

# 大型固定式離岸風機及支撐結構模擬研析

賴文政<sup>1\*</sup> 林玉楚<sup>1</sup> 黃金城<sup>2</sup>

## 摘要

臺灣的地理環境特殊，環境極端條件如颱風、海波流及地震對於離岸風機系統之性能與結構完整性具有非常重要的影響，所以對於離岸風機與風場布置，更需要特別考量這些極端環境條件下之動態載重。目前國外大多數的離岸風機系統製造商，對於多颱風及地震之臺灣特殊地理環境並無實際的經驗，並且有鑑於國外離岸風機技術資料與設計驗證技術，都為廠家保密技術資料，不易從國外獲得。本文主要參考DTU 10 MW離岸風機歐盟計畫所完成之技術資料，以逆向工程予以消化相關技術建立模型與驗證分析結果，所建立的自主化離岸風機及支撐結構設計驗證技術，希冀能提升國內在不久的將來離岸風機的安全、性能及可靠性。

關鍵詞：離岸風機，固定式支撐結構，動態載重分析

## 1. 前言

發展潔淨再生能源是我國能源政策的目標，其中風能更是重點發展項目之一。近年來全球離岸風力發電機組裝置容量增加，預期離岸風機未來將會穩定快速成長，並扮演著逐漸重要的能源角色。目前全球離岸風電廠家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以及美國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，8 MW與9.5 MW的機組也都陸續上市並投入量產，甚至是接近

10~15 MW的開發。如表1所示。

國外DTU 10 MW及NREL (National Renewable Energy Laboratory) 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，如表2所示。由丹麥科技大學(Technical University of Denmark, 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(Jonkman *et al.*, 2009)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虛擬參考風機搭載不同支撐結構(innwind.eu, 2019; lifes50plus.eu, 2019)。隨著國際間風電技術發展日趨成熟，未來的數年間亞洲離岸風電市場將蓬勃發展，而國內目前正積極投入離岸風電產業鏈的整體建立，其中離

<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 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：2021年12月29日

修正日期：2022年02月17日

接受日期：2022年04月12日

表1 5 MW級以上離岸風力機系統規格及預計量產時間

製造商	型號	額定功率(MW)	量產時間
Vestas	V236-15.0	15.0	2024
Vestas	V164-9.5	9.5	2018
Vestas	V164-8.0	8.0	2015
Siemens	SG 14.0-222 DD	14.0	2024
Siemens	SG 11.0-200 DD	11.0	2022
Siemens	SG 8.0-167 DD	8.0	2019
Siemens	SWT-7.0-154	7.0	2015
GE	HALIADE-X	12.0	2023
GE	HALIADE 150-6	6.0	2015
Adwen	AD-180	8.0	2018
Senvion	6.2M-152	6.2	2016

岸風機的支撐結構為目前最有可能由國內產業參與設計開發、製造組裝以及運輸施工之項目。離岸支撐結構包含單樁式、重力式、套筒式以及浮動平台。因此，本文主要藉由這些參考文獻，針對由DTU提供的10 MW參考風機搭載固定式支撐結構(單樁式及套筒式)進行相關載重情境的計算，並與國外結果互相比對(Bak *et al.*, 2013a; Wang *et al.*, 2021; Borstel, 2013)，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，提供作為大型化10 MW離岸風機及固定式支撐結構設計之參考。

## 2. DTU 10 MW離岸風機及固定式支撐結構建模

離岸風機大型化是目前世界上發展的趨勢，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級風機藉由蒐集技術資料，消化移植技術，建模比對及驗證，克服國外離岸風機技術資料與設計驗證技術，都為廠家保密技術資料，不易獲得，並且建立國內自主化離岸風機及支撐結構設計驗證技術，相關研發成果預期將可直接應用於國內正在開發的本土離岸風場。日後將針對國內特殊本土極端環境條件(例如：颱風、地震)建立自主化10 MW級固定式離岸風機動態載重分析模式(如：風波流載重、風機控制器邏輯、風機系統建模以及全耦合分析等)，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。

### 2.1 DTU 10 MW陸域風機建模

為針對10 MW等級參考風機結合固定式支撐結構建立完整驗證動態載重模式，以因應國內將來8~10 MW風機等級的固定式支撐結構設

表2 DTU 10 MW與NREL 5 MW參考風機規格參照

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

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。

### 2.1.1 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係數為0.6且無升力的圓柱翼型。

表3 葉片結構參數

Blade length	89.15 m
Blade mass	41692.86 kg
CM location (w.r.t Root along Preconed Axis)	26.15 m
First mass moment of inertia	1090124.25 kg*m
Second mass moment of inertia	45639992 kg*m <sup>2</sup>

表4 葉片氣動力參數

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

Mode description	HAWC2 (Hz)	Bladed (Hz)	Difference (%)
1 <sup>st</sup> flap mode	0.61	0.62	1.64
1 <sup>st</sup> edge mode	0.93	0.91	-2.15
2 <sup>nd</sup> flap mode	1.74	1.77	1.72

由表5可知Bladed商業軟體(DNV GL, 2015)模擬結果跟文獻(Bak *et al.*, 2013a) HAWC2程式模擬結果相比，誤差範圍最大為-2.15%，可驗證此葉片數值模型具有良好的可信度。

### 2.1.2 塔架建模

塔架結構模型如圖1所示，塔架總長為115.63米，RNA距離Tower Top為2.75米。如表6中，DTU 10 MW Tower Top的直徑為5.5米與厚度為0.02米，Tower Base的直徑為8.3米與厚度為0.038米，模型所假設的鋼材揚氏係數為 $2.1E+11$  (N/m<sup>2</sup>)，密度為8,500 (kg/m<sup>3</sup>)，最後塔架重量為628,442公斤。由表7可知Bladed軟體

模擬結果跟文獻(Bak *et al.*, 2013a) HAWC2程式模擬結果相比，誤差為-1.12%，可得知此塔架模型具有相當的準確性。為維持輪轂高度(hub height)固定為119米，故將離岸風機的塔架長度由塔架底端(tower base)向上截短至總長為97.63米(原陸域風機之塔架長度115.63米)。

### 2.2 單樁式支撐結構建模

單樁式支撐結構(Monopile)模型總長為30米(包含水下20米)，如表8裡Monopile的直徑為7.5米與厚度為0.085米，模型原點設置在平均海平面(MSL)，模型所假設的鋼材揚氏係數為 $2.1E+11$  (N/m<sup>2</sup>)，密度為8,500 (kg/m<sup>3</sup>)。

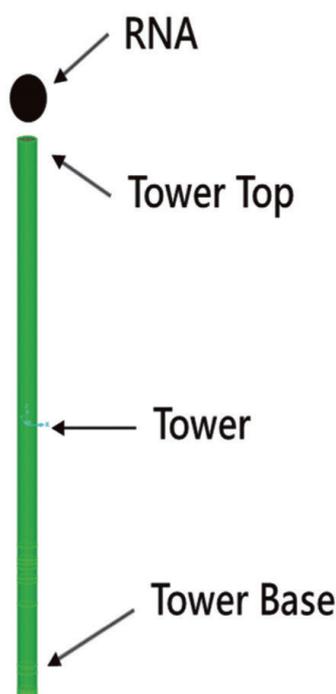


圖1 塔架模型示意圖

表6 塔架規格參數

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

Mode description	HAWC2 (Hz)	Bladed (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

表8 Monopile規格參數

Parameter	Values
Monopile diameter	7.5 m
Monopile thickness	0.085 m
1 <sup>st</sup> Natural frequency	0.21 Hz

### 2.3 套筒式支撐結構建模

套筒式支撐結構(Jacket)模型(例如：尺寸及材料)及土壤參數主要是參考文獻(Borstel, 2013)所建置而成，包含塔架、轉接段以及套筒式支撐結構，樁的長度為40米，並區分2種厚度(上半段厚度0.032米及下半段厚度0.052米)，如圖2所示，土壤曲線(P-Y、T-Z及Q-Z曲線)則如圖3所示。

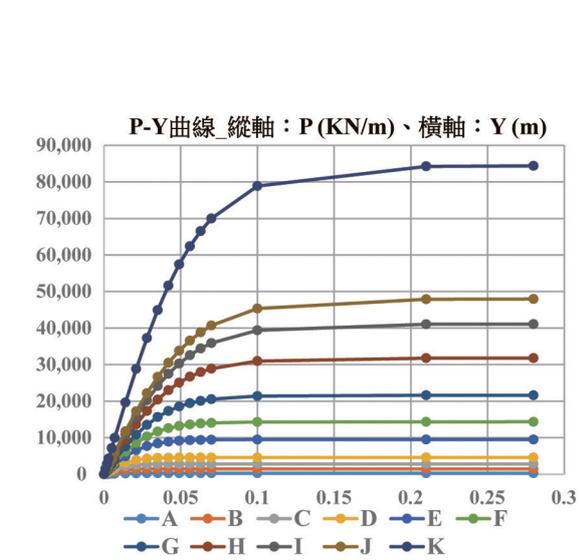


圖2 套筒式支撐結構模型示意圖

## 3. DTU 10 MW離岸風機及固定式支撐結構動態響應驗證與比對

### 3.1 DTU 10 MW陸域風機性能曲線驗證與比對

在陸域風機性能曲線驗證與比對之結果(Bak *et al.*, 2013a)，如圖4與圖5所示，在風速4至24 (m/s)風速變化下時，推力曲線比對，最



土壤曲線 → P-Y、T-Z是拉壓雙向，Q-Z是受壓單向

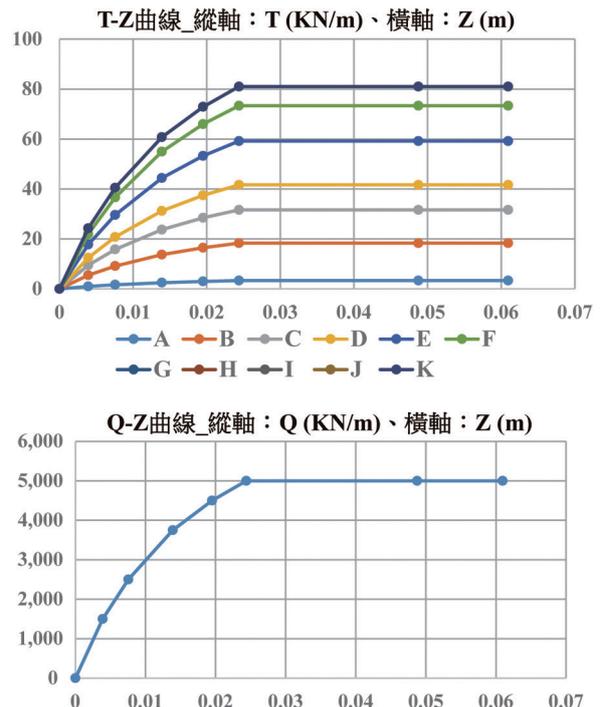


圖3 土壤性質分布進行土壤曲線建置(Borstel, 2013)

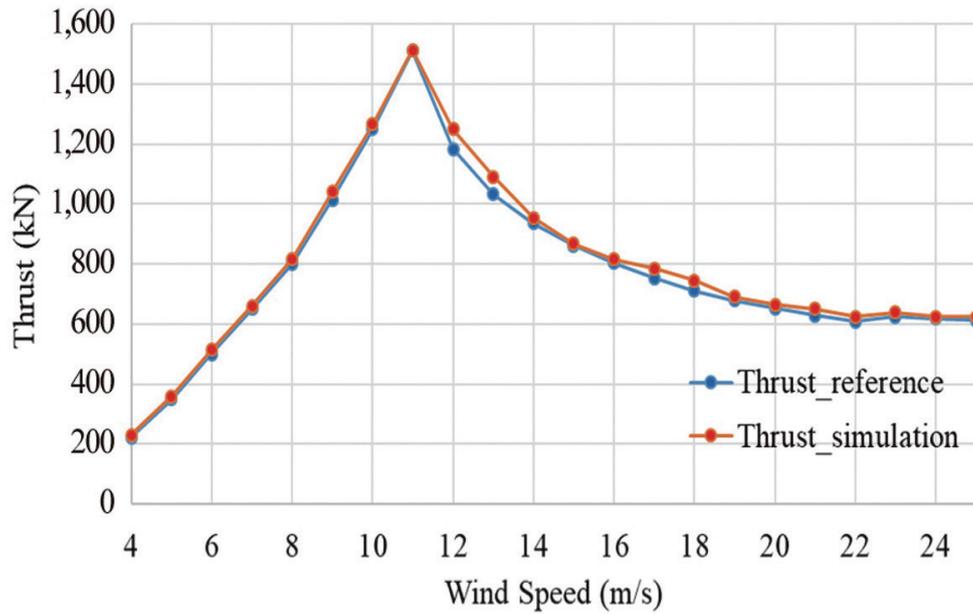


圖4 推力曲線比對

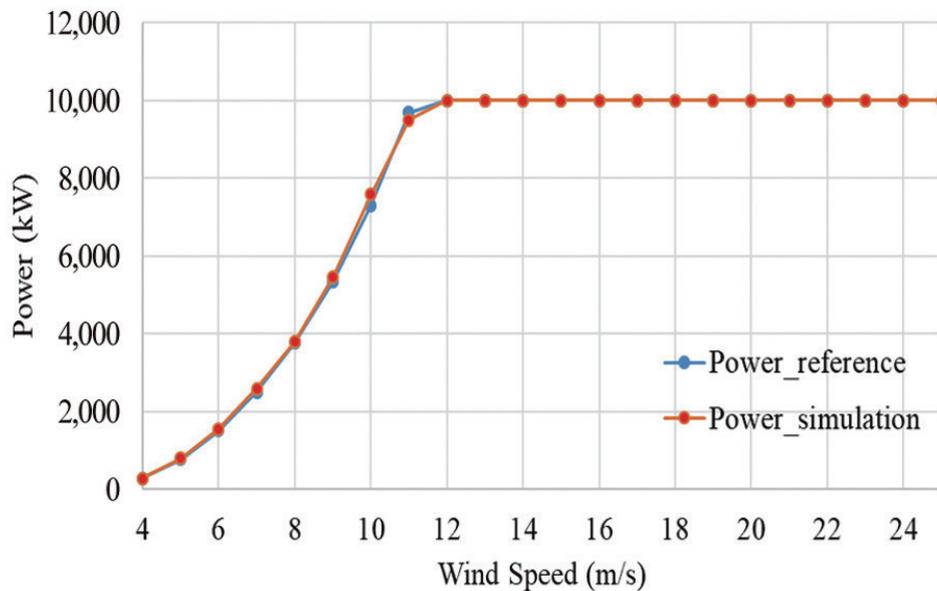


圖5 功率曲線比對

大誤差約5.7%；功率曲線比對，最大誤差約3.8%，推力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。

### 3.2 DTU 10 MW單樁式離岸風機建模驗證與比對

本小節進行單樁式離岸風機數值模型之重量、自然頻率與文獻比對(Wang *et al.*, 2021)以初步確認模型的準確性，比對結果：整體重量誤差0.16%，1階自然頻率誤差-4.76% (詳表9)。接續著進行正常發電(設計載重狀況design load case, DLC 1.1、DLC 1.6)及惰轉(DLC 6.1)，如表10，合計486個情境模擬分析。圖6及圖7與

表9 DTU 10 MW單樁式離岸風機重量及塔架結構自然頻率比對



重量比對

	單位	INER	Reference	Deviation (%)
轉子-機艙總成	[t]	677	677	0
塔架	[t]	481	476	1.05
單樁式支撐結構	[t]	700	702	-0.28
整體重量	[t]	1,858	1,855	0.16

自然頻率比對

	自然頻率	INER	Reference	Deviation (%)
1 <sup>st</sup> Bending side-side	[Hz]	0.20	0.21	-4.76
1 <sup>st</sup> Bending fore-aft		0.20	0.21	-4.76

 表10 DLC 1.1、1.6及6.1模擬情境設定(Wang *et al.*, 2021)

DLC	Design situation	Wind			Wave		
		Model	Speed	Yaw	Model	Height	Direction
1.1	Power production	NTM	$V_{in} : 2 : V_{out}$	$0^\circ, \pm 10^\circ$	NSS	$E[H_s   V_{hub}]$	$0^\circ$
1.6	Power production	NTM	$V_{in} : 2 : V_{out}$	$0^\circ, \pm 10^\circ$	SSS	$1.09 * H_{s,SSS}$	$0^\circ$
6.1	Idling	NTM	$0.95 * V_{50}$	$0^\circ, \pm 8^\circ$	SSS	$1.09 * H_{s,50}$	$0^\circ, \pm 30^\circ$

NTM：正常擾流模型；  
 $V_{in}$ ：切入風速； $V_{out}$ ：切出風速；  
 $V_{hub}$ ：位於輪轂高度之風速；  
 $V_{50}$ ：回歸期為50年之10分鐘平均風速；  
 NSS：正常海況；SSS：嚴苛海況；  
 $H_s$ ：示性波高；  
 $H_{s,SSS}$ ：嚴苛海況條件之示性波高；  
 $H_{s,50}$ ：回歸期為50年之示性波高

文獻比對可知：最大誤差發生在DLC 6.1泥線(Mudline)處約14.77%。此外，DLC 6.1為最壞情境分析，模擬條件較嚴苛，且此情境易發生極值。

### 3.3 DTU 10 MW套筒式離岸風機建模驗證與比對

本小節進行套筒式離岸風機數值模型之重量、自然頻率與文獻比對(Borstel, 2013)，初步確認模型的準確性，比對結果：整體重量誤差1.52%，結構自然頻率最大誤差發生在2nd Bending fore-aft約14.03% (詳表11)，原因為分析方法不同，本文是用多物體動力學的方法求解塔架的模態，而文獻則是用有限元素法

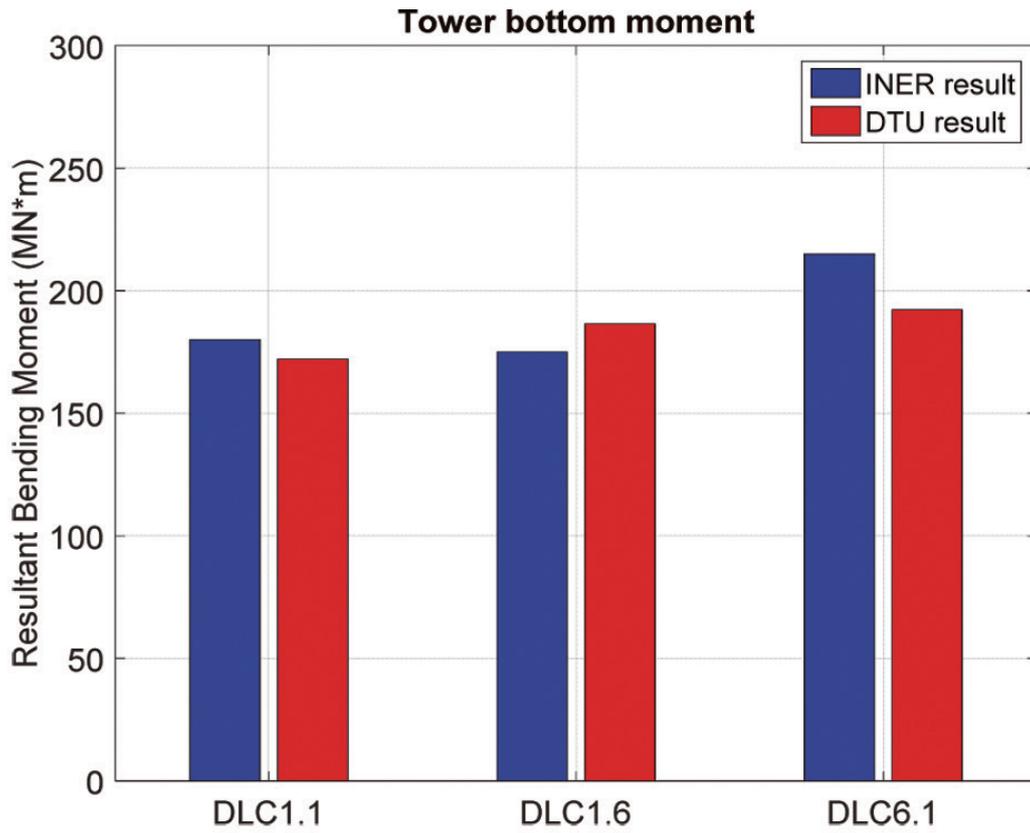


圖6 塔架底端彎矩比對

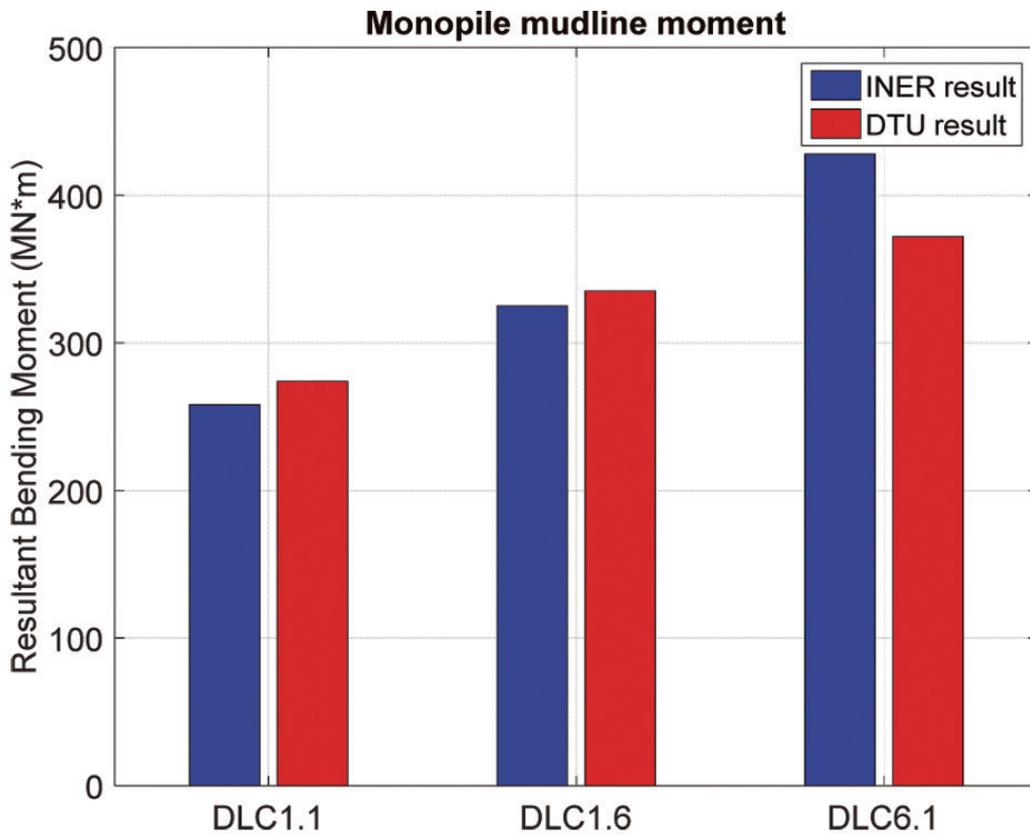


圖7 泥線彎矩比對

表11 DTU 10 MW套筒式離岸風機重量及塔架結構自然頻率比對



重量比對

	單位	INER	Reference
轉子-機艙總成	[t]	677	677
塔架	[t]	2,395	429
套筒式支撐結構	[t]		1,210
轉接段	[t]		330
樁*4	[t]		380
整體重量	[t]	3,072	3,026

自然頻率比對

	自然頻率	1 <sup>st</sup> Bending side-side	1 <sup>st</sup> Bending fore-aft	2 <sup>nd</sup> Bending side-side	2 <sup>nd</sup> Bending fore-aft
INER	[Hz]	0.2869	0.2895	1.2550	1.2695
Reference		0.2867	0.2885	1.1003	1.1133

表12 DLC 1.2及2.3模擬情境設定(Borstel, 2013)

DLC	Design situation	Wind			Wave		
		Model	Speed	Yaw	Model	Height	Direction
1.2	Power production	NTM	$V_{in} : 2 : V_{out}$	-8°	NSS	$E[H_s   V_{hub}]$	0°
2.3	Power production plus loss of electrical grid connection	EOG	$V_r \pm 2 \text{ m/s}$ 及 $V_{out}$	0°	NSS	$E[H_s   V_{hub}]$	0°

NTM：正常擾流模型；  
 EOG：極端運轉陣風；  
 $V_{in}$ ：切入風速； $V_{out}$ ：切出風速； $V_r$ ：額定風速；  
 $V_{hub}$ ：位於輪轂高度之風速；  
 NSS：正常海況；  
 $H_s$ ：示性波高

求解。接續著進行正常發電(DLC 1.2)、發電及故障發生(DLC 2.3)情境模擬，如表12，合計336個情境模擬分析。圖8及圖9與文獻比對可知：最大誤差發生在DLC 2.3轉接段(Transition Piece) Bending Moment處約14.15%。DLC 2.3為極端運轉陣風(Extreme Operating Gust, EOG)風

況及需考慮外部或內部電力故障，包括電網損失等情境模擬，故相較於DLC 1.2，此情境模擬所產生的載重結果偏高。此外，不同軟體針對轉接段拘束條件之設定差異亦會造成誤差的產生。

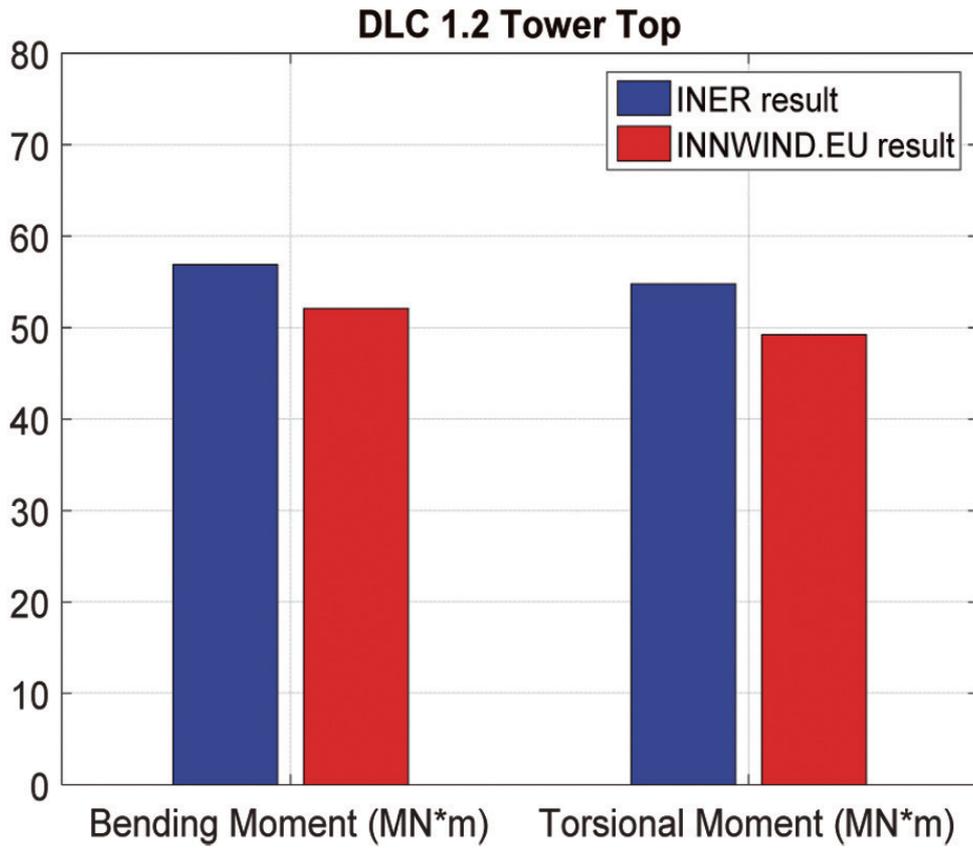


圖8 塔架頂端彎矩比對

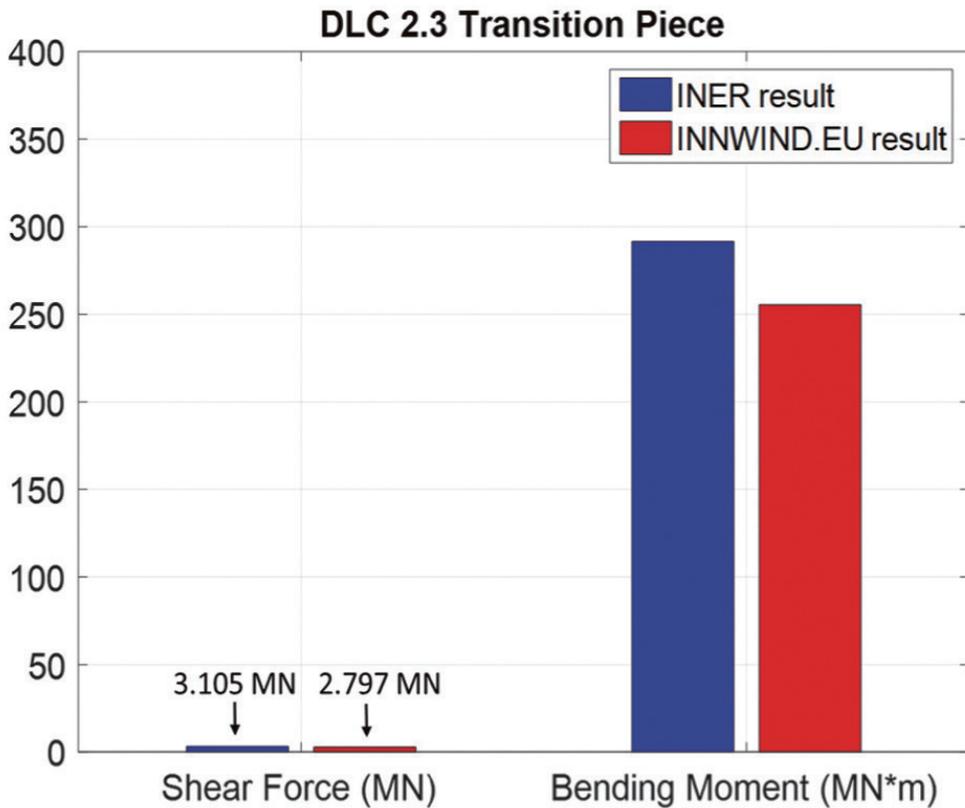


圖9 轉接段剪力及彎矩比對

## 4. 結 論

歐盟計畫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離岸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。

核研所以自主技術針對DTU 10 MW離岸風機及固定式支撐結構之議題進行模擬分析，所有分析結果皆與參考文獻之研究成果趨勢一致並達成原預期設定目標15%以內，證明核研所針對固定式離岸風機建模以及環境設定方式等執行細節皆有正確且完整的方法，明年本團隊將應用此二種固定式支撐結構模型(單樁式及套筒式)延伸應用於特定議題之探討，下一階段之研發目標係針對本土環境特性進行延伸應用與探討，包括針對臺灣的颱風、土壤、地震及海波流等外在因素進行本土極端環境條件於大型離岸風力機設計載重影響評估，相關研發成果預期將可直接應用於國內本土離岸風場。

## 參考文獻

- 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.
- Borstel T. V., 2013. “INNWIND. EU Design Report Reference Jacket”, Ramboll.
- DNV GL, 2015. “Bladed Theory Manual, Garrad Hassan & Partners Ltd”. <http://www.innwind.eu/publications/deliverable-reports> & <https://lifes50plus.eu/results/>.
- Jonkman, J., S. Butterfield, W. Musial & G. Scott, 2009. “Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development”, NREL.
- Wang S. H., T. J. Larsen and H. Bredmose, 2021. “Ultimate load analysis of a 10 MW offshore monopile wind turbine incorporating fully nonlinear irregular wave kinematics”, *Marine Structures*, Vol. 76, March 2021.

# Study on a Giant Fixed-bottom Offshore Wind Turbine with Support Structure Simulation

Wen-Jeng Lai<sup>1\*</sup> Yu-Chu Lin<sup>1</sup> Chin-Cheng Huang<sup>2</sup>

## ABSTRACT

With the special geology of Taiwan, environmental extreme conditions as typhoon, wave/current, and earthquake are crucial for the performance and structural integrity of offshore wind turbines. Therefore, it is necessary to particularly consider the dynamic load under these extreme environmental conditions for the offshore wind turbines and wind farm layout. At present, most offshore wind turbine system manufacturers abroad have no practical experience for the Taiwanese special geographical environment with multiple typhoons and earthquakes. In view of the technical data and design verification technology of foreign offshore wind turbines, all of them keep confidential technical data for the manufacturers. It's not easy to obtain from abroad. This paper mainly refers to the technical data completed by the DTU 10 MW offshore wind turbine European project, digests the relevant technology with reverse engineering, establishes the model, and validates the analysis results. Establishing the autonomous offshore wind turbine and support structure design verification technology, this paper hopes to improve the safety, performance, and reliability of domestic offshore wind turbines in the near future.

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

---

<sup>1</sup> Assistant Researcher, Institute of Nuclear Energy Research.

<sup>2</sup> Researcher & Division Director, INER.

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

Received Date: December 29, 2021

Revised Date: February 17, 2022

Accepted Date: April 12, 2022