

# 以查表法實現風力發電系統之最大功率追蹤 Implementation of the Maximum Power Point Tracking for Wind Power Generator Systems Based on Look-up Table

顏義和 郭彥志 楊子弘  
Yih-Her Yan Yan-Jhih Guo Tz-Hung Yang

虎尾科技大學電機工程系  
Department of Electrical Engineering  
National Formosa University  
Yulin, Taiwan, R.O.C  
E-mail: [goingurheart@gmail.com](mailto:goingurheart@gmail.com)

## 摘要

本研究主旨係提出可將風力發電機維持且穩定運轉至最大功率點的新方法，此方法稱為查表法乃是利用不斷實驗得知在每個風速到達最大功率點所需的責任週期，將其建立成資料庫，在運轉時直接給予固定路線直接到達最大功率點。

為驗證本文所提方法之各種發電特性，將與傳統的電流擾動法及三點權位比較法做比較，利用風力發電模擬系統做為實際測試平台，並以MATLAB內部所提供的Simulink函數方塊來建構傳統電流擾動法、三點權位法以及查表法之最大功率追蹤控制模式，經由模擬測試得知此方法可使風力發電機達到最大功率輸出、有效降低維持在最大功率點時飄移所損失的能量以及風速變動時能夠迅速追蹤至下一個最大功率點。本文之充電策略務實，可提供對串聯電池充電有興趣者參考。

關鍵字：風力發電、查表法、電流擾動法、三點權位比較法、MATLAB、Simulink

## Abstract

The proposal of this paper is to provide a new method that wind turbine can continuously and steadily run to the maximum power. This new method is called "look-up table" and its theorem is that getting the need of duty-cycle of maximum power of wind speed data through testing. Then making a data base and giving a fixed route to reach maximum power directly during operating.

The researcher used SIMULINK box of MATLAB of simulate software to create "look-up table", the Perturb Observe Algorithm and Three-Point Weighting Comparison Scheme. In addition, the researcher compared these three methods by using experimental platform of wind power simulate system. The result of comparison points out that new method improves the fault effective to promote power quality. "Look-up table" method gets maximum power, reduces the loss of energy during fluctuating on maximum point and tracks to next maximum power point quickly when wind speed changed.

Keywords: look-up table, Perturb Observe Algorithm, Three-Point Weighting Comparison Scheme, MATLAB

## I. 前言

由於傳統能源的使用過度，造成能源枯竭以及溫室效應，取代傳統能源的課題在世界各國越來越重要。不同於傳統能源的非傳統能源如太陽能、水利能、風能以及潮汐能...等等越來越受到重視，其中尤以風能受到相當重視，從1996年到2009年全球風力裝置容量總共增進了20倍達到160,000MW，而每年度裝置容量也增進了7倍達到35,000MW[1]。

但是風速的不固定變化將會造成風力機所發出的

功率隨著風速呈現不固定變化的現象；因此許多學者為了改善此現象，提出許多的控制方法使其風力發電機可以在不固定風速或者是固定風速時達到最大功率的輸出，比如傳統的電流擾動法[2-3]以及三點權位比較法[4]等等；傳統的電流擾動法最早應用在太陽能的最大功率追蹤，後來應用在風力發電的最大功率追蹤，但在到達最高點時會在左右不停震盪而造成損失；而三點權位比較法係連續偵測三點的功率值並且進行比較計算出權位值，此方法在最大功率點時，不會因為短暫性變化而使責任周期改變，提升了系統的穩定度，係針對傳統電流擾動法改良的方法，但是需要較長的時間才能到達最大功率點[4]。而本文則是針對上述這些缺點進行改良並且在獲得最大功率時可推算出當時風速，便可確認風速計是否為正常使用狀態以及在風速過低時給予適當的責任周期以防止風力發電機停止運作。

本論文的重點在於如何準確的給予責任周期使其風力機可穩定的發出最大功率，並且在風速急遽變化時能以最快的速度追蹤至下一個最大功率點。在模擬方面利用MATLAB內部所提供的Simulink函數方塊來模擬傳統電流擾動法、三點權位法以及查表法，透過風力發電模擬系統其中包含風力發電機、風速風向計、風力製造機、導風裝置、主機控制總成、儲能量測設備以及耗能設備做為實際測試的平台[5]。

## II. 風力發電原理與系統

### 2.1 風力發電原理

風力發電是利用風的流動轉換成動能使風力渦輪機葉片的葉片旋轉再轉換成電能，而風來自於地球的自轉以及區域性的太陽輻射熱吸收不均勻所引起的空氣循環流動，小規模者如海陸風、山谷風，大規模者如東北季風或者是颱風。

風力發電機不能將所有流經的風能轉換成電能，在轉換過程中，經由葉片轉換風能成動能的效率約介於30~50%之間，經由機電設備轉換動能至電能的約介於20~45%之間[6]；葉片將風能轉至於動能可透過下列公式來表示[7]：

$$P_w = 0.5 \times \rho \times \pi \times R^2 \times V_w^3 \quad (1)$$

其中， $\rho$ ：空氣密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

R：轉子葉片半徑

$V_w$ ：風速 ( $\text{m}/\text{s}$ )

而風力渦輪機將動能轉至電能可透過下列公式來表示：

$$P_m = C_p(\lambda) \times P_w \quad (2)$$

其中,  $C_p$ : 風渦輪機功率係數

$\lambda$ : 風渦輪機葉片尖端速率比

風渦輪機葉片尖端速率比可由下列公式來表示

[8]:

$$\lambda = R\omega/V \quad (3)$$

其中,  $R$ : 轉子葉片半徑(公尺)

$\omega$ : 風渦輪機角速度(弧度/秒)

由於功率係數  $C_p$  為  $\lambda$  的函數, 因此可以多項式來表示如下[9]:

$$C_p = \xi\lambda^3 + \zeta\lambda^2 + \gamma\lambda \quad (4)$$

其中,  $\xi$ : 葉片大小

$\zeta$ : 葉片數量

$\gamma$ : 風渦輪機葉片俯仰角

圖 1 所示為一個典型的  $C_p$  對  $\lambda$  的曲線圖, 但是  $C_p$  值會跟隨著風速變化而偏移最佳角度, 使風渦輪機不能保持在最大  $C_p$  值位置產生最大功率。圖 2 為風速與風渦輪機轉速關係圖, 由式 3 可知, 發渦輪機在某固定風速下運轉且轉子葉片半徑已為定值的情況下, 尖端速率比與風渦輪機轉速有一定直接的關係, 而功率係數的高低便可影響產生功率的高低, 因此圖 2 所示為一個風速與風渦輪機轉速產生功率曲線的關係圖。

再觀圖 2, 不同的風速, 最大功率點位置都盡不相同, 因此要如何利用責任周期去控制轉速使其在風速固定或是風速變化時隨時可以追隨最大功率點進行運轉發電是本研究的主旨。

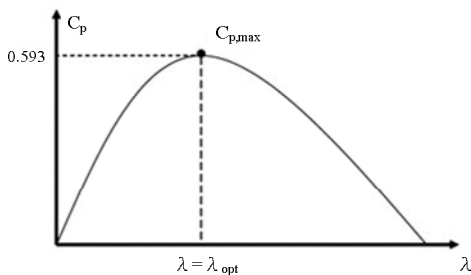


圖 1  $C_p$  對  $\lambda$  曲線圖

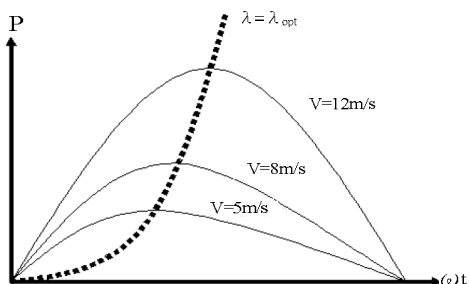


圖 2 風速與風渦輪機轉速關係圖

## 2.2 風力發電系統

風力發電系統隨著不同發電機的使用, 在系統配置上也有不同的規劃, 但大致上都會有變頻器以供並聯市電使用, 以下將介紹目前最常用之發電機種類以及系統架構[1]:

### (1) 直流激磁同步發電機

如圖 3 所示, 此發電機直接驅動轉子, 不需要透過變速齒輪箱, 而定子繞組輸出經一全功率(100%)之變頻器, 故此製作成本較高。

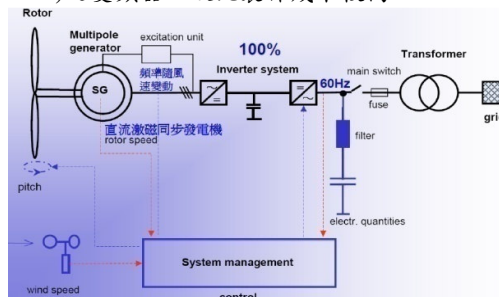


圖 3 直流激磁同步發電機系統架構圖

### (2) 永磁式同步發電機

如圖 4 所顯示, 轉子使用永久磁鐵作為激磁功用, 所以去掉了直流激磁部分, 但是需要變速齒輪箱帶動同步發電機, 定子繞組輸出經一全功率(100%)之變頻器。

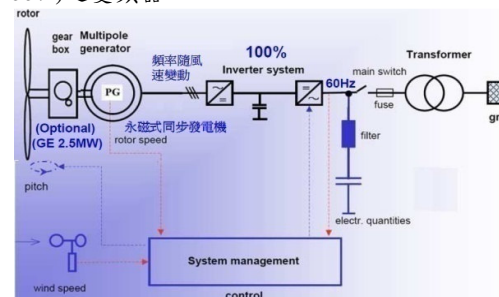


圖 4 永磁式同步發電機系統架構圖

### (3) 雙饋式感應發電機

如圖 5 所示, 此為變速且恆頻之發電機, 轉子為三相繞組, 經滑環與碳刷連接至變頻器, 變頻器容量只需感應發電機額定容量 25%~30%, 故容量較小損失較少, 效率便可較高, 整體成本較低, 但是滑環與碳刷須要維護。

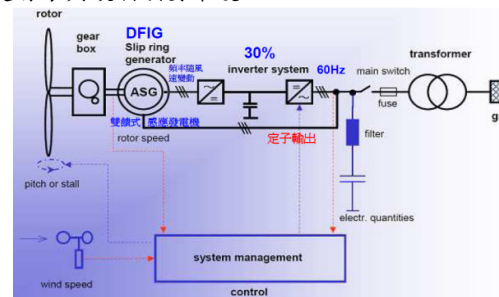


圖 5 雙饋式感應發電機系統架構圖

## III. 研究方法

本文利用 MATLAB 內建的 Simulink 函數方塊以及 A/D、D/A 卡來接收以及傳送資料訊號給風力發電模擬系統, 圖 6 為一風力發電降壓型直流-直流功率轉換器最大功率追蹤工作原理圖。

其中利用電流偵測電路以及電壓偵測電路, 將類比訊號由 A/D 轉換卡傳回至 Simulink 函數方塊轉換成數位訊號, 再經由本文所提出之最大功率追蹤方法, 輸出

適當的電壓命令，透過 D/A 轉換卡轉換成類比訊號，產生 PWM 開關切換訊號給直流-直流功率轉換器的功率開關 Q1，使其改變切換電流進而調整風渦輪機之轉速。

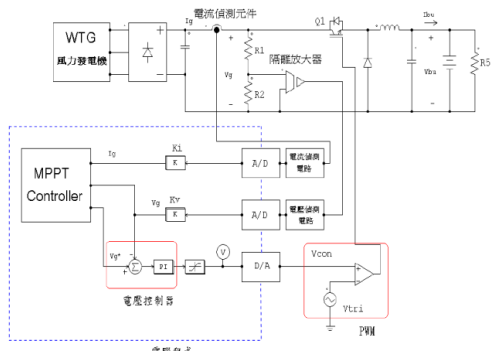


圖 6 降壓型直流-直流功率轉換器最大功率追蹤工作原理圖

### 3.1 Look-up Table 建立方法

某一固定風速下，控制功率開關的責任周期會影響風機的運轉速度是否能輸出功率達到最大值，因此在針對不同的風速下，對控制功率開關的責任周期進行測試。在 Simulink 底下，針對每一個固定風速利用函數方塊建構責任周期以斜率 0.1 的方式連續輸出從 0~9.5，而此輸出透過 D/A 轉換卡轉換成類比訊號產生 PWM 開關切換訊號給直流-直流功率轉換器的功率開關 Q1，使其改變風機之轉速，實驗結果如圖 7 所示，在每一個固定風速下都有有一個適當範圍區間能使輸出功率達到最大值的責任周期。

圖 7 所示，此為風力發電模擬系統的負載箱所能提供之最小負載 5 歐姆時的實驗結果、圖 8 為負載 50 歐姆的實驗結果以及圖 9 為負載箱所能提供之最大負載 200 歐姆的實驗結果；從圖 7 到圖 9 結果顯示，對於不同的負載並不會影響找尋適當的責任周期區間使輸出功率達到最大值的過程。

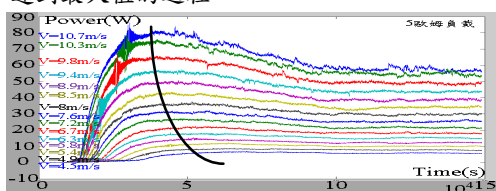


圖 7 負載 5 歐姆、風速與風機輸出功率關係圖

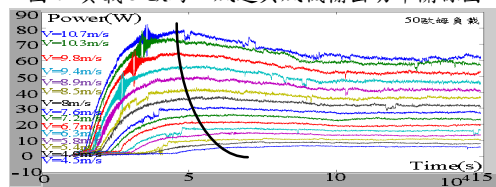


圖 8 負載 50 歐姆、風速與風機輸出功率關係圖

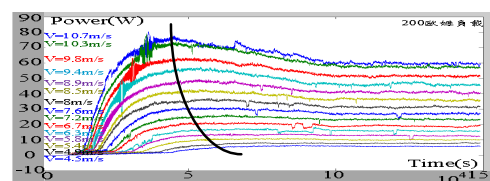


圖 9 負載 200 歐姆、風速與風機輸出功率關係圖

由圖 7 到圖 9 的結果顯示，在某一個適當範圍區間的責任周期都可以使風機輸出最大功率，但必須找尋出最適當、最能產生最大功率的責任周期，因此在此區間內針對每一個固定風速進行更精密的測試。在適當範圍區間的責任周期利用微調整的方式逐一進行測試，經由不斷測試的結果，將可獲得每一個固定風速下能達到最大功率輸出的責任周期。

### 3.2 Look-up Table 控制實施之方式

從實驗結果得知每一個固定風速下所能達到最大功率的輸出以及該對應的責任周期並且記載在 Simulink 建構的資料庫裡，在風機啟動時直接給予初始訊號經由 D/A 轉換卡轉換成類比訊號產生 PWM 開關切換訊號給直流-直流功率轉換器的功率開關 Q1，使風機轉速能夠遵循最佳化路線前進，透過電流偵測電路以及電壓偵測電路偵測出電壓與電流並且算出功率值，判斷是否超過邊界值，一旦超過邊界值則資料庫將會給予下一個責任周期使風機能夠往輸出最大功率的方向前進，如果沒有超過邊界值，則代表風機已達到最大功率輸出，責任周期將不會變動，如果因風速變動導致獲得的功率下降，資料庫將會自行判斷回到上一個該給予的責任周期。

邊界條件的設定取決於實驗的過程中在某一個固定風速下所產生的最大功率值與鄰近風速下所產生的最大功率值之間的平均值，依此方法設定每一個固定風速與每一個固定風速之間的邊界值，其判斷流程圖如圖 10 所示。

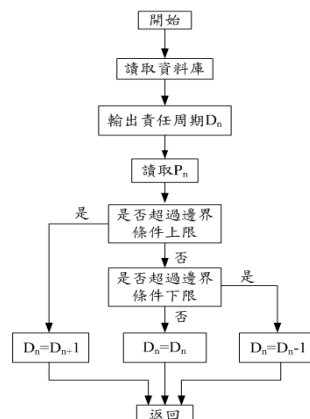


圖 10 查表法的判斷流程圖

## IV. 模擬結果

為驗證本文所提方法之各種發電特性，將與傳統的電流擾動法及三點權位比較法做比較，利用風力發電模擬系統做為實際測試平台，並以 MATLAB 內部所提供的 Simulink 函數方塊來建構傳統電流擾動法、三點權位法以及查表法之最大功率追蹤控制模式，圖 11 為傳統電流擾動法的判斷流程圖，圖 12 為三點權位法判斷流程圖。其中，風力發電模擬平台有一負載箱可提供不同負載做為測試，因此將針對於負載箱所能提供之最小負載 5 歐姆以及最大負載 200 歐姆測試在不同負載下、負載變動時以及在固定負載時風速變動下各種不同控制方法所產生的現象。

在實驗過程中將會以 1ms 為一單位進行實驗數據

的記錄並以波形圖以及表格的方式呈現,但由於風機必須在 500r.p.m 以上才會啟動,因此在這之前的數據無法納入運算,亦無法使用平均值運算,故在此使用中位值對需要獲得數據的項目進行取值。

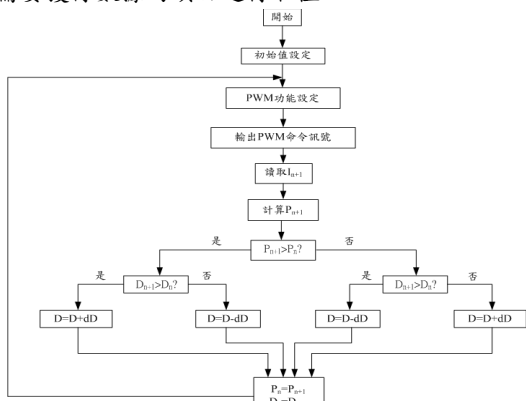


圖 11 電流擾動法判斷流程圖

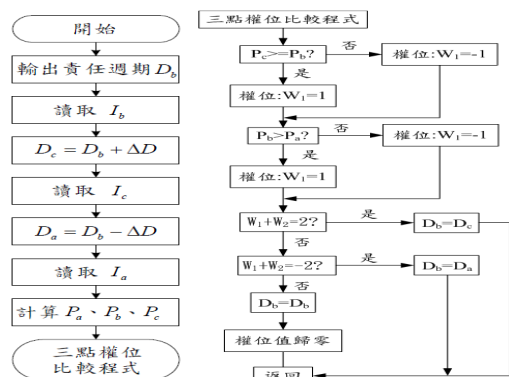


圖 12 三點權位法判斷流程圖

圖 13 到圖 15 為擾動觀察法、查表法以及三點權位比較法在風速 10.7m/s, 固定負載為 5 歐姆, 表一為記錄三種方法的功率值、電壓值、電流值以及轉速。

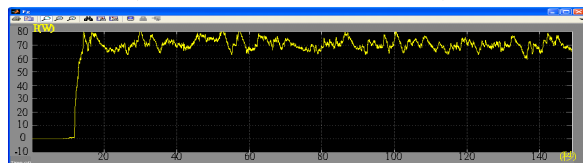


圖 13 擾動觀察法風速 10.7m/s、負載 5 歐姆功率輸出

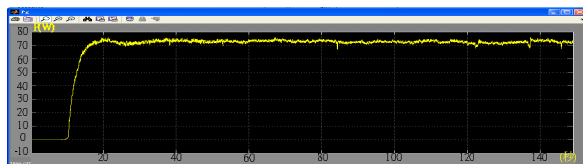


圖 14 查表法風速 10.7m/s、負載 5 歐姆功率輸出

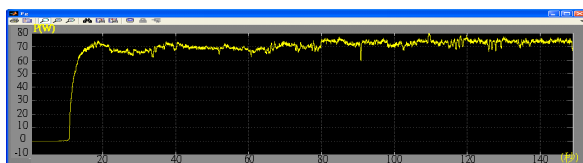


圖 15 三點權位比較法風速 10.7m/s、負載 5 歐姆功率輸出

表一

	Pg(median)	Vg(median)	Ig(median)	WTG
擾動觀察法	69.84	23.75	2.898	1164
查表法	73.8	25.64	2.875	1256
三點權位法	70.85	24.93	2.801	1222

圖 16 到圖 18 為擾動觀察法、查表法及三點權位比較法在風速 10.7m/s, 固定負載為 200 歐姆, 表二為記錄三種方法的功率值、電壓值、電流值以及轉速。

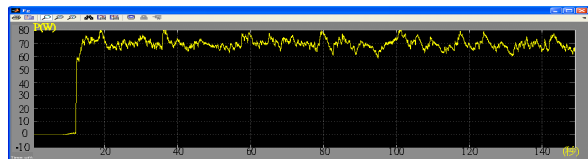


圖 16 擾動觀察法風速 10.7m/s、負載 200 歐姆功率輸出

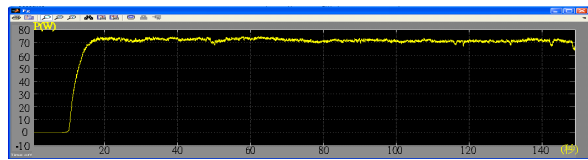


圖 17 查表法風速 10.7m/s、負載 200 歐姆功率輸出

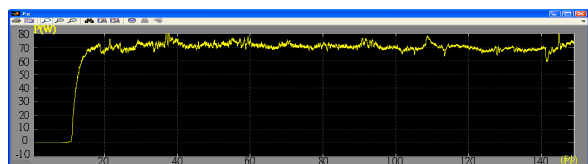


圖 18 三點權位比較法風速 10.7m/s、負載 200 歐姆功率輸出

表二

	Pg(median)	Vg(median)	Ig(median)	WTG
擾動觀察法	68.93	23.69	2.878	1161
查表法	71.53	26.4	2.707	1294
三點權位法	69.97	25.57	2.68	1253

圖 19 到圖 21 為擾動觀察法、查表法及三點權位比較法在風速 4.5m/s, 固定負載為 5 歐姆, 表三為記錄三種方法的功率值、電壓值、電流值以及轉速。

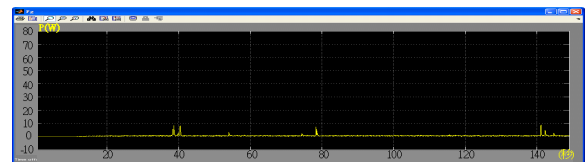


圖 19 擾動觀察法風速 4.5m/s、負載 5 歐姆功率輸出

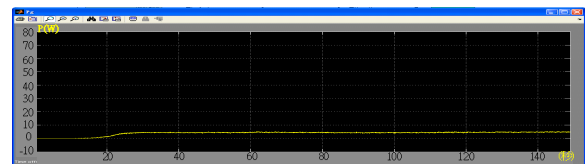


圖 20 查表法風速 4.5m/s、負載 5 歐姆功率輸出

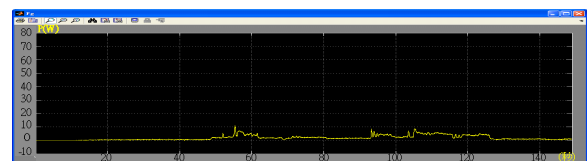


圖 21 三點權位比較法風速 4.5m/s、負載 5 歐姆功率輸出

表三

	Pg(median)	Vg(median)	Ig(median)	WTG
擾動觀察法	0.5198	22.67	0.02374	1111
查表法	4.461	16.76	0.266	821.2
三點權位法	1.339	20.32	0.06378	995.9

圖 22 到圖 24 為擾動觀察法、查表法及三點權位比較法在風速 4.5m/s，固定負載為 200 歐姆，表四為記錄三種方法的功率值、電壓值、電流值以及轉速。

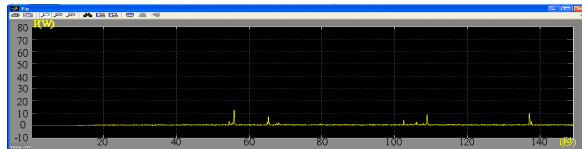


圖 22 擾動觀察法風速 4.5m/s、負載 200 歐姆功率輸出

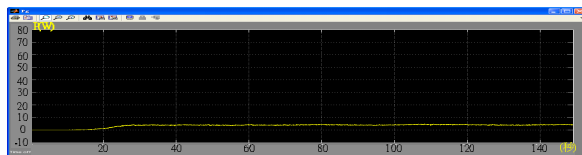


圖 23 查表法風速 4.5m/s、負載 200 歐姆功率輸出

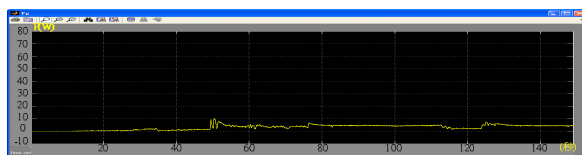


圖 24 三點權位比較法風速 4.5m/s、負載 200 歐姆功率輸出

表四

	Pg(median)	Vg(median)	Ig(median)	WTG
擾動觀察法	0.5206	22.91	0.02367	1123
查表法	4.063	17.04	0.2383	834.9
三點權位法	3.921	17.33	0.2154	849.2

圖 25 為隨機產生的訊號，給予人工風場產生風力渦輪機所需要的風源，以此測試三種方法對於風速隨機變化的反應速度以及穩定度，其中包含低風速也有高風速，低風速即能看出控制法則是否會導致風渦輪機停機，停止輸出電壓值以及電流值。

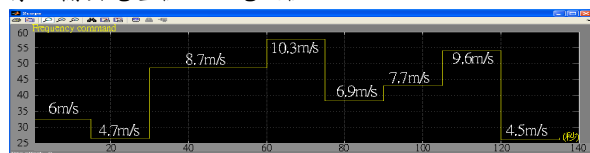


圖 25 隨機產生數位訊號

圖 26 到圖 28 為擾動觀察法、查表法以及三點權位比較法在風速隨機變化，固定負載為 50 歐姆的功率曲線圖。在低風速時，擾動觀察法會使風渦輪機停機沒有輸出功率，而三點權位法則是會較慢啟動，只有新方法可以在低風速下保持啟動輸出功率；而在高風速，擾動觀察法依然有飄移的現象，而三點權位比較法就沒有查表法如此穩定輸出。

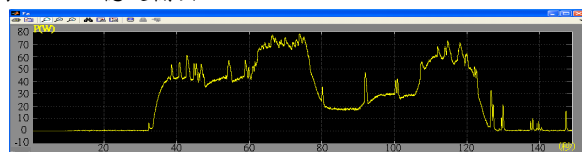


圖 26 擾動觀察法風速隨機變化、負載 50 歐姆功率輸出

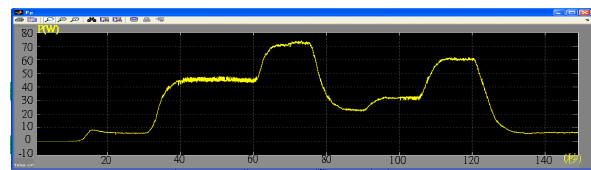


圖 27 查表法風速隨機變化、負載 50 歐姆功率輸出

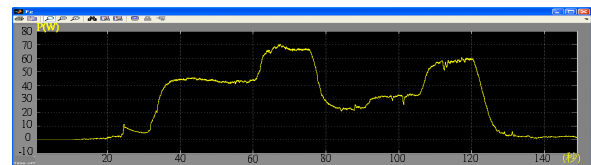


圖 28 三點權位比較法風速隨機變化、負載 50 歐姆功率輸出

## V. 結論

從實驗結果得知，本研究所提出之查表法比傳統的擾動觀察法以及三點權位比較法在固定高風速時，能夠更穩定輸出功率。而在低風速時，擾動觀察法的擾動量如果較大，可能會使風渦輪機停止發電，如果擾動量較小，在追蹤的速度方面可能會過慢，一切皆依賴經驗做決定；至於查表法在低風速時則是比三點權位比較法更趨於穩定。在針對不同的負載部分，由數據顯示，不同的純電阻負載由 5 歐姆以及 200 歐姆的實驗結果顯示，對於風渦輪機的發電品質是不太有直接的影響，只會影響到降壓型直流-直流功率轉換器的部分，而且在運轉途中，將負載加重對於風渦輪機的輸出功率並沒有產生變化，至於電感性負載或者是電容性負載，在未來可做為研究方向。至於風速隨機的變化在不同方法的反應速度以及穩定性上各有優劣，由結果顯示查表法不管在反應速度以及穩定性上皆不輸給反應速度快以及穩定性高的傳統擾動觀察法以及三點權位比較法。

## 參考文獻

- [1] 台灣電力公司, <http://www.taipower.com.tw/>
- [2] F. A. Farret, L. L. Pfitscher, D. P. Bernardon, "An Heuristic Algorithm for Sensorless Power Maximization Applied to Small Asynchronous Wind Turbogenerators," Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on, vol. 1, pp. 179-184, 2000.
- [3] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, N. C. Voulgaris, "Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 16, pp. 46-54, 2001.
- [4] 王建斌, 風力發電系統最大功率追蹤方法之研究, 中原大學, 電機工程研究所, 碩士論文, 民國九十四年七月。
- [5] 台灣仿真科技股份有限公司, <http://www.jubilee.com.tw/>
- [6] 黃意明, 風力發電之類神經網路最大功率追蹤, 中原大學, 電機工程研究所, 碩士論文, 民國九十五年七月。
- [7] J. F. Manwell, J. G. Mcgowan and A. L. Rogers, "Wind Energy Explained-Theory, Design and Application," John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- [8] 顏義和、洪紫國, "以斜率調控法實現風力發電系統之最大功率追蹤控制方法", 第三十屆電力工程研討會, 民國九十八年十一月。
- [9] A. M. Howlader, N. Urasaki, T. Senju, A. Yona, T. Funabashi, A. Y. Saber, PEDS 2009. on International Conference, Vol. 1289-1294, 2009.