
Ondersteuning Implementatie Bladhoekregeling Windturbines

T.G. van Engelen, E.L. van der Hooft

31 december 2001

Abstract

Bij de implementatie van de bladhoekregeling in een windturbine dienen keuzes gemaakt te worden voor de samenstelling van een real-time systeem dat bestaat uit meet- en regelapparatuur en de hard- en software voor dataverwerking. Dit rapport geeft een aantal handvaten om keuzes te motiveren met betrekking tot (i) toerentalmeting en bladverstelling, (ii) dataverwerking gericht op bladhoekregeling en (iii) selectie van een bepaald regelalgoritme.

Verantwoording

Erkentelijkheid gaat uit naar Koert Lindenburg (ECN) voor de uitvoering van vergelijkende berekeningen voor verschillende regelingen op een 750 kW variabel toerenturbine. Dit illustreert de beschreven methode voor motivatie van een aantal keuzes bij implementatie. Daarnaast is dank verschuldigd aan Pieter Schaak (ECN) voor inventarisatie van posite-encoders voor toerenmeting.

INHOUD

1. INLEIDING	5
2. SENSOREN EN ACTUATOREN	6
2.1 Positie-encoder voor toerenmeting	6
2.2 Bladverstelrichting	7
3. DATAVERWERKING	8
3.1 Hardware en systeemsoftware	8
3.1.1 PLC of ontwikkelsysteem en dedicated board	8
3.1.2 Eisen vanuit de bladhoekregeling	9
3.2 Inbedding regelalgoritme	10
3.2.1 Modelvoorstelling	10
3.2.2 Programmamodule	14
4. BEOORDELING REGELALGORITME	15
4.1 Regelaarkenmerken in vergelijkende studie	15
4.2 Turbinegedrag bij zeer sterke wind	16
4.3 Conclusie	18
REFERENTIES	19
BIJLAGE A. OVERLEG ARUN	21

1. INLEIDING

Moderne grote windturbines zijn meestal uitgerust met een bladhoekverstelsysteem. De bladhoekregeling maakt hierom deel uit van het turbine-ontwerp. In deze ontwerpfase worden requirements afgeleid voor sensoren, actuatoren en data-verwerking. Bij de implementatie van de bladhoekregeling dient een real-time systeem samengesteld te worden uit meet- en regelapparatuur en hard- en software voor dataverwerking.

Dit ARB-project, 'Ondersteuning Implementatie Bladhoekregeling Windturbines, project nr. 7.4108', is uitgevoerd om handvaten aan te reiken voor gemotiveerde keuzes bij de samenstelling van zo'n regelsysteem. In het kader hiervan heeft overleg plaatsgevonden met de turbinefabrikanten Lagerweij the WindMaster en NEG-MICON-Holland en real-time systeem ontwikkelaars ProLion en Arun.

De hier gegeven leidraad ten aanzien van sensoren en actuatoren, dataverwerking en beoordeling van regelalgoritmen is een aggregatie van opgedane ervaring bij industriële consultancy voor windturbinefabrikanten. De rapportinhoud is bedoeld als een verbindende schakel tussen de windturbine-industrie en de rapportage [2] van het ARB-project 'Ontwikeling Regeltool', project nr. 7.4046.

2. SENSOREN EN ACTUATOREN

Dit hoofdstuk geeft een aantal handvaten om keuzes te motiveren met betrekking tot toerentalmeting en bladverstelling. In de twee volgende hoofdstukdelen worden verbanden gelegd tussen eisen vanuit de bladhoekregeling en eigenschappen van apparatuur voor toerenmeting en bladverstelling.

2.1 Positie-encoder voor toerenmeting

Tijdens simulaties binnen het regelaarontwerp wordt het toerentalsignaal dat de regeling ingaat verstoord met ruis. Deze ruis wordt zover opgevoerd totdat de bladverstelling als gevolg hiervan ertoe neigt te gaan klapperen tussen rust en de minimum verstelwaarde (grote inactivity zone). Op deze wijze wordt het maximaal toelaatbare ruisniveau bepaald. Er is dan reeds zo'n sterk laagdoorlaatfilter in de regelkring opgenomen dat de faseverdraaiing bij de kritische frequenties reeds de maximaal toelaatbare. Bij toepassing van een positie-encoder wordt het toerental bepaald uit verschil tussen twee aspositie-metingen. De nauwkeurigheid hangt af van het aantal pulsen per as-omwenteling en de tijdspanne tussen opeenvolgende positiemetingen; er is hier dan sprake van kwantisatie-ruis.

De maat uit de simulaties voor de ruis op het toerental is de standaardafwijking $\sigma_{\epsilon_{\omega_g^q}^m}$. Bij gegeven meettijd tussen twee samples, doorgaans gelijk aan de regelcyclustijd ΔT , kan het benodigd aantal pulsen per as-omwenteling direct bepaald worden uit de maximaal toelaatbare standaardafwijking $\sigma_{\epsilon_{\omega_g^q}^m}^{\max}$ [2]:

$$N = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{\pi}{\sigma_{\epsilon_{\omega_g^q}^m}^{\max} \Delta T} \text{ rad/s} \quad (2.1)$$

Zoals uit §3.1 zal blijken bedraagt ΔT in de bladhoekregeling ca. 0.1 s. Ervaring met regelaarontwerp heeft uitgewezen dat een meetruis op het toerental met een standaardafwijking van $\sim 0.25\%$ van het nominale toerental nog toelaatbaar is.

Deze meting zal op de generatoras van een turbine met tandwielkast zelden problematisch zijn; een industrieel leverbare positie-encoder met 512 pulsen is dan afdoende. Bij een Direct Drive uitvoering ligt dit anders. Veelal zal eerst het uiteinde van de rotoras (achter de generator) 'versneld' moeten worden (via een tandwielkastje o.i.d.) voordat met een standaard encoder volstaan kan worden.

Een bijkomend nauwkeurigheidprobleem betreft de constantheid van de meetperiode ΔT . De vereiste constantheid is voor een bepaald toereniveau $\bar{\omega}$ gerelateerd aan het aantal pulsen N per omwenteling dat gekozen is. Stel dat de werkelijke, licht variërende, meetperiode, $\Delta \tilde{T}$ bedraagt, dan moet hiervoor gelden ten opzichte van de beoogde meetperiode ΔT :

$$\left| \frac{\Delta \tilde{T} - \Delta T}{\Delta T} \right| \leq \frac{\pi}{\bar{\omega} \cdot \Delta T \cdot N} \quad (2.2)$$

Voor een Direct Drive met $\bar{\omega} = 2.2 \text{ rad/s}$, $N=5000$ en $\Delta T=0.1 \text{ s}$ is dan een relatieve nauwkeurigheid van tenminste 0.3% vereist.

Deze eis is gebaseerd op het uitgangspunt dat de ruis als gevolg van een eindig aantal pulsen per asomwenteling in dezelfde orde van grootte is als die als gevolg

van een licht variërende meetperiode:

$$\left| \frac{\bar{\omega}}{2\pi} \Delta \tilde{T} \cdot N - \frac{\bar{\omega}}{2\pi} \Delta T \cdot N \right| \stackrel{(\text{eis})}{\sim} \left| \text{fix} \left(\frac{\bar{\omega}}{2\pi} \Delta T \cdot N \right) - \frac{\bar{\omega}}{2\pi} \Delta T \cdot N \right| \stackrel{(\text{quantisatie-ruis})}{\leq} \frac{1}{2}$$

Indien de meetperiode voldoende nauwkeurig verzorgd wordt door de positie-encoder zelf, en dus vrijwel exact elke ΔT s het uitgangsregister ververst, dan is het voor de bladhoekregeling niet problematisch als het uitlezen van dit register met een relatief sterk variërende regelcyclustijd plaatsvindt ($\pm 10\%$ geen bezwaar).

Het gebruik van positie-encoders voor detectie van torsie-trillingen wordt hier verder niet besproken. Dit is onderwerp van [2].

Fabrikant-informatie over positie-encoders is o.a. te vinden op de volgende internet adressen: www.inducoder.de, www.numerikjena.de, www.majestic-electronics.co.uk en www.scn.se. Daarnaast is informatie beschikbaar over een encoder van ABB, gemerkt als PXB L&LA.

2.2 Bladverstelinrichting

Tijdens simulaties binnen het regelaarontwerp wordt de delay in het bladverstelsysteem zover opgevoerd totdat de bladhoekregeling bij deze delay nog acceptabele stabiliteitsgaranties biedt (fase- en amplitudemarge). De huidige bladhoekregelingen geven setpoints aan voor de bladverstelsnelheid aan de pitch-actuatoren. Het blijkt dat de tijd die nodig is om het wrijvingskoppel in het pitch-lager te overwinnen, dat van teken omdraait bij richtingwisseling van de bladverstelling, bepalend is voor de delay. De koppel-aangroeisnelheid hangt samen met de minimale grootte van het verstelsnelheid-setpoint en de instelling van de pitch-actuatoren.

Ervaring met regelaarontwerp wijst uit dat een maximale delay van 0.1 tot 0.2 s in het bladhoekverstellen meestal acceptabel is.

Meting van de bladverstelsnelheid is niet noodzakelijk voor terugkoppelregelactie in de bladhoekregeling. Deze is wel nodig voor werkingscontrole van actuatoren.

Meting van de bladhoek is wel nodig. Deze wordt in de bladhoekregeling gebruikt voor het schatten van de rotor-wijde windsnelheid, aanpassing van de regelsterkte aan de omstandigheden en verhoging van het toerentalsetpoint boven nominaal bij hoge windsnelheden. Daarnaast is deze meting nodig voor controle op aanslagen (vaanstand, werkstand) en voor synchronisatie van bladhoeken in geval van individuele aansturing. Een meetauwkeurigheid van ca. 0.1 graad (resolutie) is voldoende; dit komt overeen met een standaardafwijking van ca 0.03 graad.

De dimensionering van elektrische en hydraulische pitch-actuatoren wordt bepaald op basis van tamelijk uitgebreide analyses van het dynamisch gedrag in de context van de pitch-lager wrijving en het aerodynamisch pitch-moment onder de voorwaarde dat de maximale pitch-delay niet meer mag zijn dan 0.1 tot 0.2 s. Zie hiervoor [2].

Gedetailleerde informatie is beschikbaar voor elektrische actuatoren van fabrikant Control Techniques [1] en voor hydraulische actuatoren van fabrikant Hydraudyne (vertrouwelijk [3], [4]).

3. DATAVERWERKING

Dit hoofdstuk geeft een aantal handvaten om keuzes te motiveren met betrekking tot de dataverwerking in de turbinebesturing, met de bladhoekregeling als invalshoek. De twee volgende hoofdstukdelen gaan respectievelijk in op (i) de eigenschappen van en eisen aan de dataverwerkingsapparatuur en (ii) de wijze van inbedding van de bladhoekregeling.

3.1 Hardware en systeemsoftware

De hard- en systeemsoftware voor de dataverwerking in de turbinebesturing is onder meer bepalend voor:

- toelaatbare omvang programmatuur voor turbinebesturing;
- timing van regeltaken en haalbare regelcyclustijd;
- data-uitwisseling met sensoren en actuatoren, operator, etc.;
- wijze van programmeren en doorzichtigheid programmatuur.

In de volgende paragrafen wordt ingegaan op verschillende benaderingen voor real-time dataverwerking en eisen vanuit de bladhoekregeling aan het dataverwerkingsapparatuur.

3.1.1 PLC of ontwikkelsysteem en dedicated board

Bij de inbedrijfstelling van een turbine prototype wordt in principe veel meer belang gehecht aan programmeringswijze en transparantie dan bij een productieturbine; dit geldt ook voor data-uitwisseling met de operator. Daarentegen is het te verwachten dat bij productie-machines de data-uitwisseling met andere dataverwerkingsapparatuur voor remote monitoring en control zeer goed verzorgd moet zijn, terwijl dit voor een prototype geheel niet van toepassing hoeft te zijn.

Ontwikkelsysteem en dedicated processor board ontwerp

Een gangbare constructie bestaat erin om op het turbine-prototype een zogeheten ontwikkelsysteem toe te passen en op de productie-turbines een zogenoemd dedicated board. Een ontwikkelsysteem is een (dure) procescomputer die doorgaans ruime, en snelle (Fortran of C), programmeerbaarheid biedt als ook mogelijkheden voor observatie van programma-variabelen tijdens of 'vlak na' bedrijf. Vervolgens wordt op basis van de 'uitontwikkelde' turbinebesturingsprogrammatuur een dedicated processor board op maat ontworpen met een vast (maximum) aantal ingangen, uitgangen en setpoints. De besturingsprogrammatuur wordt dan vaak in ROM in het board opgenomen, waarbij gebruik gemaakt kan worden van de zelfde programmamodules als in het ontwikkelsysteem. Deze optie vergt een naast een eenmalig duur ontwikkelsysteem ook een eenmalige investering met betrekking tot het board-ontwerp. Echter door de 'dedicacy' van het board-ontwerp is er in beginsel geen beperking op programma-omvang en haalbare regelcyclustijd. Zie ook Bijlage A, waarin deze benaderingswijze door het automatiseringsbedrijf Arun BV wordt belicht.

Industriële PLC's

Een andere veel toegepaste optie is het gebruik van één of meer industriële PLC's. Omdat deze zowel vrije programmeerbaarheid bieden, zij het in primitievere vorm dan een ontwikkelsysteem, als ook relatief goedkoop zijn ligt toepassing op zo-

wel het prototype als de productie-turbines voor de hand. Een probleem vormt echter al gauw de rekensnelheid indien afgeweken wordt van de standaard databewerkingsproducties die in de 'structuur van een PLC zijn opgenomen; ook het aantal variabelen is beperkt. Daarnaast is de doorzichtigheid van de aan te maken turbinebesturingsprogramma's problematisch vanwege de zeer elementaire, vaak fabrikaat-eigen, programmeermogelijkheden en geheugenorganisatie. Bovenstaande beschouwing is mede gebaseerd op de industriële PLC's van fabrikant JETTER (web site www.essentials-control.com/jetter), welke ondermeer door het automatiseringsbedrijf Prolion toegepast worden op turbines van Lagerweij.

3.1.2 Eisen vanuit de bladhoekregeling

De bladhoekregeling wordt primair gebruikt voor de vermogensregeling. Bij een pitch-to-vane regeling wordt dit doorgaans via het toerental gerealiseerd: laagfrequent is er een vast verband tussen elektrisch vermogen en toerental; vanaf nominaal is dit vermogen constant zodat het aerodynamisch begrensde dient te worden met de bladhoek door het toerental terug te regelen. Uit berekeningen met stochastische windvelden blijkt dat de rotor-wijde winddynamica zich doet gelden rond 0.1 Hz en lager voor MW-klasse windturbines. De vermogensregeling kan naast terugkoppeling van het toerental ook vooruitkoppeling van de geschatte rotor-wijde windsnelheid omvatten.

Naast het vermogen kan ook de fore-aft toentrilling in de eerste eigenfrequentie gedempt worden met de bladhoek. Deze frequentie ligt doorgaans tussen 0.2 en 0.4 Hz voor MW-klasse turbines met monopile toren.

Capaciteit

De omvang van de totale regeling wordt geschat op ca. 1000 programmaregels in ANSI Fortran onder gebruik van ca. 500 floating-point variabelen. Het gebruik van tenminste 1-dimensionale arrays en een vorm van subprogramma's (functies of subroutines) moet mogelijk zijn om minimale doorzichtigheid in de programmamodule te kunnen bereiken.

Beide regeldoelstellingen kunnen goed gerealiseerd worden bij een regelcyclus-tijd van 0.1 s of lager. De benodigde rekencapaciteit wordt thans geschat op het equivalent van ca. 3000 floating-point vermenigvuldigingen per regelcyclus. Ervaring met een ontwikkelsysteem gebaseerd op een Motorola CPU 68030 processor board heeft uitgewezen dat 3000 floating-point vermenigvuldigingen ca. 30 ms rekentijd vereisen; dit systeem had een klokfrequentie van 30MHz en draaide onder RT-operating system OS9.

Flexibiliteit hardware en systeemsoftware turbine-prototype

Op het turbine-prototype is een snelle aanpassingsmogelijkheid van de programma's essentieel. Daarnaast is het ook van belang dat setpoint-variabelen in de regeling on-line aangepast kunnen worden; dit betreft in de orde van 10 tot 20 grootheden. Ook dient het (transiënte) verloop in de tijd van afhankelijke variabelen en meet- en regesignalen geregistreerd te kunnen worden (ook ca. 10 tot 20 grootheden). Tevens dienen zogeheten parameter-variabelen, die weliswaar constant zijn tijdens bedrijf, toch zeker tussen het bedrijf door aangepast kunnen worden; dit betreft in de orde van 50 tot 100 grootheden.

Flexibiliteit hardware en systeemsoftware productie-turbine

Op de productie-turbines dient in ieder geval de programmatuur herladen te kunnen worden tijdens een turbine stop. Daarnaast blijft het van belang setpoint-variabelen in de regeling on-line aan te kunnen passen. De registratie kan beperkt blijven tot transiënt verloop van meet- en regelsignalen.

3.2 Inbedding regelalgoritme

De vorm waarin de bladhoekregeling opgenomen wordt in de programmatuur voor turbinebesturing is onder meer bepalend voor:

- bereikbaarheid van de regeling voor fine-tuning;
- traceerbaarheid van de wisselwerking tussen turbine en regeling.

Dit kan goed worden gerealiseerd door een modelvoorstelling van de regeling te maken die aansluit bij de gangbare perceptie van de turbinewerking en een overeenkomstige detailspecificatie van de regeling. De volgende paragrafen geven hiervoor een leidraad.

3.2.1 Modelvoorstelling

De primaire modelvoorstelling van het regelalgoritme gebeurt via zogeheten ‘transformation schemes’. Dit model beschrijft de regeling in de vorm van processen (‘transformations’) die al dan niet actief zijn, afhankelijk van de toestand (‘state’) die binnen de regeling onderkend wordt. Figuur 3.1 geeft het top level transformation scheme voor een bladhoekregeling in algemene zin.

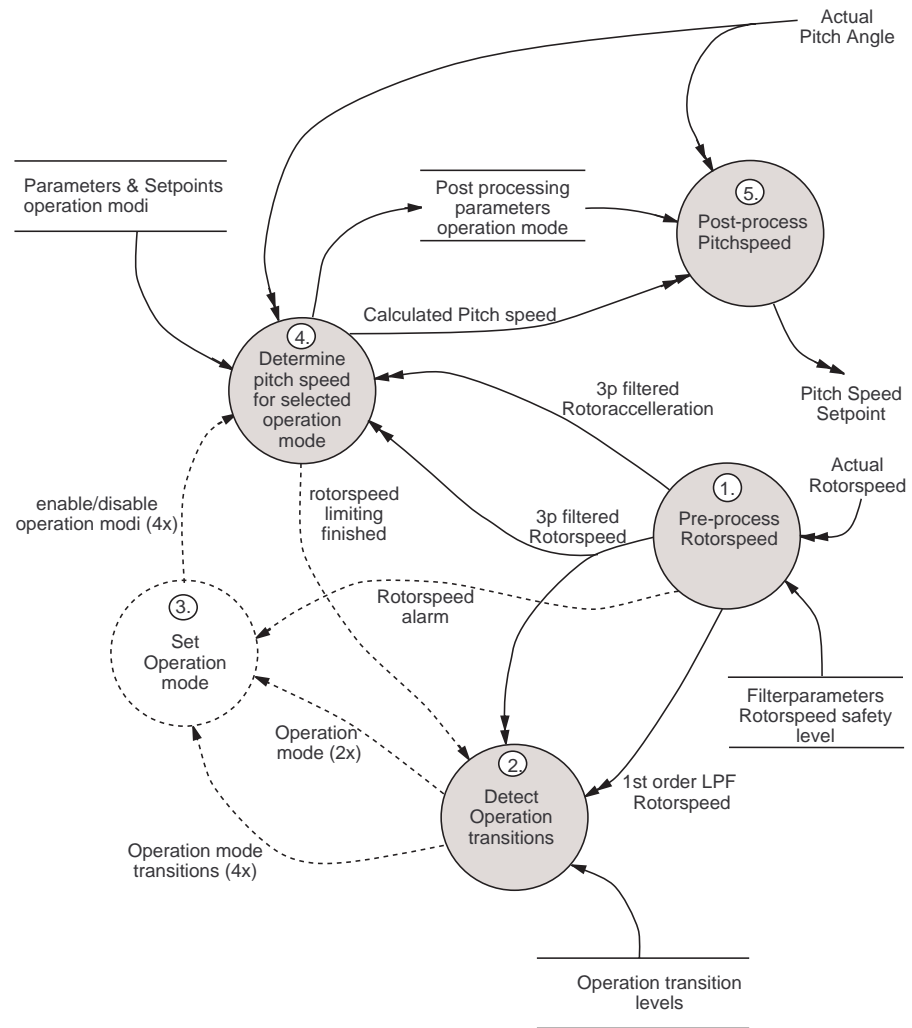
De cirkels hierin zijn de processen en de pijlen de data. De gestreeplijnde cirkel is een ‘controlproces’; deze is gemoeid met toestandsovergangen **alleen**. De overige cirkels zijn ofwel (zuivere) dataprocessen ofwel gecombineerde data- en controlprocessen. Een dataproces is gemoeid met transformatie van (fysische) data **alleen** dan wel met het constateren of er op basis van (fysische) data (verloop) aanleiding is voor acties in een ‘controlproces’. De gestreeplijnde data duiden op ‘control’, d.w.z. deze zijn gemoeid met het toestandafhankelijk activeren van processen (streeplijn-cirkel ‘uit’) of geven aan dat er aanleiding is tot verandering van toestand (streeplijn-cirkel ‘in’). Twee doorgetrokken strepen om een variabele heen geven aan dat data permanent beschikbaar is voor verwerking en/of bewerking (data store).

Figuur 3.2 geeft voor het gemengde control/data-proces ‘postprocess pitch speed’ het gedetailleerde transformatieschema met zuivere control- en dataprocessen.

In figuur 3.3 wordt het dataproces ‘inactivity zone’ uitgesplitst in twee elementaire dataprocessen die als functie hebben om vast te stellen of er aanleiding is om juist uit de rusttoestand te gaan of om in de rusttoestand te komen.

Figuur 3.4 geeft aan dat het controlproces uit fig. 3.2 bestaat uit drie parallel werkende elementaire controlprocessen.

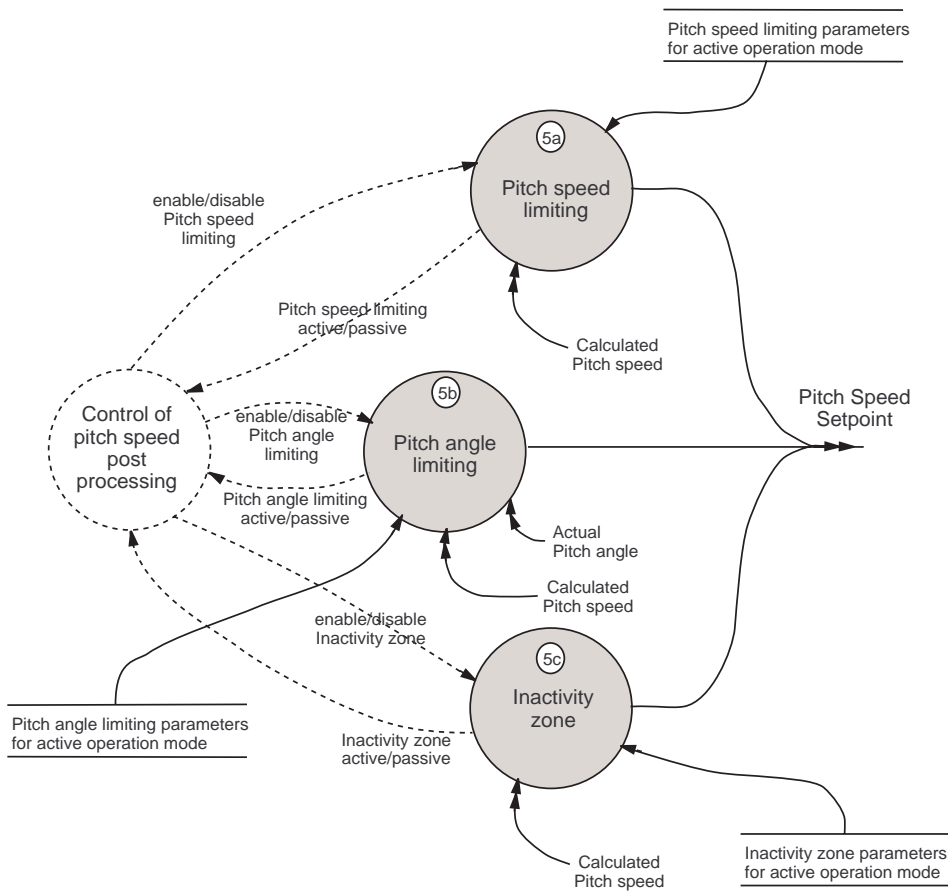
De overgang van de ene naar de andere regelaar-toestand wordt afgeleid uit het waargenomen turbinegedrag, acties van de operator en uitgevoerde regelacties. De toestandsovergangen en dataproces-activiteit per toestand worden gespecificeerd door zogeheten ‘state transition diagrams’ behorende bij de elementaire controlprocessen. Een toestandsovergang gebeurt bij een bepaald ‘event’. Zo’n



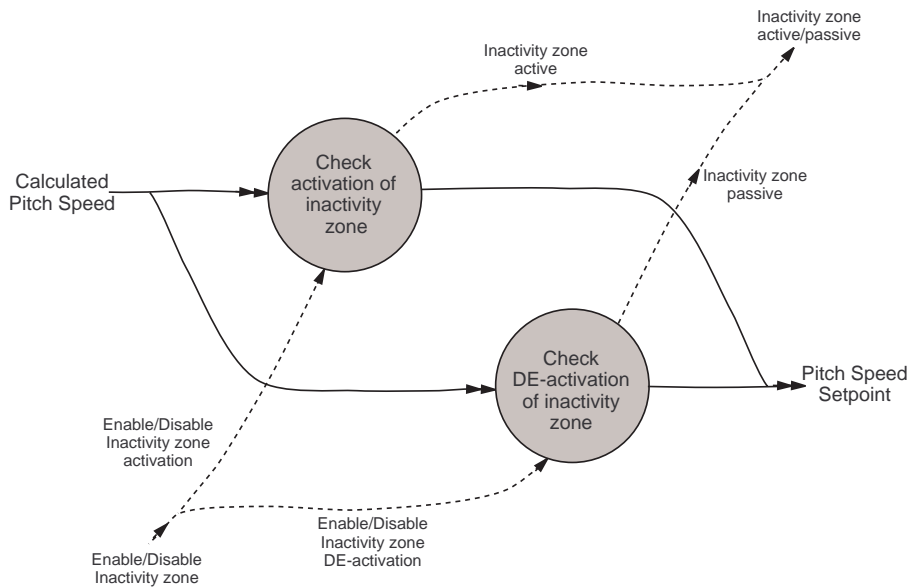
Figuur 3.1 Top level transformation scheme voor bladhoekregeling

event treedt op, dat wil zeggen wordt als zodanig *herkend* in het regelalgoritme, op het moment dat een operator-actie plaatsvindt dan wel indien turbinegedrag of regelacties aan een vooraf gesteld verloop beantwoorden. Figuur 3.5 geeft het state transition diagram voor het elementaire controlproces dat de inactivity zone in de bladhoekregeling beheerst.

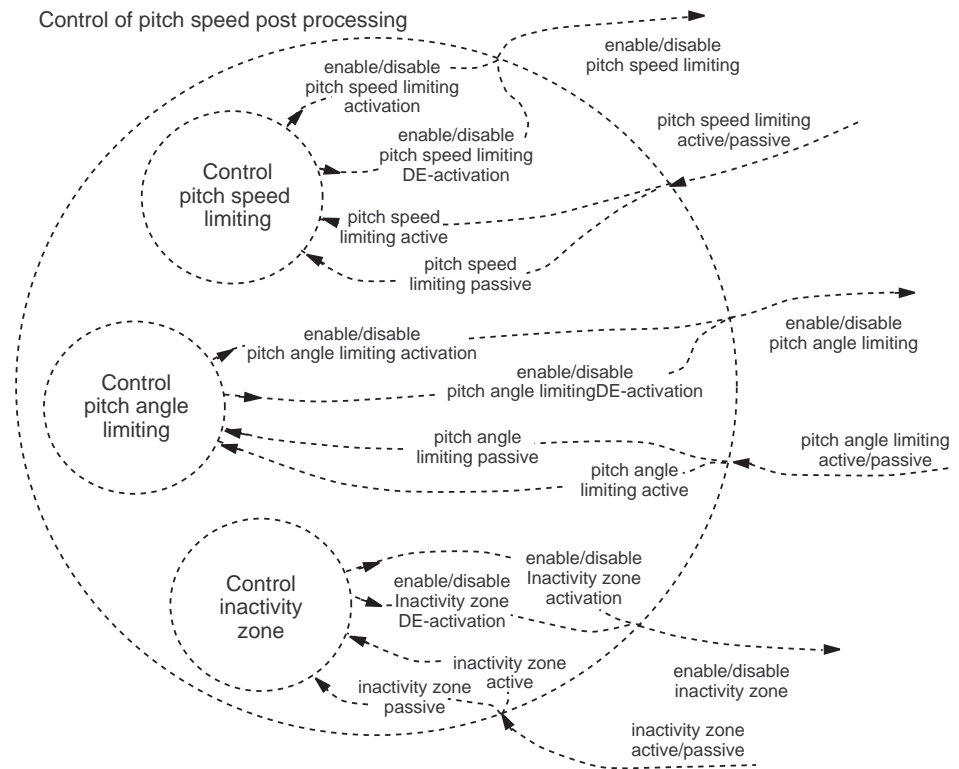
De rechthoeken in fig. 3.5 geven de mogelijke toestanden aan. De events boven de horizontale lijnen zijn toestandsovergang-drijvend; de events onder deze lijnen bepalen de activiteit van de elementaire dataprocessen.



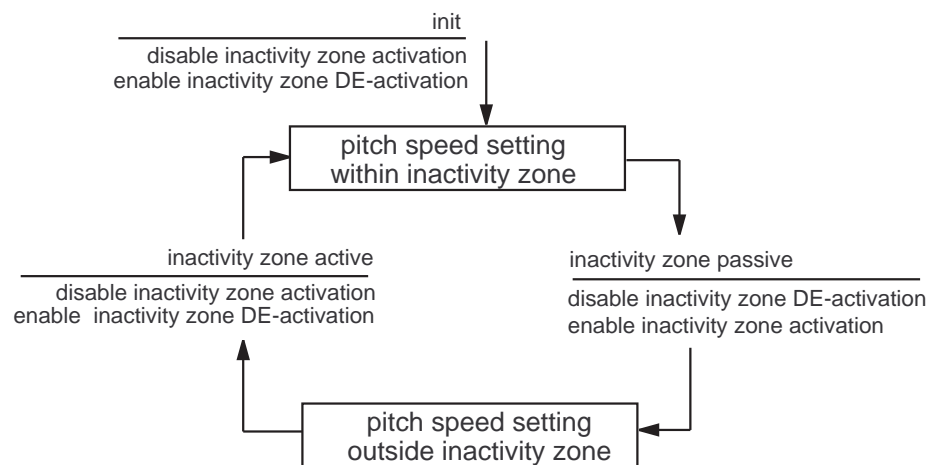
Figuur 3.2 Transformation scheme voor postprocessing pitch control in bladhoekregeling



Figuur 3.3 Elementaire dataprocessen in inactivity zone gebonden postprocessing pitch control



Figuur 3.4 Elementaire controlprocessen in postprocessing pitch control binnen blad-hoekregeling



Figuur 3.5 State transition diagram voor elementair control proces gebonden aan dode zone in postprocessing pitch control

3.2.2 Programmamodule

De exacte specificatie van het regelalgoritme wordt vastgelegd in de vorm van een programmamodule in ANSI Fortran 77 of ANSI C. Hierbij wordt zoveel mogelijk vastgehouden aan de proces-, toestands- en datastructuur in de modelvoorstelling. Er wordt een zeer elementaire coderingsvorm gehanteerd teneinde implementatie in wat voor processor-hardware dan ook doorzichtig te laten verlopen. Karakteristieke randvoorwaarden bij een PLC-implementatie zijn:

- variabelen zijn 'integer value' met 3byte lengte (waardebereik {-8388607, +8388607});
- een variabele is enkelvoudig (scalar) of een 1d-array (vector)
- arithmetische operatoren zijn integer value (/, *, -, +);
- program-control alleen via de volgende mechanismen:
 - 'if-then-else-end',
 - 'go-to-<label>'.

Hierbij wordt er vanuit gegaan dat ook tussen-uitkomsten het 3byte-waardebereik niet te buiten mogen gaan.

De voortschrijdende ontwikkelingen in de micro-electronica hebben tot gevolg dat ook PLC's reeds (gedeeltelijk) met floating-point variabelen kunnen werken zodat bovenvermelde 'integer value' constraints dan niet van toepassing zijn. Ontwikkelingsystemen en dedicated processor boards kennen in principe altijd 'real value' aritmetiek. Echter, op grond van robuustheid kan men zich voornemen te beperken tot 'integer value' bewerkingen. Intern, zijn er dan twee vertaalslagen minder, de I/O is immers altijd al integer value, en de bewerkingen zijn altijd exact bepaald, zolang natuurlijk het integer waarde bereik niet overschreden wordt.

Verder wordt er rekening meegehouden dat het aantal significante symbolen in variabele-namen beperkt is. Alle (interne) variabelen in een programmamodule met het regelalgoritme beginnen met twee letters en twee cijfers, gevolgd door een alfa-numerieke code van ten hoogste 18 karakters waarmee een betekenisomschrijving beoogd wordt. De twee cijfers bepalen een uniek variabele-nummer (01 t/m 99). De combinaties van kenletters die worden gebruikt voor datatypering staan in tabel 3.1:

Tabel 3.1 *Kenletter-code voor variabele-typering in implementatie bladhoekregeling*

code	omschrijving
CD	'constant data'; onveranderlijk gegevens binnen regeling (bv regecyclustijd)
PD	'parameter data'; instellingen bepaald tijdens regelaarontwerp; beperkt gereserveerd voor fine-tuning
SD	'setpoint data'; instellingen bepaald tijdens regelaarontwerp; juist gereserveerd voor fine-tuning
IV	'input variable'; meetsignalen van toerental en bladhoeken
TV	'temporary variable'; hulpvariabele in regeling zonder geheugenfunctie
MV	'memory variable'; hulpvariabele in regeling met geheugenfunctie
OV	'output variabele'; regelsignalen voor bladhoekverstelling

4. BEOORDELING REGELALGORITME

Een bladhoekregeling kan beoordeeld worden door berekeningen met een aerodynamische code als PHATAS [6]. De programmamodule in ANSI Fortran 77 kan aan PHATAS gelinked worden en voor berekeningen met stochastische windvelden. Twee principieel verschillende bladhoekregelingen voor een 750 kW windturbine zijn op deze wijze al eens met elkaar vergeleken [5].

In dit hoofdstuk wordt aan de hand van vergelijkende berekeningen ingegaan op de voor- en nadelen van beide regelingen. De volgende twee hoofdstukdelen beschrijven respectievelijk de hoofdlijnen van de regelingen en het hiermee bereikte turbinegedrag bij zeer sterke wind. Het hoofdstuk wordt afgesloten met conclusies op basis waarvan de keuze voor een bepaalde regeling beter kan worden gemotiveerd.

4.1 Regelaarkenmerken in vergelijkende studie

De vergeleken regelingen hebben betrekking op de toerenregeling van een pitch-to-vane windturbine met een diameter van 50 m en nominaal vermogen van 750 kW. Bij toerentallen boven het nominale niveau n_{nom} bedraagt het geleverde elektrisch vermogen 750 kW, daarbeneden neemt het vermogen bij benadering af met de derde macht van het toerental (optimaal λ -bedrijf). Het toerental n mag bij windvlagen toenemen tot n^{max} , gelijk aan 125% van de nominale waarde. De verstelsnelheid van de bladverstelinrichting $\dot{\theta}$ is variabel en kan naar believen ingesteld worden (tot een zeker maximum $\dot{\theta}^{\text{max}}$).

De ontwerpfilosofie van beide regelingen is compleet verschillend. Het gedrag in vollast wordt voor deze beide regelaars hieronder globaal omschreven.

Regeling A

Op basis van het verschil tussen het glijdend gemiddelde toerental n_{ave} en het nominale toerental n_{nom} wordt de doelwaarde θ^{set} voor de bladhoek behaald volgens een lineair verband:

$$\theta^{\text{set}} = K \cdot (n_{\text{ave}} - n_{\text{nom}}) + \theta^{\text{min}} \quad (4.1)$$

De versterking K is zo gekozen dat bij de cut-out windsnelheid de benodigde waarde voor de bladhoek bereikt wordt bij een acceptabel toerenverschil (ruim onder n^{max}). Ondersteunende tijdsimulaties dienen om zicht te krijgen op de nog toelaatbare waarde van K , in welk geval het turbinegedrag naar instabiliteit nijgt.

Uit het verschil tussen θ^{set} en de actuele bladhoek θ wordt een snelheidsssetpoint bepaald voor de bladverstelinrichting teneinde dit verschil *zo snel mogelijk* weg te regelen.

Afhankelijk van de waarde van K zal dus een bepaalde toerenoffset van nominaal ontstaan naarmate de windsnelheid toeneemt. Hierbij zal de bladverstelinrichting pulserend aangestuurd worden omdat dikwijls de maximum bladverstelsnelheid $\dot{\theta}^{\text{max}}$ aangesproken wordt terwijl dit op grond van de winddynamica meestal niet nodig is; immers $\dot{\theta}^{\text{max}}$ is zodanig gekozen dat de meest extreme vlagen nog gehanteerd kunnen worden.

Regeling B

Op basis van het verschil tussen het laagdoorlaat gefilterde toerental n_{103p} en het

setpoint toerental n^{set} wordt via proportioneel-differentiërende actie een doelwaarde voor de bladverstelsnelheid bepaald:

$$\dot{\theta}^{\text{set}} = K_p \cdot (n_{103p} - n^{\text{set}}) + K_d \cdot \frac{d}{dt} \left((n_{103p} - n^{\text{set}}) \right) \quad (4.2)$$

De versterkingsfactoren K_p en K_d zijn zo gekozen dat aan algemeen aanvaarde stabiliteitscriteria voldaan wordt, waarbij zoveel als toegestaan is de versterking wordt aangepast aan de externe omstandigheden: rond nominaal is het effect van bladhoekveranderingen gering zodat een hoge regelaarversterking is toegestaan; bij hoge windsnelheden is dit effect juist groot zodat daar de regelaarversterking veel lager moet zijn. Gemiddeld gezien zal het toerental slechts een zeer geringe afwijking vertonen van de doelwaarde n^{set} , namelijk alleen als gevolg van een inactivity zone voor de pitch-activiteit. Dynamisch schommelt het toerental natuurlijk altijd wat rond n^{set} .

Het toerental wordt zodanig gefilterd dat het effect van mastpassage van de bladen en turbulentie-doorsnijding met een vooraf ingestelde factor gereduceerd wordt ('3p-effecten').

Om te voorkomen dat het toerental in vollastcondities te vaak beneden n_{nom} zou komen te liggen, hetgeen vermogensderving impliceert, wordt het setpoint n^{set} langzaam opgevoerd naarmate de windsnelheid toeneemt. Hierdoor slaat de rotor tijdelijk energie welke weer gebruikt kan worden wanneer de bladhoek va een relatief hoge waarde naar werkstand teruggeregeld wordt als de wind afvalt.

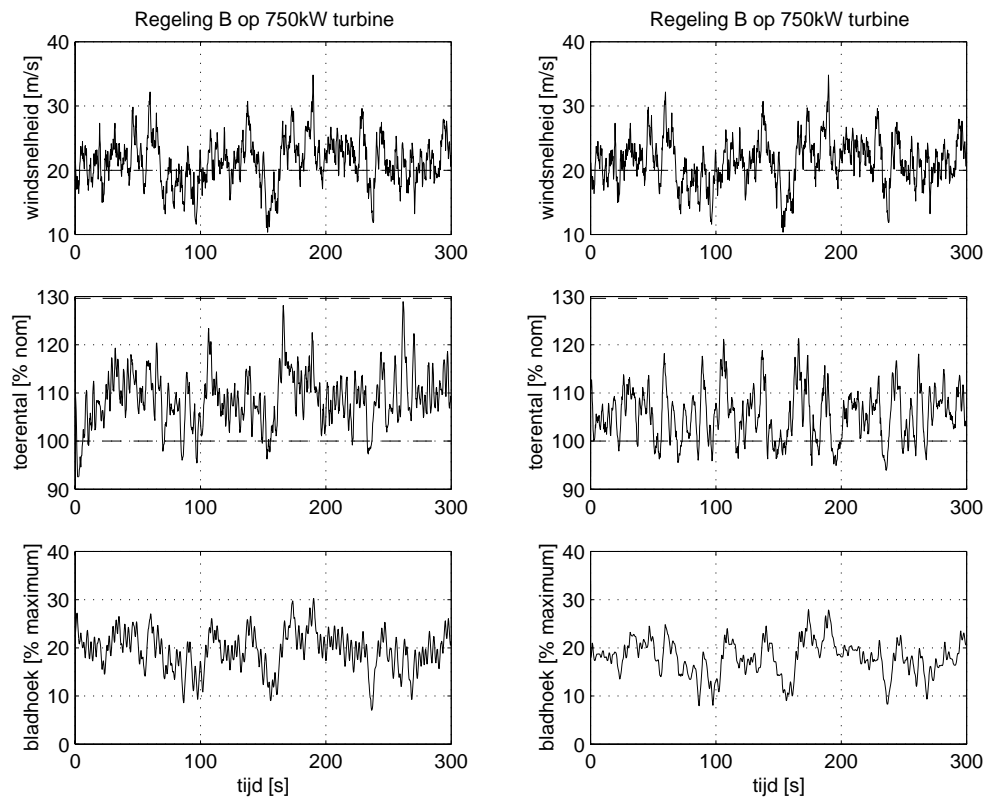
Om het maximum toerental expliciet in de hand te hebben is in deze regeling een hard begrenzingsmechanisme ingebouwd: boven een bepaald toerental in combinatie met een bepaalde versnelling wordt de bladhoek zo snel mogelijk een vast aantal graden veresteld; bij zeer sterk toenemende wind kan dit herhaaldelijk optreden.

De bladverstelrichting wordt hierbij gelijkmatig aangestuurd omdat de bladverstelsnelheid $\dot{\theta}$ meegaat met de veranderende wind; immers de toerental n_{103p} en versnelling $\frac{d}{dt} (n_{103p})$ zijn evenredig met (de integraal van) het windkoppel. De maximale verstelsnelheid $\dot{\theta}^{\text{max}}$ wordt in deze regeling alleen in geval van extreme vlagen aangesproken.

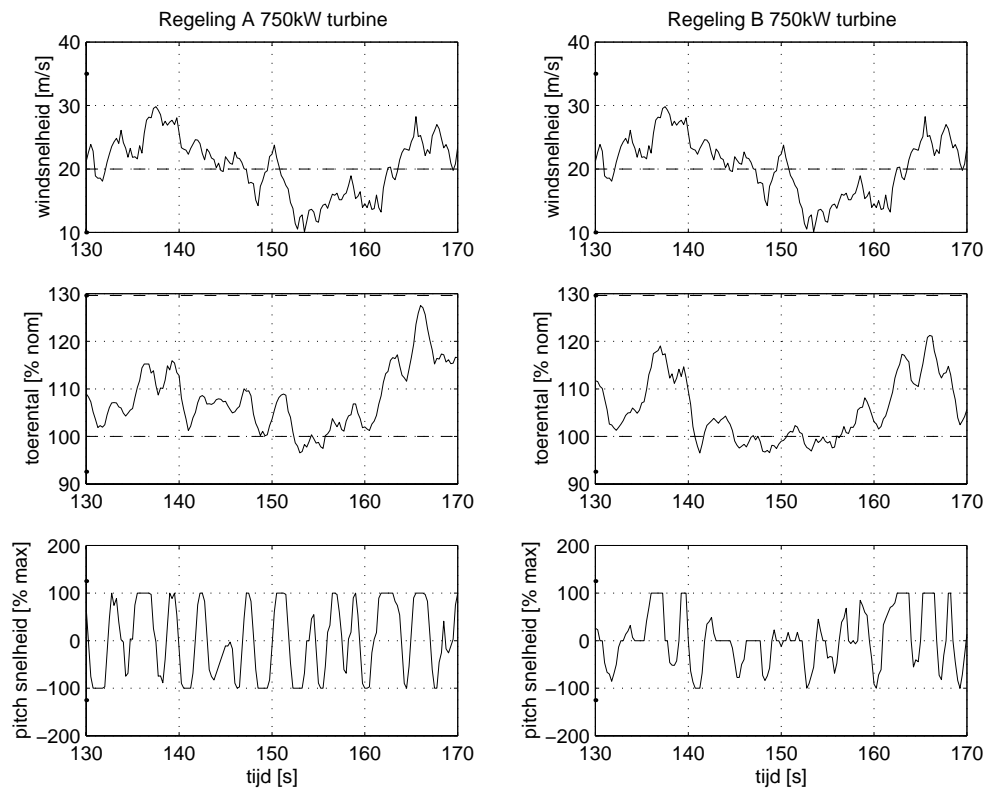
4.2 Turbinegedrag bij zeer sterke wind

Figuur 4.1 geeft de overzichtplots van windsnelheid, toerental en bladhoek voor beide regelingen. Deze plot wijst uit dat het toerental door regeling B veel beter begrensd wordt, zij het ten koste van iets meer onderschrijdingen van het nominale toerental; dit laatste kan voor komen worden door het toerentalsetpoint iets te verhogen, dan nog is de reserve ten opzichte van het hier gestelde maximum van 130% nominaal ruimschoots groter dan bij regeling A. Verder is het bladhoekverloop rustiger bij regeling B; de standaardafwijking van de bladverstelsnelheid bedraagt 50% $\dot{\theta}^{\text{max}}$ ten opzichte van 75% $\dot{\theta}^{\text{max}}$ bij regeling A.

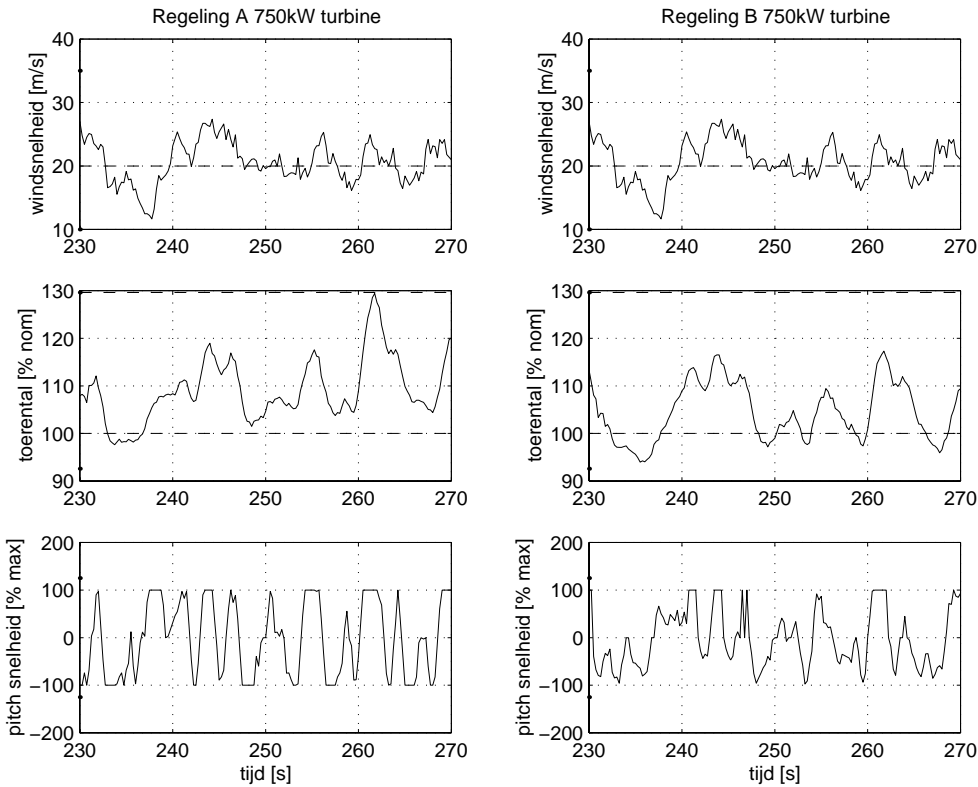
De figuren 4.2 en 4.3 geven het gedetailleerde signaalverloop rond 150 en 250 s. Nu is de bladhoekverstelsnelheid afgebeeld in plaats van de bladhoek. Deze figuren laten zien dat bij regeling A dikwijls de maximale bladverstelsnelheid aangesproken wordt terwijl dit niet altijd nodig is: een pulserend in plaats van geleidelijk bladverstelverloop. Regeling B past alleen hoge verstelsnelheden toe waar dit echt nodig is: rond 135 s en 165 s (detail 1) en rond 245 en 260 s (detail 2).



Figuur 4.1 *Overzicht gedrag bladhoekregeling voor 750 kW turbine; regeling A heeft betrekking op linker plots (abusievelijk is B vermeld in plottitel)*



Figuur 4.2 *Detail 1 in bladhoekregeling voor 750 kW turbine rond 150 s*



Figuur 4.3 Detail 2 in bladhoekregeling voor 750 kW turbine rond 250 s

4.3 Conclusie

Bij zeer harde wind blijkt de toerenbegrenzing in regeling B duidelijk beter. Hierdoor zal het aantal turbine stops op overtoerenbeveiliging minder zijn. Dit doet zich nog sterker gelden als het verschil tussen maximum toelaatbaar en nominaal toerental kleiner wordt, hetgeen het geval is als de toreneigenfrequentie lager wordt, en daardoor dichterbij de 1p-frequentie komt te liggen. Tevens is de pitch-activiteit bij regeling B aanzienlijk minder.

Regelaar A laat minder onderschrijding zien van het nominaal toerental; dit leidt tot marginale meer opbrengst. Bovendien is regelaar A makkelijker te implementeren in de dataverwerkingsapparatuur van het regelsysteem.

Tenslotte is de werking van regeling B beter te voorspellen en beter voorspelbaar te beïnvloeden door setpoint- en parameteraanpassing. Dit is een gevolg van het ontwerp op basis van algemeen aanvaarde stabiliteitscriteria en wel overwogen fine-tune keuzes voor gedragsbeïnvloeding

REFERENTIES

- [1] Control Technics b.v., Marisstraat 21, Sliedrecht. *Handleiding UNIDRIVE in servo configuratie*, - edition.
- [2] T.G. van Engelen, E.L. van der Hooft, and P. Schaak. Ontwerpgereedschappen voor de regeling van windturbines. Technical Report ECN-C-01-xxx, ECN-DE, Petten, the Netherlands, in preparation.
- [3] M. van den Hurk. *Besturing NW62 (1)*. Hydraudyne, June 6 1998. Notitie aan N. Ceton (NedWind), T. van Engelen (ECN).
- [4] M. van den Hurk. *Besturing NW62 (2)*. Hydraudyne, June 23 1998. Notitie aan M. Venema, A. Lekler (NedWind), T. van Engelen (ECN), ref. 981028.
- [5] C. Lindenburg. Comparison of control routines for the lagerwey B2. Technical Report ECN-LW-B2-00-0xx, TYPE =, 2000.
- [6] C. Lindenburg and J.G. Schepers. *PHATAS-IV Aeroelastic Modelling*. ECN Wind Energy, Petten, the Netherlands, 2000.

BIJLAGE A. OVERLEG ARUN

Notitie aan: Leden groep Operationele Techniek en Systemen (ECN), Jan van Gennip (ARUN)
Betreft: bijeenkomst bij ECN voor introductie ARUN in besturingen windturbines op 20 juli 2000
Aanwezig: Jan van Gennip (ARUN), Tim van Engelen en Eric van der Hooft (ECN)
Opsteller: Tim van Engelen
Datum: 4 augustus 2000.

Aanleiding

Telefonisch verzoek van Jan van Gennip (ARUN). Het bedrijf ARUN automatiseert processen en maakt daar zelf zogeheten 'dedicated hardware' voor; er ligt interesse om dit ook voor windturbines te doen. De industriële betrokkenheid van ECN bij turbine-regelingen, in combinatie met een eerdere kennismaking, is aanleiding geweest om nadere introductie in het veld van windenergie te realiseren via ECN.

Belang voor Windturbine-industrie en ECN

Tijdens de bespreking werd duidelijk dat het bij serie-groottes vanaf ca. 100 al aanmerkelijk goedkoper kan zijn om dedicated hardware toe te passen dan standaard PLC's. Bovendien biedt de benaderingswijze van ARUN naar verwachting voordelen bij programmering van de regeling en testen van de turbine-besturing. Dit laatste is ook van belang voor ECN aangezien ECN regelaars ontwerpt en betrokken wil zijn bij processimulaties voor het testen van de complete turbine-besturingen; voor deze laatste activiteit is bij ECN gereedschap voor processimulatie in ontwikkeling.

Twee opvallende kenmerken van de benaderingswijze van ARUN kwamen in de bespreking naar voren:

- De op maat ontwikkelde 'embedded systems' zijn van nature bedoeld voor procesregeling en -besturing volgens modelgerichte benaderingswijzen; dit in tegenstelling tot de 'logica-roots' van PLC's. Dit staat programmeren in C toe in plaats van in een PLC-achtige taal of daarvoor ontwikkelde meta-taal.
- De speciaal ontwikkelde methodologie voor de realisatie van real-time systemen garandeert van nature data-communicatie tbv operator-interfacing en supervisie die de turbine-besturing nooit enigermate zal verstoren. Met name is dit van belang bij opname van besturingen van individuele turbines in (offshore) parkwijde supervisory regelsystemen.

Indicatieve kosten van hardware en systeemsoftware voor een embedded system op maat zijn:

- fl 100.000,- ontwikkelingskosten van dedicated hardware
 - fl 50.000,- systeem software voor 1 gebruiker op 1 klasse van toepassingen
 - fl 50.000,- voor operationeel maken van een besturingsalgoritme binnen ARTOS.
- Na de ontwikkeling is een indicatief bedrag van ca. fl 5000,- per turbine gemoeid.

Vervolg

ARUN voert een korte inventarisatie uit van gangbare hardware en systeemsoftware voor turbine-besturing. Dit kan leiden tot voldoende technische en financiële argumenten om een maatsysteem als boven besproken de voorkeur te geven. In dat geval maakt ECN deze optie kenbaar indien dit strookt met de visie van het unit-management; hierbij zullen naar verwachting de eventuele voordelen voor ECN bepalend zijn voor de mate van commitment. In eerste instantie wordt voorzien om dit bij Lagerweij te doen.

	Datum: 31 december 2001	Rapport No.: ECN-C—01-067	
Titel	Ondersteuning Implementatie Bladhoekregeling Windturbines		
Auteur(s)	T.G. van Engelen, E.L. van der Hooft		
Opdrachtgever(s)	Ministerie van Economische Zaken		
ECN projectnummer Opdrachtgever ordernummer	7.4108 niet van toepassing		
Programma('s)	Algemene Rijksbijdrage (ARB)		
<p>Abstract Bij de implementatie van de bladhoekregeling in een windturbine dienen keuzes gemaakt te worden voor de samenstelling van een real-time systeem dat bestaat uit meet- en regelapparatuur en de hard- en software voor dataverwerking. Dit rapport geeft een aantal handvaten om keuzes te motiveren met betrekking tot (i) toerentalmeting en bladverstelling, (ii) dataverwerking gericht op bladhoekregeling en (iii) selectie van een bepaald regelalgoritme.</p>			
<p>Keywords control equipment, wind turbines, pitch control, data processing, pitch actuator, rotary encoder</p>			
Authorisatie	Naam	Handtekening	Datum
Gecontroleerd			
Goedgekeurd			
Geauthoriseerd			