

# Ontwikkeling van een gereedschap voor het ontwerpen van windturbineregelingen

fase 1

P. Schaak  
T.G. van Engelen  
E.L. van der Hooft  
E.J. Wiggelinkhuizen

### **Abstract**

Dit rapport betreft de generieke programmatuur die ECN ontwikkelt voor het ontwerpen van windturbिनeregelingen. Hoewel de programmatuur zich nog in een ontwikkelstadium bevindt, is deze al ingezet om regelingen voor de windturbine-industrie te ontwerpen. Hierbij richtten we ons zowel op het regelen van de rotorsnelheid en de productie, als op het reduceren van belastingen.

We belichten met name de ontwikkeling van de programmatuur die is uitgevoerd binnen het door NOVEM gesubsidieerde project 'Ontwerpgereedschap voor het integraal ontwerpen van windturbine regelingen - fase 1' (contract nummer 2020-01-12-10-003). Daarnaast is er kort aandacht voor het tijdschema waaraan de ontwikkeling onderhevig is en de toekomst die wij met de programmatuur voorzien.

De belangrijkste ontwikkelingen binnen het door NOVEM gesubsidieerde project zijn het toepasbaar maken van vollast bedrijf zonder productie-dips, demping van lateraal gekoppelde resonanties in de aandrijftrein, het overbruggen van resonantie rotorsnelheden en het vooruitkoppelen van de gereconstrueerde windsnelheid.

### **Verantwoording**

Dit project is mede mogelijk gemaakt door ondersteuning van het Programma Duurzame Energie in Nederland, dat wordt uitgevoerd door NOVEM in opdracht van het ministerie van Economische Zaken. De auteurs bedanken NOVEM voor deze ondersteuning (contractnummer 2020-01-12-10-003).

Erkentelijkheid gaat uit naar Koert Lindenburg. Ondanks zijn overvolle agenda heeft Koert vele malen 'even tussendoor' een simulatie met Phatas voor ons uitgevoerd. Dit is een grote steun geweest bij het analyseren van onze regelingen.

# INHOUDSOPGAVE

<b>1</b>	<b>Introductie</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Achtergrond</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Status en planning</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Ontwikkelingen gedurende fase 1</b>	<b>10</b>
4.1	Demping van axiale torenbuiging . . . . .	10
4.2	Demping van aandrijftreintrillingen . . . . .	10
4.3	Vooruitkoppeling van de gereconstrueerde windsnelheid . . . . .	11
4.4	Individuele bladverstelling . . . . .	11
4.5	Belasting reducerende kruiregeling . . . . .	12
4.6	Overbruggen van resonantie rotorsnelheden . . . . .	12
4.7	Geavanceerde vermogensregeling . . . . .	12
4.8	Voorspellend filteren . . . . .	13
4.9	Vollast/deellast-overgangsregeling . . . . .	13
4.10	Herstructurering . . . . .	14
4.11	Passieve demping van laterale bladbuiging . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>15</b>
5.1	Conclusies . . . . .	15
5.2	Aanbevelingen . . . . .	16
<b>A</b>	<b>Wind Turbine Control - industrial support</b>	<b>19</b>



# 1 INTRODUCTIE

Dit rapport betreft de generieke programmatuur die ECN ontwikkelt voor het ontwerpen van windturbine-regelingen. Hierbij richten we ons zowel op het regelen van de rotorsnelheid en de productie, als op het reduceren van belastingen. Naast een algemeen beeld van de programmatuur is er speciale aandacht voor de ontwikkelingen die vallen onder het door NOVEM gesubsidieerde project 'Ontwerpgereedschap voor het integraal ontwerpen van windturbine-regelingen - fase 1' (contract nummer 2020-01-12-10-003).

Hoofdstuk 2 beschrijft globaal wat we met de in ontwikkeling zijnde programmatuur beogen. In hoofdstuk 3 is de status en planning van de ontwikkeling weergegeven. Hierbij ligt de nadruk op de activiteiten die vallen onder het bovengenoemde door NOVEM gesubsidieerde project. De inhoudelijke invulling van deze activiteiten volgt in hoofdstuk 4. De conclusies en aanbevelingen die we hieruit hebben getrokken zijn samengevat in hoofdstuk 5. De conclusies betreffen de binnen het project geboekte resultaten. De aanbevelingen beschrijven hoe ECN de windturbine-industrie in de toekomst met de programmatuur kan blijven ondersteunen.

## 2 ACHTERGROND

De binnen ECN in ontwikkeling zijnde generieke programmatuur voor het ontwerpen van windturbineregelingen is op te splitsen in twee gedeelten. Het ene gedeelte heeft als doel om een turbineregeling te parametriseren, het andere gedeelte dient om de turbine plus geparametriseerde regeling te simuleren. Beide delen zijn specifiek afgestemd op het ontwerpen en beoordelen van regelingen en zijn geïmplementeerd als Matlab-code [8]. Dit stelt de gebruiker in staat snel en onderbouwd turbineregelingen te ontwerpen en in detail af te stemmen op specifieke behoeften.

In de generieke code onderscheiden we de volgende eigenschappen voor de te ontwikkelen regelingen:

- Rotorsnelheidsregeling
- Conventionele vermogensregeling
- Damping van axiale torenbuiging
- Damping van laterale torenbuiging
- Damping van aandrijftreintrillingen
- Vooruitkoppeling van de gereconstrueerde windsnelheid
- Individuele bladverstelling
- Belasting reducerende kruiregeling
- Overbruggen van resonantie rotorsnelheden
- Geavanceerde vermogensregeling
- Flexibele vermogensafgifte
- Voorspellend filteren
- Vollast/deellast-overgangsregeling

Voor de beschrijving van het regelaarontwerpproces en daarmee nagestreefde windturbineregelingen verwijzen we naar de flyer, die we binnen het door NOVEM gesubsidieerde project ‘Overdracht van regeltechnische windturbinekennis’ (contract nummer 2020-02-14-20-002) hebben samengesteld [14]. Ter verduidelijking is deze flyer ook opgenomen in appendix A van dit rapport.

### 3 STATUS EN PLANNING

Het aan de generieke ontwerpcode toevoegen van een eigenschap vindt plaats in 4 fasen:

- haalbaarheid: onderzoek of de eigenschap realiseerbaar is en een nuttige bijdrage aan het bedrijven van een turbine kan leveren
- ontwikkeling: het ontwikkelen van de regelcode voor de beoogde eigenschap
- integratie: de eigenschap (en eventueel benodigde modeluitbreiding) opnemen in de generieke code
- verificatie: de eigenschap operationeel maken in een (prototype) turbine

Uiteraard vinden er tijdens en na ontwikkeling en integratie ook tussentijdse verificaties op het werk plaats. Een toegevoegde eigenschap wordt eerst binnen de eigen regelaarontwikkelomgeving geanalyseerd. Dit betreft toetsing van stabiliteit en prestaties. Daarna wordt met de toegevoegde eigenschap een regelaarontwerp-case doorlopen, waarbij de regelaar ook aan de aërodynamische code Phatas [7] wordt gekoppeld. Pas nadat dit bevredigende resultaten oplevert, is de eigenschap gereed om te worden geverifieerd in de praktijk.

De status en planning met respect tot de in hoofdstuk 2 genoemde regelaareigenschappen is samengevat in tabel 1.

Tot en met 2001 zijn onze werkzaamheden in dit kader hoofdzakelijk uitgevoerd in opdracht van de Nederlandse industrie. Een eerste opzet van daarbij gebruikte programmatuur is gefinancierd met basis subsidie [22]. In de periode 2002-2003 hebben we deze programmatuur kunnen herstructureren en het ontwikkelwerk verder gestalte kunnen geven met het door NOVEM gesubsidieerde project 'Ontwerpgereedschap voor het integraal ontwerpen van windturbine regelingen - fase 1' (contract nummer 2020-01-12-10-003). Verificatie van 1 en 2 (tabel 1 hebben echter plaatsgevonden in samenwerking met de Nederlandse industrie en de haalbaarheid van 9, 10 en 11 hebben we bekostigd met basis subsidie. De door NOVEM gesubsidieerde werkzaamheden zijn in hoofdzaak uitgevoerd conform het van toepassing zijnde projectvoorstel. Op enkele punten is hiervan afgeweken om concrete, niet voorziene problemen van de Nederlandse industrie te kunnen oplossen. Hierom is:

- het overbruggen van resonantie rotorsnelheden geïntroduceerd (ontwikkeling en integratie)
- de geavanceerde vermogensregeling geïntroduceerd (ontwikkeling en integratie)
- de integratie van de demping van aandrijftreintrillingen versneld
- de integratie van de vooruitkoppeling van de gereconstrueerde windsnelheid versneld

Door de invoering van deze werkzaamheden en de beperkte tijd en middelen, is:

- de ontwikkeling van de demping van laterale torenbuiging opgeschort
- de ontwikkeling van de demping van axiale torenbuiging niet helemaal voltooid
- het onderzoek m.b.t. kruigedrag gelimiteerd

Tabel 1: Status en planning; de werkzaamheden die vallen onder het door NOVEM gesubsidi-  
eerd project 'Overdracht van regeltechnische windturbinekennis' (contract nummer 2020-02-  
14-20-002) staan onder 2002-2003

eigenschap	fase	..-2001	2002-2003	2004-2006	2007-..
1. rotorsnelheidsregeling	haalbaarheid	x			
	ontwikkeling	x			
	integratie	x			
	verificatie		x		
2. conventionele vermogensregeling	haalbaarheid	x			
	ontwikkeling	x			
	integratie	x			
	verificatie		x		
3. demping van axiale torenbuiging	haalbaarheid	x			
	ontwikkeling		x	x	
	integratie			x	
	verificatie				x
4. demping van laterale torenbuiging	haalbaarheid	x			
	ontwikkeling			x	
	integratie			x	
	verificatie				x
5. demping van aandrijftreintrillingen	haalbaarheid	x			
	ontwikkeling		x		
	integratie		x		
	verificatie				x
6. vooruitkoppeling van de gereconstrueerde windsnelheid	haalbaarheid	x			
	ontwikkeling		x		
	integratie		x		
	verificatie			x	
7. individuele bladverstelling	haalbaarheid		x		
	ontwikkeling			x	
	integratie			x	
	verificatie				x
8. belasting reducerende kruiregeling	haalbaarheid		x		
	ontwikkeling			x	
	integratie			x	
	verificatie				x
9. overbruggen van resonantie rotorsnelheden	haalbaarheid		x		
	ontwikkeling		x		
	integratie		x		
	verificatie			x	
10. geavanceerde vermogensregeling	haalbaarheid		x		
	ontwikkeling		x		
	integratie		x		
	verificatie			x	
11. flexibele vermogensafgifte	haalbaarheid		x		
	ontwikkeling			x	
	integratie			x	
	verificatie				x
12. voorspellend filteren	haalbaarheid		x		
	ontwikkeling			x	
	integratie			x	
	verificatie			x	
13. vollast/deellast-overgangsregeling	haalbaarheid		x		
	ontwikkeling			x	
	integratie			x	
	verificatie			x	

Naast de direct aan de regelaareigenschappen gekoppelde activiteiten is in 2002-2003 de ontwikkelprogramma's ook geherstructureerd. De toegankelijkheid en overdraagbaarheid van



de programmatuur is hierdoor sterk verbeterd.

Aan de bekostiging van het werk in de periode 2004-2007 (fase 2) is nog geen definitieve invulling gegeven. Voor deze periode is wel gepland dat de in tabel 1 aangegeven verificaties gaan plaatsvinden op het prototype van een commerciële turbine uit de megaWatt-klasse. De desbetreffende fabrikant heeft al een eerste versie van een door ECN ontworpen regeling afgenomen. De ontwikkeling en integratie van regelaareigenschappen zullen ook in fase 2 weer sterk door de wensen van industriële partijen worden beïnvloed. Hierom zouden we bij voorkeur expliciet samenwerken met een fabrikant. Hiervoor hebben we meerdere fabrikanten in gedachten. Ruim de helft van deze contacten is tot stand gekomen met het door NOVEM gesubsidieerde project 'Overdracht van regeltechnische windturbinekennis' (contract nummer 2020-02-14-20-002). Om de generalistische aanpak te kunnen blijven voortzetten en de programmatuur ook voor derden beschikbaar te houden, zullen we ook weer op subsidie willen terugvallen. Naast genoemde werkzaamheden voorzien we in fase 2 ook werkzaamheden van meer algemene aard:

- reductie van de source code van ontwikkelde regelingen (i.v.m. overdraagbaarheid en betrouwbaarheid van regelingen)
- top-down ontwerp overzichten (i.v.m. overdraagbaarheid van de ontwikkelomgeving)
- integrale stabiliteitsanalyse en daarop volgende iteratieve regelaarintensivering
- onderhandeling met fabrikanten voor verificatie na 2007

## 4 ONTWIKKELINGEN GEDURENDE FASE 1

In dit hoofdstuk staan de in 2002-2003 gemaakte vorderingen binnen het door NOVEM gesubsidieerde project ‘Ontwerpgereedschap voor het integraal ontwerpen van windturbine regelingen - fase 1’ (contract nummer 2020-01-12-10-003) globaal beschreven. Voor een meer inhoudelijke beschouwing van het werk wordt naar de binnen dit project vormgegeven publicaties verwezen.

### 4.1 Damping van axiale torenbuiging

Er is een generieke ontwerpmethodiek opgezet voor actieve axiale torendamping middels bladhoekverstelling bij pitch to vane horizontale as turbines. De methodiek is in ECN’s generieke ontwerpomgeving geïmplementeerd. De potentie van de dempende regeling is aangetoond door het gedrag van een typische multi-megaWatt offshore turbine te simuleren met de turbinemodellen in de ontwikkelomgeving voor turbineregelingen. De weg tot implementatie is nog niet volledig geplaveid; de regeling heeft beproeving in Phatas nog niet doorstaan [7]. De binnen dit project ontwikkelde en geïmplementeerde methodiek is beschreven in [10].

De regeling dempt de eerste buigmode van het torenmodel op basis van proportionele snelheidsterugkoppeling (van torentopversnelling naar bladhoekverstelsnelheid) plus band pass filtering, zoals voorgesteld in de literatuur [6][2]. Hieraan toegevoegd is de fuzzy instelling van de dempende regelaar, waarmee het actieve dempen tot de noodzakelijkheid wordt beperkt.

Deze studie heeft aanleiding gegeven te veronderstellen dat de mate waarin axiale torenbuiging optreedt ook in hoge mate wordt bepaald (naast de bekende invloed van structurele - en natuurlijke aërodynamische demping) door de gevoeligheid van de axiaalkracht voor veranderingen in de bladhoek. Mogelijk kan deze hypothese ertoe leiden dat de dempende regeling in de toekomst beter op het van toepassing zijnde proces kan worden afgestemd. Nadere analyse van deze hypothese zou bovendien kunnen uitwijzen dat het zinvol is om de genoemde gevoeligheid bij het aërodynamisch bladontwerp in acht te nemen.

Status (zie tabel 1): in ontwikkeling. Rapport: Bladhoek geregelde demping van axiale torentrillingen bij windturbines [10].

### 4.2 Damping van aandrijftreintrillingen

Gedurende dit project is de demping van aandrijftreintrillingen in de ontwerpprogrammatuur uitgebreid. Naast demping van resonantie in de hoofdas door een snelheidsterugkoppeling van as-torsie naar generatorkoppel (al dan niet gebruikmakend van signaalreconstructie), is er nu ook een generieke werkwijze beschikbaar om gekoppelde resonantieverschijnselen in laterale richting te dempen.

Door koppeling van de 2e torenbuigmode, torsie in de hoofdas (inclusief tandwielkast) en bladbuiging in het rotorvlak kan er over de hoofdas een koppel met 2 frequentiepieken (2 vervormingsmodes) komen te staan. Door Kalman-filtering, poolplaatsing en toestandsterugkoppeling met elkaar te combineren zijn we in staat gebleken om op basis van slechts het gemeten rotorsnelheidssignaal, beide vervormingsmodes te dempen. Deze werkwijze hebben we gepubliceerd tijdens de European Wind Energy Conference 2003 te Madrid [21].

Onderdeel van de werkwijze is het toepassen van een pseudo random binary sequence (prbs) op het generatorkoppel van (een aërodynamisch model van) de turbine waarvoor een dempende regeling wordt ontworpen. Hiermee identificeren we de a priori meestal onbekende, maar voor

het ontwerp benodigde regeltechnische overdracht van generatorkoppel naar rotorsnelheid. Dit deel van de werkwijze is voor het eerst afgeleid in het kader van het NOVEM project ‘TURBU Offshore’ (project nummer 2020-01-12-10-001) en binnen dit project algemeen toepasbaar gemaakt.

Status (zie tabel 1): geïntegreerd. Rapport: Control for damping the fatigue relevant deformation modes of offshore wind turbines [21].

### **4.3 Vooruitkoppeling van de gereconstrueerde windsnelheid**

Onder de vooruitkoppeling van de gereconstrueerde windsnelheid verstaan we het reconstrueren van de rotoeffectieve windsnelheid uit het waargenomen turbinegedrag, plus het bijsturen van de bladhoekverstelsnelheid op basis van dit signaal. Deze feitelijke terugkoppeling van de rotorsnelheid kan voor de begripsvorming worden opgevat als een vooruitkoppeling van een windsnelheidssignaal, waardoor de rotorsnelheid adequater wordt geregeld. Wanneer een turbine bij vollast bedrijf beneden nominaal produceert (wat niet nodig is; zie paragraaf 4.7), zal dit bovendien leiden tot een verhoging van de productie. Op deze wijze hebben we in het project ‘DOWEC’ onze regeling met betrekking tot de jaarproductie 0.9 % beter laten presteren [17].

Gedurende dit project is vooruitkoppeling van de gereconstrueerde windsnelheid geschikt gemaakt voor eenvoudige toepassing in de praktijk. De functies waarvolgens de wind uit het generatorkoppel en de gemeten rotorsnelheid wordt gereconstrueerd hoeven niet langer in de uiteindelijke regelaar te worden opgenomen. Deze functies leiden nu tijdens het ontwerpproces automatisch tot mapping-tabellen. Een tabel van gereconstrueerde windsnelheid naar bladhoekverstelsnelheid en daarvoor een 2 dimensionale tabel van generatorkoppel en rotorsnelheid naar gereconstrueerde windsnelheid. Dit werk hebben we gerapporteerd in [16].

Dit heeft geleid tot een vereenvoudiging en inkorting van de code om de rotor effectieve windsnelheid te reconstrueren. Bovendien is de werking van de code ook verbeterd: wanneer de turbine buiten het werkgebied komt waarvoor een windsnelheid eenduidig kan worden gereconstrueerd, blijft de tabel bruikbare schattingen afgeven. Bijkomend voordeel hiervan is dat de re-initialisaties van dit stuk code (tijdens het turbinebedrijf) zijn komen te vervallen.

Hiermee is een bottleneck richting implementatie weggenomen: één van ECN’s industriële opdrachtgevers was al eerder overtuigd geraakt van de potentie van deze techniek, maar bleek na genoemde vereenvoudigingen pas bereid om deze in zijn volgende turbine op te nemen. Op de desbetreffende turbine is nu de eerste praktijktoets met vooruitkoppeling van de gereconstrueerde windsnelheid gepland.

Status (zie tabel 1): geïntegreerd. Rapport: Feed forward control of estimated wind speed [16].

### **4.4 Individuele bladverstelling**

Voor het onderzoek naar individuele bladverstelling en de daarmee samenhangende koppeling met het kruimoment zijn de eerste regeltechnische modellen geïmplementeerd en is de globale werking ervan getoetst. De modellen zijn geschikt gebleken om te worden toegepast om een individuele bladverstellingsregeling te ontwerpen, wat gepland staat voor 2004. Het gedurende dit project uitgevoerde werk hebben we gerapporteerd in [18].

Bij de uitvoering van het door NOVEM gesubsidieerde project ‘Overdracht van regeltechnische windturbine kennis’ (contract nummer 2020-02-14-20-002) is ons gebleken dat de industrie met name behoefte heeft aan individuele bladverstelling voor de reductie van bladbelasting als

gevolg van windveld-bemonstering. De ontwikkeling van individuele bladverstelling zal daar dan ook met name op worden gericht. Het hiermee nauw samenhangende (semi) vrij kruien kan met een relatief kleine inspanning op de achtergrond blijven meelopen.

#### **4.5 Belasting reducerende kruiregeling**

Met betrekking tot de mogelijkheden om windturbines te ontlasten door de kruihoek relatief snel aan te passen aan (bijvoorbeeld) torenbuiging, hebben we een literatuurstudie en inventariserende berekeningen uitgevoerd. Hieruit is niet eenduidig vast komen te staan hoe structurele bewegingen met een kruihoekregeling zouden kunnen worden tegengegaan [20].

We stellen voor dit onderzoek voort te zetten door de kruihoek in een representatief turbine-model in Phatas of TURBU aan te stoten met een pseudo random binary sequence (prbs) en de potentieel te beïnvloeden bewegingen (met name toren- en bladbuiging) te registreren. Met een geschikt gekozen prbs kunnen dan de ‘regeltechnische systeemoverdrachten’ van kruihoek naar systeembewegingen worden afgeleid. Afhankelijk van de uitkomst van deze voortgezette inventarisatie kan dan invulling worden gegeven aan een eventuele kruiregeling.

Status (zie tabel 1): haalbaarheid onderzocht. Rapport: Belasting reducerende kruiregelingen - inventarisatie [20].

#### **4.6 Overbruggen van resonantie rotorsnelheden**

Tijdens het project is de industriële behoefte ontstaan om de deellast rotatiesnelheden van een turbine juist onder en juist boven de Eigenfrequentie van de toren te kiezen. Uiteraard zonder de torenresonantie (langdurig) te exciteren bij het overschakelen van de ene - naar de andere zijde van de Eigenfrequentie.

In de literatuur bleken er hiervoor licht verschillende technieken beschikbaar te zijn, die allemaal stelen op rotorsnelheidsregeling middels het generatorkoppel. Ter voorkoming van turbinebedrijf bij resonatiesnelheden is dan mode switching met tijd- of vermogenshysterese toegepast [5][1].

Gedurende dit project hebben wij een nieuwe techniek afgeleid, die mode switching en hysteresis overbodig maakt. Deze techniek is geïmplementeerd in de generieke ontwikkelomgeving voor turbineregelaars en succesvol getoetst middels een Phatas-simulatie voor een in ontwikkeling zijnde offshore windturbine. Tijdens de European Wind Energy Conference 2003 in Madrid hebben we deze ontwikkeling gepubliceerd [13]. Inmiddels is gepland dat deze regeling in het prototype van de desbetreffende windturbine wordt opgenomen.

Status (zie tabel 1): geïntegreerd. Rapport: Crossing resonance rotor speeds of wind turbines [13].

#### **4.7 Geavanceerde vermogensregeling**

Conventioneel wordt het vermogen van windturbines geregeld door het generatorkoppel bij lagere toerentallen volgens de optimum-Lambda kromme te laten verlopen en bij hogere toerentallen volgens de constant-vermogen kromme te laten verlopen (met daartussen een overgangsbied) [3]. Bij boven-nominaal turbine bedrijf leidt dit tot dips in de productie, zonder dat de (bovennominale) wind hier aanleiding toe geeft. Ondanks dat er in de literatuur een methode bekend is waarmee dit kan worden voorkomen [1][2], komen deze dips onder de huidige generatie van turbines nog altijd voor [4].

Tijdens dit project hebben we de vermogensregeling binnen onze ontwerpprogrammatuur dusdanig uitgebreid, dat er tijdens vollast geen productie-dips meer optreden. Hierdoor wordt de turbine in vollast veel rustiger bedreven (een glad verloop van generatorkoppel en vermogen). Met gebruikmaking van in de literatuur teruggevonden werkwijzen verhoogt dit de productie met orde-grootte 0.8 %. Hieraan hebben we een werkwijze toegevoegd die de hiervoor benodigde toename van het generatorkoppel halveert. Dit werk is gerapporteerd in [12].

De verbeterde werkwijze voor eliminatie van productie-dips is in generieke vorm in ECN's ontwikkelomgeving voor windturbine-regelingen opgenomen. Hiermee zijn 2 regelingen voor in ontwikkeling zijnde commerciële windturbines ontworpen, die met verschillende aërodynamische codes (waaronder Phatas) zijn beproefd. Voor één van deze gevallen zal de regeling in de praktijk worden toegepast.

Status (zie tabel 1): geïntegreerd. Rapport: Koppelregeling van variabel-toeren windturbines [12].

#### **4.8 Voorspellend filteren**

We hebben ons ook gericht op het verbeteren van de on-line reconstructie van het laagfrequente gedrag van de windturbinerotor, zoals dat wordt gebruikt in turbine-regelingen. Dit onderzoek heeft betrekking op de eliminatie van de signaalcomponenten (met name de 3p frequentie en meetruis), die de meting van het gewenste laagfrequente signaal verstoren en is gerapporteerd in [11].

Belangrijkste conclusie hieruit is dat het conventioneel toegepaste Chebychev type 2 filter de beste keus is voor de on-line reconstructie van het laagfrequente gedrag van de windturbinerotor, wanneer we dit filter vergelijken met een Moving Average -, een Linear Smoothing - of een (op voorhand veelbelovend) 'Recursive Linear Smoothed Newton (RLSN) prediction' filter [9][15].

Derhalve is de behoefte om de hogere frequenties (met name 3p) efficiënter uit het rotorsnelheidssignaal te elimineren, onverminderd blijven bestaan. Naar aanleiding van ons onderzoek bevelen we aan hiervoor lerende algoritmen te onderzoeken. De (multiple) 3p componenten worden namelijk gedeeltelijk deterministisch gereproduceerd als functie van de rotorpositie, -snelheid en wellicht ook -versnelling. Voor dit voorspelbare gedrag zou middels een feed forward-achtige constructie kunnen worden gecompenseerd. Een andere mogelijk aantrekkelijke optie is het adaptief volgen van de rotorsnelheid (en dus 3p) met een klassiek filter.

Status (zie tabel 1): haalbaarheid onderzocht. Rapport: Filtering van de rotorsnelheidsmeting bij windturbines [11].

#### **4.9 Vollast/deellast-overgangsregeling**

In de literatuur hebben we 2 overgangsregelingen tussen vol- en deellastbedrijf aangetroffen. Conventioneel is bij het naderen van de nominale rotorsnelheid een snel oplopend koppel in de generatorkarakteristiek geprogrammeerd [3]. Hoewel dit een robuuste en zeer eenvoudige werkwijze is, is een overgang middels een constant-toeren servo-regeling een aantrekkelijk alternatief [1][2].

Vooralsnog wordt in onze generieke ontwerpprogrammatuur uitsluitend gebruik gemaakt van de conventionele methode. Tijdens dit project hebben we echter laten zien dat de alternatieve methode goed realiseerbaar is en een turbine hiermee op jaarbasis orde-grootte 0.7 % meer produceert.

Aan de in de literatuur bekende constant-toeren overgang hebben we nog een werkwijze toegevoegd, waarbij de overgang wordt gekarakteriseerd door een afnemend toerental in combinatie met een toenemend koppel. Hiermee zou de productie nog verder kunnen worden verhoogd (wederom ordegrrootte 0.7 %). Deze werkwijze is nog vrij onzeker en zal slechts kunnen worden gebruikt voor offshore turbines.

Dit onderzoek hebben we gerapporteerd in [12]. Voor de constant-toeren optie stellen we voor dat deze in generieke vorm aan onze ontwerpprogrammatuur wordt toegevoegd.

Status (zie tabel 1): haalbaarheid onderzocht. Rapport: Koppelregeling van variabel-toeren windturbines [12].

#### **4.10 Herstructurering**

Tijdens het project is een eerste stap gemaakt in het overdraagbaar maken van onze, tot nu toe intern gebruikte, programmatuur. De inzichtelijkheid van het gereedschap om windturbineregelingen to ontwerpen is hiermee relevant verbeterd.

Er is een duidelijk onderscheid gemaakt tussen de verschillende submodellen die het geëxciteerde turbinemodel vormen. De structuur dwingt af dat de submodellen altijd eenduidig aan elkaar worden gekoppeld. En ook de koppeling tussen parametrisering en simulatie ligt eenduidig vast. Dit werk hebben we gerapporteerd in [23].

Voor de huidige opzet ondersteunen we de geautomatiseerde generatie van C-code. Hiermee hebben we de stap van Matlab-ontwerp-code naar een implementeerbare vorm enorm vereenvoudigd. Dit proces heeft zich inmiddels bewezen: ten behoeve van de certificatie van een windturbine van een industriële opdrachtgever hebben we de eerste automatisch aangemaakte C-code met succes aan Phatas gekoppeld.

Status (zie tabel 1): n.v.t. Rapport: ECN design tool for control development - revised points of departure [23].

#### **4.11 Passieve demping van laterale bladbuiging**

Passieve demping van laterale bladbuiging is wel binnen dit project onderzocht, maar heeft niet tot een toevoeging aan de programmatuur geleid. Binnen dit onderzoek zijn de potentie van radiale - en tangentiële demping in beeld gebracht. Beide technieken bleken complexe toevoegingen en de relevantie van de hiermee te realiseren reductie van vermoeiingsbelasting is nog onzeker. Dit onderzoek is gerapporteerd in [19].

De belastingsreductie kan relevant zijn bij geringe - of zelfs negatieve aërodynamische demping van laterale bladbuiging. Merk op dat dit niet is weg te regelen met het generatorkoppel: wanneer de bladen in tegenfase buigen, is dit niet merkbaar op de rotor-as. Zolang uit ontwerpberoeeningen en ervaringen met bestaande turbines echter niet is gebleken dat demping van laterale bladbuiging noodzakelijk is, zullen we deze complexe technieken niet verder ontwikkelen.

Status (zie tabel 1): haalbaarheid onderzocht. Rapport: Passieve mechanismen om bladzwaai-trillingen te dempen [19].

## 5 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

De generieke programmatuur voor het ontwerpen van windturbine-regelingen blijkt in een behoefte te voorzien: met de al voltooide delen van de programmatuur heeft ECN al twee maal een turbine-regeling voor de industrie ontworpen. In één van deze gevallen heeft dit ertoe geleid dat de regeling in het prototype van een commerciële turbine zal worden opgenomen. Daarnaast hebben we overleg met een fabrikant die interesse heeft om de ontwerp-programmatuur over te nemen.

In de eerste paragraaf van dit hoofdstuk staat samengevat welke ontwikkelingen van de programmatuur zijn gerealiseerd binnen het door NOVEM gesubsidieerde project 'Ontwerp-gereedschap voor het integraal ontwerpen van windturbine regelingen - fase 1' (contract nummer 2020-01-12-10-003). De tweede paragraaf beschrijft de aanbevelingen om de programmatuur dusdanig uit te breiden en te onderhouden, dat ECN de windturbine-industrie hier in de toekomst mee kan blijven ondersteunen.

### 5.1 Conclusies

Binnen dit project hebben we de volgende technieken:

- ontwikkeld en toepasbaar gemaakt:
  - geavanceerde vermogensregeling: sterk verbeterd koppel- en vermogensgedrag; 0.8 % hogere jaaropbrengst
  - demping van aandrijftreintrillingen als gevolg van lateraal gekoppelde resonantie-verschijnselen: 40 % lagere vermoeiingsbelasting door laterale beweging
  - overbruggen van resonantie rotorsnelheden: turbinebedrijf bij Eigenfrequenties wordt vermeden
- verbeterd en toepasbaar gemaakt:
  - vooruitkoppeling van de gereconstrueerde windsnelheid: meer adequate rotorsnelheidsregeling
- ontwikkeld:
  - demping van axiale torenbuiging
  - vollast-/deellast overgangsregeling bij constant toerental
- gereed gemaakt voor ontwikkeling:
  - individuele bladverstelling
- geïnventariseerd:
  - belasting reducerend kruien
  - voorspellend filteren
  - passieve demping van laterale bladbuiging

De ontwikkeling van de generieke ontwerp-programmatuur is het enige ons bekende initiatief waarmee regeltechnische windturbinekennis wordt overgedragen op een door de industrie toepasbare wijze. Hiernaast onderscheidt onze programmatuur zich doordat een aantal van de opgenomen technieken niet in de vakliteratuur zijn teruggevonden. Dit betreft:

- vollast productie zonder productie-dips, waarbij de variaties in het generatorkoppel half zo groot zijn als gebruikelijk
- demping van 2 laterale vervormingsmodes die ontstaan door koppeling van bladzwaai, zijwaartse torenbuiging en aandrijftreinverdraaiing
- overbruggen van resonantie rotorsnelheden, zonder de koppelregeling met mode switching en vermogens- of tijdhysterese te hoeven uitbreiden

Naast te zijn uitgebreid, is de ontwikkelprogrammatuur binnen het project ook geherstructureerd. Hierdoor is de toegankelijkheid en overdraagbaarheid van de programmatuur sterk verbeterd.

## 5.2 Aanbevelingen

Ook in de toekomst zal het (door)ontwikkelen van de programmatuur worden gedreven door industriële behoeften. Een belangrijke ontwikkeling in dit opzicht is dat turbinefabrikanten het noodzakelijk achten dat zij de kennis betreffende toe te passen regeltechnieken zelf beheersen. Het overdraagbaar maken (en houden) van de programmatuur is dus noodzakelijk voor het bestaansrecht ervan. Dit betekent dat we voortdurend aandacht moeten blijven besteden aan het onderhouden van de programmatuur. Regelmatig zal de evoluerende programmatuur geherstructureerd moeten worden en van engineering-tricks worden geschoond.

Om de programmatuur te laten meegroeien met de stand der techniek, is het op een implementeerbaar niveau brengen van de individuele bladverstelling de eerst in te vullen industriële behoefte. Een andere gewenste ontwikkeling komt voort uit de aanstaande grootschalige inpassing van windenergie. Hierdoor ontstaat de behoefte aan flexibel producerende windturbines: de mogelijkheid om beneden nominaal te produceren bij boven-nominale windsnelheden.

Naast het toevoegen van regelaareigenschappen zal het verbeteren van reeds in gebruik zijnde eigenschappen ook altijd een punt van aandacht zijn. Op dit gebied verwachten we het meeste van *i*) een vollast-/deellast overgang bij constante rotorsnelheid, *ii*) voorspellend filteren ter eliminatie van deterministische 3p effecten en *iii*) de integrale stabiliteitsanalyse en de daarop volgende intensivering van de rotorsnelheidsregeling.

Minder actuele open gebieden liggen er op het gebied van belastingreductie door aanvullende regellussen. Demping van axiale torenbuiging is nog niet implementeerbaar, maar voldoende gereed om een fabrikant die deze behoefte aankaart snel van dienst te kunnen zijn. Demping van laterale torenbuiging zouden we naar datzelfde niveau moeten brengen. Aan belastingreductie door kruien en (semi) vrij kruien lijkt nog geen directe behoefte te zijn. Deze onderwerpen kunnen we echter met relatief weinig inspanning laten meeliften met de aan kruien gerelateerde ontwikkeling van individuele bladverstelling.



## REFERENTIES

- [1] I. Bossanyi. Electrical aspects of variable wind speed operation of horizontal axis wind turbine generators. Technical Report ETSU W/33/00221/REP, Wind Energy Group Ltd, 1994.
- [2] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi. *Wind Energy - Handbook*. Number ISBN 0-471-48997-2. John Wiley & Sons, England, 2001.
- [3] L.L. Freris. *Wind Energy Conversion Systems*. Number ISBN 0-13-960527-4. Prentice Hall International, United Kingdom, 1990.
- [4] N. Inomata, T. Yamada, and S. Enomoto. Demonstrative operation of wind turbine with a permanent-magnet generator. In *Proc. EWEC 2001*, pages 995–998, 2001.
- [5] J.M. Kos. Speed avoidance logic for a variable speed wind turbine. (patent EP0244341), 1987.
- [6] J.M. Kos, J.P. Patrick, and K.I. Harner. Motion responsive wind turbine tower damping. (patent 4,420,692), 1983.
- [7] C. Lindenburg and J.G. Schepers. Phatas-iv aeroelastic modelling: Program for horizontal axis wind turbine analysis and simulation, version iv. Technical Report (Draft), ECN Wind Energy, Petten, The Netherlands, 2001.
- [8] The MathWorks. *MATLAB - The Language of Technical Computing: Using MATLAB Version 5*. The MathWorks Inc., 1996.
- [9] J. Pasanen, O.Vainio, and S.J. Ovaska. Predictive synchronization and restoration of corrupted velocity samples. *Measurement (Elsevier)*, No. 13, pages 315–324, 1994.
- [10] P. Schaak. Bladhoek geregelde demping van axiale toentrillingen bij windturbines. Technical Report ECN-C-03-134, ECN Wind Energy, Petten, The Netherlands, 2003.
- [11] P. Schaak. Filtering van de rotorsnelheidsmeting bij windturbines. Technical Report ECN-C-03-135, ECN Wind Energy, Petten, The Netherlands, 2003.
- [12] P. Schaak. Koppelregeling van variabel-toeren windturbines. Technical Report ECN-C-03-136, ECN Wind Energy, Petten, The Netherlands, 2003.
- [13] P. Schaak, G.P. Corten, and E.L. van der Hooft. Crossing resonance rotor speeds of wind turbines. In *Proc. EWEC 2003*, number ECN-RX-03-041, Petten, The Netherlands, 2003.
- [14] P. Schaak, T.G. van Engelen, E.L. van der Hooft, and E.J. Wiggelinkhuizen. Wind turbine control - industrial support (flyer). ECN Wind Energy, Petten, The Netherlands, 2003.
- [15] S. Valitiita and S.J. Ovaska. Delayless acceleration measurement method for motion control applications. In *Finnish Workshop on Power and Industrial Electronics (FINPIE/97)*, pages 31–36, 1997.
- [16] E.L. van der Hooft. Feed forward control of estimated wind speed. Technical Report ECN-C-03-137, ECN Wind Energy, Petten, The Netherlands, 2003.
- [17] E.L. van der Hooft, P. Schaak, and T.G. van Engelen. Wind turbine control algorithms dowec wp 1 - task 3. Technical Report ECN-C-03-111, ECN Wind Energy, Petten, The Netherlands, 2003.

- [18] T.G. van Engelen. Individual pitch control - inventory. Technical Report ECN-C-03-138, ECN Wind Energy, Petten, The Netherlands, 2003.
- [19] T.G. van Engelen and G.P. Corten. Passieve mechanismen om bladzwaaitrillingen te dempen. Technical Report ECN-C-03-139, ECN Wind Energy, Petten, The Netherlands, 2003.
- [20] T.G. van Engelen and P. Schaak. Belasting reducerende kruiregelingen - inventarisatie. Technical Report ECN-C-03-140, ECN Wind Energy, Petten, The Netherlands, 2003.
- [21] T.G. van Engelen, P. Schaak, and C. Lindenburg. Control for damping the fatigue relevant deformation modes of offshore wind turbines. In *Proc. EWEC 2003*, number ECN-RX-03-037, Petten, The Netherlands, 2003.
- [22] T.G. van Engelen, P. Schaak, and E.L. van der Hooft. Ontwerpgereedschappen voor de regeling van windturbines. Technical Report ECN-C-01-070, ECN Wind Energy, Petten, The Netherlands, 2001.
- [23] T.G. van Engelen and E.J. Wiggelinkhuizen. Ecn design tool for control development - revised points of departure. Technical Report ECN-C-03-141, ECN Wind Energy, Petten, The Netherlands, 2003.

# A WIND TURBINE CONTROL - INDUSTRIAL SUPPORT

## Wind Turbine Control industrial support

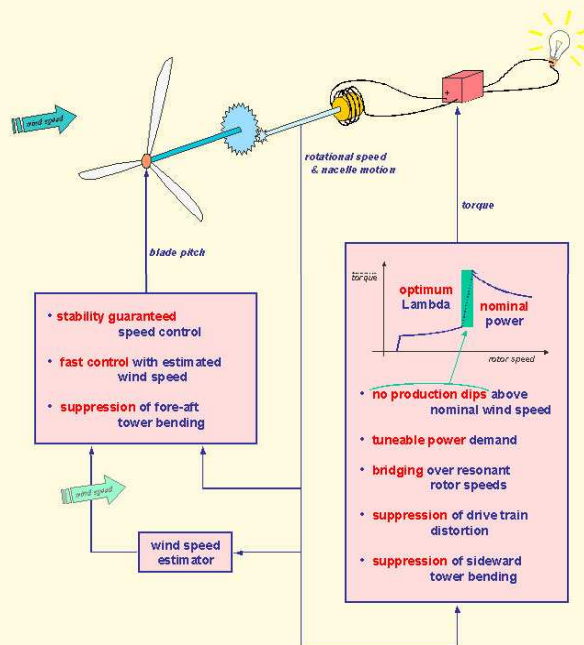


Figure 1: controlled wind turbine

ECN supports wind turbine manufacturers to develop control algorithms with dedicated development tools. These tools especially serve the prevailing turbine concept: pitch to vane and variable speed. Figure 1 shows the control scope that ECN supports.

The core control tasks are power and rotor speed control. Below nominal wind speeds, power is maximised. At higher wind speeds, power and rotor speed are regulated to their nominal values: full load control without production dips.

The other tasks of figure 1 are optional. Controller I/O allows to change settings and to (de) activate tasks gradually. Under all circumstances stability is guaranteed for the IEC wind class that is demanded.

**Structure**

Special attention is given to the development of clear control structures and plain algorithms. The top level control structure is presented in figure 2.

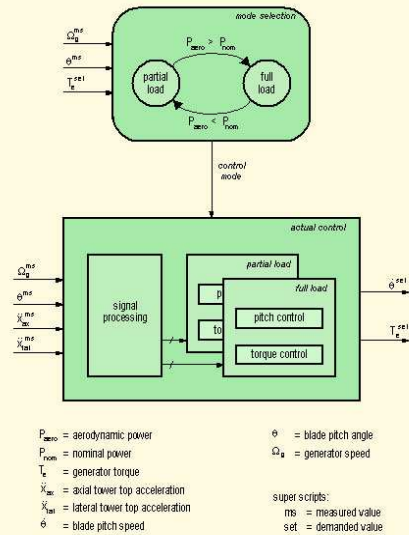


Figure 2: top level control structure

Actual control comprises signal processing and separate modes for below and above nominal wind speeds: partial and full load respectively. When the aerodynamic rotor power crosses nominal power persistently, the control mode switches smoothly.

Signal processing comprises the separation of phenomena from the measurements. Besides general low pass filtering, signals are filtered for repression or selection of the multiple blade passing frequencies and structural Eigenfrequencies of the tower, drive train, blades and combinations thereof.

**Partial load**

Partial load control basically maximises the aerodynamic power that drives the turbine rotor. Two control loops are used to achieve that:

- Fine pitch servo control: pitch speed demands enforce predetermined blade angles as a function of the rotor speed.
- Torque servo control: the generator torque is demanded as a function of the rotor speed.

The loops are optimised on the basis of the aerodynamic blade properties.

A method for bridging resonance rotor speeds may be added. The method that ECN has developed is typical for the aimed plainness in the control algorithms [5].

**Full load**

The main objectives of full load control are to maintain nominal power and rotor speed. Power is regulated to nominal with generator torque demands, which are derived from the current rotor speed. Rotor speed deviations from nominal are smoothed away with pitch speed demands. This rudimentary linear control is compensated for the dynamic wake response on blade pitching, 'dynamic inflow', and is scheduled to cater for the changing transfer function from blade angle to rotor speed. A further smoothing of the rotor speed course is obtained by the feed forward of the estimated rotor effective wind speed.

Figure 3 shows the full load control structure with the optional tasks for vibration suppression included as well.

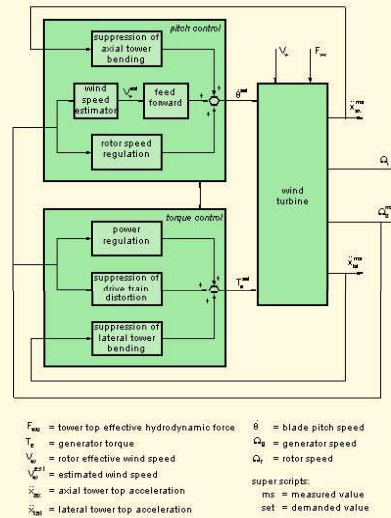


Figure 3: full load control structure

The suppression tasks are based on narrow-band speed feedback for the involved Eigenmodes. Signal reconstruction techniques, like Kalman filtering, may be used to obtain the applicable speed signals. Thresholds and fuzzy logic may be included to restrict additional actuation to the needs. The suppression of drive train distortion may be extended with acceleration feedback.

Moreover, ECN has developed a method to suppress drive train distortion as a result of coupled resonance with second mode lateral tower bending and collective in plane blade bending [3].

**Design process**

Figure 4 shows the design process, which is supported by the development tools that have been

Implemented in Matlab. Physical wind turbine data and requirements on operation are the initial input data:

- aerodynamic blade data: power and thrust coefficients as a function of the tip to wind speed ratio and rotor speed;
- structural parameters: lengths, weights, etc.;
- requirements: nominal values, allowed extremes, etc.

ECN has the capability to extract the required blade data from the blade geometry with the wind turbine analysis code Phatas [4] or blade analysis code ATG [1].

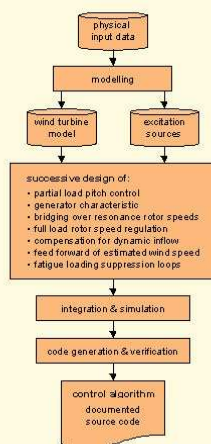


Figure 4: control design process

A control relevant wind turbine model including excitation is derived from the input data. With that model a control algorithm is designed.

First the blade angles for maximal power at partial load wind speeds are determined. Second the generator characteristic, torque as a function of rotor speed, is prescribed to obtain maximal power during partial load and nominal power during full load. With the optional design of bridging over resonance rotor speeds, the naturally stable partial load control is already completed then.

At full load conditions, stability is guaranteed by using industrial accepted stability margins of Nyquist in the design of rotor speed regulation (45 degrees in phase and -6 dB in amplitude). First rotor speed regulation is designed, then the estimated wind speed feed forward and vibration suppression tasks may be designed; all individually stable. Afterwards the control loops are integrated and subjected to overall stability analysis. Iteration is applied until the required phase and gain margins are achieved.

With the integration, that also covers the design of a smooth switching between partial and full load

control, the design is completed. Then the algorithm is fine-tuned on the basis of simulations within the Matlab environment and converted into Fortran or C-code. After successful verification with an authorised wind turbine analysis code, like Phatas [4], the algorithm is documented and ready for certification and implementation.

**Models**

Figure 5 shows the structure of the applied wind turbine model. For control design the aerodynamic conversion is modelled with finite meshed zero order transfer functions from wind speed, blade angle and rotor speed to the aerodynamic rotor torque and axial rotor force. During simulation this is replaced with non-linear transfer functions that describe the blade coefficients. In addition the dynamic inflow effect is implemented as first order linear transfer functions which are parameterised adaptively on the basis of the circumstances.

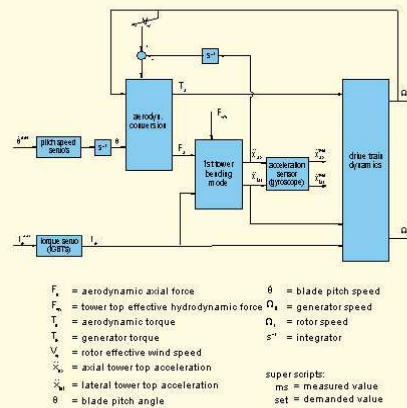


Figure 5: wind turbine model

The structural tower and drive train models are tower top and slow shaft equivalent lumped parameter models. The first tower bending mode is implemented with two second order linear transfer functions, one for axial and one for lateral displacement. By preference the drive train dynamics only relate to 2 torque to speed integrators for the generator and rotor inertia, plus a first order linear transfer function for the flexible axis in between. If necessary the coupling with second mode tower bending and collective in plane blade bending is included as well [3].

The excitation sources are the rotor effective wind speed and the tower top effective offshore hydrodynamic loading force. These are stochastic time domain realisations obtained from power spectra that involve interaction between the turbine, the wind field and the waves on beforehand. While simulating, the sampling of shear, turbulence and tower shadow by the turbine rotor is tuned to the current rotor speed.



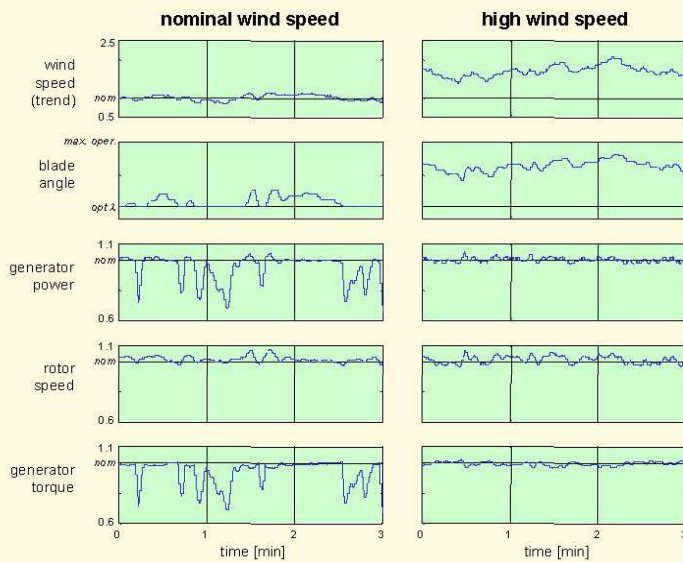


Figure 6: simulation results

#### Acknowledgement

ECN gratefully thanks the Netherlands Agency for Energy and Environment NOVEM for partly funding the realisation of the control development tools.

#### References

- [1] Bot, E.T.G., *Aerodynamic Table Generator (ATG): manual*, ECN-C-01-077 (in Dutch) ECN Wind Energy, Petten, The Netherlands, 2001.
- [2] Engelen, T.G. van, Hooft, E.L. van der, Schaak, P., *Wind Turbine Control Algorithms for Industrial Use*, EWEC2001, Copenhagen, Denmark, 2001.
- [3] Engelen, T.G. van, Schaak, P., Lindenburg, C., *Control for damping the fatigue relevant deformation modes of offshore wind turbines*, EWEC2003, Madrid, Spain, 2003.
- [4] Lindenburg, C., Schepers, J.G., *PHATAS-IV Aeroelastic Modelling; Program for Horizontal Axis Wind Turbine Analysis and Simulation, version IV*, Draft, ECN Wind Energy, Petten, The Netherlands, 2001.
- [5] Schaak, P., Corten, G.P., Hooft, E.L. van der, *Crossing resonance rotor speeds of wind turbines*, EWEC2003, Madrid, Spain, 2003.

#### ECN Wind Energy

P.O. Box 1  
1755 ZG Petten  
The Netherlands  
Westerduinweg 3  
1755 LE Petten  
The Netherlands

web: [www.ecn.nl/wind](http://www.ecn.nl/wind)  
tel: +31 224 56 4184  
fax: +31 224 56 8214

#### Results

The normalised simulation results of figure 6 have been produced with the control development tools for a typical offshore multi-MW wind turbine:

- Above nominal wind speed nominal power is produced continuously.
- Below nominal wind speed power is maximised.
- The blade angle smoothly follows the wind speed, which results in a tight rotor speed course.

From the optional tasks only the wind speed estimation had been utilised here. This typical performance has been confirmed with the authorised wind turbine analysis code Phatas [4].

Once the automated design steps are configured for a particular wind turbine, the resulting control algorithm may be re-adjusted easily. This enables an effortless fine-tuning of the algorithm and a fast surveying of turbine design changes.

We would be pleased to demonstrate those features with a control algorithm that is aimed at your own wind turbine. Please contact us to develop and demonstrate an initial design on the basis of major turbine parameters.

#### Contact:

P. Schaak (Pieter)  
[schaak@ecn.nl](mailto:schaak@ecn.nl)

T.G. van Engelen (Tim)  
[vanengelen@ecn.nl](mailto:vanengelen@ecn.nl)

E.L. van der Hooft (Eric)  
[vanderhooft@ecn.nl](mailto:vanderhooft@ecn.nl)

E.J. Wiggelinkhuizen (Edwin)  
[wiggelinkhuizen@ecn.nl](mailto:wiggelinkhuizen@ecn.nl)



	<b>Date:</b> augustus 2004	<b>Report No.:</b> ECN-C-03-133	
<b>Title</b>	Ontwikkeling van een gereedschap voor het ontwerpen van windturbineregelingen		
<b>Author</b>	P. Schaak, T.G. van Engelen, E.L. van der Hooft, E.J. Wiggelinkhuizen		
<b>Principal(s)</b>	NOVEM		
<b>ECN project number</b> <b>Principal's order number</b>	7.4153 2020-01-12-10-003		
<b>Programmes</b>			
<p><b>Abstract</b> Dit rapport betreft de generieke programmatuur die ECN ontwikkelt voor het ontwerpen van windturbineregelingen. Hoewel de programmatuur zich nog in een ontwikkelstadium bevindt, is deze al ingezet om regelingen voor de windturbine-industrie te ontwerpen. Hierbij richtten we ons zowel op het regelen van de rotorsnelheid en de productie, als op het reduceren van belastingen.</p> <p>We belichten met name de ontwikkeling van de programmatuur die is uitgevoerd binnen het door NOVEM gesubsidieerde project 'Ontwerpgereedschap voor het integraal ontwerpen van windturbine regelingen - fase 1' (contract nummer 2020-01-12-10-003). Daarnaast is er kort aandacht voor het tijdschema waaraan de ontwikkeling onderhevig is en de toekomst die wij met de programmatuur voorzien.</p> <p>De belangrijkste ontwikkelingen binnen het door NOVEM gesubsidieerde project zijn het toepasbaar maken van vollast bedrijf zonder productie-dips, demping van lateraal gekoppelde resonanties in de aandrijftrein, het overbruggen van resonantie rotorsnelheden en het vooruitkoppelen van de gereconstrueerde windsnelheid.</p>			
<p><b>Keywords</b> actieve demping, belastingreductie, bladhoekregeling, koppelregeling, ontwerpgereedschap, regeltechniek, vermogensregeling, windturbineregeling</p>			
<b>Authorisation</b>	<b>Name</b>	<b>Signature</b>	<b>Date</b>
<b>Checked</b>	E.L. van der Hooft		
<b>Approved</b>	H.B. Hendriks		
<b>Authorised</b>	H.J.M. Beurskens		