

Nieuw fysisch inzicht leidt tot 6% meeropbrengst windenergie



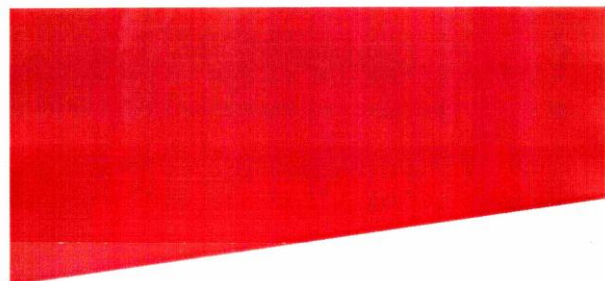
Gustave Corten is afgestudeerd in de kernreactorkunde en gepromoveerd op windturbineaerodynamica. Hij werkte 10 jaar bij ECN en heeft sinds 2006 een eigen bedrijf CortEnergy.

Onderhandelingen over nieuw bladontwerp

In 2007 vloog ik naar een van de grootste fabrikanten uit Amerika om om een uitvinding te presenteren. Het gesprek duurde maar kort: de CEO vond de aerodynamica te diep gaan en vroeg zijn aerodynamici om mijn uitvinding te beoordelen: Die zeiden: '6% meeropbrengst, als dat waar was zou iedereen het wel doen'. De CEO kon niet anders dan zijn medewerkers steunen en ik stond weer buiten. Mijn volgende halte was een andere grote fabrikant uit Amerika. Daar kwam ik nog minder ver. Ze zeiden: 'daar is de ideëenbus'. Bij LM Windpower ging het beter. Ik sprak met het toenmalige hoofd innovatie Peter Grabau. Van hem had ik interessante publicaties en patenten gelezen. Hij reageerde totaal anders. Hij betaalde mijn ticket naar Denemarken en hoorde mijn verhaal aan. Hij besloot het te laten narekenen door een onafhankelijke partij. Dit was bijzonder. Hij voorkwam daarmee een 'not invented here'-beoordeling van de eigen R&D-afdeling. De opdracht ging naar de wind-experts van Dong Energy. Na drie weken kwam Dong terug met de conclusie dat mijn beweringen klopten: zie afbeelding 1.

Er volgden efficiënte onderhandelingen. Helaas ketsten die op het laatste moment af doordat LMs hoofd R&D van toentertijd een bladontwikkeling verwachtte tegenovergesteld aan die volgens mijn uitvinding. Bij windturbinefabrikant Darwind (nu XEMC) was ik zelf CTO en probeerde ik de uitvinding te implementeren. Men vond het echter belangen-verstrengeling en daardoor verliepen de onderhandelingen traag. Ze hadden gelijk met die belangenverstrengeling, maar ze hadden de uitvinding beter wél kunnen omarmen. Ook met multinational Suzlon was ik in gesprek. Eén reden dat Suzlon geloofde in mijn uitvinding is dat ik een echte inhoudelijke beoordeling had gekregen van een vooraanstaand aerodynamicus: prof. Van der

DONG
energy



Analysis of CortEnergy Concept

Conclusion

The ideas expressed in the CortEnergy patent will lead to generally reduced fatigue loads, and will lead to even greater reductions in extreme loads on turbines.

Author: Ari Bronstein
Doc.no: 268058
Project no: T015853.01

Afbeelding 1: LM Windpower vraagt Dong Energy om uitvinding te onderzoeken.

Tooren van de TUDelft, zie afbeelding 2. Hij was een van de weinigen die echt naar de uitvinding wilde kijken en enkele weken zijn akkoord gaf en erbij zette dat het voor zover hij wist nieuw was. Hij ondertekende zelfs het wetenschappelijk bewijs van mijn beweringen. Suzlon had grote interesse maar wilde ondanks het theoretische bewijs eerst een empirisch 'bewijs': men wilde in de praktijk zien dat mijn slanke-bladen ontwerp beter zou zijn dan het beste Suzlon ontwerp. Voorwaarde was dat ik mij uitsluitend daarop zou toelagen en alle andere taken zou afstoten. Die kans die Suzlon bood wilde ik niet laten lopen: ik beëindigde direct mijn functie bij Darwind en begon aan een meetopstelling.

Praktijkexperiment met nieuw blad

Dit was een uiterst spannende fase. Mijn opdracht was om binnen één jaar twee windturbines bouwen van ongeveer 5m rotor diameter: één met het recentste Suzlon-ontwerp en één met mijn slanke-bladen ontwerp. Beide windturbines dienden variabel toerental te hebben en bladhoekverstelling. Een vergelijking van die twee windturbines zou dan het voordeel van het slanke-bladen ontwerp hopelijk bevestigen. Maar hoe zouden we kunnen vergelijken als de twee turbines ergens in het veld zouden staan? Misschien staat de ene wel in het zog van de andere of staat er voor één turbine een obstakel en voor de andere niet. Om een effect van een procent of 6 glashard aan te tonen is het nodig dat de aanstroming vrij precies gelijk is. De oplossing die ik bedacht, was om de turbines beide naast elkaar op een schip te plaatsen, zodat de



Afbeelding 2: Prof. Van der Tooren ondertekent bewijs.



Afbeelding 3: Links het slanke nieuwe ontwerp en rechts het beste ontwerp van Suzlon van 2006.

aanstroming gelijk was. Een groot voordeel is dat je dan met de dieselmotoren, de snelheid van het schip en dus de windsnelheid kan regelen. Makkelijker gezegd dan gedaan. Halsoverkop kocht ik de catamaran op de foto, bestelde ik frequentie-omvormers, elektromotoren, versnellingsbakken en ga zo maar door. De bladen waren het grootste probleem. Ze dienden heel licht te zijn en toch sterk en heel precies van vorm. Ik heb uiteindelijk zelf een CNC-machine gekocht die de bladen uitfreeste uit een blok kunsthout. In het blok zat een tapse carbon buis. En zo ontstond in 9 maanden de opstelling op afbeelding 3. Het was eigenlijk prachtig: ik had mijn eigen 'windtunnel' waar twee windturbines van 5m diameter naast elkaar inpasten. Het afdelingshoofd aerodynamica van Suzlon voer enkele dagen mee om de metingen te controleren. Na afloop was onze gezamenlijke conclusie dat de rotor met slanke bladen inderdaad veel meer energie leverde.

Rotorontwerp

Suzlon was overtuigd. Er werd een licentiecontract getekend en ik leverde Suzlon begin 2009 het eerste ontwerp voor een volle schaal windturbine van 2 MW. Suzlons eigen ingenieurs hebben het ontwerp nog op allerlei punten aangepast zodat het echt geschikt was voor hun productielijnen en hun turbines. Maar de essentie van het slanke-bladen ontwerp, de kortere koorde en de grotere wieklenge bleef ongewijzigd. Alle Suzlon bladen van na die datum zijn volgens de principes van de 'slanke bladen' ontwerpmethodode. Afbeelding 4 toont een projectteam uit India waarmee ik veldexperimenten uitvoerde.



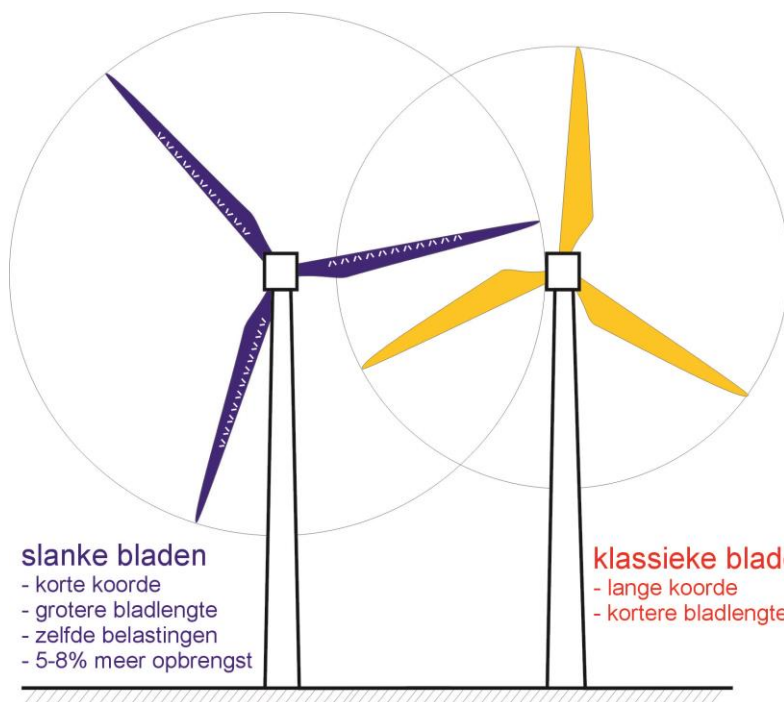
*Afbeelding 4:
In India kreeg
ik dit team
toegewezen
om
experimenten
uit te voeren
op een van de
eerste rotoren
met slanke
bladen.*

Krachten kosten geld

Om energie aan de wind te onttrekken is er een remmende kracht op de wind nodig. Het blijkt echter dat een windturbine en de bladen daarvan veel sterker en duurder geconstrueerd zijn dan om alleen maar deze vereiste remmende kracht op te wekken. Dat komt door extreme belastingen en vermoeiingsbelastingen, die weer voor een groot deel veroorzaakt worden door windvlagen. Als we die reactie op windvlagen kleiner zouden kunnen maken dan daalt de prijs van de windturbine zonder dat de opbrengst afneemt. En juist dat wordt bereikt met de slanke bladen.

De uitvinding

Ongeveer tien jaar geleden werkte ik bij Energie Centrum Nederland (ECN). In die tijd was de overtuiging van aerodynamici dat we dicht bij het optimum zaten; we



*Afbeelding 5:
een windturbine
met slanke
bladen kan
meer wind
vangen zonder
te overbelasten.*

slanke bladen
- korte koorde
- grotere bladlengte
- zelfde belastingen
- 5-8% meer opbrengst

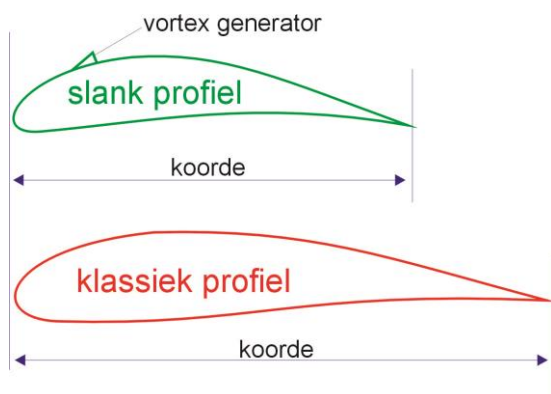
klassieke bladen
- lange koorde
- kortere bladlengte

dachten dat er misschien nog één procent meeropbrengst mogelijk zou zijn in de toekomst. Maar tot mijn grote verbazing, stelde ik in 2006 vast, dat we iets heel belangrijks over het hoofd hadden gezien. We dachten dat het niet uitmaakte of je nu een kort of een lang profiel uitkoos, zolang een profiel maar voldoende lift opwekt bij een lage weerstand was het goed. Dat bleek niet te kloppen: door de slanke bladen uitvinding was de oude logica verleden tijd.

De uitvinding is het ontwerpen van windturbinebladen met een ontwerpliftcoëfficiënt die bijvoorbeeld een factor $f = 1.3$ hoger is dan gebruikelijk en tegelijkertijd met een bladkooorde die korter is met diezelfde factor f . Het resultaat is een blad dat dezelfde lift opwekt en dezelfde opbrengst met het voordeel dat de vlaagbelastingen ruim 30% minder zijn. Dit wordt bereikt door het blad alleen maar een slimmere vorm te geven. De hele wijze van het produceren van de bladen blijft gelijk; we hebben het dus over een innovatie met laag risico. Een schets van een windturbine met slanke bladen en een met klassieke bladen staat in afbeelding 5.

Het fysische principe

We vergelijken de reactie op een vlaag van een klassiek blad en een slank blad. De getallen zijn in tabel 1 opgenomen en zijn zo gekozen dat het rekenen makkelijk is. Het essentiële kenmerk van de uitvinding staat in de bovenste twee rijen: het slanke blad heeft een dubbele ontwerpliftcoëfficiënt en een gehalveerde koorde te opzichte



*Afbeelding 6:
profieldoorsneden.*

van het klassieke blad. Een schets van profieldoorsnedes staat in afbeelding 6. De lift is recht evenredig met zowel de koorde als de ontwerpliftcoëfficiënt en is dus voor beide bladen gelijk. En als de lift hetzelfde is dan is ook de energieproductie ongeveer hetzelfde. De liftcoëfficiënt neemt voor elk profiel op dezelfde wijze lineair toe met de invalshoek, althans in het operationele bereik. Als we aannemen dat beide profielen bij een invalshoek van 0 graden ook 0 lift hebben, dan heeft het klassieke profiel een ontwerpinvalshoek van bijv. 5 graden en het slanke profiel een dubbele ontwerpinvalshoek van 10 graden om de dubbele liftcoëfficiënt te behalen.

En nu komt de clou: Stel er komt een windvlaag waardoor de invalshoek bij elk van de profielen toeneemt met 5 graden, dan verdubbelt de invalshoek van het klassieke profiel en daarom verdubbelt ook de lift ofwel er is een lifttoename van 100%. Bij het slanke profiel neemt de invalshoek toe van 10 tot 15 graden. Deze toename is van 50% resulteert ook in een lifttoename van 50%, maar de helft van die van het klassieke blad. Hoera!!!! Het slanke blad heeft een 50% geringere respons op windvlagen. En dat lukt op zo'n eenvoudige wijze.

	eenheid	klassiek profiel	slank profiel
ontwerp lift coëfficiënt	-	0.5	1.0
koorde	m	2	1
dynamische druk $\frac{1}{2}\rho V^2$	N/m ²	100	100
lift	N	100	100
invalshoek met lift 0	°	0	0
ontwerpinvalshoek	°	5	10
toename invalshoek door een vlaag	deg	5	5
invalshoek tijdens vlaag	deg	10	15
lift tijdens vlaag	N	200	150
lift toename tijdens vlaag	N	100	50

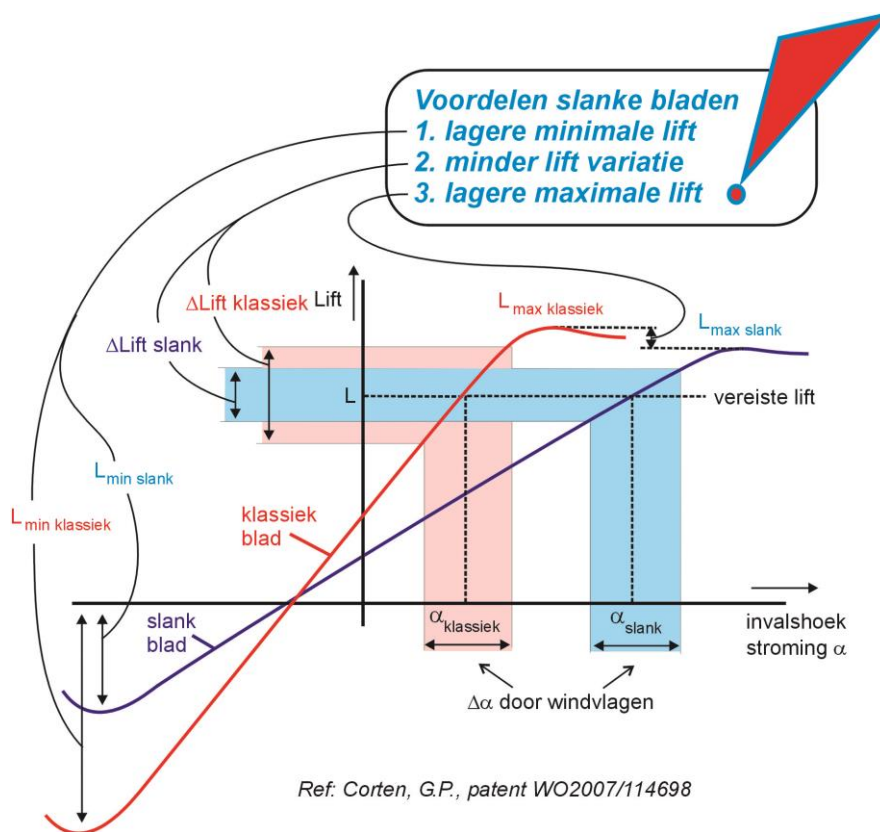
Tabel 1: de respons van een slanke profiel op een vlaag is slechts de helft.

De eerste publicatie van de fysica achter de slanke bladen uitvinding is in detail beschreven in mijn patentaanvraag die op 2 april 2006 is ingediend. Afbeelding 7 toont de fysica in een grafiek. De rode curve is voor een klassiek profiel en de blauwe voor een slank profiel. Beide curves tonen de lift als functie van de invalshoek α . Het belangrijkste voordeel, nummer 2 in afbeelding 7, is het volgende: de helling van de blauwe curve is minder dan die van de rode. Daardoor zal een variatie in de invalshoek $\Delta\alpha$ leiden tot een kleinere liftvariatie ΔL_{slank} dan de liftvariatie van het klassieke profiel $\Delta L_{klassiek}$. Deze liftvariaties zijn een maat voor de vermoeiing ten gevolge van windvlagen of in vaktermen turbulentie. Slanke bladen uit de praktijk hebben een wel 30% tot 50% hogere ontwerpliftcoëfficiënt en daardoor is een 30%-50% lagere vermoeiing door turbulentie reëel.

Extra aerodynamische voordelen

Maar slanke bladen hebben nog twee aerodynamische voordelen: Heel soms komt het namelijk voor dat de invalshoeken plotseling omkeren van positief naar negatief. Dat kan door snelle bladhoekverstelling door de turbine in het geval van een noodstop, of bij extreme windvlagen. Dan werkt er eerst een grote positieve liftkracht op de bladen, en even later een grote negatieve liftkracht. Deze zeldzame situatie maakt het vaak nodig dat de windturbineconstructie aanzienlijk zwaarder

dient te zijn. Als we nu zorgvuldig de rode en blauwe curves vergelijken, dan blijkt dat de maximale negatieve lift bij de blauwe curve veel minder diep is (30%-70%) dan bij de rode curve. Weer gaat het hier niet om een klein effect: de maximaal negatieve lift bij klassieke bladen kan wel twee keer zo veel zijn als bij slanke bladen. De oorzaak van dit voordeel ligt behalve in de slankheid ook in de keuze voor gekromde profielen omdat die hogere liftcoëfficiënten hebben en als gevolg van de kromming lagere maximale negatieve liftcoëfficiënten hebben. En het derde voordeel is dat de maximale positieve lift bij slanke bladen zo'n 5% lager ligt dan bij klassieke bladen. Dat komt omdat men vanaf de ontwerpinvalshoek een vaste marge dient te houden waarin het profiel niet mag overtrekken, dat is bijvoorbeeld 4-7 graden. En doordat de lifttoename/graad groter is bij klassieke bladen leidt dit tot een hogere maximale lift. Het is bijna te mooi om waar te zijn: maar het lijkt wel of slanke bladen overwegend voordelen hebben.



Afbeelding 7: Het slanke bladen ontwerp heeft 3 voordelen: 1. $\pm 5\%$ lagere maximale lift, 2. 30-50% minder liftvariatie door invalshoekveranderingen en 3. 30-70% lagere maximale negatieve lift. Ref: Corten, G.P., patent WO2007/114698.

Met een auto over een hobbelige weg

Een analogie helpt misschien om te begrijpen waar het om gaat: beschouw de liftkracht op een windturbineblad eens als de verticale kracht die het wegdek op autobanden uitoefent. Als de auto rijdt over een hobbelige weg dan schudt alles door elkaar en allerlei onderdelen zullen op den duur bezwijken. Door nu de auto op lange veren te zetten, volgen de wielen de hobbels nog wel, maar zijn de krachten op de auto veel constanter. De hobbels in de weg zijn analoog aan de vlagen van

de wind. En een windturbineblad met een veel kortere koorde dan gebruikelijk is vergelijkbaar met de auto met de lange veren.

Praktijk

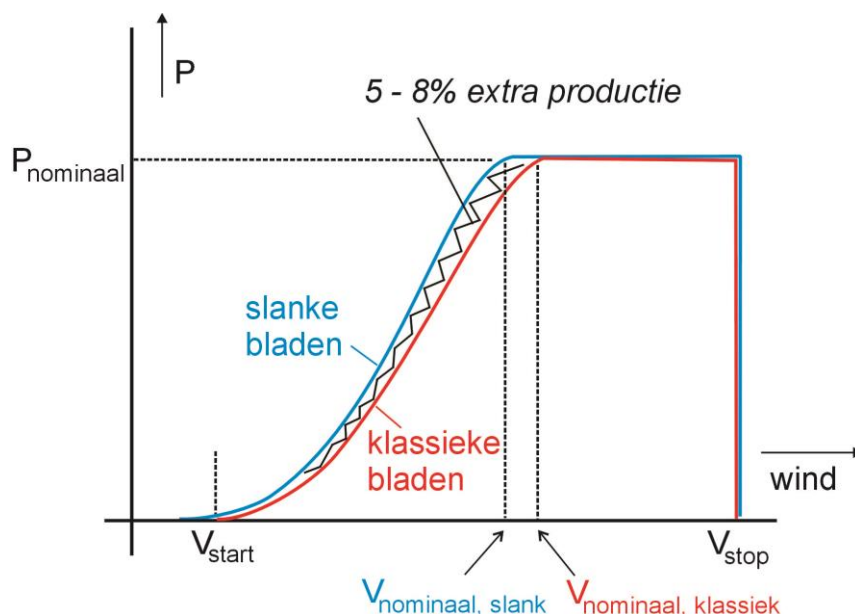
Het is in het bovenstaande voorbeeld helder gemaakt hoe slanke bladen belastingen reduceren. Maar hoe leidt dat dan tot meer opbrengst? Daaraan is niets nieuw: omdat slanke bladen de windturbine minder belasten mogen we de rotordiameter vergroten zonder overbelasting van de turbine te veroorzaken. De ontwerper vergroot dus de diameter totdat de windturbinebelasting weer gelijk is aan de maximaal toelaatbare. In de praktijk werkt het dus als volgt:

- Stap 1: Toename van de ontwerpliftcoëfficiënt (orde 30%-50%) én reductie van de bladkooord zodanig dat de lift ongeveer gelijk blijft en de belastingen fors dalen.
- Stap 2: Vergroting van de diameter totdat de rotor de windturbine weer belast tot het maximaal toelaatbare. Dit komt neer op diametertoenames van 5%-8%, zodat het bestreken oppervlakte toeneemt met 10%-16%.

Het resultaat is dat onder de nominale windsnelheid er een vermogenstoename is van 10%-16% (gelijk aan de toename van het betreken rotoroppervlakte). Boven de nominale windsnelheid blijft het vermogen onveranderd omdat het begrensd is op de maximum waarde.

Opbrengst

Slanke bladen behalen de extra opbrengst dus bij weinig wind: onder de nominale windsnelheid, zie afbeelding 8. Bij die lagere windsnelheden is de meeropbrengst 10-16%. Omdat ongeveer de helft van de opbrengst onder de nominale windsnelheid geogst wordt en de helft erboven is het effect op de jaaropbrengst ongeveer de helft: 5-8%. Overigens is energie bij weinig wind meer waard omdat het aanbod van windenergie bij veel wind vanzelfsprekend hoog is. Dat betekent dus dat de toegevoegde waarde zelfs meer is dan de directe meeropbrengst in procenten. Alweer een voordeel van de slanke-bladen techniek.



Afbeelding 8: De slanke bladen produceren onder de nominale windsnelheid 10%-16% meer energie, waardoor de jaaropbrengst ongeveer met 5-8% toeneemt.

Slanke bladen even duur

De profielen van slanke bladen kunnen in koorderichting en in dikterichting geschaalde versies zijn van die van klassieke bladen. Als dan de koorde reduceert tot 70%, neemt ook de dikte af tot 70%. Dat is iets om even goed bij stil te staan. De buigende momenten die door een rotorblad lopen zijn groot en de buigstijfheid van een profiel neemt toe met de dikte in het kwadraat. Daarom is het handig om de dikte procentueel minder te reduceren dan de koorde. Het gevolg is dat de profielen een grotere relatieve dikte krijgen. Zelfs dan is meer materiaal nodig in de gordingen van het slanke blad. Het blijkt dat het materiaal dat gespaard wordt door de kortere koorde en het daardoor kleinere bladoppervlakte ongeveer evenveel is als het materiaal dat extra in de gordingen nodig is. De massaverdeling van een klassiek blad is ongeveer 33% voor de bladwortel, 33% voor de huid en 33% voor de gordingen. Bij een slender blade is de 33% voor de bladwortel ongewijzigd, maar zit er slechts 24% in de huid en 42% in de gordingen. Uiteindelijk is het slanke blad met zijn 6-8% grotere lengte en wel 30% kortere koorde ongeveer even zwaar. Ik ben ongeveer een half jaar chieft engineer geweest bij een grote windturbinefabrikant met de taak om een ontwerpteam aan te sturen dat een klassiek blad van 6000kg aanpaste tot een slank blad. Het slanke blad was uiteindelijk zelfs 300kg lichter. Omdat de hele productietechniek verder gelijk is, bepaalt de massa de prijs. Globaal is dan de conclusie dat een slank blad ongeveer even duur en soms kennelijk zelfs iets goedkoper is dan een klassiek blad.

Waarom hebben we het effect zo lang niet ontdekt?

Misschien wel omdat aerodynamici meestal in dimensieloze nummers werken. En als je dat doet, dan blijkt dat alle profielen, ongeveer dezelfde helling hebben in de grafiek van liftcoëfficiënt versus invalshoek. Dit is ook een generiek theoretisch gegeven. De op het eerste gezicht logische conclusie is dat de respons op invalshoekveranderingen voor alle profielen ongeveer gelijk zal zijn en dat de profielkeuze vanuit dat opzicht dus niet uitmaakt. En niets is minder waar. Uit afbeelding 7 blijkt dat een profiel met een hoge ontwerpliftcoëfficiënt veel 'zachter' reageert.

Een tweede reden voor ontwerpers om in het verleden niet te kiezen voor slanke bladen is dat je in principe graag dikke bladen wilt hebben. Hoe dikker het blad hoe groter en hoger de constructie en de buigstijfheid neemt toe met het kwadraat van die hoogte, dus je zou zeggen dat je met minder materiaal dezelfde krachten kan opvangen als je dikkere profielen kiest. Deze redenatie klopt maar is dus onvolledig gebleken: men heeft niet meegenomen dat de dikkere en daarom in het algemeen langere profielen ook hogere belastingen veroorzaken en men onderschat hoe zwaar de huid is van bladen. De toename van dat gewicht blijkt ongeveer evenveel als de afname die je behaalt door de extra bouwhoogte.

Alternatieven

Al tientallen jaren proberen onderzoekers de belastingen op windturbines te reduceren. Allerlei opties worden onderzocht. Net zoals bij vliegtuigen kleppen of flexibele delen in de vleugels, het zodanig leggen van de fibers dat buiging van het blad in windrichting meteen een tordering oplevert waardoor de profielen iets naar vaanstand draaien, het opzuigen van lucht die het profiel niet volgt, etc. De opties met bewegende onderdelen in de bladen zijn erg complex en verhogen het onderhoud. Bedenk dat die bladen enorm staan te schudden, in weer en wind rondraaien en een grote kans hebben op een blikseminslag tijdens hun levensduur. Onder die omstandigheden houd je allerlei mechanica en electronica niet makkelijk heel. En storingen leiden tot stilstand en extra onderhoud. Bedenk dat de bladen enigszins vergelijkbaar zijn met een sateliet in de ruimte: ze bevinden

zich op 'onbereikbare' hoogte en dat makat onderhoud zo duur. De koppeling tussen buiging en bladverdraaiing is passief en daarmee onderhoudsarm. Maar daarvan is het nadeel dat de reactie van het blad, de verdraaiing richting vaanstand, eigenlijk te laat is. Want pas als de vlaag zijn werk gedaan heeft en het blad door de impact veel verbogen is, dan pas is het ook verdraaid. Je wilt eigenlijk een snellere reactie: een directe krachtenreductie simultaan aan de impact van de vlaag. En het schitterende van slanke bladen is dat dat het geval is. Dat was gewoon heel veel geluk hebben. Een overzicht van 16 verschillende manieren om windturbinebelastingen te reduceren is gegeven in het artikel 'Active Load Control Techniques for Wind Turbines' door J.J. Scott en C.P. van Dam van de Univ. of California. Dit 132 pagina's tellen stuk toont dat het slanke-bladen ontwerp grote belastingsreducties levert door alleen maar de bladvorm aan te passen. Sommige andere methodes, zoals individuele bladhoekverstelling, zijn ook zeer effectief en uitstekend te combineren met het slanke-bladen ontwerp.

Patenten

Naar mijn idee zijn er enkele belangrijke patenten over slanke bladen. Het lijkt erop dat Vestas als eerste een patent aanvraagt op 22 februari 2005 dat gepubliceerd wordt op 21 augustus 2006. In de tijd tussen de indiening en de publicatie van het Vestas patent dient mijn bedrijf CortEnergy een patent in op 2 april 2006, geheel onafhankelijk van Vestas.

Het patent van Vestas gaat steeds over gladde bladen, wat Vestas in een aanverwante aanvraag definieert als 'zonder vortex generatoren'. Volgens Vestas levert het ontwerp ongeveer 5% meer opbrengst. Dat is enorm veel, ik ken geen andere aerodynamische innovatie uit de laatste decennia die zoveel meeropbrengst oplevert. Het lijkt me dan ook een van Vestas' meest waardevolle patenten. Al zeg ik het zelf, een ander belangrijk patent dat van mijn bedrijf CortEnergy. Dit patent omvat de eerste tekst die het fysische principe uitlegt. Vestas verklaart de fysica achter de uitvinding niet. Hebben ze hun conclusies getrokken uit computeroptimalisaties? Geen idee. Het lijkt me dat als ze de fysica hadden begrepen dat ze zeker vortex generatoren in hun aanvraag hadden opgenomen. Want de uitvinding is het verhogen van de liftcoëfficiënten en met vortex generatoren kun je liftcoëfficiënten verhogen. Maar nogmaals, ik ken de beweegredenen van Vestas niet. Twee voordelige toevoegingen aan de slanke-bladen techniek die wél in het CortEnergy patent staan en niet in het Vestas patent zijn de toepassing van vortex generatoren en de toepassing van profielen met grote relatieve dikte. Een slanke-bladen ontwerp mét vortex generatoren levert nog ongeveer 1% extra winst én maakt bladen minder gevoelig voor oppervlaktevervuiling.

De markt

Slanke bladen zijn de wereldmarkt aan het veroveren. Het kan ook niet anders want 5-6% meeropbrengst kan je niet negeren. Hoe zit het nu met LM? Zij braken de onderhandelingen toch af omdat ze een ontwikkeling in de omgekeerde richting verwachtten? Zij zijn van mening veranderd en ze maken inmiddels de slanke GloBlade serie.

Dr. ir. G.P. Corten