

具格林翼之海潮流水平軸渦輪性能提升研究

余文升*¹ 楊敏雄*

*國立高雄科技大學 造船及海洋工程系

**國立高雄科技大學 造船及海洋工程系

關鍵詞：格林翼、海流、水平軸渦輪、船舶推進系統、功率係數

摘要

根據聯合國 17 項永續發展目標第七項—可承受之潔淨能源, Affordable And Clean Energy, 以及實現到 2050 年淨零碳排放的目標, 凸顯出再生能源發展的緊迫性和重要性。台灣四面環海, 擁有豐富的海洋資源, 非常適合進行海洋能源的開發。格林翼是一種安裝在船舶螺旋槳後方的自由旋轉系統, 其功能是從螺旋槳後方的尾流中提取能量並重新利用, 將這種能量轉換為推進力, 增加船舶的推力。本研究創新將格林翼添加到水平軸渦輪發電機的後方, 以研究及探討其對水平軸渦輪的速度場、流場、壓力場, 及渦輪發電機整體性能之輸出功率、葉尖速比和功率係數。

本研究以 Ansys_Fluent 分析渦輪, 在海流流速 1 m/s 情況下, 當轉速 6 rad/s 時, 具格林翼之渦輪有最高輸出功率 1.6571 W, 其葉尖速比為 1.05 之最佳功率係數為 0.3268, 較單一渦輪之功率增加 34.1%。在水槽實驗中, 在流速 0.7 m/s 情況下, 具格林翼之渦輪之最高輸出功率為 0.552 W, 且相較於單一渦輪高於 36.9%。數值分析與實驗結果均顯示加裝格林翼可增強水平軸渦輪的輸出功率, 本研究創新地將格林翼與水平軸渦輪結合, 具有創新性、應用性和整合性, 期待能對海洋能源領域做出了有意義的貢獻。

前言

隨著科技發展, 人們對於能源的依賴和能源的消耗速度日益增加。台灣常用的不可再生能源如化石燃料都正在逐漸減少, 且使用不可再生能源會對地球造成許多不可逆的環境汙染而導致氣候異常。現今可獲得的可再生能源, 如太陽能、風力、潮汐能、地熱能、水能、生物燃氣等, 其中就以太陽能、風力及水力為大宗, 而風力及水力獲取能源的方式, 大多都是以風和水流帶動葉片, 進而轉動發電機運轉。另一方面, 根據聯合國 17 項永續發展目標第七項—可承受之潔淨能源, Affordable And Clean Energy, 凸顯出全世界對於永續能源發展的急迫性和重視。台灣四面環海, 在地理條件上佔了相當大的優勢, 因此具有潛力開拓海洋再生能源。海洋再生能源包括洋流、波浪、潮汐和風力等。台灣的地理位置在使用風能及海洋能有非常大的優勢。例如: 台灣東部有向北流經過的黑潮, 黑潮的寬度約為 200 km, 平均流速為 1.0~2.0 m/s 且全年穩定流動之流域, 因此黑潮可為台灣海流發電的重要能源。

業界和專業領域人員對於海流能源之研究方向目前水平軸渦輪發電機為主, 著手的方向以水平軸渦輪之葉片改良為最大宗。其中, 在美國國家航空諮詢委員會 (National Advisory Committee for Aeronautics, NACA) 的研究下, 各項葉片的外貌及性能已趨於成熟。此外, 除了對葉片的外貌

進行研究外, 也有在渦輪外加上導罩, 結合流體力學柏努力定理的概念增強水流進而增加轉速, 如圖 1、圖 2。因此, 水平軸發電機如要再進行進一步的突破, 必須從其他方向著手。

格林翼(Grim vane wheel)是一種安裝在船舶螺旋槳後方的自由旋體系統, 其功能是從螺旋槳後方的尾流中汲取能量並再次利用, 也將此能量轉化為船舶動力, 而對於不同船舶類型, 各自增加了 2% 至 13% 的推進能力[3]。格林翼在船舶推進上已成功被應用, 因此在閱讀過數多期刊論文後, 發現目前無人將格林翼加裝至水平軸渦輪後方進行海洋能源發電的應用。

本研究以先以以水平軸葉片文獻分析為基礎, 藉由 3D 繪圖軟體 Rhino 繪製出整體系統, 再以分析計算軟體 ANSYS_Fluent 進行模擬海流之性能分析, 進而求出葉片之扭矩、速度場、壓力場、流線場等, 並進一步了解傳統葉片和增加格林翼後之性能, 且求出葉片之最佳轉速區間和最佳輸出功率, 最後討論與分析在流場同流速和葉片不同轉速下之差異。

¹ 聯絡作者 名字 (author@sample.com.tw)

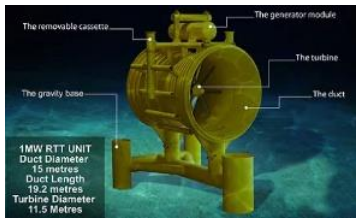


圖 1 導罩式水平軸渦輪[1]



圖 2 導罩式水平軸渦輪[2]

研究目的

格林翼(Grim vane wheel)是一種安裝在船舶螺旋槳後方的自由旋體系統，其功能是從螺旋槳後方的尾流中汲取能量並再次利用，也將此能量轉化為船舶動力，而對於不同船舶類型，各自增加了 2% 至 13% 的推進能力[3]。格林翼在船舶推進上已成功被應用，因此在閱讀過數多期刊論文後，發現目前無人將格林翼加裝至水平軸渦輪後方進行海洋能源發電的應用。

本研究以先以以水平軸葉片文獻分析為基礎，藉由 3D 繪圖軟體 Rhino 繪製出整體系統，再以分析計算軟體 ANSYS Fluent 進行模擬海流之性能分析，進而求出葉片之扭矩、速度場、壓力場、流線場等，並進一步了解傳統葉片和增加格林翼後之性能，且求出葉片之最佳轉速區間和最佳輸出功率，最後討論與分析在流場同流速和葉片不同轉速下之差異。

文獻回顧

Carlton JS [3]介紹了格林翼的發明者一開始初步的設計如圖 3。格林翼的設計內容，其作用主要是回收船舶螺旋槳之尾流能量並增加推進效率。格林翼之直徑比螺旋槳之直徑大 20%，且進階說明了格林翼設計[4][5]，其兩個主要條件為其下之公式表示：

$$\int_{r_t}^R \frac{dQ}{dr} dr + \int_{r_0}^{r_1} \frac{dQ}{dr} dr = 0 \quad (1)$$

$$\int_{r_t}^R \frac{dT}{dr} dr + \int_{r_0}^{r_1} \frac{dT}{dr} dr > 0 \quad (2)$$

其中 dT 和 dQ 是作用在葉片截面上的推力和扭矩， R 、 r_t 和 r_0 分別是葉輪尖端半徑、過渡（螺旋槳和渦輪部件之間）半徑和凸台半徑。螺旋槳和渦輪扭矩必須平衡，忽略小摩擦分量，螺旋槳和渦輪軸

向力的淨效應必須大於零。格林翼通常具有比螺旋槳更多的葉片，並且以較低的速度旋轉，大約為螺旋槳轉速的 30% 至 50% [4] [5]。

Lee K-J et al. [6]認為，高效的螺旋槳設計具有與現代船尾形式一樣大的直徑，因此在大多數情況下安裝葉輪不是合適的選擇。葉輪的自由旋轉設計降低了機械複雜性。另一方面，很難主動控制轉速，這會根據海況造成不利影響。因此將格林翼直徑設計得比螺旋槳小如圖 4，因此最大限度地減少了對船體形式和螺旋槳設計的干擾。重量減輕，從而可以實現穩定的結構設計。由於渦輪葉片的尖端位於螺旋槳滑流內部，因此可以避免螺旋槳尖端過對渦輪葉片的衝擊。由於發電機控制器可以提供對渦輪機轉速的主動控制，因此增加了設備操作的靈活性。

Lee K-J et al. [6]對於螺旋槳及格林翼後續的模擬分析有詳細的見解。為了分析水平軸渦輪機轉動之情形，首先先找出渦輪之最佳轉速以便後續模擬分析帶入此參數。在模擬分析中的網格處理時，把螺旋槳和格林翼分為兩個獨立域後續進行分析能分開進行單獨模擬，進而得出相互之間的關係。最終得出螺旋槳及格林翼同時作用時之壓力分佈，及螺旋槳和格林翼間的兩個橫向平面上比較了速度分佈。



圖 3 格林翼起初設計[3]

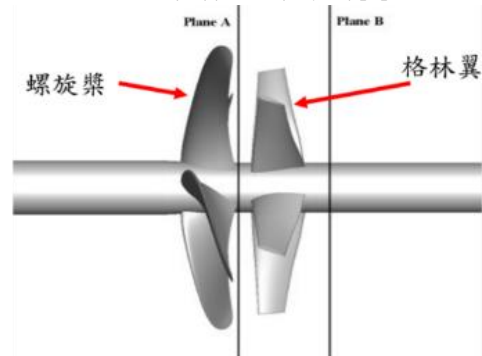


圖 4 現代設計側視圖[4]

性能分析

流體的動能是透過運動而得到的能量，且此能量不考慮位能及內能的改變只以動能的形式表示出來。可表示為：

$$E = \frac{1}{2}mV^2 \quad (1)$$

其中，E 為動能(W)，m 為質量(kg)，V 為流體流速(m/s)。

為了有效的了解水平軸渦輪機之能量轉換效率，功率定義為能量轉換或使用的速率，以單位時間所消耗或輸出的能量，可表示為：

$$P_f = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} V^2 = \frac{1}{2} (\rho AV_0) V^2 = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (1)$$

其中，Pf 為工作流體輸出之功率輸出(W)，

dm/dt 為每單位時間的質量(kg/s)，也稱為質量流率。

由式(2)可得知，流體功率輸出與截面積及速度的 3 次方成正比，因此截面積與速度為影響流體功率輸出的重要參數。

為了能夠判斷出渦輪機之功率輸出，較常用功率係數(Power Coefficient, Cp)作為重要的參考指標之一，其公式如式(3)所示

$$C_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{T \times \omega}{\frac{1}{2} \rho AV^3} \quad (3)$$

其中 ρ 為流體之密度，A 為渦輪機之掃略面積，V 為流體之流速，根據德國物理學家貝茲所提出的貝茲理論(Betz' s Theory)表示，任何渦輪機所能從流體提供的動能中，最大功率係數約為 59%，因為到如今為止各種風力發電機之功率係數都無法達到貝茲所提出的理論數值，因此被大家所認為這是渦輪機之功率係數的極限值，亦被稱作為貝茲極限(Betz limit)。

另外，為了能夠更容易比較出渦輪機在流體中之轉速，常用無因次化之參數葉尖速比(Tip speed ratio, TSR)，其公式如式(4)所示

$$TSR = \frac{\omega \times R}{v} \quad (4)$$

其中 R 為渦輪機之最大外徑，在設計葉片時，TSR 就被廣泛用來作為一重要參數，配合扭矩、輸出功率及功率係數等參數，就能夠得到不同尺寸下的最佳化之設計。

由於在數值模擬中須設定單一渦輪和格林翼轉速，而格林翼轉速約為單一渦輪轉速之 30%至 50%，因此兩者關係可表示為：

$$\gamma = \frac{\omega_G}{\omega_H} \quad (5)$$

其中， γ 為格林翼轉速與單一渦輪轉速之比值

ω_G 為格林翼轉速

ω_H 為單一渦輪轉速。

雷諾數(Reynolds number)是流體力學中的一個無因次量，其物理意義是流體的慣性力與粘性力的

比值。雷諾數較小時，黏滯力對流場的影響大於慣性力，流場中的流速擾動因黏滯力衰減，使流體流動穩定，稱為層流(Laminar flow)。雷諾數較大時，慣性力對流場的影響大於黏致力，導致流體流動不穩定，稱為紊流(Turbulence flow)，其定義為：

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu} \quad (6)$$

其中， ρ 為流體密度(kg/m³)

μ 為流體動力黏度(N·s/m²)

ν 為運動黏度(m²/s)

水平軸渦輪和格林翼葉片幾何

NACA 葉型是由美國國家航空諮詢委員會 (National Advisory Committee for Aeronautics, NACA) 開發的一系列葉型。每個葉型的代號由「NACA」這四個字母與一串數字組成，將這串數字所描述的幾何參數代入特定方程式中即可得到葉型的精確形狀。本研究採用的葉型是五位數的葉型族中的 NACA 63-815，NACA 字母後的五位數可以描述更為複雜的機翼形狀：

(1)首位數字乘以 0.15 表示理想攻角下的設計最佳升力係數。

NACA 63-815 葉型的最佳升力係數為 6*0.15=0.9

(2)第二位數字乘以 5 表示最大彎度距前緣的距離占弦長的百分比。

NACA 63-815 葉型的最大彎距位於 3*5=15%的弦長處

(3)第三位數字表示翼型是否為負彎度的。

NACA 63-815 葉型為負彎度

(4)第四、五位數字表示最大厚度占弦長的百分比。

NACA 63-815 葉型的最大厚度為弦長的 15%

以水平軸葉片文獻分析為基礎，水平軸後方安裝格林翼，進一步將兩者結合成為一個系統。本研究之水平軸渦輪葉片，參照的葉型為 NACA63-815，渦輪正視圖如圖 8，尺寸參數圖如表 1。

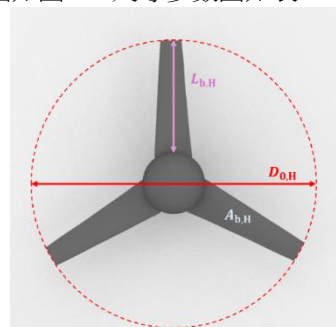


圖 8 單一渦輪之正視圖

表 1 渦輪之尺寸參數圖

外徑 D_o	350 mm
葉片長度 $L_{b,H}$	172 mm
單葉片總面積 A_b	7148 mm ²
渦輪總面積	29279.786 mm ²

格林翼直徑分別為前方渦輪的 0.8 倍、1 倍和 1.2 倍，直徑比表示：

$$\alpha = \frac{D_{0,G}}{D_{0,H}} \quad (7)$$

其中， α 為格林翼與單一渦輪直徑比

$D_{0,G}$ 為格林翼渦輪直徑(mm)

$D_{0,H}$ 為單一渦輪直徑(mm)

格林翼的葉片數分為 4 葉(B=4)、5 葉(B=5)、6 葉(B=6)和 7 葉(B=7)。

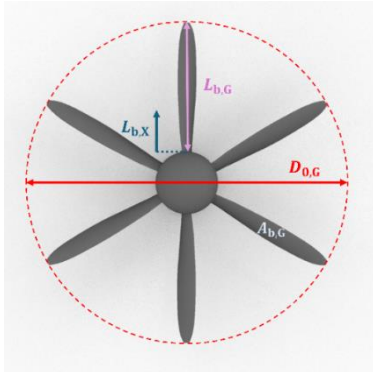


圖 9 格林翼之正視圖

表 2 格林翼葉片之尺寸參數圖， $\alpha=0.8$

葉片相對位置 $L_{b,x} / L_{b,G}$	攻角 β
0	15.00°
0.2	25.39°
0.4	34.25°
0.6	45.58°
0.8	60.63°
1.0	75.00°

表 2 格林翼葉片之尺寸參數圖， $\alpha=1.0$

葉片相對位置 $L_{b,x} / L_{b,G}$	攻角 β
0	15.00°
0.2	24.89°
0.4	35.02°
0.6	45.22°
0.8	60.40°
1.0	75.00°

表 2 格林翼葉片之尺寸參數圖， $\alpha=1.0$

葉片相對位置 $L_{b,x} / L_{b,G}$	攻角 β
0	15.00°
0.2	25.34°
0.4	34.25°
0.6	45.58°
0.8	60.63°
1.0	75.00°

數值模擬分析

本研究主要使用 ANSYS_Fluent 計算流體力學 (Computational fluid dynamic, CFD) 之套裝模組進行流體分析，運作計算時使用有限體積法 (Finite Volume Method, FVM)，將求解場域劃分為一控制體積，並在每個控制體上對物理量進行積分或平均後離散化成數個網格及節點，以藉由統御方程式 (Governing equation) 來描述在模擬系統之流線場、壓力場、速度場、扭矩、輸出功率與功率係數之情況。

在計算流體力學中，統御方程式之基礎為質量守恆中之連續方程式 (Continuity equation) 及動量方程式 (Momentum equation) 來運算並表達其物理性質，相關假設條件如下：

1. 流體為不可壓縮之穩流狀態
2. 流體於三維流場中
3. 忽略浮力與微小重力變化

而連續方程式又稱為質量方程式，若考慮方向性，以 μ 、 v 、 w 為 x 、 y 、 z 上之速度向量 (m/s)，其可定義為：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

由於本研究假設為穩態之條件並進行數值模擬分析，故分析不隨時間改變而數值有所改變，因此可將(8)改寫為(9)：

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

納維爾-史托克方程式 (Navier-Stokes equation, N-s) 表示為：

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \rho g - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (10)$$

其中， p 為壓力 (Pa)

g 為重力加速度 (m/s²)

ν 為動黏滯係數 (m²/s)

建立數值模擬分析已有一套標準流程，其中包含前處理、求解及後處理。在前處理時，首先繪製出葉片模型並匯入 ANSYS 進行網格劃分處理，若網格品質為可接受之情況下即可匯入 Fluent 進行求解，求解時需要設定其物理性質、紊流模組

及演算法等，設定完成後即可進行計算，在計算時需時刻觀察其殘差值與迭代次數之關係圖以及扭矩與迭代次數關係圖來判斷此分析結果是否為收斂之情況，若無出現收斂之情況須回至上一步修改各項設定或是調整網格品質，如圖 10。若出現收斂之情形即可進行後處理的部分，將需要之各項性能比較之圖產出。



圖 10 模擬分析流程圖

本研究模擬分析之計流速計算區域以渦輪直徑 $D=0.35\text{ m}$ 為主，分別還有流場和旋轉流場，如圖 11 所示，兩者皆為圓柱體，其中流場區域全長為 10 D ，直徑 18 D ；而旋轉流場之全長為 0.65 D ，直徑為 1.2 D ，如圖 12 所示。

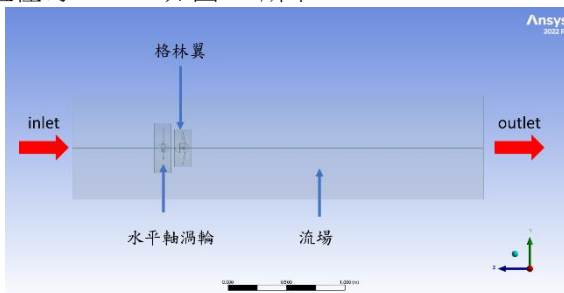


圖 11 流場計算區域

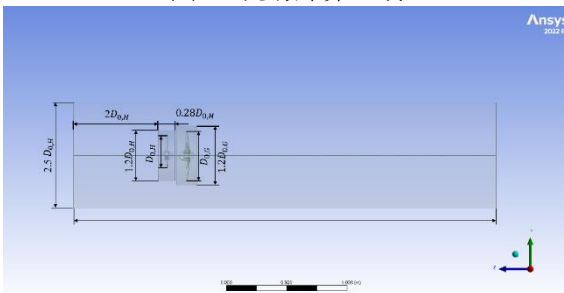


圖 12 流場計算區域尺寸圖

網格處理是將計算域劃分成離散元的過程，網格的質量和分辨率直接影響模擬結果的準確性和計算速率，圖 13 為流場網格立體分布圖，圖 14 為流場網格分布側視圖，而流體從模型左邊流入，右邊流出。

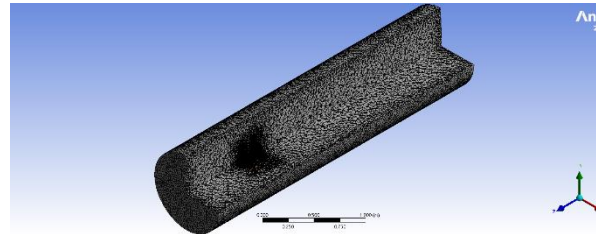


圖 13 流場網格立體分布圖

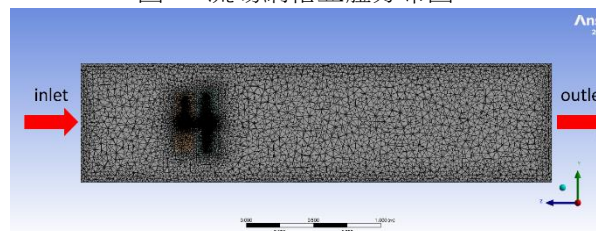


圖 14 流場網格分布側視圖

完成網格切割後接著進行流場分析，由於本研究著重於潮汐能發電，其流體為海水，因此將海水的密度設定為 $\rho = 1025\text{ kg/m}^3$ ，而計算模組可分為穩態與暫態兩種，假設以不隨時間變化而改變之情況下，計算模組需選定為穩態。

本研究選擇使用 k-epsilon 紊流模組來做分析。設定邊界條件(Boundary condition, B.C.)對於數值模擬分析來說是極重要的一個步驟，參數設定包含了流場的出、入口以及牆壁條件。說明如下

1.入口速度(Velocity inlet):

使流體沿著入口流向渦輪機時可均勻地承受到流體衝擊，並將流體流速設定為 $V=1\text{ m/s}$ 。

2.壓力出口(Pressure outlet):

本研究設定流場出口壓力為 0，與一大氣壓之壓力相同。

3.無滑移條件(No-slip condition):

本研究將流場表面周圍處設定為無滑移表面，使流體由於黏性效應在固體表面處會黏在固體之邊界上，形成一層很薄的邊界層，此時流體與固體表面之間沒有滑動之現象，稱為無滑移(no slip)邊界條件。

在進行模擬分析時，我們需要解決流場速度和壓力之間的耦合問題，即 SIMPLE 法 (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) 進行求解。藉由迭代會產生很多的殘差值(Residual)的相對誤差來判斷收斂，因此透過設定連續方程式、質量守恆方程式、k-epsilon 的紊流模組及設定監控收斂，能確保誤差值能穩定並達到收斂，

本研究之相對誤差定義為小於 0.05%，並且維持 100 不知迭代次數。

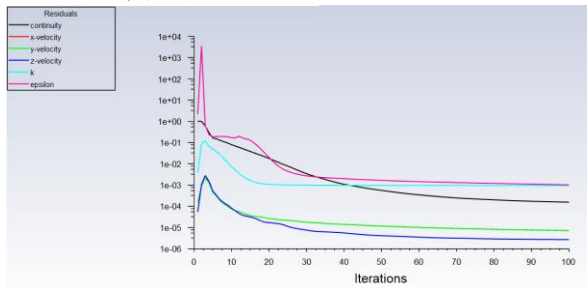


圖 15 迭代次數與殘差值之關係圖

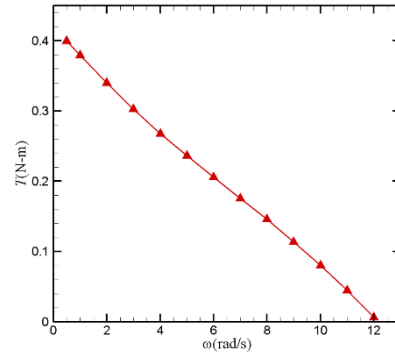


圖 16 轉速 ω 與扭矩 T 之關係

結果與討論

1. 單一渦輪之性能分析

設定條件海流在入口速度 $V=1$ m/s、渦輪旋轉速度從 $\omega=1$ rad/s 到 $\omega=10$ rad/s，並探討工作流體在渦輪葉片上作用的狀態，流體的軌跡受到葉片改變，而影響流場之流線場、壓力場及速度場之分佈，並找到渦輪最佳功率之轉速區間。

圖 16 為單一渦輪在不同轉速下的扭矩變化圖。在轉速 $\omega=1$ rad/s 時，扭矩 T 達到 0.3793 N·m，且可由圖中觀察到扭矩會隨著葉片的轉速增加而下降。

圖 17 為單一渦輪在不同轉速下之輸出功率之變化圖，輸出功率為葉片的轉速及受流體推動之轉矩的乘積，首先隨著轉速提高，功率輸出有明顯的上升，當功率輸出上升到最大值之後便下降，這是因為轉速過快而導致。圖中可以看到在轉速 $\omega=1$ rad/s 時，有最低的功率輸出 $P=0.3793$ W，但到了轉速 $\omega=6$ rad/s 時，有最大的功率輸出 $P=1.235$ W。

圖 18 為傳統葉片之功率係數 C_p 與葉尖速比 TSR 之關係，圖中顯示隨著 TSR 提高，功率係數會有明顯的上升，在達到功率係數的最高值時，會因為轉速增加功率係數性能開始下降，在達到 $TSR=1.1$ 時有最佳之功率係數 $C_p=0.2435$ 。隨著 TSR 增快，故對應較差之功率係數，可以發現到隨著轉速過快其性能會明顯降低。

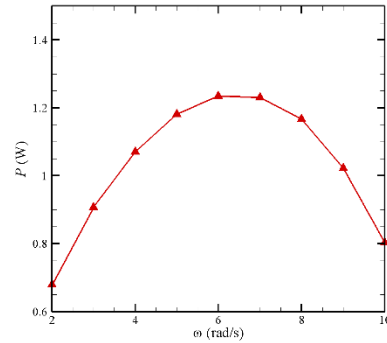


圖 17 轉速 ω 與輸出功率 P 之關係

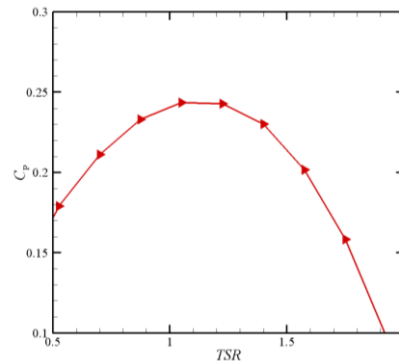


圖 18 功率係數 C_p 與葉尖速比 TSR 之關係

2. 具格林翼之渦輪性能分析

2-1 具格林翼之渦輪在 $\alpha=0.8$ 時之性能分析

透過分析我們得知在海流速度 $V=1$ m/s 時，單一渦輪在轉速 $\omega=6$ rad/s 有最大的功率輸出 $P=1.235$ W。因此，本節探討在單一渦輪轉速設定為 6 rad/s，與格林翼 $\alpha=0.8$ 和葉片數量改變之相互作用下之行為。

圖 19 為單一渦輪在格林翼數量 $B=4$ 時， $\gamma=0.3$ 、 0.4 、 0.5 之輸出功率之變化圖。當轉速 $\omega=6$ rad/s 且 $\gamma=0.3$ 、 $\gamma=0.4$ 和 $\gamma=0.5$ 時，最大輸出功率 P 分別為 1.6252 W、1.6275 W 和 1.6303 W，此

時扭矩也分別達到 0.2708 N-m、0.2713 N-m 和 0.2717 N-m。

圖 20 為單一渦輪在格林翼數量 $B=5$ 時， $\gamma=0.3$ 、 0.4 、 0.5 之輸出功率之變化圖。當渦輪轉速為 $\omega=6$ rad/s，且在 $\gamma=0.3$ 、 $\gamma=0.4$ 和 $\gamma=0.5$ 情況下，扭矩 T 分別達到 0.2706 N-m、0.2709 N-m 和 0.2717 N-m，而具格林翼之渦輪在 $\gamma=0.5$ 有最大輸出功率 $P=1.6288$ W。

圖 21 具格林翼 $B=6$ 之渦輪在 $\gamma=0.3$ 、 0.4 、 0.5 之輸出功率之變化圖。當格林翼轉速為 $\gamma=0.3$ 、 $\gamma=0.4$ 和 $\gamma=0.5$ 時且渦輪轉速 $\omega=6$ rad/s 時，最大輸出功率差異不大，具格林翼之渦輪在 $\gamma=0.5$ 有最大輸出功率 $P=1.6282$ W，同時扭矩也達到 0.2714 N-m。

圖 22 具格林翼 $B=7$ 之渦輪在 $\gamma=0.3$ 、 0.4 、 0.5 之輸出功率之變化圖。當渦輪轉速為 $\omega=6$ rad/s，且在 $\gamma=0.3$ 、 $\gamma=0.4$ 和 $\gamma=0.5$ 情況下，最大輸出功率 P 分別為 1.6096 W、1.610 W 和 1.615 W，此時具格林翼之渦輪在 $\gamma=0.5$ 有較大的扭矩 $T=0.2692$ N-m。

由圖 19 到圖 22 可得知，格林翼在葉片數量相同情況下， $\gamma=0.5$ 能使前方渦輪有較大的扭矩和較大的輸出功率。

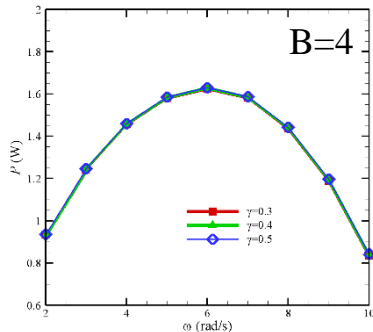


圖 19 具格林翼之渦輪之轉速 ω 與輸出功率 P 之關係

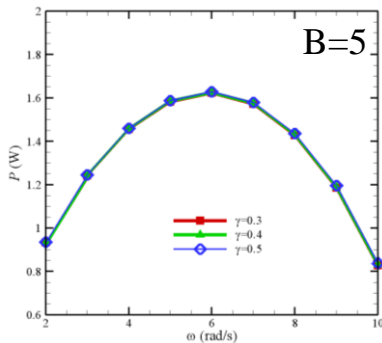


圖 20 具格林翼之渦輪之轉速 ω 與輸出功率 P 之關係

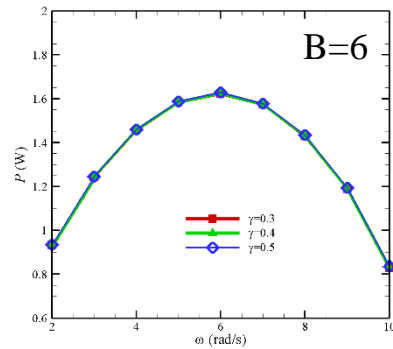


圖 21 具格林翼之渦輪之轉速 ω 與輸出功率 P 之關係

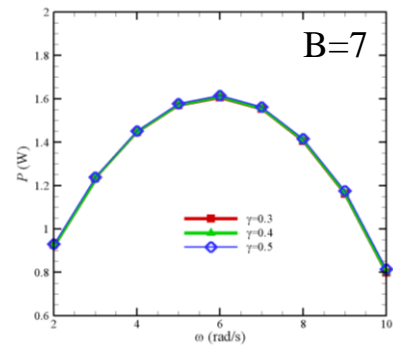


圖 22 具格林翼之渦輪之轉速 ω 與輸出功率 P 之關係

2-2 具格林翼之渦輪在 $\alpha=1.0$ 時之性能分析

透過分析我們得知在海流速度 $V=1$ m/s 時，單一渦輪在轉速 $\omega=6$ rad/s 有最大的功率輸出 $P=1.235$ W。因此，本節探討在單一渦輪轉速設定為 6 rad/s，與格林翼 $\alpha=1.0$ 和葉片數量改變之相互作用下之行為。

圖 23 具格林翼 $B=4$ 之渦輪在 $\gamma=0.3$ 、 0.4 、 0.5 之輸出功率之變化圖。當渦輪轉速為 $\omega=6$ rad/s，且在 $\gamma=0.3$ 、 $\gamma=0.4$ 和 $\gamma=0.5$ 情況下，最大輸出功率 P 分別為 1.6139 W、1.6183 W 和 1.6229 W，此時扭矩 T 也分別達到此時具格林翼之渦輪在 $\gamma=0.5$ 有較大的扭矩 0.2705 N-m。

圖 24 為單一渦輪在格林翼數量 $B=5$ 時， $\gamma=0.3$ 、 0.4 、 0.5 之輸出功率之變化圖。當轉速 $\omega=6$ rad/s 且 $\gamma=0.3$ 、 $\gamma=0.4$ 和 $\gamma=0.5$ 時，最大輸出功率 P 分別為 1.6144 W、1.6191 W 和 1.6259 W，此時扭矩 T 也分別達到 0.2691 N-m、0.2698 N-m 和 0.2710 N-m。

圖 25 為單一渦輪在格林翼數量 $B=6$ 時， $\gamma=0.3$ 、 0.4 、 0.5 之輸出功率之變化圖。當轉速 $\omega=6$ rad/s 且 $\gamma=0.3$ 、 $\gamma=0.4$ 和 $\gamma=0.5$ 時，當渦輪轉速為 $\omega=6$ rad/s，且在 $\gamma=0.3$ 、 $\gamma=0.4$ 和 $\gamma=0.5$ 情況下，扭矩 T 分別達到 0.2671 N-m、0.2678 N-m 和

0.2688N·m，此時具格林翼之渦輪在 $\gamma=0.5$ 有最大輸出功率 1.6130 W。

圖 26 具格林翼 $B=7$ 之渦輪在 $\gamma=0.3$ 、 0.4 、 0.5 之輸出功率之變化圖。當格林翼轉速為 $\gamma=0.3$ 、 $\gamma=0.4$ 和 $\gamma=0.5$ 時且渦輪轉速 $\omega=6$ rad/s 時，最大輸出功率差異不大，具格林翼之渦輪在 $\gamma=0.5$ 有最大輸出功率 $P=1.6145$ W。

由圖 23 到圖 26 可得知，格林翼在葉片數量相同情況下， $\gamma=0.5$ 能使前方渦輪有較大的扭矩和較大的輸出功率。

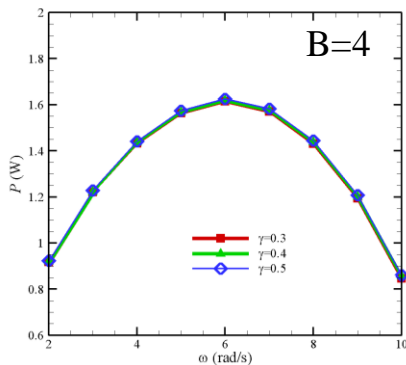


圖 23 具格林翼之渦輪之轉速 ω 與輸出功率 P 之關係

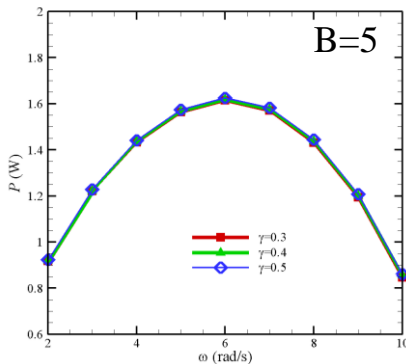


圖 24 具格林翼之渦輪之轉速 ω 與輸出功率 P 之關係

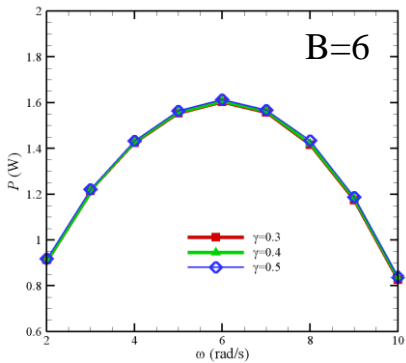


圖 25 具格林翼之渦輪之轉速 ω 與輸出功率 P 之關係

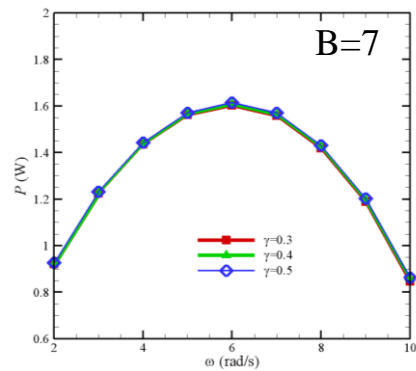


圖 26 具格林翼之渦輪之轉速 ω 與輸出功率 P 之關係

2-3 具格林翼之渦輪在 $\alpha=1.2$ 時之性能分析

透過分析我們得知在海流速度 $V=1$ m/s 時，單一渦輪在轉速 $\omega=6$ rad/s 有最大的功率輸出 $P=1.235$ W。因此，本節探討在單一渦輪轉速設定為 6 rad/s，與格林翼 $\alpha=1.2$ 和葉片數量改變之相互作用下之行為。

圖 27 為單一渦輪在格林翼數量 $B=4$ 時， $\gamma=0.3$ 、 0.4 、 0.5 之輸出功率之變化圖。當轉速 $\omega=6$ rad/s 且 $\gamma=0.3$ 、 $\gamma=0.4$ 和 $\gamma=0.5$ 時，最大輸出功率 P 分別為 1.6429 W、1.6491 W 和 1.6571 W，此時扭矩 T 也分別達到 0.2738 N·m、0.2749 N·m 和 0.2762 N·m。

圖 28 為單一渦輪在格林翼數量 $B=5$ 時， $\gamma=0.3$ 、 0.4 、 0.5 之輸出功率之變化圖。當渦輪轉速為 $\omega=6$ rad/s，且在 $\gamma=0.3$ 、 $\gamma=0.4$ 和 $\gamma=0.5$ 情況下，扭矩 T 分別達到 0.2729 N·m、0.2736 N·m 和 0.2760 N·m，而具格林翼之渦輪在 $\gamma=0.5$ 有最大輸出功率 $P=1.6560$ W。

圖 29 具格林翼 $B=6$ 之渦輪在 $\gamma=0.3$ 、 0.4 、 0.5 之輸出功率之變化圖。當格林翼轉速為 $\gamma=0.3$ 、 $\gamma=0.4$ 和 $\gamma=0.5$ 時且渦輪轉速 $\omega=6$ rad/s 時，具格林翼之渦輪在 $\gamma=0.5$ 有最大輸出功率 $P=1.6435$ W，同時扭矩也達到 0.2739 N·m。

圖 30 具格林翼 $B=7$ 之渦輪在 $\gamma=0.3$ 、 0.4 、 0.5 之輸出功率之變化圖。當渦輪轉速為 $\omega=6$ rad/s，且在 $\gamma=0.3$ 、 $\gamma=0.4$ 和 $\gamma=0.5$ 情況下，最大輸出功率 P 差異不大，分別為 1.6096 W、1.610 W 和 1.615 W，而具格林翼之渦輪在 $\gamma=0.5$ 有較大的扭矩 $T=0.2692$ N·m。

由圖 27 到圖 30 可得知，格林翼在葉片數量相同情況下， $\gamma=0.5$ 能使前方渦輪有較大的扭矩和較大的輸出功率。

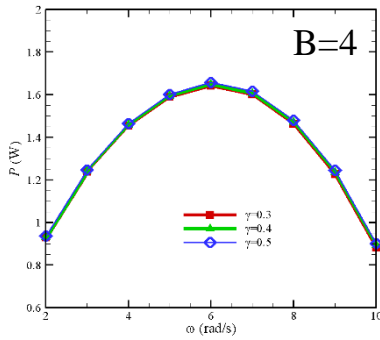


圖 27 具格林翼之渦輪之轉速 ω 與輸出功率 P 之關係

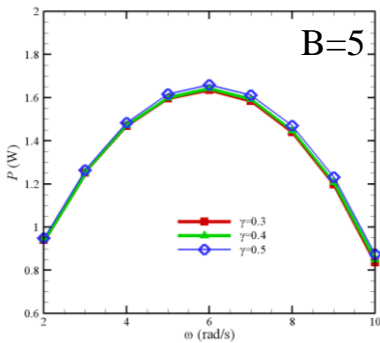


圖 28 具格林翼之渦輪之轉速 ω 與輸出功率 P 之關係

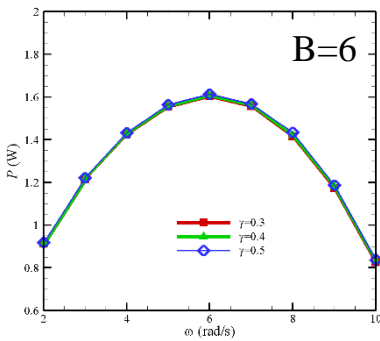


圖 29 具格林翼之渦輪之轉速 ω 與輸出功率 P 之關係

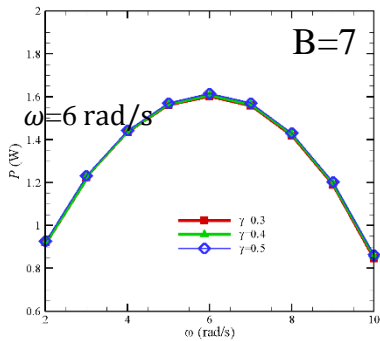


圖 30 具格林翼之渦輪之轉速 ω 與輸出功率 P 之關係

3. 單一渦輪與具格林翼之渦輪性能比較

在海流速度 $V=1$ m/s 時，單一渦輪在轉速 $\omega=6$ rad/s 有最大輸出功率，而具林翼之渦輪也轉速 $\omega=6$ rad/s 有最大輸出功率。因此，本節探討在單一渦輪在轉速 $\omega=6$ rad/s 與具格林翼之渦輪在轉速 $\omega=6$ rad/s，最佳輸出功率和轉速時之性能比較。

3-1 流線場分析

圖 31 為單一渦輪在 $\omega=6$ rad/s 之流線場，從圖中可觀察到葉片末端的水流沿著葉片末端切線流出，使得葉片後端的流速減弱，除了導致渦輪後方有渦流現象，渦輪機的扭矩迅速下降。

圖 32 至圖 34 為具格林之渦輪之流線場圖，我們可得知格林翼後方之水流呈現平整溫順之情形，使渦輪轉得更平順。

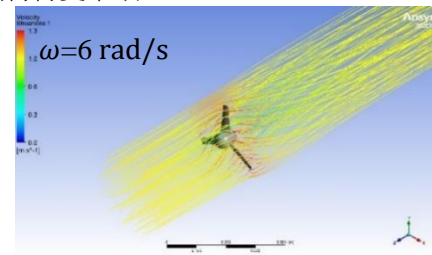


圖 31 單一渦輪之流線場分佈圖

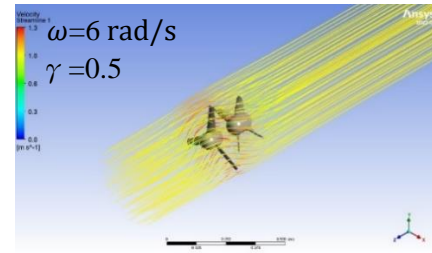


圖 32 渦輪在 $\alpha=0.8$ 時之流線場分佈圖

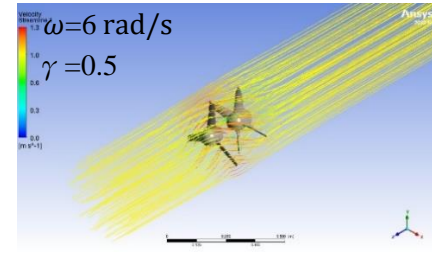


圖 33 渦輪在 $\alpha=1.0$ 時之流線場分佈圖

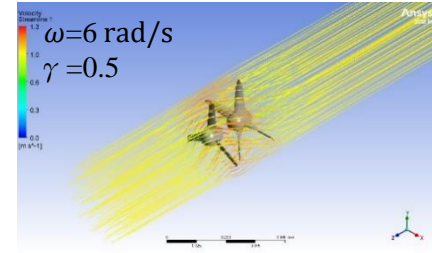


圖 34 渦輪在 $\alpha=1.2$ 時之流線場分佈圖

3-2 壓力場分析

圖 35 為單一渦輪在 $\omega=6 \text{ rad/s}$ 之壓力場分佈圖，當海流作用於葉片時，渦輪的正面形成高壓區，而流體穿過葉片後，在渦輪的背部形成低壓區。轉速的快慢會影響葉片背部低壓區的範圍，這是因為流體難以通過葉片導致而成的。

圖 36 至圖 39 為具格林之渦輪之壓力場分佈圖，透過觀察可得知，渦輪後方低壓區較單一渦輪時少，而格林翼後方低壓區也無過多的低壓區，因此格林翼具有幫助流體通過前方渦輪之作用。

當海流通過葉片時，水流會在葉片前端開始減速，且受到葉片轉速的影響，通過葉片後形成低速區。水流在葉片表面滑動，在葉片尾端形成速度較快的區域。此外，隨著離開葉片的距離增加，流體的流速也會提升，這表示流體對葉片產生正向作用，將流能轉換為葉片的動能。

我們可透過圖 35 至圖 39 得知，具格林翼之渦輪後方低速區較單一渦輪範圍小，因此流體在格林翼輔助下較能順利通過前方渦輪並轉換為葉片的動能。

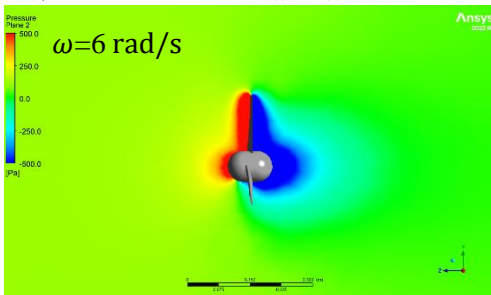


圖 35 單一渦輪之壓力場分佈圖

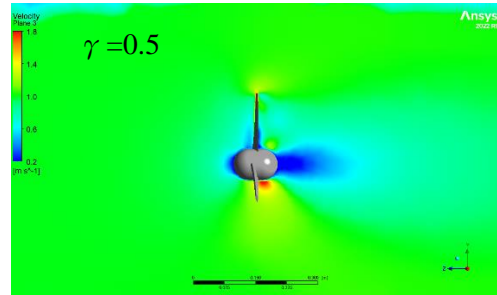


圖 35 單一渦輪之速度場分佈圖

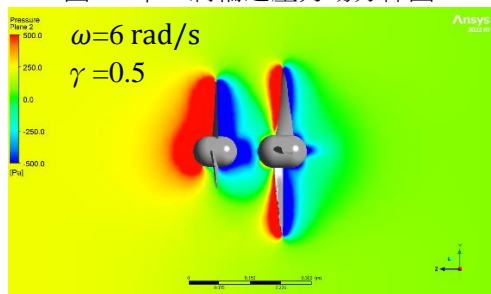


圖 32 渦輪在 $\alpha=0.8$ 時之壓力場分佈圖

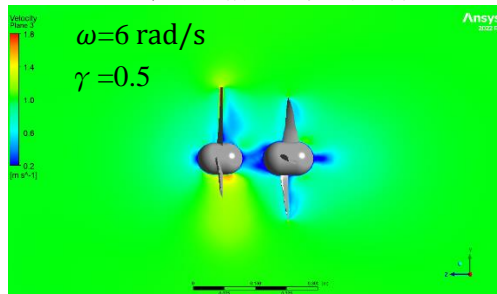


圖 36 渦輪在 $\alpha=0.8$ 時之壓力場分佈圖

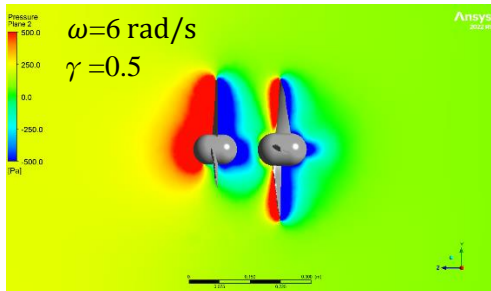


圖 33 渦輪在 $\alpha=1.0$ 時之壓力場分佈圖

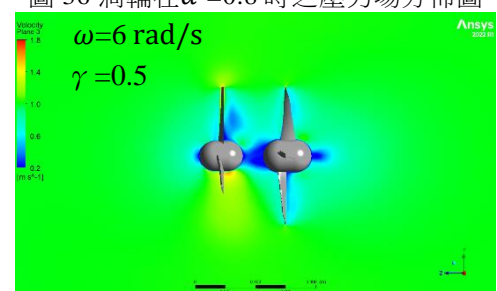


圖 37 渦輪在 $\alpha=1.0$ 時之壓力場分佈圖

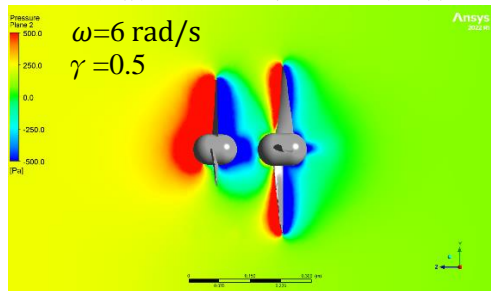


圖 34 渦輪在 $\alpha=1.2$ 時之壓力場分佈圖

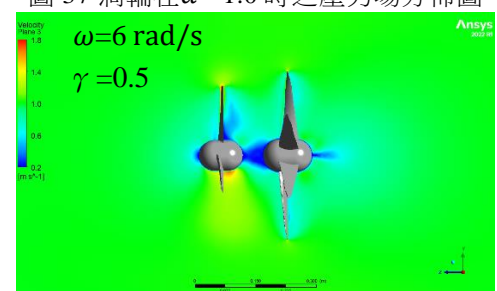


圖 38 渦輪在 $\alpha=1.2$ 時之壓力場分佈圖

3-3 速度場分析

3-4 流場分析

為了進一步分析渦輪機葉片末端之流場變化，圖 39 到圖 42 為流場之速度向量分佈圖。透過觀察可得知，圖 43 之單一渦輪之葉片尖端外緣有較多的速度向量，並且存在紊亂的情況。圖 44 到圖 46 為具格林翼之渦輪，渦輪葉片尖端部份我們觀察到葉片尖端部分的速度分量較為平順，並且較少出現互相影響的情況。

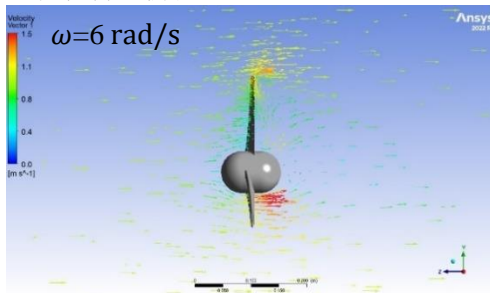


圖 39 單一渦輪之速度向量分佈圖

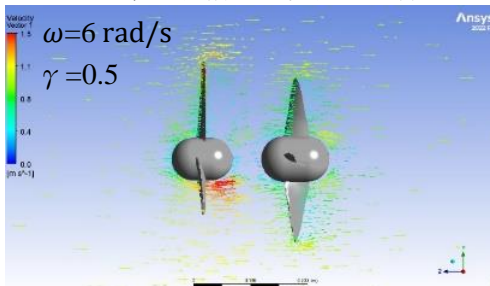


圖 40 格林翼 $\alpha = 0.8$ 與渦輪之速度向量分佈圖

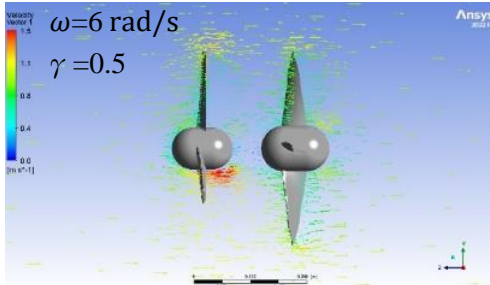


圖 41 格林翼 $\alpha = 1.0$ 與渦輪之速度向量分佈圖

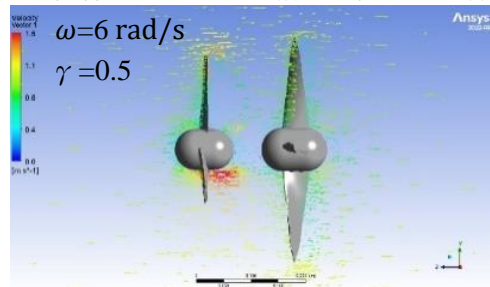


圖 42 格林翼 $\alpha = 1.2$ 與渦輪之速度向量分佈圖

3-5 單一渦輪葉片分析

圖 43 至圖 46 為關於渦輪葉片正面壓力分析圖。圖 47 透過觀察可發現，單一渦輪之葉片正面受海

流正面壓力，壓力主要集中在葉片尖端邊緣。圖 44 至圖 46 中可得知，具格林翼之渦輪葉片正面所受到之壓力較大，高壓分佈從葉片中段至葉片尖部逐步遞增，而隨著格林翼葉片數目的增多，高壓區也有些微的增大。圖 47 至圖 50 為渦輪葉片背面壓力分析圖。從圖 47 中可得知，負壓力集中在葉片根部靠近輪殼的位置，而負壓也向葉片尖部隨之遞減。圖 48 至圖 50 中可觀察到，我們可以觀察到葉片上並沒有集中的負壓力，僅有些許的負壓力分佈在葉片邊緣。

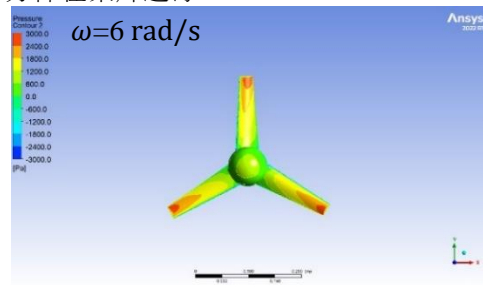


圖 43 單一渦輪之正面壓力分佈圖

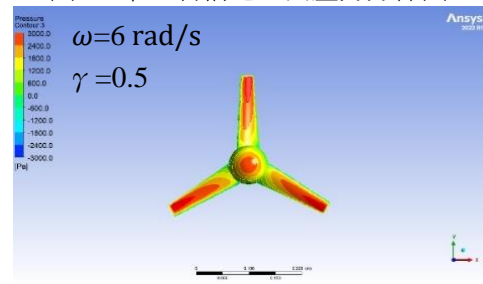


圖 44 格林翼 $\alpha = 0.8$ 與渦輪之葉片正面壓力圖

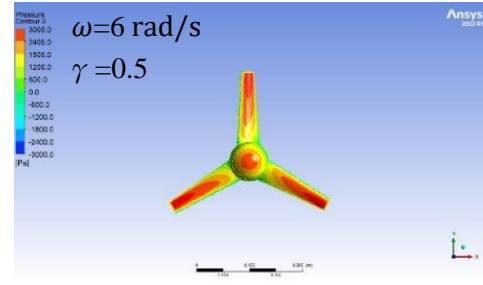


圖 45 格林翼 $\alpha = 1.0$ 與渦輪之葉片正面壓力圖

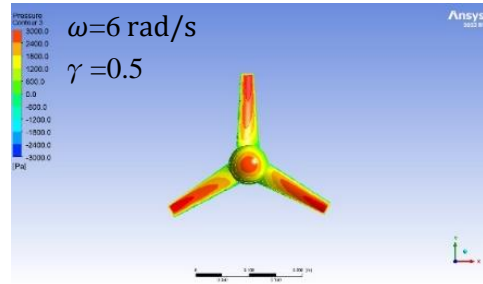


圖 46 格林翼 $\alpha = 1.2$ 與渦輪之葉片正面壓力圖

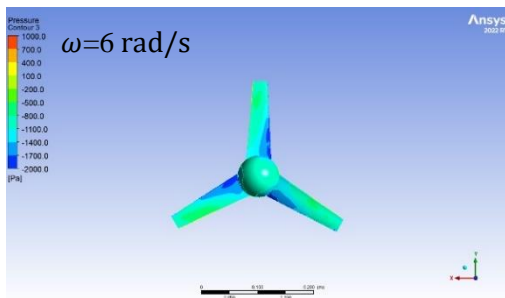


圖 47 單一渦輪之背面壓力分佈圖

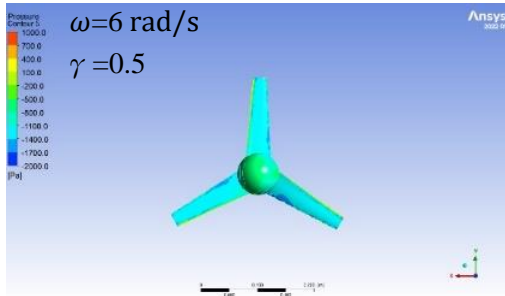


圖 48 格林翼 $\alpha = 0.8$ 與渦輪之葉片正面壓力圖

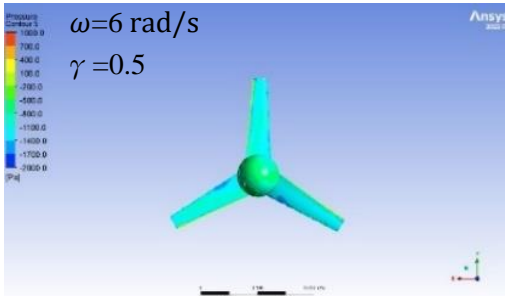


圖 49 格林翼 $\alpha = 1.0$ 與渦輪之葉片背面壓力圖

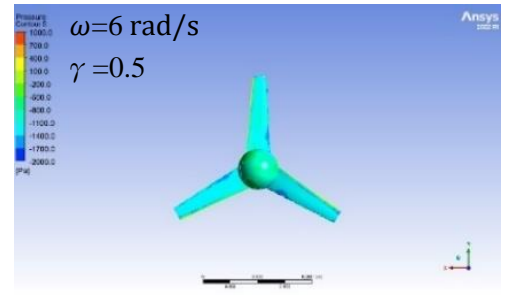


圖 50 格林翼 $\alpha = 1.2$ 與渦輪之葉片背面壓力圖

3-6 渦輪性能比較

圖 51 為渦輪在單獨運轉情況和具格林翼情況下之轉速 ω 與輸出功率 P 的關係。由圖 51 中可發現，在 $\omega=2 \text{ rad/s} \sim 10 \text{ rad/s}$ 時，具格林翼之渦輪輸出功率較單一渦輪大，其中單一渦輪在 $\omega=6 \text{ rad/s}$ 時有最大輸出功率 $P = 1.235 \text{ W}$ 。而當渦輪轉速 $\omega=6 \text{ rad/s}$ 且格林翼 $\gamma=0.5$ 時， $\alpha=0.8$ 、 $\alpha=1.0$ 和 $\alpha=1.2$ 有最大輸出功率 P 分別為 1.6303 W 、 1.6230 W 和 1.6571 W ，最大輸出功率也較單一渦輪約略增加 32.1%、31.4% 和 34.1%。

圖 52 為渦輪在單獨運轉情況和具格林翼情況下之功率係數 C_p 與葉尖速比 TSR 之關係。由圖 52 中可得知，在 $TSR=0.087 \sim 1.75$ 時，具格林翼之渦輪皆有較大之 C_p 。其中在 $TSR=1.05$ 時，單一渦輪 $C_p=0.2428$ ，具格林翼 $B=4$ 之渦輪在 $\alpha=0.8$ 、 $\alpha=1.0$ 和 $\alpha=1.2$ 情況下， C_p 分別為 0.3215、0.3201 和 0.3268。其中，具格林翼 $B=4$ 之渦輪在 $\alpha=1.2$ 有較高的功率係數，相較於渦輪在 $\alpha=0.8$ 和 $\alpha=1.0$ 時之功率係數約高 1.6% 和 2.1%。

由圖 53 進一步探討渦輪在不同格林翼直徑比和數量時的功率關係圖，我們可得知，格林翼直徑比 $\alpha=0.8$ 、 $\alpha=1.0$ 和 $\alpha=1.2$ 時，具格林翼 $B=4$ 之渦輪有相對較大的輸出功率，且隨著格林翼葉片數量增多，渦輪輸出功率隨之遞減。而具格林翼 $B=4$ 之渦輪在 $\alpha=1.2$ 之功率為 1.6571 W ，約略大於 $\alpha=0.8$ 和 $\alpha=1.0$ 之輸出功率 1.6% 和 2.1%。

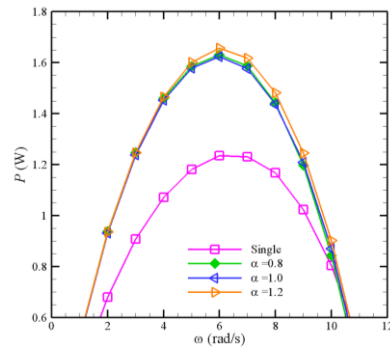


圖 51 單一渦輪與具格林翼之渦輪之轉速 ω 與輸出功率 P 之關係

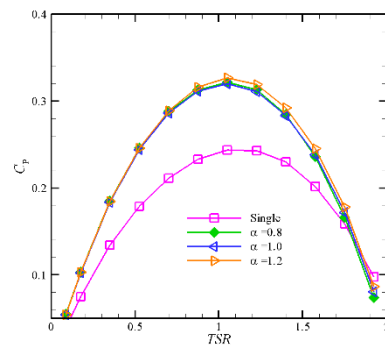


圖 52 單一渦輪與具格林翼之渦輪之功率係數 C_p 與葉尖速比 TSR 之關係

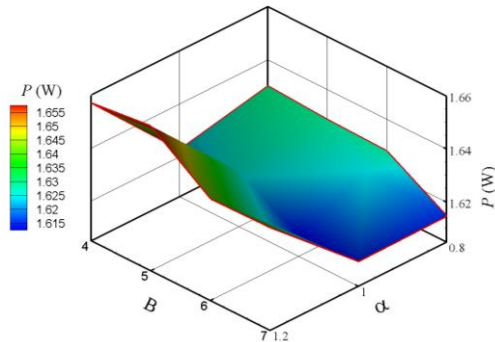


圖 53 渦輪在不同格林翼葉片數量和直徑比之功率關係圖

3-7 水槽實驗

本節為渦輪測試實驗，渦輪分為單一渦輪、具格林翼 $B=4$ ($\alpha=0.8$) 之渦輪、具格林翼 $B=4$ ($\alpha=1.0$) 之渦輪和具格林翼 $B=4$ ($\alpha=1.2$) 之渦輪。水槽水流之流速利用皮托管進行量測，量測結果發現水流流速為 $V=0.7$ m/s，經實驗結果發現，單一渦輪在此條件下，測量出的電流為 23 mA，電壓為 17.5 V，而得出的輸出功率 $P=0.403$ W，而具格林翼 $B=4$ 之渦輪在 $\alpha=0.8$ 、 $\alpha=1.0$ 和 $\alpha=1.2$ 時測量之電流分別為 26 mA、24 mA 和 30 mA，電壓分別為 18.1 V、17.7 V 和 18.4 V，而得出的輸出功率 P 分別為 0.471 W、0.425 W 和 0.552 W。因此我們能得知具格林翼 $B=4$ 之渦輪在 $\alpha=1.2$ 時有較高之輸出功率，且輸出功率相較於單一渦輪高於 36.9%。

結論

本研究探討單一渦輪與具格林翼之渦輪應用於海流發電之模擬分析，並使用 3D 繪圖軟體 Rhino 繪製葉片幾何，再將幾何模型匯入 Ansys-Fluent 分析軟體進行數值模擬分析，求得流場的流

線場、壓力場、速度場與速度流線場分佈以及渦輪機葉片之正面壓力與背面壓力，並由數值模擬分析找出最佳之幾何模型參數，再針對渦輪機葉片之性能進行分析，以扭矩、輸出功率與功率係數尋求渦輪機最佳性能。

1. 本研究之單一渦輪受到海流推動作用，分析當海流流速 $V=1$ m/s 時，在不同轉速下之性能分析，可以發現到，當 $\omega=6$ rad/s，有最高輸出功率 $P=1.235$ W，而在 $TSR=1.05$ 時，有最佳之 $C_p=0.2435$ 。
2. 具格林翼之渦輪，當渦輪轉速 $\omega=6$ rad/s 且格林翼 $\gamma=0.5$ 時， $\alpha=0.8$ 、 $\alpha=1.0$ 和 $\alpha=1.2$ 有最大輸出功率 P 分別為 1.6303 W、1.6230 W 和 1.6571 W，最大輸出功率也較單一渦輪分別增加 32.1%、31.4% 和 34.1%。
3. 在 $TSR=1.05$ 時，具格林翼 $B=4$ 之渦輪在 $\alpha=0.8$ 、 $\alpha=1.0$ 和 $\alpha=1.2$ 情況下，功率係數 C_p 分別為 0.3215、0.3201 和 0.3268，其中具格林翼 $B=4$ 之渦輪在 $\alpha=1.2$ 有最高的功率係數，相較於渦輪在 $\alpha=0.8$ 和 $\alpha=1.0$ 時之功率係數約高 1.6% 和 2.1%。
4. 水槽實驗結果發現，在相同流速 $V=0.7$ m/s 情況下，單一渦輪之輸出功率為 $P=0.403$ W，而具格林翼 $B=4$ 之渦輪在 $\alpha=0.8$ 、 $\alpha=1.0$ 和 $\alpha=1.2$ 時，輸出功率 P 分別為 0.471 W、0.425 W 和 0.552 W，相較於單一渦輪之輸出功率也分別約高 16.8%、5.5% 和 36.9%。
5. 模擬分析和水槽實驗之結果均顯示格林翼 $B=4$ 之渦輪在 $\alpha=1.2$ 皆有最大輸出功率，且具格林翼渦輪較單一渦輪之輸出功率在模擬分析和水槽實驗分別高出 34.1% 和 36.9%。因此，可得知具格林翼 $B=4$ 之渦輪在 $\alpha=1.2$ 情況下具有最佳的性能，此組合也為格林翼和渦輪之最佳搭配。

表 5 實驗測量結果

渦輪組合	實測電流(mA)	實測電壓(V)	實測輸出功率(W)
單一渦輪	23	17.5	0.403
具格林翼渦輪, $\alpha=0.8$	26	18.1	0.471
具格林翼渦輪, $\alpha=1.0$	24	17.7	0.425
具格林翼渦輪, $\alpha=1.2$	30	18.4	0.552

Study on the Performance Enhancement of Horizontal Axis Turbines in Tidal Current Power Generator with Grim Vane

Yu WS Yang MH***

*Department of Naval Architecture and Ocean Engineerin,
National Kaohsiung University of Science and Technology

**Department of Naval Architecture and Ocean Engineerin,
National Kaohsiung University of Science and Technology

Keywords: Grim Vane, Current Energy, Horizontal Axis Turbine, Marine Propulsion System, Power Coefficient

ABSTRACT

In accordance with the United Nations' 17 Sustainable Development Goals, specifically Goal 7 - Affordable and Clean Energy, and the target of achieving net-zero carbon emissions by 2050, the urgency and importance of renewable energy development are highlighted. With Taiwan surrounded by oceans, it possesses abundant marine resources, making it highly suitable for the development of marine energy.

The Green Vane is a freely rotating system installed behind the propeller of a vessel. Its function is to extract energy from the wake behind the propeller and converting the energy into propulsion for increasing the thrust force of the vessel. This study integrates the Green Wing firstly with a horizontal axis turbine generator.

To investigate and explore the effects of performance enhancement of the horizontal-axis turbine with Green Wing, the velocity field, streamlines and pressure field are analyzed. Furthermore, overall performance parameters, such as output power, tip-speed ratio and power coefficient of the horizontal axis turbine with Green Vane are depicted.

Ansys_Fluent is applied in simulations of turbines with and without Green Vane, at current velocity of 1 m/s. The turbine with Green Vane achieves its highest output power of 1.6571 W at rotational speed of 6 rad/s. At tip-speed ratio 1.05, an optimal power coefficient of 0.3268 is performed by the turbine with Green Wing and is 34.1% higher than that of turbine without Green Wing.

In the experiment, at flow velocity of 0.7 m/s, the turbine with Green Vane behaves a highest output power of 0.552 W. Compared to a single turbine without Green Vane, it has an increase in output power of 36.9%. The integration of the Green Vane with a horizontal axis turbine is demonstrated with well innovation and applicability, and making a meaningful contribution to the ocean energy.