

Overdracht regeltechnische windturbinekennis

Eindrapport

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

Maart 2004

Verantwoording

De in dit rapport beschreven werkzaamheden zijn uitgevoerd door ECN unit Windenergie binnen het NOVEM project "Overdracht regeltechnische windturbinekennis" met projectnummer 2020-02-14-20-002 en looptijd 1 januari 2003 t/m 30 juni 2004.

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.

Samenvatting

In de afgelopen jaren is een groeiende belangstelling voor windturbine regelingen merkbaar. Desondanks wordt door industriële partijen nog weinig gebruik gemaakt van de regeltechnische kennis die in Nederland op dit gebied aanwezig is.

Intensivering van kennisoverdracht op dit gebied wordt belangrijk geacht om te bewerkstelligen dat de geavanceerde, meer optimaal werkende, regelingen vaker toepassing vinden in Nederland. Daardoor kunnen toekomstige ontwikkelingen meer in nauwe aansluiting met de praktijk plaatsvinden.

Doel van het project is het overdragen van state-of-the-art regeltechnische kennis voor windturbines aan belanghebbenden zoals windturbinefabrikanten en hun toeleveranciers. De hierbij gevolgde aanpak is dat presentaties worden gegeven aan specialisten aan de hand van een z.g. "Windturbine Demonstratie Kit", of kortweg "demokit", welke worden ondersteund met brochure materiaal.

Tijdens de conferentie EWEC 2003, de beurzen Husumwind 2003 en Hannover Messe 2004 zijn vier bilaterale ontwerpdemonstraties gegeven. Er zijn hierbij nieuwe contacten gelegd met twee Spaanse, een Duitse en twee Scandinavische fabrikanten. Verder zijn twee Nederlandse, een Duitse fabrikant en een Scandinavische fabrikant benaderd, waarmee reeds contact bestond.

Bij één fabrikant bestaan concrete plannen voor het overnemen van de ontwikkelomgeving. Ook bestaat interesse in samenwerking op gebied van R&D. Tijdens een bezoek in januari 2004 zijn de mogelijkheden hiervoor verkend en is een ontwerpdemonstratie gegeven. In juni 2004 wordt door ECN een cursus gegeven bij deze fabrikant.

Tijdens de verschillende beurzen bleek dat de demonstratie een als eerste kennismaking goed werkt, waarna met specialisten dieper wordt ingegaan op het regelaarontwerp en de daarbij gebruikte gereedschappen. Ook de uitgegeven brochure heeft de interesse gewekt en bleek nuttig als ondersteuning van de presentaties.

De beste strategie voor de kennisoverdracht aan marktpartijen blijft ons inziens het overdragen van een 'open source' ontwerpomgeving. Deze aanpak is uniek en heeft de interesse gewekt bij diverse fabrikanten, omdat zij hierdoor zelf kennis opbouwen en daarmee minder afhankelijk zijn van externe partijen bij het ontwerp. Verder biedt dit ECN de mogelijkheid voor toepassing van de regeltool en verdere, zo mogelijk gezamenlijke, ontwikkeling ervan.

Trefwoorden: windenergie, regeltechniek, regelaarontwerp, simulatie

INHOUD

1	Inleiding	7
1.1	Stand van zaken kennisoverdracht	7
1.2	Belang van intensivering kennisoverdracht	7
1.3	Opzet van het project	8
2	Projectbeschrijving	9
2.1	Presentaties	9
2.2	Windturbine Demonstratie Kit	9
2.3	Brochure	10
2.4	Monitoring	10
3	Presentatiemateriaal	11
3.1	Ontwikkeling Windturbine Demonstratie Kit	11
3.1.1	Protocol definitie	11
3.1.2	Ontwerp van user-interface	12
3.2	Vervaardiging brochuremateriaal	12
4	Presentaties	13
4.1	Selecteren en benaderen van belanghebbenden	13
4.2	Presenteren regelaarontwerp en -evaluatie	13
4.2.1	EWEC 2003	13
4.2.2	Husumwind 2003	13
4.2.3	Hannover Messe 2004	13
4.2.4	Evaluatie	14
5	Monitoring kennisoverdracht	15
6	Conclusies	16
A	Beschrijving Demonstrator software	18
A.1	Inleiding	18
A.2	Structuur user-interface	18
A.3	Functionele opbouw	21
B	Brochure	22

1 INLEIDING

In de afgelopen jaren is een groeiende belangstelling voor windturbine regelingen merkbaar. Als de belangrijkste achterliggende redenen zijn te noemen dat:

1. een aantal turbinefabrikanten recentelijk is overgestapt (of zal gaan overstappen) van het klassieke Deense concept 'constant toeren, overtrek' naar 'bladhoekverstelling, variabel toerental'. Dit concept wordt algemeen verwacht in de MW klasse toonaangevend te worden.
2. door opschaling van de turbines adequaat werkende regelingen essentieel zijn om stabiliteitsproblemen te voorkomen en tegemoet te komen aan de hoge eisen ten aanzien van betrouwbaarheid en verlaging van de levelized production costs.
3. de eisen van netbeheerders ten aanzien van de kwaliteit van de geleverde energie en de regelbaarheid van de turbines worden aangescherpt om de stabiliteit van het elektriciteitsnet te kunnen waarborgen.

1.1 Stand van zaken kennisoverdracht

Ondanks de toegenomen belangstelling wordt door industriële partijen nog weinig gebruik gemaakt van de regeltechnische kennis die in Nederland op dit gebied aanwezig is. Een belangrijke reden hiervoor is dat de Nederlandse markt steeds meer wordt voorzien door buitenlandse fabrikanten, waar in voorgaande jaren meer Nederlandse fabrikanten en toeleveranciers in de markt actief waren. Intensieve samenwerking met Nederlandse kennisinstituten destijds zorgde voor concrete kennisoverdracht op onder meer het vakgebied van de regeltechniek. Hierdoor was tevens de aansluiting gewaarborgd tussen de door ECN geboden regeltechnische mogelijkheden en de praktijk.

Ten tweede is de in Nederland aanwezige regeltechnische kennis op dit moment niet snel toegankelijk voor derden. De materie is dermate complex geworden, dat het aantonen van de voordelen van state-of-the-art regelingen zeer tijdrovend is. Voor het kunnen overdragen van deze kennis is intensieve samenwerking inmiddels een vereiste. Een gezamenlijk ontwikkeltraject is ons inziens de beste vorm om de in Nederland aanwezige regeltechnische kennis over te dragen aan turbinefabrikanten in binnen- en buitenland. Verder kunnen door deze vorm van samenwerking de actuele problematiek en knelpunten bij turbinefabrikanten goed worden geïdentificeerd.

Ten derde is de regeling te vaak nog de 'sluitpost' van een turbineontwerp. Pas nadat de hoofdcomponenten zijn gedimensioneerd en de besturing is gekozen, moet er nog een definitieve regeling worden ontwikkeld. Op dat moment is er weinig tijd om de huidige stand der techniek te (h)erkennen en wordt er vaak gekozen voor een beperkte 'in huis' ontwikkeling of wordt een veelal minder vooruitstrevende regeling gekocht. Wanneer eenmaal een (eerste generatie) regeling is ontworpen en geïmplementeerd (eventueel in samenwerking met een derde partij) en daarmee ook de keuze voor actuatoren e.d. vastligt, is het voor een fabrikant moeilijk de ingeslagen weg te verlaten, waardoor de huidige technische mogelijkheden onbenut blijven.

1.2 Belang van intensivering kennisoverdracht

Op dit moment verkeren veel van deze fabrikanten in het stadium dat zij moeten kiezen voor een bepaald regelconcept voor een (hernieuwde) productielijn.

De kans is groot dat wanneer op korte termijn geen kennisoverdracht aan turbinefabrikanten plaatsvindt, er in Nederland nieuwe turbines worden geplaatst met sub-optimale regelingen. Daarom is het belangrijk om op korte termijn met deze kennisoverdracht te starten.

Daarbij vindt de in Nederland aanwezige regeltechnische windturbine kennis toepassing en kunnen toekomstige ontwikkelingen in nauwe aansluiting met de praktijk plaatsvinden.

1.3 Opzet van het project

Een belangrijk uitgangspunt is dat de kennis in een goed overdraagbare vorm wordt aangeboden, zodat de overdracht effectief en in korte tijd kan plaatsvinden. Het project richt zich met name op de eerste (algemene) stappen binnen het traject van kennisoverdracht. Afhankelijk van de reeds aanwezige kennis en de behoeften van de afnemer wordt hierop desgewenst een klantspecifiek vervolg afgesproken.

Doel van het project is het overdragen van state-of-the-art regeltechnische kennis voor windturbines aan belanghebbenden zoals windturbinefabrikanten en hun toeleveranciers. De hierbij gevolgde aanpak is dat presentaties worden gegeven aan specialisten aan de hand van een z.g. "Windturbine Demonstratie Kit", of kortweg "demokit", welke worden ondersteund met brochure materiaal.

De hieruit volgende taken zijn:

Werkpakket 1: ontwikkelen presentatiemateriaal

Taak 1.1: ontwikkelen demokit

Taak 1.2: vervaardigen brochuremateriaal

Werkpakket 2: geven van presentaties

Taak 2.1: selecteren en benaderen van belanghebbenden

Taak 2.2: demonstreren regelaarontwerp en -evaluatie

Werkpakket 3: monitoren van het effect van de kennisoverdracht

In hoofdstuk 2 is de opzet van het project verder toegelicht. De resultaten van de werkpakketten 1, 2 en 3 worden achtereenvolgens in de hoofdstukken 3, 4 en 5 beschreven en toegelicht. Hoofdstuk 6 bevat de conclusies en aanbevelingen.

2 PROJECTBESCHRIJVING

Het doel van dit project is het overdragen van state-of-the-art regeltechnische kennis voor windturbines aan belanghebbenden. Deze belanghebbenden zijn in de eerste plaats de windturbine-fabrikanten, maar ook hun toeleveranciers. Hierbij valt te denken aan fabrikanten en leveranciers van meetinstrumenten en actuatoren, dienstverleners op het gebied van regelsystemen en partijen die werkzaam zijn op het gebied van condition monitoring. Het aantal fabrikanten binnen deze doelgroep is momenteel omstreeks 15 wereldwijd.

De kennisoverdracht vindt plaats in de vorm van presentaties (2.1) aan specialisten, aan de hand van een "Windturbine Demonstratie Kit" (2.2), ondersteund met brochuremateriaal (2.3). Tijdens de looptijd van het project vindt ook monitoring plaats van zowel de omvang als het effect van de kennisoverdracht (2.4).

2.1 Presentaties

De ruggengraat van dit kennisoverdrachtproject is het interactief met belanghebbenden ontwerpen en evalueren van regelingen voor specifieke windturbines. Om de kosten te beperken en deelname aan de kennisoverdracht laagdrempelig te houden, zijn deze presentaties gekoppeld aan reeds geplande internationale conferenties en beurzen. ECN heeft presentaties gehouden tijdens de European Wind Energy Conference, juni 2003 te Madrid, Husum Wind, september 2003 en de Hannover Messe, april 2004.

Naast een algemene demonstratie aan de hand van een 'typical' offshore multi-megaWatt turbine, is er binnen het project ook bijzondere aandacht voor bilaterale ontwerpdemostraties. Daarin wordt een ontwerp gemaakt aan de hand van een aantal door de klant geleverde parameters van een windturbine. Het demonstreren van de toepassingsmogelijkheden voor het concrete product of probleemgebied van een belanghebbende achten wij namelijk essentieel om belanghebbenden zodanig bij de kennisoverdracht te betrekken, dat de in Nederland opgebouwde kennis daadwerkelijk gaat worden toegepast.

Dit kan betekenen dat de gepresenteerde technieken in 'eigen' gereedschappen van belanghebbenden worden overgenomen, maar ook dat er blijvende interesse bestaat in directe toepassing van de ECN programmatuur. Wanneer dit laatste het geval is, kan dit leiden tot afspraken die een bilaterale samenwerking beogen. Inspanningen op dit vlak worden niet tot dit project gerekend.

2.2 Windturbine Demonstratie Kit

De 'Windturbine Demonstratie Kit' is een grafisch georiënteerd computerprogramma op een laptop-PC, voor het interactief ontwerpen en evalueren van initiële windturbिनeregelingen op basis van kenmerkende turbine eigenschappen. Dit programma is binnen dit project samengesteld uit een grafische schil, plus de programmamodulen die reeds zijn ontwikkeld binnen het NOVEM project 'Ontwerpgereedschap voor het integraal ontwerpen van windturbine regelingen': de 'Control Tool' (project nr. 2020-01-12-10-003) [1].

De demokit heeft als invoer een aantal hoofdparameters van een bepaald windturbineontwerp (zoals rotordiameter, torenhoogte, nominaal toerental, karakteristieke massa's en eigenfrequenties). Via een intern protocol worden deze gegevens omgezet naar de invoerparameters voor het regelaarontwerp. Vervolgens wordt een initiële turbineregeling interactief ontworpen en wordt voor diverse instelbare bedrijfsomstandigheden de responsie van een hiermee geregelde turbine getoond. Door middel van een virtueel bedieningspaneel kunnen parameters van de tur-

bine, de regelaar en het windklimaat worden gevarieerd en het effect hiervan direct zichtbaar worden gemaakt. Als voorbeeld kan de verstelsnelheid van de pitchactuator worden veranderd waarna het effect op de daarmee ontworpen regeling kan worden bekeken. Ook kan tijdens de simulatie bijvoorbeeld een regelaarfunctie worden uitgeschakeld of een windvlaag worden opgedrukt. Ook hierbij is het effect direct te evalueren met behulp van de geplotte tijdsignalen.

De demokit is daarmee een krachtig hulpmiddel om derden concreet in kennis te stellen van de voordelen van geavanceerde regeltechnische mogelijkheden. Het doel hiervan is om de toepassing van geavanceerde regelingen te stimuleren, zowel in het ontwerp van toekomstige turbines als bij modificatie van bestaande turbines.

2.3 Brochure

Als ondersteuning van de presentaties is een brochure uitgereikt. Deze brochure beschrijft de state-of-the-art van de regeltechnische mogelijkheden voor windturbines in de MW klasse. Hierbij wordt gebruik gemaakt van gangbare modellen voor windturbines en de bijbehorende omgevingsinvloeden. Met het in de demokit opgenomen ontwerpproces als lopend voorbeeld, is concreet toegelicht hoe het ontwerpproces van een windturbineregeling kan worden gegeneraliseerd. Speciale aandacht is hierbij besteed aan het multiple input, multiple output (MIMO) karakter van windturbineregelingen en de wisselwerking tussen de verschillende doelen die hierbij worden nagestreefd.

De onderliggende theorie en de globale opzet van de Control Tool wordt in de brochure kort en overzichtelijk uiteengezet, waarmee deze basiskennis wordt overgedragen. Belanghebbenden met een gedegen regeltechnische achtergrond en brede ervaring zullen dit als input kunnen gebruiken om de state-of-the-art regeltechniek in een eigen gereedschap voor regelaarontwerp te implementeren. Zoals vermeld is een andere mogelijkheid dat belanghebbenden daadwerkelijk gebruik gaan maken van de door ECN ontwikkelde programmatuur. Op termijn zou dit door belanghebbenden zelf kunnen gebeuren. Voorlopig wordt voor effectieve inzet van de Control Tool de ondersteuning in de vorm van opleiding/training door ECN onmisbaar geacht.

2.4 Monitoring

Om het effect van de kennisoverdracht te kunnen bepalen, is lopende het project de belangstelling voor de gepresenteerde technieken gekwantificeerd. Als onderdeel hiervan is gemeten in welke mate de kennis concreet is overgedragen en waarvoor deze kennis mogelijk zal worden toegepast.

3 PRESENTATIEMATERIAAL

3.1 Ontwikkeling Windturbine Demonstratie Kit

De 'Windturbine Demonstratie Kit', of kortweg 'demokit', is een grafisch georiënteerd computerprogramma op een laptop-PC voor het interactief ontwerpen en evalueren van initiële windturbिनeregelingen op basis van kenmerkende turbine eigenschappen. Dit programma bestaat uit een grafische schil, plus de programmamodules die reeds zijn ontwikkeld binnen het NOVEM project "Ontwerpgereedschap voor het integraal ontwerpen van windturbine regelingen" (project nr. 2020-01-12-10-003) [1].

De beoogde toepassing van de demokit is een korte demonstratie van het ontwerp van regelingen voor windturbines tijdens vakbeurzen, congressen of bedrijfsbezoeken. In deze demonstratie wordt de regeling voor een generieke multi-megawatt windturbine volgens een vastgelegd protocol ontworpen en geëvalueerd door middel van een tijdsimulatie. Hiermee kunnen de regeltechnische mogelijkheden en de benodigde ontwerpstappen helder worden gepresenteerd. Doordat ontwerpparameters van zowel de regelaar als van de turbine en het windklimaat snel en eenvoudig te wijzigen zijn, kunnen de effecten hiervan tijdens de demonstratie inzichtelijk worden gemaakt. Na deze eerste kennismaking zal voor bezoekers met voldoende inhoudelijke kennis (bv. besturingstechnici van fabrikanten en hun leidinggevendenden) en belangstelling worden ingegaan op de onderliggende ontwerpomgeving.

De demokit heeft als invoer een aantal hoofdparameters van een bepaald windturbineontwerp (zoals rotordiameter, torenhoogte, nominaal toerental, karakteristieke massa's en eigenfrequenties). Via een intern protocol worden deze gegevens omgezet naar de invoerparameters voor het regelaarontwerp. Vervolgens wordt een initiële turbineregeling interactief ontworpen en wordt voor diverse instelbare bedrijfsomstandigheden de responsie van een hiermee geregelde turbine getoond. Door middel van een virtueel bedieningspaneel kunnen regelparameters worden gevarieerd en het effect hiervan direct worden bekeken en geëvalueerd.

De werkzaamheden zijn onderverdeeld in protocol definitie en ontwerp van de user-interfaces. Beide delen worden in de volgende paragrafen in het kort beschreven. Een meer gedetailleerde uiteenzetting is terug te vinden in bijlage A.

3.1.1 Protocol definitie

Er is gekozen voor een eenvoudige overzichtelijke programmastructuur voor de gebruiker, waarbij zowel het aantal menu's als de hoeveelheid in- en uitvoer beperkt is gehouden.

In elk van de hoofdmenu's kan de gebruiker een categorie van parameters kiezen om te wijzigen, bv. rotor parameters. Na deze keuze wordt het submenu parameterinvoer geopend waarin uit de geselecteerde categorie een beperkt aantal karakteristieke parameters is weergegeven. Bij elke parameter is een korte beschrijving weergegeven, een default waarde en, voor zover van toepassing, een instelbereik. Alle niet instelbare parameters worden geladen vanuit een default ontwerp of berekend.

De uitvoer van ontwerpresultaten bestaat uit enkele plots met daarin karakteristieken ter beoordeling van het ontwerp, zoals bv. een Nyquist plot in het regelaarontwerp. De resultaten van de tijdsimulaties worden tijdens de simulatieruns on-line geplott. Hiervan zijn drie plots geplaatst in het venster "Main results" en drie andere in het venster "Detailed results". De tijdreeksen van verschillende door de gebruiker geselecteerde runs kunnen off-line onderling worden vergeleken. Dit is uitgevoerd door het over elkaar heen plotten van de resultaten.

3.1.2 Ontwerp van user-interface

Voor elk van de ontwerp- en evaluatiestappen, turbine modellering (1), regelaar ontwerp (2), tijddomein simulatie (3) en post-processing (4) is een gelijksoortige user-interface ontworpen (zie bijlage A, fig. 1).

Vanuit elk van de menu's wordt voor het wijzigen van parameters tijdens het ontwerp of de simulatie hetzelfde submenu parameterinvoer aangeroepen. Voordelen van deze generieke menustructuur zijn de meer overzichtelijke bediening en voor de ontwikkelaars een overzichtelijke en flexibele programmastructuur. De menu-specifieke zaken zijn enkel de definitie en selectie van de parameter categorieën en de koppeling naar de onderliggende berekeningsroutines uit de ECN Control Tool.

Reeds in juni 2003 is een eerste versie van de demokit afgeleverd. Hierin kunnen alle ontwerp- en evaluatiestappen worden doorlopen waarbij de bedieningsfuncties beperkt zijn gehouden. Zie voor de beschrijving van deze software bijlage A.

Met de demokit zijn op de EWEC 2003 exhibition te Madrid bilaterale ontwerpdemonstraties gehouden met enkele industriële partijen.

Tijdens deze eerste presentaties bleek deze zogenaamde basisversie van de Demokit goed te voldoen, waarmee feitelijk het beoogde resultaat van werkpakket 1 is bereikt.

Ook in de daarop volgende presentaties tijdens Husumwind september 2003 en de Hannover Messe, april 2004, zijn met deze versie ontwerpdemonstraties uitgevoerd.

3.2 Vervaardiging brochuremateriaal

Op de EWEC 2003, Husumwind 2003 en de Hannover Messe 2004 is de brochure uitgegeven, welke is afgedrukt in bijlage B. Deze brochure is gebruikt voor zowel de bekendmaking als de ondersteuning van de ontwerpdemonstraties. Deze bevat bondige beschrijvingen met illustraties over de volgende onderwerpen:

Windturbinemodellen en regelkringen

Invoergegevens voor ontwerp en evaluatie

Regelaarsynthese: regeldoelstellingen, de gekozen regelaarstructuur en algoritmes

Ontwerpproces: modellering, regelaarontwerp, evaluatie en verificatie

Uitgewerkt simulatievoorbeeld

De brochure is zodanig ingedeeld dat het voor- en achterblad de strekking en kernresultaten van het regelaarontwerp weergeven, wat bv. interessant is voor leidinggevend. De twee binnenbladen geven meer gedetailleerde informatie van het ontwerpproces weer ten behoeve van ontwerpers en andere specialisten.

4 PRESENTATIES

4.1 Selecteren en benaderen van belanghebbenden

Voor de beurs bij de conferentie EWEC 2003 zijn vooraf geen mailings verstuurd, maar zijn belanghebbenden actief benaderd tijdens en na de beurs.

Voor de beurs Husumwind 2003 is een mailing inclusief brochure uitgegaan naar 15 marktpartijen, voornamelijk fabrikanten. Hierin werden zij uitgenodigd voor een bezoek aan de stand en het maken van een afspraak voor een ontwerpdemostratie.

Omdat voor de Hannover Messe een kort bezoek was gepland, is vooraf geen mailing verstuurd.

4.2 Presenteren regelaarontwerp en -evaluatie

Tijdens de beurs op EWEC 2003 en Husumwind 2003 zijn respectievelijk twee en vier bilaterale ontwerpdemostraties gegeven.

4.2.1 EWEC 2003

Tijdens de beurs op EWEC 2003 zijn nieuwe contacten gelegd met twee Spaanse fabrikanten, waarbij met één een ontwerpdemostratie is uitgevoerd. Aan beide partijen is een informatiepakket toegestuurd. Ook zijn vier bestaande contacten, allen fabrikanten, geïnformeerd over onze ontwerpgereddschappen. Eén partij heeft een ontwerpdemostratie bijgewoond.

4.2.2 Husumwind 2003

Fabrikanten toonden zich vooral geïnteresseerd in het verkrijgen van kennis in huis. De huidige praktijk is namelijk dat regelaarontwerp veelal wordt uitbesteed aan consultants.

Het hoofd van de groep "Mechanical Engineering" van een Duitse windturbinefabrikant vond in de brochure en de mogelijkheid voor een korte demonstratie een aanknopingspunt om regeltechnische ondersteuning binnen zijn bedrijf aan te kaarten. Omdat deze fabrikant te kampen heeft met drukte tot begin 2004, wordt hierna contact opgenomen.

De vice-president van een Scandinavische windturbinefabrikant heeft interesse getoond over het aanbod om zelf regeltechnische kennis in huis op te bouwen met behulp van ECN software tools in plaats van consultancy. Hij zal intern overleg hierover laten plaatsvinden. Als follow-up is contact opgenomen met regeltechnisch verantwoordelijke van dit bedrijf, die voor ontwikkeling van een 3 MW windturbine meer in huis zou willen doen.

Een Spaanse fabrikant heeft concrete belangstelling getoond voor het gebruiken van de ECN programmatuur en deze te koppelen met eigen modellen. Dit heeft geleid tot enkele vervolactiviteiten en afspraken, die zijn beschreven in hoofdstuk 5.

4.2.3 Hannover Messe 2004

Aan de Hannover Messe is een kort bezoek gebracht. Hieruit zijn geen nieuwe inzichten of contacten met fabrikanten voortgekomen. Daarvoor bleek deze beurs te veel gericht op commercie. Wel is er nuttig gesproken met een Duitse fabrikant van elektrische omzetters voor windturbines. De actuele stand van de techniek hiervan is belangrijk om de maximale prestaties van regeltechnische oplossingen te kunnen behalen.

4.2.4 Evaluatie

Onze ervaring is dat de demonstratie als eerste kennismaking goed werkt, waarna met specialisten dieper wordt ingegaan op het regelaarontwerp en de daarbij gebruikte gereedschappen. Omdat op beurzen weinig tijd beschikbaar is, werkt een demonstratie aan de hand van een generieke windturbine in de meeste gevallen het prettigst.

Uit de contacten met een groot aantal fabrikanten is als belangrijkste conclusie naar voren gekomen dat er concrete belangstelling is voor het overnemen van onze ontwerpprogrammatuur. Dit gegeven bleek al tijdens EWEC 2003 en werd bevestigd tijdens Husumwind 2003.

De achterliggende reden is dat fabrikanten zelf geen ontwikkelomgeving kunnen of willen opzetten, maar het zich ook niet kunnen permitteren om geheel afhankelijk te blijven van de kennis van derden. Voor beide partijen (ECN en potentiële klanten) lijkt het een geschikte modus te zijn om turbine-specifieke regelingen aan te bieden, inclusief de daarbij gebruikte ontwikkelprogrammatuur. Bij veranderende specificaties kan een fabrikant dan zelf kleine modificaties doorvoeren. Voor de 'grote stappen', die een nieuwe ontwikkeling vereisen, verwachten we opnieuw een bijdrage te kunnen leveren (bijv. voor het toevoegen van een structurele dempingsregeling of uitbreiding naar individuele bladverstelling).

Het ter beschikking stellen van de ontwerpomgeving vereist dat de gebruikers er eerst mee vertrouwd worden gemaakt. Het maken van goede ontwerpkeuzes en het kunnen beoordelen van gemaakte ontwerpen vereist ook gedegen kennis van de onderliggende theorie en van de gekozen uitgangspunten van de omgeving. Mogelijkheden om dit te bereiken zijn het geven van trainingen, het begeleiden van trainees of begeleiding ter plekke. Daarnaast blijven een goede beschrijving en ondersteuning noodzakelijk.

5 MONITORING KENNISOVERDRACHT

Tijdens de beurs op EWEC 2003 zijn in het kader van dit project nieuwe contacten gelegd met twee Spaanse fabrikanten, waarbij met één een uitvoerige ontwerpdemonstratie is uitgevoerd. Aan beide partijen is een informatiepakket toegestuurd. Ook zijn vier bestaande contacten, alle fabrikanten, geïnformeerd over onze ontwerpgereedschappen.

Tijdens de beurs Husumwind 2003 zijn nieuwe contacten ontstaan met een Duitse en twee Scandinavische fabrikanten en zijn verdere afspraken gemaakt met één van de bovengenoemde Spaanse fabrikanten. De analyse van de gegeven presentaties m.b.t. het presentatiemateriaal en de respons van belanghebbenden is opgenomen in [2].

In totaal is er contact gelegd met acht fabrikanten, waarbij de grootte van de doelgroep wereldwijd uit circa vijftien fabrikanten bestaat. Deze contacten verlopen alle direct met een terzakekundig c.q. verantwoordelijk persoon binnen deze organisaties die ook op de hoogte is van de mogelijkheden bij ECN. Hiervan hebben twee fabrikanten aangegeven dat zij nu niet ingaan op mogelijke toepassing van de regeltool, maar wel graag op de hoogte willen blijven. Twee andere fabrikanten toonden zich geïnteresseerd, maar hebben nog geen uitsluitsel gegeven. Voor één fabrikant bestaan concrete plannen voor het overnemen van de ontwikkelomgeving, waarvoor in juni 2004 een op maat gesneden cursus/training wordt georganiseerd. Ook bestaat interesse in verdere samenwerking op gebied van R&D. Met vier fabrikanten bestaat al samenwerking binnen andere projecten en wordt continuering beoogd.

In januari 2004 is een bezoek gebracht aan deze Spaanse fabrikant voor een meer uitgebreide ontwerpdemonstratie en een overleg waarin wordt verkend aan welke regeltechniek kennis en gereedschappen van ECN behoefte bestaat. Deze fabrikant heeft al aangegeven belang te hebben bij een goed toegankelijke ontwerpomgeving waarin de eigen modellen kunnen worden ingepast. Tijdens dit bezoek is onder meer informatie uitgewisseld over de specifieke behoeften aan regelaarontwerp software, ondersteuning bij de kennisopbouw en wensen t.a.v. de gepresenteerde ECN ontwikkelomgeving. Na dit bezoek heeft ECN een aantal mogelijke trajecten voor kennisoverdracht aan de betreffende fabrikant voorgelegd.

De monitoring van daadwerkelijke toepassing van de ontwerpgereedschappen en gerealiseerde samenwerkingsverbanden valt buiten de looptijd van het project. De monitoring heeft echter belangrijk inzicht gegeven in de te volgen strategie in de eerstkomende jaren voor kennisoverdracht en het realiseren van toepassing en samenwerking. Op de langere termijn zal de nu gevolgde opzet voor kennisoverdracht waarschijnlijk aangepast moeten worden. Dit houdt minimaal in dat de presentatiemiddelen moeten worden geactualiseerd aan de voortgaande ontwikkelingen.

Tijdens de bezoeken aan beurzen en conferenties is met behulp van de demokit en de brochure een belangrijk deel van de fabrikanten op de hoogte gesteld van de toegevoegde waarde van regeltechnische oplossingen. Het 'open source' karakter en de modulaire opzet van de ECN software, alsook het gebruik ervan in eigen beheer, zijn unieke aspecten die voor fabrikanten zwaar meewegen. Daarnaast vinden fabrikanten de verder gaande ontwikkeling van de regeltool door ECN en de mogelijkheden voor ondersteuning, zoals trainingen, belangrijk bij de toepassing van de regeltool.

6 CONCLUSIES

De Windturbine Demonstratie Kit (demokit) is in juni 2003 afgeleverd. In deze versie kunnen alle ontwerp- en evaluatiestappen worden doorlopen waarbij de bedieningsfuncties beperkt zijn gehouden.

De demokit bleek tijdens de ontwerpdemonstraties op diverse beurzen goed te voldoen aan de verwachtingen.

Verder is in juni 2003 een brochure samengesteld en gedrukt die is gebruikt voor zowel de bekendmaking als de ondersteuning van de ontwerpdemonstraties.

Tijdens de conferentie EVEC 2003, de beurzen Husumwind 2003 en Hannover Messe 2004 zijn vier bilaterale ontwerpdemonstraties gegeven. Er zijn hierbij nieuwe contacten gelegd met twee Spaanse, een Duitse en twee Scandinavische fabrikanten. Verder zijn twee Nederlandse, een Duitse fabrikant en een Scandinavische fabrikant benaderd, waarmee reeds contact bestond.

Voor één fabrikant bestaan concrete plannen voor het overnemen van de ontwikkelomgeving. Ook bestaat interesse in samenwerking op gebied van R&D. Tijdens een bezoek in januari 2004 zijn de mogelijkheden hiervoor verkend en is een ontwerpdemonstratie gegeven. In juni 2004 wordt door ECN een cursus gegeven bij deze fabrikant.

Tijdens de verschillende beurzen bleek dat de demonstratie als eerste kennismaking goed werkt, waarna met specialisten dieper wordt ingegaan op het regelaarontwerp en de daarbij gebruikte gereedschappen. Ook de uitgegeven brochure heeft de interesse gewekt en bleek nuttig als ondersteuning van de presentaties.

De beste strategie voor de kennisoverdracht aan marktpartijen blijft ons inziens het overdragen van een 'open source' ontwerpomgeving. Deze aanpak is uniek en heeft de interesse gewekt bij diverse fabrikanten, omdat zij hierdoor zelf kennis opbouwen en daarmee minder afhankelijk zijn van externe partijen bij het ontwerp. Verder biedt dit ECN de mogelijkheid voor toepassing van de regeltool en verdere, zo mogelijk gezamenlijke, ontwikkeling ervan.

REFERENTIES

- [1] T.G. van Engelen, E.L. van der Hooft, and P. Schaak. Ontwerpgereedschappen voor de regeling van windturbines. Technical report.
- [2] E.L. van der Hooft, Verbruggen T.W. Schaak, P., and S. Ramakers. Evaluatie husum wind energy exhibition and conference 2003. Technical Report ECN-Wind memo-03-027, vertrouwelijk, ECN, 2003.

A BESCHRIJVING DEMONSTRATOR SOFTWARE

A.1 Inleiding

Ten behoeve van het interactief kunnen demonstreren van het regelaarontwerp voor windturbines is een grafische user-interface gemaakt van waaruit de ontwerp- en evaluatiestappen kunnen worden doorlopen. Deze user-interface voorziet ook in de invoer en uitvoer van een geselecteerde set ontwerp- en simulatieparameters.

De user-interface opgezet m.b.v. de MATLAB GUIDE (GUI DEsign tool). De uitvoering van de ontwerp- en simulatiestappen gebeurt door het aanroepen van reeds bestaande MATLAB routines uit de *ECN Control Tool* (NOVEM project nr. 2020-01-12-10-003).

Met de hier beschreven versie kunnen alle ontwerp- en evaluatiestappen worden doorlopen voor een Variable-Speed Pitch-controlled (VSP) turbine. De menustructuur en de functionaliteit van de bediening zijn hierbij met opzet beperkt gehouden, om voor minder ervaren gebruikers de ontwerpstappen overzichtelijk te kunnen presenteren.

A.2 Structuur user-interface

In figuur 1 zijn de verschillende menu's afgebeeld waarbij het programmaverloop met behulp van de pijlen schematisch is weergegeven.

1. Menu *Turbine modelling*

Dit menu is het startpunt van het ontwerpproces en wordt geactiveerd door achtereenvolgens:

- MATLAB op te starten waarbij de applicatie *demoappl* wordt gekozen;
- het commando *startdemo* uit te voeren vanuit de MATLAB command window.

Tijdens het opstarten wordt een default model van een VSP turbine geladen. Dit turbinemodel kan naar wens worden aangepast door achtereenvolgens:

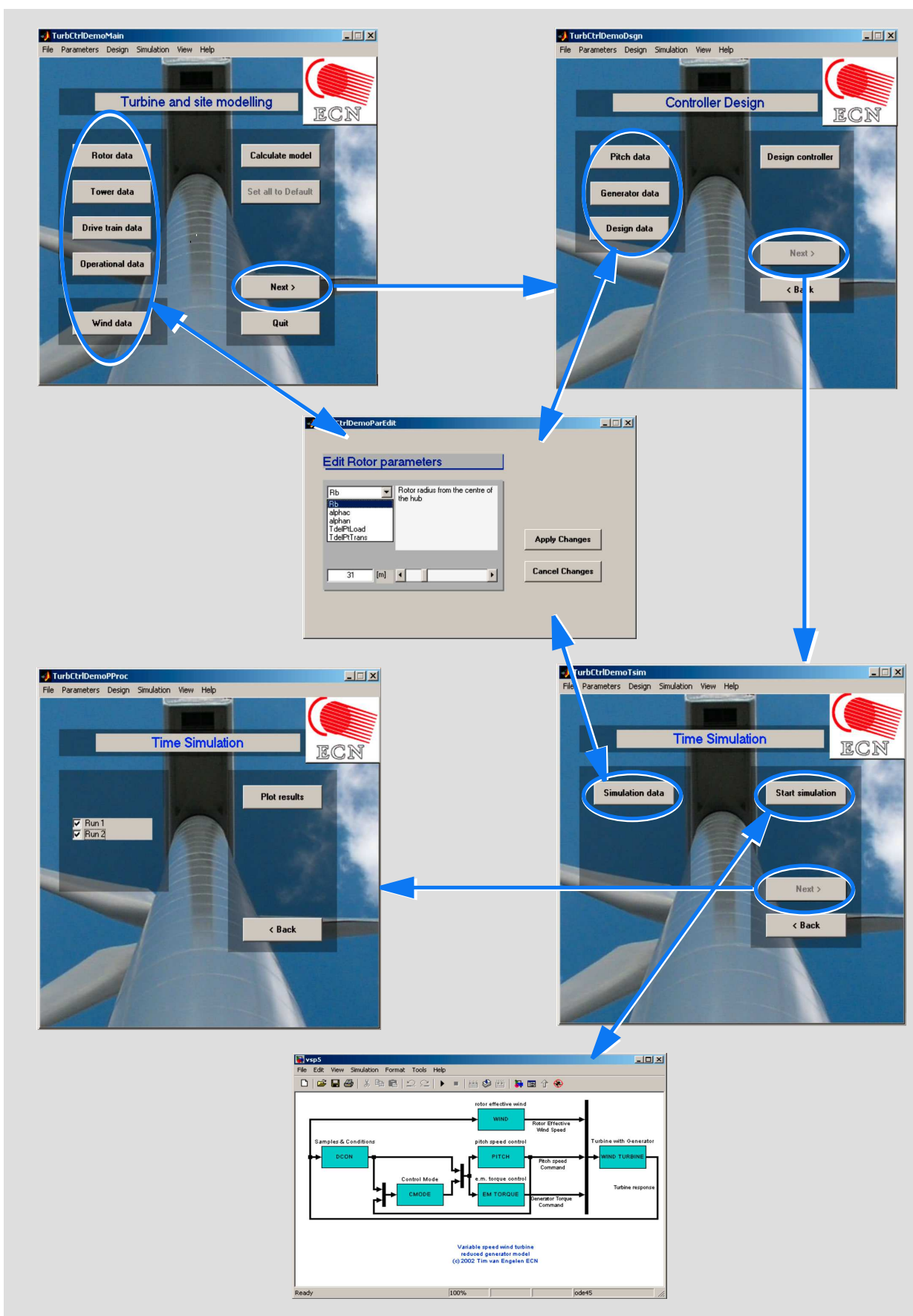
- turbineparameters aan te passen d.m.v. de knoppen Rotor data, Tower data of Drive train data ;
- klimaatgegevens aan te passen d.m.v. de knop Wind data ;
- de modellering met de aangepaste parameters uit te voeren d.m.v. de knop Calculate model .

Het aanpassen van parameters en de berekening kan naar believen meerdere malen worden herhaald, wat ook geldt in andere menu's.

Voor het aanpassen van parameters wordt vanuit alle hoofdmenu's gebruik gemaakt van het submenu *Edit parameters* . De set van te wijzigen parameters wordt bepaald door de plaats van waaruit het menu is aangeroepen.

De wijzigingen in het model kunnen worden teruggedraaid d.m.v. de knop Set all to default .

Voor zover van toepassing is de navigatie tussen de menu's mogelijk d.m.v. van de knoppen Next > en < Back . Door middel van de knop Quit in het menu *Turbine modelling* wordt het programma beëindigd.



Figuur 1: Menu's met schematisch het programmaverloop.

2. Menu *Controller design*

In dit menu wordt met het berekende turbinemodel de regelaar ontworpen, wat wordt uitgevoerd d.m.v. de knop Design controller.

Voorafgaand aan deze berekening kunnen enkele parameters van het pitching systeem en de generator worden aangepast d.m.v. de knoppen Pitch data en Generator data. Ook kunnen enkele ontwerpsturende parameters worden aangepast d.m.v. de knop Design data.

3. Menu *Time-simulation*

Vanuit dit menu wordt de tijd-domein simulatie van de gemodelleerde turbine plus regelaar gestart. De simulatieduur en stapgrootte kunnen voorafgaand aan de simulatie worden gewijzigd d.m.v. de knop Simulation data. Verder kan d.m.v. deze knop het gedrag van de windturbine worden beïnvloed, zowel tijdens de simulatie als hieraan voorafgaand. Zo kunnen o.m. het 3p-filter of de windschatter tijdelijk worden uitgeschakeld, zodat de invloed ervan duidelijk kan worden geïllustreerd.

4. Menu *Post-processing*

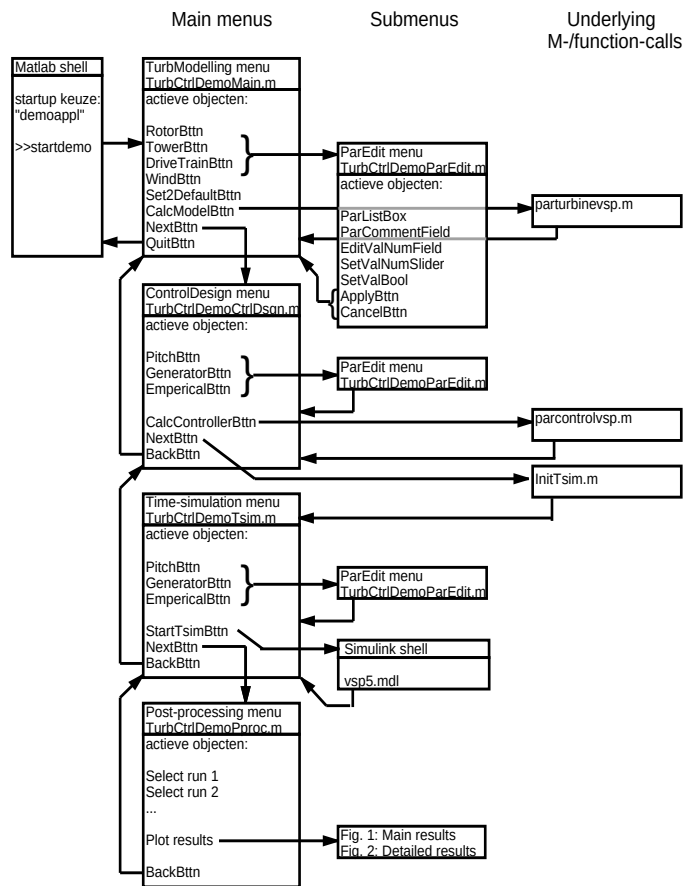
Dit menu biedt de mogelijkheid om de resultaten uit één of meerdere simulatie-runs op het scherm te plotten.

5. Submenu *Edit parameters*

Dit submenu wordt aangeroepen om ontwerp- of simulatieparameters te kunnen wijzigen. Afhankelijk van de plaats van waaruit de aanroep plaatsvindt wordt een van toepassing zijnde set parameters afgebeeld in een z.g. listbox. De gebruiker kan door het selecteren van één van deze parameters de omschrijving en de actuele waarde laten weergeven. De waarde van de betreffende parameter kan als volgt worden gewijzigd:

- in geval van een numerieke parameter kan de nieuwe waarde worden ingevoerd in het edit veld;
- ook kan in dit geval de slider op de nieuwe waarde worden ingesteld;
- in geval van een boolean parameter moet de checkbox aan ☒ of uit ☐ worden gezet;
- hierna kan de waarde van een volgende parameter worden aangepast door uit de listbox een andere parameter te selecteren;
- d.m.v. de knop Apply Changes worden de actuele waarden overgenomen en wordt het submenu afgesloten;
- d.m.v. de knop Cancel Changes blijven de waarden ongewijzigd en wordt het submenu afgesloten.

A.3 Functionele opbouw



Figuur 1: Schematisch weergegeven programmastructuur.

B BROCHURE

In de vier volgende figuren zijn de afzonderlijke pagina's van de flyer afgedrukt zoals die is verspreid op de EWEC 2003. De pagina's 1 en 4 vormen de buitenkant van de flyer en bevatten algemene informatie over het regelaarontwerp, terwijl de binnenste pagina's 2 en 3 meer gedetailleerde informatie geven.

Wind Turbine Control

industrial support

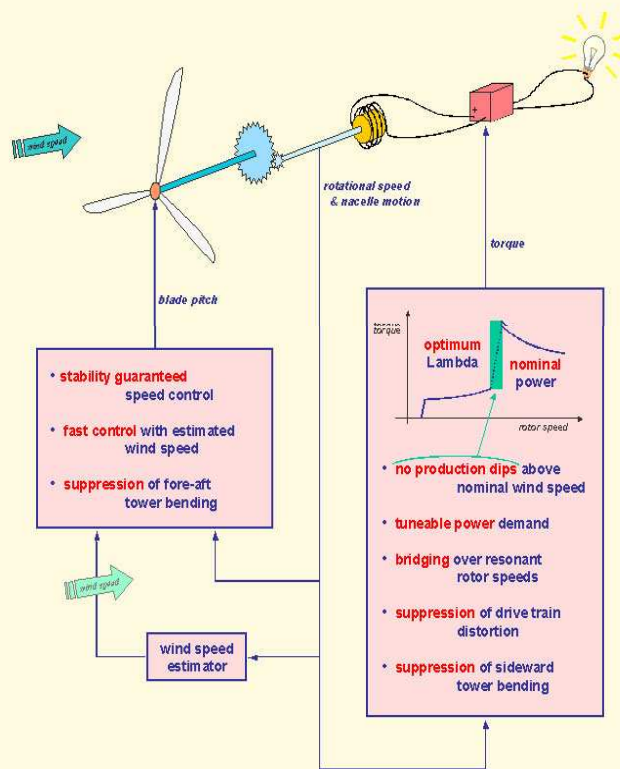


Figure 1: controlled wind turbine

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.

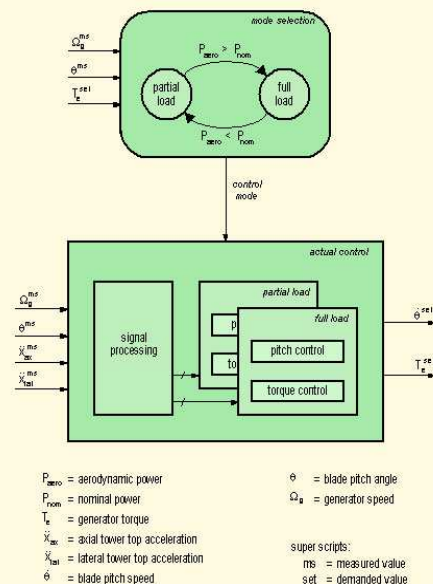


Figure 2: top level control structure

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 smoothening 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.

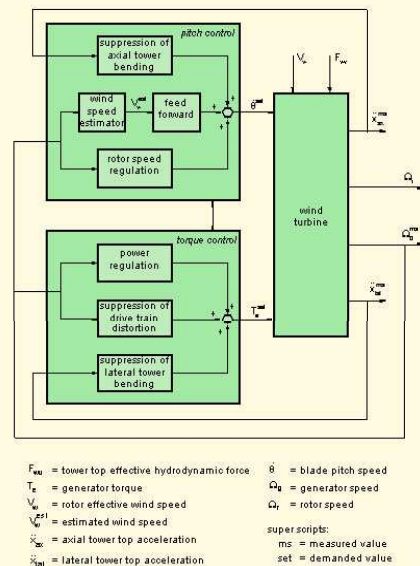


Figure 3: full load control structure

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].

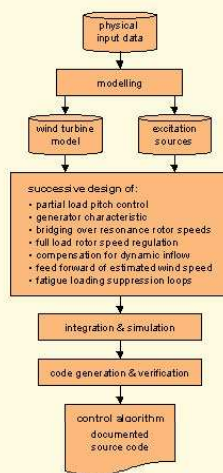


Figure 4: control design process

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.

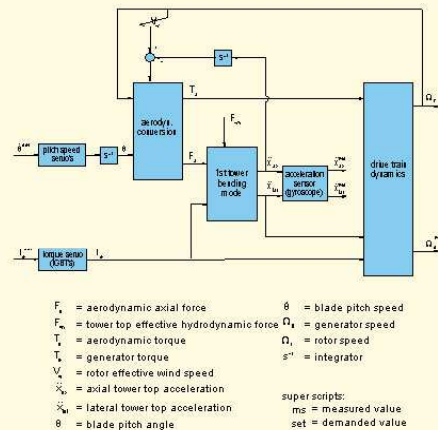


Figure 5: wind turbine model

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.

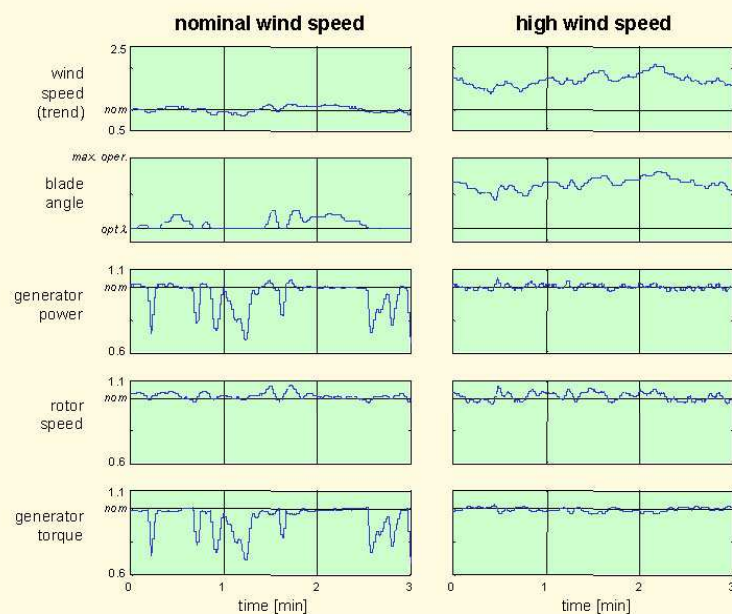


Figure 6: simulation results

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., Cortes, 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
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

T.G. van Engelen (Tim)
vanengelen@ecn.nl

E.L. van der Hooft (Eric)
vanderhooft@ecn.nl

E.J. Wiggelinkhuizen (Edwin)
wiggelinkhuizen@ecn.nl

	Date: March 2004	Report No.: ECN-C--04-059	
Title	Knowledge Transfer of Wind Turbine Control Systems		
Author	E.J. Wiggelinkhuizen, T.G. van Engelen, E.L. van der Hooft, P. Schaak		
Principal(s)	Novem BV		
ECN project number	7.4327		
Principal's order number	2020-02-14-20-002		
Programmes	BSE-DEN		
Abstract Recently the interest in wind turbine controls has increased. Yet the expertise that is present in The Netherlands is rarely applied by the industry. Therefore knowledge transfer is considered to be important for achieving more frequent application of advanced control systems in The Netherlands. This will help that developments will take place in connection with the industry. The project objective is to transfer knowledge of state-of-the-art control systems to parties that are involved in design and production of wind turbines. The approach is to give short presentations for specialists and to issue a brochure. At the EWEC 2003 conference, Husumwind 2003 and the Hannover Messe 2004 four interactive demonstrations took place. This resulted in new contacts with two Spanish, one German and two Scandinavian producers. Existing contacts with two Dutch, one German and one Scandinavian producer have been refreshed. One wind turbine producer seriously considers to apply the ECN control tool and to start R&D co-operation. As a result of this a design demonstration took place during a visit and a training in-house will be given in June 2004. The approach of a short demonstration followed by a more detailed introduction for specialists on the design process and tools proved to work well. Also the brochure arose interest and made a good complement to the demonstrations. The best strategy for knowledge transfer seems to be to hand over an 'open-source' design tool to the industry and to give support by means of training. Several industry parties have shown serious interest in this approach. This gives ECN the opportunity for application of the control tool and co-operative R&D.			
Keywords wind energy, control systems, controller design, simulation			
Authorization	Name	Signature	Date
Checked	P. Schaak		
Approved	H.B. Hendriks		
Authorised	H.J.M. Beurskens		