



Aeroelastic Stability and Control of Large Wind Turbines

Algemeen eindrapport SenterNovem

T.G. van Engelen (editor)

ECN-E--07-065

Verantwoording

Dit project werd mede mogelijk gemaakt door ondersteuning vanuit het programma DEN, dat wordt uitgevoerd door SenterNovem, onder referentienummer 2020-02-11-10-007, BSE-2002 Duurzame Energie.

ECN referentie: 7.4177.

Abstract

In het STABCON project zijn onderwerpen aangepakt die bij de windturbine industrie als uitdagingen bekend zijn, namelijk aeroelastische stabiliteitsverschijnselen van grote windturbines. Het project is uitgevoerd door een Europees consortium binnen het vijfde kaderprogramma van het EG onderzoeksprogramma op het gebied van duurzame energie (contract nr. NNE5-CT-2002-00627). Het projectconsortium bestond uit zeven onderzoeksinstellingen en een windturbinefabrikant.

Binnen het project zijn industrieel bruikbare tools ontwikkeld voor lineaire en niet-lineaire aeroelastische analyses in open en gesloten keten terwijl tegelijkertijd een Europees Onderzoek Netwerk op dit gebied werd gevormd. Afgeleide richtlijnen beschrijven hoe:

- belangrijke parameters met betrekking tot aeroelastische stabiliteit te identificeren en aan te passen voor verhoogde aeroelastische demping om aldus instabiliteiten te onderdrukken en belastingen te verlagen;
- het potentieel van aeroelastische regelconcepten te identificeren met betrekking tot belastingverlaging, vlaagonderdrukking en verhoging van de energieopbrengst;
- geïntegreerde ontwerpstudies uit te voeren voor active-stall en pitch-geregelde turbines ten einde de levensduurconsumptie gericht te kunnen beïnvloeden en het bedrijf aan te kunnen passen aan specifieke omstandigheden.

Dit algemeen rapport bevat slechts een samenvatting van de technische rapportage en licht de commerciële uitvoering en realisatie van de indirecte energieverdienste die uit het project volgt toe.

Inhoud

Inhoud	3
1. Inleiding	5
2. Projectgegevens	7
3. Inhoudelijk eindrapport	9
4. Commerciële uitvoering project	11
5. De realisatie van de indirecte energieverdienste	13
Referenties	15

1. Inleiding

Dit algemeen rapport bevat slechts een samenvatting op managementniveau van de volledige technische rapportage die uit 15 Engelstalige rapporten bestaat. Het openbare gedeelte hiervan staat op een bij ECN vrij verkrijgbare CD of kan gedownload worden vanaf diverse websites.

De volgende rapporten zijn openbaar:

- Summary of final report (www.risoe.dk)
- Final Technical report (www.risoe.dk)
- Stability Tools for Wind Turbines ([1], www.cres.gr);
- Method of modal damping estimations and exciter design - Theoretical analysis of NM80 ([2], www.risoe.dk);
- Refinements of the Stability Tools and Aeroelastic Codes ([3], www.tudelft.nl);
- Parameter Variations for Active-stall and Pitch Regulated Turbine ([4], www.risoe.dk);
- Morphological Study of Aeroelastic Control Concepts for Wind Turbines ([5], www.ecn.nl);
- Guidelines for passive instability suppression ([6], www.risoe.dk);
- Guidelines for integrated aeroelastic control of wind turbines ([7], www.risoe.dk).

Het vertrouwelijke gedeelte van de volledige rapportage is slechts onder de projectpartners en opdrachtgevers verspreid en staat op een tweede CD . Hiertoe behoren:

- Final management report;
- Measurement of Modal Damping for the NM80/2750 Prototype in Tjæreborg [8]
- Theoretical Analysis and Comparison to Experiments [9]
- Implementation and Evaluation of Aeroelastic Control Concepts [10];
- Comparison and evaluation of aeroelastic control systems [11];
- Integrated design of flexible control systems [12].

Naast de projectgegevens in hoofdstuk 2 bevat dit algemeen rapport in hoofdstuk 3 de technische samenvatting. De commerciële uitvoering en de realisatie van de indirecte energieverdienste komen in de hoofdstukken 4 en 5 aan de orde.

2. Projectgegevens

Tabel 1: Projectgegevens

Projecttitel:	Aeroelastic Stability and Control of Large Wind Turbines
Projectnummer SenterNovem:	2020-02-11-10-007
Uitgevoerd door:	Energie onderzoek Centrum Nederland (penvoerder) Unit Windenergie Postbus 1 NL-1755 ZG Petten Technische Universiteit Delft (medeaanvrager) Wind Energy Research Group Aerospace Engineering Postbus 5058 2600 GB Delft
Projectperiode:	01/11/2002 - 31/10/2006
ECN nummer:	7.4177

3. Inhoudelijk eindrapport

Zoals al in de inleiding staat vermeld bevat dit hoofdstuk slechts een samenvatting van de volledige technische rapportage.

In het STABCON project zijn onderwerpen aangepakt die bij de windturbine industrie als uitdagingen bekend zijn, namelijk aeroelastische stabiliteitsverschijnselen van grote windturbines. Het project is uitgevoerd door een Europees consortium binnen het vijfde kaderprogramma van het EG onderzoeksprogramma op het gebied van duurzame energie (contract nr NNE5-CT-2002-00627). Het projectconsortium bestond uit de volgende partners:

- Risø National Laboratory (RISO), Coordinator
- Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN)
- Centre for Renewable Energy Sources (CRES)
- National Technical University of Athens (NTUA)
- Danmarks Tekniske Universitet (DTU)
- Universitaet Stuttgart (USTUTT)
- Delft University of Technology (DELFT)
- VESTAS Wind Systems A/S (VESTAS)

De hoofddoelstelling van het STABCON project betrof de ontwikkeling van betrouwbare ontwerptools voor analyse en optimalisatie van grote windturbines met betrekking tot aeroelastische stabiliteit en actieve regeling binnen een te vormen Europese Onderzoek Netwerk. De behandelde onderwerpen zijn fundamenteel in het ontwerp van MultiMegaWatt windturbines.

De voorspelling van de fundamentele stabiliteitskarakteristieken van windturbines in de ontwerpfase leidt tot geoptimaliseerde, voorspelbare en betrouwbare ontwerpen waardoor het proces van continu opschalen mogelijk wordt gemaakt. Binnen het project werden ook de mogelijkheden voor actieve aeroelastische regelingen beschouwd om de belastingen te verminderen en de energieopbrengst te verhogen bij lage windsnelheden. De belastingreductie werd verkregen door de (i) aeroelastische demping te verhogen via kleine compenserende belastingen in tegengestelde fase, (ii) windvlagen in combinatie met turbulentie tegen te gaan door de bladen zowel collectief als cyclisch te verstellen.

Naast de *passieve* middelen voor de verbetering van de operationele karakteristieken bieden deze *actieve* beïnvloedingsvormen de mogelijkheid om het basisontwerp van windturbines te veranderen, waardoor een groot potentieel voor verdere kostenreductie wordt aangeboord. Een windturbine kan dan gezien worden als een intelligente energieleverancier die zich kan aanpassen aan de geldende condities en haar omgeving, waaronder het windgedrag, de marktprijs voor elektriciteit en de (resterende) levensduur. Bij lage marktprijzen kan bijvoorbeeld het vermogen afgebouwd worden in combinatie met heel lage belastingen om de levensduur te verlengen.

Het STABCON project heeft geleid tot een degelijk Europees Onderzoek Netwerk op het gebied van aero-servo-elasticiteit. Hierdoor is verdere toepassing van de projectresultaten gegarandeerd door industrieel gebruik van de ontwikkelde tools en methoden en door toepassing van de ontwikkelde richtlijnen voor zowel passieve stabiliteitsverbetering als voor actief aeroelastisch regelen. Met de ontwikkelde tools kunnen zowel lineaire (analyses) als niet-lineaire (simulaties) berekeningen worden uitgevoerd, en wel zonder of met aeroelastische regelkringen.

Deel 1 van het project, waarin de nadruk ligt op passieve stabiliteitsverbetering, heeft geresulteerd in een compleet tabloid van de relevante (potentiële) instabiliteiten voor windturbines zonder actieve regeling. In verschillende eerdere projecten zijn deze instabiliteiten apart bestudeerd, maar pas in het STABCON project is een totaalbeeld verkregen van de oorzaken voor deze instabiliteiten en daaraan verwante parameters. De gelijktijdige en gecoördineerde ontwikkeling van de tools bij verschillende onderzoeksinstellingen heeft dit mogelijk gemaakt.

Een ander belangrijk resultaat in het STABCON project betrof de ontwikkeling van experimentele methoden voor het schatten van parameters die aan stabiliteit gerelateerd zijn. Hierbij werd voor de eerste keer de techniek 'Operational Mode Analysis' toegepast voor het schatten van de aeroelastische frequenties en bijbehorende demping.

In Deel 2 van het project werd een compacte morfologische studie uitgevoerd naar mogelijke actieve aeroelastische regelmethode. Het resulterende tabloid van regeldoelstellingen, sensors, actuatoren en regelmethode geeft een state-of-the-art overzicht van moderne regelaarontwerpen voor windturbines. Op grond hiervan werden regelkringen geselecteerd en ondergebracht in de aeroelastische tools waarna parameterstudies werden uitgevoerd. De algemene geldigheid van de conclusies die hieruit getrokken zijn berust op het gebruikte grote aantal verschillende tools door verschillende partners.

Voor zowel Deel 1 als Deel 2 zijn algemene ontwerprichtlijnen afgeleid van de resultaten en conclusies. Deze richtlijnen kunnen direct worden toegepast in de windturbine industrie.

De ontwerprichtlijnen beschrijven onder andere hoe:

- belangrijke parameters met betrekking tot aeroelastische stabiliteit te identificeren en aan te passen voor verhoogde aeroelastische demping om aldus instabiliteiten te onderdrukken en belastingen te verlagen;
- het potentieel van aeroelastische regelconcepten te identificeren met betrekking tot belastingverlaging, vlagonderdrukking en verhoging van de energieopbrengst;
- geïntegreerde ontwerpstudies uit te voeren voor active-stall en pitch-geregelde turbines ten einde de levensduurconsumptie gericht te kunnen beïnvloeden en het bedrijf aan te kunnen passen aan specifieke omstandigheden.

De volledige beschrijvingen van deze richtlijnen zijn uitgebracht in twee openbare rapporten:

- guidelines for passive suppression of wind turbine instabilities (Task 11 report, [6]);
- guidelines for integrated aero-elastic control of wind turbines (Task 12 report [7]).

4. Commerciële uitvoering project

Tot de commerciële uitvoering van het project wordt gerekend:

- implementatie van de opgestelde ontwerprichtlijnen voor passieve onderdrukking van instabiliteiten en geïntegreerd aeroelastisch regelen in het ontwerpproces van windturbines;
- beschikbaar stellen van de ontwikkelde tools en gebruik voor aeroelastische stabiliteitsanalyse inclusief regeling ('aero-servo-elastisch') door, of ten dienste van, windturbinefabrikanten;
- educatie van windturbinefabrikanten of consultants met betrekking tot het gebruik van tools voor aero-servo-elastische stabiliteit.

Tijdens de uitvoering van het project bleek onder meer het gedrag van individuele bladregeling (een moderne methode voor reductie van bladbelastingen door vrijwel cyclische verstelling van de rotorbladen) te noodzaken tot de gepropageerde, en geïmplementeerde, aero-servo-elastische aanpak in het STABCON project. Hierbij kwam ook de voorspellende waarde van de ontwikkelde lineaire stabiliteitstools kwantitatief tot uiting. Dit rechtvaardigt temeer de realisatie van het commerciële uitvoeringstraject.

De ontwerprichtlijnen zijn mede in samenwerking met de participerende windturbinefabrikant (VESTAS) opgesteld en worden al gebruikt. Verder draagt ECN in een project met een andere industriële partner, dat loopt tot eind 2007, de aero-servo-elastische stabiliteitstool TURBU over. Binnen dat project wordt TURBU gebruikt voor het regelaarontwerp en stabiliteitsanalyse voor een MultiMegaWatt wind turbine. Behalve dat er rapporten en conferentiebijdragen binnen het STABCON project zijn uitgebracht, waartoe [13] ook (deels) behoort, zijn er in de periode 2004 tot mei 2007 aan vier (weer andere) windturbinefabrikanten cursussen gegeven op het gebied van regeling en aeroelastische stabiliteit.

5. De realisatie van de indirecte energieverdienste

5.1 Innovativiteit

De gerealiseerde innovatieve aspecten van het STABCON project zijn op hoofdlijnen:

- tegelijkertijd realiseren van regeldoelstellingen voor opbrengstoptimalisatie, toerentalbegrenzing en belastingreductie;
- beschikbaarheid van tools voor aero-servo-elastische stabiliteitsanalyse.

Deze innovaties maken het mogelijk om grote windturbines uit te rusten met regelingen waarmee de belastingen op de rotor, aandrijftrein en toren aanzienlijk gereduceerd kunnen worden. Hierdoor kan lichter, en dus beter kosteneffectief ontworpen worden, waardoor de concurrentiepositie van windenergieconversie wordt verbeterd en de toepassing ervan toeneemt. De betreffende regelingen zijn door analyses met tools vooraf goed dimensioneerbaar en brengen dus geen groot risico met zich mee tijdens de inbedrijfstelling.

5.2. Knelpunten

Het centrale knelpunt waarom het STABCON project is uitgevoerd betreft de betrouwbaarheid van ontwerpprogrammatuur in het kader van het behoud van de aeroelastische stabiliteit bij opschaling. Dit knelpunt is weggenomen, en wel als gevolg van:

- de ontwikkeling van tools voor aero-servo-elastische stabiliteitsanalyse;
- verificatie van deze tools door vergelijking van berekeningen met metingen aan de MultiMegaWatt turbine van de participerende windturbinefabrikant.

De toepassing van windenergieconversie wordt hierdoor zeker bevorderd omdat het aero-servo-elastische gedrag van grote, nieuwe turbines betrouwbaar kan worden voorspeld. Er kan dan ook worden gesteld dat het doorgaan van de realisatie van 7500MW windenergie in Nederland in 2020 niet belemmerd zal worden door te onbetrouwbare ontwerpprogrammatuur.

5.3 Kostprijs Duurzame Energie

Voorafgaand aan het project is de verwachte hoeveelheid vermeden primaire energie en emissies bepaald volgens een geharmoniseerde methodiek die is ontwikkeld bij ECN [14]. De methode is in overeenstemming met het 'Protocol Monitoring Duurzame Energie' (Novem, september 1999). De indirecte energieverdienste zou gerealiseerd worden vanaf 2010. In 2010 zou deze 7.2 PJ/jaar in Nederland bedragen, waarna toename wordt verwacht tot 15.1 PJ/jaar in 2015 en 21.5 PJ/jaar in 2020. Aldus zou in Nederland tot 2020 in totaal tussen de 100 en 150 PJ primaire energie worden vermeden.

De hierboven bepaalde indirecte energieverdienste was een gevolg van zo'n 8% lagere kosten voor kooponderdelen, 5% meer energieopbrengst en 30% kostenbesparing op onderhoud en bedrijf, waaronder ook verzekeringskosten vallen.

De projectresultaten geven nu al aan dat de 8% lagere kosten voor kooponderdelen grotendeels gerealiseerd kunnen worden. De aangenomen besparingen van 10 tot 15% op de rotor, naaf, hoofdas en tandwielkast komen goed overeen met vastgestelde afname van berekende vermoeiingsbelastingen. De geschatte afname van de torenbelastingen blijkt wat optimistisch: 5% lijkt reëler dan de aangenomen 15%. Aldus is het aannemelijk dat op grond van de projectresultaten ongeveer 80% van de voorafgeschatte kostenverlaging voor de kooponderdelen wordt gerealiseerd.

De aangenomen 30% besparing op kosten voor onderhoud en bedrijf lijkt erg hoog. Door de betere voorspelbaarheid van de belastingen zal echter het niet-geplande onderhoud zeker sterk

afnemen. Dit geeft vooral offshore een belangrijke besparing. Ook zullen verzekeringskosten aanzienlijk lager uitvallen. Door het ontbreken van foutdetectietechnieken in de ontworpen regeling zal een deel van de voorziene kostenbesparing op onderhoud en bedrijf niet worden gerealiseerd. Het is aannemelijk dat ongeveer 60% van de aangenomen kostenverlaging gerealiseerd wordt op grond van de projectresultaten.

Er kan geconcludeerd worden dat als gevolg van het STABON project door besparingen op kooponderdelen en onderhoud en bedrijf tussen 2010 en 2020 cumulatief tussen de 70 en 100 PJ aan primaire energie wordt vermeden (70% van verwachting).

Referenties

- [1] Stability Tools for Wind Turbines, edited by E.S. Politis (CRES), contributed by M.H. Hansen (Risoe), D. Winkelaar & T.G. van Engelen (ECN), E.S. Politis & P.K., Chaviaropoulos (CRES), V. Riziotis & s. Voutsinas (NTUA-FS), K. Braun & S. Streiner (Univ. of Stuttgart), J.G. Holierhoek (TUD), STABCON NNE5-CT-2002-00627, Centre for Renewable Energy Sources (CRES), Pikermi, Greece, January 2005.
- [2] Method of modal damping estimations and exciter design - Theoretical analysis of NM80, Kenneth Thomsen, Peter Fuglsang, Morten H. Hansen, STABCON NNE5-CT-2002-00627, Risø-I-2020(EN), Risø National Laboratory, Roskilde, November 2003
- [3] Refinements of the Stability Tools and Aeroelastic Codes, STABCON Task-5 Report, EU-Contract, ENK5-CT-2002-00627, edited by J.G. Holierhoek, B.A.H.Marrant, P. Lisandrin, Th.J. Mulder, (TUD), Delft University of Technology, Delft, October 2005.
- [4] Parameter Variations for Active-stall and Pitch Regulated Turbine, edited by Thomas Buhl (Risoe), contributed by E.S. Politis (CRES), J.G. Holierhoek (Delft), D. Winkelaar and T.G. van Engelen (ECN), V Riziotis & S Voutsinas (NTUA), T. Buhl, H. Markou, K. Thomson and M.H. Hansen (Risoe), S.Streiner (Univ. Stuttgart), Risø-R-2413, Risø National Laboratory Roskilde, Denmark, December 2005
- [5] Morphological Study of Aeroelastic Control Concepts for Wind Turbines, STABCON Task-7 Report, EU-Contract ENK5-CT-2002-00627, edited by T.G. van Engelen (ECN), contributed by H. Markou, T. Buhl (RISØ), B. Marrant (TUD), T.G. van Engelen (ECN), ECN-E-06-056, Energy Research Centre of the Netherlands, Petten, the Netherlands, December 2006
- [6] Design guidelines for passive instability suppression, – Task-11 Report, EU-Contract, ENK5-CT-2002-00627, edited by M. H. Hansen and T. Buhl (RISØ), contributed by T.G. van Engelen (ECN), V. Riziotis (NTUA), E. Politis (CRES), S. Streiner (USTUTT) and H. Markou (RISØ), Risø-R-1575, Risø National Laboratory Roskilde, Denmark, December 2006
- [7] Design guidelines for integrated aeroelastic control of wind turbines, Task-12 Report, EU-Contract ENK5-CT-2002-00627, edited by T.Buhl, K.Thomsen & H.Markou (Risoe), contributed by: T.S Mogensen, A.J Larsen and N.K. Poulsen (DTU), E.S. Polits (CRES), V.Rizotis (NTUA), T.G van Engelen (ECN), Risoe-R-1577, Risø National Laboratory Roskilde, Denmark, December 2006
- [8] Measurement of Modal Damping for the NM80/2750 Prototype in Tjæreborg, Morten H. Hansen, Torben Knudsen, Kenneth Thomsen, Peter Fuglsang, Report on Work Package 2 “Experimental analysis of a wind turbine in operation” of “Aeroelastic Stability and Control of Large Wind Turbines” (STABCON, NNE5-CT-2002-00627) Risø-I-2258(EN), Risø National Laboratory Roskilde, Denmark, October 2004
- [9] Theoretical Analysis and Comparison to Experiments, STABCON Task-4 Report, EU-Contract ENK5-CT-2002-00627, edited by J.G. Holierhoek, B.A.H.Marrant, P. Lisandrin, Th.J. Mulder (TUD), contributed by S. Streiner (University of Stuttgart), T.G. van Engelen (ECN), M.H. Hansen, F. Bertagnolio, J. Johansen (Risø), E.S. Politis (CRES), R. Mikkelsen, W. Shen (TUDK), V Riziotis & S Voutsinas (NTUA), J.G. Holierhoek, B.A.H. Marrant, P.Lisandrin, Th.J. Mulder (TUD), Delft University of Technology, Delft, October 2005.
- [10] Implementation and Evaluation of Aeroelastic Control Concepts, STABCON Task-8 Report, EU-Contract ENK5-CT-2002-00627, edited by T.G. van Engelen (ECN), contributed by

K. Thomsen, H. Markou & T. Buhl (RISØ), N. Poulsen, T. Mogensen & A.J. Larsen (DTU), V. Riziotis & S. Voutsinas (NTUA), E. Politis (CRES), J. Holierhoek & P. Lisandrin (TUD), T.G. van Engelen (ECN), ECN-X-06-134, Energy Research Centre of the Netherlands, Petten, the Netherlands, December 2006

[11] Comparison and evaluation of aeroelastic control systems, STABCON Task-9 Report, EU-Contract ENK5-CT-2002-00627, edited by N.K. Poulsen, contributions by T.S. Mogensen, A.J. Larsen and N.K. Poulsen (DTU), K. Thomsen, T. Buhl and H. Markou (Risø), E.S. Politis (CRES), V. Riziotis and S. Voutsinas (NTUA), D. Winkelaar and T.G. van Engelen (ECN), TUDK, Copenhagen, Denmark, December 2006.

[12] Integrated design of flexible control systems, STABCON Task-10 Report, EU-Contract ENK5-CT-2002-00627, edited by N.K. Poulsen, contributions by T.S. Mogensen, A.J. Larsen and N.K. Poulsen (DTU), K. Thomsen, T. Buhl and H. Markou (Risø), E.S. Politis (CRES), V. Riziotis and S. Voutsinas (NTUA), D. Winkelaar and T.G. van Engelen (ECN), TUDK, Copenhagen, Denmark, December 2006.

[13] Control Design Based on Aero-hydro-servo-elastic models from TURBU, T.G. van Engelen, In Proceedings of European Wind Energy Conference 2007, Milan.

[14] *Reductie van Primaire energie verbruik door windenergie-implementatie*. L. Rademakers., ECN-Wind Memo-02-015, 2002