

明新科技大學 校內專題研究計畫成果報告

1.5KW 垂直軸風力發電機電能轉換控制器之研製

Design and Implementation of a converter controller for 1.5KW vertical-axis wind-turbine generator

計畫類別：任務型計畫 整合型計畫 個人計畫

計畫編號：MUST-97 電機-02

執行期間：97 年 3 月 1 日 至 97 年 9 月 30 日

計畫主持人：蔡 明 發

計畫參與人員：徐 瑋 傑
吳 泰 維
吳 柏 鋒
蘇 嗣 傑
蕭 立 青
楊 世 豪
黃 培 育

處理方式：公開於校網頁

執行單位：工學院 電機系

中 華 民 國 97 年 10 月 30 日

摘 要

本計劃研製一個以 FPGA 為基礎之 1.5KW 垂直軸風力發電轉換器，為了實驗方便，實驗時以 400W 垂直軸風力發電機作為控制目標，並利用此轉換器將輸出之電能儲存於蓄電池中，提供直流負載使用，因風力發電機之最大功率點於不同風速下皆不相同，為使發電系統達最大功率輸出，本計劃採用擾動觀察法及直線近似法之混合型做為風力發電機之最大功率追蹤控制法則。模擬方面，使用 PSIM 建立風力發電模擬系統，藉以分析發電系統於不同風速下，電能轉換及最大功率追蹤狀況，以此做為實測電路之依據。

系統之控制核心採用 FPGA 數位控制 IC，使用 VHDL 程式語言撰寫，並於 Simulink、PSIM、ModelSim 共同模擬環境下，驗證閉迴路數位系統之正確性，並下載到 Altera Cyclone 控制晶片，於不同風速下進行實驗，驗證系統之可行性，最後更改系統硬體之參數，即可將系統套用至 1.5KW 風力發電機。

關鍵詞：垂直軸風力發電機、最大功率追蹤、擾動觀察法、直線近似法、FPGA

Abstract

This program presents the design and implementation of an FPGA-based maximum-power-point-tracking (MPPT) charger for 400W vertical-axis wind-turbine generators. Because the maximum power point is not the same under the different wind speeds, the authors use the mixing of the perturbation and observation algorithm and the linear approximation method to get the maximum output power of the generation system. The simulation system of wind-turbine generation is built in PSIM and used to analyse the converter and MPPT system operation.

The digital control circuit has been designed using VHDL hardware description language. The simulation models for the MPPT controller have also been constructed and verified by using Simulink, PSIM and ModelSim cosimulation tools. The designed control circuit has been implemented on an Altera Cyclone FPGA logic device. Simulation and experimental result are shown to verify the viability of the proposed wind energy conversion system.

Keyword: vertical-axis wind-turbine generator, MPPT, perturbation and observation algorithm, linear approximation method, FPGA

目 錄

摘 要	I
Abstract	II
目 錄	III
圖目錄	V
表目錄	VIII
第一章 緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 研究目的與方法	2
第二章 風力發電系統架構	4
2.1 簡介	4
2.1.1 風力發電原理	4
2.1.2 風力發電機種類	8
2.2 三相全橋式整流器與升壓轉換器簡介	10
第三章 最大功率追蹤控制	14
3.1 最大功率追蹤控制方法	14
3.2 擾動觀察法及直線近似法	15
3.2.1 擾動觀察法	15
3.2.2 直線近似法	17
3.2.3 混合型追蹤法	18
3.3 最大功率追蹤模擬	20
第四章 實驗結果與討論	33
4.1 Simulink、Modelsim 與 PSIM 共同模擬	33
4.2 風力發電功率曲線量測	37

4.3 最大功率追蹤實測結果	47
4.3.1 固定風場實測結果	47
4.3.2 實際風場實測結果	51
4.4 結果與分析	53
第五章 結論與未來研究方向	54
參考文獻	55

圖目錄

圖 1.1 系統架構圖	3
圖 2.1 風流經風力機示意圖	5
圖 2.2 C_p 與 λ 之特性曲線圖	7
圖 2.3 輸出功率與發電機轉速特性曲線	7
圖 2.4 水平軸風力發電機	9
圖 2.5 垂直軸風力發電機	9
圖 2.6 三相全橋式整流器及升壓型直流轉換器	10
圖 2.7 連續模式下，升壓型轉換器電壓電流波形	11
圖 2.8 升壓型直流轉換器開關導通區間等效電路	12
圖 2.9 升壓型直流轉換器開關截止區間等效電路	12
圖 3.1 風力發電系統示意圖	14
圖 3.2 擾動觀察法控制方塊圖	15
圖 3.3 擾動觀察法流程圖	16
圖 3.4 擾動觀察法狀態圖	16
圖 3.5 直線近似法示意圖	17
圖 3.6 一分鐘內，風速變化情形	18
圖 3.7 放大範圍之最大功率曲線	19
圖 3.8 混合型 MPPT 動作流程	19
圖 3.9 風力發電機模擬方塊	20
圖 3.10 風力發電系統開迴路測試方塊	22
圖 3.11 7m/s 風下，輸出之功率曲線	22
圖 3.12 10m/s 風下，輸出之功率曲線	23
圖 3.13 15m/s 風下，輸出之功率曲線	23
圖 3.14 PSIM 及 C 語言連結模擬	24
圖 3.15 DLL 檔連結程式	25
圖 3.16 7m/s 風下，擾動觀察法模擬結果	26
圖 3.17 7m/s 風下，Duty-Power 特性曲線	27

圖 3.18 7m/s 風下，混合型模擬結果.....	27
圖 3.19 10m/s 風下，擾動觀察法模擬結果.....	28
圖 3.20 10m/s 風下，Duty-Power 特性曲線.....	28
圖 3.21 10m/s 風下，混合型模擬結果.....	29
圖 3.22 15m/s 風下，擾動觀察法模擬結果.....	30
圖 3.23 15m/s 風下，Duty-Power 特性曲線.....	30
圖 3.24 15m/s 風下，混合型模擬結果.....	31
圖 3.25 多風速查表方塊.....	31
圖 3.26 風速改變時，MPPT 模擬結果.....	32
圖 4.1 Simulink、ModelSim 及 PSIM 共同模擬.....	34
圖 4.1 PSIM 建構功率電路圖.....	34
圖 4.3 7m/s 風下 Simulink、ModelSim 及 PSIM 共同模擬結果(輸出功率).....	34
圖 4.4 7m/s 風下 Simulink、ModelSim 及 PSIM 共同模擬結果(輸出責任週期).....	35
圖 4.5 10m/s 風下 Simulink、ModelSim 及 PSIM 共同模擬結果(輸出功率).....	35
圖 4.6 10m/s 風下 Simulink、ModelSim 及 PSIM 共同模擬結果(輸出責任週期).....	35
圖 4.7 15m/s 風下 Simulink、ModelSim 及 PSIM 共同模擬結果(輸出功率).....	36
圖 4.8 15m/s 風下 Simulink、ModelSim 及 PSIM 共同模擬結果(輸出責任週期).....	36
圖 4.9 風扇電壓 70V，N-Power 率特性曲線.....	39
圖 4.10 風扇電壓 70V，Duty-Power 特性曲線.....	40
圖 4.11 風扇電壓 85V，N-Power 特性曲線.....	42
圖 4.12 風扇電壓 85V，Duty-Power 特性曲線.....	43
圖 4.13 風扇電壓 110V，N-Power 特性曲線.....	45
圖 4.14 風扇電壓 110V，Duty-Power 特性曲線.....	46
圖 4.15 各風速最大功率點.....	46
圖 4.16 風扇電壓 70V，最大功率追蹤輸出波形.....	48
圖 4.17 風扇電壓 70V，最大功率追蹤輸出責任週期.....	48
圖 4.18 風扇電壓 85V，最大功率追蹤輸出波形.....	49
圖 4.19 風扇電壓 85V，最大功率追蹤輸出責任週期.....	49
圖 4.20 風扇電壓 110V，最大功率追蹤輸出波形.....	50

圖 4.21 風扇電壓 110V, 最大功率追蹤輸出責任週期.....	50
圖 4.22 實際風場實測系統架構圖.....	51
圖 4.23 實際風場下, N-Power 曲線.....	52
圖 4.24 實際風場下, Vw-Power 曲線.....	52

表目錄

表 2.1 風力發電機分類表	21
表 3.1 風力發電模擬系統特性曲線表	21
表 3.2 系統模擬參數表	22
表 4.1 風扇電壓 70V，特性曲線表.....	37
表 4.2 風扇電壓 85V，特性曲線表.....	40
表 4.3 風扇電壓 110V，特性曲線表.....	43

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

近年來由於能源危機的問題愈趨嚴重，而石油、天然氣、煤氣等無法再生之石化能源的大量使用，已經面臨枯竭，且燃燒石化能源所產生之二氧化碳等氣體的大量排放，產生的空氣污染及溫室效應亦是現今重要課題，為了減少對於石化能源的依賴，因此世界各國積極的尋求替代能源，如太陽能、風能、熱能、水力、潮汐能、生質能等等，無環境污染且取之不竭，而我國對於再生能源的開發及利用也是相當重視，民國96年底再生能源裝置容量為210.3萬瓩，占系統裝置容量5.5%，在94年6月的全國能源會議中，預計2025年再生能源裝置容量到達800~900萬瓩，占系統裝置容量10~12%為目標[1]，因此對於再生能源之相關研究亦相對重要。

再生能源中以太陽能及風力最具潛力，而在風力發電[2]方面，2007年全球風力發電新增裝置容量為18,800MW，總裝置容量達到93,106MW，到2011年新增裝置容量達到33,500MW，總裝置容量達到203,151MW，預估2007~2011年新增裝置容量成長率為15.5%，累計裝置容量成長率為21.5%[3-4]，因此風力發電在全球亦是未來重點能源開發之一，在國內，因台灣屬海島地形，許多地區年平均風速高於4公尺/秒，相當適合風力發電，目前台電也正在進行風力第一~四期發電計畫，預估2010年總裝置容量可達215.9萬，且台電正計劃收購民營之再生能源，如台塑集團的台朔重工公司在麥寮離島工業區建造的風力發電廠，因此台灣之風力發電未來亦是相當有前景。

風力發電依照用途不同，可分為獨立型、併網型及混合型，獨立型發電系統是將產生之電能儲存於蓄電池，作為獨立電源，一般運用於偏遠無市電系統之地區，例如山區氣象站、離島地區及基地台等等，或是使用於路燈、告示牌等應用，併網型發電系統則是將產生之電能經由變頻器轉換成AC110V或220V 60 Hz，直接饋入市電，提供一般地區用電，而混合型則是將獨立型及併網型結合，依照不同需求配合使用。

風力發電機是將風能轉為機械能再轉為電能之能源轉換裝置，在相同風速

下，輸出功率依風力機轉速之不同而改變，但風速變化相當快速，使風力機容易偏離最大功率點，因此如何控制風力機轉速使輸出功率在不同風速下皆能到達最大功率為重要議題之一。

1.2 研究目的與方法

風力發電系統中，風力機渦輪轉速與風力機輸出功率為非線性特性，不同的風速，最大功率點皆不相同[5-7]，如何有效的利用風的能量，讓風力機之效率達到最高，常見的最大功率追蹤控制法則有許多種，例如擾動觀察法[8-14]、直線近似法[15]、增量電導法[16-18]、模糊邏輯控制法[18-23]等等，因此最大功率追蹤控制在風力發電系統中相當重要，也是本計劃研究重點。

本計劃配合獨立型 400W 垂直軸風力發電機，研製一個最大功率追蹤控制器，如圖 1.1 所示，在硬體電路方面，首先採用三相全橋式整流器，將風力發電機輸出之三相交流電轉為直流電，再經由升壓型直流轉換器(DC/DC boost converter)[24-27]將能量儲存於蓄電池，而數位電路方面，由於科技的快速進步，電路數位化已是目前的趨勢，雖然目前市面上仍以 ASIC(Application Specific Integrated Circuit)為主，但現場可程式化邏輯閘陣列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)克服了 ASIC 不夠靈活之缺點，可方便修改設計，因此本計劃利用 FPGA 作為控制核心，將最大功率追蹤控制程式下載於 FPGA 系統晶片，以此控制直流轉換器閘流體之導通角度，藉以控制風力發電機達到最大效率。

本計劃使用擾動觀察法及直線近似法的混合型作為最大功率追蹤控制法則，擾動觀察法之優點為架構簡單、需量測參數較少，利用擾動前後之功率大小變化，來決定輸出之責任週期擾動方向，如果功率較擾動前大，則持續朝前一次方向擾動，反之如果功率較擾動前小，則朝反方向擾動，如此持續擾動於最大功率點；直線近似法之優點為追蹤速度相當快速，可彌補擾動觀察法因須配合發電機反應時間，追蹤速度較慢之缺點。

系統模擬方面，功率電路利用 PSIM 模擬軟體[28]，建立 400W 風力發電機模擬方塊，建構在不同風速下之風力發電機之特性曲線，以及建立三相整流器、升壓型直流轉換器及蓄電池，數位電路則使用 Altera 公司之 QuartusII 系統開發平台，利用 VHDL 硬體描述語言設計[29]，並利用 Simulink[30]、PSIM 及

ModelSIM 軟體共同模擬，將 VHDL 程式碼載入 ModelSim，使用 Simulink 連結方塊連結 PSIM 及 ModelSim，模擬數位電路 IC 閉迴路之工作情況，實測方面，使用工業風扇模擬實際風場，並利用變壓器改變風扇之電壓，藉以模擬不同風速下之風場，為了驗證最大功率追蹤控制之正確性，利用控制升壓型直流轉換器之責任週期，建立風力機轉速及輸出功率之特性曲線，最後將 VHDL 程式下載至 FPGA(Altera Cyclone EPC12F256C8)晶片中，進行系統實測及驗證。

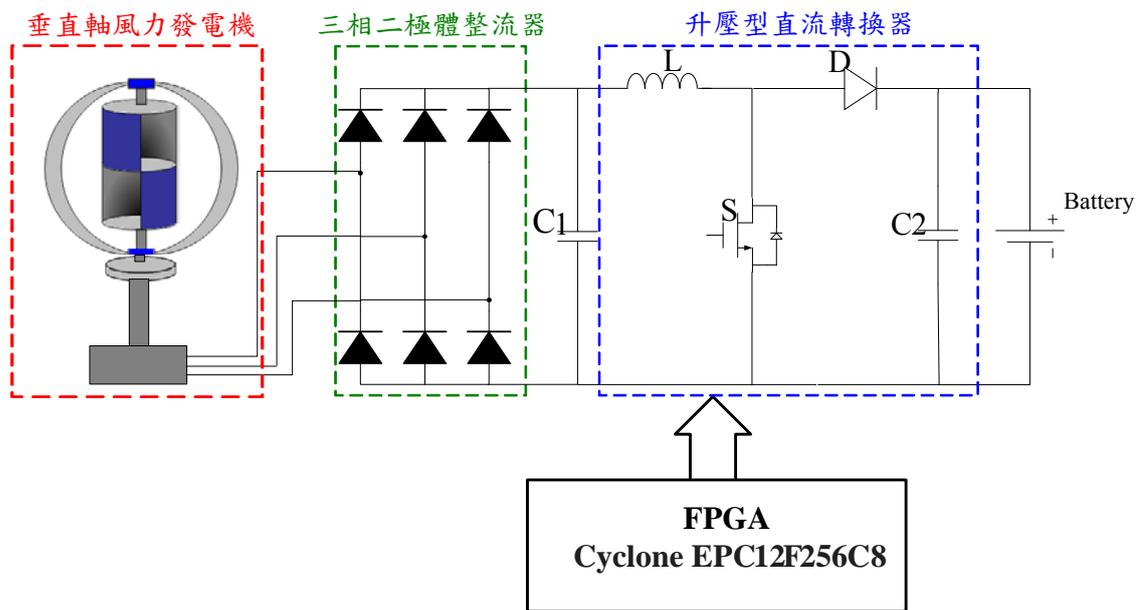


圖 1.1 系統架構圖

第二章 風力發電系統架構

2.1 簡介

台灣早期風力發電因效率低、供應不穩定及成本偏高之問題，因此風能僅能作為輔助性能源。不過隨著近年來國外風力發電技術的進步，及綠色能源時代的來臨，政府也開始大力推行風力發電，效率已大幅度提升，發電成本也接近傳統能源，因此不管是現在或是未來，風力發電發展前景是樂觀的。

2.1.1 風力發電原理

風的形成是由於太陽照射地面，不同地區產生不同之溫差，不同之壓差使大氣產生對流，風力發電則利用風的流動，推動風力發電機之葉片旋轉，進而帶動發電機旋轉產生電力，因此風力發電是將風的能量轉換為機械能再轉換為電能之轉換裝置。

蘊藏於風中的能量，可由物理觀念推導出來，假設在風能可利用的風速範圍內，氣流為不可壓縮，根據運動力學原理，風速 V_w 、質量流率(Mass flow rate) 為 \dot{m} 下之氣流動能 K 為

$$K = \frac{1}{2} \dot{m} V_w^2 \quad (2.1)$$

而單位時間內流過截面積 A 之質量流率，可表示為

$$\dot{m} = \rho A V_w \quad (2.2)$$

其中 ρ 為空氣密度，葉片旋轉面積 $A = \pi R^2$ ， V_w 為風速，因此蘊藏於風中之能量可表示為

$$P_w = \frac{1}{2} \dot{m} V_w^2 = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_w^3 \quad (2.3)$$

故風力機從風中所擷取之能量與空氣密度及葉片旋轉截面積成正比，和風速的立方成正比。但風力發電是依靠風流過風力機葉片前後之速度差來帶動葉片旋轉，因此無法將蘊藏於風中之能量完全擷取出來。

如圖 2.1 所示為風流經風力機示意圖， V_0 為風進入風管之風速， V_2 為風推

動風力機葉片後之風速， A_0 、 A_1 及 A_2 為 V_0 、 V_1 及 V_2 風速下所流過之截面積，假設此風為一理想流體，則入風口、流經葉片、出風口之質量流率皆為一常數，則可表示為

$$\dot{m} = \rho A_0 V_0 = \rho A_1 V_1 = \rho A_2 V_2 \quad (2.4)$$

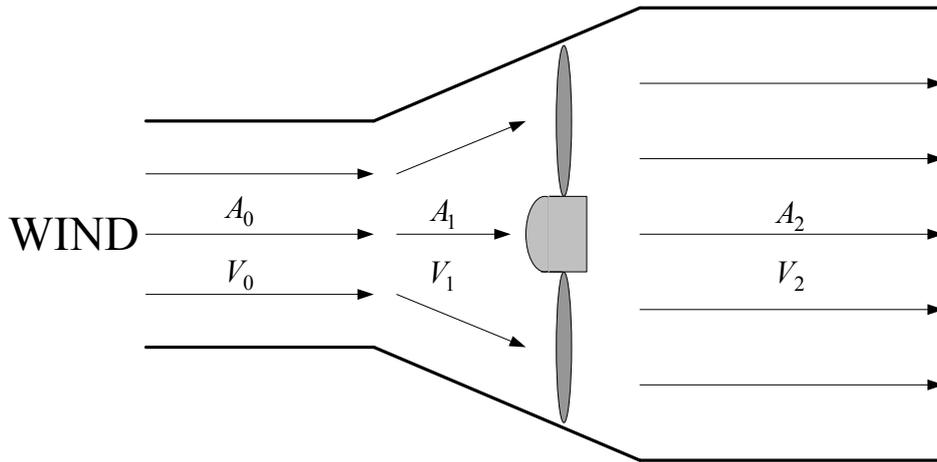


圖 2.1 風流經風力機示意圖

當風速由 V_0 推動風力機葉片後降為 V_2 ，此時風力機葉片受力為

$$F = \dot{m}(V_0 - V_2) = \rho A V_1 (V_0 - V_2) \quad (2.5)$$

若依風力機葉片兩面所受力差，可表示為

$$F = \frac{1}{2} \rho A (V_0^2 - V_2^2) \quad (2.6)$$

比較(2.5)式及(2.6)式可得

$$V_1 = \frac{1}{2} (V_0 - V_2) \quad (2.7)$$

由於風力機之輸入功率 P_w 為風對風力機葉片之推力 F 與通過風力機葉片之風速 V_1 之乘積，因此 P_w 可表示為

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A (V_0^2 - V_2^2) V_1 = \frac{1}{2} \dot{m} (V_0^2 - V_2^2) \quad (2.8)$$

當風吹向葉片時，風力機可獲取最大能量 P_{\max} 為

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \dot{m} V_0^2 = \frac{1}{2} \rho A V_0^3 \quad (2.9)$$

由(2.8)式及(2.9)式可得風力機擷取風中能量之效率 C_P 為

$$C_P = \frac{P_w}{P_{\max}} = \frac{\frac{1}{2} \rho A V_1 (V_0^2 - V_2^2)}{\frac{1}{2} \rho A V_0^3} \quad (2.10)$$

整理可得

$$C_P = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{V_2}{V_0}\right) \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_0}\right)^2\right] \quad (2.11)$$

令 $\frac{V_2}{V_0} = x$ 代入(2.11)式

$$C_P = \frac{1}{2} (1 + x - x^2 - x^3) \quad (2.12)$$

若欲獲得最大效率，令 $\frac{d\eta}{dx} = 0$ 代入(2.12)式可得

$$x = -1 \text{ 或 } \frac{1}{3} \quad (2.13)$$

風速 V_0 及 V_2 皆為正值，因此-1 不合，再將 $x = \frac{1}{3}$ 代回(2.12)式可得 η 之最大值為

$$C_{P_{\max}} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{3} - \left(\frac{1}{3}\right)^2 - \left(\frac{1}{3}\right)^3\right] = \frac{16}{27} \approx 0.593 \quad (2.14)$$

因此，理論上風能轉換為機械能之最大效率為 59.3%，由德國物理學家 Albert Betz 首先提出，亦稱為貝茲極限(Betz Limit)，但實際上，大多數的風力機轉換效率約 30%~50%，若再考慮經過發電機等機電設備將機械能轉換為電能之效率，總輸出效率約為 20%~45%。

風能擷取效率 $C_P(\lambda, \theta)$ 為風力機將風能轉換為機械能之效率，為尖端速度比 λ 與風力機與相對風速之傾斜角 θ 的函數，它與風速 V_w 、葉片旋轉角速度 ω 及葉片旋轉半徑 R 皆有關係，尖端速度比 λ 可表示為

$$\lambda = \frac{R\omega}{V_w} \quad (2.15)$$

其中 ω 為風力機葉片旋轉角速度，如圖 2.2 所示為空氣密度 ρ 、葉片旋轉面積 A 、風速 V_w 及 θ 為固定情況下， C_P 與 λ 之特性曲線圖，圖 2.2 中， C_P 隨著 λ 增大呈先上升後下降的趨勢，由(2.15)式可得知，當風速及葉片半徑為固定時角速度

ω 與 λ 成正比，因此當風力機葉片轉速持續上升時， C_p 亦是呈現先上升後下降之趨勢，而 C_p 達到最大值時即是此風力發電機之最大功率點，對應之轉速即是風力發電機此風速下之最佳轉矩點。

圖 2.3 為不同風速下功率與轉速之特性曲線，在每個不同的風速下皆有個別的最大功率點，風的變化相當快速，如何控制發電機轉速於最大功率曲線上，即是本計畫重點研究方向。

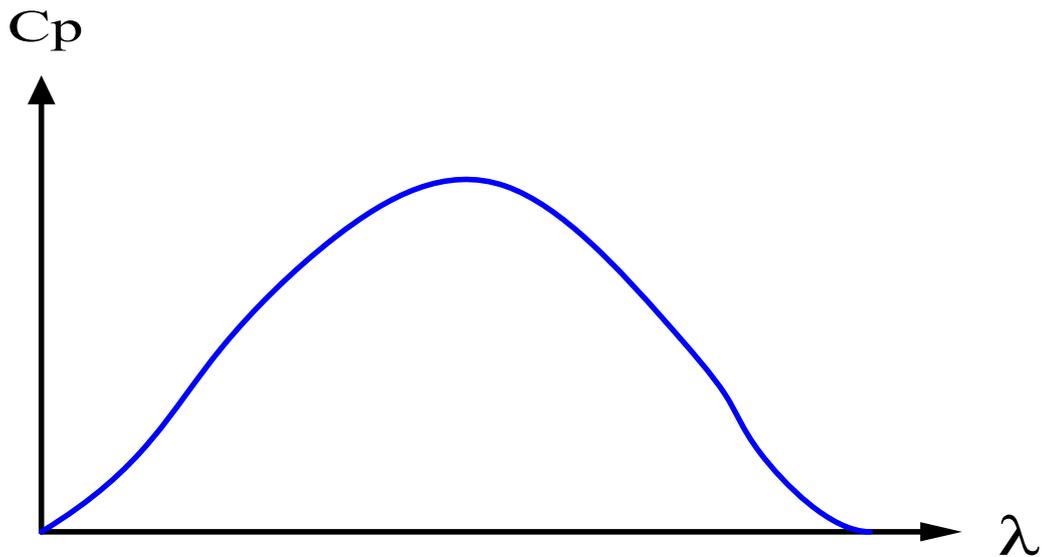


圖 2.2 C_p 與 λ 之特性曲線圖

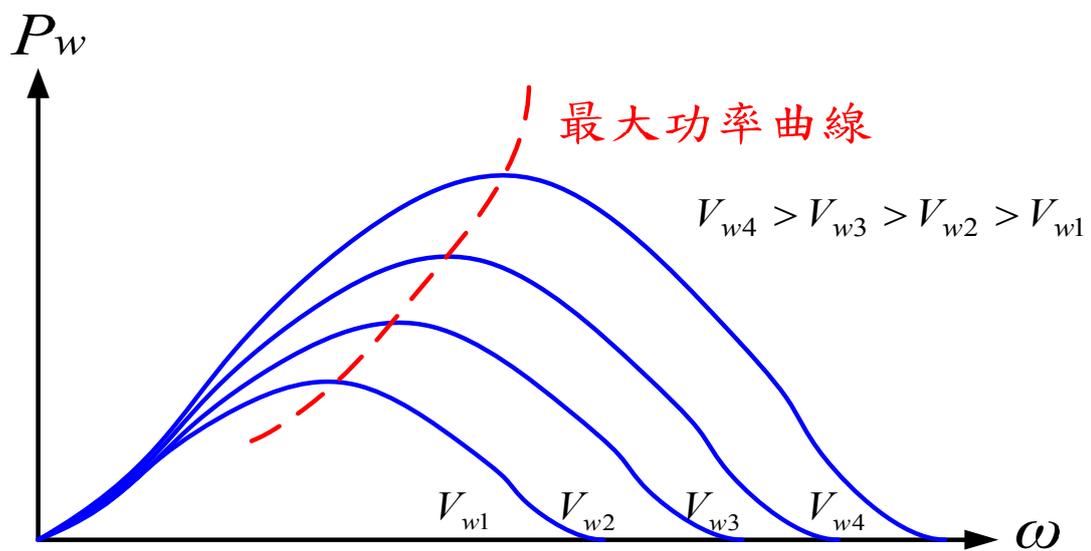


圖 2.3 輸出功率與發電機轉速特性曲線

2.1.2 風力發電機種類

風力機種類相當繁多，如表 2.1 所示：

表 2.1 風力發電機之分類

分類依據	描述	分類名稱
旋轉軸結構	風渦輪轉軸與地面相對方向	水平軸式 (Horizontal-axis type) 垂直軸式 (Vertical-axis type)
葉片受力情形	葉片工作原理	升力型 (Lift) 阻力型 (Drag)
發電機種類	發電機類型	同步機 (Synchronous generator) 感應機 (Asynchronous generator)
葉片位置	葉片與風向相對位置	上風式 (Up wind) 下風式 (Down wind)

依旋轉軸結構可分為水平軸與垂直軸兩種，如圖 2.4 及圖 2.5 所示，常見的大型風力發電機多為水平軸式，如澎湖中屯風力發電廠或台塑麥寮風力發電廠，但台灣地狹人稠，建設廠址有限，發展小型風力發電機愈趨重要，但水平軸風力發電機風切噪音較大，風向改變時需有尾翼來調整葉片之迎風面，適合架設於風向穩定且空曠區域，而垂直軸風力發電機由於不受風向限制、噪音低且啟動風速較小，適合於都會區及風向不穩定之區域。

本計劃所採用的風力發電機為國內新高能公司所生產的 400W 垂直軸風力發電機(DS-400)，發電機為永磁同步三相交流發電機，啟動風速為 2.5m/s，額定風速為 12m/s，葉片方面如圖 2.5 所示，由中間的 Savonius 型及外圍之 Darrieus 型組合而成，Savonius 為阻力型架構，有低啟動風速之優點，而 Darrieus 為升力型架構，具高轉換效率之優點。



圖 2.4 水平軸風力發電機



圖 2.5 垂直軸風力發電機

2.2 三相全橋式整流器與升壓轉換器簡介

本計劃使用之風力發電機為永磁同步三相交流發電機，如圖 2.6 所示為三相全橋整流器及升壓型直流轉換器，首先利用三相全橋式整流器將輸入之三相交流電整流為直流電，並經過電容 C_1 濾波後，提供升壓型直流轉換器(Boost Converter)穩定的直流電源，其中整流器使用最便宜且最常見的為二極體整流器，雖二極體整流器所整流出來之直流電壓為不可控，且功率流向只能由交流側流向直流側，但本計劃之最大功率追蹤由升壓式直流轉換器控制，且輸出為一固定電壓之蓄電池，因此使用架構簡單的二極體整流器。

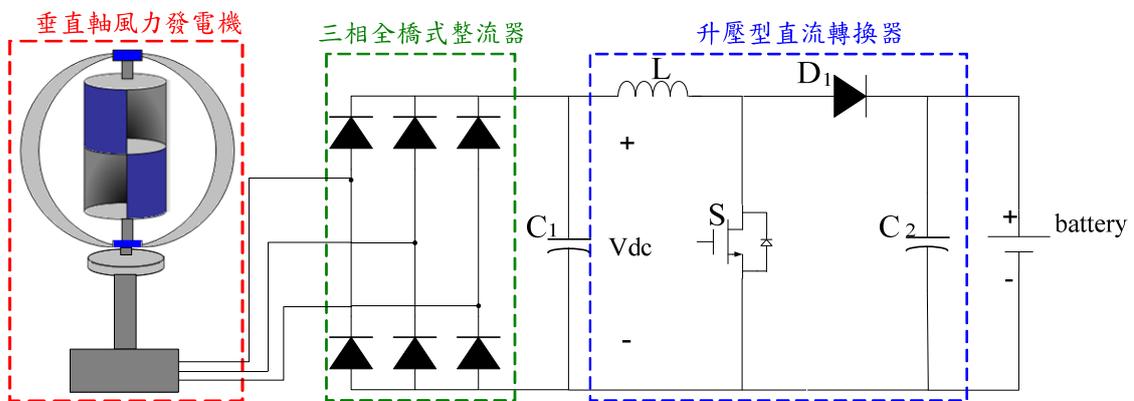


圖 2.6 三相全橋式整流器及升壓型直流轉換器

直流對直流轉換器目前被廣泛應用於直流電源供應器及馬達驅動等等領域，常見的直流對直流轉換器如降壓型(Buck Converter)、升壓型(Boost Converter)、升降壓型(Buck-Boost Converter)、邱克(Cuk Converter)等等，本計劃使用的 400W 風力發電機於額定功率 400W 下，輸出電壓整流後約為 36V，而轉換器之輸出側為一 48V 蓄電池，因此使用升壓型直流轉換器作為功率電路之主要架構，而開關之控制方式乃是利用典型的脈波寬度調變法(pulse-width modulation, PWM)，如圖 2.6 所示，升壓式直流轉換器輸出側為一穩定之直流電源，當開關 S 之導通時間改變時，輸入電壓 V_{dc} 之大小將跟著改變，而由於發電機之轉子速度與輸出電壓成正比，因此可藉由控制 V_{dc} 之大小，來間接控制發電機之機械轉速，由此作為系統最大功率追蹤之控制基礎。

升壓型直流轉換器電路，若考慮操作模式為連續模式 $[i_L(t) > 0]$ ，且所有元件為理想狀況下，如圖 2.7 所示， T_S 為 PWM 之週期， D 為 PWM 之責任週期， DT_S 為開關導通時間， $(1-D)T_S$ 為開關截止時間，依開關導通與截止時間可分為兩部份討論：

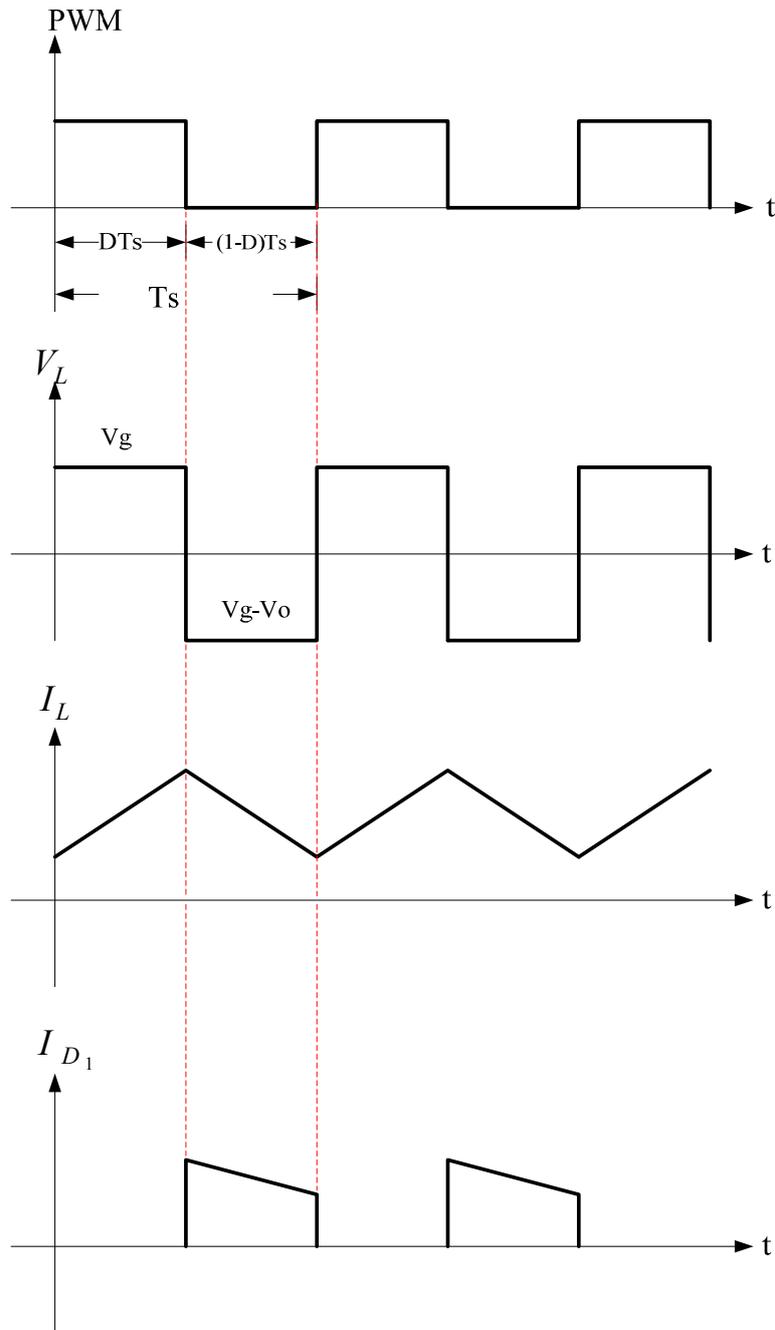


圖 2.7 連續模式下，升壓型轉換器電壓電流波形

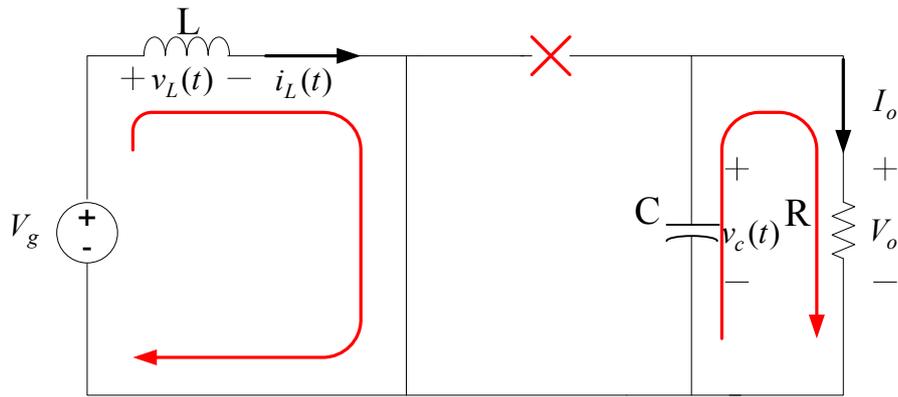


圖 2.8 升壓型直流轉換器開關導通區間等效電路

區間一 ($0 \leq t \leq DT_S$):

如圖 2.8 為 PWM 之責任周期為 D 時，此時開關 S 為導通，二極體 D_1 截止，電感上電壓 $v_L(t)$ 為

$$v_L(t) = V_g \quad (2.16)$$

此時輸入之直流電壓 V_g 對電感充電，電感電流持續上升至開關截止，此時電感電流 $i_L(t)$ 為

$$i_L(t) = i_L(0) + \frac{1}{L} \int_0^t v_L(\lambda) d\lambda = i_L(0) + \frac{V_g}{L} t \quad (2.17)$$

當 $t = DT_S$ 時，由(2.17)式可得

$$i_L(t) = i_L(0) + \frac{V_g}{L} DT_S \quad (2.18)$$

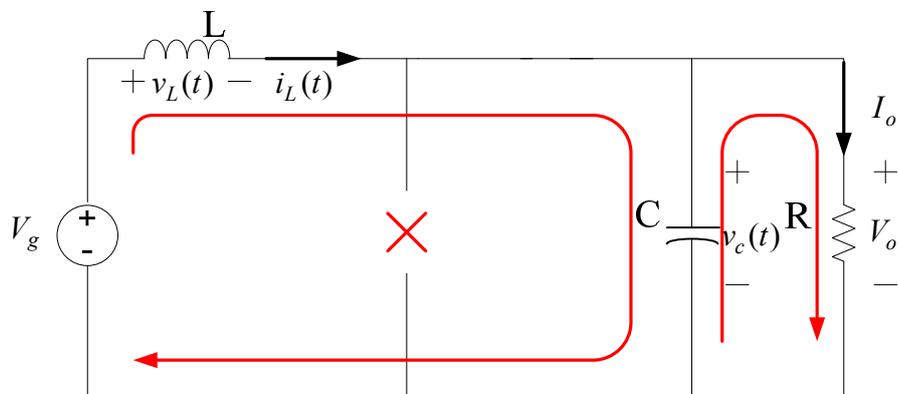


圖 2.9 升壓型直流轉換器開關截止區間等效電路

區間二 ($DT_S \leq t \leq T_S$) :

如圖 2.9 為 PWM 責任周期為(1-D)時，此時開關 S 為截止，二極體 D_1 導通，電感上電壓 $v_L(t)$ 為

$$v_L(t) = V_g - V_O \quad (2.19)$$

此時電感對輸出電容充電，電感電流將會持續下降至開關再次導通，則電感上電流 $i_L(t)$ 為

$$i_L(t) = i_L(DT_S) + \frac{1}{L} \int_{DT_S}^t v_L(\lambda) d\lambda = i_L(DT_S) + \frac{V_g - V_O}{L} (t - DT_S) \quad (2.20)$$

由(2.20)式可得 $t = T_S$ 時， $i_L(t)$ 為

$$i_L(t) = i_L(DT_S) + \frac{V_g - V_O}{L} (1 - D)T_S \quad (2.21)$$

當系統穩態時，依伏秒平衡定理，電感電壓一周期之平均值為零

$$\int_0^t v_L dt = \int_0^{DT_S} v_L(t) + \int_{DT_S}^t v_L(t) = 0 \quad (2.22)$$

由(2.16)、(2.19)及(2.22)式可得

$$\frac{V_g(DT_S) + [V_g - V_O(1 - D)T_S]}{T_S} = 0 \quad (2.23)$$

整理可得

$$\frac{V_O}{V_g} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.24)$$

因假設系統為理想，且忽略所有元件之損失，則輸入功率 P_g = 輸出功率 P_O ，輸入電流與輸出電流關係可表示為

$$I_g \cdot V_g = I_O \cdot V_O \quad (2.25)$$

移項可得

$$\frac{I_O}{I_g} = \frac{V_g}{V_O} = 1 - D \quad (2.26)$$

由(2.24)式可得知輸出電壓與輸入電壓之關係式，本計劃之最大功率追蹤控制器即是利用調整責任周期 D 之大小，使風力發電機運轉於最大功率，而最大功率追蹤法則將於第三章作詳細的介紹。

第三章 最大功率追蹤控制

3.1 最大功率追蹤控制方法

風力發電為一種將風能轉換為機械能再轉換為電能之轉換裝置，由於風的變化相當快速，且不同的風速下，最大功率點皆不相同，如何利用最大功率追蹤(Maximum-Power-Point-Tracking, MPPT)控制，使不同風速下之發電效率達到最高，在風力發電系統裡相當重要，而風力機之效率，由第二章可得知與風力發電機之機械轉速有關，如圖 3.1 所示，發電機之機械轉速與發電機之輸出電壓成正比，亦即與整流後之電壓 V_{dc} 成正比，因升壓型轉換器之輸出為蓄電池， V_O 為固定電壓，因此控制升壓型轉換器之責任週期即可控制 V_{dc} 之大小，並間接控制風力機之機械轉速，以此達到最大功率追蹤之目的。

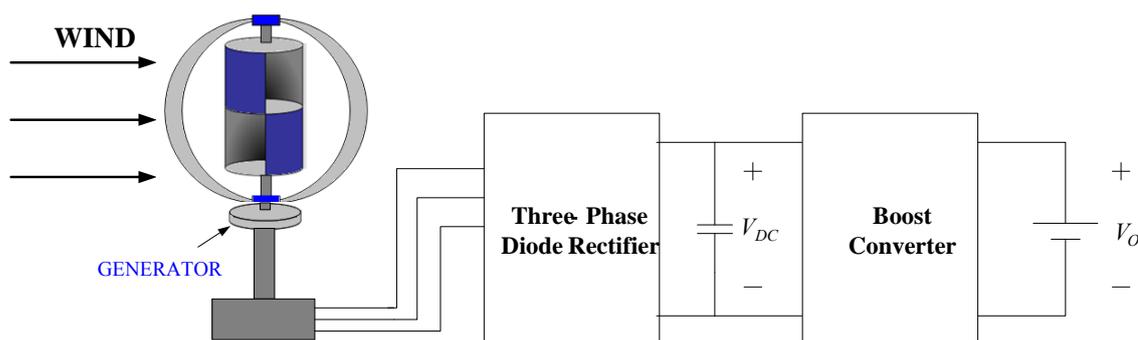


圖 3.1 風力發電系統示意圖

最大功率追蹤法則有許多種，如增量電導法、模糊邏輯法、擾動觀察法等，其中增量電導法藉由量測輸出之增量電導值與瞬時電導值，經比較後決定下一次之開關責任週期，但於實際應用時，若回授信號無法非常精密，將會有很大的誤差；模糊邏輯法之動作原理為量測功率之變化量及發電機轉速之變化量，將參數經模糊化後，經邏輯判斷，再經由解模糊化判斷輸出控制信號，但若無法正確設計模糊規則，將會產生誤差，且計算時間較久；本論文使用之最大功率追蹤法則為擾動觀察法及直線近似法之混合，將於以下作詳細的介紹。

3.2 擾動觀察法及直線近似法

3.2.1 擾動觀察法

圖 3.2 所示為擾動觀察法控制方塊圖[22]，控制方法為先偵測整流後之直流電壓 V_{dc} 及電流 I_{dc} 後，經由控制器計算功率之大小，再比較開關責任週期前後之功率大小，以決定下一步責任週期之擾動方向，詳細流程圖如圖 3.3 所示，經過參數初始化後，先輸出一 PWM 訊號，讀取回授之 I_{dc} 及 V_{dc} 訊號，並計算其功率，將計算得到之功率 P_{n+1} 與上一周期計算之功率 P_n 做比較，判斷責任週期之擾動方向是否正確，再依據上一次之擾動方向來決定輸出之責任週期，最後更新參數，其中 Δd 為擾動量；而擾動方向之判斷可分為四種情況，圖 3.4(a)所示為當 $P_{n+1} > P_n$ 且 $D_{n+1} > D_n$ ，表示此時擾動方向為正確，則持續朝上一周期之擾動方向擾動，輸出 $(D + \Delta d)$ 之責任週期，圖 3.4(b)為當 $P_{n+1} > P_n$ 且 $D_{n+1} < D_n$ ，則輸出 $(D - \Delta d)$ 之責任週期，圖 3.4(c)為當 $P_{n+1} < P_n$ 且 $D_{n+1} > D_n$ 時，表示上一次之擾動方向錯誤，開關之責任週期 D 則朝反方向擾動，輸出 $(D - \Delta d)$ 之責任週期，圖 3.4(d)為當 $P_{n+1} < P_n$ 且 $D_{n+1} < D_n$ 時，則輸出 $(D + \Delta d)$ 之責任週期，依照上述之規則，輸出之責任週期將持續擾動至最大功率點。

擾動觀察法之優點為量測參數較少，且控制方法簡單，但於擾動至最大功率點時，擾動並未停止，會在附近持續左右擾動，造成功率率的損失，若降低擾動量，達最大功率點時擾動損失會降低，但追蹤時需花費較長的時間，同理若提高擾動量，搜尋速度較快，但達最大功率點之功率消耗會加大，因此擾動量之大小則依靠測試後依經驗選擇，且擾動觀察法之擾動頻率亦限制於發電機反應速度，若擾動頻率高於發電機之反應速度，易造成系統之誤判。

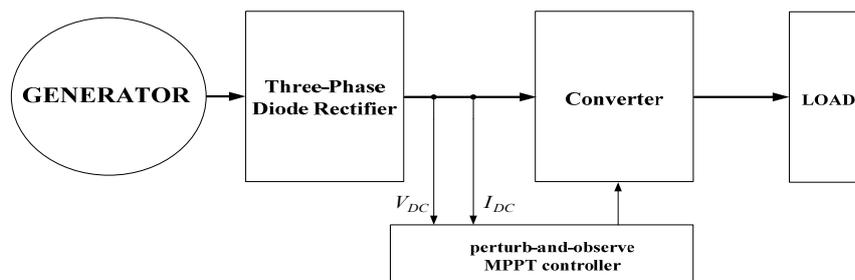


圖 3.2 擾動觀察法控制方塊圖

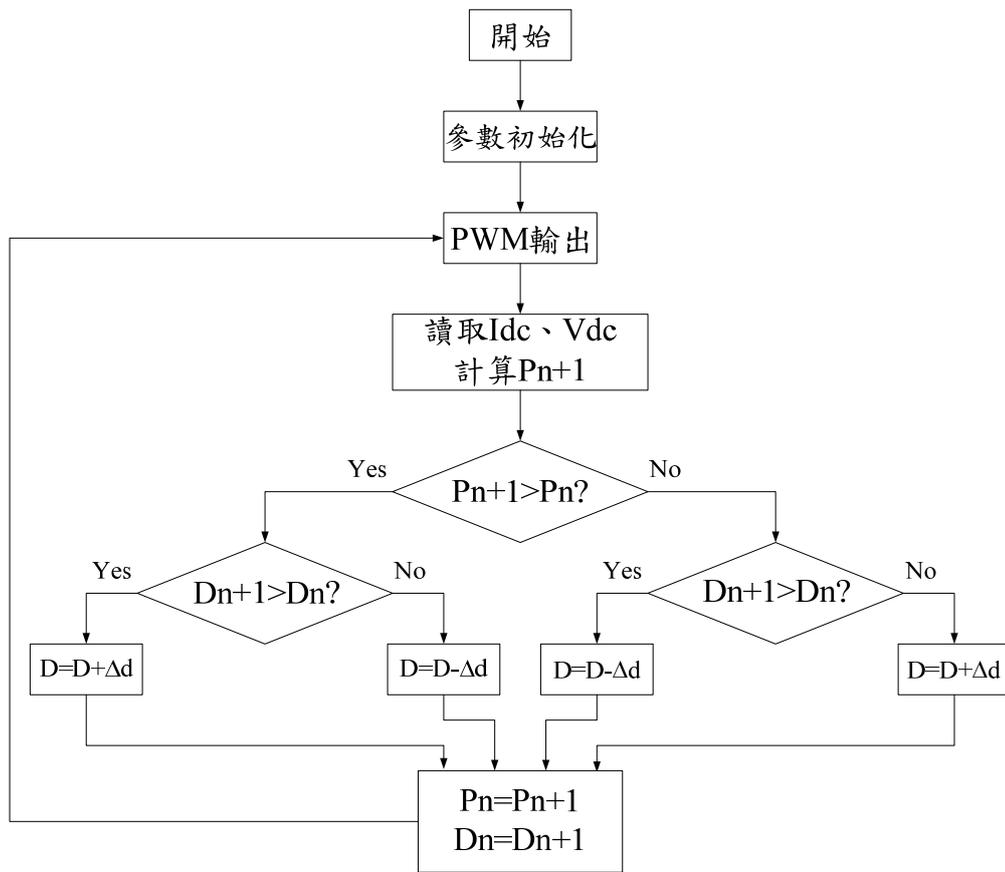


圖 3.3 擾動觀察法流程圖

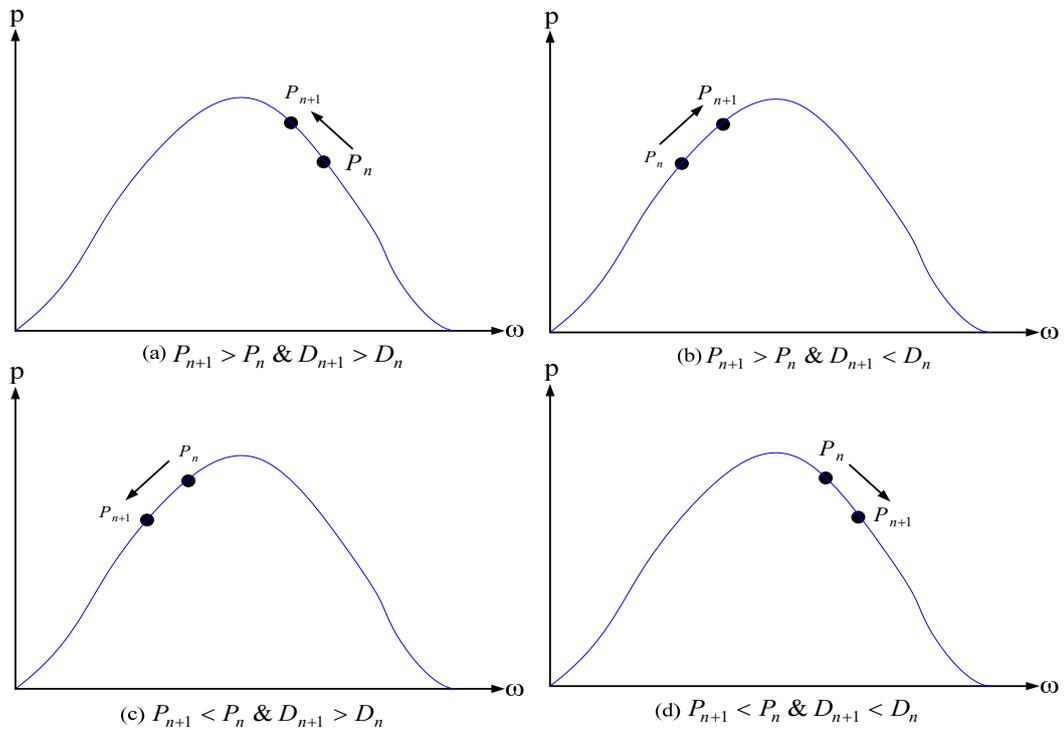


圖 3.4 擾動觀察法狀態圖

3.2.2 直線近似法

直線近似法如圖 3.5 所示，將不同風速下之最大功率點之功率及責任周期量測出，並將其近似為一直線，作為追蹤之準則，如圖所示於風速為 V_{w2} 時，若此時位於 A 點，偏離最大功率點，此時判斷 A 點功率 P1 所對應之最大功率點為 B，並輸出 B 點之責任周期 D2，當責任周期改變為 D2 後，輸出功率將改變為 C 點之功率 P2，此時系統繼續判斷 P2 所對應之最大功率點為 D，因此輸出 D 點所對應之責任周期為 D3，當責任周期改變為 D3 後，輸出功率將上升至 E 點所對應之功率 P3，並再判斷 P3 所對應之最大功率點為 F，則輸出 F 點所對應之責任周期 D4，進而達到最大功率點 P4，直線近似法之優點為追蹤速度快，缺點為當最大功率曲線之量測不夠精準時，會造成誤差，且不同之風力發電機及負載，最大功率曲線皆不相同。

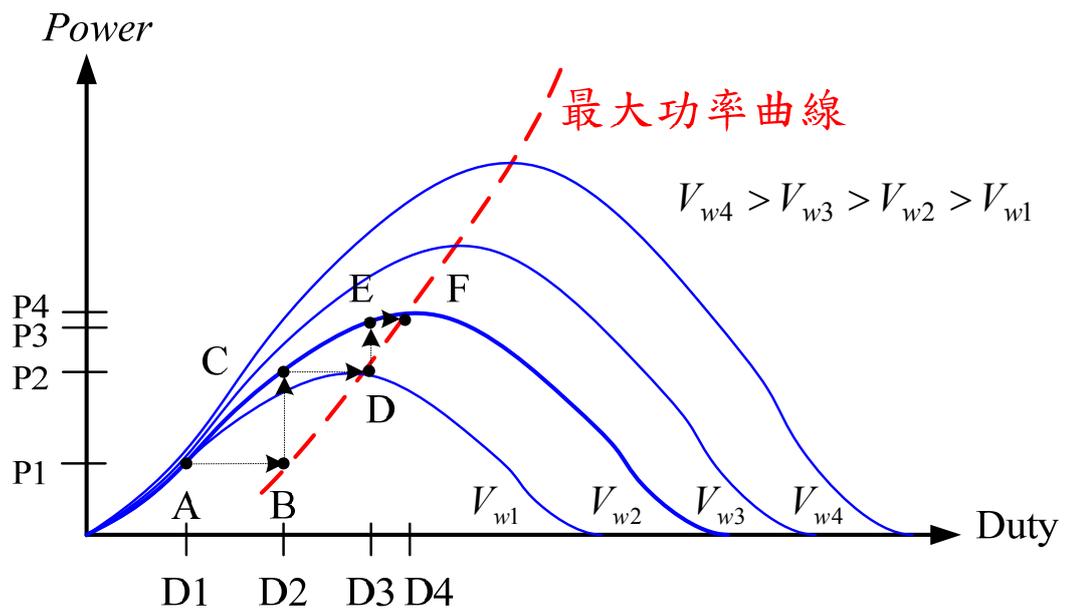


圖 3.5 直線近似法示意圖

3.2.3 混合型追蹤法

如圖 3.6 所示為一分鐘內風速變化情形，測試場所為位於本校風力發電測試站，由圖可得知風的變化相當快速，且變化落差相當大，但擾動觀察法追蹤速度較慢，易造成尚未追蹤至最大功率點風速卻已改變，而直線近似法雖追蹤快速，但若無標準之風洞測試，難以精準量測出最大功率曲線，有鑒於上述兩種最大功率追蹤法則之缺點，本論文於最大功率追蹤時，結合兩種方法，將直線近似法之最大功率曲線放大，如圖 3.7 所示將所測得之最大功率曲線放大範圍，當直線近似法追蹤至範圍內後，擾動觀察法將繼續擾動至最大功率點，如此可提升追蹤速度及精準度，如圖 3.8 為混合型最大功率追蹤法則之動作流程，首先由回授之 I_{dc} 及 V_{dc} 計算出功率後，由直線近似法可得知對應之 Duty，並與上一周期之 Duty 比較，若相差大小於所設計之範圍外，則採用直線近似法，若已進入範圍內，則採擾動觀察法，最後更新參數，輸出責任周期。

此種設計方式，若起始點偏離最大功率點很遠，可快速追蹤至最大功率點附近，且若已進入直線近似法之設計範圍，已接近最大功率點，則可降低擾動觀察法之擾動量，減少擾動之損失。

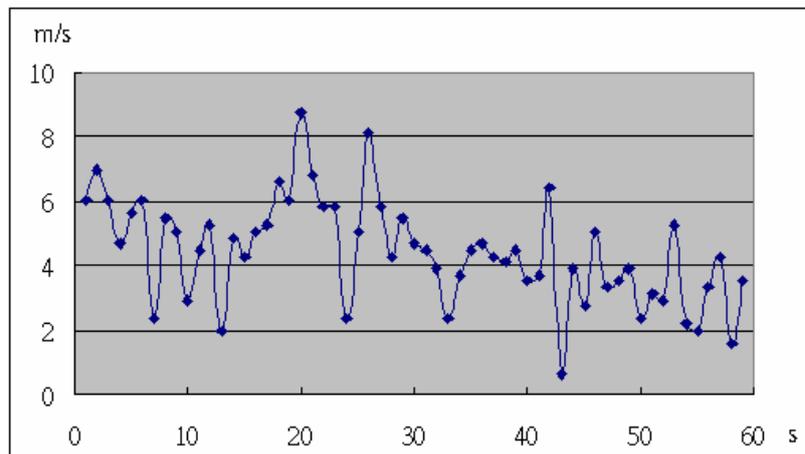


圖 3.6 一分鐘內，風速變化情形

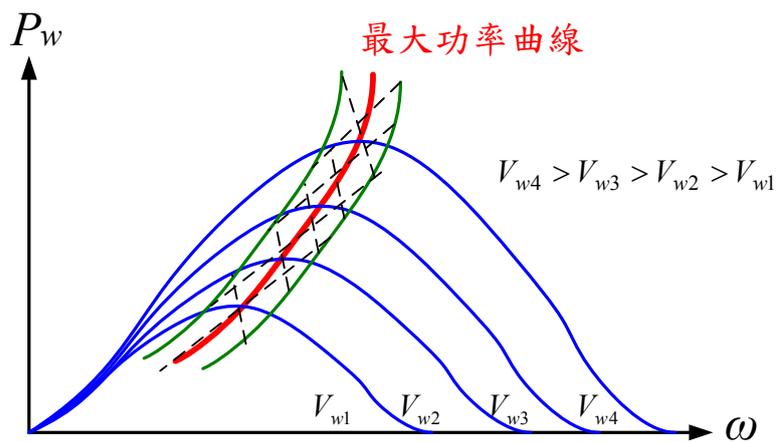


圖 3.7 放大範圍之最大功率曲線

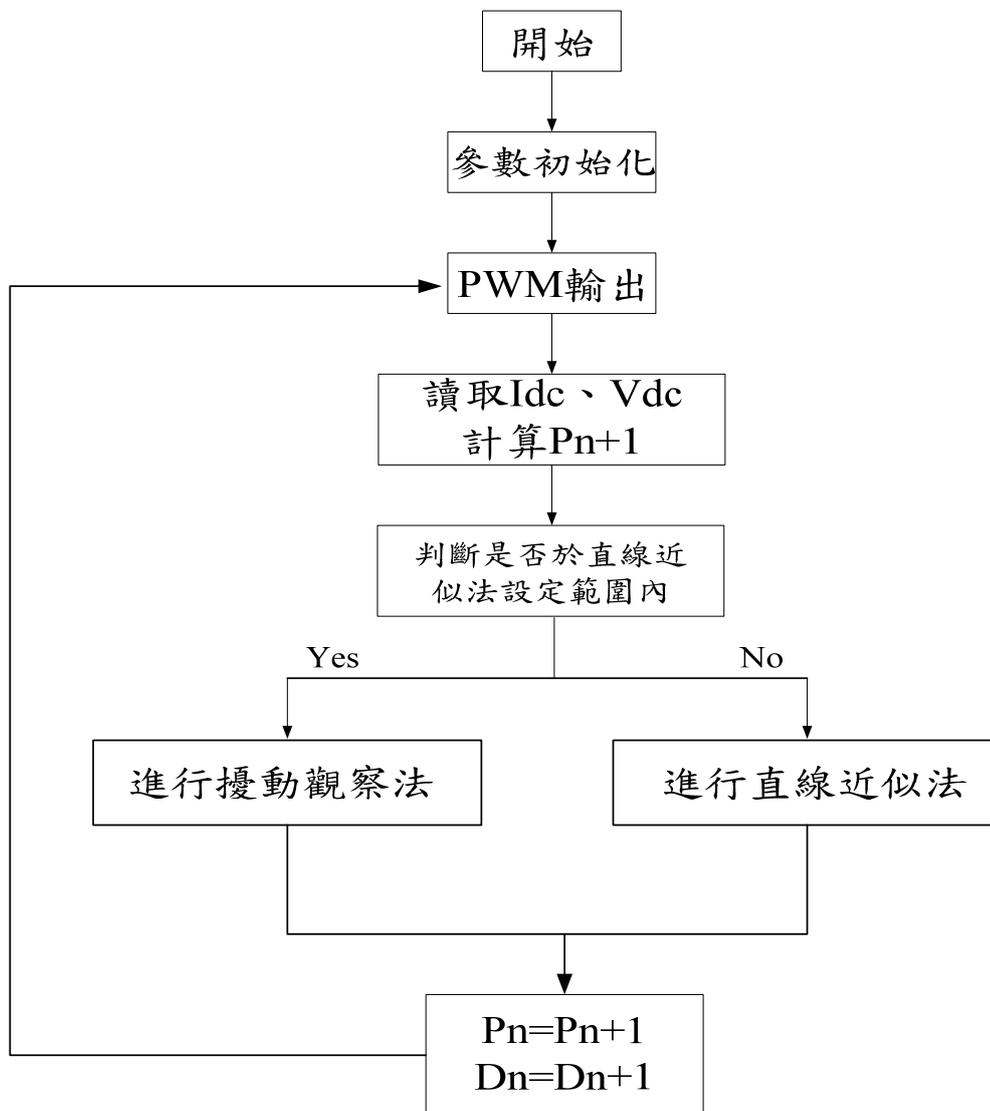


圖 3.8 混合型 MPPT 動作流程

3.3 最大功率追蹤模擬

為了驗證系統最大功率追蹤控制之可行性，本論文使用 PSIM 作為主要之模擬軟體，其為美國 Powersim 公司開發[23]，為一種電力電子模擬軟體，軟體內建包括一般常用的電子元件、變壓器、馬達及負載模型...等等，且具備了類比與數位元件，可進行類比/數位混合模擬，並內建 C 語言所設計之動態連結檔 (DLL) 之連結方塊，更能與 MATLAB/Simulink 模擬軟體進行同步連結模擬，且模擬速度較快，適合模擬時間較長之風力發電系統。

建立風力發電模擬系統前須先建立一風力發電機之模擬方塊，如圖 3.9 所示，風車模擬方塊是利用第二章所介紹之風車特性方程式為基礎所建立，發電機部分使用 PSIM 內建的永磁同步發電機(PMSM)模型，並利用圖 2.3 於內部建立不同風速下之風車特性曲線表，提供不同轉數時 C_p 值之查表，表 3.1 為模擬 7m/s 風、10m/s 風、15m/s 風所建立之特性曲線表，並假設於三種不同風速下，三個不同的最大功率點 C_p 皆為 0.4，上述所建之特性曲線及發電機參數皆為假設，與實際 400W 垂直軸發電機之參數並不相同，但並不影響驗證最大功率追蹤控制器之正確性。

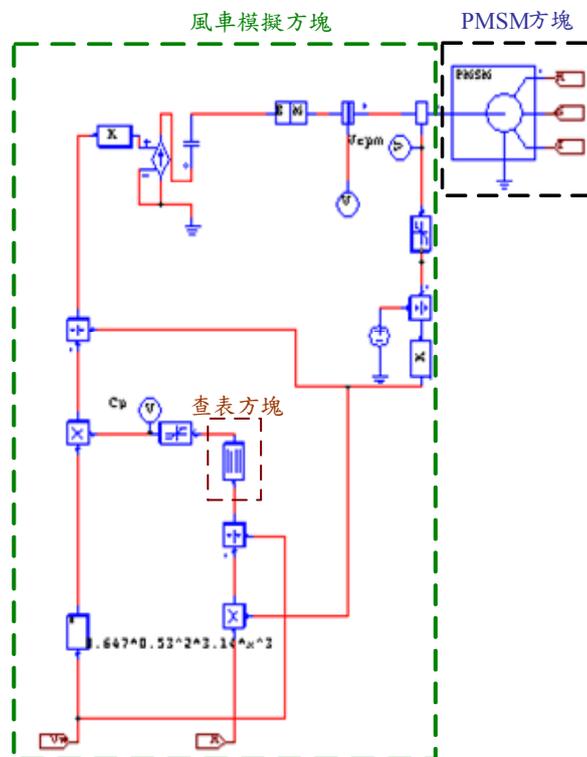


圖 3.9 風力發電機模擬方塊

表 3.1 風力發電模擬系統特性曲線表

7m/s		10m/s		15m/s	
λ	C_p	λ	C_p	λ	C_p
0.80	0.05	0.67	0.04	0.56	0.07
1.01	0.10	0.83	0.09	0.74	0.12
1.22	0.15	0.99	0.13	0.83	0.16
1.43	0.20	1.15	0.18	1.11	0.20
1.64	0.25	1.31	0.22	1.20	0.25
1.85	0.30	1.47	0.27	1.30	0.29
2.00	0.35	1.62	0.31	1.39	0.34
2.27	0.40	1.78	0.36	1.48	0.35
2.51	0.35	1.94	0.40	1.57	0.38
2.69	0.31	2.10	0.35	1.67	0.40
2.90	0.26	2.26	0.29	1.76	0.33
3.11	0.21	2.42	0.24	1.85	0.27
3.33	0.16	2.58	0.18	1.94	0.20
3.54	0.12	2.74	0.13	2.04	0.10
3.75	0.07	2.89	0.07	2.13	0.05
3.96	0.02	3.05	0.02	2.22	0.02

如圖 3.10 所示為 PSIM 所建立開回路測試方塊，模擬之參數如表 3.2 所示，為了驗證模擬系統之可行性，首先於固定風速下，利用 PWM 產生器輸出 0.1~0.9 之責任周期，區間設為 0.01，並將每一點紀錄後，可得到該風速下之功率曲線，如圖 3.11、圖 3.12、圖 3.13 為 7m/s、10m/s、15m/s 風下模擬之功率曲線，其中 7m/s 風時，最大功率點發生於 Duty 約為 0.53 時，此時功率約為 54W，轉速約為 284rpm；10m/s 風時，最大功率點為 Duty 約為 0.49 時，功率約為 143W，轉速約為 350rpm；15m/s 風時，最大功率點為 Duty 約為 0.42 時，功率約為 388W，轉速約為 447rpm，接下來將加入最大功率追蹤控制器之模擬，模擬結果將依據測得之最大功率點來驗證是否正確。

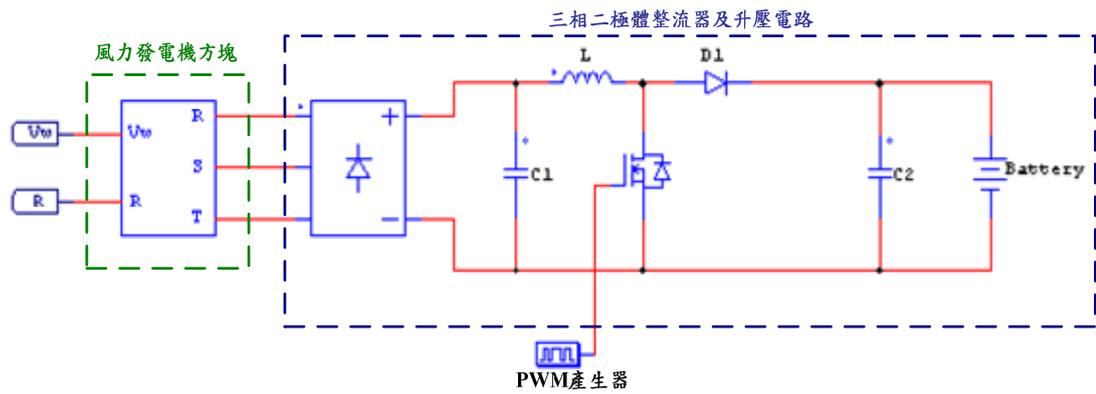


圖 3.10 風力發電系統開迴路測試方塊

表 3.2 系統模擬參數表

參數名稱	風速	葉片半徑	C1	C2	L	PWM 頻率	電池電壓
參數數值	7~15m/s	0.53m	940uF	940uF	2mH	10kHz	48V

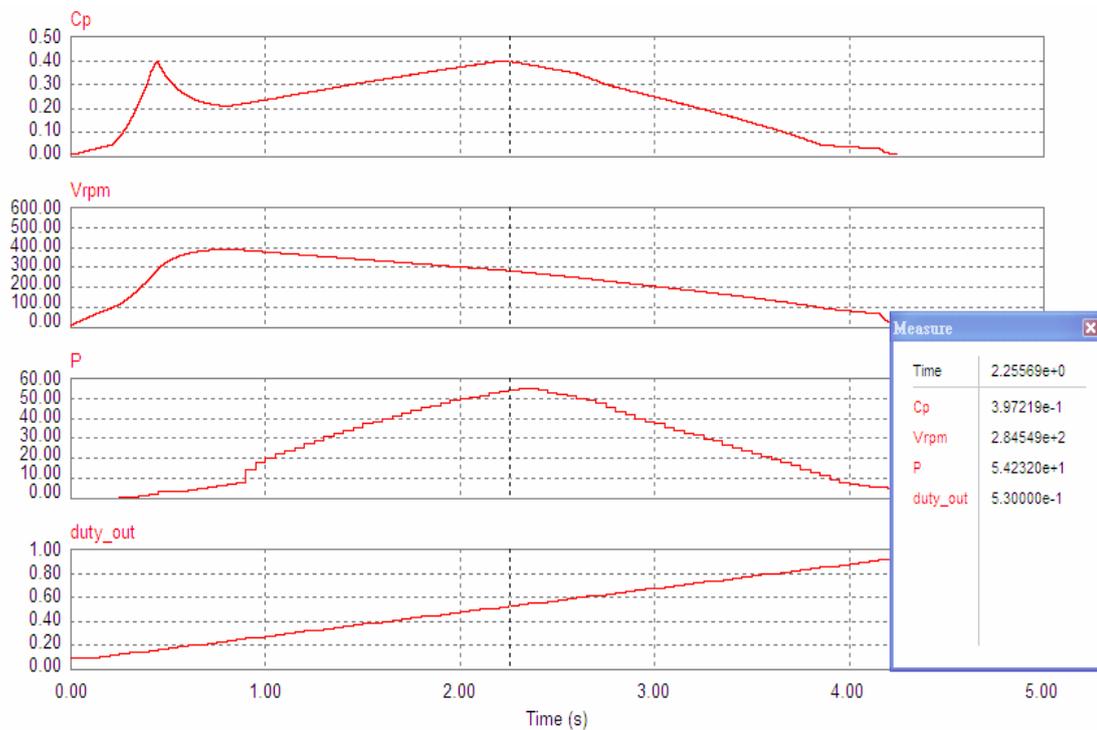


圖 3.11 7m/s 風下，輸出之功率曲線

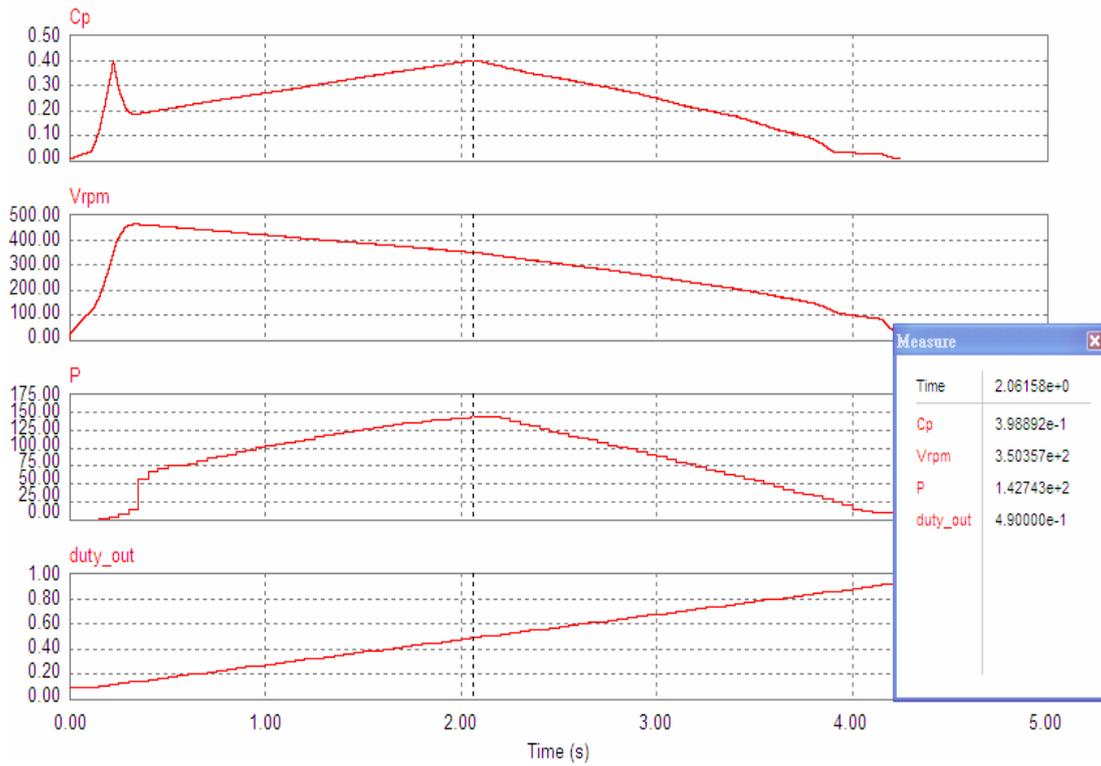


圖 3.12 10m/s 風下，輸出之功率曲線

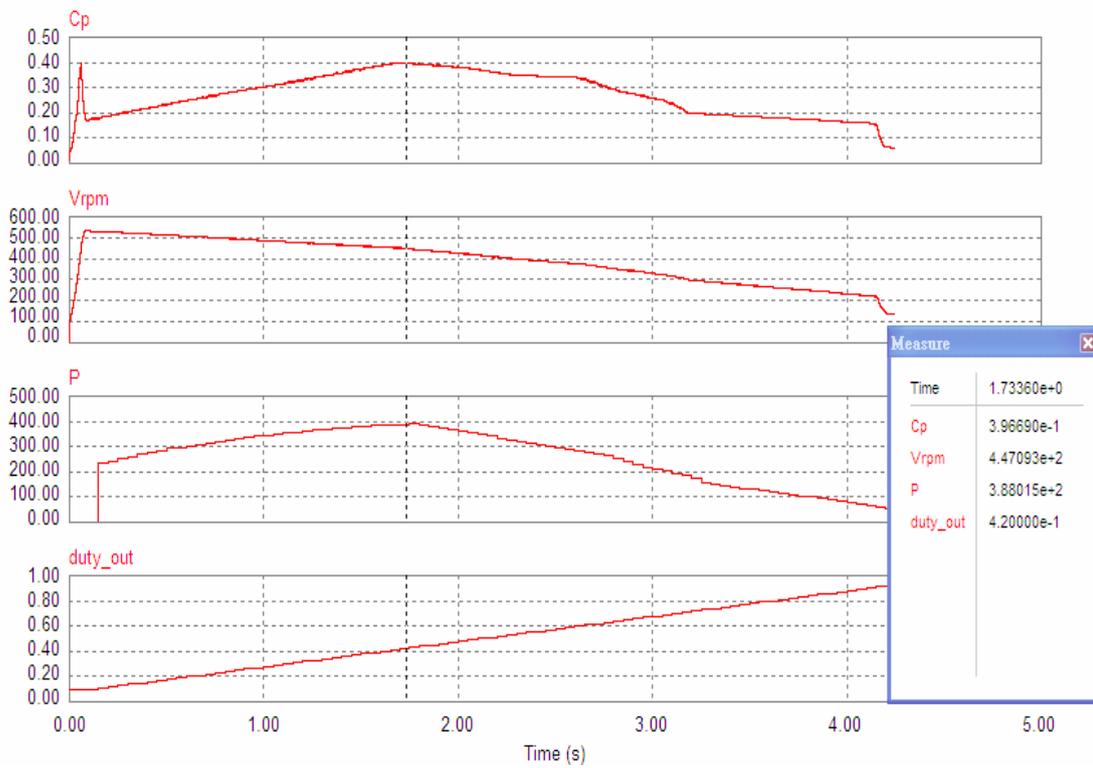


圖 3.13 15m/s 風下，輸出之功率曲線

PSIM 模擬時，MPPT 控制器之設計，利用 C 程式語言撰寫，並使用 PSIM 內建的動態連結 DLL 檔連結方塊，如圖 3.14 所示，而連結之程式如圖 3.15 所示，最大功率追蹤之撰寫方式為依據圖 3.8 之流程來撰寫，由於 V_{dc} 及 I_{dc} 具有漣波，因此 DLL 檔內加入了平均值計算器，計算一周期之平均值，增加回授信號之正確性，其模擬原理為先將功率電路之 V_{dc} 及 I_{dc} 回授至 DLL 連結方塊，再將 V_{dc} 及 I_{dc} 相乘為功率後，進行 MPPT 之運算，運算結果之責任周期與一 10kHz 之鋸齒波進行比較，產生升壓電路開關之 PWM 訊號，進而控制發電機之轉速，如此反覆追蹤至最大功率點，而擾動觀察法方面，設定擾動頻率為 5Hz ，擾動量為 0.01 ，輸出 PWM 之責任周期預設為 0.1 ，直線近似法範圍設計為 0.1 ，觀察模擬結果之效率 C_p 、發電機轉速，輸出功率及 Duty 之波形，與先前紀錄之功率曲線最大功率點相比對，觀察是否追蹤至最大功率點，並比較擾動觀察法及混合型之追蹤情況，驗證混合型追蹤法則之可行性。

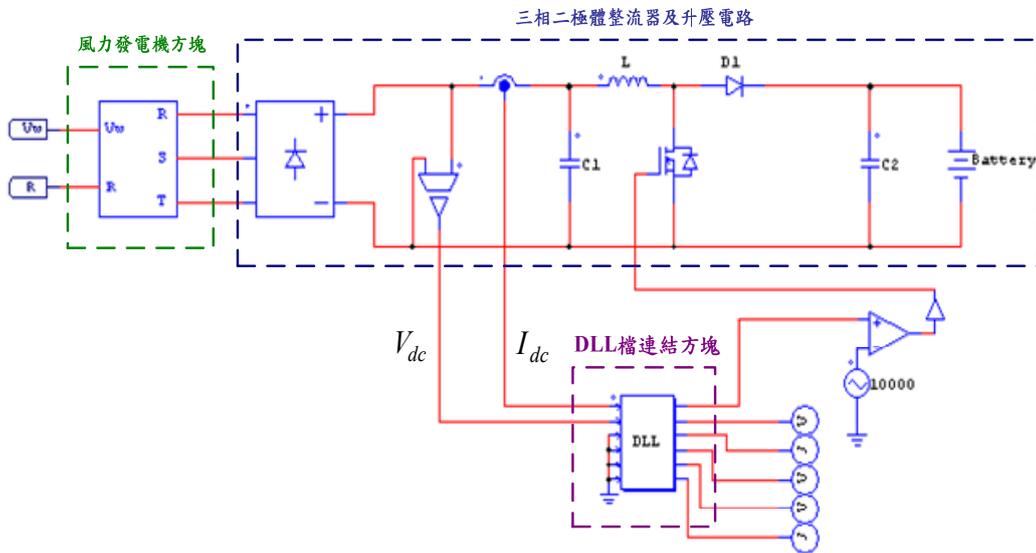


圖 3.14 PSIM 及 C 語言連結模擬

<pre> #include <math.h> __declspec(dllexport) void simuser (t, delt, in, out) double t, delt; double *in, *out; { double Tperiod=1.0/5.0,Ts=1.0/4000.0; static double P,duty=0.1,Pk=0.0,temp_P=0.0,t_start=0.1,P_start=0.0, p_avg,i_in,v_in,i_avg,v_avg,t_table=2,p_n=0; static int n1=0,nk=1,signal_duty=0,signal_P=1,nt=1; if (t>=nk*Tperiod) if (duty-in[2]>0.05 duty -in[2] < -0.05) duty=in[2]; if(t>=t_start) { i_in=in[0]+i_in; v_in=in[1]+v_in; n1=n1+1; if(t>=t_start+Tperiod) { i_avg=i_in/n1; v_avg=v_in/n1; p_avg=i_avg*v_avg; i_in=0; v_in=0; t_start=t; n1=0; } } if(t>=nk*Tperiod) {nk=nk+1; } Pk=temp_P; P=p_avg; if(P>Pk) signal_P=1; else signal_P=0; if(signal_P==1) { </pre>	<pre> if(signal_duty==1) { duty=duty+0.01; signal_duty=1; } else if(signal_duty==0) { duty=duty-0.01; signal_duty=0; } } else if(signal_P==0) { if(signal_duty==1) { duty=duty-0.02; signal_duty=0; } else if(signal_duty==0) { duty=duty+0.01; signal_duty=1; } } } else duty=duty; if (signal_P==2) duty=duty; temp_P=P; } if(duty>=0.9) {duty=0.9;} if(duty<=0.1) {duty=0.1;} temp_P=P; out[0]=duty; out[1]=P; out[2]=Pk; out[3]=i_avg; out[4]=v_avg; out[5]=n1; } </pre>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

圖 3.15 DLL 檔連結程式

擾動觀察法之模擬結果如圖 3.16、圖 3.19、圖 3.22 所示，紀錄 7m/s、10m/s、15m/s 風下追蹤區間及擾動區間之 C_p 、發電機轉速，輸出功率及 Duty，可觀察出，當 Duty 持續改變時，功率持續上升，表示追蹤方向正確，達最大功率時 C_p 約為 0.4，與之前設計各風速之最大功率點相符合，表示此時之功率為此風速下之最大功率點，但亦可觀察出擾動觀察法的缺點，當追蹤到最大功率點時並未停止擾動，會於最大功率點附近左右擾動，造成功率消耗，若要減少功率之消耗，可降低其擾動量，但追蹤速度會降低，因此擾動量之選擇為依實測時選一

折衷值，而圖 3.17、圖 3.20、圖 3.23 為各風速下 Duty 與功率之特性曲線，可以更清楚觀察出，當功率上升時，Duty 由 0.1 持續向上追蹤，直到追蹤至最大功率點。

圖 3.16 及圖 3.18 為 7m/s 風下之模擬結果，於最大功率點之 C_p 為 0.39，轉速(Vrpm)約為 280rpm，功率(P)約為 52W，輸出之責任周期(duty_out)約為 0.53，與開迴路模擬之最大功率點相符合，而擾動觀察法於 8 秒達最大功率點，混合型為 5 秒。

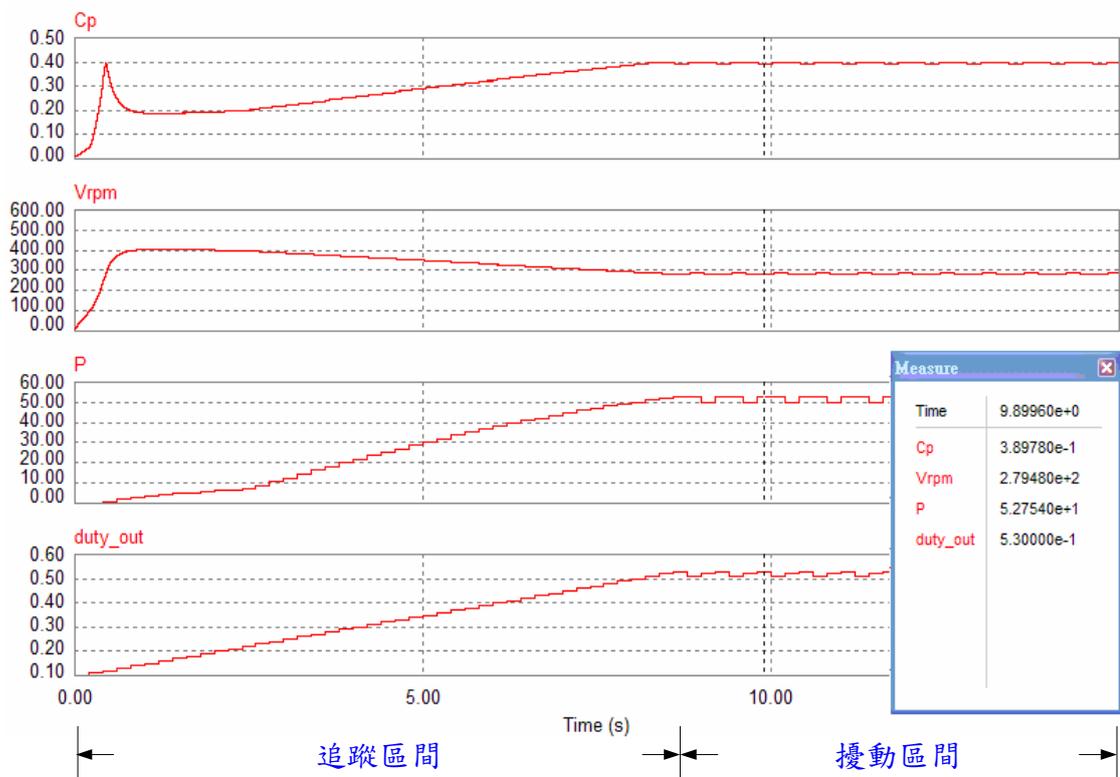


圖 3.16 7m/s 風下，擾動觀察法模擬結果

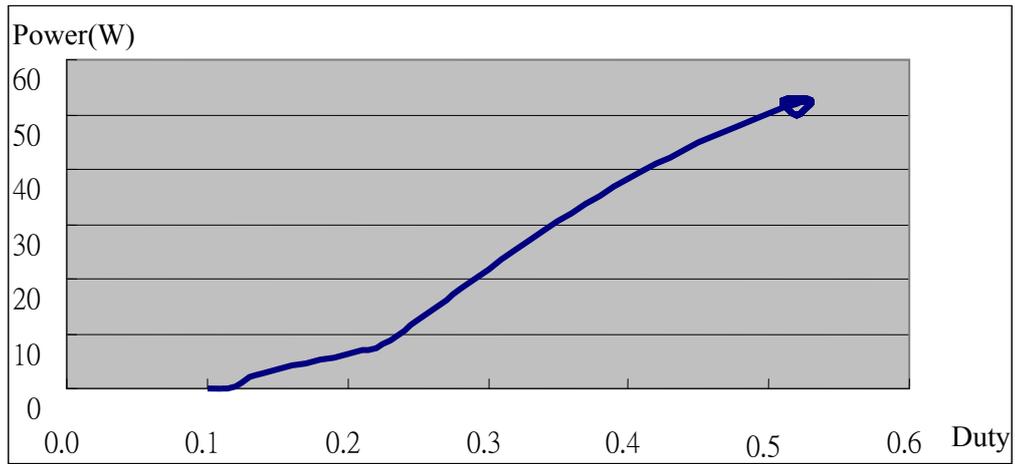


圖 3.17 7m/s 風下，Duty-Power 特性曲線

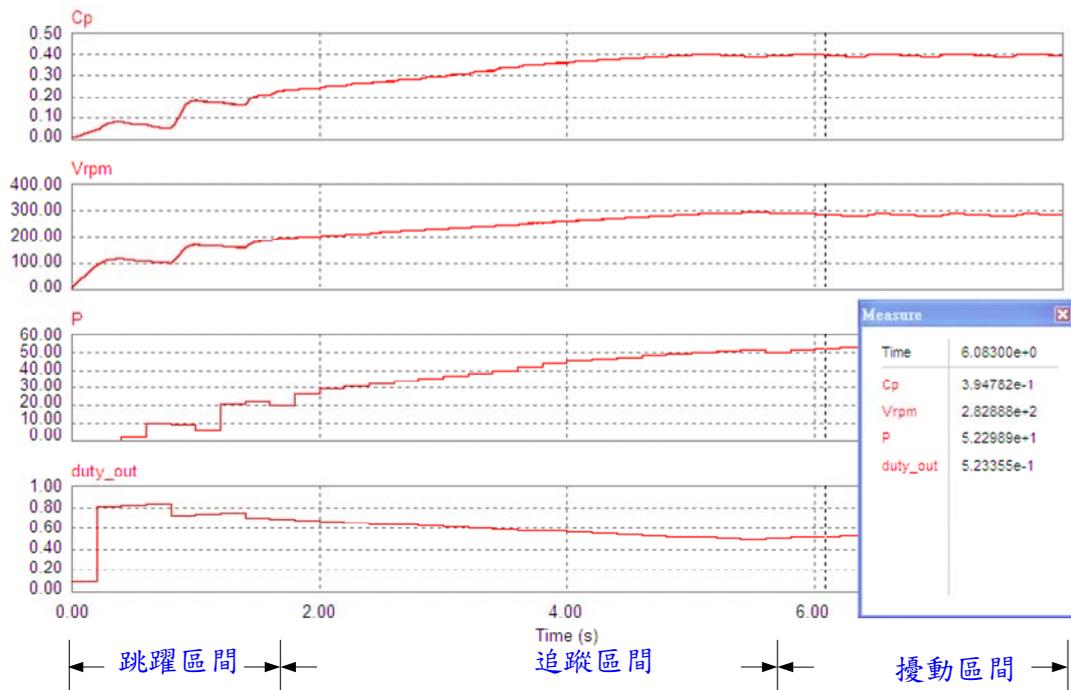


圖 3.18 7m/s 風下，混合型模擬結果

圖 3.19 及圖 3.21 為 10m/s 風下之模擬結果，最大功率點之 C_p 為 0.4，轉速 (Vrpm) 約為 350rpm，功率(P) 約為 140W，輸出之責任週期(duty_out) 為 0.48，與開回路模擬之最大功率點相符合，而擾動觀察法於 9 秒達最大功率點，混合型為 3 秒。

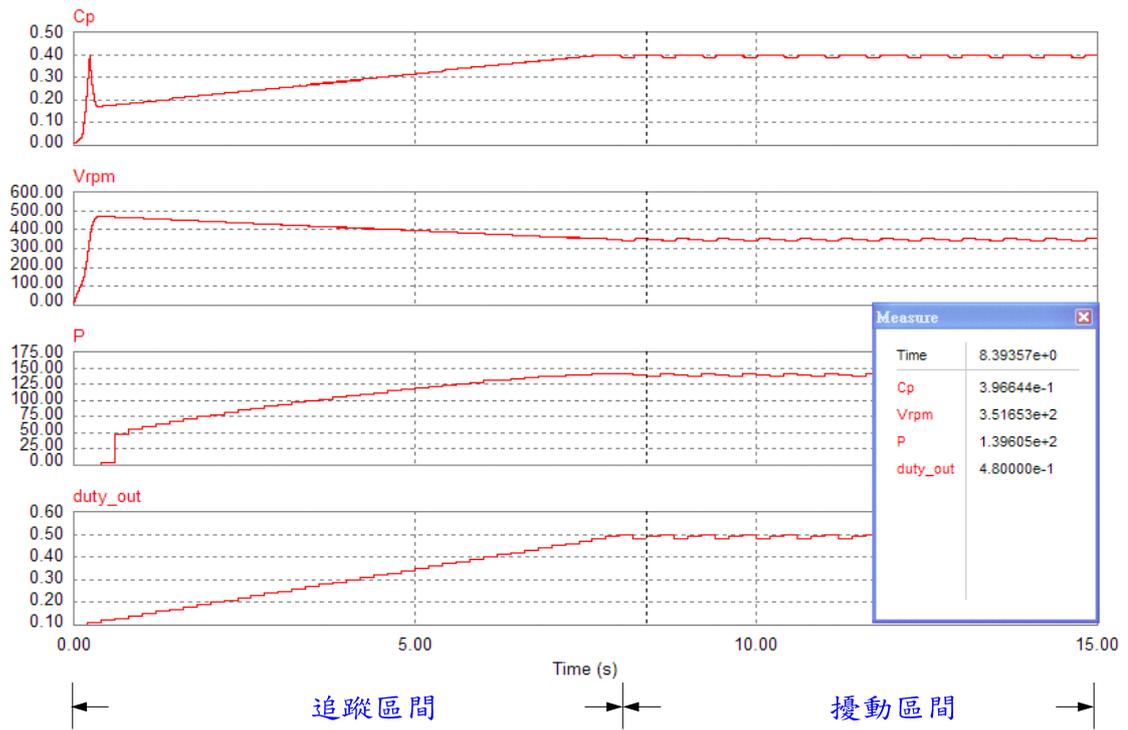


圖 3.19 10m/s 風下，擾動觀察法模擬結果

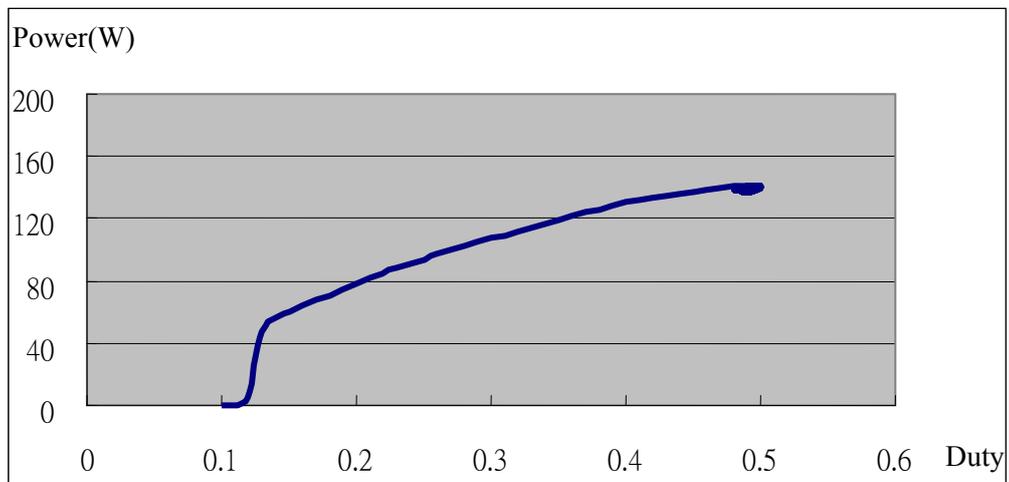


圖 3.20 10m/s 風下，Duty-Power 特性曲線

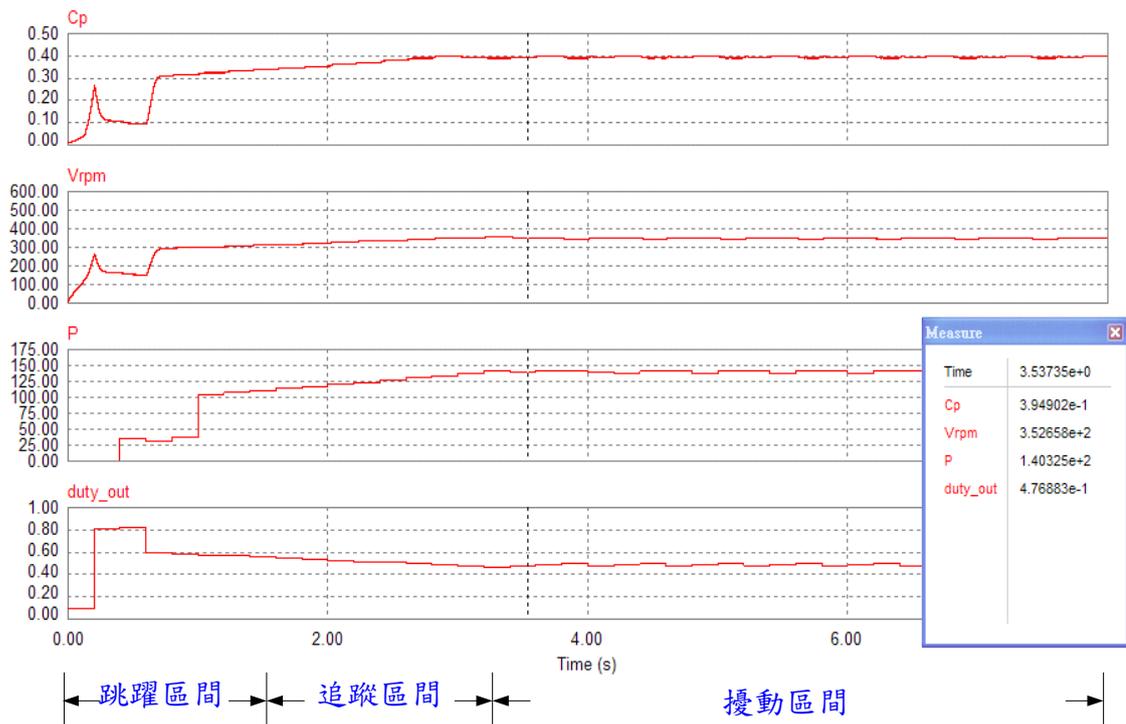


圖 3.21 10m/s 風下，混合型模擬結果

圖 3.22 及圖 3.24 為 15m/s 風下之模擬結果，於最大功率點之 C_p 為 0.4，轉速 (Vrpm) 約為 450rpm，功率 (P) 約為 380W，輸出之責任周期 (duty_out) 約為 0.42，與開回路模擬之最大功率點相符合，而擾動觀察法於 6 秒達最大功率點，混合型為 1 秒。

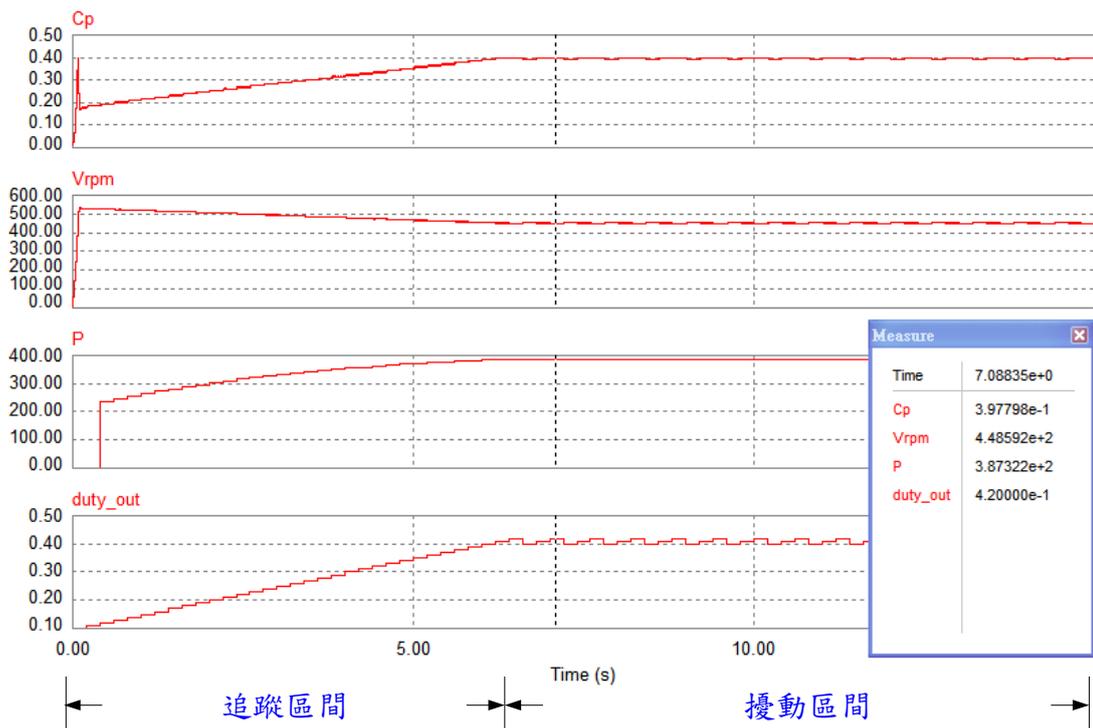


圖 3.22 15m/s 風下，擾動觀察法模擬結果

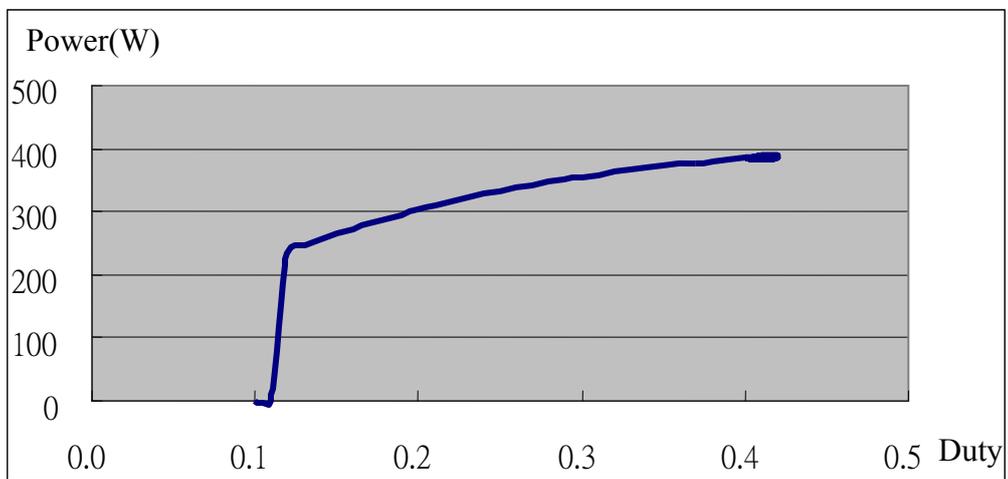


圖 3.23 15m/s 風下，Duty-Power 特性曲線

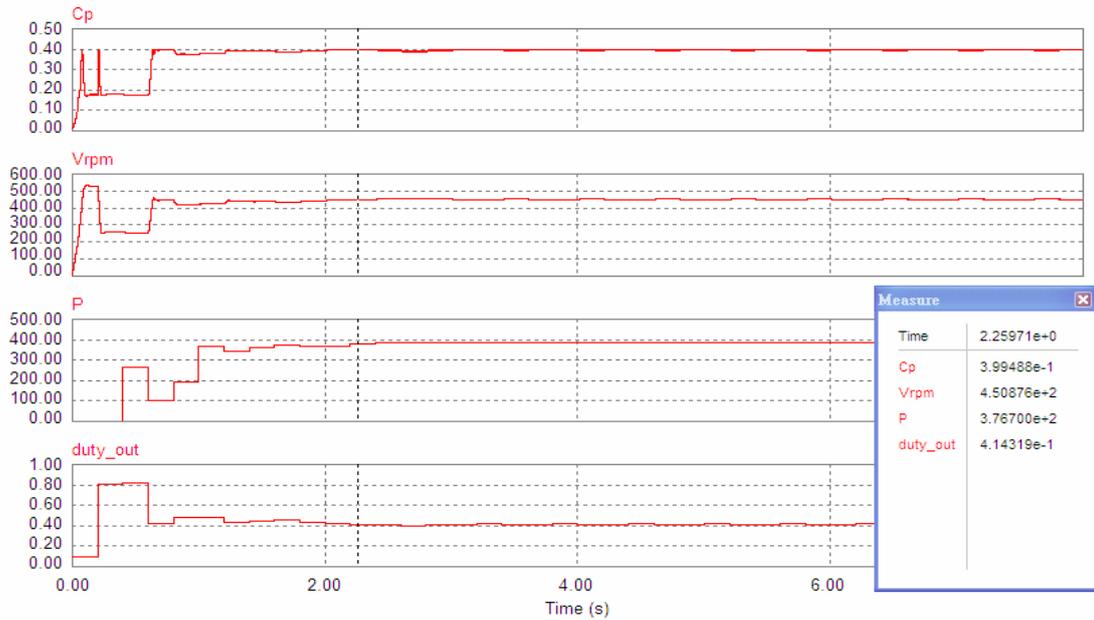


圖 3.24 15m/s 風下，混合型模擬結果

由於風的變化相當快速且頻繁，因此如圖 3.14 所示，建立了多風速查表方塊，模擬風速突然改變時，最大功率追蹤控制器之追蹤狀況，模擬時假設風速原為 7m/s 風，於模擬時間 10 秒時升至 10m/s 風，15 秒時升至 15m/s 風，模擬結果如圖 3.15 所示，當風速改變時， C_p 會下降後，再追蹤至最大效率 0.4，表示於風速突然改變時，控制器依然會快速追蹤至最大功率點。

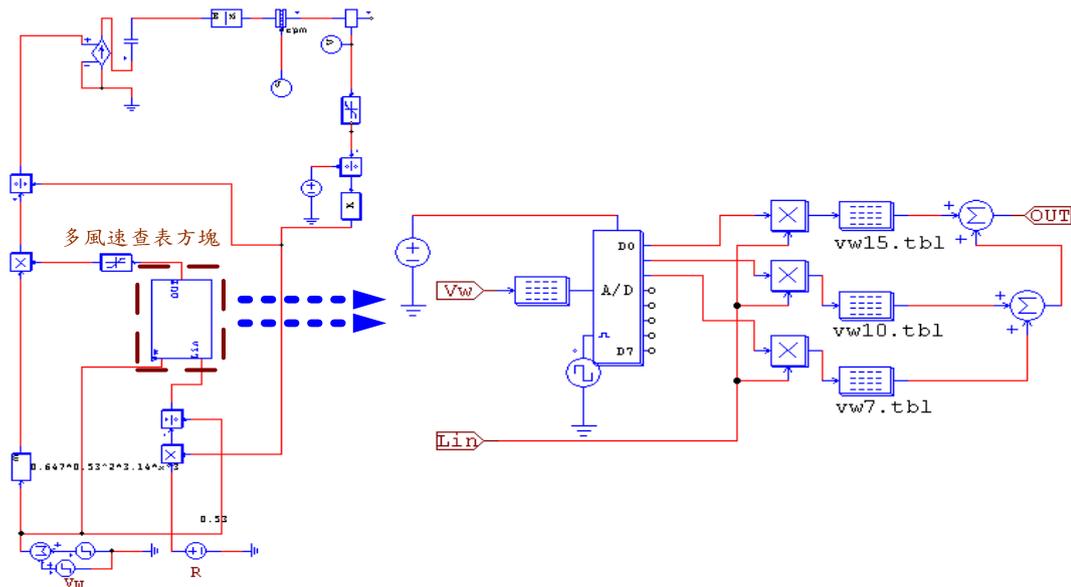


圖 3.25 多風速查表方塊

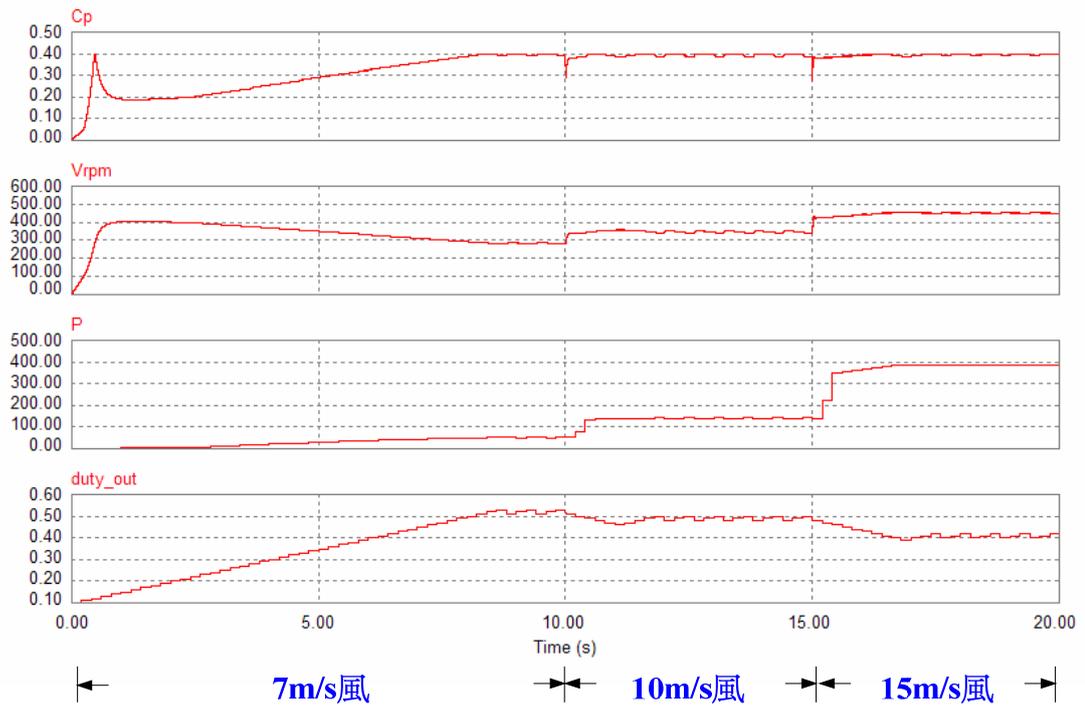


圖 3.26 風速改變時，MPPT 模擬結果

第四章 實驗結果與討論

本章節首先將利用 Matlab 中的 Simulink 結合 ModelSim 與 PSIM，來驗證數位程式之正確性，實測方面為了驗證最大功率追蹤控制器之正確性，需先量測風力發電機之功率曲線，量測方法為利用控制功率電路開關之責任週期，紀錄 Duty 由 0.1 至 0.9 共 81 點之電壓、電流、轉速及功率資料，以得到每個風速下之最大功率點，最後再將最大功率追蹤之數位程式下載至 FPGA(Altera Cyclone EPC12F256C8)晶片中進行實測，實測方面包括固定風場及實際風場兩種，固定風場為利用工業風扇以穩定風速下進行實驗，並紀錄達最大功率點時波形，驗證最大功率追蹤控制器之可行性，實際風場為將風力發電機架設於室外進行實驗，並以 LabVIEW 程式以每秒一次紀錄各項參數，以驗證於實際風場下，控制器之可行性。

4.1 Simulink、Modelsim 與 PSIM 共同模擬

如圖 4.1 所示為利用 Matlab 建構 Simulink、ModelSim 與 PSIM 共同模擬系統，包括了 ModelSim 呼叫方塊、ModelSim 連結方塊及 PSIM 連結方塊，PSIM 建構之功率電路如圖 4.2 所示，其中包括風力發電機模擬系統及升壓電路，共同模擬之優點為速度快，可節省電腦資源，且可驗證 VHDL 硬體描述語言所撰寫之程式，模擬時直線近似法範圍設為 0.1，擾動頻率為 10Hz，擾動量為 0.01，設計之最大功率點與第三章相同，模擬時 PSIM 將回授信號送入 ModelSim 連結方塊，進行運算後經由 PSIM 連結方塊輸出傳回至 PSIM，圖 4.3 為風速 15m/s 下輸出功率，圖 4.4 為 15m/s 風下開關之責任週期，圖 4.5 為風速 10m/s 下輸出功率，圖 4.6 為 10m/s 風下開關之責任週期，圖 4.7 為風速 7m/s 下輸出功率，圖 4.8 為 7m/s 風下開關之責任週期，由結果可得到當責任周期偏離最大功率點較遠時，系統將採用直線近似法跳躍至最大功率點附近，並繼續以擾動觀察法持續追蹤，所得之最大功率點與所設計相符合，得以驗證數位程式之正確性。

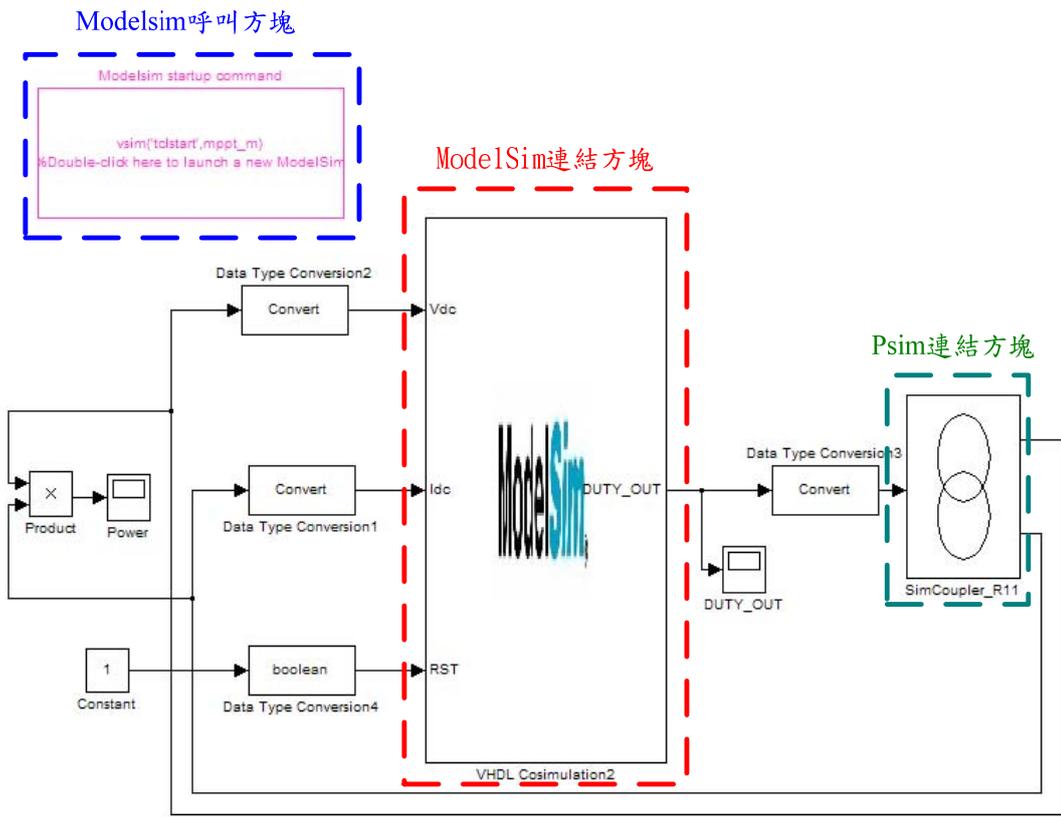


圖 4.1 Simulink、ModelSim 及 PSIM 共同模擬

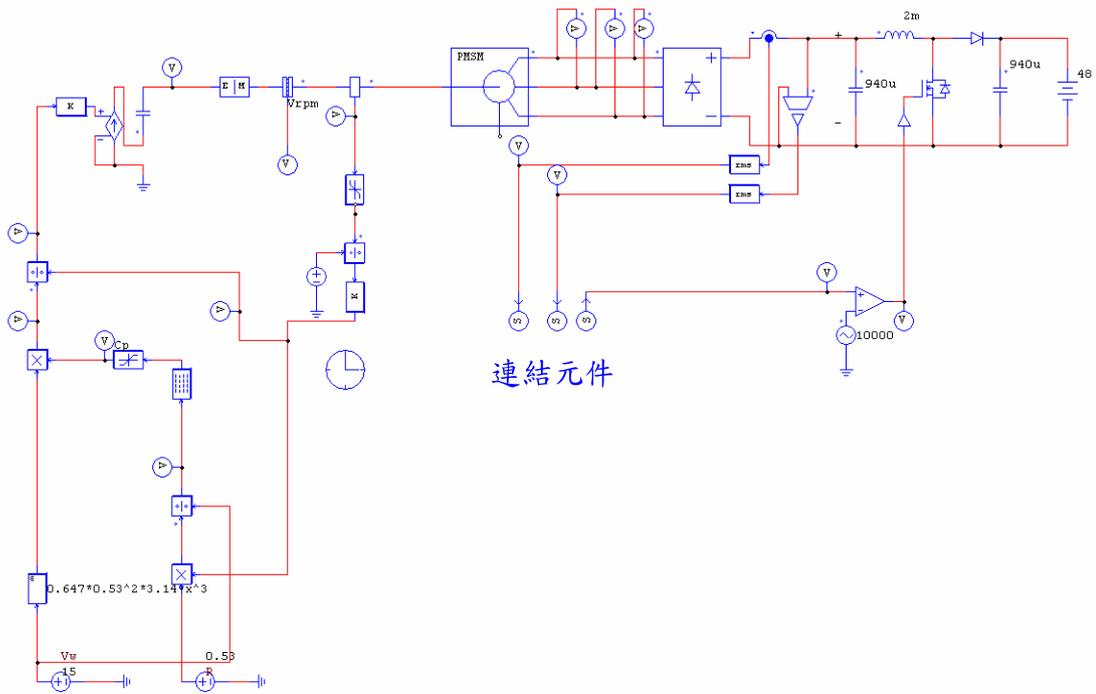


圖 4.2 PSIM 建構功率電路圖

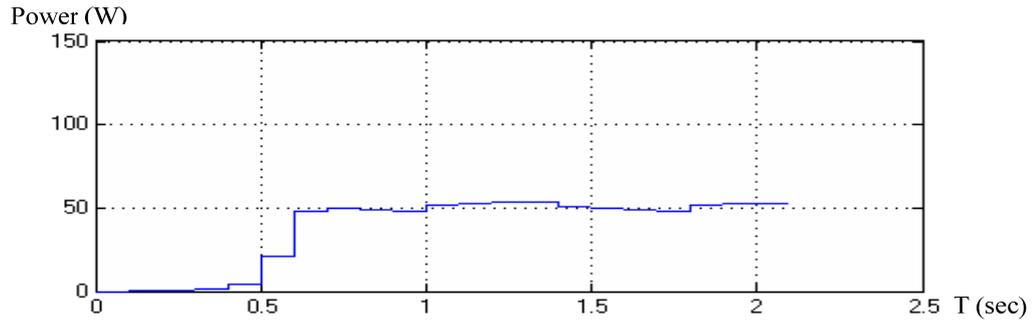


圖 4.3 7m/s 風下 Simulink、ModelSim 及 PSIM 共同模擬結果(輸出功率)

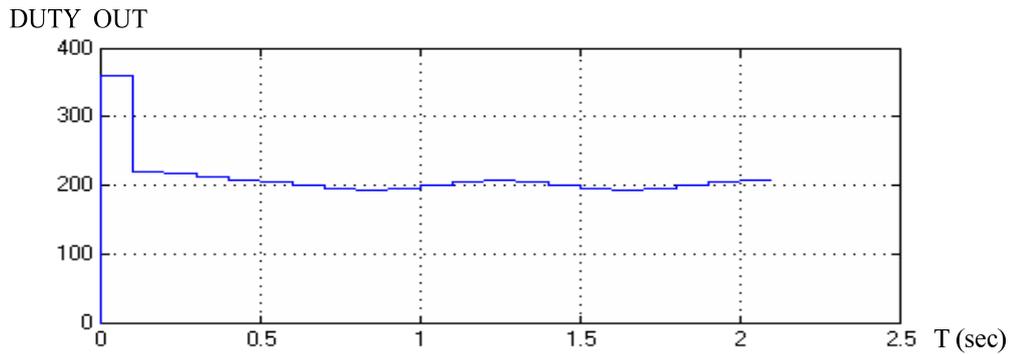


圖 4.4 7m/s 風下 Simulink、ModelSim 及 PSIM 共同模擬結果(輸出責任週期)

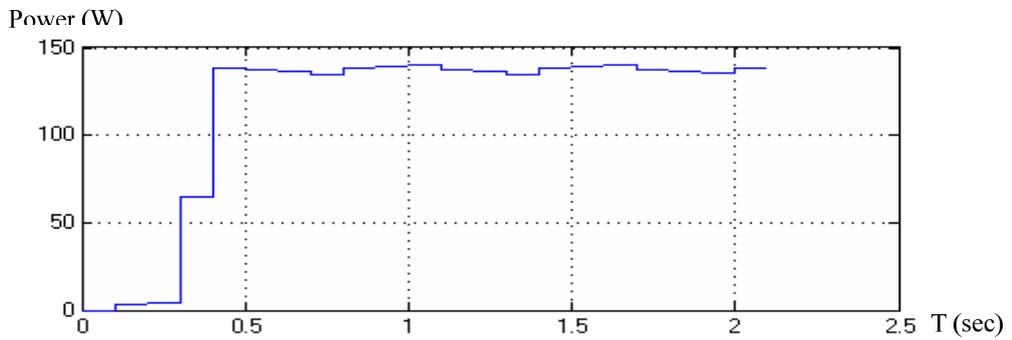


圖 4.5 10m/s 風下 Simulink、ModelSim 及 PSIM 共同模擬結果(輸出功率)

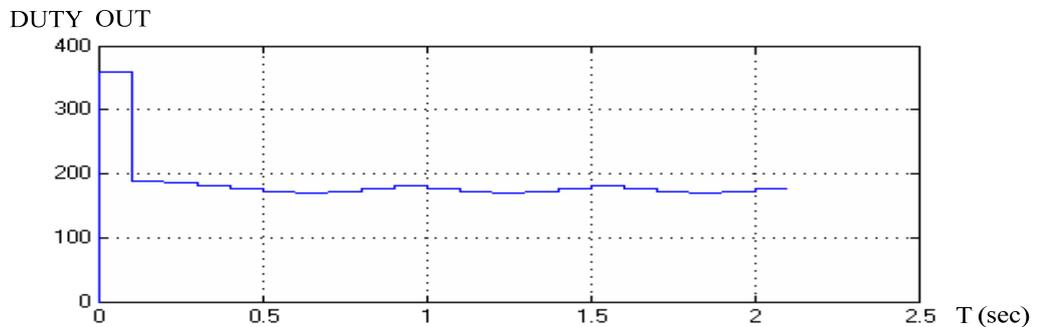


圖 4.6 10m/s 風下 Simulink、ModelSim 及 PSIM 共同模擬結果(輸出責任週期)

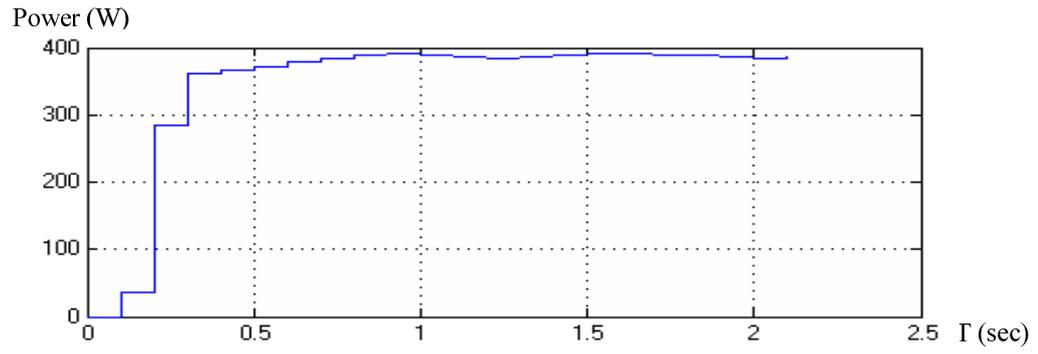


圖 4.7 15m/s 風下 Simulink、ModelSim 及 PSIM 共同模擬結果(輸出功率)

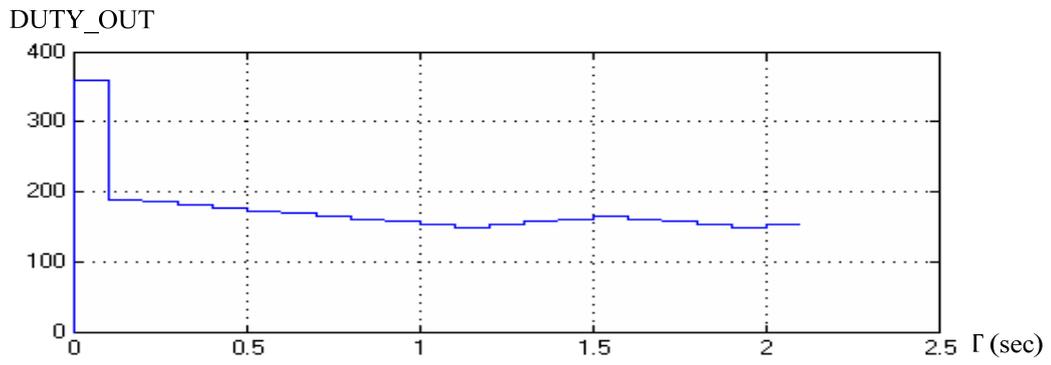


圖 4.8 15m/s 風下 Simulink、ModelSim 及 PSIM 共同模擬結果(輸出責任週期)

4.2 風力發電功率曲線量測

為了驗證最大功率追蹤之正確性，固定風場實測時利用 2 馬力之工業風扇模擬實際風場，並以自耦變壓器控制風扇電壓，模擬不同風速，首先功率曲線量測為控制開關責任週期於 0.1~0.9，每次增加 0.01，記錄其整流後之電壓、電流、轉速及功率，如表 4.1 為風扇電壓為 70V 時記錄之特性曲線表，圖 4.9 為轉速對功率之特性曲線，圖 4.10 為開關之責任週期對功率之特性曲線，可得之最大功率點位於 Duty 為 0.8、轉速(N)為 293rpm、輸出功率(Power)為 10.4W，表 4.2 為風扇電壓為 85V 時記錄之特性曲線表，圖 4.11 為轉速對功率之特性曲線，圖 4.12 為開關之責任週期對功率之特性曲線，可得之最大功率點位於 Duty 為 0.75、轉速為 393rpm、輸出功率(Power)為 29.45W，表 4.3 為風扇電壓為 110V 時記錄之特性曲線表，圖 4.13 為轉速對功率之特性曲線，圖 4.14 為開關之責任週期對功率之特性曲線，可得之最大功率點位於 Duty 為 0.75、轉速為 403rpm、輸出功率(Power)為 32.6W。

本節所量測功率曲線除了做為驗證最大功率追蹤依據外，將所測得各個風速下之最大功率點連接起來，並以直線向上下延伸，如圖 4.15 所示，將做為直線近似法查表依據。

表 4.1 風扇電壓 70V，特性曲線表

Duty	I(A)	V(V)	N(rpm)	P(w)
0.1	0.07	18.6	452	1.30
0.11	0.07	18.6	452	1.30
0.12	0.07	18.5	451	1.30
0.13	0.07	18.5	451	1.30
0.14	0.08	18.5	450	1.48
0.15	0.08	18.5	449	1.48
0.16	0.08	18.4	448	1.47
0.17	0.08	18.4	447	1.47
0.18	0.08	18.4	447	1.47
0.19	0.08	18.3	446	1.46
0.2	0.08	18.3	444	1.46
0.21	0.09	18.2	444	1.64
0.22	0.09	18.1	443	1.63
0.23	0.09	18	441	1.62
0.24	0.09	17.9	441	1.61

Duty	I(A)	V(V)	N(rpm)	P(w)
0.25	0.1	17.8	440	1.78
0.26	0.1	17.7	439	1.77
0.27	0.1	17.6	438	1.76
0.28	0.11	17.5	438	1.93
0.29	0.11	17.4	436	1.91
0.3	0.11	17.3	434	1.90
0.31	0.11	17.2	433	1.89
0.32	0.12	17.2	430	2.06
0.33	0.12	17.1	428	2.05
0.34	0.12	17	425	2.04
0.35	0.13	17	423	2.21
0.36	0.13	16.9	420	2.20
0.37	0.13	16.8	418	2.18
0.38	0.14	16.7	415	2.34
0.39	0.14	16.7	413	2.34
0.4	0.14	16.6	410	2.32
0.41	0.15	16.6	410	2.49
0.42	0.15	16.6	409	2.49
0.43	0.15	16.5	409	2.48
0.44	0.16	16.5	408	2.64
0.45	0.16	16.5	408	2.64
0.46	0.16	16.5	407	2.64
0.47	0.17	16.5	407	2.81
0.48	0.17	16.4	406	2.79
0.49	0.17	16.4	406	2.79
0.5	0.18	16.4	405	2.95
0.51	0.18	16.4	404	2.95
0.52	0.19	16.3	404	3.10
0.53	0.2	16.3	404	3.26
0.54	0.2	16.3	403	3.26
0.55	0.21	16.3	403	3.42
0.56	0.21	16.2	402	3.40
0.57	0.22	16.2	402	3.56
0.58	0.23	16.2	401	3.73
0.59	0.23	16.1	401	3.70
0.6	0.24	16.1	400	3.86
0.61	0.28	16	398	4.48
0.62	0.3	15.8	396	4.74
0.63	0.32	15.7	395	5.02

Duty	I(A)	V(V)	N(rpm)	P(w)
0.64	0.36	15.5	392	5.58
0.65	0.38	15.4	390	5.85
0.66	0.41	15.3	388	6.27
0.67	0.42	15.1	386	6.34
0.68	0.46	15	385	6.90
0.69	0.49	14.8	382	7.25
0.7	0.52	14.7	380	7.64
0.71	0.55	14.3	371	7.87
0.72	0.61	13.8	363	8.42
0.73	0.66	13.4	354	8.84
0.74	0.72	13.1	347	9.43
0.75	0.76	12.6	337	9.58
0.76	0.8	12.2	328	9.76
0.77	0.84	11.8	320	9.91
0.78	0.89	11.4	310	10.15
0.79	0.94	10.9	302	10.25
0.8	0.99	10.5	293	10.40
0.81	1.01	10	281	10.10
0.82	1.02	9.6	270	9.79
0.83	1.06	9.1	258	9.65
0.84	1.06	8.6	246	9.12
0.85	1.08	8.2	235	8.86
0.86	1.11	7.7	227	8.55
0.87	1.12	7.2	211	8.06
0.88	1.13	6.8	199	7.68
0.89	1.15	6.3	188	7.25
0.9	1.17	5.8	176	6.79

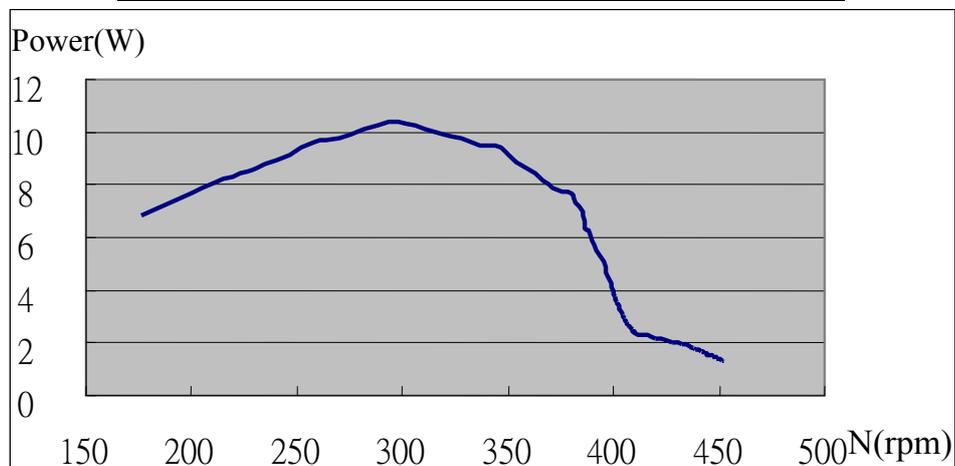


圖 4.9 風扇電壓 70V，N-Power 率特性曲線

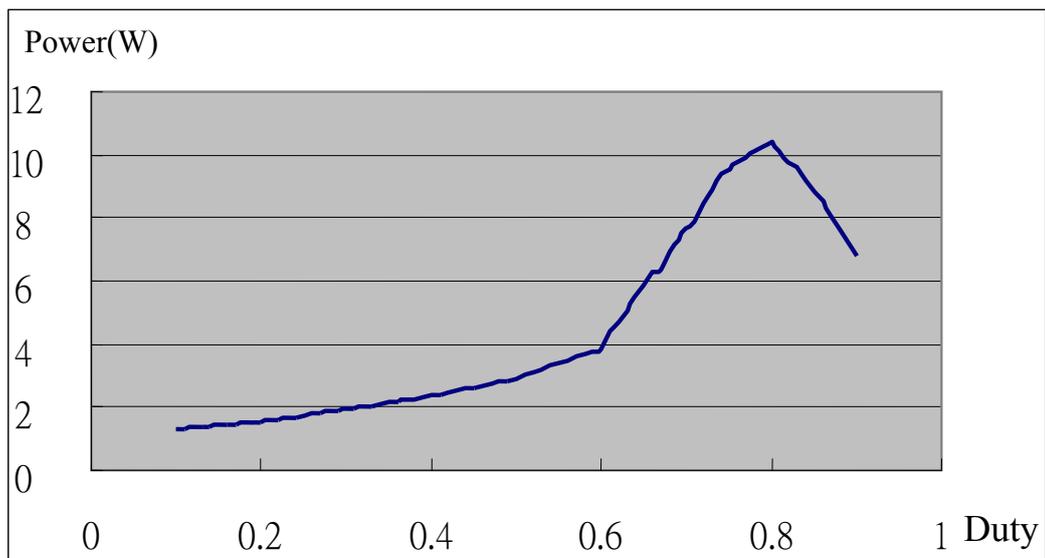


圖 4.10 風扇電壓 70V，Duty-Power 特性曲線

表 4.2 風扇電壓 85V，特性曲線表

Duty	I(A)	V(V)	N(rpm)	P(w)
0.1	0.03	25.1	605	0.75
0.11	0.04	25.1	605	1.00
0.12	0.04	25.1	605	1.00
0.13	0.04	25	604	1.00
0.14	0.05	25	604	1.25
0.15	0.05	25	604	1.25
0.16	0.06	25	604	1.50
0.17	0.06	25	604	1.50
0.18	0.06	24.9	603	1.49
0.19	0.07	24.9	603	1.74
0.2	0.07	24.9	603	1.74
0.21	0.07	24.9	603	1.74
0.22	0.08	24.8	603	1.98
0.23	0.08	24.8	602	1.98
0.24	0.09	24.8	602	2.23
0.25	0.09	24.8	602	2.23
0.26	0.09	24.7	602	2.22
0.27	0.1	24.7	602	2.47
0.28	0.1	24.7	601	2.47
0.29	0.11	24.6	601	2.71
0.3	0.11	24.6	601	2.71
0.31	0.12	24.6	601	2.95

Duty	I(A)	V(V)	N(rpm)	P(w)
0.32	0.12	24.5	600	2.94
0.33	0.13	24.5	600	3.19
0.34	0.14	24.5	600	3.43
0.35	0.15	24.5	600	3.68
0.36	0.15	24.4	599	3.66
0.37	0.16	24.4	599	3.90
0.38	0.17	24.4	599	4.15
0.39	0.17	24.3	598	4.13
0.4	0.18	24.3	598	4.37
0.41	0.2	24.2	597	4.84
0.42	0.21	24.2	596	5.08
0.43	0.23	24.1	594	5.54
0.44	0.24	24	593	5.76
0.45	0.26	24	592	6.24
0.46	0.27	23.9	591	6.45
0.47	0.29	23.8	590	6.90
0.48	0.3	23.7	588	7.11
0.49	0.32	23.7	587	7.58
0.5	0.33	23.6	586	7.79
0.51	0.4	23.3	581	9.32
0.52	0.46	22.9	575	10.53
0.53	0.53	22.6	570	11.98
0.54	0.59	22.3	564	13.16
0.55	0.66	22	559	14.52
0.56	0.72	21.6	554	15.55
0.57	0.79	21.3	548	16.83
0.58	0.85	21	543	17.85
0.59	0.92	20.6	537	18.95
0.6	0.98	20.3	532	19.89
0.61	1.05	19.9	522	20.90
0.62	1.12	19.5	513	21.84
0.63	1.2	19	503	22.80
0.64	1.27	18.6	495	23.62
0.65	1.34	18.2	484	24.39
0.66	1.41	17.7	475	24.96
0.67	1.48	17.5	465	25.90
0.68	1.56	16.9	455	26.36
0.69	1.63	16.6	447	27.06

Duty	I(A)	V(V)	N(rpm)	P(w)
0.7	1.7	16.1	436	27.37
0.71	1.77	16	427	28.32
0.72	1.82	15.7	419	28.57
0.73	1.88	15.6	410	29.33
0.74	1.9	15.2	402	28.88
0.75	1.95	15.1	393	29.45
0.76	2.12	13.7	385	29.04
0.77	2.18	13	376	28.34
0.78	2.26	12.6	368	28.48
0.79	2.32	12.1	359	28.07
0.8	2.41	11.7	352	28.20
0.81	2.34	11.2	335	26.21
0.82	2.28	10.6	321	24.17
0.83	2.22	10.1	305	22.42
0.84	2.15	9.5	289	20.43
0.85	2.1	9	275	18.90
0.86	2.04	8.6	261	17.54
0.87	1.96	7.9	243	15.48
0.88	1.92	7.4	230	14.21
0.89	1.84	6.8	217	12.51
0.9	1.8	6.3	200	11.34

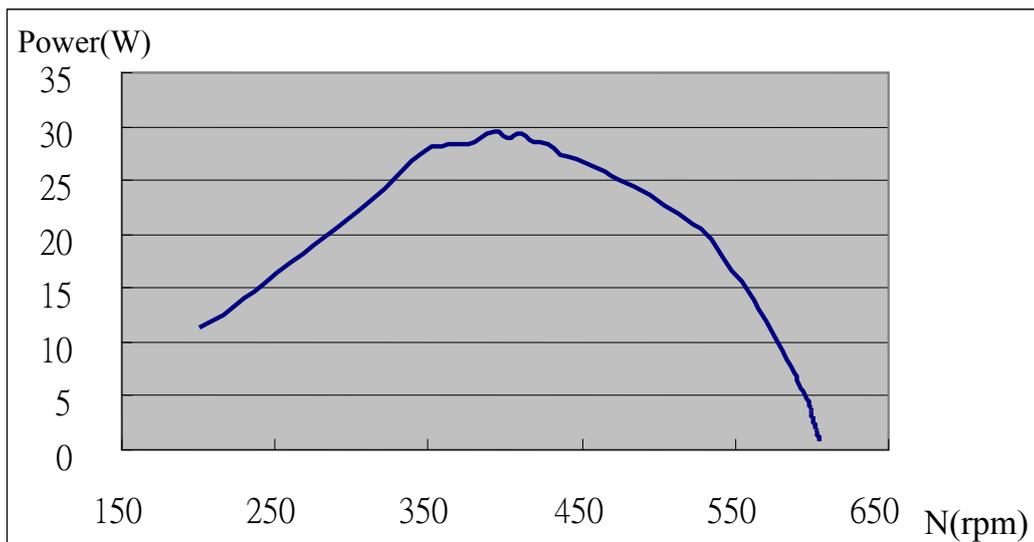


圖 4.11 風扇電壓 85V，N-Power 特性曲線

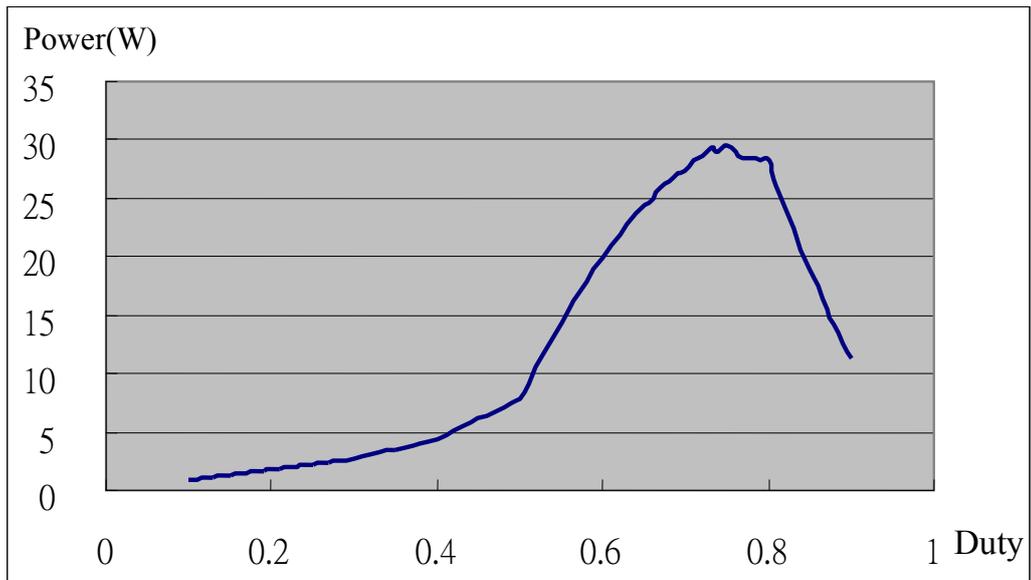


圖 4.12 風扇電壓 85V，Duty-Power 特性曲線

表 4.3 風扇電壓 110V，特性曲線表

Duty	I(A)	V(V)	N(rpm)	P(w)
0.1	0.06	27.1	650	1.63
0.11	0.06	27.1	650	1.63
0.12	0.06	27	650	1.62
0.13	0.07	27	649	1.89
0.14	0.07	27	649	1.89
0.15	0.08	27	649	2.16
0.16	0.08	26.9	649	2.15
0.17	0.09	26.9	649	2.42
0.18	0.09	26.9	648	2.42
0.19	0.1	26.8	648	2.68
0.2	0.1	26.8	648	2.68
0.21	0.11	26.8	648	2.95
0.22	0.11	26.7	647	2.94
0.23	0.12	26.7	647	3.2
0.24	0.12	26.6	647	3.19
0.25	0.13	26.6	647	3.46
0.26	0.13	26.5	646	3.45
0.27	0.14	26.5	646	3.71
0.28	0.14	26.4	646	3.7
0.29	0.15	26.4	645	3.96
0.3	0.15	26.3	645	3.95
0.31	0.16	26.3	644	4.21

Duty	I(A)	V(V)	N(rpm)	P(w)
0.32	0.16	26.2	643	4.19
0.33	0.17	26.2	642	4.45
0.34	0.18	26.1	640	4.7
0.35	0.19	26.1	640	4.96
0.36	0.19	26	639	4.94
0.37	0.2	26	638	5.2
0.38	0.21	25.9	638	5.44
0.39	0.21	25.9	636	5.44
0.4	0.22	25.8	633	5.68
0.41	0.26	25.7	633	6.68
0.42	0.3	25.5	630	7.65
0.43	0.33	25.4	628	8.38
0.44	0.37	25.2	625	9.32
0.45	0.41	25.1	623	10.29
0.46	0.45	24.9	620	11.21
0.47	0.49	24.8	618	12.15
0.48	0.52	24.6	616	12.79
0.49	0.56	24.5	613	13.72
0.5	0.6	24.3	610	14.58
0.51	0.66	24	604	15.84
0.52	0.73	23.6	597	17.23
0.53	0.79	23.3	592	18.41
0.54	0.85	22.9	586	19.47
0.55	0.92	22.6	581	20.79
0.56	0.98	22.3	574	21.85
0.57	1.04	21.9	568	22.78
0.58	1.1	21.6	563	23.76
0.59	1.17	21.2	556	24.8
0.6	1.23	20.9	550	25.71
0.61	1.3	20.5	542	26.65
0.62	1.36	20	531	27.2
0.63	1.43	19.6	524	28.03
0.64	1.5	19.2	512	28.8
0.65	1.57	18.8	503	29.52
0.66	1.63	18.3	493	29.83
0.67	1.7	17.9	484	30.43
0.68	1.77	17.5	472	30.98
0.69	1.83	17	465	31.11

Duty	I(A)	V(V)	N(rpm)	P(w)
0.7	1.9	16.6	457	31.54
0.71	1.98	16.2	445	32.08
0.72	2.07	15.6	434	32.29
0.73	2.16	15	427	32.4
0.74	2.23	14.6	413	32.56
0.75	2.32	14.1	403	32.71
0.76	2.4	13.6	392	32.64
0.77	2.46	13.1	388	32.23
0.78	2.55	12.6	371	32.13
0.79	2.65	12.1	363	32.07
0.8	2.73	11.7	350	31.94
0.81	2.65	11.2	335	29.68
0.82	2.58	10.6	321	27.35
0.83	2.5	10.2	304	25.5
0.84	2.42	9.5	291	22.99
0.85	2.35	9	277	21.15
0.86	2.27	8.3	260	18.84
0.87	2.19	7.9	246	17.3
0.88	2.11	7.3	230	15.4
0.89	2.05	6.8	214	13.94
0.9	1.96	6.2	199	12.15

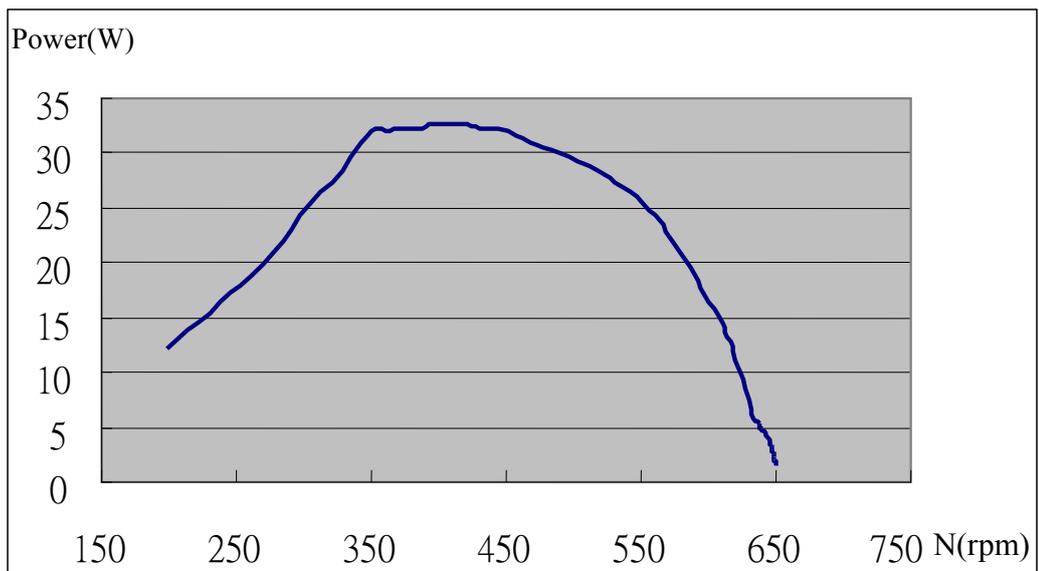


圖 4.13 風扇電壓 110V，N-Power 特性曲線

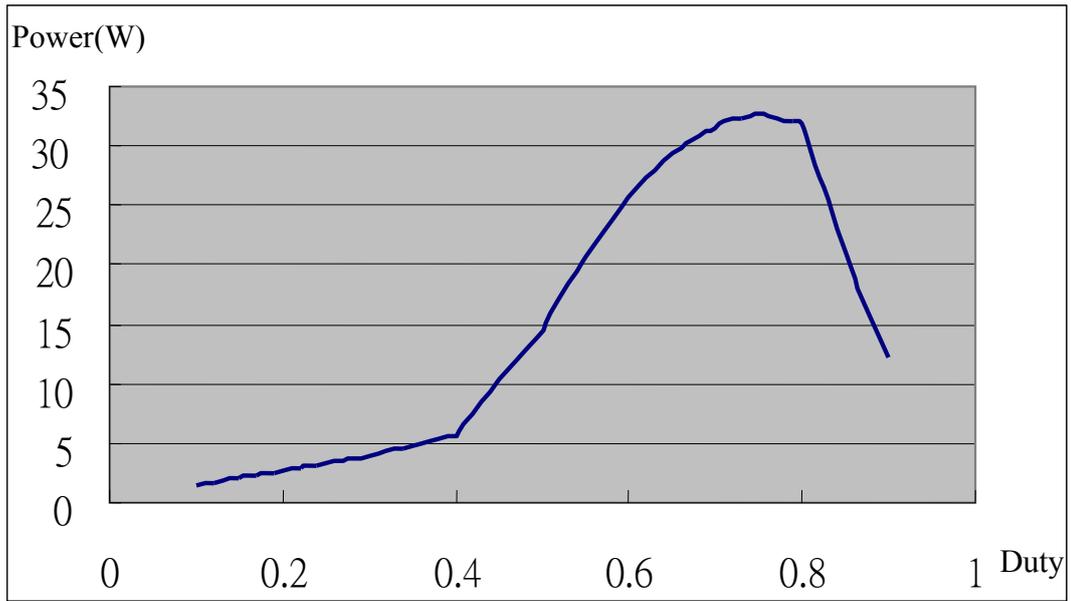


圖 4.14 風扇電壓 110V，Duty-Power 特性曲線

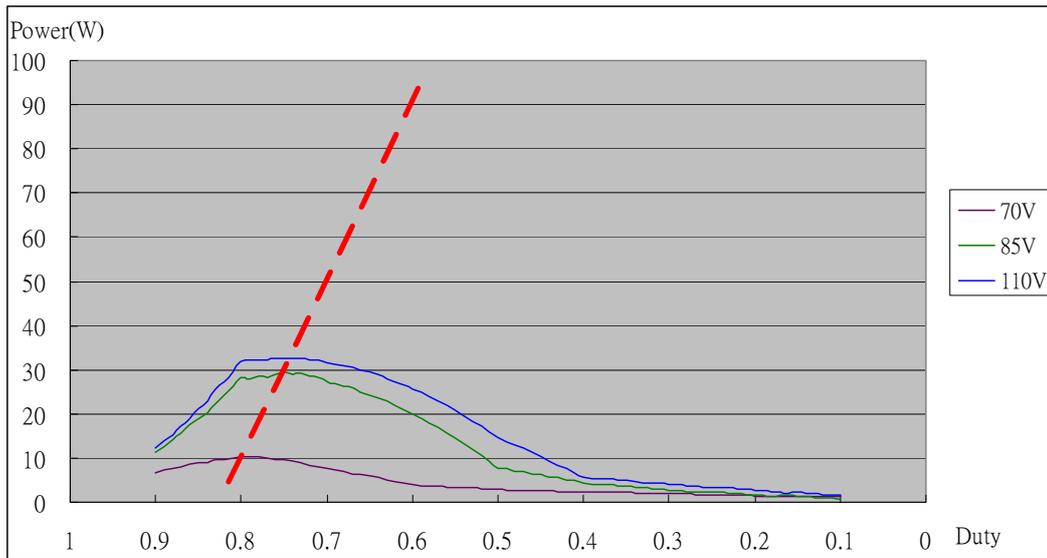


圖 4.15 各風速最大功率點

4.3 最大功率追蹤實測結果

4.3.1 固定風場實測結果

於固定風速實驗時，首先將風力發電機空轉至穩定，再開啟控制器進行最大功率追蹤控制，以觀察系統追蹤狀況，如圖 4.16 所示為風扇電壓於 70V 時最大功率追蹤輸出波形圖，CH1 為整流後電壓，平均值為 10.7V，CH2 為整流後電流，平均值為 0.969A，由電壓及電流，即可計算功率約為 10.4W，CH3 為發電機輸出之三相電壓其中一相，頻率為 39Hz，經計算後轉速約為 292rpm，CH4 為充電至電池之電流，約為 0.122A，圖 4.17 為風扇電壓 70V 下輸出之責任週期，正脈波寬約 79.01 μ f，而開關之切換頻率為 10KHz，因此可得輸出之責任週期約為 0.79；圖 4.18 為風扇電壓為 85V 時最大功率追蹤輸出波形圖，CH1 為整流後電壓，平均值為 13.7V，CH2 為整流後電流，平均值為 2.08A，計算可得功率約為 28.5W，CH3 為發電機輸出之三相電壓其中一相，頻率為 51Hz，經計算後轉速約為 383rpm，CH4 為充電至電池之電流，約為 0.417A，圖 4.19 為風扇電壓 85V 下輸出之責任週期，正脈波寬約 76 μ f，可得輸出之責任週期約為 0.76；圖 4.20 為風扇電壓為 110V 時最大功率追蹤輸出波形圖，CH1 為整流後電壓，平均值為 12.8V，CH2 為整流後電流，平均值為 2.71A，計算可得功率約為 34.7W，CH3 為發電機輸出之三相電壓其中一相，頻率為 50Hz，經計算後轉速約為 375rpm，CH4 為充電至電池之電流，約為 0.514A，圖 4.21 為風扇電壓 110V 下輸出之責任週期，正脈波寬約 76 μ f，可得輸出之責任週期約為 0.76，上述最大功率追蹤結果與測試之功率曲線所量測的最大功率點相當接近，可得知控制器之正確性。

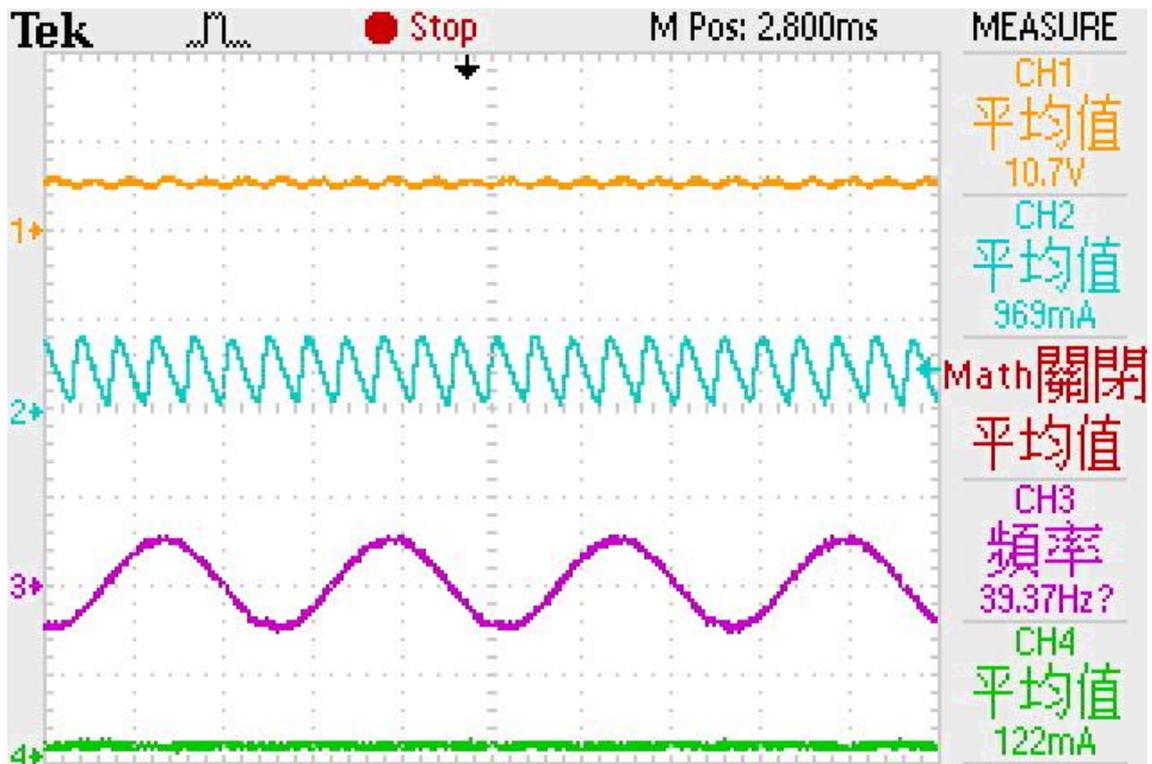


圖 4.16 風扇電壓 70V，最大功率追蹤輸出波形



圖 4.17 風扇電壓 70V，最大功率追蹤輸出責任週期

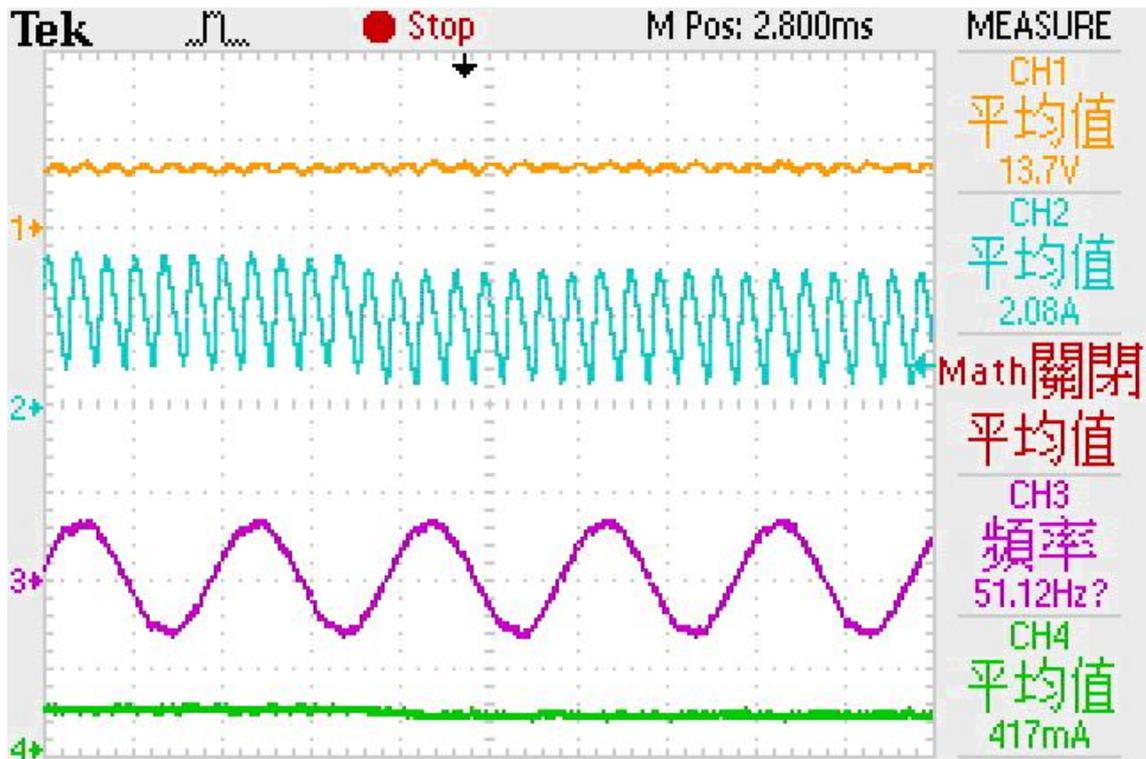


圖 4.18 風扇電壓 85V，最大功率追蹤輸出波形



圖 4.19 風扇電壓 85V，最大功率追蹤輸出責任週期

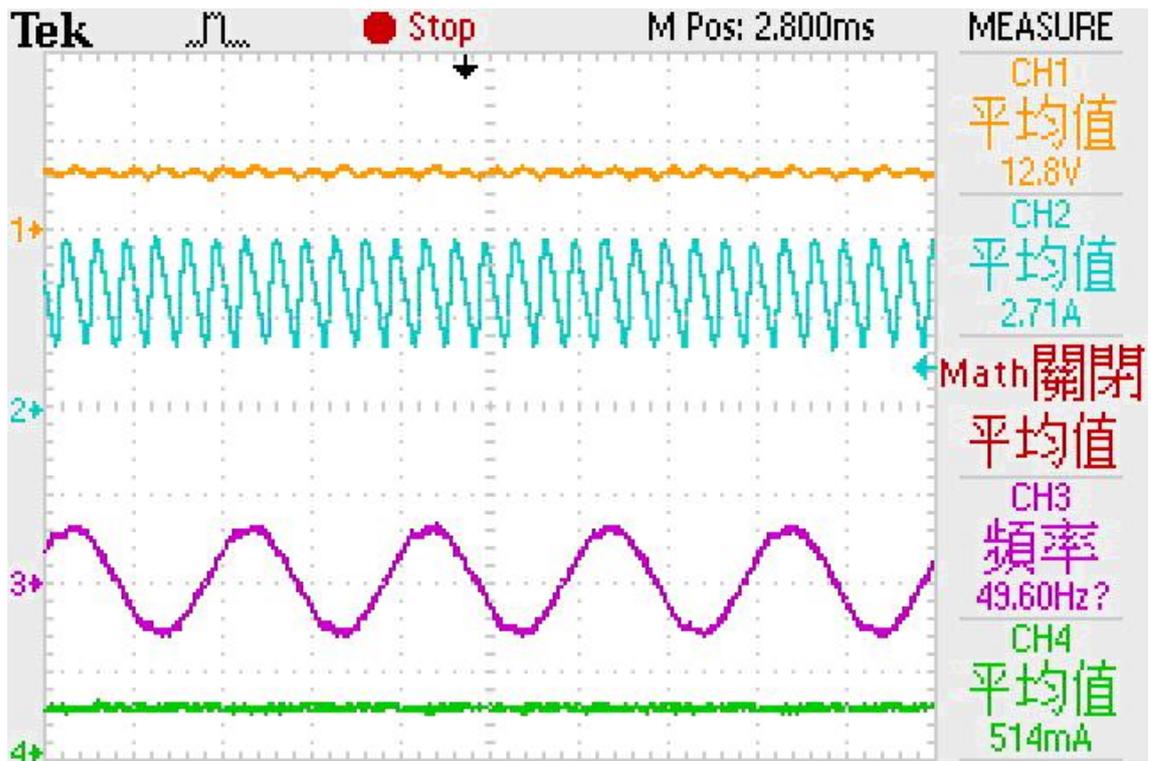


圖 5.20 風扇電壓 110V，最大功率追蹤輸出波形



圖 4.21 風扇電壓 110V，最大功率追蹤輸出責任週期

4.3.2 實際風場實測結果

如圖 4.22 為實際風場測試時系統架構圖，實際風場測試時，將預監測參數經由 DAQ 類比數位轉換卡傳送至個人電腦，並以 LabVIEW 程式將每秒資料記錄至 Excel 下，最後將記錄之資料加以整理分析，以利了解最大功率追蹤情況，如圖 4.23 為轉速對功率特性曲線，圖 4.24 為風速對功率特性曲線，所測得最大功率約為 200W，發生於風速約 11m/s 下。

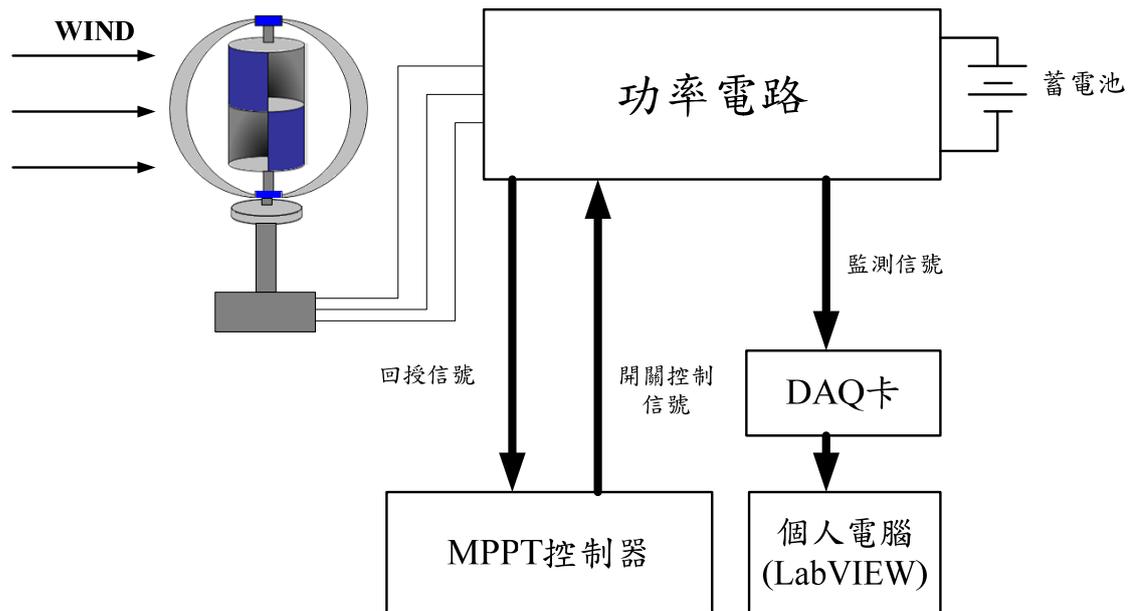


圖 4.22 實際風場實測系統架構圖

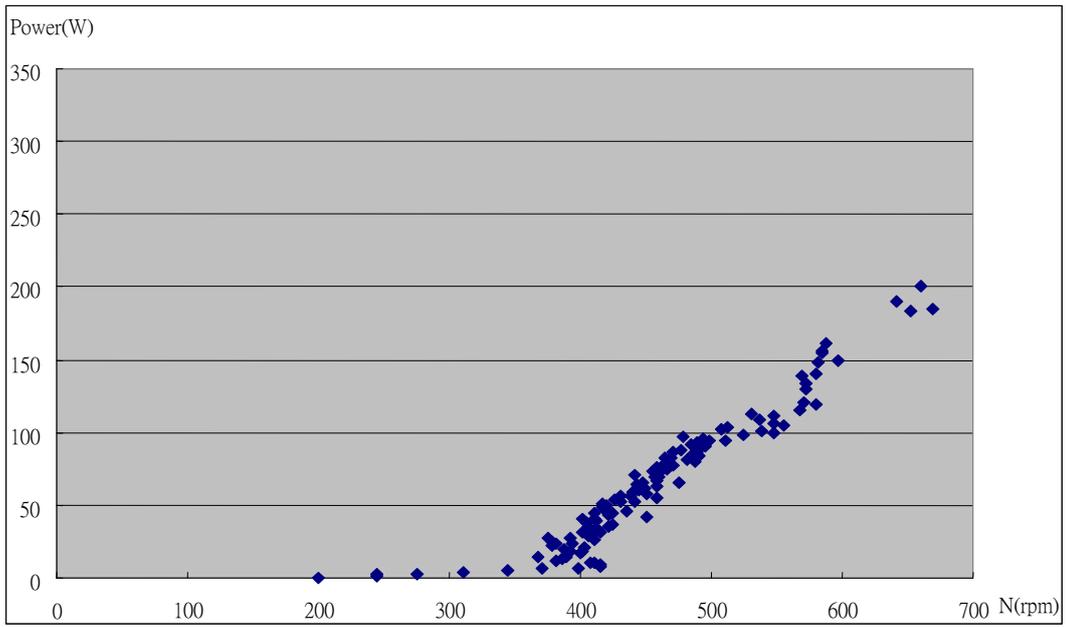


圖 4.23 實際風場下，N-Power 曲線

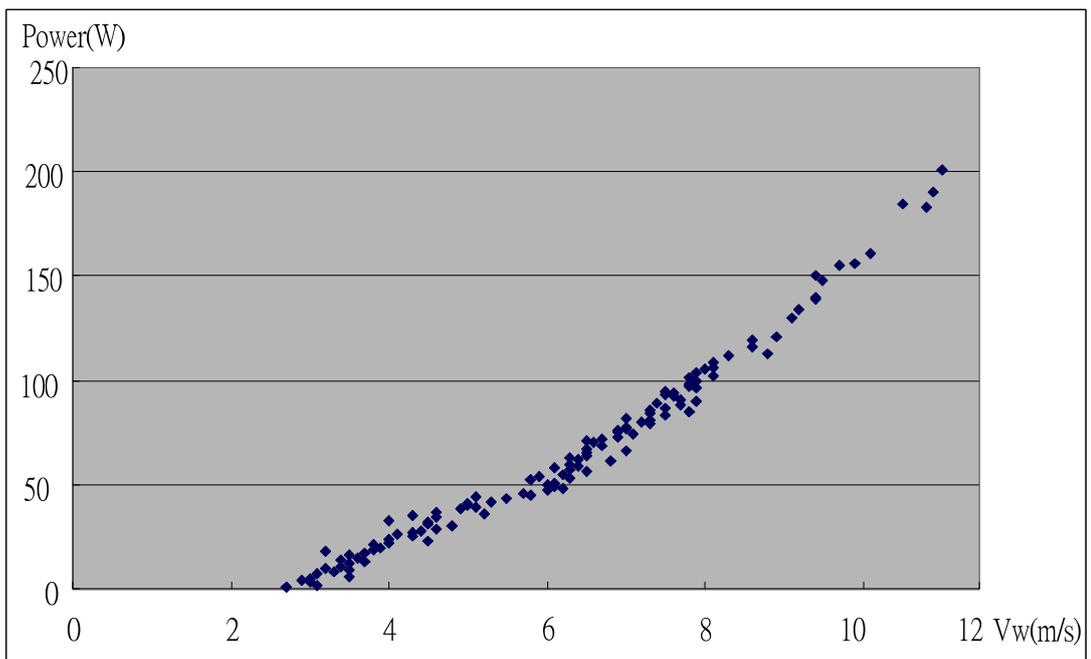


圖 4.24 實際風場下， V_w -Power 曲線

4.4 結果與分析

本章首先利用 Simulink、ModelSim 與 PSIM 共同模擬，驗證數位控制 IC 之正確性，並使系統模擬更接近實際運轉情形，於 MPPT 實測中，首先利用控制工業風扇輸入電壓，產生 70V、85V 及 110V 三種不同風速，且量測各風速下之功率曲線，以此為依據，驗證最大功率追蹤之可行性，最後並將風力發電機架設於室外，做系統之測試。

第五章 結論與未來研究方向

本計畫之目的為完成 1.5KW 垂直軸風力發電機電能轉換控制器，為實驗方便，先以 400W 垂直軸風力發電機作為實驗對象，最大功率追蹤方面，採用直線近似法與擾動觀察法之混合型，並以 PSIM 模擬軟體建立一風力發電模擬系統，並以連結 C 語言之動態連結檔，模擬驗證混合型追蹤法則能快速的追蹤至最大功率點。

控制系統以 FPGA 數位控制 IC 作為系統核心，數位電路以 VHDL 硬體描述語言設計，並以 Simulink、ModelSim 與 PSIM 共同模擬驗證，最後將數位程式下載至 Altera Cyclone EPC12F256C8 控制板，作系統之實測，實測方面，首先利用所量測之不同風速下之發電機特性曲線，建立直線近似法查表機制，實驗結果，系統能快速的追蹤至最大功率點，驗證風力發電系統之可行性。

本系統目前之硬體架構為 400W，但只需更改元件參數，如利用兩個以上開關並聯使用，增加耐流，即可應用於 1.5KW 風力發電系統，且可加入直流-交流轉換器，提供交流負載使用，並配合 PFC 功率因數修正技術，提高整體效率，而當負載所需能量較少時，未來可將發出之電能與市電併聯，提高系統供電之便利性及穩定性。

參考文獻

- [1] 台灣電力公司，<http://www.taipower.com.tw/>.
- [2] 張希良、郭興家、張勝雄、林矩民，風力發電技術，初版，台北市，新文京出版有限公司，民國 96 年。
- [3] 工研院產業經濟與資訊服務中心，全球風力發電產業總覽，初版，台北市，工研院產業經濟與資訊服務中心，民國 96 年。
- [4] 蕭葆義，風工程，初版，基隆市，成陽出版有限公司，民國 94 年。
- [5] Y. Higuchi, N. Yamamura, M. Ishida, and T. Hori, "An improvement of performance for small-scaled wind power generating system with permanent magnet type synchronous.
- [6] N. Yamamura, M. Ishida, and T. Hori, "A simple wind power generating system with permanent magnet type synchronous generator," *IEEE PEDS'99*, Hong Kong, pp. 849-854, 1999.
- [7] R. Datta and V. T. Tangananathan, "A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 18, no. 1, pp. 163-168, March 2003.
- [8] M. G.. Simoes, B. K. Bose, and R. J. Spiegel, "Design and performance evaluation of a fuzzy-logic-based variable-speed wind generation system," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 33, no. 4, pp 956-965, July/August 2001.
- [9] R. Chedid, F. Mard, and M. Basma, "Intelligent control of a class of wind energy conversion systems," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 14, No. 4, pp. 1597-1604, December 1999.
- [10] Q. Wang and L. Chang, "An Independent Maximum Power Extraction Strategy for Wind Energy Conversion Systems," *Proceedings of the 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, May 1999, pp. 1142-1147.
- [11] J. H. R. Enslin, "Maximum power point tracking: a cost saving necessity in solar energy systems," *Conference of IEEE IECON*, Vol. 2, pp.1073-1077, 1990.
- [12] J. Gow and C. D. Manning, "Controller Arrangement for Boost Converter

- Systems Sourced from Solar Photovoltaic Arrays or Other Maximum Power Sources,” *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, Vol. 147, No. 1, Jan. 2000, pp.15-20.
- [13] M. Veerachary, T. Senjyu, and K. Uezato, “Voltage-Based Maximum Power Point Tracking Control of PV System,” *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 38, No. 1, pp. 262-270, January 2002.
- [14] C. Hua, J. Lin, and C. Shen, “Implementation of a DSP-Controlled Photovoltaic System with Peak Power Tracking,” *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol. 45, No. 1, pp. 99-107, February 1998.
- [15] Ching-Tsai Pan, Jeng-Yue Chen, Chin-Peng Chu, and Yi-Shuo Huang, “A Fast Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Power System,” *Proceedings of IECON '99. Vol. 1, pp. 390-393, 1999.*
- [16] O. Wasynczuk, D. T. Man, J. P. Sullivan, “Dynamic Behavior of a Class of Wind Turbine Generators During Randon Wind Fluctuations,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 6 June 1981.*
- [17] O. Wasynczuk, “Dynamic Behavior of a Class of Photovoltaic Power System,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. -PAS-102, No. 9, September 1983*
- [18] R. M. Hilloowala and A. M. Sharaf, “A Rule-Based Fuzzy Logic Controller for a PWM Inverter in a Stand Alone Wind Energy Conversion Scheme,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 32, No.1, pp. 57-65, January/February 1996.
- [19] C. Y. Won, D. H. Kim, S. C. Kim, W. S. Kim, and H. S. Kim, “A New Maximum Power Point Tracker of Photovoltaic Arrays using Fuzzy Controller,” *Proceedings of the IEEE Power Electrics Specialists Conf.*, Vol. 1, June 1994, pp. 396-403.
- [20] I. H. Altas and A. M. Sharaf, “A Novel On-Line MPP Search Algorithm for PV Arrays,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 11, No.4, pp. 748-754, December 1996.
- [21] M. G. Simoes, B. K. Bose, and R. J. Spiegel, “Design and Performance Evaluation of a Fuzzy-Logic-Based Variable-Speed Wind Generation System,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 33, No. 4, pp. 956-965,

July/August 2001.

- [22] J. H. R. Enslin, "Maximum Power Point Tracking: A Cost Saving Necessity in Solar Energy Systems," *Conference of IEEE IECON*, Vol. 2, 1990, pp.1073-1077.
- [23] A. Z. Mohamed, M. N. Eskander, and F. A. Ghali, "Fuzzy logic control based maximum power tracking of a wind energy system," *Renewable Energy*, vol. 23, pp. 235-245, June 2001.
- [24] 于俊傑，風力發電最大功率追蹤技術之研究，中原大學，電機工程學系，碩士論文，民國 93 年 7 月。
- [25] 江炫樟 譯，電力電子學，三版，台北市，全華科技圖書公司，民國 92 年。
- [26] 梁適安，電力電子控制，二版，台北市，全華科技圖書公司，民國 78 年。
- [27] Robert W. Erickson, *Fundamentals of Power Electronics*, Fifth printing, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [28] Chi-Hung Tsai, Hsuang-Chang Chiang, Hsin-Jang Shieg, Ming-Sung Chiang, "Wind Turbine Generator Emulated with Power Converter." *第七屆電力電子研討會*, pp. 683-688, 2008.
- [29] 陳慶逸、林柏辰，VHDL 數位電路學習與專題研究，初版，台北市，文魁資訊圖書公司，民國 94 年。
- [30] 李宜達，控制系統設計與模擬—使用 MATLAB/SIMULINK，四版，台北市，全華科技圖書公司，民國 94 年。