

## 風力機控制器設計之研究-以可變速水平風力機為例

楊宏宇 蘇信松

中華科技大學土木防災與管理所

## 摘要

有鑑於世界環保綠色能源的趨勢及未來可能面臨的能源危機，發展再生能源已經是勢在必行的工作。目前台灣的風能產業與歐洲北美等先進國家相距甚遠，加上台灣本身為海島型國家，深具開發風能的潛力，本文擬針對可變速風力發電系統，進行功率追蹤器控制器之設計研究。在不同風速情況下對風力機進行模擬控制，研究結果顯示風力機發電系統所使用的控制器可使風力發電系統輸出功率追蹤得最佳的輸出功率曲線。此外固定槳距型風力機本身具有機構簡單、控制複雜性低及可靠度高等優點，配合可變速控制的發電機，並利用變速控制來使發電機能在額定風速以下能保持最佳功率，可降低設計及控制時的成本並減少經費支出，希望本研究可作為國內在風力發電系統選擇時的考量，在風能推動提供參考。

**關鍵字：**風力機，可變速水平風力機，可調變結構控制，功率追蹤控制器

## 一、前言

風能本身正是一種無污染可再生的綠色能源，因此風力發電也成為備受矚目的一種新興能源取得的方式，風力發電的原理主要是利用風輪機葉片的空氣動力特性產生升力來帶動轉子旋轉，將風能轉換為機械能，透過轉軸的傳遞驅動發電機以將機械能再轉換為電能。近十幾年來，每一年全球風力裝置的數量皆呈現持續的成長，其代表著風力發電成本已具備市場競爭力，而目前台灣的風能產業，只具備小型風力發電機組的製造能力，無法與歐洲北美等先進國家相比，加上台灣本身為海島型國家，深具開發風能的潛力，如何提昇國內風力發電的技術與建構風力發電廠已成為台灣目前的一大課題，本文擬由研究可變速風力發電系統之控制器設

計，希望能為國內的風力發電研究及環保再生能源議題提供參考。

## 二、研究方法

隨著大型風力機慣性的增加，可變槳距型的風力機硬體控制有著因葉片過於巨大而造成響應速度的問題，本研究主要是以可變速固定槳距的水平軸式風力機作為研究的對象，固定槳距型風力機配合可變速控制的發電機具有機構簡單、控制複雜性低及可靠度高等優點，並利用變速控制來使發電機能在額定風速以下能保持最佳功率，而當風速過大使得發電機超過額定功率時也能進行功率控制，而不需要藉由可變槳距的硬體設計及控制來完成，在控制器的設計上則採用可變結構控制來做功率追蹤控制器的設計依據。

## 2.1 風力渦輪機系統模型

風力渦輪機系統主要是包含了風輪機、齒輪箱以及發電機三個部分，其運作原理主要是風輪機藉由葉片旋轉將風能轉換為動能，利用齒輪箱變換轉速來帶動發電機，以將動能再轉換為電能而達成風力發電的目的。本文的研究主要是針對在不同的風速下，利用固定的葉片角度及透過控制發電機的轉速來達到最佳的風力發電，而利用風輪機獲取的氣流動能，可由下列方程式(1)來表示：

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

其中  $\rho$  代表空氣密度； $R$  代表馬達的半徑； $v$  代表的是風速； $C_p$  函數為風輪機的功率係數 (rotor power coefficient)，函數中的變數  $\lambda$  為葉尖速比 (tip-speed ratio)，變數  $\beta$  則為槳距角度 (blade pitch angle)，本文的研究因不考慮改變槳距角度，因此(1.1)可以簡化成式(2)如下：

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda) v^3, \quad (2)$$

而葉尖速比指的是風輪機葉片尖端的速度與風速的比值，可表示成式(3)：

$$\lambda = \frac{R\omega_r}{v}, \quad (3)$$

其中  $\omega_r$  指的是風輪機的轉速。由式(3)我們可以知道一旦風速或風輪機轉速有所改變時，則產生的能量也會因此受到改變，而式(1)中氣流動能的表示也可以由式(4)來定義如下：

$$P_a = \omega_r T_a, \quad (4)$$

其中  $T_a$  代表氣流扭矩，可以式(5)表示：

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_q(\lambda) v^2, \quad (5)$$

其中扭矩係數 (torque coefficient)  $C_q(\lambda)$  與功率係數  $C_p(\lambda)$  的關係可表示如式(6)

$$C_q(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda}. \quad (6)$$

風力渦輪機系統模型[1-2]可以利用圖一來加以表示，其中氣流扭矩  $T_a$  驅動馬達，低速扭矩  $T_b$  對於馬達而言則扮演著煞車的扭矩，同樣地高速扭矩  $T_h$  驅動著發電機，而發電機端的電磁扭矩則扮演發電機煞車的扭矩。透過中間被帶動的齒輪箱，可以將馬達轉速  $\omega$  提高至發電機轉速  $\omega_g$ ，這樣的關係可以藉由式

(7)的齒輪比  $n_g$  來表示：

$$n_g = \frac{\omega_g}{\omega_r} = \frac{T_b}{T_h}. \quad (7)$$

包含風輪機、齒輪箱及發電機的風力渦輪機系統可由動態方程式表示如式(8)：

$$\begin{cases} J_r \dot{\omega}_r = T_a - B_r \omega_r - K_r \theta_r - T_b \\ J_g \dot{\omega}_g = T_h - B_g \omega_g - K_g \theta_g - T_{em} \end{cases} \quad (8)$$

由式(7)及式(8)可以將兩個質量系統整理成為單一質量系統如圖二，並得到式(9)如下：

$$J_i \dot{\omega}_i = T_a - B_i \omega_i - K_i \theta_i - T_g, \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} J_i = J_r + n_g^2 J_g \\ B_i = B_r + n_g^2 B_g \\ K_i = B_r + n_g^2 K_g \\ T_g = n_g T_{em} \end{cases}$$

由於外在彈力係數  $K_i$  數值過小，在本文中忽略此參數的影響，因此可以將式(9)表示成單一質量系統如式(10) [3]：

$$J_i \dot{\omega}_i = T_a - B_i \omega_i - T_g. \quad (10)$$

因此風力渦輪機系統，所產生的電力功率可以表示如下式(11)：

$$P_g = T_g \omega_i. \quad (11)$$

## 2.2 最佳輸出功率曲線

本文是進行固定槳距型風力機的模擬，因此考慮槳距角度  $\beta=0$  的情況，即風輪機功率係數  $C_p$  是利用一個已知函數作計算如式(12) [3]：

$$C_p(\lambda) = c_1 \lambda^3 + c_2 \lambda^2 + c_3 \lambda + c_4. \quad (12)$$

其中係數分別為  $c_1=0.0013$ 、 $c_2=-0.0439$ 、 $c_3=0.4083$  及  $c_4=-0.6703$ ，利用式(12)可以得到風輪機功率係數  $C_p$  與葉尖速比  $\lambda$  的關係曲線如圖二，可以計算出最大功率係數  $C_{p,max}$  為 0.486，相對於最佳葉尖速比  $\lambda_{opt}$  為 6.564，利用下列的式(13)可以在不同風速下，計算出在最佳葉尖速比下的風輪機轉速、發電機的扭矩及最大功率。

$$T_{opt} = \frac{1}{2} \pi \rho R^3 \frac{C_{pmax}(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}} v^2,$$

$$\omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt} v}{R},$$

$$P_{max} = T_{opt} \omega_{opt} = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 C_{pmax}(\lambda_{opt}) v^3.$$

(13)

在不考慮發電機額定功率的情況下，假設風力機半徑  $R=20$  m，風場空氣密度  $\rho=1.21$  kg/m<sup>3</sup>，透過最大功率追蹤(maximum power point tracking, MPPT)定理[4]可以得到在不同風速下的風力機擷取功率與風輪機轉速的關係曲線，透過不同風速曲線的極值可求得最佳功率曲線。

### 2.3 功率控制器設計之研究

為了達成各個風速區段的功率控制，在本研究中使用可變結構控制來做功率追蹤控制器設計，可變結構控制[5]為一種有效且具強健性的非線性系統控制器，在風力發電的控制器上也常被應用[6]，首先考慮風力渦輪機運作時的功率追蹤誤差如式(14)：

$$e_p = P_{ref} - P_g \quad (14)$$

其中風力渦輪機所產生的電力功率  $P_g$  可透過式(11)來計算，將功率追蹤誤差作微分可以得到式(15)：

$$\dot{e}_p = \dot{P}_{ref} - T_g \dot{\omega}_r - \dot{T}_g \omega_r \quad (15)$$

我們假設  $d = \dot{P}_{ref} - T_g \dot{\omega}_r$ ，其中擾動量  $d$  滿足  $|d| < \delta$ ， $\delta$  為一個未知的正實數。此外，選擇的可變結構控制器[7]如式(16)：

$$\dot{T}_g = \frac{(B + \eta) \text{sgn}(e_p)}{\omega_r} \quad (16)$$

$$\dot{B} = |e_p|.$$

其中  $\eta$  為一正實數，接著將控制器代入式(16)的誤差微分方程式中可以得到

$$\dot{e}_p = \dot{P}_{ref} - T_g \dot{\omega}_r - [B(t) + \eta] \text{sgn}(e_p). \quad (17)$$

並將式(15)的假設代入式(17)的誤差微分方程式中可以得到式(18)如下：

$$\dot{e}_p = -[B(t) + \eta] \text{sgn}(e_p) + d. \quad (18)$$

為了證明控制器的功率追蹤誤差收斂性，考慮 Luapunov 函數如下式(19)：

$$V = \frac{1}{2} e_p^2 + \frac{1}{2} (B - \delta)^2. \quad (19)$$

將上式 Luapunov 函數作微分可以得到

$$\dot{V} \leq -\eta |e_p|. \quad (20)$$

由 LaSalle 定理[8]可以知道，功率追蹤誤差會漸進收斂至零。

### 三、模擬結果分析與討論

在本研究中進行模擬的風力機，其啟動風速設定為 3 m/s，安全停機風速為 24 m/s，風輪機的額定轉速設定為 12 rev/min，而發電機的額定功率設定在 5 MW，其中風輪機的半徑  $R=60$  m，風力機本身採固定槳距型風力機( $\beta=0$ )，風輪機功率係數則利用式(12)作為計算參考，設定最佳葉尖速比  $\lambda_{opt}=6.564$  及對應最大輸出功率係數  $C_{pmax}=0.484$ ，模擬的取樣時間為 0.001s，風場之空氣密度：1.21 kg/m<sup>3</sup>，取樣時間為 0.1 s；而風力渦輪機的慣量係數 ( $J$ ) 與黏滯係數 ( $B_f$ ) 則分別為 500000 kg·m<sup>2</sup> 與 0.1 Nm·s/rad。

在本研究中分別針對三種不同風速區段進行模擬，三種風速分別定義如下：

$$\begin{cases} v_1 = 10, \\ v_2 = 8 - 0.5 \sin(5t) + \cos(3t), \\ v_3 = 12 - 0.5 \sin(5t) + \cos(3t). \end{cases}$$

針對模擬定速風速  $v_1$  如圖 3(a) 時，當系統加入可變結構控制器後，風輪機轉速變化如圖 3(b)，而由圖 4(a) 可以觀察到葉尖速比  $\lambda$  會收斂至最佳葉尖速比  $\lambda_{opt}=6.564$ ，圖 4(b) 則可以觀察到功率係數  $C_p$  亦會收斂至最大輸出功率係數  $C_{pmax}=0.484$ ，圖 5(a) 中虛線代表在此風速下的理想輸出功率  $P_{ref}$ ，而實線代表實際功率的變化，圖 5(b) 則可觀察理想輸出功率與實際輸出功率間的誤差變化。圖 6(a) 中的實線為在風速  $v_2$  時，對風速觀察週期為 0.1s 時所得到的風速曲線，而需線則代表風速  $v_2$  的實際變化，圖 6(b) 為系統加入控制後風輪機的轉速變化，由圖 7 可分別觀察到葉尖速比  $\lambda$  及功率係數  $C_p$  的變化，可以知道在取樣風速  $v_2$  的變化下，葉尖速比  $\lambda$  及功率係數  $C_p$  仍會保持在最佳葉尖比及最大輸出功率，而由圖 8 則可以看到風力機輸出功率以及參考功率的變化，其中輸出功率會追蹤參

考功率  $P_{ref}$  的變化。風速  $v_3$  相較於風速  $v_2$  為較大的風速，在此風速下控制後的風輪機轉速變化可由圖 9 所示。

### 四、結論與建議

本文中針對可變速風力發電系統，進行功率追蹤器控制器之設計研究，在不同風速情況下對風力機進行模擬控制，其模擬結果與分析可以映證研究中所使用的控制器可使風力發電系統輸出功率追蹤最佳的輸出功率曲線。此外固定槳距型的風力機本身具有機構簡單、控制複雜性低及可靠度高等優點，配合可變速控制的發電機，並利用變速控制來使發電機能在額定風速以下能保持最佳功率，即使風速過大而使發電機超過額定功率時，控制器仍可藉由控制馬達扭矩來保持額定功率輸出，而不需要藉由可變槳距的硬體設計及控制來完成，不但可降低設計及控制時的成本並減少經費支出，希望本研究可作為國內在風力發電系統選擇時的考量

研究發現台灣目前在風力發電的相關設置技術與經驗仍是相當薄弱的，尤其是離岸風力發電裝置，本文期能以接近實際大型風力系統的資料建構，以求模擬結果的正確性，並考量在真實情況下的各種控制問題。

### 五、參考文獻

- B. Boukhezzar, L. Lupu, H. Siguerdidjane, and M. Hand, "Multivariable control strategy for variable speed variable pitch wind turbine," *Renew. Energy*, vol. 32, no. 8, pp. 1273-1287, 2007.
- Y. D. Song, B. Dhinakaran, and X. Y. Bao, "Variable speed control of wind turbines using nonlinear and adaptive algorithm," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 85, pp. 293-308, 2000.
- E. B. Muhando, T. Senjyu, N. Urasaki, A. Yona, H. Kinjo, and T. Funabashi,
- H. Camblong, I. M. D. Alegria, M. Rodriguez, and G. Abad, "Experimental evaluation of wind turbines maximum power point tracking controllers," *Energy Convers. Manage.*, vol. 47, no. 18-19, pp. 2846-2858, 2006.
- K. D. Young, V. I. Utkin, and O. Ozguner, "A control engineer's guide to sliding mode control," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 328-342, 1999.
- H. de Battista and R. J. Mantz, "Dynamical variable structure controller for power regulation of wind energy conversion systems," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no. 4, pp. 756-763, 2004.
- D. S. Yoo and M. J. Chung, "A variable structure control with simple adaptation laws for upper bounds on the norm of the uncertainties," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 37, no. 6, pp. 860-865, 1992.
- H. de Battista and R. J. Mantz, "Dynamical variable structure controller for power regulation of wind energy conversion systems," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no. 4, pp. 756-763, 2004.

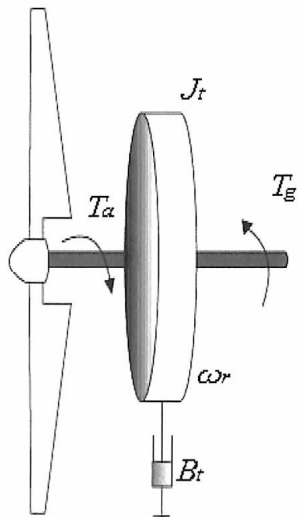


圖 1. 單一質量風力渦輪機之系統模型

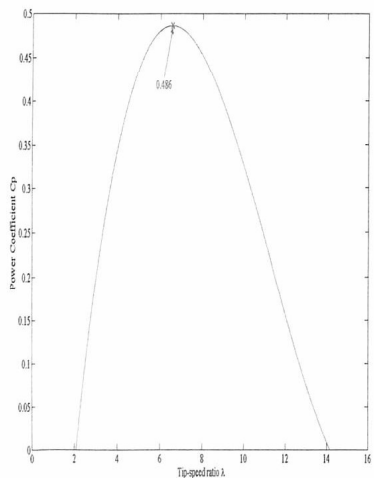


圖 2. 風輪機功率係數與葉尖速比關係曲線

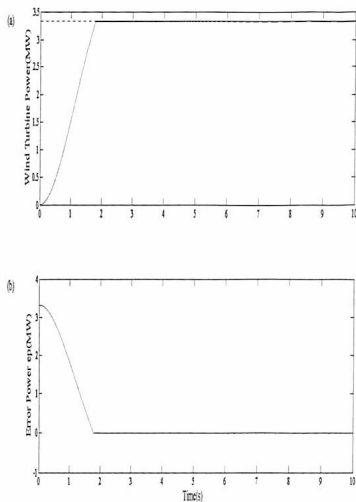


圖 3. (a)風力機參考功率(虛線)及輸出功率曲線(實線)；(b)誤差功率曲線

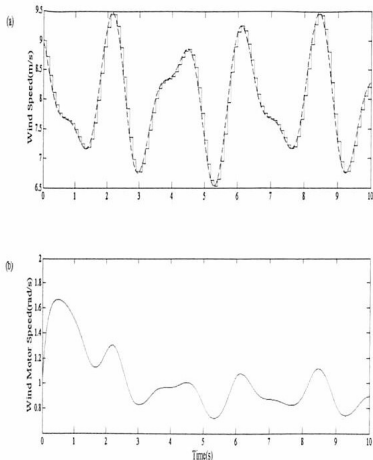


圖 4. (a)風速曲線(虛線)與取樣風速曲線(實線)；(b)風輪機轉速曲線

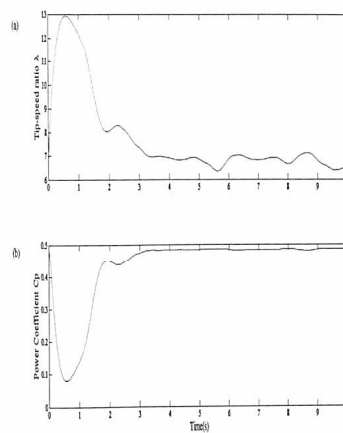


圖 5. (a)葉尖速比  $\lambda$  曲線；(b)功率係數  $C_p$  曲線

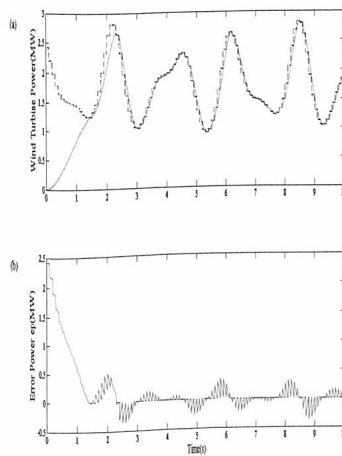


圖 6. (a)風力機參考功率(虛線)及輸出功率曲線(實線)；(b)誤差功率曲線

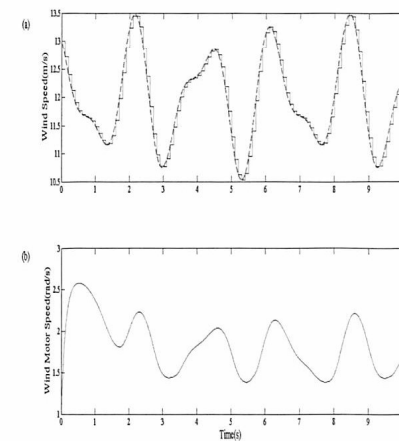


圖 7. (a)風速曲線(虛線)與取樣風速曲線(實線)；(b)風輪機轉速曲線

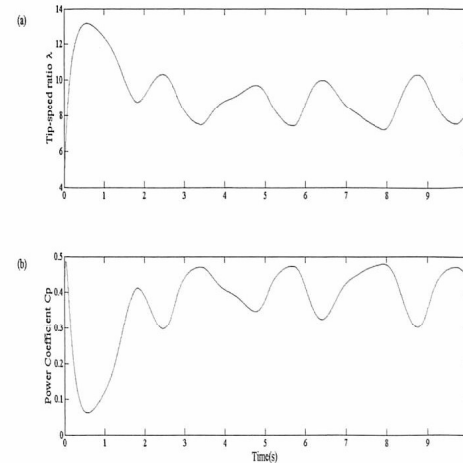


圖 8. (a)葉尖速比  $\lambda$  曲線；(b)功率係數  $C_p$  曲線

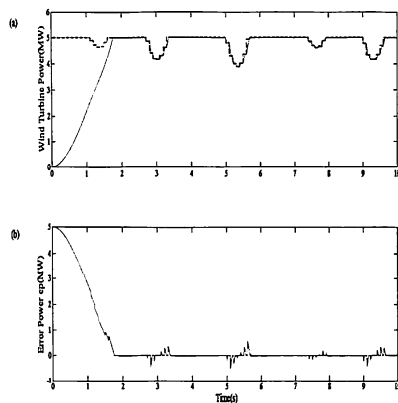


圖 9. (a)風力機參考功率(虛線)及輸出功率曲線(實線)；(b)誤差功率曲線

## The Study in the Controller Design of Wind Turbines- As Variable Speed Horizontal Wind Turbine For example

Hong-Yu Yang Hsin-Sung Su

Master Section of Civil Disaster Prevention and Management, China University of Science and Technology.

### ABSTRACT

Due to the world tendency toward green energy and the upcoming energy crisis, the wind power generation is the present one kind of the energy industries which grows fast. The wind power generation related research development is also receiving greater attention day by day. Because in the traditional windmill foundation with the modern science and technology, the wind power generation benefit and the performance all largely promotes. Since Taiwan is an island country, the wind energy of Taiwan has high development potentials. However, the present wind energy industry in Taiwan is far behind those developed countries, such as Europe and North America. In Taiwan, besides the tower and the concretes base, the entire wind power unit of the majority installed the MW level anemometer is imported. The key production and critical technology are grasped are paying great attention the environmental consciousness the European and American advanced countries. So how to improve the internal power supply system is an immediate subject.

At this moment, most of the wind power development is the variable pitch, variable speed wind turbine. The purpose of that is to collect the maximum wind power. However, with the growing large MW, also the blade is growing bigger and the blade inertia is increasing. It may result responses problem in controlling blades of the variable pitch wind turbine. Therefore, this research is focus on the fixed pitch, variable speed, and horizontal wind turbine. Since the fixed pitch wind turbine contains the advantages that simple construction, low control complexity and high reliability, we use the variable speed control to obtain the optimal power under normal rated speed. Even if the strong wind causes the generator under exceeding rated power, the designed controller can keep the normal rated power output by controlling the motor torque, without the hardware design and the control of the variable pitch. It can reduce the cost of design and control and expenditure.

The power tracking controller used in this research is designed by the variable structure control. Since the off-shore wind power generator is the future trend, the parameters of the simulation are according to the current off-shore wind power generator to certify the controller efficiencies. The off-shore wind power generator whose normal rated power is given 5MW, the radius of blades is given 60m, and the rated speed of the wind turbine is given 12rev/min. It shows the positive result that the power tracking controller is useful. This research may provide some references and considerations for future wind power supply development.

**Keyword :** wind turbine , variable speed horizontal wind turbine, variable structure control, power tracking controller