

離岸風場風機跡流數值模擬

Wake Modeling of Wind Turbines in an Offshore Wind Farm

李可掬¹、范秉天²、林宗岳²、趙修武^{1*}

臺灣大學工程科學與海洋工程學系¹、財團法人中國驗船中心研究處²

Ke-Chu Lee¹, Bryan Nelson², Tsung-Yueh Lin², Shiu-Wu Chau^{1*}

¹Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University

²R/D Section, CR Classification Society

chausw@ntu.edu.tw

摘要

本研究目的在建立描述風機三維紊流場的制動盤模型，然後藉由分析不同離岸風場中風機三維跡流場，獲得個別風機在不同風況下的功率輸出，並討論風機間的干涉特性。在數值風場模擬中使用制動盤模型的主要目的在於降低風機跡流場模擬所需巨量數值計算需求以及相對應模擬方法的複雜度，因此在離散風機流場計算空間時不使用風機的實體幾何外形，而利用等效物體力模型獲得風機轉子對於風機周圍流場的影響，也就是將三維轉子葉片在空間中的掃掠區域簡化為具備等效物體力的制動盤。這種做法不但能避免生成包覆於複雜幾何外形葉片外部網格的難題，亦不需使用移動網格方式模擬風機轉子的空間運動，僅需要生成卡氏網格系統，後將等效物體力適當地分佈於葉片轉子通過的空間網格內，因此能使用較為簡易的模擬方法進行流場模擬，達到有效縮短流場分析時間之目的。

關鍵詞：跡流、風機、離岸風場、數值模擬、制動盤模型、流場計算。

Abstract

This paper proposes an actuator disk model for the prediction of the wind turbine wake behavior in the wind farms due to its advantage in reducing the required modeling complexity as well as the required computational cost. In this approach, no wind turbine geometry is considered when generating numerical grids to discretize the computational domain. The impact of wind turbine blades on the incoming flow is modeled via an actuator disk model, where the actuator disk is defined by the swept region of the rotor in space, and a body force distribution representing the aerodynamic characteristics of the rotor is assigned within this virtual disk. This approach neither requires dense grid points to precisely describe the blade shape nor demands a moving grid technique to depict the rotor motion of wind turbines, such that a Cartesian grid coupled with an appropriate body force distribution is able to effectively analyze the wind turbine wake flow. This study first presents the proposed actuator disk model for predicting three-dimensional turbulent wind turbine flow, and the case studies of various wind conditions are followed to estimate the power output of an offshore wind farm along with the understanding of the interferences among wind turbines.

Keywords: Wake, wind turbine, offshore wind farm, numerical simulation, actuator disk model, flow computation.

I. 前言

鑒於世界前二十名優良風場中即有 16 處位於台灣海峽[1]，因此台灣離岸風電較陸域風電更具發展發展潛力的優勢。隨著民國 105 年 10 月竹南風場首批兩座 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。再先前研究中，本研究團隊已分析額定條件下大型 2MW 水平軸風機葉片氣動力負荷特性，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]，對於陣風條件下暫態風機流場行為模擬[5,6]，以及緊急停機過程中風機氣動力特性[7]分析。接著本研究團隊使用雙向流固耦合方式，預測風機彈性與剛性葉片對於運轉狀態水平軸風機氣動力與噪音的影響[8-10]，並應用於開發預兆式離岸風機營運維修系統的研究[11,12]。另外台灣易受颱風侵襲，本團隊評估台灣地區颱風造成風力發電機倒塌之可能風險[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特性[14]，並探討在颱風風況下大型水平軸風機 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]。基於考量風機跡流效應是台灣離岸風場建置之關鍵課題之一，因此本團隊分析臺灣西海岸現役之 2MW 三葉水平軸風機周圍流場，預測前後排列之運轉兩風機氣動力負荷，以了解前方風機跡流對於後方風機氣動力的影響[16]。

惟現行以轉動風機葉片完整幾何外形的計算流體力學模型進行風機跡流模擬之模擬方法相當複雜，且必須耗費巨量數值計算時間與能量，故本文提出較為簡易的模擬方法進行風機跡流場模擬，達到在有效精度條件下得以有效縮短流場分析時間之目的。本研究目的在建立制動盤理論的計算流體力學模型，藉由分析離岸風場的三維風機間跡流干涉特性，獲得個別風機在不同風況下的功率輸出，得以進行目標風場內擬用不同風機選址方案的優劣評估。

II. 數學模型與數值計算方法

本研究使用雷諾平均化納維爾史托克斯方程式 (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation) 描述風機周圍的穩態不可壓縮流場，如下所示：

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

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

其中 ρ 為流體密度， u_i 為流場平均速度 u 在座標 i 方向上流場速度分量。 p 為流場壓力， ν 為流體等效動黏滯係數

($=v_m+v_t$)， v_m 為流動黏滯係數， v_t 為紊流動黏滯係數。本研究同時使用 k - ε 紊流模型，以求解紊流模型中之紊流動能 k (Turbulent Kinetic Energy) 以及其消散率 ε (Dissipation Rate of Turbulent Kinetic Energy) 的關係：

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(k u_j) = + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\varepsilon u_j) = + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_{\varepsilon 1} P_k \frac{\varepsilon}{k} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

其中 σ_k 、 σ_ε 、 $c_{\varepsilon 1}$ 、 $c_{\varepsilon 2}$ 與分別為 k 與 ε 傳輸方程式的紊流模型係數， P_k 為紊流動能生成項。

本研究採用具有二階精確度有限體積法離散統御方程式[17]，並利用 SIMPLE 法分離雷諾平均化納維爾史托克斯方程式中壓力與速度的耦合關係，以及使用 MPI 程式庫達到平行計算之目的。圖 1 為本研究所建立 RANS 求解器的流程圖，首先基於現有的速度場建立驅動盤之物體力模型，接著求解動量方程式以獲得流場速度分佈，在更新流場邊界流量後，以連續方程式求解流場壓力場修正量，根據壓力修正量更新流場之速度場與壓力場，然後求解紊流模型，如此完成一次流場外循環疊代。而數值計算內循環疊代則為以 SIP 法[18]完成求解各個線性化的統御方程式。

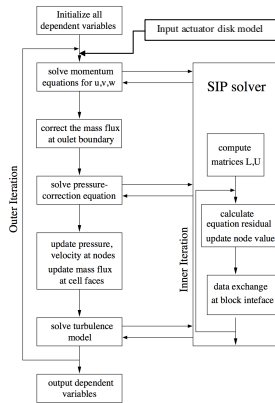


圖 1 RANS 求解器結構

由於葉片為運轉中風力發電機之最大受力貢獻來源，故本研究將三維轉子葉片在空間中的掃掠區域簡化為具備等效物體力的制動盤，利用葉片元素法(Blade Element Method)預測此制動盤於不同入流風速下之等效物體力。本研究將葉片分為數個彼此相鄰的葉片單元(Blade Segment)，葉片單元依據葉片主要截面(Blade Section)的間距(ΔR)以及其弦長(Chord Length, c)加以定義，圖 2(a)為葉片單元示意圖，葉片單元的中心點 P_i 以下式加以描述：

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{P}_0 + (2i - 1) \frac{\Delta R}{2} \mathbf{r} \quad (6)$$

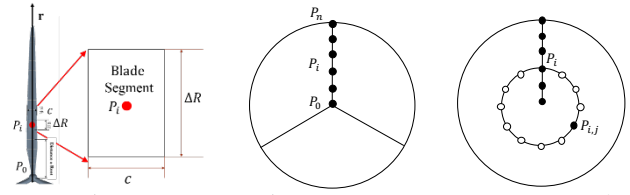
其中 $\mathbf{P}_0$ 為葉片轉軸位置， i 為葉片單元次序， $\mathbf{r}$ 為葉片徑向單位向量。接著將葉片單元物體力沿徑向分佈至相對應之 n 個葉片單元中心點上：

$$f_k(r_i) = f_k(i), \quad 0 \leq r_i \leq R, 0 \leq i \leq n, k = X, Y, Z \quad (7)$$

其中 r_i 為葉片單元中心位置， R 為葉片半徑， n 為葉片單元總數。圖 2(b)說明葉片單元中心點位置分佈的關係。本研究定義制動盤節點 $P_{i,j}$ ，其中 i 為徑向次序， j 為節點周向次序。將上述物體力模型之 n 個葉片單元中心點

以同心圓方式平均分配至周向的 m 個節點上， m 為周方位角的分割總數，如式(8)所示，圖 2(c)說明制動盤節點與葉片單元中心點的關係：

$$f_k^* = \frac{3}{m} f_k(r) \quad (8)$$



(a) 葉片單元 (b) 葉片單元中心點 (c) 制動盤節點
圖 2 葉片單元、葉片單元中心點與制動盤節點的關係

為避免產生三維風機跡流場計算的數值奇異性，本研究使用高斯分佈的物體力佈放函數[19]將物體力自制動盤節點 $P_{i,j}$ 位置佈放至三維卡式網格單元內：

$$\eta_k(d) = \frac{1}{\epsilon^2 \pi^{3/2}} \exp \left[- \left(\frac{d}{\epsilon} \right)^2 \right] \quad (9)$$

其中 ϵ 為給定之等效物體力作用區域， d 為卡氏網格中心點與制動盤節點的距離。因此，在三維卡式網格單元內考慮葉片影響的制動面等效物體力密度為

$$\mathbf{f}_s(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^B \int_0^R \mathbf{f}_{2D}(s) \eta_k(|\mathbf{x} - s \mathbf{e}_i|) ds \quad (10)$$

其中 $\mathbf{x}$ 為制動盤節點座標， s 為葉片徑向長度， B 為葉片數目， $\mathbf{f}_{2D}$ 為葉片單元的氣動力向量， $\mathbf{e}_i$ 為葉片徑向單位向量。

III. 風場計算條件

本研究使用的計算空間如圖 3 所示，其中 D 為葉片直徑。流場的流入邊界使用考慮海平面邊界層之風剖面分佈(Power-Law Wind Profile)：

$$V = V_{\text{Hub}} \left(\frac{z}{z_{\text{Hub}}} \right)^\alpha \quad (11)$$

其中 V 為離地高度位置 z 之平行地表入流風速， V_{hub} 為輪轂高度位置的額定風速， z_{hub} 為輪轂離地高度， α 為風速分布的冪次指數，離岸風場之 α 取為 0.1；流場的出口邊界使用速度梯度消失的假設；流場上方及側方使用對稱面條件，即垂直於邊界的流場物理量梯度為零；下方為海平面，速度給定為零。

本研究的目標風機為 NREL 5MW 離岸風機，目標風場為 5 列 5 行的風機陣列，風機間距為 4 倍轉子直徑如圖 4 所示。目標風向條件為 0° 至 360° ，風向角 α 的定義如圖 5 所示。

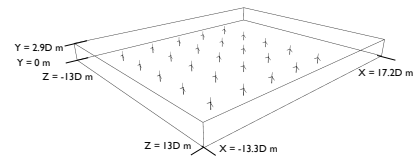


圖 3 離岸風場計算空間定義與尺寸

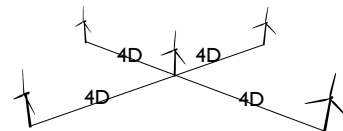


圖 4 陣列風機間距

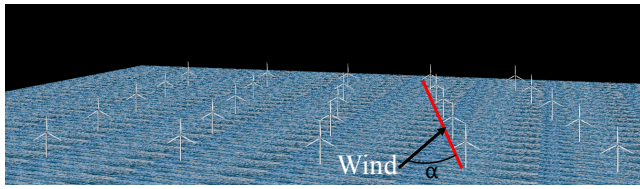


圖 5 離岸風場中風向角定義圖

III. 模擬計算結果

本節探討固定風機總數與間距條件下，風機排列位置對於風機功率之影響。圖 6 為對正排列(aligned)與交錯排列(staggered)風場於轉子高度之正規化軸向風速分布，其中正規化軸向風速 $\bar{U}$ 定義如下：

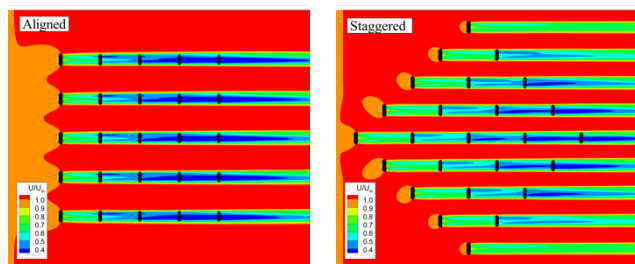
$$\bar{U} = \frac{U}{U_{in}} \quad (12)$$

其中 U 為風場之軸向(x 方向)速度， U_{in} 為目標風機之額定入流風速。圖 6(a)顯示，氣流經過前排風機時，被風機吸收部分能量，並在後方產生明顯跡流。其中坐落在跡流區內之後排風機，對氣流再次產生減速作用，跡流效應更為明顯。觀察圖 6(b)可以發現，在固定風場空間及風機總數條件下，風機交錯排列能較為有效地減少覆蓋於跡流中之風機，進而提升風場總體發電效率。圖 7 為沿入流風向之風場累積輸出功率比，其中風場累積輸出功率比 P_{CPR} 的定義如下：

$$P_{CPR} = \sum_m \frac{P_m}{P_{rated}} \quad (13)$$

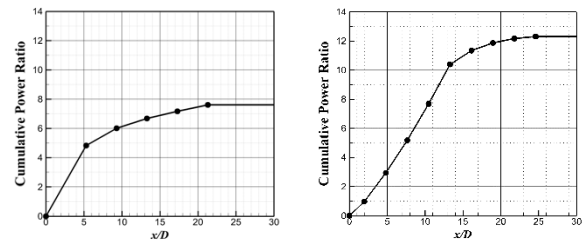
其中 P_m 為風場中給定入流風向位置內風機之輸出功率， P_{rated} 為目標風機額定輸出功率。計算結果顯示對正排風機陣列在 $1/6$ 風場處($x=5D$) 風場累積輸出功率比曲線逐漸趨於平緩，整體風場輸出功率比約為 7.5；而交錯排列風機陣列在 $1/2$ 風場處($x=15D$)功率成長趨勢才逐漸趨於平緩，交錯排陣列之整體風場發電效率可達對正排陣列之 1.67 倍。對正排陣列風場中，後面一列的風機基本上皆位於前面一列風機的跡流區中，使得後面一列風機的入流風速明顯降低，導致後面一列風機的輸出功率無法提高。這個結果說明風場陣列中直接迎風（即未覆蓋於前排風機跡流中）的風機數量對於提升輸出功率具有決定性貢獻。

圖 8 為對正排列風場於第一列至第五列風機後方一倍直徑處的風速分布，圖中顯示運轉中風機造成後方氣流軸向減速效應，以及在下游處誘導出旋轉運動，也就是後方流場軸向速度降低伴隨著切向速度的生成，反映了後排風機功率顯著下降之原因。比較第一列至第五列的風機減速效應，可以發現後排風機之軸向速度變異逐漸變小，即說明當入流愈慢時，風機減速效愈不顯著。



(a) 對正排列 (b) 交錯排列

圖 6 風場正規化軸向速度分佈圖



(a) 對正排列

(b) 交錯排列

圖 7 風場累積功率比曲線

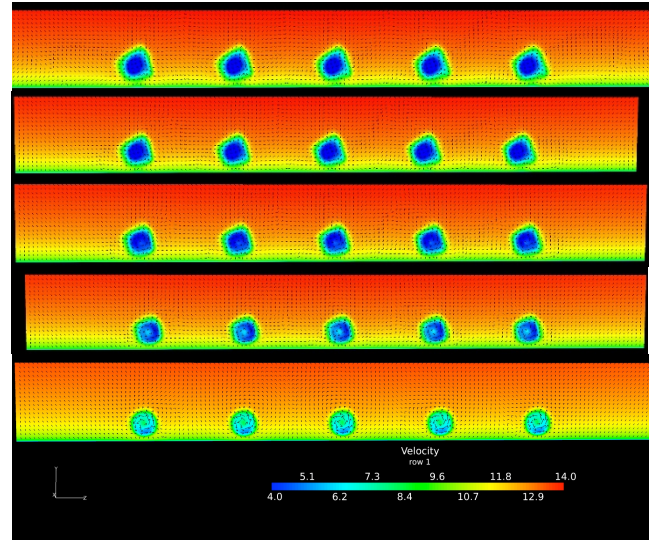


圖 8 風機後方軸向及旋向速度剖面圖（單位：m/s）

接著本研究探討風向對於離岸風場總發電功率的影響，尤其針對台灣海峽的主要風向（即北風至東北風）進行分析。圖 9 為不同風向角(α)與風機陣列總輸出功率比的關係，其中總輸出功率比 P_R 定義如下：

$$P_R = \sum_n \frac{P_n}{P_{rated}} \quad (14)$$

其中 P_n 為風場中任一風機之輸出功率。

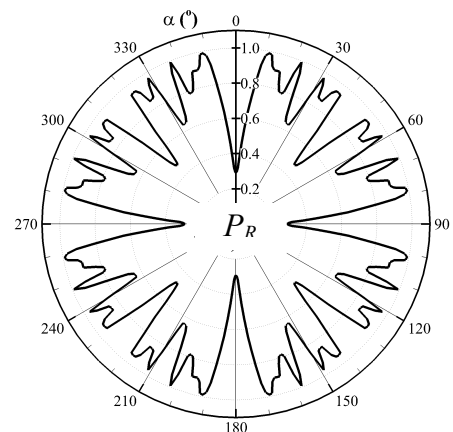


圖 9 目標陣列總輸出功率比風花圖

計算結果顯示風機陣列總輸出功率對風向極為敏感，總輸出功率對風向之變異值可達 27%，其中變異係數(CV)為變數標準差(standard deviation)除以變數平均數(mean)，其值與相關性成正相關：

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{\sum (P_R - \bar{P}_R)^2}{360}}}{\bar{P}_R} \quad (15)$$

由圖 9 可以發現風機陣列在正北風($\alpha=0^\circ$) 及東北風($\alpha=45^\circ$)情況下僅具有約三成之理想輸出功率, 在東北風($\alpha=22.5^\circ$)時則可獲得接近理想發電效率。圖 10 比較 $\alpha=0^\circ$ (總功率低) 及 $\alpha=22.5^\circ$ (總功率高) 之風場風速分布, 發現在風向 22.5° 與搭配 4 倍轉子直徑之風機間距的條件下, 後排風機得以有效地避開前排風機跡流, 此時風場總發電功率約為風向 0° 時的三倍。

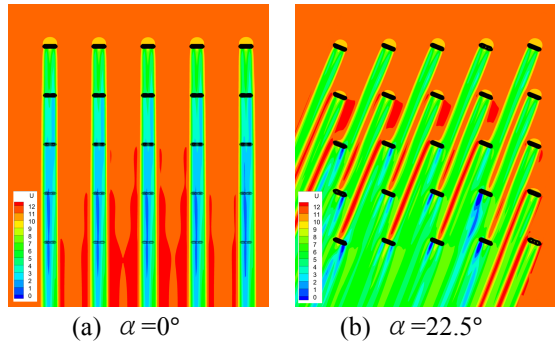
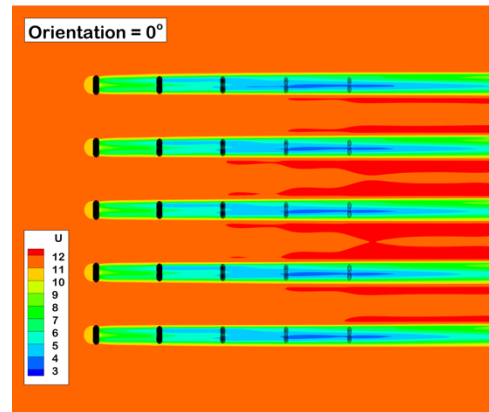
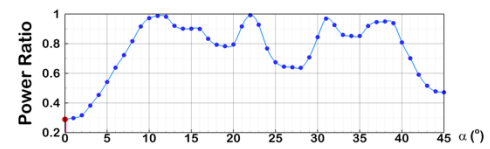


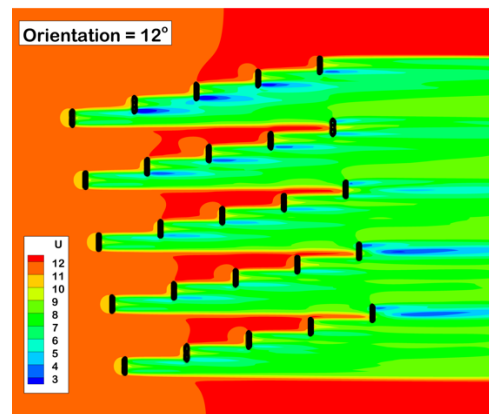
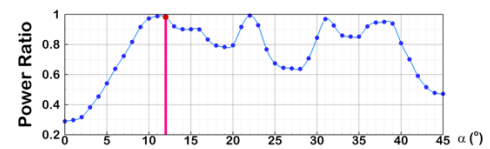
圖 10 風場軸向風速分佈 (單位: m/s)

本研究接著探討離岸風場陣列功率與列(row)的關係, 尤其是針對台灣海峽主的主要風向的情況分析, 即北風至東北風($\alpha=0^\circ$ 至 45°)的風向區間。圖 11 為目標風場陣列在風向 $\alpha=0^\circ$ 至 45° 之總輸出功率比及 $\alpha=0^\circ$ 、 6° 、 12° 時軸向風速分佈。

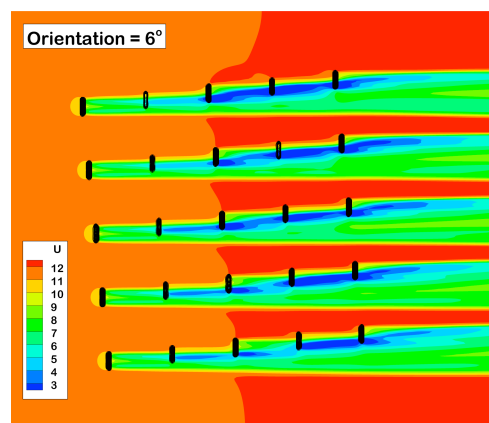
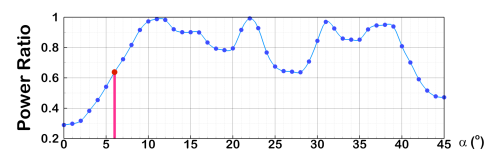
由圖 11(a)曲線圖之總輸出功率比與風向關係, 可以發現總輸出功率比隨著風向變化而產生在 0.3 與 1.0 區間內的非週期性的變化。總輸出功率比在某些風向範圍內變化不大, 例如 $10^\circ \leq \alpha \leq 12^\circ$ 、 $13^\circ \leq \alpha \leq 16^\circ$ 、 $18^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ 、 $26^\circ \leq \alpha \leq 28^\circ$ 、 $33^\circ \leq \alpha \leq 35^\circ$ 、 $36^\circ \leq \alpha \leq 39^\circ$ 、 $26^\circ \leq \alpha \leq 28^\circ$ 、 $44^\circ \leq \alpha \leq 46^\circ$, 但總輸出功率比的數值並不相同, 差異性顯著; 但在某些特定風向前後總輸出功率比的變化十分顯著, 例如 10° 、 22° 、 31° 、 39° , 然而其變化趨勢不甚一致, 具明顯差異性。圖 11(a)、圖 11(b)與圖 11(c)的等高線圖分別顯示三個典型風向的風場流速分佈, 當風向由 0° 變化至 12° , 後排風機被覆蓋於前方跡流的比例逐漸減少, 使得後排風機的入流風速增加, 造成後排風機輸出功率的提升, 因此總輸出功率比在風向為 12° 時為風向為 0° 時的三倍。圖 12 為前後五列風機之平均正規化風速及總功率比特性圖, 其中圖中柱狀圖示為該列所屬五座風機總輸出功率, 虛線表示該列所屬五座風機之平均入流風速。本研究計算結果顯示, 風機入流風速與風機輸出功率具有相高關性: 當風向為 0° 時 (以綠色表示), 後四列風機完全被覆蓋於前方風機跡流中 (圖 11(a)), 入流風速沿著下游方向快速減少, 造成後列風機輸出功率嚴重下降, 此時第五列風機僅得以輸出一成額定功率; 當風向為 6° 時 (以藍色表示), 第二與第四列風機受前方跡流影響較為顯著 (圖 11(b)), 僅具約低於四成之額定功率輸出, 若能藉由選擇適當風機間距應可有效避免後列風機落於前方跡流中, 避免風機之低功率輸出情形; 當風向為 12° 時 (以紅色表示), 後四列風機能避開前方跡流影響 (圖 11(c)), 皆能獲得額定入流條件並得以出額定功率, 因此該風向條件下, 具備藉由調小陣列間距以提高風場發電密度的潛力。



(a) $\alpha=0^\circ$



(b) $\alpha=6^\circ$



(c) $\alpha=12^\circ$

圖 11 總輸出功率比及風場流速分佈 (單位: m/s)

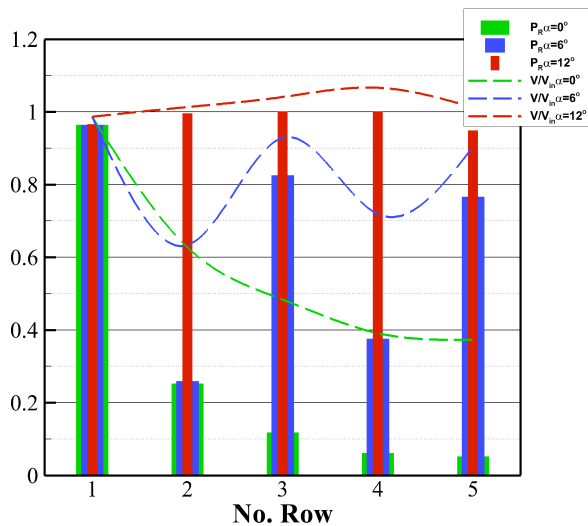


圖 12 五列風機輸出功率比與入流風速比較圖

IV. 結論

本研究完成結合計算流體力學方法的制動盤模型，建立分析風場中風機三維穩態跡流場的平行化數值模型，得以預測個別風機在不同風況下的功率輸出，達到有效縮短流場分析時間之目的。本研究採用具有二階精確度有限體積法求解連續方程式、動量方程式以及紊流模型，並利用 SIMPLE 法分離壓力與速度的耦合關係。使用卡式網格系統離散風機流場計算空間，利用等效物體力模型獲得風機轉子對於風機周圍流場的影響，將葉片在空間中的掃掠區域簡化為具備等效物體力的制動盤，利用葉片元素法計算制動盤之等效物體力。為避免產生三維風機跡流場計算的數值奇異性，以高斯分佈將物體力自制動盤節點位置佈放至三維卡式網格單元內。以制動盤模型分析在額定條件下配置 NREL 5MW 離岸風機的 5 列 5 行的風機陣列，獲得風向、排列方式與風場功率輸出的關係。在排列方式與風場功率關係的研究中發現，由於能有效避開前方風機跡流效應，交錯排列的功率約為對正排列的 1.67 倍。在風向與風場功率關係的研究中發現：風場輸出功率對風向極為敏感，其變異值可達 27%；風場輸出功率比隨著風向變化而產生在 0.3 與 1.0 區間內的非週期性的變化，如風向區間 $10^\circ \leq \alpha \leq 12^\circ$ 。該值在某些風向範圍內變化不大；但某些特定風向前後風場功率比的變化則十分顯著，如風向為 22° 。

IV. 誌謝

感謝財團法人中國驗船中心提供部分研究經費與研究人力，使本研究得以順利完成。

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、張智韋，“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、周亞諱、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 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 台灣風能學術研討會，基隆，2016。
- [17] Chau, SW. Numerical Investigation of Free-Stream Rudder Characteristics Using a Multi-Block Finite Volume Method. Universität Hamburg (1997)
- [18] Stone, HL. Iterative Solution of Implicit Approximation of Multidimensional Partial Differential Equations. *SIAM Journal of Numerical Analysis*, Vol. 5, pp.530-558. (1968)
- [19] Trolborg, N. Actuator Line Modeling of Wind Turbine Wakes. PhD Thesis. Technical University of Denmark (2008)