

科技部補助
大專學生研究計畫研究成果報告

* ***** *
* 計 畫 *
* : 風場資源及風力發電機風能預測模式之建立 *
* 名 稱 *
* ***** *

執行計畫學生： 余冠頡
學生計畫編號： MOST 104-2815-C-167-016-E
研 究 期 間： 104 年 07 月 01 日至 105 年 02 月 28 日止，計 8 個月
指 導 教 授： 黃美玲

處理方式： 本計畫可公開查詢

執 行 單 位： 國立勤益科技大學工業工程與管理系

中華民國 105 年 03 月 29 日

目錄

一、摘要.....	2
二、研究動機與研究問題.....	2
2.1 研究動機.....	2
2.2 研究問題.....	3
三、文獻回顧與探討.....	4
3.1 風力發電產業概況.....	4
3.2 風力發電趨勢	4
3.3 各國離岸風力發電介紹.....	5
3.4 離岸風機的優缺點	8
3.5 風機構造.....	9
3.6 風能相關文獻.....	10
四、研究方法及步驟.....	11
4.1 各項指標計算.....	11
4.2 風能密度.....	14
4.3 擾流強度.....	16
4.4 尾流效應.....	19
4.5 建構群集與預測模式.....	20
五、結論.....	21
六、參考文獻.....	23

一、摘要

在現今環境問題日益嚴重的狀況下，再生能源的有效利用成為當前急需克服的課題。在眾多的再生能源之中，風力發電的部分是讓世人相當期待的。畢竟如果能將風力百分百的利用，對於能源的生產將有更大的幫助。

在本次研究中，首先介紹目前風力發電產業的概況，以便了解目前的趨勢。並結合澎湖中屯風力園區中之風力發電機組所測得之數據及中央氣象局之澎湖氣象觀測站所測得之風速與風向資料進行研究。以確認目前風力發電產業風機的擺放位置是否影響其風機效能，藉由資料的蒐集計算出風場的風能密度，了解該地區風能資源的多寡，並計算風場內的擾流強度及尾流效應，探討造成能量損失的因子。

在整合這些資訊後，使用模糊分群（Fuzzy c-means Clustering）再結合類神經網路建立風能預測模式以修正風能預測模型，期望藉由此模型，可在未來進行風力發電機發電量之預測，可以提供及幫助業者評估風機設置之經濟效益及發電成本。

二、研究動機與研究問題

2.1 研究動機

能源是國家經濟發展的基礎與人類生活必需的物質。根據經濟部能源局[1]提出能源主要可分為兩類，分為可直接使用的「初級能源」和加工使用的「次級能源」，而初級能源又分為再生能源與非再生能源，再生能源如風、水、太陽能.....等；非再生能源如石油、天然氣、煤等。隨著有限資源日益枯竭，人類必須尋找另一未來可永續發展的能源道路。環保意識的抬頭，以及二氧化碳的增加造成的溫室效應的增強，人們變得相當重視能源使用的問題。而為了保護這美麗的地球能永續的發展，可循環再利用的再生能源就變得相當的重要。風能是因為空氣流動而產生的一種可利用的能量[1]。而風能的分布相當的廣泛，不會產生汙染，更不會排放溫室氣體。風力發電自 80 年代開始就受到歐美各國的重視，至今全球風力發電的發電量以 30% 的驚人速度快速成長[1]。

全球風速前 30 名的離岸風場(offshore wind farm)，台灣海峽占其中 15 個，年平均風速都超過 11.5m/s。平均風速大於 9.5m/s 可歸類為最優良等級，因此台灣是適合發展風力發電的國家之一，也讓風力發電成為我國發展替代能源的重要政策。

2.2 研究問題

本研究目標包含 (1)了解風力發電產業的概況及趨勢，確認目前風力發電產業風機的擺放位置；(2)藉由資料的蒐集計算出風場的風能密度，了解該地區風能資源的多寡；(3)計算風場內的擾流強度及尾流效應，並探討出能量損失的原因；(4)建立風能預測模式，提供業者評估風機經濟效益及發電成本。

本研究之研究對象為位於澎湖中屯風力園區中之風力發電機組所測得之數據進行研究，園區附近地勢平坦，根據瓦硯氣象測站風速資料顯示，距地面 30 公尺高度之年平均風速可達 7.8 公尺/秒，故適合發展風力發電。園區內共設置 8 台 600 千瓦風力發電機組，各台位置如下圖 1 所示。

本研究根據參考文獻定義發電量，分別為：「最大可轉換風能」、「理論計算發電量」、與「實測計算發電量」，並讀取風機的「實際發電量」。根據以上四種發電量，經由撰寫 MATLAB 程式分別計算參考文獻所定義的「有效風率」(availability factor)、「自然容量因數」(natural capacity factor)、「效率因子」(drive train efficiency)、「容量因數」(capacity factor) 與「利用率」(utilization) 等五個指標，並分析探討風機的運轉效率與影響其效率的原因，以提供決策者於規劃及發展風力發電廠之資料參考。再結合中央氣象局之澎湖氣象觀測站所測得之風速與風向以修正風能預測模型，期望藉由此模型，對未來四季發電量的預測更加精確，提高評估其經濟效益及發電成本的準確率。



圖 1 澎湖中屯風力園區 8 台機組位置圖

三、 文獻回顧與探討

3.1 風力發電產業概況

全球風力發電在進入 21 世紀後開始逐步發展，2005 至 2010 年間為陸域風力發電急速成長時期，2011 年以後陸域風力發電市場成長趨緩，逐漸轉為離岸型發電。我國風力發電產業源自 1980 年由政府委託工研院開發風力機計畫，2000 年由台灣電力公司、台朔重工及正隆公司最先設置了三個風力發電系統，2006 年開放民營電廠後，德商英華威開始設立風力發電廠。

隨著全球風力發電市場急遽成長，台灣廠商開始切入風力發電零組件產業，具備葉片、鑄件、變壓器等組件製造能力。2010 年東元電機發表台灣第一款 MW 級大型風力發電機組，使得我國成為世界第八個大型風力機設備製造國，至此我國在材料、零組件、系統、應用等風力機產業鏈逐漸發展完備。



圖 2 東元 TECO TFC2000 2MW PMSG wind turbine

我國風力機設備及上中下游產業供應鏈已漸趨完整，但現有風場之設備及備品等仍以進口為主。國內廠商多為零組件業者，由於過去陸域內需市場規模不大，廠商以國外市場為主，如發電機、鑄件、葉片及葉片樹脂等大型風機元件已切入國際大廠供應鏈。而小型風力機已具備出口能力，國產之小型風力機主要出口至歐洲和中國大陸，在國內主要設置於風光互補路燈、學校、民宿等。

3.2 風力發電趨勢

離岸風力發電進入高速成長階段，全球風能協會（Global Wind Energy Council；簡稱 GWEC）於 2013 年 4 月發布「2012 年全球風能市場更新報告」（Global Wind Report Annual market update 2012）指出，2012 年全球風力機組總裝置容量已達 282.6GW（單位：吉瓦）；2013 年全球風力機組總裝置容量達 322.4 GW，較 2012 年成長 14%，並推估 2017 年全球風力機組累計裝置容量將達到 536.1

GW。

相較於陸域風力發電成長趨緩，離岸風力發電則引起各界矚目。海上風場不但具備比陸域風場較佳且穩定的風力狀況，且多數國家陸上優良風場的開發已逐漸飽和，可預計離岸風力發電市場將快速成長。2012 年全球離岸風力發電累積裝置容量達 5.42GW，新增裝置容量達到 1.30GW，較 2011 年成長 33%，也與陸域風力發電同年相比新增裝置容量 10% 的成長，側面應證離岸風力發電快速發展的現況。如圖 3 及圖 4。



圖 3 離岸電廠

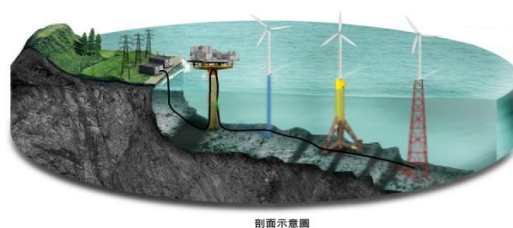


圖 4 離岸電廠剖面

3.3 各國離岸風力發電介紹

以擁有健康且安全的居住環境為目標，各國著眼於再生能源的方向努力，風力發電為其中一方向，研究者期望風力發電達到最大的效率，並減少不必要的浪費。圖 5 為目前全球離岸風力發電領導國家的離岸風機狀況，其中以英國的離岸風力發電廠最為多有 28 個廠址已經全面投產，其次是中國，全面投產的廠址已經有 17 個。

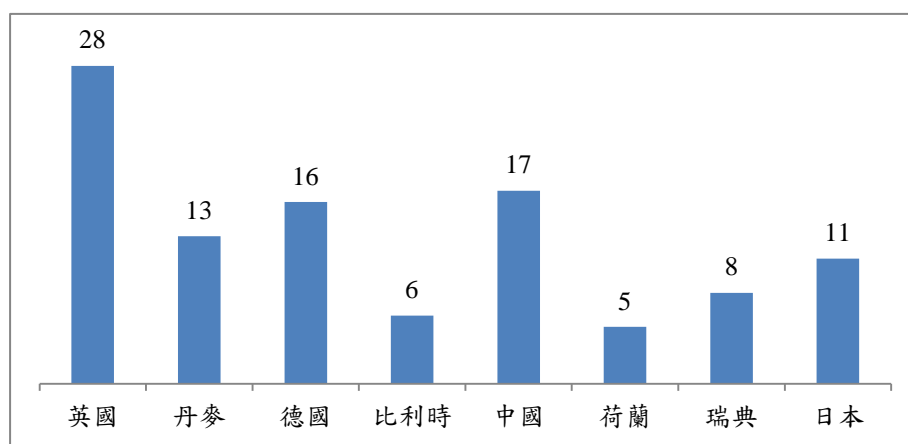


圖 5 全球離岸風力發電領導國家的全面投產離岸風場數量

3.3.1 英國案例

英國，一個緊鄰大西洋四面環海的島國，終年盛行西風，是個擁有大量風能資源的地方。70 年代開始，英國在北海正式進行石油生產，成為開發國家中少

有的能源純出口國。90 年代後，天然氣開始取代石油，但這兩種能源都是屬於非再生能源，會產生汙染且隨著時間的推移遺少性越發凸顯，在 2009 年的石油產量跌落到 1999 年產量峰值的一半，天然氣也跌到了峰值產量的 55%，尋找替代方案已勢在必行，而英國地理條件使它擁有發展風力發電的優是，這也是英國積極採取風力發電的原因。

英國的風機市場有個特色，除了離岸風機外，小型風力發電機也是相當發達的，這也造就了許多裝置在屋頂的「都市型小風機」，在增加了併網應用的特性後，這些小風機所發的電除了供給住戶使用，多餘的部分更可以集中運輸到其他需要的地方，圖 6 為英國倫敦陣列海上風力發電在泰晤士河口運轉啟用[2]。



圖 6 英國倫敦陣列海上風力發電

在 2013 年，全球最大離岸風力發電廠倫敦陣列（London Array）正式在英國泰晤士河口落成，其發電量可供應 50 萬戶家庭的發電需求，每年可以減少約 90 萬噸的二氧化碳排放量。這座風力發電廠總發電量高達 630MW（單位：百萬瓦），總投資額高達 15 億英鎊（約 679 億台幣），其距離肯特郡（Kent）及埃塞克斯郡（Essex）海岸約 20 公里，由西門子供應及安裝 175 座風力渦輪發電機，每座發電機都配備直徑 120 公尺的葉輪 [3]。在併網的部分，西門子提供了電網連接，設置一座陸上變電站及兩座海上變電站，透過風力渦輪發電機將產生的電力在海上集結，再經過高壓海底電纜傳送至海岸。

3.3.2 丹麥案例

丹麥是地理位置處於風力資源較為豐富的西風帶上，這也使丹麥成為全球風力發電比重最高的國家。得天獨厚的季節風力變化，巧妙的配合丹麥各個季節所需的發電量，讓丹麥的風力發電有相當的利用價值。雖然丹麥是世界上最早研究風力發電的國家，但在 1970 年代初期，丹麥的主要能源消費來自於進口石油占 94% 比例，當第一次的石油危機爆發後，丹麥政府也開始尋求替代的能源方案。丹麥政府一開始選擇的替代能源是核能，但安全問題以及廢料的處理問題讓丹麥人民強烈反對，於是在 1985 年後，核電廠完全消失在丹麥的國土上，取而代之

的是注重於風力發電發展。

丹麥的風力發電之所以這麼成功，其原因在於政府的大力推動以及政策的協助。在 1979 年丹麥的環境部要求風力發電機要強制上網，並要求電力公司支付部分的併網成本。在稅收方面，從 1980 年初到 1990 年中，風機發電的所得收入都不徵稅。在電價方面，丹麥採取固定的風力發電電價政策，這既讓風能投資者的利益受到保障，也吸引投資者來進行投資。

在距離丹麥哥本哈根 3 個小時船程的薩姆索島，為目前丹麥新能源的樣板地區，圖 7 為丹麥薩姆索島的離岸風機[4]，這裡吸引了無數的外國代表團前來學習觀摩。這個小島上的能源發展已達自給自足的狀態，島上有 11 座陸域型風機和 10 座離岸型風機併網發電。這些風機日復一日地轉動著，滿足了島上 4000 多名居民的所有電力需求。



圖 7 丹麥薩姆索島的離岸風機

3.3.3 德國案例

德國屬溫帶海洋性氣候，南部偶爾颳起的溫暖焚風。同樣位於西風帶，德國的風力發電也是不容小覷的。身為全球最積極推動再生能源發電的國家之一，目前德國的太陽能及風能發電已經低於當地電網的平均價格。德國目前已經架設了 1700 座風力發電機，這些風機全年可以發出等同於 2 座核能發電廠所發出的電力。目前德國的陸域型及正在建設的離岸型風力發電機，所產出來的電力可望在未來滿足該國 50% 的用電需求。德國於再生能源發電的推動上相當的積極，這使得德國境內擁有不少太陽能板及風力發電機。藉由將風力發電及太陽能發電併網的方式，讓電力可以更有效率的應用。

德國北部海島博爾庫姆附近海域的「阿爾法·文圖斯」是德國目前正在建造的風力發電廠，這座海上風力發電廠是世界上第一個，也是目前唯一一個海上風力發電廠。這個發電廠是由 148 米和 150 米高總計 12 台風力發電機所組成。發電廠的佔地面積約為 4 平方公里，併網發電後總裝機容量 60 兆瓦，可滿足 5 萬戶家庭的用電需求。

風力及太陽能發電這些再生能源的效率都是受氣候所影響，為了確保再生能源的穩定供電。德國雷根斯堡大學再進行電程轉換的研究，嘗試將過剩的電力儲存起來備用，若這項技術成功的話，預計能使德國的能源發展有更快速的進步。

3.3.4 中國案例

在地理位置上，中國不像英國等位於中緯度地區的國家，擁有穩定的西風帶，但廣闊的土地面積和漫長的海岸線，讓中國有不錯的風能資源。加上中國政府對於再生能源產業的大力推動，讓中國的風力發電有了突飛猛進的進步。但也導致近期因為風力發電產能過剩，而國有的電網營運商不願意購買這些多餘的發電量，甚至將風力發電併入電網的速度降低，以限制風力發電的使用。這種採取「棄風」的措施，導致在 2015 年第一季的風力發電產能有五分之一被擱置未使用，這些被棄置的發電量約為 107 億度，相當於 350 萬噸的燃煤。會造成這樣的原因最主要在於，中國風力發電的產能已經遠超過其架設電網的速度。這種「棄風」的現象是中國目前關注的部分，雖然中國的風力發電裝置量佔全球的四分之一，但處理風能的方式卻沒有效率，這是一種資源的浪費。

目前中國已完成的風力發電廠除了東海大橋的示範風場外，其於風場均位於潮間帶，該風場於 2010 年 7 月完成 34 部 3MW（單位：百萬瓦）的風機運轉。而中國內許多省都提出各自的離岸風力發展計畫，可以說是相當積極的。

3.3.5 日本案例

在經過福島的核災後，日本並沒有因此就被擊垮，反而努力的朝著安全、環保的能源生產邁進。而架設於福島縣外海域 20 公里處的浮體式海上風力發電場，可以說是核災後遭受重創的福島縣實現復興的一個象徵。這座大型的離岸發電廠有三座大型離岸風機及全球首創的浮體變電所，其中第一座 200 萬瓦的發電機已經在 2013 年底啟動。而第二座發電機在 2015 年 7 月架設完成，發電量有 700 萬瓦，至於第三座預計要在今年內建造完成。這三台風力發電機的總發電量預計 14MW，可以供應 14000 戶家庭 1 年的用電量。這些風力發電機所生產的電力將通過海底電纜與火力發電廠進行併網輸到東北電力公司的輸電線 [5]。

3.4 離岸風機的優缺點

離岸風力發電的效益可以分成環境面及經濟面。從環境面的角度，發展離岸風力發電可以減少二氧化碳排放量。根據全球能源總署(IEA)的報告，2004 年台灣的每人平均二氧化碳排放量為 11.26 公噸，位居全球第 18 名，且為亞洲第一。

地球暖化、溫室效應越來越嚴重，這些問題已成為全球須正視且面對的課題，

台灣政府於 2010 年訂立減碳目標，2020 年排碳量要回到 2005 年水準，相當於減碳 2.1 億公噸，而 2025 年要回歸至 2000 年之排放量，因此，如何達成減碳目標為刻不容緩之事。離岸風場的發電效率相較於陸上風場為佳，因此每 1 MW 的減碳量也較高約為 2,000 噸，假定台灣擁有 6,000MW 的風場潛能，相當於每年可減碳 1,200 萬噸，其減碳效益居所有再生能源項目之冠，且能有效協助台灣達成所宣示的減碳目標。

就經濟面而言，離岸風力發電的發展可帶動台灣包括產業界及金融界的投入。成功的離岸風場開發牽涉多元介面，除了風場開發商的投資之外，還需要金融機構提供專案融資，而設備及海事工程廠商可形成離岸風力發電產業供應鏈，不僅增加產值，更創造就業機會，提升台灣的經濟競爭力。

離岸式有以下優點：

- i. 可使用較大面積的完整區塊，易於規劃。
- ii. 同一區之陸域風場，有較高的平均風速。
- iii. 由於海面平坦，擾流較小易於獲取風能亦可減低風機的疲勞應力。
- iv. 具較低的風剪效應，可使用較低高度的塔架。
- v. 無噪音問題，風機可以設計的更有效率，同樣機組平均效率可提高 5% 以上。
- vi. 大型機組遠離岸上，無景觀衝擊及噪音問題，容易獲得支持。

亦有以下缺點：

- i. 須使用海中基礎，施工困難，造價昂貴。
- ii. 使用海底電纜連接，布線施工及材料費用較高。
- iii. 若岸邊無較大電網，須增加在線路及輸變電設施上的投資。
- iv. 良好的風場，一般平均風速較高，可以施工、吊裝的時間受限，造成工期長、難度高且風險較大。
- v. 由於接近困難，萬一故障或無法定期維修，導致停機，修復時間難以掌握，可能使停電時間過長，降低可用率。
- vi. 維護成本高，需動用船舶或直昇機等交通工具，所費不貲。

3.5 風機構造

水平軸風力發電機主要由以下部分組成：風輪、停車制動器、傳動機構(增速箱)、發電機、機座、塔架、調速器或限速器、調向器等。垂直軸風力發電機主要由以下部分組成：旋轉翼、塔、基座、齒輪箱等。

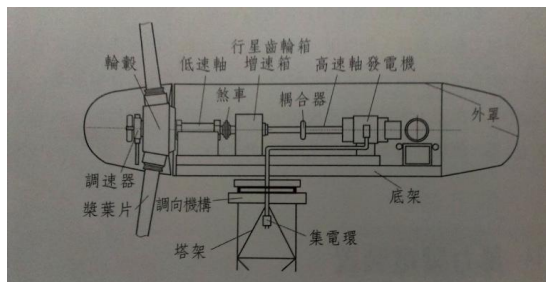


圖 8 水平軸風力發電機

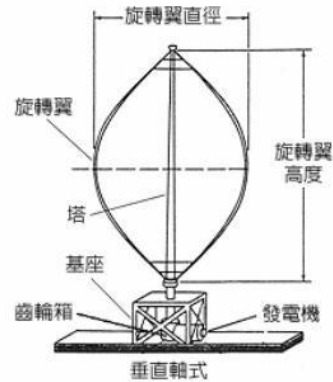


圖 9 垂直軸風力發電構造圖

3.6 風能相關文獻

- ✚ Julieta (2013) 詳細回顧數位作者所提出的研究方法，並提出一組可用於估算某特定區域風力發電的方程式。為計算風力發電，作者探討風場的佈置(configuration)、應用內插法(interpolation)與外插(extrapolation)估算特定塔架高度下的風速，與如何計算 Weibull distribution 的參數等。該文章也提出方法用於估算每年風力發電的成本。[6]
- ✚ Flores et al. (2005) 使用類神經網路預測風速，並依此設計一風能產生控制系統。Tu et al. (2012) 研究類神經網路(artificial neural networks; ANN)的輸入神經元參數與個數，應用於短期間觀察資料的效能。該資料來自於 2006 年台灣中屯風場的風機，每十分鐘紀錄風速、風向與機腹偏向角度等。經試驗數種神經元的輸入組合，本文章結論指出，選擇適合的輸入參數比使用多重參數重要。[7]
- ✚ Mohandes et al. (1998) 比較類神經網路與自動迴歸(autoregressive)模式應用於預測風速。[8]
- ✚ Chan et al. (2003) 以 Weibull distribution 的機率密度函數描述風速，提出數學模式用於估算風機的理想風能發電，並比較由風機所產生的實際發電量。實際發電量的計算，考慮起動風速、額定風速與停機風速。[9]
- ✚ 陳一成 (2007) 「台灣風場評估及風力機可用性分析-以台中風力發電廠為例」文中提及為使風力發電廠場址土地能最佳化利用，以實際的運轉資料演算與分析，有助於提升未來評估的正確性與運轉的可用性。[10]
- ✚ 吳俊杰 (2010) 「都會區小型風力發電機之建置評估與短期電力預測」文中提及本研究主要是針對都會區小型風力發電機建置場所的評估及後續風力發電機發電量的短期預測做探討。[11]

四、 研究方法及步驟

近年來，已有許多關於風力發電預測之研究，在蒐集相關文獻當中，本研究發現至目前為止，尚未有相關研究使用模糊分群（Fuzzy c-means Clustering）再結合類神經網路(Artificial Neural Network, ANN)預測風力發電機之發電量，故本研究使用台灣澎湖中屯風力園區之第一台風力發電機，於 2012 年 08 月 01 日至 2013 年 07 月 31 日本身機組所測得之即時觀測資料，每 10 分鐘一筆，共有 55110 筆樣本。資料輸入變數預計包含平均風速、平均轉速及平均功率，輸出變數為風能。藉由結合模糊分群及類神經網路做為風力發電機發電量推估之工具，目的是希望達到風力發電機發電量的監控及預測，以此建構一個預測模式。此外本研究預計再加入中央氣象局澎湖氣象站風速與風向量測之數據(數據蒐集期間為 2012 年 08 月 01 日至 2013 年 07 月 31 日，每小時一筆之數據)，比較加入變數資料是否可提升風機風能預測模式的準確性。

風機利用風可產生的理論能量是： $P = 0.5\rho AV^3$ ，其中 P 是風能， ρ 是空氣密度 (air density)， A 是風機轉子的橫掃面積， V 是風速。但受限於機械能量轉換的效率，實際上可產生的能量可表示為：

$P = 0.5\rho AC_p\eta V^3$ ，其中 C_p 代表 rotor power coefficient (= rotor power/power in the wind = rotor power/ $0.5\rho AV^3$)， η 代表 drivetrain efficiency (= generator power/rotor power)。

C_p 決定於尖速度比 (tip-speed ratio) λ ，與葉片旋角角度 (blade pitch angle) β 。空氣密度 ρ 在一定高度為一常數，例如在海平面與 15°C 下為 1.225 kg/m³，而風機轉子的橫掃面積也是常數。因此影響風能的最重要參數是風速 V 。

風機的發電過程，自起動風速 (cut-in speed, V_I) 開始運轉，當到達額定風速 (rated speed, V_R) 時，風機的輸出能量最大。若超過停機風速 (cut-out speed, V_O)，風機將停止運轉。一般適合運轉的風速範圍大約是 3-25m/s 之間，額定風速大約是 15m/s，決定於各風機的構造與性能。風速與輸出能量的關係又稱為風能曲線 (power curve)。

假設風速 V 的機率密度函數為 $f(V)$ ，風機的風能曲線為 $P_w(V)$ 。根據 Manwell et al. (2010)，風機的平均風能 (average wind turbine power, \bar{P}_w) 可表示為：

$$\bar{P}_w = \int_0^{\infty} P_w(V) f(V) dV$$

4.1 各項指標計算

將每 10 分鐘記錄一次的風速給統整起來，總計一年共 5 萬筆資料。將把蒐集的數據以 Matlab 計算出平均風速，最大可轉換電 E_w 、理論計算發電量 E_E 、

實際運轉發電量 E_I 、與實際發電量 E_A 填入下表 1。

$$E_I = T \int_{V_I}^{V_O} P_T(V) f(V) dV$$

$$= TP_R \int_{V_I}^{V_R} \left(a_1 V^3 + a_2 V^2 + a_3 V + a_4 \right) \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} e^{-(V/c)^k} dV + TP_R \int_{V_R}^{V_O} \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} e^{-(V/c)^k} dV$$

$$E_W = 0.5 \rho T A \left[\int_{V_I}^{V_R} V^3 \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} e^{-(V/c)^k} dV + V_R^3 \int_{V_R}^{V_O} \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} e^{-(V/c)^k} dV \right]$$

$$E_E = T \int_{V_I}^{V_O} P(V) f(V) dV$$

表 1 各月風力發電機之發電量

Year	Month	E_W	E_E	E_I	E_A
2012	8	410060	54033	40104	95412
2012	9	579030	48480	38840	126756
2012	10	834860	53224	51932	305587
2012	11	613690	67761	65135	231335
2012	12	855420	50412	55783	325889
2013	1	871230	47525	50197	331545
2013	2	637720	51605	51344	233002
2013	3	552680	62129	58100	181031
2013	4	458870	67423	59598	157520
2013	5	245340	70975	53323	74116
2013	6	188240	69253	46995	58156
2013	7	178730	59777	41202	46745

計算風機的各项指標：

$$\text{有效風率} = Pr(V_I \leq V \leq V_O) = F(V_O) - F(V_I) = e^{-\left(\frac{V_I}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{V_O}{c}\right)^k}。$$

$$\text{效率因子 (drive train efficiency; } \eta) = E_A / E_W。$$

$$\text{容量因數 (Capacity factor; CF)} = E_A / TP_R。$$

$$\text{自然容量因數} = E_I / E_E。$$

$$\text{利用率} = E_A / E_I。$$

之後將計算結果填入表 2 中。

表 2 各項指標的數值

Year	Month	有效風率	效率因子	容量因數	自然容量因數	利用率
2012	8	85.91%	23.27%	21.37%	74.22%	237.91%
2012	9	90.91%	21.89%	29.34%	80.12%	326.35%
2012	10	99.52%	36.60%	68.46%	97.57%	588.44%
2012	11	98.19%	37.70%	53.55%	96.12%	355.16%
2012	12	99.55%	38.10%	73.00%	110.65%	584.21%
2013	1	99.50%	38.05%	74.27%	105.62%	660.49%
2013	2	97.47%	36.54%	55.80%	99.49%	453.81%
2013	3	94.46%	32.76%	40.55%	93.52%	311.59%
2013	4	94.56%	34.33%	36.46%	88.39%	264.30%
2013	5	92.35%	30.21%	16.60%	75.13%	138.99%
2013	6	95.89%	30.89%	13.46%	67.86%	123.75%
2013	7	88.70%	26.15%	10.47%	68.93%	113.45%

表中可發現在一整年的有效風率差異不大，平均值在 94.75%，可見整年產生的風都可用來發電，對於風場評估而言，該風場位置極佳。

表 3 各項指標數據平均值比較

	有效風率	效率因子	容量因數	自然容量因數	利用率
本研究	94.75%	32.21%	41.11%	88.14%	346.54%
陳一成	82.00%	32.00%	28.00%	58.00%	95.00%

在效率因子的部分，可以發現值落在 21.89%~38.10%之間，年平均為 32.21%。

容量因數依照陳一成論文[10]中定義為一段時間實際的發電量和機組以滿載運轉的發電量之比值。由發電量可觀察出，夏天用電量最高但發電量卻最少，由容量因數觀察得年容量因數為 41.11%，而在陳一成論文中[10]提到「台中風力發電廠可行性評估之容量因數為 28 %」，相較之下高出許多。

「自然容量因數」年平均為 88.14%，依據陳一成的論文中[10]所提到—「台中風力發電廠之「自然容量因數」年平均值才 58%」，顯然較高。故可以判斷澎湖風場的「自然容量因數」是相對比較好的。

全年的「利用率」346.54%，相較於陳一成論文中[10]所提到「台電規劃均以 95%為基準。」，相差甚遠。利用率的公式是實際發電量和實際運轉發電量的比值。而實際運轉發電量是以風速及瞬時出力來計算，累計一段時間後，利用迴歸法，可得實際運轉時之性能曲線。陳一成論文中所提到的風場，成立時間不久，收集到的風速數據較不平均。而澎湖風場的風趨近於穩定，故實際運轉發電量計算出來的值並不會太大。至於利用率在 100%以上，表示風機運轉所產生的發電量是理想狀態下。

4.2 風能密度

氣流垂直通過單位截面積（風輪面積）的風能，空氣在 1 秒內以速度為 V 流過單位面積產生的動能稱為風能密度，是表徵一個地方風能資源多少的一個指標〔12〕。風能密度的計算如下：

$$\text{風能密度} = P/A = 0.5\rho c^3 \Gamma\left(\frac{k+3}{k}\right), k = \left(\frac{\sigma_v}{\bar{v}}\right)^{-1.086}, c = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1+1/k)}$$

表 4 風力發電機各參數、發電量與各指標

Year	Month	Mean	Std.	k	c
2012	8	6.501	5.448	1.212	6.928
2012	9	8.438	6.947	1.235	9.035
2012	10	12.265	4.594	2.905	13.754
2012	11	9.509	4.652	2.174	10.738
2012	12	12.542	4.783	2.849	14.076
2013	1	13.125	4.75	3.015	14.694
2013	2	10.882	5.611	2.053	12.284
2013	3	8.156	5.512	1.53	9.055
2013	4	7.605	4.614	1.72	8.530
2013	5	5.641	3.027	1.966	6.363
2013	6	5.102	2.51	2.161	5.761
2013	7	4.502	2.787	1.684	5.042

接下來，利用 k 以及 c 值計算出風能密度，結果顯示在表 5。而利用計算出來的風能密度及月平均風速繪製出圖 10，以找出兩者間的關係。

Matlab 的程式碼

```
AC08=xlsread('201208.xlsx');
ENERCON_V08 =AC08(:,2)
Avg08=mean(ENERCON_V08);
S08=std(ENERCON_V08);
k08=(S08/Avg08).^(-1.086);
c08=(Avg08/(gamma(1+1/k08)))
```

表 5 風能密度數據

Year	Month	風能密度(w/m^2)
2012	8	659.2380
2012	9	1389.0893
2012	10	1616.3245
2012	11	929.7518
2012	12	1748.3998
2013	1	1939.1431
2013	2	1469.0397
2013	3	877.2223
2013	4	608.2854
2013	5	213.6673
2013	6	144.3849
2013	7	129.6433

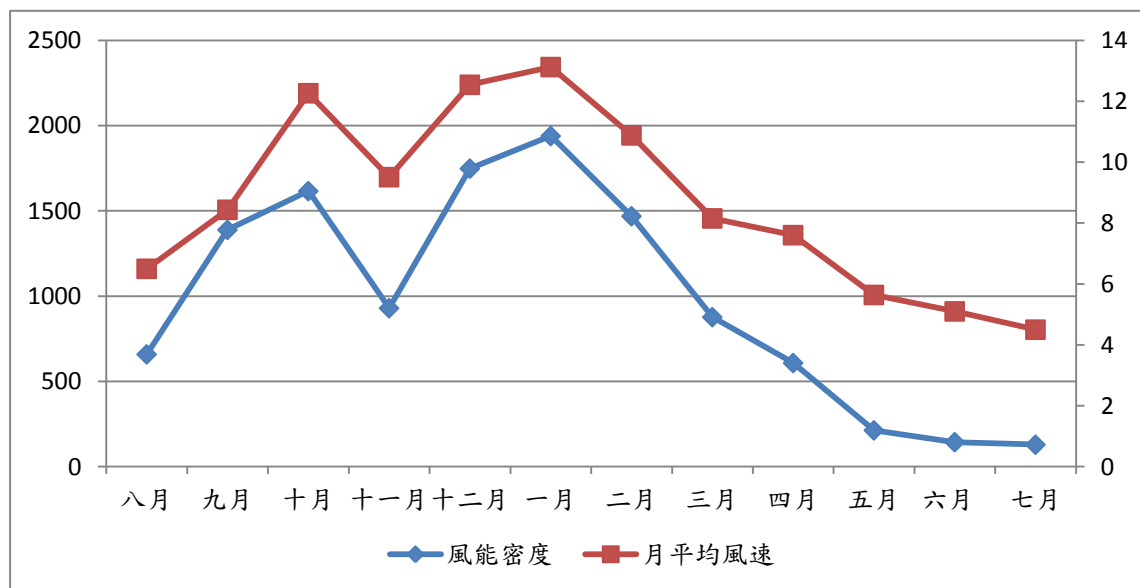


圖 10 風能密度及月平均風速關係

橫軸：月份

縱軸：風能密度（左），月平均風速（右）

由此圖 10 可得知，澎湖風場在十二、一月的時候會有較高的風能密度，分別為 1748.3998 及 1939.1431 w/m^2 ，可以看出在這兩個月份會有較多的風能資源。而在六、七月夏秋交際之時，風能密度會相對較小，分別為 144.3849 及 129.6433 w/m^2 ，故在此時段的風力發電效果會顯得較差。平均風速對於風能密度也有相當的影響，在平均風速越高的狀況下，可以發現風能密度也會越高。

在 11 月所出現的異常值則是因為當月風機在進行維修，這才產生數值上的偏差。

4.3 擾流強度

擾流強度為量度流體擾流特性強弱的指標。擾流強度定義為擾流中速度分量的標準偏差與平均流場流速的比值。在大氣中，擾流強度為大氣擴散能力的指標，若擾流強度大，則大氣擴散的能力較佳，反之則較弱〔13〕。

$$\text{擾流強度(TI)} = \sigma/V$$

表 6 每月的擾流強度

Year	Month	擾流強度
2012	8	0.838025
2012	9	0.823299
2012	10	0.374562
2012	11	0.489221
2012	12	0.381359
2013	1	0.361905
2013	2	0.515622
2013	3	0.675821
2013	4	0.606706
2013	5	0.536607
2013	6	0.491964
2013	7	0.619058

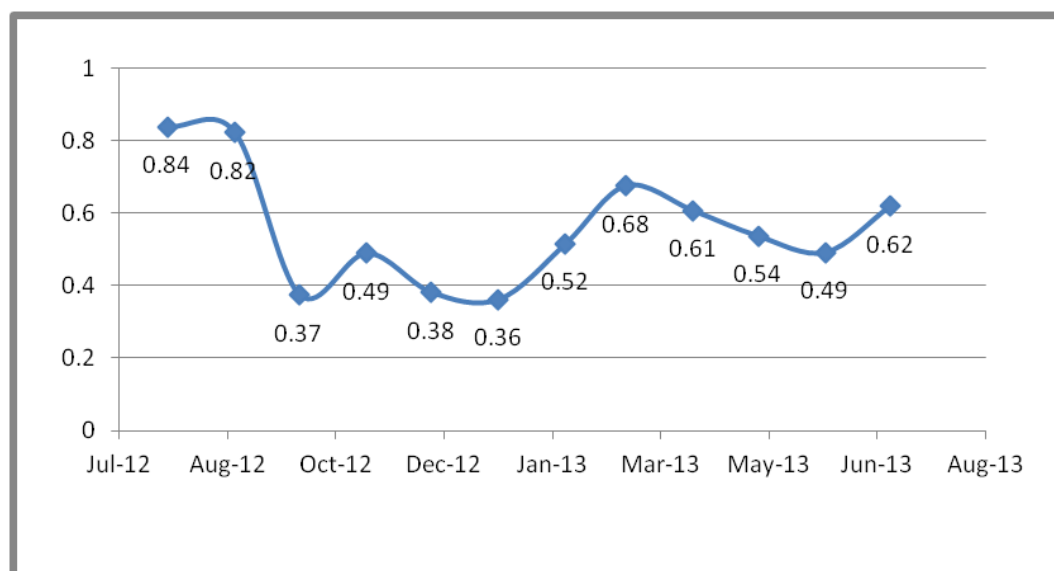


圖 11 每月的擾流強度

由圖 11 可得知，擾流強度在 1 月的數值為最低，只有 0.361905，而在 8 月有 0.838025 這個較高的數值。這就表示在 8 月大氣擴散能力較佳，風不好聚集，發電量會比較差。

表 7 每小時的擾流強度

	風速平均數 (m/s)	風速標準差	擾流強度
0 時	8.33065	5.68426	0.68233
1 時	8.40151	5.76940	0.68671
2 時	8.51238	5.85589	0.68793
3 時	8.52153	5.88262	0.69033
4 時	8.53949	5.85796	0.68599
5 時	8.60169	5.81521	0.67605
6 時	8.53420	5.68867	0.66657
7 時	8.56968	5.56971	0.64993
8 時	8.61735	5.44253	0.63158
9 時	8.64168	5.37560	0.62205
10 時	8.79435	5.31428	0.60428
11 時	8.85044	5.19274	0.58672
12 時	8.91987	5.19648	0.58257
13 時	8.97935	5.19136	0.57814
14 時	9.05497	5.23947	0.57863
15 時	9.13876	5.35829	0.58633
16 時	9.15316	5.45368	0.59582
17 時	9.14893	5.55028	0.60666
18 時	8.97623	5.66887	0.63154
19 時	8.73166	5.79069	0.66318
20 時	8.53567	5.76895	0.67586
21 時	8.39259	5.60799	0.66821
22 時	8.28870	5.55782	0.67053
23 時	8.25101	5.55685	0.67348

利用 Microsoft Excel 將資料進行整理，將二十四個不同時程的數據進行分類，並求出各別時程的平均數及標準差，來進行擾流強度的計算。計算結果如表 7 所示。

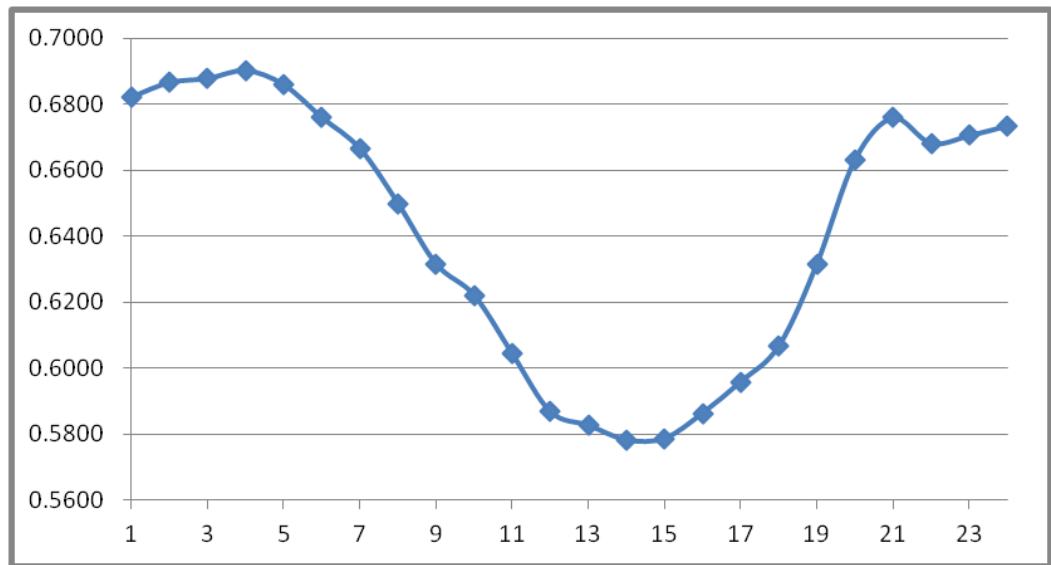


圖 12 每小時的擾流強度

橫軸：每小時與每月

縱軸：擾流強度

由圖 12 可得知，擾流強度在下午 1 點到 2 點這段區間，擾流強度會變得較弱，只有 0.57814 及 0.57863，而在清晨 2 點到 3 點的這個區間會有較高的數值，有 0.68793 及 0.69033。所以風的聚集程度會在下午有比較大的表現，風力發電會在此時段有比較好的表現。

表 8 風速與擾流強度的關係

風速間距	標準差	平均風速 (m/s)	擾流強度
0.1~3.9	1.020693	2.357728	0.432914
4~7.9	1.095509	5.7071442	0.191954
8~11.9	1.199018	10.067684	0.119096
12~15.9	1.145893	13.76004	0.083277
16~19.9	1.136456	17.857323	0.063641
20~23.9	1.028567	21.326025	0.048231
24~27	0.775936	25.044156	0.030983

利用 Microsoft Excel 將風速分成 7 個區間，並求出各別區間內的平均數及標準差，來進行擾流強度的計算。計算結果如表 8 所示。

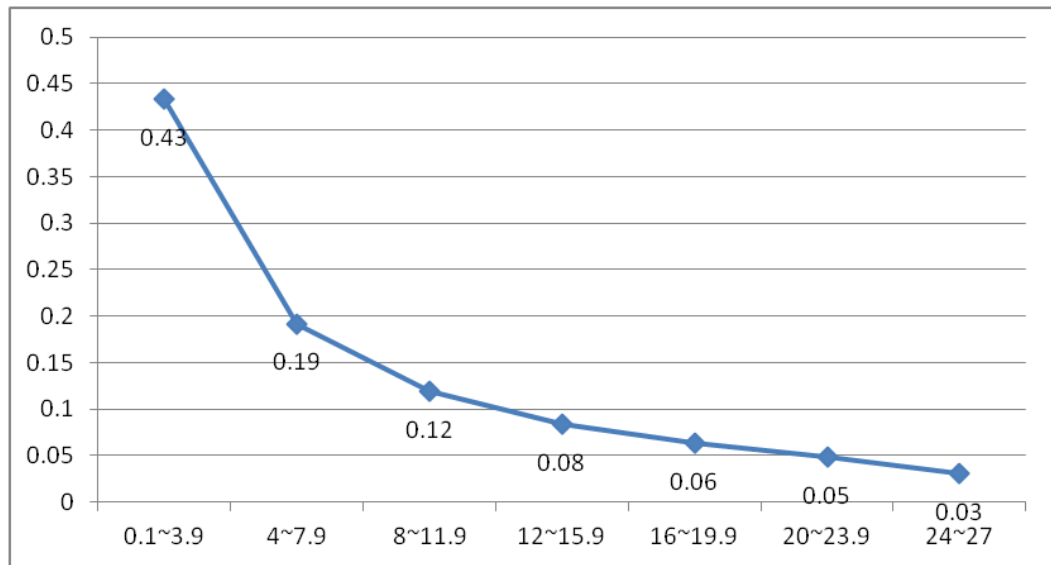


圖 13 風速與擾流強度的關係

橫軸：風速 (m/s)

縱軸：擾流強度

由圖 13 可得知，在風速愈小的狀況下擾流強度會愈大，風能會難以聚集，發電效率下降。而風速愈大的狀況下，則反之。

綜合以上的圖，我們可以知道分別在 8 月，清晨以及風速較小時有較高的擾流強度，所以應當避免在這三個時間點上運作風力發電機，並在這些時間點上改進行其他活動。

4.4 尾流效應

當風經過風機後速度有所下降的現象稱為尾流效應。尾流效應損失與地形、地貌、風機間的距離和風的湍流強度等有關，根據風力發電場地形情況，其模型可分為風機組位於較為平坦地形的模型和風機組位於複雜地形的模型。是一個在風力發電中常用的術語，也是影響風力發電功率穩定的重要因素。[14] 計算尾流(wake)效應

篩選平均功率 > 60

以風機#1 為基準

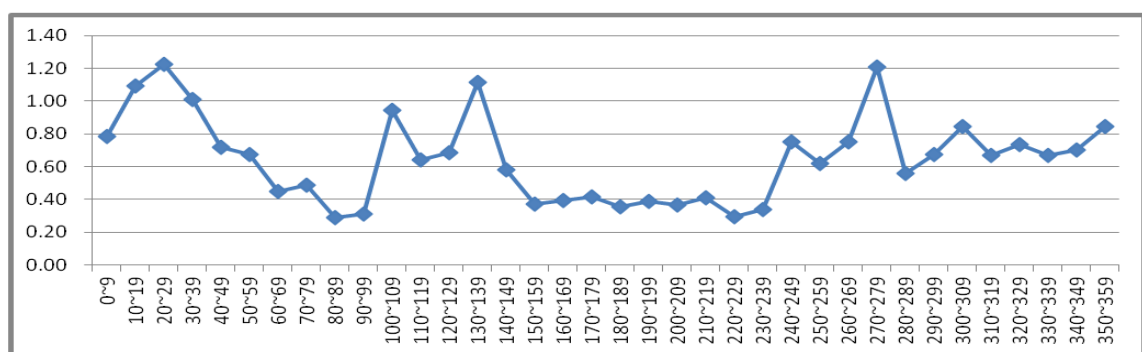


圖 14 風向角度所造成的尾流效應

橫軸: #1 的 mrwAbGoPos

縱軸:(各風機平均功率)/(#1 風機平均功率)

由圖 14 可以得知，尾流效應在風向 20-29 度 270-280 度時有最高的功率比值，可達到 1.20，這意味著當風向在這兩個角度時，各風機的平均功率大於一號風機的功率，就表示在這兩個風向角度時，功率不會被削弱。而在 80-89 度及 220-229 度時，會有最低的功率比值 0.29，就表示在這兩個風向角度時，功率會被一號風機給削弱。則盡量避免當風向為這兩個角度時進行風力發電，以免功率損失過多，不但造成發電上浪費，也削減掉風力發電機的壽命。

4.5 建構群集與預測模式

本研究使用模糊分群結合類神經網路，依據操作步驟可以分為資料輸入與預處理、模糊分群、類神經網路預測、結果分析與探討四大研究主軸：

- ✚ 資料輸入與預處理使用風力發電機機組所測得的觀測數據作為本研究探勘之對象，首先檢查有無輸入錯誤、無相關屬性、遺漏值等，共有 55110 筆資料，3 項輸入變數，1 項輸出變數。
- ✚ 模糊分群
將輸入與輸出值資料匯入至 Matlab R2011b 的 Workspace 中，並將其轉置過後，使用撰寫程式之方法將其分為四群後，再將資料匯入 Microsoft Excel 中，以便進行資料分析。
- ✚ 類神經網路預測因資料散佈型態不同，若直接將原始資料放入類神經網路中作訓練，則資料散佈型態較大者就會產生相當大之影響，因此，須將四群資料個別予以標準化（Standardize）轉換，換而言之把資料轉換成-3~3 之間。標準化之後再將資料分別匯入 Matlab R2011b 中，轉至後開啟 nntool 工具箱，選擇倒傳遞類神經網路選項，針對輸出變數-實際產能來做預測，最後將其預測結果之預測值與誤差值匯出至 Microsoft Excel 來探討預測之誤差。
- ✚ 欲了解分類器之鑑別能力，本研究透過計算均方誤差（Mean Square Error, MSE）作為績效評估之比較工具。計算 MSE 之公式根據 Leonid Sheremetov et al. [15]整理如下所示：

$$E_{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2, \text{ 其中 } N=\text{樣本數量}; y_i=\text{預測值}; \hat{y}_i=\text{實際值}。$$

本研究使用 Matlab R2011b 進行模糊分群，嘗試將風力發電之數據分為（一）尚未分群與（二）分為四群。根據目前粗略分群的結果，四群中之第一群有 19529 筆；第二群有 18911 筆；第三群有 5310 筆；而第四群則有 11360 筆，四群加總共有 55110 筆數據。其分群結果如下表 8 所示。

表 9 模糊分群各群集資料

	各群筆數	總筆數
尚未分群	55110	55110
4-1	19529	55110
4-2	18911	
4-3	05310	
4-4	11360	

將數據分別建構模糊分群模型分為尚未分群與四群，再將其結果代入 Matlab R2011b 軟體執行類神經網路建構預測模型。其分群結果如下表 9 所示。

表 10 模糊分群結合類神經網路預測之誤差

	平均誤差	MSE	各群總筆數
尚未分群	1.97E-03	9.99E-01	55110
4-1	1.32E-04	3.40E-04	19529
4-2	9.08E-05	1.56E-04	18911
4-3	3.29E-04	5.76E-04	05310
4-4	3.19E-04	1.15E-03	11360

在這些風力發電機組中，共有 55110 筆數據，四群中之第一群有 19529 筆、第二群有 18911 筆、第三群有 05310 筆以及第四群有 11360 筆；由預測結果可以看出，尚未分群之 MSE 為 9.99E-01、平均誤差為 1.97E-03，而分四群後之 MSE 最低為 1.56E-04、平均誤差最低為 9.08E-05，分群後之最低點皆落在四群中之群二。由此可知，尚未分群之預測誤差較模糊分群後之預測誤差大，而使用模糊分群分四群中較好的預測模型為群二。在經過分群後，進行預測的動作會有較好的結果。

五、 結論

本次研究的風力發電機組是位於台灣海峽上的澎湖群島，由於澎湖群島缺乏高山作為屏障，且地形偏低，多平地，以至於當地受到季風所造成的影響非常大。尤其此處冬季的風力較大，在風力發電上占了很大的優勢。如果能好好利用此優勢來進行大量供電，對目前大家都非常重視的環保議題也有極大的幫助，並可以達成節能減碳的目的。

本次研究分析了澎湖中屯風場風機的數據，並利用 Excel 將數據繪製圖表，從中可以得知每月風能密度的變化，擾流強度與月份、時間及風速的關係，及其他編號的風機是否因為地勢或位置的不同，造成尾流效應的產生而使得發電量上出現誤差。

根據擾流、尾流、風能密度的分析後發現在冬季與夏季的發電效率確實較平時的效率優良，每月的擾流強度明顯在七、八月份時較高，又從每小時擾流強度

的分布圖發現，在二十時至二十四時與零時到五時，因此清晨擾流最強，風速越低擾流強度越強。根據研究結果，澎湖風力發電場可以在 8 月，清晨以及風速較小等任一條件下進行維修工作或者開放觀光增加額外的收入，而在 1 月，中午時段及風速較高時大量且專注於進行發電作業。至於尾流效應的部分，根據尾流效應的分析圖，當風向在 20-29 度 270-280 度時可讓功率比值達到 1.20，這表示當風向在這兩個角度時，風力發電的功率不會受到尾流效應的影響。但在 80-89 度及 220-229 度時，會有最低的功率比值 0.29，風力發電場要盡量避免在這兩個風向角度時發電，以免讓 1 號風力發電機後方的機台受到尾流效應的干擾，讓功率降低，也造成機台的壽命大幅減少，增加維修的成本。

而蒐集之資料會因機台擺放的面向，風速的強弱以及季風的角度造成很大的高低落差。故本研究還以模糊分群分析方法先將此資料庫每台風力發電機組之異常值剔除，再進行群集分析以達到「組間差異大、組內差異小」之目的，將資料相似之月份數據聚集一起，並計算 MSE、平均誤差等指標。

經過計算後，發現風力發電機組在分群前之預測誤差皆大於分群後之預測誤差，分群前之 MSE 為 $9.99E-01$ ，平均誤差為 $1.97E-03$ ，而分群後之 MSE 範圍在 $1.00E-04 \sim 1.00E-03$ 間，平均誤差的範圍在 $9.08E-05 \sim 3.30E-04$ 。可以發現分群後的值明顯較分群前之模型預測要來的好，由此可知風力發電機組之資料庫是適合使用群集分析法，經過群集分析，不但可以降低資料間之落差，讓預測可以更加的準確，更可以讓風力發電增加效率。

六、 參考文獻

1. 維基百科：風能，<http://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%A2%A8%E8%83%BD>
2. 遠見雜誌，http://www.gvm.com.tw/webonly_content_795_1.html
3. 王美珍，“全球最大離岸風電廠啟用”，遠見雜誌
4. 聯合報，<http://a.udn.com/focus/2015/10/25/13717/index.html>
5. 中視新聞專題 20151115，“日本獨步全球 首座浮體離岸風力發電”
6. Julieta, S.-R., 2013. A methodological review to estimate techno-economical wind energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 272-287.
7. Flores, P., Tapia, A., Tapia, G., 2005. Application of a control algorithm for wind speed prediction and active power generation *Renewable Energy* 30, 523–536.
8. Mohandes, M.A., Reham, S., Halawani, T.O., 1998. A neural networks approach for wind speed prediction *Renewable Energy* 13, 345–354.
9. Chang, T.J., Wu, Y.T., Hsu, H.Y., Chu, C.R. and Liao, C.M., 2003. Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan *Renewable Energy* 28, 851–871.
10. 陳一成，2007，台灣風場評估及風力機可用性分析-以台中風力發電廠為例，國立中興大學，碩士論文。
11. 吳俊杰，2010，都會區小型風力發電機之建置評估與短期電力預測，國立高雄應用科技大學，碩士論文。
12. 台灣維基：風能密度，
<http://www.twwiki.com/wiki/%E9%A2%A8%E8%83%BD%E5%AF%86%E5%BA%A6>
13. 國家教育研究院：紊流強度，<http://terms.naer.edu.tw/detail/1318514/>
14. 王朝網路：尾流效應，http://tc.wangchao.net.cn/baike/detail_529518.html
15. Leonid Sheremetov, Itzamá López-Yáñez, Cornelio Yáñez-Márquez, 2014, “A novel associative model for time series data mining.” *Pattern Recognition Letters*, vol.41, page 23-33.