

# 整合型離岸風機動態載重模擬軟體平台之開發與應用

賴文政<sup>1\*</sup> 吳庭君<sup>2</sup> 蘇煒年<sup>3</sup> 黃金城<sup>4</sup>

## 摘要

為發展離岸風機動態載重分析技術，本文參考美國國家再生能源實驗室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)資料建立5 MW離岸風機系統的數值模型，對於單樁式、套筒式以及浮動式支撐結構進行模型建置和軟體平台開發與整合。主要說明利用MATLAB (MATrix LABoratory)軟體平台整合NREL 5 MW風機系統與三種不同的支撐結構進行縮尺模型(up-scaled model)並經Scaling Law縮放動態響應後再與原尺寸模型(full model)之響應作比對，結果證明皆具有良好的一致性，所建立之離岸風機及支撐結構整合動態載重分析及設計軟體平台，可做為提升國內動態載重計算的專業能力。

**關鍵詞：**離岸風機，支撐結構，動態載重分析

## 1. 前言

為配合非核家園政策，再生能源占比應達20%，離岸風電將以遴選3 GW、競標2.5 GW，於2025年前達成5.5 GW裝置容量目標，並分三階段推動，先建立示範風場、潛力場址，最後是區塊開發；陸域風電則約設置682 MW，預計2025年達到1.2 GW設置目標；陸域及離岸風電年發電量估計可達230億度。

再生能源是未來能源與環保的趨勢，為響應政府推動5+2產業創新計畫，建置全方位風力機整機測試能量，滿足離岸風電產業所需的設計驗證能量，並建立國內自主驗證能力，以提供國內符合於國際標準設計驗證服務，確保本土風機系統性能、品質與支撐結構安全性，

亦可協助國內業者發展所需，縮短開發時程及節省開發成本。

因此，為滿足上述所需，本文利用MATLAB平台整合了離岸風機系統設計軟體，希冀在動態載重計算時能降低人為操作失誤及縮短模擬計算的時間，並配合107年科技部計畫分別進行NREL 5 MW離岸風機搭配三種不同支撐結構的縮尺模型進行建置及比對。如：單樁式(Monopile)、套筒式(Jacket)以及浮動式平台(Semi-submersible Platform)。

## 2. NREL 5 MW參考風機及IEA OC3/4計畫介紹

### 2.1 NREL 5 MW參考風機介紹

<sup>1</sup>行政院原子能委員會核能研究所機械及系統工程專案 助理研究員

<sup>2</sup>行政院原能會核研所機械及系統工程專案 助理工程師

<sup>3</sup>行政院原能會核研所機械及系統工程專案 副工程師兼分組長

<sup>4</sup>行政院原能會核研所機械及系統工程專案 研究員兼組長

\*通訊作者 E-mail: [abc720919@iner.gov.tw](mailto:abc720919@iner.gov.tw)

收到日期: 2019年02月12日

修正日期: 2019年04月17日

接受日期: 2019年05月17日

美國能源署國家再生能源實驗室(NREL)透過國際風能技術中心(National Wind Technology Center, NWTC)發起離岸風機技術的概念性研究計畫，針對美國離岸淺水區域或深水區的大陸棚(Outer Continental Shelf, OCS)以及世界其它離岸場所為研究目標。為從研究中獲取有效的資訊，必須輸入實際及標準化的數據以獲得所需風機與支撐結構設計參數。以下簡介國家再生能源實驗室離岸5 MW示範風機規格及其發展背景，目的為制定適用於布署在深海水域的大型風力機之詳細規格作為參考範例。

在制定詳細規格前，必須先選定基本尺寸及額定功率，由於支撐結構占海上風力發電機大部分的成本，因此若要符合經濟效益，先前的研究報告則建議需選用額定功率為5 MW或以上的風機。以下介紹NREL挑選5 MW為基準示範風機之相關依據及理由(Kooijman *et al.*, 2003；Malcolm & Hansen, 2002；Musial *et al.*, 2004；Tarp-Johansen, 2004)：

1. 美國能源署已公布的離岸風機成本研究是建立在轉子直徑為128公尺的風機規格上，這樣的風機大約就是額定功率為5~6 MW的規格。
2. 美國WindPACT (Wind Partnerships for Advanced Component Technology)所完成有

關風機的研究著作皆為額定功率5 MW的風機。

3. 海上風力發電機提案(Recommendations for Design of Offshore Wind Turbines, RECOFF)所研擬計算的風機規格為5 MW的額定功率，而且荷蘭DOWEC (Dutch Offshore Wind Energy Converter)計畫的概念設計風機為額定功率6 MW。
4. 當時(2009年)世界最大的風力發電機原型機Multibrid M5000及REpower 5M額定功率皆為5 MW。

藉由NREL過去研究所收集之Multibrid M5000及REpower 5M原型機的公開資料以及WindPACT、RECOFF及DOWEC計畫中公開的風機模型資料，綜合以上模型參數，最後提出了最佳及最具代表性的規格。REpower 5M的轉子半徑約為63公尺，為了減少風機支撐結構的傾倒力矩，OC3決定基準示範風機的輪轂高度為90公尺，在與REpower 5M風機相同的轉子半徑及合理最低輪轂高度的兩個條件下，這將提供風機在評估承受50年極端波高值30公尺時(即15公尺振幅)，風機葉片尖端在未變形前與塔架仍有15公尺的間隙，其它5 MW基準示範風機的規格皆與REpower 5M風機相同，如表1所示。

表1 NREL 5 MW參考離岸風機規格(本研究整理)

Rating	5 MW
Rotor Orientation, Configuration	Upwind, 3 Blades
Control	Variable Speed, Collective Pitch
Drivetrain	High Speed, Multiple Stage Gearbox
Rotor Diameter	126 m
Hub Height	90 m
Cut-In, Rated, Cut – Out, Wind Speed	3 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s
Cut-In, Rated Rotor Speed	6.9 rpm, 12.1 rpm
Rated Tip Speed	80 m/s
Overhang, Shaft Tilt, Precone	5 m, 5°, 2.5°
Rotor Mass	110,000 kg
Nacelle Mass	240,000 kg
Coordinate Location of Overall CM	(-0.2 m, 0.0 m, 64.0 m)

## 2.2 IEA OC3/4計畫介紹

由於離岸風機承受相當複雜的工况將實際影響各項設計分析與模擬結果的正確性，因而為了驗證各個程式的準確性及提升分析模擬技術，國際能源總署(International Energy Agency, IEA)分別於2005年及2010年成立OC3 (Offshore Code Comparison Collaboration) (Jonkman & Musial, 2010)及OC4 (Offshore Code Comparison Collaboration Continuation) (Jonkman *et al.*, 2014)。

此二項計畫的目標為透過國際合作，發展關於離岸風機設計分析驗證技術與軟體程式比對，例如：離岸風機系統的數值模型、控制器設計、空氣動力負載計算及支撐結構設計的影響等；OC3/4國際合作計畫是藉由各國大專院校、研究機構及業界之間的技術交流來執行，其主要目的不僅是作為離岸風機基準和驗證程式碼之外，同時也鼓勵模型和軟體工具的開發。為確保離岸風機安裝是符合成本效益的，則有必要針對不同海域使用不同的支撐結構作分析，如OC3計畫的單樁式(Fixed-bottom)結構、三腳架(Tripod)及深水浮筒式(Spar)結構；OC4計畫的套筒式(Jacket)及半潛式(Semi-submersible)結構(詳圖1)。

### 2.2.1 OC3 Phase I ~ Phase IV介紹

OC3計畫目標所強調的是驗證離岸支撐結構動態行為，並考慮全系統動態行為分析，重點著重於不同風機程式的比對驗證，分別在以下階段作探討：

在Phase I，NREL 5 MW風機使用在20 m水深之單樁式支撐結構並裝置在剛性基礎。

在Phase II，延續Phase I的單樁結構但裝置在柔性體基礎，透過不同的模型藉以探討樁-土之間的作用。

在Phase III，水深改變至45 m，且原本的單樁結構改成使用三腳架結構，此結構為一種基本的離岸基礎設施。

在Phase IV，離岸風機裝置於較深水域(320 m)之浮動結構體上。

### 2.2.2 OC4 Phase I ~ Phase II介紹

OC4為OC3計畫之延伸，在Phase I階段，NREL 5 MW風機使用套筒式支撐結構並裝置在50 m水深的剛性基礎上，主要分析理念為OC3 Phase III三腳架概念之延伸。

在Phase II階段，半潛式結構是OC3 Phase IV Hywind浮動平台概念之延伸，對於採用傳統固定支撐結構的風電機組，平台運動不受垂直方向水動力負載影響。而對於浮動式基礎，其

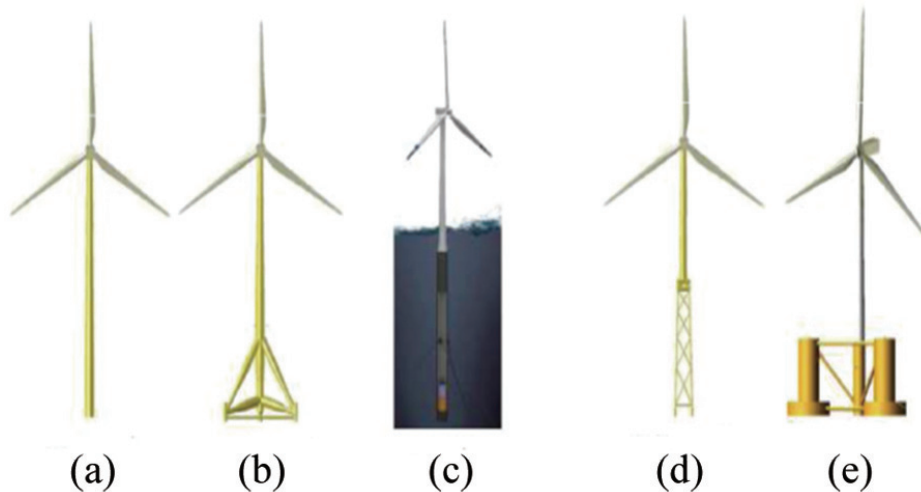


圖1 不同型式支撐結構示意圖(本研究繪製)  
(a)單樁式 (b)三腳架 (c)深水浮筒式 (d)套筒式 (e)半潛式

垂直方向上的水動力負載對風電機組運動的影響是不可忽略的。相比於固定支撐結構，浮動式的平台有以下特點：(1) 系統有較大的低頻模態，這類低頻模態對塔架和轉子的阻尼和整個系統的穩定性都有重要的影響；(2) 相比固定式的支撐平台，浮動式平台在運轉的時候，其位移量更大，可能會導致機艙轉子耦合運動，若有微小系統的加入亦會對整個系統的動力行為造成影響；(3) 水動力對於浮動平台的影響亦要納入考量。

上述OC3/OC4國際合作研究計畫主要執行離岸風機系統整合型結構動態載重計算及互相比對，參加的國家與單位超過10個，主要目的是有鑑於離岸風機承受的動態載重相當複雜，其來源包括風力、波浪、海流等，並且需要考慮耦合作用力的影響較為複雜，而正確計算相關的動態載重對於風機的結構設計及其安全性相當重要，而且不同研究團隊已發展各自的程式進行計算，有必要藉由國際合作計畫進行結果比對，以驗證計算模式之準確性。而NREL 5 MW參考離岸風機為目前所知在公開領域(Public Domain)可以取得技術規格的離岸風機(Jonkman *et al.*, 2009)，由NREL針對參與歐盟及IEA相關離岸風機國際合作計畫所研發制定的虛擬離岸風機，雖不具實體但其主要參考德

國Repower 5 MW離岸風機參數，主要以提供作為各項技術研究使用，IEA OC3/OC4計畫的研究對象也是以NREL 5 MW離岸風機為參考模型。

### 3. 模擬軟體簡介

風機動態載重計算模型是一個需考慮與外在複雜環境條件交互作用的結構體，例如葉片轉子與尾流的氣動力計算，以及支撐結構與大氣邊界層、海上環境條件與地質的影響。目前應用於風機設計與分析的軟體正在如火如荼的發展中，設計者可透過這些軟體，並可參考IEC 61400-3 (International Electrotechnical Commission, 2009)或是GL 1212 (Germanischer Lloyd, 2012)這些工程上常遵循的設計標準，進行風機的動態載重計算，以確保風機與支撐結構在運轉中的安全及可靠性。

本文採用由NREL Dr. Jonkman所開發的FAST (Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence, FAST)程式，這是一套用於計算風機動態載重的程式並持續由NREL更新及支援，主要是用Fortran語法所撰寫，其風機動態載重計算分析的流程，如圖2所示。FAST程式可評估二葉片或三葉片水平軸風力發電機極限

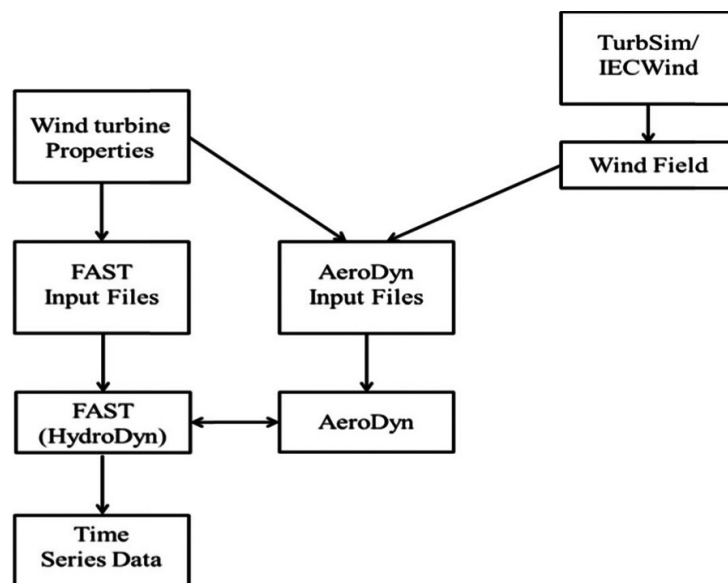


圖2 風機動態載重計算分析流程圖(本研究繪製)



及疲勞負載(Jonkman & Buhl Jr., 2005)，在模擬前可利用BModes (Bir, 2007)程式將所建構的葉片和塔架視為個別的柔性體，這二個柔性體的特性是可設定沿著翼展或沿塔架底端向上的分布剛性和質量屬性，並且經由等效的多項式係數來指定它們的模態(Mode Shape)，傳動系統的彈性體則是建構一個等效線性的彈簧和阻尼模型，而高速傳動軸則是將其慣量和扭矩經由適當的齒輪比轉換後和低速傳動軸鑄在一起，因此基本上HSS (high speed shaft)和LSS (low speed drive shaft)並不需要單獨建構，至於發電機機艙和葉片輪殼在FAST中是以適當的質量和慣量建構為剛體。

FAST在計算過程中所需風機規格參數如尺

寸、重量與慣性參數等，將輸入於FAST Input Files中，葉片翼型與氣動力特性則須定義於AeroDyn Input File中，包含不同翼型與攻角下的阻力係數與升力係數，而模擬所需的風況分別由TurbSim與IECWind程式來產生，TurbSim程式可產生三維全場的紊流風況，而IECWind則可產生符合IEC標準條件的陣風模型。此外，AeroDyn程式是利用葉片元素理論(Blade Element Method, BEM)來進行葉片氣動力計算，如圖3示。

葉片元素理論是將一隻葉片切分成若干段，並假設對於每一段翼截面只考慮葉片軸向轉動與角速度方向時，即可先各別分析其中一段翼截面(如圖4)進行氣動力計算，例如計算圖

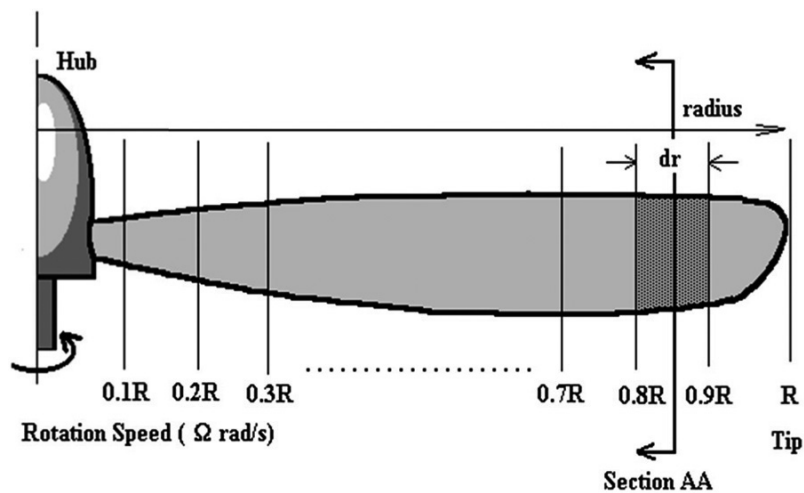


圖3 葉片分段示意圖(Aerodynamics for student, 2019)

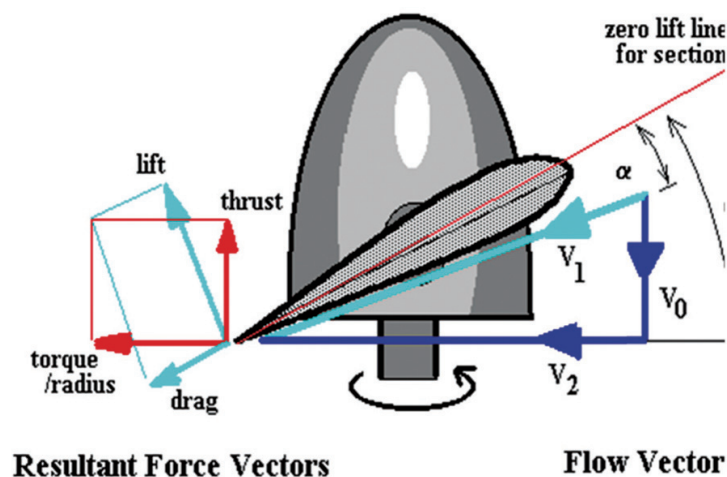


圖4 翼截面示意圖(Aerodynamics for student, 2019)

中的AA段需找出整隻葉片的傾角( $\theta$ )與各翼截面的攻角( $\alpha$ )，即可推導出下列式子。

推力與升力方向的角度定義為：

$$\varphi = \theta - \alpha \quad (1)$$

因此葉片截面的推力與扭矩可寫成：

$$\Delta T = \Delta L * \cos\varphi - \Delta D * \sin\varphi \quad (2)$$

$$\Delta Q = R * (\Delta D * \cos\varphi + \Delta L * \sin\varphi) \quad (3)$$

其中

$\Delta T$ ：葉片截面受到的推力

$\Delta L$ ：葉片截面受到的升力

$\Delta D$ ：葉片截面受到的阻力

$\Delta Q$ ：葉片截面受到的扭矩

$R$ ：翼截面距離葉片旋轉中心的距離

另外 $\Delta L$ 與 $\Delta D$ 可透過實驗得到升力係數( $C_L$ )以及阻力係數( $C_D$ )，因此可將 $\Delta L$ 與 $\Delta D$ 轉換為下列式子：

$$\Delta L = C_L * 0.5 * \rho_a * V_1^2 * c * dr \quad (4)$$

$$\Delta D = C_D * 0.5 * \rho_a * V_1^2 * c * dr \quad (5)$$

其中

$C_L$ ：翼截面的升力係數

$C_D$ ：翼截面的阻力係數

$\rho_a$ ：空氣密度

$c$ ：翼弦長

$dr$ ：分成若干段的翼型厚度

$V_1$ ：相對於各翼截面方向上的流速，  
 $\sqrt{(V_0^2 + V_2^2)}$

$V_0$ ：空氣通過整隻葉片轉子方向的流速

$V_2$ ：整隻葉片旋轉時的切線速度

最後可得到推力與扭矩如下：

$$\Delta T = 0.5 * \rho * V_1^2 * c * (C_L * \cos\varphi - C_D * \sin\varphi) * B * dr \quad (6)$$

$$\Delta Q = 0.5 * \rho * V_1^2 * c * (C_L * \sin\varphi - C_D * \cos\varphi) * B * dr \quad (7)$$

其中 $B$ ：葉片數量

在FAST中負責計算水動力的是HydroDyn模組，而水下的支撐結構無論是單樁或是套筒式結構等，皆由圓柱的幾何形狀所組成，因此水動力的計算是根據Morison equation進行計算，其方程式如下所示：

$$F = \rho_w C_m V \ddot{u} + \frac{1}{2} \rho_w C_d A u |u| \quad (8)$$

其中

$F$ ：水動力負載

$\rho_w$ ：液體密度

$C_m$ ：慣性係數， $C_m = 1 + C_a$

$C_a$ ：附加質量係數

$C_d$ ：阻力係數

$V$ ：結構物體積

$u$ ：液體流速

$A$ ：液體通過物結構的截面積

## 4. 軟體平台之開發

風機設計與分析通常採用具有模擬系統動態負載及響應之耦合行為的軟體程式，一般風機模擬分析使用氣彈模型(Aero-Servo-Elastic)，而在時域耦合模擬環境中計算則包含氣動力、控制系統及結構動態模型。近年來，這些分析程式也擴展到海上動態負載的計算模組，包括波浪、洋流等載重輸入。

本文主要說明如何建立整合型離岸風機系統設計軟體平台之開發(如圖5、圖6)，可交互比對FAST程式(Jonkman & Buhl Jr., 2005)與商用套裝軟體Bladed (DNV GL, 2015)二個不同求解器建模之結果，在FAST/Bladed有關風力跟波浪力的計算都是風機葉片和支撐結構以梁元素(beam element)方式進行多體動力學(Multibody Dynamics)計算，以及利用此軟體平台建立三種不同支撐結構的風機整機系統(單樁式支撐結構、套筒式支撐結構、半潛式浮動平台)縮尺數值模型，並經福祿數(Froude Number)相似之比例定律(Scaling Law) (Jain et al., 2012)縮放動態響應後再與原型5 MW離岸風機之響應作比

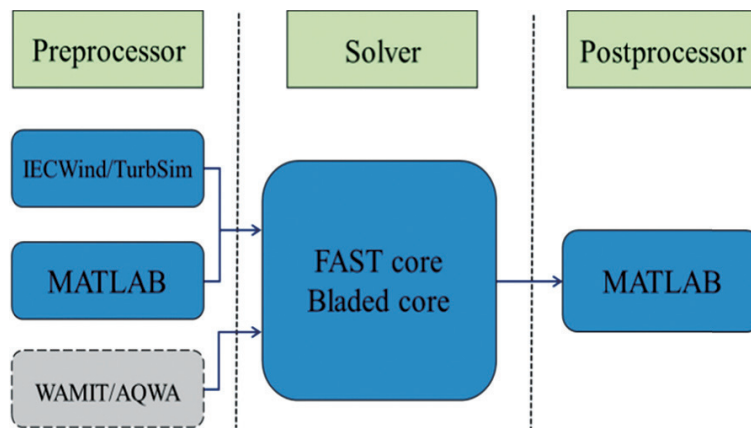


圖5 整合型離岸風機系統設計軟體平台概念圖(本研究繪製)

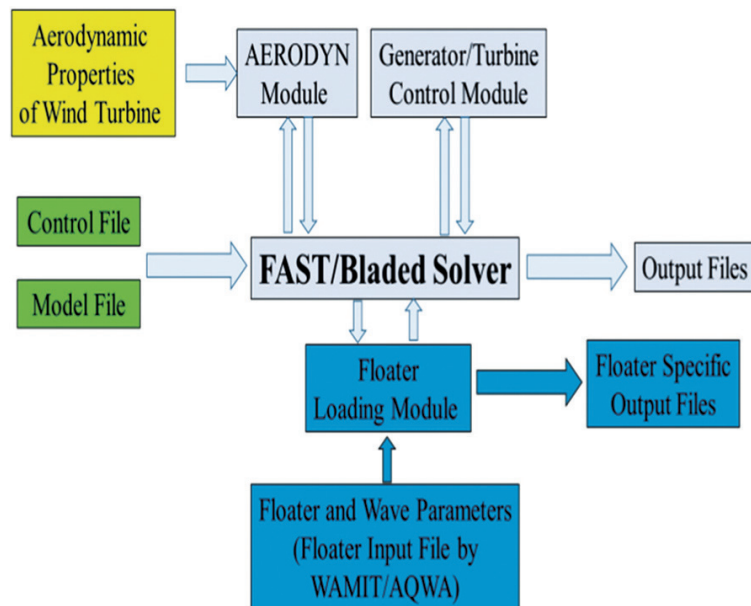


圖6 整合型離岸風機系統設計軟體流程圖(本研究繪製)

對。

#### 4.1 風況檔的批次處理

由於Bladed軟體有自己內建的風況產生器，為了整合FAST/Bladed可共同使用的風況檔，本研究使用美國國家再生能源實驗室所開發的IECWind /TurbSim (Jonkman & Kilcher, 2012) 風況產生器並整合至MATLAB軟體平台作大量批次文件產生，其目的為在軟體模擬比對時可確保風況檔的輸入是一致的，降低人為及程式數值方法之誤差。藉由IEC 61400-3與GL 2012標準之定義以及輪轂高度值，可依序產生相對應的風況，例如：正常紊流模式

(Normal Turbulence Model, NTM)、極端紊流模式(Extreme Turbulence Model, ETM)、極端運轉陣風(Extreme Operating Gust, EOG)…等不同風況條件。

#### 4.2 設計載重情況的批次產生

此軟體平台可參考IEC 61400-3與GL 2012標準之設計載重情況(Design Load Case, DLC)，進行DLC批次產生，而地震DLC則參考GL 2012標準之DLC 9.7~9.9 (賴文政等，2016)，颱風DLC則參考GL TC Tech. Note (GL Tropical Cyclone Technical Note)、CNS 15176-1 (國家標準，Chinese National Standard)與CGC/GF 031

(China General Certification Center/GF, CGC/GF；註：GF是中國的規範，採漢語拼音發音)中的情境模式建立其批次檔，流程如圖7所示。其部分的相關成果已發表於近幾年的風能研討會論文(吳庭君等，2016；吳庭君等，2017)。

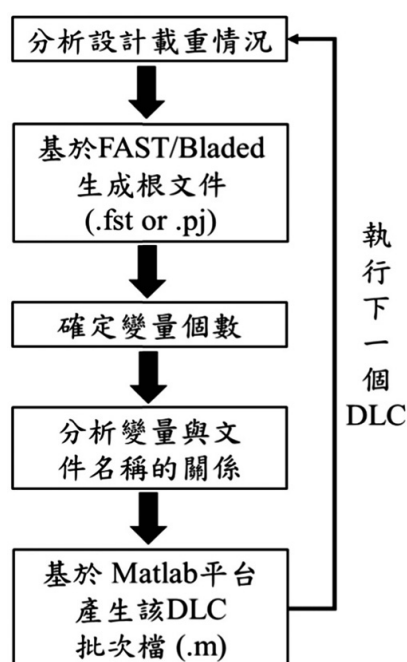


圖7 DLC批次產生流程(本研究繪製)

以IEC 61400-3 DLC 1.1為例(如表2)， $V_{in} = 3 \text{ m/s}$ 、 $V_{out} = 25 \text{ m/s}$ ，若以每2 m/s為間隔，可計算得知DLC 1.1共有432個排列組合( $12 \times 6 \times 2 \times 3 = 432$ )。以一般離岸風機25年壽命條件為設計基準，其所需經歷的DLC至少有5,000個以上的排列組合，因此大量批次產生DLC確實有其便利及可靠性。

表2 IEC 61400-3 DLC 1.1 (本研究整理)

設計載重案例(DLC)：			
1.1			
設計條件：			
正常發電			
風況條件：			
正常紊流模式(NTM)			
分析形式：			
極限載重			
模擬描述：			
平均風速	紊流粒子	設計波浪週期	轉向誤差
$V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	6	$T_{p1}, T_{p2}$	$-10^\circ, 0^\circ, +10^\circ$

### 4.3 模擬結果後處理程式之開發

為了快速判讀上千個模擬結果是否收斂或發散，本文將求解器(FAST、Bladed)的輸出整合成相同檔案格式，再經過自行開發的圖形使用者介面(Graphical User Interface，簡稱GUI)(如圖8)判斷結果是否收斂及合理，最後若確認無誤即可再透過自行編譯開發的後處理程式篩選排序成IEC 61400-3 (International Electrotechnical Commission, 2009)或是GL 2012 (Germanischer Lloyd, 2012)所制定的極限載重以及疲勞載重的表格，再交給結構設計的團隊利用有限元素軟體(如：ANSYS ASAS (賴文政等，2017)、ANSYS APDL、SAP 2000)作進一步的極限及疲勞強度的結構安全檢核。此MATLAB平台程式開發著重在快速呼叫程式(例如：IECWind /TurbSim, FAST/ Bladed core)執行上千個DLC計算，及作後處理判別及篩選排序，以縮短風機系統或支撐結構設計時所需之時間。

### 4.4 案例應用

不同的風況及運轉條件可基於MATLAB平台實現DLC工況的批次產生，本文的案例主要是NREL 5 MW離岸風機搭配IEA OC3/OC4國合計畫的單樁式、套筒式以及全耦合浮動式支撐結構進行建置，相關比對結果具有良好的一致性(Lai *et al.*, 2015；Lai *et al.*, 2016a；Lai *et al.*, 2016b)，再配合成大水工所縮尺實驗模型的水槽試驗，建立理論縮尺數值模型，並經比例定律縮放動態響應後再與原型5 MW風機之響應作比對(圖9及表3)，以確認縮尺數值模型的正確性。在進行理論縮尺數值模型建立前，需先將原5 MW風機控制器修正為符合1:50及1:64縮尺模型所需之控制邏輯，如4.4.1子節所述。

#### 4.4.1 控制器修改

在縮尺數值模型建立前，需先修正PI控制器的 $K_p$ 、 $K_i$ 值，依據文獻(Jonkman *et al.*, 2009)



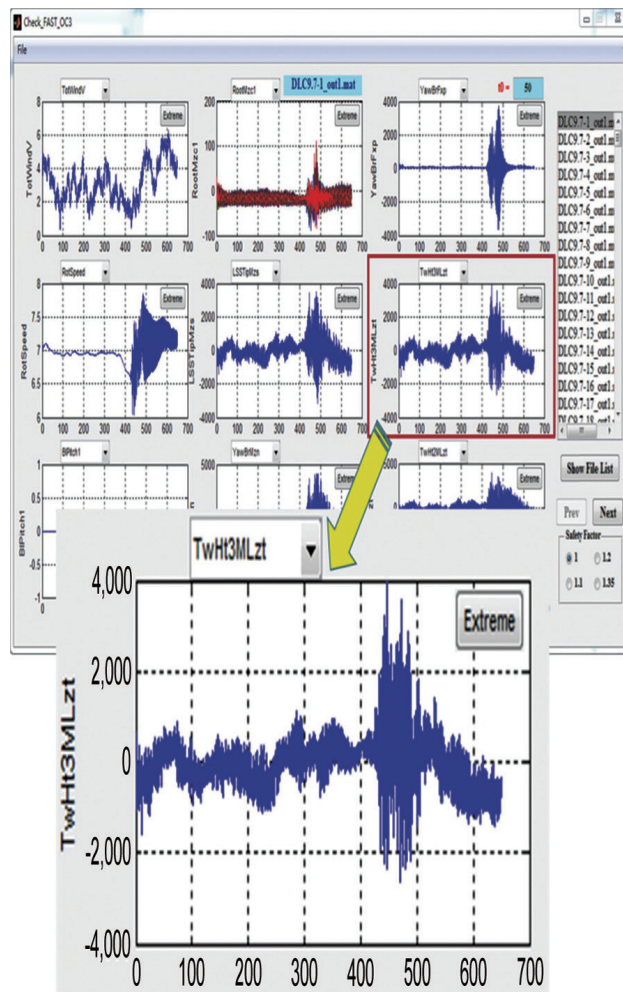


圖8 Matlab GUI模擬結果檢核介面示意圖(本研究繪製)

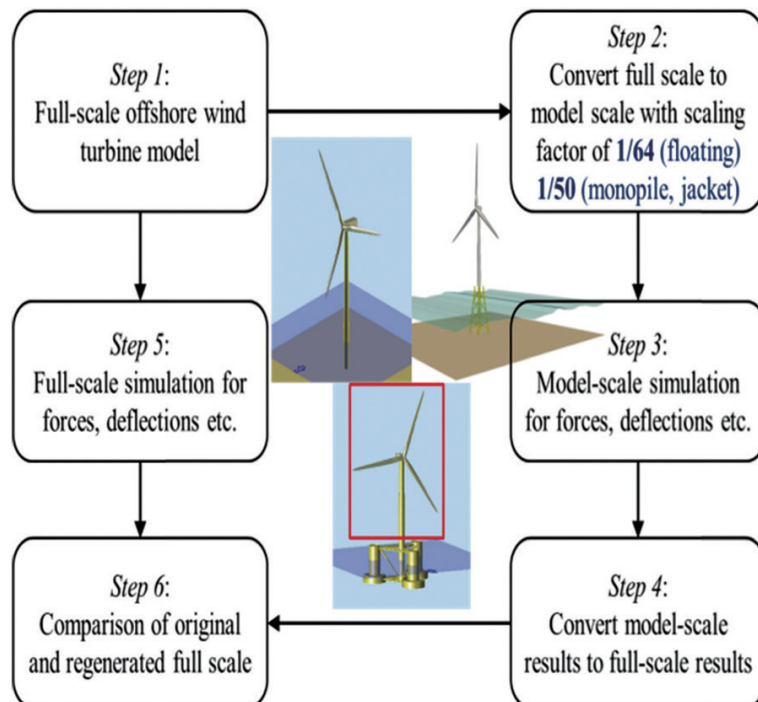


圖9 數值模型建立與縮尺模型比對流程圖(本研究繪製)

表3 縮尺規格及比例參數(本研究整理)(1/50 Scale和1/64 Scale)

Property	Full Scale	$\lambda$ Scale	1/50 Scale	1/64 Scale
Power	5 MW	$\lambda^{3.5}$	5.7 W	2.38 W
Blades mass	17,740 kg	$\lambda^3$	0.14 kg	0.068 kg
Blade length	61.5 m	$\lambda$	1.23 m	0.961 m
Hub mass	56,780 kg	$\lambda^3$	0.45 kg	0.217 kg
Nacelle mass	240,000 kg	$\lambda^3$	1.92 kg	0.916 kg
Tower top mass (hub, 3 blades and nacelle)	350,000 kg	$\lambda^3$	2.80 kg	1.335 kg
Hub radius	1.50 m	$\lambda$	0.03 m	0.023m
Rotor diameter, $D$	126 m	$\lambda$	2.52 m	1.969 m
Tower mass	249,718 kg	$\lambda^3$	1.998 kg	0.953 kg

Input Parameter	Scaling
Total run time and time step	$\lambda^{1/2}$
Generator and rotor angular speed	$\lambda^{-1/2}$
Tower height, tip and hub radius	$\lambda$
Nacelle top to center of mass (x) (y) and (z)	$\lambda$
Blade, tower, platform, nacelle and hub mass	$\lambda^3$
Hub, nacelle and generator mass moment of inertia	$\lambda^5$
Blade and tower moment of inertia	$\lambda^4$
Blade and tower bending stiffness	$\lambda^5$
Tower draft and platform CM from MSL	$\lambda$
Displaced Volume of Water	$\lambda^3$
Platform diameter, water depth, and wave ht.	$\lambda$
Wave peak-spectral period	$\lambda^{1/2}$

Output Parameter	Scaling
Blade tip deflections	$\lambda$
Tower Shear Forces	$\lambda^3$
Tower Bending Moments	$\lambda^4$
Platform Translational Displacements	$\lambda$
Morning Line Tensions	$\lambda^3$

的流程求出縮尺後風機功率對葉片傾角敏感度之最佳配適線的關係式(詳圖10)再代入式(1)~(4)求出新的 $K_p$ 、 $K_I$ 值。此外，發電機轉速對扭矩的相對應曲線也要根據Scaling Law作修正，再重新編譯成新的控制器動態連結函式庫(DLL檔；Dynamic-Link Library, DLL)。

$$\frac{\partial P}{\partial \theta}(\theta = \theta_k) = 2 \frac{\partial P}{\partial \theta}(\theta = 0) \quad (1)$$

$$K_p(\theta) = \frac{2I_{Drivertrain} \Omega_0 \zeta_\theta \omega_{on}}{N_{Gear} \left[ -\frac{\partial P}{\partial \theta}(\theta = 0) \right]} GK(\theta) \quad (2)$$

$$K_I(\theta) = \frac{I_{Drivertrain} \Omega_0 \omega_{on}^2}{N_{Gear} \left[ -\frac{\partial P}{\partial \theta}(\theta = 0) \right]} GK(\theta) \quad (3)$$

$$GK(\theta) = \frac{1}{1 + \frac{\theta}{\theta_k}} \quad (4)$$

其中

$\frac{\partial P}{\partial \theta}$ ：傾角敏感度

$K_p$ ：比例增益

$K_I$ ：積分增益

$I_{Drivertrain}$ ：低速軸傳動慣性矩

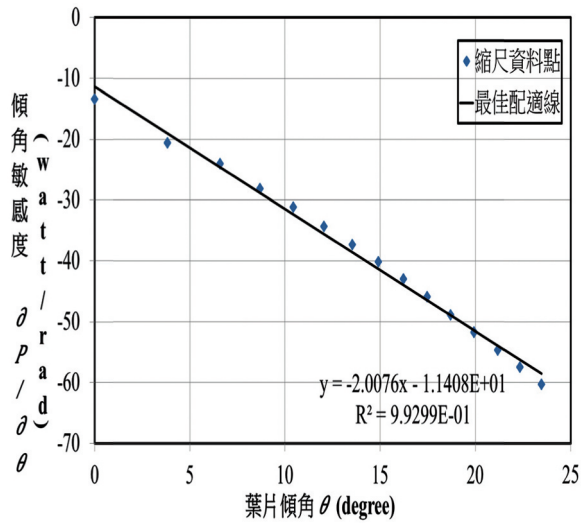


圖10 葉片傾角敏感度之最佳配適線(本研究繪製)

 $\Omega_0$ ：額定時低速軸轉速

 $\zeta_\theta$ ：系統阻尼比

 $\omega_{on}$ ：系統自然頻率

 $N_{Gear}$ ：齒輪比

 $GK(\theta)$ ：無因次增益校正因子

#### 4.4.2 支撐結構縮尺模型建立及確認

本案例將NREL 5 MW離岸風機分別搭配OC3 phase I單樁式支撐結構、OC4 phase I套筒式支撐結構、OC4 phase II全耦合半潛式浮動平台，將其縮小比例至1:50或1:64縮尺模型(up-scaled model)(圖11)，並經Scaling Law縮放動態響應後再與原尺寸模型(full model)之響應作比

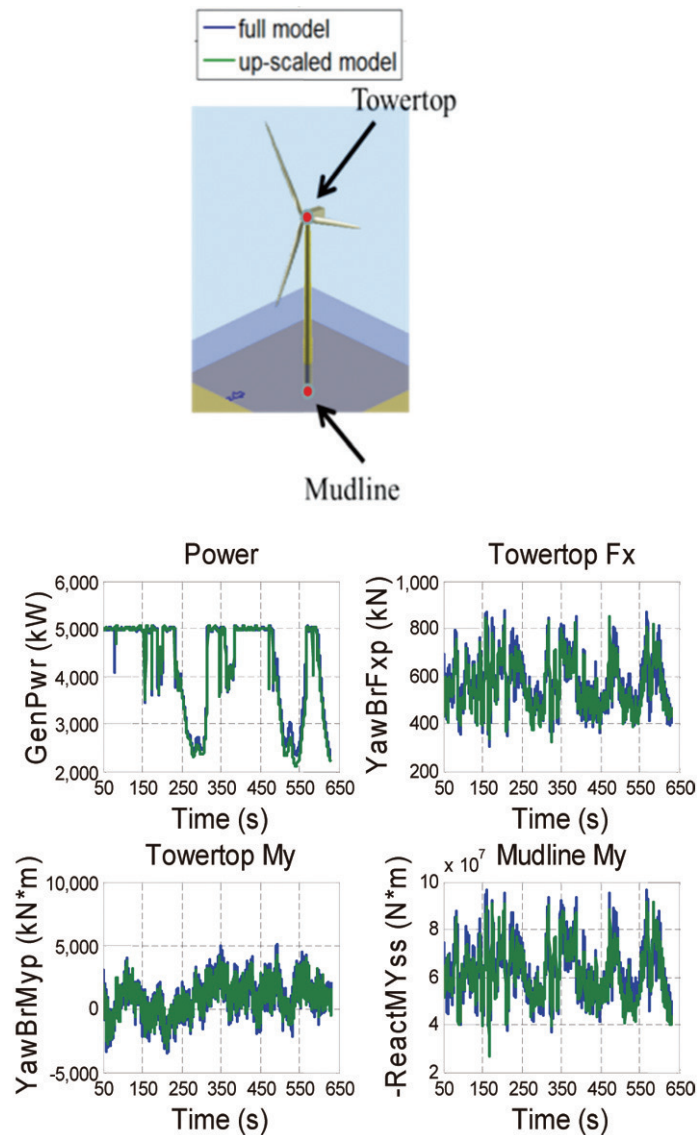


圖11 單樁式支撐結構 - full model對up-scaled model結果比對圖(本研究繪製)

對，以驗證三種不同的支撐結構縮尺模型之建立具有良好的正確性。

1:50單樁式及套筒式支撐結構模擬情境比對，full model設定條件為：紊流風速(Kaimal model:  $V_{hub} = V_r = 11.4$  m/s)、轉子初始速度(9 rpm)跟傾角(0 degree)、波浪力(PM model:  $H_s = 6$  m,  $T_p = 10$  sec)，藉由原NREL 5 MW風機控制器控制轉子速度跟傾角。up-scaled model設定經Scaling Law縮放後之條件為：紊流風速(Kaimal model:  $V_{hub} = V_r = 1.612$  m/s)、轉子初始速度(63.64 rpm)跟傾角(0 degree)；、波浪力(PM

model:  $H_s = 0.12$  m,  $T_p = 1.414$  sec)，藉由4.4.1小節修改後之控制器控制轉子速度跟傾角。在施加紊流風況及波浪力下，由圖12及圖13可知，原NREL 5 MW風機動態響應與經縮尺後的動態行為再放大至原比例之響應間的比對，由風機功率(Power)圖可觀察在風速的變化下二控制器的功率追蹤曲線極為吻合以及塔架頂端(Towertop)、泥線(Mudline)和套筒式支撐結構某節點(MudbraceL2)之動態響應皆具有良好的一致性，可驗證單樁式及套筒式支撐結構up-scaled model數值模擬結果經Scaling Law 1:50

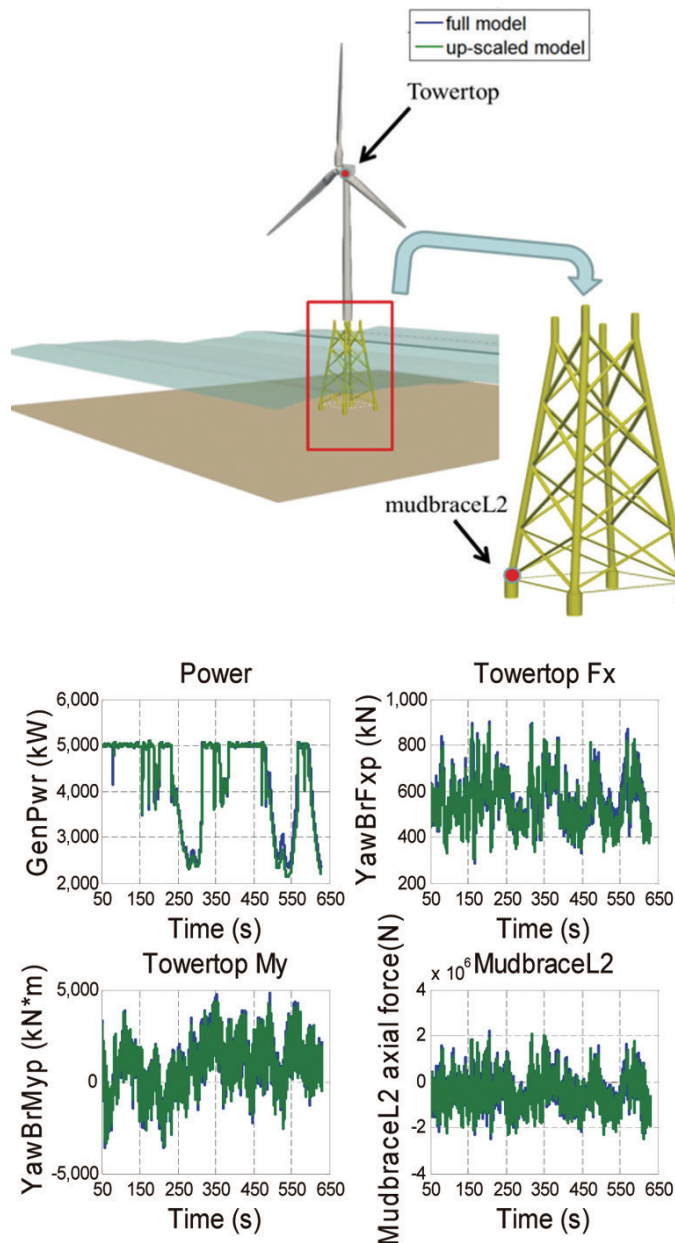


圖12 套筒式支撐結構 - full model對up-scaled model結果比對圖(本研究繪製)



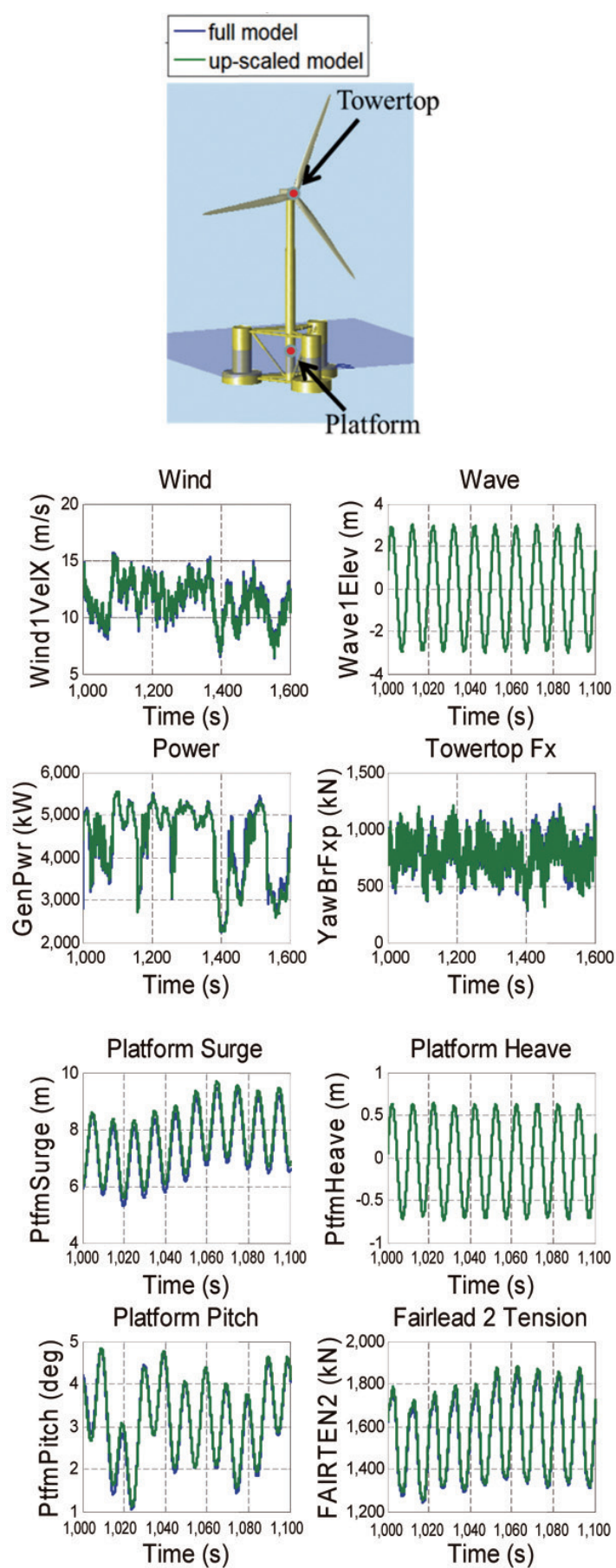


圖13 全耦合半潛式浮動平台 - full model對up-scaled model結果比對圖(本研究繪製)

縮放後與full model動態響應之正確性。

1:64全耦合半潛式浮動平台模擬情境比對，full model設定條件為：紊流風速(Kaimal model:  $V_{hub} = V_r = 11.4$  m/s)、轉子初始速度(9 rpm)跟傾角(0 degree)；、波浪力(PM model:  $H_s = 6$  m,  $T_p = 10$  sec)，藉由原NREL 5 MW風機控制器控制轉子速度跟傾角。而up-scaled model設定則經1:64縮放後之條件為：紊流風速(Kaimal model:  $V_{hub} = V_r = 1.425$  m/s)、轉子初始速度(72 rpm)跟傾角(0 degree)；、波浪力(PM model:  $H_s = 0.09375$  m,  $T_p = 1.25$  sec)，亦藉由Scaling Law修改後之控制器控制轉子速度跟傾角。在施加紊流風況及波浪力下，由圖12可知，原NREL 5 MW風機及半潛式浮動平台動態響應與經縮尺後的動態行為再放大至原比例之響應間的比對，由風機功率(Power)圖可觀察在紊流風速的變化下二控制器的功率追蹤曲線近似重疊以及塔架頂端(Towertop)、平台(Platform)姿態(Surge, Heave, Pitch方向)和繫泊張力(Fairlead 2 Torsion)之動態響應皆擁有良好的一致性，可驗證全耦合半潛式浮動平台up-scaled model數值模擬結果經Scaling Law 1:64縮放後與full model動態響應之正確性。

綜上，經由控制器之修正及整個風機系統縮尺參數值的設定，從圖11至圖13比對結果可得知此三種支撐結構(單樁式、套筒式以及浮動式平台)之縮尺模型與原尺寸模型具有良好的一致性可信度。此外，在原尺寸數值模型(NREL 5 MW風機)的部分，先前已分別藉由FAST/Bladed軟體(Lai *et al.*, 2015; Lai *et al.*, 2016a; Lai *et al.*, 2016b)跟文獻 (Jonkman *et al.*, 2010; Robertson *et al.*, 2014)作比對驗證，而縮尺模型的部分本文則是採用FAST程式模擬的結果作說明。

## 5. 結果與討論

本文主要說明利用MATLAB軟體平台整合NREL 5 MW風機系統與三種不同的支撐結構

(單樁式、套筒式與全耦合半潛式浮動平台)進行縮尺放大與原尺寸風機之數值模型比對與確認，結果證明皆具有良好的一致性。此外，由FAST或Bladed直接輸入參數是相當耗時、繁瑣的工作，透過此整合型離岸風機系統設計軟體平台亦可提高DLC的生成效率及計算結果的準確度，減少人為操作的失誤次數，因載重計算在整個風機設計中所占的地位甚為重要，故利用MATLAB提供的GUI設計工具或編寫程序，可以簡單、迅速的生成IEC、GL標準所需要的DLC，此平台亦可透過相同的前後處理器，呼叫Bladed或FAST核心進行計算，所得到的模擬結果可互相比對確認以得到較佳的合理值。

## 6. 結 論

本文開發整合型離岸風機動態載重模擬軟體平台可同時考量風、波浪等動態力之影響，建立離岸風機整機數值模式和動態響應之技術，以及上述IEA OC3/OC4國合計畫的技術引進及驗證比對；所建立之理論數值縮尺模型，今年會藉由水槽測試(Tank Test)配合國內本土海氣象參數作縮尺實驗量測，再依照實際水槽現況修改後之數值縮尺模型之模擬結果作比對。此外，使用簡單易操作與銜接的軟體平台，將可擴大應用技術推廣及落實技術本土化。

## 參考文獻

- 吳庭君、王俊凱、賴文政、蘇煒年與黃金城，2016。“NREL 5MW離岸參考風機於GL Tropical Cyclone Technical Note與IEC設計標準之極端氣候極限負載計算比較”，臺灣風能協會會員大會暨學術研討會，基隆。
- 吳庭君、王俊凱、賴文政、蘇煒年與黃金城，2017。“離岸風機颱風設計標準比對與分析”，臺灣風能協會會員大會暨學術研討會與科技部成果發表會，彰化。
- 賴文政、蘇煒年、黃金城與黃以玫，2017。“離

- 岸型風力機安全評估技術之建立”，中國機械工程學會第三十四屆全國學術研討會，臺中。
- 賴文政、吳庭君、王俊凱、蘇煒年與黃金城，2016。“本土化離岸風機整合地震動態負載模擬分析”，2016綠色科技工程與應用研討會，臺中。
- Aerodynamics for student, 2019. [http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/aerothermal\\_dvd\\_only/aero/propeller/prop1.html](http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/aerothermal_dvd_only/aero/propeller/prop1.html). Data Captured in February, 2019.
- Bir, G., 2007. “User’s guide to BModes”, NREL.
- DNV GL, 2015. “Bladed user manual v4.7”.
- Germanischer Lloyd (GL), 2012. “Guideline for the certification of offshore wind turbines”.
- International Electrotechnical Commission, 2009. “IEC61400-3 Edition 1.0”.
- Jonkman, J. & M. L. Buhl, Jr., 2005. “FAST user’s guide”, NREL.
- Jonkman, J., S. Butterfield, W. Musial & G. Scott, 2009. “Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development”, NREL.
- Jonkman, J. & W. Musial, 2010. “Offshore Code Comparison Collaboration (OC3) for IEA Task 23 Offshore Wind Technology and Deployment”, NREL.
- Jonkman, J. & L. Kilcher, 2012. “TurbSim user’s guide: version 1.06.00”, NREL.
- Jonkman, J., A. Robertson and Musial W., 2014. “IEA wind task 30 offshore code comparison collaboration continuation (OC4)”, NREL.
- Jain, A., J. Jonkman, A. Robertson, A. Goupee, R. Kimball and A. Swift, 2012. “FAST Code Verification of Scaling Laws for DeepCwind Floating Wind System Tests”, NREL.
- Kooijman, H. J. T, C. Lindenburg, D. Winkelaar and E. L. Hooft, 2003. “DOWEC 6 MW Pre-Design: Aero-elastic modeling of the DOWEC 6 MW pre-design in PHATAS”, ECN.
- Lai, W. J., C. C. Huang, C. C. Tung, R. M. Lee, C. M. Hsu and J. C. Wang, 2015. “Technology Development of Dynamic Analysis for Offshore Jacket-Type Wind Turbine Generators”, Proceedings of The 10th International Green Energy Conference (IGEC), Taichung, Taiwan.
- Lai, W. J., C. Y. Lin, C. C. Huang and R. M. Lee, 2016a. “Dynamic analysis of jacket substructure for offshore wind turbine generators”, Applied Sciences, 6, 307-331.
- Lai, W. J., W. N. Su & C. C. Huang, 2016b. “Dynamic Load Analysis for Offshore Wind Turbine with Flexible Bottom Condition under Earthquake Loading”, Proceedings of the Twenty-sixth International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Rhodes, Greece.
- Malcolm, D. J. & A. C. Hansen, 2002. “WindPACT Turbine Rotor Design Study”, NREL.
- Musial, W., S. Butterfield & A. Boone, 2004. “Feasibility of Floating Platform Systems for Wind Turbines”, NREL.
- Robertson, A., J. Jonkman, F. Vorpahl and W. Popko, 2014. “Offshore Code Comparison Collaboration Continued”, IEA Wind Task 30.
- Tarp-Johansen, N. J., 2004. RECOFF Home Page [online publication], URL: <http://www.risoe.dk/vea/recoff/>. Data Captured in February, 2019.

# Development and Application of Integrated Offshore Wind Turbine Dynamic Load Simulation Software Platform

Wen-Jeng Lai<sup>1\*</sup>   Ting-Jiun Wu<sup>2</sup>   Wei-Nian Su<sup>3</sup>   Chin-Cheng Huang<sup>4</sup>

## ABSTRACT

To develop the dynamic load analysis technologies for offshore wind turbines (OWTs), the numerical models of NREL 5 MW OWT system are built in this paper, and the modeling and the software platform development for the monopile, jacket and floating support structures are also proposed. The paper is mainly presented integrated NREL 5 MW wind turbine systems with three different support structures in MATLAB software platform to perform the verification between up-scaled model from Scaling Law zooming and full model dynamic responses. The results show a good agreement. The developed offshore wind turbine with support structure integrated dynamic load analysis and design software platform could promote the professional ability of dynamic load calculation in Taiwan.

**Keywords:** Offshore Wind Turbines, Support Structure, Dynamic Load Analysis.

---

<sup>1</sup> Assistant Researcher, Mechanical and System Engineering Program, Institute of Nuclear Energy Research.

<sup>2</sup> Assistant Engineer, Mechanical and System Engineering Program, INER.

<sup>3</sup> Associate Engineer, Mechanical and System Engineering Program, INER.

<sup>4</sup> Researcher & Director, Mechanical and System Engineering Program, INER.

\*Corresponding Author, E-mail: [abc720919@iner.gov.tw](mailto:abc720919@iner.gov.tw)

Received Date: February 12, 2019

Revised Date: April 17, 2019

Accepted Date: May 17, 2019