

國立臺灣大學工學院工程科學及海洋工程學系

碩士論文

Department of Engineering Science and Ocean Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

5MW 浮動半潛式離岸風力發電機整合直驅式永磁同
步發電機與併網之全機組運轉控制研究

Dynamic Analysis and Control for a 5MW Semi-
submersible Floating Offshore Wind Turbine Combining
with a Direct-drive Permanent Magnet Synchronous
Generator and Grid

謝昌桂

Chang-Guei Hsieh

指導教授：江茂雄 博士

陳義男 博士

Advisor: Dr.-Ing. Mao-Hsiung Chiang

Dr.-Eng. Yih-Nan Chen

中華民國 109 年 7 月

July, 2020

致謝



在台大工科海洋系就讀研究所這4年間，首先要感謝指導老師江茂雄老師在這幾年對我的指導及栽培，除了學術及研究上的寶貴建議，老師對待學生及待人處事等其他無形的層面更值得我們學習，很高興有機會在這實驗室完成我的碩士學位。

感謝口試委員陳義男老師、黃金城組長、楊瑞源老師、趙修武老師及江茂雄老師撥空參加，針對半潛式風機這研究題目在各領域給我不同的建議及修正方向，使我的研究論文更完善嚴謹。

感謝實驗室的同伴，學長：致宏、敬淞、柏延、哲瑋、威宏、懋豪、元堂及瑞甫；同儕：昱廷、名竣、奇峰及懷哲；學弟：舜博、富群、可瑄、廷晏、聖家、煒諭、峻弘、孟倫、林靖等。在實驗室這幾年有你們的陪伴，使研究室的生活更有趣歡樂。

感謝我的大學及研究所認識的同學們，首先感謝世銓在我剛換題目時給我許多建議和幫助，另外也感謝你一直請我吃飯，讓我可以專心研究不用怕會餓肚子；感謝育維提供一堆笑話，使我研究生活不枯燥；感謝家丞一樣在我剛換題目時給我建議和幫助，感謝在我研究所期間所有給我建議及陪伴的人，不管是在不同實驗室或是在重訓室認識的各位，有你們的陪伴才有我這麼精彩的碩士生活。

感謝蔡武廷老師從我大三事故後一直以來對我的關心。

最後感謝我的家人，一直以來在我的求學生涯不斷的支持及愛護，能進台大念書做研究是我這輩子最難忘的一段回憶，沒有你們的支持很難順利走完。

以此篇論文獻給所有教導過我的老師、幫助過我的同學及朋友與無條件支持我的家人們。

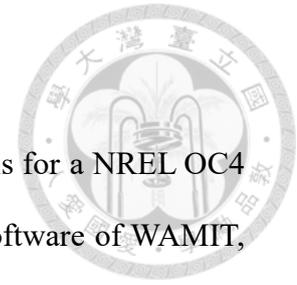
摘要



本論文旨在發展浮動半潛式離岸風力發電機全系統動態模擬分析與控制，風力發電機以美國國家再生能源實驗室 NREL 提供的 5MW 風機為主體進行探討，結合 OC4 半潛式載台及錨碇系統，整合波浪力、空氣動力、風機系統動態及控制系統動態分析。本文以軟體 FAST 結合軟體 WAMIT 以及軟體 MATLAB/SIMULINK 進行全系統動態模擬與分析。浮動式風力發電機模型以軟體 FAST 建立，包含浮台、錨碇系統、塔架、葉片及機艙模型，葉片氣動力分析(Aerodynamic Analysis)以 AeroDyn 進行計算，由軟體 WAMIT 預先計算取得的浮台水動力係數在 HydroDyn 下進行水動力分析(Hydrodynamic Analysis)及進行浮動式風力發電機組的全機動態模擬，將自行發展的子系統動態模型在 MATLAB/SIMULINK 環境下建模，包含發電機系統的直驅式永磁同步發電機(Direct-Drive Permanent Magnet Synchronous Generator)結合磁場導向控制(Field-Oriented Control)及電網側變流器控制(Grid-Side Converter Control)，其他子系統含葉片變旋角系統以及交流感應馬達驅動的機艙轉向(yaw)系統等，並進行浮式風機閉迴路控制系統的設計及分析。最後於不同風況及海況下，整合浮式風機之運轉控制策略與控制理論，進行浮動半潛式離岸風力發電機全系統動態模擬與控制。當風機運轉於切入風速與額定風速之間時，利用直驅式永磁同步發電機的變轉速控制系統，控制發電機轉速追蹤最佳葉尖速比，保持在最大功率係數即維持最佳的發電功率輸出。而當風機運轉於額定風速之上，葉片變旋角系統開始作動，調控葉片旋角以降低葉片轉子對風能擷取效率，使風機發電功率輸出穩定在額定值。本研究所發展之動態模擬，可分析浮動半潛式載台受波浪力及風力之作用產生運動，以及風力發電機之操控及發電功率之影響。

關鍵字：浮動式、半潛式、風力發電、直驅式永磁同步發電機、磁場導向控制、電網側變流器控制、葉片變旋角系統

Abstract



This study aims to investigate dynamic simulation and analysis for a NREL OC4 5MW semi-submersible floating wind turbine by combining the software of WAMIT, FAST and MATLAB/SIMULINK. FAST serves to build the motion models of floater, mooring system, tower, blades, nacelle of wind turbine, aerodynamic analysis of blade, dynamic simulation of wind turbines and hydrodynamic analysis, in which the hydrodynamic coefficients of floater is obtained from the preprocessing of WAMIT. MATLAB/SIMULINK is used to establish the subsystem dynamic models for analysis and design of floating wind turbines. The subsystems comprise the direct-drive permanent magnet synchronous generator mathematical model with the magnetic field oriented control and grid-side converter control, the blade pitch control system, the AC induction motor driving nacelle yaw system. Finally, through combining the models of WAMIT、FAST and MATLAB/SIMULINK, the floating wind turbine operation and control strategies can be implemented and verified in the different wind and wave conditions. As the wind turbine operates between the cut-in speed and the rated wind speed, the variable speed control of direct drive permanent magnet synchronous generator is performed to make the wind turbine rotor tracking the desired rotor speed calculated by the optimal tip speed ratio strategy for maintaining the maximum power coefficient and optimum power output. As the wind turbine operates above the rated wind speed, the blade pitch control is implemented to adjust the pitch angle of the blades and maintain the rated power output. Different wind and wave conditions are given for verifying the developed overall dynamic simulation of floating offshore wind turbines. The motion of the floating platform can be analyzed that influence the output power seriously.

Keywords: floating wind turbine、semi-submersible, direct-drive permanent magnet

synchronous generator、grid-side converter control、pitch control system.



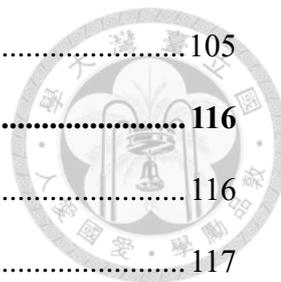
目錄



致謝.....	2
摘要.....	I
Abstract.....	II
目錄.....	IV
圖目錄.....	VII
表目錄.....	X
第 1 章 緒論	1
1-1 前言	1
1-2 文獻回顧	2
1-3 研究動機	2
1-4 本文架構	3
第 2 章 5MW 浮動式風力發電機架構及運動模型的建立.....	4
2-1 風力發電機基本理論	4
2-2 浮動式風力發電機模擬軟體介紹	6
2-2-1 風力發電機模擬軟體 FAST(Fatigue, Aerodynamic, Structures, and Turbulence)簡介	9
2-2-2 波浪力頻域分析軟體 WAMIT (Wave Analysis MIT).....	10
2-2-3 波浪力時域分析軟體 HydroDyn.....	11
2-2-4 錨碇系統軟體 MoorDyn	12
2-3 浮動式風力發電機運動模型建立	14
2-3-1 建立塔架運動模型	15
2-3-2 建立葉片運動模型	16
2-3-3 建立機艙運動模型	17

2-3-4 建立浮台運動模型	17
2-3-5 建立錨碇系統繫纜運動模型	21
第 3 章 浮動式風力發電機之非線性數學模式	23
3-1 發電機系統	23
3-1-1 直驅式永磁同步發電機(PMSG)數學模型	24
3-1-2 磁場導向控制(Field-Oriented Control)	26
3-1-3 電網側變流器控制(Grid-Side Converter Control)	28
3-2 轉向(yaw)系統	31
3-2-1 轉向(yaw)系統機構	31
3-2-2 轉向(yaw)系統數學模型	32
3-3 浮台的波浪力負載與運動	38
3-4 錨碇系統波浪力負載	44
第 4 章 控制理論與策略	46
4-1 5MW 浮動式風力發電機控制策略	46
第 5 章 模擬結果與討論	48
5-1 永磁同步發電機磁場導向控制	50
5-2 風力發電機變轉速控制	54
5-3 風力發電機變旋角控制	58
5-4 電網側變流器控制	68
5-5 轉向(yaw)系統位置控制	72
5-6 全機組變轉速變旋角動態模擬	75
5-6-1 追蹤最佳尖速比區	76
5-6-2 功率恆定區	85
5-6-3 全區域變轉速變旋角動態模擬	91
5-7 固定式與浮動式風力發電機比較	96

5-8 抗颶策略分析	105
第 6 章 結論與未來展望	116
6-1 結論	116
6-2 未來展望	117
參考文獻.....	118



圖目錄



圖 2-1 水平軸上風型三葉片風力發電機機艙系統架構圖	6
圖 2-2 為模擬軟體 WAMIT、FAST、MATLAB/Simulink 分工模式示意圖	7
圖 2-3 WAMIT+FAST+MATLAB/SIMULINK 軟體整合	9
圖 2-4 FAST 與其子程式軟體之輸入及輸出檔	10
圖 2-5 WAMIT 的副程式 POTEN 與 FORCE 及其輸入輸出檔關係流程圖	11
圖 2-6 錨碇系統示意圖	13
圖 2-7 塔架座標軸示意圖	15
圖 2-8 塔架座標剖面圖	15
圖 2-9 葉片座標軸示意圖	16
圖 2-10 半潛式浮台上視(左)及側視(右)圖	18
圖 2-11 半潛式浮台壁厚與帽蓋側視圖	18
圖 2-12 半潛式浮台幾何建構圖	20
圖 2-13 錨碇系統配置圖	22
圖 3-1 半潛式風機結合直驅式永磁同步發電機系統架構	23
圖 3-2 定子三相(a,b,c)時變量轉換成轉子兩相(d,q)軸同步旋轉座標	24
圖 3-3 直驅式永磁同步發電機於 d/q 軸座標下等效電路圖	26
圖 3-4 直驅式永磁同步發電機磁場導向控制系統架構圖	28
圖 3-5 風能轉換系統示意圖	29
圖 3-6 電網側變流器控制架構	30
圖 3-7 DC-link 功率流	30
圖 3-8 轉向(yaw)系統架構圖	31
圖 3-9 感應馬達於 d/q 軸座標下等效電路圖	33
圖 3-10 感應馬達間接向量控制數學模型方塊圖	38

圖 4-2 風力發電機在不同風速下的控制策略	46
圖 4-3 NREL 5MW 翼形風能係數、葉尖速比及葉片旋角關係圖	47
圖 5-1 浮動半潛式風力發電機座標定義示意圖	48
圖 5-2 錨碇系統配置圖	49
圖 5-3 永磁同步發電機(PMSG)結合磁導向控制(FOC)於 SIMULINK 模擬圖 ...	50
圖 5-4 輸入一五階軌跡轉速於永磁同步發電機之磁場導向控制模擬結果	51
圖 5-5 永磁同步發電機之變轉速控制系統方塊圖	54
圖 5-6 輸入拋物軌機風速追蹤最佳尖速比轉速控制	55
圖 5-7 變旋角控制於 MATLAB/SIMULINK 模擬圖	58
圖 5-8 變旋角控制系統方塊圖	58
圖 5-9 輸入遞增風速且靜水面下風力發電機變旋角控制響應	59
圖 5-10 輸入遞增風速且有波浪條件下風力發電機變旋角控制響應	64
圖 5-11 電網側變流器控制於 SIMULINK 模擬圖	68
圖 5-12 電網側變流器控制	69
圖 5-13 轉向(yaw)系統於 MATLAB/SIMULINK 模擬圖	72
圖 5-14 輸入線性軌跡之轉向(yaw)角位置控制	73
圖 5-15 全機組變轉速變旋角控制系統 SIMULINK 程式圖	75
圖 5-16 風力發電機運轉在追蹤最佳尖速比區	76
圖 5-17 輸入遞增風速且靜水面條件下風力發電機運轉於最佳尖速比區控制響應	77
圖 5-18 輸入遞增風速且有波浪條件下風力發電機運轉於最佳尖速比區控制響應	81
圖 5-19 風力發電機運轉在功率恆定區	85
圖 5-20 輸入快速變動風速且有波浪條件下風力發電機運轉於功率恆定區控制響應	86

圖 5-21 風力發電機運轉於全區域風速	91
圖 5-22 輸入遞增風速風力發電機運轉於全區域風速控制響應	92
圖 5-23 離岸型風力發電機示意圖	96
圖 5-24 輸入遞增風速固定式風力發電機運轉於全區域風速控制響應	97
圖 5-25 輸入遞增風速浮動式風力發電機運轉於全區域風速控制響應	100
圖 5-26 輸入極端風速與波浪條件下風力發電機於 7 個不同轉向(yaw)位置之抗 颱風策略分析.....	105



表目錄



表 2-1	本論文採用的軟體名稱及版本	8
表 2-2	NREL 之 5MW 參考風機規格表	14
表 2-3	NREL 之 5MW 參考風機機組塔架資料	15
表 2-4	NREL 之 5MW 參考風機機組葉片資料	16
表 2-5	NREL 之 5MW 參考風機機組機艙資料	17
表 2-6	半潛式浮台幾何資料	18
表 2-7	半潛式浮台各構件幾何資料	19
表 2-8	半潛式浮台資料	21
表 2-9	錨碇系統資料表	21
表 3-1	轉向(yaw)感應馬達的規格	32
表 3-2	OC4 半潛式浮台水動力資料	41
表 5-1	抗颱風策略之 7 個不同轉向(yaw)位置得分表	114
表 5-2	抗颱風策略之 7 個不同轉向(yaw)位置各項目方均根值列表	115

第1章 緒論



1-1 前言

近年來，隨著石化燃料逐漸枯竭及環保意識抬頭，新興可再生能源包含風能、水力、太陽能、生質能等研究及發展快速上升，這些新能源科技發展的優點除了較石化能源碳排放量低外，還有對環境更低污染及能循環再生利用的特性。在這些再生能源中又以風能的發電效率及成本等因素考量而更有前景。以現行蓬勃發展的固定式離岸型風力發電機來看，風機發展以水平式大型化為趨勢，但受限於打樁成本隨深度越深成本越高因素影響，超過 50 米水深的風場開始不適合以固定式為發展主流[1]，因此近年浮動式離岸型風力發電機的概念及研究開始被重視，而台灣西海岸平均水深於 50 米內面積容量有限，其他海岸平均水深皆大於 50 米，因此未來西海岸的離岸固定式風機風場建置完後，往更深水深海域或其他海岸發展建置風場的風機將會以浮動式為主，台灣在固定式離岸風機的發展雖然算是剛開始但在國際上技術已然成熟，期許未來透過國家政策推行以及國內產業的合作，浮動式風機在台灣也能有不錯的發展，甚至在國際上佔有一席之地。

目前風力發電機的發展趨勢趨向大型化，風力發電機往大型化發展後，有能在更高處擷取較不受地面及海面影響的平均高風速及有更大的掃掠面積等優點，使大型風力發電機在風能擷取效率上有相比小型風機沒有的巨大優勢。

台灣在離岸風電發展上已經有政府推出 2025 年發電總容量到 5.5GW 第一期規劃及 2026 到 2035 年新增 10GW 的第二期規劃支持，離岸風電在台灣發展已然萌芽，而隨淺海岸的風場發展逐漸飽和，未來高於 50 米水深的海域發展勢必需要靠浮動式風力發電機來實現，由於台灣海峽深海岸的平均水深約在 100 米左右，因此半潛式浮台會是比較適合台灣發展的目標。



1-2 文獻回顧

本節進行浮動式風機文獻回顧。

2009 年 Falcão[2] 對於波浪發電有全面的介紹，文章中可以認識現今對於浮台的設計及想法。2011 年 Cordle[3] 提供了可以結合氣動力及水動力模擬程式工具。2014 年 Robertson 等[4] 進行現今浮動式風力發電機模擬工具套件組的比較與驗證。2014 年 Robertson 等[5] 詳細進行半潛式風力發電機的詳細建模過程與分析。2016 年 Cruz[6] 書中敘述了如何從石油業鑽油浮台技術應用至浮動式風力發電機浮台，全面介紹浮式風機發展、類型及模型。2016 年 Matha[7] 進行不同氣動力及錨碇數值模型對於浮動式風力發電機的動態及負載影響。2018 年 DNVGL-ST-0119[8] 提供了浮式風機結構設計的規範。2019 年 Aliabadi[9] 探討不同葉尖速比下，浮台縱移於相同時間內位移大小不同對於功率係數、升力係數葉片旋角控制調整幅度影響。日本石原孟[10] 教授則進行了小型浮式風機風場實驗。2020 年 Wang 等[11] 預測分析在同一颱風不同半徑位置下大型風機相對狀況。

1-3 研究動機

本論文旨在發展浮動半潛式離岸風力發電機全系統動態模擬分析與控制，風力發電機以美國國家再生能源實驗室 NREL 提供的 5MW 風機為主體進行探討，結合 OC4 半潛式載台及錨碇系統，整合波浪力、空氣動力、風機系統動態及控制系統動態分析。本文以軟體 FAST 結合軟體 WAMIT 以及軟體 MATLAB/SIMULINK 進行全系統動態模擬與分析。浮動式風力發電機模型以軟體 FAST 建立，包含浮台、錨碇系統、塔架、葉片及機艙模型，葉片氣動力分析(Aerodynamic Analysis)以 AeroDyn 進行計算，由軟體 WAMIT 預先計算取得的浮台水動力係數在 HydroDyn 下進行水動力分析(Hydrodynamic Analysis)及進行浮動式風力發電機組的全機動態模擬，將自行發展的子系統動態模型在 MATLAB/SIMULINK 環境下建模，包含發電機系統的直驅式永磁同步發電機(Direct-Drive Permanent



Magnet Synchronous Generator)結合磁場導向控制(Field-Oriented Control)及電網側變流器控制(Grid-Side Converter Control)，其他子系統含葉片變旋角系統以及交流感應馬達驅動的機艙轉向(yaw)系統等，並進行浮式風機閉迴路控制系統的設計及分析。最後於不同風況及海況下，整合浮式風機之運轉控制策略與控制理論，進行浮動半潛式離岸風力發電機全系統動態模擬與控制。當風機運轉於切入風速與額定風速之間時，利用直驅式永磁同步發電機的變轉速控制系統，控制發電機轉速追蹤最佳葉尖速比，保持在最大功率係數即維持最佳的發電功率輸出。而當風機運轉於額定風速之上，葉片變旋角系統開始作動，調控葉片旋角以降低葉片轉子對風能擷取效率，使風機發電功率輸出穩定在額定值。本研究所發展之動態模擬，可分析浮動半潛式載台受波浪力及風力之作用產生運動，以及風力發電機之操控及發電功率之影響。

1-4 本文架構

第一章 緒論

介紹離岸風力發電機與風場及浮動式風力發電機現況，蒐集不同風力發電機系統、風機模擬軟體 FAST 之相關文獻，本論文研究動機與架構。

第二章 5MW 浮動式風力發電機架構及運動模型的建立

介紹浮動式風力發電機架構，風機模擬軟體 FAST 所需的資料檔，建構 5MW 浮式風力發電機軟體 FAST 之運動模型。

第三章 浮動式風力發電機之非線性數學模式

建立 5MW 浮動式風力發電機系統，包含葉片升力、阻力與變距力矩係數、傳動系統數學模型、永磁同步發電機系統數學模型、變旋角系統、交流感應馬達驅動轉向(yaw)系統、浮台水動力係數與其波浪力計算模型及錨碇系統。

第四章 控制理論與控制策略

介紹 PID 控制理論及風力發電機控制策略。

第五章 模擬結果與討論

使用 MATLAB/SIMULINK 模擬永磁同步發電機子系統、變旋角系統與轉向(yaw)系統，並且結合風機模擬軟體 FAST，實現風力發電變轉速控制及變旋角控制。且將兩技術應用於風機低於額定風速及高於額定風速之模擬，最後進行抗颱風策略分析。

第六章 結論與未來展望

對研究結果總結與未來研究方向建議。

第2章 5MW 浮動式風力發電機架構及運動模型的建立

2-1 節介紹 5MW 水平軸風力發電機運轉原理，2-2 節介紹波浪力分析軟體 WAMIT 及風機模擬軟體 FAST 等軟體，2-3 節建立浮動式風力發電機機構動態模型。

2-1 風力發電機基本理論

圖 2-1 為風力發電機機艙基本架構圖。風力發電機在風速達到切入風速後，轉子葉片開始轉動，經由轉子傳動系統驅動發電機發電，並利用變旋角系統來調節輸出功率，以達到額定功率的輸出。本文使用的 5MW 風力發電機是水平軸上風型三葉片，其子系統由塔架、機艙轉向(yaw)系統、轉子葉片、傳動系統、發電機、控制系統、風向計與變旋角系統等組成。由能量守恆定律，由動能推算得風能為下式[12]：

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

其中 P_w : 風機獲取的風能大小

\dot{m} : 流體質量流率

A : 轉子葉片掃過面積



ρ : 空氣密度

V_w : 風速

假設空氣密度為定值，轉子葉片掃過的面積由(2-1)可知也為定值，風速的三次方正比於風能，因此風速為影響風能獲取的主要因素。

由於風力發電機無法將所有風能轉換成電能，根據 Lanchester-Betz 定律可知風能可利用的最大效率為 $\frac{16}{27}$ (約 60%)，而一般水平軸上風型三葉片風力發電機功率係數(Power coefficient) $C_p(\lambda, \beta)$ 定義如下：

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

其中 λ : 尖速比(tip-speed ratio)

β : 轉子葉片的旋角(pitch angle)

定義風機葉片尖端速度與風速的比值為尖速比 λ ，表示風機的性能，公式如下：

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_w} \quad (2-3)$$

其中 ω : 風機轉子轉速

R : 葉片半徑

力矩係數(Torque coefficient)指風在葉片翼形產生的升力造成轉子的力矩，公式為：

$$C_q(\lambda, \beta) = \frac{T_w}{\frac{1}{2} \rho A V_w^2 R} \quad (2-4)$$

其中 T_w : 風機在轉子端獲取的力矩大小

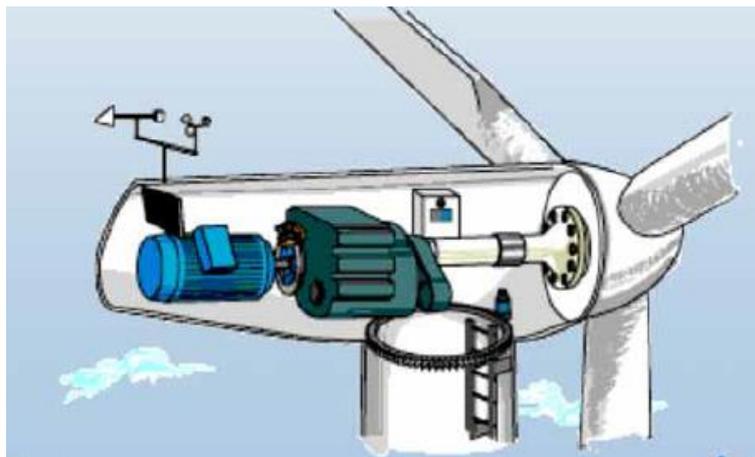


圖 2-1 水平軸上風型三葉片風力發電機機艙系統架構圖[13]

2-2 浮動式風力發電機模擬軟體介紹

本論文採用 WAMIT、FAST(Fatigue, Aerodynamic, Structures, and Turbulence) 與 MATLAB/SIMULINK 建構 5MW 浮動式水平軸上風型三葉片之風力發電機，三個軟體各負責不同部份，圖 2-2 是全機模擬運行軟體分工圖，FAST 是一套時域分析軟體，含 IECWind、TurbSim、InflowWind、AeroDyn、ServoDyn、ElastoDyn、HydroDyn、MoorDyn 等各個子系統的動力分析程式，而這些子程式亦可以獨立作為該領域分析進行計算。

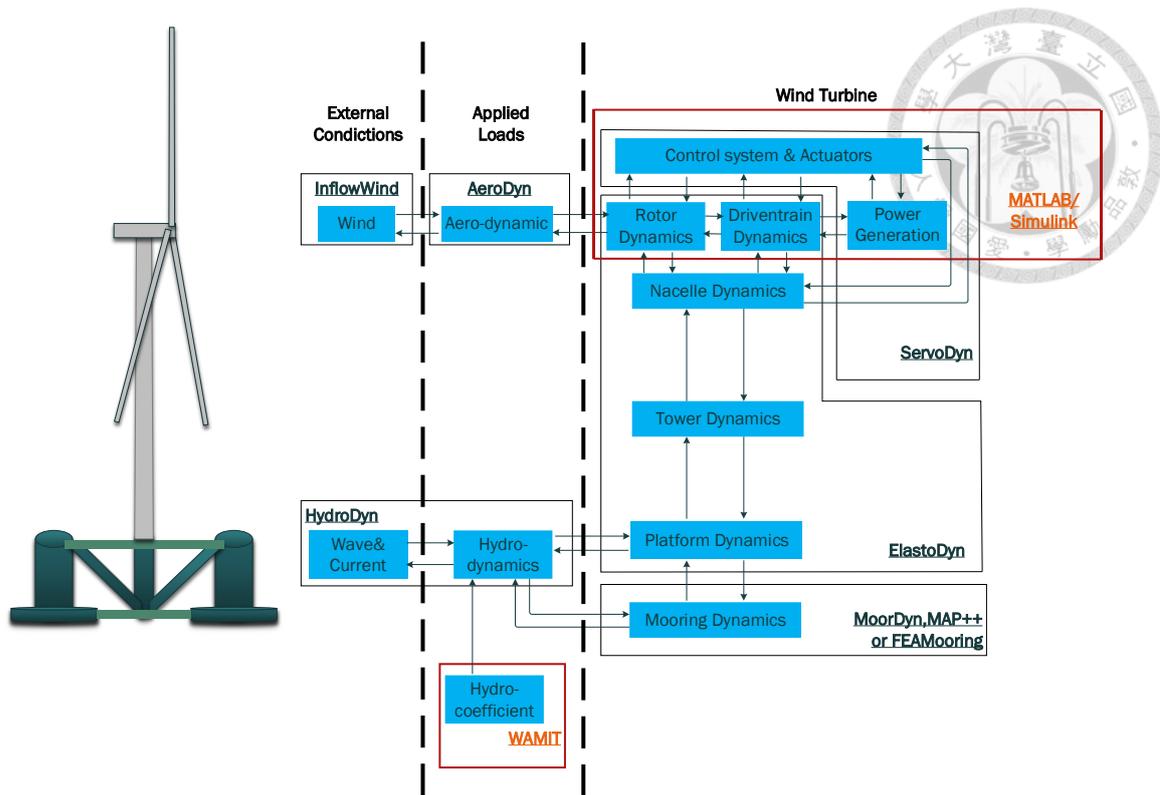


圖 2-2 為模擬軟體 WAMIT、FAST、MATLAB/Simulink 分工模式示意圖

IECWind 提供符合 IEC-61400-1 風機分級規範之風況頻譜，TurbSim 產生全場域、紊流風況風檔、InflowWind 可以接收含 wnd、bts、bin... 等不同風況風檔、AeroDyn 主要負責包含葉片、塔柱的幾何資訊處理及用 BEM 計算空氣動力造成的負載與運動(motion)；ServoDyn 負責簡易電機參數設定及簡單控制方法、旋角控制、機艙轉向(yaw)控制等設定；ElastoDyn 負責全機自由度設定、全機姿態起始條件設定、全機幾何、質量及慣量設定還有傳動系統等設定；HydroDyn 負責波浪條件、浮台剛性與阻尼特性等設定來計算浮台的水動力負載及運動(motion)；MoorDyn 負責錨碇系統基礎設定含繫纜數量、連接點、質量、切割區段等設定來計算繫纜張力及運動。WAMIT 在頻域預先以勢流理論計算浮台節點速度勢，輸出含浮台幾何所形成的等效水動力係數矩陣(added mass、drag coefficient)、線性靜水恢復矩陣(linear hydrostatic restoring matrix)及一階激發波力向量(wave-excitation force vector)，之後再將這些參數輸入給 HydroDyn 由頻域轉換為時域進行分析。MATLAB/Simulink 則是將傳動、電機及控制系統取出進行系統擴展建模的介面。表 2-1 為本論文採用的軟體名稱及版本[14-20]。

表 2-1 本論文採用的軟體名稱及版本

軟體名稱	軟體版本
WAMIT	v7.31 (2019-09 發佈)
FAST	v8.16.00a-bjj (2016-07-27 發佈)
IECWind	v5.01.02(2012-09-14 發佈)
TurbSim	v1.06.00(2012-10-13 發佈)
InflowWind	v3.03.00 (2016-07-26 發佈)
AeroDyn	v15.03.00a-bjj (2016-07-27 發佈)
ServoDyn	v1.06.00a-bjj (2016-07-26 發佈)
ElastoDyn	v1.04.00a-bjj (2016-07-26 發佈)
HydroDyn	v2.05.01 (2016-07-27 發佈)
MoorDyn	v1.01.02F (2016-04-08 發佈)
MATLAB/SIMULINK	R2017b 與 R2020a

圖 2-3 為本論文整合三個分析軟體：WAMIT+FAST +MATLAB/SIMULINK，藉由三軟體同時執行及資料交換，進行全系統動態(dynamic)建模及模擬，WAMIT 負責以勢流理論在頻域計算速度勢、從而求得水靜恢復係數、水動力係數及激發波力，水動力負載與運動由 FAST 下 HydroDyn 於時域求解，葉片空氣動力由 FAST 下的 AeroDyn 解，風機機構動態由 FAST 解得，次系統如發電機 PMSG、葉片旋角(pitch)控制系統、機艙轉向(yaw)系統、電網系統、控制系統由 MATLAB/SIMULINK 解得。

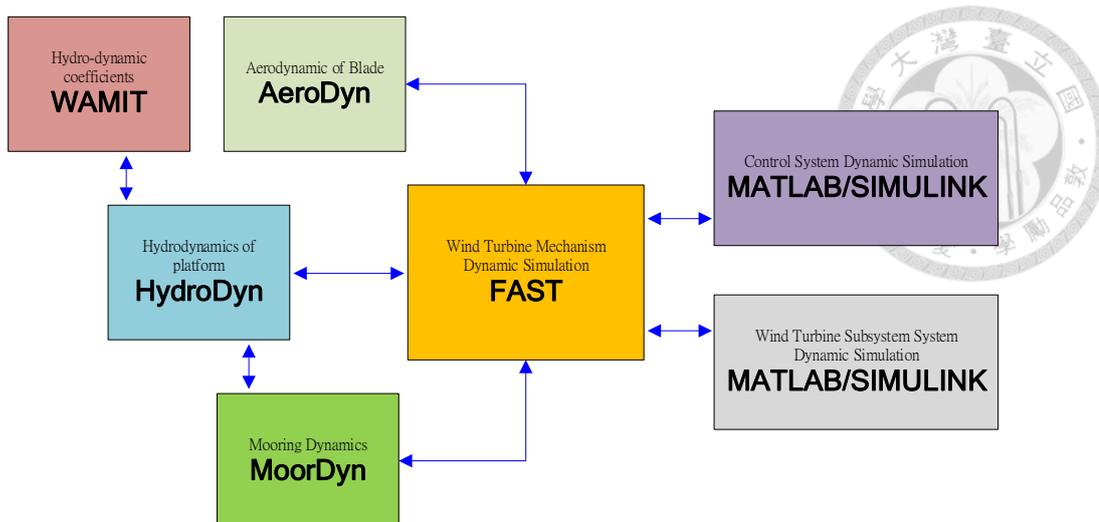


圖 2-3 WAMIT+FAST +MATLAB/SIMULINK 軟體整合

2-2-1 風力發電機模擬軟體 FAST(Fatigue, Aerodynamic, Structures, and Turbulence)簡介

圖 2-4 是執行 FAST 軟體需要的輸入檔，包含 EDFile、BDBldFile(1:3)、AeroFile、InflowFile、ServoFile、HydroFile、MooringFile 等輸入檔，EDFile 裡包含簡單的初始條件、風機各自由度設定、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。BDBldFile(1:3) 主要負責包含葉片幾何資訊。AeroFile 主要負責包含環境參數與 BEM 參數設定、葉片翼形種類及塔柱的幾何資訊等。InflowFile 選擇風況類型、風速作用中心及範圍等。ServoFile 含發電機、變旋角及轉向(yaw)系統控制。HydroFile 內含浮台幾何資訊、水動力係數、靜水恢復力係數、波浪波高、週期、頻譜等設定資訊。MooringFile 內為錨碇系統基礎設定含繫纜數量、連接點、質量、切割區段等設定。

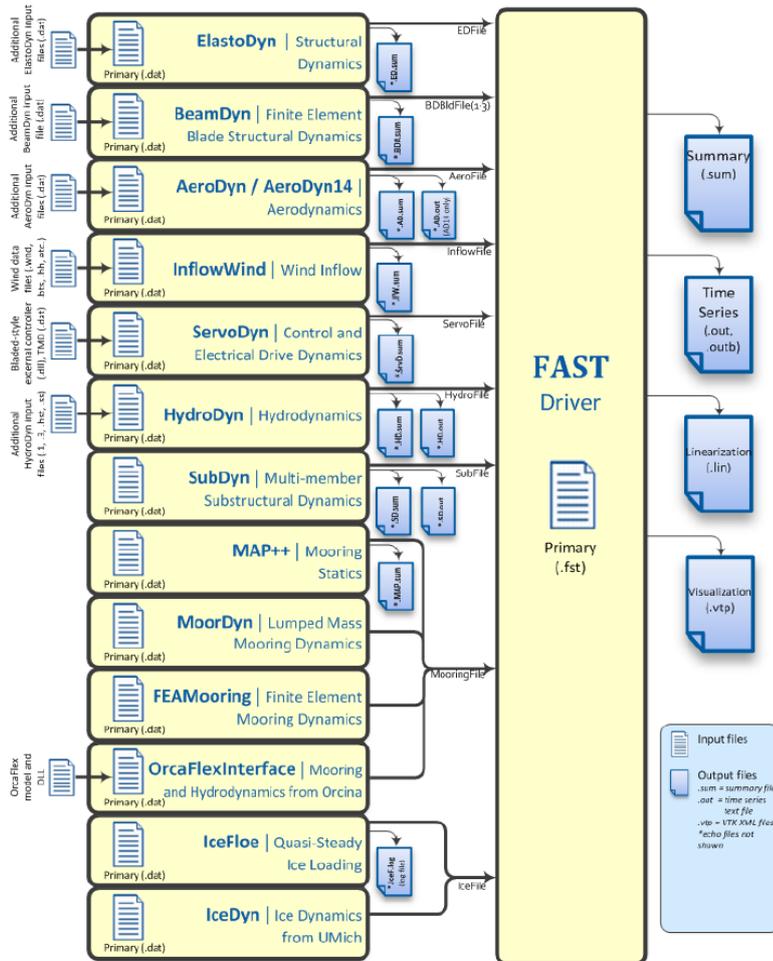


圖 2-4 FAST 與其子程式軟體之輸入及輸出檔 [20]

2-2-2 波浪力頻域分析軟體 WAMIT (Wave Analysis MIT)

WAMIT 由麻省理工學院的研究人員開發，因此縮寫為 Wave Analysis MIT。WAMIT 是一種計算機程式，用於計算波浪負載和波浪中近海結構的運動。它基於線性和二階位勢理論。速度勢通過邊界積分方程法（也稱為小板法）求解。WAMIT 能夠通過高階方法表示結構的幾何形狀，因此速度勢(potential)以連續的 B 木條曲線(B-splines)來表示。

WAMIT 由二個副程式組成如圖 2-5，POTEN 和 FORCE。POTEN 負責計算在特定自由度(modes)、頻率及波向(wave headings)下，物體表面的輻射(radiation)和繞射(diffraction)的速度勢。FORCE 則計算全域數值包含水動力係數、運動、

一階與二階波浪力。浮台表面速度與壓力亦由 FORCE 負責計算。

WAMIT 在頻域預先以勢流理論計算浮台節點速度勢，輸出檔案中的 PotFile 中含 1、3、hst 及 2 階項檔案。Hst 檔案為浮台之 6×6 線性水靜恢復矩陣(linear hydrostatic restoring matrix)；1 檔案為由輻射問題(radiation problem)分析頻域下浮台之水動力附加質量係數與阻尼係數，為 6×6 矩陣；3 檔案中則由線性繞射問題(diffraction problem)分析頻域下浮台所受一階波激發力(wave-excitation force)，為 6×1 向量。

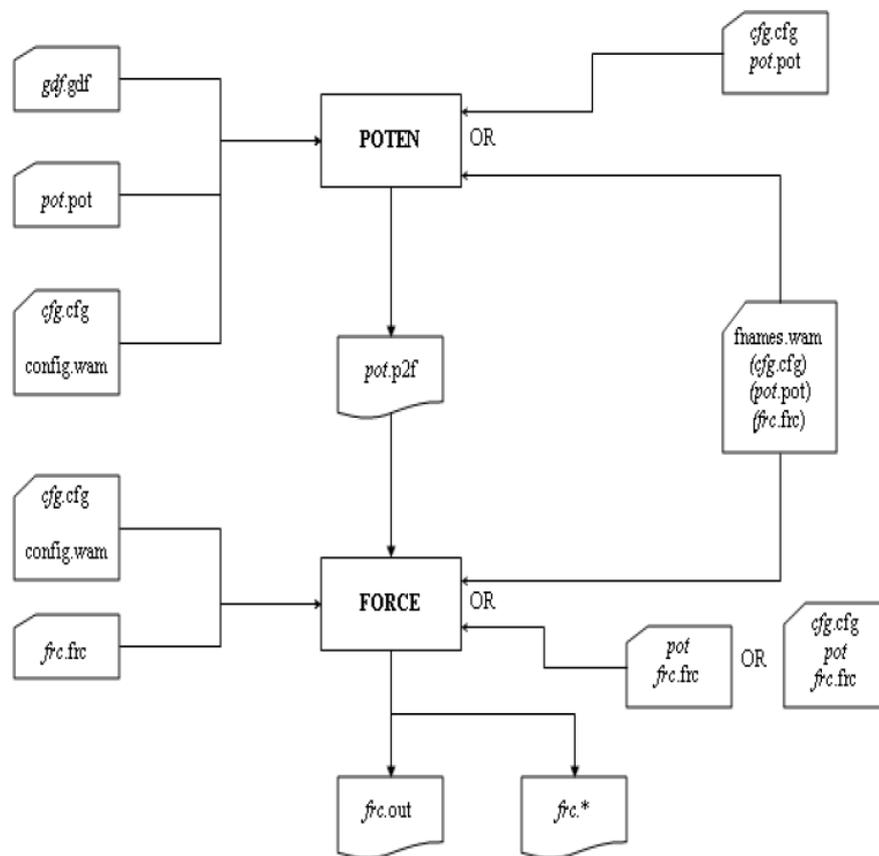


圖 2-5 WAMIT 的副程式 POTEN 與 FORCE 及其輸入輸出檔關係流程圖[17]

2-2-3 波浪力時域分析軟體 HydroDyn

HydroDyn 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)開發的軟

體。HydroDyn 負責工作與 WAMIT 一樣為計算浮台之水動力負載與運動，相異之處在於 HydroDyn[19]另外提供了截片理論求解方式(strip-theory solution)及結合勢流理論及 strip-theory 共三種求解方式可以來計算浮台水動力負載。另一相異處在於 HydroDyn 同 FAST 一樣主要在時域下進行分析，HydroDyn 可將 WAMIT 於頻域分析下的勢流理論解算出的數值轉換在時域分析，因此做為 WAMIT 與 FAST 中間轉接介面。

在 HydroDyn 中我們可以定義浮台幾何資訊、水動力係數、入射波運動與海流運動、勢流理論解算數值(potential-flow solution options)、溢流與壓載(flooding/ballasting)及海洋附著(marine growth)等參數，而這些參數大多可以從 WAMIT 取得進行分析。

2-2-4 錨碇系統軟體 MoorDyn

MoorDyn 由 School of Sustainable Design Engineering, University of Prince Edward Island 的 Matthew Hall 開發。MoorDyn[18]是一個集中質量的繫纜線模型分析軟體。MoorDyn 的設計中心思想是只取具代表意義的繫纜特性來預測典型錨碇系統的動態，因此可能不適合具有相當大的彎曲(bending)及扭轉(torsional)剛性(stiffness)之繫纜模型分析。

如圖 2-6，MoorDyn 支援任意繫纜互連方式(line interconnections)、重量配置(clump weights)、浮球配置(clump floats)與不同繫纜特性。模型需要內軸向剛性(internal axial stiffness)、阻尼力(damping force)、重量、浮力、來自 Morison's equation 的水動力及來自連接海床的縱向彈簧阻尼力。在 FAST v8 版本中，水動力是來自外接的 HydroDyn。

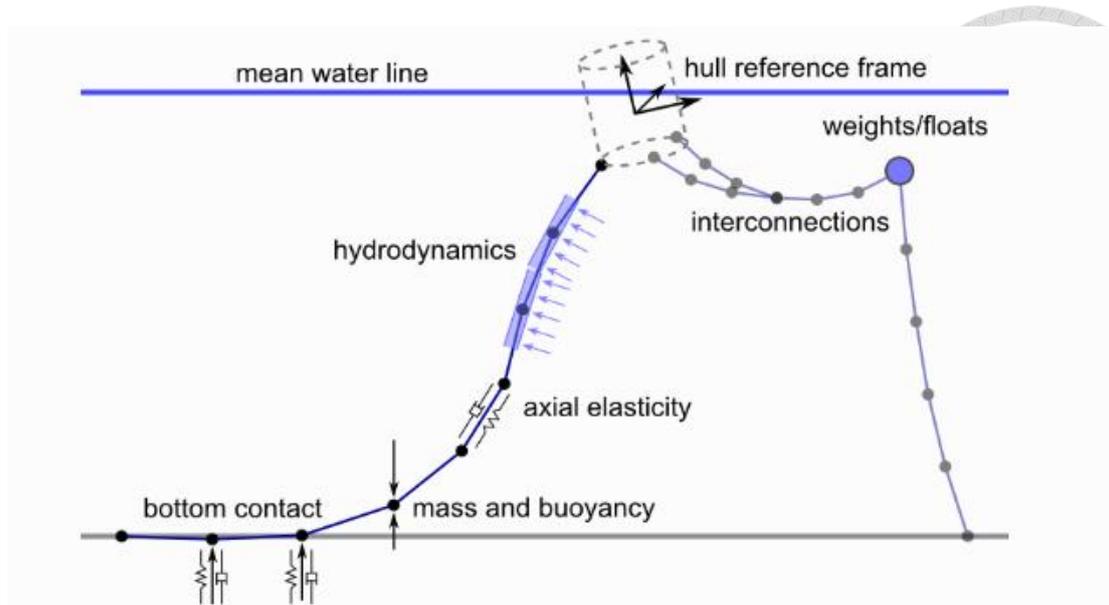


圖 2-6 錨碇系統示意圖[21]

MoorDyn 的設計本身就需要與其他軟體做銜接共同模擬，其目的在於給予繫纜在導鏈器(fairlead)端的運動。而模型執行步驟分二階段，在以下說明。

階段一為初始階段時，MoorDyn 先讀取描述錨碇系統資訊的檔案，建置錨碇系統結構並根據銜接軟體提供的浮台初始位置資訊來決定初始導鏈器位置，從而決定錨碇系統初始平衡狀態。

階段二為與銜接軟體進行共同模擬階段，MoorDyn 接收來自銜接軟體最新的浮台或是導鏈器的位置及速度資訊，在利用這些資訊換算到繫纜每個節點上，有了每個節點的運動後可以計算節點上個別受力，有力量後可在換算每個節點上的加速度，將加速度做二次積分可以得到速度及位置資訊，而 MoorDyn 會將繫纜受力回傳給銜接軟體計算下個時間點的浮台運動。

2-3 浮動式風力發電機運動模型建立

本文風機建模採用 NREL 的 5MW 大型水平軸參考風力發電機，建立 FAST 所需的 Blade(s)、Tower、Platform 與 Mooring 資料如表 2-2 所示。

表 2-2 NREL 之 5MW 參考風機規格表

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、輪穀半徑	126 m, 3 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)



2-3-1 建立塔架運動模型

塔架的座標軸依風吹入的方向來定義，分成 fore-aft 與 side-to-side 兩個方向的座標，如圖 2-7 所示。

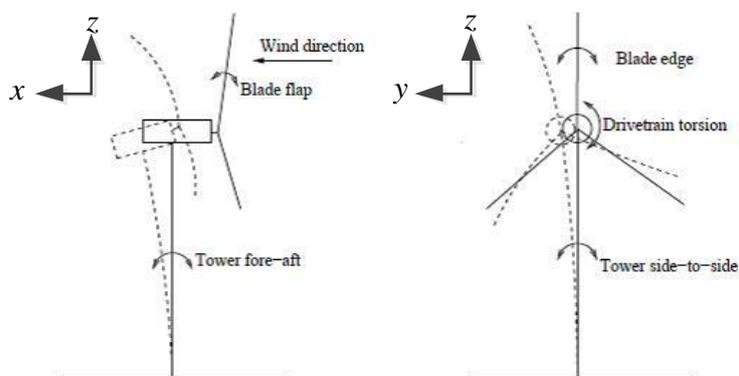


圖 2-7 塔架座標軸示意圖[22]

隨後利用塔架的剖面圖來定義 fore-aft 與 side-to-side 兩個方向的座標。

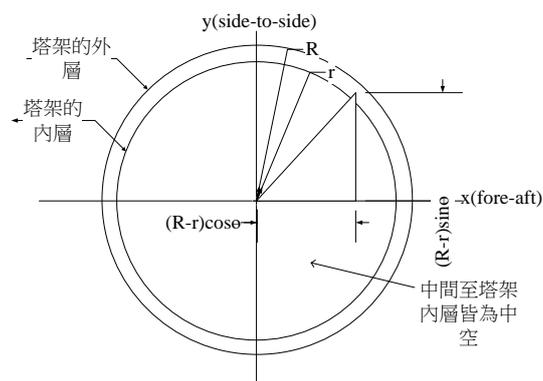


圖 2-8 塔架座標剖面圖[23]

最後利用座標定義、相關尺寸、與柔性體的計算，如表 2-3，於 FAST 完成塔架資料檔的建立。

表 2-3 NREL 之 5MW 參考風機機組塔架資料

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 %

2-3-2 建立葉片運動模型

葉片的座標軸依葉片的剖面來定義，分為翼面向(flapwise axis)與翼弦向(edgewise axis)。圖 2-9 上半部表示 flapwise axis 是以翼弦向為轉軸來轉動，此轉軸定義為 x 軸方向；下半部 edgewise axis 是以翼面向為轉軸來轉動，此轉軸定義為 y 軸方向，並假設其彈性中心為質量中心，透過上述的座標定義，完成座標的定義。

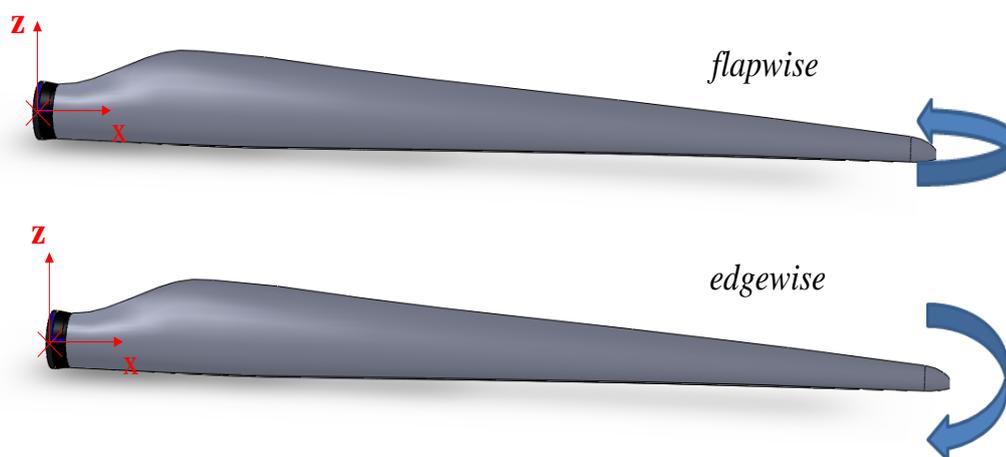


圖 2-9 葉片座標軸示意圖[23]

最後利用座標定義、相關尺寸、與柔性體的計算，如表 2-4，於 FAST 完成葉片資料檔的建立。

表 2-4 NREL 之 5MW 參考風機機組葉片資料

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 ²
質量慣性矩	363,231 kg · m
質心位置	20.475 m
結構阻尼比	0.477465 %

2-3-3 建立機艙運動模型

如表 2-5 為機艙相關參數。

表 2-5 NREL 之 5MW 參考風機機組機艙資料

轉向(yaw)軸承高度	87.6 m
轉向(yaw)軸垂直距離	1.96256 m
輪殼中心至轉向(yaw)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 ²
機艙重量	240,000 kg
機艙質量慣性矩	2,607,890 kg – m ²
機艙質心位置	1.9 m
等效轉向(yaw)系統彈簧系數	9,028,320,000 N · m/rad
等效轉向(yaw)系統阻尼係數	19,160,000 N · m/(rad/s)
標準機艙與轉向(yaw)比	0.3 %

2-3-4 建立浮台運動模型

本文已 NREL Offshore Code Comparison Collaboration Continuation(OC4)計畫中的半潛式浮台為主體，建置浮台幾何產生 GDF 檔輸入於 WAMIT 中進行勢流理論計算。以圖 2-10、圖 2-11、表 2-6 半潛式浮台幾何資料。

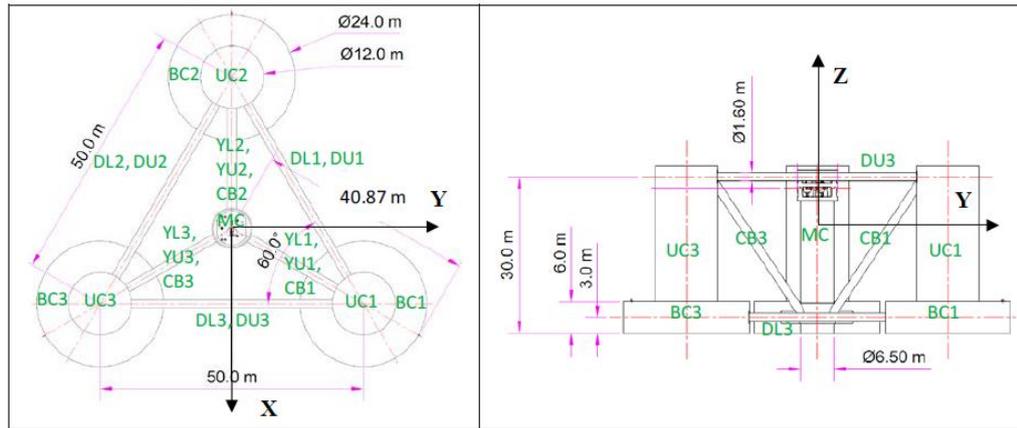


圖 2-10 半潛式浮台上視(左)及側視(右)圖[5]

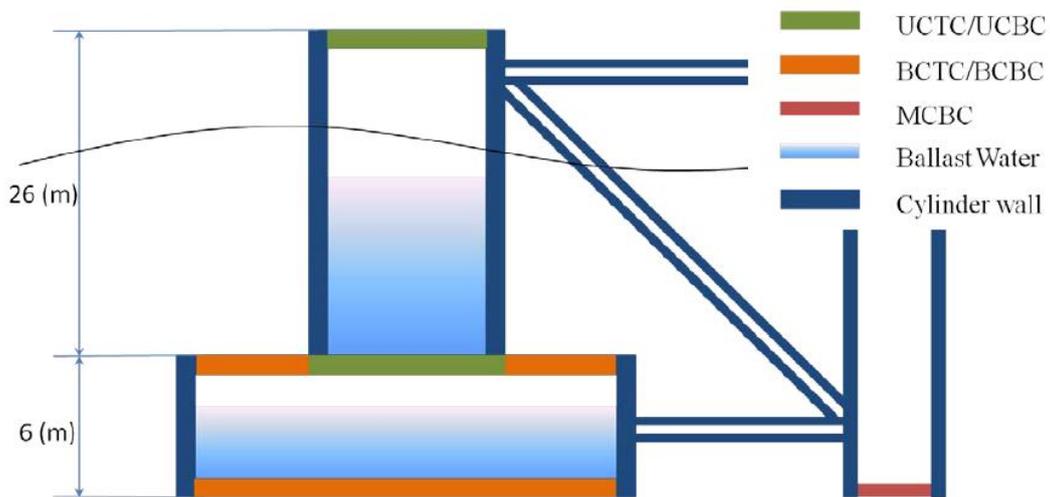


圖 2-11 半潛式浮台壁厚與帽蓋側視圖[5]

表 2-6 半潛式浮台幾何資料

浮台基底離靜水面下距離	20 m
主柱(風機塔柱基底)離靜水面上距離	10 m
偏位柱(主柱外三直柱，由上柱與基柱組成)於靜水面上距離	12 m
偏位柱彼此間距	50 m
上柱長度	26 m
基柱長度	6 m

離靜水面下基柱頂端深度	14 m
主柱直徑	6.5 m
上柱直徑	12 m
基柱直徑	24 m
浮柱與交叉撐柱直徑	1.6 m

表 2-7 半潛式浮台各構件幾何資料

柱名	簡稱	起始位置 (X, Y, Z)	終止位置 (X, Y, Z)	長度 (m)	壁厚 (m)
主柱	MC	(0, 0, -20)	(0, 0, 10)	30	0.03
上柱 1	UC1	(14.43, 25, -14)	(14.43, 25, 12)	26	0.06
上柱 2	UC2	(-28.87, 0, -14)	(-28.87, 0, 12)	26	0.06
上柱 3	UC3	(14.43, -25, -14)	(14.43, -25, 12)	26	0.06
基柱 1	BC1	(14.43, 25, -20)	(14.43, 25, -14)	6	0.06
基柱 2	BC2	(-28.87, 0, -20)	(-28.87, 0, -14)	6	0.06
基柱 3	BC3	(14.43, -25, -20)	(14.43, -25, -14)	6	0.06
三角上浮柱 1	DU1	(9.20, 22, 10)	(-23.67, 3, 10)	38	0.0175
三角上浮柱 2	DU2	(-23.67, -3, 10)	(-20, -22, 10)	38	0.0175
三角上浮柱 3	DU3	(14.43, -19, 10)	(14.43, 19, 10)	38	0.0175
三角下浮柱 1	DL1	(4, 19, -17)	(-18.47, 6, -17)	26	0.0175
三角下浮柱 2	DL2	(-18.47, -6, -17)	(4, -19, -17)	26	0.0175
三角下浮柱 3	DL3	(14.43, -13, -17)	(14.43, 13, -17)	26	0.0175
Y 型上浮柱 1	YU1	(1.625, 2.815, 10)	(11.43, 19.81, 10)	19.62	0.0175
Y 型上浮柱 2	YU2	(-3.25, 0, 10)	(-22.87, 0, 10)	19.62	0.0175

Y 型上浮柱 3	YU3	(1.625, -2.815, 10)	(11.43, -19.81, 10)	19.62	0.0175
Y 型下浮柱 1	YL1	(1.625, 2.815, -17)	(11.43, 14.6, -17)	13.62	0.0175
Y 型下浮柱 2	YL2	(-3.25, 0, -17)	(-16.87, 0, -17)	13.62	0.0175
Y 型下浮柱 3	YL3	(1.625, -2.815, -17)	(11.43, -14.6, -17)	13.62	0.0175
交叉撐柱 1	CB1	(1.625, 2.815, -16.2)	(11.43, 19.81, 9.13)	32.04	0.0175
交叉撐柱 2	CB2	(-3.25, 0, -16.2)	(-22.87, 0, 9.13)	32.04	0.0175
交叉撐柱 3	CB3	(1.625, -2.815, -16.2)	(11.43, -19.81, 9.13)	32.04	0.0175
上柱頂蓋	UCTC				0.06
上柱底蓋	UCBC				0.06
基柱上蓋	BCTC				0.06
基柱底蓋	BCBC				0.06
主柱底蓋	MCBC				0.06

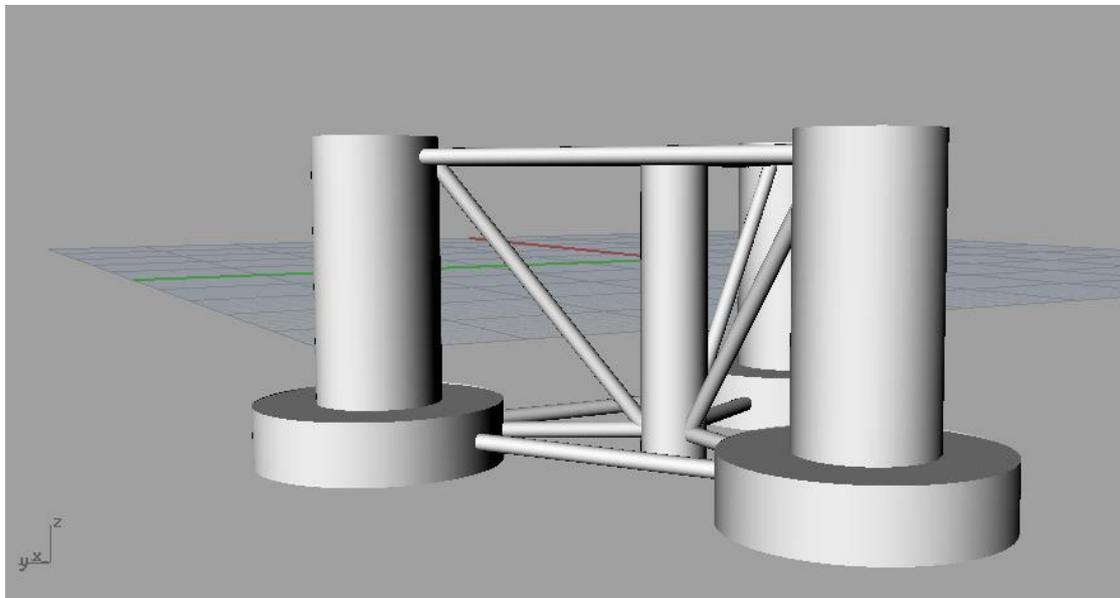


圖 2-12 半潛式浮台幾何建構圖

表 2-8 半潛式浮台資料

浮台質量(含壓艙水)	$3.85218 \times 10^6 \text{ kg}$
位於靜水面以下質心位置	8.6588 m
相對於質心之浮台橫搖慣性矩	$2.56193 \times 10^9 \text{ kg} - \text{m}^2$
相對於質心之浮台俯仰(pitch)慣性矩	$2.56193 \times 10^9 \text{ kg} - \text{m}^2$
相對於質心之浮台平擺(yaw)慣性矩	$4.24265 \times 10^9 \text{ kg} - \text{m}^2$

2-3-5 建立錨碇系統繫纜運動模型

本文使用三條對稱於浮台 Z 軸的懸垂纜線作為錨定系統配置。錨定系統配置圖如圖 2-13。繫纜資料如錯誤! 找不到參照來源。。

表 2-9 錨碇系統資料表

繫纜數	3
繫纜相鄰夾角	120°
錨碇點於靜水面下深度	200 m
導鏈器於靜水面下深度	14 m
錨碇點相對浮台中心半徑	837.6 m
導鏈器相對浮台中心半徑	40.868 m
未拉伸之繫纜長度	835.5 m
繫纜直徑	0.0766 m
繫纜之等效質量密度	113.35 kg/m
繫纜於水中之等效質量密度	108.63 kg/m
繫纜之等效拉伸剛性(extensional stiffness)	753.6 MN
繫纜之結構阻尼與阻尼比之比值	1

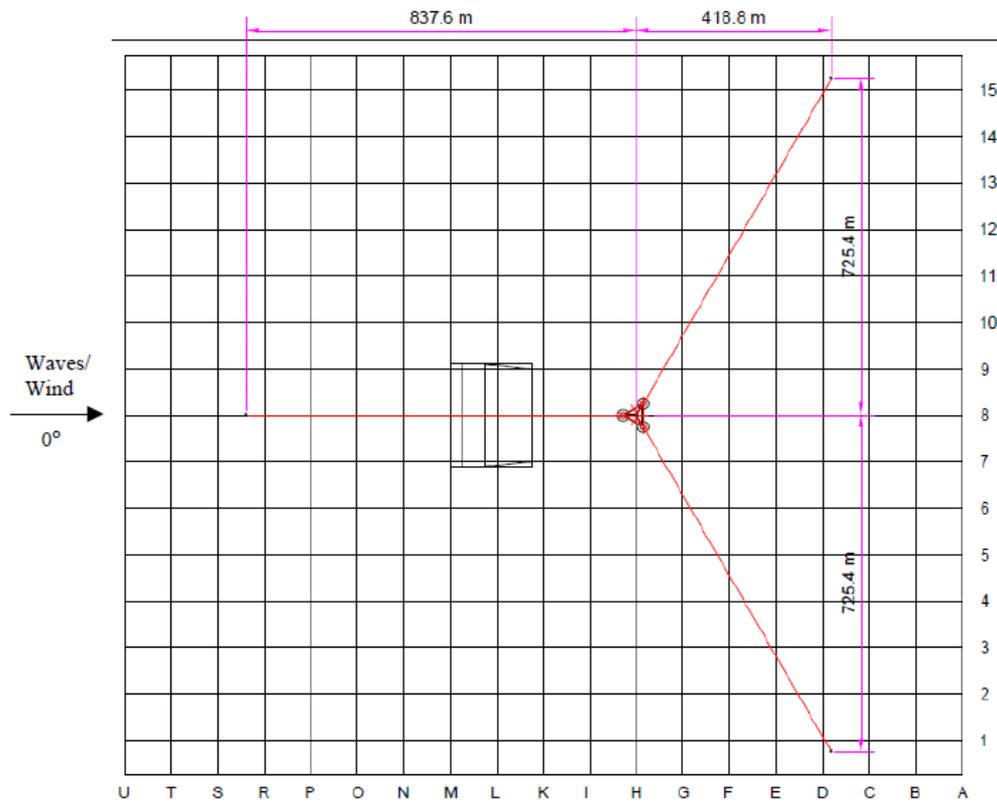


圖 2-13 錨碇系統配置圖[5]

第3章 浮動式風力發電機之非線性數學模式

本章節主要介紹浮動式風力發電機內部子系統之非線性數學模式，3-1節介紹直驅式永磁同步發電機系統數學模型與磁場導向控制，3-2節介紹以交流馬達驅動之機艙轉向系統數學模型，3-3節介紹浮台所受波浪負載計算。3-4節介紹錨碇系統所受波浪負載計算。半潛式風力發電機結合直驅式永磁同步發電機系統架構如圖 3-1。

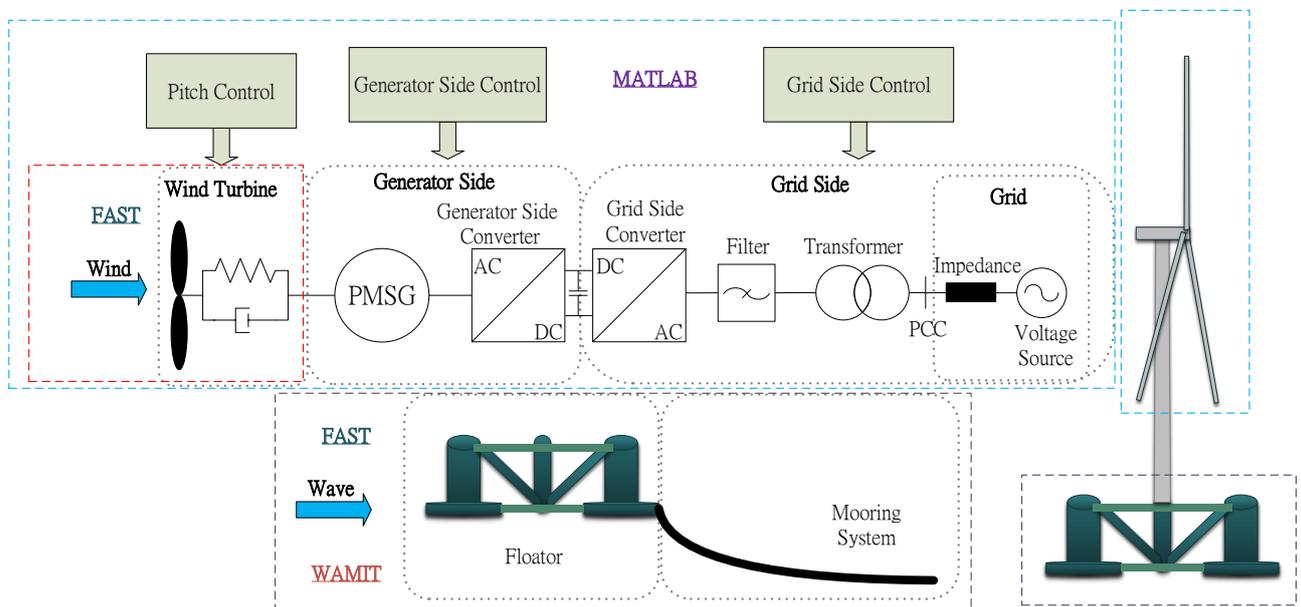


圖 3-1 半潛式風機結合直驅式永磁同步發電機系統架構

3-1 發電機系統

永磁同步發電機可操作於低轉速下，具備低風速時低噪音、高效率、長壽命等優點。轉子側材料為永久磁鐵，所以不需要線圈繞阻之直流激磁系統、滑環及電刷。傳動系統上不用透過增速齒輪箱進行增速，可減少維護上損壞的風險及能量損耗的問題。永磁同步發電機機組體積較小，佔用空間較少，可以縮短機艙，在安裝及運輸上較容易，綜合上述優點，永磁同步發電機是風力發電機系統未來發展的趨勢。

在永磁同步發電機系統可分為二個部分，電機電子端與機械動力端。第一部分主要在 FAST 下進行建模，由風機氣動力與傳動系統組成，第二部分電機電子主要在 MATLAB/Simulink 下建模，由外部電網、變壓器、濾波器、電網側變流器、發電機側變流器與永磁同步發電機組成。



3-1-1 直驅式永磁同步發電機(PMSG)數學模型

直驅式永磁同步發電機為非線性時變的耦合系統，為簡化同步發電機的分析，如圖 3-2 將定子三相時變量轉換至轉子 d/q 兩相同步旋轉軸後進行分析。

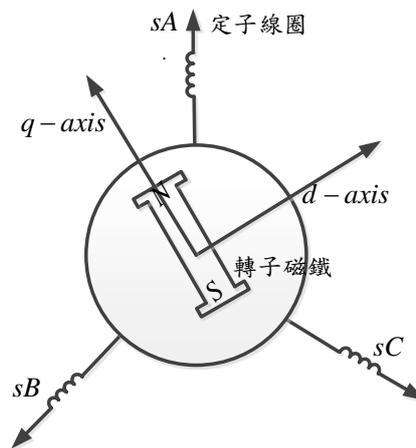


圖 3-2 定子三相(a,b,c)時變量轉換成轉子兩相(d,q)軸同步旋轉座標

假設發電機有以下二個理想條件分別為：其一，因轉子使用永久磁鐵，沒有線圈繞組，所以轉子部分不用進行 d/q 軸轉換；其二，能量損失視為一定值並忽略渦流損耗、飽和現象與磁鐵磁滯效應的影響。

可得以下永磁同步發電機的數學模型[24-26]：



$$\frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{L_{ds} + L_{ls}} (-R_s i_{ds} + \omega_e (L_{qs} + L_{ls}) i_{qs} + v_{ds}) \quad (3-1)$$

$$\frac{di_{qs}}{dt} = \frac{1}{L_{qs} + L_{ls}} (-R_s i_{qs} - \omega_e [(L_{ds} + L_{ls}) i_{ds} + \Psi_{PM}] + v_{qs}) \quad (3-2)$$

定子電壓方程式為：

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + (L_{ds} + L_{ls}) \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_e (L_{qs} + L_{ls}) i_{qs} \quad (3-3)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + (L_{qs} + L_{ls}) \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_e [(L_{ds} + L_{ls}) i_{ds} + \Psi_{PM}] \quad (3-4)$$

其中 L_{ds} L_{qs} : 定子 d 軸電感及 q 軸電感

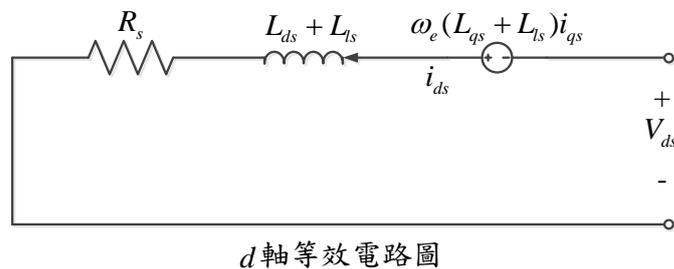
i_{ds} i_{qs} : 定子 d 軸電流及 q 軸電流

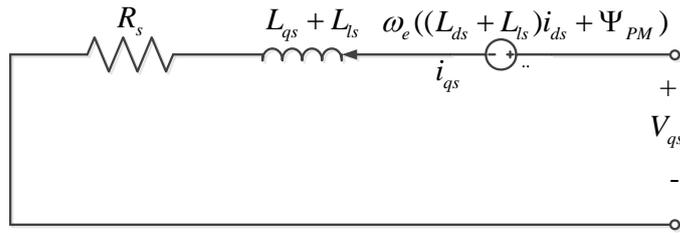
Ψ_{PM} : 永久磁鐵磁通量

R_s : 定子電阻

ω_e : 發電機端電磁轉速

圖 3-3 為永磁同步發電機定子側三項時變量轉換成兩相 d/q 軸後的等效電路圖。





q 軸等效電路圖

圖 3-3 直驅式永磁同步發電機於 d/q 軸座標下等效電路圖

式(3-5)為發電機端電磁轉速：

$$\omega_e = p\omega_g \quad (3-5)$$

其中 ω_g ：發電機端機械轉速

p ：發電機極數對

式(3-6)為發電機端電磁力矩：

$$T_e = 1.5p \left[(L_{ds} - L_{qs})i_{ds}i_{qs} + \Psi_{PM}i_{qs} \right] \quad (3-6)$$

最後發電機端定子實功率及虛功率為：

$$P_s = 1.5 [v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs}] \quad (3-7)$$

$$Q_s = 1.5 [v_{qs}i_{ds} - v_{ds}i_{qs}] \quad (3-8)$$

由式(3-6)可知發電機極對數 p 與永久磁鐵磁通量 Ψ_{PM} 皆為定值，接著我們

假設 $i_{ds}^* = 0$ ，藉此以控制 i_{qs} 來控制電磁力矩 T_e 及電磁功率 P_e 。

3-1-2 磁場導向控制(Field-Oriented Control)

馬達伺服控制系統可分為向量控制法(Vector Control)與純量控制法(Scalar Control)，其中向量控制亦稱為磁場導向控制 (field-oriented control，簡稱 FOC)。

磁場導向控制法為一種電流控制技術，為使轉矩與磁通能分別被獨立控制，

因此利用三相對二軸以及旋轉對靜止之座標轉換，將原本互相耦合的非線性之同步發電機控制結構，轉換為解耦合的線性控制結構。本文以永磁同步發電機 (PMSG) 為例，將發電機 d 軸分量的定子側電流控制在零，即可單獨以 q 軸分量控制轉矩，使永磁同步發電機像直流系統，易於進行定位及轉速控制。

由(3-3)與(3-4)可知，定子電壓 v_{ds} 與 v_{qs} 對應於定子側電流 i_{qs} 與 i_{ds} 相互耦合，我們藉由磁場導向控制將其各自的耦合項進行解耦合，使定子側電流 i_{ds} 與 i_{qs} 可以分別獨立控制。式(3-9)與式(3-10)為定子側電壓 v_{ds} 及 v_{qs} 分別拆解成解耦合項與補償項。

$$v_{ds} = [R_s + (L_{ds} + L_{ls})s]i_{ds} - \omega_e(L_{qs} + L_{ls})i_{qs} = v'_{ds} - \Delta v_{ds} \quad (3-9)$$

$$v_{qs} = [R_s + (L_{qs} + L_{ls})s]i_{qs} + \omega_e[(L_{ds} + L_{ls})i_{ds} + \Psi_{PM}] = v'_{qs} + \Delta v_{qs} \quad (3-10)$$

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

如圖 3-4 所示，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，是為一個雙層閉迴路架構，其中電流控制的響應要比轉子轉速控制的響應要快。永磁同步發電機數學模型結合磁場導向控制共使用三個 PI 控制器來控制。

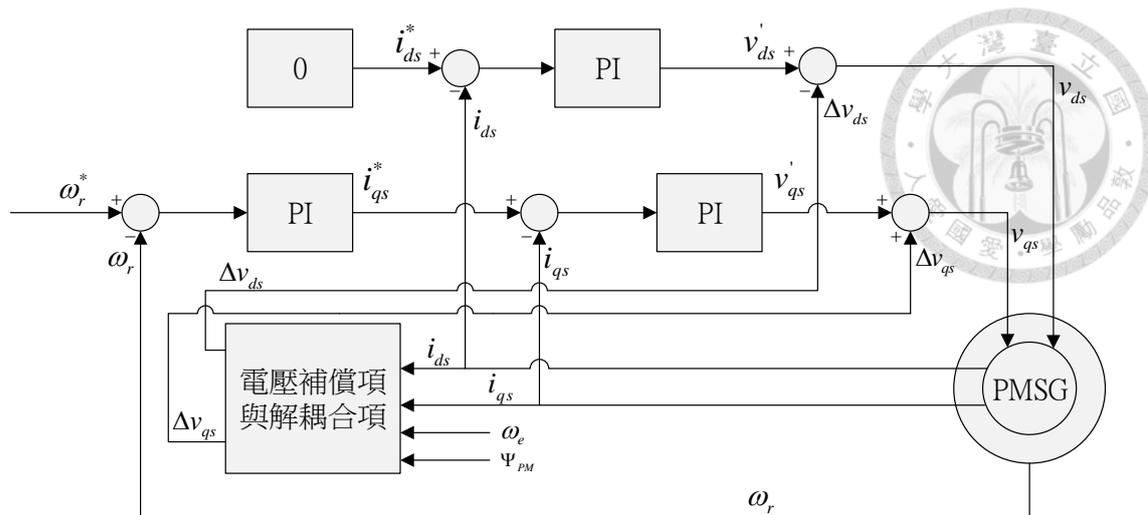


圖 3-4 直驅式永磁同步發電機磁場導向控制系統架構圖

內層為電流控制層：假設定子 d 軸電流參考值 $i_{ds}^* = 0$ ，將定子側電流參考值與定子電流實際回傳值相減所得的誤差項，輸入 PI 電流控制器後可得將定子側電壓解耦合項 v'_{qs} 與 v'_{ds} ，再加上定子側電壓補償項 Δv_{qs} 與 Δv_{ds} ，可得實際定子電壓 v_{qs} 與 v_{ds} ，最後將其輸入回永磁同步發電機(PMSG)定子電壓方程式，完成直驅式永磁同步發電機結合磁場導向控制。

外層為轉速控制層：定子電流參考值 i_{qs}^* 為轉子轉速參考值 ω_g^* 與發電機端轉速 ω_g 實際回傳值相減後之差值經由 PI 轉速控制器取得。

3-1-3 電網側變流器控制(Grid-Side Converter Control)

電壓方程式在電網側變流器控制輸出為式(3-11)與式(3-12)[27, 28]

$$v_{gd} = R_f i_{gd} + L_f \frac{di_{gd}}{dt} - \omega_s L_f i_{gq} + v_{sd} \quad (3-11)$$

$$v_{gq} = R_f i_{gq} + L_f \frac{di_{gq}}{dt} + \omega_s L_f i_{gd} + v_{sq} \quad (3-12)$$

其中 v_{gd} ， v_{gq} ：電網側變流器控制輸出電壓 d q 軸分量



i_{gd}, i_{gq} : 電網側變流器控制輸出電流 dq 軸分量

R_f, L_f : 電網側濾波器電阻及電感

ω_s : 同步角速度

v_{sd}, v_{sq} : 電網電壓 dq 軸分量

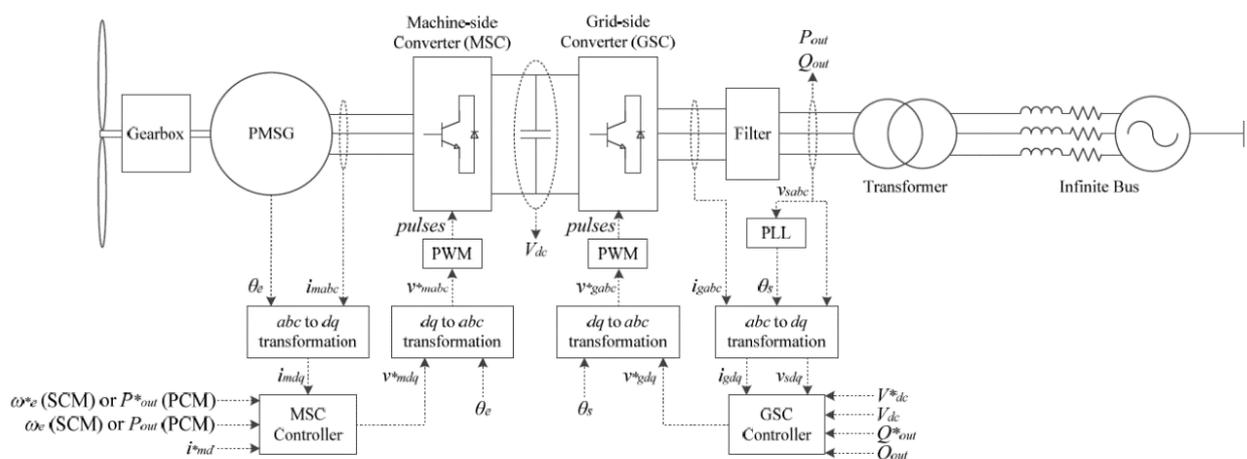


圖 3-5 風能轉換系統示意圖[27]

實功率及虛功率在電網側輸出分別為式(3-13)與式(3-14)[27]

$$P_{out} = \frac{3}{2}(v_{gd}i_{gd} + v_{gq}i_{gq}) = \frac{3}{2}v_{gd}i_{gd} \quad (3-13)$$

$$Q_{out} = \frac{3}{2}(v_{gq}i_{gd} - v_{gd}i_{gq}) = -\frac{3}{2}v_{gd}i_{gq} \quad (3-14)$$

電網側變流器控制架構如錯誤! 找不到參照來源。所示，分成外迴圈控制及內迴圈控制，外層分別控制 DC-link 電壓及輸出虛功率 Q_{out} ；內層控制電網側變流器控制輸出電壓。

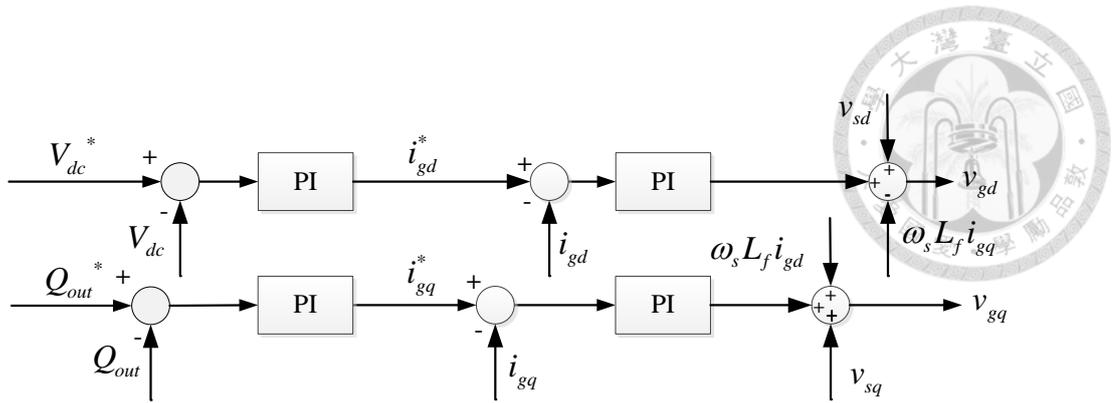


圖 3-6 電網側變流器控制架構[27]

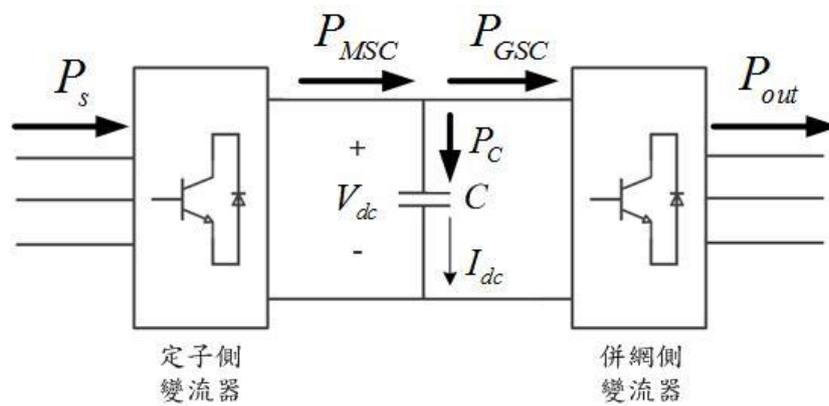


圖 3-7 DC-link 功率流[27]

如圖 3-7 所示，發電機側變流器與 DC-link 與和電網側變流器的功率關係式為：

$$P_{MSC} = P_{GSC} + P_C$$

$$P_C = V_{dc} I_{dc} = V_{dc} C \frac{dV_{dc}}{dt}$$

其中 P_{MSC} : 發電機側變流器到 DC-link 間實功率

P_{GSC} : DC-link 到電網側變流器間實功率

P_C : 經過 DC-link 電容的實功率

V_{dc} , I_{dc} : DC-link 電壓及電流

C : DC-link 電容



3-2 轉向(yaw)系統

在一般風機運轉情況下，考慮風向會持續改變，為了更有效的擷取風能，除了變旋角系統，需另外加入轉向(yaw)系統，但一般大型風力發電機的轉向(yaw)系統在 ± 15 度以內不會啟動，以節省啟動所需能源的消耗。而本文將此系統用於颱風卸載分析。

3-2-1 轉向(yaw)系統機構

圖 3-8 是大型風力發電機系統機艙的剖面圖。轉向(yaw)系統機構一般採用電動馬達或是液壓馬達來驅動機艙轉動。

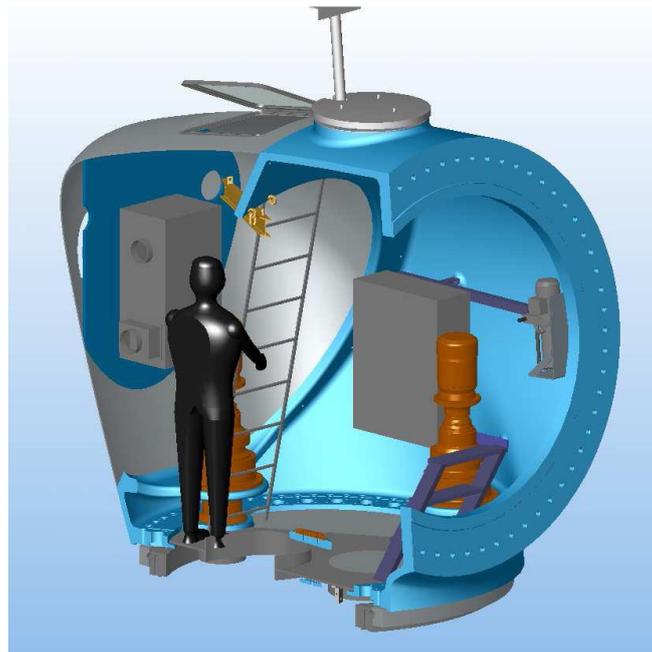


圖 3-8 轉向(yaw)系統架構圖[29]

因風機的機艙轉動慣量十分龐大，因此本文採用四個交流感應馬達來驅動機艙轉向(yaw)系統的轉動。

表 3-1 轉向(yaw)感應馬達的規格

名稱	系統參數值	單位
定子電阻	0.0856	Ohm
轉子電阻	0.0825	Ohm
定子電感	0.000895	H
互感	0.00564	H
轉向(yaw)系統齒輪比	10909.8	-
電機極數	6	-
馬達轉動慣量	0.0143	$\text{kg} \times \text{m}^3$
d 軸定子電流	10	A
電流補償增益	0.5625	-
電流回授增益	0.01	-

3-2-2 轉向(yaw)系統數學模型

轉向(yaw)系統採用非同步感應馬達來驅動轉向(yaw)機構，而非同步馬達即感應馬達，本文使用四顆感應馬達來驅動機艙進行旋轉。

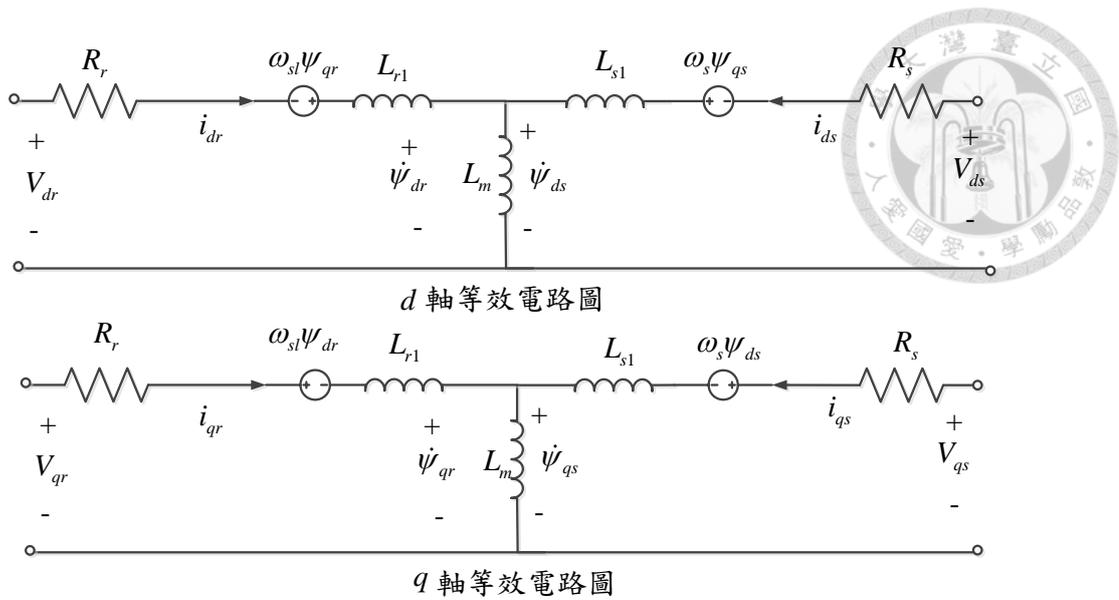


圖 3-9 感應馬達於 d/q 軸座標下等效電路圖

交流感應馬達的定子電壓方程式：

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \psi_{qs} + \dot{\psi}_{ds} \quad (3-15)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \psi_{ds} + \dot{\psi}_{qs} \quad (3-16)$$

交流感應馬達的轉子電壓方程式：

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - \omega_{sl} \psi_{qr} + \dot{\psi}_{dr} \quad (3-17)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \omega_{sl} \psi_{dr} + \dot{\psi}_{qr} \quad (3-18)$$

其中 R_s : 定子電阻

R_r : 轉子電阻

ω_s : 同步角速度

交流感應馬達的定子磁通鏈方程式：



$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} - L_m i_{dr} \quad (3-19)$$

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} - L_m i_{qr} \quad (3-20)$$

交流感應馬達的轉子磁通鏈方程式：

$$\psi_{dr} = L_r i_{dr} - L_m i_{ds} \quad (3-21)$$

$$\psi_{qr} = L_r i_{qr} - L_m i_{qs} \quad (3-22)$$

其中 $L_s = L_{s1} + L_m$: 定子電感

$L_r = L_{r1} + L_m$: 轉子電感

L_m : 定子與轉子間的互感

i_{ds}, i_{qs} : 定子電流 d 軸分量, 定子電流 q 軸分量

i_{dr}, i_{qr} : 轉子電流 d 軸分量, 轉子電流 q 軸分量

交流感應馬達的轉差轉速：

$$\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r \quad (3-23)$$

其中 ω_r : 轉子轉速

將式(3-19)~(3-22)整理為矩陣形式：

$$\begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (3-24)$$

將式(3-24)帶入式(3-15)~(3-18)整理為矩陣形式：

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + sL_s & -\omega_s L_s & -sL_m & \omega_s L_m \\ \omega_s L_s & R_s + sL_s & -\omega_s L_m & -sL_m \\ -sL_m & \omega_{sl} L_m & R_r + sL_r & -\omega_{sl} L_r \\ -\omega_{sl} L_m & -sL_m & \omega_{sl} L_r & R_r + sL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (3-25)$$



電磁力矩方程式由電壓方程式可簡化為：

$$T_e = \frac{p}{2} \frac{3}{2} (\psi_{qs} i_{ds} - \psi_{ds} i_{qs}) = \frac{3}{4} p L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (3-26)$$

為了將 q 軸分量參數轉換以 d 軸分量參數表示，我們利用間接向量控制法達成。

由 (3-17) 及 (3-18) 的轉子電壓方程可得

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - \omega_{sl} \psi_{qr} + s\psi_{dr} \quad (3-27)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \omega_{sl} \psi_{dr} + s\psi_{qr} \quad (3-28)$$

其中 s : 微分因子

令感應馬達轉子線圈短路，得以下理想條件：

$$v_{dr} = v_{qr} = 0 \quad (3-29)$$

$$s\psi_{qr} = 0, \psi_{qr} = 0 \quad (3-30)$$

經由上述條件，可得下列簡化方程式：



$$\omega_{sl} = -\frac{R_r i_{qr}}{\psi_{dr}} \quad (3-31)$$

$$\psi_{dr} = -\frac{L_m i_{ds}}{1 + s\left(\frac{L_r}{R_r}\right)} \quad (3-32)$$

$$i_{dr} = \frac{L_m i_{ds}}{L_r} \left(1 - \frac{1}{1 + s\left(\frac{L_r}{R_r}\right)} \right) \quad (3-33)$$

$$i_{qr} = \frac{L_m}{L_r} i_{qs} \quad (3-34)$$

討論在穩態時，可得條件：

$$i_{dr} = 0 \quad (3-35)$$

$$\psi_{dr} = -L_m i_{ds} \quad (3-36)$$

將(3-34)及(3-36)代入(3-31)後，得轉差轉速：

$$\omega_{sl} = \frac{R_r i_{qs}}{L_r i_{ds}} \quad (3-37)$$

將上述推導所得到的 i_{dr} 與 i_{qr} 代入(3-26)，可得

$$T_e = \frac{3}{4} p L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) = \frac{3}{4} p \frac{L_m^2}{L_r} i_{ds} i_{qs} = \frac{3}{4} p \frac{L_m}{L_r} \psi_{dr} i_{qs} \quad (3-38)$$

經由間接向量控制將(3-16)之q軸電壓方程式改寫以q軸分量之參數表示為：

$$v_{qs} = (R_s + sL_s) i_{qs} + \omega_s L_s i_{ds} + sL_m \left(\frac{L_m}{L_r} \right) i_{qs} \quad (3-39)$$

其中同步轉速為：



$$\omega_s = \omega_r + \omega_{sl} = \frac{p}{2} \omega_m + \frac{R_r i_{qs}}{L_r i_{ds}} \quad (3-40)$$

將(3-40)代入(3-39)，可將 q 軸電壓方程式簡化為：

$$v_{qs} = R_i i_{qs} + L_t s i_{qs} + k_b \omega_m \quad (3-41)$$

其中

$$R_i = R_s + \frac{L_s}{L_r} R_r \quad (3-42)$$

$$L_t = L_s \left(1 + \frac{L_m^2}{L_s L_r} \right) \quad (3-43)$$

$$k_b = \frac{p}{2} L_s i_{ds} \quad (3-44)$$

由(3-38)力矩方程式可簡化為

$$T_e = -\frac{3}{4} p \frac{L_m^2}{L_r} i_{ds} i_{qs} = k_t i_{qs} \quad (3-45)$$

其中

$$k_t = -\frac{3}{4} p \frac{L_m^2}{L_r} i_{ds} \quad (3-46)$$

轉向(yaw)系統總力矩方程式：

$$\begin{aligned} \sum T &= n \cdot T_m - T_{ext} / n_g = J_{eq} \ddot{\theta}_m + D_{eq} \dot{\theta}_m + C_{eq} \theta_m \\ &= \left(J_m + \frac{J_y}{n_g^2} \right) \ddot{\theta}_m + \left(D_m + \frac{D_y}{n_g^2} \right) \dot{\theta}_m + \left(C_m + \frac{C_y}{n_g^2} \right) \theta_m \end{aligned} \quad (3-47)$$

其中 n : 馬達的個數

n_g : 馬達與負載端齒輪比

T_{ext} : 外部干擾扭矩的總和

J_{eq}, J_m, J_y : 馬達側等效，馬達本身及轉向(yaw)機構的轉動慣量

D_{eq}, D_m, D_y : 馬達側等效，馬達本身及轉向(yaw)機構旋轉黏滯係數，

C_{eq}, C_m, C_y : 馬達側等效，馬達本身及轉向(yaw)機構摩擦常數

θ_m, θ_y : 馬達轉角與機艙轉向(yaw)角度($\theta_y = \theta_m / n_g$)



AC 感應馬達數學模型整合間接向量控制後，AC 感應馬達數學模型可簡化為直流馬達的數學模型形式表示，並將(3-41)~(3-47)整合以方塊圖圖 3-10 表示。

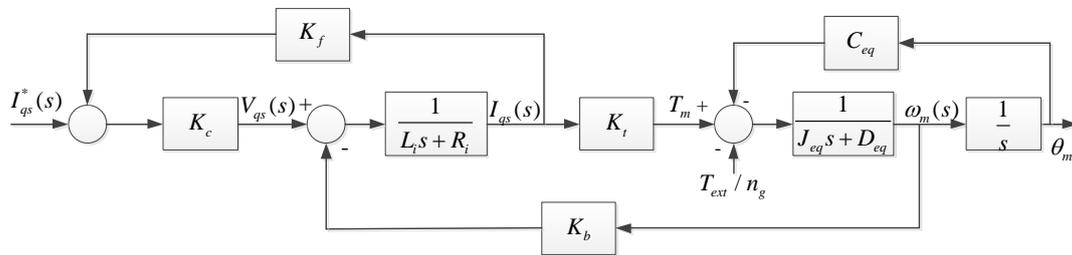


圖 3-10 感應馬達間接向量控制數學模型方塊圖

其中 k_c : 電流補償增益

k_f : 電流回授增益

3-3 浮台的波浪力負載與運動

波浪運動數學模型[19]利用微小振幅波理論(Airy Wave Theory)，其可以用來表示規則波與不規則波。規則波波高(ζ)以一單一振幅及頻率正弦波表示。微小振幅波理論亦可描述未受擾動流體粒子速度與加速度隨深度以指數衰減變化。不規則波可以視為不同規則波的疊加，表示為(3-48)



(3-48)

$$\zeta(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) \sqrt{2\pi S_{\zeta}^{2-side}(\omega)} e^{j\omega t} d\omega$$

其中

- ζ : 波浪波高
- $W(\omega)$: 傅立葉轉換下的白高斯雜訊
- S_{ζ}^{2-side} : 二側譜密度

在水動力學中我們會使用到入射波運動學與水動力負載模型。水動力負載是沿浮台表面的動態水壓積分的表現，水動力負載包含附加質量(added mass)、線性拖曳力(linear drag)、恢復力(restoring)、入射波散射(scattering)、海流及其他非線性效應。

入射波的運動學中，我們會用微小振幅波理論(Airy wave theory)來描述規則波未受擾動的水分子速度及加速度隨深度衰減情形，非規則波則用規則波的組合來描述。

水動力負載在HydroDyn中主要有三種描述方式，勢流理論、Morison's equation或是前二者結合。

在勢流理論中以線性勢流理論來描述負載施加在浮台參考點上的關係：

$$\overrightarrow{F_{WRP}} = \overrightarrow{F_W} + \overrightarrow{F_{HS}} + \overrightarrow{F_{RD_n}} + \overrightarrow{F_{AM}} \quad (3-49)$$

其中

- F_{WRP} : 施加於WAMIT參考點上的水動力總負載(N/m)，為6×1向量
- F_W : 施加於浮台參考點上的入射波負載(N/m)，為6×1向量
- F_{HS} : 施加於浮台參考點上的靜壓負載(N/m)，為6×1向量
- F_{RD} : 施加於浮台參考點上的輻射效應負載(N/m)，為6×1向量

$\overrightarrow{F_{AM}}$: 所有效應引起的附加質量負載(N/m)，為 6×1 向量



$$\overrightarrow{F_{AM}} = -AM_{RP} \overrightarrow{a_P} \quad (3-50)$$

$$\overrightarrow{F_W} = \frac{1}{N} \sum_{k=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} W[k] \sqrt{\frac{2\pi}{\Delta t} S_{\zeta}^{2-Side}(\omega) X(\omega, \alpha) |_{\omega=k\Delta\omega}} e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (3-51)$$

$$\overrightarrow{F_{HS}} = \rho g V_0 (\{\delta\}_3 + y^{CB} \{\delta\}_4 - x^{CB} \{\delta\}_5) - C^{Hydrostatic} x \quad (3-52)$$

$$\overrightarrow{F_{RD}} = -\int_0^t K(t-\tau) \cdot \dot{x}(\tau) d\tau \quad (3-53)$$

將(3-53)由摺積改寫為離散形式，只考慮在一特定區段時間 N_{RD} 內

$$\overrightarrow{F_{RD_n}} = -\Delta t_{RD} \sum_{i=n-N_{RD}}^{n-1} K_{n-i-1} \dot{x}_i \quad (3-54)$$

其中

AM_{RP} : 施加於WAMIT參考點上因輻射問題產生的附加質量係數

a_p : 浮台加速度

X : 浮台位移

ω : 波頻

α : 入射波角度

ρ : 水密度

V_0 : 於浮台無位移位置之水變化體積

δ_j : 克羅內克 δ 函數(衡等函數)，下標 j 表示浮台6自由度
(1:縱移(surge)、2:橫移(sway)、3:起伏(heave)、
4:橫搖(roll)、5:俯仰(pitch)、6:平擺(yaw))

y^{CB} : y 方向浮力中心位置



- x^{CB} : x方向浮力中心位置
 $C^{Hydrostatic}$: 液靜壓恢復係數
 x : 浮台位移
 Δt_{RD} : 計算輻射記憶效應的時間間距
 K : 勢流理論的輻射函數(脈衝響應函數)
 \dot{x} : 浮台速度

表 3-2 OC4 半潛式浮台水動力資料

水密度(ρ)	1025 kg/m ³
水深(h)	200 m
於浮台無位移位置之水變化體積 (V_0)	13917 m ³
於靜水面下浮力中心位置	8.6588 m
於浮台無位移位置之浮力($\rho g V_0$)	1.3989×10^8 N

Morison's equation為一半經驗公式，其波浪力負載計算含入射波激發影響、輻射反應引起的附加質量效應及分流引起的黏性阻力，而波浪力沿浮台長度可以表示為

$$F = F_I + F_D + F_B + F_{MG} + F_{FB} + F_{AMM} + F_{AMMG} + F_{AMF} \quad (3-55)$$

其中

- F : 水動力總負載
 F_I : 慣性力負載
 F_D : 拖曳力負載
 F_B : 浮力負載



- F_{MG} : 隨海洋附加而增加的負載
 F_{FB} : 壓艙水重負載
 F_{AMM} : 結構物本身造成附加質量效應負載
 F_{AMMG} : 因海洋附加附加物造成的附加質量效應負載
 F_{AMF} : 壓艙水造成的附加質量效應負載

本文同時考慮勢流理論及Morison's equation，水動力負載可以表示為

$$F = F_W + F_{HS} + F_{RD} + F_{AM} + F_D + F_{FB} + F_{AMF} \quad (3-56)$$

其中：

$$\vec{F}_D = \left\{ \begin{array}{l} C_D \rho_w (R+t_{MG}) \left\| \vec{v}_{rel} - (\vec{v}_{rel} \cdot k)k \right\| (\vec{v}_{rel} - (\vec{v}_{rel} \cdot k)k) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\} \quad (3-57)$$

$$\vec{v}_{rel} = \vec{v}_f - \vec{v}_s \quad (3-58)$$

$$\vec{F}_{FB} = \rho_f g \left\{ \begin{array}{l} C \left\{ \begin{array}{l} C_{31}\pi(R-t_M)^2 \\ C_{32}\pi(R-t_M)^2 \\ -2\pi(R-t_M)\frac{\partial R}{\partial z}(Z-Z_{fs}) \end{array} \right\} \\ C \left\{ \begin{array}{l} -C_{32}\pi\frac{\partial R}{\partial z}(R-t_M)^3 \\ C_{31}\pi\frac{\partial R}{\partial z}(R-t_M)^3 \\ 0 \end{array} \right\} \end{array} \right\} \quad (3-59)$$

$$\vec{F}_{AMF} = -AM_F \left\{ \begin{array}{l} \vec{a}_s \\ \vec{\alpha}_s \end{array} \right\} \quad (3-60)$$

$$AM_F = \rho_f \pi (R-t_M)^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-61)$$

其中

C_D : 阻力係數

ρ_w : 水密度

R : 構件(member)外層半徑

t_{MG} : 海洋增生物厚度

\vec{v}_{rel} : 水分子與結構物間相對速度，為 3×1 向量

\vec{v}_f : 水分子速度，為 3×1 向量

\vec{v}_s : 結構物速度，為 3×1 向量

k : 本地座標 Z 方向之單位向量

C_{ij} : 額外恢復係數(additional stiffness)，下標 i 、 j 表浮台六自由度





ρ_f	壓艙水液體密度
t_M	結構物厚度
Z	壓艙水高度
Z_{fs}	壓艙水自由液面高度(靜水面高度)
AM_F	壓艙水造成附加質量
\vec{a}_s	結構物平移加速度，為 3×1 向量
$\vec{\alpha}_s$	結構物旋轉加速度，為 3×1 向量

3-4 錨碇系統波浪力負載

MoorDyn 將錨碇系統中每條繫纜切割為等大小區段，區段間以節點(node)連接。每區段的質量集中在節點上，伴隨著重力、浮力、水動力及與海床接觸而產生的反應。由附加質量效應及阻力產生的水動力經由 HydroDyn 中 Morison's equation 來計算。繫纜之軸向剛性(axial stiffness)藉由施加於每個區段張力方向的線性剛性來模擬。而阻尼部分透過施加每個區段造成非實體共震阻尼來模擬。彎曲及扭轉剛性則忽略。與海床接觸的反應透過施加於節點上縱向恢復力與阻尼力方式模擬。

繫纜線性簡化模型[5]，施加於浮台上之所有繫纜總負載 F_i^{lines} 為下式：

$$F_i^{Lines}(q) = F_i^{Lines,0} - C_{ij}^{Lines} q_j \quad (3-62)$$

其中

- $F_i^{Lines,0}$: 第*i*條繫纜施加於未位移浮台之總負載
- C_{ij}^{Lines} : 繫纜之線性恢復係數矩陣(*i*:第*i*條繫纜，*j*:第*j*個浮台自由度)
- q_j : 浮台第*j*個自由度位移



水動力負載藉由 Morison's equation 計算:

$$F(q) = \rho \nabla \dot{v} + \rho \nabla C_a (\dot{v} - \ddot{X}) + \frac{C_d \rho A_d}{2} (v - \dot{X}) |v - \dot{X}| \quad (3-63)$$

其中

- ρ : 水密度
- ∇ : 排開液體體積
- \dot{v} : 水分子加速度
- C_a : 附加質量係數
- \ddot{X} : 物體加速度
- C_d : 阻力係數
- A_d : 阻力方向之特徵面積
- v : 水分子速度
- \dot{X} : 物體速度

第4章 控制理論與策略



4-1 5MW 浮動式風力發電機控制策略

如圖 4-1，當風機運轉至切入風速 3m/s 時，葉片轉子啟動開始擷取風能進行發電，直到風速達切出風速 25m/s 則停止運轉以保護機組，而介於切入及切出風速期間，進行變轉速變旋角(pitch angle)的風力發電機控制策略，並將風速區間分為二個區域，如圖 4-1，第一區域為追蹤最佳尖速比，當風速增加至額定風速時，進入第二區域功率恆定區。

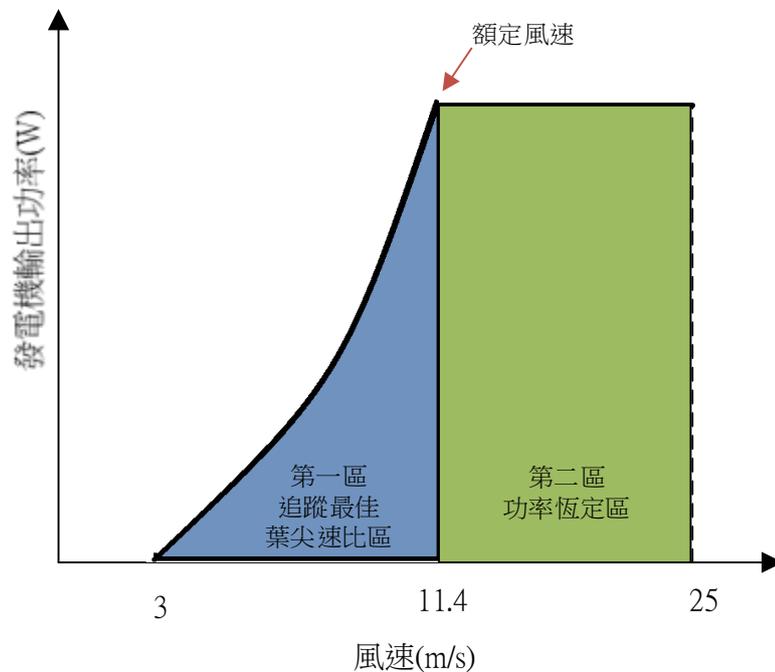


圖 4-1 風力發電機在不同風速下的控制策略

追蹤最佳尖速比區

定義為介於切入風速與低於額定風速之間，此區域控制目標為擷取該風速下的最大風能，透過追蹤最佳葉尖速比的方式與利用發電機之轉速控制來實現，發電機的轉速目標值則由最佳葉尖速比可以換算取得。



如圖 4-2，參考 NREL 5MW 風機使用之參數，於葉片旋角 0 度時，最佳葉尖速比值為 7.55、風能係數為 0.482。

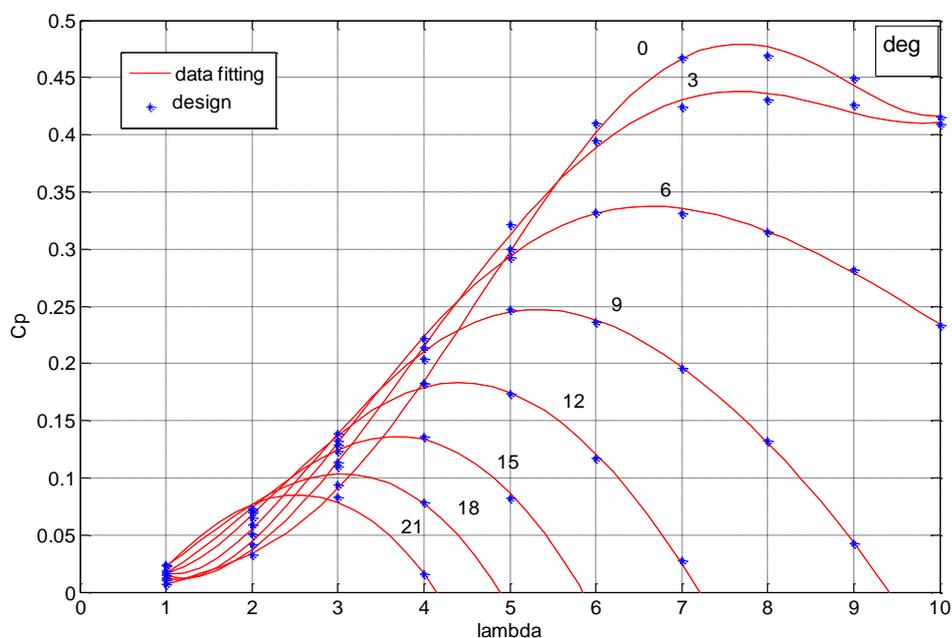


圖 4-2 NREL 5MW 翼形風能係數、葉尖速比及葉片旋角關係圖

功率恆定區

定義為風速達到額定風速後與低於切出風速之間為功率恆定區，此區控制策略在發電機轉速控制部分維持風機轉速固定在額定轉速，設計浮式風機全機恆功率控制器，根據發電機功率實際輸出的回授與目標功率(額定功率)相減的誤差值，輸入至恆功率控制器可得葉片旋角應調整之角度，透過葉片旋角的改變調整風能擷取的大小，使風機的功率輸出穩定在額定值。葉片旋角控制系統包含回授恆功率控制、轉移函數、旋角角速度限制器等。

第5章 模擬結果與討論



本章為先前章節整合的模擬結果呈現及討論，包含第二章浮式風機運動模型、第三章數學模型及第四章控制策略整合，以 AeroDyn 進行氣動力計算、WAMIT 及 HydroDyn 進行水動力計算及整合 MATLAB/SIMULINK 進行子系統建模及閉迴路控制，輸入不同風速及波浪條件進行以下模擬討論。全機配置如**錯誤! 找不到參照來源**。浮動半潛式風機全機配置示意圖及圖 5-2 錨碇系統配置示意圖。

第 5 章區分為 5-1 節永磁同步發電機磁場導向控制(FOC)、5-2 節發電機變轉速控制、5-3 節葉片變旋角控制、5-4 節電網側變流器控制、5-5 節轉向(yaw)系統位置控制模擬、5-6 節全機組變轉速變旋角動態模擬、5-7 節固定式與浮動式風力發電機比較、5-8 節抗颱風策略分析。

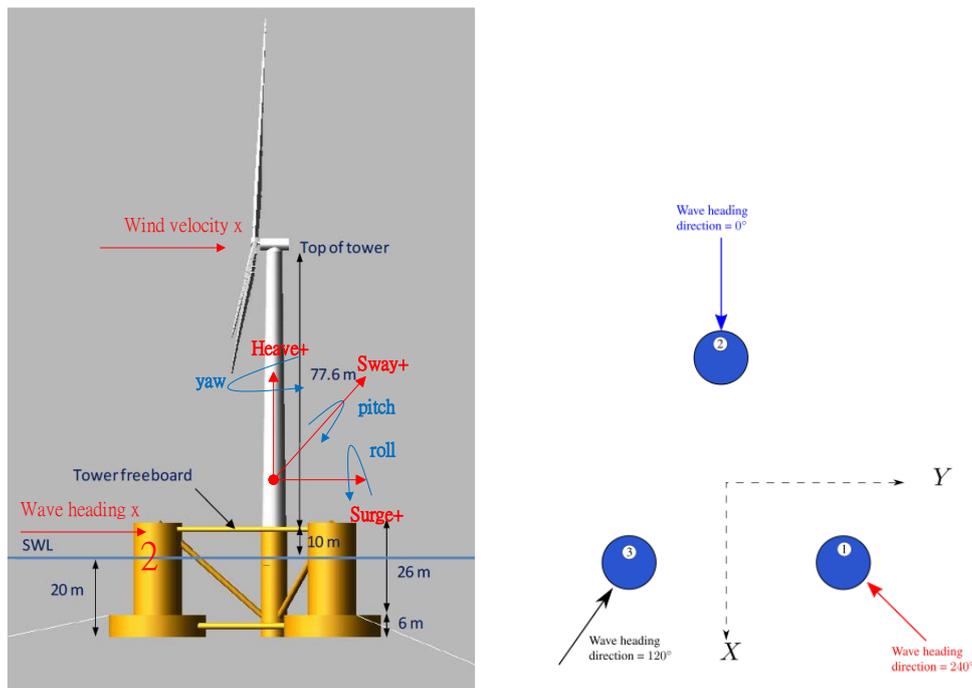


圖 5-1 浮動半潛式風力發電機座標定義示意圖[5]

(a)全機側視圖、(b)浮台 3 圓柱上視圖

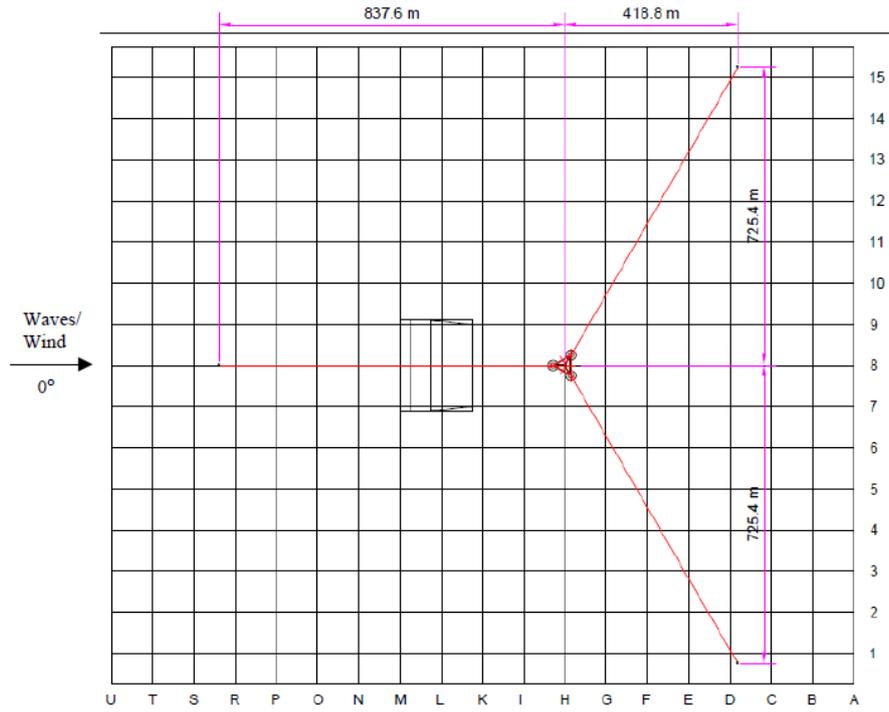


圖 5-2 錨碇系統配置圖[5]

5-1 永磁同步發電機磁場導向控制

本節進行永磁同步發電機結合磁導向控制子系統模擬，目的是經由輸入轉速取得輸出發電機力矩，將其用於後續的模擬並回傳 FAST，進行全機負載及動態模擬。模擬程式建置如圖 5-3 經磁導向控制後的永磁同步發電機模型，經由三個 PI 控制器及控制定子電流在同步旋轉座標的 d 軸分量為零，可將定子電壓拆解為解耦合項及補償項，定子電流在 d 軸及 q 軸分量得以獨立控制，q 軸定子電流獨立控制發電機力矩。

發電機轉速目標值為 0.31rad/s 到 1.26rad/s 之五階軌跡，其與轉速相減之誤差，經 PI 控制可得到解耦合後 d 軸與 q 軸定子電流及電壓，又 q 軸定子電流與發電機力矩成正比，因此可以透過 q 軸定子電流來控制發電機力矩。模擬時間為 200 秒，結果如圖 5-4 (a)~(i)所示。

發電機轉速誤差最大約為 0.005rad/s，換算誤差約 0.4%，q 軸電流最大誤差約為 8A，換算誤差約 0.5%，追蹤狀況良好。

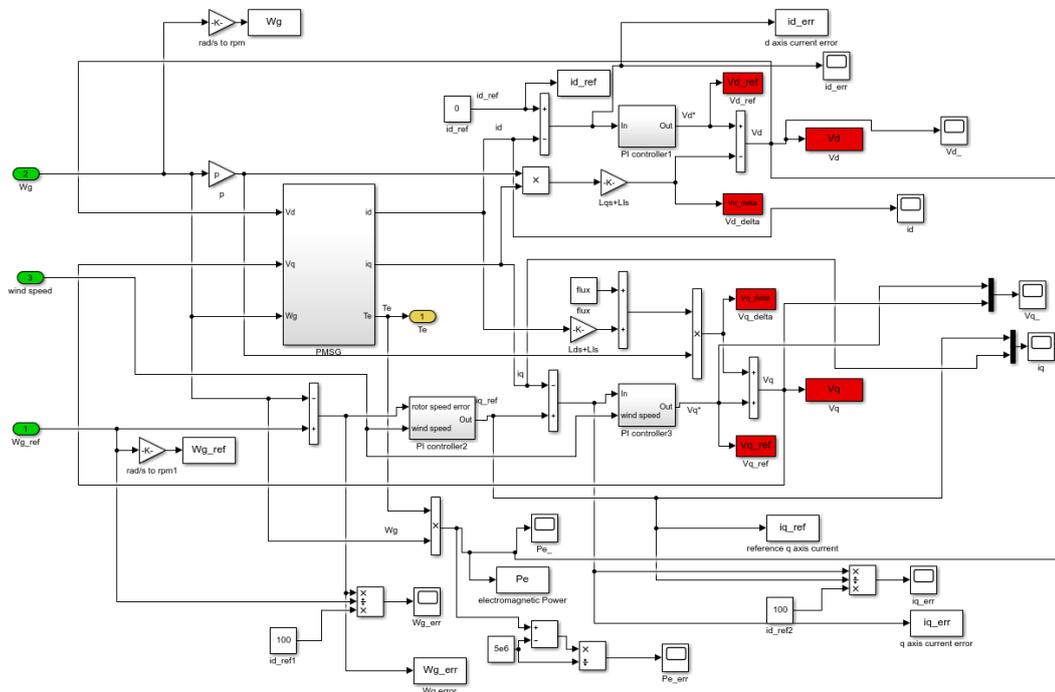


圖 5-3 永磁同步發電機(PMSG)結合磁導向控制(FOC)於 SIMULINK 模擬圖

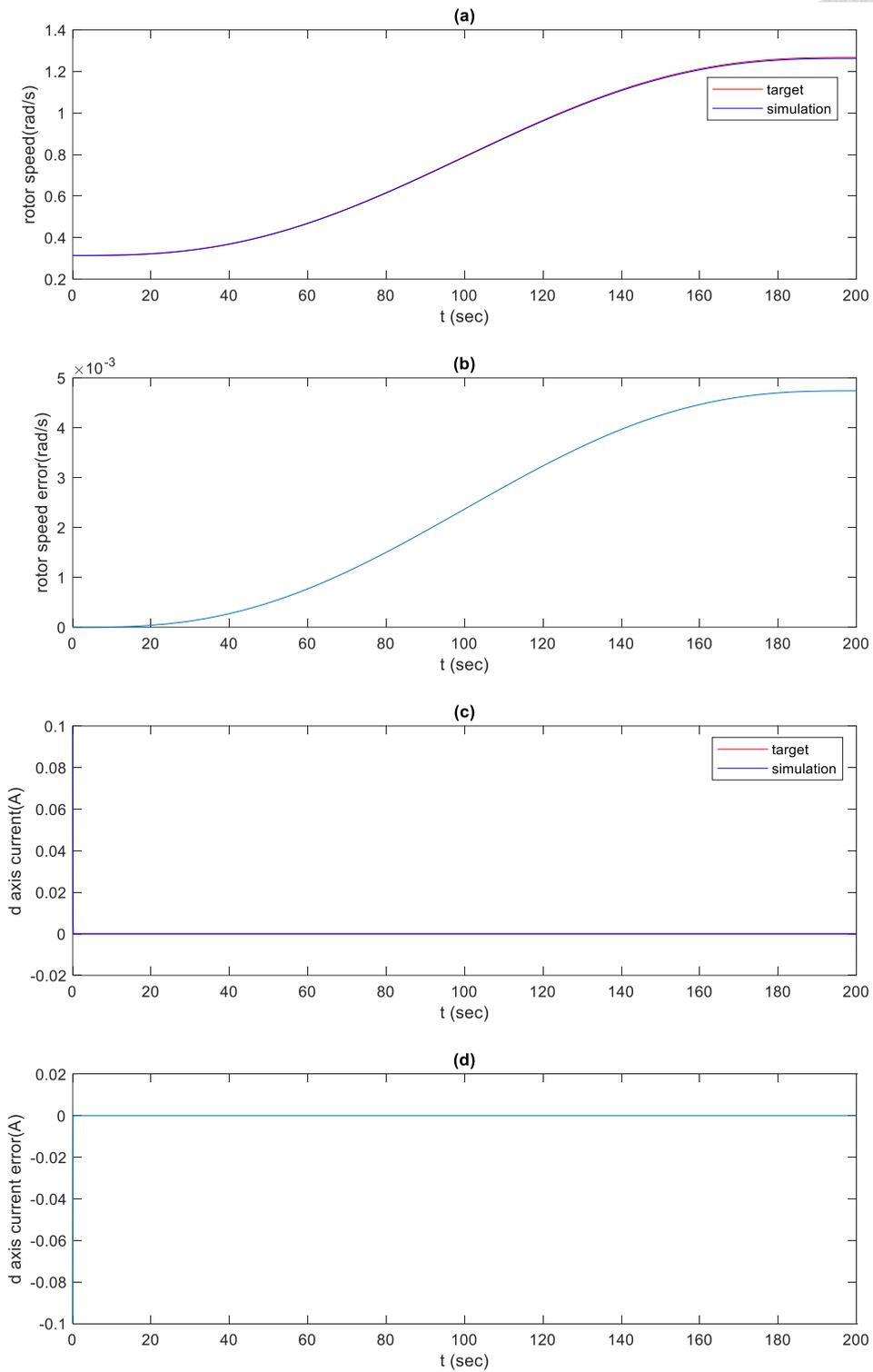


圖 5-4 (a)~(d)輸入一五階軌跡轉速於永磁同步發電機之磁場導向控制模擬結果

- (a) 發電機轉速目標值與模擬值、(b) 發電機轉速誤差、
(c) d 軸電流目標值與模擬值、(d) d 軸電流誤差

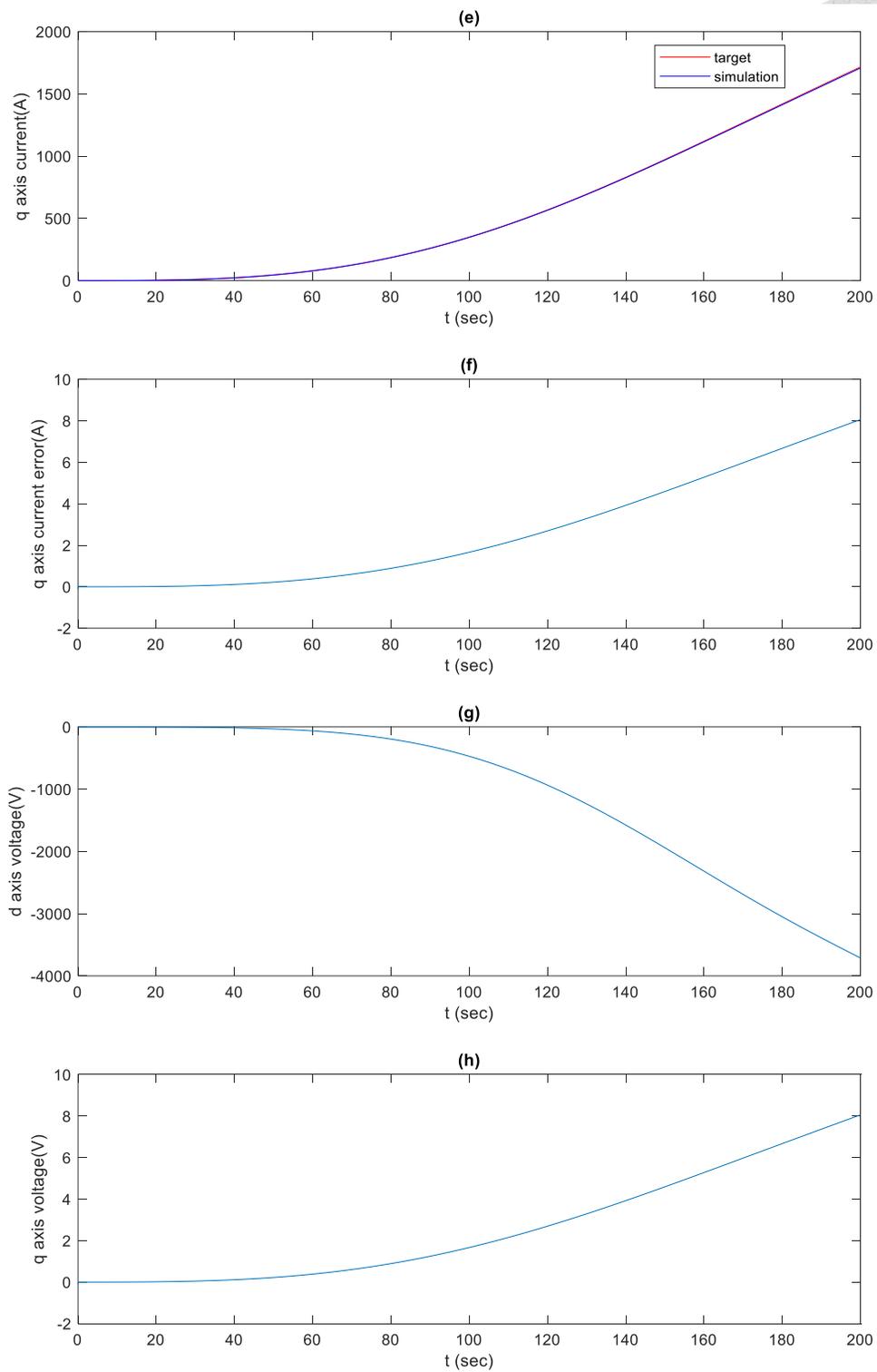


圖 5-4 (e)~(h)輸入一五階軌跡轉速於永磁同步發電機之磁場導向控制模擬結果

(e) q 軸電流目標值與模擬值、(f) q 軸電流誤差、(g) d 軸電壓、(h) q 軸電壓

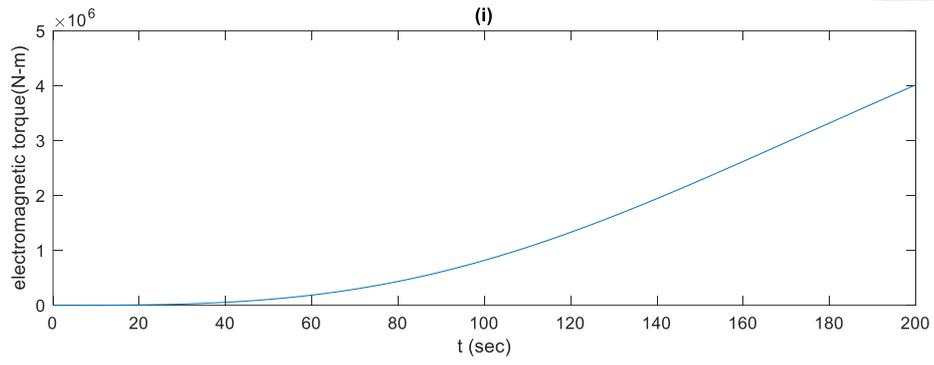


圖 5-4 (i)輸入一五階軌跡轉速於永磁同步發電機之磁場導向控制模擬結果

(i) 發電機力矩

5-2 風力發電機變轉速控制

本節討論永磁同步發電機之變轉速控制，透過控制風機轉速，目的使其在低於額定風速的情況下，能夠擷取較多風能，最後產出較大的發電功率，而達成此目的之策略便是利用追蹤最佳葉尖速比 7.55 達成。如圖 5-5，由最佳葉尖速比得到的發電機轉子轉速目標值 ω_{ref} 和 FAST 回傳之發電機轉子轉速模擬值 ω 相減之誤差 e ，通過轉速控制器得到定子 q 軸目標電流 i_q^* ，經過永磁同步發電機與磁導向控制系統後得到電磁力矩 T_e ，將其輸入回風力發電機組機構動態模擬程式 FAST 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。

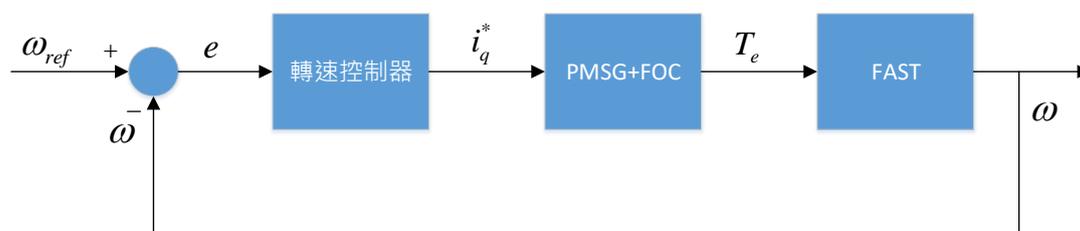


圖 5-5 永磁同步發電機之變轉速控制系統方塊圖

輸入風速 3~10m/s 之拋物線軌跡與有義波高 3m、週期 7.5s 之 JONSWAP 波譜之波浪波高如圖 5-6 所示，在低於額定風速區，追蹤最佳葉尖速比 7.55，討論其轉速與發電機力矩關係。模擬時間為 200 秒，結果如圖 5-6(a)~(k)所示，包含風速、波浪浪高、葉尖速比目標值與模擬值、葉尖速比誤差、發電機轉速目標值與模擬值、發電機轉速誤差、d 軸電流目標值與模擬值、d 軸電流誤差值、q 軸電流目標值與模擬值、q 軸電流誤差值、發電機力矩。

經由永磁同步發電機變轉速控制，除了約前 10 秒為發電機啟動正常震盪外，轉速追蹤保持誤差在 0.004rpm 內，尖速比在波浪條件影響下，隨著波浪波高做上下些微震盪，震盪幅度在 0.05 以內。而波浪震盪效應由 3-1-1 節及 3-1-2 節發

電機數學模型推導與圖 5-5 中可知，q 軸電流由發電機轉速誤差透過轉速控制器取得，而發電機力矩又受 q 軸電流變化影響，因此波浪震盪效應在 q 軸電流及發電機力矩表現明顯。

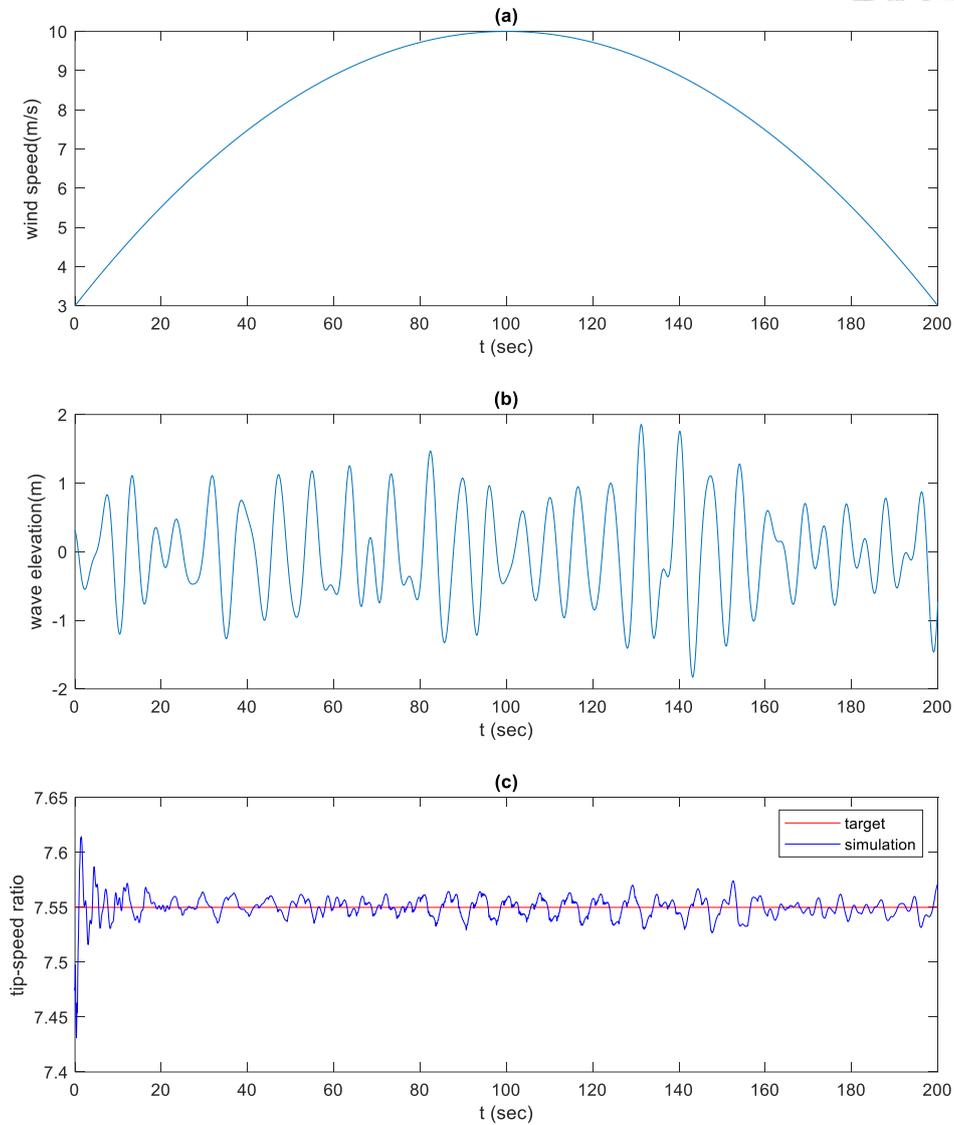


圖 5-6 (a)~(c)輸入拋物軌機風速追蹤最佳尖速比轉速控制
(a)風速、(b)波浪波高、(c)葉尖速比目標值與模擬值

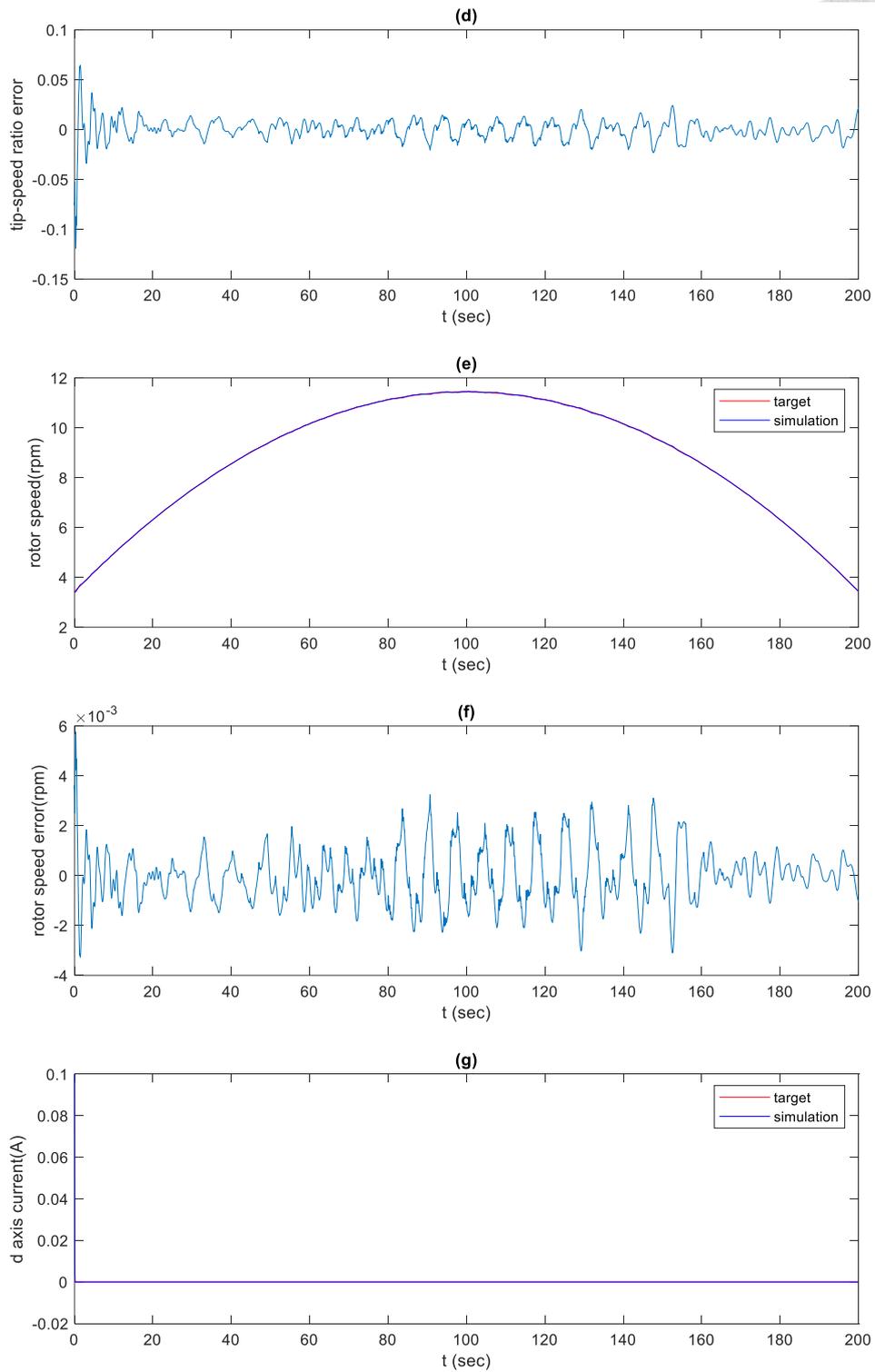


圖 5-6 (d)~(g)輸入拋物軌機風速追蹤最佳尖速比轉速控制
 (d) 葉尖速比誤差值、(e) 發電機轉速、(f) 發電機轉速誤差、
 (g) 定子 d 軸電流目標值及模擬值

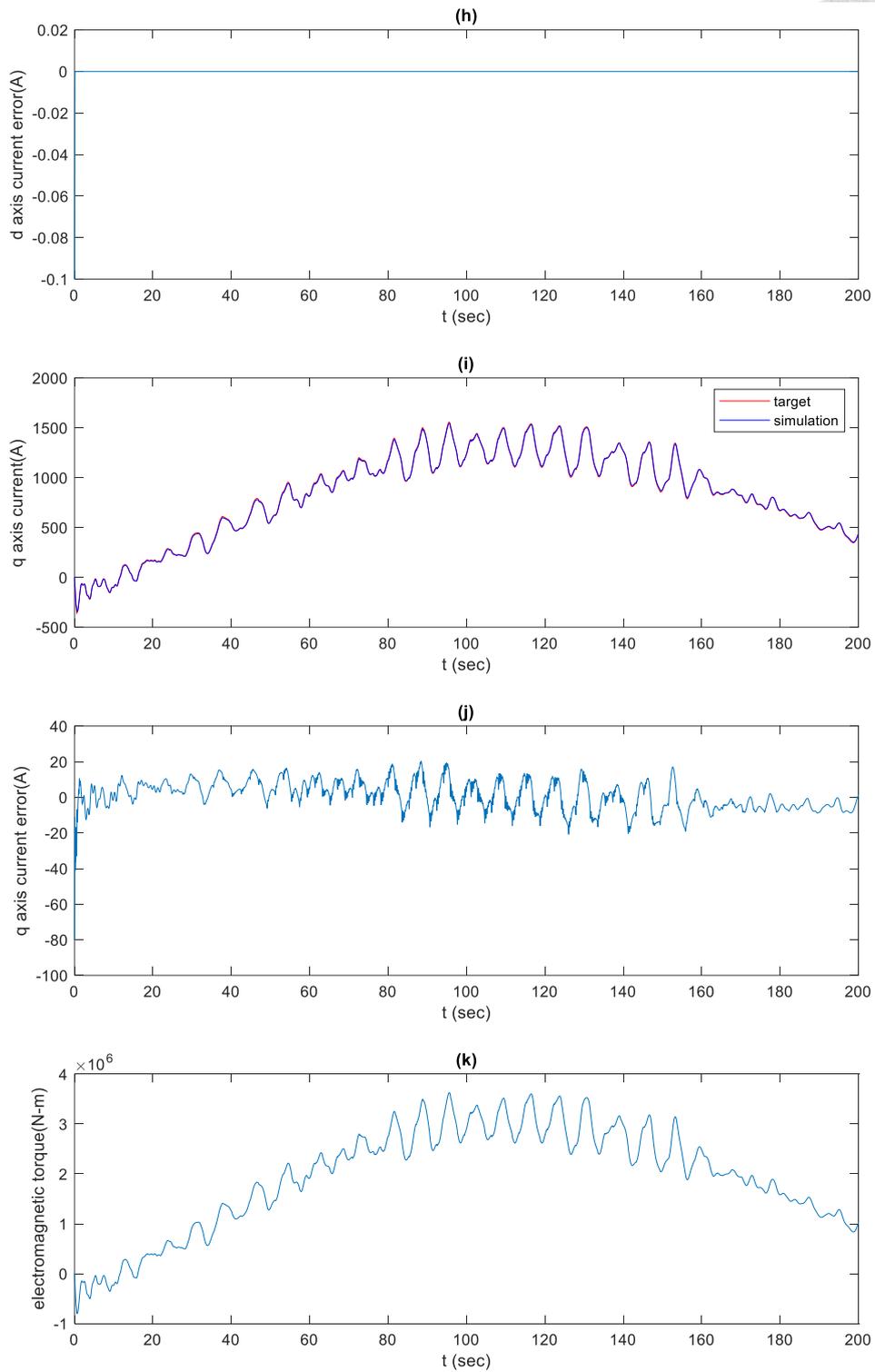


圖 5-6 (h)~(k)輸入拋物軌機風速追蹤最佳尖速比轉速控制

(h) 定子 d 軸電流誤差值、(i) 定子 q 軸電流目標值及模擬值、

(j) 定子 q 軸電流誤差值、(k)發電機力矩

5-3 風力發電機變旋角控制

本節討論變旋角控制系統如圖 5-7，圖 5-8 為變旋角控制系統方塊圖，目標功率為 5MW 與回授實際功率值相減誤差，經功率控制器轉為目標旋角，再經液壓或馬達旋角驅動系統數學模式後，由旋角角速度限制器限制其旋角角速度之上下限，最後將旋角角度傳回 FAST 中，FAST 重新計算下個時刻在該旋角下的功率輸出回功率控制器完成閉迴路之控制。

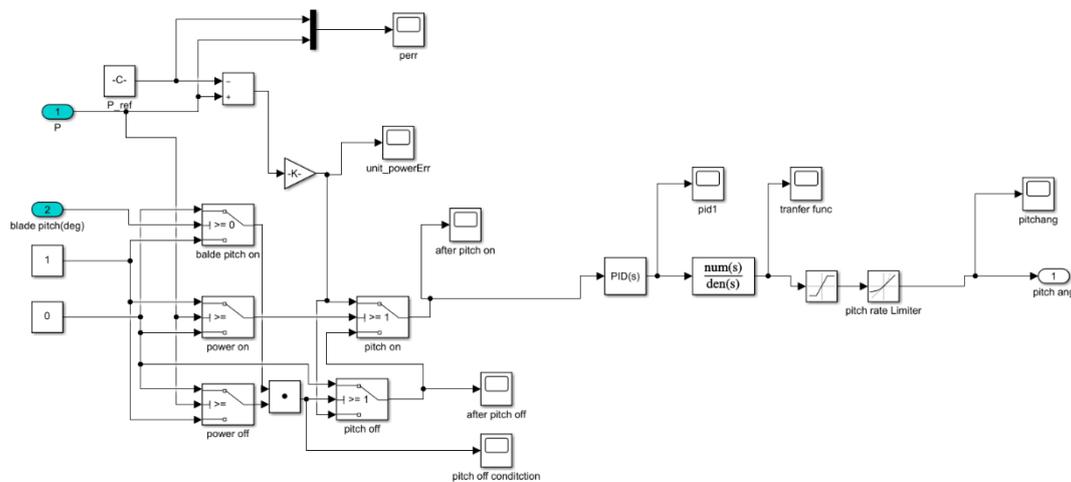


圖 5-7 變旋角控制於 MATLAB/SIMULINK 模擬圖



圖 5-8 變旋角控制系統方塊圖

輸入 10~20 m/s 的平滑風速，當功率達額定功率 5MW 後，葉片變旋角系統啟動。模擬時間為 200 秒，結果如圖 5-9 與圖 5-10。包含風速、波浪波高、發電機轉速目標值與模擬值、發電機轉速誤差、q 軸電流目標值與模擬值、q 軸電流誤差、發電機力矩、發電功率目標值與模擬值、發電功率誤差、葉片旋角變化、浮台縱移(surge)位移、浮台橫移(sway)位移、浮台起伏(heave)位移、浮台橫搖(roll)

角度、浮台俯仰(pitch)角度、浮台平擺(yaw)角度。圖 5-9 與圖 5-10 均為相同平滑風速，圖 5-9 為無波浪之靜水面情況，圖 5-10 為輸入波浪條件有義波高 3m、週期 7.5s 且有 JONSWAP 波譜之波浪。

圖 5-9 於靜水面模擬結果來看，發電機轉速除了前 20 秒的正常發電機震盪外，發電機轉速誤差在 0.0025rpm 內，發電功率部分除了葉片旋角控制剛啟動到達 1.1MW 的誤差，隨後誤差落在 0.5MW 內，表現相當好。與圖 5-10 有波浪條件比較，圖 5-10 發電機轉速除了前 20 秒的正常發電機震盪外，發電機轉速誤差在 0.005rpm 內，發電功率部分則在 4~6.1MW 間震盪，討論原因主要為浮台此時俯仰(pitch)角度變化頻率較無波浪時更快，即浮台俯仰(pitch)角變率較大，對於葉片旋角控制系統來說浮台在無波浪表現近似一固定傾角之穩定浮台，葉片旋角控制系統還可以有很好的控制表現，而有波浪條件下，浮台俯仰(pitch)角一直在變動，對於只考慮功率誤差的葉片旋角控制系統來說，表現並沒有如無波浪時穩定，可以從二者之葉片旋角調整幅度可以看出，但有波浪下葉片旋角控制系統整體結果依然良好。

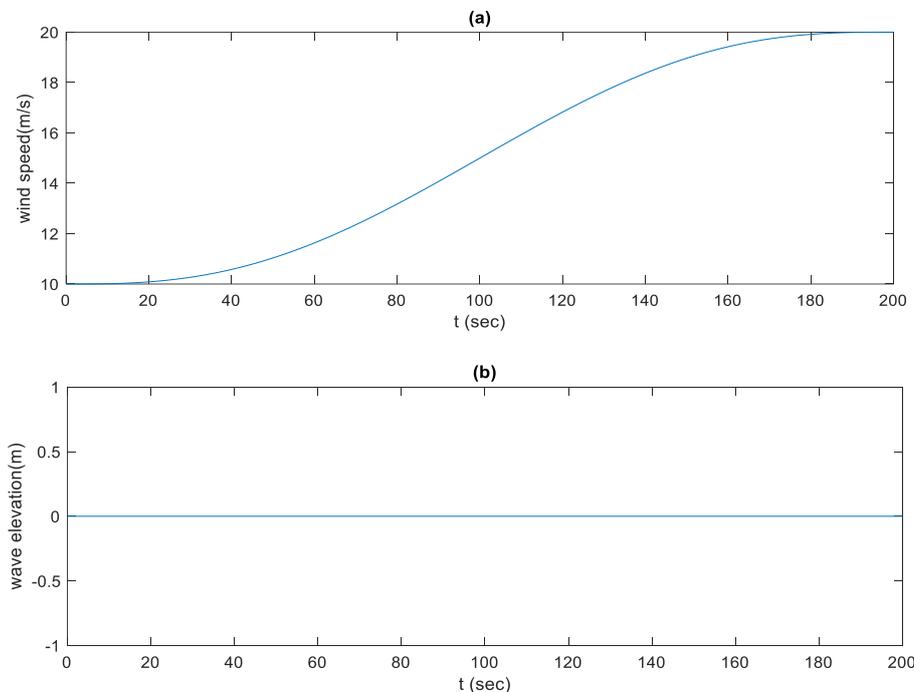


圖 5-9 (a)~(b)輸入遞增風速且靜水面下風力發電機變旋角控制響應

(a) 風速、(b) 波浪波高

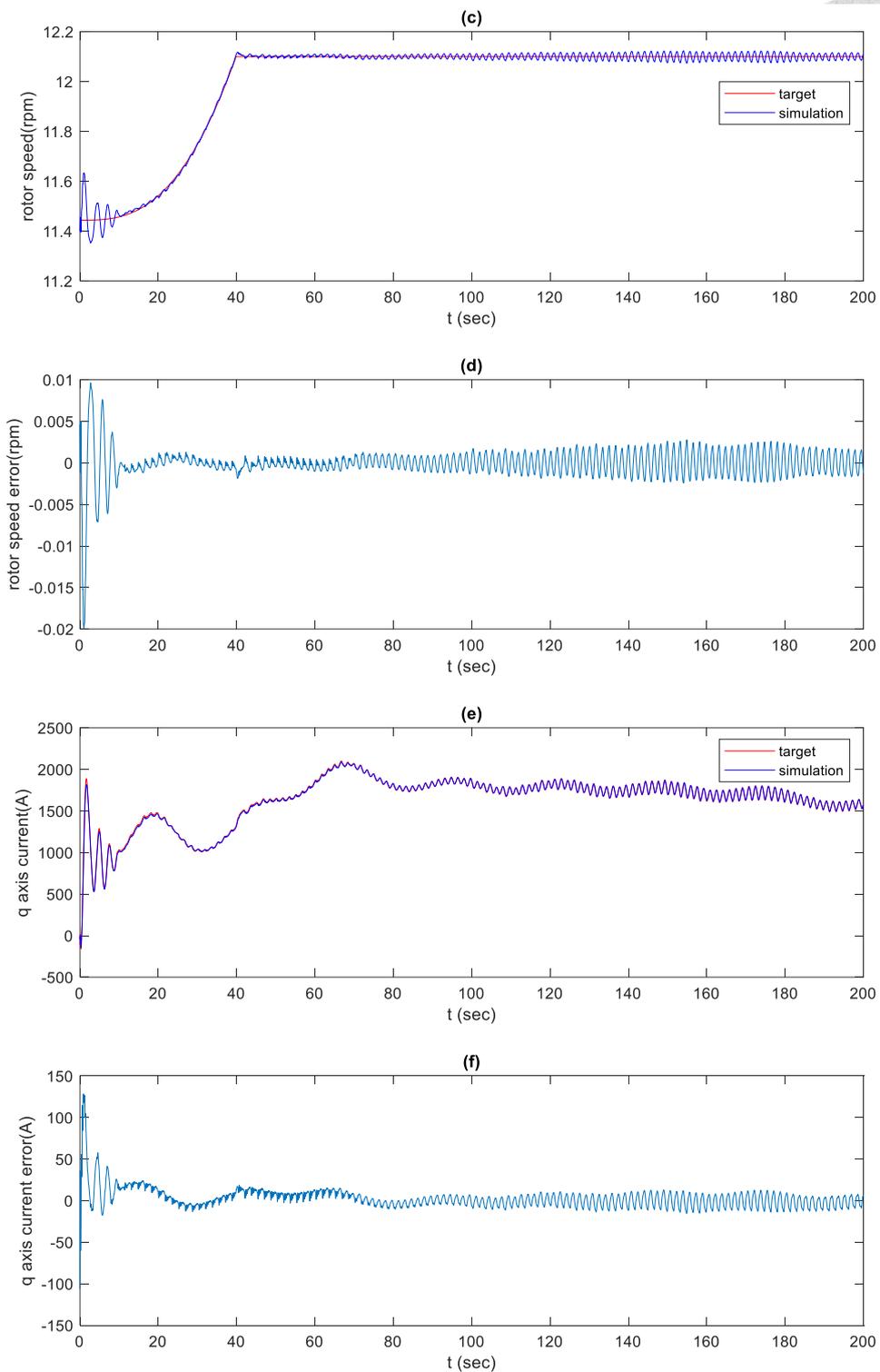


圖 5-9 (c)~(f)輸入遞增風速且靜水面下風力發電機變旋角控制響應

(c) 發電機轉速目標值與模擬值、(d) 發電機轉速誤差、

(e) q 軸電流目標值與模擬值、(f) q 軸電流誤差

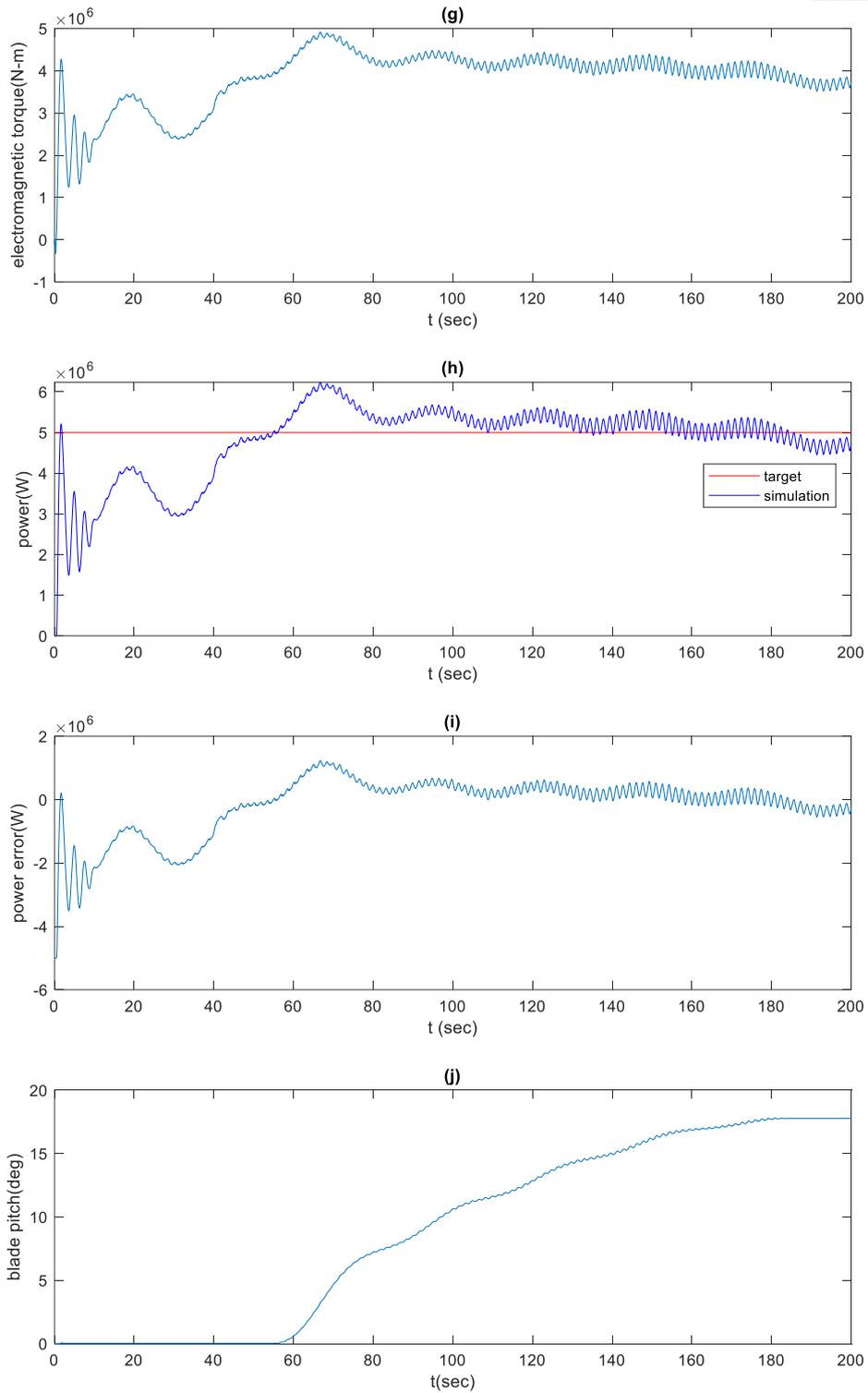


圖 5-9 (g)~(j)輸入遞增風速且靜水面下風力發電機變旋角控制響應
 (g) 發電機力矩、(h) 發電功率目標值與模擬值、(i) 發電功率誤差、
 (j) 葉片旋角變化

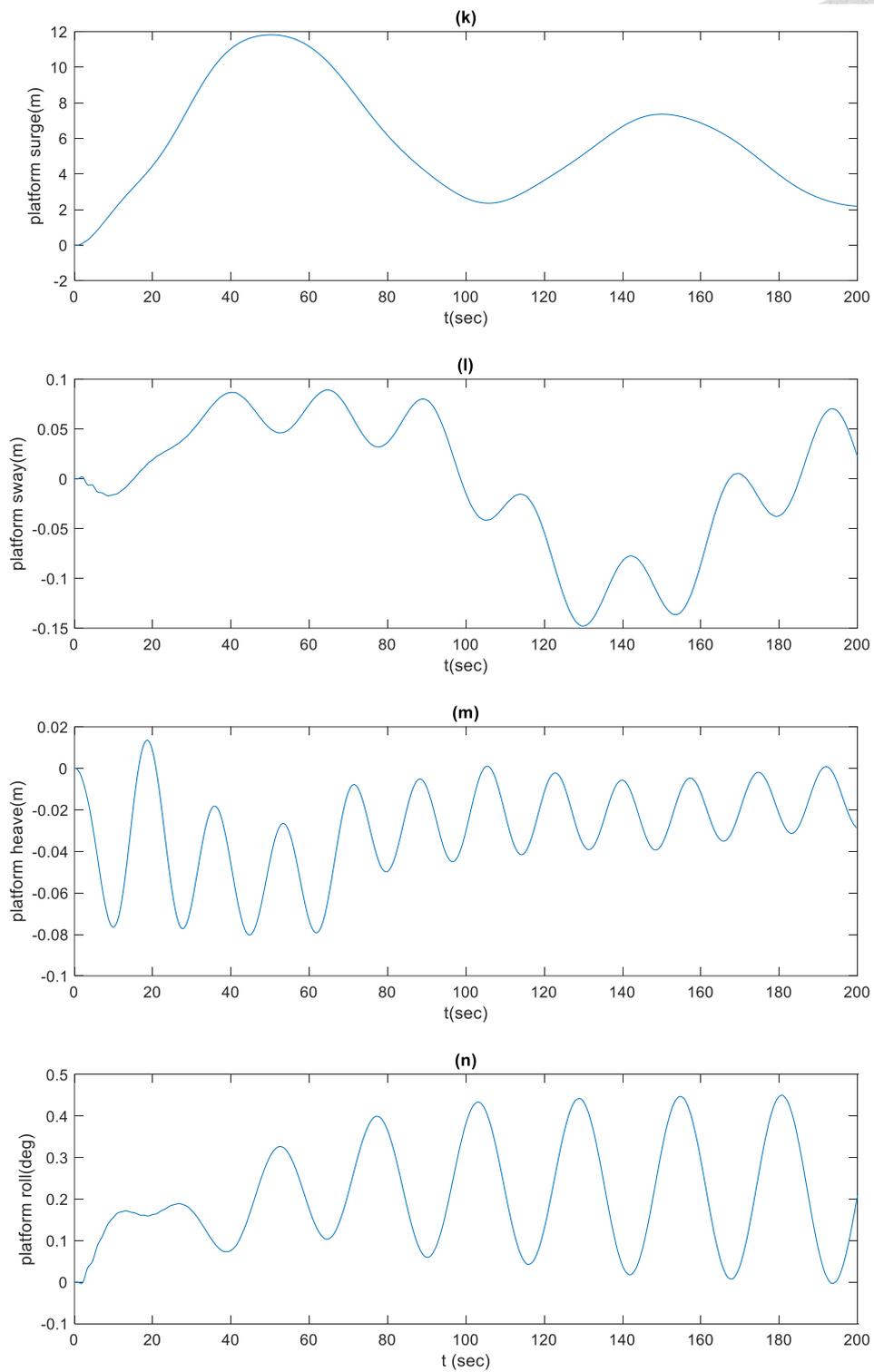


圖 5-9 (k)~(n)輸入遞增風速且靜水面下風力發電機變旋角控制響應

(k) 浮台縱移位移、(l) 浮台橫移位移、(m) 浮台起伏位移、

(n) 浮台橫搖角度

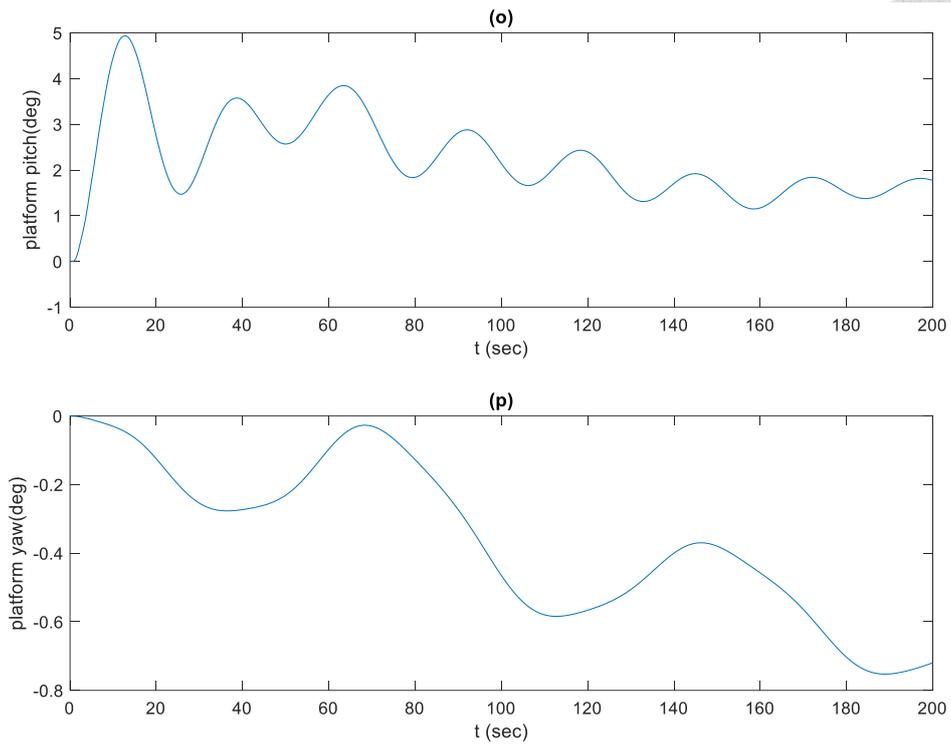


圖 5-9 (o)~(p)輸入遞增風速且靜水面下風力發電機變旋角控制響應

(o) 浮台俯仰(pitch)角度、(p) 浮台平擺(yaw)角度

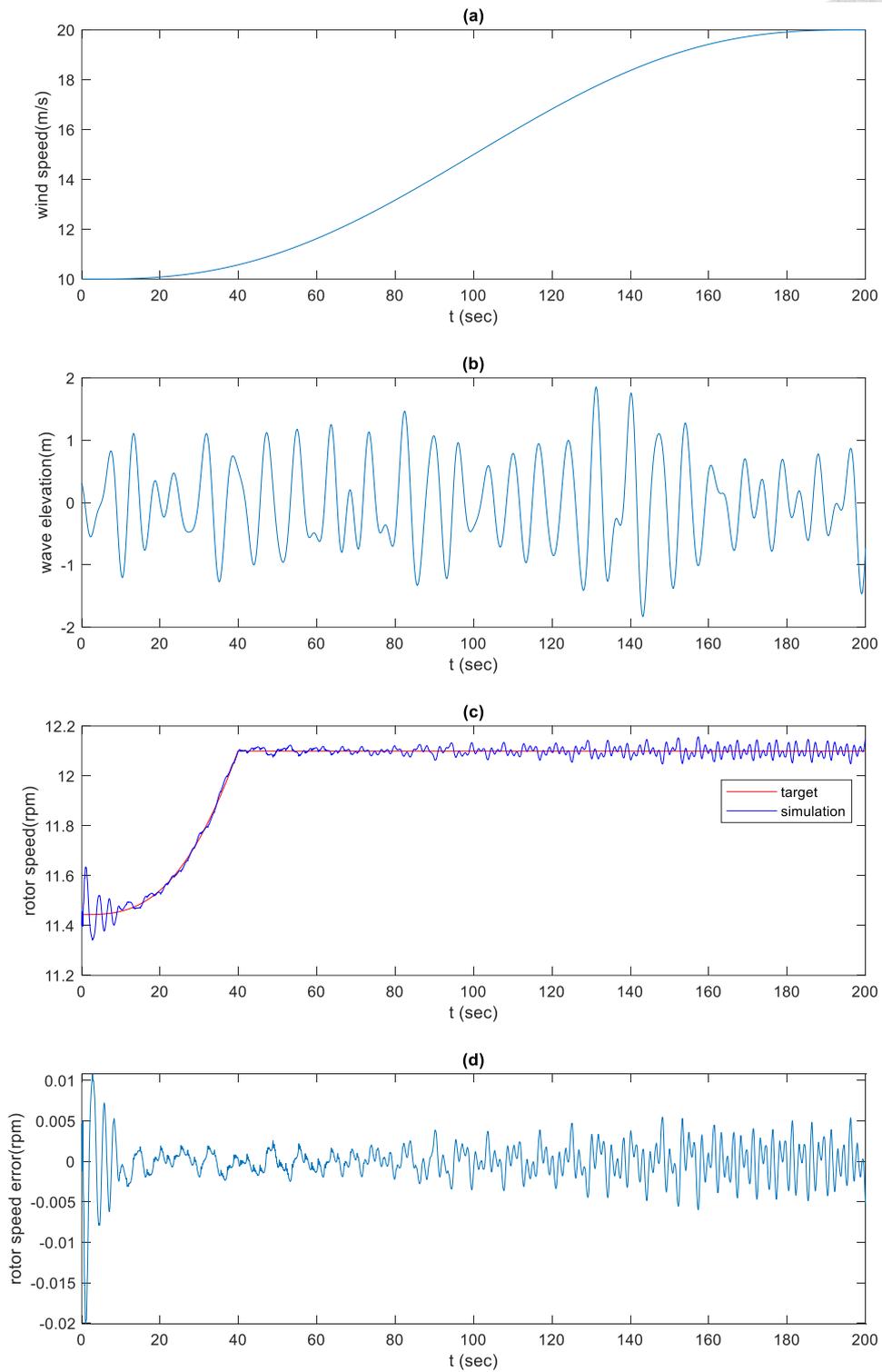


圖 5-10 (a)~(d)輸入遞增風速且有波浪條件下風力發電機變旋角控制響應

(a) 風速、(b) 波浪波高、(c) 發電機轉速目標值與模擬值、

(d) 發電機轉速誤差

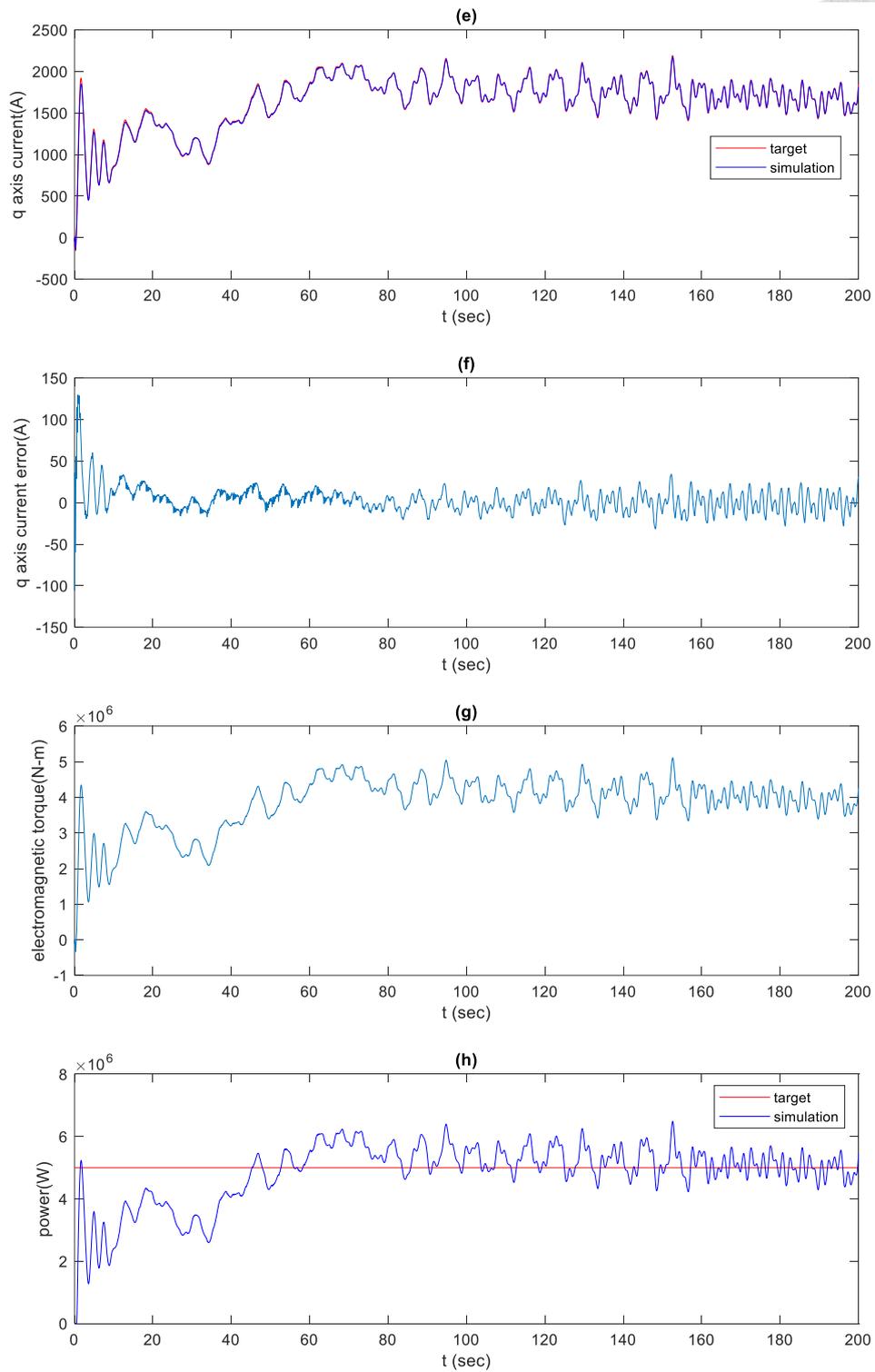


圖 5-10 (e)~(h)輸入遞增風速且有波浪條件下風力發電機變旋角控制響應

(e) q 軸電流目標值與模擬值、(f) q 軸電流誤差、(g) 發電機力矩、

(h) 發電功率

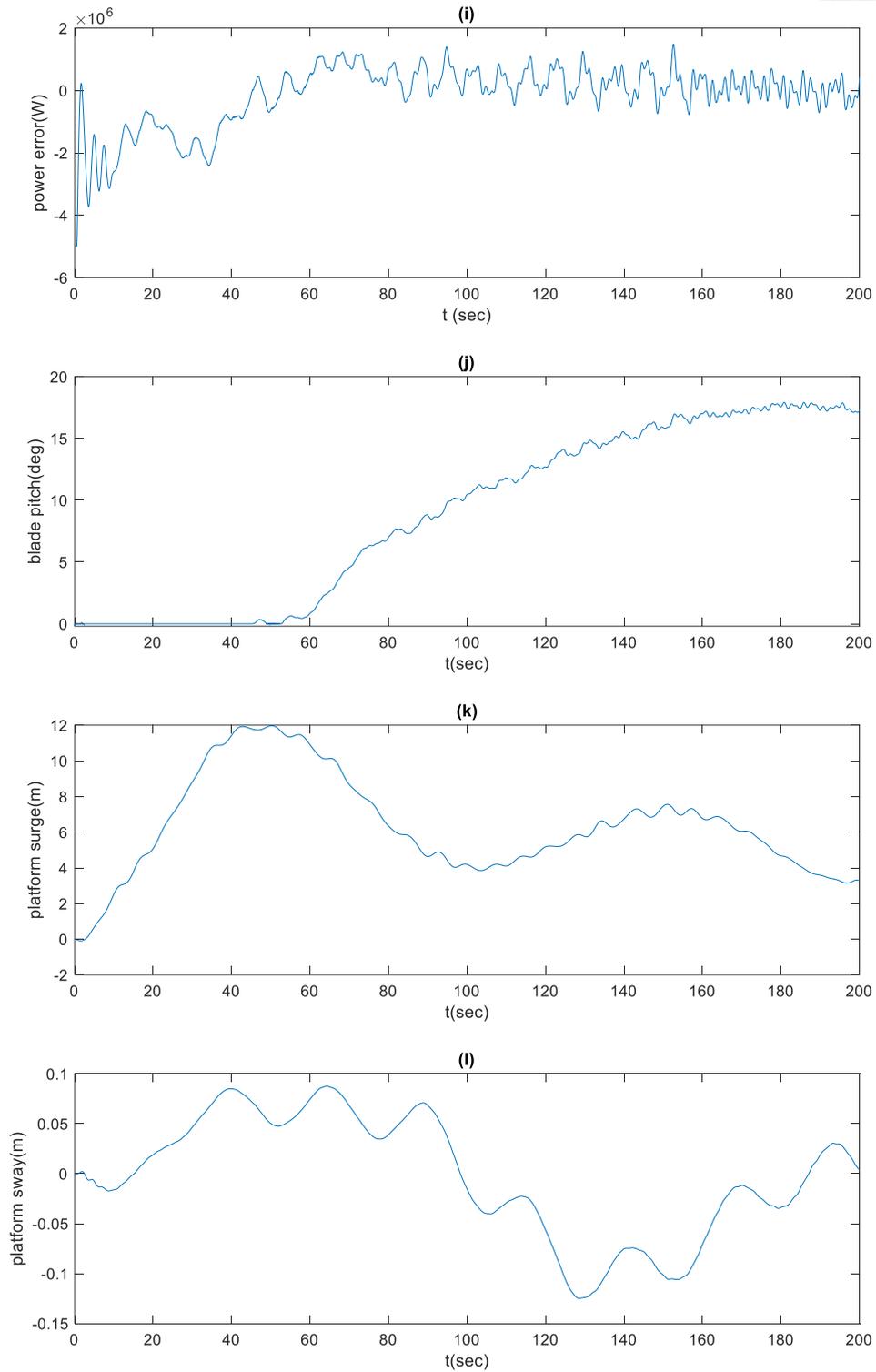


圖 5-10 (i)~(l)輸入遞增風速且有波浪條件下風力發電機變旋角控制響應

(i) 發電功率誤差、(j) 葉片旋角變化、(k) 浮台縱移位移、(l) 浮台橫移位移

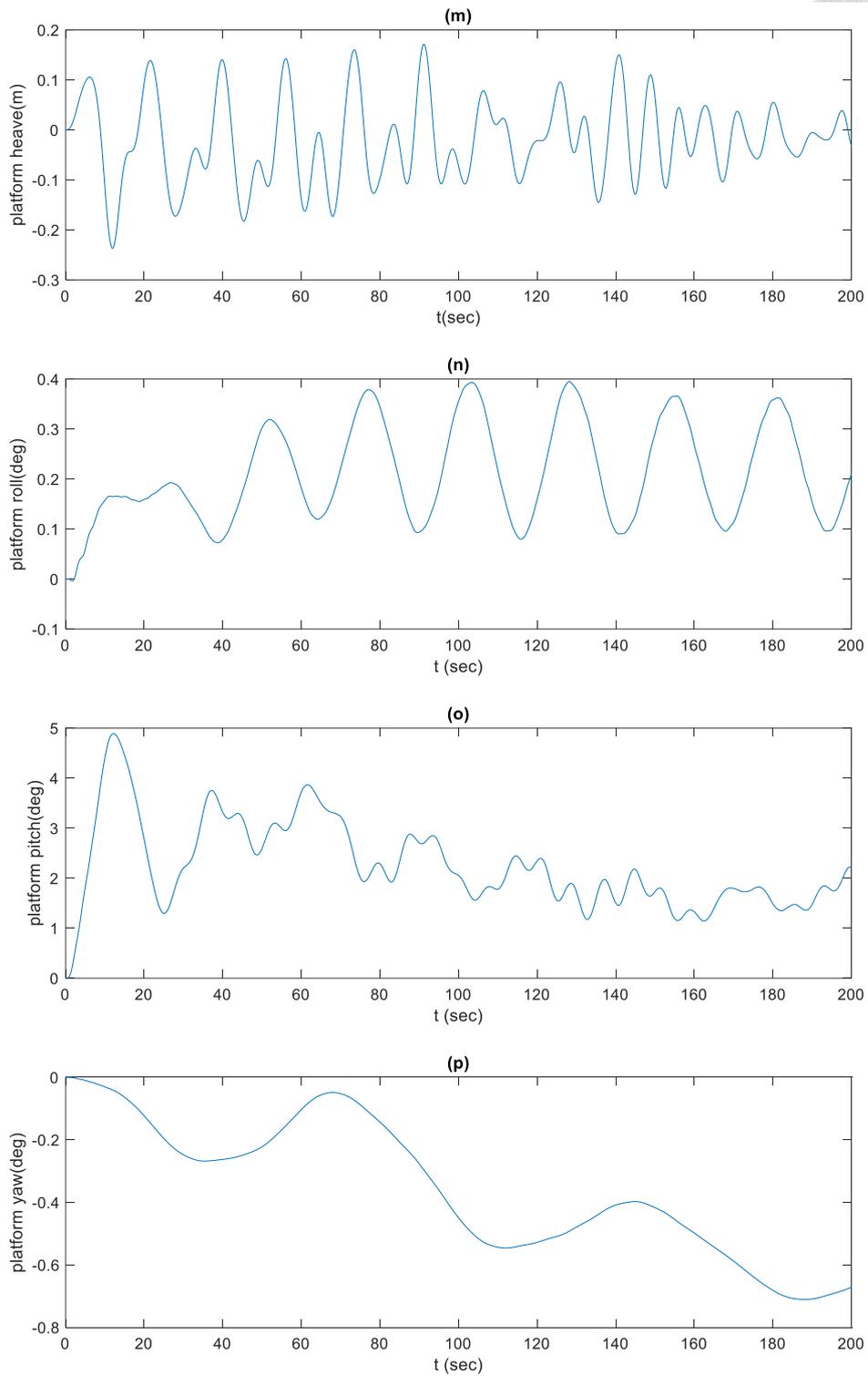


圖 5-10 (m)~(p)輸入遞增風速且有波浪條件下風力發電機變旋角控制響應

(m) 浮台起伏位移、(n) 浮台橫搖角度、(o) 浮台俯仰(pitch)角度、

(p) 浮台平擺(yaw)角度

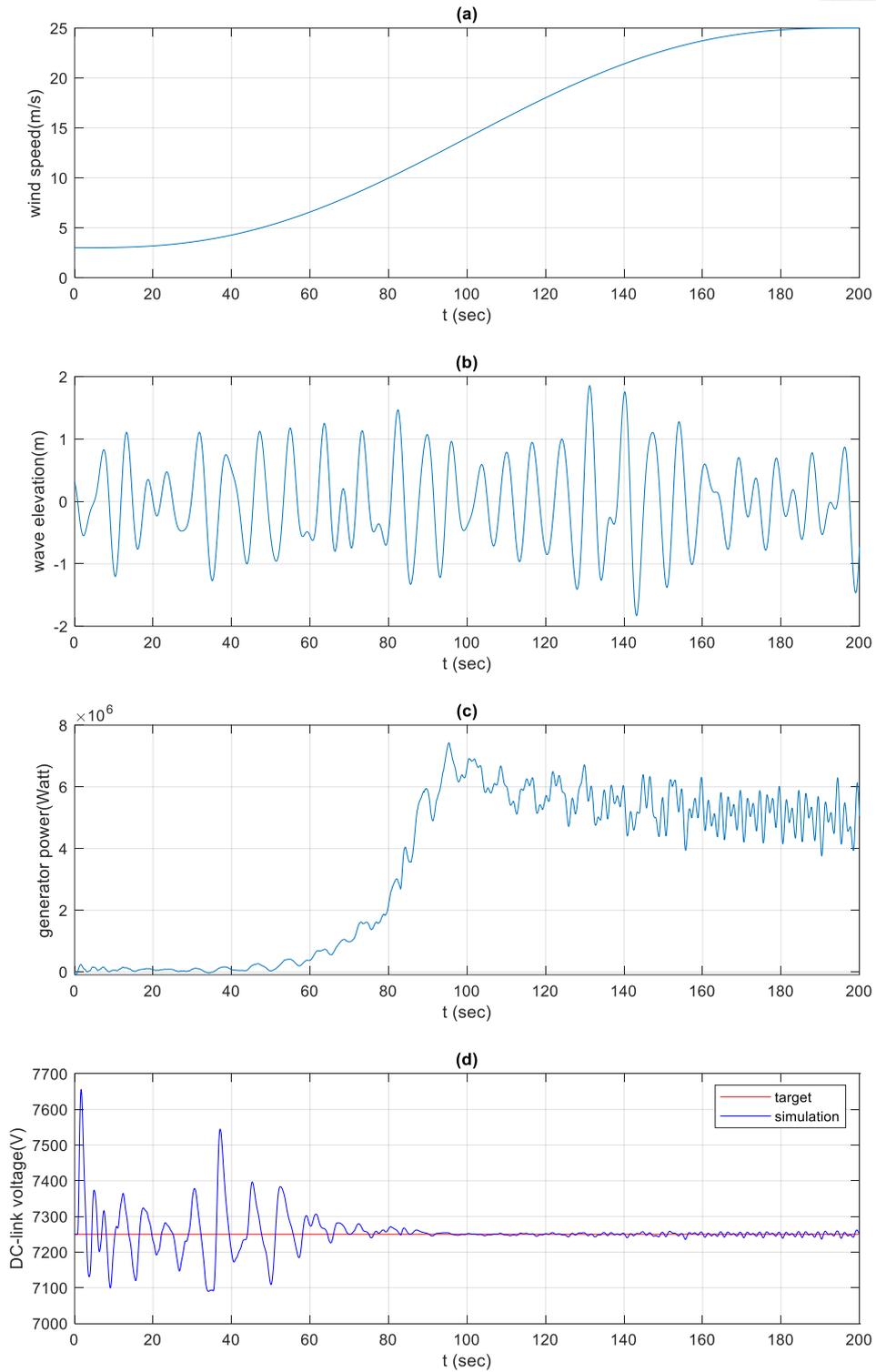


圖 5-12 (a)~(d)電網側變流器控制

(a)風速、(b)波浪波高、(c)發電機側功率、(d)DC-link 電壓目標值及模擬值

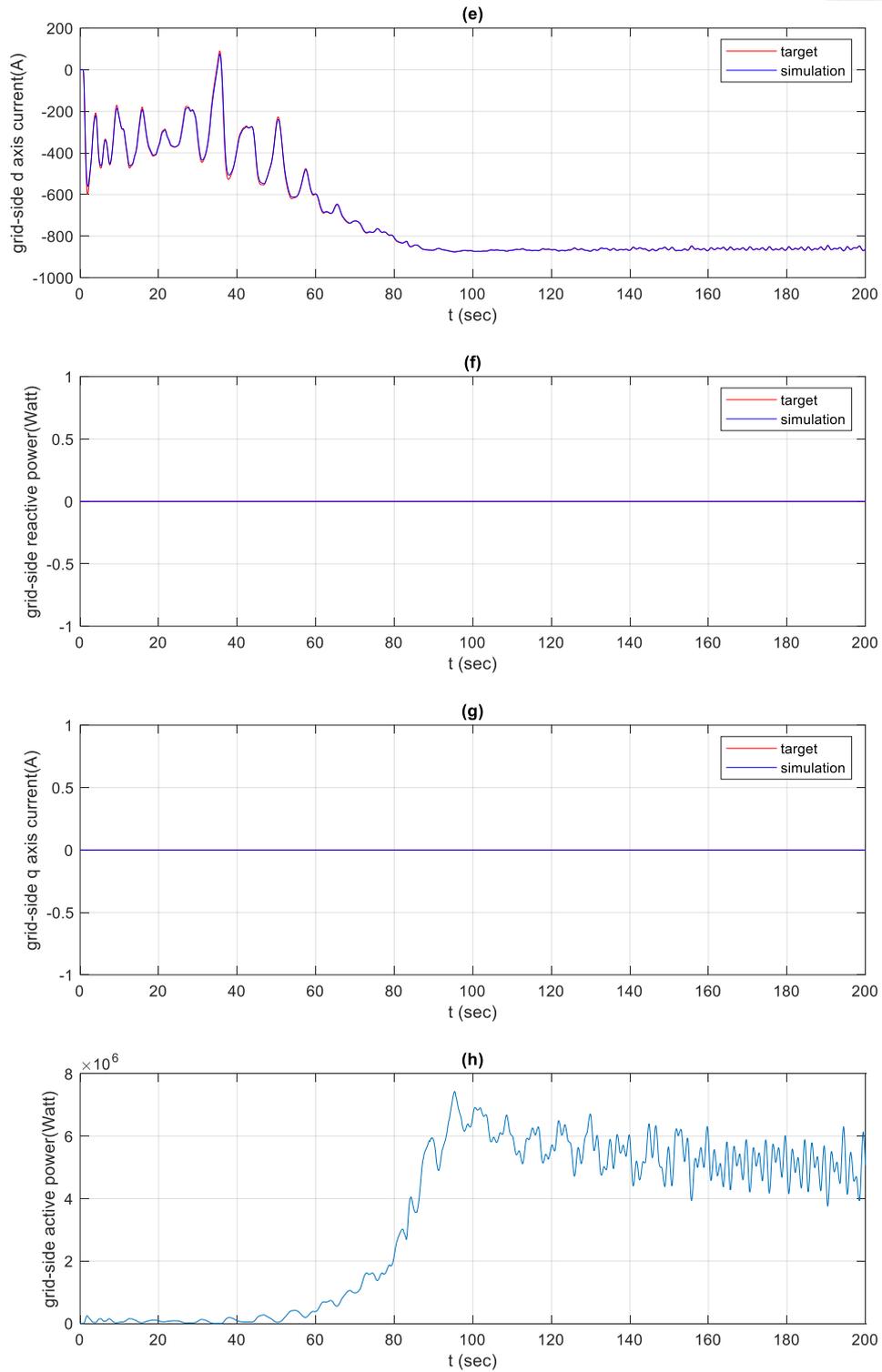


圖 5-12 (e)~(h)電網側變流器控制

(e) 電網側 d 軸電流目標值與模擬值、(f) 電網側虛功率目標值與模擬值、

(g) 電網側 q 軸電流目標值與模擬值、(h) 電網側實功率

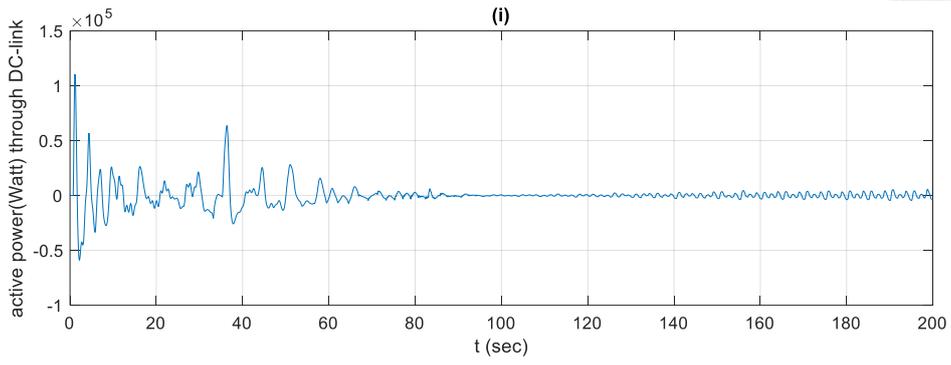


圖 5-12 (i)電網側變流器控制

(i) 經過 DC-link 電容的實功率

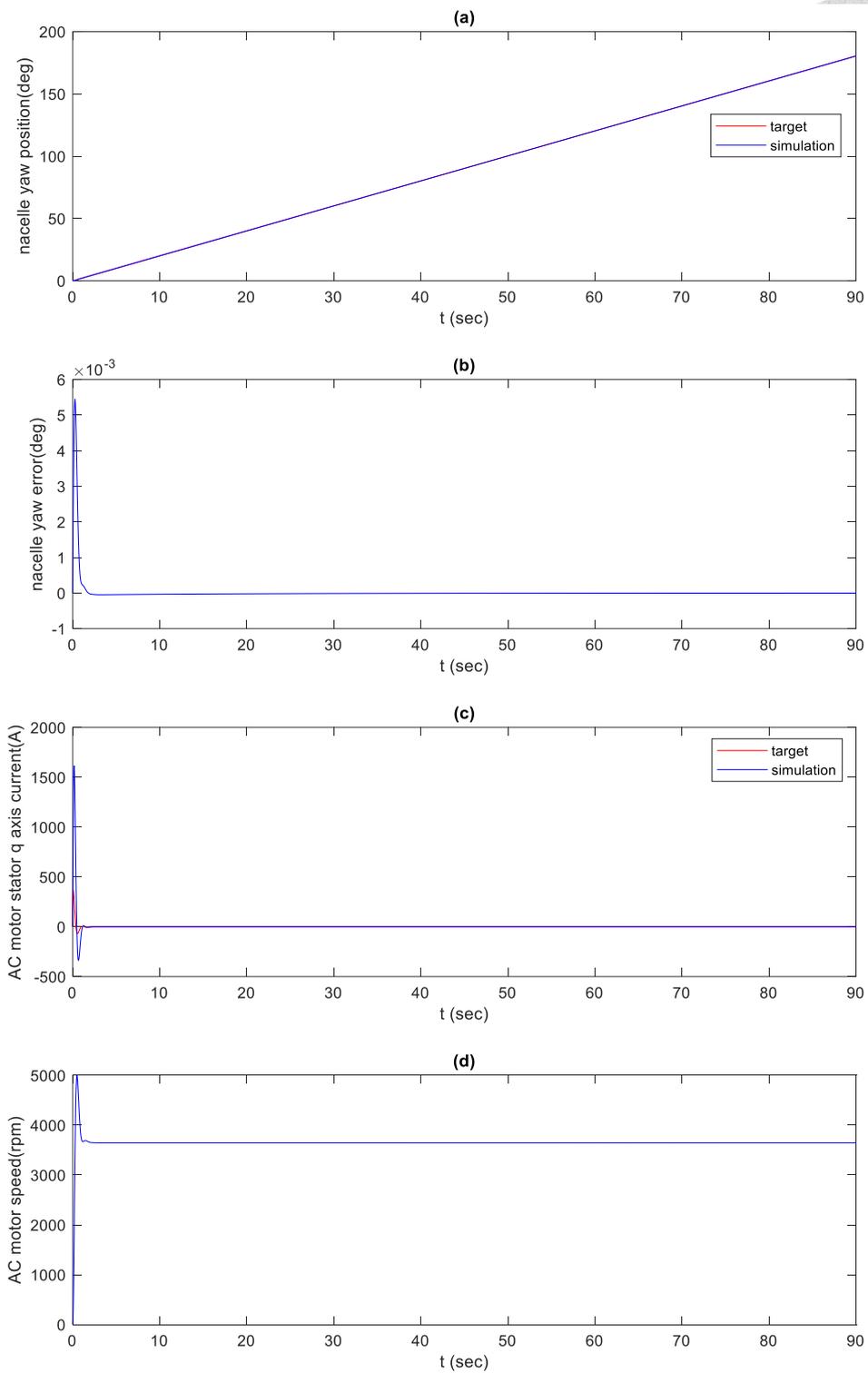


圖 5-14 (a)~(d)輸入線性軌跡之轉向(yaw)角位置控制

(a) 轉向(yaw)角位置目標值及模擬值、(b) 轉向(yaw)角誤差、

(c) 馬達定子 q 軸電流目標值及模擬值、(d) 馬達轉速

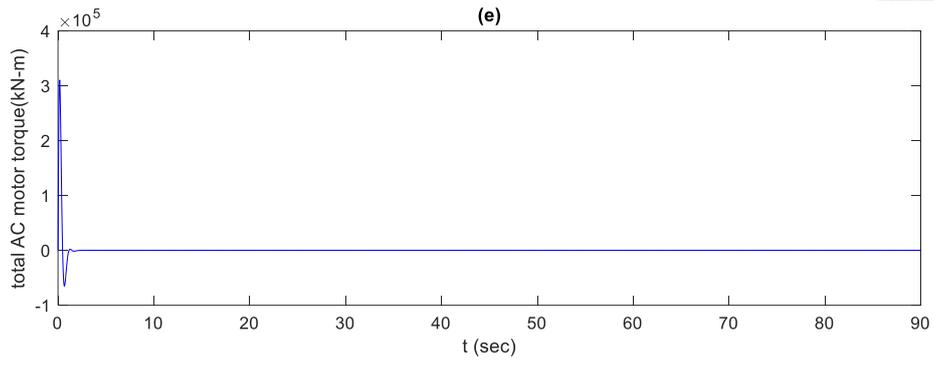


圖 5-14 (e)輸入線性軌跡之轉向(yaw)角位置控制

(e) 馬達總力矩

5-6 全機組變轉速變旋角動態模擬

本節將先前章節各個子系統整合來討論全機組下的模擬分析，整合含第二章浮式風機運動模型、第三章浮式發電機子系統非線性數學模型及第四章控制策略，圖 5-15 為本節整合後之全機組變轉速變旋角控制系統 SIMULINK 程式圖。

本節討論內容分為 5-6-1 節追蹤最佳尖速比區模擬，進行有無波浪差異分析，5-6-2 節功率恆定區進行變動風速之分析，5-6-3 節為全區域變轉速變旋角動態模擬進行平滑風速之分析。

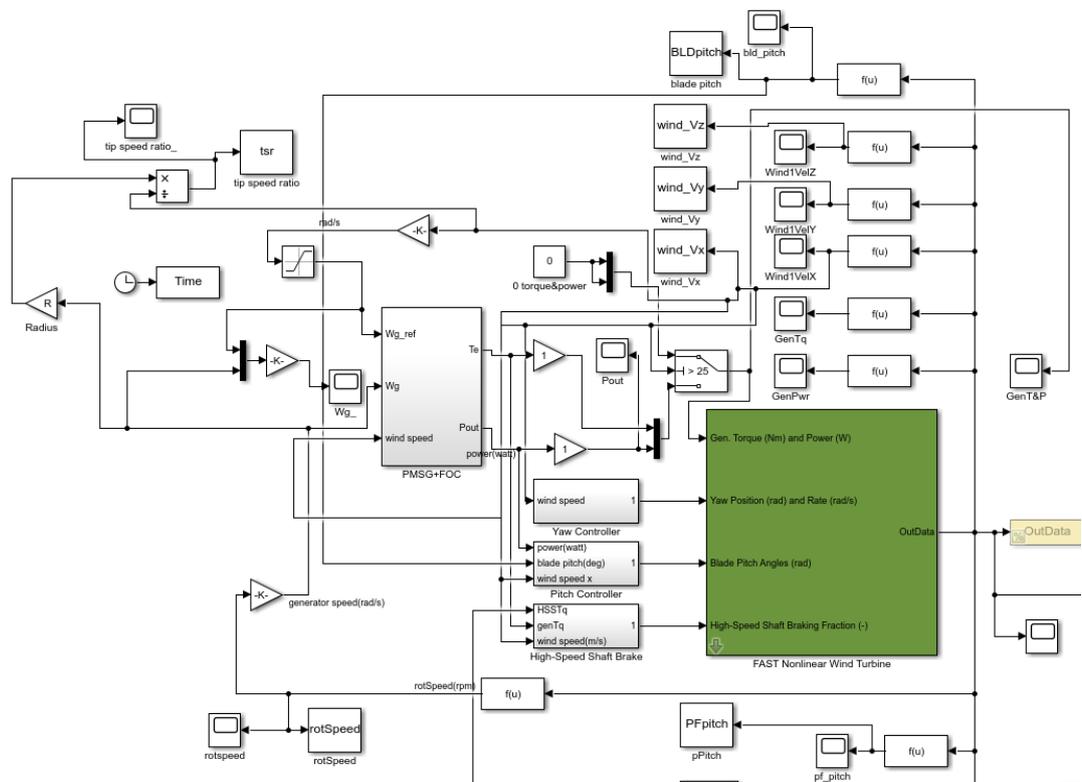


圖 5-15 全機組變轉速變旋角控制系統 SIMULINK 程式圖

5-6-1 追蹤最佳尖速比區

本節根據 NREL 5MW 風機規格設定，如圖 5-16 所示，在低於額定風速 11.4m/s 下，進行之控制策略為追蹤最佳間速比 7.55，功率係數最大為 0.482，其目的在達到額定風速且葉片變旋角系統尚未啟動時，葉片旋角於 0 度時能夠擷取較多風能，讓此區發電功率最佳化。透過最佳葉尖速比轉換的目標發電機轉速，結合先前永磁同步發電機變轉速控制來達成追蹤最佳葉尖速比控制策略。

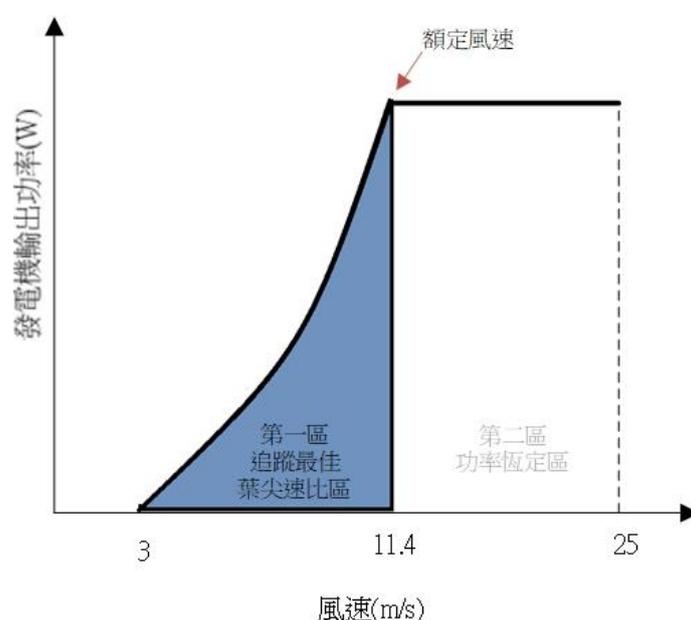


圖 5-16 風力發電機運轉在追蹤最佳尖速比區

輸入一風速 3~10m/s 之遞增軌跡風速，模擬時間為 200 秒，結果如圖 5-17 及圖 5-18 所示，包含風速、波浪波高、發電機功率、葉尖速比目標值與模擬值、葉尖速比誤差、發電機轉速目標值與模擬值、發電機轉速誤差、發電機力矩。比較同風速條件下，有無波浪對浮台動態及最後葉尖速比追蹤影響，圖 5-17 為無波浪條件模擬，圖 5-18 為在波浪條件於有義波高 3m、週期為 7.5sec 且有 JASOWAP 波譜之波浪下模擬，模擬結果前 20 sec 屬於電機正常震盪，由模擬結果可知無波浪條件下，葉尖速比追蹤狀況良好，誤差小於 0.02。有波浪條件下，

浮台姿態受波浪影響較無波浪多些高頻震盪，而這些也轉而表現到轉速誤差變化進而影響葉尖速比追蹤有較為明顯的震盪起伏，誤差在 0.25rpm 內，但總體葉尖速比追蹤狀況良好。

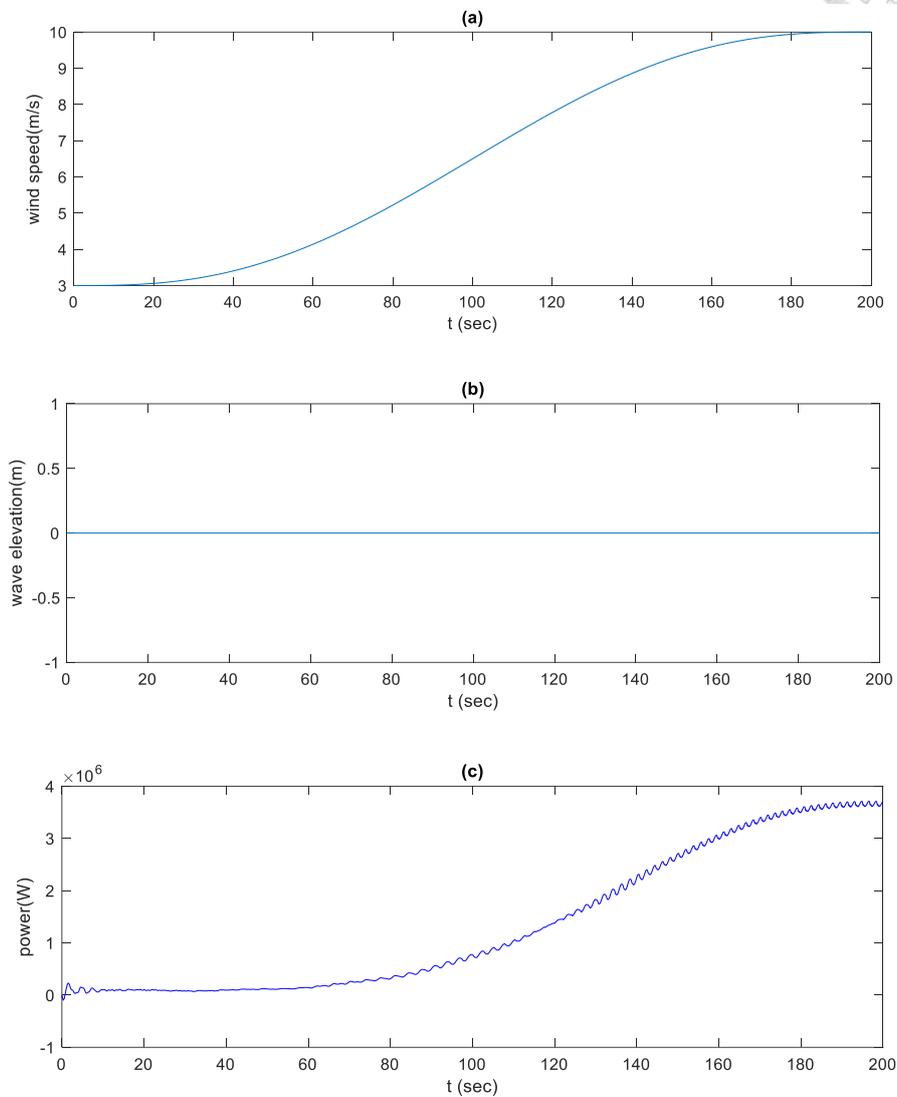


圖 5-17 (a)~(c)輸入遞增風速且靜水面條件下風力發電機運轉於最佳尖速比區控制響應 (a)風速、(b) 波浪波高、(c) 發電功率

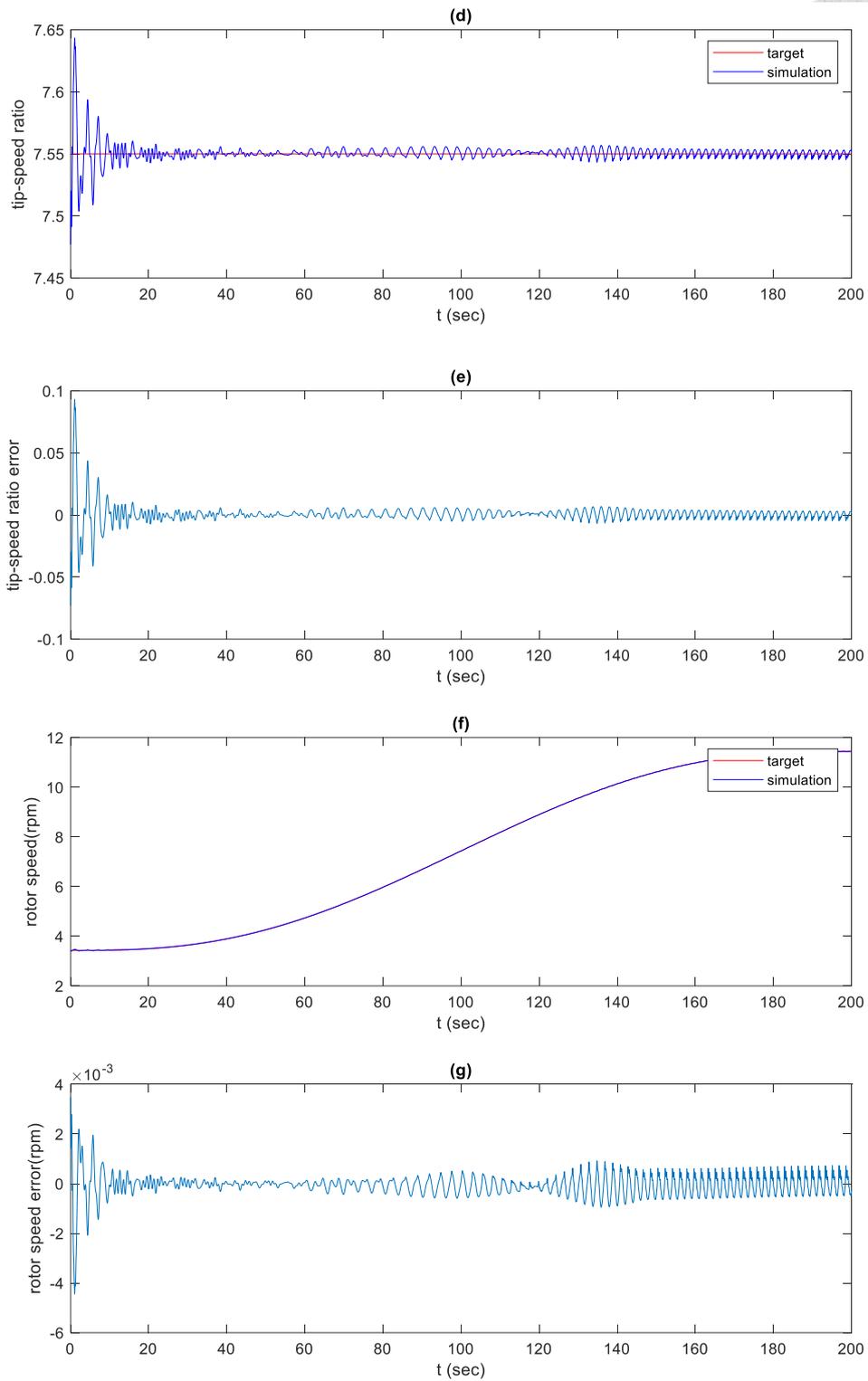


圖 5-17 (d)~(g)輸入遞增風速且靜水面條件下風力發電機運轉於最佳尖速比區控制響應 (d) 葉

尖速比目標值及模擬值、(e) 葉尖速比誤差、

(f) 發電機轉速目標值及模擬值、(g) 發電機轉速誤差

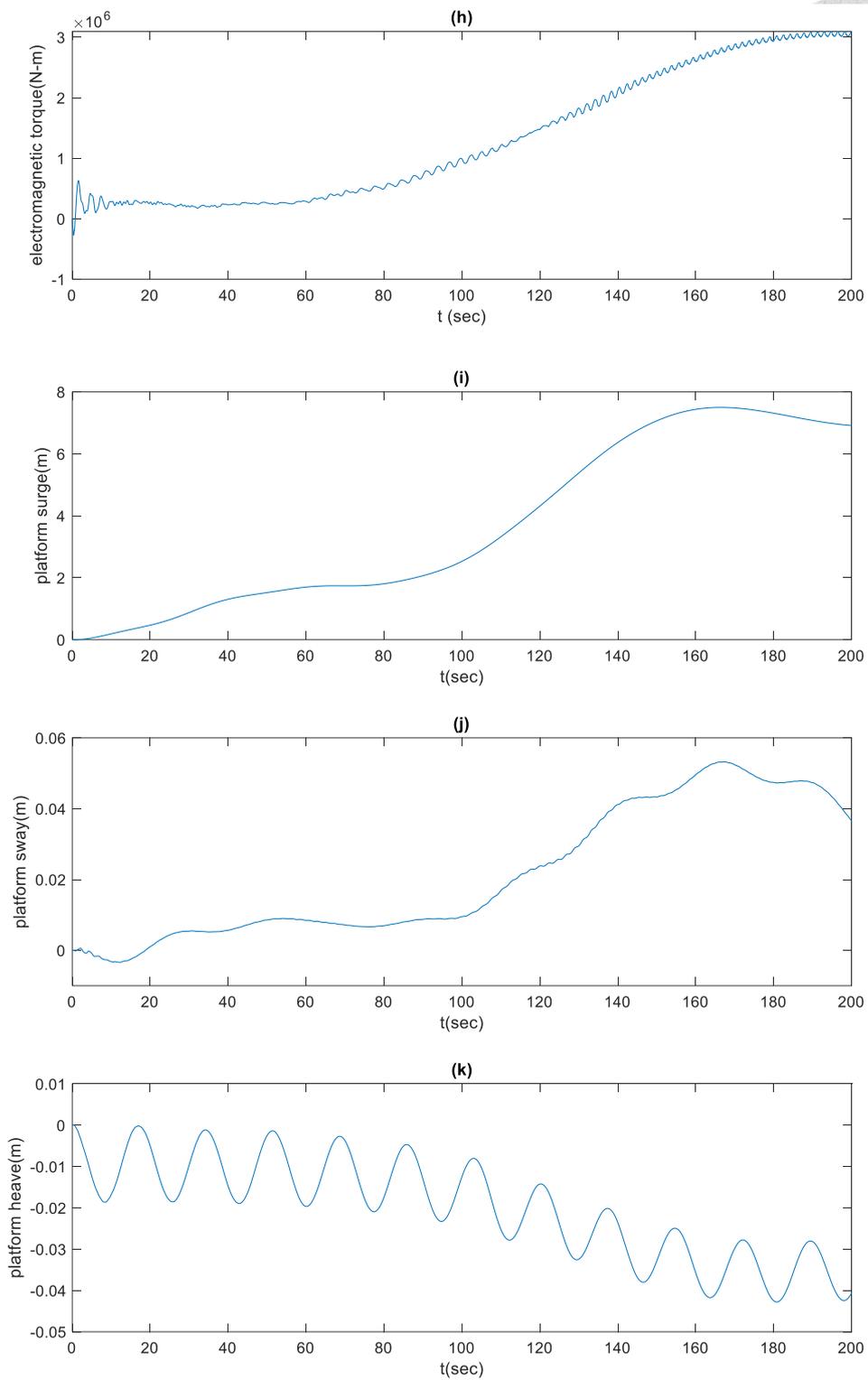


圖 5-17 (h)~(k)輸入遞增風速且靜水面條件下風力發電機運轉於最佳尖速比區控制響應 (h) 發電機力矩、(i) 浮台縱移位移、(j) 浮台橫移位移、
(k) 浮台起伏位移

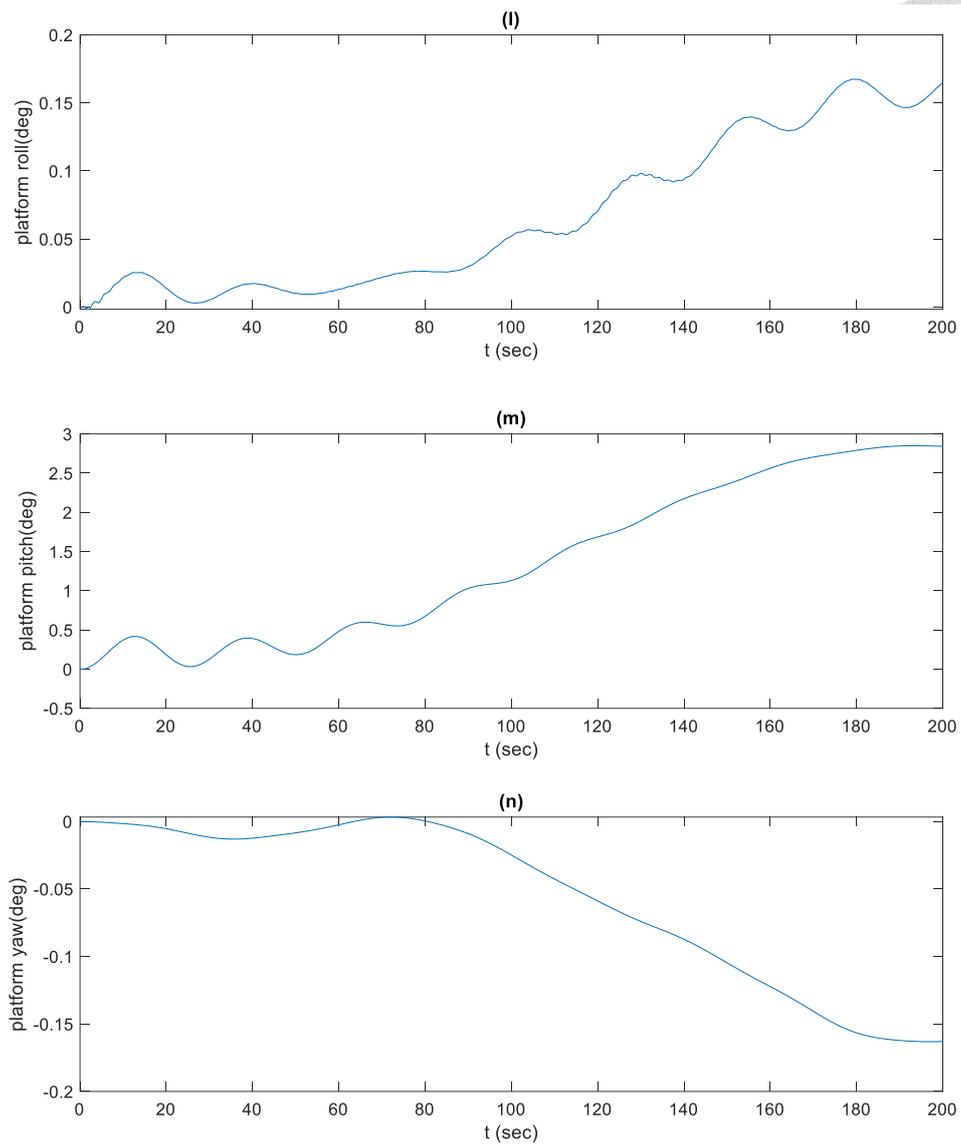


圖 5-17 (l)~(n)輸入遞增風速且靜水面條件下風力發電機運轉於最佳尖速比區控制響應 (l) 浮台橫搖轉動位移、(m) 浮台俯仰(pitch)角度、
(n) 浮台平擺(yaw)角度

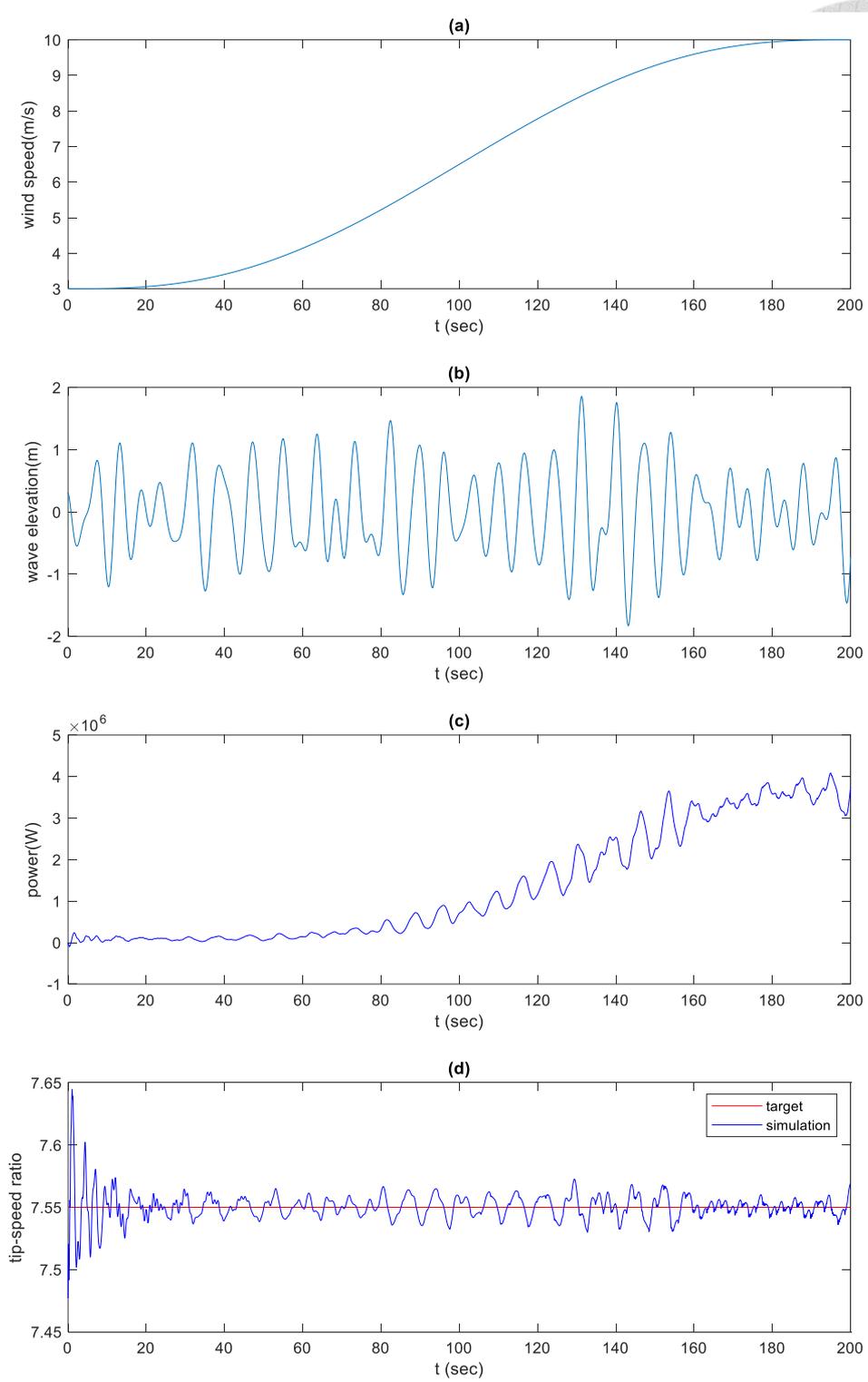


圖 5-18 (a)~(d)輸入遞增風速且有波浪條件下風力發電機運轉於最佳尖速比區控制響應 (a)風速、(b) 波浪波高、(c) 發電功率、(d) 葉尖速比目標值及模擬值

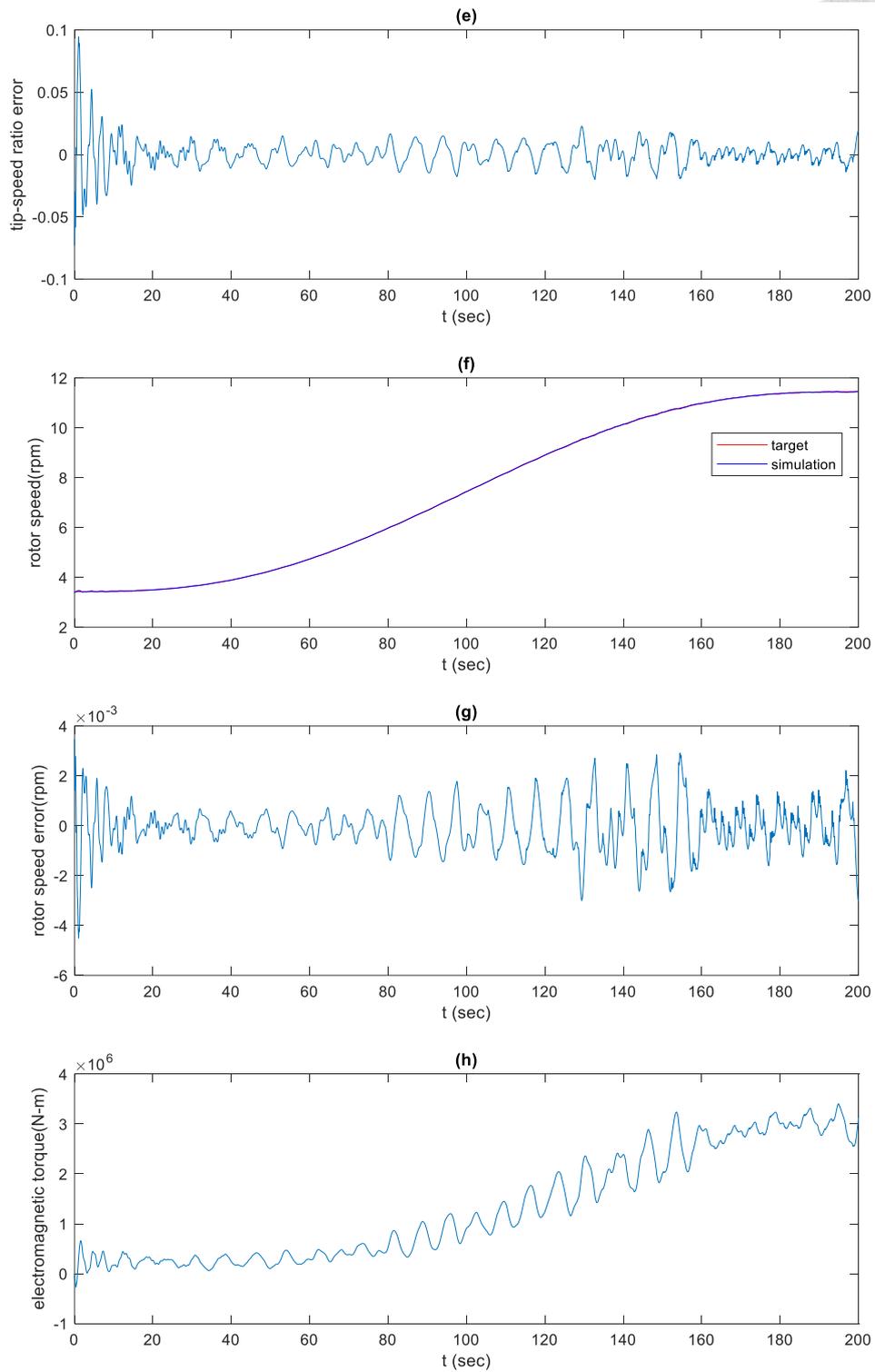


圖 5-18 (e)~(h)輸入遞增風速且有波浪條件下風力發電機運轉於最佳尖速比區控制響應 (e) 葉尖速比誤差、(f) 發電機轉速目標值及模擬值、(g) 發電機轉速誤差、(h) 發電機力矩

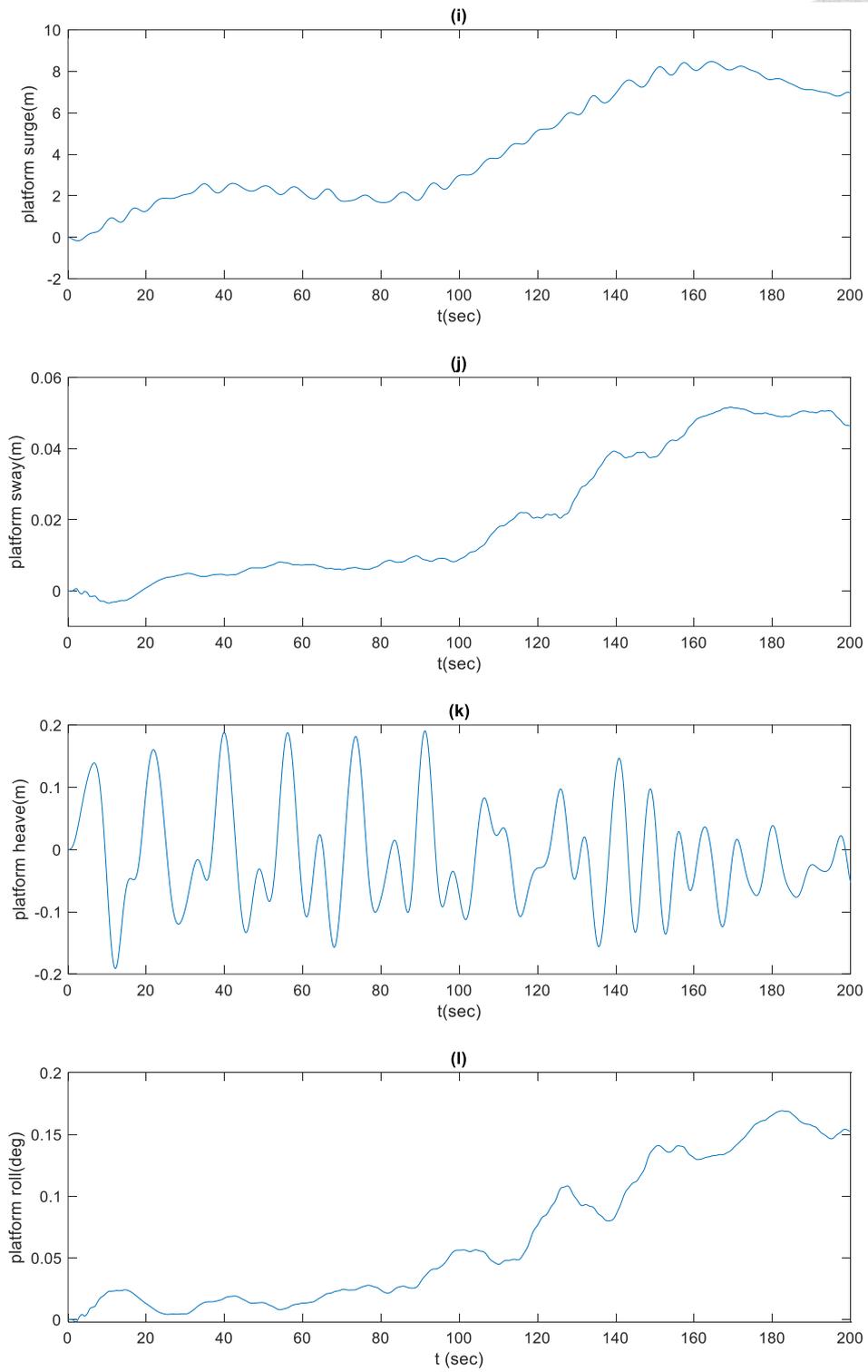


圖 5-18 (i)~(l)輸入遞增風速且有波浪條件下風力發電機運轉於最佳尖速比區控制響應 (i) 浮台縱移位移、(j) 浮台橫移位移、(k) 浮台起伏位移、
(l) 浮台橫搖轉動位移

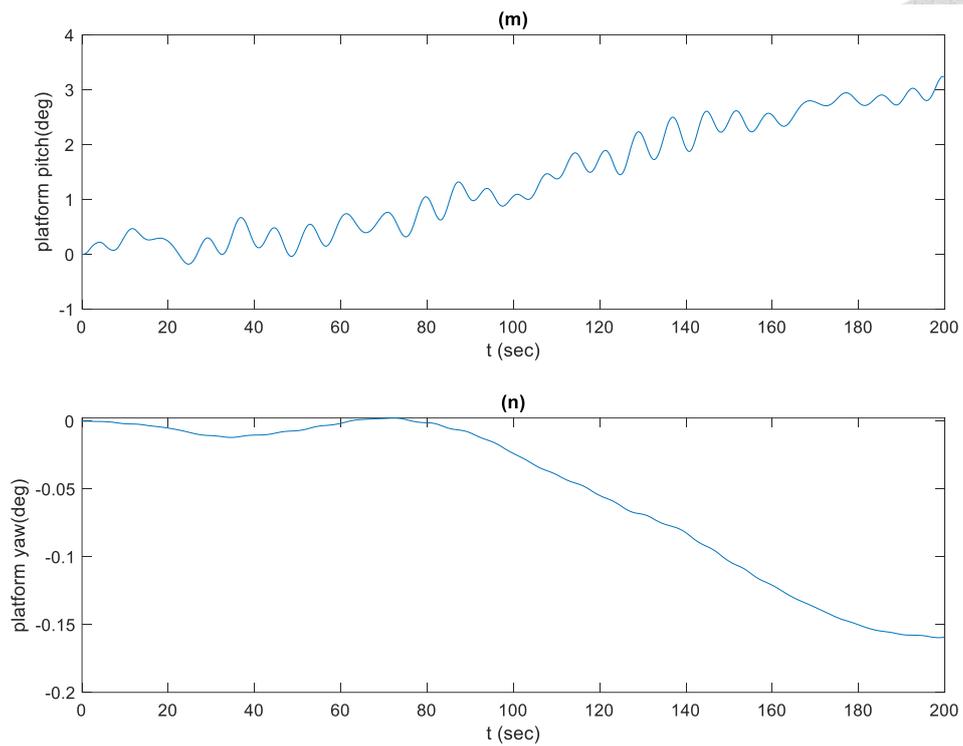


圖 5-18 (m)~(n)輸入遞增風速且有波浪條件下風力發電機運轉於最佳尖速比區

控制響應 (m) 浮台俯仰(pitch)角度、(n) 浮台平擺(yaw)角度

5-6-2 功率恆定區

本節依據 NREL 5MW 風機規格，討論風速達到額定風速 11.4m/s 後，風力發電機為了維持在額定轉速 12.1rpm 及額定功率 5MW，不讓發電機轉子端轉速過高，造成機組損壞的模擬分析。如圖 5-19 所示。達額定風速後，利用葉片變旋角系統調整葉片旋角角度，降低其功率係數即降低葉片擷取風能效率，以達成穩定轉速及發電功率之目的。

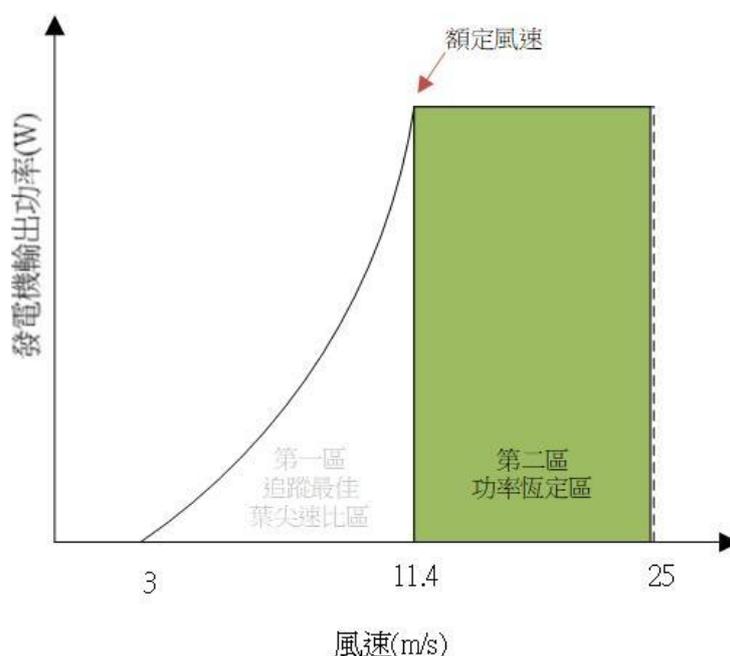


圖 5-19 風力發電機運轉在功率恆定區

輸入 10~20 m/s 之間快速變動的風速，模擬時間為 200 秒，結果如圖 5-20 所示，包含風速、波浪波高、發電機轉速目標值與模擬值、發電機轉速誤差、q 軸電流目標值與模擬值、q 軸電流誤差、發電機力矩、發電功率目標值與模擬值、發電功率誤差、葉片旋角變化、浮台縱移位移、浮台橫移位移、浮台起伏位移、浮台橫搖角度、浮台俯仰(pitch)角度、浮台平擺(yaw)角度。

圖 5-20 為風速為快速變動紊流條件且波浪條件有義波高 3m、週期 7.5s 且有 JONSWAP 波譜之波浪。輸入風速風檔為 TurbSim 輸出符合 IECWind 規範之紊流風速下，分析旋角控制響應，風速條件為於機艙均速 15m/s，風速於 10~20m/s

間快速變動，模擬時間 200 秒，結果如圖 5-20 所示，可以看出轉速控制在誤差 0.2rpm 內，功率誤差控制在 2MW 內，控制結果雖較平滑風速差了一點，但整體結果還算良好。

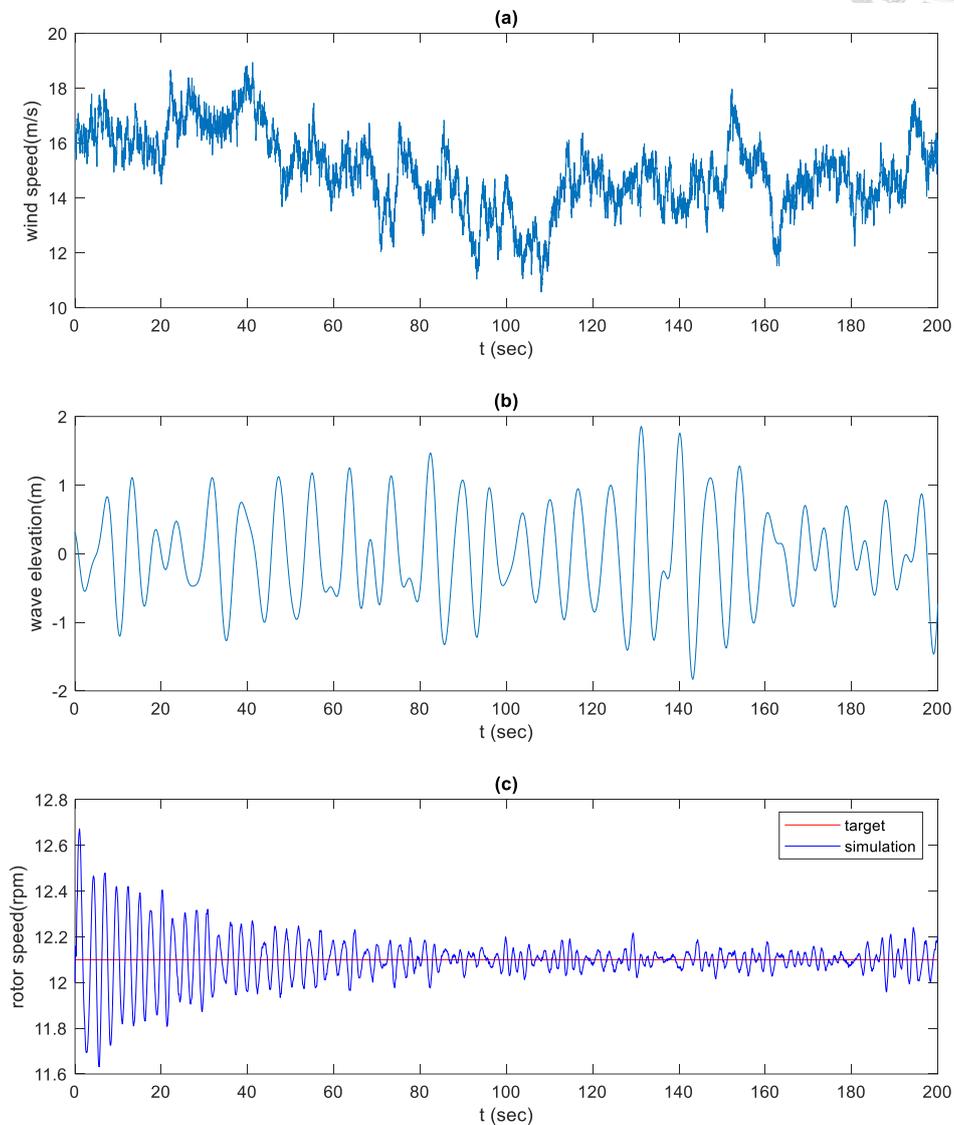


圖 5-20 (a)~(c)輸入快速變動風速且有波浪條件下風力發電機運轉於功率恆定區控制響應 (a) 風速、(b) 波浪波高、(c) 發電機轉速目標值與模擬值

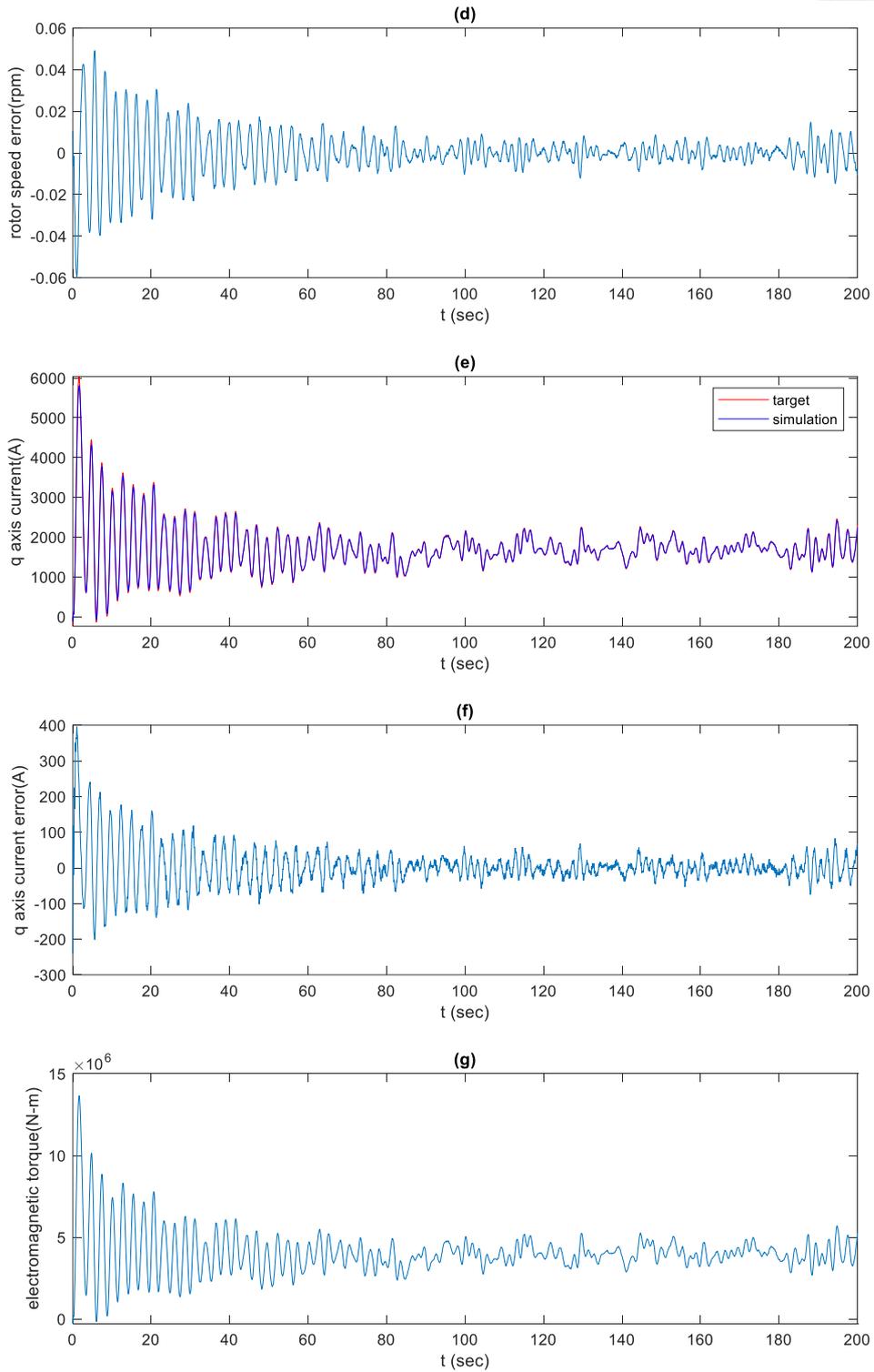


圖 5-20 (d)~(g)輸入快速變動風速且有波浪條件下風力發電機運轉於功率恆定區

控制響應 (d) 發電機轉速誤差、(e) q 軸電流目標值與模擬值、

(f) q 軸電流誤差、(g) 發電機力矩

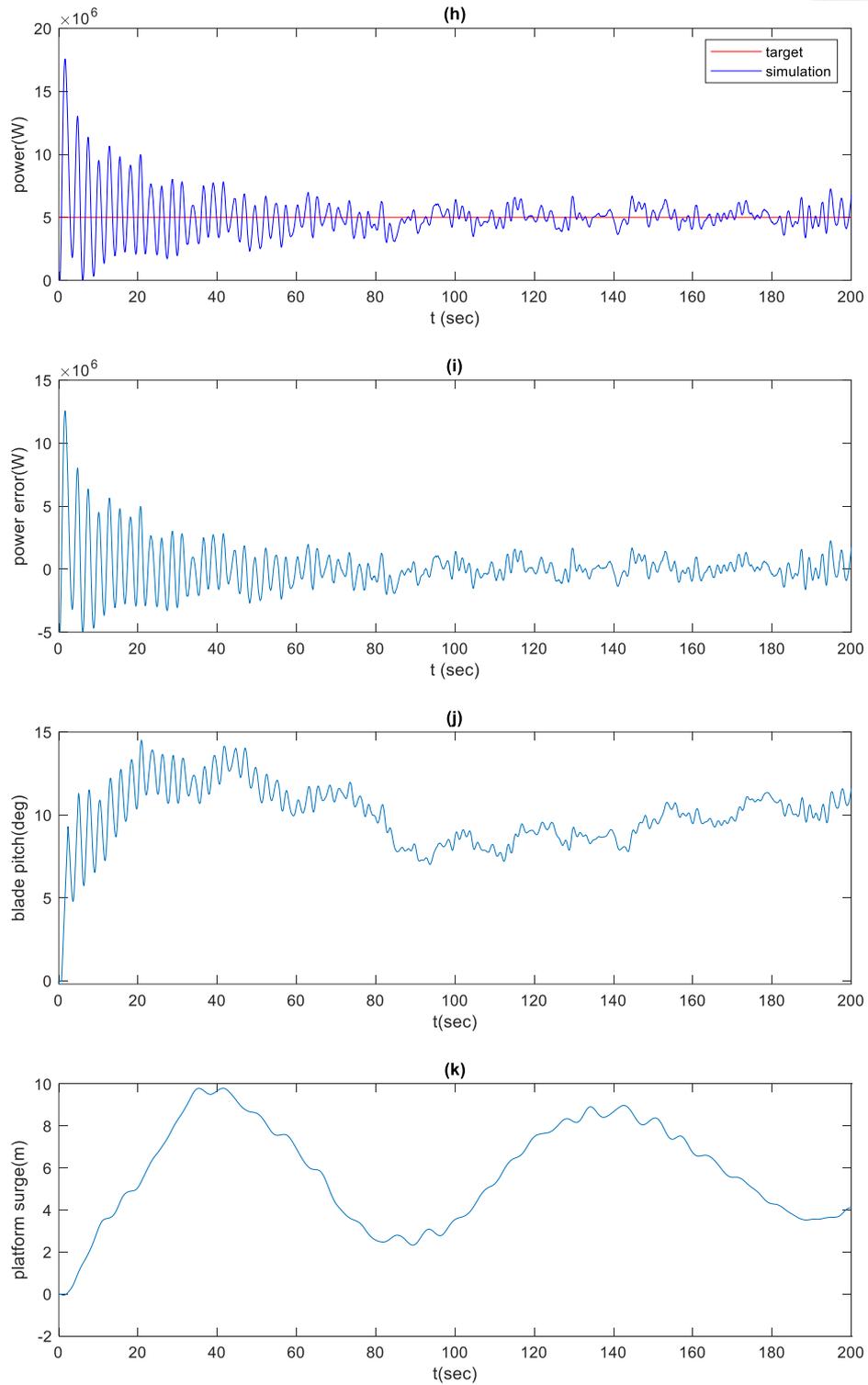


圖 5-20 (h)~(k)輸入快速變動風速且有波浪條件下風力發電機運轉於功率恆定區
 控制響應 (h) 發電功率目標值與模擬值、(i) 發電功率誤差、
 (j) 葉片旋角變化、(k) 浮台縱移位移

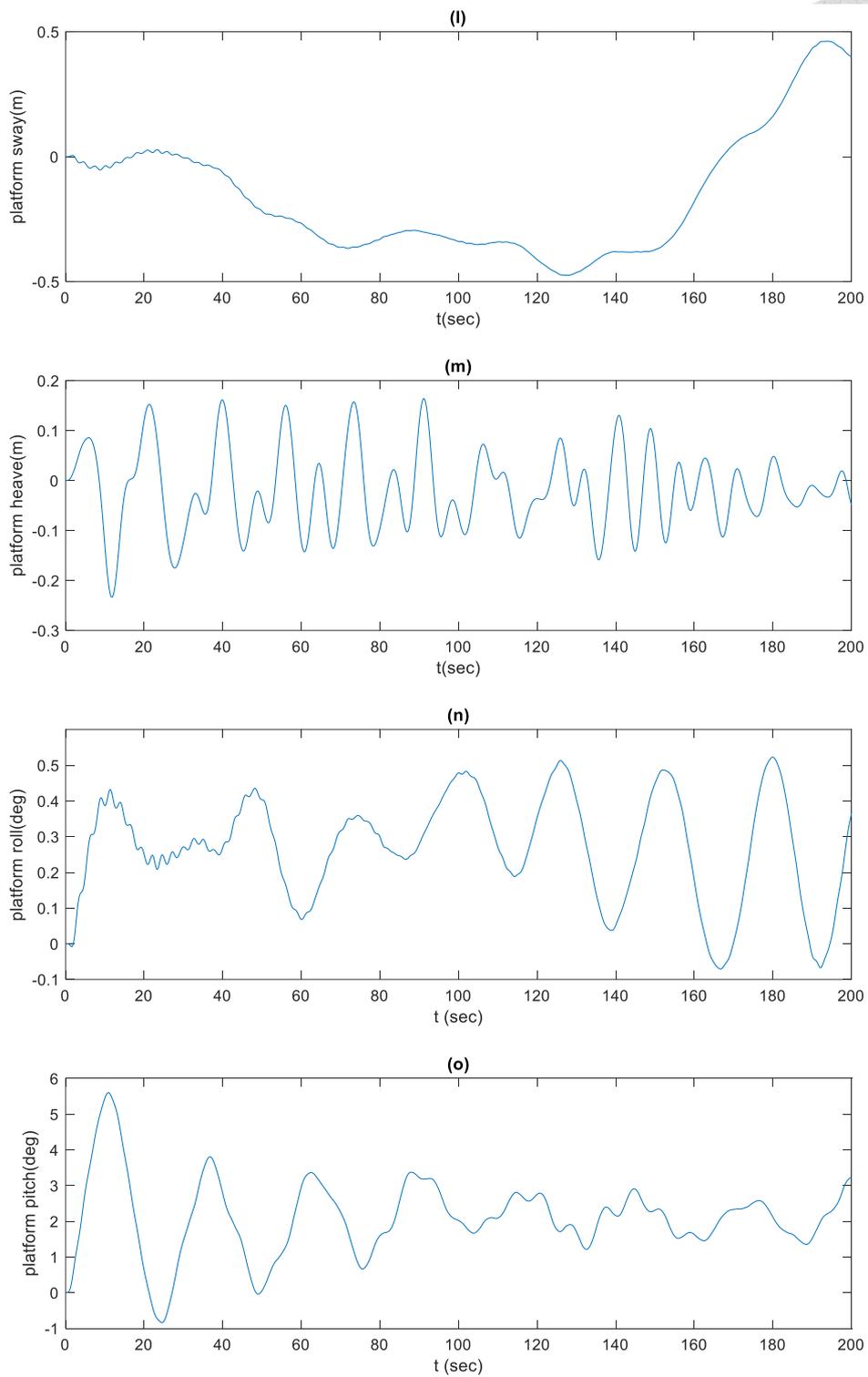


圖 5-20 (l)~(o)輸入快速變動風速且有波浪條件下風力發電機運轉於功率恆定區

控制響應 (l) 浮台橫移位移、(m) 浮台起伏位移、

(n) 浮台橫搖角度、(o) 浮台俯仰(pitch)角度

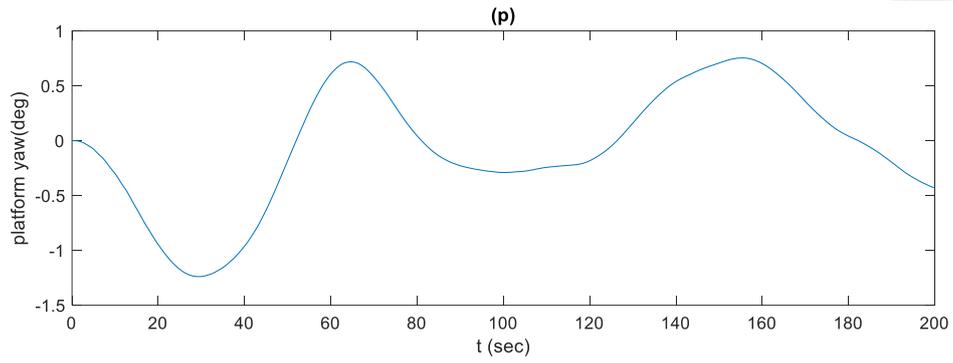


圖 5-20 (p)輸入快速變動風速且有波浪條件下風力發電機運轉於功率恆定區控制響應 (p) 浮台平擺(yaw)角度

5-6-3 全區域變轉速變旋角動態模擬

本節結合 5-6-1 追蹤最佳間速比區及 5-6-2 功率恆定區，如所示，討論風速變化從低於額定風速到超過額定風速後，結合二區間不同控制策略，達成浮式風機在低於額定風速區可以取得最佳發電量的同時，在進入到高於額定風速區時，可以穩定全機組運轉於額定轉速，維持穩定額定發電功率輸出，其區域控制策略切換不會有不連續性，造成機組損害。

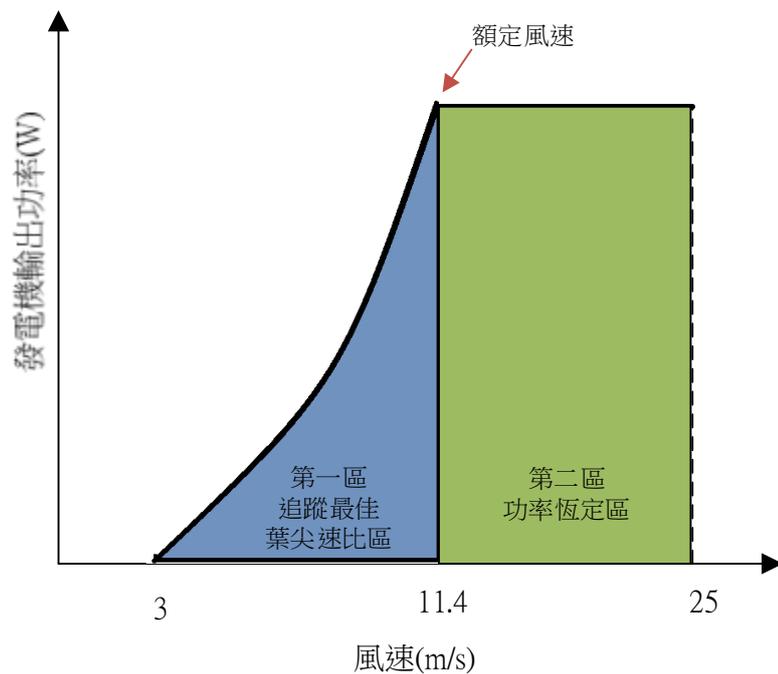


圖 5-21 風力發電機運轉於全區域風速

輸入 3 ~ 25 m/s 之間的平滑風速，模擬時間 200 秒，結果如圖 5-22(a)~(n) 所示，包含風速、波浪波高、尖速比最佳值與模擬值、轉子轉速目標值與模擬值、轉子轉速控制誤差、發電機力矩、發電功率、葉片旋角變化、浮台縱移位移、浮台橫移位移、浮台起伏位移、浮台橫搖角度、浮台俯仰(pitch)角度、浮台平擺(yaw)角度。低於額定轉速區葉尖速比追蹤良好，直到進入高額定轉速區，為維持發電功率穩定，葉片旋角系統開始作動，使葉尖速比下降，但同時亦維持在額定轉速 12.1rpm，發電功率在 90 秒左右有將功率降回 5MW，但葉片旋角系統始動造成突增力矩直接反應在約 90~100 秒間，在浮台縱移及俯仰(pitch)角變化上也可以

看到因葉片旋角系統啟動後，風能擷取下降而使浮台縱移位移及俯仰(pitch)角驟降，使得浮台姿態改變，最終影響發電功率，使其有過衝現象。

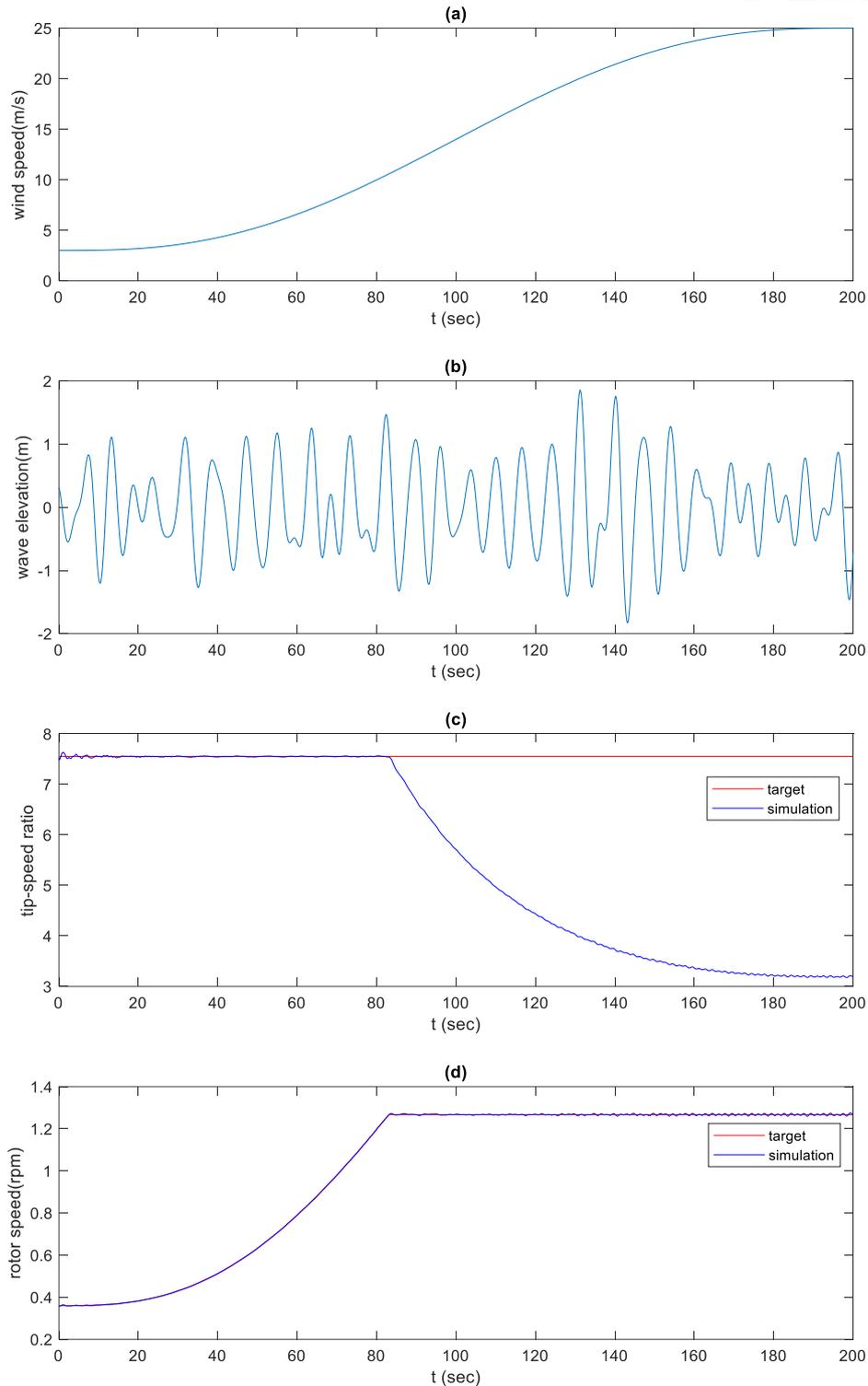
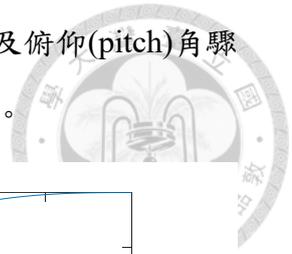


圖 5-22 (a)~(d) 輸入遞增風速風力發電機運轉於全區域風速控制響應

(a) 風速、(b) 波浪波高、(c) 尖速比最佳值與模擬值、

(d) 轉子轉速目標值與模擬值

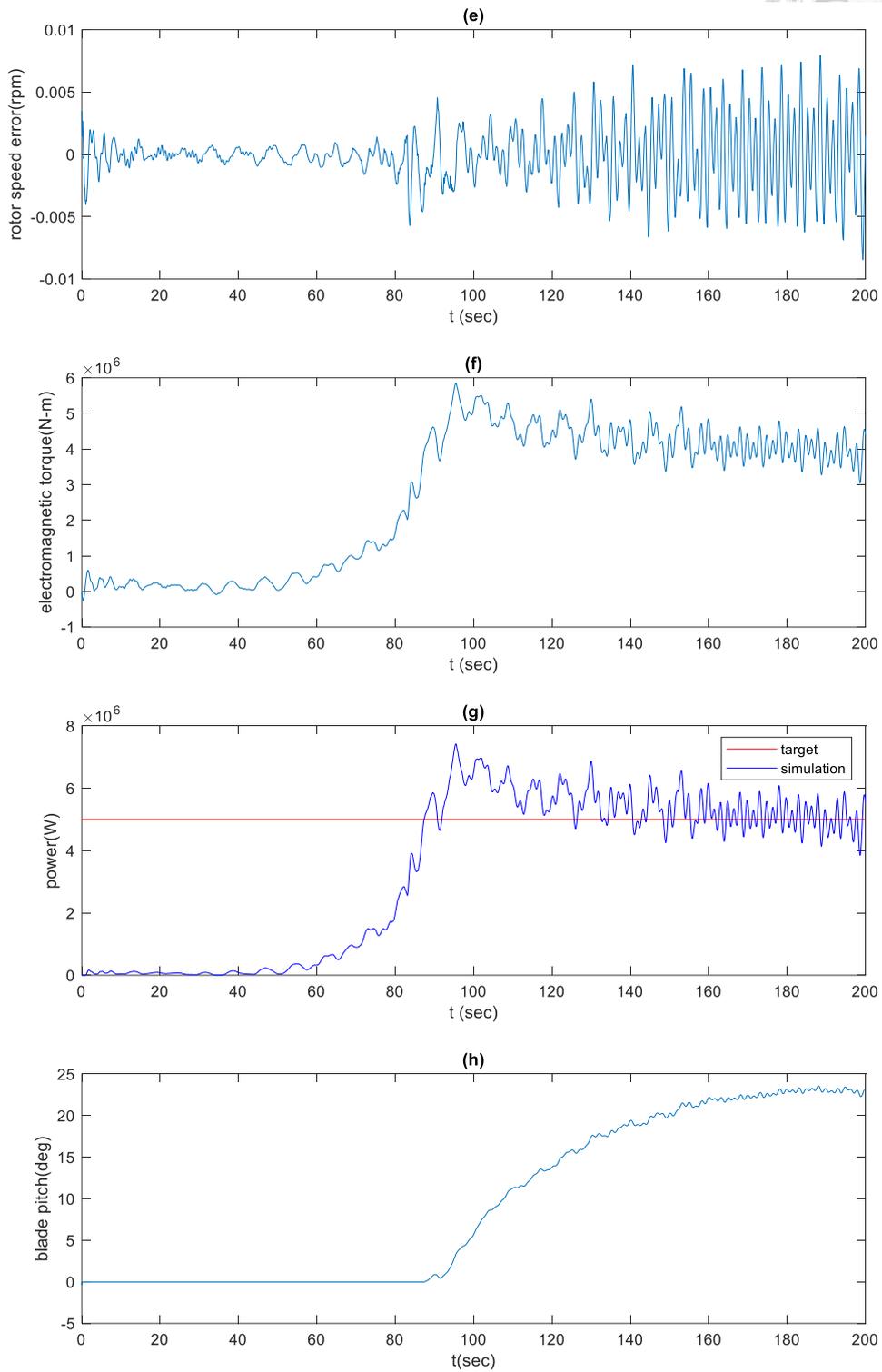
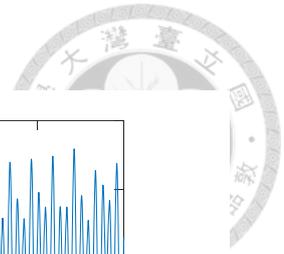


圖 5-22 (e)~(h) 輸入遞增風速風力發電機運轉於全區域風速控制響應

(e) 轉子轉速控制誤差、(f) 發電機力矩、(g) 發電功率、(h) 葉片旋角變化

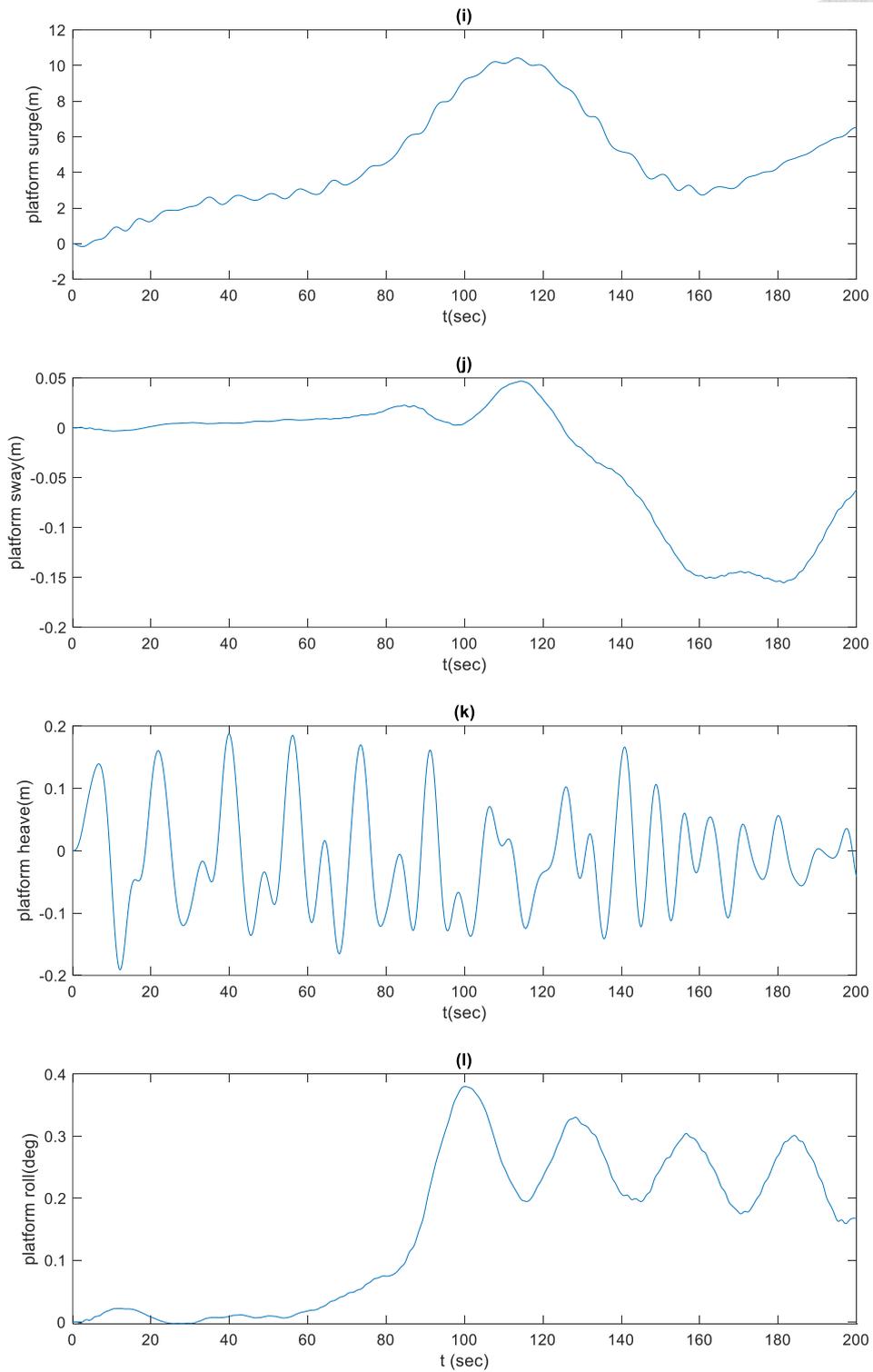


圖 5-22 (i)~(l) 輸入遞增風速風力發電機運轉於全區域風速控制響應

(i) 浮台縱移位移、(j) 浮台橫移位移、(k) 浮台起伏位移、

(l) 浮台橫搖角度

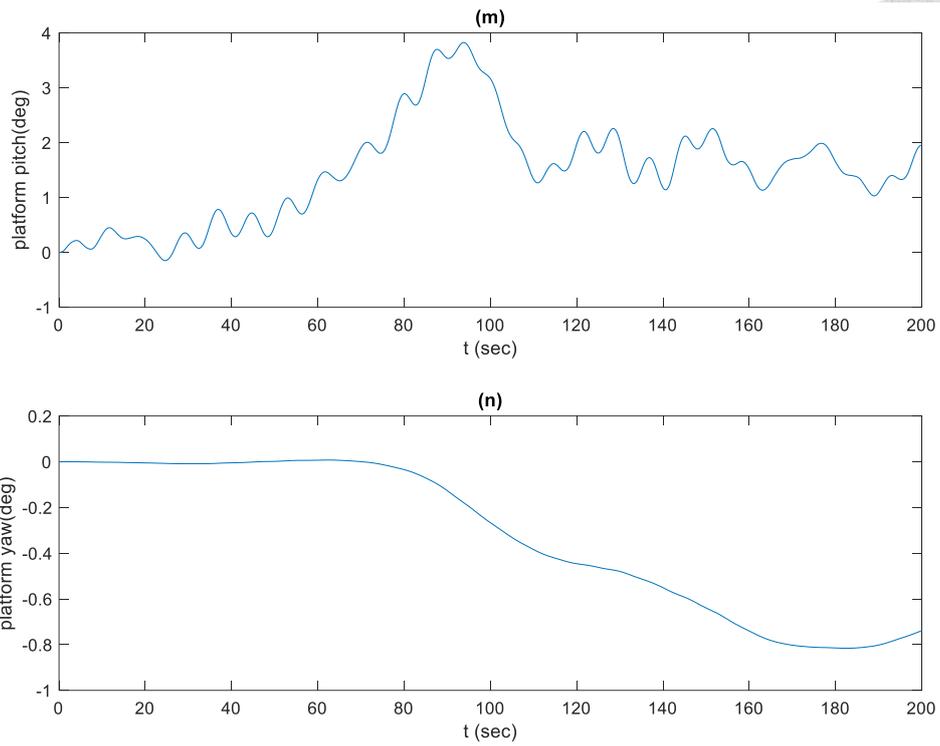


圖 5-22 (m)~(n) 輸入遞增風速風力發電機運轉於全區域風速控制響應

(m) 浮台俯仰(pitch)角度、(n) 浮台平擺(yaw)角度

5-7 固定式與浮動式風力發電機比較

本節探討風力發電機之載台為固定式與浮動式對於全機動態之影響，如圖 5-23 風力發電機全機規格基本相同，皆為 NREL 5MW 風機，發電機皆為 PMSG。探討之條件為風速 3~25m/s 之平滑風速，有波浪條件，模擬時間 270 秒，固定式風機模擬結果如圖 5-24，含風速、發電功率、轉子轉速、發電機力矩、轉子轉速誤差、葉片旋角變化、葉尖速比、波浪負載 x 分量、波浪負載 y 分量、波浪負載 z 分量。浮動式風機模擬結果如圖 5-25，含風速、發電功率、轉子轉速、發電機力矩、轉子轉速誤差、葉片旋角變化、葉尖速比、波浪波高、波浪負載三自由度個別分量與浮台六自由度姿態。



圖 5-23 離岸型風力發電機示意圖[20, 30]

(a) 固定式離岸風機示意圖、(b)浮動式離岸風機示意圖

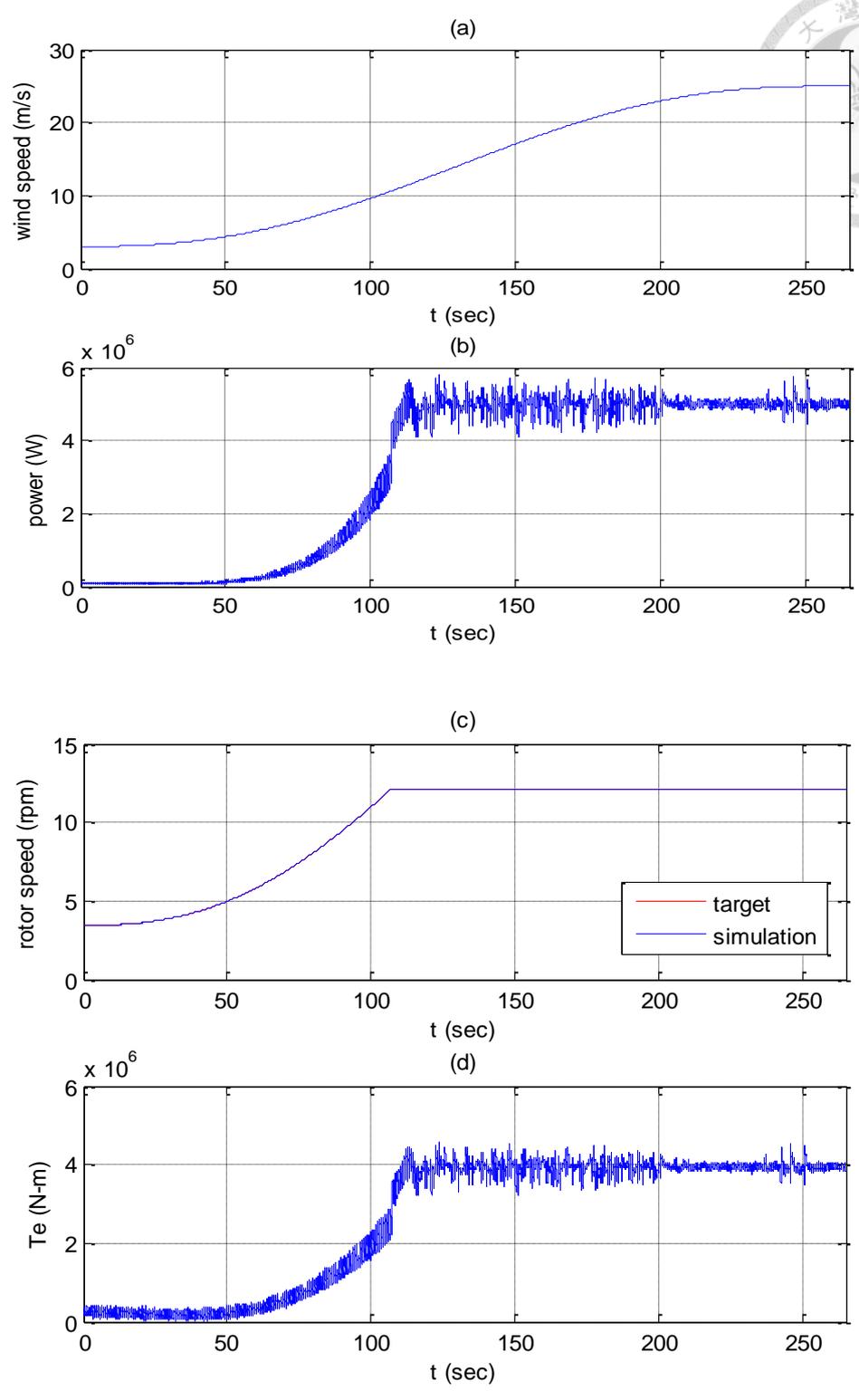
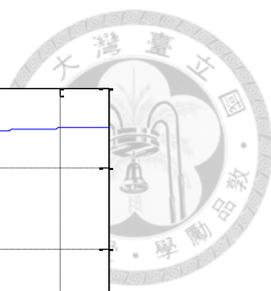


圖 5-24 (a)~(d)輸入遞增風速固定式風力發電機運轉於全區域風速控制響應[23]

(a) 風速、(b) 輸出功率、(c) 轉子轉速、(d) 發電機力矩

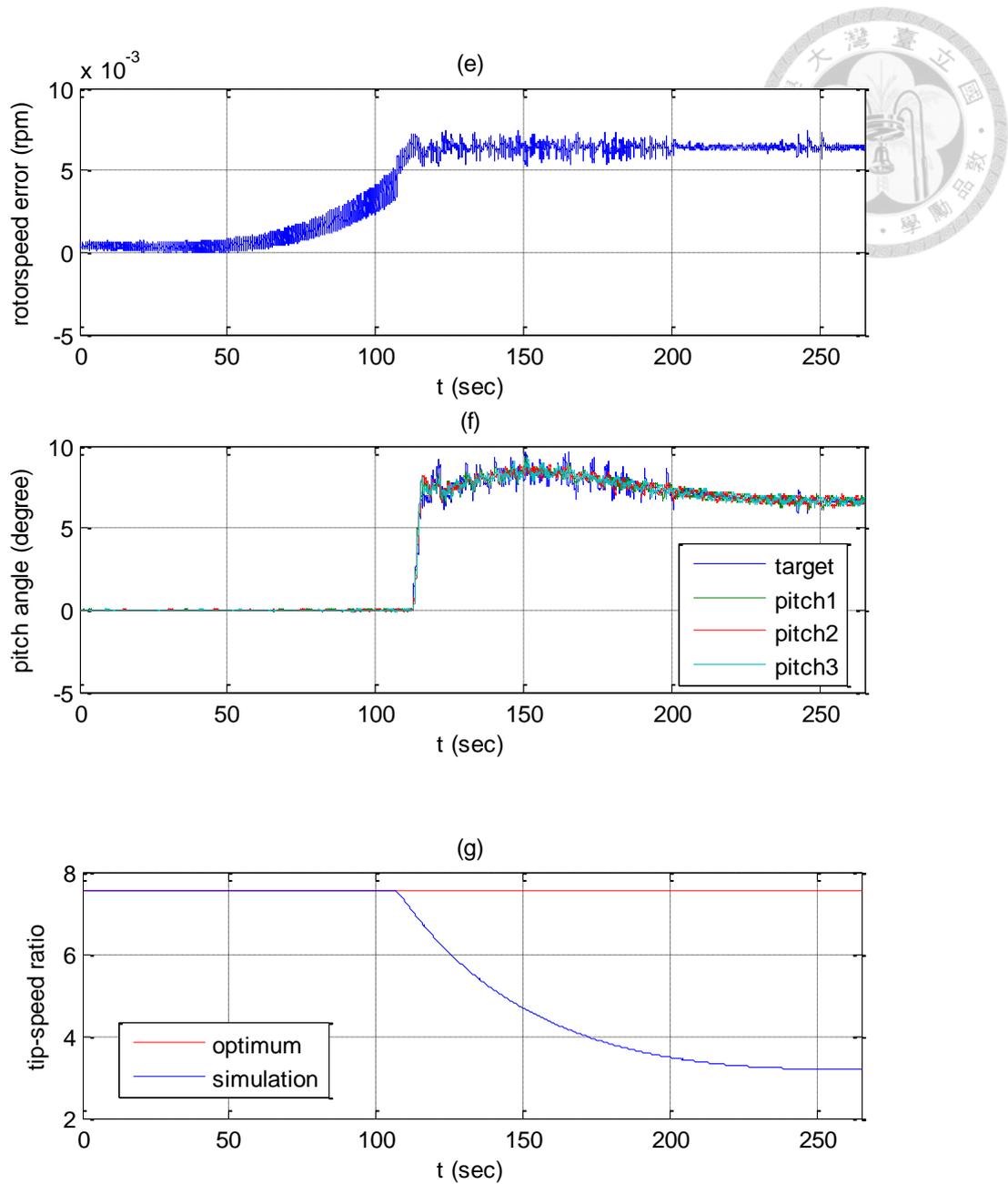


圖 5-24 (e)~(g)輸入遞增風速固定式風力發電機運轉於全區域風速控制響應[23]

(e) 轉子轉速控制誤差、(f) 葉片旋角變化、(g) 葉尖速比目標值與模擬值

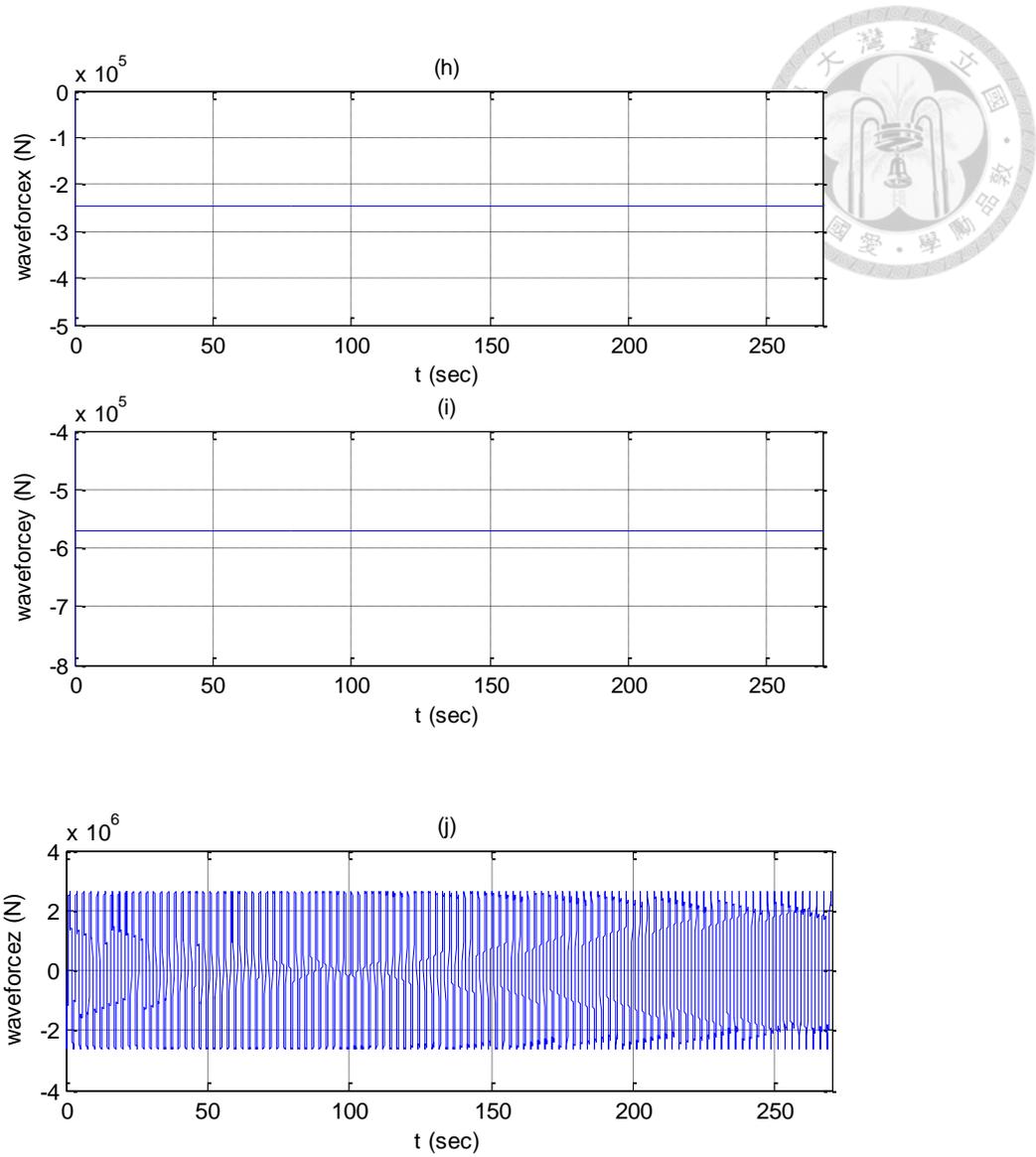


圖 5-24 (h)~(j)輸入遞增風速固定式風力發電機運轉於全區域風速控制響應[23]

(h) 波浪力負載 x 分量、(i) 波浪力負載 y 分量、(j) 波浪力負載 z 分量

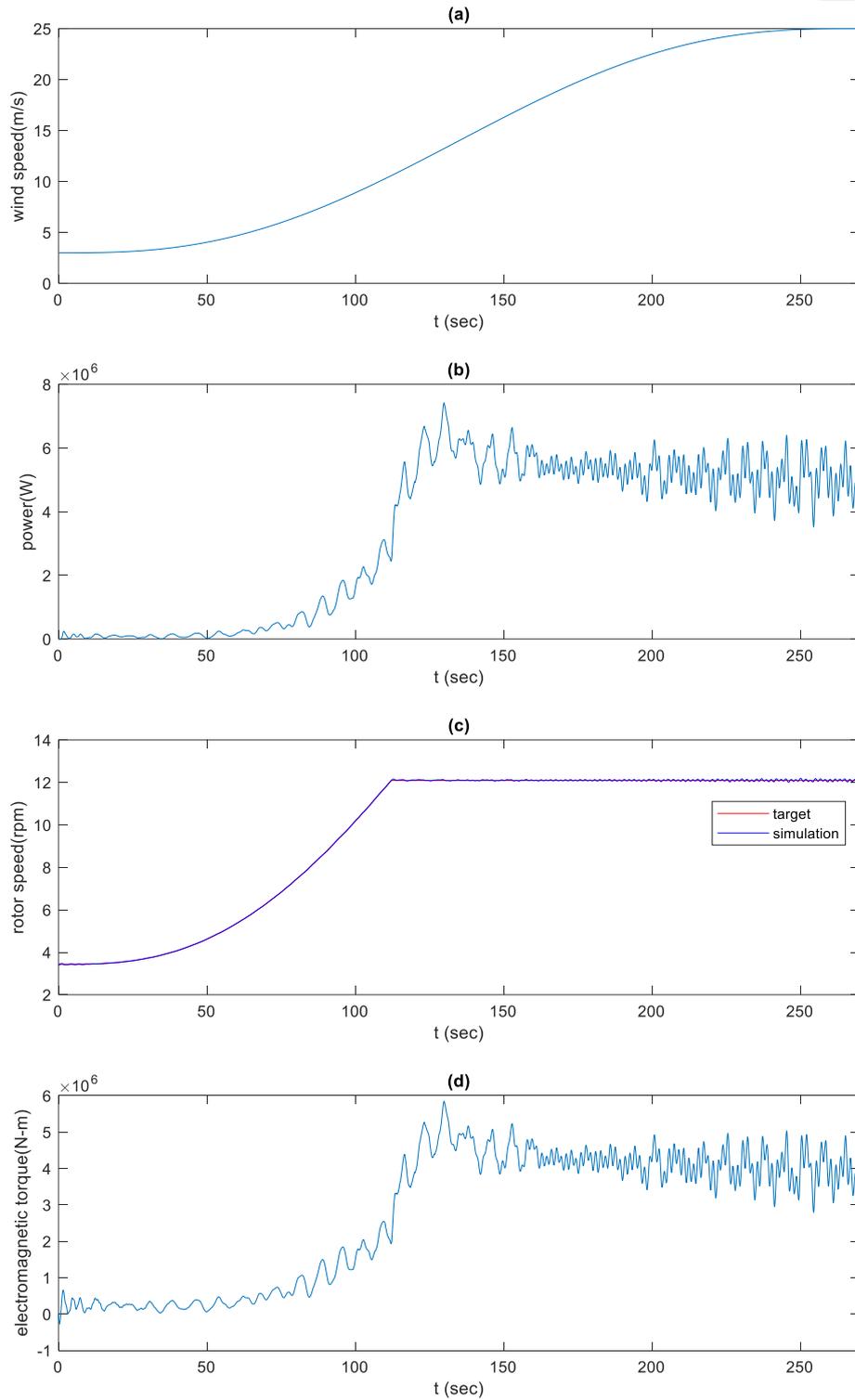


圖 5-25 (a)~(d)輸入遞增風速浮動式風力發電機運轉於全區域風速控制響應

(a) 風速、(b) 發電功率、(c) 轉子轉速、(d) 發電機力矩

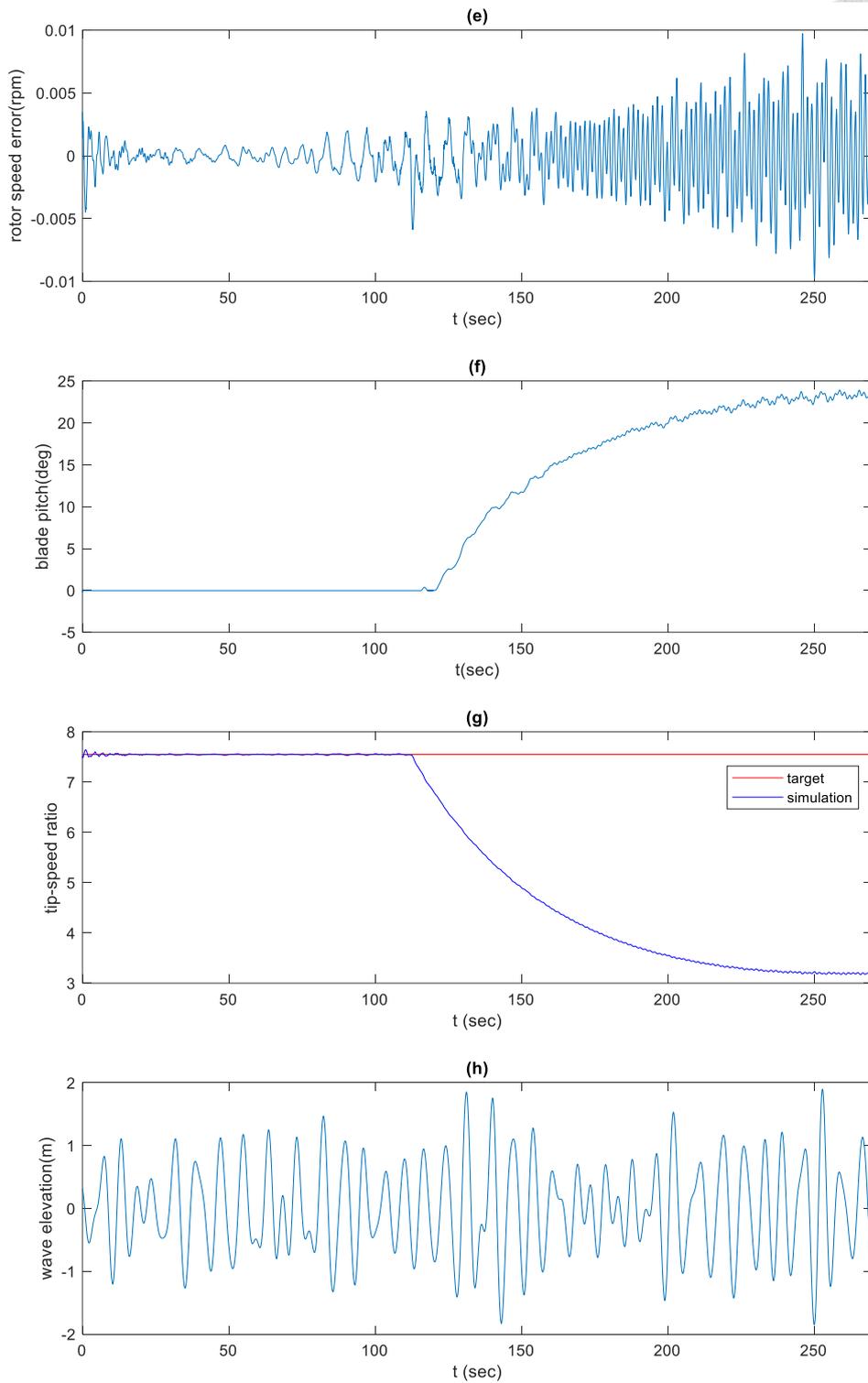


圖 5-25 (e)~(h)輸入遞增風速浮動式風力發電機運轉於全區域風速控制響應

(e) 轉子轉速誤差、(f) 葉片旋角變化、(g) 葉尖速比目標值與模擬值、

(h) 波浪波高

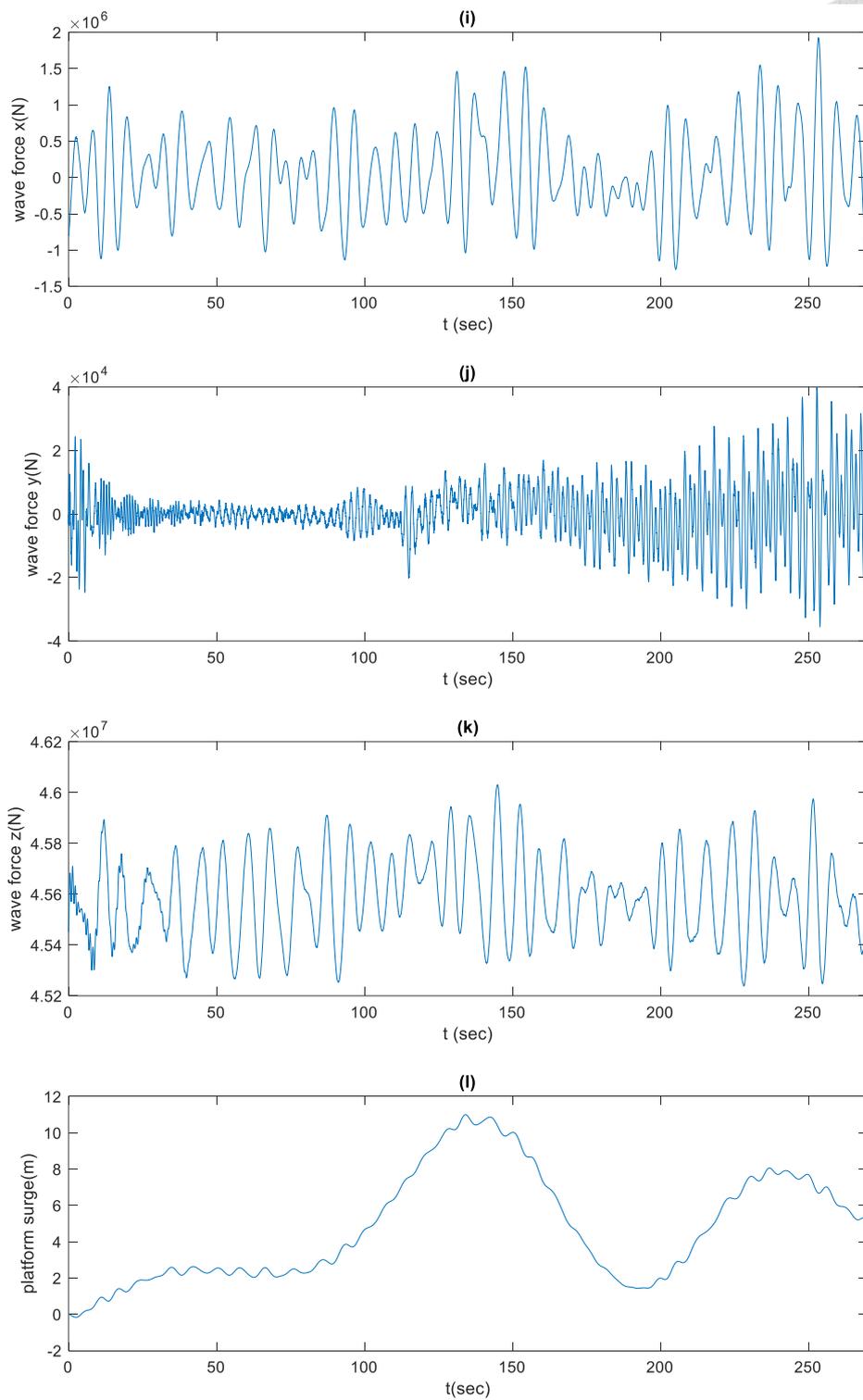


圖 5-25 (i)~(l)輸入遞增風速浮動式風力發電機運轉於全區域風速控制響應

(i) 波浪負載 x 分量、(j) 波浪負載 y 分量、(k) 波浪負載 z 分量、

(l) 浮台縱移位移

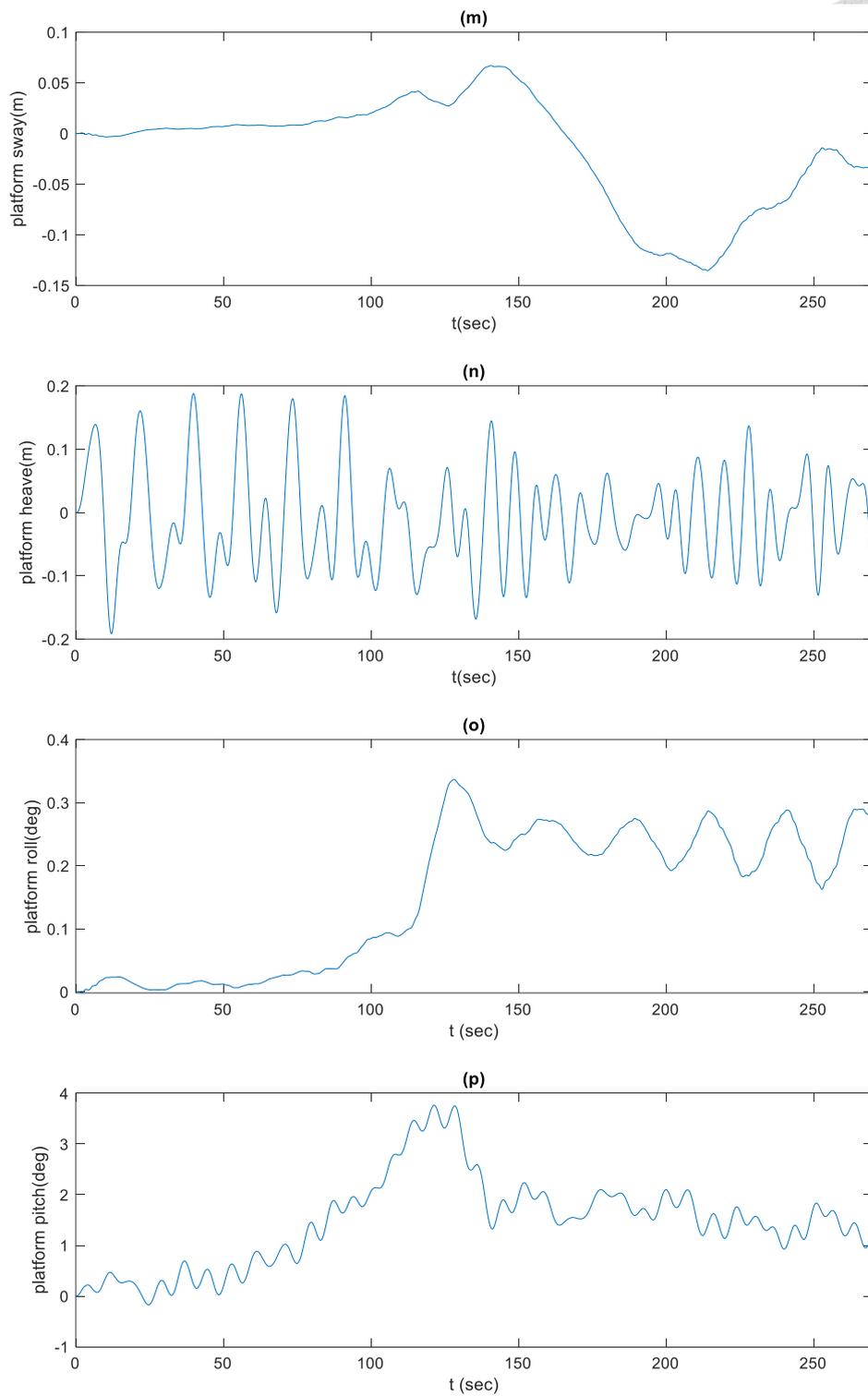


圖 5-25 (m)~(p)輸入遞增風速浮動式風力發電機運轉於全區域風速控制響應

(m) 浮台橫移位移、(n) 浮台起伏位移、(o) 浮台橫搖角度、

(p) 浮台俯仰(pitch)角度

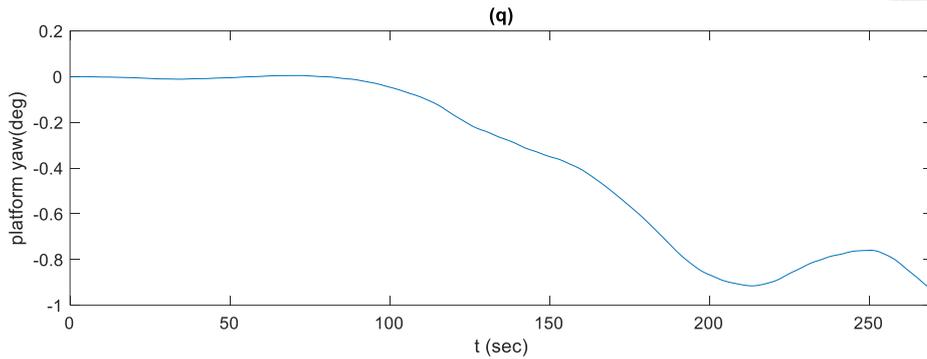


圖 5-25 (q)輸入遞增風速浮動式風力發電機運轉於全區域風速控制響應

(q) 浮台平擺(yaw)角度

觀察圖 5-24 可以發現固定式風機發電功率在 4~6MW 之間震盪，200 秒後甚至震盪範圍減至 4.5~5.5MW 內直到約 250 秒突然又有較大的震盪，原因在轉子轉速約 250 秒亦有較大擾動造成，此瞬間轉子轉速造成的擾動在葉片旋角主動控制中無法立即跟上而造成最後在功率上表現出來。

如圖 5-25，在浮動式風機發電功率表現較固定式風機有更大的震盪，在約 115~135 秒之間震盪幅度最大來到約 7.5MW，原因主要在葉片旋角控制時，在 110 秒左右一超過 5MW 馬上進行調整，造成功率下降低於 5MW 後，葉片旋角變不作動，約 120 秒時風速比先前更大，把功率推到更大值，此時葉片旋角系統又重新運作，漸漸將功率控制回 5MW，約 160~190 秒之間控制狀況良好，功率在 4.5~5.5MW 間震盪。

討論固定式與浮動式間功率差異，主要原因來自於浮動式之浮台的運動，雖然並非直接影響，而是隨著浮台運動後，機艙位置產生相對應位移，造成進入轉子之風速及角度產生相對變化，因而影響功率擷取，造成最終浮動式發電功率較固定式不穩定。

5-8 抗颱風策略分析

本節模擬颱風條件下之極端風速與波浪情況下，考慮不同轉向(yaw)角度下，浮動半潛式風力發電機所受負載最小姿態最為穩定。環境與風機設定條件如下：風向與波浪方向始終來自同一方向、發電機力矩負載為 0、葉片旋角固定於 90 度，轉向(yaw)系統角度轉至 7 個不同位置，分別為 0 度、30 度、60 度、90 度、120 度、150 度及 180 度時，討論葉片根部、轉向(yaw)系統、浮台端繫纜器與海床端錨碇器在颱風條件影響下的負載與浮台穩定性分析。輸入由 TurbSim 產生符合 IEC 61400-1 規範的 50 年一遇之極端風況，其平均風速為 50m/s，波浪條件為有義波高 3m、週期 10.3s，模擬時間 200 秒，輸出如圖 5-26，包含風速、波浪波高、葉片旋角位置、機艙轉向(yaw)位置、葉片根部受力負載、轉向(yaw)系統受力負載、浮台六自由度位移、繫纜器 1 至 3 號受力負載、錨碇器 1 至 3 號受力負載。

討論於轉向(yaw)角 30 度時，此時風速與波浪條件造成風機葉片與塔柱共振，使葉片根部及轉向(yaw)系統所受負載特別大。

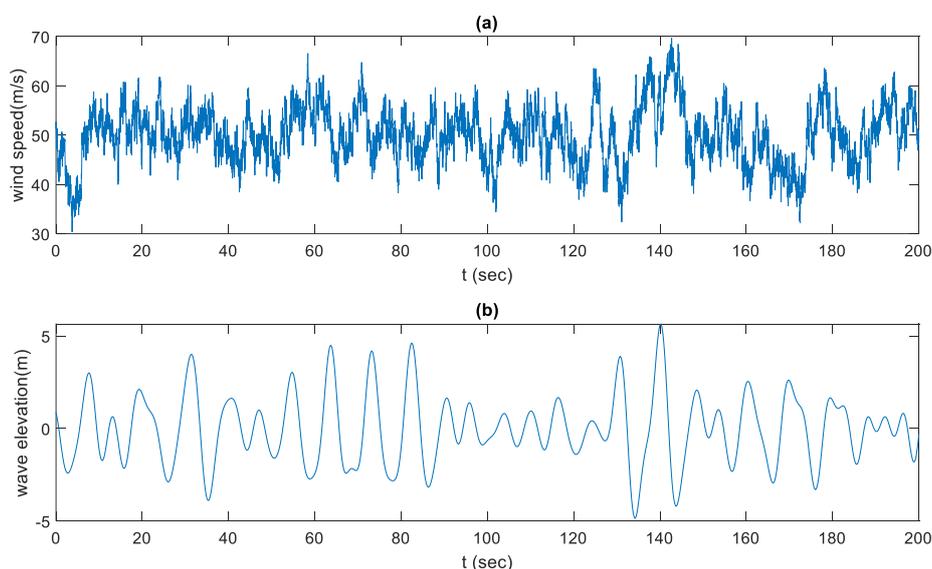


圖 5-26 (a)~(b)輸入極端風速與波浪條件下風力發電機於 7 個不同轉向(yaw)位

置之抗颱風策略分析

(a)風速、(b)波浪波高

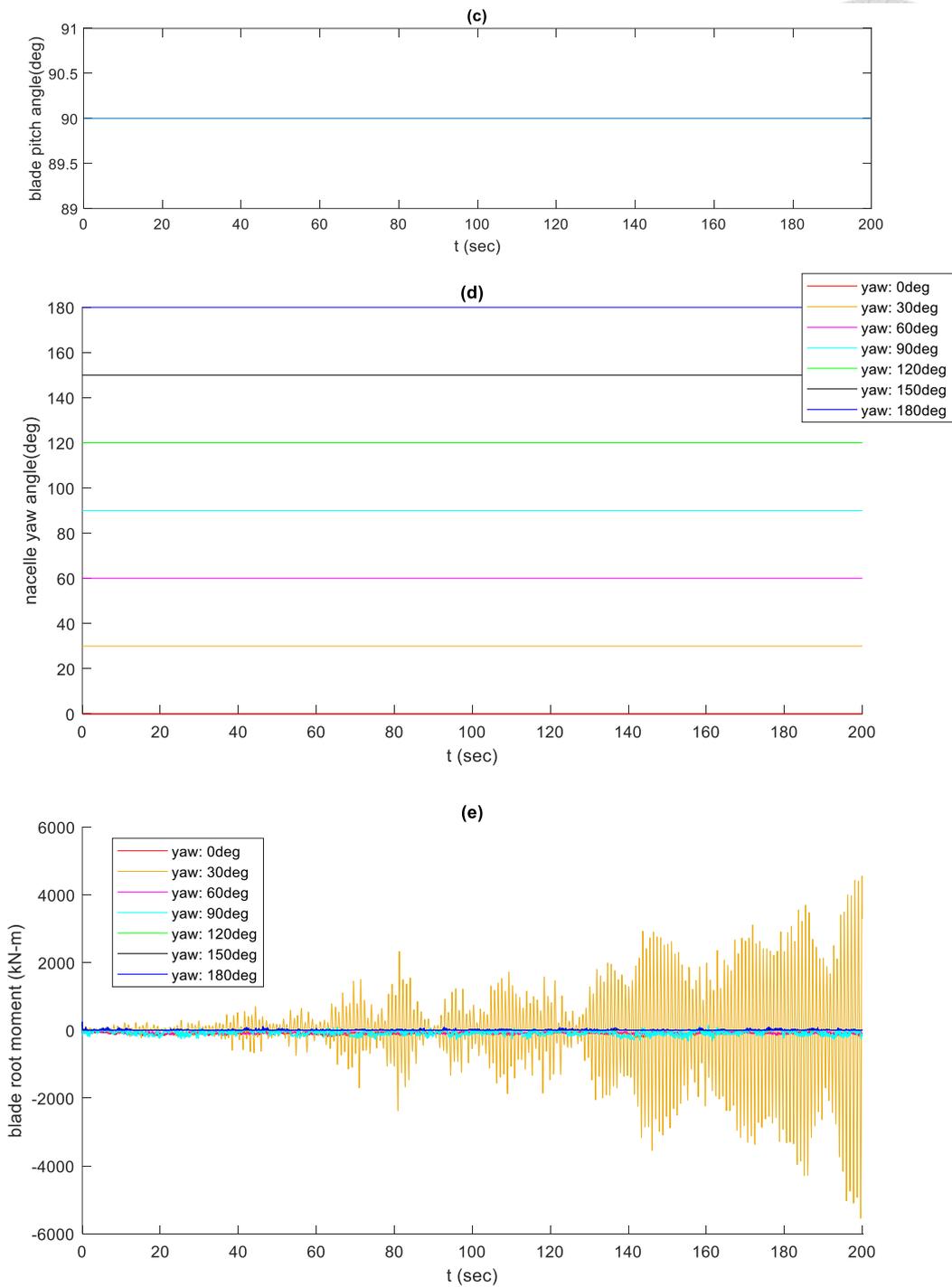


圖 5-26 (c)~(e)輸入極端風速與波浪條件下風力發電機於 7 個不同轉向(yaw)位置之抗颱風策略分析

(c) 葉片旋角位置、(d) 機艙轉向(yaw)位置、(e) 葉片根部受力負載

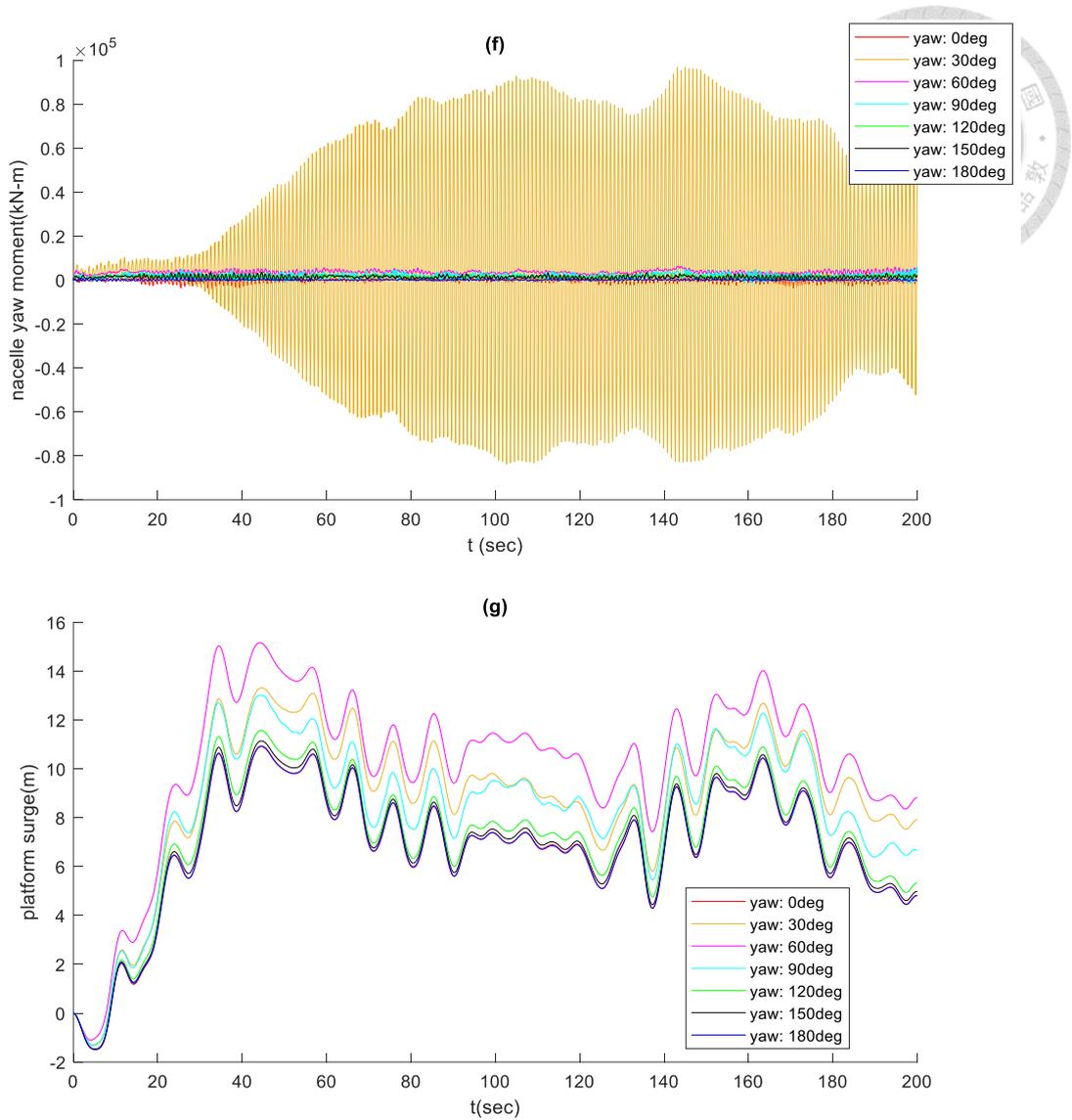


圖 5-26 (f)~(g)輸入極端風速與波浪條件下風力發電機於 7 個不同轉向(yaw)位

置之抗颱策略分析

(f) 轉向(yaw)系統受力負載、(g) 浮台縱移位移

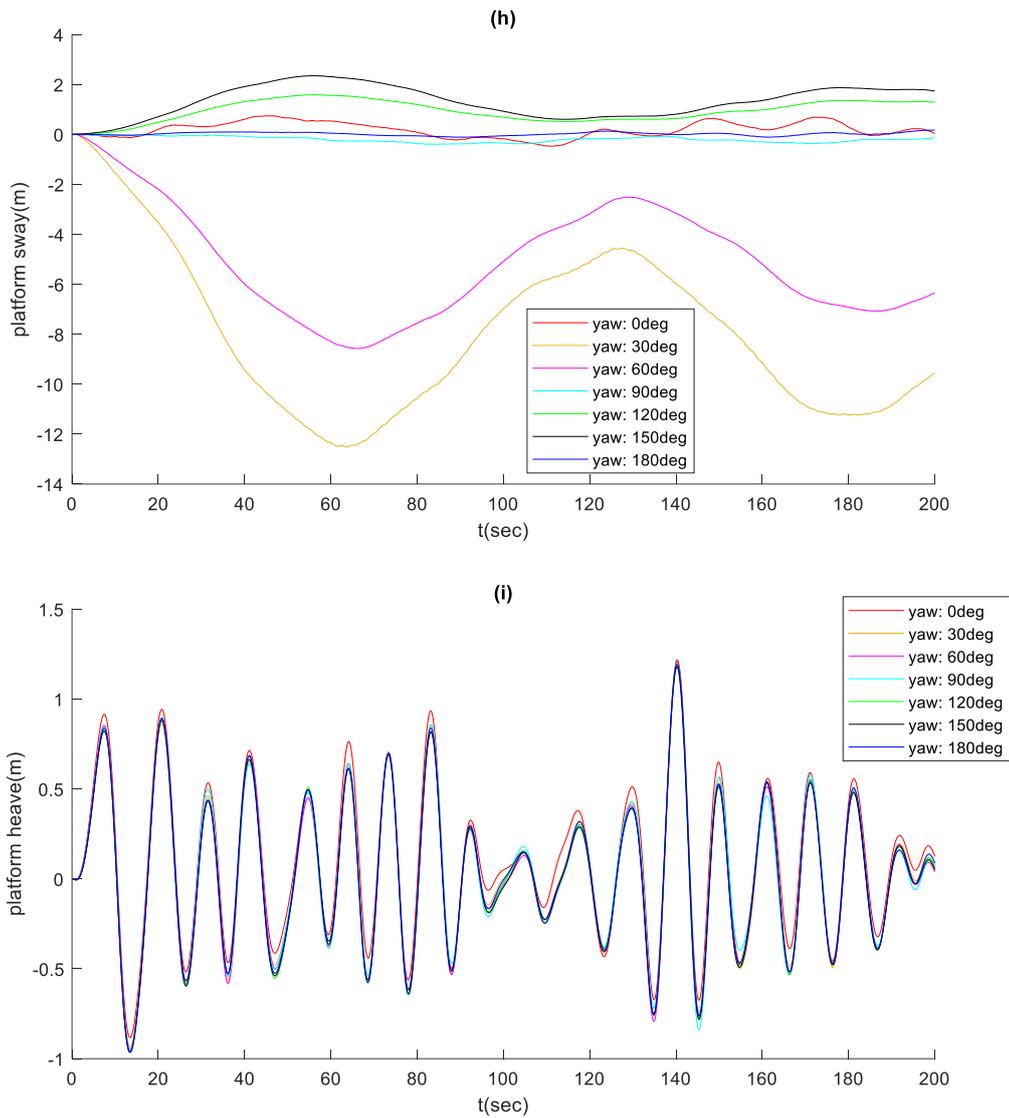


圖 5-26 (h)~(i)輸入極端風速與波浪條件下風力發電機於 7 個不同轉向(yaw)位置
之抗颱風策略分析

(h) 浮台橫移位移、(i) 浮台起伏位移

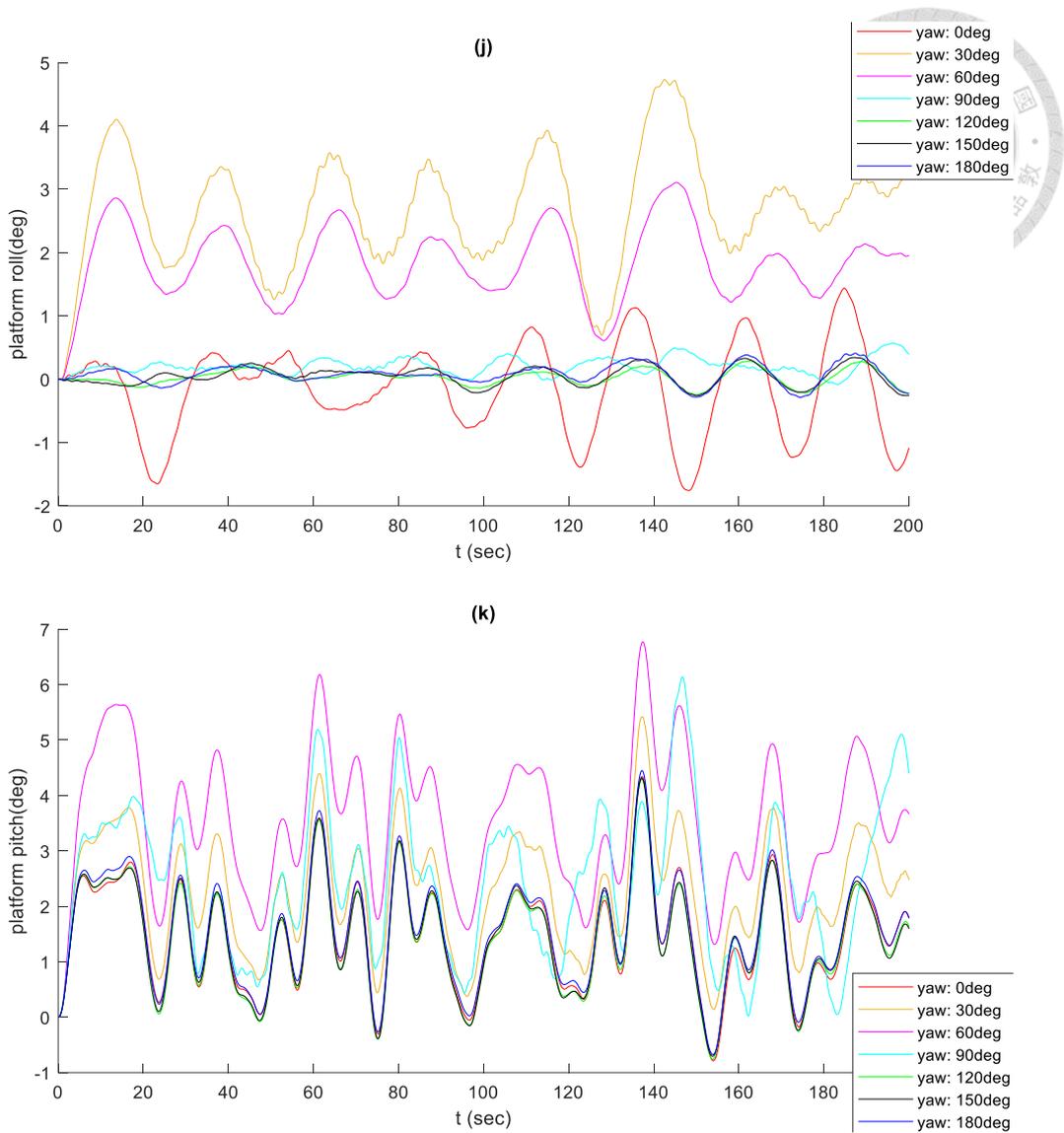


圖 5-26 (j)~(k)輸入極端風速與波浪條件下風力發電機於 7 個不同轉向(yaw)位置
之抗颱風策略分析

(j) 浮台橫搖角度、(k) 浮台俯仰(pitch)角度

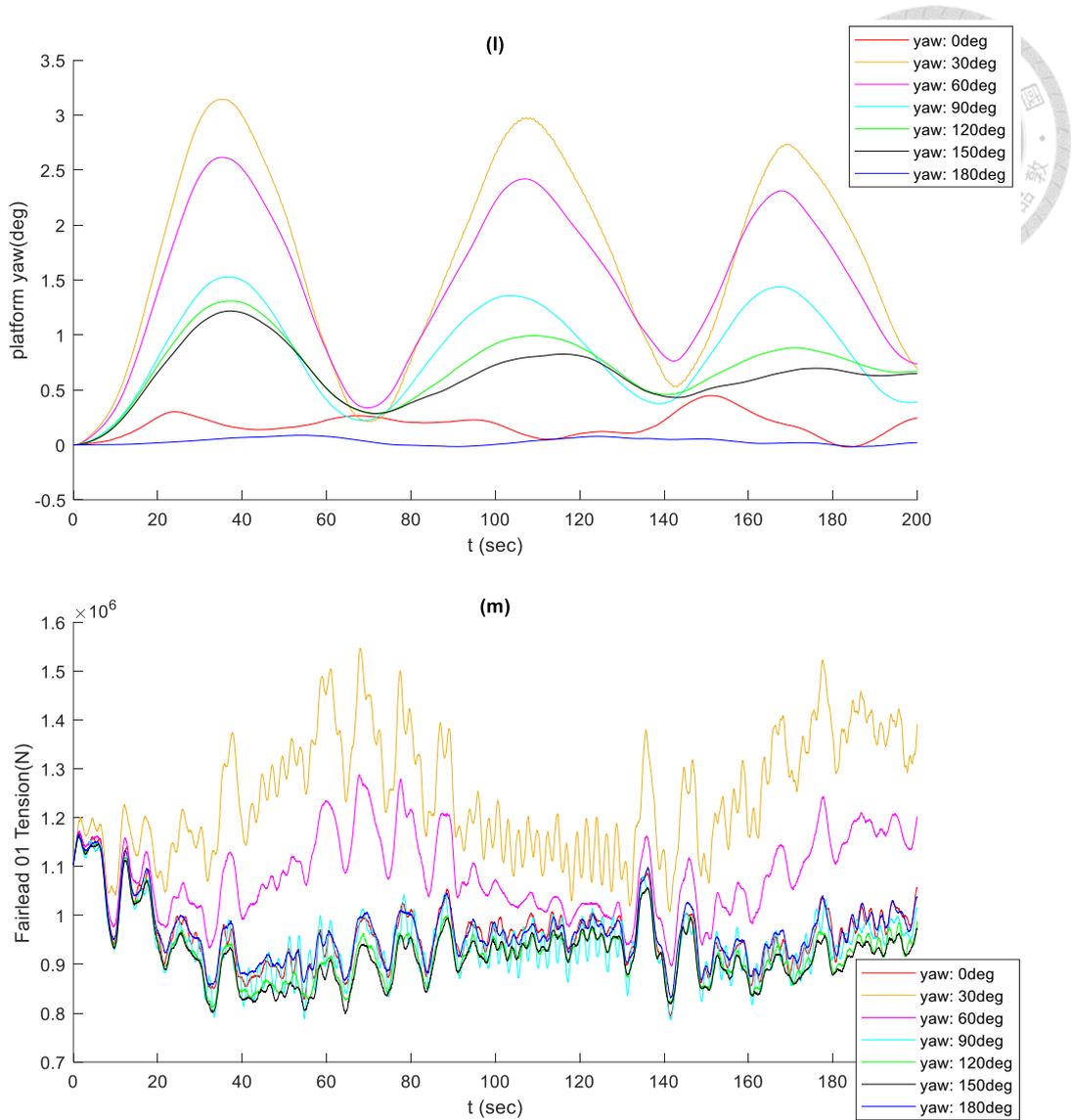


圖 5-26 (l)~(m)輸入極端風速與波浪條件下風力發電機於 7 個不同轉向(yaw)位

置之抗颱風策略分析

(l) 浮台平擺(yaw)角度、(m) 導纜器 1 號受力負載

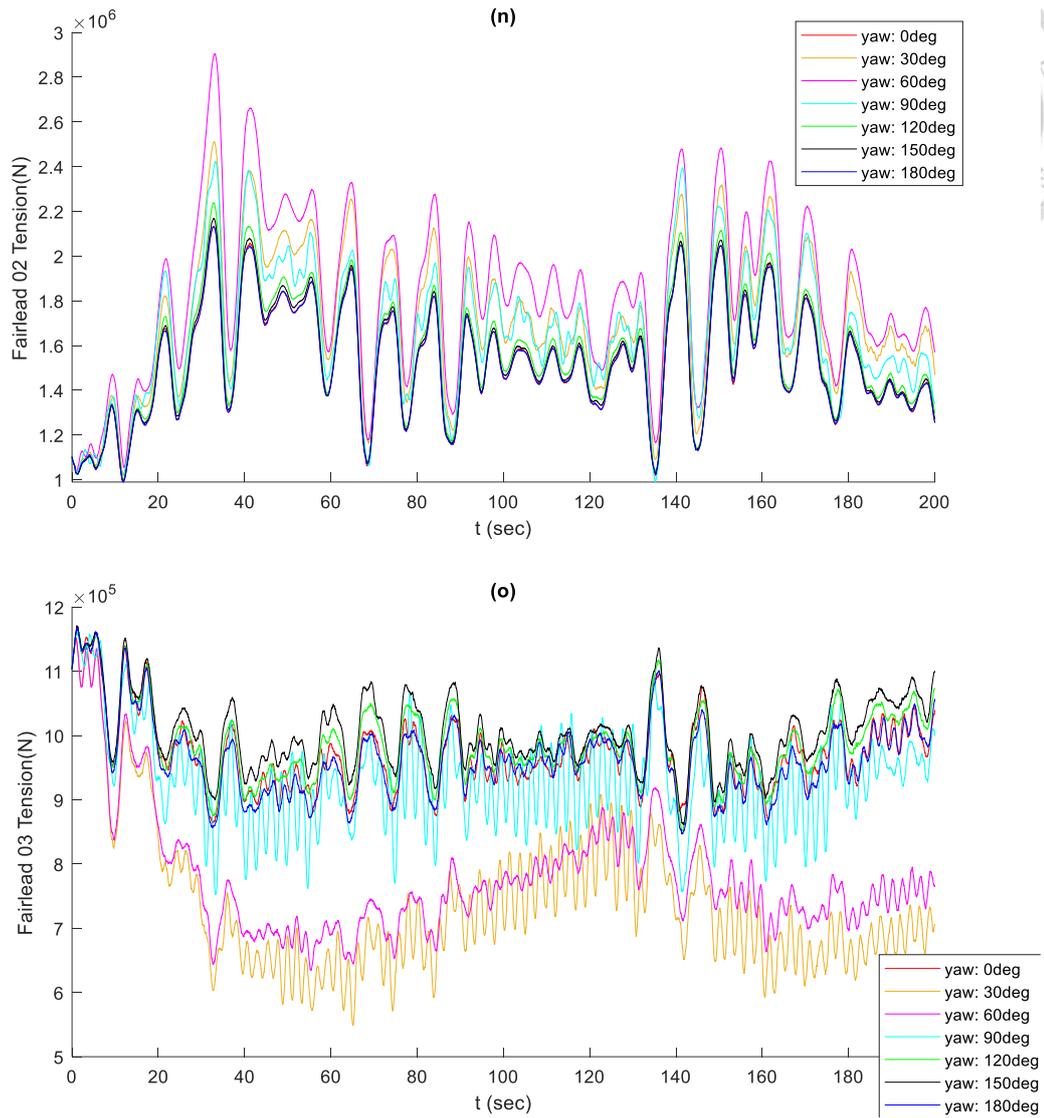


圖 5-26 (n)~(o)輸入極端風速與波浪條件下風力發電機於 7 個不同轉向(yaw)位

置之抗颱風策略分析

(n) 導纜器 2 號受力負載、(o) 導纜器 3 號受力負載

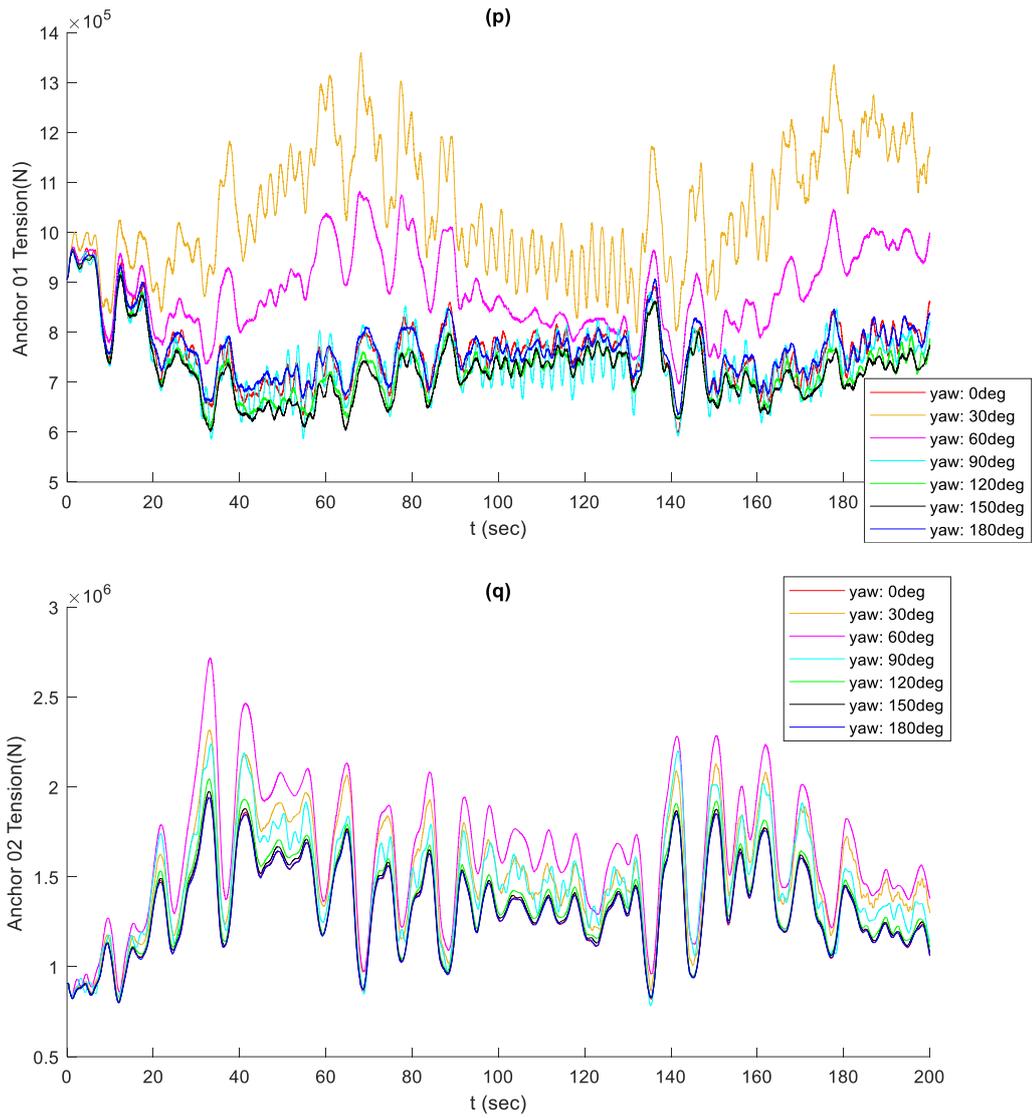


圖 5-26 (p)~(q)輸入極端風速與波浪條件下風力發電機於 7 個不同轉向(yaw)位

置之抗颱策略分析

(p) 錨碇器 1 號受力負載、(q) 錨碇器 2 號受力負載

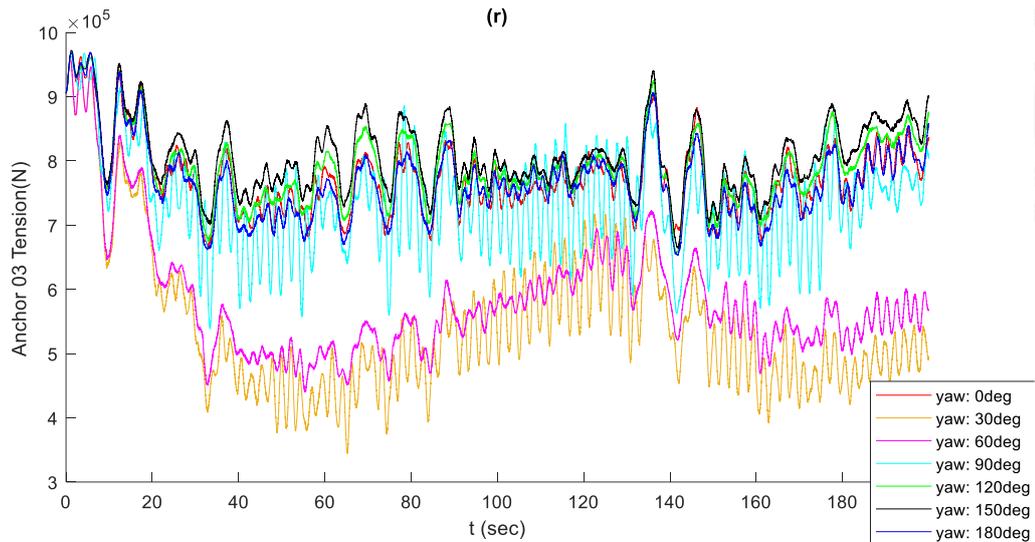


圖 5-26 (r)輸入極端風速與波浪條件下風力發電機於 7 個不同轉向(yaw)位置之
抗颱策略分析

(r) 錨碇器 3 號受力負載

根據表 5-1，討論項目共 14 項，包含風機葉片根部及機艙轉向(yaw)系統所受負載、錨碇系統 2 端碇點所受負載及浮台六自由度姿態穩定性分析，根據方均根值大小進行排序，方均根值越低者得分越少，每個項目權重相同，總得分最少者即綜合(考慮 1~14 項)表現最佳者(所受負載最小與姿態最穩定者)為轉向(yaw)位置為 180 度。因主要影響風機風能擷取在於葉片受力面(即機艙位置)姿態，浮台晃動程度大不一定代表機艙位置晃動程度也大，因此不考慮浮台六自由度穩定性分析，只考慮風機及錨碇系統所受負載(1~8 項)，得分最少者一樣為轉向(yaw)位置為 180 度。考慮風機壽命較浮台短，因此只考慮風機端所受負載，得分最少者為轉向(yaw)位置為 150 與 180 度時，此時 150 與 180 度並列最佳轉向(yaw)位置

表 5-1 抗颱風策略之 7 個不同轉向(yaw)位置得分表

編號	機艙轉向(yaw)位置	0 deg	30 deg	60 deg	90 deg	120 deg	150 deg	180 deg
1	葉片根部受力負載	5	7	4	6	2	1	3
2	機艙轉向(yaw)系統受力負載	2	7	6	5	4	3	1
3	繫纜器 1 號受力負載	4	7	6	3	2	1	5
4	繫纜器 2 號受力負載	2	6	7	5	4	3	1
5	繫纜器 3 號受力負載	5	1	2	3	6	7	4
6	錨碇器 1 號受力負載	4	7	6	3	2	1	5
7	錨碇器 2 號受力負載	2	6	7	5	4	3	1
8	錨碇器 3 號受力負載	5	1	2	3	6	7	4
9	浮台縱移位移	2	6	7	5	4	3	1
10	浮台橫移位移	3	7	6	2	4	5	1
11	浮台起伏位移	7	1	6	3	5	2	4
12	浮台橫搖角度	5	7	6	4	1	2	3
13	浮台俯仰(pitch)角度	3	5	7	6	1	2	4
14	浮台平擺(yaw)角度	2	7	6	5	4	3	1
	考慮所有情況(1~14)	51	75	78	58	49	43	38
	只考慮受力負載(1~8)	29	42	40	33	30	26	24
	只考慮風機受力(1~2)	7	14	10	11	6	4	4

表 5-2 抗颱策略之 7 個不同轉向(yaw)位置各項目方均根值列表

項目	機艙轉向 (yaw) 位置	單位						
		0 deg	30 deg	60 deg	90 deg	120 deg	150 deg	180 deg
葉片根部受 力負載	MN-m	0.0926	1.0969	0.0762	0.095	0.0067	0.0046	0.0167
機艙轉向 (yaw)系統受 力負載	MN-m	1.375	45.004	3.67	2.153	1.585	1.504	0.264
繫纜器 1 號 受力負載	MN	0.9622	1.2486	1.0868	0.945	0.9308	0.9248	0.9661
繫纜器 2 號 受力負載	MN	1.5467	1.7401	1.8717	1.6929	1.5835	1.5583	1.5448
繫纜器 3 號 受力負載	MN	0.9736	0.7466	0.7851	0.9333	0.9894	1.008	0.9672
錨碇器 1 號 受力負載	MN	0.7658	1.051	0.8897	0.7489	0.7344	0.7284	0.7696
錨碇器 2 號 受力負載	MN	1.3504	1.5441	1.6752	1.4967	1.3876	1.3622	1.3486
錨碇器 3 號 受力負載	MN	0.77684	0.55514	0.59232	0.73794	0.7928	0.81128	0.77072
浮台縱移位 移	m	7.348	9.4442	10.7564	8.9937	7.7946	7.5042	7.3478
浮台橫移位 移	m	0.3585	8.572	5.5722	0.2362	1.0294	1.4621	0.067
浮台起伏位 移	m	0.4184	0.4075	0.4115	0.4088	0.4103	0.4082	0.41
浮台橫搖角 度	deg	0.7398	2.817	1.9284	0.2416	0.1209	0.154	0.1685
浮台俯仰 (pitch)角度	deg	1.7472	2.5098	3.7873	2.7854	1.7065	1.7302	1.8317
浮台平擺 (yaw)角度	deg	0.2061	1.9122	1.633	0.9483	0.7728	0.6833	0.0435

第6章 結論與未來展望



6-1 結論

本文以 NREL 開發的 FAST 為主體結合 WAMIT 與 MATLAB/SIMULINK，完成 5MW 浮動半潛式離岸風力發電機全機組動態模擬與閉迴路控制。模型建立包含於 FAST 下進行浮台、錨碇系統、塔架、葉片及機艙模型建模，將自行發展的子系統動態模型在 MATLAB/SIMULINK 環境下建模，含發電機系統的直驅式永磁同步發電機(Direct-Drive Permanent Magnet Synchronous Generator)結合磁場導向控制(Field-Oriented Control)及電網側變流器控制(Grid-Side Converter Control)、其他子系統含葉片變旋角系統以及交流感應馬達驅動的機艙轉向(yaw)系統等，除了考慮氣動力外，水動力部分結合 WAMIT、HydroDyn 與 MoorDyn，考慮波浪力施加於浮台及繫纜後，對於浮動半潛式離岸風力發電機組的動態及其發電功率的影響。完成全機建模後，發展運轉控制策略包含追蹤最佳葉尖速比區與功率恆定區，追蹤最佳葉尖速比區即在低於額定風速下透過永磁同步發電機轉速控制，使發電機轉速追蹤最佳葉尖速比所換算之轉速目標值，以維持較佳功率係數，保持最佳發電功率；功率恆定區則是在高於額定風速後，為穩定發電機轉速與發電功率，不讓轉子超速造成機組損害，透過調整葉片旋角降低風能擷取效率來實現。

另外進行了浮動式與固定式差異討論，差異主要在於浮動式多了浮台運動，會影響機艙位置，造成風機葉片受力面及所受相對風速與絕對風速及角度差異，影響發電功率。最後進行在不同轉向(yaw)位置下的抗颱風策略分析，以葉片旋角位置 90 度且機艙轉向(yaw)位置 180 度為最佳抗颱風位置。

6-2 未來展望

波浪力對於浮動式風機的動態影響明顯較固定式風機大，固定式風機基本上即使有波浪力負載，但基樁部分幾乎是沒有位移的，而這點在浮動式上就不同了，六自由度都有一定程度位移變化，尤其是在浮台縱移位移與俯仰(pitch)角變化較大，同時對於風機穩定及發電功率有較為明顯影響，以本篇論文只有葉片旋角主動控制情況來看，旋角些微變化對整體發電功率有很大影響，所以葉片旋角控制在未來建議加入浮台俯仰(pitch)角變化做為另一項控制變因。

浮台各自由度穩定對於整體發電功率穩定或是全機機械負載降低分別有多大程度的影響，通過特定幾個自由度的穩定達到上述目的，也是未來可以作為另一項探討主題。

對於同一浮台與錨碇系統配置而言，入射波浪的角度不同，對於浮台造成的負載與動態亦有所不同，因此在不同入射波角度下探討浮台可以有較穩定姿態或是較穩定之發電功率是未來可以進行的分析。

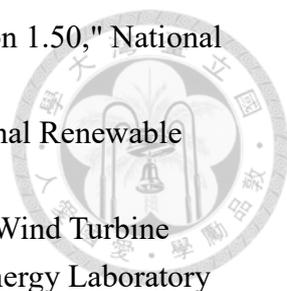
目前對於浮動式風力發電機發電功率穩定的研究以浮台及風機全機姿態穩定為主要研究方向，順著此邏輯往下深入的話，浮台主動或被動平衡控制便成為浮動式風機與固定式風機最大差異，而這邊重心放在主動平衡上，主動控制的方式是未來值得發展的研究方向。

針對抗颱風策略部分，其一是未來整合專業動態分析軟體如 ADAMS 或 Simpack 可以有效觀察到動態及負載變化關係，如 5-8 節中機艙轉向(yaw)角在 30 度時風機葉片根部及機艙轉向(yaw)系統所受負載特別大，可以透過觀察葉片及塔柱在各分段及各自由度位移，透過軟體視覺化將其用不同顏色表示，使分析人員可以較快較直覺取得究竟是在哪個位置哪個自由度下因為共振造成較大位移，進而影響其所受負載，其二因為浮台多了額外的自由度，抗颱風模式可以探討以機艙轉向(yaw)系統被動式或主動式平衡浮式風機全機動態或是減低機艙轉向(yaw)負載以外的受力負載之研究。

參考文獻



- [1] A. Myhr, C. Bjerkseter, A. Ågotnes, and T. A. Nygaard, "Levelised cost of energy for offshore floating wind turbines in a life cycle perspective," *Renewable Energy*, vol. 66, pp. 714-728, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2014.01.017.
- [2] Antóniod F. de O. Falcão, "Wave energy utilization: A review of the technologies," October 22, 2009.
- [3] A. Cordle, "State of the Art in Floating Wind Turbine Design Tools," June 19 – 24, 2011.
- [4] A. Robertson, F. Vorpahl, W. Popko, J. Qvist, L. Frøyd, X. Chen, J. Azcona, E. Uzunoglu, C. Guedes Soares, C. Luan, H. Yutong, F. Pengcheng, A. Yde, T. Larsen, J. Nichols, R. Buils, L. Lei, T. Anders Nygard, D. Manolas, A. Heege, S. Ringdalen Vatne, H. Ormberg, T. Duarte, C. Godreau, H. Fabricius Hansen, A. Wedel Nielsen, H. Riber, C. Le Cunff, R. Abele, F. Beyer, A. Yamaguchi, K. Jin Jung, H. Shin, W. Shi, H. Park, M. Alves, and M. Guérinel, "Offshore Code Comparison Collaboration Continuation Within IEA Wind Task 30: Phase II Results Regarding a Floating Semisubmersible Wind System," June 8–13, 2014.
- [5] A. Robertson, M. Masciola, and H. Song, A. Goupee and A. Coulling, C. Luan, "Definition of the Semisubmersible Floating System for Phase II of OC4," September 2014.
- [6] M. A. Joao Cruz, "Floating offshore wind energy: The next generation of wind energy," 2016.
- [7] D. Matha, "Impact of Aerodynamics and Mooring System on Dynamic Response of Floating Wind Turbines," July 19, 2016.
- [8] DNVGL-ST-0119, "Floating wind turbine structures," July 2018.
- [9] S. R. Saeed Karimian Aliabadi, "Effect of Platform Surge Motion on the Performance of 5MW NREL Offshore Floating Wind Turbine," October 21, 2019.
- [10] 石原孟, "福島復興浮體式洋上 Wind-Farm 實證研究事業."
- [11] S. T. K. H. Wang, T.G. Wang a, S.Y. Zhu, "Typhoon-induced vibration response and the working mechanism of large wind turbine considering multi-stage effects," February 4, 2020.
- [12] 牛山泉, *風車工學入門：從基礎理論到風力發電技術*. 國立澎湖科技大學, 2009.
- [13] J. Jonkman-NREL, "NREL 5MW Offshore Baseline Turbine and Controller Specifications," June 26 2006.

- 
- [14] B. Jonkman and J. Jonkman, "TurbSim User's Guide: Version 1.50," National Renewable Energy Laboratory (NREL), Aug 2009.
- [15] M. L. B. J. Jason M. Jonkman, "FAST User's Guide," National Renewable Energy Laboratory (NREL), August 2005.
- [16] A. C. H. David J. Laino, "AeroDyn USER'S GUIDE to the Wind Turbine Aerodynamics Computer Software," National Renewable Energy Laboratory (NREL), Dec 2002.
- [17] I. WAMIT. WAMIT USER MANUAL Version 7.3.
- [18] M. Hall, "MoorDyn User's Guide," August 16, 2017.
- [19] A. N. R. J.M. Jonkman, G.J. Hayman, "HydroDyn User's Guide and Theory Manual."
- [20] Jason Jonkman and Bonnie Jonkman. (july 26, 2016). FAST v8.16.00a-bjj.
- [21] K. R. Yi-Hsiang Yu, Jennifer Van Rij, Nathan Tom, Dominic Forbush. "<https://wec-sim.github.io/WEC-Sim/index.html>." (accessed.
- [22] S. Suryanarayanan and A. Dixit, "Control of large wind turbines: Review and suggested approach to multivariable design," in *Proceedings of the National Conference on Controls and Dynamic Systems*, 2005: Citeseer.
- [23] 陳威宏, "5MW 離岸風力發電機整合直驅式永磁同步發電機與併網之全機組運轉控制研究," July, 2016.
- [24] S. Vijayalakshmi, S. Saikumar, S. Saravanan, R. Sandip, and V. Sridhar, "Modelling and control of a wind turbine using permanent magnet synchronous generator," *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 2377-2384, 2011.
- [25] A. Rolan, A. Luna, G. Vazquez, D. Aguilar, and G. Azevedo, "Modeling of a variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator," in *Industrial Electronics, 2009. ISIE 2009. IEEE International Symposium on*, 2009: IEEE, pp. 734-739.
- [26] S. K. Bisoyi, R. Jarial, and R. Gupta, "Modeling and control of variable speed wind turbine equipped with pmsg," *International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences*, vol. 13, p. 513.
- [27] Y.-S. Kim, I.-Y. Chung, and S.-I. Moon, "An Analysis of Variable-Speed Wind Turbine Power-Control Methods with Fluctuating Wind Speed," *Energies*, vol. 6, no. 7, p. 3323, 2013. [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/1996-1073/6/7/3323>.
- [28] S.Y. Yang, Y.K. Wu, and H.J. Lin, "New application of predictive direct torque control in permanent magnet synchronous generator-based wind turbine," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 7, no. 2, p. 023108, 2015, doi: [doi:http://dx.doi.org/10.1063/1.4915261](http://dx.doi.org/10.1063/1.4915261).

- [29] Harakosan, "Technical description of the Z72 wind turbine."
- [30] D. K. Bethany Speer, and Suzanne Tegen, "Floating Offshore Wind in California: Gross Potential for Jobs and Economic Impacts from Two Future Scenarios," April 2016.

