

以跡流導向方式進行前後排列風機功率最適化數值模擬

李可掬* 江衍成* 黃世翹* 林宗岳** 范秉天** 趙修武*¹

*國立臺灣大學 工程科學及海洋工程學系
**財團法人中國驗船中心 研究處研發組

關鍵詞：功率最適化，跡流導向，前後排列，風機，流場模擬

摘要

本文基於額定風速條件以跡流導向方式進行前後排列的兩 5MW 三葉風機輸出功率最適化的數值模擬。藉由運用旋轉座標系統定義風機葉片運動，風機周圍三維流場可由穩態連續方程式、動量方程式以及 $k-\omega$ 紊流模型加以描述，使用 CCM+ 進行風機周圍流場三維數值模擬。風機與前方遠處未擾流風向的夾角定義為導向角，本文研究在後方風機方向垂直於前方遠處風向時，前方風機導向角與總輸出功率的關係。在特定風況條件下，風機的相對應轉速由風機功率曲線以疊代的方式加以決定。本研究的數值模擬發現，前方風機的功率隨著導向角的增大而降低；後方風機的功率隨著導向角的增大而成長，當導向角達到特定範圍，後方風機的功率趨於定值。當前後風機相距八倍轉子直徑時，兩風機總功率的最大值發生於導向角 6° ，總功率可達額定輸出功率的 97.8%，若與未使用跡流導向的前後排列風機相較，總功率輸出可增加 18.7%。

前言

鑑於台灣海峽具有 16 座世界前二十名優良風場 [1]，台灣離岸風電實具有極大發展潛力。隨著民國 105 年 10 月竹南風場兩座 4MW (百萬瓦) 離岸風機 (Siemens SWT-4.0-120) 建置完成 [2]，我國的離岸風電產業已經掀起序幕。先前研究中，本研究團隊已分析額定條件下葉片方位角對於大型水平軸 2MW 風機葉片氣動力負荷特性的影響，獲得葉片受力、葉片轉矩、葉片彎矩、葉片轉子轉矩與葉片方位角的關係 [3,4]，以及對於陣風條件進行暫態風場模擬 [5,6] 與緊急停機過程風機氣動力特性進行分析 [7]。同時使用雙向流固耦合方式，預測風機葉片變形對於運轉狀態水平軸風機氣動力與噪音的影響 [8-10]，並將該研究成果應用於開發預兆式離岸風機營運維修系統 [11,12]。此外，台灣為颱風好發地區，本團隊亦評估台灣地區颱風造成風力發電機倒塌之風險 [13] 及 NREL 5MW 風機於台灣彰濱外海地區極限風速下之氣動力負荷 [14]，並探討在颱風風況下風向角與方位角對於大型水平軸風機 Z72 氣動力負荷特性的影響，獲得葉片轉矩、機艙平擺力矩、風機轉子轉矩與風向角、方位角的關係 [15]。

本研究團隊為達成大型離岸風場功率最佳化之工業目標，以模擬現役臺灣西海岸前後排列之 2MW 三葉水平軸風機周圍流場為起點，預測前後兩風機氣動力負荷，分析前方風機跡流對於後方風機的影響

[16]。利用結合制動盤理論的計算流體力學模型，進行離岸風場中風機陣列三維穩態紊流場干涉模擬，得知風機跡流效應為風場功率輸出之關鍵課題 [17]，且利用跡流導向 (wake steering) 之手段達到主動性跡流控制 (wake control)，將大幅提升後排風機效率，進而提升風場總功率輸出 [18]。本文模擬不同導向角 (steering angle) 條件的前後排列 NREL 5MW 三葉水平軸風機周圍流場，預測後風機在不同導向條件下之功率輸出，以了解跡流導向對後方風機的影響，進而分析整體風機之最佳功率輸出。

數學模型與數值方法

本文使用納維爾-斯托克斯方程式 (Navier-Stokes Equations) 描述風機周圍流場，在風機額定運轉條件下，三維計算空間可視為不可壓縮流場，統御方程式的不可壓縮流形式如 (1) 與 (2) 所示：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (2)$$

其中 ρ 為流場密度， t 為時間， u_i 為流場速度 u 在座標 i 方向上流場速度分量。 p 為流場壓力， μ 為流體黏滯係數， g_i 為重力加速度在 i 方向的分量。

本文使用剪應力傳輸 $k-\omega$ 紊流模型 (Shear-Stress Transport, SST)，求解模型中之紊流動能 k (Turbulent

¹ 聯絡作者 趙修武 (chausw@ntu.edu.tw)

Kinetic Energy) 以及其消散率 ω (Specific Dissipation Rate) 以計算紊流黏滯係數，紊流模型方程式如(3)與(4)所示：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = G_k - Y_k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = G_\omega - Y_\omega + D_\omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

其中 α_k 與 α_ω 分別為 k 與 ω 傳輸方程的紊流普朗特數， μ_t 表示紊流粘度， G_k 與 G_ω 分別為 k 與 ω 傳輸方程式生成項， Y_k 與 Y_ω 分別為 k 與 ω 傳輸方程式的消散項， D_ω 表示為紊流擴散項。本文使用流力分析軟體 CCM+ 求解上述非線性聯立方程組，該軟體採用有限體積法離散統御方程式，並利用[19]提出之 SIMPLE 法，以分離納維爾史托克斯方程式中壓力與速度的耦合性。

計算條件

本文的目標風機定義如圖 1 所示。固定坐標系原點位於塔柱底部中心，氣流入流方向為負 x 軸方向， z 軸方向向上與塔柱中心軸重合。 α_s 為風機導向角(steering angle)，定義為轉子轉軸與入流夾角。本文所分析目標風機為 NREL 離岸型 5MW 三葉水平軸風機，其輪轂中心前沿高度(z_{hub})為 90m，轉子掃掠直徑(D)為 126 m，運轉額定風速及功率為 11.4 m/s 及 5 MW，設計運轉轉速自切入轉速 7 RPM 至額定轉速 12.1 RPM[20]。計算空間示意圖如圖 2 所示。本研究採用幕次函數(Power Law)描述風速分佈，如式(5)所示：

$$V = V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^\alpha \quad (5)$$

其中 V 為離地高度位置 z 之平行地表入流風速， V_{hub} 為輪轂高度位置的風速， z_{hub} 為輪轂離地高度， α 為幕次指數。本研究分析案例的輪轂高度風速(V_{hub})使用額定入流風速，幕次指數(α)參考平坦地形值 0.1。流場計算空間使用數個網格加密區間以減低網格造成的離散誤差，特別是兩風機間的流場空間，如圖 3 所示。本研究採用轉動座標方式模擬風機運轉的葉片運動，即離散葉片及其附近圓盤區域網格，以葉片轉軸定義為進行順時鐘旋轉之參考軸。本研究使用六面體網格以離散計算空間，計算網格總數約為四千萬。

計算結果

本研究首先進行不同風速條件之單一風機正常運轉的功率驗證，特定風速下風機所對應轉速則由風機的設計功率曲線以疊代方式獲得，此時該風機不考慮導向角效應。圖 4 為本研究的計算結果與[20]比較， P^* 為無因次風機功率定義為

$$P^* = \frac{P}{P_R} \quad (6)$$

其中 P 為風機功率， P_R 為額定功率。發現本研究採取的數值模型具有足夠的定量精確性。接著考慮在額定風速條件下前後排列風機的流場計算，分析前風機導向角的六類案例，分別為 0° 、 3° 、 6° 、 9° 、 12° 、 15° ，後方風機則無施加導向運動。圖 5 為導向角為 0° 的兩風機間流場，以指數型態分佈的氣流在經過前方風機後，被風機吸收部分能量，在風機後方產生明顯的跡流區，此時風速的軸分量向失去與高度方向的相依性，並同時導入額外的切向速度分量。前方風機跡流與後方風機作用後，氣流再次產生減速效應，跡流效應更趨明顯。圖 6 至圖 9 為其他導向角條件下流場的縱剖面(風機中心面)速度分佈圖，計算結果顯示，隨著前排風機導向角增加，其產生之跡流逐漸偏移，使後方風機覆蓋於跡流的比例大幅減少，因此後方風機功率受跡流影響變小，輸出功率逐漸回升至額定功率。圖 7 為前後排列風機無因次功率輸出與導向角的關係， P_1^* 為前方風機無因次功率、 P_2^* 為後方風機無因次功率與 P_t^* 為前後風機無因次功率分別定義如下：

$$P_1^* = \frac{P_1}{P_R} \quad (7)$$

$$P_2^* = \frac{P_2}{P_R} \quad (8)$$

$$P_t^* = \frac{P_1 + P_2}{P_R} \quad (9)$$

其中 P_1 為前方風機功率， P_2 為後方風機功率。本研究的數值模擬發現，前風機的功率隨著導向角的增大而降低；後風機的功率隨著導向角的增大而成長，當導向角達到特定範圍，後風機的功率趨於定值。當前後風機相距八倍轉子直徑時，兩風機總功率的最大值發生於導向角 6° ，總功率可達理想輸出功率的 97.8%，若與未使用跡流導向的前後排列風機相較，總功率輸出可增加 18.7%。

結論

本研究以數值方式討論跡流導向對於額定風速條件下前後排列的 5MW NREL 風機輸出功率的影響，使用 CCM+ 進行風機周圍流場三維數值模擬。本研究的數值模擬發現，前方風機的功率隨著導向角的增大而降低；後方風機的功率隨著導向角的增大而成長，當導向角達到特定範圍，後方風機的功率趨於定值。當前後風機相距八倍轉子直徑時，兩風機總功率的最大值發生於導向角 6° ，總功率可達額定輸出功率的 97.8%，若與未使用跡流導向的前後排列風機相較，總功率輸出可增加 18.7%。由本文的研究可以說明跡流導向方式能有效地降低前方風機對於後方風機的跡流干擾，可進一步應用於風場運維最適化工作，避免風機間跡流干擾的現象，提升整體風場效能。

參考文獻

1. <http://www.gwec.net/about-winds/wind-energy-faq/>
2. <http://technews.tw/2016/11/06/台灣首座離岸風力發電明年運轉,能供電8000戶家庭/>
3. 李文傑、江俊明、趙修武,“運轉狀態下風力發電機之氣動力負荷數值研究”,第二十五屆中國造船暨輪機工程研討會,台北,2013。
4. 莊岳祥、趙修武,“額定條件運轉風機葉片氣動力特性計算”,第二十八屆中國造船暨輪機工程研討會,台北,2016。
5. 郭真祥、趙修武、楊淳宇、李文傑,“考慮陣風條件之暫態風機周圍風場模擬”,第二十四屆中國造船暨輪機工程研討會,台北,2012。
6. 郭真祥、趙修武、楊淳宇、張智章,“濱海複雜地形之風場模擬”,第二十四屆中國造船暨輪機工程研討會,台北,2012。
7. 郭真祥、趙修武、楊淳宇、李岱柏、林宇、李仲凱,“水平軸離岸風機緊急停機過程氣動力特性分析”,第二十六屆中國造船暨輪機工程研討會,基隆,2014。
8. 趙修武、江俊明,“考慮流固耦合效應之水平軸風力發電機氣動力特性數值研究”,2013年台灣風能學術研討會,基隆,2013。
9. 趙修武、林宇、李念澤,“水平軸離岸風機雙向流固耦合氣動力特性分析”,2014年台灣風能學術研討會,台北,2014。
10. 趙修武、李念澤,“大型水平軸風機運轉葉片之氣動力噪音計算”,第二十七屆中國造船暨輪機工程研討會,高雄,2015。
11. 蔡進發、郭真祥、蔡國忠、王昭男、趙修武、周亞諄、李仲凱、林宗岳、郭家齊、湯耀期、李念澤,“預兆式離岸風機營運維修系統之開發(1/3)”,2014年台灣風能學術研討會,台北,2014。
12. 蔡進發、蔡國忠、王昭男、趙修武、葉柏廷、楊其昌、詹勳智、陳泰瑜、湯耀期、秦正宇,“預兆式離岸風機營運維修系統之開發(2/3)”,2015年台灣風能學術研討會,台北,2015。
13. 郭真祥、蔡國忠、趙修武、楊淳宇、李文傑,“台灣地區颱風造成風力發電機倒塌風險之研究”,2012年台灣風能學術研討會,台南,2012。
14. 郭真祥、蔡國忠、趙修武、楊淳宇、李仲凱、李岱柏,“NREL 5MW 風機於台灣彰濱外海地區極限風速下之氣動力負荷數值模擬研究”,2013年台灣風能學術研討會,基隆,2013。
15. 李可掬、趙修武,“額定條件運轉風機葉片氣動力特性計算”,第二十八屆中國造船暨輪機工程研討會,台北,2016。
16. 李可掬、趙修武,“前後排列風機之氣動力負荷數值研究”,2016年台灣風能學術研討會,基隆,2016。
17. 李可掬、范秉天、林宗岳、趙修武,“離岸風場風機跡流數值模擬”,2017年台灣風能學術研討會,彰化,2017。
18. Gebraad, P. M. O. (2014). Data-driven wind plant control (Doctoral dissertation, Delft University of Technology).
19. STAR-CCM+ User's Manual.

20. Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., & Scott, G. (2009). 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).

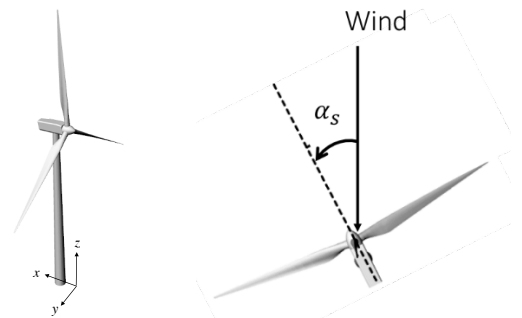


圖 1 風機座標與導向角定義

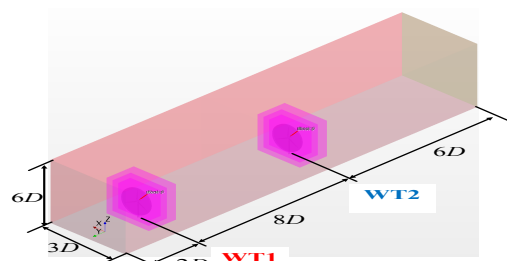


圖 2 計算空間示意圖

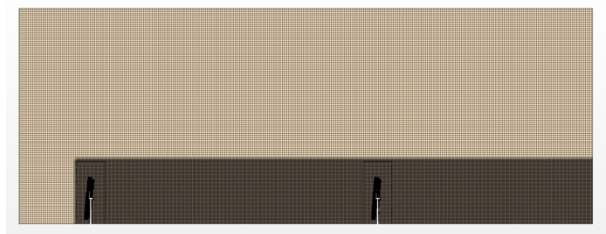


圖 3 前後排列風機周圍流場網格佈置

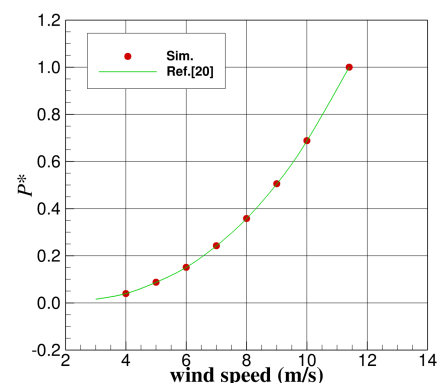


圖 4 單一風機正常運轉功率驗證

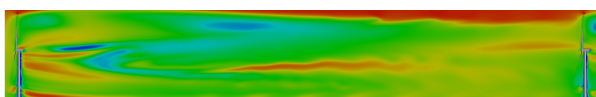


圖 5 前後排列風機間流場($\alpha_s=0^\circ$)

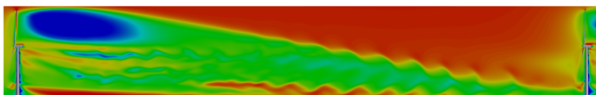


圖 6 前後排列風機間流場($\alpha_s=6^\circ$)

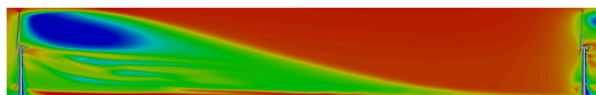


圖 7 前後排列風機間流場($\alpha_s=9^\circ$)

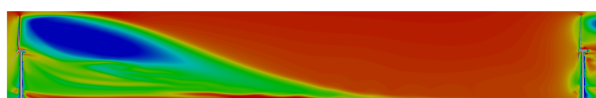


圖 8 前後排列風機間流場($\alpha_s=12^\circ$)

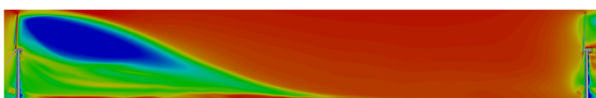


圖 9 前後排列風機間流場($\alpha_s=15^\circ$)

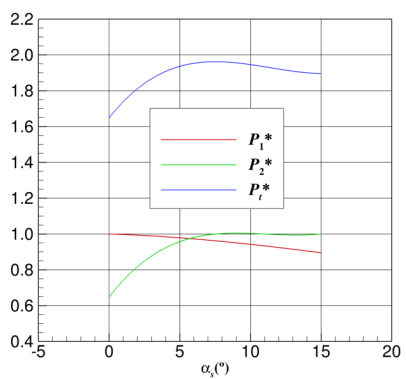


圖 7 前後排列風機無因次功率輸出

NUMERICAL STUDY ON THE POWER OPTIMIZATION OF TWO CASCADING WIND TURBINES VIA A WAKE STEERING APPROACH

K. C. Lee* Y. C. Jiang* S. K. Wong* T. Y. Lin** B. Nelson** S. W. Chau*

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

**Research Department, CR Classification

Keywords: power optimization, wake steering, cascading, wind turbines, flow simulation

ABSTRACT

This paper numerically investigates the power optimization of two cascading three-bladed 5MW wind turbines. Power optimization is implemented via a wake steering approach, where a three-dimensional flow simulation is conducted around the target horizontal-axis wind turbines operating at the rated wind speed. The flow field is described by the steady continuity and momentum equations incorporated with a k-w turbulence model and are solved by the commercial software Star-CCM+. In the proposed wake steering approach, the angle between the normal direction of the first turbine and the incoming wind, i.e., the steering angle, varies from 0° to 15° , whereas the second one is always aligned with the incoming wind direction. An iterative process following the power curve of the target wind turbines is adopted to determine the corresponding rotation speeds of both turbines under different steering situations. The power of the first turbine declines with the increase of the steering angle, whereas the that of the second turbine grows with the rise of the steering angle. The power of the second turbine reaches its design power output when the steering angle exceeds an upper limit. For two wind turbines spaced by 8 rotor diameters, the maximum total power output is found at the steering angle of 6° , where the total power is 97.8% of the ideal power output and 18.7% power increase is expected compared to the case without employing wake steering.