

# 基於葉素動量理論之水平軸風力發電機葉片設計

## Blade Design Method for a Horizontal Axial Wind Turbine Based on Blade Element Momentum Theory

王晟桓 陳世雄  
Sheng-Huan Wang Shih-Hsiung Chen  
國立成功大學航空太空工程學系  
台灣 台南市  
Department of Aeronautics and Astronautics  
National Cheng Kung University  
Tainan, Taiwan

### 摘要

本研究的主要目的在於建立水平軸風力發電機葉片設計程序，以葉素動量理論為基礎，同時考量葉尖損失及阻力的影響，研究中設計程式採用Fortran程式語言撰寫，並以Grumman Wind Stream 33水平軸風力發電機的葉片為物理模型來驗證設計程式的適用性。

研究結果顯示在額定的工作狀態考量葉尖損失及阻力影響的葉片設計會有較高的功率係數，以Glauert法及Wilson法設計的葉片功率係數次之，而原始參考的葉片功率係數較低。另外研究中進一步探討近葉片根部弦長分佈線性化對風力發電機性能的影響，雖然簡化近葉根的弦長分佈會造成葉輪的功率係數些微降低，但相對提升了葉片製造的便利性。

關鍵詞：葉素動量理論、葉片設計、水平軸風力發電機

### Abstract

The purpose of this research is to establish the method of horizontal axial wind turbine (HAWT) blade design. It is based on the blade element momentum theory (BEM). The effect of tip-loss and blade drag is also considered. The blade design method is programmed by Fortran language and its applicability is verified by comparing with the Grumman Wind Stream 33 horizontal axial wind turbine.

The results show that under rated condition the power coefficients of rotor designed by this blade design method is highest comparing with those designed by the Glauert method and Wilson method. The power coefficient of the original Grumman Wind Stream turbine blade is lowest between them. Furthermore, the influence of the linear chord distribution on the performance was also investigated. Although linear chord distribution lowered the power coefficient slightly, it simplified the procedure of turbine blade production.

Keywords: blade element momentum theory, blade design, HAWT

### I. 前言

風力發電機葉片設計的好壞會直接影響葉片的空氣動力性能，並反應在擷取風能轉換成機械能的效率上，一般而言，設計不良的葉片除功率係數較低外，可能會造成作用於葉片表面的風荷載過大及不穩定變化，因此最佳化的葉片設計是非常重要的。

目前廣泛應用於風力發電機葉片設計的方法多數是以葉素動量理論為基礎發展而成。Glauert [1] 考量葉輪後方尾流旋轉的葉素動量理論，即同時考量軸向和切向誘導係數，由於葉片翼型阻力與葉尖損失對外型設計的影響較小，因此忽略不計。Wilson [2] 在 Glauert 法的基礎上進一步考量升阻比和葉尖損失對葉片最佳性能的影響，並且研究葉輪在非額定工作狀態下的性能。Hansen [3] 建議可採用不考量阻力影響 Glauert 法的軸向和切向誘導係數關係式及包含阻力係數的最佳弦長分佈，來簡化計算的複雜度。Burton et al. [4] 考量尾流旋轉對軸向力的影響，因此軸向誘導係數的關係式中含有切向力係數的二次項，另外對葉尖損失進行修正，若誘導係數為平均值則須修正葉素項，誘導係數為最大值則須修正動量項。

回顧過去關於葉片設計的理論多忽略阻力的影響，故本研究將建立水平軸風力發電機葉片設計程序，以葉素動量理論為基礎，同時考量葉尖損失及阻力的影響，設計程式僅需讀入二維翼型的空氣動力參數，於交談視窗輸入額定的工作狀態、葉輪的幾何參數和葉片截面翼型的設計攻角，並於程式執行後輸出葉片的幾何參數。研究中與 Glauert 法、Wilson 法及原始參考葉片的性能曲線進行比較來驗證設計程序的適用性，另外文中進一步探討近葉根弦長分佈線性化對風力發電機性能的影響。

### II. 物理模型

美國國家再生能源實驗室(NREL) Hand et al. [5] 於 2000 年在 NASA Ames 120×80 ft 風洞中進行世界上最大的全尺寸水平軸風力發電機風洞實驗，實驗中採用 Phase VI 二葉片風力葉輪，葉片的幾何參數如圖 1 所示，Giguere and Selig [6] 提及其葉片最初是 NREL 為聯合實驗轉子(CER)所設計的直徑 10.058m (33ft) 三葉片的葉輪，葉輪被安裝於 Grumman Wind Stream 33 水平軸風力發電機，該風力發電機為額定功率 20kW 下風式配置，並藉由變矩控制轉速操作在 72 rpm。

本研究採用與 NREL Phase VI 相同的葉輪直徑、葉片的截面翼型 S809 及設計點葉尖速度比，葉片數設定為 3 片以符合 CER 原先的設計，設計攻角取 6.4 度以對應最大的升阻比，分別以 Glauert 法、Wilson 法以及考量阻力影響的水平軸風力發電機葉片設計程序進行最佳化設計。

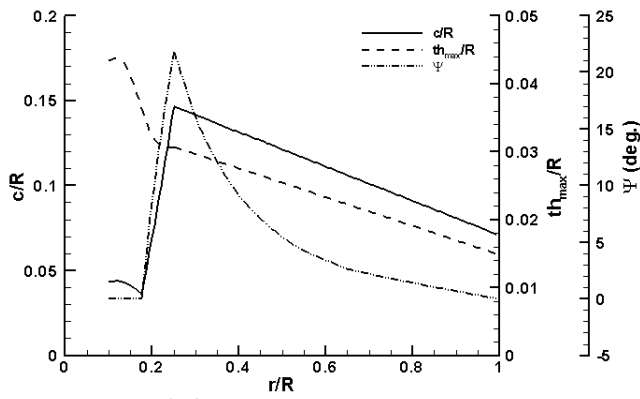


圖 1：原始參考葉片的弦長、最大厚度和扭角分佈

### III. 葉素動量理論

葉素動量理論的詳細推導已有大量文獻可供參考，故本文省去繁複的推導過程，只針對設計程序所需的方程式給予簡略敘述。

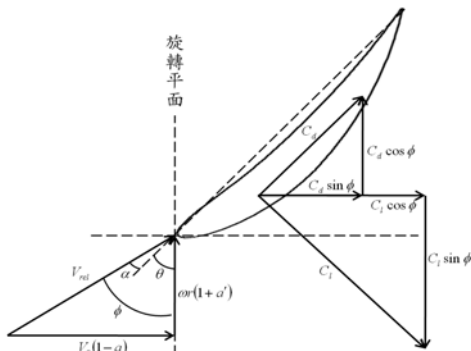


圖 2：葉輪徑向位置  $r$  處的葉片截面

圖 2 為葉輪徑向位置  $r$  處葉片截面的速度三角分析，流向角可由軸向速度與切向速度的比值求得

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{(1-a)V_0}{(1+a')\omega r} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{(1-a)}{(1+a')\lambda} \right) \quad (1)$$

其中  $V_0$  為風機前方遠流場處的風速， $\omega$  為旋轉角速度， $\lambda$  為在徑向位置  $r$  處的速度比，而  $a$  和  $a'$  分別為軸向及切向誘導係數。再經由流向角及設計攻角求得槳矩角，其定義為弦線與葉輪旋轉平面的夾角

$$\theta = \phi - \alpha \quad (2)$$

圖中將二維翼型的升力係數  $C_l$  及阻力係數  $C_d$  分解為軸向及切向，分別表示為無因次化的軸向力係數  $C_n$  及切向力係數  $C_t$

$$C_n = C_l \cos \phi + C_d \sin \phi \quad (3)$$

$$C_t = C_l \sin \phi - C_d \cos \phi \quad (4)$$

因此作用於葉片數  $N_B$  的葉輪局部軸向力及扭矩為

$$dT = \left( \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 C_n \right) N_B dr \quad (5)$$

$$dM = \left( \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 C_t \right) r N_B dr \quad (6)$$

另外由控制體積的動量分析求得作用於葉輪局部的軸向力及扭矩

$$dT = 4\pi r \rho V_0^2 a(1-a) dr \quad (7)$$

$$dM = 4\pi r^3 \rho V_0 \omega (1-a) a' dr \quad (8)$$

聯立方程式(5)和(7)，可得軸向誘導係數

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma C_n} + 1} \quad (9)$$

聯立方程式(6)和(8)，可得切向誘導係數

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_t} - 1} \quad (10)$$

其中稠度  $\sigma$  定義為

$$\sigma = \frac{c N_B}{2\pi r} \quad (11)$$

### IV. 葉片設計法

#### Glauert 法

風力發電機葉片的最佳化設計即是將功率係數  $C_p$  最大化，依據葉素動量理論，不考量葉尖損失的功率係數可由(12)積分式求得

$$C_p = \frac{8}{\lambda_{Tip}^2} \int_{\lambda_{Root}}^{\lambda_{Tip}} (1-a) a' \lambda^3 d\lambda \quad (12)$$

其中  $\lambda_{Tip}$  為葉尖速度比，而  $\lambda_{Root}$  為葉根速度比。

為最佳化軸功率輸出，需要對方程式(12)中的  $(1-a)a'$  求最大值，式中存在  $a$  與  $a'$  兩個變數，因此還需要找到一條  $a$  與  $a'$  兩個變數之間的關係式，Glauert 假設  $C_d = 0$ ，推導出  $\lambda$ 、 $a$  與  $a'$  的關係式

$$\lambda^2 a'(1+a) = a(1-a) \quad (13)$$

$a$  與  $a'$  的最佳化關係式

$$a' = \frac{1-3a}{4a-1} \quad (14)$$

這樣對於每一個  $\lambda$  值，可用方程式(13)及(14)求得最佳化對應的  $a$  與  $a'$  如圖 3 所示，從圖中可看出隨著轉速增加即  $\lambda$  增加時， $a$  趨近於 1/3 且  $a'$  趨近於 0，這與理想水平軸風力發電機的一維動量理論一致。依圖 3 的結果對方程式(12)進行積分可得到最佳功率係數  $C_p$ ，此即為 Glauert 對 Betz Limit 修正的結果，圖 4 顯示考量葉輪後方尾流旋轉的 Glauert 最佳功率係數與理想風力發電機 Betz Limit 之間的差異，圖中可看出當  $\lambda_{Tip}$  大於 6 時，由於旋轉導致的損失較小，故其間的差異隨之減小。另外最佳弦長分佈可由方程式(15)代入各半徑  $r$  處之最佳化  $a$  值求得

$$c = \frac{8\pi r a \sin^2 \phi}{N_B C_l (1-a) \cos \phi} \quad (15)$$

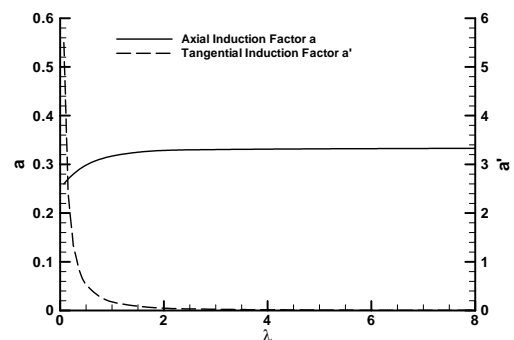


圖 3：最佳化  $C_p$ ， $\lambda$ 、 $a$  與  $a'$  之間的關係

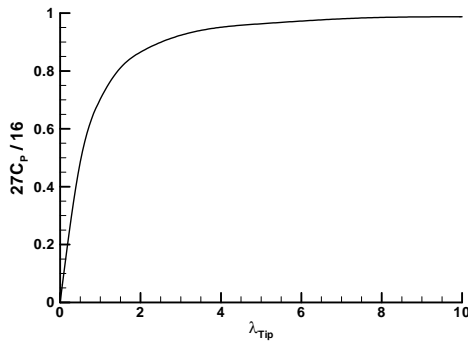


圖 4：Glauert 最佳功率係數與 Betz Limit 之比較

#### Wilson 法

Wilson 考量葉片翼型升阻比對軸向及切向誘導係數影響較小，因此在設計階段忽略阻力的影響，但在空氣動力分析時則須考慮阻力的影響。另外對於葉尖損失進行修正，並且進一步考量葉尖損失亦會影響葉片前的軸向速度，因此功率係數修正為

$$C_p = \frac{8}{\lambda_{Tip}^2} \int_{\lambda_{Root}}^{\lambda_{Tip}} (1-a)a'F\lambda^3 d\lambda \quad (16)$$

其中  $F$  為普朗特葉尖損失因子

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( e^{-\frac{N_B(R-r)}{2r \sin \phi}} \right) \quad (17)$$

$\lambda$ 、 $a$  與  $a'$  的關係式

$$\lambda^2 a'(1+a) = a(1-aF) \quad (18)$$

在滿足方程式(18)的條件下，可用迭代法計算每一個  $\lambda$  值所對應的  $a$  與  $a'$ ，使  $\frac{dC_p}{d\lambda}$  達到最大。另外最佳弦長分佈可由方程式(19)代入各半徑  $r$  處之最佳化  $a$  值及  $F$  求得

$$c = \frac{8\pi(1-aF)aF \sin^2 \phi}{N_B C_l (1-a)^2 \cos \phi} \quad (19)$$

阻力對最佳化葉片設計的影響

本研究考量阻力及葉尖損失的影響，但忽略葉尖損失對葉片前方軸向速度的影響，則方程式(9)和(10)分別修正如下

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma C_n}{4F \sin^2 \phi} \quad (20)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{\sigma C_l}{4F \sin \phi \cos \phi} \quad (21)$$

聯立方程式(20)和(21)可得  $a$  與  $a'$  的關係式

$$a' = \frac{1}{\left(\frac{1-a}{a}\right) \frac{C_n \cos \phi}{C_l} - 1} \quad (22)$$

從方程式(22)  $a$  與  $a'$  的關係式中尚有另一變數  $\phi$ ，故將方程式(1)、(3)和(4)代入(22)可進一步求得  $\lambda$ 、 $a$  與  $a'$  的關係式(23)，若式中的  $C_d$  為 0，則方程式改寫後與方程式(13)一致。另外從方程式(23)可看出實際上阻力的影響已隱含在  $a$  與  $a'$  之中，因此功率係數可由方程式(16)求得。而要達到最大功率係數的葉片最佳化設計，則同 Wilson 法，在限制條件方程式(23)及(17)下，以方程式(16)

為目標函數求取每一個  $\lambda$  值的  $\frac{dC_p}{d\lambda}$  最大值。

$$a' = \frac{1}{\left(\frac{1-a}{a}\right) \left(\frac{(1+a')\lambda}{(1-a)} + \frac{C_d}{C_l}\right) \left(\frac{(1+a')\lambda}{(1-a) - \frac{C_d}{C_l}(1+a')\lambda}\right) - 1} \quad (23)$$

另外最佳弦長分佈可由方程式(24)代入各半徑  $r$  處之最佳化  $a$  值及  $F$  求得

$$c = \frac{8\pi r a F \sin^2 \phi}{N_B C_n (1-a)} \quad (24)$$

#### V. 葉片設計程序

在進行風力發電機葉片設計前，我們必須先訂定風力發電機的規格，其包含額定風速、額定功率、葉輪直徑以及額定轉速。

##### 額定風速

額定風速取決於使用風力發電機地區的風能資源分佈，主要考量平均風速的大小和風速的頻率，在全年獲得最大能量的原則下確定額定風速  $V_{rated}$ 。一般而言，風能資源較豐富的地區，宜採較高的額定風速進行葉片設計。

##### 額定功率

額定功率  $P_{rated}$  取決於使用端的電力需求，小型風力發電機主要考量使用端日平均用電量和負載特性，而大型併網風力發電機則需考量尖峰負載和電網特性等。

##### 葉輪直徑

葉輪直徑可藉由下列的公式進行估算

$$D_B = \sqrt{\frac{8P_{rated}}{\pi \rho V_{rated}^3 C_p \eta_G \eta_T}} \quad (25)$$

其中  $\eta_G$  為發電機效率， $\eta_T$  為傳動效率。而  $C_p$  一般取約 0.45~0.55，若選取的過大可能會造成設計的風力發電機實際輸出功率低於額定功率。

##### 額定轉速

額定轉速  $\omega_{rated}$  可藉由風力發電機的類型、葉輪直徑和發電機傳動系統的參數來確定。另外藉由額定功率、額定轉速和葉輪直徑可以表示葉尖速度比  $\lambda_{Tip}$ ，其為風力發電機主要的性能參數之一，如圖 4 顯示在風力發電機未過速的條件下，運轉於高的葉尖速比狀態下的風力發電機具有較高的功率係數，但也會產生較高的噪音。

##### 葉片截面的翼型

翼型的選取影響風力發電機的效率。一般而言，風力發電機葉片截面選用升阻比較高的翼型，可以獲得較高的功率係數，若考量風力發電機長時間於戶外運轉，為因應多變的環境，宜選用空氣動力特性較不易受表面粗糙度影響的翼型，Abbott et al. [7] 整理一系列的 NACA Airfoil 的風洞測試數據，Tangler and Somers [8] 針對水平直風力發電機 1 至 25 公尺長的葉片，提供適用的翼型，

Timmer and van Rooij [9]對5種Delft University設計的風力發電機葉片翼型進行風洞實驗，結果顯示這些翼型的空氣動力特性不易受表面粗糙度影響，另外在距前緣20%處安裝渦流產生器可延後失速，並將最大升力係數提高30%，在尾緣安裝Gurney flaps亦可有效提高最大升力係數，Bertagnolio et al. [10]以數值方法EllipSys2D計算Airfoil的空氣動力參數並與XFOIL數值計算的結果和實驗數據進行比較，對於某些翼型的計算結果準確度優於XFOIL。另外考量葉片的結構強度，靠近根部可採用厚度較大的翼型。

### 葉片截面翼型的攻角

考量流體的黏性，則不可忽略翼型的阻力，因此為了獲得最佳的功率輸出，葉片截面翼型的設計攻角應該選最大升阻比所對應的攻角，再由攻角 $\alpha$ 決定對應的升力係數 $C_l$ 與阻力係數 $C_d$ 。另外為了簡化設計步驟，通常忽略了雷諾數對翼型空氣動力參數的影響，圖5和圖6為Reuss et al. [11]於風洞實驗中量測S809 Airfoil在不同雷諾數 $Re$ 下的升力係數及阻力係數，圖中顯示出在設計攻角附近雷諾數的影響不大。

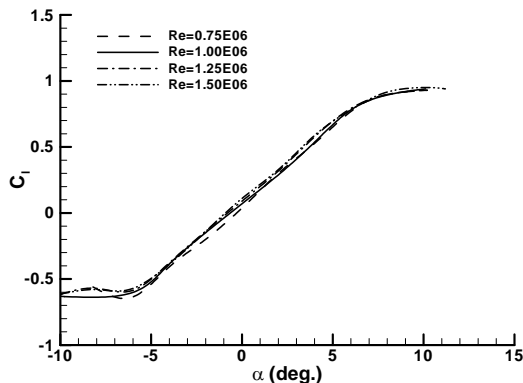


圖 5：不同雷諾數下的 S809 翼型  $C_l - \alpha$  曲線

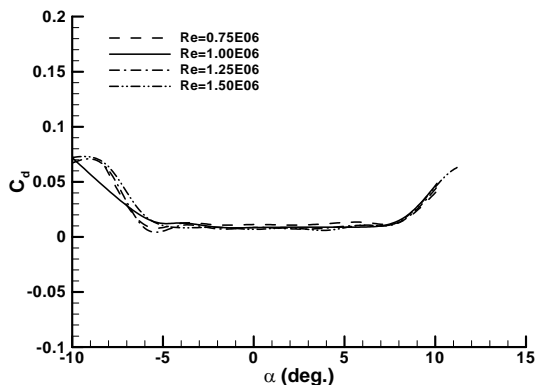


圖 6：不同雷諾數下的 S809 翼型  $C_d - \alpha$  曲線

### 葉片數

風力發電機的葉片數愈多可降低葉尖損失，而有較高的功率輸出，但若考量製作成本，則過多的葉片數會增加製作的成本及安裝的複雜度，故一般而言風力發電機多設計為運轉及輸出功率較平穩的三葉片。

本研究分別以 Glauert 法、Wilson 法及考量阻力影響的水平軸風力發電機葉片設計程序，並以 Fortran 程式

語言進行風力發電機葉片設計程式的撰寫。考量阻力影響的法葉片設計程序敘述如下，而其他方法僅需修改目標函數及限制條件方程式，迭代的過程並無太大的差異：

- 輸入風力發電機的規格：額定風速  $V_{rated}$ 、額定功率  $P_{rated}$ ，葉尖速度比  $\lambda_{Tip}$ 。
- 輸入風力機的幾何參數：葉輪直徑  $D_B$ 、輪轂直徑  $D_{Hub}$  及葉片數  $N_B$ 。
- 將葉片根部  $r_{Root}$  到葉片尖端  $r_{Tip}$  分成  $n$  個截面。
- 選擇各截面使用的翼型，並決定設計攻角  $\alpha$ 。
- 讀入各截面翼型近額定點雷諾數的空氣動力參數，即不同攻角所對應的升力係數  $C_l$  及阻力係數  $C_d$ 。
- 計算  $r_i$  截面處的局部速度比  $\lambda$ 。
- 假設軸向誘導因子  $a$  及切向誘導因子  $a'$  起始值。
- 以方程式(1)及(17)計算葉尖損失因子  $F$ 。
- 將  $F$  代入方程式(23)重新計算切向誘導因子  $a'$ 。
- 直到切向誘導因子  $a'$  的變化收斂到某一容許誤差，否則重複程序(h)~(i)。
- 改變軸向速度誘導因子  $a$  的假設值，重複程序(g)~(j)。
- 以  $a$ 、 $a'$  及  $F$  的各組數對代入方程式(16)，找到使  $dC_p$  最大的最佳組合。
- 使用方程式(1)計算流向角  $\phi$ ，並以方程式(2)求得  $r_i$  截面處的槳矩角  $\theta$ 。
- 使用方程式(24)計算出  $r_i$  截面處的弦長  $c$ 。
- 重複程序(f)~(n)，計算各截面處的最槳矩角  $\theta$  及弦長  $c$ 。
- 堆疊各截面的翼型，並繪製三維的幾何外型。

## VI. 結果與討論

葉片設計程式的交談視窗如圖7所示，使用者需輸入風力發電機葉輪的額定工作狀態及幾何參數，其中包含額定風速、額定轉速、葉輪直徑、輪轂直徑、設計攻角和堆疊葉片所需的截面數，並讀入葉片各截面二維翼型的空氣動力參數。



圖 7：葉片設計程式的交談視窗

從圖8沿徑向葉片弦長分佈顯示最佳化的弦長分佈在靠近葉根處較原始參考的葉片大，其原因為原始參考的葉片外型考量風力發電機75%的功率輸出來自於近葉尖處，故將弦長修正為線性分佈以降低製作及加工成

本，而靠近葉尖處以 Wilson 法最佳化設計的弦長較原始設計小，其原因為 Wilson 法有考量葉尖損失的影響。圖 9 葉片扭角分佈，原始參考的葉片將扭角設定在 75% 葉展為 0 度，故不同設計法的葉片扭角分佈，需藉由葉片槳矩角分佈(圖 10)求得，考量葉尖損失影響的最佳化設計結果顯示靠近葉根及葉尖處的扭角與原始參考的葉片有較明顯的差異。

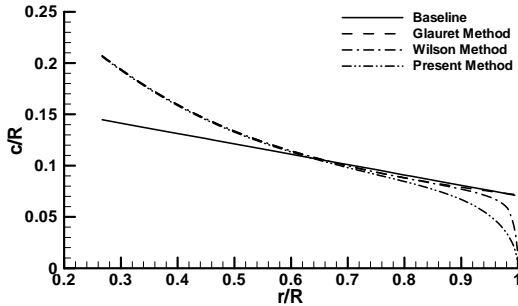


圖 8：沿徑向葉片弦長分佈

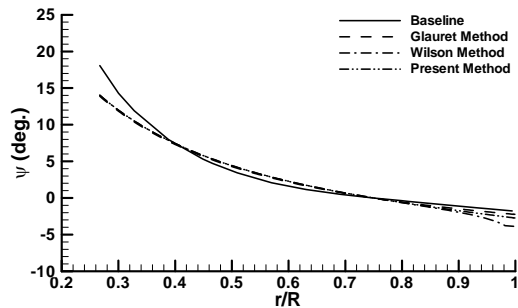


圖 9：沿徑向葉片扭角分佈( $\psi = 0 \text{ deg.}$  在  $r/R = 0.75$ )

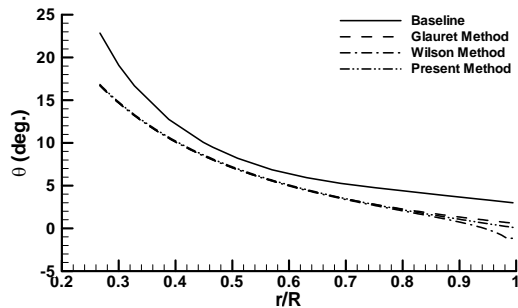


圖 10：沿徑向葉片槳矩角分佈

CER 原先的設計為變矩控制的水平軸風力發電機，故只提供葉片扭角分佈，並未給出操作在設計點葉尖速度比的葉尖槳矩角，因此研究中以 BEM 含葉尖損失因子的空氣動力分析程式，分別對 0、1、3、5 及 7 度葉尖槳矩角進行計算，而 Glauret 法設計的葉片則以設計的葉尖槳矩角 0.62 度取代 0 度的計算，Wilson 法設計的葉片則以設計的葉尖槳矩角 -1.16 度取代 0 度的計算，考量阻力影響設計的葉片則以設計的葉尖槳矩角 0.12 度取代 0 度的計算。圖 11 為原始參考的葉片，在不同葉尖槳矩角下葉尖速度比與功率係數的關係，圖中顯示當葉尖槳矩角為 1 度時在設計點附近有最大的功率係數，隨著葉尖槳矩角的增加最大功率係數隨之降低且其所對應的葉尖速度比也隨之下降，變矩控制即是利用這樣的結果，在低於額定風速時控制最大功率係數與發電機性能曲線匹配，獲得最大的功率輸出，在高於額定

風速時可藉此降低輸出功率避免發電機過速運轉。圖 12~圖 14 分別為不同的葉片設計法在不同葉尖槳矩角下葉尖速度比與功率係數的關係，於設計的葉尖槳矩角下皆有最大的功率係數，Wilson 法設計的葉尖槳矩角為負值，其主要的原因為近葉尖流向角小於設計攻角的 6.4 度，在一般的設計中會控制葉尖槳矩角為正值。圖 15 以不同的葉片設計法，在設計的葉尖槳矩角下葉尖速度比與功率係數的關係，圖中顯示考量阻力影響設計的葉片有最大功率係數，而其以其他方法設計的葉片也有不錯的功率係數。

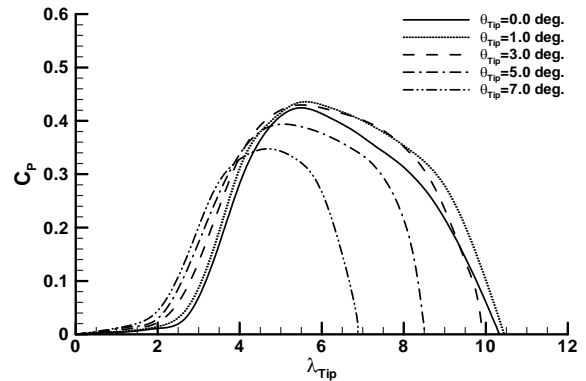


圖 11：原始參考的葉片，在不同葉尖槳矩角下葉尖速度比與功率係數的關係

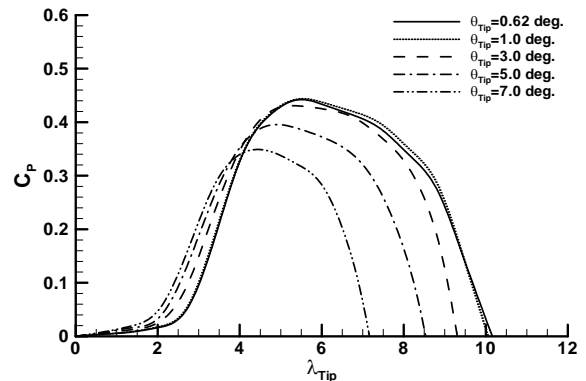


圖 12：以 Glauret 法設計，在不同葉尖槳矩角下葉尖速度比與功率係數的關係

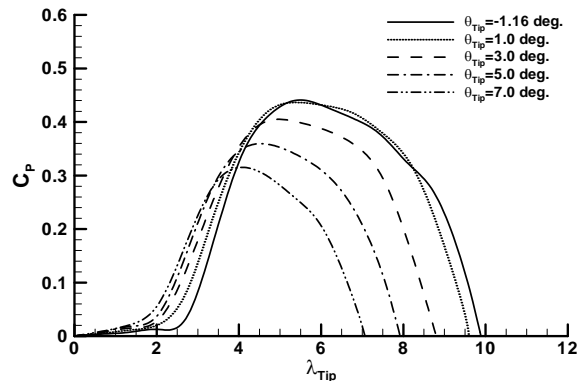


圖 13：以 Wilson 法設計，在不同葉尖槳矩角下葉尖速度比與功率係數的關係

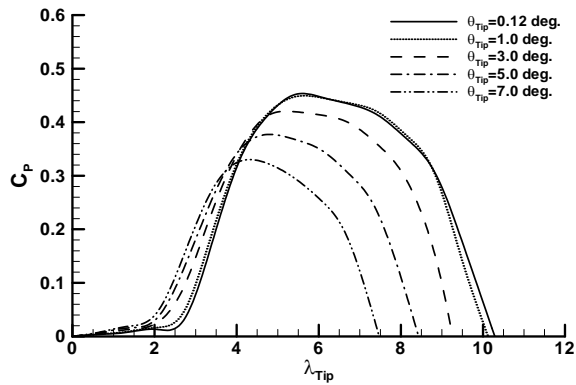


圖 14：考量阻力的影響，在不同葉尖槳矩角下葉尖速度比與功率係數的關係

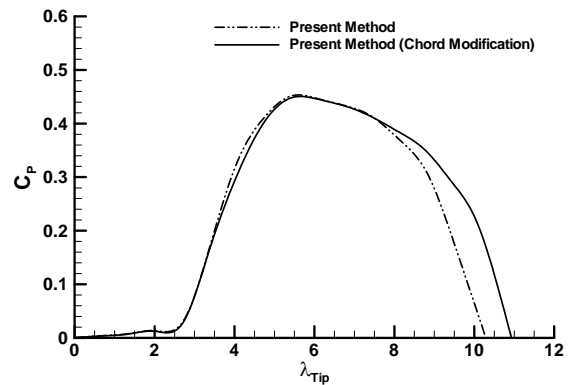


圖 17：近葉根的弦長線性修正後，葉尖速度比與功率係數的關係

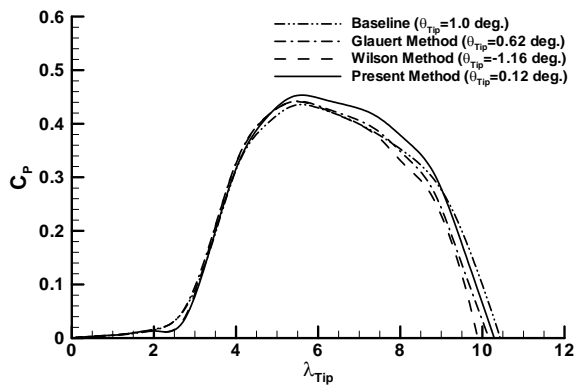


圖 15：以不同的葉片設計法，在設計的葉尖槳矩角下葉尖速度比與功率係數的關係

若考量葉片的製作成本，則可減小近葉根的弦長並調整為線性分佈，圖 16 為考量阻力影響設計的葉片弦長分佈與調整後的比較，而圖 17 則為葉尖速度比與功率係數的關係，圖中顯示調整弦長的葉片在設計點葉尖速度比所對應的功率係數些微降低，其原因為風力發電機葉片近葉根處擷取的能量較少，而愈靠近葉尖能擷取愈多的能量。

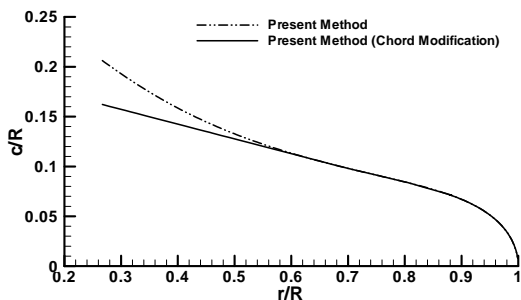


圖 16：近葉根的弦長線性修正後，沿徑向葉片弦長分佈

### VII. 結論

本研究藉由水平軸風力發電機葉片最佳化設計程序，可使原始參考葉片的最大功率係數再提高約 4%，雖然提升的幅度有限，但驗證了設計程序的適用性。與 Glauert 法及 Wilson 法比較，研究中考量葉尖損失及阻力影響的葉片設計能有更高的最大功率係數。另外考量葉片的製造成本，嘗試將靠近葉片根部的弦長線性化，在額定的工作狀態下葉輪的功率係數約降低 0.8%，對整體風力發電機的性能而言影響非常有限。

### 參考文獻

- [1] Glauert, H., "Airplane Propellers," Aerodynamic Theory, Edited by W. F. Durand, Julius Springer, Berlin, pp. 169-360, 1935.
- [2] Wilson, R. E., Lissaman, P. B.S., and Walker, S. N., *Aerodynamic Performance of Wind Turbines*. Corvallis, Oregon: Oregon State University, Jun., 1976.
- [3] Hansen, M. O. L., *Aerodynamics of Wind Turbines*. Rotors, Load and Structures. James & James: London, 2000.
- [4] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., and Bossanyi, E., *Handbook of Wind Energy*. JOHN WILEY & SONS, LTD, 2001.
- [5] Hand, M. M., Simms, D. A., Fingersh, L. J., Jager, D. W., Cotrell, J. R., Schreck, S. J., and Larwood, S. M., "Unsteady aerodynamics experiment phase VI: wind tunnel test configurations and available data campaigns," NREL/TP-500-29955, Dec., 2001.
- [6] Giguere, P., and Selig, M. S. "Design of a tapered and twisted blade for the NREL combined experiment rotor," NREL/SR-500-26173, NREL, Golden, CO, 1999.
- [7] Abbott, Ira H., Von Doenhoff, Albert E., and Stivers, Louis S., Jr., "Summary of Airfoil Data," NACA Report TR-824, 1945.
- [8] Tangler, J. L., and Somers, D. M., "NREL Airfoil Families for HAWTs," NREL/TP-442-7109, Jan., 1995.
- [9] Timmer, W. A., and van Rooij, R., "Summary of the Delft University Wind Turbine Dedicated Airfoils," 41st Aerospace Sciences Meeting, Reno, USA, Paper no. AIAA-2003-0350, Jan., 2003.
- [10] Bertagnolio, F., Sørensen, N., Johansen, J. and Fuglsang, P., "Wind Turbine Airfoil Catalogue," Risø-R-1280 (EN), Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, Aug., 2001.
- [11] Reuss, R. R., Hoffmann, M. J., and Gregorek, G. M., "Effects of Grit Roughness and Pitch Oscillations on the S809 Airfoil," NREL/TP-442-7817, 1995.