

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：1032001INER039

受委託機關(構)：財團法人台慶科技教育發展基金會

計畫主持人：國立台灣大學工程科學及海洋工程系 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：童琮志

報告日期：103 年 11 月 2 日

## 中文摘要

本計畫研究針對 NREL 5MW 離岸風機機組，以 ADAMS 軟體 AdWiMo 模組建構全機組之動態模式，包含：葉片幾何、機艙及塔柱等 ADAMS 提供之模組，進行風力機組動態模擬，不同風速、不同葉片旋角(pitch angle)以及不同轉向(yaw)等條件下，風力機組動態特性，並結合 TIS1 風機氣動力(Aerodynamic analysis)分析以及 TIS1 風機結構安全性評估之葉片及塔架應力分析，可得風力機組於不同風速、風向等操作條件下之應力，並結合 ADAMS 與 MATLAB/SIMULINK，發展風力機組之旋角控制(pitch control)，進行開迴路及閉迴路模擬，分析於不同風況下，不同旋角控制及不同轉向控制下，所產生之應力，從而訂定極端風速下，風力機組之最小受力模式，依此制定風力機組最佳操作模式以及控制策略。

同時，本文亦根據風力發電機的離岸狀況下設計出創新液壓變旋角驅動系統。結合液壓系統的高出力高響應的特性，系統可以輕鬆地針對風況與海況做出改變，以達到最佳功率的實現。最後，獨立變旋角控制器的效果也會在本文中作分析，並針對離岸風力發電機設計出適合的控制策略。

**關鍵詞：**風力發電機、旋角控制、轉向控制、液壓系統、動態模擬

## **Abstract**

The project aims to develop the suitable operation mode of offshore wind turbine released by NREL. The dynamic simulation that is executed by the commercial software ADAMS is investigated by using the provided component modules of ADAMS\_AdWiMo, including blade, gear, cabin and yaw...etc. under different wind speed, directions, pitch angle and yaw angle. By combining the TIS1-aerodynamic loading analysis and the TIS1- stress analysis of blade and tower, the suitable operation mode can be analyzed and thus the proper operation mode and control strategies can be developed. Furthermore, by combining ADAMS and MATLAB/ SIMULINK the open-loop and closed-loop control simulation of pitch control and yaw control can be implemented in order to evaluate the developed operation mode and control strategies.

Meanwhile, a novel hydraulic pitch control system was developed to deal with the offshore condition. With the characteristics of high response and high power output, the system can easily react in different wind and wave conditions so that we can finally present a maximum power tracking control in our simulation. Finally, the efficiency of independent pitch control will be verified in this study to design a proper strategy for offshore wind turbine.

**Keywords:** wind turbine, pitch control, yaw control, hydraulic system, dynamic simulation

# 目錄

中文摘要	II
Abstract	III
目錄	IV
圖目錄	VI
表目錄	VIII
<b>壹、計畫緣起與目的</b>	<b>1</b>
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	5
<b>貳、研究方法與過程</b>	<b>10</b>
<b>一、風力發電機運轉原理及架構</b>	<b>10</b>
(一)風力發電機模擬軟體 AdWiMo 介紹	11
(二)氣動力模擬軟體 AeroDyn 介紹	12
<b>二、NREL 離岸型風力發電機運動模型建立</b>	<b>12</b>
(一)塔架資料檔模型建立	13
(二)葉片資料檔模型建立	15
(三)NREL 5MW 機艙 3D 幾何建立	17
<b>三、NREL 離岸風機旋角控制器</b>	<b>18</b>
(一)直流馬達旋角控制器	18
(二)創新液壓系統旋角控制器	19

四、變螺距液壓控制系統控制器設計 .....	24
(一)具自調式模糊滑動補償之適應性模糊控制器 .....	24
參、主要發現與結論 .....	29
一、風力發電機開迴路液壓伺服系統模擬 .....	29
二、風力發電機液壓伺服系統控制器閉迴路控制模擬 .....	31
(一)變螺距系統無擾動之螺距角五階軌跡-定位控制模擬 .....	33
(二)變螺距系統無擾動之螺距角正弦波軌跡追蹤控制模擬 .....	37
(三)變螺距系統無擾動之螺距角全機控制模擬 .....	41
三、結論 .....	44
參考文獻 .....	45

## 圖目錄

圖 1：陸上型、固定式離岸型及浮動式離岸型風力發電機.....	2
圖 2：台灣離岸風能.....	2
圖 3：行政院所提出『千架海陸風力機』之規劃.....	3
圖 4：浮動式離岸型風力發電機可變螺距控制架構.....	3
圖 5：VPVM液靜壓傳動系統架構.....	5
圖 6：AdWiMo主要執行輸入檔.....	12
圖 7：塔架坐標軸示意圖.....	14
圖 8：塔架坐標剖面圖.....	14
圖 9：Tower_by_beam 產生器介面.....	15
圖 10：Blade_by_beam 產生器介面.....	16
圖 11：NREL 5MW風機葉片幾何.....	16
圖 12：NREL 5MW風機機艙 3D幾何.....	18
圖 13：直流馬達驅動螺距角示意圖.....	18
圖 14：變轉速泵控液壓系統架構圖.....	20
圖 15：液壓變螺距機構細部架構圖.....	23
圖 16：具自調式模糊滑動補償之適應性模糊控制器及系統架構圖.....	28
圖 17：變螺距系統無擾動力矩下之開迴路模擬與實驗之比較.....	30
圖 18：變螺距系統無擾動之螺距角五階軌跡-定位控制行程為 20 秒 10 度，模擬時間為 30 秒之模擬結果.....	34
圖 19：變螺距系統無擾動之螺距角五階軌跡-定位控制行程為 20 秒 15 度，模擬時間為 30 秒之模擬結果.....	35
圖 20：變螺距系統無擾動之螺距角五階軌跡-定位控制行程為 20 秒 20 度，模擬時間為 30 秒之模擬結果.....	36
圖 21：變螺距系統無擾動之螺距角正弦波軌跡追蹤控制振幅為 10 度，.....	38
圖 22：變螺距系統無擾動之螺距角正弦波軌跡追蹤控制振幅為 15 度，.....	39
圖 23：變螺距系統無擾動之螺距角正弦波軌跡追蹤控制振幅為 20 度，.....	40
圖 24：變螺距系統於穩定風速下全機模擬結果 (a)輸入風速 (b) 螺距角目標值及模擬值 (c) 螺距角誤差.....	42
圖 25：變螺距系統於隨機風速下全機模擬結果 (a)輸入風速 (b) 螺距角目標值及模	

擬值 (c) 螺距角誤差.....	43
-------------------	----

## 表目錄

表 1：NREL 5MW 風機規格表 .....	13
表 2：NREL 5MW機組塔架資料 .....	14
表 3：NREL 5MW機組葉片資料 .....	15
表 4：NREL 5MW機艙資料 .....	17
表 5：變螺距系統無擾動力矩下之開迴路模擬與實驗規畫表 .....	29
表 6：模擬控制器參數表 .....	32
表 7：變螺距系統無擾動之螺距角五階軌跡-定位控制模擬規畫表 .....	33
表 8：變螺距系統無擾動之螺距角正弦波軌跡追蹤控制模擬規畫表 .....	37
表 9 變螺距系統客制化風況軌跡追蹤控制模擬規畫表 .....	41



## 壹、計畫緣起與目的

### 一. 研究背景

自 1980 年代來，許多已開發國家如：德國、丹麥、美國等，在風力發電技術已有相當成果，風力發電機組單機容量由最初數十 KW，發展至 MW 級；而控制方式由基本固定槳距(pitch angle)失速控制朝全葉片變螺距(variable pitch angle)和變速恆頻發展，未來幾年內將可見智慧型風力發電機組。而運轉可靠度方面，由 1980 年代初之 50%，提升至 98%以上。而就發展趨勢而言，風場將由內陸移至海上，離岸式風力發電機之發展需求勢必更加殷切，也因此風力發電機將朝更大發電容量發展。

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，圖 1 所示為陸上型、固定式離岸型及浮動式離岸型風力發電機之區隔。台灣離岸風能蘊含豐富約 48,000MW，如圖 2 所示。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，如圖 1 所示。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，如圖 2 所示。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。而離岸型風力發電機已裝置之水深，又分為固定式及浮動式，固定式離岸型風力發電機多裝置於 20m 水深以內，直接將基樁固定於海床，故裝置及操控方式與陸上型風力發電機類似。浮動式離岸型風力發電機多裝置於 50m 水深以上，風力機組固定採用浮動式，以錨定方式固定，故風力機組會隨波浪及風力而擺動，使得其裝置及操控與固定式離岸型風力發電機截然不同，而更加複雜困難。

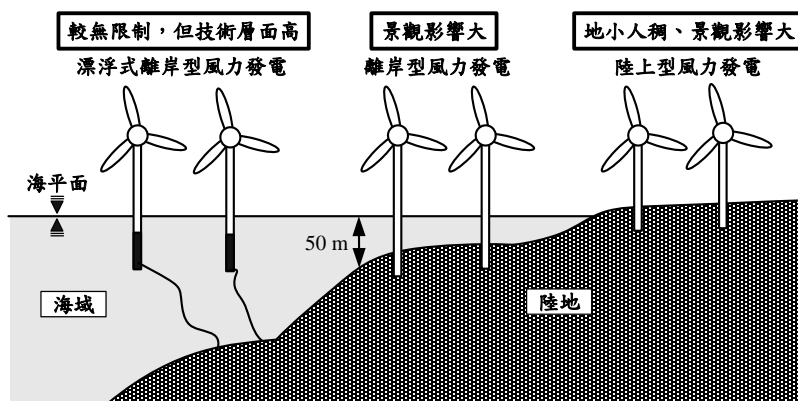


圖 1：陸上型、固定式離岸型及浮動式離岸型風力發電機

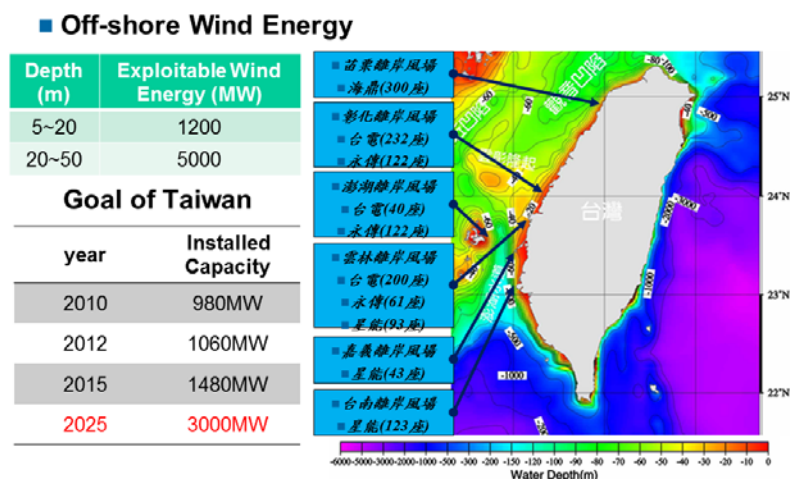


圖 2：台灣離岸風能

## Goal and Schedule

### ■ One Thousand Wind Turbines in 2030

year	2010	2015	2030
Onshore (MW) (wind turbines)	519 (268)	866 (350)	1,200 (450)
Offshore (MW) (wind turbines)	0	15 (3架)	3,000 (600)
Total (MW) (wind turbines)	519 (268)	881 (353)	4,200 (1,050)

圖 3：行政院所提出『千架海陸風力機』之規劃

而浮動式離岸型風力發電機，由於塔架將會隨波浪浮動，導致葉片旋角(Pitch angle)及機艙轉向(yaw)亦會隨波浪浮動，故無法如陸上行或固定式離岸發電機，容易保持葉片旋角與風之相對夾角與。浮動式離岸型風力發電機若想要保持葉片旋角與風之固定相對夾角，必須量測塔架浮動之三維絕對位置，再將塔架浮動絕對角度列入葉片旋角控制之補償，故以變速型風力發電機實現浮動式離岸型風力發電機，葉片旋角控制為基本功能要求，然而卻也更複雜，難度更高。目前風力發電機大都採用雙饋式感應發電機，而未來離岸型風力發電機將採用永磁同步發電機，其具有低轉速特性，故風機之運轉模式也不同。離岸型漂浮式風力發電機可變螺距控制架構如圖 4 所示。

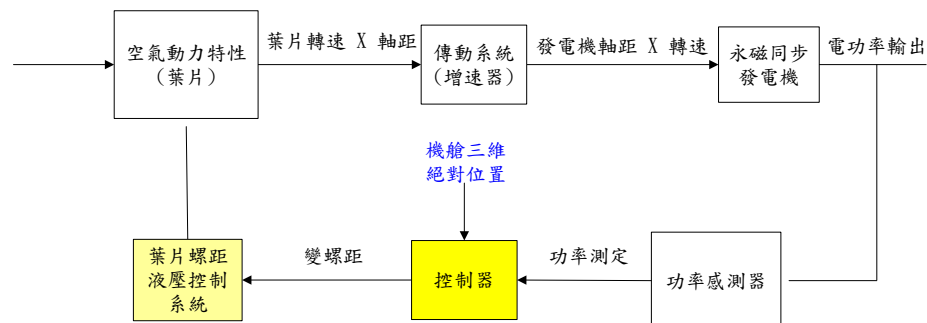


圖 4：浮動式離岸型風力發電機可變螺距控制架構

離岸型風力發電機組正朝大發電容量機組(2~5MW)發展，比陸上型規模更大，而且環境氣候因素，如：風速、波浪、鹽化腐蝕等，更惡劣。而離岸型風力發電機較陸上型更難組立，必須藉配備大型吊具之特殊船舶進行吊裝，故離岸型風力發電機較陸上型對機艙(Cabine)之重量必須更審慎考量，減低機艙重量將可簡化吊裝組立作業及時間。另一方面由於目前風力發電機之發電機產生之電力必須先經過整流等電力轉換後，才可併入電網，而隨著大發電容量機組(2~5MW)發展，電力轉換設備也將更大，導致機艙重量將更高。

由於液壓系統具有高出力、高功率/重量比(Power/Weight ratio)、以及良好的剛性等優點，使得液壓系統廣泛地應用在各個領域裡，如船舶、飛機、車輛、工具機、電場設備…等。液壓系統依供油方式主要可以分成二類：閥控液壓系統(hydraulic valve-controlled system)及泵控液壓系統(或排量控制液壓系統，hydraulic displacement controlled system)，而又各分為定流量及定壓力系統，而其中定流量泵控液壓系統即為液靜壓傳動系統(Hydrostatic Transmission System, HST)，可進行連續無段之變轉速及變扭矩調控，如圖 5 所示，已廣泛應用於不同之領域，如：車輛無段變速傳動等。液靜壓傳動系統包含液壓泵及液壓馬達，而其可由定排量及變排量不同性能，故可組成四種不同之液靜壓傳動系統，包含：定排量泵定排量馬達(FPFM)、定排量泵變排量馬達(FPVM)、變排量泵定排量馬達(VPFM)、變排量泵變排量馬達(VPVM)。其中變排量泵變排量馬達(VPVM)系統具最廣之變速範圍，由於液靜壓傳動系統具高效率及高功率/重量比，故相當適合應用於對體積及重量限制較高之傳動系統，進行無段變速及變扭矩控制。

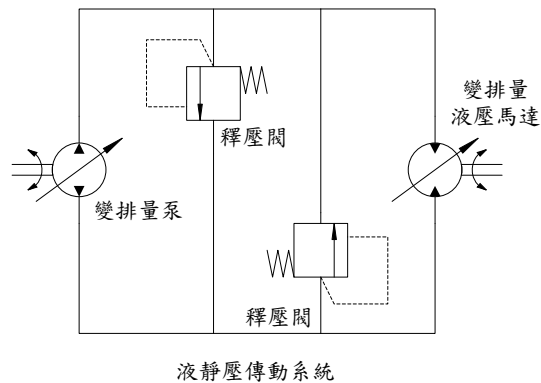


圖 5：VPVM 液靜壓傳動系統架構

目前國內所安裝之風力機組，皆為國外機組，以台電為例，外國風機安裝於國內後，逐漸發生嚴重水土不合之問題，歐美機組所設計之環境與國內不盡相同，台灣較高溫、潮濕，較易有鹽害腐蝕之問題，而更重要是颱風對機組之影響，歐美機組幾乎都沒有考慮颱風問題，而浮動式離岸型風力發電機，裝置於海上，故颱風之影響更嚴重，故發展抗颱風(Anti-typhoon)風機是迫切需要的。

而抗颱風風機除由結構設計進行考量外，本研究將以控制方式結合結構子計畫之風機結構及葉片應力分析，藉由不同入射風速及角度，由結構子計畫先行分析風機結構及葉片所受之應力及變型量，作為抗颱風風機之控制策略，然後結合轉向控制(Yaw Control)依颱風時不同風速及入射角度，進行抗颱風風機之控制，使風機之葉片應力保持於最低受力狀態，以保護風機及葉片。

## 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，始於 1980 年代，而於近十年來，投入之研究迅速增加，主要原因在於，歐美先進國家環保意識高漲，綠色能源之開發，獲得政府政策之支持，其中特別以德國及丹麥為最早投入風力發電機組之實際大量應用。而美國近幾年來，GE 也相繼投入開

發大型風力發電機組。而國內也是政府政策之支持，台電公司及德商英威華公司相繼投入國內風力發電機組之建立及應用。

學術研究方面，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，區分為四類，分別為 1.風力發電機組回顧及分析；2. 風力發電機數學模式建立；3. 風力發電機螺距控制；4. 風力發電機之發電機控制；5. 離岸型風力發電機。

#### ■ 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  $H_{\infty}$  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，對浮動式離岸型風力發電機之機組技術探討，並沒有相關討論。

## ■ 智慧型控制理論

自 1965 年 Zadeh 教授提出模糊集合論的見解後，在 1974 年英國倫敦大學 E.H. Mamdani[34]教授成功的將 Fuzzy 理論應用於控制上，1988 年後，日本人更將 Fuzzy 理論有效應用於消費性家電後，Fuzzy 已然成為家喻戶曉的名詞。所謂模糊控制即仿效人類的思考方式，類似於人類經驗法則，以 if-then 的形式，表達具模糊性思考決策過程，不需數學模型的控制理論，然而模糊理論發展至今，在應用於上仍有相當多的缺點，最常見的問題如下：(1)專家經驗不足:由於模糊控制系統是一種結合操作人員直覺及經驗的專家型控制器，不需數學模型，在設計過程中仍以反覆試誤居多，沒有一定的系統方法可循，若專家經驗不足將導致不可預知的後果。(2)資料庫龐大：若欲使用模糊控制器於一個高控制精度的系統，往往需要強大的資料庫，而實際硬體裝置中記憶體的大小會使資料庫有所限制。故陸續有改良方法提出。模糊滑動模式控制(Fuzzy Sliding Mode Control)結合滑動模式控制與模糊控制，簡化規則庫及運算時間[49-51]。[52]發展出語意式之自組織控制器(Self-Organizing Controller)。而更進一步發展出具線上學習能力之自組織模糊控制[53]。[54]結合自組織控制器與模糊滑動模式控制，發展出自組織模糊滑動模式控制，兼具線上學習能力及簡化規則庫，更具實際應用。

## 貳、研究方法與過程

### 一. 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。目前 2MW 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：

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

其中  $A$  : 轉子葉片掃過面積  
 $\rho$  : 空氣密度  
 $V_w$  : 風速

由式(2-1)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：

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

其中  $P_w$  : 風機獲取的風能大小  
 $\lambda$  : 尖速比 (tip-speed ratio)  
 $\beta$  : 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：

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

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

### (一)風力發電機模擬軟體 AdWiMo 介紹

風力發電機是一個負責的機械系統，其中包含葉片、軸承、齒輪、塔架發電機及控制...等。這些部分彼此高度耦合不儘增加模擬上的困難，更顯示其整合模擬的重要性。ADAMS 這套軟體著重在系統的多體動力分析並同時具有剛體與柔性體的分析以提供風機系統動態充足且完整的數值預測。

AdWiMo (Advanced Windturbine Modelling) 是一個再 ADAMS 的嵌入式系統是設計用來提供有效的風力發電機建模與分析環境。其中建模方面包含了 tower\_by\_beam 與 blade\_by\_beam 等建模處理器。空氣動力的部分則仰賴 NREL 自行開發的 Aerodyn。因此使用者可以簡單的定義出風場病逝模擬的情況輸入單一或多個風場。而附加功能”waveloads”是由 Leibniz 大學的 Hannover 所設計用來支援 AdWiMo 中的離岸風機，這些東西大大簡化了假設這些模型的時間

除了提供葉片與塔架的柔性體分析之外，AdWiMo 同時提供了輪殼、機艙與主軸承的柔性分析讓全機組的模擬更加完整。

圖 6 是執行 AdWiMo 軟體需要的輸入檔，共分成 Primary、Tower、Blade(s)與 Hub 等輸入檔，Primary 裡面包含簡單的初始條件、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，作為增速齒輪箱與直驅式之用。Tower 與 Blade(s) 輸入檔可依據不同的風機把塔架與葉片建構成柔性體(Flexible)

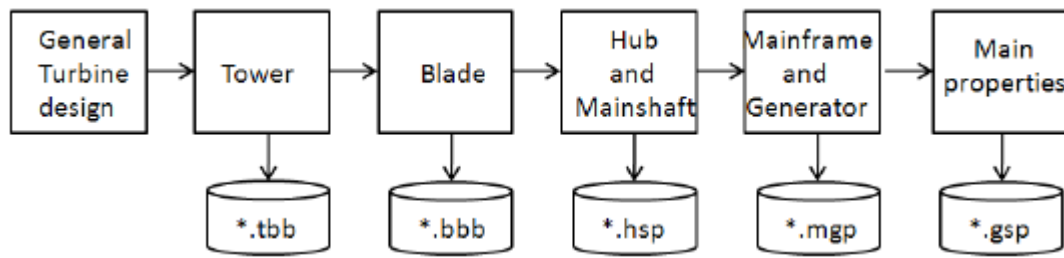


圖 6：AdWiMo 主要執行輸入檔

## (二)氣動力模擬軟體 AeroDyn(Aerodynamics)介紹

AeroDyn 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)來對葉片的螺距軸(Pitch axis)作畫分，並對每個元素的節點施加氣動力。

AeroDyn 需要三個資料檔，分別是 Primary、Airfoil(s)與 Wind，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 16 等份。Airfoil(s)裡面包含不同的攻角(angle of attack)對應的升力(Lift coefficient)與阻力係數(Drag coefficient)，翼型的資料可由風洞實驗或 CFD 軟體計算獲得，這對於 AeroDyn 計算氣動力提供一個良好的根基，第三章會就這兩個係數做一詳細介紹。Wind 風的資料檔是由 TurbSim 或 IECwind 軟體產生，可以就不同風況，如定風、陣風、風向改變等，模擬真實的風況，增加模擬結果的可信度。

## 二. NREL 離岸型風力發電機運動模型建立

建立 AdWiMo 所需的 Tower、Blade(s)與 Turbine 檔，並執行 AdWiMo 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。

表 1：NREL 5MW 風機規格表

類型	5 MW
轉子類型、轉子型態	Upwind, 3 Blades
控制	Variable Speed, Collective Pitch
傳動軸	High Speed, Multiple-stage Gearbox
轉子、輪殼半徑	126 m, 3 m
輪殼高度	90 m
切入、額定、切出風速	3 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s
切入、額定轉速	6.9 rpm, 12.1 rpm
額定葉尖速	80 m/s
突出、軸承傾角、葉片傾角	5 m, 5°, 2.5°
轉子質量	110,000 kg
機艙質量	240,000kg
塔架質量	347,460 kg
整體質心位置	(-2.0 m, 0.0 m, 64.0 m)

### (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

表 2：NREL 5MW 機組塔架資料

高度	87.6 m
整體質量	347,460 kg
質心位置	38.234 m
結構阻尼比	1 %

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。

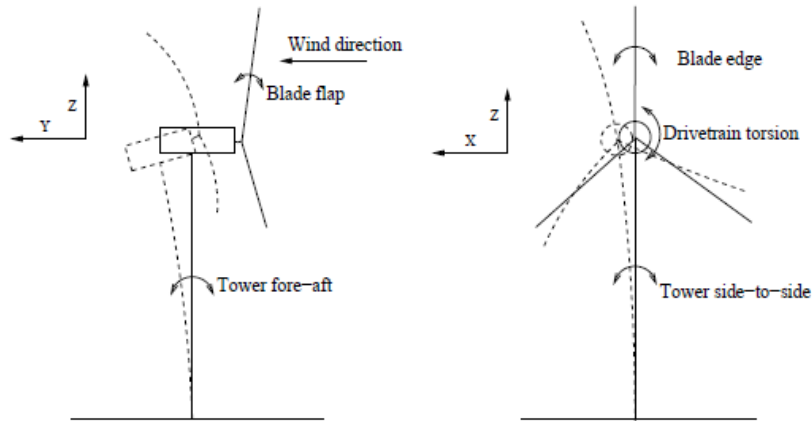


圖 7：塔架坐標軸示意圖

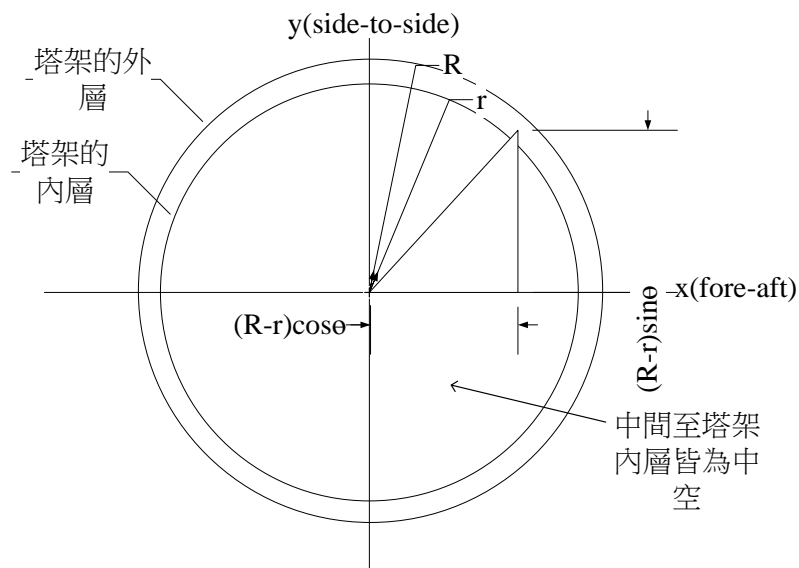


圖 8：塔架坐標剖面圖

利用上述的尺寸、坐標定義與柔性體的計算，執行 AdWiMo 軟體，產生風力發電機模組，並且在 ADAMS 軟體上呈現，如圖 9 所示。

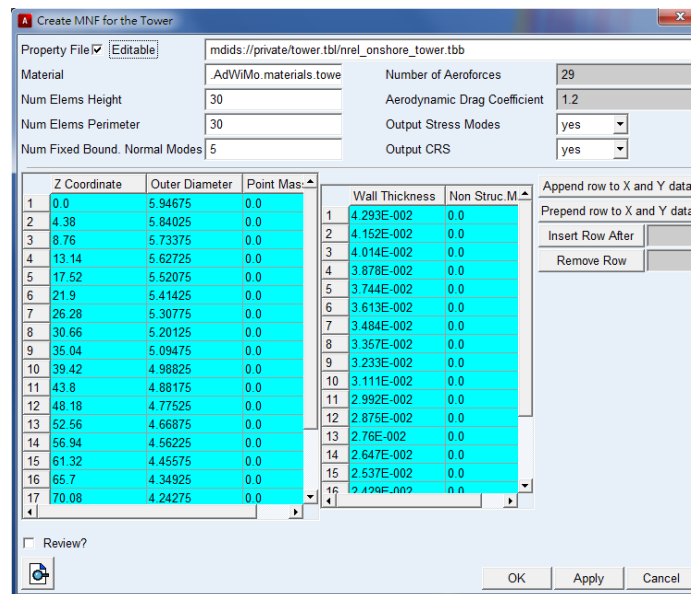


圖 9： Tower\_by\_beam 產生器介面

## (二) 葉片資料檔模型建立

表 3 包含葉片的基本特性，如上節的塔架資料檔，根據 AdWiMo 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。

表 3：NREL 5MW 機組葉片資料

長度	61.5 m
質量比例因數	4.536 %
整體質量	17,740 kg
第二質量慣性矩	11,776,047 kg·m <sup>2</sup>
質量慣性矩	363,231 kg·m
質心位置	20.475 m
結構阻尼比	0.477465 %

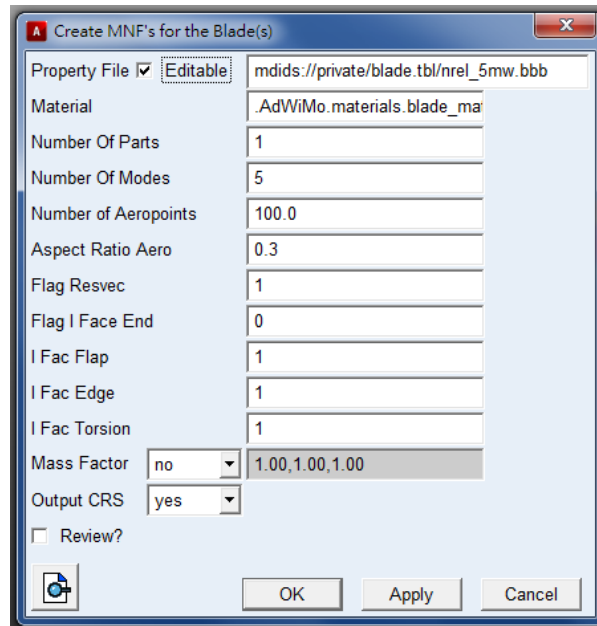


圖 10：Blade\_by\_beam 產生器介面

利用上述的尺寸、坐標定義與柔性體的計算，執行 AdWiMo 軟體，產生風力發電機模組，並且在 ADAMS 軟體上呈現，如圖 10~圖 11 所示。

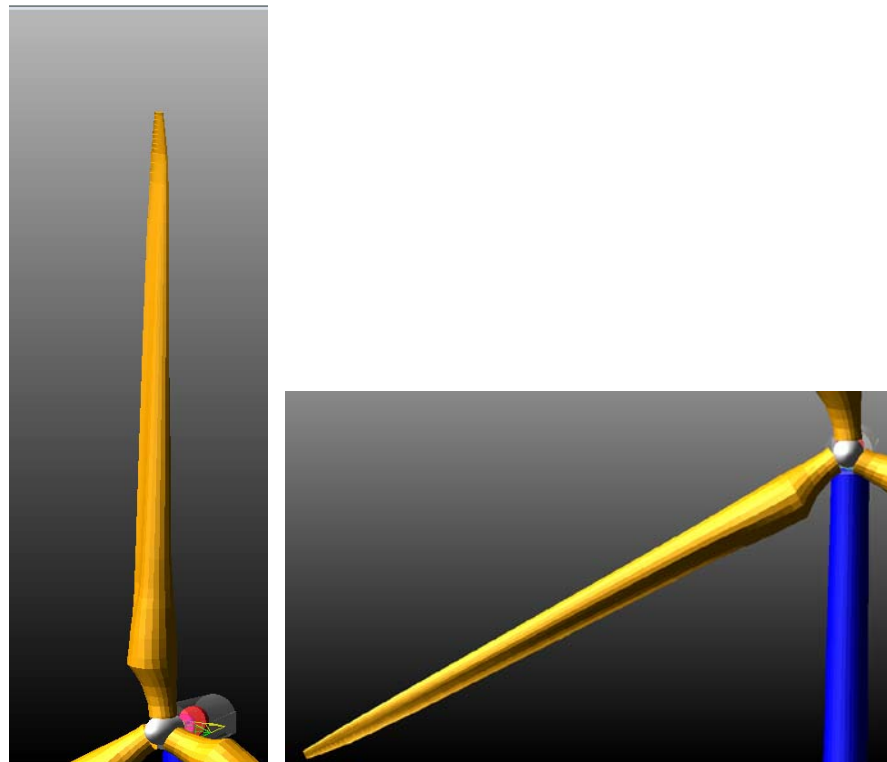


圖 11：NREL 5MW 風機葉片幾何



### (三) NREL 5MW 機艙 3D 幾何建立

表 4 包含輪殼半徑、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，圖 12 是風力發電機幾何外型 3D 圖在 ADAMS 軟體上實現。

表 4：NREL 5MW 機艙資料

偏航軸承高度	87.6 m
偏航軸垂直距離	1.96256 m
輪殼中心至偏航軸距離	5.01910 m
輪殼中心至主軸距離	1.912 m
輪殼質量	56,780 kg
輪殼質量慣性矩	115,926 kg· m <sup>2</sup>
機艙重量	240,000 kg
機艙質量慣性矩	2,607,890 kg· m <sup>2</sup>
機艙質心位置	1.9 m
等效偏航系統彈簧系數	9,028,320,000 N·m/rad
等效偏航系統阻尼係數	19, 160,000 N·m/(rad/s)
標準機艙與偏航比	0.3 %

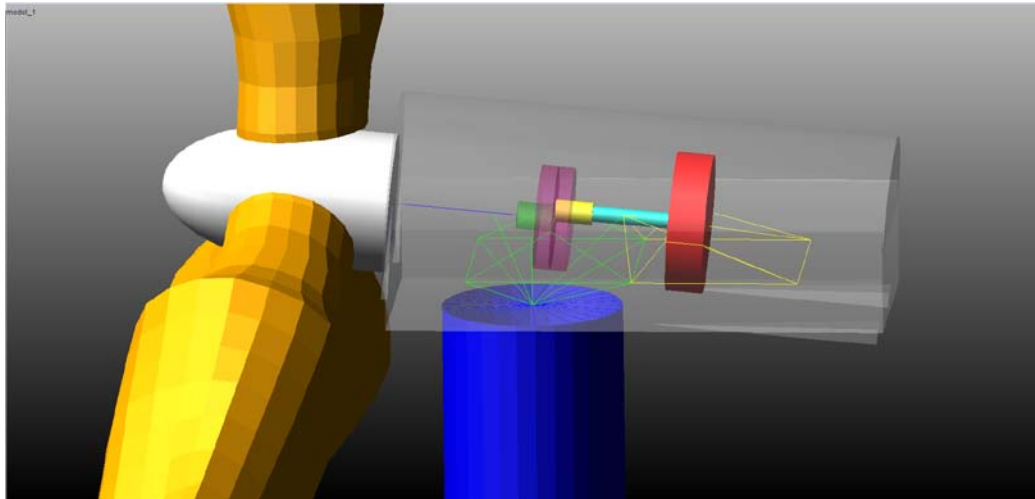


圖 12：NREL 5MW 風機機艙 3D 幾何

### 三. NREL 離岸風機旋角控制器

#### (一) 直流馬達旋角控制器

直流馬達控制螺距角系統數學模型，利用馬達可以直接輸出轉矩的特性，本研究設計馬達利用齒輪直接與螺距角根部作一對一的轉動，如圖 13. 直流馬達驅動螺距角示意圖 13 所示。

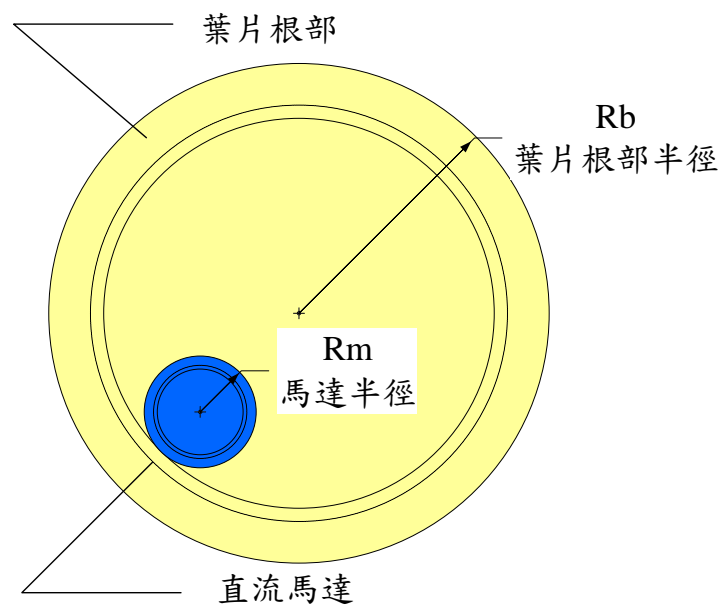


圖 13：直流馬達驅動螺距角示意圖

而負載力矩方程式改寫成：

$$\sum T = T = T_m - T_{ext} - T_f = J\ddot{\theta}_m + D\dot{\theta}_m = (J_m + \frac{J_b}{n^2})\ddot{\theta}_m + (D_m + \frac{D_b}{n^2})\dot{\theta}_m \quad (3-1)$$

其中	$T_m$	：馬達力矩
	$T_{ext}$	：外部干擾力矩
	$T_f$	：摩擦力矩
	$J$	：等效轉動慣量
	$D$	：等效轉動阻尼
	$\ddot{\theta}_m$	：馬達轉動加速度
	$\dot{\theta}_m$	：馬達轉動速度
	$J_m$	：馬達轉動慣量
	$J_b$	：葉片轉動慣量
	$D_m$	：馬達阻尼
	$D_b$	：葉片阻尼
	$n$	：齒輪比( $R_b/R_m$ )

從以上的運動方程式，我們就可以得到馬達的轉動角度 $\theta_m$ ，再經由齒輪比的轉換 ( $\theta_m/n = \theta_b$ )，就可以得到負載端的螺距角轉動角度 $\theta_b$ 。

## (二)創新液壓系統旋角控制器

當風力機組達到額定風速後，發電功率達到極限，必須有相應的功率調節措施，使輸出功率不再增加。葉片變螺距控制主要是以液壓伺服系統結合機構推動葉片改變翼型攻角，使翼型升力阻力產生變化，達到控制風力機擷取風能而改變輸入扭矩和功率之目的。功率調節效果之優劣，與葉片變螺距響應速度有關。

## ■ 變轉速泵控液壓伺服系統數學模型

變轉速泵控液壓系統架構圖如圖 14：

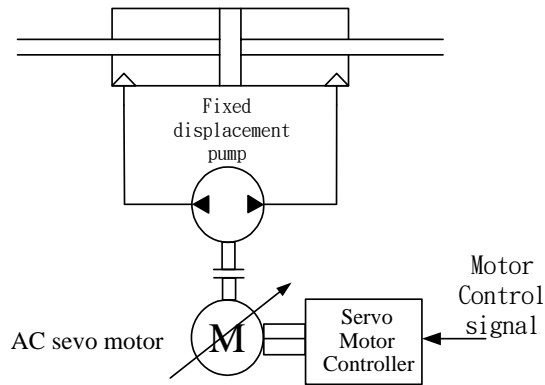


圖 14：變轉速泵控液壓系統架構圖

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：

$$Q_l = D_l \omega_a - C_l P_l \quad (3-2)$$

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
$\omega_a$	：	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：

$$\omega_a = K_a u \quad (3-3)$$

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：

$$Q_l = A_p \dot{x}_p + C_l P_l + \left( \frac{V_t}{4\beta_e} \right) \dot{P}_l \quad (3-4)$$

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  
 $\beta_e$  : 液壓油有效容積模數

將 (3-2)式及(3-4)式結合可得變轉速系統及受控液壓缸流量連續方程式：

$$D_l \omega_a = A_p \dot{x}_p + (C_l + C_t) P_l + \left( \frac{V_t}{4\beta_e} \right) \dot{P}_l \quad (3-5)$$

根據牛頓第二運動定律，液壓缸運動方程式為：

$$f_h - f_l = A_p P_l - f_l = M \ddot{x}_p + B \dot{x}_p + K x_p \quad (3-6)$$

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

■ 創新液壓變螺距機構

液壓系統驅動扭矩為：

$$T_h = f_h \times D_h = A_p P_l \times L_c \sin \phi_2 \quad (3-7)$$

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

$$\sum T = nT_h - T_{ext} - T_{load} = J\ddot{\beta} + d\dot{\beta} + c\beta \quad (3-8)$$

其中  $n$  : 液壓缸數量

$T_{ext}$  : 干擾力矩

$T_{load}$  : 負載力矩

$\beta$  : 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

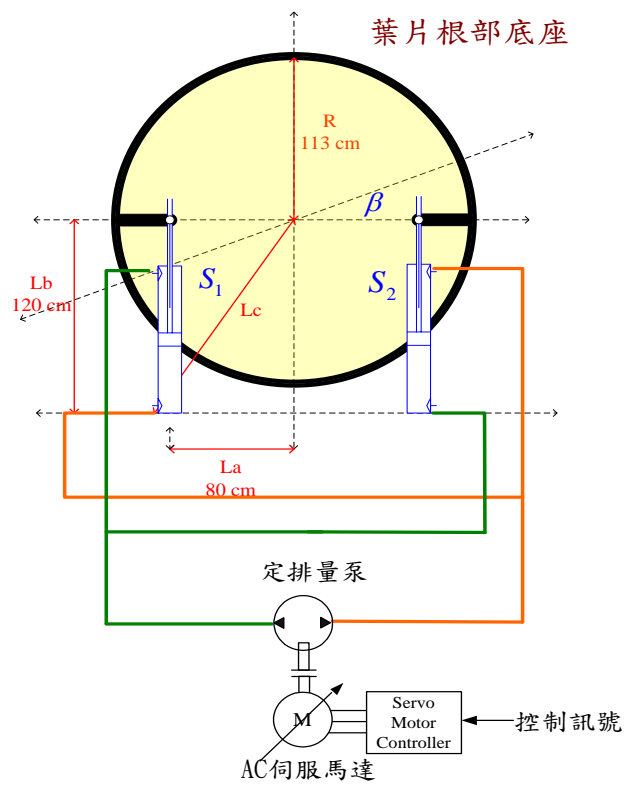


圖 15：液壓變螺距機構細部架構圖

#### 四. 變螺距液壓控制系統控制器設計

由於變螺距液壓控制系統具有高度非線性，不易控制，必須採用較複雜之現代控制理論，本文以實驗室所發展之具自調式模糊滑動補償之適應性模糊控制器，進行控制器之設計。

設計一性能良好的滑動模態控制器，需要精確系統模型和參數，然而在實際上要得到完整詳細的動態模型，是相當困難的，所以我們利用具自調式模糊滑動補償之適應性模糊控制器（adaptive fuzzy controller with self-tuning fuzzy sliding-mode compensation, AFC-STFSMC）來解決這些問題，運用在複雜且非線性的液壓系統，實現風機之變螺距控制。

##### (一)具自調式模糊滑動補償之適應性模糊控制器

本研究以實驗室發展之具自調式模糊滑動補償之適應性模糊控制器 adaptive fuzzy controller with self-tuning fuzzy sliding-mode compensation (AFC-STFSMC)[19]，進行液壓變螺距控制器設計。

假定一單輸入單輸出非線性系統，數學動態模型表示如下：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2(t) \\ \dot{x}_2 = x_3(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_n = f(\underline{x}) + g(\underline{x})u + d(\underline{x}) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (4-1)$$

控制目的是希望經控制器計算所輸出的控制訊號  $u$ ，能調整系統狀態  $x$ ，可以追蹤參考值  $x_d$ 。

定義追蹤誤差：



$$e(t) = x_d(t) - x(t) \quad (4-2)$$

定義一滑動平面 S :

$$S(t) = \ddot{e}(t) + k_1 \dot{e}(t) + k_2 e(t) \quad (4-3)$$

其中  $k_1$  及  $k_2$  為非零正數

假設(4-1)式之系統動態模型參數及內外干擾已知或可量測，可導出

控制器輸出為：

$$u^* = g^{-1}(x) [\eta S_\Delta(t) - f(x) - d(x) + \ddot{x}_d + k_1 \ddot{e}(t) + k_2 \dot{e}(t)] \quad (4-4)$$

其中  $S_\Delta(t) = S(t) - \Phi \text{sa}(S(t)/\Phi)$  為滑動平面 S 的邊界層

$\Phi$  為滑動平面 S 的邊界層寬度

邊界層  $S_\Delta$  函數性質，根據適應性定律設計為

$$\text{Property 1 : As } |S| > \Phi, \Rightarrow |S_\Delta| = |S| - \Phi \text{ and } \dot{S}_\Delta = \dot{S} \quad (4-7)$$

$$\text{Property 2 : As } |S| \leq \Phi, \Rightarrow S_\Delta = \dot{S}_\Delta = 0 \quad (4-8)$$

根據上述兩個性質，可避免因為過度學習導致系統發散，因此

當系統進入滑動平面 S 的邊界層，適應律規則便不再修正。

將(4-1)式及(4-2)式代入(4-3)式並微分可得：

$$\dot{S}(t) = -f(x) - g(x) u - d(x) + \ddot{x}_d + k_1 \ddot{e}(t) + k_2 \dot{e}(t) \quad (4-9)$$

將(4-10)式代入(4-13)式可得

$$\dot{S}(t) + \eta S_\Delta(t) = 0, \quad \eta > 0 \quad (4-10)$$

滿足(4-14)式可以發現，當  $t \rightarrow \infty$  時， $e(t)$  將會收斂在零附近，其值視邊界層  $\Phi$  而定[50]。但實際系統之參數很難精確的獲得，故(4-10)式

的  $u^*$  很難獲得，所以我們引入萬用逼近理論(universal approximation theorem)。

定義理想控制器與模糊控制器之間誤差滿足

$$|u^* - \hat{u}_{fz}(S, \underline{\alpha}^*)| \leq \rho^* \quad , \quad \rho^* > 0 \quad (4-11)$$

其中  $\rho^*$  為有限值，其範圍  $|\rho^*| \leq M_\rho$

利用模糊控制器  $\hat{u}_{fz}(S, \underline{\alpha}^*)$  估測理想控制器  $u^*$ ，其估測值為：

$$\hat{u}_{fz}(S, \hat{\underline{\alpha}}) = \underline{\alpha}^T \underline{\xi} \quad (4-12)$$

其中  $\hat{\underline{\alpha}}$  是  $\underline{\alpha}^*$  的估測參數向量

由自調式模糊滑動補償之適應性模糊控制器(AFC-STFSMC)所發展的控制  
器定義如下：

$$u = \hat{u}_{fz}(S, \hat{\underline{\alpha}}) + u_{comp}(S) \quad (4-13)$$

其中模糊控制器  $\hat{u}_{fz}(S, \hat{\underline{\alpha}})$  是用來近似理想控制器  $u^*$  的估測值，模糊  
滑動控制器  $u_{comp}(S)$  為補償理想控制器  $u^*$  與模糊控制器  $\hat{u}_{fz}(S, \hat{\underline{\alpha}})$  之差，透  
過(4-14)式、(4-7)式及(4-11)式，其動態方程表示為：

$$\dot{S}(t) + \eta S_\Delta(t) = g[u^* - \hat{u}_{fz}(S, \hat{\underline{\alpha}}) - u_{comp}(S)] \quad (4-14)$$

為了確保由適應性定理所推導的控制器能使系統響應收斂至  
限制邊界層內，定義 Lyapunov 候選函數(candidate Lyapunov function)：

$$V(S_\Delta, \tilde{\underline{\alpha}}, \tilde{\rho}) = \frac{1}{2} \frac{S_\Delta^2}{g} + \frac{1}{2\eta_1} \tilde{\underline{\alpha}}^T \tilde{\underline{\alpha}} + \frac{1}{2\eta_2} \tilde{\rho}^2 \quad (4-15)$$

其中  $\tilde{\underline{\alpha}}^T = \underline{\alpha}^{*T} - \hat{\underline{\alpha}}^T$  為理想值與估測值之差

$\tilde{\rho} = \rho^* - \hat{\rho}$  為估測誤差與估測誤差補償之差

$\eta_1, \eta_2$  為正整數

將(4-15)式微分：

$$\dot{V}(S_\Delta, \tilde{\alpha}, \tilde{\rho}) = \frac{S_\Delta \dot{S}_\Delta}{g} + \frac{1}{\eta_1} \tilde{\alpha}^T \dot{\tilde{\alpha}} + \frac{1}{\eta_2} \tilde{\rho} \dot{\tilde{\rho}} \quad (4-16)$$

當  $|S| \leq \Phi$ ，則  $S_\Delta = 0$ ，得  $\dot{V}(S_\Delta, \tilde{\alpha}, \tilde{\rho}) = 0$

當  $|S| > \Phi$ ，則  $\dot{S}_\Delta = \dot{S}$

將(4-14)式代入(4-16)式，可推導出

$$\begin{aligned} \dot{V}(S_\Delta, \tilde{\alpha}, \tilde{\rho}) &= -\eta \frac{S_\Delta^2}{g} + S_\Delta [u^* - \hat{u}_{fz}(S, \hat{\alpha})] - S_\Delta u_{comp}(S) + \frac{1}{\eta_1} \tilde{\alpha}^T \dot{\tilde{\alpha}} + \frac{1}{\eta_2} \tilde{\rho} \dot{\tilde{\rho}} \\ &= -\eta \frac{S_\Delta^2}{g} + S_\Delta [u^* - \hat{u}_{fz}(S, \hat{\alpha}^*) + u_{fz}(S, \hat{\alpha}^*) - u_{fz}(S, \hat{\alpha})] \\ &\quad - S_\Delta u_{comp}(S) + \frac{1}{\eta_1} \tilde{\alpha}^T \dot{\tilde{\alpha}} + \frac{1}{\eta_2} \tilde{\rho} \dot{\tilde{\rho}} \\ &\leq -\eta \frac{S_\Delta^2}{g} + |S_\Delta| |u^* - \hat{u}_{fz}(S, \hat{\alpha}^*)| + S_\Delta [u_{fz}(S, \hat{\alpha}^*) - u_{fz}(S, \hat{\alpha})] \\ &\quad - S_\Delta u_{comp}(S) + \frac{1}{\eta_1} \tilde{\alpha}^T \dot{\tilde{\alpha}} + \frac{1}{\eta_2} \tilde{\rho} \dot{\tilde{\rho}} \\ &\leq -\eta \frac{S_\Delta^2}{g} + [|S_\Delta| \rho^* - S_\Delta u_{comp}(S) - \frac{1}{\eta_2} \tilde{\rho} \dot{\tilde{\rho}}] + \tilde{\alpha}^T (S_\Delta \xi(S) - \frac{1}{\eta_1} \dot{\tilde{\alpha}}) \end{aligned} \quad (4-17)$$

為了使  $\dot{V}(S_\Delta, \tilde{\alpha}, \tilde{\rho}) < 0$ ，AFC-STFSMC 的適應律選取如下：

$$\dot{\tilde{\alpha}} = \eta_1 S_\Delta \xi(S) \quad (4-18)$$

$$u_{comp}(S) = -\hat{\rho} u_{fs} \quad (4-19)$$

$$\dot{\tilde{\rho}} = \eta_2 |S_\Delta| \quad (4-20)$$

其中(4-18)式及(4-19)式的  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  分別為  $\hat{\alpha}$  與  $\hat{\rho}$  的學習率，均為正數。

如此，便可將(4-20)式改寫為：

$$\dot{V}(S_\Delta, \tilde{\alpha}, \tilde{\rho}) \leq -\eta \frac{S_\Delta^2}{g} \quad (4-21)$$

由(4-16)式~(4-19)式只能確定  $S_\Delta \in L_\infty$ ，但不一定保證能收斂。

對式(4-25)兩側積分可得：

$$\int_0^\infty S_\Delta^2 dt \leq \frac{V(S_\Delta(\infty), \tilde{\alpha}, \tilde{\rho}) - V(S_\Delta(0), \tilde{\alpha}, \tilde{\rho})}{\frac{\eta}{g}} \quad (4-22)$$

可知上(4-26)式右側為有限的，引用 Barbalat's 定理可證明  $\lim_{t \rightarrow \infty} S_\Delta = 0$ ，表示不等式  $|S| \leq \Phi$  為臨界穩定(asymptotically stable)，所以誤差  $e(t)$  能收斂至零。綜合以上推導，AFC-STFSMC 由(4-8)式表示，其中  $\hat{u}_{fc}$  由(4-12)式表示，估測參數向量  $\hat{\alpha}$  藉由適應性規則調整如(4-16)式，另外  $u_{comp}$  由(4-17)式表示，估測誤差補償  $\hat{\rho}$  藉由適應性規則調整如(4-18)式。Lyapunov 函數必須包含適應性調整法則，才能保證 AFC-STFSMC 系統最終可以為穩定狀態。

圖 16 為具自調式模糊滑動補償之適應性模糊控制器應用於及液壓變螺距系統的控制架構圖。

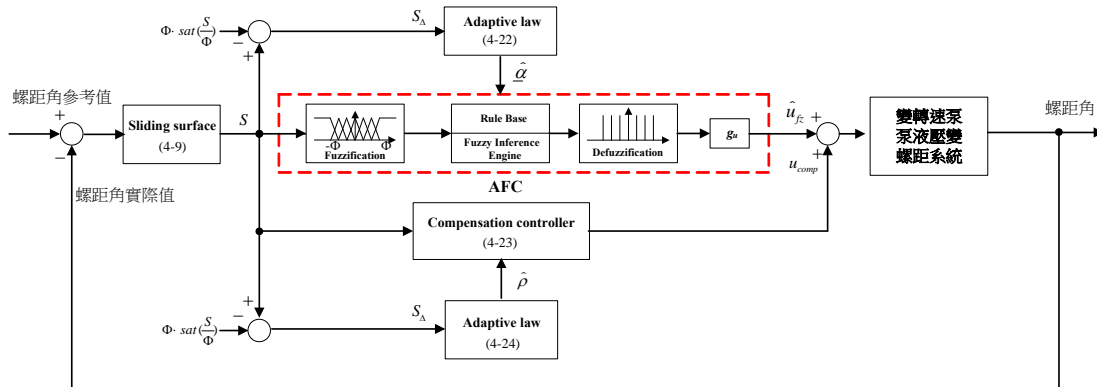


圖 16：具自調式模糊滑動補償之適應性模糊控制器及系統架構圖

## 參、主要發現與結論

### 一、風力發電機開迴路液壓伺服系統模擬

本節我們將以 MATLAB/Simulink 所建立的系統動態數學模型模擬和實際系統量測在開迴路的情況下作比較，以證明本文所推導的數學模型可近似於實際系統的行為。

為了提供系統的控制模擬，估測出實際系統的參數值，在此採用比較開迴路特性的方式，輸入適當的訊號，藉由比較實際系統與模擬的輸出曲線以修改系統的參數估測值，最後使模擬的開迴路輸出特性接近於實際系統的輸出特性，以確保所推導的數學模型符合實際系統。

本節將探討變螺距系統無擾動力矩情況下之開迴路模擬與實驗之比較，在開迴路情況下輸入變轉速泵控液壓系統之 AC 伺服馬達轉速分別為 200rpm、300rpm、400rpm 進行模擬和實驗，由模擬和實驗的圖 17 可知，在不同馬達轉速下模擬的輸出曲線和實驗的輸出曲線相當地匹配，由此可知模擬所推導的數學模型近似於實際系統的行為，而實驗的可行性也相當地高。

表 5 為變螺距系統無擾動力矩下之之開迴路模擬與實驗規畫表。

表 5：變螺距系統無擾動力矩下之開迴路模擬與實驗規畫表

圖號	輸入馬達轉速	模擬和實驗時間
圖 17(a)	200rpm	20 sec
圖 17(b)	300rpm	20 sec
圖 17(c)	400rpm	20 sec

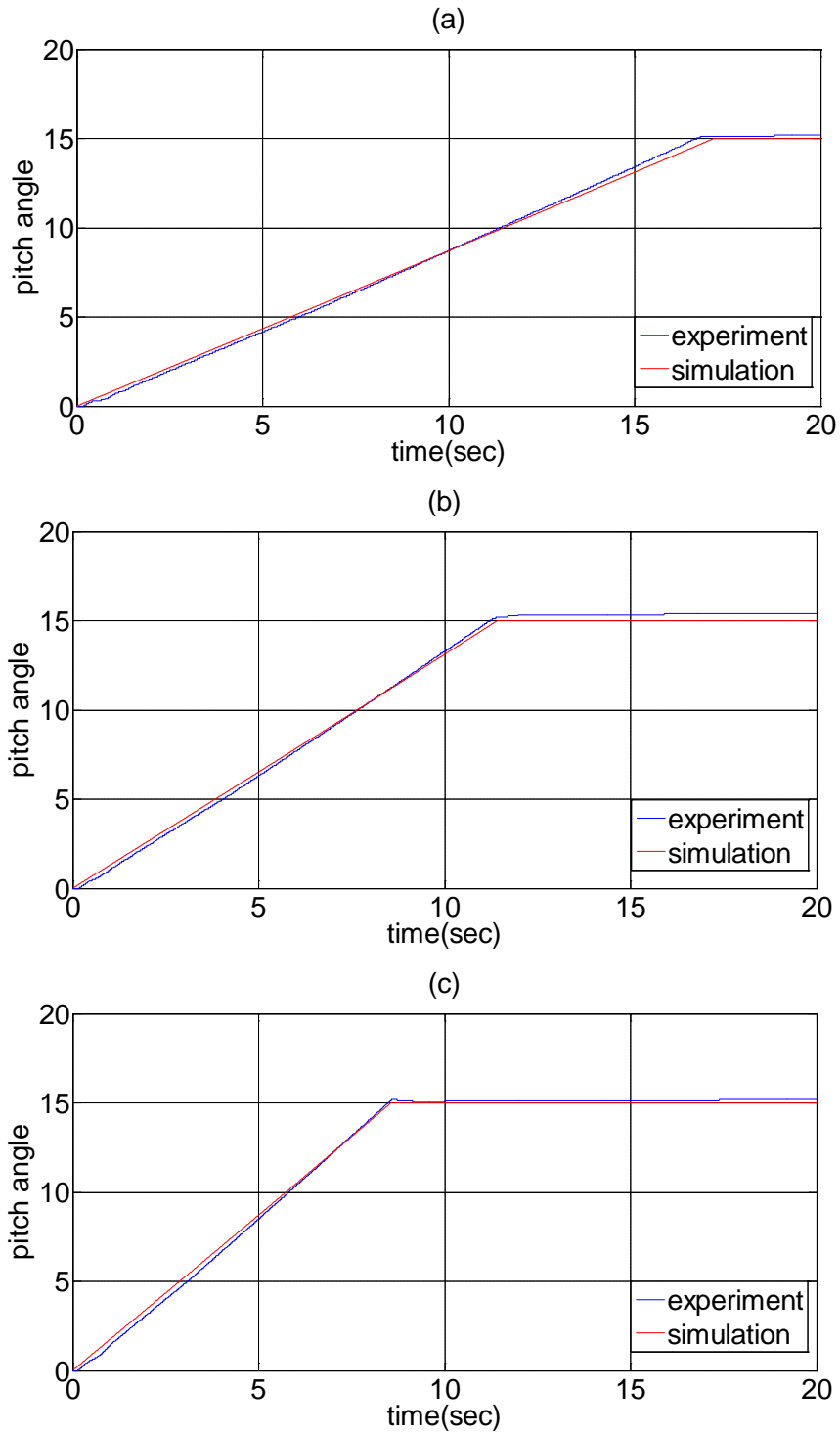


圖 17：變螺距系統無擾動力矩下之開迴路模擬與實驗之比較

(a) 輸入馬達轉速 200rpm (b)輸入馬達轉速 300rpm (c)輸入馬達  
轉速 400rpm

## 二、風力發電機液壓伺服系統控制器閉迴路控制模擬

本文的模擬和實驗中皆採用軌跡追蹤控制或軌跡-定位控制，可避免因控制時的初始誤差太大而造成電壓飽和的現象，且可限制系統的移動速度，以避免系統移動速度太快導致感測器反應不及而造成資料遺失與誤判，且控制器必須兼顧定位過程之軌跡追蹤及定位點之高精度定位控制。本研究定位方程式採用五階軌跡-定位方程式及正弦波軌跡追蹤方程式。

五階軌跡方程數學式為

$$x_d(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \quad (5-1)$$

其中

$$a_0 = x_{d0}$$

$$a_1 = \dot{x}_{d0}$$

$$a_2 = \frac{1}{2} \ddot{x}_{d0}$$

$$a_3 = \frac{1}{2t_f^3} \left[ 20x_{df} - 20x_{d0} - (8\dot{x}_{df} + 12\dot{x}_{d0})t_f - 3(\ddot{x}_{d0} - \ddot{x}_{df})t_f^2 \right]$$

$$a_4 = \frac{1}{2t_f^4} \left[ 30x_{d0} - 30x_{df} - (14\dot{x}_{df} + 16\dot{x}_{d0})t_f + 3(\ddot{x}_{d0} - 2\ddot{x}_{df})t_f^2 \right]$$

$$a_5 = \frac{1}{2t_f^5} \left[ 12x_{df} - 12x_{d0} - (6\dot{x}_{df} + 6\dot{x}_{d0})t_f - (\ddot{x}_{d0} - \ddot{x}_{df})t_f^2 \right]$$

$x_{d0}$ 、 $\dot{x}_{d0}$ 、 $\ddot{x}_{d0}$  分別為此軌跡在時間為零的位置、速度及加速度， $x_{df}$ 、 $\dot{x}_{df}$ 、 $\ddot{x}_{df}$

$x_{df}$ 、 $\dot{x}_{df}$ 、 $\ddot{x}_{df}$  分別為此軌跡在時間為的位置、速度及加速度。

正弦波軌跡追蹤方程數學式為

$$x_d(t) = A \sin(0.05\pi t) \quad (5-2)$$

以下分為兩小節探討分別為(一)變螺距系統無擾動之螺距角五階軌跡-定位控制模擬(二)變螺距系統無擾動之螺距角正弦波軌跡追蹤控制模擬。表 6 為模擬控制器參數表。

表 6：模擬控制器參數表

Control parameters	$k_1$	$k_2$	$\Phi$	$\eta_1$	$\eta_2$
	3000	20	1.7	0.008	1.0
Membership function of $S$	[- $\Phi$ -0.5 $\Phi$ -0.25 $\Phi$ 0 0.25 $\Phi$ 0.5 $\Phi$ $\Phi$ ]				
Membership function of $u_{comp}$	[-1 -0.6 -0.33 0 0.33 0.6 1]				
Membership function of $\hat{u}_{fz}$	[-1 -0.6 -0.33 0 0.33 0.6 1]				



### (一)變螺距系統無擾動之螺距角五階軌跡-定位控制模擬

輸入目標軌跡為平滑的五階軌跡-定位行程分別為 20 秒到達 10 度、15 度、20 度，模擬結果如圖 18 、圖 19、圖 20 所示，定位控制在無干擾負載時，其追蹤誤差可控制於約 0.1 度以內，而到達終點後之穩態誤差可收斂於極小的角度以內。表 7 為變螺距系統無擾動之螺距角五階軌跡-定位控制模擬規劃表。

表 7：變螺距系統無擾動之螺距角五階軌跡-定位控制模擬規畫表

圖號	定位角度	模擬時間
圖 18	10 度	30 sec
圖 19	15 度	30 sec
圖 20	20 度	30 sec

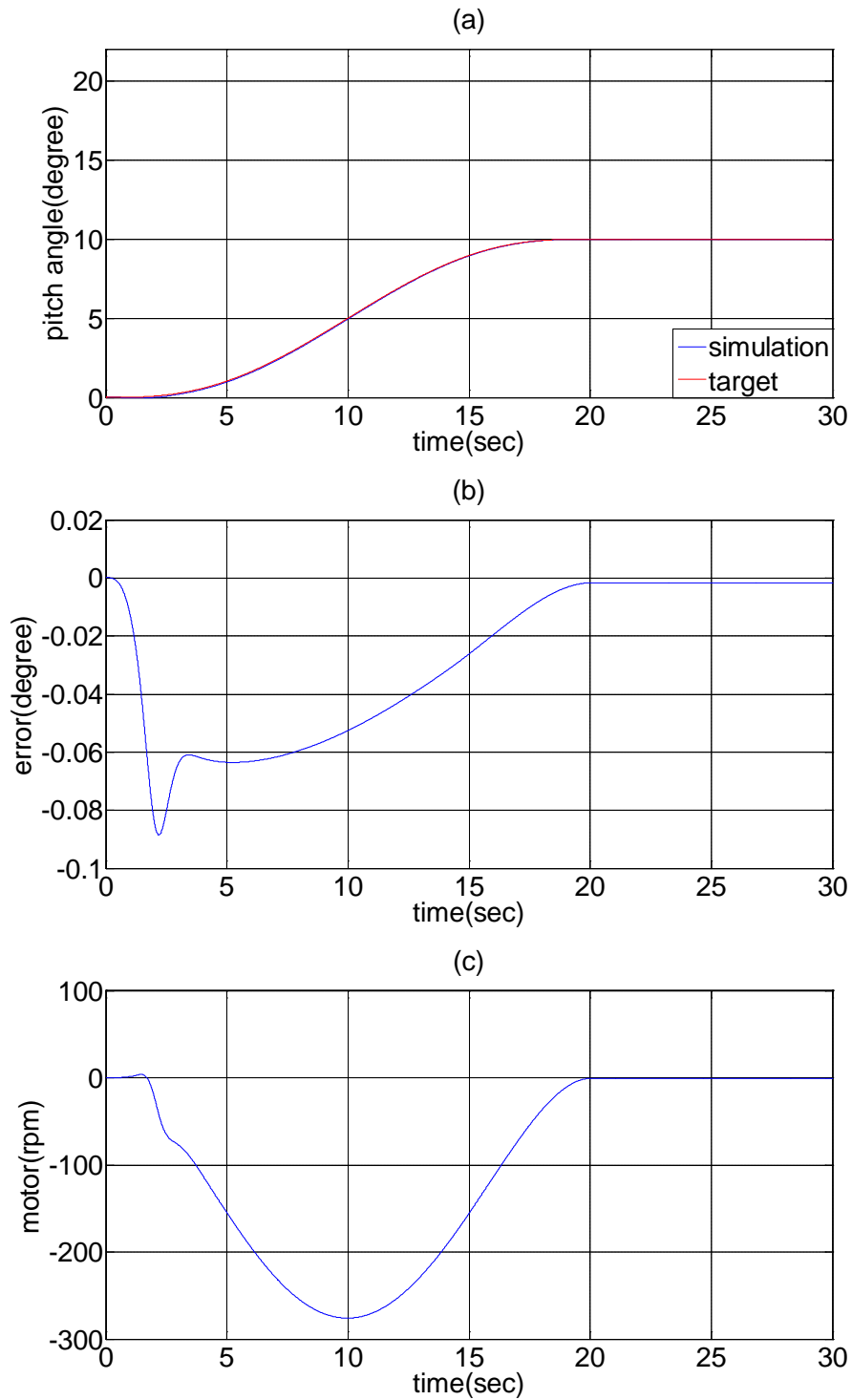


圖 18：變螺距系統無擾動之螺距角五階軌跡-定位控制行程為 20 秒 10 度，模擬時間為 30 秒之模擬結果

(a)螺距角目標值及模擬值(b)螺距角誤差(c)AC 伺服馬達轉速

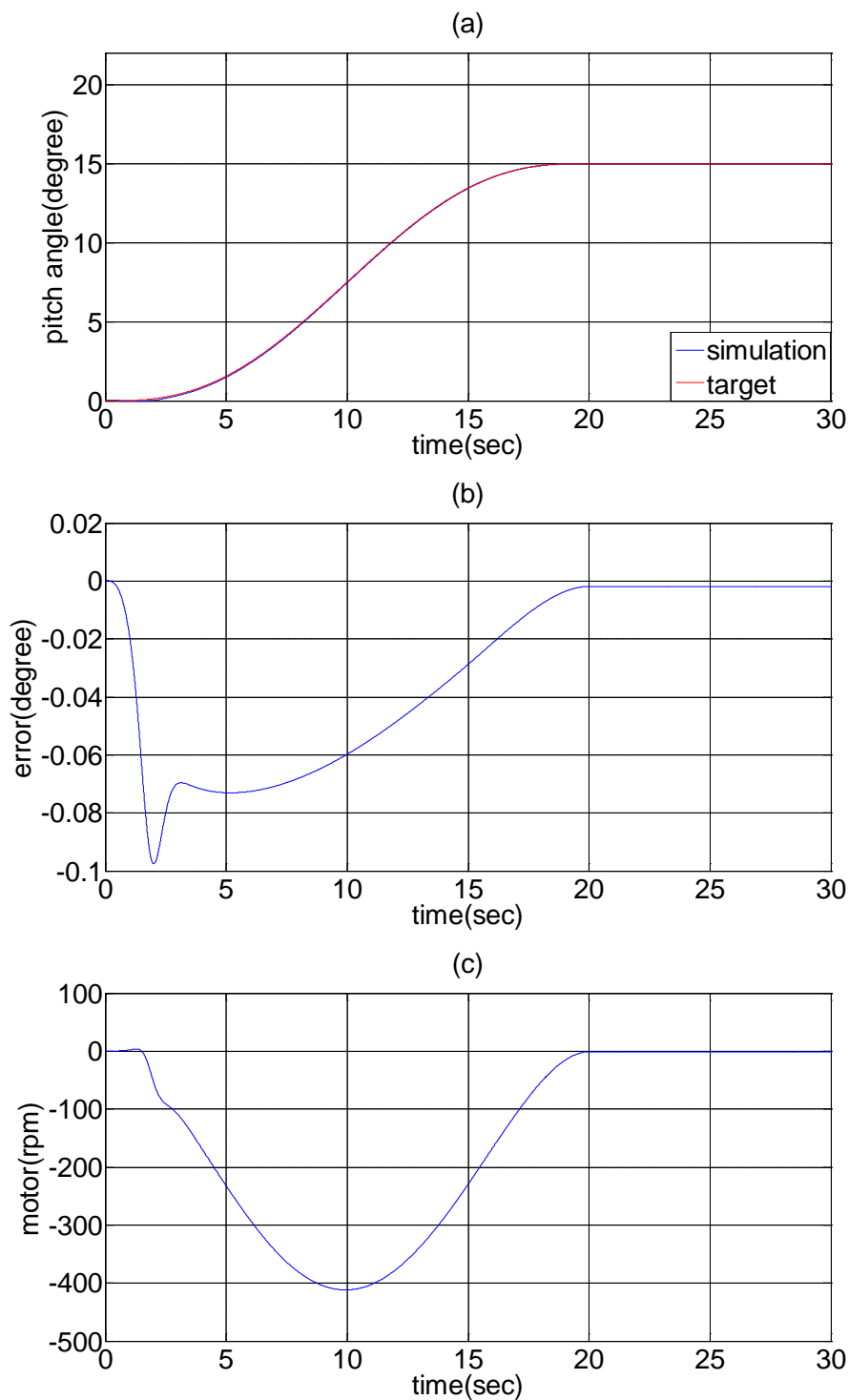


圖 19：變螺距系統無擾動之螺距角五階軌跡-定位控制行程為 20 秒 15 度，模擬時間為 30 秒之模擬結果

(a)螺距角目標值及模擬值(b)螺距角誤差(c)AC 伺服馬達轉速

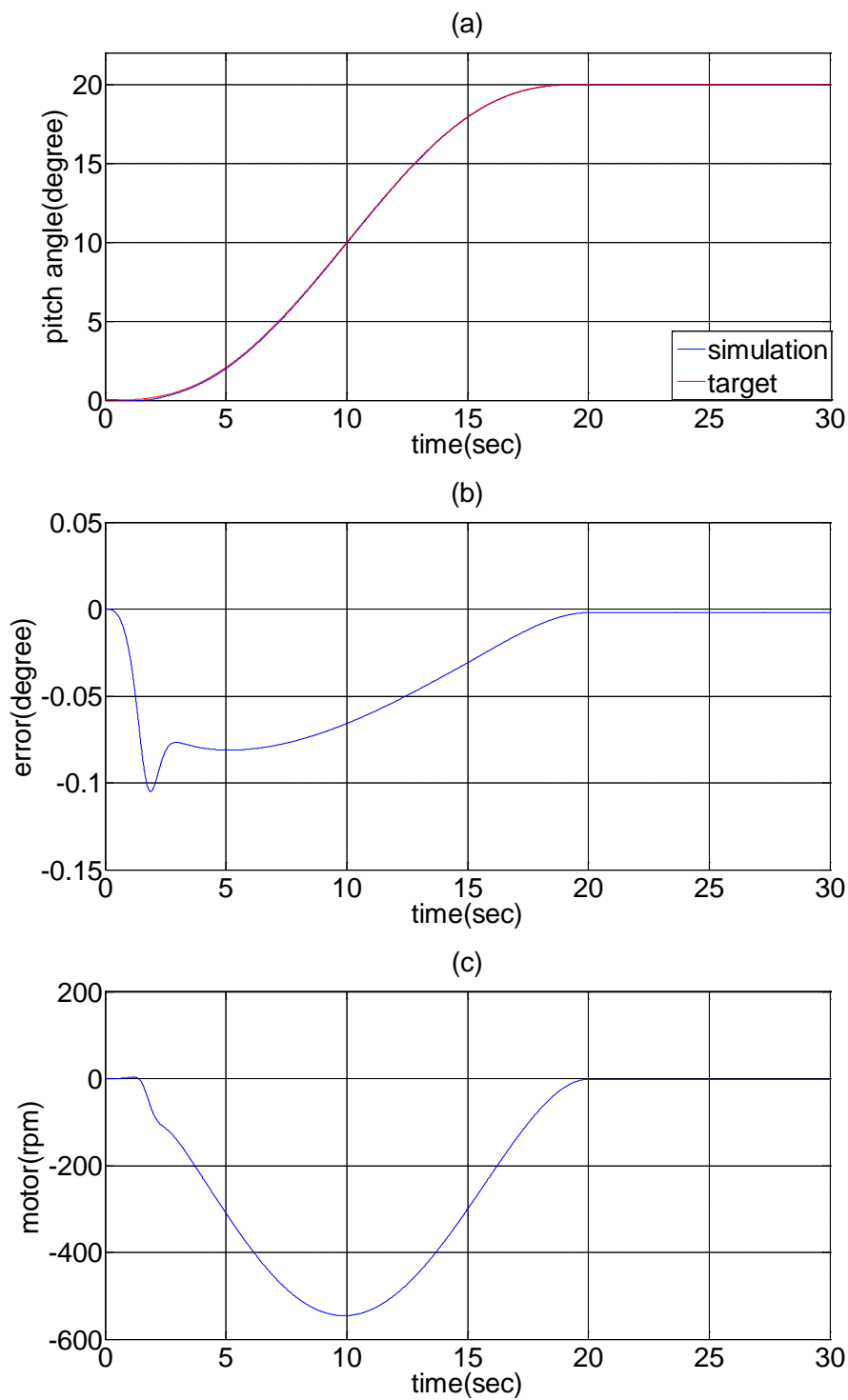


圖 20：變螺距系統無擾動之螺距角五階軌跡-定位控制行程為 20 秒 20 度，模擬時間為 30 秒之模擬結果  
 (a)螺距角目標值及模擬值 (b)螺距角誤差 (c)AC 伺服馬達轉速

## (二)變螺距系統無擾動之螺距角正弦波軌跡追蹤控制模擬

輸入目標軌跡為平滑的正弦波軌跡追蹤振幅分別為 10 度、15 度、20 度，週期 40 秒，模擬時間為 40 秒，模擬結果如圖 21、圖 22、圖 23 所示，追蹤控制在無干擾負載時，其追蹤誤差可控制於約 0.6 度以內。表 8 為變螺距系統無擾動之螺距角正弦波軌跡追蹤控制模擬規畫表。

表 8：變螺距系統無擾動之螺距角正弦波軌跡追蹤控制模擬規畫表

圖號	正弦波振幅	模擬時間
圖 21	10 度	40 sec
圖 22	15 度	40 sec
圖 23	20 度	40 sec

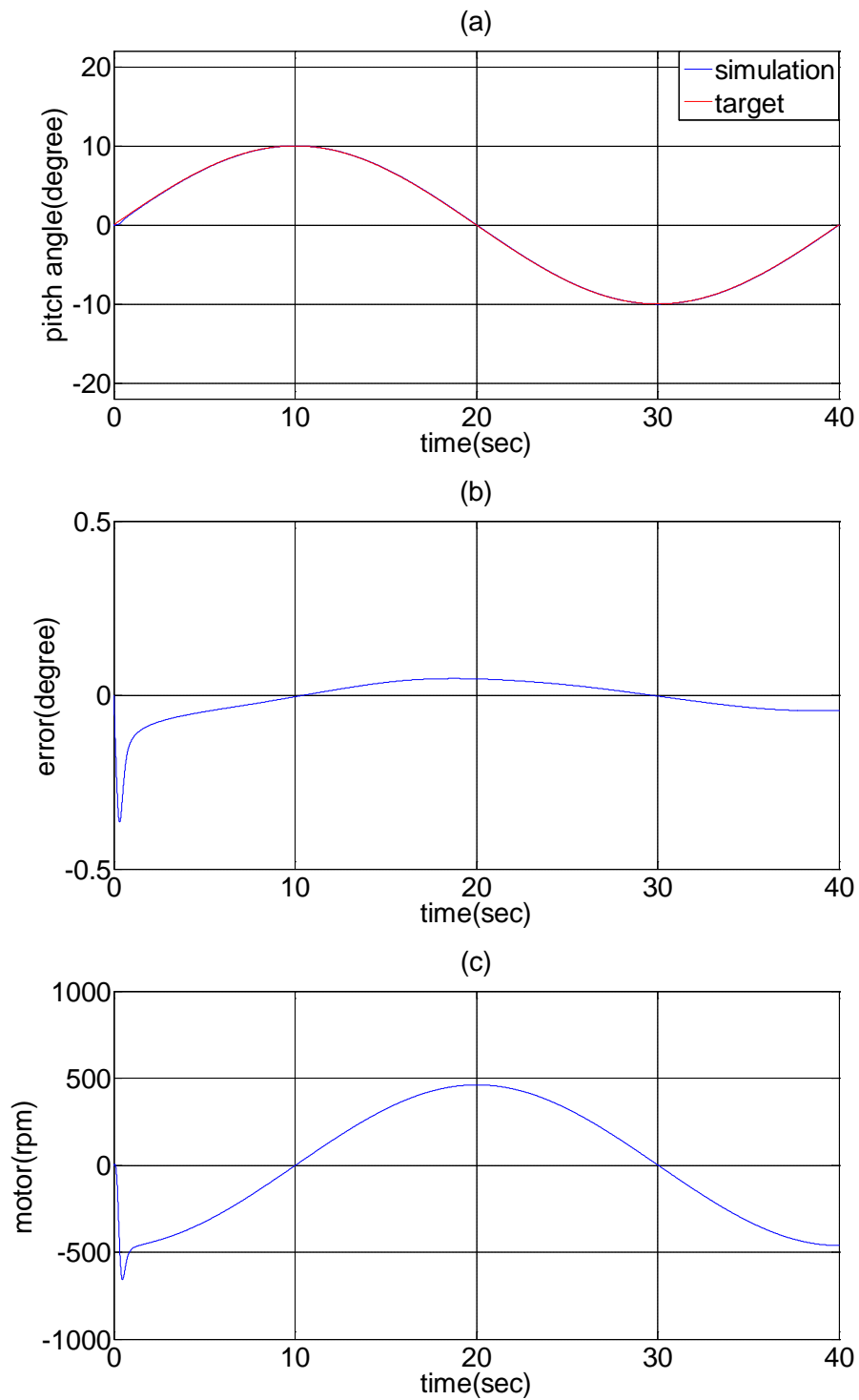


圖 21：變螺距系統無擾動之螺距角正弦波軌跡追蹤控制振幅為 10 度，週期為 40 秒之模擬結果

(a)螺距角目標值及模擬值(b)螺距角誤差(c)AC 伺服馬達轉速

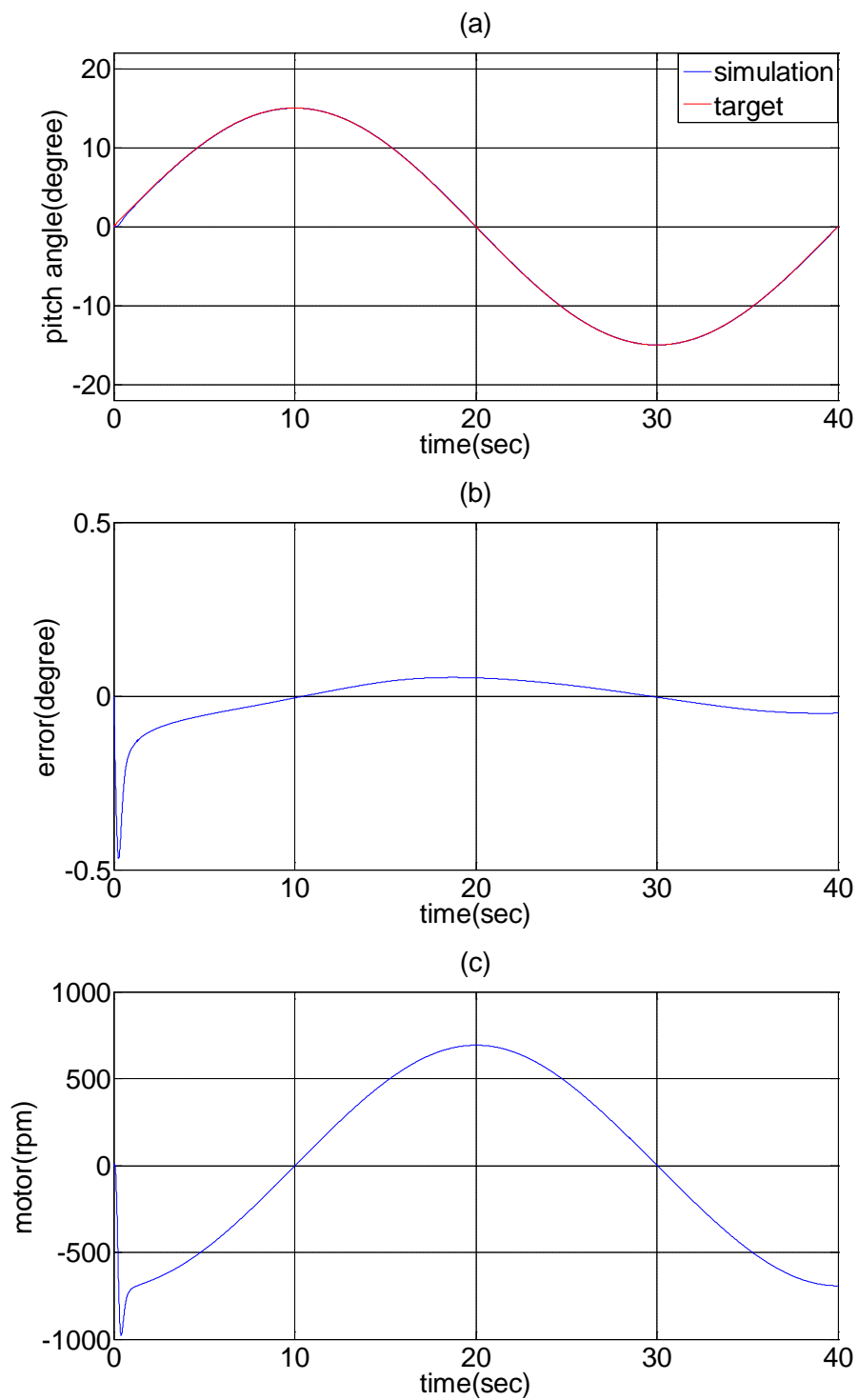


圖 22：變螺距系統無擾動之螺距角正弦波軌跡追蹤控制振幅為 15 度，週期為 40 秒之模擬結果

(a)螺距角目標值及模擬值(b)螺距角誤差(c)AC 伺服馬達轉速

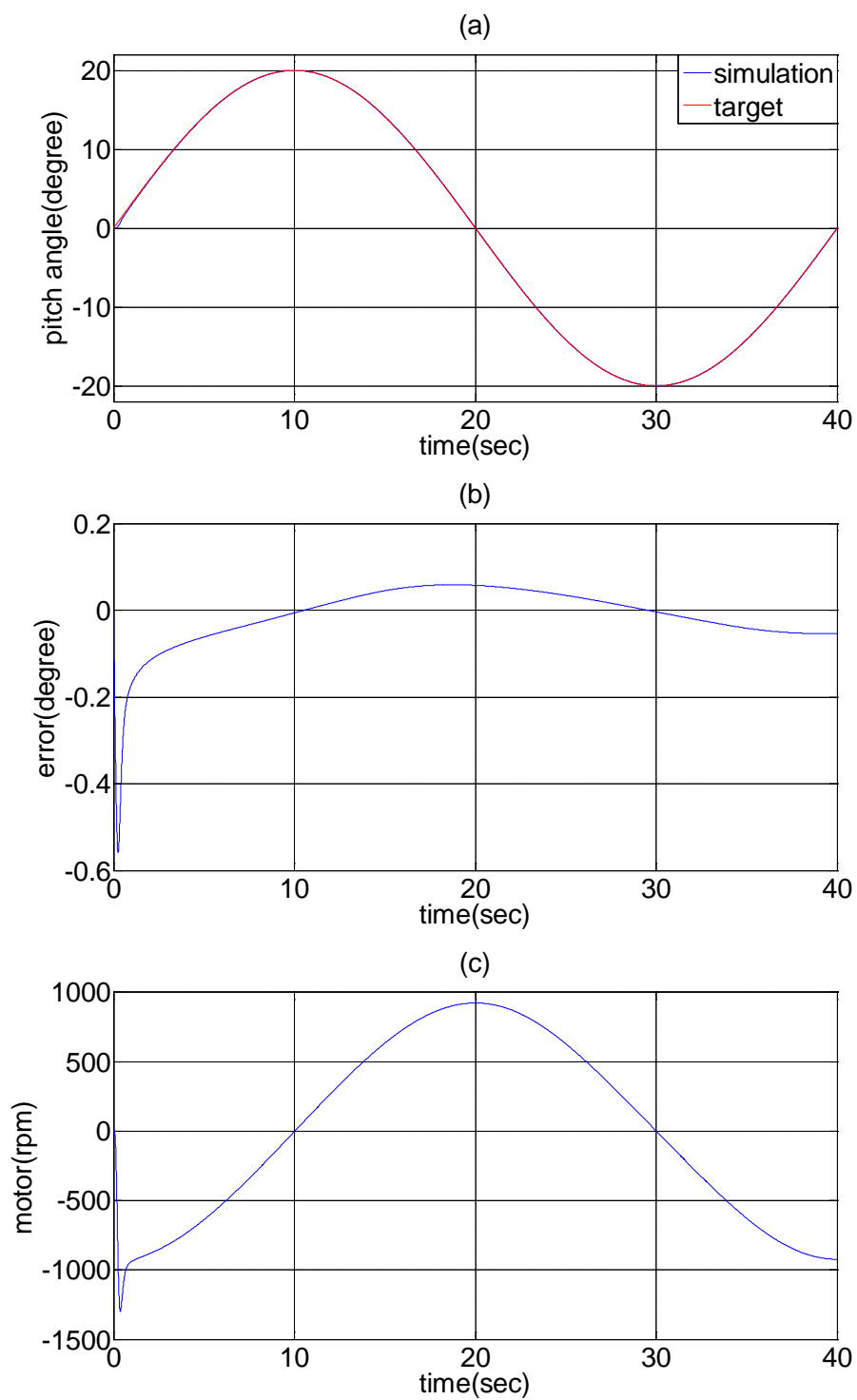


圖 23：變螺距系統無擾動之螺距角正弦波軌跡追蹤控制振幅為 20 度，週期為 40 秒之模擬結果

(a)螺距角目標值及模擬值(b)螺距角誤差(c)AC 伺服馬達轉速



### (三)變螺距系統螺距角全機控制模擬

輸入目標軌跡為平滑的五階軌跡-定位行程為 10 秒到達 10 度，分別在兩個客製化的風速：12 米每秒的穩定風速與 25 米每秒的隨機風速模擬結果如圖 24、圖 25 所示，即便於有隨機陣風的干擾下，其追蹤誤差可控制於約 0.1 度以內，而到達終點後之穩態誤差可收斂於極小的角度以內。為變螺距系統無擾動之螺距角五階軌跡-定位控制模擬規劃表。

表 9 變螺距系統客制化風況軌跡追蹤控制模擬規畫表

圖號	輸入風況	隨機陣風
圖 24	12 m/s	無
圖 25	12 m/s	25 m/s

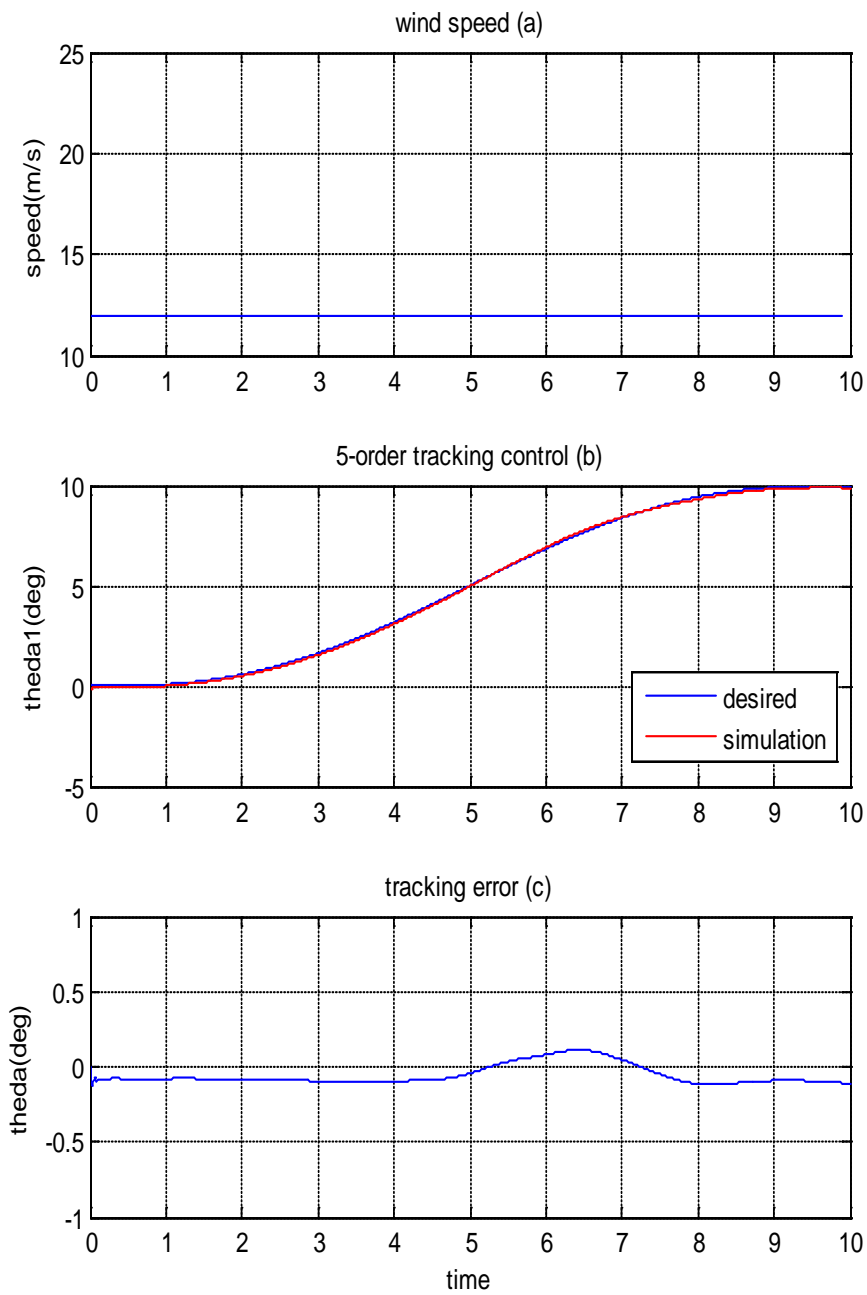


圖 24：變螺距系統於穩定風速下全機模擬結果 (a)輸入風速  
(b) 螺距角目標值及模擬值 (c) 螺距角誤差

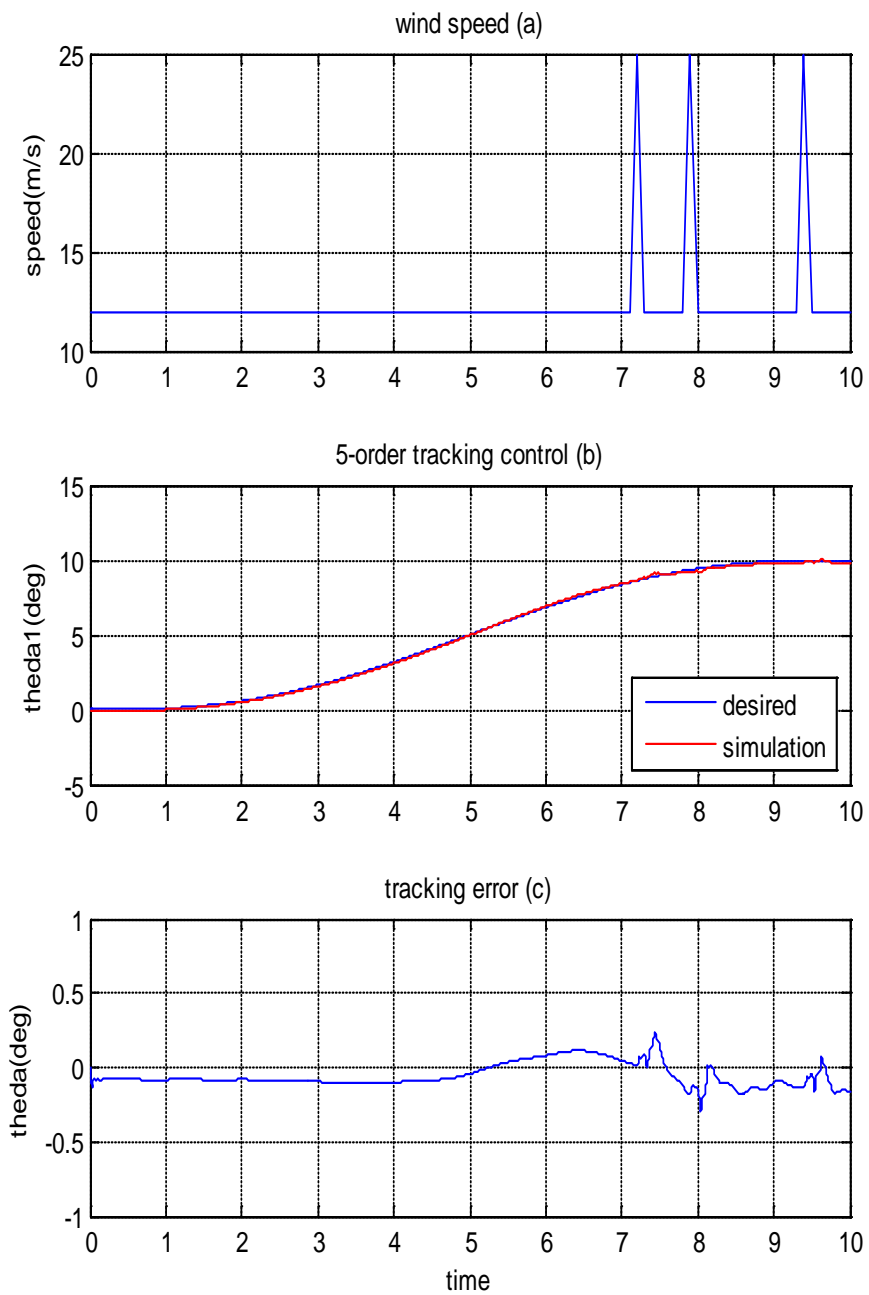


圖 25：變螺距系統於隨機風速下全機模擬結果 (a)輸入風速  
(b) 螺距角目標值及模擬值 (c) 螺距角誤差

### 三、結 論

本研究是針對與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，也取得 NREL 5MW 離岸型風機機組塔架及葉片 3D 外型幾何 CAD 檔。完成 AdWiMo 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。

推導馬達驅動系統的非線性數學方程式，並且使用 MATLAB/SIMULINK 來實現機組轉向控制模組，變螺距系統每個葉片使用一個直流馬達來驅動。同時，本文也根據計畫目標提供一個創新的液壓變螺距系統驅動器，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 中。

液壓伺服控制應用於螺距控制系統，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，必須要有較大的油箱和散熱裝置，故本文發展變轉速泵控系統驅動，變轉速泵控系統具有高響應、高效率及高強健性、且體積小、不易發熱，相當適合應用於大型風力發電機，特別是離岸型風力發電機。

風力發電機運轉於額定風速以上時，利用創新之變轉速泵控液壓系統驅動創新之變螺距機構，並結合現代控制理論-具自調式模糊滑動補償之適應性模糊控制器，在無擾動和外加擾動的情況下，採軌跡-定位和軌跡追蹤的方式進行實驗以實現變螺距控制，經實驗證實，在角度定位和追蹤上，皆能得到平滑的系統響應曲線，即使有些微擾動現象，但控制器仍可有效地使誤差收斂至極小的穩定值並達到良好的追蹤效果，可證明控制器強健性之存在，可驗證本研究所研發之風力發電機創新變螺距系統之優越性能。

未來更會將本研究發展出來的創新液壓伺服系統結合前面章節所發展出來的風機模型，透過給定不同的風況、海況及不同的外在條件再藉由 ADAMS 軟體的 AdWiMo 模組發展之風機做動態模擬，以分析系統的動態響應以及應力分布。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擴展計畫。

## 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](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. Erisis, 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 Ekelund<sup>1</sup>, 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] Boukhezzar, 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.