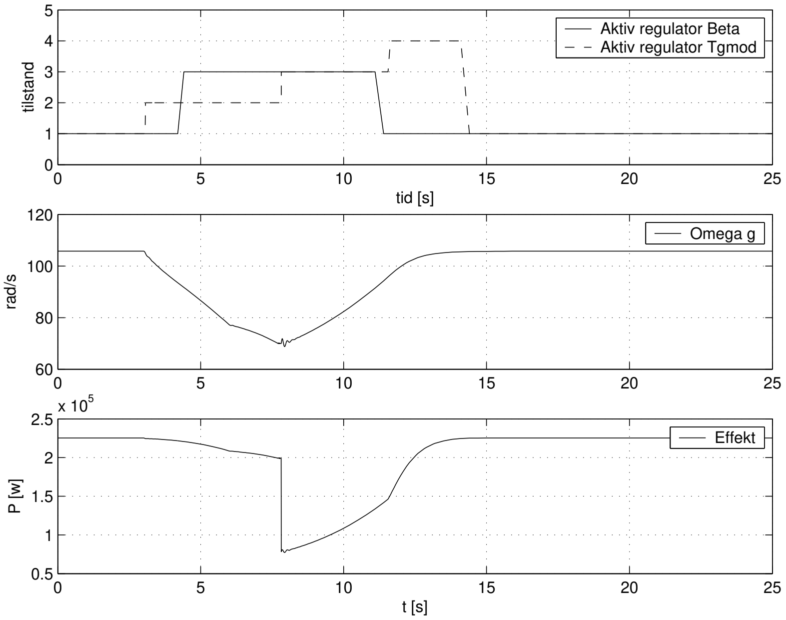


Figur 17.4: Udgangseffekt for model II.

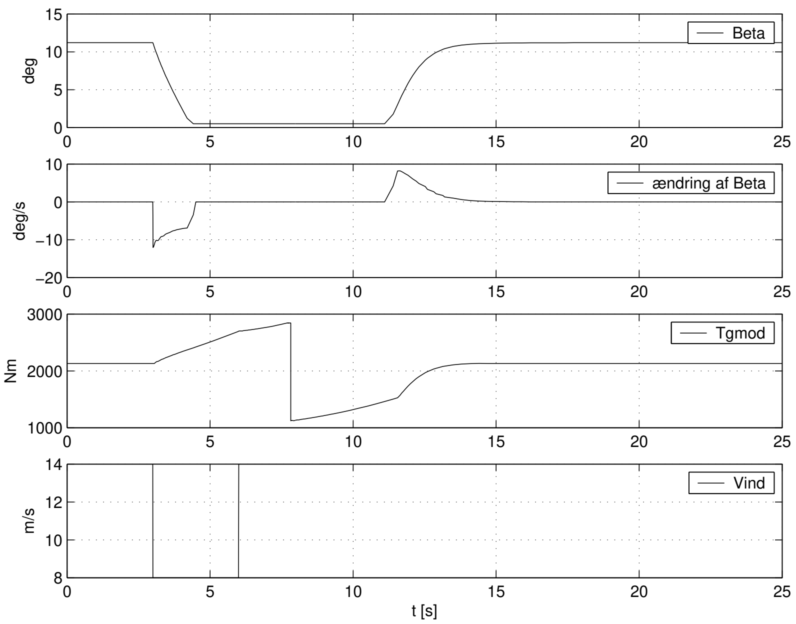


Figur 17.5: Styresignaler for model II.

Her er der markant forskel i udgangseffekten. Den første kurve viser, at det kun er P,ω og P regulatoren, der er aktive. Det er altså den indbyggede effektudglatning for model II, der resulterer i det gunstige reaultat. Som tidligere nævnt er der en grænse for, hvor lang tid strategien går godt. På de næste to plot bremses rotoren så langt ned, at der kommer et voldsomt dyk i udgangseffekten.



Figur 17.6: Udgangseffekt for model II.



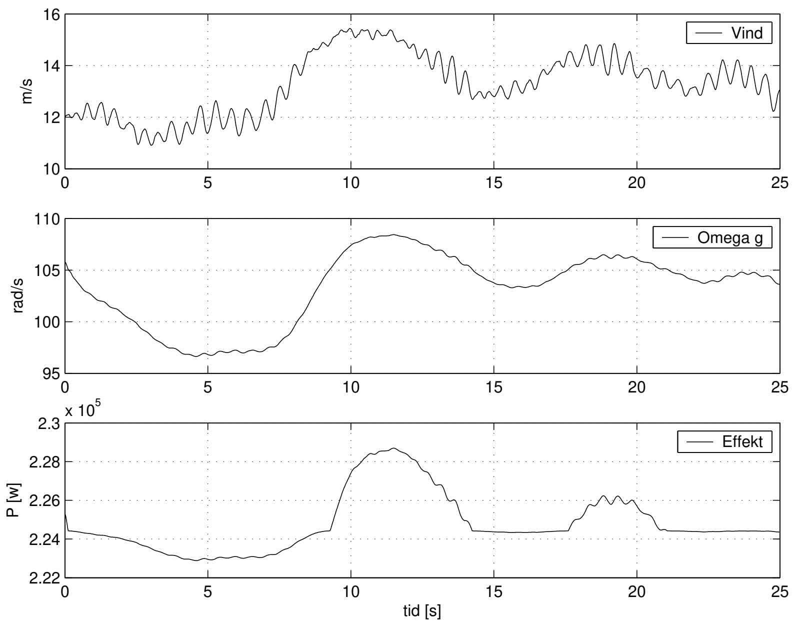
Figur 17.7: Styresignaler for model II.

Udgangseffekten når ned på cirka det samme niveau som udgangseffekten fra Risø modellen (figur 17.2).

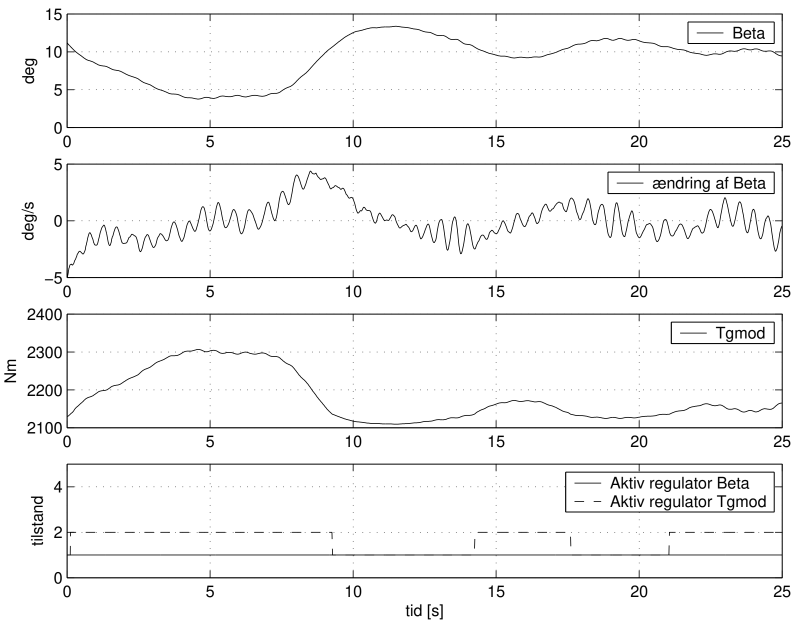
Det er altså muligt inden for visse grænser at bruge rotoren som et slags mekanisk batteri, der kan afhjælpe mindre afbrydelser af energitilførslen.

17.3 Realistisk vind på model II

For at se hvordan reguleringen til model II opfører sig under mere normale forhold, testes den med et realistisk vindsignal (se figur 17.8 og 17.9). Vindmodellen er overført direkte fra Risø's vindmølle model.



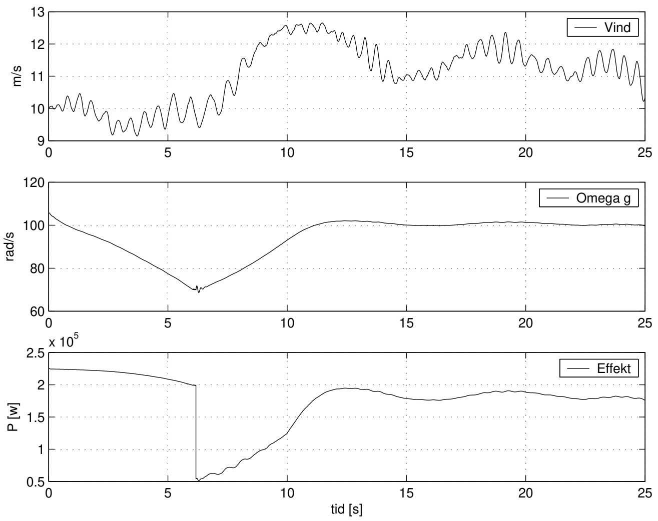
Figur 17.8: Model II ved et vindsignal omkring 12 m/s.



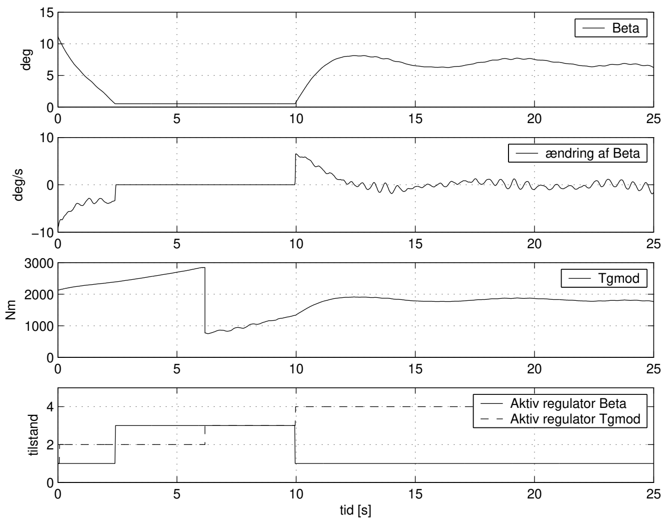
Figur 17.9: Model II ved et vindsignal omkring 12 m/s.

Det er tydeligt, at styringen har en udglattende virkning på udgangseffekten. Det er kun de to regulatorer, der indgår i effektudglatningsstrategien P,ω og P regulatorerne, der er aktive. Ved et dyk i vindhastigheden bremses rotoren ned, modmomentet øges og effekten holdes konstant.

Når rotorhastigheden bliver for lav, skiftes til $c_p$maks. regulatoren, og der kommer et dyk i effekten.



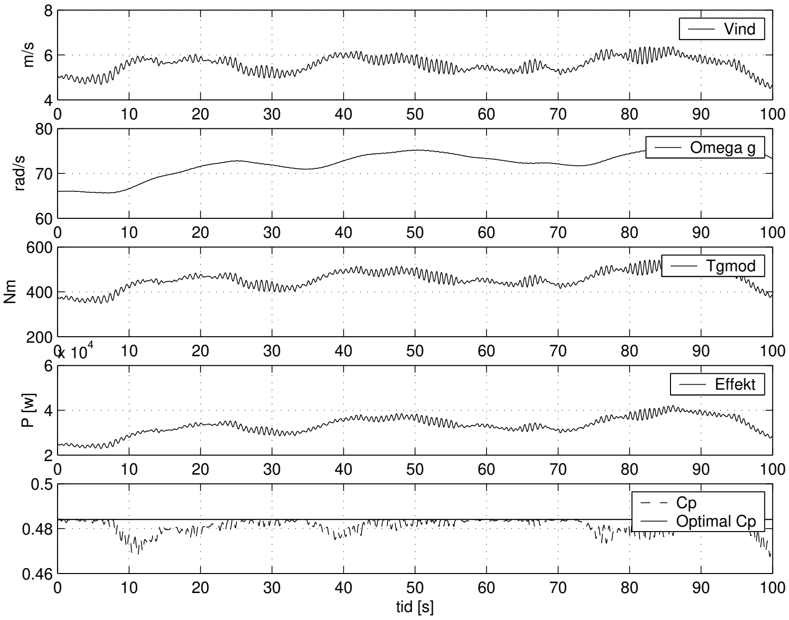
Figur 17.10: Model II ved et vindsignal omkring 10 m/s.



Figur 17.11: Model II ved et vindsignal omkring 10 m/s.

Alle regulatorer er aktive. Den endeligt aktive regulator er ω regulatoren. Der er ikke nok vind til at få en udgangseffekt, der er høj nok til at aktivere P,ω regulatoren. Som kurven for omløbstallet viser, prøver den at holde nominelt omløbstal, mens effekten får lov at svinge.

Endeligt testes c_p-maks. regulatoren.

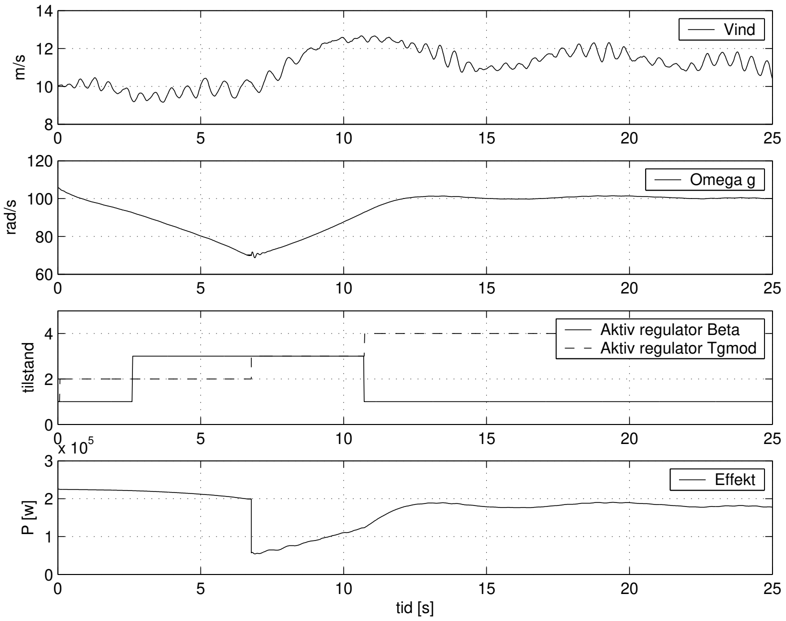


Figur 17.12: Model II ved et vindsignal omkring 5 m/s.

Det er kun c_p-maks. regulatoren der er aktiv i denne simulation. På den sidste kurve, der viser c_p i forhold til den maksimale c_p, ses at regulatoren virker efter hensigten. Når vindhastigheden skifter niveau, tager det lidt tid for rotoren at følge med, men efter lidt tid kommer den på plads, og c_p er igen på det optimale.

17.4 Robusthed for model II

Model II undersøges for robusthed ved at lægge 10% til både rotor og generator inertierne; men kun i simulationsmodellen. Regulatorerne er således designet med værdierne, før de 10% blev lagt til.



Figur 17.13: Model II ved et vindsignal omkring 12 m/s.

Simulationen ligner sig selv, den går i hvert fald ikke grassat. Det lader altså ikke til, at systmet er følsomt over for variationer i parametrene. Dette er selvfølgelig ikke nogen grundig undersøgelse. Den er taget med for at give et fingerpeg.

Kapitel 18

Konklusion

Der blev i projektet arbejdet med bumpless transfer altså skift mellem forskellige regulatorer med så bløde overgange som muligt. Objektet hvorpå bumpless transfer blev afprøvet, var vindmøller. Projektet faldt i to dele en indledende og en videregående.

18.1 Del I

I første del af projektet blev der opstillet en simpel vindmøllemodel. Indgangene til den var bladvinklen β og vindhastigheden, mens udgangen var udgangseffekten. Den blev lineariseret, og der blev designet en regulator til den. Det var en observerbaseret LQG regulator. Der blev opstillet en strategi for styringen af vindmøllen. Under den kritiske vindhastighed skulle bladvinklen være konstant $0.5\,^{\circ}$, og over skulle LQG regulatoren styre bladvinkelen. Forskellige bumpless transfer principper blev forklaret, og en af dem blev testet på den opbyggede model og regulering.

Princippet går ud på at tilstandene i observeren, ikke må løbe løbsk. Det kan de, hvis det styresignal der fødes til selve objektet, ikke er det samme som det, der fødes til observeren. Det kan ske, hvis der er flere forskellige regulatorer i den samlede styring, eller hvis styresignalet går i mætning.

Det princip blev afprøvet, men det viste sig, at der stadig ikke kom et bumpless transfer mellem de to reguleringer (den konstante og LQG regulatoren). Det var tydeligt, at observeren ikke var i den rette tilstand i skifteøjeblikket. Derfor blev skiftetidspunktet ændret fra at være bestemt af vindhastigheden til at være bestemt af regulatorens tilstand. Der blev med andre ord skiftet regulator, idet de to styresignaler krydsede hinanden. Det gav et pænt resultat.

Konklusionen fra del I var dermed, at et skift mellem to regulatorer foregår pænest, hvis det sker på det tidspunkt, hvor de to styresignaler krydser hinanden.

18.2 Del II

I del to skulle de høstede erfaringer fra del I bruges i forbindelse med en mere kompliceret vindmølle model og en mere kompliceret styrestrategi.

Modellen blev udbygget så vredet i akslen kom med. Desuden blev styringen ændret, så møllen ikke længere skulle køre med fast omløbstal. Generatorens modmoment blev dermed et styresignal.

Målene med undersøgelserne i del II var for det første at få gode skift mellem regulatorerne. For det andet skulle det undersøges, om det var muligt at bruge rotorens kinetiske energi i forbindelse med udglatning af møllens udgangseffekt. Rotoren skulle bremses ned for at overføre noget af dens kinetiske energi til generatoren.

Der blev til styringen af vindmøllen opstillet fire regulatorer. De to vigtigste var regulatoren over den kritiske vindhastighed P,ω regulatoren og regulatoren under den kritiske vindhastighed $c_p$maks. regulatoren. Den første skulle holde effekten og omløbstallet på de nominelle værdier. Regulatoren blev designet, og via simulationer blev det vist, at den fungerede efter hensigten. Den anden, $c_p$maks. regulatoren, skulle ved at styre omløbstallet optimere vindmøllens aerodynamiske tilstand og dermed søge at opnå maksimal udgangseffekt. Den blev også designet, og det blev via simulationer vist, at den virkede. $c_p$maks. regulatoren skulle bruge vindhastigheden for at finde ud af hvilket omløbstal, den skulle køre med. Der var altså brug for et estimat af vindhastigheden.

Hvis vindhastigheden kortvarigt falder under den kritiske vindhastighed, resulterer det i dyk i udgangseffekten. Når rotoren for eksempel kører med nominelt omløbstal, har den oplagret en vis mængde kinetisk energi. Ved at bremse rotoren ned frigøres noget af denne energi. Den overføres til generatoren.

For at udglatte udgangseffekten blev der indført en regulator mere, P regulatoren. Den skulle arbejde sammen med P,ω regulatoren. P regulatoren skulle tillade fald i omløbstallet, mens udgangseffekten skulle holdes på den nominelle værdi. Det skulle den gøre ved at skrue op for modmomentet. Ved dyk i vindhastigheden skulle P regulatoren således kortvarigt kobles ind. Via simulationer blev det vist, at dette princip virkede. Altså ved dyk i vindhastigheden kunne dyk i udgangseffekten undgås ved at bremse rotoren ned, idet der blev overført energi fra rotoren til generatoren. Der var dog en grænse for, hvor langt det gik godt. Hvis rotoren kom for langt ned i hastighed, mens vinden var relativt høj, resulterede det i en lav c_p og dermed et ringe effekt optag. Det kunne sætte møllen i stå.

Hvis vindhastigheden var lav, skulle c_p-maks. regulatoren være aktiv. Det blev vist, at denne strategi resulterede i, at møllen kørte med nominelt omløbstal, et stykke før vindhastigheden nåede op på den kritiske vindhastighed. Da det ikke kunne tillades, at det nominelle omløbstal blev overskredet, blev der indført en fjerde regulator, ω regulatoren. Opgaven for denne var at holde omløbstallet på det nominelle, mens den skulle opnå maksimal effekt. Regulatoren blev designet, men det viste sig, at forstærkningerne blev uforholdsmæssigt store. Der var altså en risiko for, at systemet blev støjfølsomt. Grunden til de store forstærkninger var, at overføringen fra modmoment til omløbstal var lille i forhold til overføringen fra bladvinkel til omløbstal. Der skulle dermed store forstærkninger til for at ændre omløbstallet med modmomentet. Desuden var de største forstærkninger fra de to første tilstande i modellen, omløbstallet for rotoren og akslens vred. De to var i forvejen små størrelser, og det var også medvirkende til, at forstærkningerne blev så store. I simuleringsmodellen blev det vist, at regulatoren virkede efter hensigten.

For at koble regulatorerne sammen på en fornuftig måde skulle erfaringerne fra del I bruges. Altså skiftet fra en regulator til en anden skulle ske, idet styresignalerne fra de to krydsede hinanden. Det viste sig undervejs, at de ikke altid krydsede hinanden. Derfor blev det nødvendigt at re-designe regulatorerne, så de relevante styresignaler krydsede hinanden. Det kunne betyde både ændringer af vægtene men også ændringer i lineariseringspunkterne. Dermed skulle regulatorerne ikke blot opfylde de reguleringsmæssige krav, der var stillet til dem, men de skulle også indstilles, så de kunne kobles sammen med de andre regulatorer.

Regulatorerne blev designet, så der kunne skiftes mellem dem på en pæn måde. Skiftet fra P regulatoren til c_p-maks. regulatoren kunne ikke laves uden et abrupt spring i modmomentet. Det var fordi at P regulatoren til det sidste, skruede op for modmomentet for at holde udgangseffekten konstant. Samtidigt skruede c_p-maks. regulatoren ned for modmomentet fordi omløbstallet faldt. På grund af at de to regulatorer var lavet med de mål, de var, kunne skiftet mellem deres modmomenter ikke realiseres på en pæn måde. Bortset fra det lykkedes det at lave bumpless transfer mellem regulatorerne.

Der blev udført en række simulationer for at se, hvordan det samlede system opførte sig under forskellige påvirkninger. På forskningscenter Risø har de opbygget en model af den samme vindmølle, som i projektet her. Der blev fortaget sammenlignende simulationer.

Model II blev lavet, så den kunne klare en dyk i vindhastigheden fra 14 m/s til 9 m/s og op igen til 14 m/s efter 3 sekunder. Hvis den blev udsat for et sådant signal, kunne den holde udgangseffekten tæt på det nominelle. Hvis dykket blev en tak lavere, skiftede styrestrategien ned til c_p-maks. regulatoren, og dermed faldt udgangseffekten til under det halve. Risø modellen blev testet med det samme signal, og det resulterede i, at udgangseffekten dykkede ned til nogenlunde samme niveau, som hvis model II var skiftet til c_p-maks. regulatoren. Model II kunne altså til en vis grænse udglatte udgangseffekten ved et dyk i vindhastigheden.

Vindmodellen i Risømodellen var realistisk. Den blev overført til model II. Det viste sig igen, at model II kunne glatte udgangseffekten ud for mindre vinddyk. Endvidere viste det sig, at de forskellige regulatorer fungerede fint ved den mere realistiske vindpåvirkning.

Der blev lavet et hurtigt tjek af, hvor robust systemet var. Inertimomenterne for rotoren og generatoren blev ændret i simulationsmodellen. Selvom regulatorerne så var designet ved nogle andre inertimomenter, gav det ikke anledning til problemer. Der var altså ikke tegn på, at reguleringen ikke var robust.

18.3 Forbedringer

For eventuelt efterfølgende projekter beskrives mulige forbedringer.

Under beskrivelsen af sammenkoblingen af P,ω regulatoren og P regulatoren, er det nævnt, at P regulatoren har nogle uheldige egenskaber. Hvis rotoren kommer tilstrækkeligt langt ned i omløbstal, og vindhastigheden stiger, kan reguleringen ikke accelerere rotoren op. Det er oplagt at se på en modificering af P-regulatoren, der kan lette lidt på modmomentet, så rotoren kan accelereres op, hvis der er vind til det.

Et andet problem er ω regulatoren. Den har fået meget store forstærkninger. Det kan godt give praktiske problemer. Reguleringen fra den nedre kritiske vindhastighed (cirka 8m/s) til den øvre kritiske vindhastighed (cirka 11 m/s) er et problem, der godt kunne trænge til at blive set efter i sømmene.

For $c_p$maks. regulatoren bruges vindhastigheden til at bestemme, hvilken regulator der er aktiv. Der er altså brug for et estimat af middelvindhastigheden.

Den opbyggede styring skal fin-indstilles, så de forskellige regulatorer arbejder i de områder, hvor det er meningen, de skal arbejde. De områder er ikke lavet helt præcise i dette projekt. Der skal altså fifles lidt med vægtene og lineariseringspunkterne for at få styringen helt på plads.

Del III

Appendix

Appendiks A

Data for Vestas v29

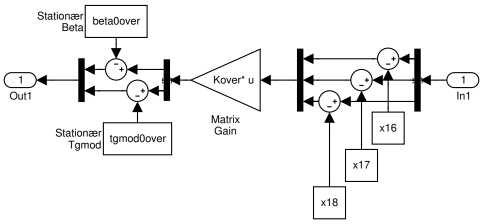
Nominel udgangseffekt	225	$[kW]$
Nominelt omløbstal for rotor	41	$[rpm]$
	4.3	$[rad/s]$
Akslens stivhed	$8e6$	
Akslens dæmpning	$8e4$	
Rotor inerti	90000	$[kgm^2]$
Generator inerti	10	$[kgm^2]$
Gear forhold	24.6	
Vingelængde	29/2	$[m]$
Generator poler	3	
grænser for β	$[-1 \quad 25]$	$^\circ$
Maksimal ændring af β	10	$^\circ/s$

Kilde: Risø's Matlab vindmøllemodel for v29.

Appendiks B

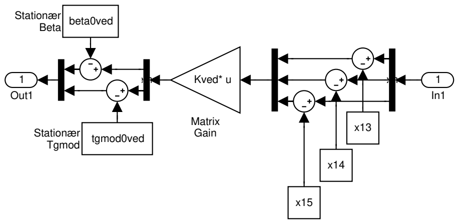
Simulink diagrammer

B.1 P,ω Regulator



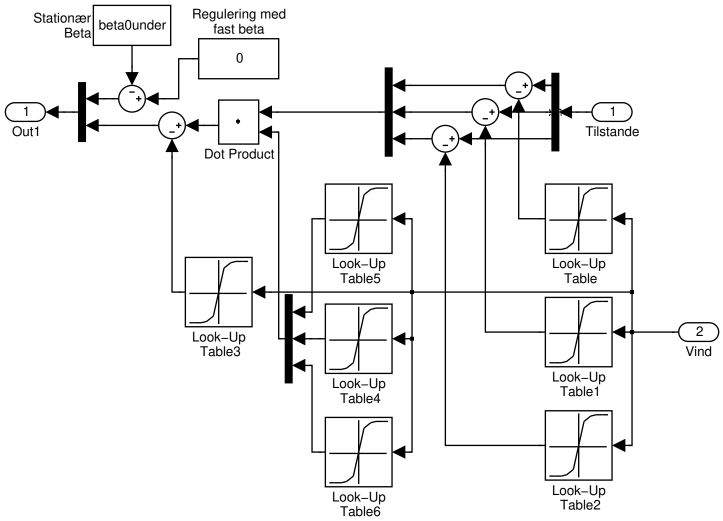
Figur B.1: Simulink diagram for P,ω Regulator

B.2 P Regulator



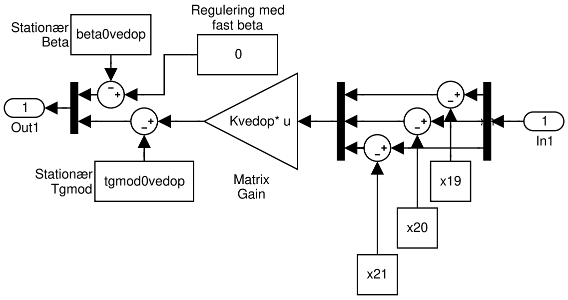
Figur B.2: Simulink diagram for P Regulator

B.3 c_p-maks. regulator



Figur B.3: Simulink diagram for c_p-maks. regulator

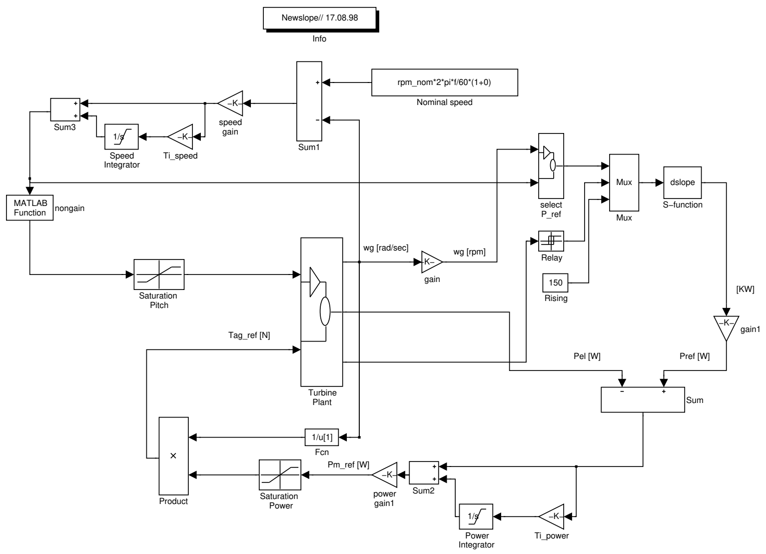
B.4 ω Regulator



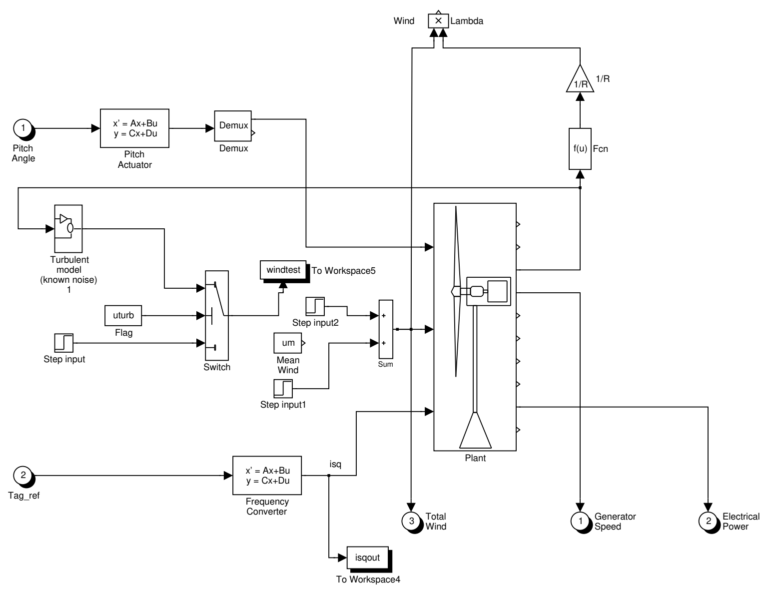
Figur B.4: Simulink diagram for ω Regulator

Appendiks C

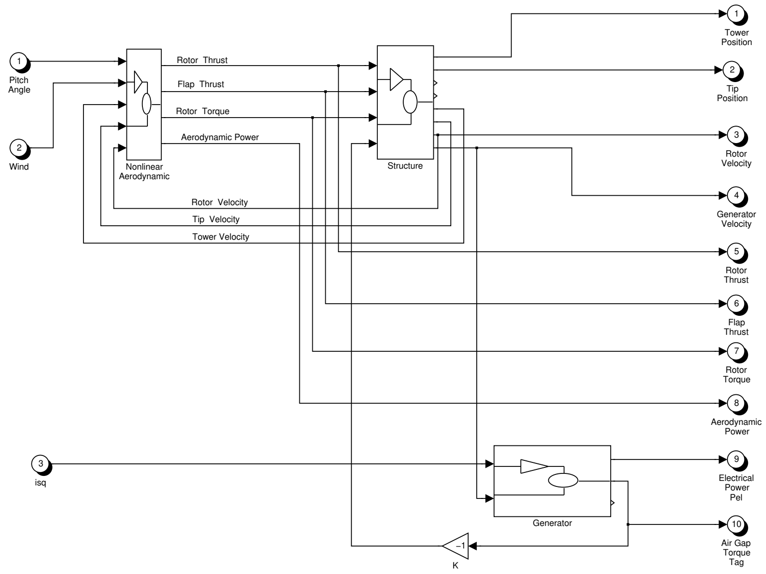
Simulink diagrammer for Risøs Vestas V29 model



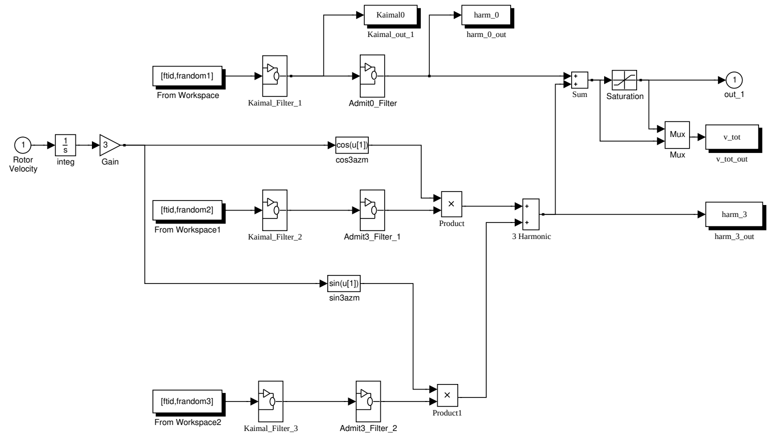
Figur C.1: Regulering



Figur C.2: Turbine plant



Figur C.3: Plant



Figur C.4: Risøs vindmodel.

Litteratur

[Bak 98] Artikel; Bak, M.:"A survey of Anti-Windup and Bumpless Transfer Schemes"; 1998; technical report; IAU DTU Lyngby Denmark;

[Bak 00] Ph.D. Thesis; Bak, M.:"Control of systems with Constraints"; 2000; IAU DTU Lyngby Denmark; ISBN 87-87950-85-5;

[Bindner 94] Bindner, Henrik:"Active Pitch control: wind turbine model"; 1994; Forskningscenter Risø; Rapport;

[Flensborg Sørensen 95] Master Thesis; Flensborg , Jens; Sørensen, Jan B.: "Combined Variable Speed and Pitch Control for Wind Turbines"; 1995; Aalborg University;

[Graebe og Ahlén 96 Bumpless] Artikel; Graebe, S.F.; Ahlén, L.B.: "Bumpless transfer"; 1996;

[Graebe og Ahlén 96] Artikel; S.F. Graebe; L.B. Ahlén: "Dynamic transfer among alternative controllers and its relation to antiwindup controller design"; 1996; IEE transaction on control systems technology, 4(1);

[Hanus] Artikel; Hanus, R.; Kinnaert, M.:"Control of constrained mulitvariable systems using the conditioning technique";

[Hau 96] Hau, Erich:"Windkraftanlagen; Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftkeit"; 1996; Springer; ISBN 3-540-57430-1;

[Heier 98] Heier, Sigfried:"Grid Integrations of Wind Energy Conversion Systems"; 1998; John Wiley & Sons; ISBN 0 471 97143 X;

[Jannerup Sørensen 95] Jannerup, Ole; Sørensen, Paul Haase: "Introduktion til reguleringsteknik"; 1995; Polyteknisk forlag; ISBN 87-502-0781-4

[Jannerup 00 et.al.] Jannerup, Ole; Sørensen, Paul Haase; Hendricks, Elbert: "Forelæsningsnoter til kursus 50310 reguleringsteknik 2"; 2000; Institut for automation DTU;

[Jørgensen 93] Master Thesis; Jørgensen, Henrik Kjær:"Adaptive pitch control of wind turbine"; 1993; IMSOR DTH; ISSN 0 105-8568;

[Kingsley 83] Fitzgerald, A.E.; Kingslet, Charles Jr.; Umans, Stephen D. :"Electric Machinery"; 1983; McGraw-Hill; ISBN 0-07-021145-0;

[Klingenberg 91] Master Thesis; Klingenberg, Bibi:"Adaptive pitch control for wind turbines"; 1991; IMSOR DTH;

[Langreder 96] Langreder, Wiebke:"Models for variable speed wind turbines"; 1996; MSC thesis Loughborough University UK og Forskningscenter Risø;

[Manwell 02] Manwell, J.F.; McGowan, J.G.; Rogers, A.L.:"Wind energy explained; theory, design and application"; 2002; John Wiley; ISBN 0 471 49972 2;

[Middelton 96] Artikel; Middelton, R.H.:"Dealing with Actuator Saturation"; 1996;

[Rasmussen 94] Rasmussen, Knud:"Analogier mellem mekaniske, akustiske og elektriske systemer"; 1994; 4. udgave; Polyteknisk forlag; ISBN 87-502-0762-8;

[XIN 93] Master Thesis; Ma Xin:"Modelling and control of a wind turbine"; 1993; IMSOR DTH;

[XIN 97] Ph.D. Thesis; Ma Xin:"Adaptive extremum control and wind turbine control"; 1997; IMSOR; DTU;

[Young 92] Young, Hugh D.: "University physics"; 1992; 8th edition; Addison-Wesley; ISBN 0-201-52981-5;

[Åström og Rundqwist 89] Artikel; Åström, Karl Johan; Rundqwist, L.: "Integrator windup and how to avoid it"; 1989; Department og automatic control Lund institute of technology; in "American control conference"pages 1693-1698 Pittsbug;

[Åström 97] Åström, Karl J.; Wittenmark, Björn:"Computer controlled systems; theory and design"; 1997; Prentice Hall; ISBN0-13-314899-8; third edition;