

15MW 浮動式離岸風機縮尺性能比較分析

江茂雄^{*,**1} 馬開東* 洪昱杰* 余承哲* 黃日新* 黃智遠*

*國立臺灣大學 工程科學及海洋工程學系
**臺大能源研究中心

關鍵詞：半潛浮動式離岸風機，台大浮台，技術成熟度，縮尺性能，aero-hydro-elastic-servo 耦合動態模擬

國科會計畫編號：NSTC 112-2218-E-002-049

摘要

為達到 2050 年淨零碳排目標，我國以訂定 2035 年 20.7GW 離岸風電開發之目標，而 2028 年後之離岸風場開發將超過 60m 水深區域，浮動式離岸風機技術將為迫切技術，我國目前由國科會及經濟部支持所發展的自主研發設計的半潛式浮臺，發展至技術成熟度(Technology Readiness Level, TRL) TRL4 的縮尺模型水槽實驗階段，我國浮式風機技術推動及發展速度仍落後於國際已達 TRL8-9，故急需規畫 TRL5-7 之 2MW 或 5MW 原型機組進行實海域測試驗證，使我國趕上國際浮式風機技術。然而，TRL5-7 之單一 2MW 或 5MW 原型機組開發計劃所需經費相當高，2MW 原型機組開發計初估約需 6 億台幣以上。本研究針對 TRL5-7 2MW 及 5MW 實海域測試半潛浮動式離岸風機動態分析、以台大浮台為基礎，進行 2MW 及 5MW 全系統風力機與載台、繫泊之 aero-hydro-elastic-servo 耦合動態模擬分析以及縮尺性能比較。

前言

淨零碳排已成為國際間的普世價值，台灣政府也將目標著眼於 2050 年淨零碳排。近年來隨著台灣固定式離岸風機場域逐漸飽和，離岸風場將逐漸往 60m 以上水深開發，此水深區域會較為適合浮動式離岸風力發電機。而我國目前由國科會及經濟部支持所發展的自主研發設計的半潛式浮台，發展至技術成熟度(Technology Readiness Level, TRL) TRL4 的縮尺模型水槽實驗階段，落後於目前國際已達 TRL8-9，因此急需規畫 TRL5-7 之 2MW 或 5MW 原型機組進行實海域測試驗證。

而本研究以縮尺之中型版本台大浮台為基礎，進行 2MW 及 5MW 風力發電機與載台、繫泊之全系統 aero-hydro-elastic-servo 耦合動態模擬分析。

模擬軟體架構及介紹

本文整體的模擬軟體架構是在 SIMPACK 和 MATLAB/SIMULINK 中所建立。SIMPACK 為多體系統分析軟體，用作浮式風機整體運動分析，浮式風機整體模型建在其中，含葉片、塔架、機艙、輪軸，以及浮動式水下基礎。MATLAB/SIMULINK

中則是建立發電機及葉片變旋角控制系統的數學模型。HydroDyn[1]、AeroDyn[2]及 MAP++[3]為分別進行浮台運動分析、葉片塔架空氣動力學分析、及簡化的繫泊系統分析。圖 1 為系統模擬軟體架構關係圖，各個軟體分析之數值都會及時回傳至 SIMPACK 中進行全域性的模擬分析，實作結合空氣動力、波浪力、結構系統動態、控制系統的動態分析。

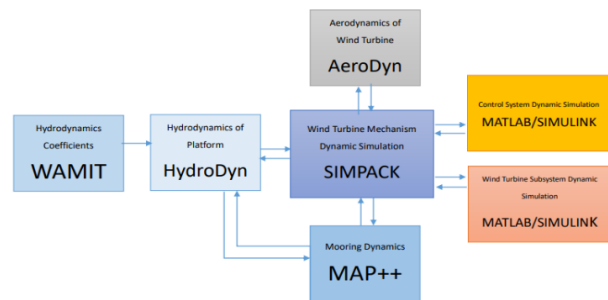


圖 1 系統模擬軟體架構關係圖

浮式風機發電機動態模擬模型

本研究使用之浮動式風力發電機為，2MW 及 5MW 風力發電機搭配，原先為 15MW 風機設計之

¹ 聯絡作者 江茂雄 (mhchiang@ntu.edu.tw)

台大浮台[4]，縮尺版本的中型台大浮台，水深設定為 70m，採用 3×2 繫泊設定。圖 2 為 2MW 及 5MW 浮式風機。

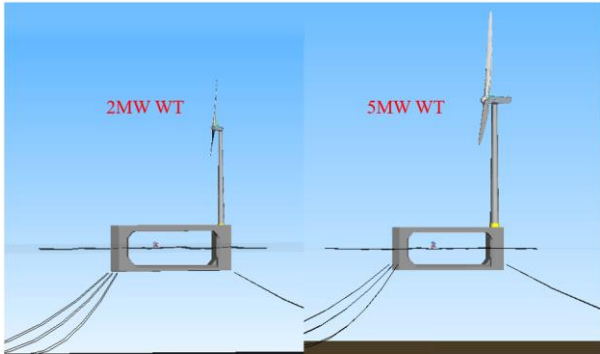


圖 2 2MW 及 5MW 風機搭配縮尺台大浮台

本文 2MW 風機建模為採用 Harakosan 2MW 水平軸上風型三葉片風力發電機設計[5]。

本文 5MW 風機建模為 NREL(Nation Renewable Energy Laboratory) 5MW 水平軸上風型三葉片風力發電機，設計參考 NREL Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development 報告書[6]。

風力發電機控制策略

■ 風力發電機分區控制策略

風力發電機控制策略以風速區分為三個區間，最佳葉尖速比區間、定轉速控制區間、功率恆定區間。分區示意圖如圖 3 所示。

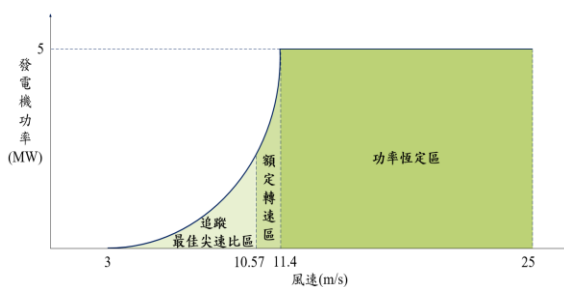


圖 3 5MW 風力發電機各風速區域控制策略圖

➤ 最佳葉尖速比區間

風速大於切入風速時，風力發電機的葉片轉子便會開始轉動，藉由設計發電機變轉速控制系統，使轉速能追蹤最佳葉尖速比以達到最佳發電效率。

➤ 定轉速控制區間

風力發電機轉子轉速會先達到額定轉速，再達到額定風速也就是到達額定功率。因此透過發電機變轉速控制系統，使轉子轉速維持在額定轉速不繼續增加，以避免風力發電機組的損壞。

➤ 功率恆定區間

風速達到額定風速時，風力發電機的發電功率會達到額定功率，此時需要透過葉片變旋角控制系統改變葉片翼型攻角來調整、減少風能的擷取，保持額定功率的輸出，降低風機附載及損壞。

■ 風力發電機控制系統架構

風力發電機控制系統分成兩大部分，風力發電機控制系統架構圖如圖 4 所示，上方區域為發電機變轉速控制系統，會先根據風速算出此時轉子轉速參考值，並跟 SIMPACK 中此時實際轉速相減，作為控制器輸入，經由轉速控制器算出發電機定子 q 軸電流目標值，再經過應用磁場導向控制的永磁同步發電機得到目前轉子電磁力矩，並將力矩值傳至 SIMPACK，實現轉子轉速控制。

而下方區域為葉片變旋角控制系統，將此時發電機功率與額定功率相減，作為控制器輸入，控制器算出此時葉片旋角目標值，並將此目標角度與 SIMPACK 中此時實際旋角角度相減，再經由變旋角控制器及液壓系統產生此時葉片旋角轉矩，並將轉矩值傳至 SIMPACK 驅動葉片轉動，實現葉片變旋角控制，使功率維持穩定。

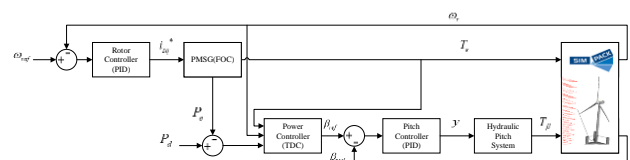


圖 4 風力發電機控制系統架構圖

動態模擬結果及討論

模擬條件為 3 m/s 至 16 m/s 的 200 秒上升風速，跟 200 秒 16 m/s 風速，及 200 秒 16 m/s 加 3% 紊流之風速。搭配有義波高 1.4 m 譜峰周期 7.8s 的波浪，進行 2MW 及 5MW 浮式風機全系統的動態模擬與控制分析。2MW 風機模擬結果如圖 5，5MW 風機模擬結果如圖 6 所示，其中包含(a)風速、(b)波高、(c)轉子轉速響應、(d)轉子轉速誤差、(e)發電功率響應、(f)葉片旋角響應、(g) surge、(h) sway、(i) heave、(j) roll、(k) pitch、(l) yaw。由圖 5、圖 6 之(c)、(e)、(f)可看出，兩支風機皆可正常運轉發電，轉子轉速控制及葉片旋角控制效果良

好，能使風力發電機轉速及功率維持穩定，並且從 (g) ~ (l) 來看，浮台運動良好，整體運動限制在很小的範圍內。

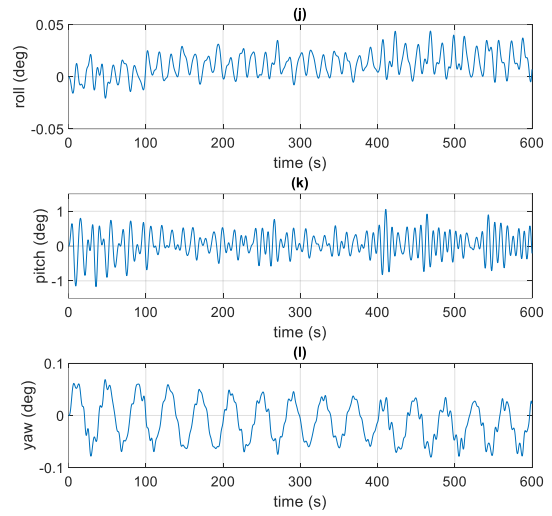
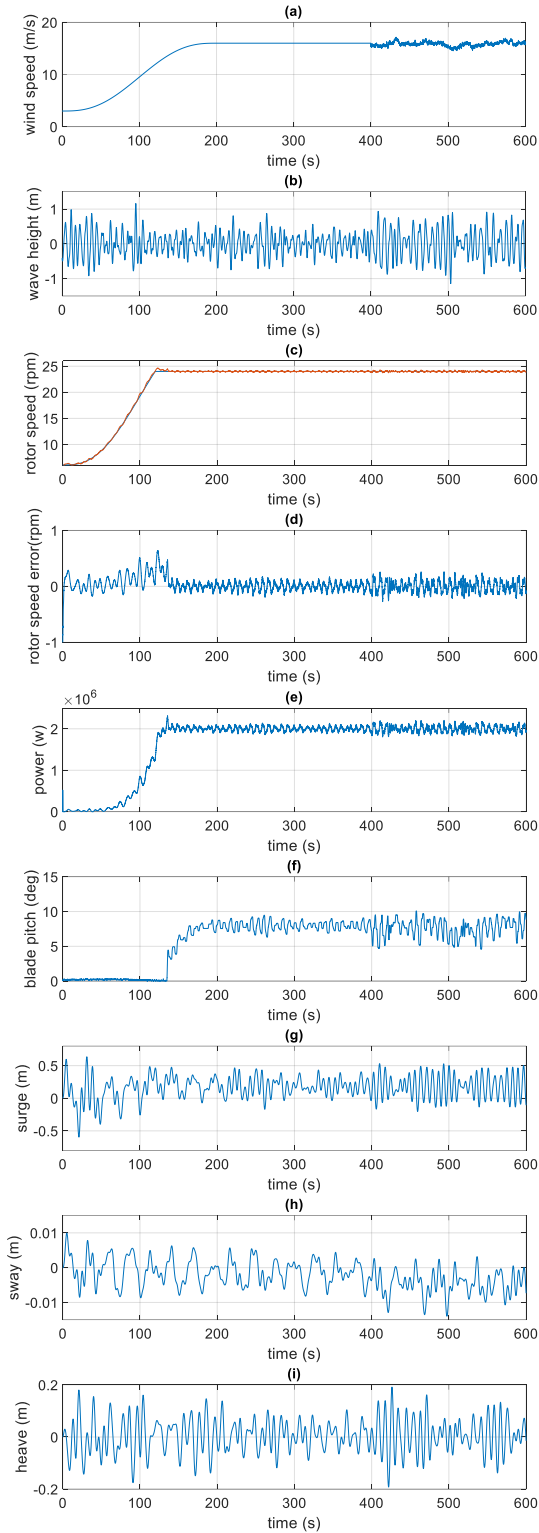
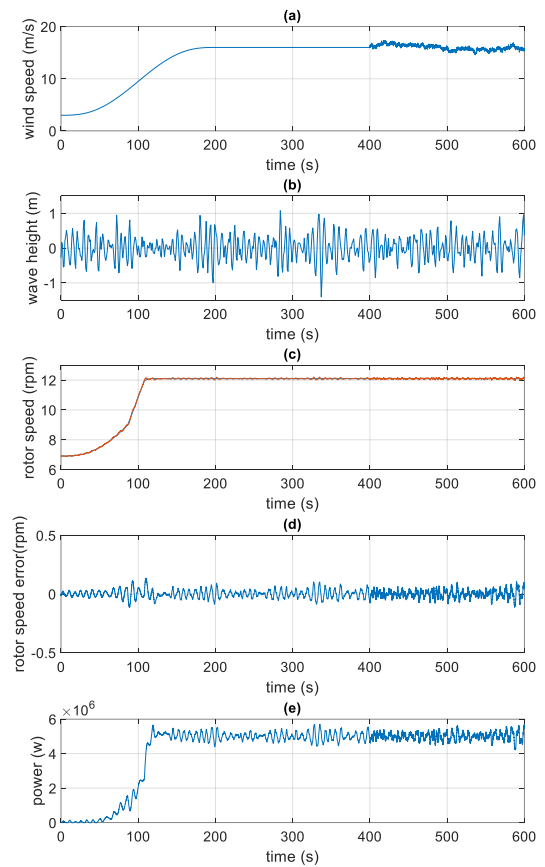


圖 5 2MW 風機模擬結果圖，
 (a)風速、(b)波高、(c)轉子轉速響應、(d)轉子轉速誤差、(e)發電功率響應、(f)葉片旋角響應、
 (g)surge、(h) sway、(i) heave、
 (j) roll、(k) pitch、(l) yaw



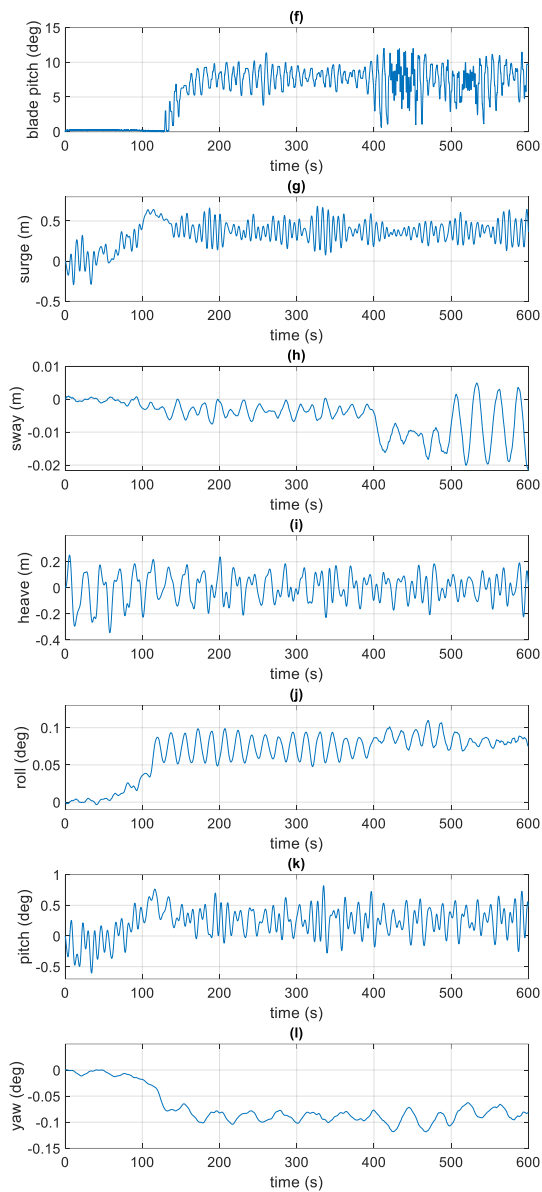


圖 6 5MW 風機模擬結果圖，
 (a)風速、(b)波高、(c)轉子轉速響應、(d)轉子轉速
 誤差、(e)發電功率響應、(f)葉片旋角響應、
 (g) surge、(h) sway、(i) heave、
 (j) roll、(k) pitch、(l) yaw

結論

本文以 SIMPACK 為主要浮式風機模擬環境，結合 MATLAB/SIMULINK，進行縮尺中型臺大浮台，搭配 2MW 及 5MW 風機之浮動半潛式離岸風力發電機，全機組動態模擬與閉迴路控制。在 SIMPACK 環境下建置風力發電機組的機械結構建置，包括風力發電機之葉片、塔架、輪轂、機艙，以及半潛式浮台基礎部分的中型臺大浮台及其繫泊系統。並由 HydroDyn、AeroDyn 及 MAP++ 為分別進行浮台運動分析、葉片塔架空氣動力學分析、及簡化的繫泊系統分析。而 MATLAB/SIMULINK 中則是建立直驅式永磁同步發電機及液壓葉片變旋角控制系統的數學模型。模擬條件設定 3 m/s 至 16 m/s 的風速搭配有義波高 1.4 m 的波浪，進行全系統的動態模擬與控制分析。在模擬結果中，搭載 2MW 及 5MW 風機之浮式風機皆能正常運行發電，且浮台運動良好。因浮台原先設計就考慮需要承受基隆外海測試場域之強勁風浪，浮台設計的較為寬大，而可乘載較大之風機。所以採用 5MW 風機搭配縮尺之中型台大浮台，在正常運行風浪情況下，會有較好的能源效率。

致謝

感謝國科會提供本研究之計畫經費補助 (計畫編號: NSTC 112-2218-E-002-049)。

參考文獻

1. W. TURBINES, "Offshore Wind Turbine Hydrodynamics Modeling in SIMPACK."
2. A. C. H. David J. Laino, "AeroDyn USER'S GUIDE to the Wind Turbine Aerodynamics Computer Software," National Renewable Energy Laboratory (NREL), Dec 2002.
3. Masciola, M (2016). "Map++ Documentation Release 1.15," Technical report, National Renewable Energy Laboratory-NREL.
4. Glib Ivanov, I-Jen Hsu, and Kai-Tung Ma, "Design Considerations on Semi-Submersible Columns, Bracings and Pontoons for Floating Wind," *J. Mar. Sci. Eng.* 2023, 11(9), 1663.
5. 陳昌聖, "以 FAST 結合 MATLAB/SIMULINK 進行 2MW 直驅式風力發電機動態模擬與分析之研究", 國立台灣大學, 工程科學及海洋工程學系, 碩士論文, 指導教授: 江茂雄, 2011。
6. J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott, "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development," No. NREL/TP-500-38060, National Renewable Energy Lab (NREL), Golden, CO (United States)(2009).

15MW FLOATING OFFSHORE WIND TURBINE SCALE MODEL PERFORMANCE COMPARISON AND ANALYSIS

*Mao-Hsiung Chiang*** *Kai-Tung Ma*** *Yu-Chieh Hung** *Chen-Che Yu** *Jih-Hsin Huang**
*Chih-Yuan Huang**

*Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University

** Energy Research Center, National Taiwan University

Keywords: Semi-Submersible Offshore Wind Turbine, TaidaFloat, Technology Readiness Level (TRL), Scale Model, Aero-hydro-elastic-servo Coupled Dynamic Simulation

ABSTRACT

In order to achieve the goal of net-zero emissions of greenhouse gases by 2050, the Taiwan government has set a target of 20.7GW offshore wind power development by 2035. After 2028, the offshore wind farm will extend to areas with water depths exceeding 60 meters. Thus, the FOWT (Floating Offshore Wind Turbine) technology will be urgently needed. Currently, our country semi-submersible floating platforms development which supported by National Science and Technology Council and Ministry of Economic Affairs has reached Technology Readiness Level (TRL) 4 in scaled model tank experiments. However, the development of our country's FOWT technology still below international levels, which have reached TRL 8-9. Therefore, it is necessary to plan for the testing and verification of 2MW or 5MW prototype at TRL 5-7 in real sea conditions to catch up with international FOWTs development. However, the cost of a single 2MW or 5MW prototype FOWT is quite high, with an initial estimate of over 600 million NTD. This study focuses on the dynamic analysis of TRL 5-7 2MW and 5MW semi-submersible floating offshore wind turbine testing in real sea conditions, with the platform developed by National Taiwan University. The research conducted aero-hydro-elastic-servo coupled dynamic simulation analysis of the entire system of 2MW and 5MW wind turbines and platforms, as well as scale performance comparisons.