

Wind Energy Investigation based on MANFIS-PSO Control with Inertia-tunable Flywheel: A Case Study on the Dongji Island

Chi-Wei Tsai and Chung-Neng Huang*

Graduate Institute of Mechatronic System Engineering

National University of Tainan, Tainan, Taiwan

* kosono@mail.nutn.edu.tw

Abstract

How to deal with the extreme weather resulted from global warming has become the most important issue that elevates the development of renewable energy among countries in the world. Nowadays, the renewable energy occupies at about 5% of total electricity consumption in Taiwan where wind energy is the main of it. However, the exploring efficiency of wind farm depends on the potential of wind energy. How to locate the wind farms with higher energy potential is most important. At present, 323 land-type wind power generations were established in Taiwan. That is, the exploration of land-type wind farms has been approaching to saturation. For the off-shore wind energy of Taiwan is excellent, the promotion of the off-shore wind farms has become one of the green energy policies.

Although the stability of off-shore wind farms is better than the land-type ones, the previous is less of the observation data than later. In order to improve this problem, a wind energy investigation based on the MANFIS-PSO control with inertia-tunable flywheel is proposed to evaluate the potential wind energy for the possible wind farms. For the MANFIS-PSO control is the integration of multiple neuro-fuzzy networks and particle swarm organization to optimize the PID parameters, through this artificial intelligent algorithm combining with the local wind data can minimize the error occurrence of data inadequateness in long period.

Keywords: Wind Farm, Multiple Adaptive Neuro-fuzzy Inference System (MANFIS), and Particle Swarm Organization(PSO).



利用 MANFIS-PSO 可變慣性飛輪控制之風場調查： 以東吉島為例

蔡志緯 黃崇能*

機電系統工程研究所

國立臺南大學

摘要

如何因應近百年來全球暖化造成的氣候變化已成為國際間的重要議題，各國都在積極發展再生能源。目前，再生能源發電占全台總用電量的 5%，其中以風力發電為主要。然而，風能之優劣攸關風場開發效益，故如何找尋具風力潛能之開發場址為其首要之務。目前全臺灣的陸域風場已經設置了 323 架風力發電機，可見陸域風場之開發已趨近飽和；由於台灣海域風能極佳，故離岸風場之推動已成為政府主要綠能政策之一。

雖然海域風場較陸域來為穩定，但是也較缺乏觀測資料。為此，本研究提出一以可變慣性飛輪控制方法來穩定風力發電系統輸出，並透過複數類神經模糊網路結合粒子群演算法來最佳化 PID 控制參數；透過人工智慧模擬結合局部風能資料的方式來評估潛在可開發的風能，以改善長時間觀測資料不足所可能造成的誤差，進而提供一更有效且快速的風場評估方式。

關鍵字:風場、適應性模糊類神經決策系統、粒子群演算法



1.前言

地球上任何地方都在吸收太陽的熱量，但是由於地面每個地方受熱的不均勻性，空氣產生流動，形成了風。由於地球和太陽的相對位置發生變化，使地球上存在日夜及季節的溫度變化，因此風向、風速是一直改變的，忽大忽小，時有時無。與傳統發電相比，風力發電最大的特點是：風能波動性大，因而不能像水力、火力發電那樣可以依照用電需求來調整發電量，致使風力發電機組的輸出功率表現出很大的波動性。隨著風力機組單機容量不斷增大和風場(wind farm)多部機組並聯運轉，大型風場直接併入輸電系統，風力發電對電力系統的安全穩定運行帶來越來越大的影響。由於目前風力發電存在電力穩定度不夠之問題，而大量電力瞬間波動，可能對電網的系統穩定性和電力品質造成衝擊，因此風力發電輸出功率控制成為風電技術的研究重點。

近年來隨著電力電子技術發展，以及電力元件性能的提昇，現在可以以電力電子的調變技術，將變頻的電源調變成定頻的電源[1][2]，一般而言，於永磁式或雙饋式風力發電系統中，其使用了一組整流器、蓄電池組與換流器，將輸入的電能經過整流，透過電池做緩及儲存電能，並由換流器將電源經過再次轉換後，輸出至後端市電及負載[3]。

為使風力發電機獲得最大的輸出功率並穩定輸出，在額定風速範圍內時，風力發電機做最大功率追蹤；風速超過額定風速時，則利用旋角控制限制風能獲效率，使風力發電機穩定保持額定功率輸出[4][5][6]。旋角控制是在高風速的情況下改變葉片受風角度，降低葉片受風力量，限制載風能量並協助使風力發電機減慢速度，避免造成過載情形發生，如此可限制風力發電機的平均速度及發電量，但是需要頻繁調節旋角，容易導致機械磨損[7]。最大功率追蹤(Maximum power point tracking, MPPT)，是透過升降電壓轉換器來調控電壓，進而控制風力機轉子轉速，追蹤各風速下的最佳尖速比，以達成最大功率追蹤，提高發電機效率，缺點為電力電子轉換造成額外損失，同時其採用較多設備，造成成本較高。為了彌補這些問題本研究利用轉動慣性可變之概念作為穩定電力品質之機制，來轉移部分來自風力的不穩定能量，並以直流伺服馬達驅動滾珠螺桿來調控飛輪之慣性。風能透過可變慣性飛輪轉動儲存為動能，再將此轉動動能穩定輸出至發電機，降低電力波動量，以提高電力品質及將更大風速範圍的風能轉換成電能。

2.系統架構

本研究所提出之利用可變慣性飛輪穩定風力發電系統輸出，並透過類神經模糊網路結合粒子群演算法最佳化 PID 控制器參數之系統架構如圖 1 所示。發電系統主要是由風力機葉片，將輸入風能透過傳動機構傳遞動能驅動永磁式同步發電機，再由發電機將機械能轉換成電能輸出至市電負載。由於自然界中，風能的擾動會造成風力機輸出功率與發電機輸出功率變動，為了穩定永磁式同步發電機的輸出功率，本研究利用由伺服馬達及滾珠螺桿所組成的致動器，由馬達帶動滾珠螺桿而使可變慣性飛輪的滑塊移動以調控飛輪之慣性，做為能量補償機構，並透過複數類神經網路模糊推論系統(MANFIS)[8]結合粒子群演算法(PSO)使 PID 控制器能自動調整控制器參數來適應程序或環境改變以 PID 控制器降低穩態誤差及提高穩定性。

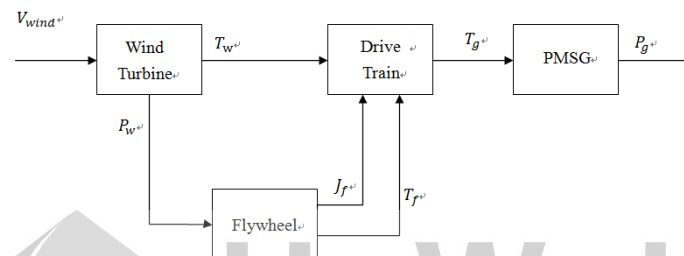


圖 1 系統架構

在傳動機構中，其結合了風力機輸入的風能和可變慣性飛輪控制架構所提供的轉動動能，並將輸入能量傳遞至永磁式同步發電機。由式(4)可得到風力機輸入風能轉矩 T_w 與可變慣性飛輪轉矩 T_f ，乘上其各別的轉速 ω_w 、 ω_f ，即可獲得風力機整體輸入的功率，其能量傳遞如圖 2 所示。輸出至永磁式同步發電機的總功率可表示為發電機轉矩 T_g 與發電機轉速 ω_g 的

乘積。

$$T_g \cdot \omega_g = T_w \cdot \omega_w + T_f \cdot \omega_f \quad (1)$$

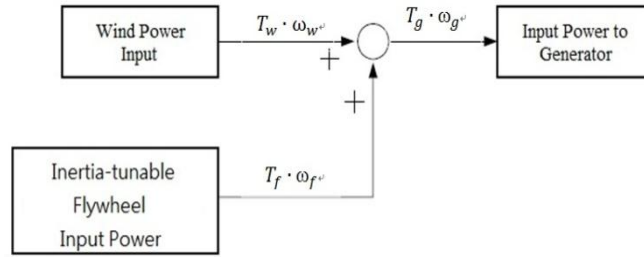


圖 2 飛輪機構能量傳遞圖

2.1 風力機之數學模型

風力機所捕獲的風能為：

$$P = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{V_R}{V} = \frac{\omega \cdot R}{V} \quad (3)$$

R 為葉片的旋轉半徑(m)， ρ 為空氣密度(kg/m^3)， V 為風速(m/s)， C_p 為風能功率係數， λ 為尖速比， β 為扇葉旋角， ω 為風力機轉速(rad/s)。本研究所使用之風力發電機的特性曲線如圖 3 所示。

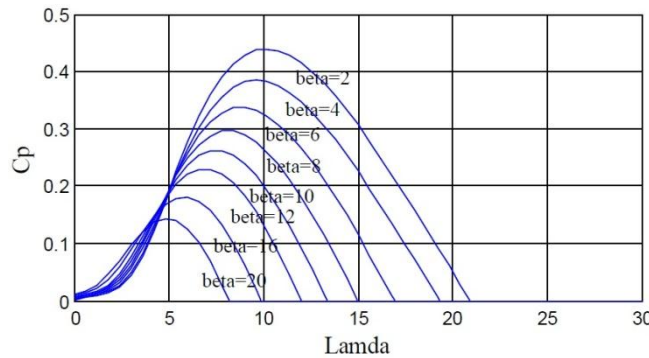


圖 3 風能係數與旋角、尖速比之關係圖

2.2 永磁同步發電機之數學模型

根據旋轉坐標系統(d-q 軸轉換)下的永磁同步發電機的定子電壓方程式為：

$$u_d = -R_s i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + L_q \omega i_q \quad (4)$$

$$u_q = -R_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - L_d \omega i_d + \omega \psi \quad (5)$$

式中： u_d 、 u_q 和 i_d 、 i_q 分別為定子電壓和電流的 d 軸、q 軸分量， R_s 為定子電阻， L_d 、 L_q 分別為 d 軸和 q 軸電感， ω 為角速度， ψ 為永磁體磁鏈。

永磁同步發電機之電磁轉矩方程式為：

$$T_e = 1.5n_p[\psi i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (6)$$

風力發電用永磁同步發電機的永磁體多採用徑向表面式分佈，即 $L_d = L_q$ ，則電磁轉矩方程式可簡化為：

$$T_e = 1.5n_p \psi i_q \quad (7)$$

2.3 可變慣性飛輪機構

可變慣性飛輪是以固定慣性矩的平板式飛輪儲能與釋能概念為基礎，建構可隨轉速自動調變慣性矩之變慣性矩飛輪，作為間歇運動機台之能量補償裝置。可變慣性飛輪其構造如圖 4 所示， b_f 為飛輪之外徑， a_f 為飛輪之內徑， l_f 為飛輪之厚度， l'_f 為滑塊之長寬， r 為滑塊高之一半， l_m 為中心軸到滑塊心之距離， l_x 為中心軸之半徑， l_s 為滑塊外移之距離。

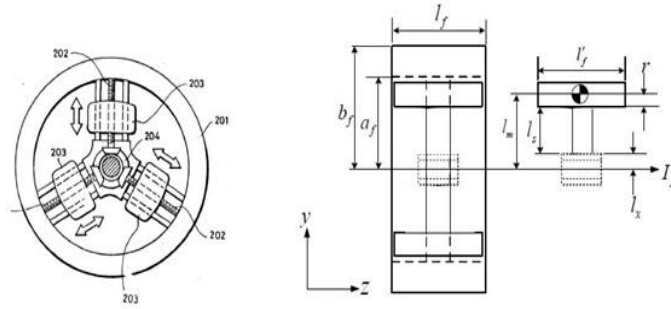


圖 4 可變慣性飛輪之示意圖[9]

滑塊之質量為：

$$m = \rho V = \rho 2r l'_f \quad (7)$$

滑塊之慣性矩為：

$$I_m = \frac{1}{12} m [l'_f{}^2 + (2r)^2] + m l_m^2 \quad (8)$$

假設可變慣性飛輪具有四塊滑塊，則慣性矩為：

$$I_f = \rho l_f \left(\frac{(b_f^4 - a_f^4) \pi}{2} \right) + 4 \cdot \sum I_m \quad (9)$$

可變慣性飛輪之質量為：

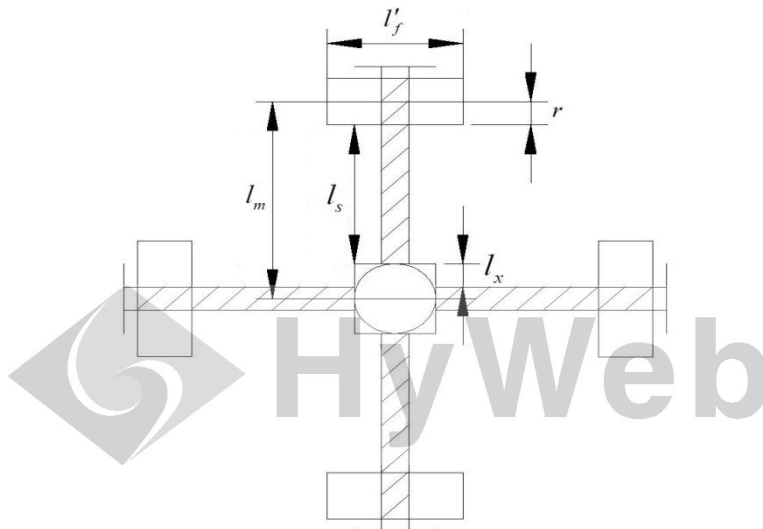


圖 5 去除外框之可變慣性飛輪

$$m_f = \rho(b_f^2 - a_f^2)\pi l_f + 4 \cdot (2r\rho l_f'^2) \quad (10)$$

本研究所使用之可變慣性飛輪為了增加慣性變化量，所以移除外框，其構造圖與示意圖如圖 5 所示。其質量慣性矩可表示為：

$$I_f = 4I_m = I_m = \frac{1}{3}m[l_f'^2 + (2r)^2] + 4ml_m^2 \quad (11)$$

飛輪質量可表示為：

$$m_f = 4 \cdot (2r\rho l_f'^2) \quad (12)$$

物體繞著固定軸做旋轉運動，其角動量為：

$$L = I \cdot \omega = m \cdot r^2 \cdot \omega \quad (13)$$

L 為角動量， J 為慣性矩， ω 為角速度， r 為質點到旋轉中心的距離， m 為質量。

當物體的轉動狀態發生改變時，表示物體受到力矩作用，而力矩就等於角動量的時變率：

$$T = \frac{dL}{dt} \quad (14)$$

如果飛輪的慣性矩發生改變，會產生一力矩，根據公式(1)、(2)：

$$T_f = -\frac{dJ_f}{dt} \cdot \omega_f \quad (15)$$

可變慣性飛輪之控制結構如圖 2.5.4 所示，其輸入為風力機實際輸出功率 P_w 和參考功率 P_{ref} 的差值，經過控制器根據

風力機輸出功率的變化分析推得適當的可變慣性飛輪之滑塊位移，再將位移變化做為致動器的目標輸入值，致動器接收訊號後，伺服馬達驅動滾珠螺桿產生滑塊位移，最後經過感測器感測滑塊位移後產生實際位移訊號，再和下次輸入指令產生誤差訊號，致動器的控制器接收誤差訊號後調整輸出指令以減少誤差。

當 $P_w > P_{rated}$ ，此時風力機之輸出功率大於額定功率，為了使風力機之輸出功率保持在額定值，可變慣性飛輪之滑塊外移，增加飛輪慣性，使飛輪吸收能量以穩定風力機輸出功率。

當 $P_w < P_{rated}$ ，此時風力機之輸出功率低於額定功率，為了提高風力機之輸出功率，可變慣性飛輪之滑塊內縮，減少飛輪慣性，使飛輪釋放能量以提高風力機輸出功率，由於本研究所用風力機之尖速比較高，所以當飛輪補償能量時會造成尖速比上升使風力機功率係數 C_p 值下降，因此當 C_p 值低於 0.2 時，飛輪就不再補償能量以免補償效率太低。

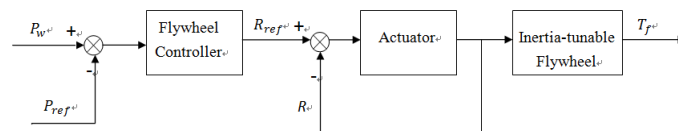


圖 6 可變慣性飛輪控制結構

2.4 致動器

本研究之可變慣性飛輪是利用直流伺服馬達驅動滾珠螺桿來移動滑塊位置，以改變飛輪之慣性矩，如圖 7 所示，目標位置為致動器控制系統的輸入，並透過 PID 控制器減少控制誤差，再以伺服馬達驅動滾珠螺桿使螺帽產生位移，用以改變可變慣性飛輪的滑塊位置，最後經感測器偵測位移結果再回授到 PID 控制器進行誤差修正，藉此可以精確的掌握變慣性飛輪的滑塊位置。

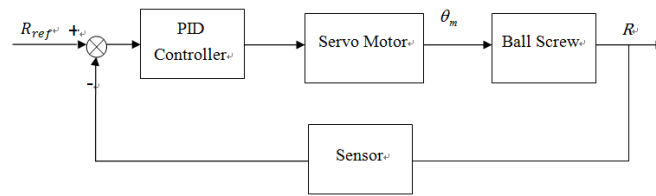


圖 7 致動器控制系統

2.5 旋角控制

為比較風力發電機在變動風速下可變慣性飛輪之影響，故以旋角控制做為比較對象，旋角控制是利用發電機轉速和發電機轉速參考值間的誤差作為PID控制器的輸入，控制器輸出旋角參考值，旋角機構再根據參考值來改變旋角，控制結構如圖2.6.1所示，當風速超過額定風速時，可以透過調節風力機扇葉之旋角從而降低風力機之輸出功率，使其維持在額定功率附近。

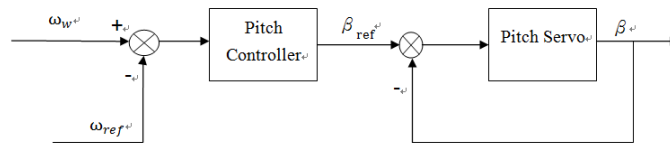


圖 8 旋角控制結構圖

3. 自調適PID控制系統

PID 控制器架構簡單，成本較低，維修也較容易，並可有效地應用於大部分的工業程序。可是由於程序參數會隨著時間改變，或者受控程序具有非線性的動態行為，當操作點遠離當初控制器設計所考量的條件時，PID 控制器就不再符合預期的設計規格，甚至程序可能會發生失控而產生危安事故，所以控制器就必須再重新調整，可是重新調整是耗時的，基於此原因，本研究將透過複數類神經網路模糊推論系統(MANFIS)和粒子群演算法(PSO)使PID 控制器能自動調整控制器參數來適應程序或環境改變。

3.1 PSO-PID 控制器

本研究所使用伺服馬達之轉移函數為(16)式[10]，滾珠螺桿之導程是10(mm)，因此致動器系統中滑塊位置與輸入電壓之間的轉移函數如(17)式所示：

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{2.096}{1.65s^2 + 3.9067s} \quad (16)$$

$$\frac{D(s)}{V(s)} = \frac{10}{2\pi} \times \frac{2.096}{1.65s^2 + 3.9067s} \quad (17)$$

$$= \frac{3.3359}{1.65s^2 + 3.9067s}$$

使用 SIMULINK 建立轉移函數的PID 控制系統的方塊圖

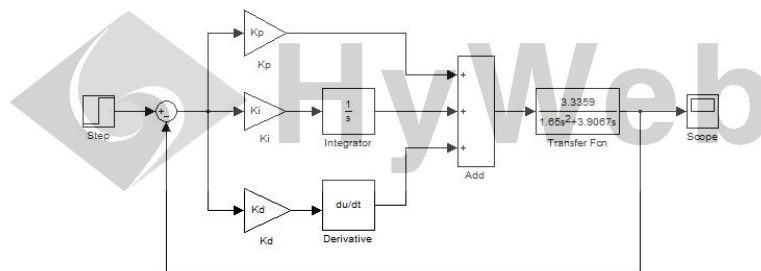


圖 9 轉移函數的方塊圖

本研究使用 PSO 去最佳化 PID 參數，其流程首先設定初始條件如：粒子總數、疊代次數、慣性權重、搜尋速度、PID 參數搜尋範圍等，之後以隨機方式產生位置和速度，再分別計算每個粒子的適應函數值，再來判斷系統是否穩定，以避免得到不穩定的系統，接下來判斷粒子的個體最佳解及群體最佳解，再更新粒子的位置及速度，最後重複執行直到滿足停止條件，就可以得到一組最佳的 PID 參數值。適應值函數的目的是使最佳化之後控制系統的誤差趨近於零，並且具有較快的響應時間跟較小的最大超越量，本研究之適應值函數是使用 ITAE 指標，即：

$$T_{ITAE} = \int_0^T t|e(t)|dt \quad (18)$$

3.2 MANFIS-PSO-PID 控制器

一般傳統控制器之參數皆為固定值，當受到外部干擾影響時，原本的控制器參數將無法有效的改善系統的響應，因此並須重新調整，以適應新的情況，而 PSO 演算的過程中收斂需要花費時間，所以本研究使用複數適應性類神經模糊推論系統(MANFIS)[11]來改進 PSO-PID 控制器，用以適應性的調整參數並加快 PSO 的收斂速度，MANFIS 會依據系統的輸入值和輸出值利用類神經網路進行學習預測，再利用模糊控制進行自適應調整，PSO 再依據 MANFIS 的輸出值做為參考值進行最佳化，因此先建立一模糊控制 PID 並擷取其輸入值和輸出值，圖 10 是 MANFIS-PSO-PID 的結構圖。

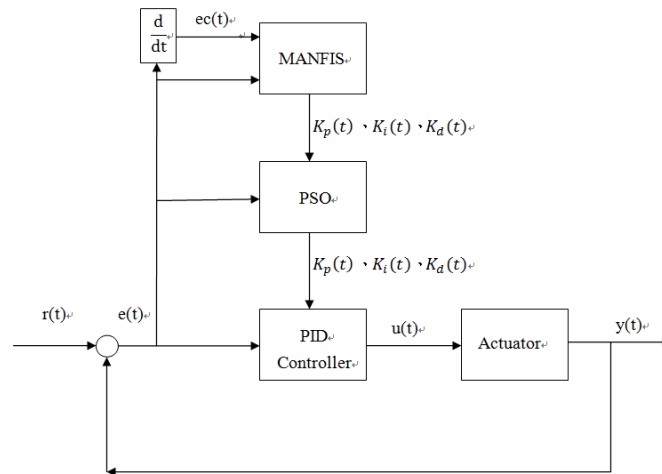


圖 10 MANFIS-PSO-PID 控制器的架構圖

MANFIS 基本上就是根據輸出值的數目，使用相同數目的 ANFIS 控制器來進行訓練，而 PID 控制器有 K_p 、 K_i 、 K_d 三個輸出值，因此本研究使用三個 ANFIS 控制器分別來調整 K_p 、 K_i 、 K_d 三個值，圖 11 是 MANFIS-PID 之結構圖。

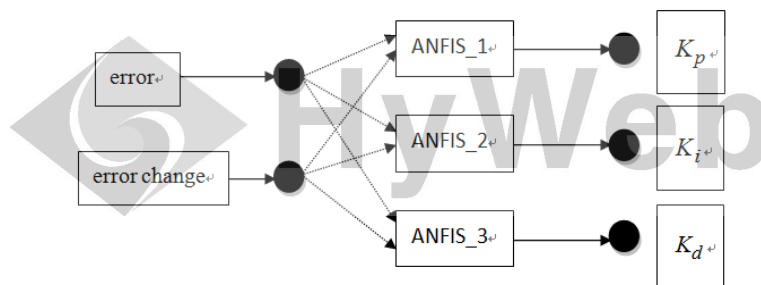


圖 11 MANFIS-PID 之結構圖

ANFIS 是利用類神經網絡來實現模糊推論，是基於一階 sugeno 模糊模型的，它能改善傳統模糊控制設計中所依靠人的思維一次次的調整隸屬函數才能達到減小誤差、增進效能的缺點，以複合式的學習過程為基礎建立一套 if-then 規則，並調整出適當的隸屬函數來滿足所要的模糊推理輸入輸出關係。

ANFIS 的 2 個輸入分別為誤差和誤差變化率，隸屬函數的數目為 7，類型為三角形，論域為[-6、+6]和[-3、+3]，目標誤差為 0，經過 40 次訓練後，得到的隸屬函數如圖 3.3.3~圖 3.3.8。

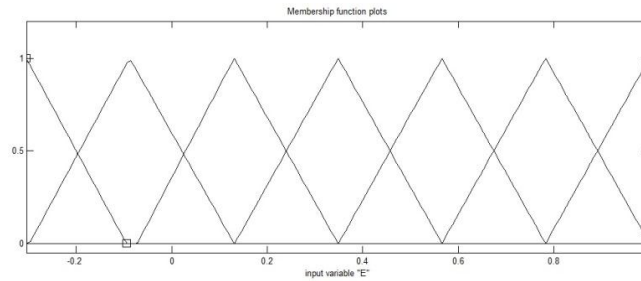


圖 12 K_p 的誤差/誤差變化隸屬函數

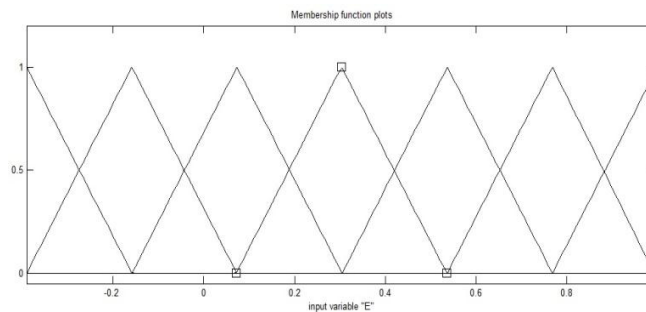


圖 13 K_i 的誤差/誤差變化隸屬函數

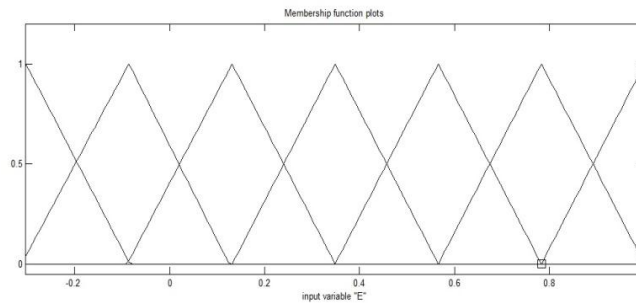


圖 14 K_d 的誤差/誤差變化隸屬函數

接下來擷取 MANFIS 的輸出值帶入 PSO，由於 PSO 的粒子是依照群體最佳解來修正搜尋速度，藉由 MANFIS 的輸出值做為初始群體最佳解，用以增加群體最佳解的精確度並加快搜尋最佳解的收斂速度，粒子群搜尋範圍則是以 MANFIS 調整之參數為中心，向其左右兩側拓展而成的範圍，用以縮小搜尋範圍，圖 15、圖 16 分別為 POS-PID 及 MANFIS-PSO-PID 的收斂情形，由圖可知 MANFIS-PSO-PID 收斂速度比一般 PSO 還快，圖 3.3.11、表 3.3.1 分別是性能比較圖及性能指標，由表可知 MANFIS-PSO-PID 的性能比 PSO-PID 的還要好。

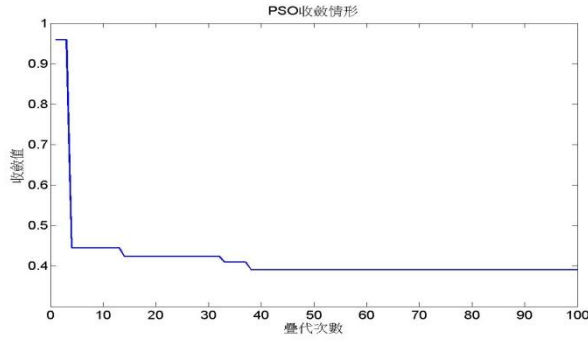


圖 15 PSO-PID 適應值收斂情形

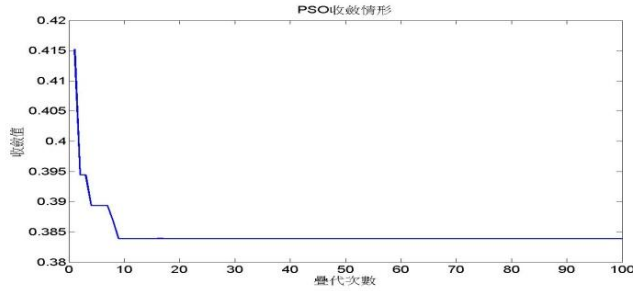


圖 16 MANFIS-PSO-PID 的收斂情形

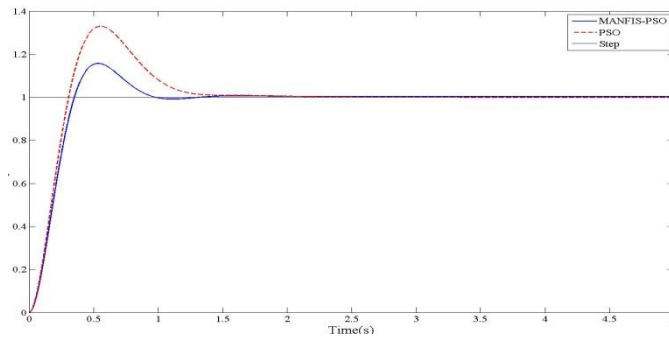


圖 17 MANFIS-PSO-PID 跟 PSO-PID 的性能比較圖

表 1 MANFIS-PSO-PID 跟 PSO-PID 的性能指標

	上升時間 (t_r)	安定時 間(t_s)	最大超 越量 (%)	尖峰時 間(t_p)
PSO	0.2115	1.2412	33.03	0.5548
MANFIS-PSO	0.2391	0.8872	15.76	0.5348

4.系統模擬與分析

本研究的可變慣性飛輪是用於吸收超過額定功率之能量以補償低於額定功率之能量，藉以穩定發電機額定輸出，所以為分析風力發電機在變動風速下含與不含可變慣性飛輪之影響，故以旋角控制做為比較對象，並使輸入風為基本風速 12 m/s 之隨機風[12]，來觀察模擬結果。

4.1 風能評估

如圖 18 所示，其風速變動範圍在 9 ~ 15 (m/s)之間。

圖 19、圖 20、圖 21 所示分別為風力機輸入到發電機之機械轉矩、風力發電機之輸出功率、轉速，由圖可知風力機輸入到發電機之機械轉矩、風力發電機之輸出功率、轉速會因為風速上升或下降之影響而變動，但是加入可變慣性飛輪系統可以降低功率波動之情形，使風力發電機之輸出維持在額定值附近以增加發電效率，離散值和輸出比較和說明如表 4.2.1，加入可變慣性飛輪之平均輸出功率為 5674W 比不加飛輪之平均輸出功率 5327W 提高了 6.51%。

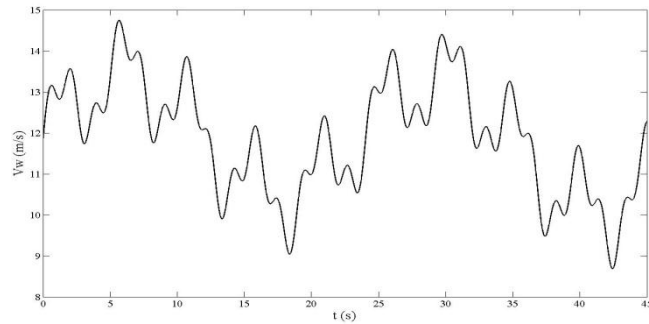


圖 18 風速

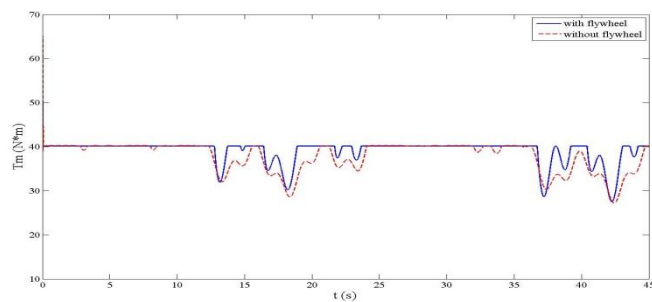


圖 19 風力機輸入到發電機之機械轉矩

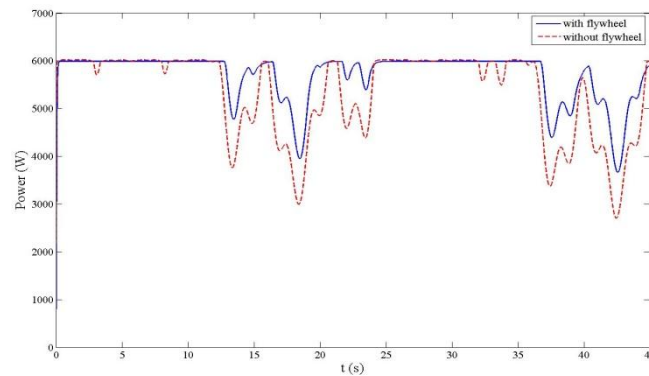


圖 20 風力發電機之輸出功率

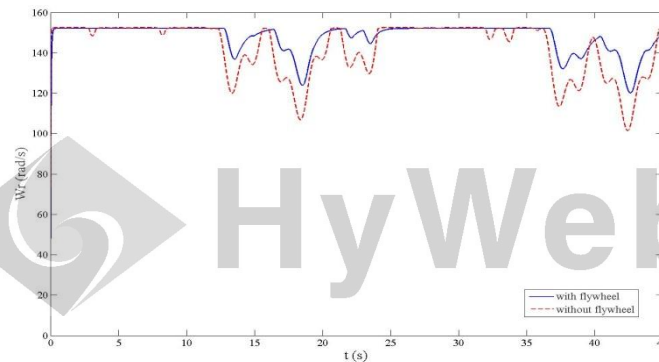


圖 21 風力發電機之轉速

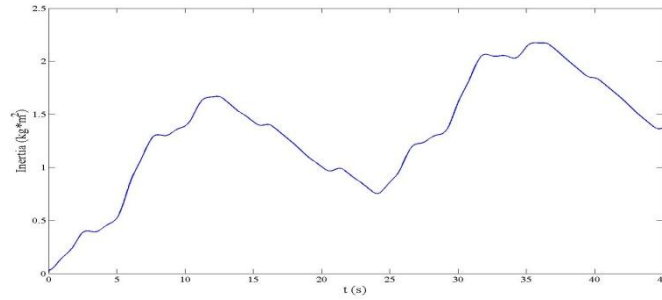


圖 22 可變慣性飛輪之慣性矩

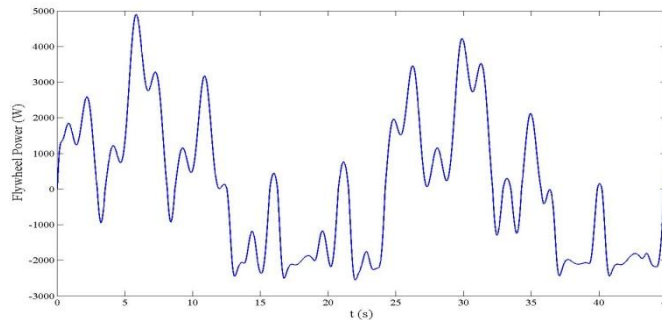


圖 23 可變慣性飛輪之輸出功率

可變慣性飛輪會隨著風速變動，移動滑塊來改變慣性矩用以吸收或釋放能量，當風速超過額定風速時，慣性矩變大會吸收能量，當風速低於額定風速時，慣性矩變小會釋放能量，如圖 22、圖 23 所示為可變慣性飛輪之慣性矩、可變慣性飛輪之輸出功率。

4.2 以東吉島為例

風速是變動的，所以風力發電機的發電量會隨著風速變動而改變，因此本研究結合可變慣性飛輪用以在風速變動時使風力發電機之輸出功率穩定在額定值，可以較客觀的探勘出風力發電量，本研究根據中央氣象局風速資料(表 2)選出平均風速較接近額定風速之地點，以東吉島為例，圖 24 為東吉島 12 月之日平均風速。

由於本研究之可變慣性飛輪是用來吸收超過額定功率之能量以補償低於額定功率之能量，所以工作範圍是在額定風速附近 10~14(m/s)，超出工作範圍時就無法吸收或補償能量，所以可變慣性飛輪有工作之平均風速為：12/3(12.1m/s)、12/4(12.4m/s)、12/5(10.6m/s)、12/8(13.5m/s)、12/11(10.9m/s)、12/14(10.8m/s)、12/18(13.3m/s)、12/19(11.2m/s)、12/25(12m/s)、12/26(10.7m/s)、12/27(11.3m/s)、12/29(12.7m/s)、12/30(11.9m/s)，圖 25~圖 26 分別為可變慣性飛輪有工作時之風速及風力發電機輸出功率比較圖，表 4.2.1 為平均輸出功率比較，圖 4.2.11 則為東吉島 12 月日平均功率比較圖，由圖可知當可變慣性飛輪有工作時，風力發電機之輸出功率變動會較小，平均輸出功率也較高。

表 2 中央氣象局風速資料-台灣月平均風速

地名	風速												單位:公尺/秒	
	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	平均	統計期間
淡水	2.3	2.3	2.2	2.0	1.9	1.8	2.0	2.0	2.0	2.3	2.4	2.4	2.1	1981-2010
鞍部	3.5	3.4	3.2	3.0	2.7	2.6	3.0	3.3	3.8	3.7	3.8	3.6	3.3	1981-2010
臺北	2.8	2.7	2.6	2.7	2.6	2.2	2.2	2.4	2.9	3.4	3.3	3.0	2.7	1981-2010
竹子湖	2.9	2.7	2.2	1.8	1.6	1.4	1.2	1.3	1.8	2.5	2.7	2.7	2.1	1981-2010
基隆	3.5	3.3	2.9	2.5	2.3	2.3	2.6	2.8	3.1	3.5	3.7	3.6	3.0	1981-2010
彭佳嶼	8.2	8.1	7.3	6.7	6.2	6.2	6.9	6.6	7.1	7.9	8.4	8.3	7.3	1981-2010
花蓮	2.7	2.6	2.5	2.4	2.2	2.3	2.5	2.3	2.4	2.7	2.7	2.8	2.5	1981-2010
蘇澳	3.0	2.9	2.7	2.4	2.2	2.2	2.9	2.8	2.9	3.0	2.9	3.0	2.7	1982-2010
宜蘭	1.6	1.6	1.6	1.6	1.5	1.6	2.0	2.0	2.1	1.9	1.6	1.6	1.7	1981-2010
東吉島	11.0	10.1	8.4	6.7	5.6	5.7	5.2	4.9	6.5	9.9	10.9	11.4	8.0	1981-2010
澎湖	5.6	5.3	4.5	3.7	3.2	3.3	2.8	2.8	3.8	5.6	5.8	5.9	4.4	1981-2010
恆春	4.2	3.9	3.5	3.1	2.7	2.5	2.6	2.4	2.8	4.1	4.9	4.7	3.5	1981-2010
成功	4.0	3.7	3.3	3.0	2.7	2.5	2.6	2.7	3.3	4.2	4.4	4.2	3.4	1981-2010
蘭嶼	8.1	7.7	7.6	7.5	7.5	9.2	8.4	8.1	7.4	8.5	9.1	8.6	8.1	1981-2010
日月潭	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1981-2010
臺東	1.9	1.9	1.8	1.7	1.6	1.7	1.7	1.7	1.8	2.0	2.1	2.0	1.8	1981-2010
梧棲	6.9	6.4	5.5	4.4	3.8	4.0	3.7	3.5	4.4	6.2	6.4	6.8	5.2	1981-2010

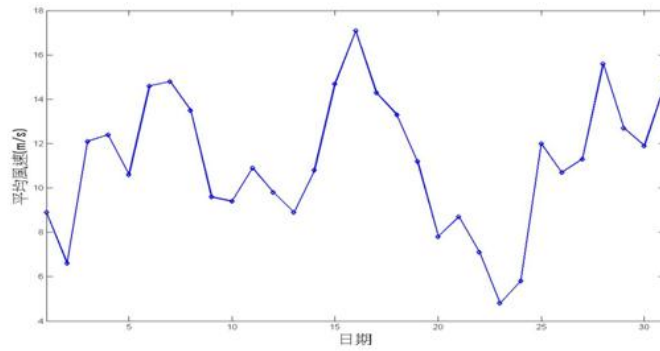


圖 24 東吉島 12 月之日平均風速

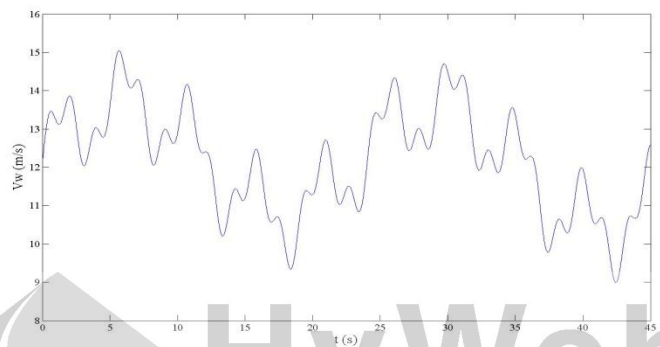


圖 25 平均風速 12.1 之隨機風

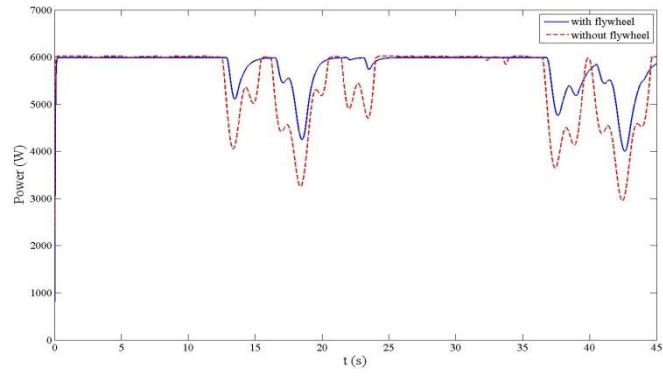


圖 26 平均風速 12.1 之風力發電機輸出比較圖

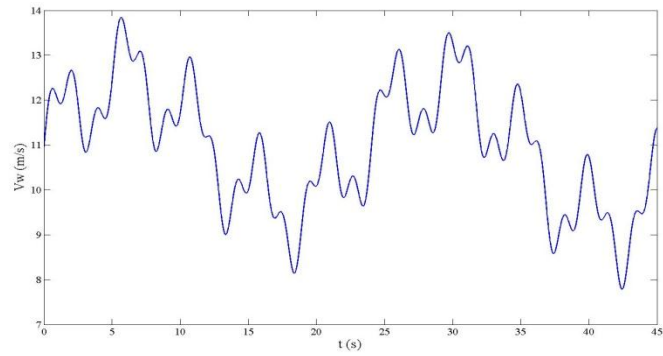


圖 27 平均風速 10.9 之隨機風

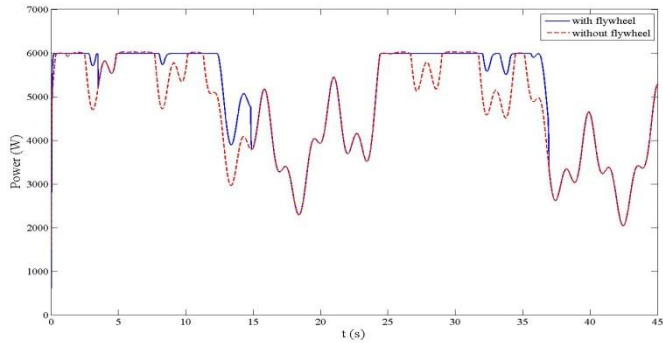


圖 28 平均風速 10.9 之風力發電機輸出比較圖

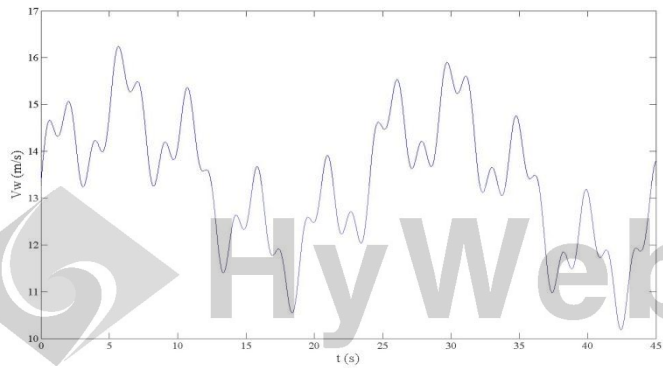


圖 29 平均風速 13.3 之隨機風

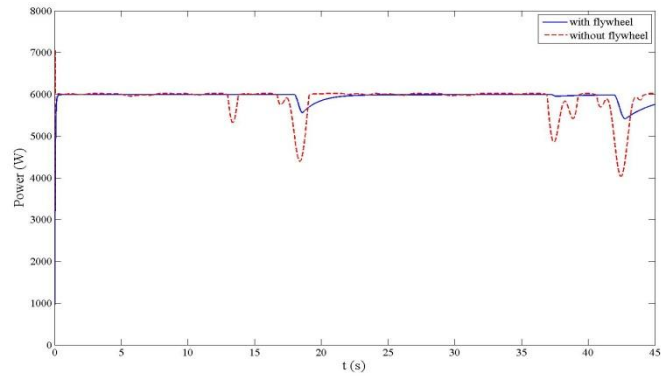


圖 30 平均風速 13.3 之風力發電機輸出比較圖

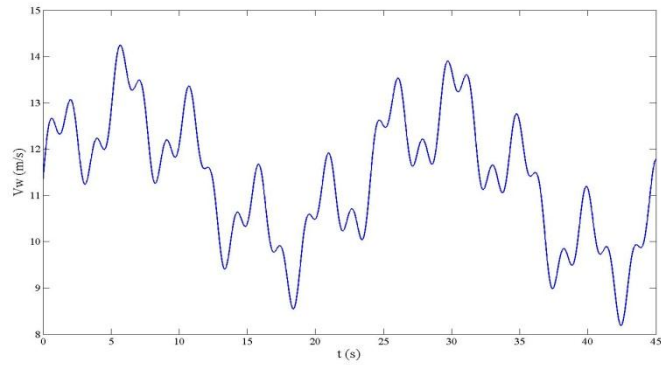


圖 31 平均風速 11.3 之隨機風

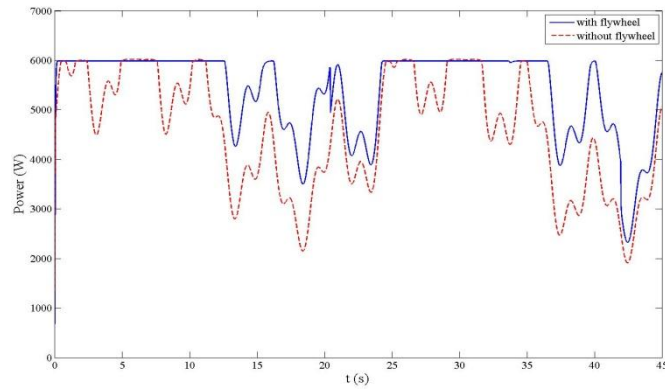


圖 32 平均風速 11.3 之發電機輸出比較圖

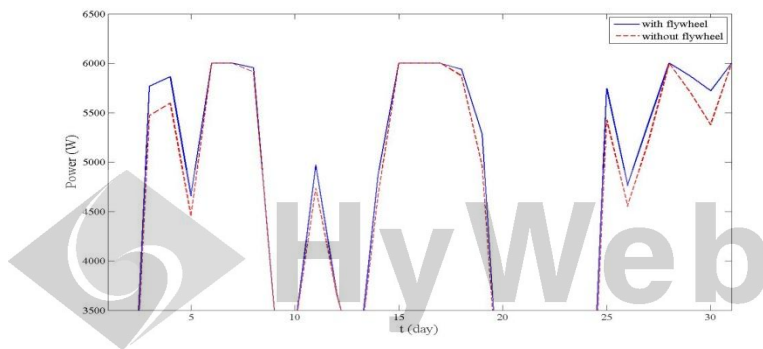


圖 33 東吉島 12 月之日平均功率比較

由圖 25~圖 32 可知，當風力發電機輸出功率大於額定功率 6000W 時，可變慣性飛輪會儲存超過額定功率之能量，使風力發電機之輸出功率限制在額定功率，避免損害發電機；當風力發電機輸出功率低於額定功率 6000W 時，可變慣性飛輪釋放之前儲存的能量，提升風力發電機之輸出功率，以減小輸出功率之變動，使風力發電機之輸出功率較穩定。

由表 3 可知，風力發電機結合可變慣性飛輪可以提高平均輸出功率，當平均風速越接近額定風速 12(m/s)時，平均輸出功率提升越多，當平均風速為 10.5~13(m/s)之內時，平均輸出功率提升 2~8%，當平均風速低於 10.6 時，因為風速高於額定風速 12(m/s)的時間不多，可變慣性飛輪儲存能量不多，所以平均輸出功率只提升不到 3%，當平均風速高於 12.7(m/s)時，因為風速低於額定風速 12(m/s)的時間不多，可變慣性飛輪釋放能量不多，所以平均輸出功率只提升不到 3%。

表 3 有無飛輪之平均功率比較表

日期	風速(m/s)	無飛輪	含飛輪	提高功率
12/3	12.1	5471	5767	296W(5.41%)
12/4	12.4	5595	5823	228W(4.075%)
12/5	10.6	4503	4656	153W(3.4%)
12/8	13.5	5912	5956	44W(0.744%)
12/11	10.9	4737	4972	235W(4.96%)
12/14	10.8	4661	4865	204W(4.377%)
12/18	13.3	5874	5940	30W(0.511%)
12/19	11.2	4957	5285	328W(6.617%)
12/25	12	5426	5745	319W(5.88%)
12/26	10.7	4583	4760	177W(3.86%)
12/27	11.3	5025	5395	370W(7.36%)
12/29	12.7	5709	5871	162W(2.837%)
12/30	11.9	5378	5720	342W(6.36%)

5 結論

本論文主要是研究使用可變慣性飛輪吸收補償能量，以穩定風力發電輸出功率，並利用 MATLAB/SIMULINK 進行模擬分析，最後根據實際風速資料探討含與不含可變慣性飛輪之影響。為穩定飛輪之控制系統，本研究使用 PID 控制器來減少誤差並使用 PSO 來最佳化 PID 控制器，以達到更好的效果，當受到外部干擾影響時，會使原本的控制器性能下降，因此並須及時調整，以適應新的情況，而 PSO 演算的過程中收斂需要花費時間，所以本研究使用 MANFIS 來改進 PSO-PID 控制器，用以適應性的調整參數並加快 PSO 的收斂速度，由於 PSO 的粒子會依據群體最佳解來修正搜尋速度，所以本研究藉由 MANFIS 的輸出值做為初始群體最佳解，用以增加群體最佳解的精確度並加快搜尋最佳解的收斂速度並進行適應性修正，並以 MANFIS 調整之參數為中心，向其左右兩側拓展而成的範圍做為粒子群搜尋範圍，用以縮小搜尋範圍，由實驗結果可知 MANFIS-PS-PID 比 PSO-PID 安定時間減少了 0.354 秒，最大超越量減少了 17.27%，尖峰時間減少了 0.02 秒。

由模擬結果可知，加入可變慣性飛輪系統後，當隨機風速在額定值 12(m/s)上下變動時，風力發電機之平均輸出功率上升了 6.51%，輸出功率之波動也比不含飛輪時要小，且根據實際風速資料，當平均風速在 10~14(m/s)範圍內時，加入可變慣性飛輪可以穩定輸出功率之變動並提高平均輸出功率以增加發電量。

由於風速是隨機變動的，而風力發電機的輸出功率會隨風速波動，因此造成必須長時間蒐集資料以評估風能，所以本研究結合可變慣性飛輪，使風速變動時，可變慣性飛輪吸收超過額定功率之能量以補償低於額定功率之能量，使風力發電機之輸出功率更穩定並且接近額定功率，以改善長時間觀測資料不足所可能造成的誤差，提高風力發電預測的準確度，進而使風場評估更有效且快速。

參考文獻

- [1] Yingcheng X, Nengling T. Review of contribution to frequency control through variable speed wind turbine. *Renewable Energy* 2011; 36(6):1671–1677.
- [2] Erlich I, Wilch M. Primary frequency control by wind turbines. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010 Minneapolis, USA.
- [3] A. Grauers, “Efficiency of Three Wind Energy Generator Systems,” IEEE
- [4] M. El Mokadem , V. Courtecuisse , C. Saudemont , B. Robyns, and J. Deuse, ” Fuzzy Logic Supervisor-Based Primary Frequency Control Experiments of a Variable-Speed Wind Generator”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, Issue 1, pp. 407-417, Feb 2009.
- [5] T. Senjyu, R. Sakamoto, N. Urasaki, T. Funabashi, H. Fujita and H. Sekine, ” Output power leveling of wind turbine Generator for all operating regions by pitch angle control”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, Issue 2, pp.467-475, June 2006.
- [6] Xue-mei Zheng, Dan-mei Ding, Peng Li, ” Power stable regulation of direct-drive permanent magnet wind power system using pitch and torque control”, *International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015)*, Beijing. *Transactions on Energy Conversion*, Vol. 11, No. 3, September 1996, pp.650-657.
- [7] Yousif El-Tous and Al-Balqa, “Pitch Angle Control of Variable Speed Wind Turbine”, *American J. of Engineering and Applied Sciences* 1 (2): 118-120, 2008 ISSN 1941-7020 © 2008 Science Publications.
- [8] Le Hoang Sona, Nguyen Duy Linha, Hoang Viet Longb, ”A lossless DEM compression for fast retrieval method using fuzzy clustering and MANFIS neural network”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 29, pp.33-42, March 2014.
- [9] 楊泰和, “主動驅動或依離心力線性隨動之動態飛輪效應原理及結構”, 台灣專利: 80102715, 1991。
- [10] 李宜達, ”控制系統設計與模擬: 使用” MATLAB/SIMULINK”, 全華科技, 2005.
- [11] Le Hoang Sona, Nguyen Duy Linha, Hoang Viet Longb, ”A lossless DEM compression for fast retrieval method using fuzzy clustering and MANFIS neural network”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 29, pp.33-42, March 2014.
- [12] Omessaad Elbeji, Mouna Ben Hamed, Lassaad Sbita, ”PMSG Wind Energy Conversion System: Modeling and Control”, *International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application*, pp.88-97, 2014, 3.



