

OAC-NTU-108-025(研究報告)

離岸風場間跡流干涉研究

正式報告

海洋委員會補助研究

中華民國 108 年 10 月

「本研究報告僅供海洋委員會施政參考，並不代表該會政策，該會保留採用與否之權利。」

OAC-NTU-108-025(研究報告)

離岸風場間跡流干涉研究

正式報告

學校：國立臺灣大學

指導教授：趙修武

學生：劉沁雅

研究期程：中華民國 108 年 5 月至 108 年 12 月

研究經費：新臺幣貳萬元

海洋委員會補助研究

中華民國 108 年 10 月

「本研究報告僅供海洋委員會施政參考，並不代表該會政策，該會保留採用與否之權利。」

目 次

表 次	3
圖 次	4
摘 要	5
第一章 前言	6
第一節 研究緣起	6
第二節 問題背景與現況分析	7
第三節 研究目的	8
第四節 研究重點及預期目標	8
第二章 研究方法與過程	9
第一節 致動盤模型建立	9
第二節 風場環境參數分析	12
第三節 風場跡流模擬	13
第三章 結果與討論	15
第一節 致動盤模型建立	15
第二節 風場環境參數分析	16
第三節 風場跡流模擬	17
第四章 結論	19
參考資料	19

表 次

表 3-1 DTU 10MW 風機資訊.....	15
表 3-2 福海風場風速風向聯合機率表.....	16

圖 次

圖 2-1	風機周圍流場求解流程圖.....	10
圖 2-2	致動盤節點關係示意圖.....	10
圖 2-3	計算網格系統.....	11
圖 2-4	風機流場模擬邊界條件.....	12
圖 2-5	雙風機計算網格系統.....	14
圖 2-6	潛力場址風機分布.....	14
圖 3-1	轉子面平均風速與輸出功率關係圖.....	15
圖 3-2	風速 6m/s 流場模擬結果 xz 平面.....	15
圖 3-3	風速 12m/s 流場模擬結果 xz 平面.....	15
圖 3-4	福海風場風速風向機率圖.....	16
圖 3-5	調整後風速風向機率圖.....	16
圖 3-6	間距 4D 流場模擬結果 xz 平面.....	17
圖 3-7	間距 8D 流場模擬結果 xz 平面.....	17
圖 3-8	後方風機相對前方風機風速及功率比率.....	17
圖 3-9	單元風場風機排列.....	18
圖 3-10	額定風速下各風向跡流功率損耗百分比.....	18
圖 3-11	線性方法與 RANS 方法計算損耗比較.....	18
圖 3-12	目標風場各風向發電功率與額定功率比值.....	18

摘要

一、研究緣起

根據經濟部能源局於 104 年公告的「離岸風力發電規劃場址申請作業要點」，選定 36 處淺海及深海區域的優良場址供申請，其中 25 處離岸風場場址集中於彰化外海。雖然彰化外海離岸風場具備風能開發的有利條件，但設置過度密集的離岸風場除了造成生態環境衝擊以及與航道衝突的負面因素外，各離岸風場也無法排除互相干涉使得彼此功率不彰的窘境[1]。在取消部分潛在風場後，目前的風場的密集度仍然偏高。由於我國潛在離岸風場主要受到季風特性影響，即長期東北及西南穩定風向為主[2]，因此有必要研究與分析離岸風場長期受到鄰近風場跡流影響導致效率低落以及疲勞損壞的潛在風場營運不利因素的可能性。

二、目的

本研究擬探討在風場密集且具有主流風向的區域，如彰化外海潛在離岸風場場址，風場跡流對於鄰近風場的影響，其結果可提供未來潛在風場選址規劃或是潛在風場容量因子評估提供參考依據。此方法能夠在風場中風機實際配置未知的情況下計算實際風場入流速度分布。

三、研究方法及過程

本研究使用風機致動盤模型計算離岸風場的三維與紊流效應，分析個別離岸風場的功率輸出，再進一步分析多個離岸風場緊鄰的跡流效應對個別風場的發電效率影響。本研究根據 107 年通過遴選的離岸風場位置、大小、裝置容量為參考進行風場計算，以受其他風場包圍的彰化外海 14 號潛在風場為目標風場，模擬緊鄰風場的跡流對其造成入流風速的改變及功率輸出的降低程度。

四、重要發現

本研究發現在彰化外海的潛在離岸風場可能受到鄰近風場的跡流影響，容量因子約比單一風場低 10.16%，在裝置容量 600MW 的風場中約會有 26MW 的損耗。

五、結論與展望

目前由經濟部能源局公布的離岸風場潛在場址密集度仍然偏高，且有明顯的主流風向，緊鄰風場的跡流對風場造成的影響可能造成輸出功率的降低，長期而言也可能降低受影響風機的壽命。因此在規劃風場時建議考量緊鄰風場的跡流影響，未來除了能更改風機排列位置外，亦可能採用其他可降低跡流影響的機制。

第一章 前言

第一節 研究緣起

近年來，由於氣候變遷與永續發展意識備受重視，燃燒化石燃料產生的能源污染問題及核能安全的疑慮逐漸浮現，因此再生能源技術成為世界各國爭相發展的新興產業。我國於 98 年正式立法通過「再生能源發展條例」[3]，正式開始推動綠色能源產業。在眾多的能源型態中，離岸風力發電由於不受土地限制，加上台灣海峽擁有世界頂尖的風速條件[4]，因此相較於其他的再生能源更具有發展潛力。截至 106 年底，全球的離岸風力發電總容量達 18,814MW，比前一年增加約 30%的容量，同時風場的建置成本預估將於五年內下降至原來的一半[5]，顯示這項產業邁向大規模的商業化而逐漸成熟。根據經濟部規劃的新能源政策，再生能源的發電比率於 114 年需達 20%，其中離岸風力發電的裝置容量需達 5.5GW[6]。

離岸風力發電的選址上，若以美國國家再生能源實驗室(NREL) 建議的 50 m 高度風場風能資源評估等級為標準，分析台灣領海範圍風能密度 800 W/m² 及平均風速 9m/s 以上的區域，台灣島西部離岸約有 16,500 km² 的風能可開發面積[7]。然而，台灣海峽的海床坡度隨著離岸距離陡降，因此整體海床深度較深，因應深度變化範圍可區分為水深 5~20m 的淺海區、水深 20~50 m 的深海區、水深 50 m 以上的極深區的三個主要區域，其中淺海及深海區共計有 8326 km² 的可開發面積[8]。

根據經濟部能源局於 104 年公告的「離岸風力發電規劃場址申請作業要點」，選定 36 處淺海及深海區域的優良場址供申請，如圖 1 所示，並於 107 公告「離岸風力發電規劃場址容量分配作業要點」後進行遴選，目前已有 10 處場址通過遴選[9]。依據離岸風場潛在場址分布位置，有 25 處離岸風場場址集中於彰化外海平均水深約 40m 處的區域，整體風場規模相當龐大。彰化外海離岸風場的主要優勢為風能密度高、彰雲砂脊區域地形隆起且相對平坦穩定、地震規模較小[10]等因素，故為台灣周遭較適合發展的離岸風場區域[11]。

雖然彰化外海離岸風場具備風能開發的有利條件，但設置過度密集的離岸風場除了造成生態環境衝擊以及與航道衝突的負面因素外，各離岸風場也無法排除互相干涉使得彼此功率不彰的窘境[1]。基於消除與航道衝突的疑慮以及保留預定航道規劃位置，新的離岸風場規劃取消了與航道衝突的數個潛在風場場址。在新的規劃中保留了先前規劃的 11~19 號與 26~29 號風場，以及取消了部分離岸風場場址，但目前潛在離岸風場的密集度仍然偏高。由於我國潛在離岸風場主要受到季風特性影響，即長期東北及西南穩定風向為主[12]，因此有必要研究與分析離岸風場長期受到鄰近風場跡流影響導致效率低落以及疲勞損壞的潛在風場營運不利因素的可能性。

第二節 問題背景與現況分析

隨著全球能源永續發展的持續加溫與風力發電技術的日趨成熟，加上臺灣地區地狹人稠的地理特性，因此發展不需佔用陸地面積的離岸風力發電產業不但有助於降低我國對於進口能源的依賴度，同時提高我國能源自主性，是我國勢在必行的能源政策與方向。就技術成面來說，在建置離岸風場時，為了達到最大發電量，離岸風場風機安裝的數量以及風機彼此間的跡流效應，這兩個互為因果的因素必須同時加以考量。Liu 和 Yocke[13]等以數值方法求解風機後方的跡流場，並將其應用至單風機、兩平行風機、前後兩風機的模型並與風洞試驗的結果進行比較驗證。Méchalí[14]等以 SCADA 資料分析 Horns Rev I 風場的跡流效應，獲得不同風速及風向條件下，各風機與最前端風機的距離與發電效率減少幅度的關聯性。該研究顯示在兩風機的連線恰與風向平行時，受到跡流影響最大，效能降低幅度可達 50%。李[15]等研究三維流場中風機導向角對前後兩風機輸出功率的影響，並提出以跡流導向方式減少跡流影響，藉以提升風場效能。

對於整體風場的研究，多以簡化模型表示個別風機的流場特性，以平衡數值模擬所需求的流場精度以及所需要的計算資源。常見方式為使用風機轉子簡化為致動盤 (Actuator Disk Model, ADM)或是使用風機葉片簡化為致動線 (Actuator Line Model, ALM)的數值模型，得以進行後續的風場模擬工作。Mikkelsen[16]以三維致動盤模型模擬轉子空氣動力特性，並在數個案例中驗證葉片元素動量理論 (Blade Element Momentum, BEM)的精確度。李[17]等將致動盤應用於模擬整個風場中風機陣列的三維跡流場，獲得風向、排列方式與風場功率輸出的關係。Churchfield[18]等研究 ADM 及 ALM 兩種模擬方式的差異，比較兩者在風機轉子模型的網格解析度、葉片尖端損失校正以及物體力的佈置方式的優劣，並分析兩者對於發電量及跡流模擬的影響。該研究發現 ALM 可較為精確解析轉子周遭的跡流變化，而 ADM 則較能掌握遠方的跡流效應。在多個風場的相關研究方面，Frandsen[19]等藉由計算風機後方速度損失的回復距離探討巨大風場間應保持特定的間距以確保發電效率。陳等[20]的風場研究建議在多風場分析工作中單一風場的跡流效應可以使用等效風機的概念加以近似，以簡化風場分析的複雜性。

本研究擬針對受多個風場包圍的目標風場進行研究，在已知各風場場址分布以及裝置容量的情況下，以三維致動盤模型模擬排除其他風場干擾效應的目標風場的流場特性並預測其發電功率，接著探討考慮具有周圍風場干涉效應的目標風場的發電功率變化，以及該風場受其他風場跡流影響的程度。本研究結果可建議給定裝置容量風場場址規劃的適切大小，以及其容量因素範圍，可提供台灣海峽地區未來潛在場址規劃參考，以及銀行貸款作業所需評估風場產能的依據。

第三節 研究目的

基於能源安全性與自主性的要求，我國再生能源的發展日益受到重視，本研究藉由模擬現有潛在離岸風場的風機陣列流場，推估實際離岸風場運轉後可能面臨的跡流干涉問題。本研究目的旨在定量分析目前離岸風場排列緊密造成的輸出效率問題，提供在未知實際離岸風機陣列配置下進行既有潛在場離岸風場址發電效率的評估，以及未來規劃潛力場址界域劃分與分配方式的參考，達到離岸風力資源有效利用之目的。

第四節 研究重點及預期目標

本研究擬探討在風場密集且具有主流風向的區域，如彰化外海潛在離岸風場場址，風場跡流對於鄰近風場的影響。本研究結果可提供未來潛在風場選址規劃或是潛在風場容量因子評估提供參考依據。依據前述的動機，本研究擬探討的問題如下：

- (1) 氣流流經離岸風場後的風速損失
- (2) 離岸風場入流氣流受到上游風場干擾後輸出功率的變化
- (3) 預測不同風機陣列配置的離岸風場所造成的跡流效應

第二章 研究方法與過程

第一節 致動盤模型建立

本研究使用雷諾平均化聶維爾史托克方程式描述風機周圍的穩態不可壓縮流場 [17]：

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

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

其中 p 為流場壓力， ρ 為流體密度， μ_m 為流體動黏滯係數， μ_t 為紊流動黏滯係數。 u_j 為流場平均速度在 x_j 方向上流場速度分量， u_j' 為座標 x_j 方向速度與平均值差異變動量。以及使用 k - ε 紊流模型，求解紊流動能 k 和其消散率 ε 的關係：

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

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\varepsilon u_j) = C_{\varepsilon 1} P_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} \quad (4)$$

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

式中 C_μ 、 σ_k 、 σ_ε 、 $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 為紊流模型係數， P_k 為紊流動能生成項。

本研究擬以有限體積法離散聯立統御方程組，獲得離散化線性方程組並以疊代方式求解，進行穩態風場風機陣列流場模擬。本研究擬使用的 RANS 方程求解方式如下：首先藉由現有速度場建立致動盤模型的物體力，求解動量方程式得到速度分布，接著求解連續方程式取得流場壓力，然後根據更新後的速度與壓力場求解紊流模型，如此完成一個外循環疊代，持續外循環疊代至計算收斂為止，計算流程如圖 2-1 所示。

本研究將轉子掃掠平面化為佈置等效物體力的致動盤，葉片氣動力特性則以葉片元素法估算不同風速條件下的等效物體力分佈。首先定義葉片轉軸與轉子掃掠平面交點為原點(定義為 P_0)，並沿著葉片半徑方向將葉片分割為數個相鄰葉片截面單元，各葉片截面單元由該單元截距(ΔR)及弦長(c)加以定義，從葉片轉軸中心軸沿徑向分布的第 i 個單元中心點定義為：

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{P}_0 + (2i - 1) \frac{\Delta R}{2} \mathbf{r}, \quad 0 \leq i \leq n \quad (6)$$

其中 \mathbf{r} 為葉片徑向單位向量， n 為葉片單元總數。接著物體力 f_k 徑向分布定義在相對應的 n 個葉片截面單元中心點上：

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

其中 r_i 為葉片單元中心位置， R 為葉片半徑， k 為座標方向。接著定義致動盤節點 $P_{i,j}$ ， $0 \leq j \leq m$ ， m 為周向節點分布個數，致動盤節點位置如圖 2-2 所示。將上述物體力模型建立的 n 個葉片截面中心點以同心圓的方式分布至周向的 m 個節點上，此時具三葉片的致動盤節點的物體力分佈 f_k^* 可定義為：

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

為避免產生以致動盤模型計算風機流場產生的數值奇異性，本研究擬以高斯分布代表葉片截面單元的三維物體力分布[21]，即將物體力由節點 $P_{i,j}$ 佈放至三維卡氏網格內：

$$\eta_\varepsilon(d) = \frac{1}{e^{2\pi^{1.5}} \varepsilon^2} e^{-\left(\frac{d}{\varepsilon}\right)^2} \quad (9)$$

其中 ε 為葉片截面單元等效物體力作用距離， d 為卡式網格中心點與致動盤節點的距離。因此基於上述方法的卡式網格單元內物體力密度為

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

其中 \mathbf{x} 為致動盤節點座標， 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。

本研究利用李[15]以 FORTAN 語法開發的風機致動盤跡流模擬程式 WIFA3D 進行風場模擬，分析不同入流條件下風機跡流特性及輸出功率大小。

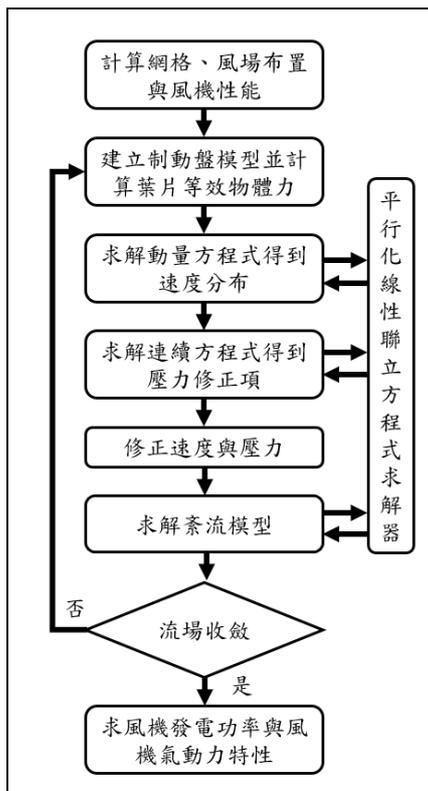


圖 2-1 風機周圍流場求解流程圖[17]

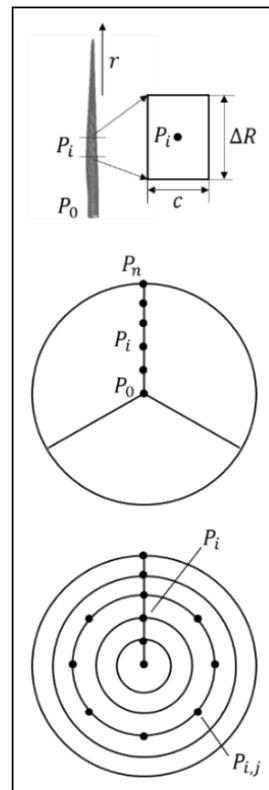


圖 2-2 致動盤節點關係示意圖[17]

本節的研究過程如下:

1. 計算網格生成

本研究使用六面體網格系統，如圖 2-3 所示。網格生成方式為在風機轉子面 z 方向範圍生成均勻網格，從轉子面頂部至最高邊界逐漸增大網格，從轉子面底部至最低邊界逐漸縮小網格。

2. 致動盤節點生成

利用生成的網格檔案以及節點控制參數檔案、風機參數設定檔案計算並配置致動盤模型節點。

3. 轉子面平均風速計算

本研究所使用 WIFA3D 程式的風場模擬使用轉子面平均風速作為參考風速，故需要先模擬單風機流場求得轉子面平均風速，對原始的風機參數進行修改後才能進行風場模擬，故於此步驟做轉子面平均風速計算。

風機流場模擬計算的邊界條件如圖 2-4 所示：入流邊界考量與海平面摩擦影響入流速度，使用風速剖面冪次分布(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 z 時平行地表的入流風速， V_{hub} 為輪轂高度額定風速， z_{hub} 為輪轂高度， α 為風速分布的冪次指數，本研究討論離岸風場，因此 α 取 0.1。下方為海平面，速度向量設為零。側面及上方使用對稱面邊界條件。後方流場出口使用速度梯度消失的條件。

將設定完成的風機參數、網格檔案及致動盤節點檔案輸入置流場求解器進行不同入流風速下的風場模擬，並依照各風向的模擬的結果修改風機參數，完成轉子面平均風速計算。

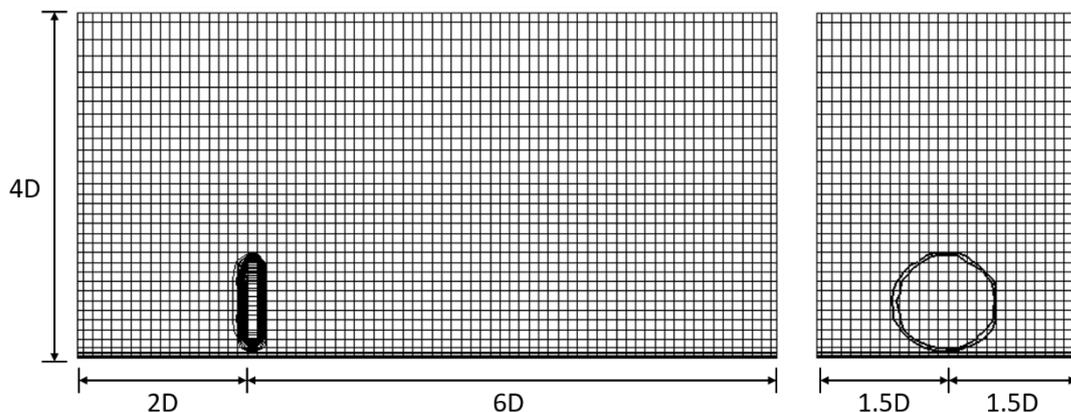


圖 2-3 計算網格系統。左圖為 xz 平面，右圖為 yz 平面，圖中黑色物體為風機轉子面所在位置。

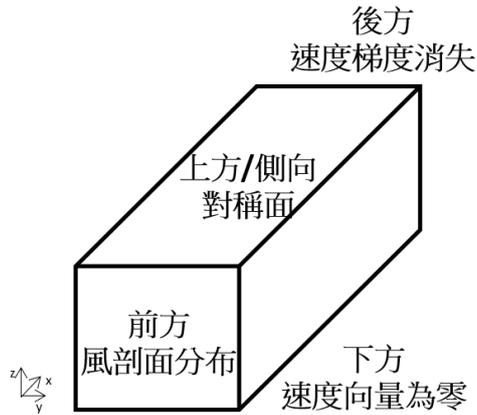


圖 2-4 風機流場模擬邊界條件

第二節 風場環境參數分析

本研究的目標風場雖位於彰化外海，但由於目前仍未有完整彰化外海離岸風場的風況資料，本研究擬以福海示範風場的風速及風向條件作為環境參數，作為彰化外海離岸風場的近似風況。本研究利用福海示範風場測風塔的量測數據並使用風速剖面幕次分布 (power law wind profile) 計算得目標風場輪轂高度的風速資料。

臺灣海峽海域受到季風特性影響，以長期東北及西南穩定風向為主，故主流風向的跡流影響更為顯著。本研究以固定風場空間與入流方向，以旋轉風機矩陣位置來模擬不同風向下的流場流況。預計以 45 度為單位進行一次目標離岸風場模擬，共取 8 個風向的風速進行目標離岸風場計算，得到各風向下未受鄰近離岸風場跡流影響的目標離岸風場輸出功率。

本節的研究過程如下：

1. 風速資料計算

將福海示範風場測風塔的量測高度與目標風場風機的輪轂高度不同，故需將量測數據以風速剖面幕次分布 (power law wind profile) 修正為目標風場輪轂高度的風速資料。

2. 風速風向機率分布

本研究取 8 個風向的風速進行目標離岸風場計算，將每個風向正負 22.5 度範圍內的風速分入該風向，並計算各風速與風向的聯合機率。將計算結果輸出以計算各風向下未受鄰近離岸風場跡流影響的目標離岸風場輸出功率。

第三節 風場跡流模擬

陳等[20]的研究指出風場風機陣列跡流效應可以使用單一等效風機加以近似。根據其研究成果，在不需詳細得知風場內風機配置的情況下，可依風場尺寸、外形、裝置容量、上下游風速等參數，計算風機後方的風速削減函數。但因目標離岸風場及其鄰近離岸風場直接相鄰，因此本研究以前排風場跡流效應生成的下游風速直接作為後排風場的上游風速，即建立上下游風速的函數關係。

本研究進行前後雙風機的流場模擬，分析結果後取得前後風機間的風速、間距及輸出功率衰減關係。將前一節建立的致動盤模型及風場環境參數延伸至前後雙風機的模擬，風場配置如下圖 2-5。以此配置藉由調整前後風機間距，模擬不同風機間距下的流場、風速、輸出功率差異。

之後進行單一風場與風場間的模擬，以預測多個風場相鄰時的跡流干涉影響。由於風場數量龐大，以有限體積分法求解紊流流場曠日費時，因此本研究改以 Jensen's model 進行模擬[22]。Jensen's wake model 假設風機後的風速與上下游風機軸向間距呈線性遞減，並以動量守恆推導，得兩風機間的風速衰減率 δ_i ：

$$\delta_i = 1 - \frac{u_i}{u_0} = \frac{1 - \sqrt{1 - C_T}}{\left(1 + \frac{k_w x}{r_r}\right)^2} \times \frac{A_{overlap}}{A_{rotor}} \quad (12)$$

其中 u_0 為上游風機入流風速， u_i 為下游風機入流風速， C_T 為風機的推力常數， k_w 為跡流衰減常數，於離岸風場時建議值為 0.04[23]， r_r 為風機轉子直徑。因下游風機不一定會完全處於上游風機的跡流干涉範圍內，所以需計算下游風機處於上游風機跡流範圍面積 $A_{overlap}$ 。當風機處於多支風機的跡流範圍內時，風機的總風速衰減率 δ ：

$$\delta = \sqrt{\sum \delta_i^2} \quad (13)$$

接著進行單一風場的跡流模擬，並與紊流模型的計算結果相比對，得知兩種模擬方式間的差異。以單一風場為單位，依據風場的遴選容量置入潛力場址位置，潛力場址相對位置及大小以經濟部能源局公告之潛力場址邊界點位座標計算，如下圖 2-6。將風場環境參數置入目標風場模型，模擬目標風場單獨存在時的發電效率。之後將周遭風場置入目標風場模型，模擬目標風場受相鄰風場跡流干涉時的發電效率。

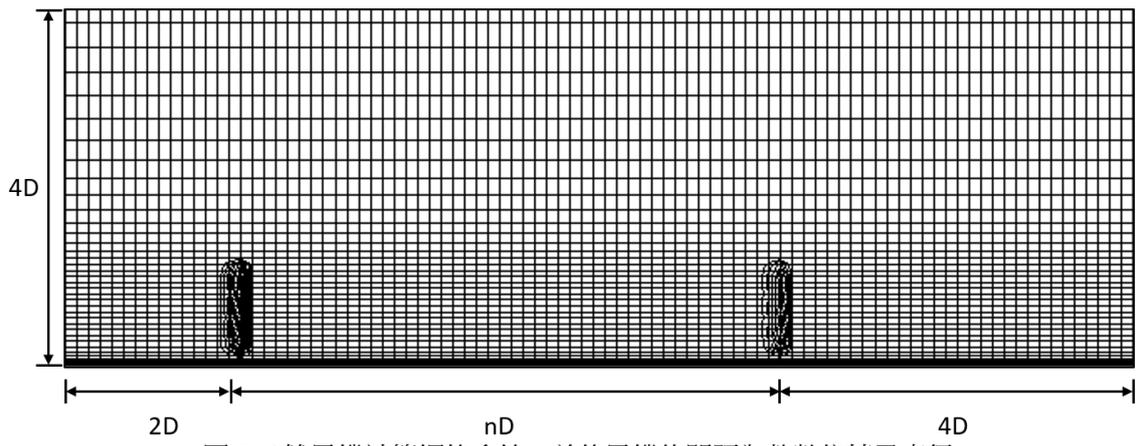


圖 2-5 雙風機計算網格系統。前後風機間距為整數倍轉子直徑

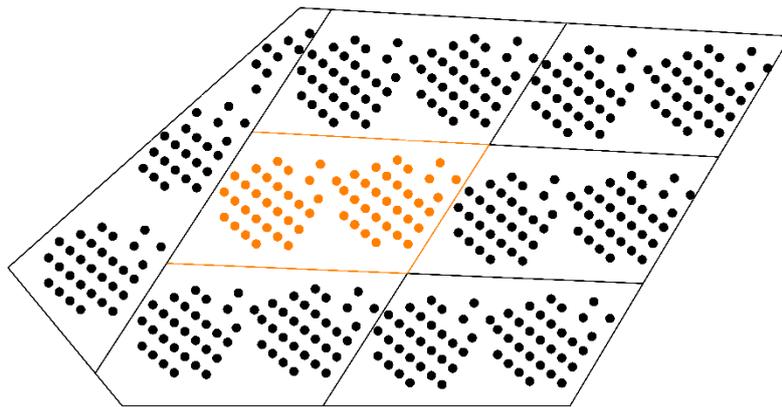


圖 2-6 潛力場址風機分布。圖中橘色處為目標風場

第三章 初步研究發現與成果

第一節 致動盤模型建立

本節建立致動盤模型，原定使用 8MW 的風機資料，但礙於詳細資料難以取得，最終使用開源的 DTU 10MW Reference Wind Turbine，相關資訊如下表 3-1。將設定完成的風機參數、網格檔案及致動盤節點檔案輸入置流場求解器進行不同入流風速下的風場模擬，計算轉子面平均風速。入流風速取 4~25m/s 每 1m/s 進行一次模擬，並取每次模擬結果繪製風速與功率的關係圖，如下圖 3-2。部分模擬流場結果可視化後用於觀察流場變化，如下圖 3-3、圖 3-4。

表 3-1 DTU 10MW 風機資訊

Rotor Diameter	178.3	m
Hub Height	119.0	m
Cut in wind speed	4.0	m/s
Cut out wind speed	25.0	m/s
Rated wind speed	11.4	m/s
Rated power	10	MW
Tilt Angle	5	°

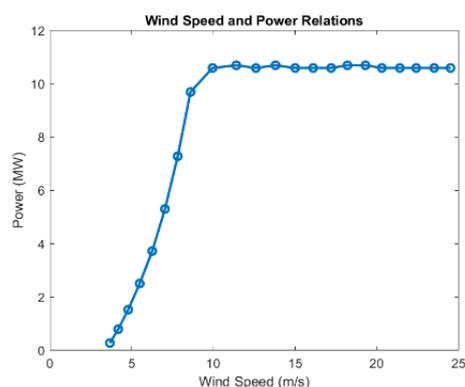


圖 3-1 轉子面平均風速與輸出功率關係圖

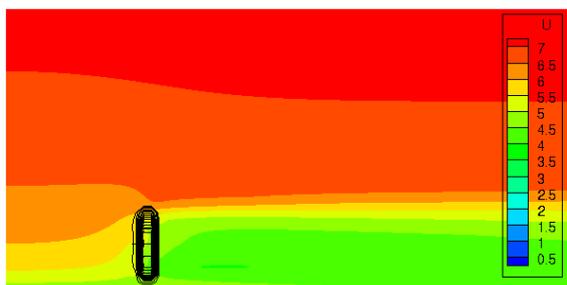


圖 3-2 風速 6m/s 流場模擬結果 xz 平面

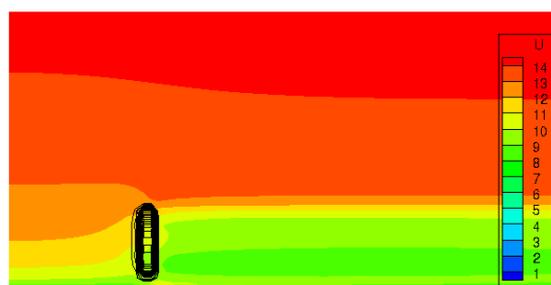


圖 3-3 風速 12m/s 流場模擬結果 xz 平面

第二節 風場環境參數分析

本研究使用福海示範風場測風塔量測數據的量測高度為 90m，而 DTU 10MW 風機的輪轂高度為 119.0m，故使用風速剖面幕次分布(power law wind profile)調整風速資料，並將原始資料與調整後資料繪製成風花圖，如下圖 3-5、圖 3-6。從圖中可見福海風場以北北東方向為主流風向，在設計風場配置時應以此風向的最佳化為優先。

本研究取共 8 種風向條件(即相鄰兩風向條件相隔 45° 風向角)進行目標離岸風場計算各風速與風向的聯合機率，如下表 3-2，在分為 8 個風向時以正北風發生機率最高、其次為東北風。將計算結果輸出以利後續計算各風向下未受鄰近離岸風場跡流影響的目標離岸風場輸出功率。

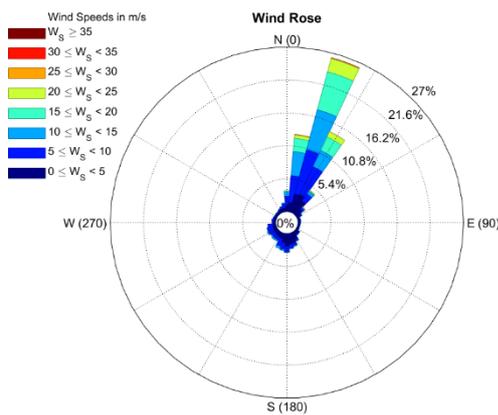


圖 3-4 福海風場風速風向機率圖

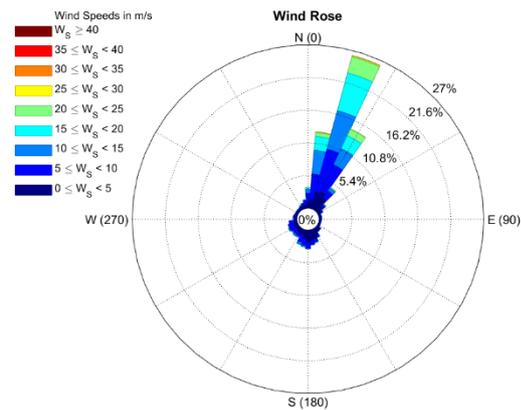


圖 3-5 調整後風速風向機率圖

表 3-2 福海風場風速風向聯合機率表

		風速風向聯合機率表 (機率單位%)															
		風速(m/s)															
		w≤2	2<w≤4	4<w≤6	6<w≤8	8<w≤10	10<w≤12	12<w≤14	14<w≤16	16<w≤18	18<w≤20	20<w≤22	22<w≤24	24<w≤26	26<w≤28	28<w≤30	30<w
風向	N	7.931	27.152	48.213	55.138	47.625	40.946	40.073	39.428	32.559	24.514	16.090	5.939	2.030	0.455	0.342	1.006
	NE	22.541	38.213	45.025	39.029	27.683	22.958	19.315	15.995	15.881	15.084	11.271	4.535	1.252	0.455	0.209	0.019
	E	5.901	6.546	3.776	1.347	1.290	0.797	0.361	0.171	0.171	0.095	0.114	0.019	0	0	0	0
	SE	7.703	16.128	12.409	3.245	1.385	1.518	0.664	0.740	0.133	0.133	0.038	0	0.019	0.019	0	0
	S	12.011	37.625	38.251	17.058	8.349	5.028	1.935	1.082	0.607	0.455	0.095	0.190	0.133	0.038	0	0
	SW	4.706	14.705	19.866	15.027	9.051	6.356	2.391	0.531	0.531	0.531	0.152	0.076	0.038	0.114	0.057	0
	W	3.586	8.159	16.640	11.195	0.949	0.474	0.512	0.512	0.398	0.076	0.095	0.019	0.019	0.019	0.019	0
	WN	3.320	7.684	8.159	3.434	1.044	0.493	0.512	1.006	0.930	0.076	0.038	0.019	0	0	0	0

第三節 風場跡流模擬

雙風機流場模擬使用第一節建立的致動盤模型及針對轉子面平均風速修正後的參數進行模擬。模擬方式為調整前後風機間距，在額定風速下做流場模擬，並分析後方風機的風速及輸出功率衰減比率。設定從 2 倍轉子直徑(D)至 12D 間每 2D 進行一次模擬，共五次模擬。可視化後的流場模擬結果如下圖 3-7、圖 3-8。比較後方風機相對前方風機的風速及輸出功率，如下圖 3-9，可見在後方 4D 處的輸出功率低於前方風機的一半，並隨間距增大逐漸回升。

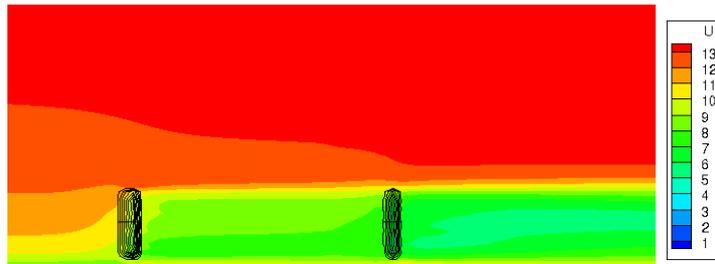


圖 3-6 間距 4D 流場模擬結果 xz 平面

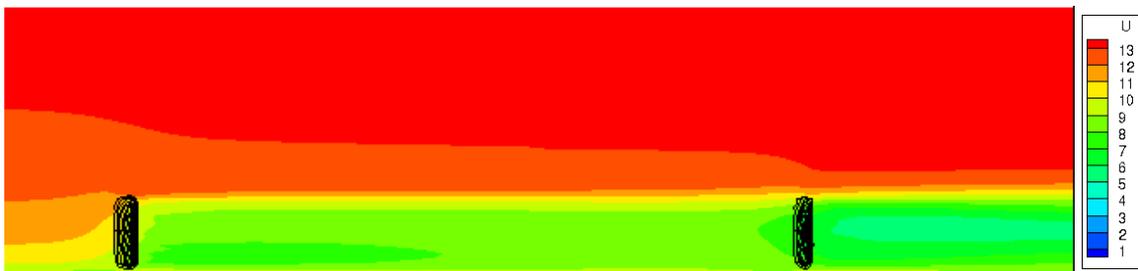


圖 3-7 間距 8D 流場模擬結果 xz 平面

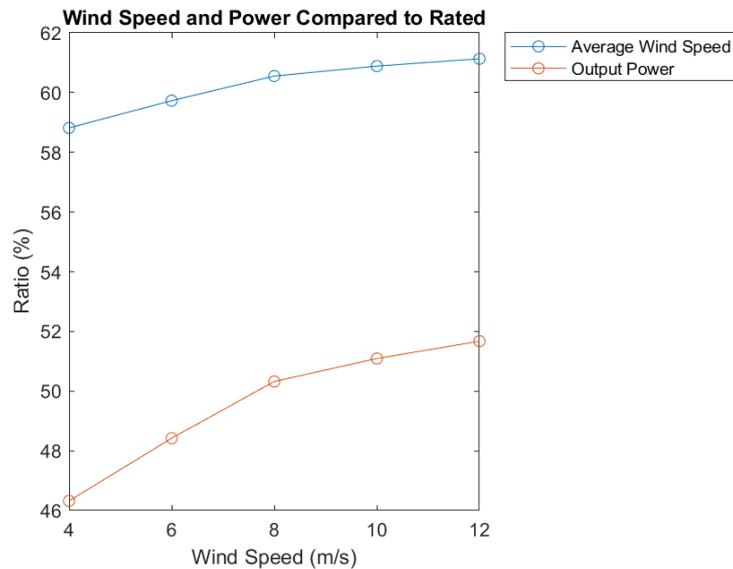


圖 3-8 後方風機相對前方風機風速及功率比率

接著以 Jensen's model[22]進行單一風場的跡流模擬，以 30 支 DTU 10MW 進行排列，單一風場風機排列如下圖 3-9，總容量為 300 MW，將此排列設為單元風場。單元風場在額定風速下於各風向受到跡流影響的功率損耗如下圖 3-10，並與紊流模型的結果相比，如下圖 3-11。

目標風場與其鄰近潛在風場的遴選裝置容量接約為 600 MW，因此將每個潛在風場的裝置容量簡化為 600 MW，故在目標風場與每個潛在風場內各放入兩個單元風場。目標風場單獨存在時，考量風場環境參數在八個風向的入流風速與機率，計算其發電效率。之後將周遭風場置入目標風場模型，計算目標風場受相鄰風場跡流干涉時的發電效率，目標風場各風向發電功率與額定功率的比值如下圖 3-12。為量化功率損失的差異，分別計算兩者的容量因子(Capacity Factor, CF)，單一目標風場 CF = 0.4215，多風場並存時單一目標風場 CF = 0.3786，損失容量因子百分比約為 10.16%。

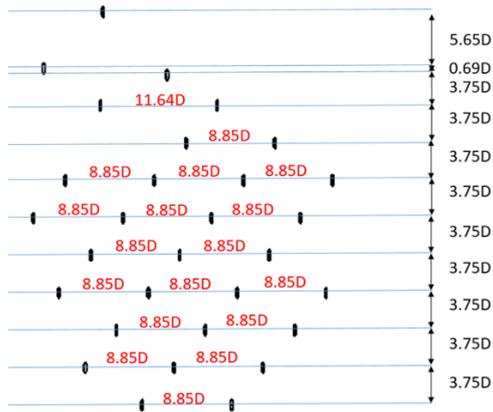


圖 3-9 單元風場風機排列，左側為 0° 入流方向

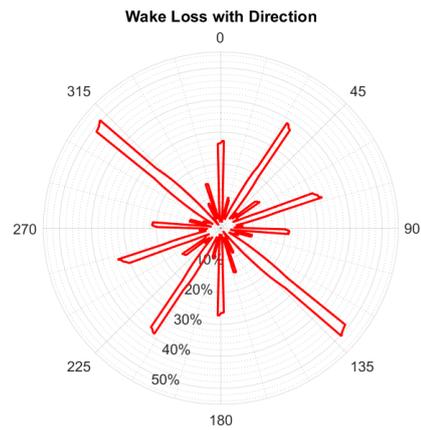


圖 3-10 額定風速下各風向跡流功率損耗百分比

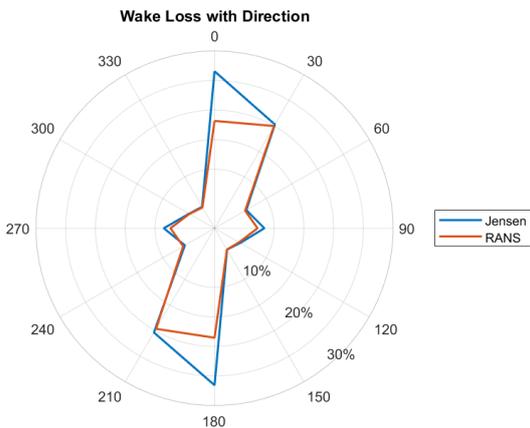


圖 3-11 線性方法與 RANS 方法計算損耗比較

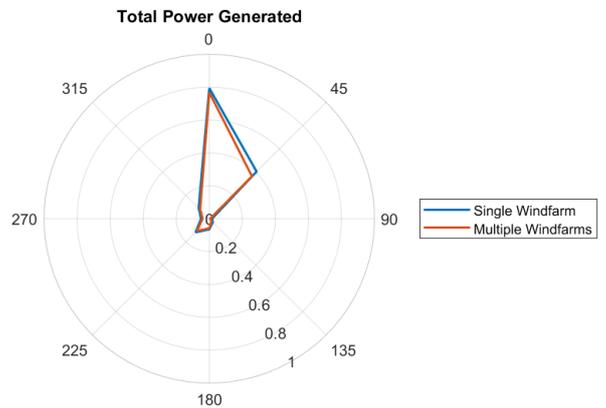


圖 3-12 目標風場各風向發電功率與額定功率比值

第四章 結論

本研究使用 60 支 DTU 10MW 進行排列，模擬總容量 600 MW 目標風場受跡流干涉的影響。目標風場單獨存在與目標風場迎風面上游存在其他風場，其容量因子差異約為 10.16%。長期運轉下將累積可觀的能量損耗量，且受跡流影響的風機壽命也可能受影響。本研究使用 10MW 的風機進行模擬，而實際興建的風場若使用容量較低的風機，在一樣的總裝置容量下風場內風機的排列密度也會增大，因此推測受鄰近風場的影響將更嚴重。本研究模擬跡流影響對風場造成的功率損耗，也期許未來能有相對應解決方案。

參考資料

- [1] Sten Frandsen, Rebecca Barthelmie, Sara Pryor, Ole Rathmann, Søren Larsen, Jørgen Højstrup (2004). "The Necessary Distance Between Large Wind Farms Offshore - Study."
- [2] 吳俊達，〈由氣象浮標資料探討台灣附近海域的風場特性與風應力〉，《國立中山大學海洋資源研究所碩士論文》，2006。
- [3] 行政院經濟部，〈再生能源發展條例〉，2009。
- [4] 4C Offshore, "Global Offshore Wind Speed Rankings," <https://www.4coffshore.com/windfarms/windspeeds.aspx>
- [5] GWEC (2018). "Global Wind Report: Annual Market Update 2017."
- [6] 行政院經濟部，〈風力發電 4 年推動計畫〉，2017。
- [7] 林俶寬、張上君、黃振愷、劉晉堯，〈台灣地區離岸風場選址技術之探討〉，《中華技術期刊第 103 期》，2014。
- [8] 工研院綠能所，〈臺灣風能評估手冊〉，2011。
- [9] 行政院經濟部，〈離岸風力發電規劃場址申請作業要點〉，2015。
- [10] 溫國樑、張毓文、陳俊德、黃雋彥，〈臺灣地區地震潛勢評估之研究〉，2011。
- [11] 張純美、陳信宏、楊瑞源、李宗霖、鄭東生，〈台灣離岸風力發電場址評估之研究〉，2008。
- [12] 吳俊達，〈由氣象浮標資料探討台灣附近海域的風場特性與風應力〉，《國立中山大學海洋資源研究所碩士論文》，2006。
- [13] M.-K. Liu, M.A. Yocke, T.C. Myers. (1983). "Mathematical Model for The Analysis of Wind-Turbine Wakes," Journal of Energy, Vol. 7, No. 1, pp. 73-78.
- [14] Martin Méchali, Rebecca Barthelmie, Sten Frandsen, Leo Jensen, Pierre-Elouan Réthoré. (2006). "Wake Effects at Horns Rev and Their Influence on Energy Production."

- [15]李可掬、江衍成、黃世翹、林宗岳、范秉天、趙修武，〈以跡流導向方式進行前後排列風機功率最適化數值模擬〉，《第三十屆中國造船暨輪機工程研討會》，2018。
- [16]Robert Mikkelsen. (2003). “Actuator Disc Methods Applied to Wind Turbines.”
- [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 台灣風能協會會員大會暨學術研討會與科技部成果發表會》，2017。
- [18]Matthew J. Churchfield , Patrick J. Moriarty, Luis A. Martinez, Stefano Leonardi. (2012). “A Comparison of Actuator Disk and Actuator Line Wind Turbine Models and Best Practices for Their Use.”
- [19]Sten Frandsen, Rebecca Barthelmie, Sara Pryor, Ole Rathmann, Søren Larsen, Jørgen Højstrup, Morten Thøgersen. (2004). “Analytical Modelling of Wind Speed Deficit in Large Offshore Wind Farms,” EWEC conference 2004
- [20]陳建廷、郭志禹、張建成，〈天氣預報模式在風場開發之應用〉，《2016 台灣風能協會會員大會暨學術研討會》，2016。
- [21]李可掬，〈基於跡流模型之風機功率預測〉，《國立台灣大學碩士學位論文》，2018。
- [22]Jensen, N.O. (1983). “A Note on Wind Generator Interaction”
- [23]Rabia Shakoor, Mohammad Yusri, Hassan Abdur Raheem, Yuan-Kang Wu. (2016). “Wake Effect Modeling: A Review of Wind Farm Layout Optimization Using Jensen’ s Model”