

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

大型風力機控制器設計研究
Controller Design of a Large Wind Turbine

計畫編號：1042001INER030

受委託機關(構)：國立臺灣大學嚴慶齡工業發展基金會合設
工業研究中心

計畫主持人：國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系 江茂雄教授

聯絡電話：02-3366 3730

E-mail address：mhchiang@ntu.edu.tw

核研所聯絡人員：林彥廷

報告日期：104 年 11 月 30 日

中文摘要

本計畫旨在發展 5MW 離岸型風力發電之全機運轉控制模式，整合葉片空氣動力、風機機組動態、發電機、傳動系統、葉片旋角控制(pitch control)系統、機艙轉向控制(yaw control)、波浪力、控制系統等，以風速作為輸入，模擬風機運轉之動態特性，建立詳細之全系統分析能力，整合 AeroDyne(空氣動力)、ADAMS(風機系統動態)、MATLAB/SIMULINK(控制系統動態分析、波浪力)、進行浮動式離岸型風力發電機之全系統動態模擬，可分析離岸型風力發電機不同風況下之運動狀態，進一步整合控制系統進行葉片旋角(pitch)控制及機艙轉向(yaw)控制。不同軟體之溝通及介面整合將是相當具挑戰性之問題。發展全機運轉控制策略，包含額定轉速前之發電機最大功率追蹤之轉速控制，以及達額定轉速後之葉片旋角控制以維持額定功率輸出，並可藉由實驗室已發展之葉片旋角控制系統，實現 hardware-in-the-loop 之分析，可兼顧全機動台模擬與葉片旋角控制實驗。

關鍵詞：風力發電機、旋角控制、轉向控制、液壓系統、動態模擬、整合模擬、轉速控制、恆功率輸出控制

Abstract

The objective of the research is to develop controllers and control strategies for the overall system of a 5MW wind turbine. By integrating the blade aerodynamics, turbine mechanism dynamics, generator dynamics, pitch control systems, wave force, and controllers, the overall system dynamic simulation can be achieved according to different wind conditions. By the integration of the software, including AeroDyne (aerodynamics), ADAMS (mechanism dynamics), MATLAB/SIMULINK (generator, controller, wave force), the co-simulation can be implemented. The control strategies for the operation of overall wind turbine is analyzed and designed. Besides, the test rig of the pitch control system Developed in the AFPCL, NTU, can also be used in this project to combine the dynamic simulation of wind turbine to achieve Hardware-in-the-loop.

Keywords: wind turbine, pitch control, yaw control, hydraulic system, dynamic simulation, co-simulation, rotational speed control, constant output power control.

目錄

中文摘要	II
Abstract	III
目錄	IV
壹、計畫緣起與目的	1
一、研究背景	1
二、國內外有關本計畫之研究情況、重要參考文獻	3
貳、研究方法與過程	11
一、本計畫採用之研究方法及進行步驟	12
二、風力發電機運轉原理及架構	12
三、風力發電機模擬軟體介紹	12
(一) 風力發電機模擬軟體 FAST	16
(二) 氣動力模擬軟體 AeroDyn(Aerodynamics)介紹	17
(三) 風況產生軟體 IECWind 與 TurbSim 介紹	18
(四) 動態模擬軟體 ADAMS 介紹	19
四、NREL 離岸型風力發電機運動模型建立	19
(一)塔架資料檔模型建立	19
(二)葉片資料檔模型建立	20
(三)NREL 5MW 機艙 3D 幾何建立	21

五、NREL 離岸風機葉片旋角控制系統設計及建模	22
(一) 變轉速泵控液壓伺服系統數學模型	22
(二) 變旋角液壓控制系統控制器設計	24
六、直驅式永磁同步發電機系統	26
(一) 直驅式永磁同步發電機數學模式	27
(二) 磁場導向控制	31
參、主要發現與結論	32
一、風力發電機開迴路液壓伺服系統模擬	32
二、永磁同步發電機系統模擬	33
三、開迴路液壓旋角系統整合風力發電機全機系統模擬	36
四、第 I 區低於額定風速區追蹤最佳尖速比轉速控制模擬	40
五、第 II 區額定風速以上之恆功率控制模擬	43
六、全區運轉控制模擬	45
七、結論	48
參考文獻	49

壹、計畫緣起與目的

一. 研究背景

全球風能協會(Global Wind Energy Council) 統計，在過去數年到 2013 年風能市場是持續且激烈的成長，在未來幾年的市場趨勢於多元化。經濟合作暨發展組織 (Organization for Economic Cooperation and Development, OECD) 以外的新市場也會不斷出現。經合組織之風能市場以接近兩位數的百分比成長，代表風能市場需求越來越增長。大多數在經合組織以外的市場在未來數年也會成長。

目前化石燃料發電雖然還是占相當大多數，但全球環保意識的抬頭，出現碳價格機制。一些區域和國家已經給予了一定的碳市場。過去石油擁有的價值目前已經逐漸減少，近幾年來石油越來越減少的情形下，價格也慢慢上漲。能源的缺少與經濟的動盪，使得風能等可再生能源的競爭力大大的提升。而全球風能協會(Global Wind Energy Council, GWEC)也預測了 2014 年~2018 年的風能市場，如圖 1。

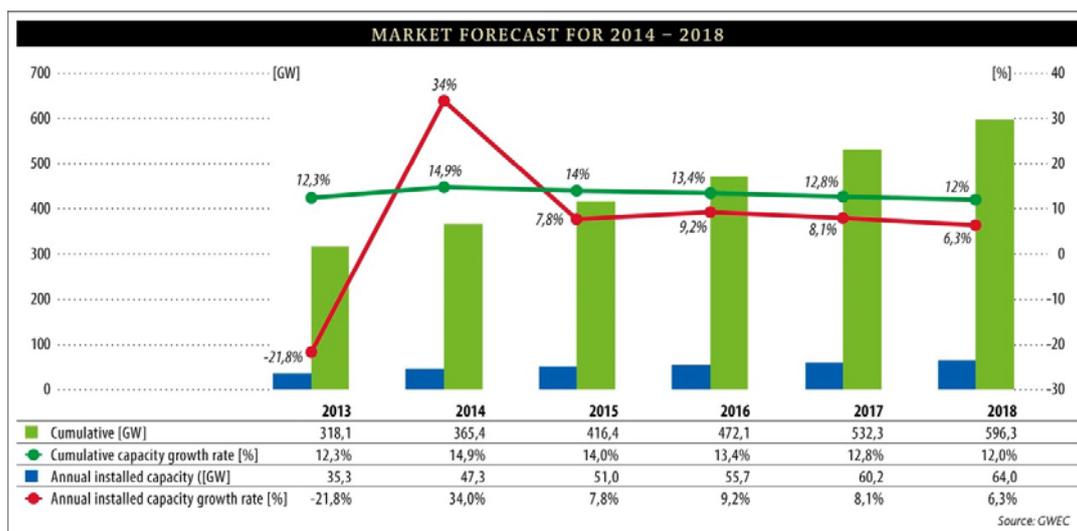


圖 1：2014~2018 年的市場預測 (資料來源:Global Wind Energy Council)

離岸風力發電具有相當大的潛能，可滿足歐洲能源需求的七倍，美國能源需求的五倍。離岸風力發電是一種相對較新的技術，因此未來技術會更推進而使成本降低，有助於離岸風電更有效提升短期成本競爭力。而世界各地政府的能源規劃已經將離岸風場技術納入。世界上離岸風場超過 90% 安裝歐洲北部，大部分在波羅的海、愛爾蘭的海域以及英吉利海峽。其他大部分位於中國東部沿海。海上風電是歐洲重要的約束性指標來源，中國政府也為自訂在 2020 年要在海上安裝達到 30 GW 離岸風電的目標。而美國方面，離岸具有良好的風力資源，但目前很多政策正在開發，尚未安裝任何離岸風力發電。到 2020 年全球離岸風場的容量，大概可以佔全球風機容量的 10%。至 2012 年離岸風場全球累積容量如圖 2:

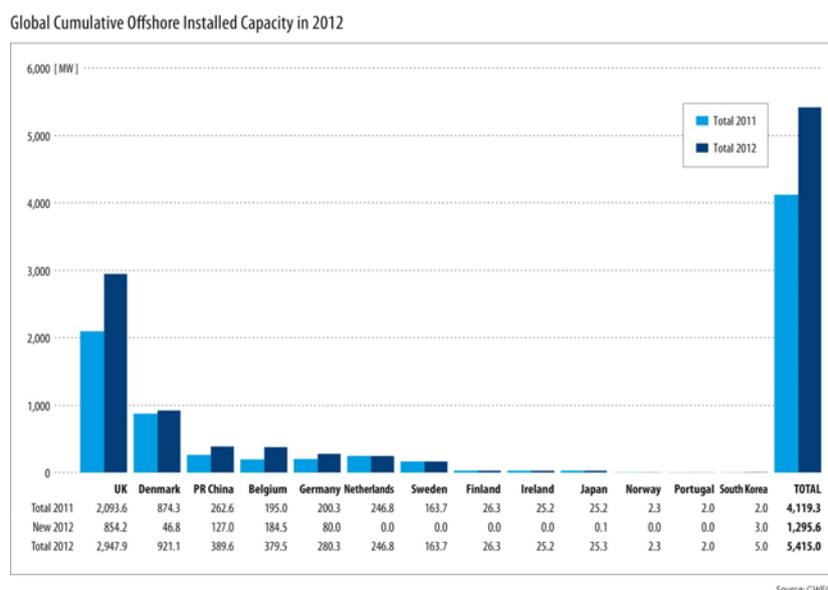


圖 2：2012 年離岸風場全球累積容量

隨著陸上型風力發電機建置逐漸飽和，離岸型風力發電機已成為近年來世界各國爭相發展之重點綠色能源。台灣離岸風能蘊含豐富約 48,000MW。風能風力發電已被我國政府列為未來重要之綠色能源，依據行政院所提出『千架海陸風力機』之規劃，我國至 2010 年陸域風機已裝置 268 組共 519MW，離岸風機尚未建置。規畫至 2015 年將完成陸域風機 350 組共 866MW，離岸風機 3 組共 15MW。而至 2030 年將完成陸域風機 450 組共 1,200MW，離岸風機 600 組共 3,000MW。換言之，陸

域風機將再增建約 200 組，已近台灣陸地之飽和。而海域之離岸風力發電機組，將於 2030 年從無到建立 600 組，達到行政院所提出『千架海陸風力機』之目標。台電公司及業界，如台塑、德商英威華等公司，已規劃之陸上型風力發電機也漸趨飽和，目前正積極規畫及建置國內離岸型風力發電場。國內有關離岸型風力發電機之研究，雖有能源國家型計畫正在執行，但其內容偏向離岸風力發電之環境及應用評估，對離岸型風力發電機之機組技術相關問題，並未深入探討。

計畫主持人研究團隊，先期研究已成功整合空氣動力、風機機組動態及控制系統針對陸上型風力發電機進行分析，然對固定式及浮動式離岸型風力發電系統而言，需進一步整合波浪力，考慮共振及結構破壞，更進一步需整合靜態之應力及動態之振動模態分析。此分析技術目前國內無論產學研都闕如，是國內迫切亟需建立之離岸型風力發電系統分析能力。本計畫旨在發展 5MW 離岸型風力發電之全機運轉控制模式，整合葉片空氣動力、風機機組動態、發電機、傳動系統、葉片旋角控制(pitch control)系統、機艙轉向控制(yaw control)、波浪力、控制系統等，以風速作為輸入，模擬風機運轉之動態特性，建立詳細之全系統分析能力，整合 AeroDyne(空氣動力)、ADAMS(風機系統動態)、MATLAB/SIMULINK(控制系統動態分析、波浪力)、進行浮動式離岸型風力發電機之全系統動態模擬，可分析浮動式離岸型風力發電機不同風況下之運動狀態，進一步整合控制系統進行葉片旋角(pitch)控制及機艙轉向(yaw)控制。不同軟體之溝通及介面整合將是相當具挑戰性之問題。發展全機運轉控制策略，包含額定轉速前之發電機最大功率追蹤之轉速控制，以及達額定轉速後之葉片旋角控制以維持額定功率輸出，並藉由實驗室已發展之葉片旋角控制系統，實現 hardware-in-the-loop 之分析，可兼顧全機動台模擬與葉片旋角控制實驗。

二、國內外有關本計畫之研究情況、重要參考文獻

有關風力發電機組控制之研究，經蒐集近二十年之相關國內外重要期刊及研討會資訊，可清楚了解，國外學界也對風力發電機組之研究，

有越來越多投入之趨勢，以美國有關風力發電機組之碩博士論文之數量，近幾年來迅速增加，可見一般，投入研究之學校，如：MIT，George Tech 等。而德國風力發電研究所 DEWI(German Wind Energy Institute)[1]，更早已整合德國學術界與業界能量，投入風力發電之研究及應用。

以下就所蒐集之風力發電機組控制相關文獻進行分析，區分為六類，分別為風力發電機組回顧及分析；風力發電機數學模式建立；風力發電機螺距控制；風力發電機之發電機控制；離岸型風力發電機；發電機。

■ 風力發電機組回顧及分析

Ackermann (2000)[4]探討於風力發電相關技術之發展歷史回顧分析及未來展望，分別就機組及電廠管理進行探討。Crawford (2003) [6]為 MIT 2003 年博士論文，針對風力發電機組以 CAD 方式進行最佳化設計及分析。

■ 風力發電機數學模式建立

有關風力發電機數學模式建立之探討，自 1984 年起有陸續發表，Chaiyapinunt (1984)[7]為 Oregon state university 博士論文，探討水平軸風力發電機於偏航(Yaw)系統之線性數學模式及靜態之穩定性。Wan (1998)[8]以商業套裝軟體 ADAMSRTM/WT，模擬 UTEP 型風力發電機之暫態特性。Diop 等(1999)[9]亦探討水平軸可變螺距風力發電機之數學模式。Stol (2001)[10]為 University of Colorado at Boulder 之博士論文，探討水平軸風力發電機之動態建模(Dynamic Modeling)及控制。Lopez (2003)[11]以 Model-based 控制器應用於變速風力發電機，為 The university of Texas at EL PASO 之碩士論文。Rehfeldt (2003)[12]建立數學模式並以模糊控制應用於風力發電機。

綜合以上之相關文獻可知，目前有關風力發電機系統數學模式建立之探討，都集中於發電機性能之探討，對葉片之空氣動力特性，特別是

針對可變螺距(Pitch)葉片之探討，均相當簡化，而對可變螺距調控之液壓伺服系統之動態特性，皆無探討，由於風力發電機系統之發電穩定與可變螺距葉片系統之響應速度有極大之關係，故對可變螺距葉片系統之數學模式建立，應將液壓伺服系統之動態特性一併考量，同時調控葉片螺距後之空氣動力特性也應建立數學模式分析。

■ 風力發電機螺距控制

有關風力發電機螺距控制之研究已有不少發表[13-43]，隨著風力發電機技術之發展，由固定葉片螺距失速型、全葉片可變螺距型到變速型等。自 1980 年代中期之研究以固定葉片螺距失速型為探討之重點，Ali-Reza (1986)[13]及 Wilmshurst(1986)[14]均為此領域之發表，由於固定葉片螺距失速型之控制系統及控制策略相對簡易，其輸出電功率之性能也較不穩定，葉輪功率係數 C_p 亦較低。

1990 年後全葉片可變螺距型及變速型風力發電機之研究陸續發表 [16-43]，[16](1994)對如何維持變速風力發電機之主要輸出功率進行分析。[17](1996)針對配備自動控制連續可變傳輸之風力發電機之動態特性進行討論。[18](1997)以 PI 控制器對變速水平軸風力發電機進行控制。[19](1997)以 Predictive control 對小風力發電機具有高不穩定風速條件下進行控制。[20](1997)以實驗方式針對風力發電機之動態模式進行系統鑑定。[21](1998)以模式參考適應性控制對水平軸風力發電機進行變速控制。[22](2000)以強健性控制對連續可變速風力發電機探討。[23](2000)以 memory-based method 對變速風力發電機探討。[24](2000)以非線性及適應性控制對可變速風力發電機探討。[25](2000) 探討偏航(Yaw)控制對風力發電機結構動態影響。[26](2000) 探討以 Soft-stall control 對變速及失速控制風力發電機進行控制。[27](2002)以獨立螺距控制結合動子(rotor)位置回授降低風側向力及重力對風力發電機產生之疲勞(Fatigue)。[28](2003)以 H_∞ 控制對變速風力發電機進行控制探討。[29][30](2003)分別討論水平軸風力發電機之動態特性及控制。[31](2003)探討以非線性控制對變速及變螺距控制風力發電機進行控制。[32](2004)為 University of Colorado at Boulder 博士論文，以適應性控制對變速風力

發電機之扭力進行控制探討。[33] (2005)以螺距角度控制實現風力發電機于全運轉區域之輸出功率分級。[34](2005) 以非線性控制結合無速度回授，針對風力發電機進行控制。 [35](2006)、[36](2006)及[37](2006)以模糊控制針對風力發電機進行控制。[38](2006)以適應性控制達到風力發電機最大風能擷取之控制。[39](2006)以類神經控制針對小風力發電機控制。[40] (2006)以螺距角度控制實現風力發電機于全運轉區域之輸出功率分級。[41] (2006)以強健性控制實現風力發電機額定速度及可變輸出功率之控制。

綜合以上之相關文獻可知，目前有關風力發電機系統螺距控制之探討，經過近十年之發展，許多現代控制理論陸續已被應用於風力發電機系統螺距控制，達到不同之控制目標，如：轉速控制、輸出功率控制等。然而，除控制理論之外，針對螺距控制之驅動系統-液壓伺服控制系統之探討很少，液壓伺服控制系統應用於螺距控制之變螺距系統、制動系統及偏航(Yaw)系統，目前都以傳統閥控液壓缸系統實現，而傳統閥控液壓缸系統響應快但效率不佳，造成油溫上升迅速，故必須有較大之油箱及散熱裝置，如此亦增加機艙(Cabine)之重量，影響風力發電機之偏航控制(Yaw control)響應及機塔之結構。

■ 風力發電機之發電機探討

有關風力發電機之發電機探討，也有許多文獻[42-48]，目前風力發電機所使用之發電機以感應式非同步發電機為主，因其併網方法簡單，併網運轉穩定，維護方便、結構體積小、價格便宜。另外亦有同步發電機、永磁發電機之應用，但僅使用於小功率之風力發電機組。由於發電機部份，非本研究計畫之重點，故文獻回顧部份僅概述。

■ 離岸型風力發電機

有關離岸型風力發電機之探討，近年來逐漸發表[55-60]，美國國家再生能源實驗室(National Renewable Energy Laboratory, NREL) 積極投入離岸型風力發電機之研究[55-57]。然而，相關文獻多偏重於離岸型風力發電機之規劃、施工、海域平台設計等。

■ 發電機

國外已經有一些相關文獻針對永磁式同步發電機(Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG)建模的探討,其中主要是針對風力渦輪機(Wind Turbine)以及發電機控制等等相關的議題,其相關研究的整理如下:

如何有效地從大自然的風能中擷取能量,並有效率地傳送至發電機,一直是風力發電的議題之一。而能達到此效果的方法之一,便是最大功率追蹤(Maximum Power Point Tracking, MPPT)。文獻[61]探討如何將最大功率追蹤運用至升壓電路的永磁式同步發電機中。該文獻首先推導發電機側電壓在升壓電路下與開關時間、直流匯流排電壓的關係式,以此關係式推導從大自然中所能擷取的最大風能。利用得到的開關時間來控制開關,來讓發電機能實現最大的功率。文獻最後放上實驗結果圖,比較在不同轉速下直流匯流排電壓與開關時間的關係,並發現在不同轉速下,追蹤到最大功率時的開關時間幾乎一樣,藉此明白最大功率追蹤可經由計算最大功率點下升壓電路的開關時間來實現,也證明了該文獻最大功率追蹤的有效性。最大功率追蹤的實現除了文獻[61]提出的那個方法外,在文獻[62]中將當時的新興演算法--最大功率提取演算法(Maximum-Power-Extraction Algorithm, MPEA)應用於升壓電路的永磁式同步發電機中。該文獻首先介紹新技術的控制流程,並與當時舊有的演算法做比較。相較於舊有的演算法,新的技術包含了最大功率差速控制(maximum-power differential-speed, MPDS)與最大功率錯誤驅動(Maximum-Power Error-Driven, MPED)。該文獻介紹了最大功率差速控制與最大功率錯誤驅動的原理。最大功率差速控制的原理近似於爬坡法則(Hill-Climb Searching, HCS),是經由發電機轉速的變化來決定其動作。而最大功率錯誤驅動可避免風力渦輪機因為風速的瞬時跌落而失速,且在此系統下進行實驗時不需要機械感測器,這降低了建製系統所需的成本。在文末以實驗比較定電壓控制與新控制之間的差異,同時驗證新控制的有效性。文獻[63]提出以魏氏輻射基底類神經網路(Wilcoxon Radial Basis Function Network, WRBFN)(其中包含了爬坡法則)為基礎的最大功

率追蹤，並利用進階型粒子群優化(Modified Particle Swarm Optimization, MPSO)至魏氏輻射基底類神經網路中，以便增加魏氏輻射基底類神經網路的效率。該文獻同時解釋了直流匯流排電壓與最大功率點的關係，並利用新的最大功率追蹤來決定直流匯流排的參考電壓，藉由改變直流匯流排的參考電壓來達到最大的功率系數(power coefficient)。文末以實驗來驗證此方法的有效性。文獻[64]探討在發電機轉速不穩定的情況下，風力發電機組(Wind Turbine Generator System, WTGS)如何的配置。在轉速不穩定的情況下，該文獻將風力發電機組分成三個部份做探討--風速、風力渦輪機、驅動裝置。並在文末利用MATLAB/Simulink建製模型。

對於永磁式同步發電機而言，其主要的控制方法有幾種。而在此次整理中，主要介紹直接轉矩控制(Director Torque Control, DTC)與向量控制(Vector Control, VC)這兩種。由發電機所產生的電磁轉矩可作為發電機穩是否穩定的指標之一，因而便有學者提出直接控制電磁轉矩的技術--直接轉矩控制。文獻[65]將直接轉矩控制運用到永磁式同步馬達中。該文獻探討直接轉矩控制的理論，以及馬達在直接轉矩控制下的一些行為，並在文末以實作驗證直接轉矩控制的有效性。在直接轉矩控制逐漸運用於永磁式同步發電機之後，後人便一直為了減少電磁轉矩在穩態操作時的波動而提出許多改善的方法。開關週期的不固定是電磁轉矩波動的原因之一。文獻[66]提出在參考轉矩上加入了穩定開關頻率的條件，以便解決直接轉矩控制一直以來都有的開關頻率不穩定問題。在穩定開關頻率的同時，也能減少電磁轉矩在穩定操作時的波動。以往直接轉矩控制的參考值都以定值為主，然而該文獻提出應當輸入三角波波形的參考值。該文獻利用開關穩定的條件，來求取的參考值的三角波形。藉由此參考值來讓發電機穩定時的波動不至於太大。文末利用實作來驗證此方法的有效性。由於直接轉矩控制的運作可避免使用到傳感器(senseless)，並以估測的方式作代替。文獻[67]加入滑模觀測器(Sliding Observer)至直接轉矩控制中。滑模觀測器乃是利用轉子的位置與定子電流來估測定子側磁通，該文獻在以空間向量模組(Space Vector Module, SVM)來實現直接轉矩控制的同時，加入滑模觀測器，並利用MATLAB/Simulink 建置模型來驗證滑模觀測器在直接轉矩控制中的有

效性。文獻[68]以空間向量模組來實現直接轉矩控制，並將預測的機制加入至直接轉矩控制中。該文獻利用預測機制來求得整流器開關的可能時間，並求得在此時間下的發電機的電磁轉矩，求得的電磁轉矩再與我們所期望的電磁轉矩做比較，而能明白預測下的開關時間是否適用。反覆進行操作以便求得整流器最適當的開關時間。文末利用 MATLAB/Simulink 模擬並比較發電機加入預測機制前後的差異。發現加入機制前，發電機電磁轉矩穩定時的波動要大於加入後的波動。這也代表加入機制後，發電機的運作確實比加入前要來得穩定。永磁式同步發電機有許多以向量控制技術為主的方法。文獻[69]在不考慮定子側電阻的跨壓下，分別分析了發電機在最大轉矩控制、功率因素控制、定電壓控制與定磁通控制下的運作，指出各個控制下對發電機的益處與壞處，並在文末通過實驗實現了定磁通控制。文獻[70]在向量控制內將模糊控制(fuzzy control)應用於 PI 控制器中。該文獻探討了永磁式同步發電機的穩態與暫態行為，藉此探討傳統向量控制的缺陷。針對此缺陷，該文獻提出利用模糊控制來找尋適當的 PI 參數輸入至 PI 控制器中，並在文末以 MATLAB/Simulink 實現此控制技術，並比較加入模糊控制前後的差異。文獻[71]利用傳統的向量控制與直接電流向量控制(direct-current vector control)來控制整流器的發電機側與電網側。該文獻解釋如何藉由使用傳統的向量控制與直接電流控制來有智慧的控制整流器的發電機側與電網側。在此控制實行的同時，也完成了最大功率提取、直流匯流排電壓的限制、虛功控制以及電網電壓支援控制。文末用 SimPowerSystem 來進行模擬分析。文獻[72]將向量控制以及滑動模式控制(sliding mode control, SMC)運用至永磁式發電機組中，並在文末以 MATLAB/Simulink 建置模型來比較這兩種控制的差異。

在雙饋式感應發電機的控制技術方面，文獻[73]藉由定向定子側磁通來實行直接轉矩控制與磁通控制於感應電機中。該文獻利用空間向量模組來實現開關時間，藉此穩定開關的頻率。由於此控制中的 PI 控制器的較傳統控制少，這情況加強了感應電機的暫態反應。最後以數位訊號處理器(Digital Signal Processor, DSP)來實現此控制技術。文獻[74]整理了與磁場定向控制(Field-oriented control, FOC)與直接轉矩控制相關的

文獻，並將磁場定向控制與直接轉矩控制運用至感應電機中，以便比較磁通定向控制與直接轉矩控制之間的差異。文獻[75]提出新的直接功率控制(Direct Power Control, DPC)策略，該文獻通過定子側磁通的位置，以及實虛功的誤差來決定整流器開關的狀態，並以此開關的狀態改變發電機轉子側的磁通。文末以 PSCAD/EMTDC 建製一個額定功率為 2MW 的雙饋式感應發電機，並在此系統中實現此控制技術。文獻[76]在直接功率控制中加入預測的機制。該文獻首先探討預測下發電機定子側的實、虛功的行為，並解出實、虛功的波動。將此波動做偏微分，找出在何種開關時間下，實虛功的波動為最小值。在文末以 MATLAB/Simulink 模擬實現此控制技術。文獻[77]整理了到 2013 年為止，與雙饋式感應發電機相關的各種控制策略。包含典型的直接轉矩控制、向量控制以及電網電壓不平衡時的控制策略等等，並在文中穿插實驗結果驗證。

而在電網側控制方面，大部分的永磁同步發電機多以電壓定向控制(Voltage Oriented Control, VOC)為主。而文獻[78]將此控制運用至具有 LCL 的濾波器電路中，以便解決 LCL 電路需要共振阻尼(resonance damping)的問題，並對其進行探討。在系統效率分析部份，文獻中較少探討大型風機之電能轉換效率，但是文獻[82]中提出了以新型 SiC 為材料之 MOSFET 與 Schottky Diode 應用於風力發電電能轉換器時對效率之影響，所採用之發電機模型為永磁式，轉換器為傳統背對背型式，由此文獻可知，採用相同之控制與最大功率追蹤策略，但系統轉換效率仍會受採用之功率元件影響。而風力發電系統之轉換效率會直接影響風能利用之整體效率，因此效率分析在本計畫中亦有其重要性。

貳、研究方法與過程

一、本計畫採用之研究方法及進行步驟

1. 文獻資料收集及分析

就 5MW 離岸型風力發電機動態系統數學模式方面，除目前收集之參考文獻外，將運用現代控制理論，發展更強健性、智慧型之控制器，收集相關之發表論著，以作為控制器設計之參考。

2. 永磁同步發電機建模及動態模擬

5MW 離岸型風力發電機配置直驅式永磁同步發電機，將針對 5MW 永磁同步發電機推導其數學模式，以 MATLAB/SIMULINK 發展動態模擬程式，進行動態模擬分析。

3. 5MW 離岸風機葉片旋角控制系統設計分析

發展智慧型葉片旋角控制系統之控制器，並建立中鋼 5MW 離岸型風力發電機之葉片旋角(pitch)控制系統數學模式，以 MATLAB/SIMULINK 軟體實現，可驗證開迴路及閉迴路模擬，模擬響應。以驗證所設計葉片旋角控制系統之性能。

4. 發電機轉速控制器設計

低於額定風速區，針對風力發電機系統設計控制器進行發電機之轉速控制，以跟蹤風速的變化，風機追蹤最佳尖速比，維持風能係數最大值，以擷取該風速下風能的最大值。

5. 全機恆功率控制器設計

當風速達到額定風速後進入功率恆定區，此時風機轉速維持額定轉速，設計全機恆功率控制器，藉由葉片旋角系統調控，使發電機維持額定轉速，達到額定功率輸出，根據功率輸出的回授與額定功率的誤差，利用恆功率控制器調節適當的葉片旋角，使風機維持額定功率的輸出。

6. 全機運轉控制策略設計

設計規劃全機運轉之控制策略，需整合步驟 4 發電機轉速控制及步驟 5 全機定轉速控制，以做為不同風速下之操控模式設定。

7. 整合空氣動力、風機系統動態、控制系統動態分析、波浪力進行全系統動態模擬

解決整合 AeroDyne(空氣動力)、ADAMS(風機系統動態)、MATLAB/SIMULINK(控制系統動態分析、波浪力)等分析工具問題之後，進行 5MW 離岸型風力發電機之全系統動態模擬，針對不同風況下，驗證葉片旋角控制系統之性能，以及全系統之動態性能。

8. 全系統運轉閉迴路動態模擬

整合步驟 3 至步驟 7，進行全系統運轉之閉迴路模擬，可針對不同風況下，進行全系統運轉分析

二、風力發電機運轉原理及架構

風力發電機運轉原理，當風速達到切入風速後，帶動風力發電機的葉片轉動，經由轉子傳動系統驅動發電機發電，並透過變螺距系統與偏航系統來調節輸出功率，藉以達到額定功率的輸出。圖 3 為水平式風力發電機系統基本組成元件架構圖。目前 5MW 風力發電機都是此用水平軸上風型三葉片，其內部的子系統由轉子葉片、傳動系統、發電機、變螺距系統、偏航系統、控制系統、塔架與風向計等構成。

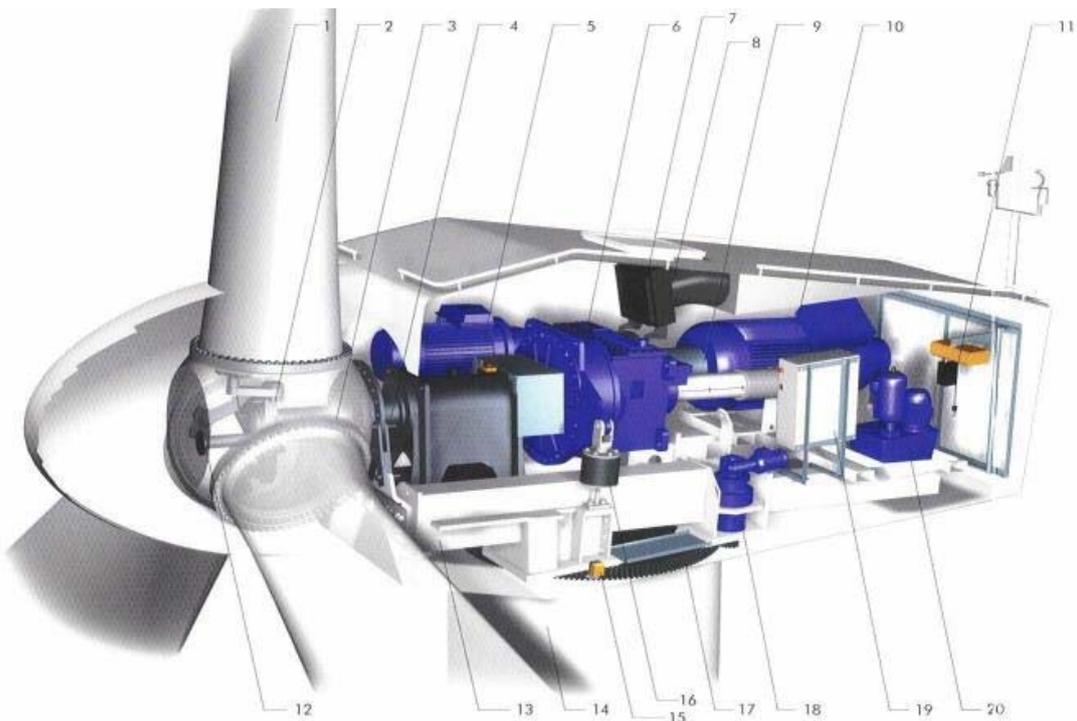
根據能量守恆定律，風能可由動能推算出來，所下式：

$$P_w = \frac{1}{2} m V_w^2 = \frac{1}{2} (A \rho V_w) V_w^2 = \frac{1}{2} A \rho V_w^3 \quad (1)$$

其中 A : 轉子葉片掃過面積

ρ : 空氣密度

V_w : 風速



1.Blade: 葉片	2.Blade hub: 葉輪輪轂
3.Blade bearing: 葉片軸承	4.Main shaft: 主傳動軸
5.Secondary generator: 副發電機	6.Gearbox: 齒輪箱
7.Disc brake: 碟式煞車	8.Oil cooler: 油溫冷卻器
9.Cardan shaft: 萬向接軸	10.Primary generator: 主發電機
11.Service crane: 維修用小吊車	12.Pitch cylinder: 螺距角控制
13.Machine foundation: 機組座架	14.Tower: 塔架
15.Yaw control: 轉向控制	16.Gear tie rod: 齒輪箱支撐桿
17.Yaw ring: 轉向齒輪盤	18.Yaw gears: 轉向齒輪
19.VMP top control unit: 塔頂控制單	20. Hydraulic unit: 液壓動力單元

圖 3 水平式風力發電機系統基本組成元件架構圖

由式(1)可知轉子葉片掃過的面積固定，空氣密度假設固定，風能正比於風速的三次方，因此影響風能獲取的大小最大的因素是風速。

根據 Lanchester-Betz 效率可知，風力發電機無法利用全部的風能，其極限效率為 $16/27$ (59.3%)，一般水平軸上風型三葉片風力發電機的效

率介於 30%~50%之間，此效率由功率係數(Power coefficient) $C_p(\lambda, \beta)$ 來決定，功率係數的定義如下：

$$C_p(\lambda, \beta) = \frac{P_w}{\frac{1}{2} \rho A V_w^3} \quad (2)$$

其中 P_w : 風機獲取的風能大小
 λ : 尖速比(tip-speed ratio)
 β : 轉子葉片的螺距角(pitch angle)

風在葉片翼型產生的升力造成葉輪端的扭矩，其扭矩係數(Torque coefficient)為：

$$C_q(\lambda, \beta) = \frac{T_w}{\frac{1}{2} \rho A V_w^2 R} \quad (3)$$

其中 T_w : 風機在葉輪端獲取的扭矩大小
 R : 轉子葉片的半徑

三、風力發電機模擬軟體介紹

本研究採用 AeroDyn(AeroDynamics)、IEC(IEC wind)、FAST(Fatigue, Aerodynamic, Structures, and Turbulence)與 ADAMS(Automatic Dynamic Analysis of Mechanical System)及 MATLAB/SIMULINK 建構大型離岸風力發電機，各軟體各負責不同部份，IECWind 軟體負責產生風況，AeroDyn 軟體負責葉片氣動力計算，FAST 軟體負責建構風力發電機的運動模型，ADAMS 軟體負責建構全機組機構動態模擬，MATLAB/SIMULINK 軟體負責建構發電機、旋角控制系統及全機控制系統之動態模擬。

圖 4 表示四個軟體之間相互操作模式，分成兩種運算方式，AeroDyn 軟體以及 MATLAB/SIMULINK 分別在這兩種方法負責計算葉片氣動力以及建立發電機、變旋角控制系統，第一種方法：FAST 軟體負責風力發電機幾何外型建構與機構動態模擬，AeroDyn 則內建在 FAST 裡面。第二種方法：執行 FAST 軟體輸出風機模型檔案至 ADAMS 軟體中，在 ADAMS 軟體中模擬風機的機構動態，透過 DLL(Dynamic link library)的模式與 AeroDyn 連結，藉以提供氣動力的計算。

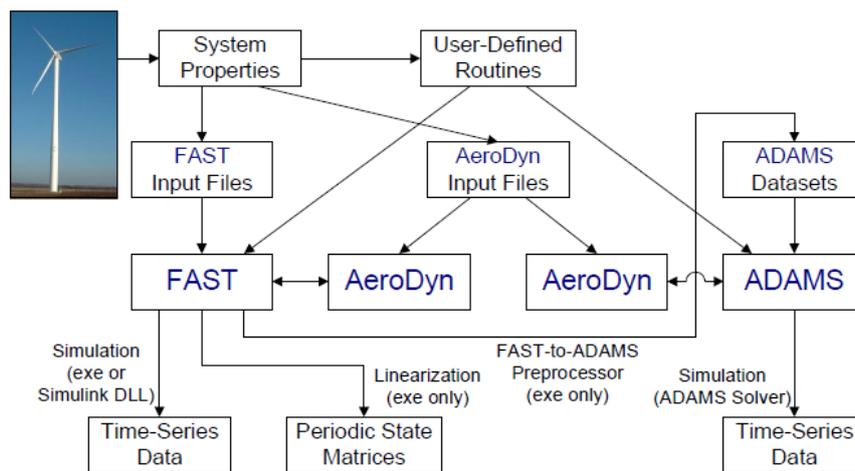


圖 4 整合軟體操作模式圖[83]

(一) 風力發電機模擬軟體 FAST(Fatigue, Aerodynamic, Structures, and Turbulence)介紹

FAST[41]軟體是由美國國家再生能源實驗室(National Renewable Energy Laboratory)簡稱 NREL 和美國奧勒岡州大學(Oregon State University)合作研發出來，可用來建構和分析二葉及三葉片水平軸式風力機。其最多擁有 24 個自由度 DOF(degrees of freedom)的限制，但仍然可以建構出大部分常見的風力機外型和控制系統。

圖 5 是執行 FAST 軟體需要的輸入檔，共分成 Primary、Tower、Blade(s)、Furling 與 ADAMS-Specific 等輸入檔，Primary 裡面包含簡單的初始條件、發電機、變旋角及偏航系統控制、風機幾何外型尺寸建構、風機質量及慣性矩等。傳動系統採用等效彈簧與阻尼系統及齒輪比的轉換，作為增速齒輪箱或直驅式之用。Tower 與 Blade(s)輸入檔把塔架與葉片建構成柔性體(Flexible)。葉片柔性體的特性是藉由沿著翼展(span)上特定分布的剛性(distributed stiffness)和質量特性(mass properties)，並且經由等效的多項式係數(polynomial)來指定他們的模態外型(mode shape)。ADAMS-Specific 裡面包含由 FAST 軟體產生的風機模型匯入到 ADAMS 軟體上的尺寸規格，以及輸出檔案格式，之後便可以在 ADAMS 軟體上觀看模擬結果。

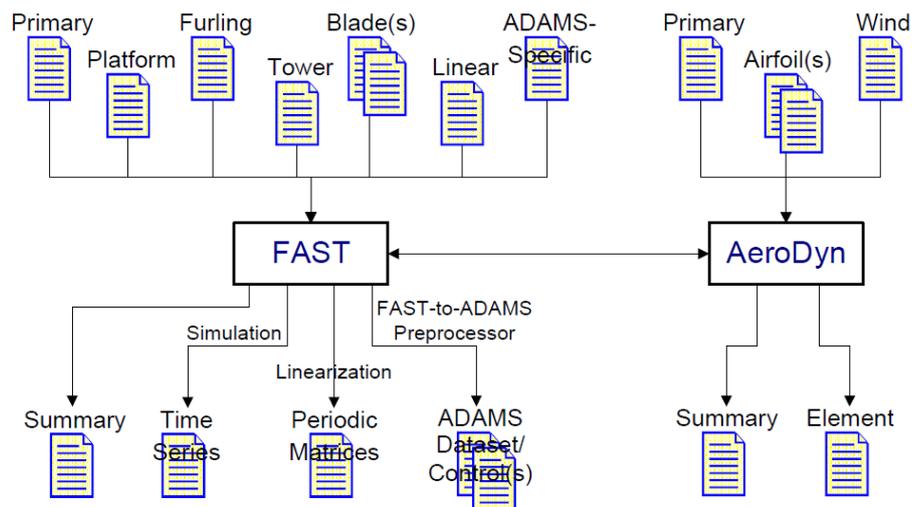


圖 5 FAST 與 AeroDyn 軟體的輸入及輸出檔[83]

(二)氣動力模擬軟體 AeroDyn(Aerodynamics)介紹

AeroDyn[84]是由 NWTC 與美國猶他大學(University of Utah)共同開發，它是以元素層級(element-level)來對葉片的旋角軸(pitch axis)作畫分，並對每個元素的節點施加氣動力。

AeroDyn 需要三個輸入資料檔，如圖 5 所示，Primary 內部包含計算氣動力方法，採用葉片元素理論(Blade element momentum theory, BEM)，及參數的設定，如輪穀高度、空氣密度與黏滯係數等，葉片的不同元素的弦長(chord)、翼展(span)長度、扭轉角(twist angle)與對應的翼型資料(airfoil file)，本論文的葉片共分成 20 等份。Airfoil(s)裡面包含不同的攻角(angle of attack)對應的升力、阻力與變距力矩係數(Lift, Drag, and Pitching moment coefficient)，葉片翼型的資料可經由風洞實驗或 CFD 軟體計算獲得。Wind 風的資料檔是由 IECwind 或 TurbSim 軟體產生，可以就不同風況，如定風、陣風、風向改變等，模擬實際的風況，增加模擬結果的可信度。

(三)風況產生軟體 IECWind 與 TurbSim 介紹

IECWind 和(IEC wind)與 TurbSim(Turbulent Simulation)[43]皆是由 NREL(National Renewable Energy Laboratory, 國家再生能源實驗室)中的 NWTC(National Wind Technology Center, 國家風能科技中心)共同開發的軟體。

IECWind 是提供 AeorDyn 與 FAST 軟體風場資料檔來作為風場的輸入，其符合 IEC61400-1 的規範，其風場資料檔可任意修改成使用者所需的風場。TurbSim [85]主要是作為產生隨機、全場域及紊流風況模擬器。其產生的風況資料檔常用的有兩種，分別是 hub-height wind files(輪穀高度資料檔)與 full-field turbulence wind data files(全場域紊流風資料檔)，前者包含時間與風速、風向垂直風速、垂直與水平風切(wind shear)及陣風(gust speed)，後者包含兩種資料檔 binary wind data file 與

summary file，可作為 AeroDyn 軟體的風況模擬輸入，提供作為計算氣動力的根據。

(四)動態模擬軟體 ADAMS(Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems)介紹

ADAMS(Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems)是由美國 MDI(Mechanical Dynamics, Inc)公司開發，之後由 MSC 公司收購，也稱為 MD Adams(Multibody Dynamics Adams)。可利用其優越的”虛擬原型”技術，無須推導機械系統的動態方程式，即可完整模擬機構系統之複雜運動行為，並快速地分析比較多個參數方案，以獲得優化的工作性能，從而減少測試模型及試驗次數，提高產品設計質量並縮短產品研製週期和費用，廣泛應用於機械系統動態模擬分析，如航空太空、風力發電機、建設機械、機器人、汽車等系統上。ADAMS 軟體主要用來模擬機械系統較大位移的運動特性，包含位置、角位移、速度、角加速度、加速度、角加速度、受力及力矩等，其中模擬的系統元件皆視為剛體，元件的質量集中在物體的中心。如果要作柔性體相關的運動模擬，ADAMS 軟體可與有限元素分析軟體(ANSYS 或 ABAQUS 等)或 ADAMS 進階模組(Adams/Flex)連結，來作進一步分析。ADAMS 軟體透過進階模組(Adams/Control)可與 MATLAB/SIMULINK 等軟體連結，對機械系統作複雜的閉迴路控制。

透過 ADAMS 動態模擬軟體當中內建的<Export>功能，能產生出符合 MATLAB 的系統檔案<adams_sys.m>，利用這項介面整合功能，能將 ADAMS 所建立的模組以 Fortran 程式語言輸出，並用於 MATLAB 軟體當中。圖 6 為整合介面檔 adams_sys。

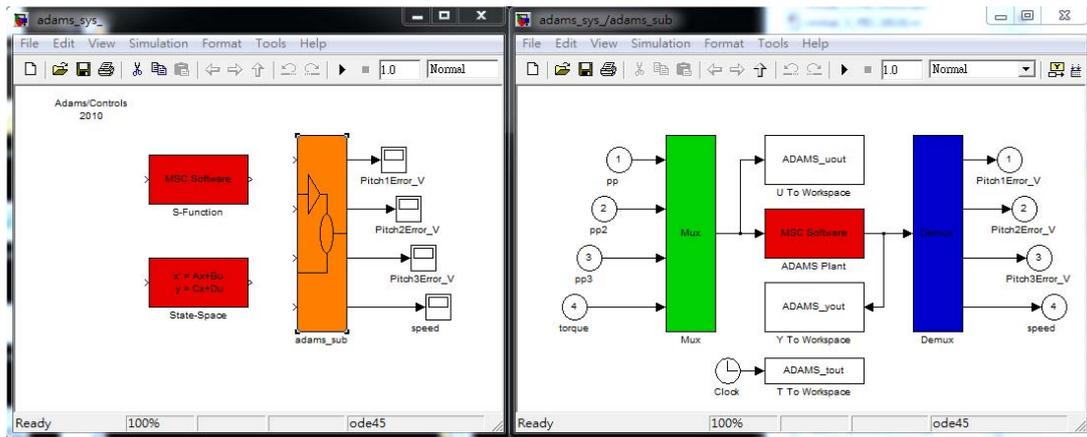


圖 6 整合介面檔 adams_sys

四、NREL 5MW 離岸型風力發電機運動模型建立

建立 FAST 所需的 Tower、Blade(s)與 ADAMS-Specific 檔，並執行 FAST 軟體產生風機模型圖，並且匯入到 ADAMS 軟體，第一節是塔架的資料檔柔性體的建立，並且在 ADAMS 軟體上實現，第二節是葉片資料檔的柔性體建立，並且由 ADAMS 軟體呈現，第三節利用 ADAMS specific 檔來調整風機模型的尺寸。

(一)塔架資料檔模型建立

包含塔架使用的材質、密度、彈性模數(modulus of elasticity)、剛性模數(modulus of rigidity)、輸入節點與輸入等分，以上這些參數是作為之後計算剛度(stiffness)與慣性矩(inertia)之用。

首先，定義塔架的坐標軸，依風吹入的方向，分成 fore-aft 與 side-to-side 兩個方向的卡式坐標，如圖 7 所示，接著，利用塔架的剖面圖來定義這兩個方向的坐標，如圖 8 所示。

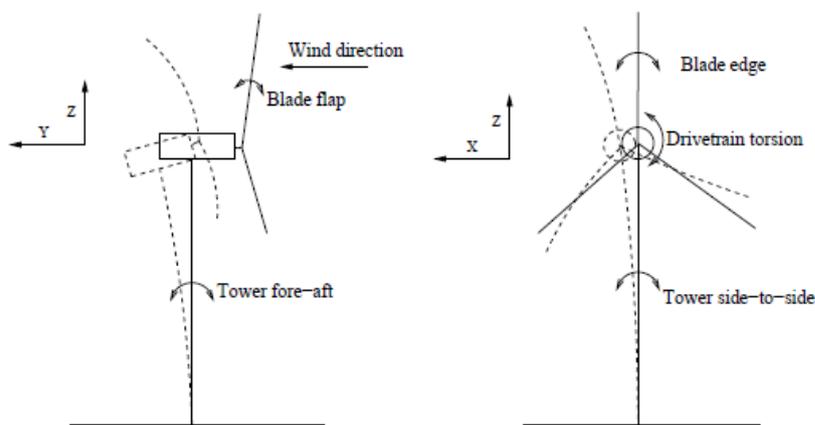


圖 7：塔架坐標軸示意圖

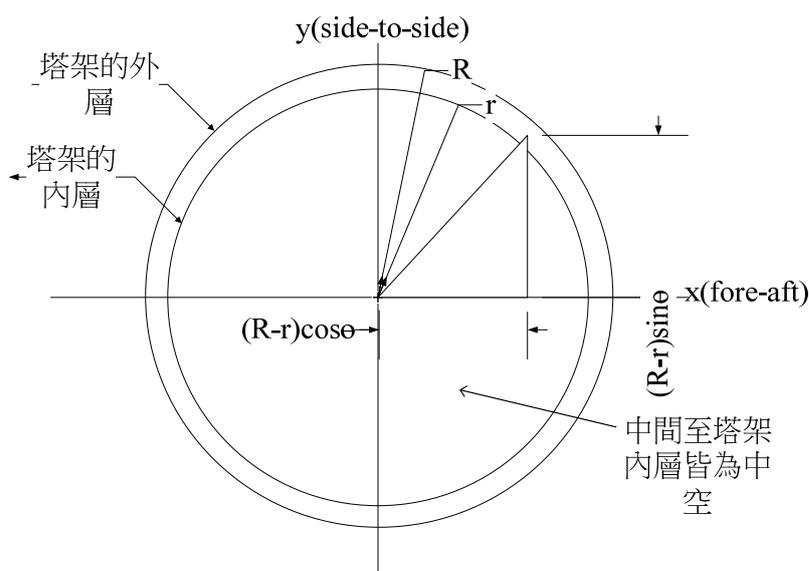


圖 8：塔架坐標剖面圖

利用上述的尺寸、坐標定義與柔性體的計算，執行 ADAMS 軟體，產生風力發電機模組，並且在 ADAMS 軟體上呈現。

(二) 葉片資料檔模型建立

葉片的基本特性如上節的塔架資料檔，根據 FAST 的葉片產生器能產生。首先由於葉片的非線性幾何我們必須將葉片分成數個不同的柔性區

塊，接著根據需要決定葉片的模數、氣動力作用點以及幾何參數。利用葉片的尺寸、坐標定義與柔性體的計算，完成葉片資料檔的建立，執行 FAST 軟體，產生風力發電機模組，並且在 ADAMS 軟體上呈現。

(三)NREL 5MW 機艙 3D 幾何建立

輪殼半徑、轉子傾斜角度、葉片的錐角、機艙質量慣性矩、發電機質量慣性矩與輪殼質量慣性矩等，整合上述這些參數，編輯 ADAMS specific 資料檔，執行 FAST 軟體並在 ADAMS 軟體上呈現。

五、NREL 離岸風機葉片旋角控制系統設計及建模

本計畫針對 NREL 5MW 風機，採用創新變轉速泵控雙液壓缸系統，以 AC 伺服馬達帶動定排量泵，以驅動雙液壓缸系統。由於泵控液壓系統若使用差動缸，因兩腔室有效面積不相同而造成流量不連續，所以泵控液壓系統將會更加複雜，使控制更為困難。故設計偶數支差動缸，結合原有泵控液壓系統組合而成，其效果等同於對稱液壓缸，可避免不對稱缸有效受壓面積不同之問題。

(一)變轉速泵控液壓伺服系統數學模型

變轉速泵控系統是由 AC 伺服馬達驅動定排量泵，並由控制器依據不同伺服控制的目標值，藉由控制伺服馬達的轉速(2000 rpm)而能調整液壓油的流量。由於 AC 伺服馬達頻寬高於液壓系統，故其數學模型可視為比例元件。AC 伺服馬達轉速與負載流量 Q_l 之間的關係為：

$$Q_l = D_l \omega_a - C_l P_l \quad (4)$$

其中

D_l	:	定量泵之容積排量
C_l	:	泵之總洩漏係數
P_l	:	負載壓力
ω_a	:	AC 伺服馬達轉速

AC 伺服馬達輸入電壓與轉速的比例關係為：

$$\omega_a = K_a u \quad (5)$$

其中

K_a	:	電壓換算轉速增益
u	:	輸入電壓

受控液壓缸流量連續方程式：

$$Q_l = A_p \dot{x}_p + C_l P_l + \left(\frac{V_t}{4\beta_e} \right) \dot{P}_l \quad (6)$$

其中

A_p	: 液壓缸之有效面積
\dot{x}_p	: 液壓缸活塞運動之速度
C_l	: 液壓缸總洩漏係數
P_l	: 負載壓力
V_t	: 總壓縮體積
β_e	: 液壓油有效容積模數

將 (4)式及(6)式結合可得變轉速系統及受控液壓缸流量連續方程式：

$$D_l \omega_a = A_p \dot{x}_p + (C_l + C_t) P_l + \left(\frac{V_t}{4\beta_e} \right) \dot{P}_l \quad (7)$$

根據牛頓第二運動定律，液壓缸運動方程式為：

$$f_h - f_l = A_p P_l - f_l = M \ddot{x}_p + B \dot{x}_p + K x_p \quad (8)$$

其中

x_p	: 液壓缸位移
f_h	: 液壓缸出力
f_l	: 任意負載
M	: 活塞重量及活塞桿之總重
B	: 活塞和負載的黏度阻尼係數
K	: 彈性係數

液壓系統驅動扭矩為：

$$T_h = f_h \times D_h = A_p P_l \times L_c \sin \phi_2 \quad (9)$$

其中

f_h	: 液壓缸出力
D_h	: 等效力臂

葉片變螺距運動方程式

$$\sum T = nT_h - T_{ext} - T_{load} = J\ddot{\beta} + d\dot{\beta} + c\beta \quad (10)$$

- 其中
- n : 液壓缸數量
 - T_{ext} : 干擾力矩
 - T_{load} : 負載力矩
 - β : 葉片旋角
 - J : 變旋角系統總轉動慣量
 - d : 阻尼係數
 - c : 剛性係數

機構幾何關係為：

$$\phi_1 = \tan^{-1}\left(\frac{L_b}{L_a}\right)$$

$$s^2 = L_a^2 + L_c^2 - 2L_a L_c \cos(\beta + \phi_1)$$

定義上式當螺距角 $\beta = 0^\circ$ 時， $s = s_0$

$$\phi_2 = \cos^{-1}\left(\frac{L_a^2 + s^2 - L_c^2}{2 L_a s}\right)$$

- 其中
- s : 液壓缸長度包含伸長量大小及固定之安裝機構長度
 - R_b : 單支葉片底座半徑
 - L_a, L_b, L_c : 機構安裝位置

(二)變旋角液壓控制系統控制器設計

考量變旋角液壓控制系統未來之實際應用，採用工業界最常應用之 PID 控制器，進行控制器之設計。

PID 控制器(比例積分微分控制器)是在工業中常用到的一種閉迴路控制器，應用的領域相當廣泛。透過輸入值與目標值的比較，得到一個誤差值進入到 PID 控制器裡面，讓系統可以維持在目標值。PID 控制器是由比例單位(P)、積分單位(I)與微分單位(D)所組成，藉由調整 PID 對應到的 K_p 、 K_i 和 K_d 三個參數的設定來調整系統，包括系統的反應快慢、控制器的過衝程度與系統的穩態誤差。

P:比例控制(proportional)

比例控制考慮現在誤差，誤差值跟 K_p 相乘。如果 K_p 太大則容易使系統不穩定，太小則讓控制器無法修正干擾的影響。因為與誤差呈現比例關係，所以無法消除系統的穩態誤差(Steady-state error)。

I:積分控制(integral)

積分控制考慮過去誤差，誤差值的過去一段時間和(誤差和)跟 K_i 相乘。積分控制可以消除穩態誤差，讓系統能夠趨近目標值。如果 K_i 越大可能會使回授出現過衝的情形，太小則使系統趨近設定值的速度越慢。比例+積分(PI)控制器可以使系統進入穩態後沒有穩態誤差。

D:微分控制(derivative)

微分控制考慮未來誤差，誤差值的一階導數跟 K_d 相乘。微分控制可以預測誤差變化的趨勢，避免受控目標的過衝，改善系統的動態特性並提升系統的穩定性。比例+微分(PD)控制器能改善系統在調節過程中的動態特性。

PID 控制器結合三種控制器的優點，比例控制可使響應速度變快，積分控制可改善穩態誤差，微分控制可改善暫態響應。定義 $u(t)$ 為控制輸出，PID 控制器可由 (11) 式表示，其方塊圖如圖 9 所示。

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (11)$$

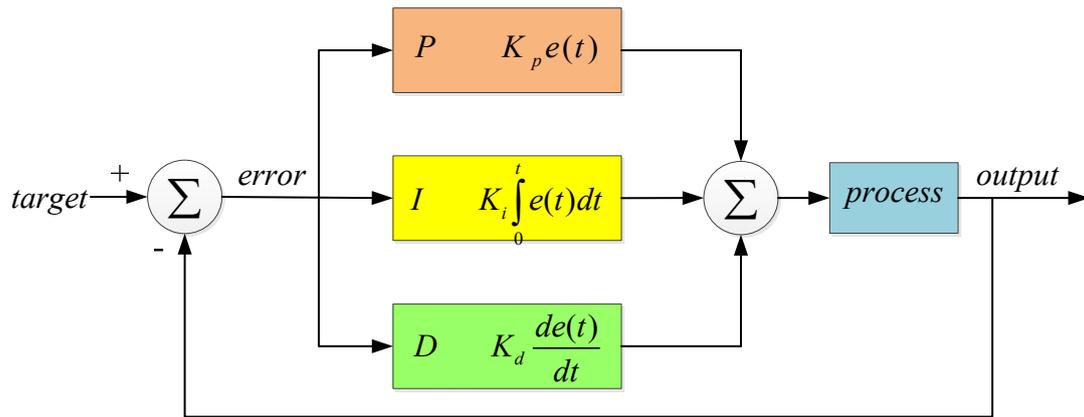


圖 9 PID 控制方塊圖

PID 控制器轉移函數 $G_s(s)$ 可由下式表示：

$$G_s(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (12)$$

其中

K_p : 比例增益常數

$K_i = \frac{K_p}{T_i}$: 積分增益常數

$K_d = \frac{K_p}{T_d}$: 微分增益常數

六、直驅式永磁同步發電機系統

隨著大型可變轉速風力發電機的發展，直驅式永磁同步發電機 (Directly-Driven Multi-Pole Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG) 也日益受到重視，NREL 5MW 採用直驅式永磁同步發電機，使用的材料是永久磁鐵，所以不需要直流激磁系統、電刷及滑環，一方面發電機可操作在低轉速下，另一方面無須使用增速齒輪箱，可減少能量的損耗及維護上的問題，與雙饋式感應發電機相比，機組所需空間較少，體積較小，機艙較短，因此運輸和安裝較容易，是風力發電機系統

未來發展的趨勢。

直驅式永磁同步發電機系統分成兩個部分，第一部分是機械動力，由風機氣動力與傳動系統組成，第二部分是電子電機，由直驅式永磁同步發電機、發電機側整流器、電網側整流器、變壓器、濾波器及外部電網所構成，如圖 10 所示，

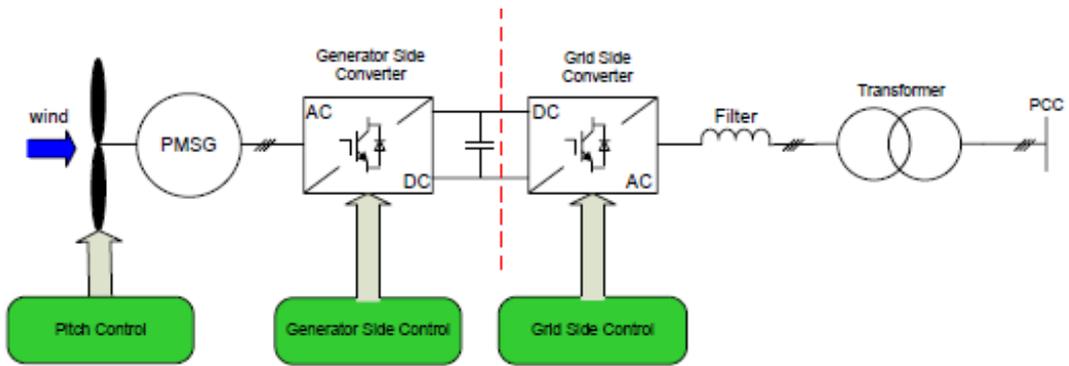


圖 10 直驅式永磁同步發電機系統及控制架構[86]

(一)直驅式永磁同步發電機數學模式

直驅式永磁同步發電機為非線性時變及相互耦合系統，將磁場導向理論(Field-Oriented Control)應用於同步發電機的控制[86-90]。

為了簡化同步發電機的分析，把定子三相時變量轉換成轉子 d/q 兩相同步旋轉軸，如圖 11、圖 12 所示：

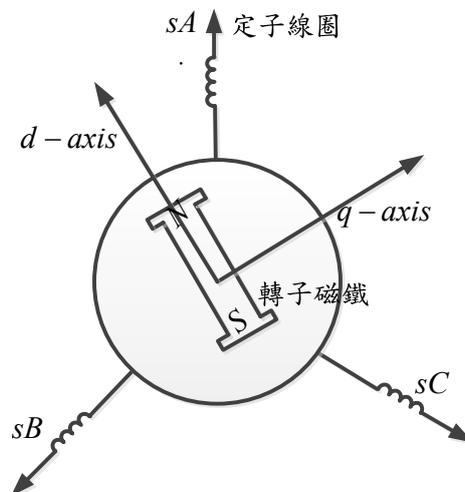


圖 11 三相(a,b,c)時變量轉換成兩相 d/q 軸同步旋轉坐標

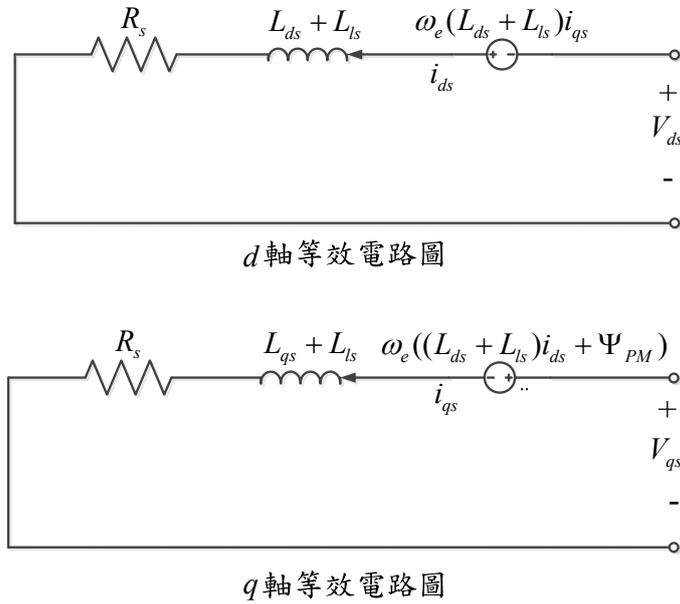


圖 12 直驅式永磁同步發電機於 d/q 軸坐標下等效電路圖

假設發電機的理想條件：

1. 由於轉子使用永久磁鐵，沒有線圈繞組、電刷及滑環，所以轉子部分無須 d/q 軸轉換。
2. 忽略磁鐵磁滯效應、渦流損耗與飽和現象的影響。

定子磁通鏈方程式

$$\psi_{ds} = (L_{ds} + L_{ls})i_{ds} + \Psi_{PM} \quad (13)$$

$$\psi_{qs} = (L_{qs} + L_{ls})i_{qs} \quad (14)$$

對式(13)與式(14)微分，可得

$$\dot{\psi}_{ds} = (L_{ds} + L_{ls}) \frac{di_{ds}}{dt} \quad (15)$$

$$\dot{\psi}_{qs} = (L_{qs} + L_{ls}) \frac{di_{qs}}{dt} \quad (16)$$

其中

$\psi_{ds} \ \psi_{qs}$: 定子 d 軸磁通鏈及 q 軸磁通鏈

$L_{ds} \ L_{qs}$: 定子 d 軸電感及 q 軸電感

$i_{ds} \ i_{qs}$: 定子 d 軸電流及 q 軸電流

$\dot{\psi}_{ds} \ \dot{\psi}_{qs}$: 定子 d 軸暫態電壓及 q 軸暫態電壓

Ψ_{PM} : 永久磁鐵磁通量

定子電壓方程式

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_e \psi_{qs} + \dot{\psi}_{ds} \quad (17)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_e \psi_{ds} + \dot{\psi}_{qs} \quad (18)$$

其中：

R_s : 定子電阻

ω_e : 發電機端電磁轉速

將式(7)~(10)代入定子電壓方程式，可改寫為

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + (L_{ds} + L_{ls}) \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_e (L_{ds} + L_{ls}) i_{qs} \quad (19)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + (L_{ds} + L_{ls}) \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_e [(L_{ds} + L_{ls}) i_{ds} + \Psi_{PM}] \quad (20)$$

發電機端電磁轉速

$$\omega_e = p \omega_g \quad (21)$$

其中 ω_g : 發電機端機械轉速

p : 發電機極數對

發電機端電磁力矩

$$T_e = \frac{3}{2} p [\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}] \quad (22)$$

將式(13)與式(14)代入式(22)，得到下式

$$T_e = \frac{3}{2} p [(L_{ds} - L_{qs}) i_{ds} i_{qs} + \Psi_{PM} i_{qs}] \quad (23)$$

發電機端定子實功率及虛功率

$$P_s = \frac{3}{2} [v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}] \quad (24)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} [v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}] \quad (25)$$

由上式可知 p 與 Ψ_{PM} 皆為常數，由於已經設定 $i_{ds}^* = 0$ ，因此在下一節會提到控制 i_{qs} 就能夠控制電磁力矩 T_e 及電磁功率 P_e 。

由 (19)式與(20)式可知，定子電流 i_{qs} 與 i_{ds} 對應於定子電壓 v_{ds} 與 v_{qs} 相互耦合，無法獨立控制，因此需要藉由向量控制將各自的耦合項解耦合，使定子電流 i_{qs} 與 i_{ds} 可以獨立控制。

(二)磁場導向控制(Field-Oriented Control)

由式(19)與式(20)可知，定子 d 軸電流與 q 軸電流相對應於定子 q 軸電壓與 d 軸電壓相互耦合，運用磁場導向控制對永磁同步發電機建立向量控制數學模型，分別對定子 i_{ds} 及 i_{qs} 進行解耦合控制。把定子電壓 v_{ds} 及 v_{qs} 分解成解耦合項與補償項。

$$v_{ds} = [R_s + (L_{ds} + L_{ls})s]i_{ds} - \omega_e(L_{ds} + L_{ls})i_{qs} = v'_{ds} + \Delta v_{ds} \quad (26)$$

$$v_{qs} = [R_s + (L_{ds} + L_{ls})s]i_{qs} + \omega_e[(L_{ds} + L_{ls})i_{ds} + \Psi_{PM}] = v'_{qs} + \Delta v_{qs} \quad (27)$$

其中 s : 微分運算子

v'_{ds} , Δv_{ds} : 定子電壓 d 軸解耦項與補償項

v'_{qs} , Δv_{qs} : 定子電壓 q 軸解耦項與補償項

根據永磁同步發電機數學模型與磁場導向控制使用三個PI控制器來控制，本系統使用雙層閉迴路架構，內層為定子電流控制，外層是轉子轉速的控制。其中控制電流的響應要比速度控制的響應要快。

外層轉速控制層，將轉子轉速參考值 ω_g^* 與發電機端轉速 ω_g 實際回傳值相減，將差值透過PI轉速控制器運算，輸出定子電流參考值 i_{qs}^* ，令定子電流參考值 $i_{ds}^* = 0$ 。內層電流控制層，將定子電流參考值與定子電流實際回傳值相減，將差值經過PI電流控制器，分別計算定子電壓解耦項 v'_{ds} 與 v'_{qs} 再與定子電壓補償項 Δv_{ds} 與 Δv_{qs} 相加，可得實際定子電壓 v_{ds} 與 v_{qs} 輸入永磁同步發電機定子電壓方程式，完成磁場導向控制。

參、主要發現與結論

一、風力發電機全機系統控制策略

風力發電機全機系統控制策略，包含第 1 區低於額定風速區及第 2 區高於額定風速區。

■ 第 1 區低於額定風速區

低於額定風速區，針對風力發電機系統設計控制器進行發電機之轉速控制，以跟蹤風速的變化，風機追蹤最佳尖速比，維持風能係數最大值，以擷取該風速下風能的最大值。

■ 第 2 區高於額定風速區

當風速達到額定風速後進入功率恆定區，此時風機轉速維持額定轉速，設計全機恆功率控制器，藉由葉片旋角系統調控，使發電機維持額定轉速，達到額定功率輸出，根據功率輸出的回授與額定功率的誤差，利用恆功率控制器調節適當的葉片旋角，使風機維持額定功率的輸出。

■ 全機運轉控制策略設計

風力發電機全機系統控制策略，整合第 1 區低於額定風速區及第 2 區高於額定風速區，進行全機系統控制模擬，對不同風速下之操控模式進行模擬驗證。

二、永磁同步發電機系統模擬

根據永磁同步發電機數學模型與磁場導向控制，令發電機轉子電流在同步旋轉座標之 d 軸分量控制在零，利用三個 PI 控制器，設計永磁同步發電機閉迴路控制，運用 FOC 將定子電壓分解為解耦合項與補償項，再分別對定子 i_{ds} 及 i_{qs} 進行解耦合控制。

輸入五階軌跡作為發電機轉速的目標值，模擬時間為 120 秒，如圖 13 所示，以三個 PI 控制器對 i_{ds} 及 i_{qs} 進行解耦合，由於 q 軸電流直接與電磁力矩成正比，因此便可控制 q 軸電流來達到所需的電磁力矩。模擬時間為 120 秒，結果如圖 27，發電機轉速追蹤誤差最大約為 0.001 rpm， d 軸電流與 q 軸電流模擬值均能追蹤到目標值。

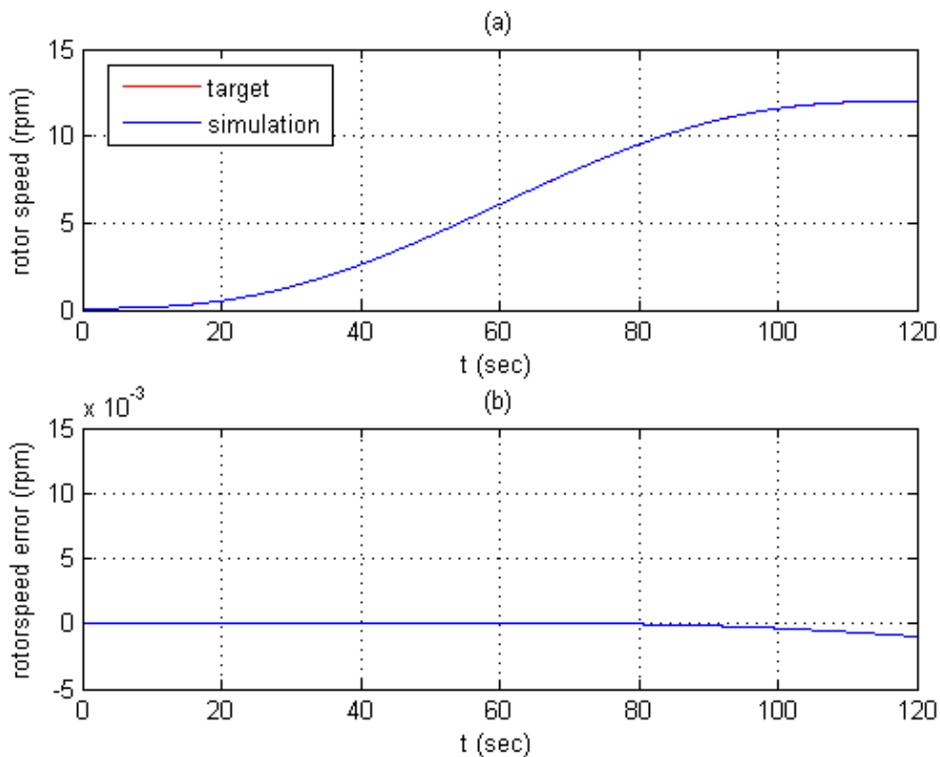


圖 13 (a)~(b) 輸入五階軌跡於永磁同步發電機之力矩控制模擬結果：

(a)發電機轉速目標值與模擬值、(b)發電機轉速誤差、

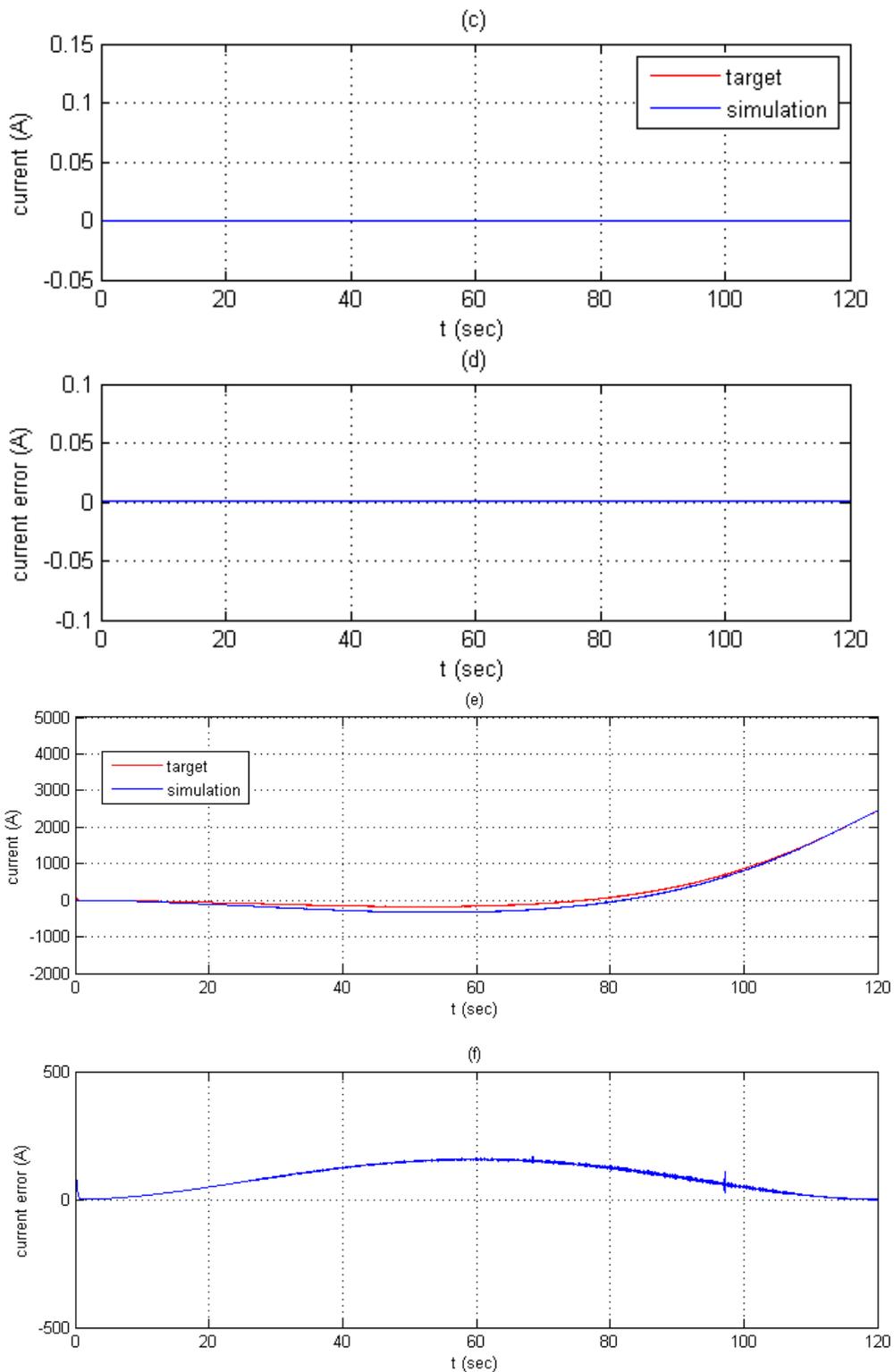


圖 13(c)~(f)輸入五階軌跡於永磁同步發電機之力矩控制模擬結果：
 (c) d 軸電流目標值與模擬值、(d) d 軸電流誤差(e) q 軸電流目標值與模
 擬值、(f) q 軸電流誤差、

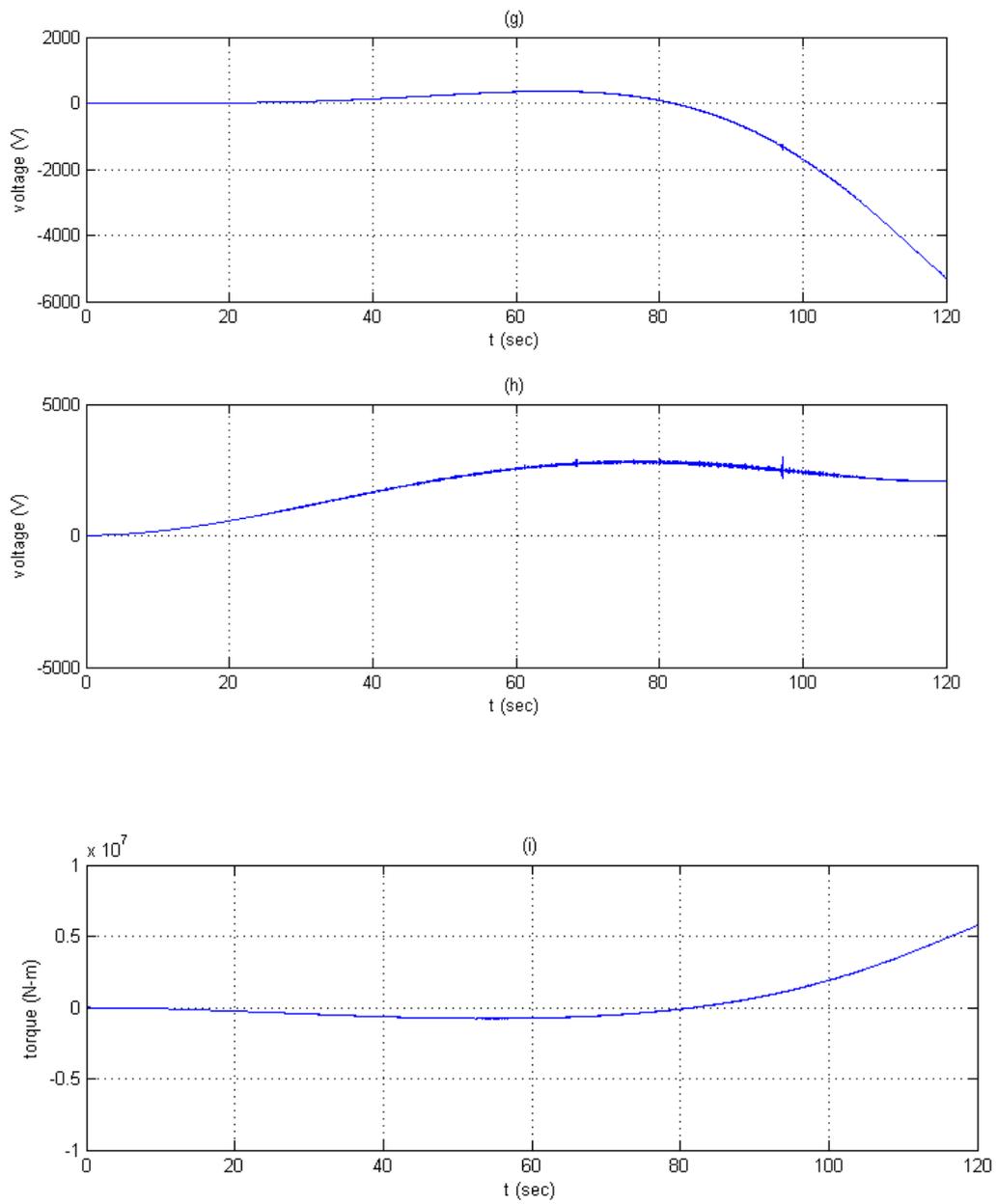


圖 13(g)~(i) 輸入五階軌跡於永磁同步發電機之力矩控制模擬結果：(g) d 軸電壓、(h) q 軸電壓 (i)發電機力矩

三、閉迴路液壓旋角系統整合風力發電機全機系統模擬

本節以 MATLAB/Simulink 所建立的液壓旋角系統整合 ADAMS 建立之風力發電機全機系統，進行不同風況下，對葉片產生不同負載。三支葉片之閉迴路旋角軌跡追蹤控制，以驗證旋角控制器之性能。

變旋角控制系統是利用直流伺服馬達驅動葉片齒輪機構，並搭配 PID 控制器，以一傘齒輪帶動三個從動傘齒輪，改變風機葉片旋角。根據我們輸入軌跡的旋角目標值與旋角模擬值回授相減之誤差，透過控制器計算出控制訊號，驅動馬達系統來推動葉片齒輪機構，最後做旋角的回授，完成變旋角直流伺服馬達閉迴路控制。

圖 14 為風速 12m/s 下，旋角五階軌跡追蹤之模擬結果，包含：圖 14(a)風速；圖 14(b)-(d)為葉片 1 之旋角控制響應、旋角控制誤差及控制訊號；圖 14(e)-(g)為葉片 2 之旋角控制響應、旋角控制誤差及控制訊號；圖 14(h)-(j)為葉片 3 之旋角控制響應、旋角控制誤差及控制訊號。旋角控制響應相當良好，控制誤差都在 0.03 度以內。

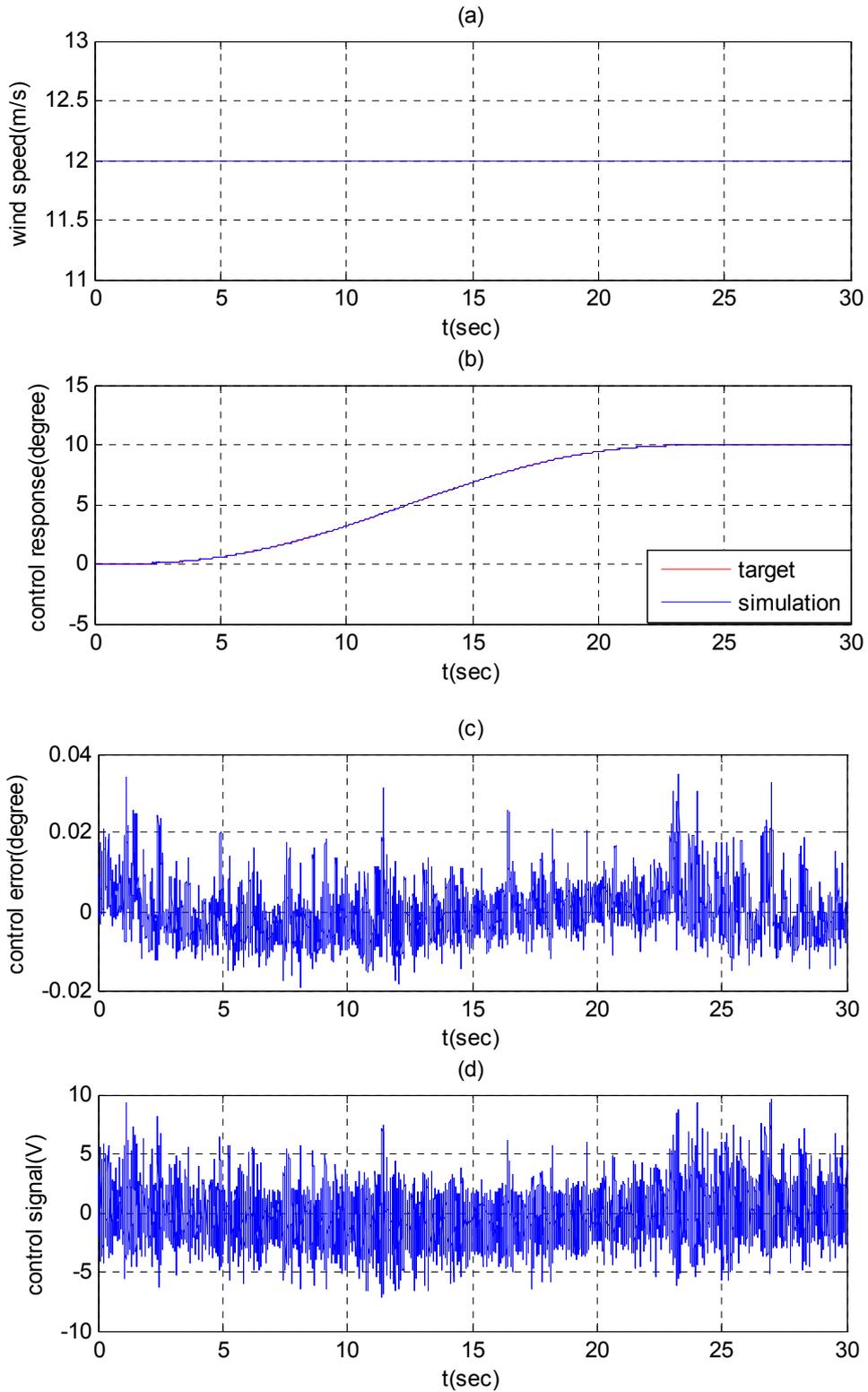


圖 14(a)-(d) 風速 12 m/s 下閉迴路液壓旋角五階軌跡追蹤之模擬結果：(a)風速 (b)葉片 1 旋角控制響應 (c)葉片 1 旋角控制誤差 (d)葉片 1 控制訊號

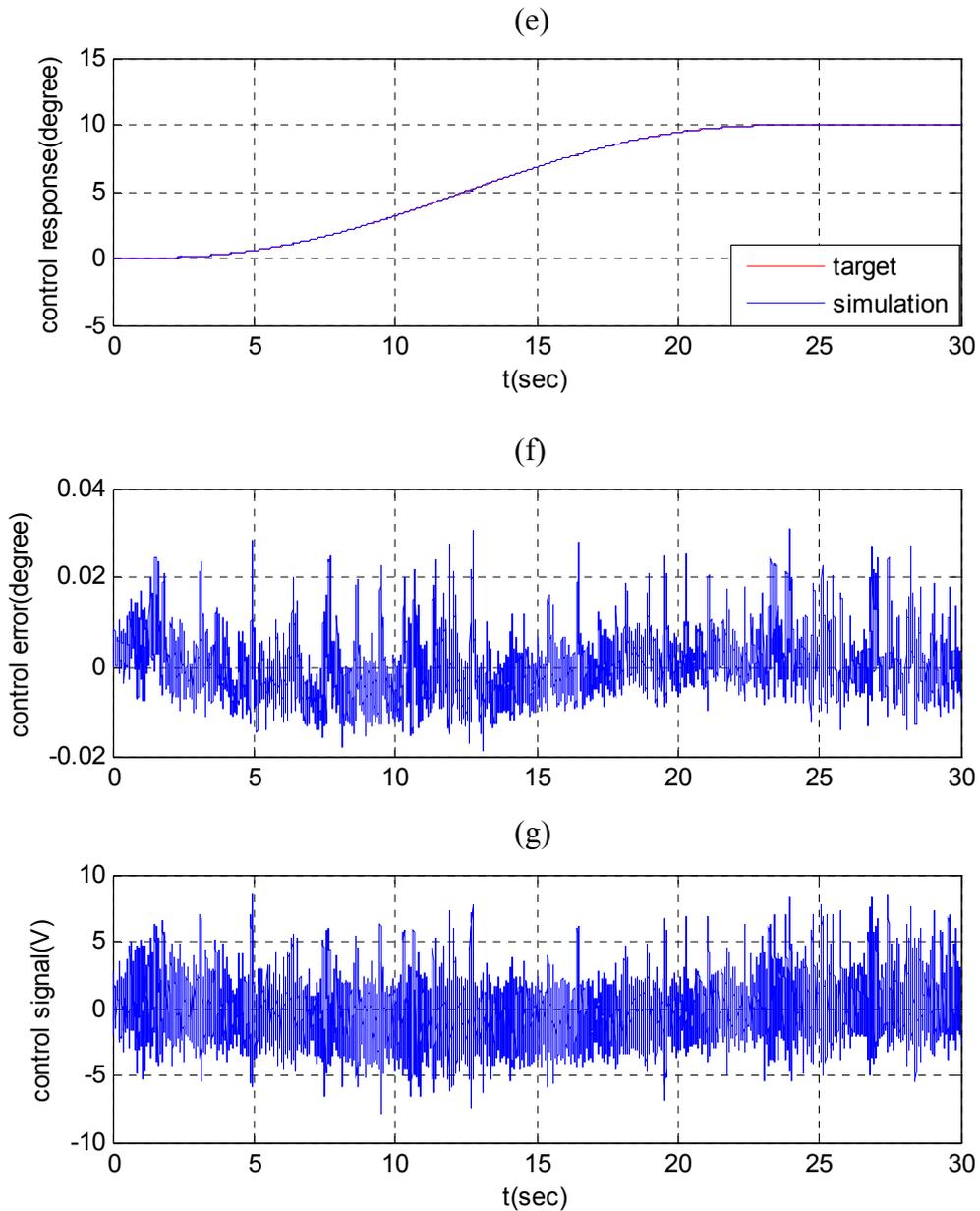


圖 14e)-(g) 風速 12 m/s 下閉迴路液壓旋角五階軌跡追蹤之模擬結果：(e)葉片 2 旋角控制響應 (f)葉片 2 旋角控制誤差 (g)葉片 2 控制訊號

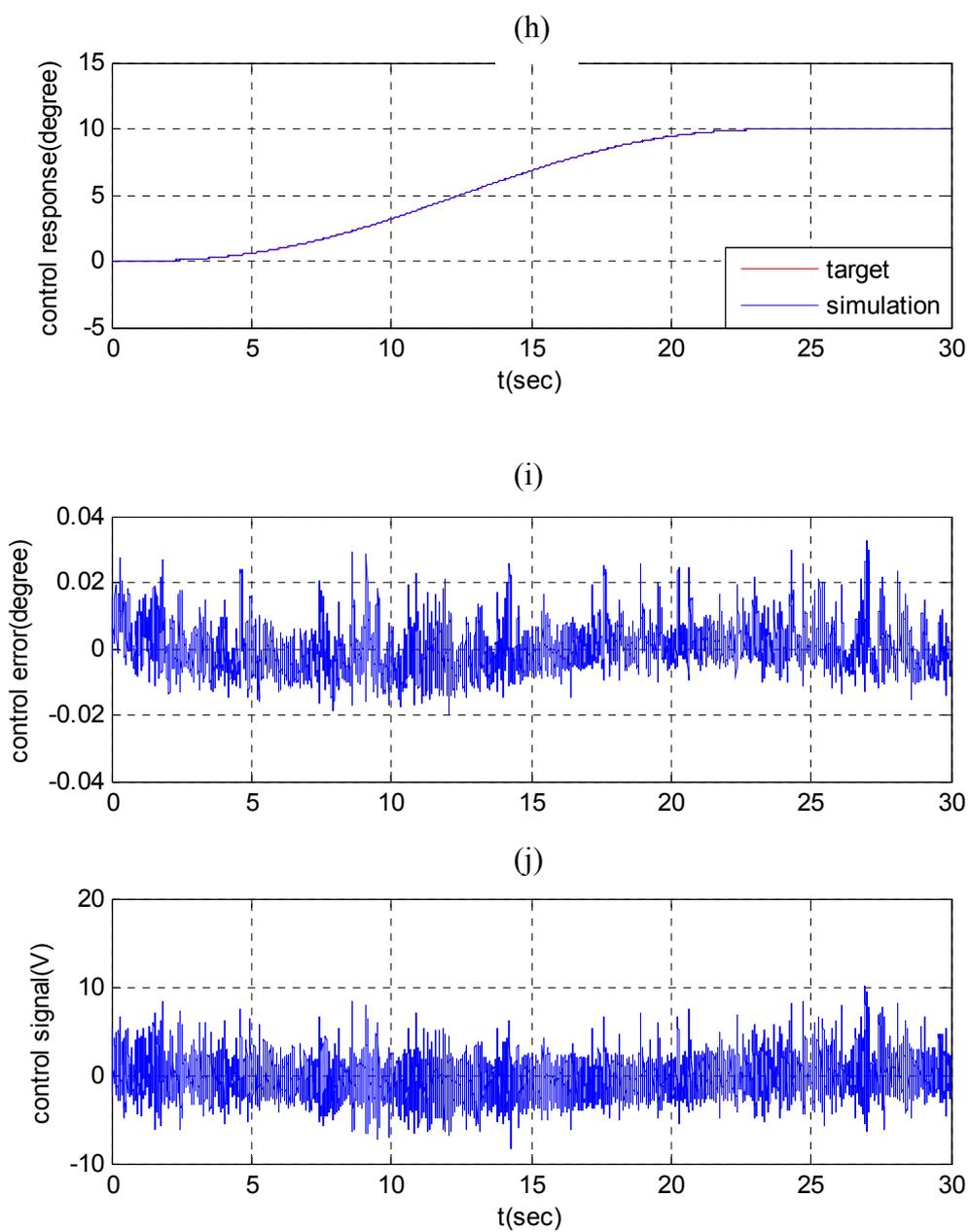


圖 14(h)-(j) 風速 12 m/s 下閉迴路液壓旋角五階軌跡追蹤之模擬結果：(h)葉片 3 旋角控制響應 (i)葉片 3 旋角控制誤差 (j)葉片 3 控制訊號

四、第 I 區低於額定風速區追蹤最佳尖速比轉速控制模擬

風力發電機運轉在追蹤最佳尖速比區，利用永磁同步發電機做變轉速控制，主要目標是於額定風速 11.4 m/s 下控制發電機轉速，追蹤最佳尖速比，使風機能擷取到最佳風能，輸出功率最大值。發電機變轉速控制架構圖，以發電機轉子的目標值和量測到的模擬值相減之誤差，經由 PI 控制器追蹤理想 i_q^* ，進而計算出所需的電磁力矩，輸入到風力發電機組機構動態模擬程式 ADAMS 模塊中，計算產生模擬發電機轉速作為回授，完成永磁同步發電機變轉速閉迴路系統。

葉片在旋角 0 度時的最佳尖速比 λ 約為 7.19，功率係數 C_p 最大值為 0.47，輸入額定風速 11.4 m/s 以下的變動風速，利用變轉速控制使轉子追蹤最佳的尖速比 λ ，此時變旋角控制系統尚未作動，旋角保持 0 度，因而保持功率係數 C_p 為最大值，使風力發電系統在額定風速下擷取最大的風能，保持最佳的發電量。

輸入一遞增風速如圖 15 所示，未達額定風速，追蹤風力發電機最佳尖速比，使發電效能達到最佳，並探討發電機轉速追蹤的效果。模擬時間為 110 秒，結果如圖 15 所示，經由永磁同步發電機力矩控制，使發電機轉速追蹤到該風速下最佳轉速值，尖速比達到近乎最佳值。

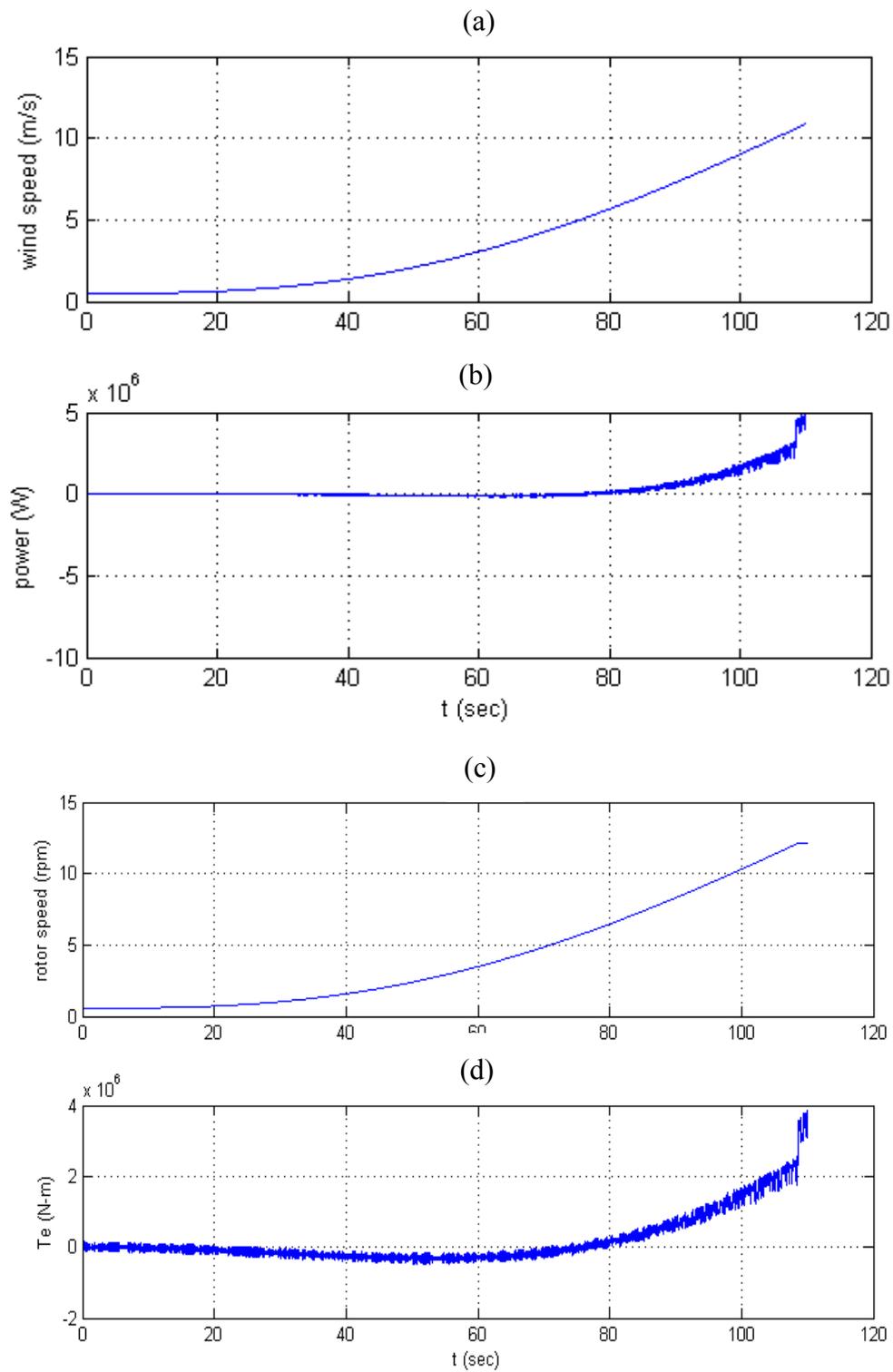


圖 15(a)-(d) 未達額定風速，進行風力發電機最佳尖速比追蹤之轉速控制
 模擬：(a)風速 (b)輸出功率 (c)轉子轉速響應 (d)發電機力矩

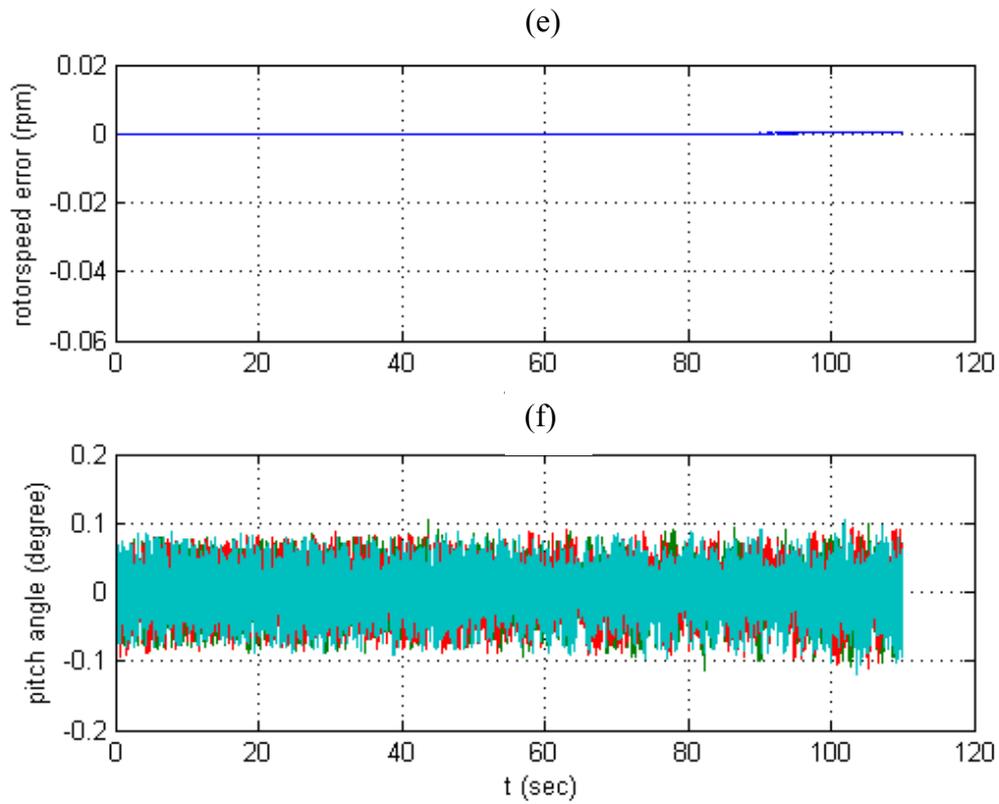


圖 15(e)-(f) 未達額定風速，進行風力發電機最佳尖速比追蹤之轉速控制
模擬： (e)轉子轉速控制誤差 (f)旋片旋角變化

五、第 II 區額定風速以上之恆功率控制模擬

本節模擬風力發電系統運轉於額定風速 11.4 m/s 以上之功率恆定區。輸入 11~20 m/s 之間變動的風速，當轉速到達額定轉速 12.1 rpm，葉片變旋角系統開始作動，利用液壓系統驅動變旋角系統，推動葉片改變氣動力調降功率係數，讓輸入的風能保持恆定最大值，進而使風力發電系統在變動的風速下大致維持在額定功率輸出，且風力機的轉速也維持在額定轉速 12.1 rpm，以避免超轉，導致發電機損壞。

於額定風速之上，輸入 10~25 m/s 之間變動的風速，模擬時間 25 sec，結果如圖 16 所示。約在 3.5 秒時，風速達到額定風速 11.4 m/s 以上，變旋角系統開始啟動，造成系統較大的擾動，因此在角度追蹤方面有較大的誤差，控制訊號及轉速誤差也因為不連續的現象而造成擾動。透過發電機力矩的調節，使運轉在不停變動風速中的風力發電系統的輸入風能較為平緩，且風機轉速維持在額定轉速 12.1 rpm，發電功率大致維持在額定功率 5MW 的附近。

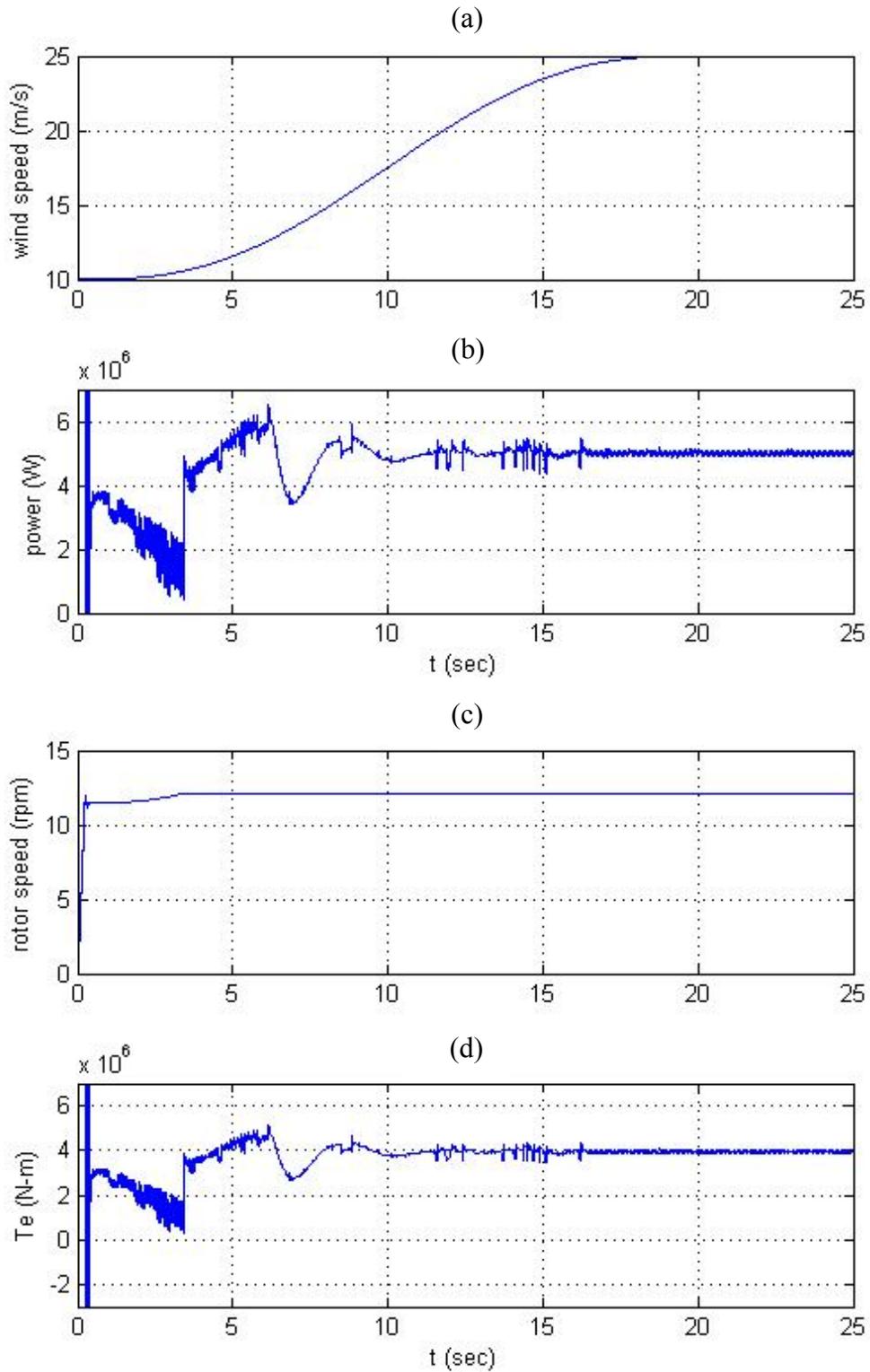


圖 16 於額定風速之上，輸入 10~25 m/s 之間變動的風速，模擬時間 25 sec，(a)風速 (b)輸出功率 (c)轉子轉速 (d)發電機力矩

六、全區運轉控制模擬

本節模擬風力發電系統運轉於全區域風速，輸入一平滑風速，當風速未達到額定風速前，利用變轉速控制使轉子追蹤最佳的尖速比 λ ，此時變旋角控制系統尚未作動，旋角保持 0 度，使風力發電系統在額定風速下擷取最大的風能，保持最佳的發電量。當風速到達額定風速時，葉片變旋角系統開始作動，利用直流伺服馬達驅動變旋角系統，推動葉片改變氣動力調降功率係數，使風力發電系統在變動的風速下大致維持在額定功率輸出。

■ 全區域風速模擬結果

輸入 1 ~ 25 m/s 之間的平滑風速，模擬時間 270 秒，結果如圖 17 所示，風力發電系統運轉於全區域風速包含(a)風速、(b)輸出功率、(c)功率控制誤差、(d)旋角控制響應、(e)轉子轉速、(f)發電機力矩。風力發電變轉速變旋角控制系統正常運作，於額定風速 11.4 m/s 以下，風力發電系統皆能追蹤相對應轉速，於額定風速之上，能使風機轉速維持在額定轉速 12.1 rpm，並維持額定功率 5MW 輸出。在變旋角系統啟動即停止的瞬間，會造成系統較大的擾動，因此在變旋角控制方面有較大的誤差，控制訊號也造成擾動。

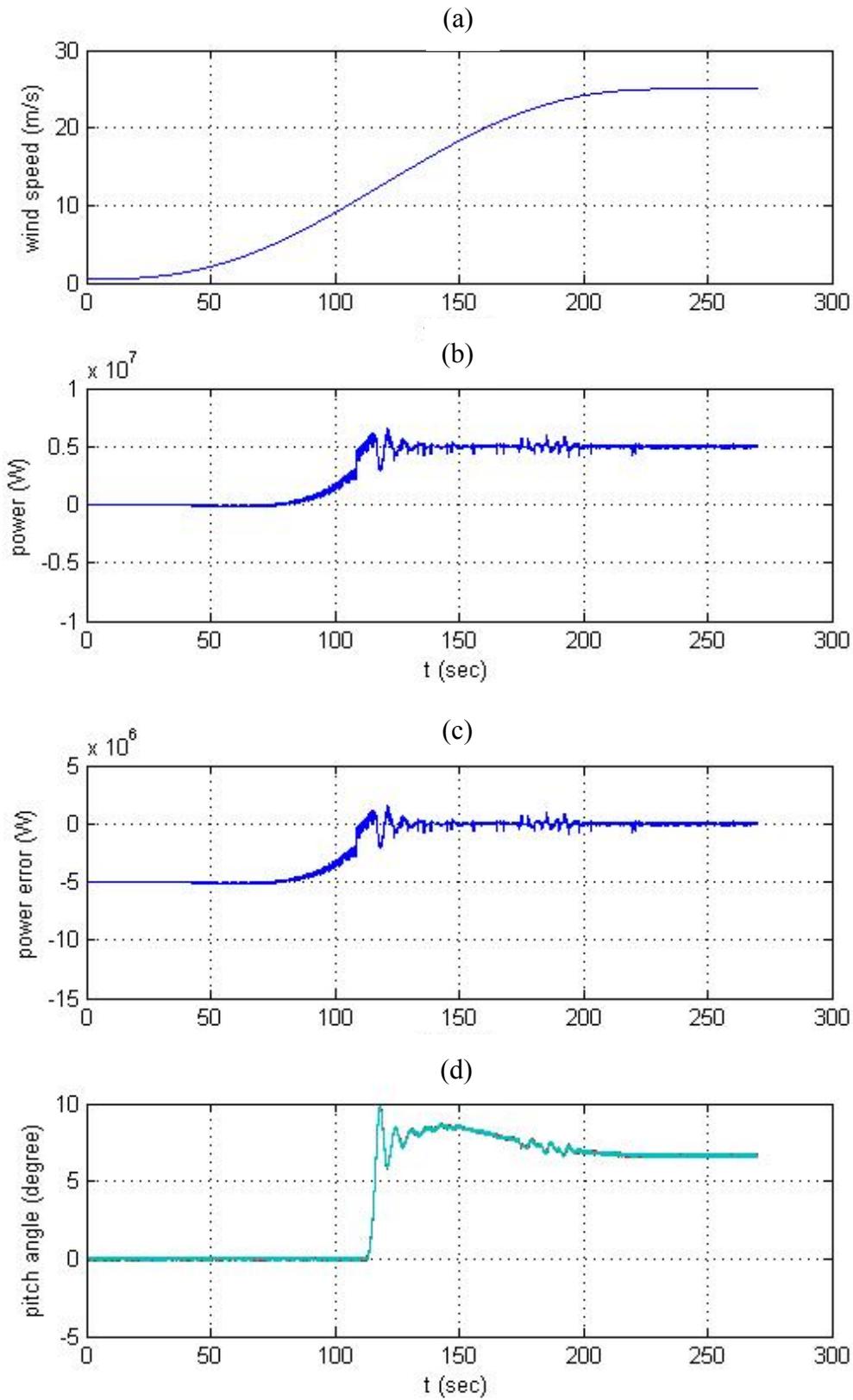


圖 17 (a)-(d) 風力發電系統運轉於全區域風速：(a)風速 (b)輸出功率
(c)功率控制誤差 (d)旋角控制響應

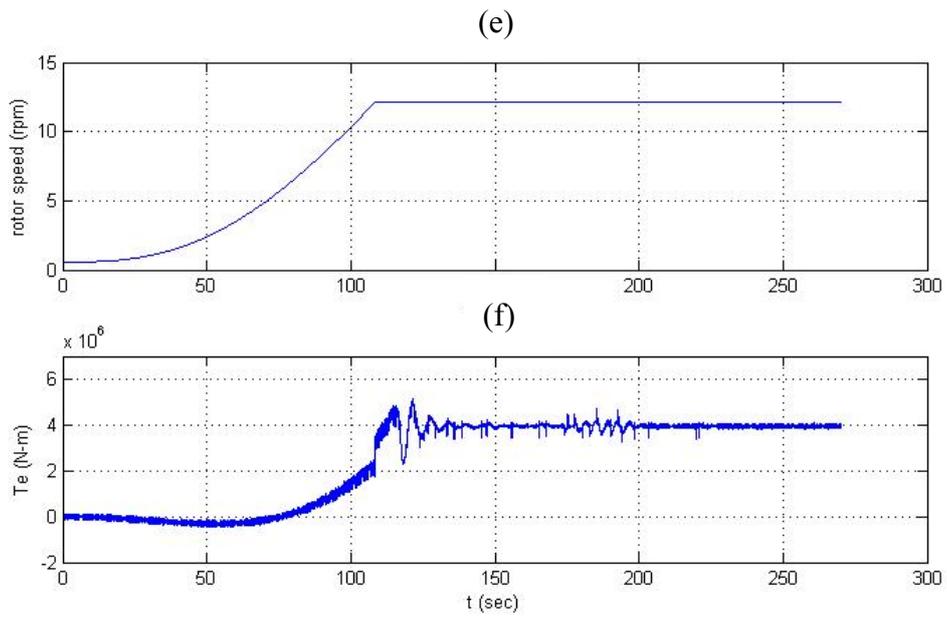


圖 17 (e)-(f) 風力發電系統運轉於全區域風速：(e)轉子轉速 (f)發電機力矩

七、結 論

本研究為核能研究所合作計畫案。依據預定進度表，完成 ADAMS 風機模擬訓練，根據 NREL 5MW 離岸型風機機組塔架及葉片 3D 外型幾何 CAD 檔，完成 FAST 軟體的塔架資料檔、葉片資料檔與機艙資料檔，產生風力發電機模型，匯入到 ADAMS 軟體，完成以 ADAMS 軟體建構 NREL 5MW 機組的葉片幾何、塔架外型及機艙；完成永磁同步發電機建模及動態模擬；完成發電機轉速控制器設計；完成全機定轉速控制器設計、完成全機運轉控制策略設計；完成整合空氣動力、風機系統動態、控制系統動態分析進行全系統動態模擬；完成全系統運轉閉迴路動態模擬。

推導永磁同步發電機的非線性數學方程式，並且使用 MATLAB/SIMULINK 來實現永磁同步發電機模組。變旋角系統每個葉片使用創新液壓變旋角系統驅動，針對大型風力發電機組設計高效率的液壓泵控系統，並成功實現在 MATLAB/SIMULINK。並整合風機子系統，並加入控制理論來模擬風力發電機，包含永磁同步發電機控制系統、變旋角控制系統與變轉速控制系統。

成功發展 FAST、ADAMS 及 MATLAB/SIMULINK 之整合模擬技術，結合風機控制策略，進行不同風況下之全系統動態模擬。當風速於額定風速 11.4 m/s 之下，利用發電機變轉速控制，追蹤最佳尖速比 λ 對應的轉速，達到最大功率的輸出，擷取最佳風能。當風速於額定風速之上，啟動液壓伺服驅動變旋角控制系統，調節葉片的旋角使風機維持在額定轉速 12.1 rpm，並使發電量保持額定功率 5MW 輸出，實現主動控制風力發電系統。

未來更能針對大型風機做出合適的控制策略，如獨立控制、最佳功率追蹤…等，以因應國家未來離岸風電的整合與風機發展計畫。

參考文獻

■ 風力發電機組回顧及分析

- [1] German Wind Energy Institute: <http://www.dewi.de>.
- [2] Enercon GmbH: http://www.enercon.de/en/_home.htm.
- [3] Vestas: <http://www.vestas.com/vestas/global/en/>.
- [4] Thomas Ackermann, Lennart Soeder, Wind energy technology and current status: a review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 4, pp.315-374, 2000.
- [5] J.F. Manwell, J.G. McGowan and A.L. Rogers, Wind Energy Explained – Theory, Design and Application, John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [6] Curran A Crawford, An Integrated CAD Methodology Applied to Wind Turbine Optimization, PhD thesis, MIT, 2003.

■ 風力發電機數學模式建立

- [7] Chaiyapinunt, Somsak, Linearized model for wind turbines in yaw (horizontal axis, static stability), PhD thesis, Oregon state university, 1984.
- [8] Wan, Deming, Simulation of the UTEP wind turbine operation in transient states using ADAMSRTM/WT, Master thesis, The university of Texas at EL PASO, 1998.
- [9] A.D. Diop, C. Nivhita, J.J. Belhache, et al., Modeling variable pitch HAWT characteristics for a real time wind turbine simulator, Wind Eng., 23 (4), 1999.
- [10] Stol, Karl Alexander, Dynamics modeling and periodic control of horizontal-axis wind turbines, PhD thesis, University of Colorado at Boulder, 2001.
- [11] Lopez, Adalgisa E., Model-based analysis of control strategies for a variable speed wind turbine, Master thesis, The university of Texas at EL PASO, 2003.
- [12] Rehfeldt K., Untersuchungen zur Modellbildung von Windkraftanlagen mit hydrostatischem Treibstrang und deren Regelung auf der Basis der Fuzzy-Logik (in German), VDI Verlag, Reihe 8, Nr.538, 2003.

■ 風力發電機螺距控制

- [13] Sharif-razi, Ali-Reza, Discrete-time blade pitch control for wind turbine torque regulation with digitally simulated random turbulence excitation, PhD thesis, Oregon state university, 1986.

- [14] S.M.B. Wilmshurst, Control strategies for Wind turbines, *Wind Eng.*, 12(4), pp.236-249, 1988.
- [15] M.T. Iqbal, A. Coonick, L.L. Ereris, Dynamic control options for variable speed wind turbines, *Wind Eng.*, 18(1), p.1~12, 1994.
- [16] R. Jones, G.A. Smith, High quality mains power from variable speed wind turbines, *Wind Eng.*, 18(1), pp.45-49, 1994.
- [17] Mangialardi L, Mantriota L. Dynamic behavior of wind power systems equipped with automatically regulated continuously variable transmission, *Renewable Energy*;7(2):185–203, 1996.
- [18] L .Kendall, M.J. Balas, Y.J. Lee, et al., Application of proportional-integral and disturbance accommodation control to variable speed variable pitch horizontal axis wind turbines, *Wind Eng.*, 21(1), 1997.
- [19] N. Nanayakkara, M. Nakamura, H. Hatazaki, Predictive control of wind turbine in small power systems at high turbulent wind speeds, *Control Engineering Practice*, Vol.5, No.8, pp.1063-1069, 1997.
- [20] E. Welfonder, R. Neifer, M. Spanner, Development and experimental identification of dynamic models for wind turbines, *Control Engineering Practice*, Vol.5, No.1, pp.67-73, 1997.
- [21] J.B. Freeman, M.J. Balas, Direct model reference adaptive control of a variable speed horizontal axis wind turbines, *Wind Eng.*, 22(5), 1998.
- [22] Idan M, Lior D. Continuously variable speed wind turbine: transmission concept and robust control, *Wind Engineering*, 24(3):151–67, 2000.
- [23] Y.D. Song, Control of wind turbines using memory-based method, *Journal of Wind Engineering, and Industrial Aerodynamics* 85, pp.263-275, 2000.
- [24] Y.D. Song, B. Dhinakaran, X.Y. Bao, Variable speed control of wind turbines using nonlinear and adaptive algorithms, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 85,pp. 293-308, 2000.
- [25] Thommy Ekelund1, Yaw control for reduction of structural dynamic loads in wind turbines, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 85, pp. 241-262, 2000.

- [26] E. Muljadi, K. Pierce, P. Migliore, Soft-stall control for variable-speed stall-regulated wind turbines, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 85, pp.277-291, 2000.
- [27] D. Trudnowski, D. LeMieux, Independent pitch control using rotor position feedback for wind shear and gravity fatigue reduction in a wind turbine, *American control conference*, (6), pp.4335-4340, 2002.
- [28] Hongche Guo; Qingding Guo; H infin control of variable-speed adjustable-pitch wind turbine adjustable-pitch system, *Electrical Machines and Systems*, 2003. ICEMS 2003. Sixth International Conference Volume 1, Page(s):266 - 269 vol.1, 9-11 Nov. 2003.
- [29] Balas, M.J.; Wright, A.; Hand, M.; Stol, K.; Dynamics and control of horizontal axis wind turbines, *American Control Conference*, 2003. Proceedings of the 2003, Volume 5, Page(s):3781 - 3793 vol.5, 4-6 June 2003.
- [30] Holley, W.E.; Wind turbine dynamics and control - issues and challenges, *American Control Conference*, 2003. Proceedings of the 2003, Volume 5, Page(s):3794 - 3795 vol.5, 4-6 June 2003.
- [31] Zhao Lin; Guo Qingding, Adjustable-pitch and variable-speed control of wind turbines using nonlinear algorithm, *Electrical Machines and Systems*, 2003. ICEMS 2003. Sixth International Conference on, Volume 1, Page(s):270 - 273 vol.1, 9-11 Nov. 2003.
- [32] Johnson, Kathryn E., Adaptive torque control of variable speed wind turbines, PhD thesis, University of Colorado at Boulder, 2004.
- [33] Sakamoto, R.; Senjyu, T.; Kinjo, T.; Urasaki, N.; Funabashi, T.; Fujita, H.; Sekine, H.; Output power leveling of wind turbine generator for all operating regions by pitch angle control, *Power Engineering Society General Meeting*, 2005. IEEE, 12-16 Page(s):45 - 52 Vol. 1, June 2005.
- [34] Boukhezzer, B.; Siguerdidjane, H.; Nonlinear Control of Variable Speed Wind Turbines without wind speed measurement, *Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference. CDC-ECC '05. 44th IEEE Conference* Page(s):3456 – 3461, 12-15 Dec. 2005

- [35] Xinyan Zhang; Weiqing Wang; Ye Liu; Jing Cheng, Fuzzy Control of Variable Speed Wind Turbine, Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on Volume 1, Page(s):3872 – 3876, 21-23 June 2006
- [36] Hongwei Liu; Yonggang Lin; Wei Li , Study on Control Strategy of Individual Blade Pitch-Controlled Wind Turbine, Intelligent Control and Automation, 2006. The Sixth World Congress on, Volume 2, Page(s):6489 – 6492, 21-23 June 2006.
- [37] Junhua Yang; Jianhua Li; Jie Wu; Jinming Yang; Fuzzy Adaptive Control of Novel Brushless Doubly-fed Wind Turbine, Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress Volume 2, Page(s):8241 – 8245, 21-23 June 2006.
- [38] Johnson, K.E.; Pao, L.Y.; Balas, M.J.; Fingersh, L.J.; Control of variable-speed wind turbines: standard and adaptive techniques for maximizing energy capture, Control Systems Magazine, IEEE Volume 26, Issue 3, Page(s):70 – 81, June 2006.
- [39] Li, H.; Zhang, D.; Foo, S.Y.; A Stochastic Digital Implementation of a Neural Network Controller for Small Wind Turbine Systems, Power Electronics, IEEE Transactions on Volume 21, Issue 5, Page(s):1502 – 1507, Sept. 2006
- [40] Senjyu, T.; Sakamoto, R.; Urasaki, N.; Funabashi, T.; Fujita, H.; Sekine, H.; Output power leveling of wind turbine Generator for all operating regions by pitch angle control, Energy Conversion, IEEE Transactions on Volume 21, Issue 2, Page(s):467 – 475, June 2006.
- [41] Camblong, H.; Tapia, G.; Rodriguez, M.; Robust digital control of a wind turbine for rated-speed and variable-power operation regime, Control Theory and Applications, IEE Proceedings-Volume 153, Issue 1, Page(s):81 – 91, 16 Jan. 2006.
- **風力發電機之發電機探討**
- [42] C.S. Brune, R. Spee, A. Wallace, Experimental evaluation of variable speed double-fed wind power generator system, IEEE Trans. On Industrial Applications, 30: 648-655, 1994.

- [43] R.M. Hilloowala, A.M. Sharaf, A rule-based fuzzy logic controller for a PWM inverter in a stand alone wind energy conversion scheme, *IEEE Trans. Industry Applications*, 32(1), 1996.
- [44] M.G. Simoes, B.K. Bose, R.J. Spiegel, Design and performance evaluation of a fuzzy logic based variable speed wind generation system, *IEEE Trans. Industrial Applications*, 33(4), 1997.
- [45] R. Chedid, F. Mrad, M. Basma, Intelligent control for wind energy conversion systems, *Wind Eng.*, 22(1), pp.1-16, 1998.
- [46] L. Dambrosio*, B. Fortunato, One-step-ahead adaptive control of a wind-driven synchronous generator system, *Energy* 24, pp.9–20, 1999.
- [47] A.D. Hansen, P. Sorensen, et al., Control of variable speed wind turbine with double-fed induction generators, *Wind Eng.*, 28(4), 2004.
- [48] M.M.; Carrasco, J.M.; Galvan, E.; Sanchez, J.A.; Franquelo, L.G.; A new fuzzy logic controller to improve the captured wind energy in a real 800 kW variable speed-variable pitch wind turbine Prats, *Power Electronics Specialists Conference, 2002. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual Volume 1*, pp.101 - 105 vol.1, June 23-27 2002.

■ 智慧型控制理論

- [49] Kim, S. W., Lee, J. J., Design of a fuzzy controller with fuzzy sliding surface, *Fuzzy Sets & Systems*, vol.71, no.3, 359-67, 1995.
- [50] Tzafestas, S.G., Rigatos, G.G., A simple robust sliding-mode fuzzy-logic controller of the diagonal type, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol.26, no.3-4, 353-388, 1999.
- [51] Wu, J. C. and Liu, T. S., A sliding-mode approach to fuzzy control design, *IEEE Trans. Control Systems Technology*, vol. 4, no. 2, 141-151, 1996.
- [52] T. J. Procky, and E. H. Mamdani, “A linguistic Self-Organizing Process Controller”, *Automatica*, Vol.5,pp.15-30,1979.
- [53] Lu Yusheng., ” A self-organizing fuzzy sliding-mode controller design for a class of nonlinear servo systems,“ *IEEE Transactions on Industrial Electronics* Vol. 141. No. 5. pp. 492-495, 1994.

- [54] Chiang, M.H., Chien Y.W., Parallel control of velocity control and energy-saving control on a hydraulic valve controlled system using self-organizing fuzzy sliding mode control, JSME International Journal, Series C, Vol.46, No.1, pp.224-231, 2003.

■ 離岸型風力發電機

- [55] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott, Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, *Technical Report*, NREL/TP-500-38060, February 2009.
- [56] Denis Matha, Model Development and Loads Analysis of an Offshore Wind Turbine on a Tension Leg Platform, with a Comparison to Other Floating Turbine Concepts, *Subcontract Report*, NREL/SR-500-45891, February 2010
- [57] G.R. Fulton, D.J. Malcolm, H. Elwany, W. Stewart, E. Moroz, and H. Dempster, Semi-Submersible Platform and Anchor Foundation Systems for Wind Turbine Support, *Subcontract Report*, NREL/SR-500-40282, December 2007.
- [58] Tomoaki Utsunomiya, Hidekazu Matsukuma, Shintaro Minoura, ON SEA EXPERIMENT OF A HYBRID SPAR FOR FLOATING OFFSHORE WIND TURBINE USING 1/10 SCALE MODEL, Proceedings of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2010, June 6-11, 2010, Shanghai, China.
- [59] C.A. Cermelli, D.G. Roddier, C.C. Busso, MINIFLOAT: A Novel Concept of Minimal Floating Platform for Marginal Field Development, Proceeding of the Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Toulon, France, May 23-28, 2004.
- [60] Alexia Aubault, Christian Cermelli, Dominique Roddier, PARAMETRIC OPTIMIZATION OF A SEMI-SUBMERSIBLE PLATFORM WITH HEAVE PLATES, Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE2007, June 10-15, 2007, San Diego, California, USA.

■ 發電機

- [61] Kenji Amei, Yukichi Igkayasu, Takahisa Ohji and Masaaki Sakui (2002), "A maximum power control of wind generator system using a permanent magnet

- synchronous generator and a boost chopper circuit," Power Conversion Conference, 2002. PCC-Osaka 2002. Proceedings of the.
- [62] R.J. Wai, C.Y. Lin and Y.R. Chang, "Novel maximum-power-extraction algorithm for PMSG wind generation system," *IET Electric Power Applications*, vol. 1, no. 2, pp 275-283, March. 2007.
- [63] Whei-Min Lin and Chih-Ming Hong, " Intelligent approach to maximum power point tracking control strategy for variable-speed wind turbine generation system," *Energy*, vol. 35, no. 6, pp 2440-2447, January. 2010.
- [64] Alejandro Rolan, Alvaro Luna, Gerardo Vazquez, Daniel Aguilar and Gustavo Azevedo, "Modeling of a variable speed wind turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009)*, pp 734-739, July 5-8. 2009.
- [65] Minghua, F. and X. Longya (1999), "A sensorless direct torque control technique for permanent magnet synchronous motors," Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE.
- [66] Nasiri, A. (2007). "A Novel Direct Torque Control Method of PM Synchronous Motors," Power Electronics Specialists Conference, 2007. PESC 2007. IEEE.
- [67] Shoudao Huang, Zhenyu Xu, Keyuan Huang, Qingyun Pu, Lei Zheng, Jiangchuan Kuang (2011), "Direct torque control for permanent synchronous motor based on sliding observer," Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on.
- [68] Zhongqi, W. and N. Heng (2012). "A novel torque ripple reduction strategy for predictive direct torque controlled PMSG," Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2012 15th International Conference on.
- [69] Haoxiong Wang, Weiming Ma, Fei Xiao, Minliang Cheng, Yong Liu (2009). "Control strategy of permanent magnet synchronous generator of directly driven wind turbine," Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, 2009. ASEMD 2009. International Conference on.
- [70] Shuhui Li , Timothy A. Haskew and Ling Xu, " Conventional and novel control

designs for direct driven PMSG wind turbines," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no 3, pp 328-338, March. 2010.

- [71] Shuhui Li, Timothy A. Haskew, Richard P. Swatloski and William Gathings, "Optimal and Direct-Current Vector Control of Direct-Driven PMSG Wind Turbines," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, pp 2325-2337, no. 5, May. 2012.
- [72] Emna Mahersi, Adel Khedher and M.Faouzi Mimouni., "The Wind energy Conversion System Using PMSG Controlled by Vector Control and SMC Strategies," *International Journal of Renewable Energy Research*, vol.3, no.1, 2013.
- [73] Thomas G. Habetler, Francesco Profumo, Michele Pastorelli and Leon M. Tolbert, "Direct Torque Control of Induction Machines Using Space Vector Modulation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 28, no. 5, September / October. 1992.
- [74] Casadei, D., et al. "FOC and DTC: two viable schemes for induction motors torque control." *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 17, pp 779-787, no. 5, September. 2002
- [75] Lie Xu and Phillip Cartwright, "Direct Active and Reactive Power Control of DFIG for Wind Energy Generation," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, pp 750-758, no. 3, September. 2006.
- [76] Sergio Aurtenechea Larrinaga, Miguel Angel Rodríguez Vidal, Estanis Oyarbide and José Ramón Torrealday Apraiz "Predictive Control Strategy for DC/AC Converters Based on Direct Power Control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, pp 1261-1271, no. 3, June. 2007.
- [77] Roberto Cárdenas, Rubén Peña, Salvador Alepuz and Greg Asher, "Overview of Control Systems for the Operation of DFIGs in Wind Energy Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, pp 2776-2798, no. 7, July. 2013.
- [78] Joerg Dannehl, Christian Wessels and Friedrich Wilhelm Fuchs, "Limitations of Voltage-Oriented PI Current Control of Grid-Connected PWM Rectifiers With *LCL* Filters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, pp 380-388, no. 2,

February. 2009.

- [79] Global Wind Report MARKET FORECAST FOR 2014 – 2018
- [80] Global Wind Energy Council
- [81] GWEC – Global Wind 2012 Report
- [82] Hui Zhang and L. M. Tolbert, "Efficiency Impact of Silicon Carbide Power Electronics for Modern Wind Turbine Full Scale Frequency Converter," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 1, pp. 21-28, Jan. 2011.
- [83] J. M. Jonman and M. L. B. Jr., "FAST User's Guide," N. R. E. Laboratory, Ed., ed, August 2005.
- [84] D. J. Laino and A. C. Hansen, "AeroDyn USER'S GUIDE to the wind Turbine Aerodynamics Computer Software," N. R. E. Laboratory, Ed., ed, December 2002.
- [85] B. J. Jonkman, "TurbSim User's Guide," N. R. E. Laboratory, Ed., ed, Aug. 2009.
- [86] Ming Yin, Gengyin Li, Ming Zhou, Chengyong Zhao, "Modeling of the Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator for Integration", IEEE, Power Engineering Society General Meeting, Page(s):1 - 6, June 2007
- [87] Daryoush Mehrzad, Javier Luque, Marc Capella, "Vector control of PMSG for wind turbine applications", Aalborg University: Electrical Energy Technology, Denmark.
- [88] Gabriele Michalke, Anca D. Hansen, Thomas Hartkopf, "Control strategy of variable speed wind turbine with multiple permanent magnet synchronous generator", European Wind Energy Conference and Exhibition EWEC, Milano, Page(s): 1-8, May 2007.
- [89] A. Rolan, A. Luna, G Vazquez, D Aguilar, G. Azevedo, "Modeling of a Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator", International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009), Page(s): 734-739, July 2009.
- [90] C. Busca, A Stan, T Stanciu, D. I. Stroe, "Control of Permanent Magnet Synchronous Generator for Large Wind Turbines", IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2010), Page(s): 3871-3876, July 2010.
- [91] T. Senjyu, N. Nakasone, A. Yona, A. Y. Saber, T. Funabashi, H. Sekine, "Operation Strategies for Stability of Gearless Wind Power Generation Systems", Power and

Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Page(s):1-7, July 2008.