

Haalbaarheidsstudie van het ontwerp, de productie en economische potentie van vezelversterkte polymeer rasterstructuren ten behoeve van windturbine torens

Samenvatting

Binnen elke commercieel bedrijf vormen de kosten een doorslaggevende factor wat betreft ontwerpkeuze en vanzelfsprekend vormt de windenergie sector hierop geen uitzondering. De potentie van kostbesparingen op windturbine torens door middel van een lichtgewicht composiet ontwerp is in het verleden reeds aangetoond. Echter zijn gridverstijfde composiet constructies, welke in de lucht- en ruimtevaartindustrie tot significante gewichtsbesparingen hebben geleid, nog geen onderwerp van onderzoek geweest als toepassing voor windturbine torens.

Dit rapport beschrijft de bevindingen van de haalbaarheidsstudie uitgevoerd door ATG Europe waarbij de mechanische eigenschappen van gridverstijfde composiet constructies worden onderzocht als toepassing voor de bouw van windturbine torens. Een bijkomend voordeel van het gebruik van deze constructies, in aanvulling op het gewichtsvoordeel, zijn de aerodynamische semi-transparante eigenschappen van composiet structuren. Deze eigenschap biedt voordelen vanwege een verminderde interactie tussen rotorblad en turbine toren. Als zodanig is dit kenmerk een aanvullende motivatie voor deze haalbaarheidsstudie, waarvoor de beoogde doelen als volgt gedefinieerd worden:

1. Ontwerp van een gridverstijfde composiet torenconstructie op volle schaal welke voldoet aan de ontwerpvereisten volgens geldende voorschriften;
2. Aantonen van de maakbaarheid door middel van een representatief geschaald proefmodel van de constructie;
3. Evaluatie van de waarheidsgetrouwe mechanische eigenschappen van gridverstijfde composiet structuren onder normale belasting voor een windturbine;
4. Opzet van een kostenoverzicht van het gridverstijfde composietenontwerp en vergelijking met een standaard conventionele turbinetoren, gebaseerd op de kostenrelatie van het productieproces tot en met de in-situ installatie van de toren.

Om bovengenoemde doelen te bereiken, is er een literatuurstudie uitgevoerd waarbij de focus lag op zowel een state-of-the-art windturbine ontwerp als op de productie en analyse van gridverstijfde composieten. Een standaard conventionele windturbine, internationale voorschriften en normale krachtsbelasting zijn geïdentificeerd en vormen een goed uitgangspunt voor het ontwerp van de windmolen toren. Verder bevestigt de literatuur de verwachte gewichtsbesparing door het gebruik van gridverstijfde composietstructuren.

De gekozen referentie turbine voor dit project is de "NREL 5MW reference turbine", met een gewicht van 347.5 ton en een prijs van 510.000,- euro. Dit betreft een virtuele open source turbine gebaseerd op de feitelijke eigenschappen van een (ontwerpstudie van een) wind turbine. De ontwerpbelasting gekozen in dit project is gebaseerd op krachten onder normale windturbine omstandigheden met een piekbelasting welke naar verwachting eens in de vijftig (50) jaar voorkomt.

Een analytische smeared stiffness optimalisatie methode is gebruikt om tot een reeks van bruikbare uit gridverstijfde composiet opgebouwde configuraties te komen welke voldoen aan de geselecteerde referentievoorwaarden. De uiterste limieten van deze reeks, de extreme grid

configuraties, zijn gebruikt als input voor het ontwerp van kleinschalige glasvezel versterkte polymeerstalen op basis waarvan de productiemethode verder kon ontwikkeld en getest worden. Aan de hand van een aantal iteraties is er een productiemethode vastgesteld die resulteerde in de productie van visueel foutloze stalen.

Om een nauwkeuriger voorspelling te betrachten van de mechanische eigenschappen dan het geval bij gebruik van de analytische modellen, zijn er tevens numerieke simulaties en optimalisaties toegepast op de constructie. Hierbij is gebruik gemaakt van een minimale natuurlijke frequentie van 0.222 Hz, een getal gebaseerd op de operationele rotorfrequenties. Nagenoeg alle dimensies van de matrix torenconstructie zijn overgenomen van de referentie turbine, behalve de diameter van de basis. Deze is beperkt tot 4.4 m om excessieve transportkosten van de torenconstructie over land te voorkomen.

Uitgaande van de initiële resultaten van de optimalisatie blijkt dat een glasvezel ontwerp niet gelijktijdig kan voldoen aan de vooropgestelde ontwerpvereisten betreffende stijfheid, productieproces en gronddiameter van 4.4 m. Aanvullende voorbereidende berekeningen wijzen uit dat een koolstofvezelversterkte polymeer versie van de toren wel voldoet aan de ontwerpvereisten. Daarenboven is deze versie goedkoper dan de glasvezelversterkte versie vanwege het aanzienlijk lager gewicht en geringere transportkosten.

Voortbouwende op deze modificatie, is het ontwerp van de koolstofvezelversterkte torenconstructie geoptimaliseerd middels een in huis ontwikkelde ontwerptechniek toegespitst op matrix torens. Het resultaat van deze optimalisatieronde is een toren met een gewicht van 134.5 ton, een aan materiaalsterkte gerelateerde veiligheidsfactor van 2.41 en een natuurlijk frequentie van 0.225 Hz.

Ter validatie van deze toegepaste analyse en het gedrag van vacuum infused matrices, is een mechanische staal in de vorm van een geminiaturiseerde versie van de composieten matrix torenconstructie ontworpen voor testdoeleinden. Zes stalen met gelijkaardige geometrie zijn getest als validatie van de analyse. Na het correleren van de testresultaten, is de gemiddelde foutmarge van de stijfheidsvoorspelling van de stalen met gebruik van deze analysemethode 3.8 % met een standaard deviatie van 4.7 %. De maximale belasting gevonden via deze analyse was 67 kN, met een bijbehorende spreiding in de test data van 44 kN tot 76 kN.

De kosten van de constructie op volle grootte zijn vastgesteld op basis van het productieproces, te beginnen bij de productie van de torengedeeltes tot en met de in-situ installatie ervan. Hiervoor is een schatting gemaakt van materiaal-, productie- en (waar mogelijk besparing op) transport- en installatiekosten. De materiaalkosten zijn bepaald aan de hand van het berekende gewicht van het geoptimaliseerd ontwerp, de productiecosten zijn vastgesteld na onderzoek naar de productiecosten van windturbine bladen, en als laatste zijn de transport- en installatiekosten gebaseerd op een studie naar de logistiek van windturbines. Hieruit blijkt dat de materiaalkosten de totale kosten van de composiettoren domineren. Een composieten versie van de turbine toren kost 675.000,- euro meer dan de stalen referentie toren. Bij verrekening van deze toename in kosten ten opzichte van de gegenereerde energiekosten, komt dit neer op een stijging in off-shore windenergie van 1.8-3.0 %. Deze kostenstijging dient gecompenseerd te worden door de potentieel bijkomende voordelen van het gebruik van een composieten torenconstructie om de economische efficiëntie te waarborgen. Zulke voordelen zijn in het bijzonder de transparante eigenschappen van de gridverstijfde composietenstructuur waardoor de impact op het blad veel lager is dan bij een blad van een stalen toren het geval is, waardoor de vermoeidheidsspanning significant gereduceerd wordt. Dit kan onmiddellijk resulteren in een gewichtsbesparing voor zowel de bladen als de toren, en verder kan dit de huidige restricties met betrekking tot de maximaal mogelijke rotor overspanning vanwege

metaalmoetheid versoepelen. Zodoende kan dit leiden tot de productie van windturbines met een tot op heden ongeziene grootte.

De resultaten van deze studie tonen aan dat het mogelijk is om een geometrische constructie te ontwerpen welke voldoet aan alle gestelde ontwerpeisen. Tevens is de productie van stalen op kleine schaal gerealiseerd en zijn de mechanische drukeigenschappen van kleine representatieve stalen getest. Gebaseerd op deze testen, was het mogelijk om de stijfheidsvoorspelling, sterkte en out-of-plane deflecties te verbeteren. De schatting van de kosten van het productieproces van de torenonderdelen tot en met de installatie van de composieten torenconstructie ter plekke toont aan dat de kosten voor off-shore windenergie toenemen met 1.8-3.0 % ten opzichte van een stalen toren voor 5MW windturbines. Deze stijging kan naar verwachting gecompenseerd worden door de aanvullende voordelen van windtorens opgetrokken uit composieten matrixstructuren.