

# 大型浮動式離岸風機及半潛式平台模擬研析

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

## 摘要

為發展大型浮動式離岸風機動態載重分析技術，本文建立NREL 5 MW浮動式離岸風機之半潛式(semi-submersible)平台並利用風機最大推力及縮尺定律(scaling law)放大至額定功率達10 MW等級風機所合適之尺寸。此外，將DTU 10 MW陸域風機結合此放大平台進行浮動式離岸風機及半潛式平台之整合型動態載重分析。本文之結果比對5 MW及10 MW浮動式離岸風機半潛式平台的自由衰減測試及在遭遇規則波條件下的反應振幅運算子及繫纜張力分析。而所建立之浮動式離岸風機及半潛式平台整合型動態載重計算，可做為提升國內浮動式離岸風機及平台整合動態載重設計分析之參考。

**關鍵詞：**浮動式離岸風機，半潛式平台，動態載重分析

## 1. 前言

近年來全球離岸風電製造商正朝向風機大型化發展，各大知名廠商如：丹麥與日本的合資公司Vestas MHI、德國Siemens、Adwen、Senvion、Enercon、美國GE等公司，都根據離岸風場特性專門設計和製造了各自的大型風電機種，為了提高離岸風電的經濟效益，機組容量發展越來越大，從2 MW與3 MW後，在2010年間，各大廠直接往上跳到5 MW為主流。再看到現在，6 MW與8 MW的機組也都陸續上市並投入量產，甚至是接近10~12 MW的開發。如表1所示。

國外的大型風機系統於商業化之前，都會透過國際第三方驗證單位如DNV GL、TÜV SÜD等進行驗證，以確認其各項設計包括性能、結構與製造及組裝與維護等，都能

依據大型風機相關的工業標準施行。然而，對於離岸大型風機之驗證除了風機型式驗證(type certification)外，大都被要求須針對預計建置之離岸風場場址進行專案驗證(project certification)，針對特定場址所設計之支撐結構，結合離岸風機預計承受的場址特定環境條件，如：極端風況、海波流、地震等所引發的動態載重，進行離岸風機整體的耦合動態載重分析，除了確認風機於特定場址嚴苛條件下的動態力量為風機型式驗證所涵蓋，更須以此動態載重進行風機支撐結構與樁基礎之強度檢核，以確保離岸風機運轉之安全性及可靠度。因此，為配合未來國內離岸風場的開發及確保離岸風機的適用性，國內有必要儘速建立離岸風機整合型動力分析驗證模式之技術，以期能安全、可靠及有效地推動離岸風力發電建設。

過去美國再生能源國家實驗室(National

<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 研究員兼組長

\*通訊作者電話: 03-4711400#3342, E-mail: [abc720919@iner.gov.tw](mailto:abc720919@iner.gov.tw)

收到日期: 2019年12月17日

修正日期: 2020年03月02日

接受日期: 2020年05月20日

表1 目前已知超過5 MW離岸風力機系統規格與預計量產時間(本研究整理)

製造商	型號	額定功率(MW)	量產時間	認證等級
Vestas	V164-9.5	9.5	2018	S(IB)
Vestas	V164-8.0	8.0	2015	S(IB)
Siemens	SWT-8.0-154	8.0	2018	IB
Siemens	SWT-7.0-154	7.0	2015	IB
Siemens	SWT-6.0-154	6.0	2015	IB
Siemens	SG 8.0-167	8.0	2019	IB
GE	Haliade 150-6	6.0	2015	IB
GE	Haliade-X	12.0	2020	IB
Adwen	AD-180	8.0	2018	IB
Senvion	6.2M-152	6.2	2016	S(I)

Renewable Energy Laboratory, NREL)所開發5 MW額定功率的參考離岸風機即是一例(Jonkman *et al.*, 2009)，後來也持續有相關研究投入，許多技術的驗證都是透過這個計畫所提供的機組模型作為基礎，例如：國際能源署(International Energy Agency, IEA) OC3/OC4/OC5國際合作計畫(Jonkman & Musial, 2010；Robertson *et al.*, 2014；Robertson *et al.*, 2017)，而在此計畫之後離岸風電市場主流則皆以5 MW為主。但歐盟研究計畫並沒有因而停滯，在超大型前瞻機組的研究中，丹麥技術大學(Technical University of Denmark, DTU)於2013年間所發展的10 MW額定功率大型機組(Bak *et al.*, 2013a；Bak *et al.*, 2013b)就是為了研究機組在下一代風機大型化之後可能面臨那些問題，這台DTU設計的10 MW陸域原型機，在現實中並不存在，僅作為學術研究使用；該計畫尤其著重於大型葉片輕量化的設計，同時也參考NREL 5 MW的資料，建立其它風機相關的系統參數。如同該計畫所提，重點放在新風機轉子的設計方法、流程，並且也希望此模型建立後，能夠提供給外界，作為進一步使用與研究之參考。表2是DTU與NREL兩個風機機組的規格比較，可明顯看出此計畫直接參考NREL 5 MW機組進行升級。基本的風速操作設定規格雷同，然後基於額定容量的提升，加上改為

中速型的齒輪組，相對應的轉子轉速與發電機額定轉速有作相對應的調整。另外一個已於2017年年底結束的大型化離岸風機研究計畫是INNWind.EU計畫。同樣是由DTU負責執行，但結合了多達28個參與的夥伴廠商，包含測試單位(DNV-GL、Fraunhofer)、系統廠(Vestas、Siemens Gamesa)、學術機構(SWE、NREL、ECN、TU Delft、DTU、Aalborg)等，也因此該計畫較為全面，考量更多方的設計因素，目標為10~20 MW的大型機組，最後完成整體能源發電成本的評估，每度電的成本可以降至3.5元新臺幣以下，這是非常大的誘因。

針對考慮上述因應離岸風機大型化所之實際風機資料與設計驗證技術，不易從國外獲得且都為廠家保密技術資料，而為了能以一具體的離岸風機為對象並以較為有效率的方式進行技術建立，核研所團隊已與德國斯圖加特大學風能研究中心(SWE, University of Stuttgart)專家建立顧問合作管道，並將其過去參與歐盟研究計畫(UpWind) (upwind.eu, 2019)，INNWind.EU (innwind.eu, 2019)以及LIFES50+ (lifes50plus.eu, 2019)等為主，同步進行相關驗證技術的本土化建立工作。上述歐盟研究計畫主要執行大型離岸風機系統整合型結構動態載重分析與支撐結構設計，參加的國家與單位超過10個，以丹麥DTU為主導單位，德國SWE

表2 DTU 10 MW與NREL 5 MW參考風機規格參照(本研究整理)

Parameter	DTU 10 MW	NREL 5 MW
Wind Regime	IEC Class 1A	IEC Class 1B
Rotor Orientation	Clockwise, Upwind	Clockwise, Upwind
Control	Variable Speed, Collective Pitch	Variable Speed, Collective Pitch
Rated Power	10 MW	5 MW
Number of Blades	3	3
Rotor Diameter	178.3 m	126 m
Cut-In, Rated, Cut-Out Wind Speeds	4 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s	3 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s
Rotational Speed Range	6 - 9.6 RPM	6.9 - 12.1 RPM
Maximum tip speed	90 m/s	80 m/s
Hub Diameter	5.6 m	3 m
Hub Height	119 m	90 m
Rotor mass	228,962 kg	110,000 kg
Nacelle mass	446,036 kg	240,000 kg
Tower mass	628,442 kg	347,500 kg

亦為主要參與研究單位之一。DTU 10 MW及NREL 5 MW參考離岸風機為目前所知公開領域(Public Domain)所可以取得技術規格的離岸風機系統。由DTU針對參與歐盟相關離岸風機國際合作計畫所研發制定的虛擬離岸風機，主要參考美國NREL 5 MW離岸風機系統參數並將其升級及優化至10 MW額定功率以提供各項研究使用，歐盟計畫的研究對象也是DTU 10 MW離岸風機。因此，本文主要藉由這些國際合作計畫，針對由NREL 5 MW浮動式離岸風機(FOWT)及半潛式平台和DTU提供的10 MW陸域參考風機進行相關載重情境的計算，並與國外結果互相比對(Robertson *et al.*, 2014；Bak *et al.*, 2013b)，以確認各個計算工具程式、方法及模式開發的正確性與保守度，提供做為大型化10 MW浮動式離岸風機及半潛式平台設計之參考。

## 2. NREL 5 MW浮動式離岸風機及半潛式平台建模

在IEA OC4 Phase II是採用NREL 5 MW風機搭配半潛式平台(圖1)進行數值模擬，半潛式

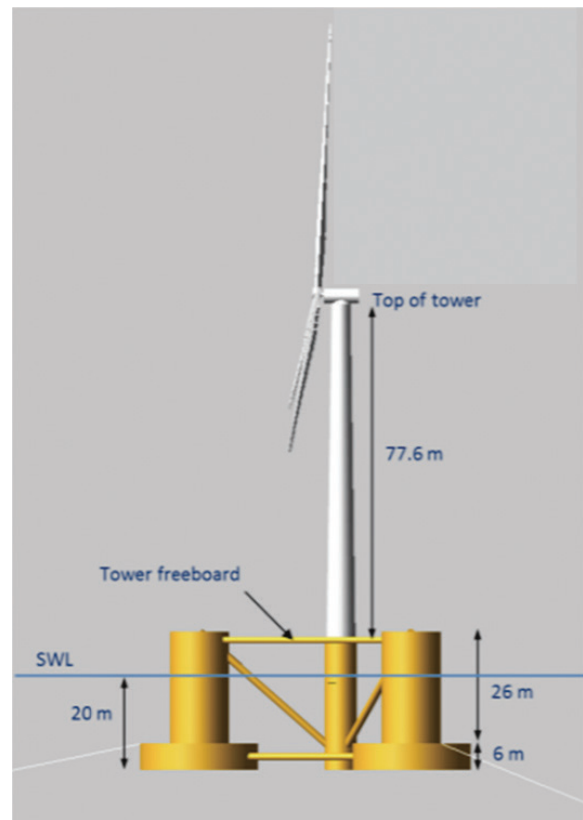


圖1 OC4 Phase II半潛式平台  
(Robertson *et al.*, 2014)

支撐載台是OC3 Phase IV Hywind浮動平台概念之延伸。對於採用傳統固定式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，而對於浮動式載台，其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。相比於固定式支撐結構，浮動式的平台有以下特點：(1) 系統有較多的低頻模態，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) 相比固定式的支撐結構，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體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。

本節主要說明利用FAST (Fatigue, Aerodynamics, Structures and Turbulence) (如圖2)建立NREL 5 MW浮動式離岸風機及半潛式平台數值模型並與文獻(Robertson *et al.*, 2014)中的載重案例(Load Case) 2.1及3.2驗證比對所模擬之動態響應結果。有關FAST程式的說明、參數設定及NREL 5 MW風機簡介可參考(Jonkman & Buhl, 2005；賴文政等，2019)。

Load Case 2.1模擬條件：浮動式離岸風機視為剛體系統，無風況輸入僅施加水動力負載(水深200 m；規則波，波高6 m，週期10 sec)，

可觀察在此波浪狀況下平台的響應。圖3是縱移(Surge)、起伏(Heave)及縱搖(Pitch)方向響應跟繫纜編號2 (Mooring 2) (如圖4)導纜孔(Fairlead)張力的比對，由圖可知本載重案例分析比對結果跟OC4研究團隊的模擬結果相比，具有良好的一致性。因此，由這個案例分析可驗證半潛式平台的水動力跟繫纜動力效應所造成的動態響應。

Load Case 3.2考慮風機為柔性體系統，在紊流風況(Turbulent, Mann model,  $V_{hub} = 11.4$  m/s)、水深200 m及不規則波(JONSWAP spectrum ( $\gamma = 2.87$ ), 波高6 m, 週期10 sec) 影響下的情境模擬。由圖5可知本案例比對結果跟OC4研究團隊在頻率域之模擬結果相符，亦即可確認風機系統的氣動力效應在葉片尖端所造成的偏移量的正確性。

### 3. DTU 10 MW浮動式離岸風機及半潛式平台建模

離岸風機大型化是目前世界上發展的趨

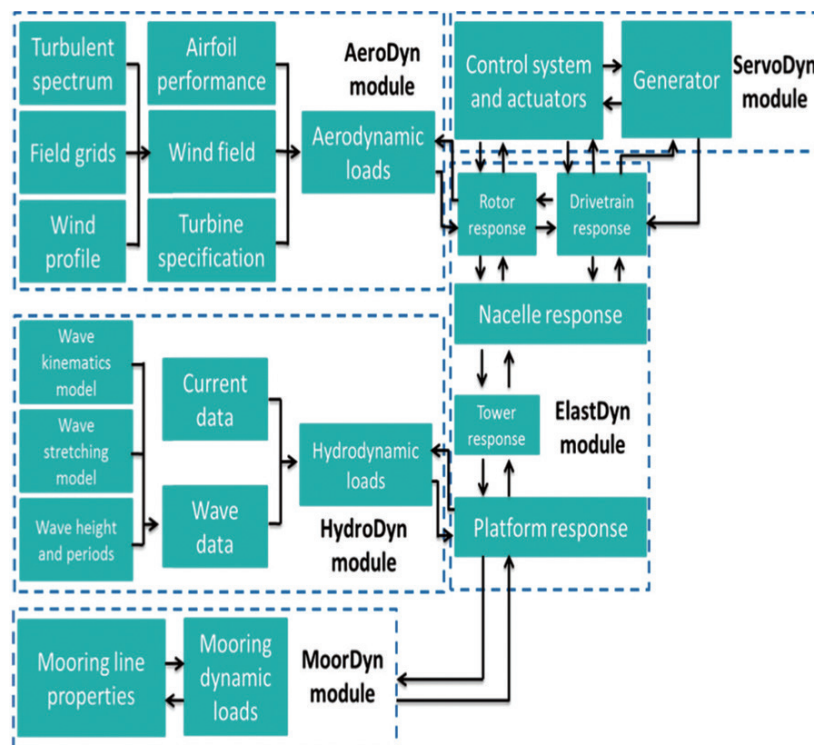


圖2 FAST程式模組結構示意圖(本研究繪製)



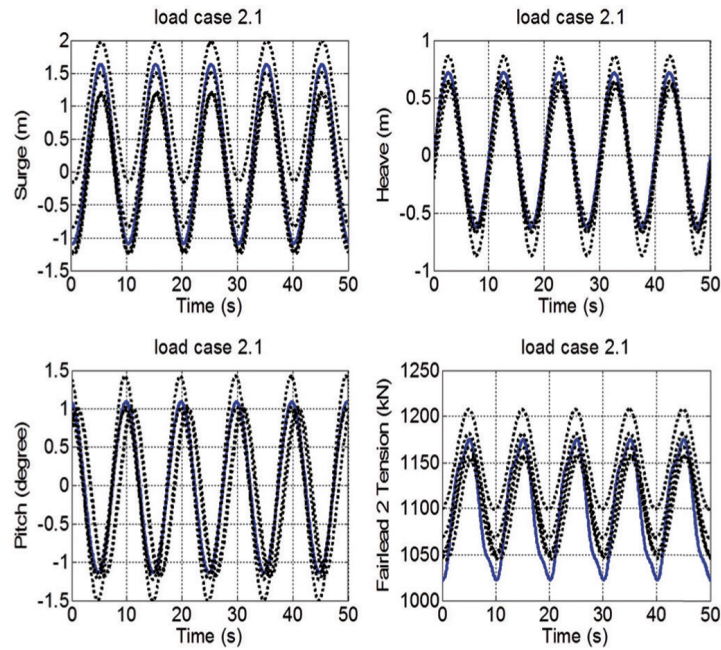


圖3 Load Case 2.1：規則波模擬 (波高6 m，週期10 sec)(本研究繪製)

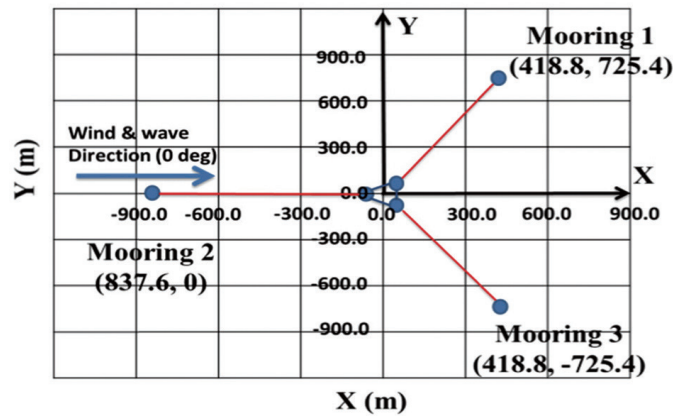


圖4 繫纜排列(本研究繪製)

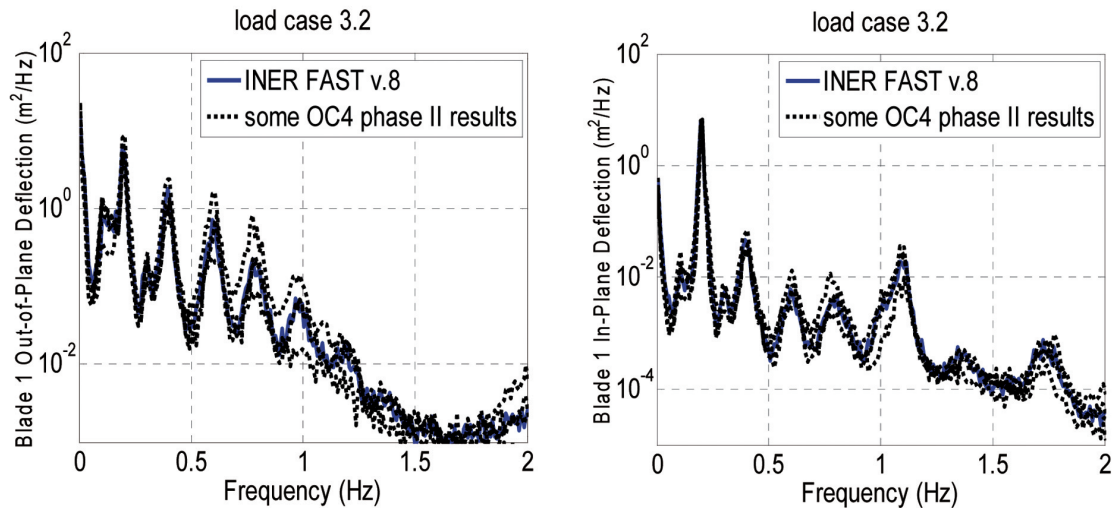


圖5 Load Case 3.2：隨機性風波耦合模擬-葉片尖端之譜功率密度圖(本研究繪製)

勢，對於臺灣未來離岸風場的設置更需要探討風機大型化後對於離岸風機零組件及支撐結構動態行為之差異分析。由於國內缺乏實際之離岸風機分析對象，亦無可供參考之案例，而國外對此領域雖已有多年之研究經驗，但國外離岸風機設計相關資料大都為受保護的資訊，不易獲得。因此，本節旨在利用國外DTU 10 MW陸域風機搭配經由縮尺定律(Scaling Law) (Jain *et al.*, 2012)將OC4 Phase II半潛式平台放大至10 MW等級風機所需尺寸之平台，並比對5 MW與10 MW浮動式離岸風機及半潛式平台在自由衰減測試及遭遇規則波條件下平台的反應振幅運算子(Response Amplitude Operator, RAO)及繫纜張力分析。藉由蒐集技術資料，消化移植技術，建模比對及驗證，日後將針對國內特殊極端環境條件(例如：颱風)建立自主化浮動式離岸風機動態載重分析模式，加速國內對大型化離岸風機之設計驗證技術的建立及相關設計分析能力之提升。

### 3.1 半潛式平台之尺寸放大

賴文政等人(2018)已發表利用FAST程式建立三種不同支撐結構(單樁式、桁架式及半潛式浮動平台)的風機整機系統縮尺數值模型，並

經福祿數(Froude number)相似之Scaling Law縮放動態響應後再與原型5 MW離岸風機之響應作比對，驗證縮放結果的準確性(賴文政等，2018)。

本案例將NREL 5 MW風機所產生的最大推力790.6 kN放大1.9倍至DTU 10 MW風機所產生之最大推力(約1,507.4 kN)，依推力比例將NREL 5 MW風機及OC4 phase II半潛式浮動平台與繫纜次系統放大至1.9倍(如圖6)，並經Scaling Law縮小動態響應後再與原尺寸之響應作比對及驗證。經由控制器之修正及整個風機系統放大參數值的設定，證明放大後之模型與原模型具有良好的一致性和可信度。

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(規則波： $H = 6$  m,  $T = 10$  sec)，藉由原NREL 5 MW風機控制器控制轉子速度跟傾角。而down-scaled model設定則經1.9倍放大後之條件為：紊流風速(Kaimal model： $V_{hub} = V_r = 15.71$  m/s)、轉子初始速度(6.529 rpm)跟傾角(0 degree)；波浪力(規則波： $H = 11.4$  m,  $T = 13.784$  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

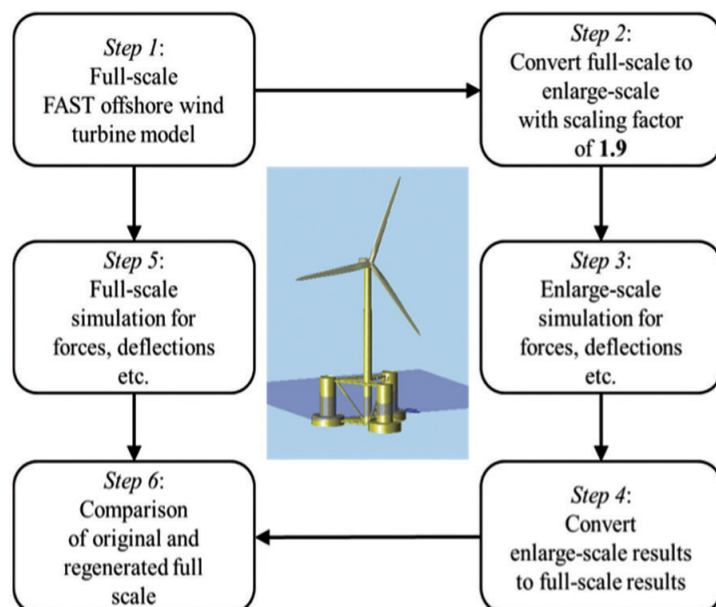


圖6 放大模型比對流程圖(本研究繪製)

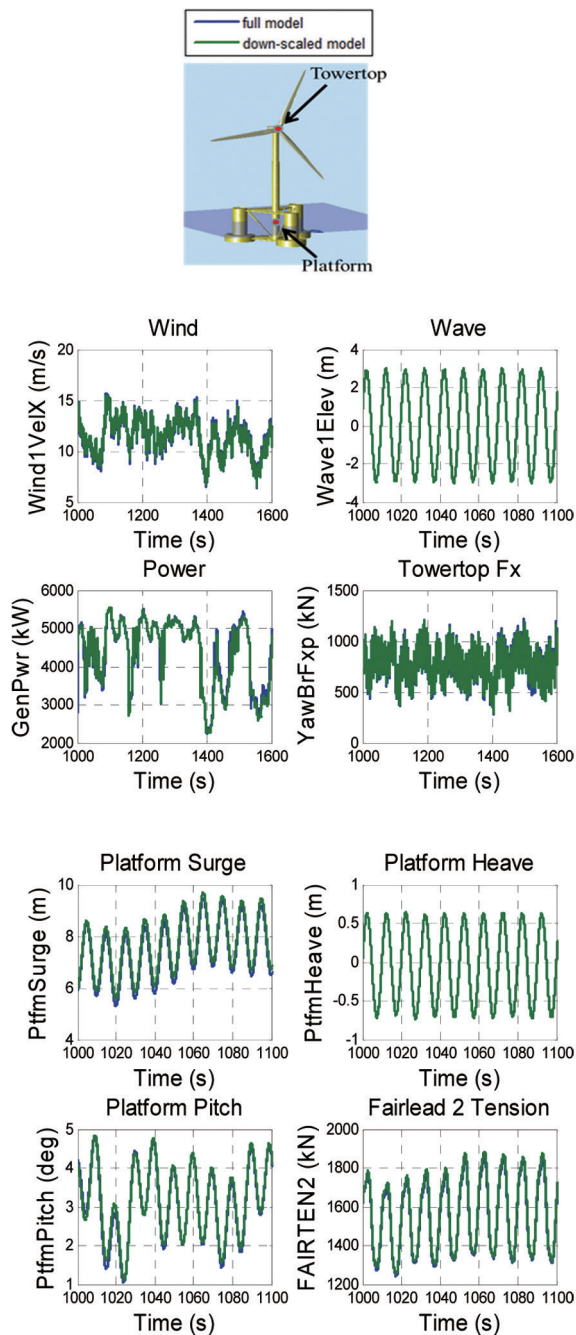


圖7 全耦合半潛式浮動平台結果比對圖(本研究繪製)

及波浪力下，從圖7比對結果可知，原NREL 5 MW風機及半潛式浮動平台之動態響應與經放大1.9倍後的動態行為再縮小至原比例之響應間的比對，由風機功率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)姿態和導纜孔張力編號2 (Fairlead 2 Tension)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down-scaled model數值模擬結果經Scaling Law縮小後與原full model動態響應之正確性及10 MW等級離岸風機平台尺寸的初步設計。

### 3.2 DTU 10 MW陸域風機建模

為針對10 MW等級參考風機及塔架建立完整驗證動態載重模式，結合大型浮動式平台設計技術開發，建立大型化浮動式離岸風機的關鍵模擬技術，以因應國內將來8~10 MW風機等級的浮動式或固定式支撐結構設計技術能力，藉由技術整合並配合場址不同適用性考量，將可同時兼顧離岸風機及支撐結構的成本效益與安全，以期將可於短時間引進設計驗證技術，協助評估引進國內8~10 MW等級離岸風機之結構性能，確保其安全性及可靠度。因此，本小節將以DTU 10 MW陸域參考風機為分析對象(以葉片、塔架及功率變化曲線為例)，並與歐盟計畫之技術報告結果比對與驗證，建立正確設計分析模式及技術能力。

葉片建模：DTU 10 MW參考風機為三葉片的型式，葉片分布採用玻纖結構為基底，而葉片結構斷面性質請參考(Bak *et al.*, 2013b)。表3為葉片結構參數，而表4中可知DTU合併6個不同翼型資料(FFA-W3-xxx)用以建立DTU 10 MW陸域參考風機之葉片，最內部的翼型使用阻力

表3 葉片結構參數(本研究整理)

Blade length	89.15 m
Blade mass	41,692.855 kg
CM location (w.r.t Root along Preconed Axis)	26.147 m
First mass moment of inertia	1,090,124.250 kg*m
Second mass moment of inertia	45,639,992 kg*m <sup>2</sup>

係數為0.6且無升力的圓柱翼型。

由表5可知FAST程式模擬結果跟文獻(Bak *et al.*, 2013b) HAWC2 (Horizontal Axis Wind turbine simulation Code 2nd generation)模擬結果相比，誤差範圍最大為1.44%，可驗證此葉片

表4 葉片氣動力參數(本研究整理)

Node (-)	RNodes (m)	Aero Twist (0)	DRNodes (m)	Chord (m)	Airfoil Table (-)
1	4.800	14.491	4.000	5.380	Cylinder
2	7.512	14.424	1.424	5.423	Cylinder
3	9.119	14.260	1.790	5.503	Cylinder
4	10.275	14.044	0.522	5.577	FFA_W3_600
5	11.658	13.581	2.244	5.679	FFA_W3_600
6	13.258	12.909	0.956	5.802	FFA_W3_600
7	15.068	11.909	2.664	5.937	FFA_W3_600
8	17.075	10.680	1.350	6.064	FFA_W3_480
9	19.267	9.480	3.034	6.157	FFA_W3_480
10	21.633	8.385	1.698	6.201	FFA_W3_360
11	24.156	7.607	3.348	6.192	FFA_W3_360
12	26.823	6.958	1.986	6.129	FFA_W3_360
13	29.617	6.369	3.602	6.014	FFA_W3_301
14	32.521	5.809	2.206	5.854	FFA_W3_301
15	35.519	5.255	3.790	5.658	FFA_W3_301
16	38.591	4.691	2.354	5.435	FFA_W3_301
17	41.720	4.088	3.904	5.190	FFA_W3_241
18	44.886	3.445	2.428	4.929	FFA_W3_241
19	48.072	2.790	3.944	4.658	FFA_W3_241
20	51.257	2.125	2.426	4.384	FFA_W3_241
21	54.423	1.482	3.906	4.111	FFA_W3_241
22	57.550	0.868	2.348	3.845	FFA_W3_241
23	60.620	0.295	3.792	3.589	FFA_W3_241
24	63.615	-0.221	2.198	3.345	FFA_W3_241
25	66.516	-0.705	3.604	3.115	FFA_W3_241
26	69.306	-1.121	1.976	2.903	FFA_W3_241
27	71.968	-1.517	3.348	2.707	FFA_W3_241
28	74.487	-1.876	1.690	2.529	FFA_W3_241
29	76.847	-2.210	3.030	2.365	FFA_W3_241
30	79.034	-2.520	1.344	2.200	FFA_W3_241
31	81.034	-2.798	2.656	2.018	FFA_W3_241
32	82.837	-3.033	0.950	1.812	FFA_W3_241
33	84.431	-3.221	2.238	1.536	FFA_W3_241
34	85.806	-3.370	0.512	1.138	FFA_W3_241
35	86.955	-3.428	1.786	1.138	FFA_W3_241
36	87.870	-3.428	0.044	1.138	FFA_W3_241
37	88.546	-3.428	1.308	1.138	FFA_W3_241

表5 葉片模態比對(本研究整理)

Mode description	HAWC2 (Hz)	FAST (Hz)	Difference (%)
1 <sup>st</sup> flap mode	0.610	0.618	1.31
1 <sup>st</sup> edge mode	0.930	0.922	-0.86
2 <sup>nd</sup> flap mode	1.740	1.765	1.44



數值模型具有良好的可信度。

塔架建模：塔架結構模型建立主要分為二個部分，如圖8分別是塔架(Tower)以及轉子機艙組(Rotor Nacelle Assembly, RNA)質量點，塔架總長為115.63 m，RNA距離Tower Top為2.75 m。如表6中，DTU 10 MW Tower Top的直徑為5.5 m與厚度為0.02 m，Tower Base的直徑為8.3 m與厚度為0.038 m，模型所假設的鋼材揚氏係數為 $2.1\text{E}+11\text{ N/m}^2$ ，密度為 $8,500\text{ kg/m}^3$ ，最後塔架重量為628,442 kg。由表7可知FAST程式模擬結果跟文獻(Bak *et al.*, 2013b) HAWC2程式模擬結果相比，誤差為-1.12%，可得知此模型具有相當的準確性。

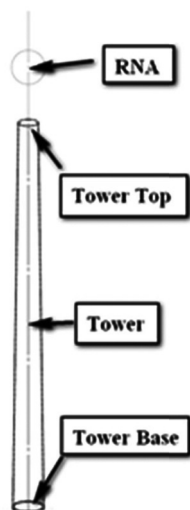


圖8 塔架模型示意圖(本研究繪製)

在整機動態響應比對之結果如圖9 (Bak *et al.*, 2013b)與圖10所示，可知在風速4至24 (m/s) 風速變化下時，傾角(pitch angle)及功率變化具有良好的一致性，可驗證此風機系統數值模型及控制器邏輯的準確度。

### 3.3 DTU 10 MW浮動式離岸風機及半潛式平台動態響應比對

本小節將比對NREL 5 MW與DTU 10 MW浮動式離岸風機半潛式平台的自由衰減測試(free-decay test)及在遭遇規則波條件下的反應振幅運算子(RAO)及繫纜張力分析，因DTU 10

表6 塔架規格參數(本研究整理)

Height (m)	Outer diameter (m)	Wall thickness (mm)
0.000	8.3000	38
11.500	8.0215	38
11.501	8.0215	36
23.000	7.7431	36
23.001	7.7430	34
34.500	7.4646	34
34.501	7.4646	32
46.000	7.1861	32
46.001	7.1861	30
57.500	6.9076	30
57.501	6.9076	28
69.000	6.6292	28
69.001	6.6291	26
80.500	6.3507	26
80.501	6.3507	24
92.000	6.0722	24
92.001	6.0722	22
103.500	5.7937	22
103.501	5.7937	20
115.630	5.5000	20

表7 塔架模態比對(本研究整理)

Mode description	HAWC2 (Hz)	FAST (Hz)	Difference (%)
1 <sup>st</sup> tower fore-aft	0.251	0.248	-1.12
1 <sup>st</sup> tower side-side	0.251	0.248	-1.12

MW風機整體系統重量較NREL 5 MW最大推力放大1.9倍至10 MW時之重量還輕，故增加放大後之平台重量，使DTU 10 MW浮動式離岸風機整體重量為NREL 5 MW整體重量的6.86倍(依縮尺定律，重量需放大為 $1.9^3$ 倍)。

自由衰減測試模擬情境：浮動式離岸風機視為剛體系統，無風浪(水深200 m)，比較二種不同平台在六個方向自由度之平台結構的自然頻率值，由表8可知隨著風機及平台的重量加重，使得10 MW浮動式離岸風機六個方向的自

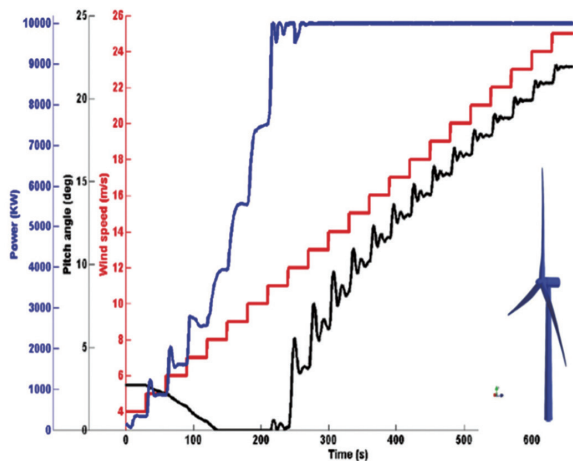


圖9 DTU 10 MW陸域風機傾角及功率變化\_文獻模擬結果(本研究繪製)

然週期增加，另由圖11 surge方向的自由衰減測試(surge方向初始值設為22 m)亦可知此放大後的平台可維持一定的穩定性。

反應振幅運算子及繫纜張力模擬情境：同Load Case 2.1規則波模擬條件。RAO的峰值處即代表風機與波浪的共振週期，且直接影響風力發電機的安全及穩定性，亦即在該峰值處的浪週期下，風機與波浪易發生共振現象。本模擬情境比對二種不同風機及平台系統在surge、heave及pitch方向的RAO極值及繫纜編號2導纜孔張力變化。由圖12可知在三個方向的RAO極值較小是因為在相同的入射波條件下，大型化

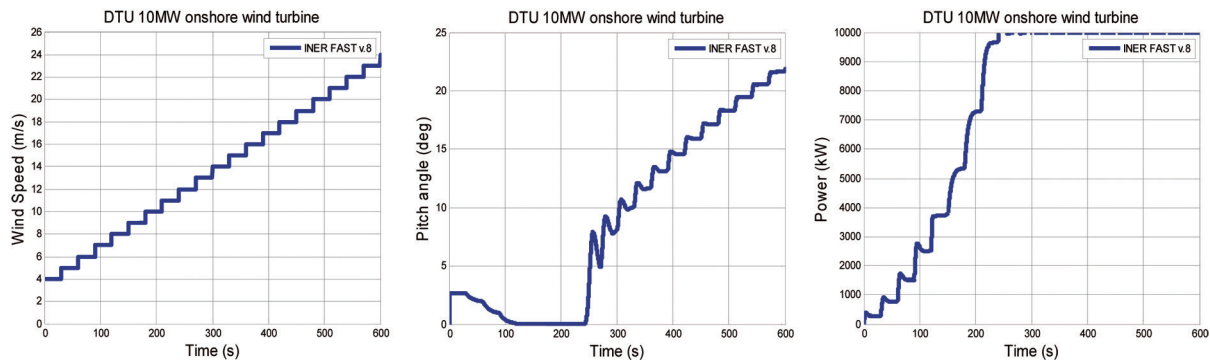


圖10 DTU 10 MW陸域風機傾角及功率變化\_本文模擬結果(本研究繪製)

表8 半潛式平台六個自由度的自然週期比對(本研究整理)

Period (sec)	5 MW FOWT	Ref. OC4	Deviation (%)	10 MW FOWT
Surge	107.5	107	0.47	209.5
Sway	107.5	113	-4.87	209.5
Heave	17.2	17.5	-1.71	19.2
Roll	25.8	26.9	-4.09	29.1
Pitch	25.7	26.8	-4.10	29.1
Yaw	81.1	82.3	-1.46	150.3

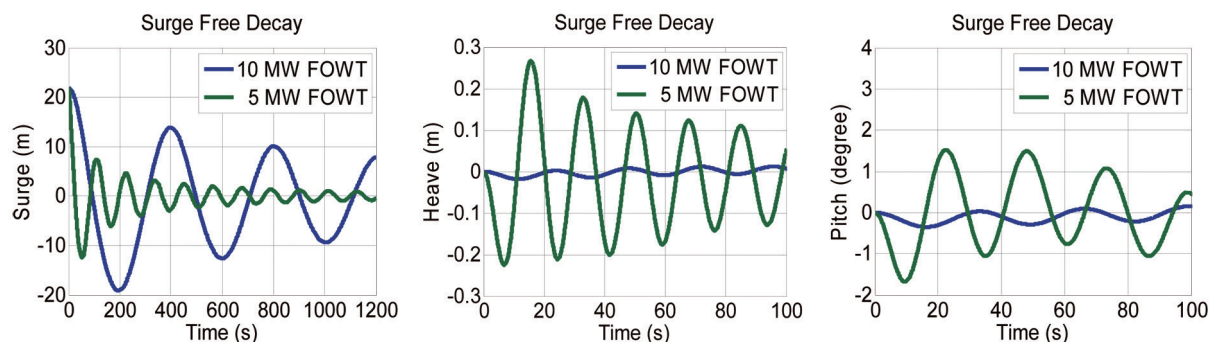


圖11 半潛式平台Surge方向自由衰減測試結果比對圖(本研究繪製)

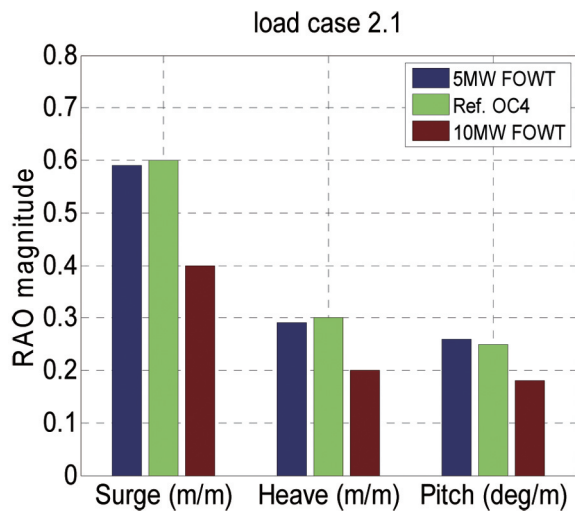


圖12 半潛式平台反應振幅運算子比對圖  
(本研究繪製)

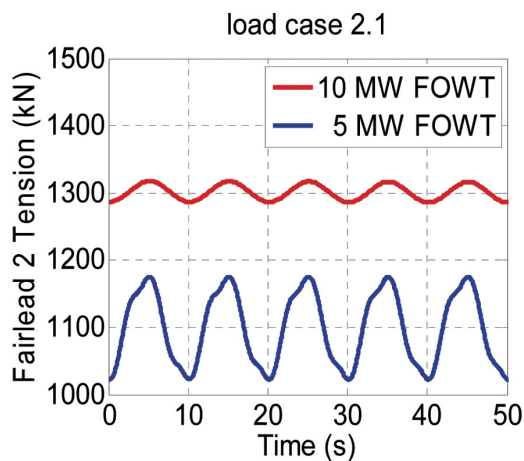


圖13 繫纜編號2導纜孔張力比對圖  
(本研究繪製)

風機平台尺寸重量相對較大之因素，而在圖13可知10 MW浮動式離岸風機相較於5 MW浮動式離岸風機在繫纜編號2導纜孔之張力平均值約增加18.18%，需更進一步考量繫纜尺寸及材質之可靠度及適用性。

## 4. 結 論

歐盟計畫UpWind (2006~2011)、INNWind.EU (2012~2017)以及LIFES50+ (2015~2019)集合歐洲不同國家之學研單位、風機與支撐結構製造商針對大型風機作一系列的研究，例如：運用數值模擬及縮尺實驗評估10

MW離岸風機搭配不同新穎型支撐結構或浮動平台的互相比對。

臺灣離岸風場環境相較於歐洲相對特殊，常有異常強度的紊流及陣風，風速與風向可能在瞬間有急遽的變化，這對於風力機的轉子及支撐結構造成很大的負擔，影響到整個機組的壽命。加上全球氣候變化，颱風及地震的等級越來越強，帶來的極端負載也將需要事先透過數值模型的分析模擬來進行設計，以便整體風機系統能夠承受更強的受力，或是透過控制器的改良，來降低結構所承受的載重。

本文主要藉由驗證NREL 5 MW浮動式離岸風機及OC4 Phase II半潛式平台之模擬結果，並說明如何將NREL 5 MW風機之最大推力(maximum thrust)依縮尺定律將OC4 Phase II半潛式平台放大至10 MW等級風機平台所需之尺寸並結合DTU 10 MW陸域風機進行整機系統動態載重分析。比對NREL 5 MW及DTU 10 MW浮動式離岸風機半潛式平台的自由衰減測試及在遭遇規則波條件下的反應振幅運算子及繫纜張力分析，在DTU 10 MW浮動式離岸風機及半潛式平台整機動態載重模擬之初步結果可知此放大後的平台具有良好的穩定性。

根據中鋼公司表示目前其29號風場規劃將優先採用MHI Vestas最新型9.5 MW風機，因台灣尚無學研單位致力於探討8~10 MW等級的離岸風機整體動態載重分析評估，尤其是風機大型化後葉片長度增長又要輕量化及塔架高度提高又增重，這些因素所造成的物理現象及動態行為是值得探討的。因此，為確保日後國內離岸風機的運轉安全及可靠性，本文已完成建立10 MW浮動式離岸風機及半潛式平台整合動態設計分析計算，而未來將進行結構優化及防颱風型平台之概念設計並針對臺灣特定的環境條件包括颱風等極端風況、海波流，實際進行分析評估，建立國內自主化的離岸風機設計驗證技術，並協助與提供未來離岸風場建置的參考以確保國內將來採用更大型離岸風機如8~10 MW級等之離岸風場的安全、性能及可靠性。

## 參考文獻

賴文政、吳庭君、蘇煒年與黃金城，2019。

“整合型離岸風機動態載重模擬軟體平台之開發與應用”，臺灣能源期刊，6(3)，pp.1-16。

賴文政、吳庭君、蘇煒年、黃金城、黃以玫與劉瑞弘，2018。“整合型離岸風機系統設計軟體平台之開發與應用”，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，臺南。

Bak, C., F. Zahle, R. Bitsche, T. Kim and A. Yde, 2013a, “The DTU 10-MW Reference Wind Turbine,” DTU Wind Energy.

Bak, C., F. Zahle, R. Bitsche, T. Kim and A. Yde, 2013b, “Description of the DTU 10 MW Reference Wind Turbine,” DTU Wind Energy.

inwind.eu, 2019. <http://www.innwind.eu/publications/deliverable-reports>.

Jain, A., J. Jonkman, A. Robertson, A. Goupee, R. Kimball and A. Swift, 2012. “FAST Code Verification of Scaling Laws for DeepCwnd Floating Wind System Tests”, NREL.

Jonkman, J. and M. L. Buhl, 2005. “FAST user’s

guide”, NREL.

Jonkman, J., S. Butterfield, W. Musial and G. Scott, 2009. “Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development”, NREL.

Jonkman, J. and W. Musial, 2010. “Offshore Code Comparison Collaboration (OC3) for IEA Task 23 Offshore Wind Technology and Deployment”, NREL.

life50plus, 2019. <https://lifes50plus.eu/results/>.

Robertson, A., J. Jonkman, F. Vorpahl and W. Popko, 2014. “Offshore Code Comparison Collaboration Continued”, IEA Wind Task 30.

Robertson, A., F. Wendt, J. Jonkman, W. Popko, H. Dagher and S. Gueydon, 2017. “OC5 Project Phase II: Validation of Global Loads of the DeepCwind Floating Semisubmersible Wind Turbine”, 14th Deep Sea Offshore Wind R&D conference (EERA Deep Wind), Trondheim, Norway.

upwind.eu, 2019. <https://www.slideshare.net/EWEA/upwind-design-limits-and-solutions-for-very-large-wind-turbines>.



# Study on a Giant Floating Offshore Wind Turbine with Semi-submersible Platform Simulation

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

## ABSTRACT

To develop the dynamic load analysis technology for a giant floating offshore wind turbine (FOWT), the numerical model of the semi-submersible platform of NREL 5 MW FOWT is built in this paper, and the corresponding semi-submersible platform model is also enlarged to 10 MW wind turbine class with maximum thrust and scaling law. Besides, the DTU 10 MW onshore wind turbine is further combined with the up-scaled platform to perform the integrated dynamic load analysis of FOWT with semi-submersible platform. The results of this paper compare the free-decay test, response amplitude operators (RAOs), and mooring-line tension analysis of 5 MW and 10 MW FOWT under the regular wave condition. The developed FOWT with semi-submersible platform integrated dynamic load calculation could provide the reference of FOWT with platform integrated dynamic load design and analysis in Taiwan.

**Keywords:** Floating Offshore Wind Turbines, Semi-submersible Platform, Dynamic Load Analysis.

---

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

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

<sup>3</sup> Researcher & Director, Mechanical and System Engineering Program, INER.

\* Corresponding Author, Phone: +886-3-4711400#3342, E-mail: [abc720919@iner.gov.tw](mailto:abc720919@iner.gov.tw)

Received Date: December 17, 2019

Revised Date: March 2, 2020

Accepted Date: May 20, 2020