

出國報告（出國類別：進修）

赴英國 NEWCASTLE 大學進修再生
能源碩士學位

服務機關：台灣電力公司 營建處

姓名職稱：林俊昌 發電設計專員

派赴國家：英國

出國期間：97 年 12 月 30 日至 99 年 12 月 29 日

報告日期：100 年 03 月 7 日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

赴英國 NEWCASTLE 大學進修再生能源碩士學位

頁數 73 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/陳德隆/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

林俊昌/台灣電力公司/營建處/變電設計專員/(02) 2366-6965

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：97 年 12 月 30 日至 99 年 12 月 29 日 出國地區：英國

報告日期：100 年 03 月 07 日

分類號/目

關鍵詞：內容摘要：(二百至三百字)

首先說明出國進修的緣由與目的，並對獲得的支持與協助表達感謝之意。接著描述出國進修的行程、學校簡介及進修課程的架構與內容等。接下來為心得與感想及建議。最後，說明專題研究與論文寫作，自選題目為「彰化離岸風力計畫故障之忍受能力」，報告內容包括研究背景及動機、彰化離岸風力計畫簡介、風場模型建構、故障忍受能力案例分析、討論及結論等；模擬結果發現，彰化離岸風力計畫第一期及第二期如使用雙饋式感應發電機，在面對市電端電力系統三相故障時，風場有足夠的故障忍受能力而不跳脫。隨後報告出國期間所遭遇之困難與特殊事項。

目錄

目	錄.....	i
壹	出國緣由與目的.....	1
貳	過程.....	2
參	進修心得與建議事項.....	7
肆	論文專題報告：彰化離岸風力發電廠之故障忍受能力 (Fault Ride Through Capability of Chanhua Offshore Wind Farm in Taiwan)	8
	第一章 緒論.....	8
	1.1 研究背景與動機.....	8
	1.2 世界風力發電發展概況.....	10
	1.3 研究目的.....	14
	第二章 文獻回顧.....	16
	2.1 前人研究.....	16
	2.2 風力發電機電氣相關理論	20
	第三章 風力發電廠模型建構	27
	3.1 計畫介紹.....	27
	3.2 風力發電廠模型建構.....	30
	第四章 彰化離岸風力計畫故障忍受能力分析	42
	4.1 第一期風機系統之三相故障分析	42
	4.2 第一期風機系統之三相故障分析並聯STATCOM	46
	4.3 第二期風機系統之三相故障分析	50
	4.4 第二期風機系統之三相故障分析並聯STATCOM	55
	第五章 討論.....	60
	5.1 第一期風機系統之三相故障分析結果討論	60
	5.2 第二期風機系統之三相故障分析結果討論	61
	第六章 結論與建議.....	63
	6.1 結論.....	63
	6.2 建議.....	63
	參考文獻.....	64
	附錄 A.DFIG 風力發電機控制方塊圖	67
	附錄 B.GE 風力發電機參數.....	68
	附錄 C.GE 風力發電機控制模組.....	69

附錄 D. STATCOM 單線圖及控制方塊圖	71
附錄 E. 風力發電機及轉換器跳脫時間及等級	72
伍 出國期間遭遇的困難與特殊事項	73

壹、出國緣由與目的

「高品質的工程，源自於專業的規劃」，因應京都議定書生效 CO2 減量政策，再生能源發電工程之推動成為國家發展的重點，本處負責本公司再生能源工程之規劃設計及工程管理等工作，由於本公司以往並無離岸式風力發電工程之詳細規劃、設計及工程管理之經驗，且國內亦無相關經驗公司，因此有進修再生能源以提升本公司之技術能力的想法。

於 97 年在長官推薦下，參加公司「菁英留學計畫」出國進修人員甄試，該年度共選派 12 人，很幸運地通過甄選，獲得公司資助出國進修之機會，申請赴英國新堡大學(Newcastle University)進修再生能源碩士學位。

進修主題為再生能源技術，藉在營建處之工作經驗希擴大相關專業領域學習，論文更將本處即將執行之離岸風力案作更深入研究，以確保發電系統穩定性。

貳、過程

出返國行程

時間	地點	工作概要
97年12月30日~ 97年12月31日	桃園國際機場→阿姆斯特丹 →Newcastle國際機場→Newcastle city	去程: (台北→Newcastle)
98年01月01日~ 99年12月27日	英國 Newcastle University	進修再生能源碩士 學位
99年12月28日~ 99年12月29日	Newcastle→倫敦 Heathrow 國際 機場→桃園國際機場	回程: (Newcastle→倫敦→ 台北)

學校簡介

新堡大學 (Newcastle University)，是一所位於英格蘭泰恩河畔的英國一流著名大學，創建之初取名為泰恩河畔新堡大學(根據1963年8月的國會法案，「University of Newcastle upon Tyne」現在仍然是正式的大學名字)。大學也是英國名校聯盟羅素大學集團的成員之一(包含牛津、劍橋等20所學校，為英國的長春藤聯盟)，其校徽如圖 2.2-1 所示。新堡大學現有學生約 20000 人(2010-2011)，包括了來自於世界 100 多個國家的超過 3300 名的海外學生。



圖 2.2-1: 英國新堡大學校徽

在 2000 年，新堡大學獲得了泰晤士報年度最佳大學獎。新堡大學的醫學院一直都是英國最好的醫學院之一，並且是歐洲第一、世界第二個被授予人類幹細

胞研究許可的醫學機構。新堡大學的醫學專業 (Medicine) 和電子工程專業 (Electrical and Electronic Engineering) 在英國大學學科排名中一直名列前茅。

新堡大學也是英國公主尤金妮 (Princess Eugenie) 最鍾情的大學。尤金妮公主於 2009 年 9 月入讀新堡大學，剛剛年滿 19 歲的尤金妮在英國中學高級水平考試 (A-Levels) 三門科目中取得了兩門優秀、一門良好的優異成績，她也是迄今為止獲得最佳 A-level 成績的英國王室成員。

大學排名

- 1、在 2010 英國大學排名新堡大學位列全英第 21 位。
- 2、泰晤士報 2010 世界大學排名把新堡大學排在世界大學 500 強的第 140 位。

進修過程：

- 課前預習、課前作業、課前簡報→一周課程→課後考試→課後作業→R&D Project →Meeting →論文提交→口試
- 一份課前作業或課後作業(Assignment):1,5000~3,000 字。
- 課前簡報(Presentation)：10~20 分鐘。
- 考試：題目四選三或五選三
- 論文(Dissertation):12000 字(約 70~80 頁)。
- 口試(Oral exam)：約 1 小時。

課程內容簡介

新堡大學科學、農業及工程學院(Faculty of Science, Agriculture and Engineering) 的再生能源碩士學位(Master of Science in Renewable Energy)課程內容如表 2.3-1 所示，簡要說明如下。

課程代碼	課程名稱	學期	學分
SPG8001	再生能源概論 Resources	1	10
SPG8002	太陽光電及地熱能 Photovoltaics & Geothermal Energy	1	10
SPG8003	電機發電系統 Electrical Generation Systems	1	10
SPG8004	電力網路系統 Grid Systems	1	10
SPG8005	機械動力傳輸系統 Mechanical Power Transmission	1	10
SPG8006	風力及水力技術 Wind and Hydro Energy Technology	2	10
SPG8007	氫及燃料電池技術 Hydrogen and Fuel Cell Technology	2	10
SPG8008	生質及廢棄物能技術 Biomass and Waste Technology	2	10
SPG8009	政策、政治及道德 Policy, Politics and Ethics	2	10
SPG8010	海洋及離岸設備 Marine and offshore Devices	2	10
SPG8011	海洋及離岸結構及系統 Marine and Offshore Structures and Systems	2	10
SPG8012	能源管理 Energy Management	2	10
SPG8095	碩士專題及報告 Masters Project and Report	全年	60

表 2.3-1: 再生能源碩士課程內容

SPG8001. 再生能源概論 (Resources)

由 Dr. Yao Dong Wang 授課，主要內容包括全球能源使用概況；氣候變遷相關之政治、社會、環境及經濟等議題；再生能源的來源、蘊藏量及資源評估(包含太陽能、風力、水力、海浪、潮汐及生質能等)；能源轉換裝置簡介等。

SPG8002. 太陽光電及地熱能 (Photovoltaics & Geothermal Energy)

由 Dr. Catherine Gandy 授課，主要內容包括太陽光電及地熱發電之發電系統及轉換器系統，其中包含半導體技術之理論、裝置運作、處理及製造技術。太陽能電池之設計、製造及性能技術。地熱能之理論、場址選擇及發電廠型式。地源熱能之熱泵浦、鑽探、場址選擇及使用執照等。

SPG8003. 電機發電系統 (Electrical Generation Systems)

由 Dr. Rose Norman 授課，主要內容包括再生能源之電機工程學、太陽光電系統、微網路系統、發電機及電力電子轉換器原理。電磁理論、變壓器、同步機及感應機理論；電力電子轉換器電路；獨立的 PV 系統包含能源儲存裝置；網路連接至 PV 系統；變速發電機運轉等。

SPG8004. 電力網路系統 (Grid Systems)

由 Dr. Bashar Zahawi 授課，主要內容包括三相電力系統理論、傳輸線及電纜、實功率及虛功率潮流、線電壓及虛功率潮流的關係、標么系統的計算、故障等級的計算、負載潮流的計算、系統穩態穩定度、暫態穩定度、系統頻率及電壓控制、非對稱故障計算、諧波提供、保護系統、高壓直流傳輸及分散式發電系統對配電網路的影響。

SPG8005. 機械動力傳輸系統 (Mechanical Power Transmission)

由 Mr. Rob Davidson 授課，主要內容包括機械傳動系統、傳動系統元件 (軸承、培林、機殼)、轉距、機械性能及元件選擇；齒輪驅動、齒輪型式、主要特性、幾何結構、材料特性及製造方法。

SPG8006. 風力及水力技術 (Wind and Hydro Energy Technology)

由 Dr. Sandy Anderson 授課，主要內容包括水力能及風能發電的供應能力及扮演的角色；專案計畫經濟評估方法；水輪機及其不同型式的模型原理；風力機的安裝及設計；水力發電安裝設計；抽蓄發電。

SPG8007. 氫及燃料電池技術 (Hydrogen and Fuel Cell Technology)

由 Prof. Keith Scott 授課，主要內容包括物理化學(化學元素、熱力學、動力學及電化學)；反應工程學(介紹化學工程、材料及能量平衡、熱轉換分離程序及過程設計)；氫製造；氫經濟；燃料電池技術；蓄電池技術；超級電容器。

SPG8008. 生質及廢棄物能技術 (Biomass and Waste Technology)

由 Dr. Paul Billsborrow 授課，主要內容包括生質能資源、政策及對歐洲及英國的潛在貢獻；生質熱能；氣化；厭氧消化；生質燃料技術；環境議題；經濟及成本。

SPG8009. 政策、政治及道德 (Policy, Politics and Ethics)

由 Mr. Euring lan Arbon 授課，主要內容包括永續及再生能源；再生能源的國際政治及道德議題；英國再生能源之政治概況；地區再生能源概況；環境衝擊議題。

SPG8010. 海洋及離岸設備 (Marine and offshore Devices)

由 Prof Martin Downie 及 Mr Graeme Mackie 授課，主要內容為再生能源相關之海洋及離岸工程，包括海浪發電、潮汐發電及離岸風力發電之設計原理，並分析其生命週期。

SPG8011. 海洋及離岸結構及系統 (Marine and Offshore Structures and Systems)

由 Prof Martin Downie 授課，主要內容包括流體力學、海洋結構及侵蝕、海洋基礎及拉錨設計、海洋流體力學。

SPG8012. 能源管理 (Energy Management)

由 Ms. Sharon Joyce 授課，主要內容包括能源的需求面的管理、政策、規範及財務的面的驅動力、監測及改善目標、能源效率技術及方法、人因素及實際能源的帳務審查。

SPG8095. 碩士專題及報告 (Masters Project and Report)

在實際進行專題研究前，先與學校的授課老師討論，尋找對公司有幫助的研究題目，在初步瞭解學校的資源及老師的專業背景後，決定將論文題目訂在公司即將發展的離岸風力發電計畫上，並定時與指導老師會面討論，最後提出書面報告，並對口試評審委員進行簡報。詳細研究報告內容請參閱報告肆。

參、進修心得與建議事項

心得

1. 由於課程的教學方式於台灣有很大的不同，因此學習“自我學習知識、時間管理及組織條理能力”非常重要，例如：每一門課程通常在開始之前會有作業，因此在未受過這門課的專業知識前，學生需有自我學習知識的能力，以完成課前作業。而在課程結束後會有考試，因英國課程時間緊湊，所以時間管理及組織條理能力非常重要。
2. 課程中有許多機會和其他國際學生及英國學生一起討論學習。兩年的進修，不只增進了我的語言能力，開拓了我的視野，也認識到不少不同國籍的朋友，瞭解不同文化的風俗民情，最重要的是學習到了如何自我增進專業知識及與外國人溝通，這是一輩子受用的難能可貴經驗。
3. 課程中有許多機會需上台做簡報，由於語言的因素，每次演講皆須花費相當的精神及時間準備，因此獲益良多。

建議

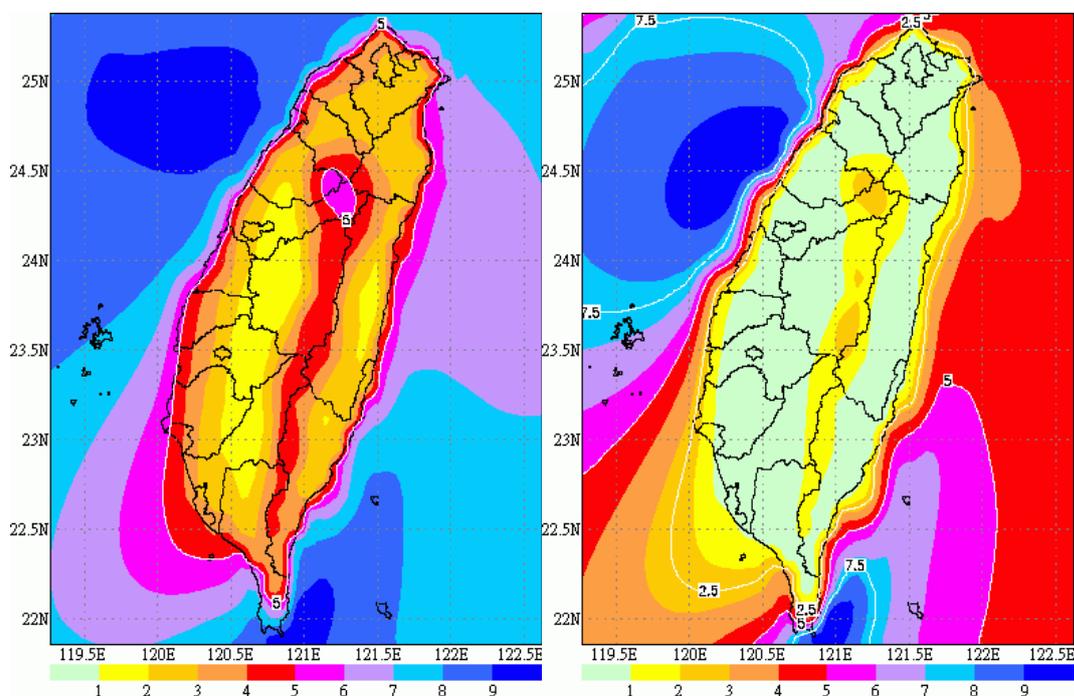
1. 在進修過程中，經常需要向廠商要一些技術資料，廠商也大多樂意提供，因此未來如有技術上的需求可以直接 email 原廠，請之提供協助。
2. 近年來離岸風力發電裝置容量在國外快速成長，其設計規劃及運轉經驗也累積了一段時間，建議本公司可與歐洲的電力系統運轉公司交流，另外也可多參加歐美的風力研討會以學習國外的設計規畫經驗。
3. 英文是國際共通的語言，所有新的科技皆會以英文發表在網路上，因此建議同仁平時即應加強外語能力，不只可吸收新知加強個人本職學能，而且當公司有出國進修考察機會時方不至於來不及準備。

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

在台灣約超過 97%的能源消耗是由國外進口其中包含煤、石油、天然氣及鈾。依據台灣電力公司長期電力發展預測，國家的尖峰負載將由 2008 年的 34353MW 增加到 2017 年的 47008MW，也就是說發電機組的容量需增加約 12655MW [1]。政府想要發展再生能源不只在於降低燃料進口的依賴更重要的是有益於環境生態。經濟部能源局於 2002 年頒布了再生能源發展條例以推展乾淨能源，另外為了達到非核家園政策，行政院於 2003 年訂定了在 2010 年前國家電力供應的 10%由再生能源提供目標，在 2007 年的工業技術政策會議決議，再生能源的裝置容量在 2025 年前需到達 16%(約 8450MW)，其中主要發展的內容為太陽光電、風力、生質能、太陽熱能、地熱、水力、海洋能及氫等 [2]。

由於台灣為一太平洋上之亞熱帶島嶼，一年中吹東北風時間達六個月，沿著海岸、山及離岸，其潛在的風能龐大且其平均風速可達 4m/s。依據研究報告，台灣地區約有 2000km²的面積其風速超過 4m/s，也就是說其潛在的風能為 3000MW [3]，其中 1000MW 為岸上及 2000MW 為離岸 [2]。1996 年到 2000 年間台灣地區在 50 公尺高的平均風速(m/s)及平均風能($\times 100W/m^2$)分佈圖如圖 1.1 所示 [11]。



(a)

(b)

圖 1.1 1996 年到 2000 年間台灣地區在 50 公尺高的(a)平均風速(m/s)；(b)平均風能($\times 100W/m^2$)分佈圖[11]。

台灣政府已於 2000 年開始推展建造風力發電廠，截至 2007 年止，風力發電的總裝置容量已達 280MW 且另有 500MW 的風機正在規劃建造中。由於台灣民眾多半不歡迎風機安裝於住家附近，且現在社會民意高漲，對於岸上風力計畫的執行日益困難，未來離岸風力將是一個較為可行的解決方案。而且，台電公司幾乎已將潛在的岸上風力發電規劃完成且已有部分離岸風力計畫完成規劃。未來，台電將於彰化海上建造一個 300 台風力發電機的離岸風力發電廠，其計畫佈置圖如圖 1.2 (a)所示；其平均風速在 110m 高處分佈圖如圖 1.2(b)所示。從圖 1.2 中可以發現在高程為 110m 時北區的平均風速為 10-12m/s；南區為 12-14m/s。由於到目前為止台灣尚未有離岸風力發電的建造及運轉經驗，因此確有必要研究此一計畫對於電力系統的影響。

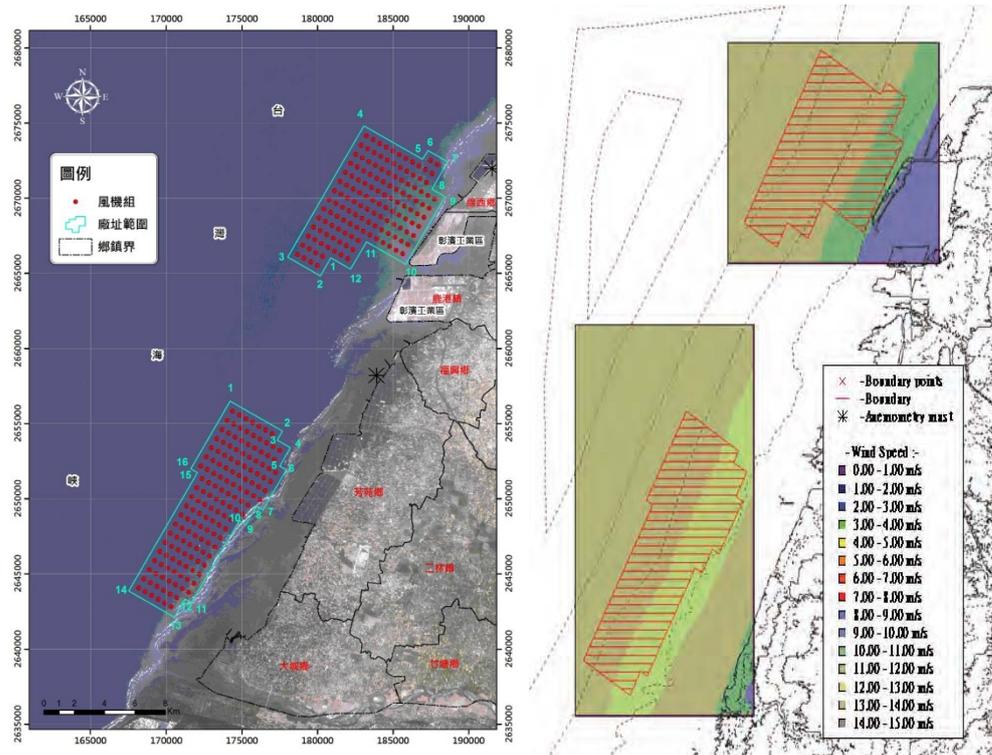
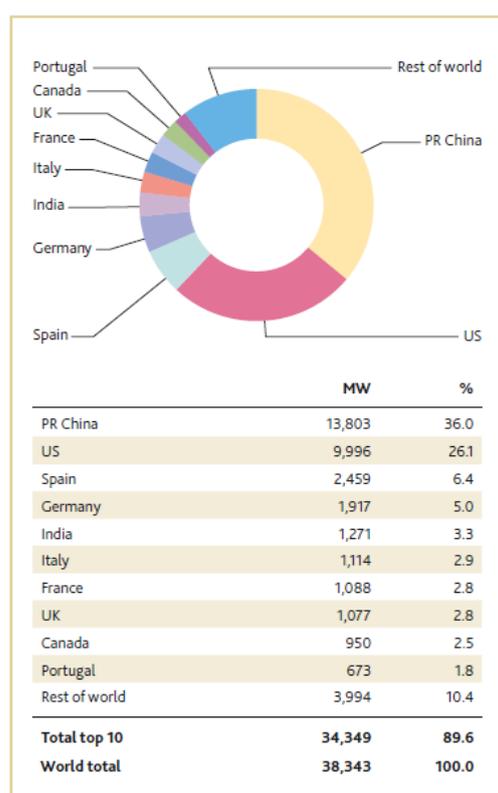


圖 1.2 彰化的離岸風力發電計畫，(a)300 台風力發電機計畫佈置圖；(b) 在 110m 高處平均風速分佈圖 [10]。

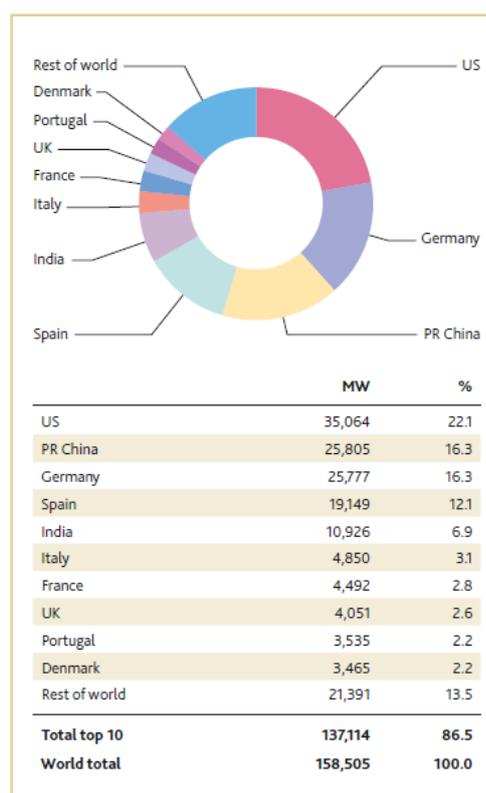
1.2 世界風力發電發展概況

全球風能市場

根據全球風能協會(GWEC)的統計，2009年風能市場比2008年成長41.5%，其裝置容量增加38GW至158.5GW，其中新裝置容量前五名的國家為：中國(13,803MW)、美國(9,996MW)、西班牙(2,459MW)、德國(1,917MW)及印度(1,271MW)，其2009年新安裝風機容量前十名的國家如圖1.3(a)所示；截至2009年累計風機裝置容量前十名的國家如圖1.3(b)所示。如依照區域劃分，全球各區之累計風機裝置容量如表1.1所示，由表中可以明顯發現中國的風機總裝置容量從2008年的12.1GW增加到2009年25.8GW，增加幅度超過100%且成為世界第二大的風機市場，其2009年新增之風機容量亦大於歐洲所有國家之總裝置容量。另外，從表中可發現台灣之裝置容量在2009年新增78MW，其累計之風機裝置容量為436MW。全球風能協會預估未來全球風機之裝置容量將達409GW，而其中亞洲、北美及歐洲將扮演主要的驅動力。



(a)



(b)

圖 1.3 (a)2009 年新安裝風機容量前十名的國家；(b)截至 2009 年累計風機裝置容量前十名的國家 [5]

表 1.1 依照區域劃分，全球各區之累計風機裝置容量(MW)[5]

		End 2008	New 2009	Total end 2009
AFRICA & MIDDLE EAST	Egypt	365	65	430
	Morocco	134	119	253
	Iran	85	7	91
	Tunisia	20	34	54
	Cap Verde	12	0	12
	South Africa	8	0	8
	Israel	8	0	8
	Kenya	0	5	5
	Other ¹⁾	4	0	4
	Total	635	230	865
ASIA	PR China	12,020	13,803	25,805
	India	9,655	1,271	10,926
	Japan	1,880	178	2,056
	Taiwan	358	78	436
	South Korea	236	112	348
	Philippines	33	0	33
	Other ²⁾	6	0	6
	Total	24,188	15,442	39,610
EUROPE	Germany	23,903	1,917	25,777
	Spain	16,689	2,459	19,149
	Italy	3,736	1,114	4,850
	France	3,404	1,088	4,492
	UK	2,974	1,077	4,051
	Portugal	2,862	673	3,535
	Denmark	3,163	334	3,465
	Netherlands	2,225	39	2,229
	Sweden	1,048	512	1,560
	Ireland	1,027	233	1,260
	Greece	985	102	1,087
	Austria	995	0	995
	Turkey	458	343	801
	Poland	544	181	725
	Belgium	415	149	563
	Rest of Europe ³⁾	1,313	304	1,614
	Total Europe	65,741	10,526	76,152
	<i>of which EU-Z⁴⁾</i>	<i>64,719</i>	<i>10,163</i>	<i>74,767</i>
LATIN AMERICA & CARIBBEAN	Brazil	341	264	606
	Mexico	85	117	202
	Chile	20	148	168
	Costa Rica	74	50	123
	Nicaragua	0	40	40
	Caribbean	35	0	35
	Argentina	29	2	31
	Uruguay	20	0	20
	Jamaica	22	1	23
	Colombia	20	0	20
Others ⁵⁾	6	0	6	
	Total	653	622	1,274
NORTH AMERICA	USA	25,068	9,996	35,064
	Canada	2,369	950	3,319
	Total	27,437	10,946	38,383
PACIFIC REGION	Australia	1,306	406	1,712
	New Zealand	325	171	497
	Pacific Islands	12	0	12
	Total	1,643	577	2,221
	World total	120,297	38,343	158,505

1 Lebanon, Nigeria, Jordan

2 Thailand, Bangladesh, Indonesia, Sri Lanka

3 Bulgaria, Croatia, Czech Republic, Estonia, Faroe Islands, Finland, Hungary, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Norway, Romania, Russia, Slovakia, Slovenia, Switzerland, Ukraine

4 Austria, Belgium, Bulgaria, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Italy, Ireland, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Netherlands, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, UK

5 Cuba, Peru

Please note:
project de-commissioning of 134.3 MW
and rounding affect the final sums

Source:GWEC

全球風機產業概況

現階段全球約有 10 家主要廠商生產風力發電機，如表 1.2 所示，其中前五名就有 2 家中國廠商，合計前十名中國廠商市佔率就高達 22.9%是所有國家廠商中最高，由此可知中國的風機製造市場成長非常快速。

表 1.2 2007 到 2009 年全球前十名之風機廠商及其市佔率 [6]

Company	Country	2009	2008	2007
Vestas	Denmark	12.5%	19.8%	22.7%
GE Energy	United States	12.4%	18.6%	16.6%
Sinovel	China	9.2%	5%	3.4%
Enercon	Germany	8.5%	10%	14%
Goldwind	China	7.2%	4%	4.2%
Gamesa	Spain	6.7%	12%	15.4%
Dongfang	China	6.5%	3.7%	1.1%
Suzlon	India	6.4%	9%	10.5%
Siemens	Denmark	5.9%	6.9%	7.1%
Repower	Germany	3.4%	3.3%	3.3%

離岸風力發電發展概況

相較於岸上風力，離岸風力擁有較高、穩定及不受地形影響之風速，雖然現階段離岸風力發電廠之建造仍然遠高於岸上風力，但由於案上風力發電有較高的居民抗爭問題，因此離岸風力不失為一解決方案。近年來，離岸風力發電已成為世界各國積極努力開發的方向，截至 2008 年止，全球離岸風力發電的總裝置容量已達 1,471MW，且 2009 年另有 830 台的風力機(2,063MW)正在興建中分別引接至歐洲 9 個國家的電網。關於風場的容量從 2MW 到 42MW 不等，其中主要的離岸風力市場皆在歐洲，分別為英國(883MW)、丹麥(646MW)、荷蘭(247MW)、瑞士(164MW)及德國(42MW)，除此之外現有超過 100GW 的離岸風力計劃正被規劃中。歐洲的風能協會(EWEA)已經訂定了 2020 年將達到 40GW 離岸風力裝置容量的目標 [5][7][8]。

由於建造費昂貴，例如：風機基礎、電力傳輸線及維護費用，離岸風力機組之單機容量傾向於大型化。典型的離岸風機其製造費用約高於岸上風機 20%以上，因為結構大型化及較為複雜的風機塔安裝方式，另外在相同容量下，離岸風機塔及基礎費用約為岸上風力發電機組的 2.5 倍。因此一般建議，離岸風力發電廠的建造容量需介於 100 到 200MW 之間，其單機容量介於 2MW 到 3.6MW 之間較為理想。近幾年的主要離岸風力發電廠及其每 MW 的建造費用如表 1.3 所示，而其每 MW 之投資成本如圖 1.4 所示，從圖中可以發現離岸風力發電廠每 MW 的建造費

介於 1.2 百萬歐元到 2.7 百萬歐元[9]。

表 1.3 2001 至 2008 年世界主要離岸風力發電廠及其每 MW 的建造費[9]

Offshore wind farm	In operation	Number of turbines	Turbine size (MW)	Capacity (MW)	Investment Cost/million
Middelgrunden	2001	20	2	40	47
Horns Rev I (DK)	2002	80	2	160	272
Samsø (DK)	2003	10	2.3	23	30
North Hoyle (UK)	2003	30	2	60	121
Nysted (DK)	2004	72	2.3	165	248
Scroby Sands (UK)	2004	30	2	60	121
Kentich Flat (UK)	2005	30	3	90	159
Barrows (UK)	2006	30	3	90	-
Burbo Bank (UK)	2007	24	3.6	90	181
Lillgrunden (S)	2008	48	2.3	110	197
Robin Rigg (UK)	2008	60	3	180	492

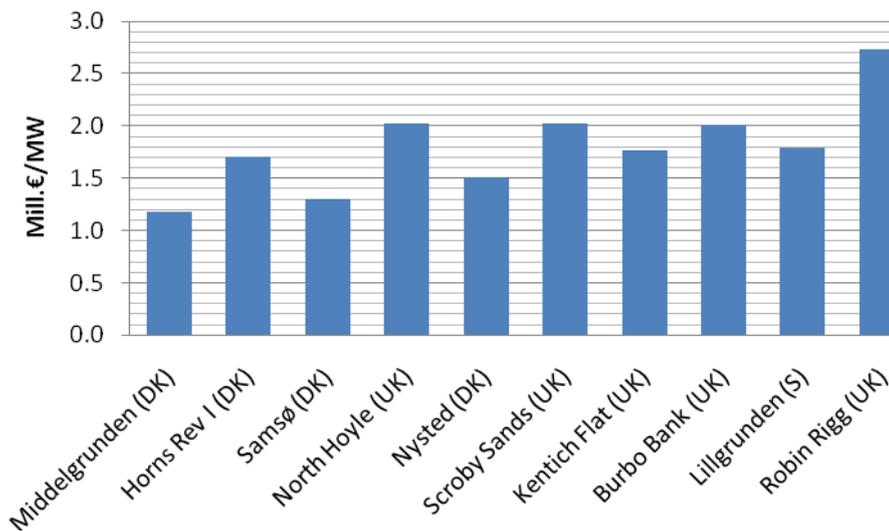


圖 1.4 離岸風力發電場每 MW 之投資成本

全球有能力製造離岸風力機的廠商約有 10 家，包含 Clipper、Enercon、GE、AREVA Multibrid、Nordex、Siemens、Repower、Vestas、WinWinD 及 BARD 等，如果從離岸風廠的建造經驗來看，只有 Clipper 尚未有任何的實績，但該公司已

有製造 2.5MW 機組的能力且目前與 NaREC (New and Renewable Energy Centre) 正致力於 7.5MW 機組的研發。考慮近年來離岸風力發電廠的建造經驗及建構成本,此處僅列出單機容量超過 2MW 之離岸風力發電計畫及其製造商如表 1.4 所示。

1.3 研究目的

由於近年來風力發電廠之容量日益增大,風力機組運轉對電力系統的影響議題已逐漸受到重視,因此本研究之目的旨在評估彰化離岸風力發電計畫之風機通過三相故障忍受能力及不切離系統之運轉忍受力,包含並聯靜態功因補償器之運轉情形。

表 1.4 單機容量超過 2MW 之離岸風力發電計畫及其製造商[10]

Company	Wind turbine type	Capacity	Experience			
			Location	No. turbine	Year	
BARD	BARD VM	5.0 MW	Rysumer Nacken, Emden	2		
			Hooksiel	1	2008	
Enercon	Enercon E112	4.5 MW	Ems Emden(DE)	1		
	Enercon E122	6.0 MW	Cuxhaven(DE)	-		
GE Energy	GE Wind 3.6s	3.6 MW	Arklow Bank I(IE)	7	2004	
Areva	Multibrid M5000	5.0 MW	Bremerhaven(DE)	4		
Nordex	Nordex N90	2.3 MW	Frederikshavn II(DK)	1	2003	
	Nordex N80	2.5 MW	Breitling(DE)	1	2006	
	Nordex 5M	5.0 MW	-	-		
Repower	Repower 5M	5.0 MW	Beatrice Demonstration(UK)	2	2007	
			Thornton Bank I(BE)	6	2008	
Siemens	(Bonus) 2.0MW	2.0MW	Middelgrunden(DK)	20	2001	
			Rønland(DK)	2	2003	
	SWT-2.3-82	2.3MW	Frederikshavn II(DK)	1	2003	
	or		Nysted Havmøllepark(DK)	72	2003	
	SWT-2.3-93		Samso(DK)	10	2003	
				Liigrund(SE)	48	2007
	SWT-3.6-107	3.6MW	Burbo Bank(UK)	25	2007	
Lynn and Inner Dowsing(UK)			54	2008		
Vestas	V80 2.0MW	2.0MW	Blyth Offshore(UK)	2	2000	
			Yttre Stengrund(SE)	5	2001	
			Hrons Rev I(DK)	80	2002	
			Rønland(DK)	4	2003	
			North Hoyle(UK)	30	2003	
			Scroby Sands(UK)	30	2004	
			Princess Amalia(NL)	60	2008	
	V90 3.0MW	3.0MW	Frederikshavn I(DK)	1	2002	
			Frederikshavn II(DK)	1	2003	
			Kentish Flats(UK)	30	2005	
			Barrow Offshore Wind(UK)	30	2006	
			Egmond aan Zee(NL)	36	2006	
			Lfloating Hywind(NO)	1	2009	
V120 4.5MW	4.5MW	-	-			
WinWinD Oy	WWD-3	3.0MW	Kemi Ajos I+II(FI)	8	2008	

第二章 文獻回顧

2.1 前人研究

離岸風力發電已成為世界發展的趨勢，而風機的故障忍受能力對於電力系統日益重要，因此已有很多文章探討相關議題。一個大型的離岸風力發電廠有兩種主要的方式將電力輸送至電網：一個是以電壓源轉換器(VSC)為基礎的高壓直流傳輸(HVDC)及高壓交流(HVAC)電纜傳輸，其兩者的效益比較於文獻[12]，文中的系統模型假設為一等效的風廠系統，系統中有 80 台共 184MW 的風機，為了減少模擬的時間作者將 80 台風機等效成 8 台，在此系統中，傳輸線的長度為 45km、額定電壓為 33kV 使用 HVDC 及 HVAC 傳輸系統，圖 2.1 為離岸風力發電廠使用 HVAC 連接至電網的接線圖；圖 2.2 為 VSC 為基礎的 HVDC 接線圖。此文中之風力發電機為轉子固定轉速電壓為 690V 容量為 2.3MW 之非同步發電機，並比較當故障發生時間為 100ms 及 625ms 時風力發電廠對於故障的忍受能力，另外亦比較兩種傳輸系統對於電網側的三相故障的影響程度，研究結果發現 HVAC 傳輸方式無法通過故障時間 625ms，然 VSC 為基礎的 HVDC 則無此問題，其藉由傳輸線路轉換器(converter)的控制因而提升了故障忍受能力。

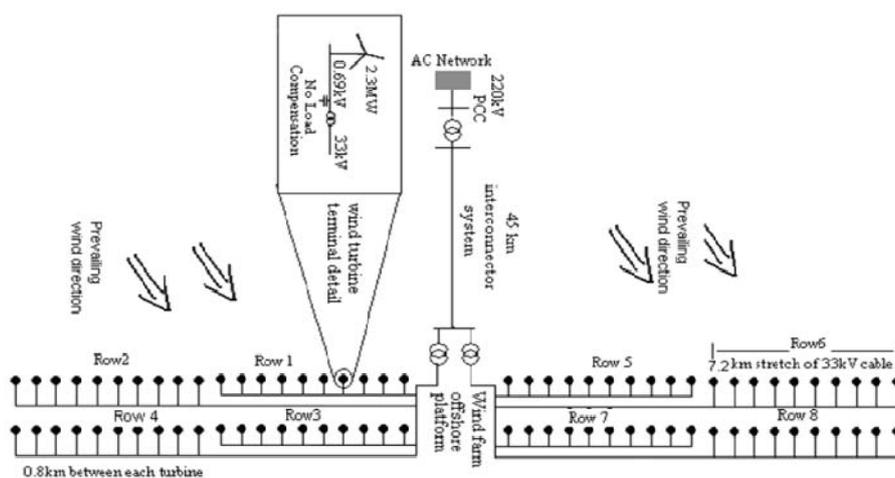


圖 2.1 HVAC 傳輸方式之離岸風力發電廠之系統圖

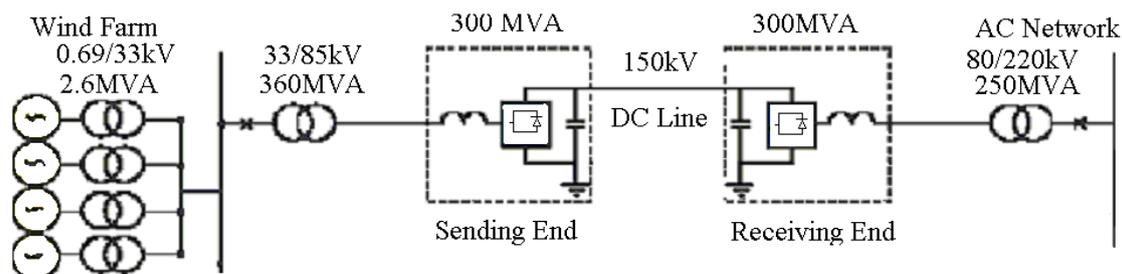


圖 2.2 以 VSC 為基礎之 HVDC 傳輸離岸風力發電廠系統圖

在文獻[13]中亦比較了離岸風力發電廠的直流及交流傳輸對於故障的忍受能力，結果發現 HVDC 傳輸方式可藉由 converter 的控制傳送較多的實功率及虛功率。文中亦指出，雖然 HVDC 的傳輸方式有較佳的功率控制能力，但在距離小於 50km 時其建造費也較昂貴。因此該文建議當離岸風廠的容量高於 100MW 且距離大於 100km 時，再採用 VSC 為基礎的 HVDC 較有發展的經濟效益。另在文獻[14]中，作者提出了在不同的傳輸距離及風廠容量，其較經濟的傳輸方式選項，如圖 2.3 所示。

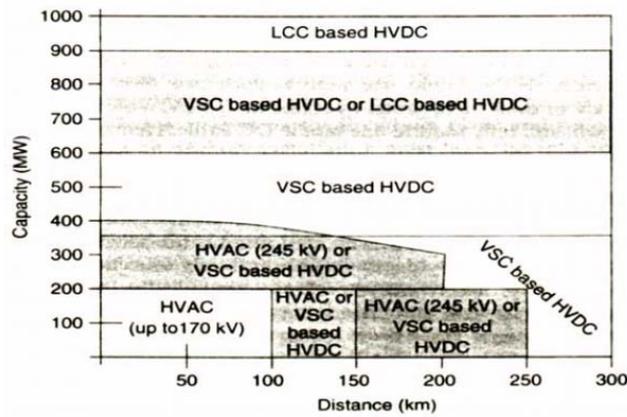


圖 2.3 離岸風力發電之傳輸技術選擇方式建議

現階段絕大部分的風機皆採用非同步發電機，除了 Enercon 及 Siemens 外主要的風機製造商皆提供雙饋式感應發電機(Doubly-Fed Induction Generator, DFIG)，其型式為繞線式轉子感應機連接一 AC-DC-AC converter 在定子及轉子之間，並採用絕緣柵雙極電晶體(IGBT)之波寬調變技術(PWM)控制實功及虛功傳送至電網。然而，廠商為了節省一般皆將 DFIG convertor 設計在 25%的發電機額定容量，因此減少了其低電壓穿越(Low Voltage Ride Through, LVRT)的能力。LVRT 的特性如圖 2.4 所示[16]，其定義為最小電壓分布在故障的期間隨後回復至正常的電壓情形之曲線。當電壓下降至 LVRT 特性曲線以下，發電機極可能跳脫。在文獻[12]中，研究發現 DFIG 風機連接至強電網比弱電網有較佳的低電壓穿越能力。

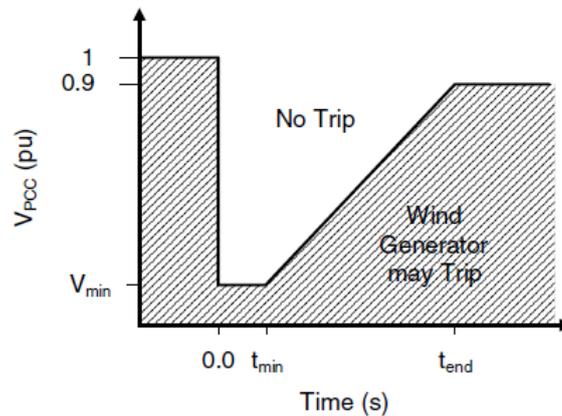


圖 2.4 典型之 LVRT 特性圖

當電壓不穩定及崩潰問題發生在電網時，系統將無法滿足虛功、重載及故障時的需求。因此在文獻[17]中作者模擬風力發電廠連接至弱電網情形，分析結果顯示，風力發電廠及電網電壓不穩定與短路容量(Short Circuit Capacity, SCC)在共同耦合接點(Point of Common Coupling, PCC)有關，且最大的風機容量占比為 20%的 SCC。當風機容量的佔比上升至 25 到 30%的 SCC 時，其風力發電廠將運轉於不穩定狀態。由於輸電線的阻抗比 X/R 對於風廠的電壓驟降有影響，因此當增加輸電線路的 X/R ，則電壓驟降也將被減少。在文獻[17]中作者指出增加線路阻抗比 X/R 、提高線路電壓藉由功率因數控制器(PFC)或靜態同步補償器(STATCOM)將可改善電壓暫態響應。在文獻[20]中作者結論 STATCOM 的虛功控制方式可以改善系統電壓並幫助系統回復穩定。

文獻[21]中指出目前大型風力機主要有三種型式：一、定速風機：為一多段齒輪箱搭配一鼠籠式感應發電機(SCIG)直接連接至電網，此型式只能運轉在同步轉速且從電網吸收虛功率，因此需電容器組補償虛功率架構圖如 2.5 所示。；二、變速型風機：為一多段齒輪箱搭配一雙饋式感應發電機(DFIG)，其轉子為繞線式並連接一部份容量之電力轉換器(Power Converter)，通常其容量為發電機的 25 到 30%，而其定子直接連接至電網，架構如圖 2.6 所示。；三、無齒輪式變速風機：為一同步發電機連接一全容量之 Power Converter，此型式可在低速高轉矩下驅動風力發電機，其直驅式發電機有兩種：電激磁式同步發電機(EESG)及永磁式同步發電機(PMSG)，其架構如圖 2.7 及 2.8 所示。上述型式 2MW 容量之相關製造廠商如表 2.1 所示。文中亦指出未來大型離岸風力發電廠須考慮實功及虛功控制、電壓及頻率控制、電力品質及故障忍受能力等議題。

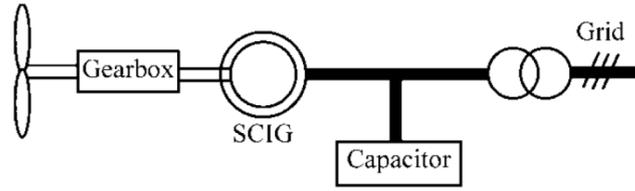


圖 2.5 SCIG 與齒輪箱系統

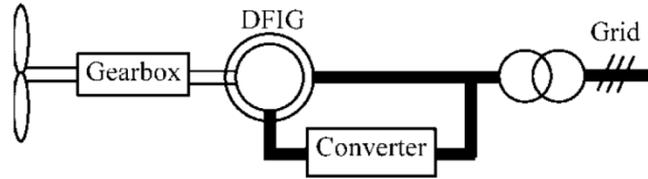


圖 2.6 DFIG 與齒輪箱系統

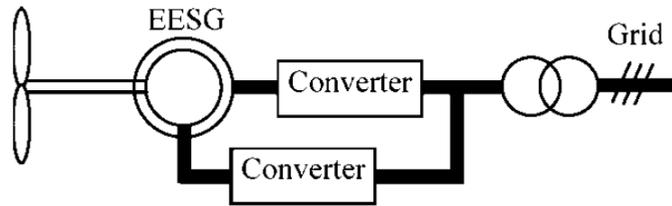


圖 2.7 直接驅動之 EESG 系統

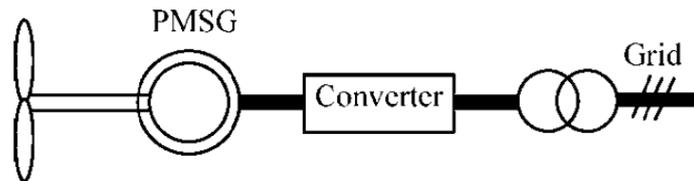


圖 2.8 直接驅動之 PMSG 系統

上述議題中電網運轉公司(Transmission System Operators, TSOs)較關心功因控制能力及故障忍受能力，例如：E. On Netz (德國北部電網運轉公司)要求發電公司在事故發生時其電壓特性在圖 2.9 Limit Line1 以上時，須有能力克服電壓突降且不能導致系統不穩定或將發電廠切離系統，且在電壓突降期間發電廠須提供虛功電流給電網，其電壓控制特性須符合圖 2.10 [22]。文獻[21]結論，多段式齒輪箱型雙饋式感應發電機(DFIG)未來將持續成為離岸風力市場的主流，而製造商將持續對全容量 Power Converter 變速型 SCIG 感興趣。此外，文中亦指出由於離岸風機之維修困難及費用昂貴，因此有必要發展堅固免維修之風機以及提升其故障忍受能力。

文獻[23]將 E.ON Netz 最新的連網規定作為案例研究，研究指出當電纜長度增加其變速型風機將減少虛功之供應，在此條件當故障時 Converter 將很難提供額外的虛功率。

文獻[25]使用一台 3.6MW 之 DFIG 風力機連接至一個弱電網，並模擬當使用 STATCOM 及不使用 STATCOM 之情形，其 STATCOM 是連接於 PCC 處以提供穩態及暫態電壓調整。其研究結果為當使用 STATCOM 時，在三相故障發生後 30ms($t=2.03s$)，轉子側 Converter (RSC)將被閉鎖以防止轉子側被故障過電流破壞，並且在 200ms($t=2.2s$)後清除故障。另外在不使用 STATCOM 的案例中，DFIG 風機的網路側 Converter(GSC)被設定為最大容量為 0.25pu(0.9MVA)；RSC 被設定成 0.28pu 以調整 PCC 點的電壓為 1.02pu。其結果顯示，故障清除後 PCC 點的電壓只能恢復至 0.9pu，因此 RSC 無法重新啟動且風機從電網跳脫。在使用 STATCOM 的案例中，RSC 及 GSC 的虛功調整命令設定為零，因而在故障期間 STATCOM 提供 2.3MVar 的虛功率($t=2.03\sim 2.53$)，在 PCC 處的電壓恢復至 1.02pu 且 RSC 成功的重新啟動，因此風機持續正常運轉。

2.2 風力發電機電氣相關理論

2.2.1 雙饋式感應發電機 (DFIG)[26][27]

雙饋式感應發電機(DFIG)之構造包含：風渦輪機、齒輪箱、感應發電機、電壓源轉換器(VSC)、直流匯流排(DC link)及控制系統等，架構圖如 2.11 所示，其中發電機定子直接連接至交流電網；轉子連接背對背的 VSC converter 至電網，電網側為直流轉交流 converter (Cgrid)，轉子側為交流轉直流 converter (Crotor)，Crotor 連接滑環至轉子，Cgrid 連接電感器至電網；DC link 連接電容器以穩定電壓並傳送電力潮流至電網側；控制系統包含葉片傾斜度控制及產生

電壓控制命令訊號 Vr 與 Vgc 給 Cgrid 與 Crotor 以達到控制風力機的實功率及虛功率到電網側。

DFIG 風力機的穩態電力潮流特性如圖 2.12 所示，其風渦輪機之輸出功率關係式如下所示：

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) v_w^3 \quad (2.1)$$

$$\lambda = \frac{R \omega_r}{v_w} \quad (2.2)$$

其中 P_m 是風渦輪機機械功率 (W)； ρ 是空氣密度 (1.225 kg/m³)；A 是葉片掃過面積 πR^2 (m²)，R 為轉子半徑； C_p 是功率性能係數，一般之熱極限為 59% 稱為 Betz 極限； λ 為轉子葉片尖速比； β 為葉片俯仰角 (deg)； v_w 為風速 (m/s)； ω_r 為轉子速度。

機械輸出功率及定子電輸出功率定義如下：

$$P_m = T_m \omega_r \quad (2.3)$$

$$P_s = T_{em} \omega_s \quad (2.4)$$

其中 P_s 是定子電輸出功率； T_m 是轉子機械轉矩； T_{em} 是發電機感應至轉子電磁轉矩； ω_s 為發電機氣隙中電磁同步轉速。

無損失發電機之機械關係式為：

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_{em} \quad (2.5)$$

其中 J 為轉子及風渦輪機之慣性系數，對於無損失發電機，當其在穩態在固定轉速時， $T_m = T_{em}$ 及 $P_m = P_s + P_r$ ， P_r 是轉子電輸出功率，其定義為：

$$P_r = P_m - P_s = -T_m \left(\frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \right) \omega_s = -s T_m \omega_s = -s P_s \quad (2.6)$$

其中 s 為發電機滑差，關係式為 $s = (\omega_s - \omega_r) / \omega_s$ ，當發電機之滑差為正時為次同步運轉(sub-synchronous)，其實功率由電網側傳送至轉子電路；相反的滑差為負值時，為超同步運轉(super-synchronous)，其實功率由轉子電路傳送至電網。定子側則是依據轉速提供實功率至電網。在次同步運轉下 C_{rotor} 為正值且從直流匯流排取出 P_r 並微幅增加直流電壓。 C_{grid} 之控制邏輯與 STATCOM 的原理相似且控制模式可設定為一樣的方式。在穩態無損失 AC/DC/AC converter， C_{grid} 的電功率輸出(P_{gc})與 P_r 相等，且風機速度取決於功率 P_r 的吸收或 C_{rotor} 為負值的產生的次同步轉速。

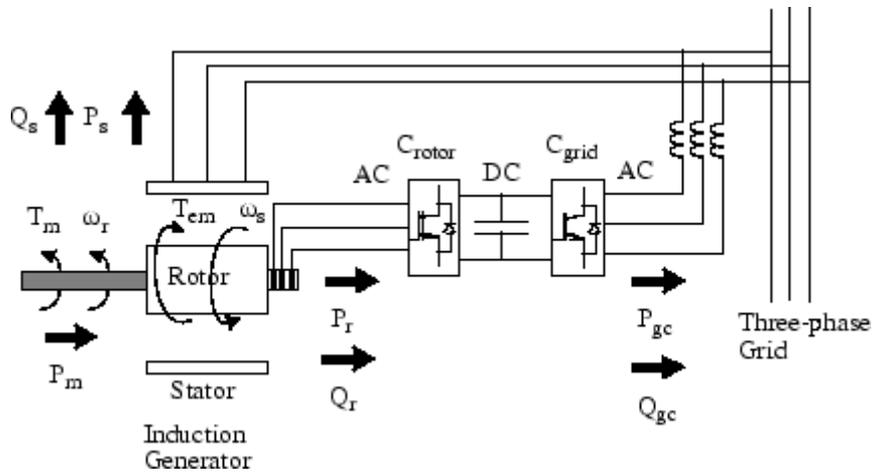


圖 2.11 DFIG 風力機的電力潮流 [26]

在穩態運轉時，直流匯流排電壓(U_{dc})與電網之交流電壓(U_s)在 C_{grid} 側之關係式為：

$$U_s = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} U_{dc} P_M \quad (2.7)$$

其中 P_M 為 C_{grid} 的調製程度，當 $P_M \leq 1$ 時，則直流匯流排之電壓為：

$$U_s \leq \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} U_{dc} \Rightarrow U_{dc} \geq \frac{U_s}{0.6124} \quad (2.8)$$

另 C_{grid} 側的實功率關係式為：

$$P_{gc} = P_E - P_s \quad (2.9)$$

其中 P_E 為 DFIG 提供至電網側總實功率，當 C_{grid} 的損失可忽略時，則實功率 $P_{gc} = P_r$ 。

電網側 converter 端之虛功率 (Q_{gc}) 及流過電抗器之電流 (I_{gc}) 相關式為：

$$P_{gc} + jQ_{gc} = U_s \cdot I_{gc}^* \quad (2.10)$$

$$I_{gc} = \frac{U_c - U_s}{R_c + jX_c} \quad (2.11)$$

其中 $R_c + jX_c$ 為電抗器之阻抗。

電網側 converter 之電力損失關係式為：

$$\Delta P_c = R_c \cdot |I_{gc}|^2 \quad (2.12)$$

電抗器之電阻不能被忽略當電網發生擾動時，因為電阻對抑制暫態電流有重要的作用。

2.2.2 感應發電機之動態模型 [28]

感應機之動態等效電路如圖 2.12. 所示。

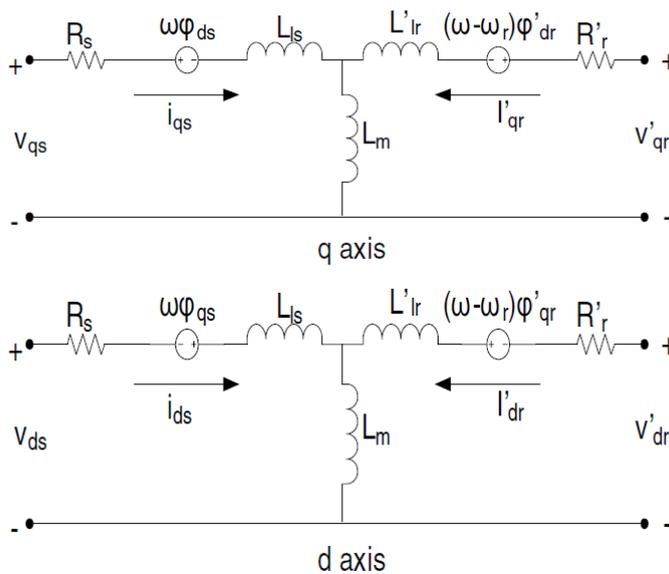


圖 2.12 感應機 d-q 軸等效電路 [28]

感應機之狀態方程式轉換至同步旋轉座標系統(d-q)之關係式為：

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega \varphi_{ds} \quad (2.13)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega \varphi_{qs} \quad (2.14)$$

$$v'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr} \quad (2.15)$$

$$v'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{dr} - (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr} \quad (2.16)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (2.17)$$

$$\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \quad (2.18)$$

$$\varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr} \quad (2.19)$$

$$\varphi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs} \quad (2.20)$$

$$\varphi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \quad (2.21)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (2.22)$$

$$L'_r = L'_{lr} + L_m \quad (2.23)$$

其中 v_{qs} , v_{ds} 為 d-q 軸之定子電壓； v'_{qr} , v'_{dr} 為 d-q 軸之轉子電壓； R_s , L_{ls} 為定子側電阻及漏電抗； R'_r , L'_{lr} 為轉子電阻及漏電抗； L_m 為磁化電抗； L_s , L'_r 為總定子及轉子電感； i_{qs} , i_{ds} 為 d-q 軸之定子電流； i'_{qr} , i'_{dr} 為 d-q 軸之轉子電流； φ_{qs} , φ_{ds} 為 d-q 軸之轉子磁通量； ω 為定子之角速度； ω_r 為轉子之角速度； P 為極對數； T_e 為電磁轉矩。

2.2.3 靜態同步補償器(STATCOM)

STATCOM 是一個並聯式的虛功率補償器，藉由調整電網匯流排的電壓以達到改善功率之效果。當電網之電壓低於要求時，STATCOM 可產生虛功率如同電容器到電網，當電網電壓太高時，STATCOM 可吸收虛功率如同電抗器。

圖 2.13 為 STATCOM 之動作原理，其電力潮流之控制是藉由 VSC 輸出端電壓之大小及相位角，而 VSC 被連接至一個耦合變壓器。

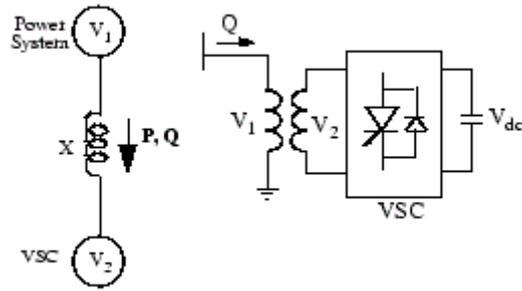


圖 2.13 STATCOM 之基本架構圖

其實功率及虛功率之關係式為：

$$P = \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X} \quad (2.24)$$

$$Q = \frac{V_1 (V_1 - V_2 \cos \delta)}{X} \quad (2.25)$$

其中 V_1 為一次側線對線電壓； V_2 為二次側側線對線電壓； X 為連接變壓器及濾波器間之電抗器； δ 為 V_1 與 V_2 間之夾角。

STATCOM 運轉在不同狀態電壓及電流之向量圖如圖 2.14 所示：



圖 2.14 STATCOM 之向量圖(a) 電容性運轉模式, $Q > 0; P = 0$ (b) 電感性運轉模式, $Q < 0; P = 0$

當輸出電壓 V_2 與 V_1 同相位時 ($\delta = 0$)，則從 2.24 式子可以發現其實功率為零，只有虛功率產生。若輸出電壓 V_2 大於 V_1 時，則 STATCOM 工作於電容性模式(如圖

2.14 (a)所示)且虛功率由 V_2 供給 V_1 ；相反的，若 V_1 大於 V_2 ，則 STATCOM 工作於電感性模式(如圖 2.14(b)所示)且虛功率由 V_1 流向 V_2 。

第三章 風力發電廠模型建構

3.1 計畫介紹

彰化離岸風力發電廠為台灣第一個離岸風力計畫，此計畫將建造 300 台離岸風力機，每台風機容量為 3.0MW 或 3.6MW。由於此計畫之總容量非常大(約為 1000MW)，因此計畫之顧問公司中興顧問建議將此計畫分為六期執行，以達較高經濟效益及施工容量之需求，例如：現階段離岸風力為世界各國爭相發展之方向，然而風機製造商之產能有限無法由同一家廠商同時提供如此大數量之風機。此外，由於絕大多數的離案風機建造船隊都在歐洲，因此很難能夠同時請到數個船隊到台灣施工，而且考慮到社會及環境的影響，將計畫分為六期比一期有較高的益處。此計畫之六期工程佈置方式如圖 3.1 所示，而每期之風機數量如表 3.1 所示。

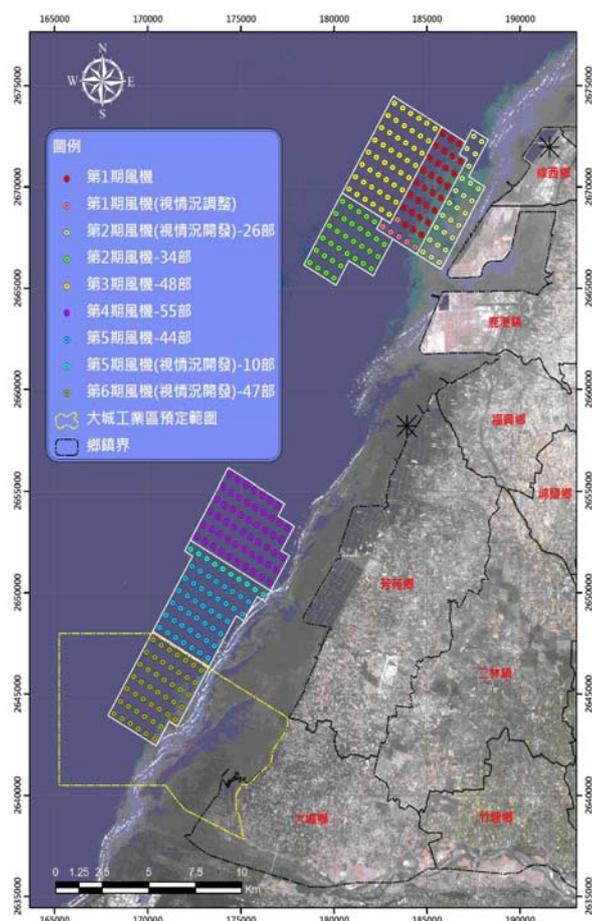


圖 3.1 彰化離岸風力計畫六期佈置圖

表 3.1 彰化離岸風力計畫各分期風機數

Phase		Number of wind turbine	Note
North area	1	30 (or 36)	Depends on the type of wind turbine
	2	60 (or 66)	Depends on stage one
	3	48	
South area	4	55	
	5	54 (or 44)	Adjusted depending on reservation fishing channel
	6	47	Determined as the Industrial Zone Development

依據中興工程顧問公司之可行性研究報告，此計畫之第一分期 32 部風機及第二分期中 16 部風機將連接至線西 D/S 變電所，其餘風機將連接至彰工發電廠及彰林超高壓變電所(E/S)。此計畫之北區風機系統單線圖如圖 3.2 所示，南區之單線圖如圖 3.3 所示。

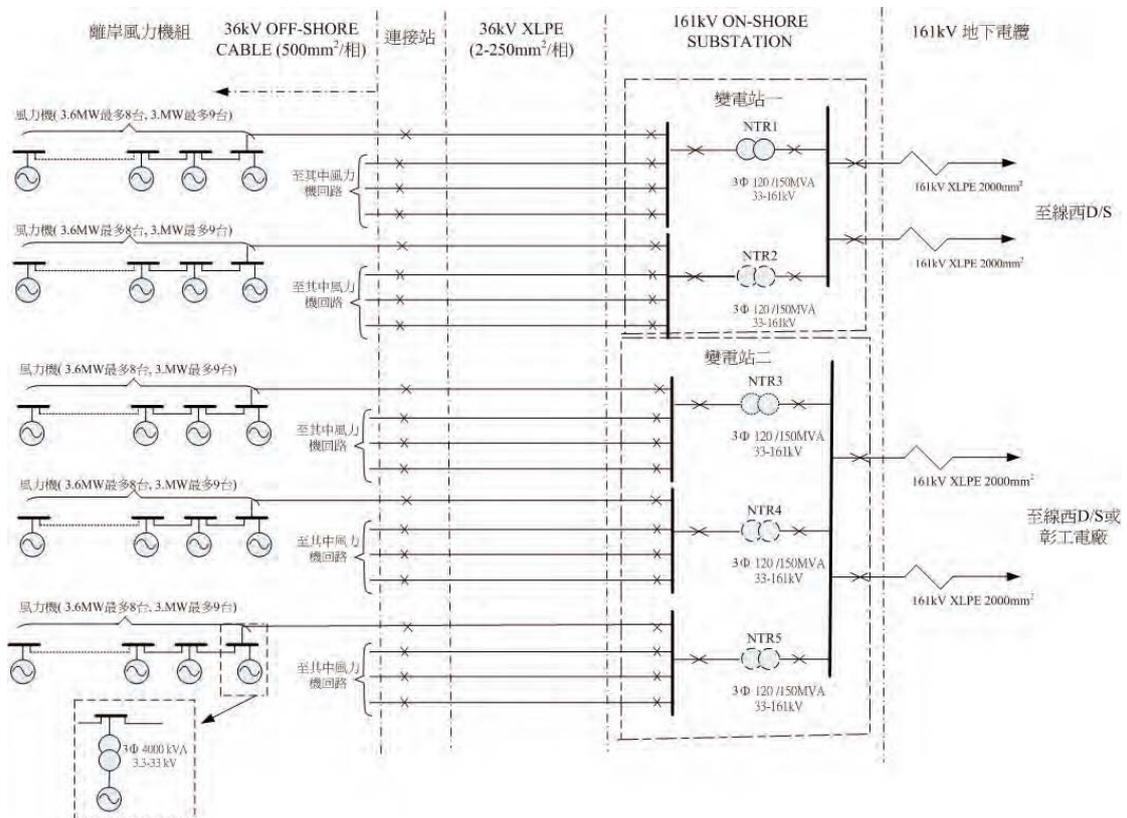


圖 3.2 彰化離岸風力計畫北區風機系統單線圖

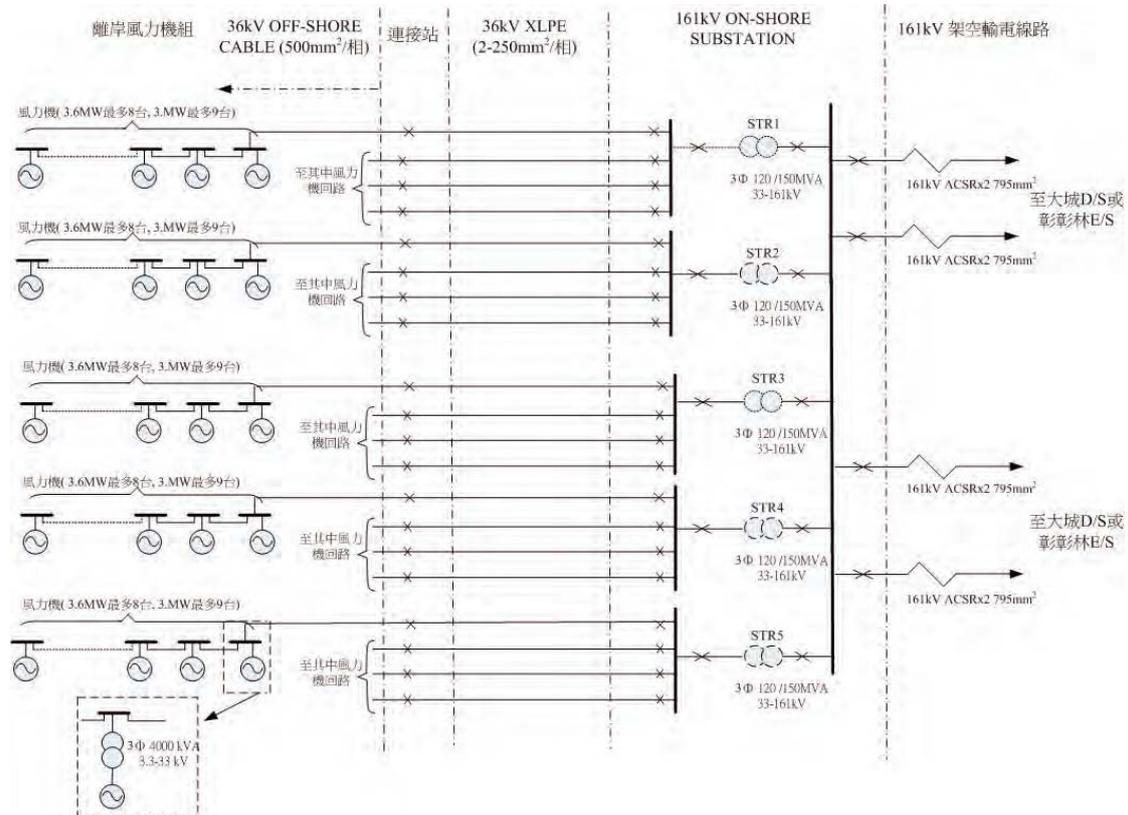


圖 3.3 彰化離岸風力計畫南區風機系統單線圖

因為台電公司系統規劃處已針對本計畫做了風機對電力系統影響的穩態模擬，且第三期到第六期之風機將不會連接到同一個變電所(線西 D/S)，沒有同一個連接點容量過大的問題，所以本文將只針對連接至線西 D/S 之風機之動態響應，並探討其低電壓忍受能力(LVRT)。

由於絕大多數的風機參數無法從網路(包含期刊論文)取得，且越來越多風機製造廠家對於 DFIG 風機感興趣，因此本論文將使用 GE 3.6MW 風機作為模型並藉由 Matlab/Simulink 套裝軟體模擬相關案例。

本計畫第一期系統之連接方式為四個並聯分路，每一個分路串連八台風力風機，每一台風機型式為 DFIG 3.6MW，其總容量為 115.2 MW ($=3.6 \times 8 \times 4$)，其發電機輸出電壓為 4160V 連結至一台 34.5kV/4160V 容量為 4MVA 阻抗為 6%之變壓器。此風力發電機之額定功率因數為 ± 0.9 pf，其虛功率之調節能力為 $Q_{max}=1.74$ MVAR 及 $Q_{min}=-1.74$ MVAR，其額定容量為 4MVA。風機之變壓器藉由 33kV 500mm²

XLPE (Crosslinked polyethylene insulated cable)海底電纜連接至岸上連接站，接著改為 33kV 2-250mm² XLPE 之岸上電纜以增加輸電可靠度及減少輸電損失，連接至岸上變電站之變壓器，此變壓器之規格為 33kV/161kV 150 MVA 阻抗 17%，再經由 161kV 2000mm² XLPE 電纜連接至線西 D/S。

3.2 風力發電廠模型建構

3.2.1 雙饋式感應發電機之風力發電機組 (DFIG WTG)

DFIG WTG 之模型建構採用 Matlab/Simulink/SimPowerSystems 工具箱內之 Phasor Type 模型，其內容包含風力渦輪機、發電機、轉換器及控制單元，此模型是以 GE 1.5 MW 及 3.6MW 之風機為建構基礎。此 3.6 MW 風機之追蹤特性曲線如圖 3.4 所示，其風速的工作狀態範圍被設定為 ABCD 四點，A 點為始動位置，風速高於 A 點風機開始輸出功率，低於 A 點停止輸出功率，本文中 GE 採用之切入風速為 3.5m/s。B 點到 C 點間曲線為風機之最大功率追蹤特性曲線，在 C 點處時風力發電機輸出功率為額定之 75%且發電機運轉於 120%的同步速度。風機運轉在 D 點時，其功率輸出為 1 p.u (per unit)，發電機轉速比 C 點略高約為 1.2 p.u。當風速高於 14 m/s 時，葉片將傾斜至設備的額定(1.0 p.u)以減少機械力受力於軸承。

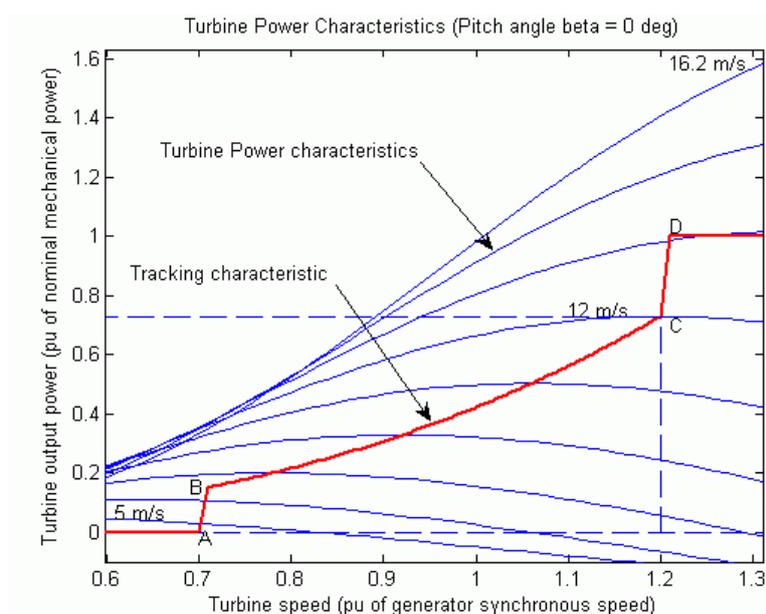


圖 3.4 GE 3.6MW 風力發電機之追蹤特性曲線

GE 風機之功率係數曲線如圖 3.5 所示，其曲線模型之數學表示式如下：

$$C_p(\theta, \lambda) = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^4 \alpha_{ij} \theta^i \lambda^j \quad (3.1)$$

其中 C_p 為功率係數； θ 為葉片傾斜角(度)； λ 為轉子葉片尖速與轉速比，當 λ 值超過 2 跟 13 之間時，表示非常高或非常低之風速作用在機器上。

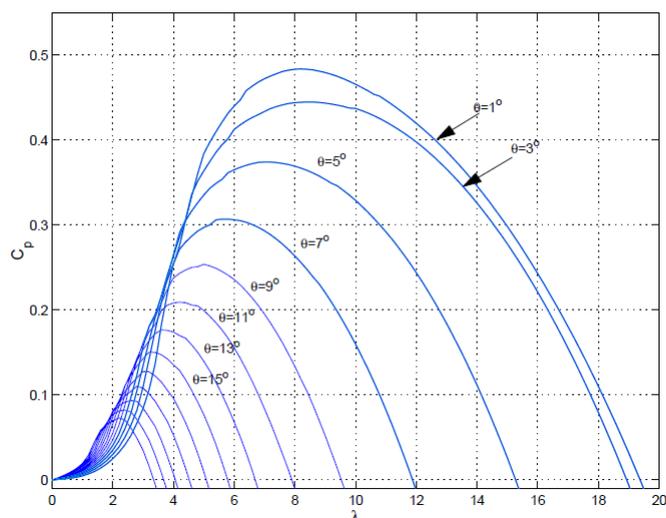


圖 3.5 GE 風機功率特性曲線

本文 Matlab 模擬所採用之 DFIG 風機模型參數如表 3.2 所示，其轉子側轉換器控制系統架構如附錄 A.1 所示、電網測轉換器控制系統架圖如附錄 A.2 所示、葉片傾斜控制系統架構如附錄 A.3 所示。

依據文獻 [32]，GE 之風力發電機控制參數可依客戶使用情況修正，其相關參數設定為：虛功率控制能力最大為 48% 最小為 -48%；發電機及轉換器之跳脫等級為電壓低於 0.7 p.u 時跳脫、高於 1.3 p.u 時跳脫；最大電流 1.11 p.u 跳脫；發電機轉子轉速低於 0.7 p.u 或高於 1.3 p.u 時(參考轉速為 1.2 p.u)跳脫，以上參數設定可避免發電機及轉換器運轉於額定值以上以保護設備。GE 風力發電機之電氣控制參數詳如附錄 B.1 所示，其風機參數詳如附錄 B.2 所示，而其相關之模型控制圖詳如附錄 C 所示。

本文中轉換器之直流匯流排設定可經由式子(2.8)得到 V_{dc} 之值，此處之 V_{dc} 為 7000 V，接著利用此電壓可計算出直流匯流排電容器之值，

$C = (t \times P_n) / (0.5 \times V_{dc}) = 702 \mu F$ ，其中 t 為 4.3 ms 表示在頻率 60 Hz 時之週期為 0.26 cycle； P_n 為 4 MVA。

表 3.2 本文 DFIG 風力發電機之參數設定值

Generator Data	
Power rating (MW)	3.6
Voltage (V_{rms})	4600
System frequency (Hz)	60
R_s (p.u)	0.00421
L_{ls} (p.u)	0.17081
R_r' (p.u)	0.00466
L_{lr}' (p.u)	0.1017
L_m (p.u)	2.66
H (s)	11
F (p.u)	0.15
P (pair)	3
S (%)	0.2
Converters Data	
Maximum power (p.u)	0.48
Grid-side coupling inductor [L R] (p.u)	0.02 0.02/100
Coupling inductor initial current [IL (p.u) ph_IL (deg)]	0 90
DC bus voltage (V)	7000
DC bus capacitor (μF)	702
Wind Turbine Data	
Mechanical output power (MW)	3.6
Tracking characteristic speeds: [A B C D] (p.u)	0.7 0.71 1.2 1.21
Power at point C (p.u)	0.73
Wind speed at point C (m/s)	12
Pitch angle controller gain [kp]	540
Maximum pitch angle (deg)	27
Maximum rate of change of pitch angle (deg/s)	10
Control parameters	
Reference grid voltage V_{ref} (p.u)	1.0
Grid-side converter generated reactive current reference	0
Grid voltage regulator gains: [Kp Ki]	3 60
Droop X_s (p.u)	0.02
Power regulator gains: [Kp Ki]	3 0.6
DC bus voltage regulator gains: [Kp Ki]	0.002 0.05
Grid-side converter current regulator gains: [Kp Ki]	1 100
Rotor-side converter current regulator gains: [Kp Ki]	0.3 8
Maximum rate of change of reference grid voltage (p.u/s)	100
Maximum rate of change of reference power (p.u/s)	1
Maximum rate of change of converter reference currents	200

3.2.2 傳輸線及變壓器

本文模擬所使用之傳輸線為 π 模型，如圖 3.6。因為海底電纜擁比架空線有較大之電容值所以可能增加湧入電流，此現象可能減少實功率之供給能力。隨著電纜長度的增加，電容量及湧入電流也將增加。因此，如果此現象嚴重輸電系統將需使用並聯電抗器來補償虛功率。然而本文中所使用的輸電線總長度只有 10 公里(含 161kV 及 33kV 電力電纜)，因此電容效應並不嚴重。

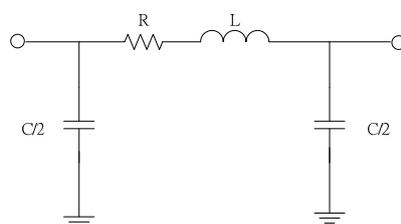


圖 3.6 π 模型之傳輸線

傳輸線及變壓器之阻抗參數如表 3.3 所示，本案所連接之線西 D/S 161kV 電網之最大短路容量為 11,009 MVA ($X/R=57.95$)，其最小之短路容量為 6,679 MVA ($X/R=48.65$) [30]。

表 3.3 傳輸線及變壓器之阻抗參數

161kV 2000mm ² XLPE		161/33 kV transformer	
R (Ω /km)	0.0285	Capacity (MVA)	150
L (mH/km)	0.2695	Impedance Z (%)	17
C (μ F/km)	0.27	X/R ratio	42
33kV 500mm ² XLPE		33/4.16 kV transformer	
R (Ω /km)	0.047	Capacity (MVA)	4
L (mH/km)	0.221	Impedance Z (%)	6
C (μ F/km)	0.16	X/R ratio	11.41

3.2.3 STATCOM [28]

本文所採用的 STATCOM 分析模型為 Phasor Type block 之三相靜態同步補償器，其電壓源轉換器採用 IGBT 為基礎之波寬調變(PWM)，其切換頻率為數千

Hz，將直流電壓轉換成正弦波。然而在此模型中電力電子元件將不會呈現在模組中，只有應用相量方式模擬，而其 Simulink 模型須藉由 Powergui 模塊激活才能使用。本文中之 100 MVA STATCOM 是連接於 33 kV 匯流排側，並安裝於 161kV 變電所，此設備之單線圖及其控制方塊圖如附錄 C 所示。

3.2.4 第一期風力發電機系統-32 台 DFIG 風力發電機模型

本文模擬所使用之 Matlab/Simulink 32 台 DFIG 風力機模型如圖 3.7 所示，為了縮短模擬的速度，本研究將 32 台 3.6 MW 之風機等效成一個 DFIG phasor 模組，並連接至一台 4160V/33 kV 配電變壓器，此二者中間連接一個 32kW 的風機塔內負載。接著配電變壓器連接一 8 公里長之傳輸線到 33kV/161 kV 升壓變壓器，再經由 2 公里之地下電纜連接至 161 kV 電網。

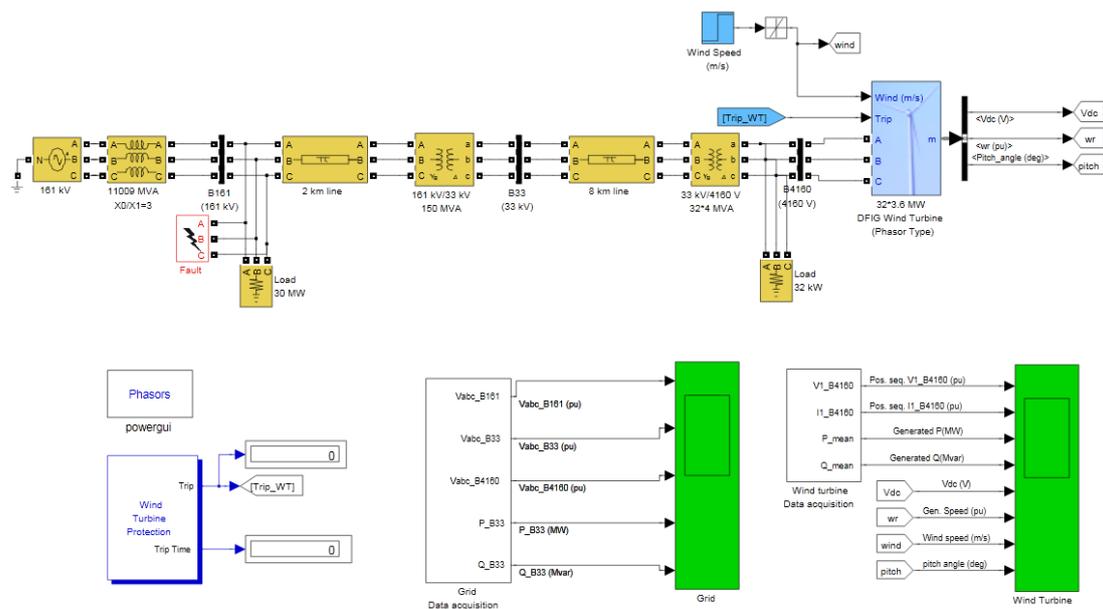


圖 3.7 Matlab/Simulink 32 台 DFIG 風力機系統模型

從表 3.2 可知，當風速為 14 m/s 時第一期 DFIG 風力發電機系統運轉在額定輸出功率，其發電機、匯流排及轉速狀況如圖 3.8 所示，其中圖 3.8(a)為發電機輸出端正序電壓，其值為 1 p.u (4160 V)；(b)為發電機輸出端電流，其值約為 0.9 p.u (500 A)，此結果是因為風機之額定容量為 4 MVA，其額定電流為 555 A；(c)為發電機輸出端之總實功率其值為 115 MW，其所需到達額定之時間為 27 秒；(d)為發電機輸出端之虛功率，其正常運轉時是從電網接收虛功率；(e)為直流匯流排電壓其值為 7000 V；(f)為發電機轉速，其轉速為 0.7 p.u 啟動到 1.2 p.u 額定；

(g)為風速其值為 14 m/s；(h)為葉片傾斜角度，當發電機轉速低於 1.2 p.u 時，葉片傾斜角為 0 度，此時之功率輸出為 0.73 p.u，當發電機轉速高於 1.2 p.u 時，控制器將調整葉片之角度以減少發電機之機械功率輸出，此時風機為額定功率輸出，葉片之傾斜角度為 0.75 度。

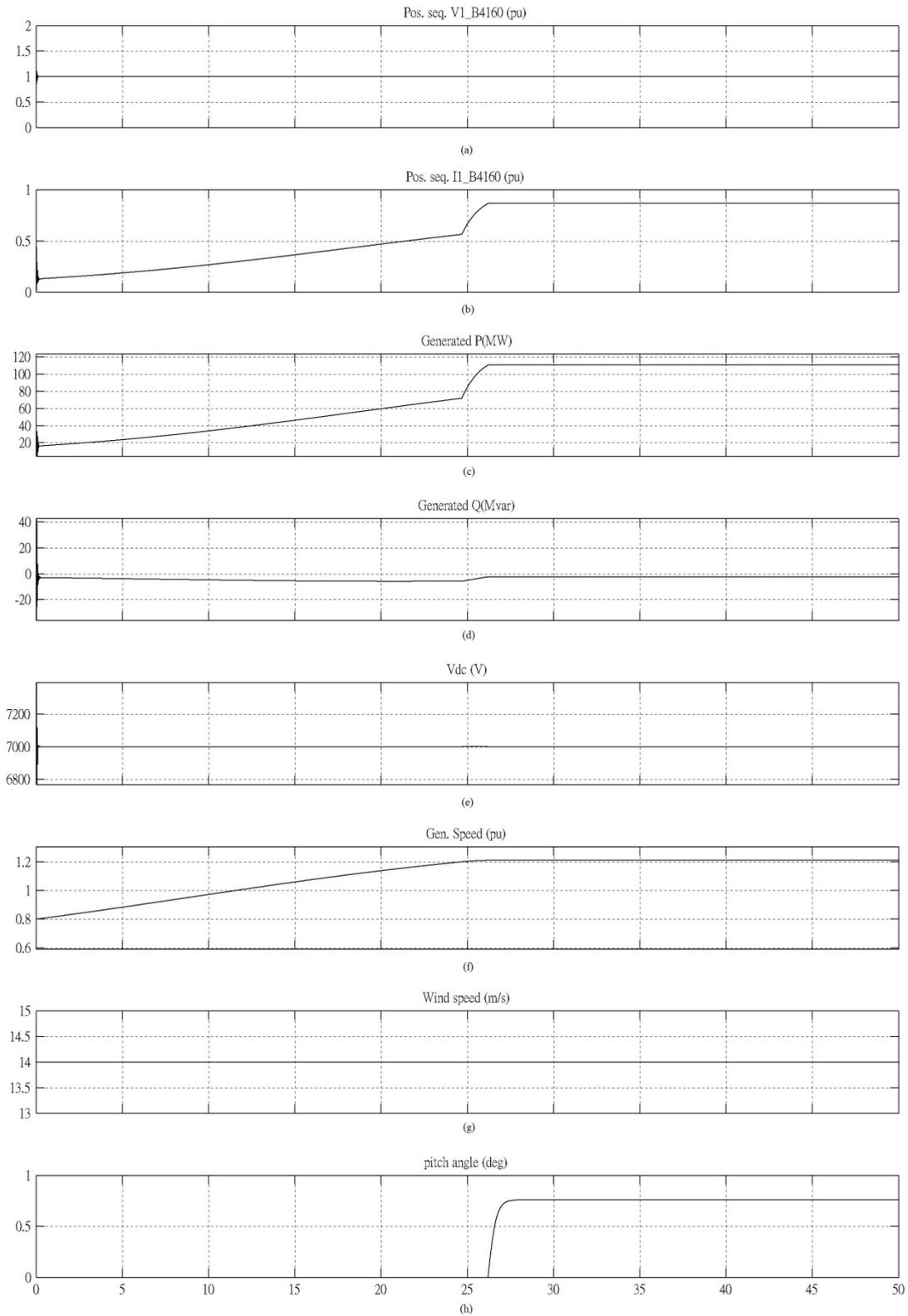


圖 3.8 第一期 DFIG 風力發電機系統運轉在風速為 14 m/s 時，(a)發電機輸出端正序電壓；(b)發電機輸出端電流；(c)發電機輸出端之總實功率；(d)發電機輸出端之虛功率；(e)直流匯流排電壓；(f)發電機轉速；(g)風速；(h)葉片傾斜角度。

本案第一期風機系統匯流排側之電壓及電力潮流模擬結果如圖 3.9 所示，子圖(a)為 161kV 匯流排電壓，圖中顯示電壓值為 0.998 p.u，此匯流排之電壓高於 33kV 匯流排側電壓；圖(b)為 33kV 匯流排側電壓，其電壓值為 0.97p.u，此電壓低於 161kV 匯流排電壓，因此虛功率由 161kV 匯流排流向 33kV 匯流排。而此功率潮流可由圖(e)顯示，虛功率之供應由 0 到 30 MVAR；圖(c)為風力發電機輸出到 4160V 匯流排側之電壓，其值為 1 p.u，因此使得風機只吸收 2MVAR 的虛功率；圖(d)為發電機位輸出實功率至 33kV 匯流排，圖中顯示實功率由 20 到 121 MW，由此可知傳輸線之功率因數高於 0.9 所以風機提供之實功率高於 32 台風機在功率因數 0.9 時之供給功率 115.2 MW。

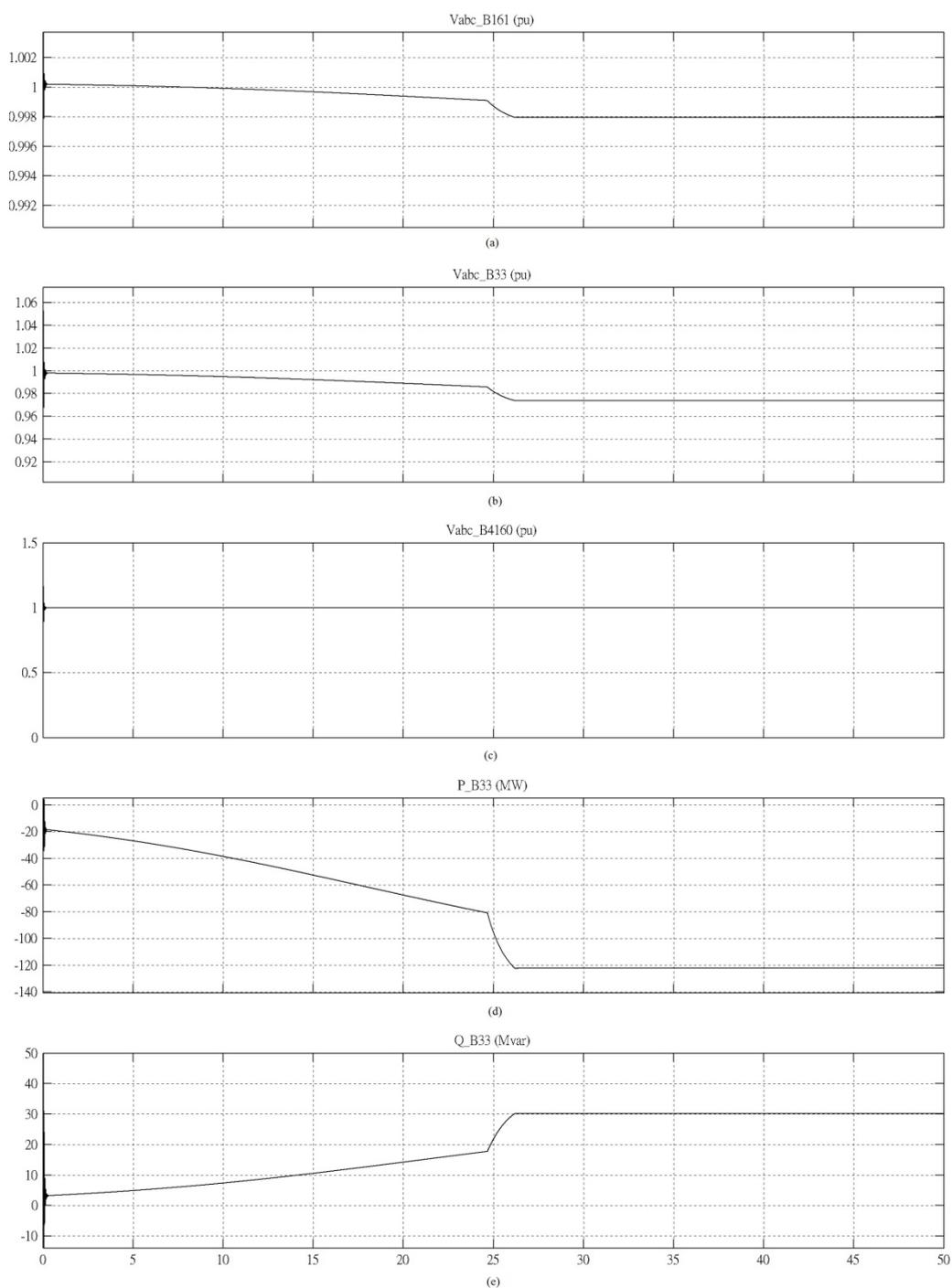


圖 3.9 第一期 32 台 3.6 MW 風機系統在風力為 14m/s，(a)161kV 匯流排電壓；(b)33kV 匯流排側電壓；(c)4160V 匯流排側電壓；(d)33kV 匯流排側之實功率潮流；(e)33kV 匯流排側之虛功率潮流。

3.2.5 第二期(含第一期)共 64 台 DFIG 風機系統模型

第二期之風機系統包含第一期的 32 台風機(群組一)加上第二期建造的 32 台風機(群組二)共 64 台風機，Matlab/Simulink 之模型如圖 3.10 所示。第二期建造之 32 台風機架構與第一期相同，不同的是傳輸線的長度，在一期之傳輸線長度為 8km，而二期之傳輸線長度為 6km。

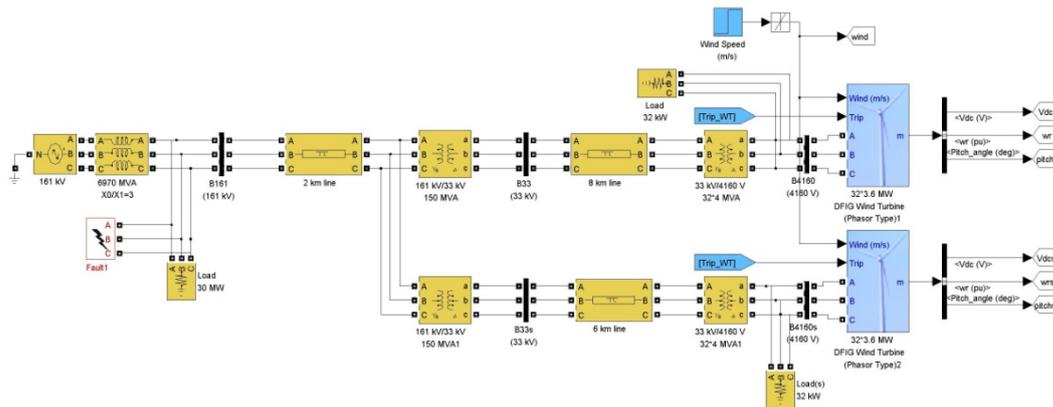


圖 3.10 第二期(含第一期)共 64 台 DFIG 風機系統之 Simulink 模型

在二期的風機系統，雖然群組一與群組二之風機容量相同，但群組一之風力發電機輸出較低之實功率，此現象是因為兩個群組之風機傳輸線長度，因此傳輸阻抗也不同，在兩個群組並聯下，因而造成不同的功率輸出。在此情形下如使用一期的參數設定將無法使二期的系統達到額定輸出，因此本文將發電機的摩擦係數由原本的 0.15 調整為 0.025 以增加發電機的功率輸出到額定，其第二期的群組二之相關波形如圖 3.11 所示。

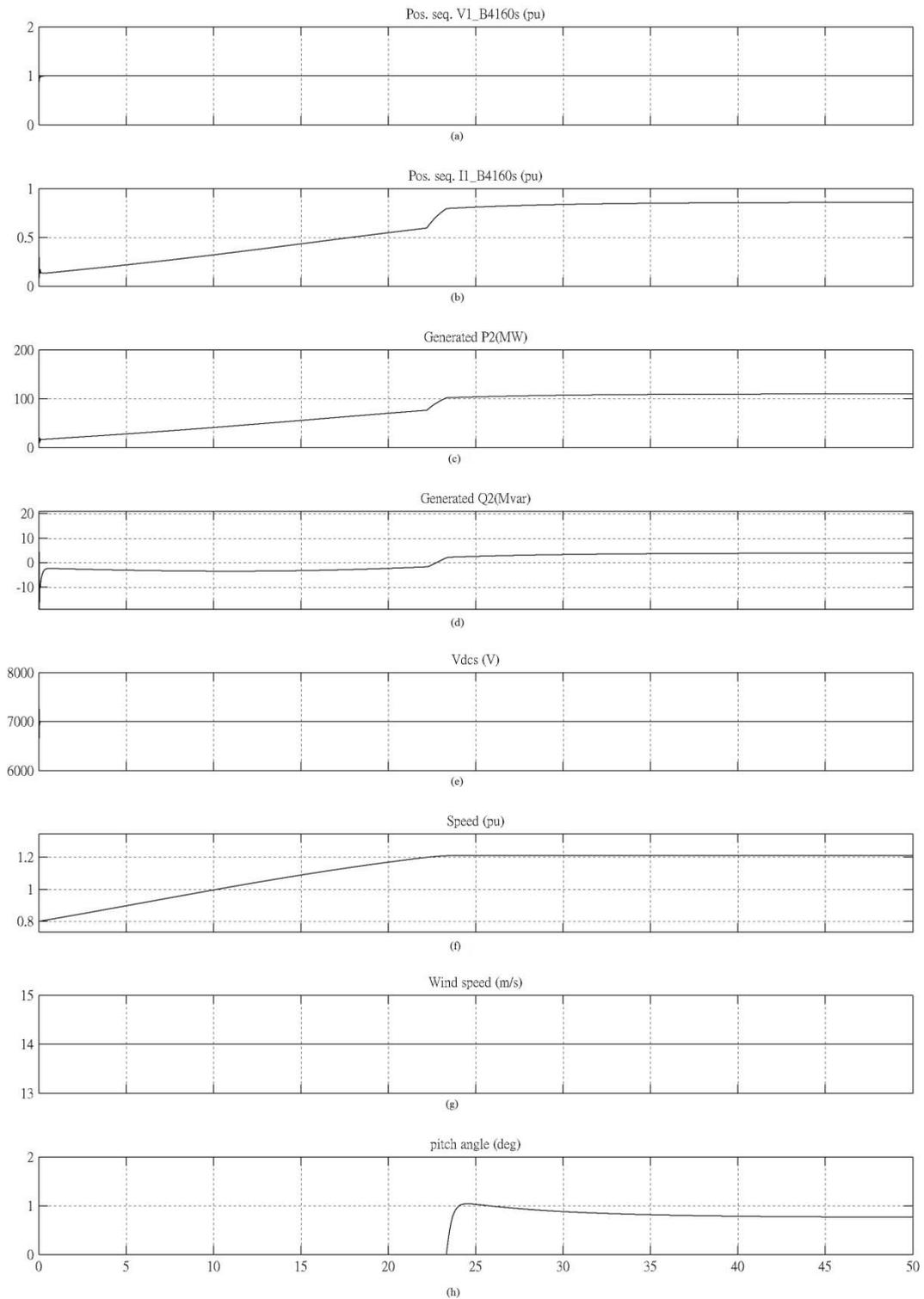


圖 3.11 第二期風機系統之群組二 32 台風力發電機運轉在 14m/s 時，(a)發電機輸出電壓；(b)發電機輸出電流；(c)發電機輸出實功率；(d)發電機輸出虛功率；(e)發電機之直流匯流排電壓；(f)發電機之轉速；(g)風速；(h)風機葉片之傾斜角。

第四章 彰化離岸風力計畫故障忍受能力分析

彰化離岸風力計畫為一大容量之風力發電廠，若電網因暫態故障而使風力發電廠脫離系統，極可能造成系統的不穩定。因三相故障為所有故障類型中對系統傷害最嚴重的情形，因此本章節將針對此計劃之第一期及第二期機組容量作三相故障分析，而此分析結果必須符合 E.ON 之規定標準。

4.1 第一期風機系統之三相故障分析

第一期之三相短路故障模型架構圖如圖 3.7 所示，而其故障發生點為電網端 30MW 負載側；故障時間為 0.15 秒；故障點電壓將降至 0V。此模擬中為了保護風機不受故障電流及電壓之損害，將其直流匯流排之 VSC 最大直流容許電壓設定為 11,060V，若高於此電壓時間超過 0.0001 秒，則風機從系統跳脫。風機之最大交流電流設定為 1.11p.u 忍受時間為 5 秒；交流低電壓及過電壓分別設定為 0.3 及 1.3p.u 其跳脫延遲時間 0.02 秒。GE 風機之發電機及轉換器跳脫時間及等級設定詳如附錄 E 所示。

本案第一期風機系統三相短路故障發電機端之模擬結果如圖 4.1 所示，其子圖(a)為發電機輸出端電壓，從圖中顯示正序電壓在故障期間下降至 0.29p.u 時間為 0.15 秒，隨後此電壓震盪 0.5 秒後回到 1p.u。子圖(b)為發電機輸出端電流，圖中顯示在故障發生時正序電流在 Bus-4160 處上昇至 1.0p.u 並於 2 秒後恢復到 0.9p.u。子圖(c)為發電機輸出端之實功率，圖中指出故障期間之實功率輸出為 9MW，此實功率之消耗為線路阻抗及區域負載，發電機實功率輸出在故障 2 秒後回復穩定。子圖(d)為發電機輸出端之虛功率，在故障期間發電機供應 50 MVAR 之虛功率至電網，並在故障發生後 2 秒回復零虛功率輸出狀態。圖(e)為直流匯流排電壓，在故障期間直流電壓發生擾動達 0.5 秒且最高之突波電壓達 9000V，此一電壓值高於設定之保護值，唯時間短暫並未造成風機跳脫。圖(f)與(g)分別為發電機轉速及風速，結果顯示故障期間二者並未變動，這是由於故障時間只有 0.15 秒對於風速而言可視為定值，而發電機轉速則是因為機械慣性因此並未變動。圖(h)為葉片傾斜角度，在故障開始時風機葉片角度上昇 2.5 度以減少風機葉片對於風能之能量擷取，此目的為減少實功率的輸出。

本案第一期風機系統三相短路故障匯流排側之電壓及電力潮流模擬結果如圖 4.2 所示，子圖(a)為 161kV 匯流排電壓，圖中顯示故障期間匯流排電壓降為 0V，這是因為匯流排三相故障直接接地未經由任何阻抗，在故障後其電壓立即恢復為 1.0p.u。圖(b)為 33kV 匯流排側電壓，故障期間匯流排電壓降為 0.11p.u，此電壓高於 161kV 匯流排電壓，這是因為故障電流通過 2 公里之傳輸線及 150 MVA 變壓器所造成的壓降。圖(c)為 4160V 匯流排側電壓，其電壓降為 0.38p.u，此值高於 161kV 及 33kV 匯流排側之電壓，由此可知線路越長及變壓器越多則電壓降越大，且在故障期間之短路電流越小，對於設備的衝擊越小。圖(d)為 33kV 匯流排側之實功率潮流，圖中顯示故障期間實功率降為 0W，此值表示發電機位輸出實功率。圖(e)為 33kV 匯流排側之虛功率潮流，故障期間發電機提供 17MVAR 虛功到此匯流排。圖(f)及(g)分別為 161kV 匯流排側之實功率及虛功率潮流，故障期間匯流排並未收到任何實功率及虛功率。

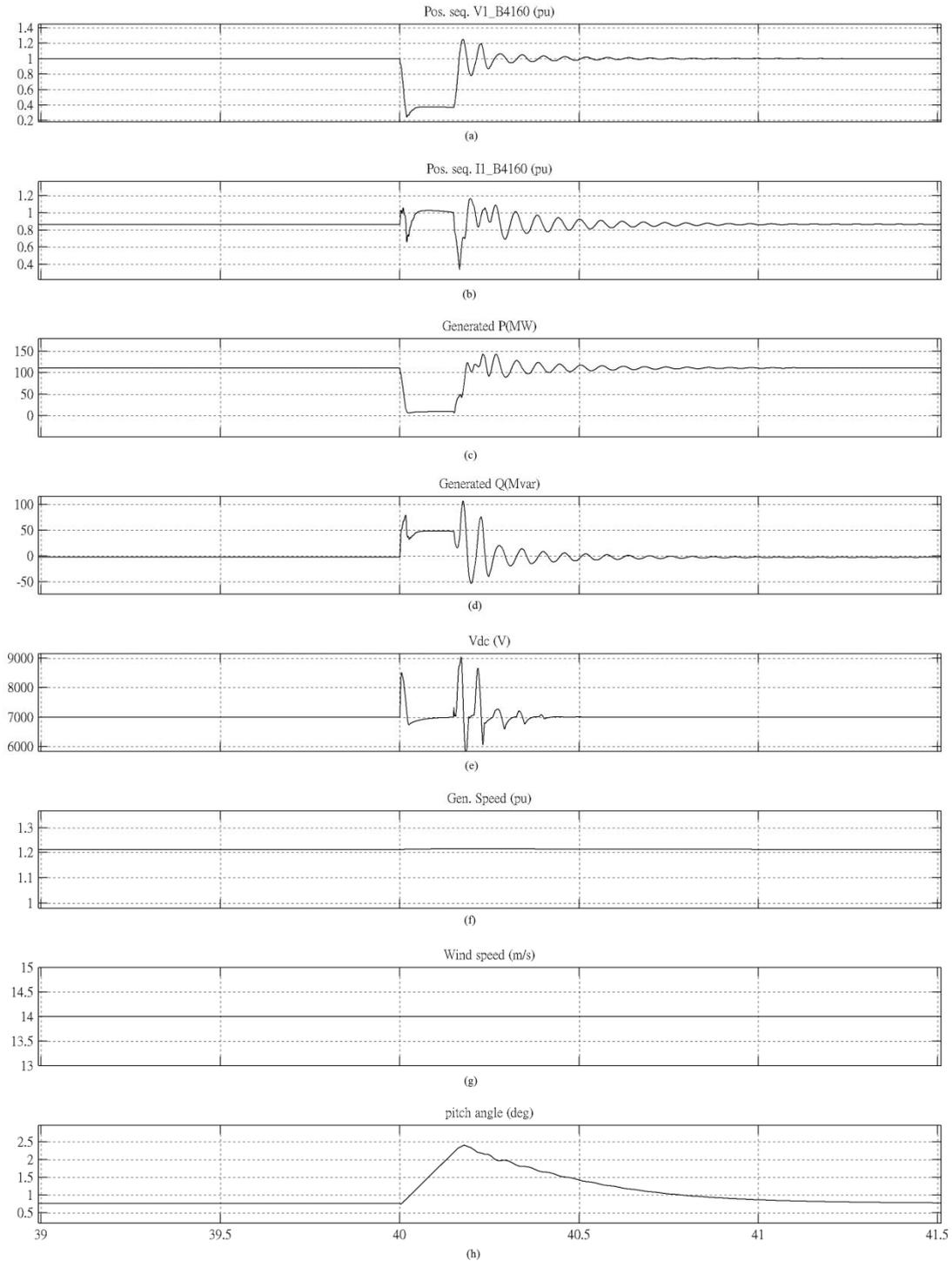


圖 4.1 第一期風機系統三相短路故障發電機端之模擬結果，(a)發電機輸出端電壓；(b)發電機輸出端電流；(c)發電機輸出端之實功率；(d)發電機輸出端之虛功率；(e)直流匯流排電壓；(f) 發電機轉速；(g)風速；(h)葉片傾斜角度。

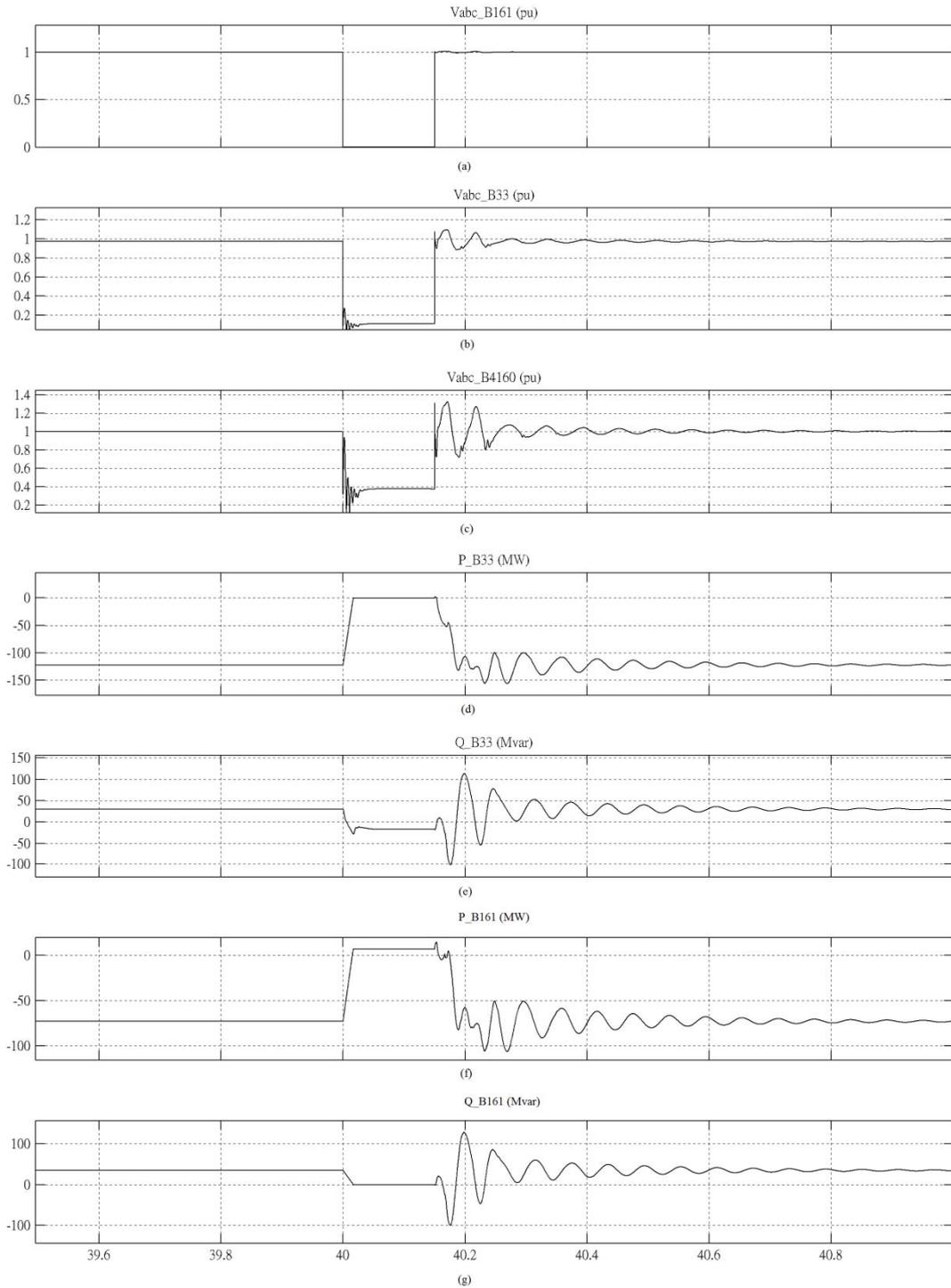


圖 4.2 第一期風機系統三相短路故障匯流排側之電壓及電力潮流模擬結果，
 (a)161kV 匯流排電壓；(b)33kV 匯流排側電壓；(c)4160V 匯流排側電壓；(d)33kV
 匯流排側之實功率潮流；(e)33kV 匯流排側之虛功率潮流；(f) 161kV 匯流排側之
 實功率；(g) 161kV 匯流排側之虛功率潮流。

4.2 第一期風機系統之三相故障分析並聯 STATCOM

第一期三相短路故障並聯 100MVAR STATCOM 模型架構圖如圖 4.3 所示，此 STATCOM 連接至 161 kV/33 kV 變壓器之高壓側，由於變壓器低壓側電流大因此 STATCOM 設備連接於高壓側可降低設備的絕緣等級並減少設備費用投資之優點，此外將設備安裝在離電網較近之位置，對於故障時之系統有較高的恢復能力。此模型之故障模擬結果如圖 4.4 及 4.5 所示，從圖中可發現第一期風機系統在三相短路故障時有加 STATCOM 跟沒有加的圖形幾乎相同。唯一不同之波形為 161 kV 匯流排之電力潮流如圖 4.5(f)~(g)，在故障結束前此匯流排出現一個正脈衝的實功率波形，其振幅約為 100MW，此現象可能表示在系統恢復正常前電網須提供暫態的實功率到風機系統以幫助快速恢復正常狀態。然而相反的在故障結束前此匯流排出現一個負脈衝的虛功率波形，其振幅約為 300MVAR，此現象可能表示在系統恢復正常前 STATCOM 會提供虛功率給電網以幫助快速恢復正常狀態。另外，觀察 d-q 軸電流流入 STATCOM 的情形如圖 4.6 所示，圖 4.6(a) 顯示正值之波形，此結果表示實功率流入 STATCOM，因此可以確定在故障期間 STATCOM 會吸收實功率，而圖 4.6(b)顯示正值之波形，表示故障期間 STATCOM 會供應虛功率到系統。

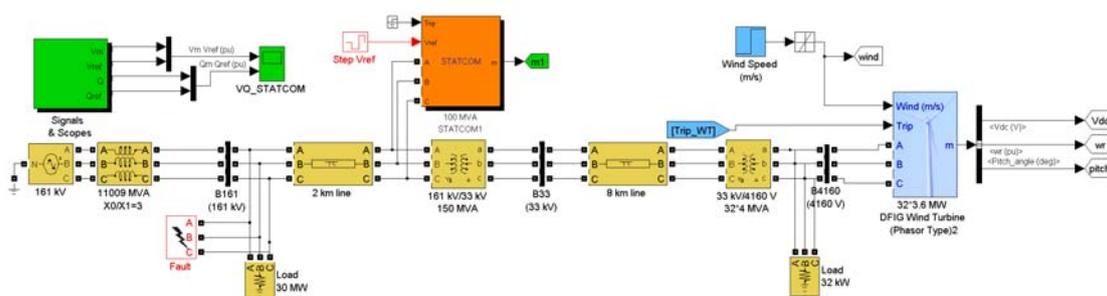


圖 4.3 第一期 32 風力發電機並聯 100MVAR STATCOM 之 Matlab/Simulink 模型

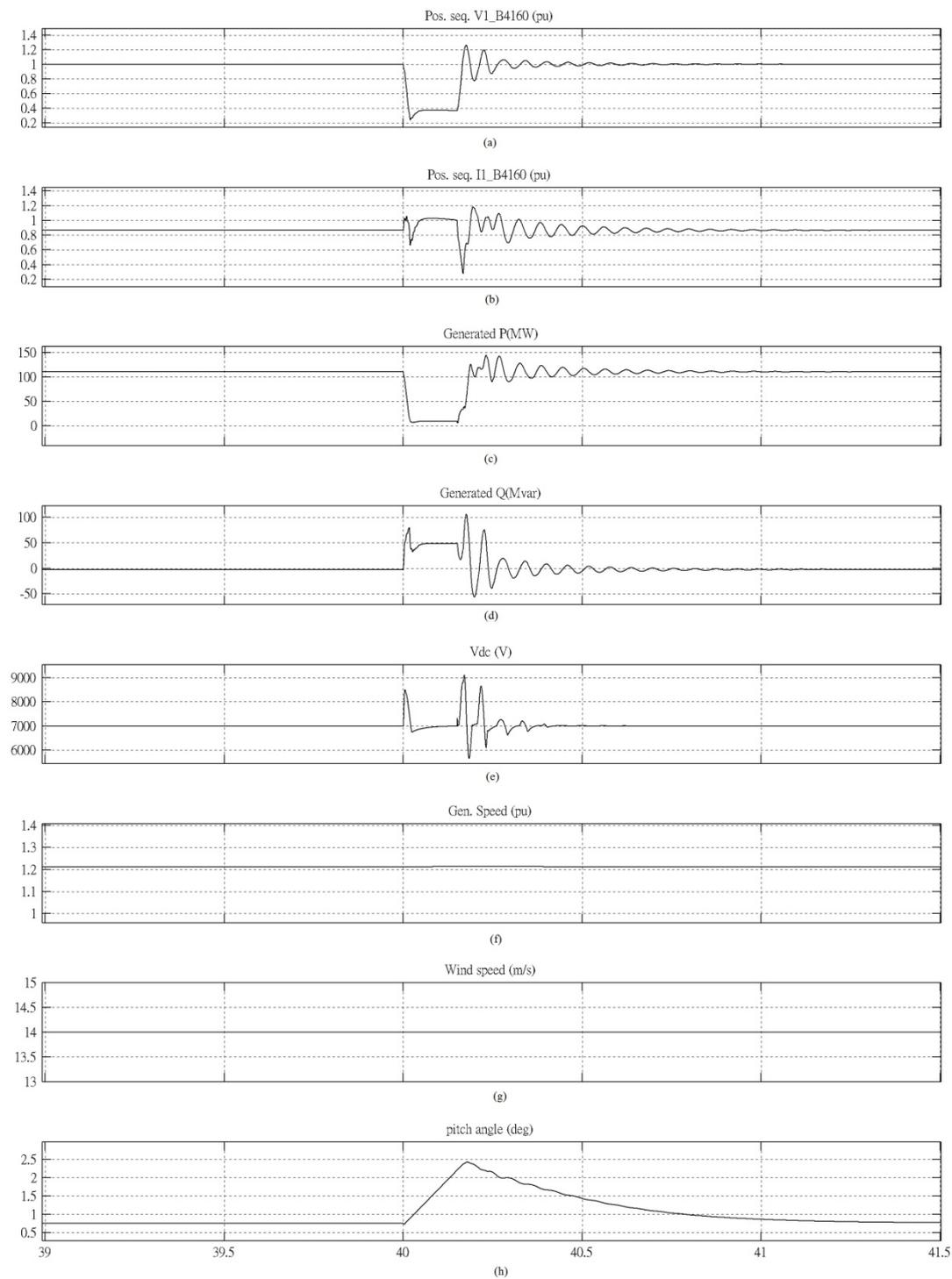


圖 4.4 第一期三相短路故障並聯 100MVAR STATCOM，(a)發電機輸出端電壓；(b) 發電機輸出端電流；(c)發電機輸出端之實功率；(d)發電機輸出端之虛功率；(e)直流匯流排電壓；(f) 發電機轉速；(g)風速；(h)葉片傾斜角度。

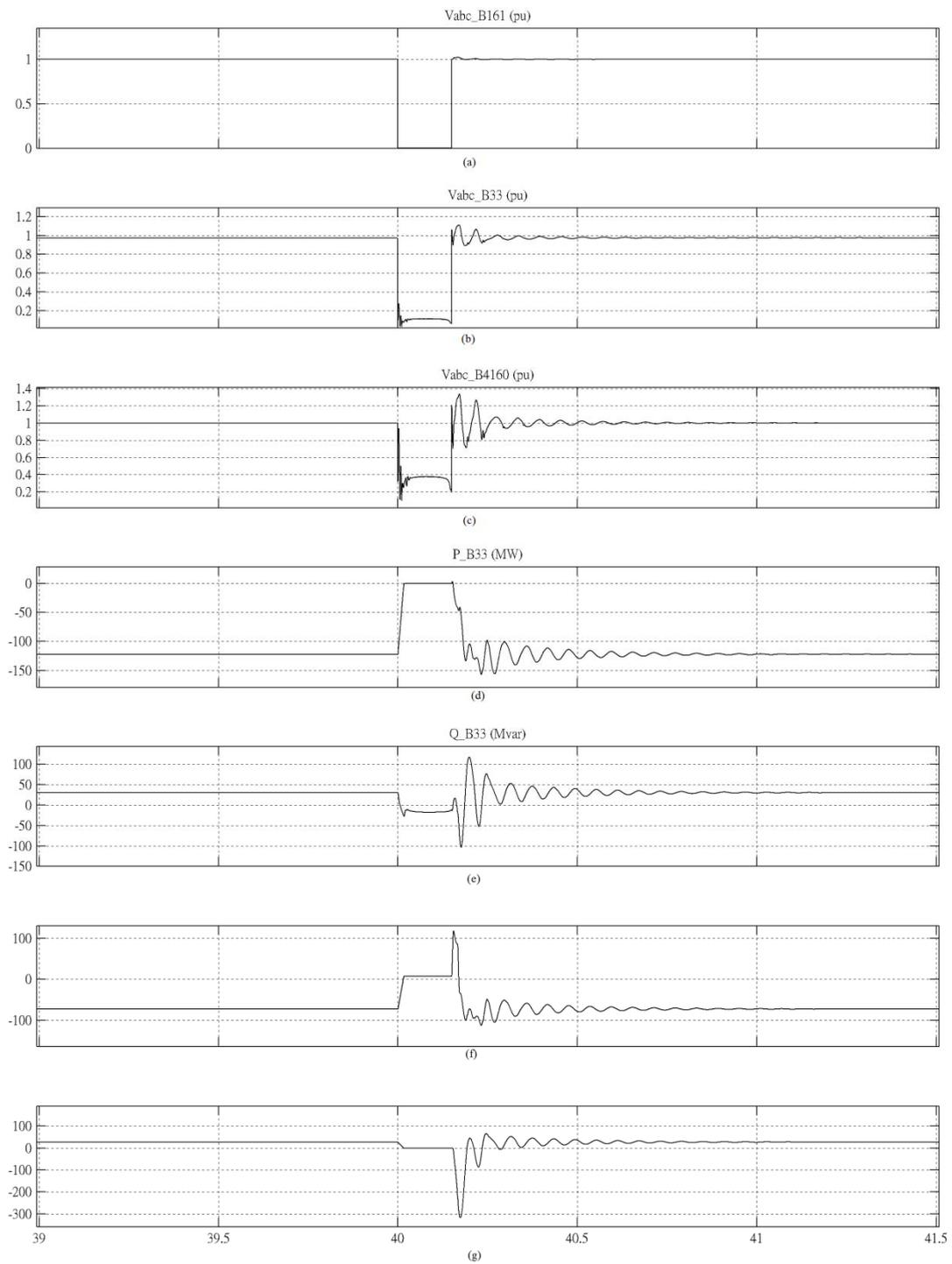
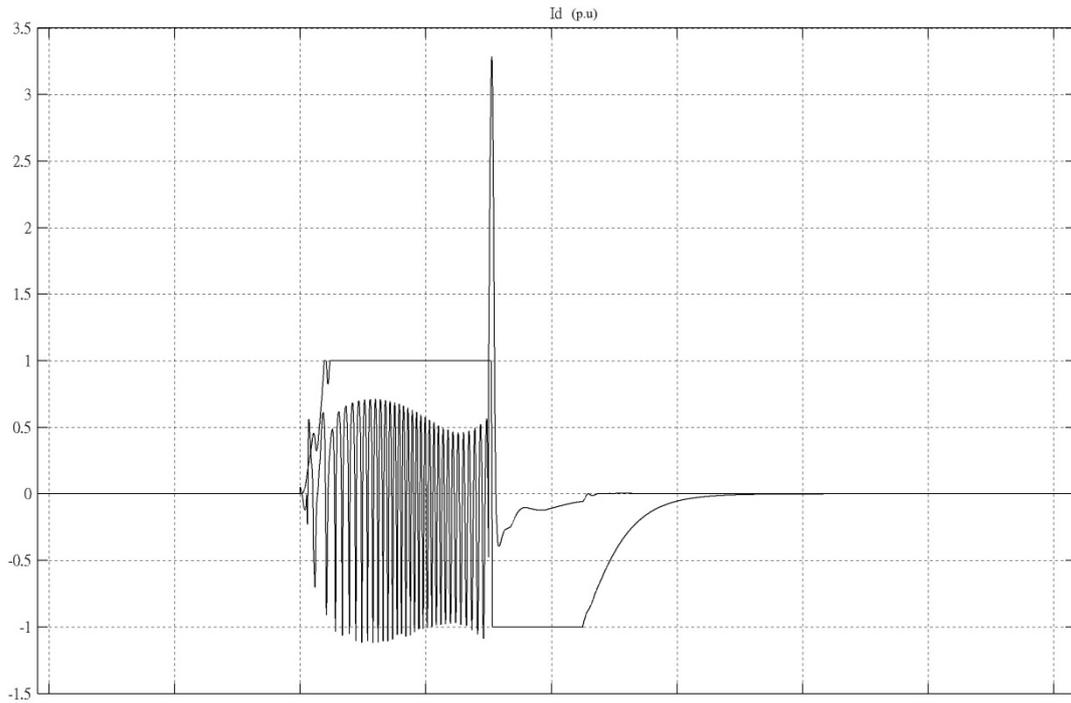
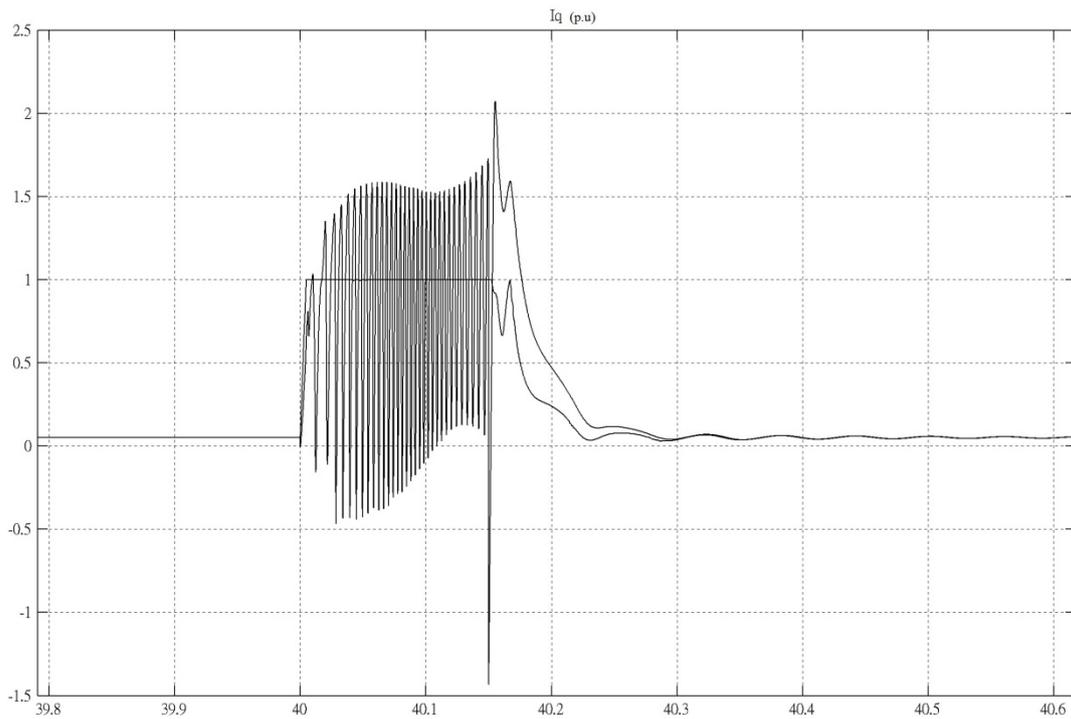


圖 4.5 第一第一期三相短路故障並聯 100MVAR STATCOM，(a)161kV 匯流排電壓；(b)33kV 匯流排側電壓；(c)4160V 匯流排側電壓；(d)33kV 匯流排側之實功率潮流；(e)33kV 匯流排側之虛功率潮流；(f) 161kV 匯流排側之實功率；(g) 161kV 匯流排側之虛功率潮流。



(a)



(b)

圖 4.6 d-q 軸電流流入 STATCOM 的情形，(a)d 軸分量電流；(b)q 軸分量電流。

4.3 第二期風機系統之三相故障分析

第二期之三相短路故障模型架構圖如圖 3.10 所示，而其故障發生點為電網端 30MW 負載側；故障時間為 0.15 秒；故障點電壓將降至 0V。第一個風力發電機群之波形如圖 4.7 所示，第二個風力發電機群之波形如圖 4.8 所示。比較此二群組之波形可發現，由於此二群組風力發電機離岸距離不同，其電纜長度不同、阻抗特性亦不同。風機群組一，因其傳輸線路比群組二長，所以有較高的正序電壓在 4160V 匯流排，且其正序匯流排之電流亦較高。比較實功率波形，在故障結束前群組一產生一負值脈衝，此值表示群組一從系統吸收實功，相反的群組二則產生一正脈衝，表示群組二提供實功到系統。此外，在故障期間群組二提供較高之虛功率到系統。群組一及二電力潮流在匯流排之波形分別顯示在圖 4.9 及 4.10 中，比較此二圖形可發現在故障期間其電壓及功率皆不同，33KV 匯流排電壓在群組一為 0.11p.u、群組二為 0.12p.u；4160V 匯流排電壓在群組一為 0.37p.u、群組二為 0.33p.u；故障後群組一在 33kV 匯流排處提供一正脈衝為 32MW 之實功率到風機組，接著再從風機組接收一虛功率為 62MVAR 之負脈衝；而同時群組二 33kV 匯流排處從風機組吸收一虛功率為 67MVAR 之負脈衝。

161kV 匯流排之電力潮流如圖 4.11 所示，圖中顯示在三相故障前電網接收 198MW 之實功率，並供應 63MVAR 之虛功率給風力發電廠。如果比較風機第一期及第二期系統之 16kV 匯流排電力潮流圖 4.2 及 4.11，在風機正常運轉時第一期之電網接收 73MW 之實功及提供 34.28MVAR 的虛功率，二期之電網接收 195MW 之實功及提供 61.5MVAR 之虛功。

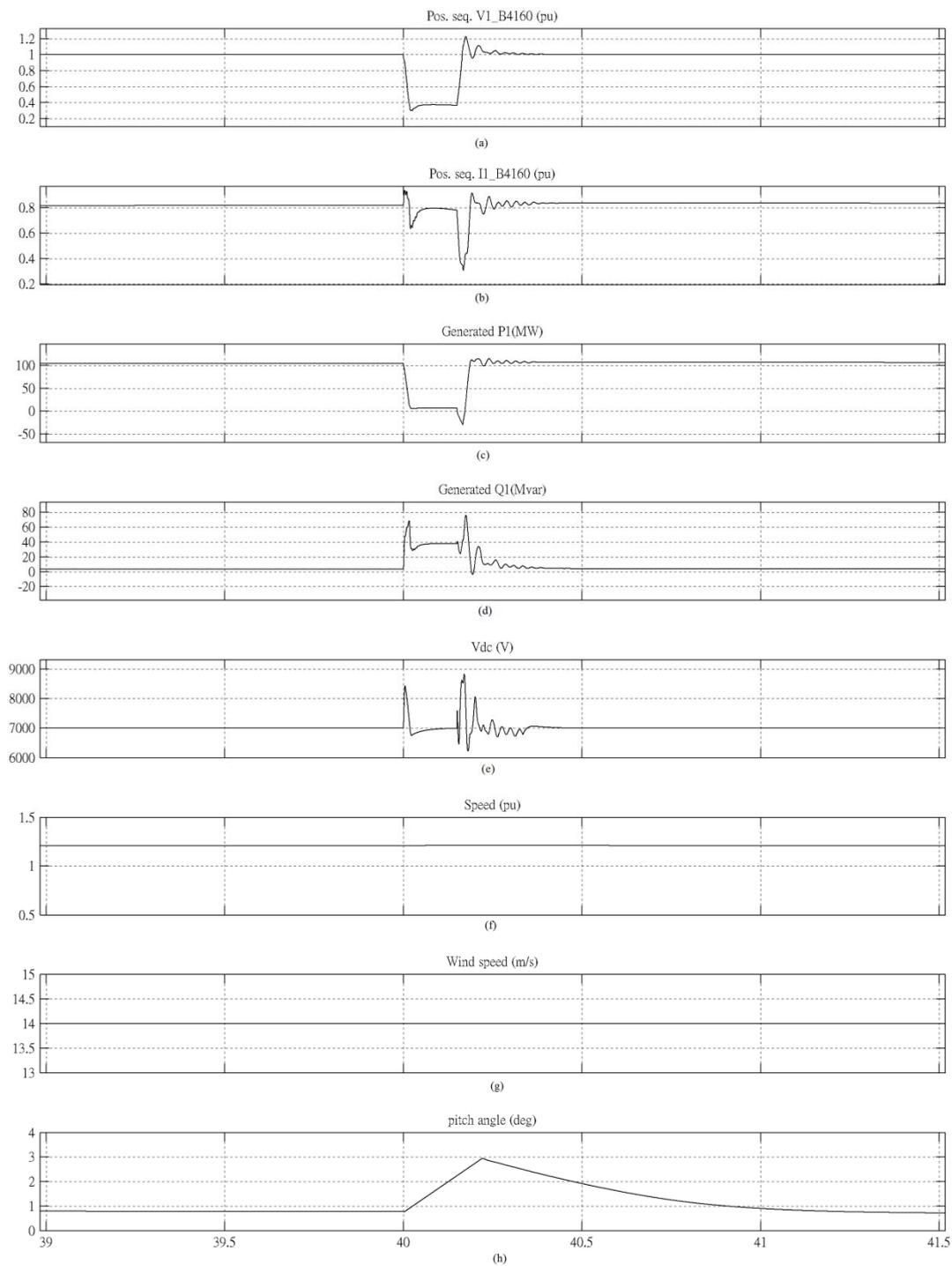


圖 4.7 第二期風機系統之第一群組風機之三相短路故障，(a)發電機輸出端電壓；(b)發電機輸出端電流；(c)發電機輸出端之實功率；(d)發電機輸出端之虛功率；(e)直流匯流排電壓；(f) 發電機轉速；(g)風速；(h)葉片傾斜角度。

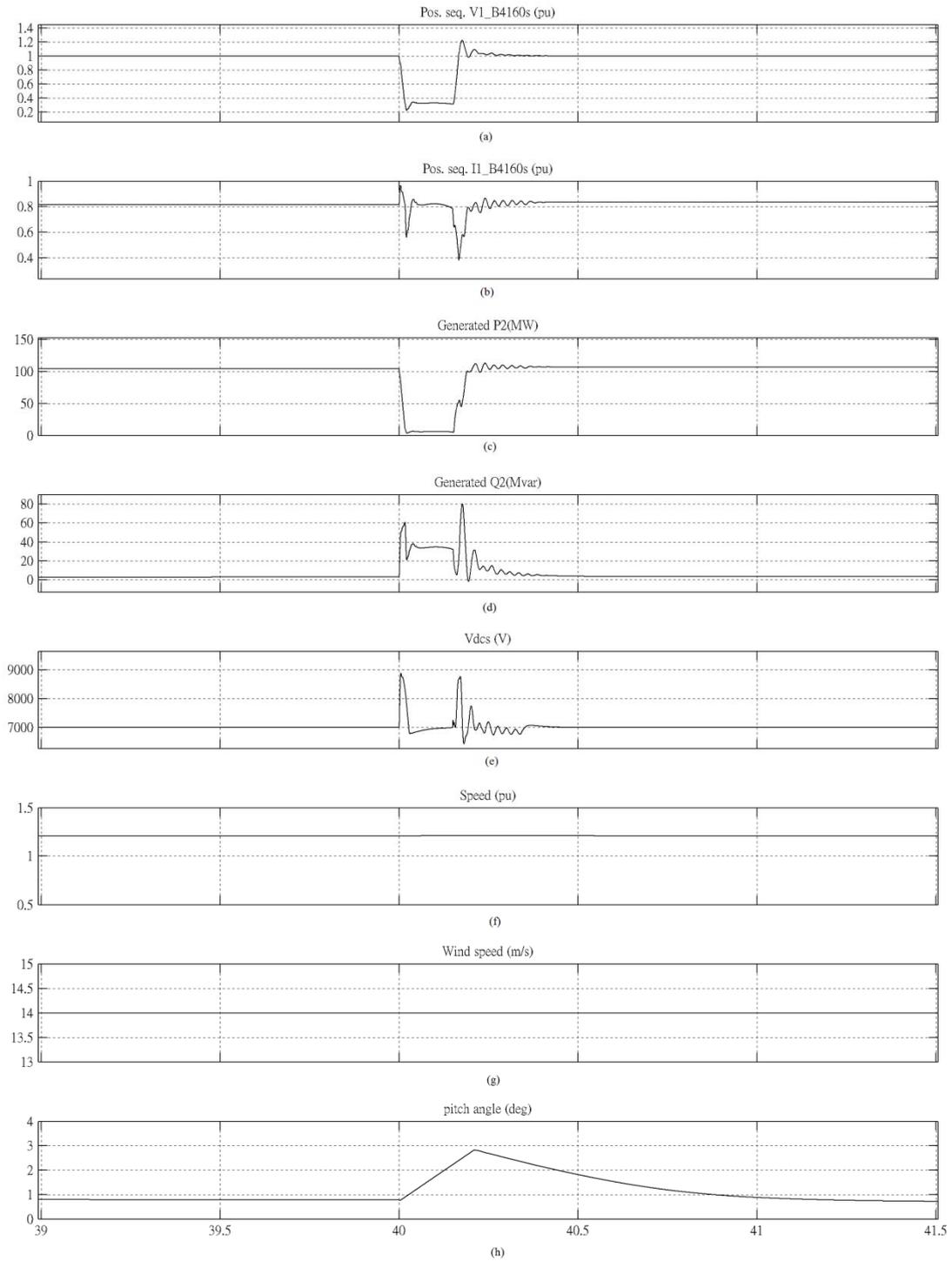


圖 4.8 第二期風機系統之第二群組風機之三相短路故障，(a)發電機輸出端電壓；(b)發電機輸出端電流；(c)發電機輸出端之實功率；(d)發電機輸出端之虛功率；(e)直流匯流排電壓；(f) 發電機轉速；(g)風速；(h)葉片傾斜角度。

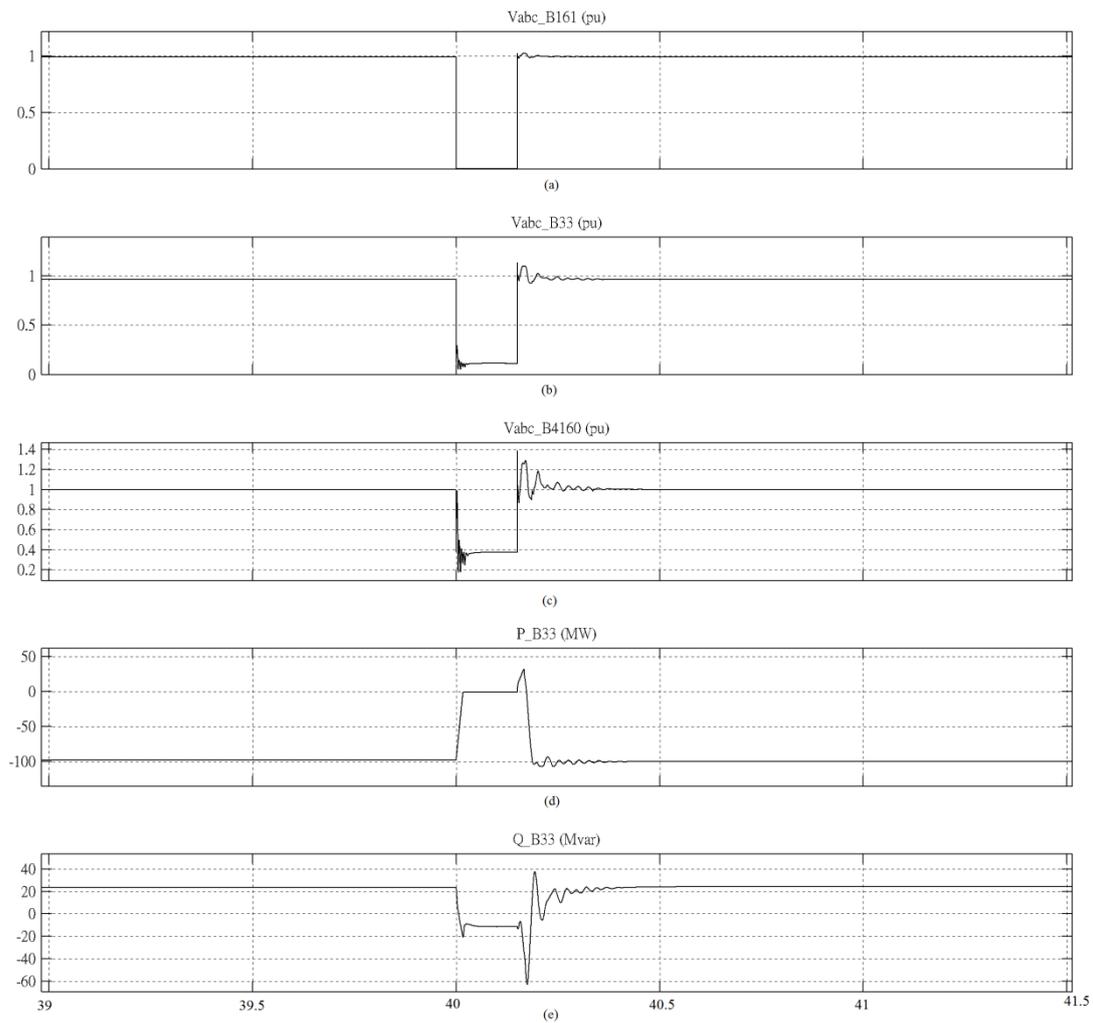


圖 4.9 第二期風機系統之第一群組風機之三相短路故障，(a)161kV 匯流排電壓；(b)33kV 匯流排側電壓；(c)4160V 匯流排側電壓；(d)33kV 匯流排側之實功率潮流；(e)33kV 匯流排側之虛功率潮流。

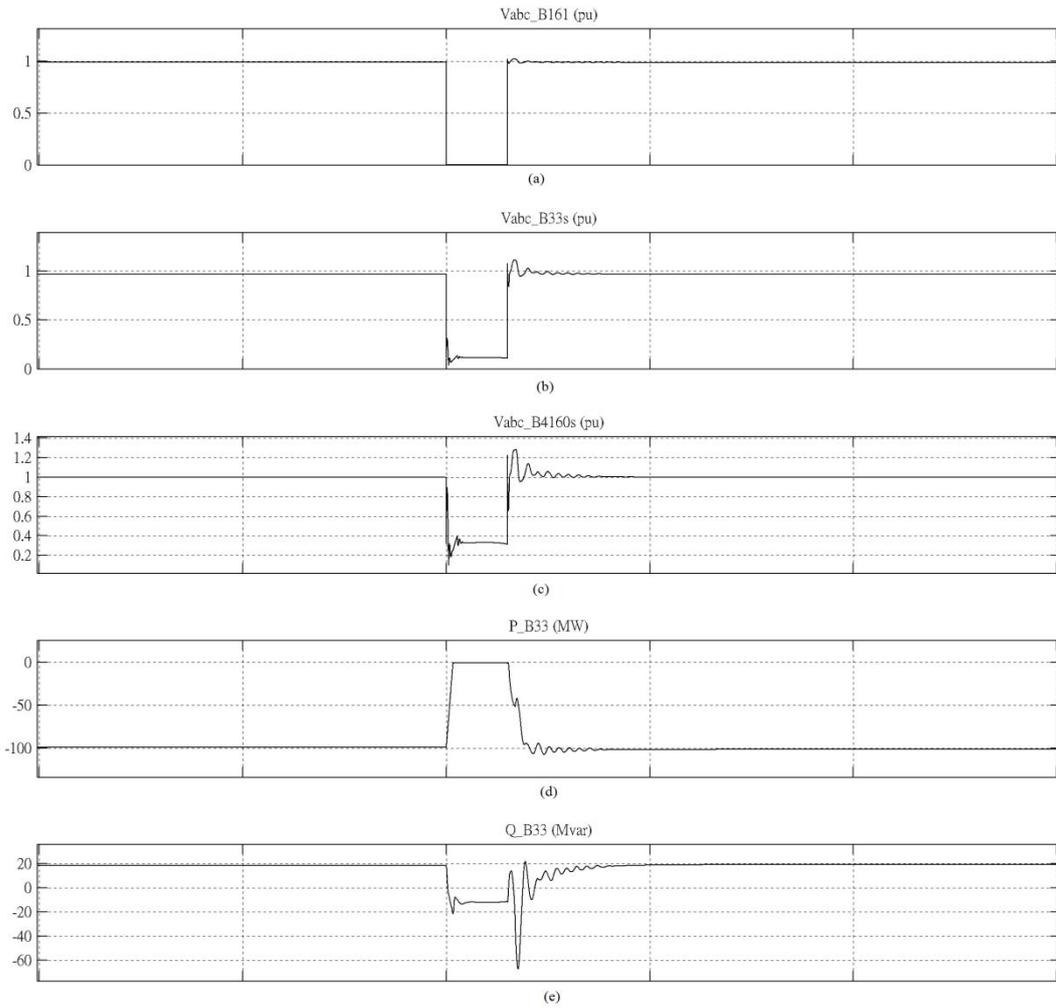


圖 4.10 第二期風機系統之第二群組風機之三相短路故障，(a)161kV 匯流排電壓；(b)33kV 匯流排側電壓；(c)4160V 匯流排側電壓；(d)33kV 匯流排側之實功率潮流；(e)33kV 匯流排側之虛功率潮流。

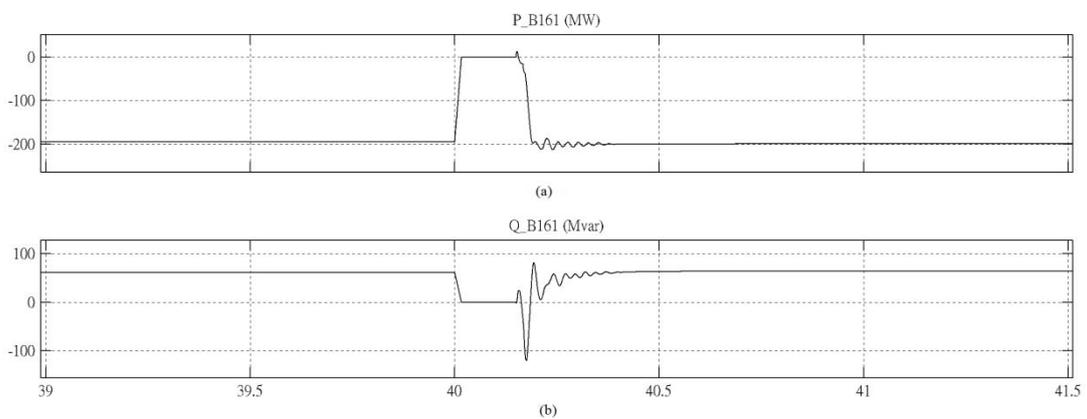


圖 4.11 第二期風機系統在三相短路故障時之 161kV 匯流排電力潮流，(a)實功率潮流；(b)虛功率潮流。

4.4 第二期風機系統之三相故障分析並聯 STATCOM

第二期三相短路故障並聯 100MVAR STATCOM 模型架構圖如圖 4.12 所示，其故障期間之第一個風力發電機群及第二個風力發電機群之波形如圖 4.13 及 4.14 所示。若比較此二圖形與圖 4.7 與 4.8 可發現，其波形極為相似，此含義表示第二期風機系統在三相故障時，是否安裝 STATCOM 對於風力發電機影響甚微。匯流排之電壓及功率潮流如圖 4.15 與 4.16 所示。比較此二圖形與圖 4.9 與 4.10 可發現，其圖形亦相似；另外 161KV 匯流排之功率潮流波形如圖 4.17 所示，比較圖 4.11 可發現，在故障結束後電網從風機系統接收一突波為 216 MVAR 的虛功率，此虛功率值高於圖 4.11(b)約 96 MVAR，而此虛功率是由 STATCOM 所提供。

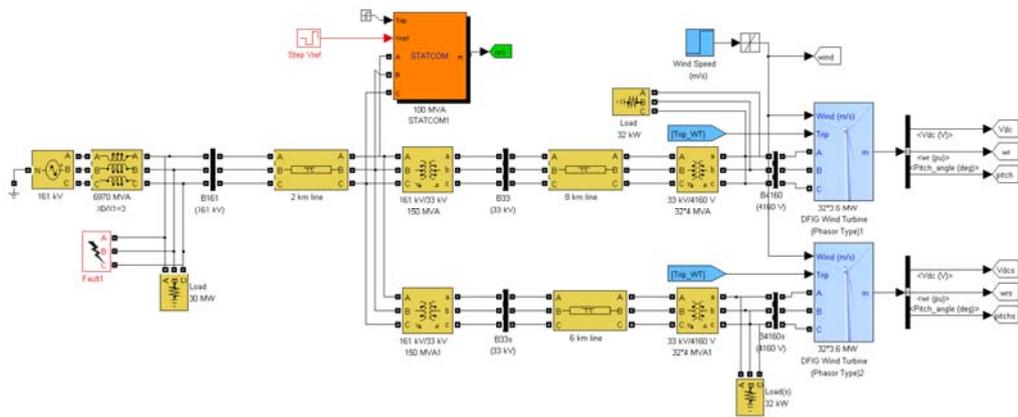


圖 4.12 第二期 64 台 DFIG 風機系統連接 STATCOM 之 Matlab/Simulink 模型

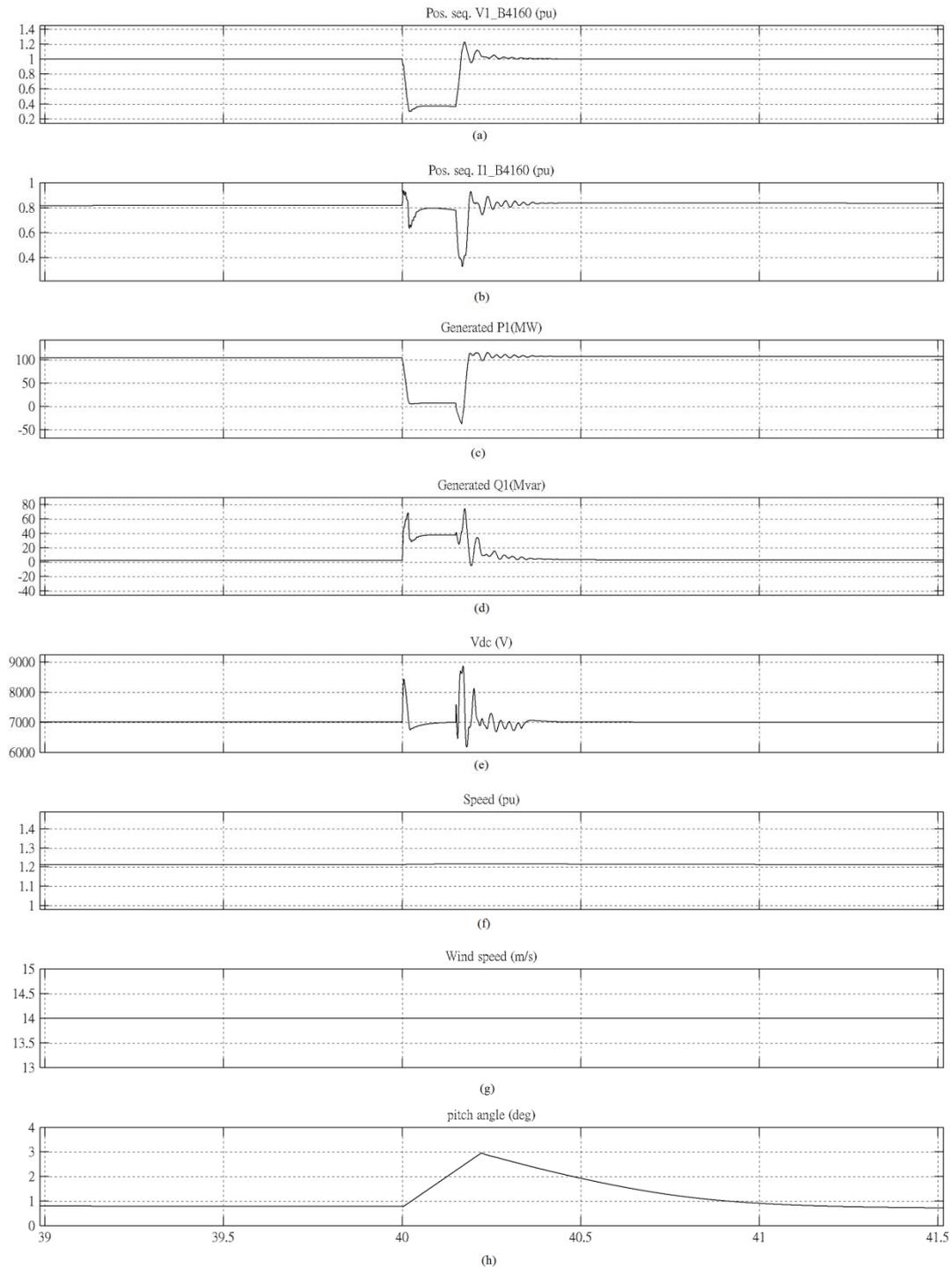


圖 4.13 第二期風機系統連接 STATCOM 之第一群組風機之三相短路故障，(a)發電機輸出端電壓；(b)發電機輸出端電流；(c)發電機輸出端之實功率；(d)發電機輸出端之虛功率；(e)直流匯流排電壓；(f) 發電機轉速；(g)風速；(h)葉片傾斜角度。

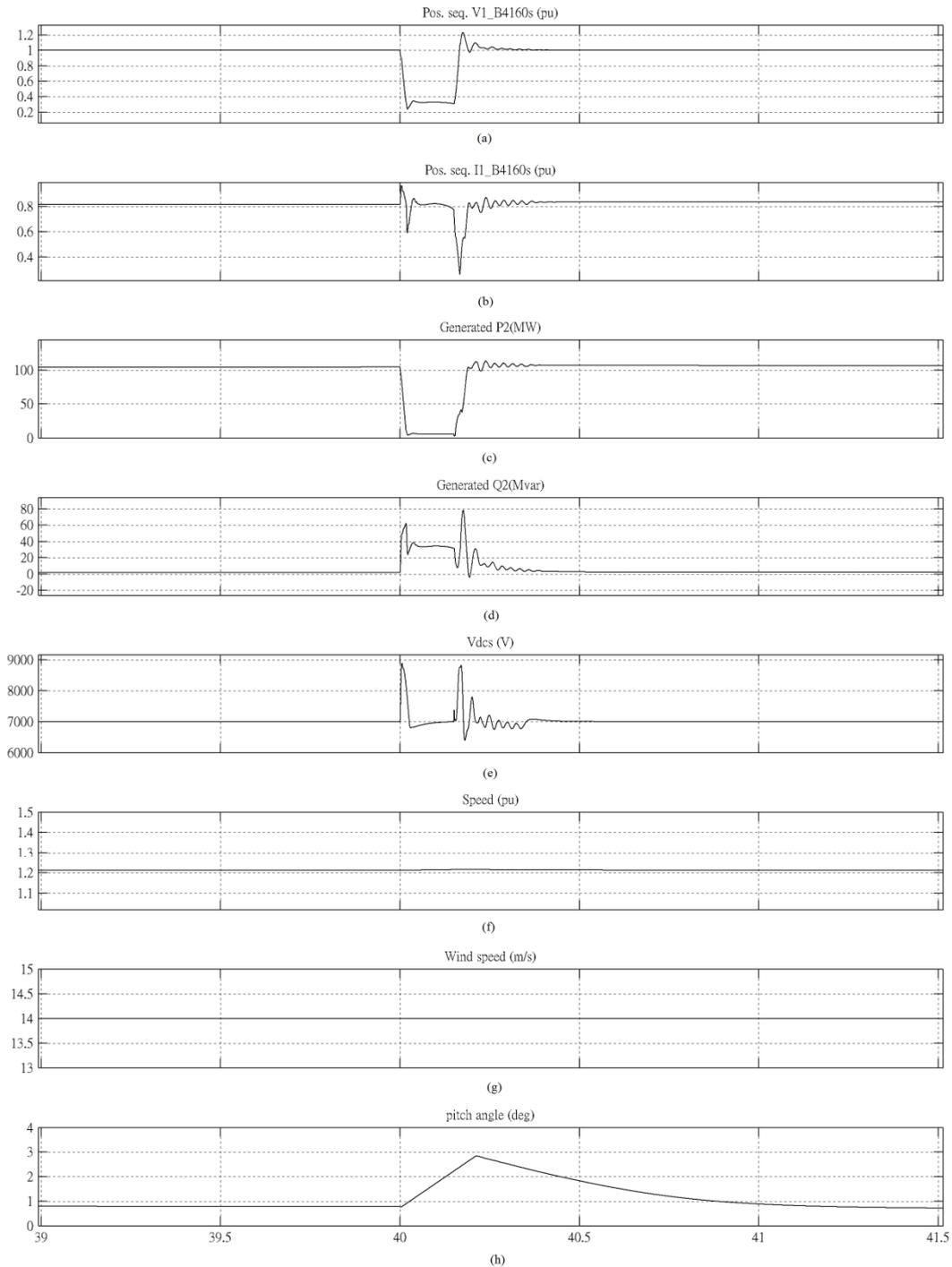


圖 4.14 第二期風機系統連接 STATCOM 之第二群組風機之三相短路故障，(a)發電機輸出端電壓；(b)發電機輸出端電流；(c)發電機輸出端之實功率；(d)發電機輸出端之虛功率；(e)直流匯流排電壓；(f)發電機轉速；(g)風速；(h)葉片傾斜角度。

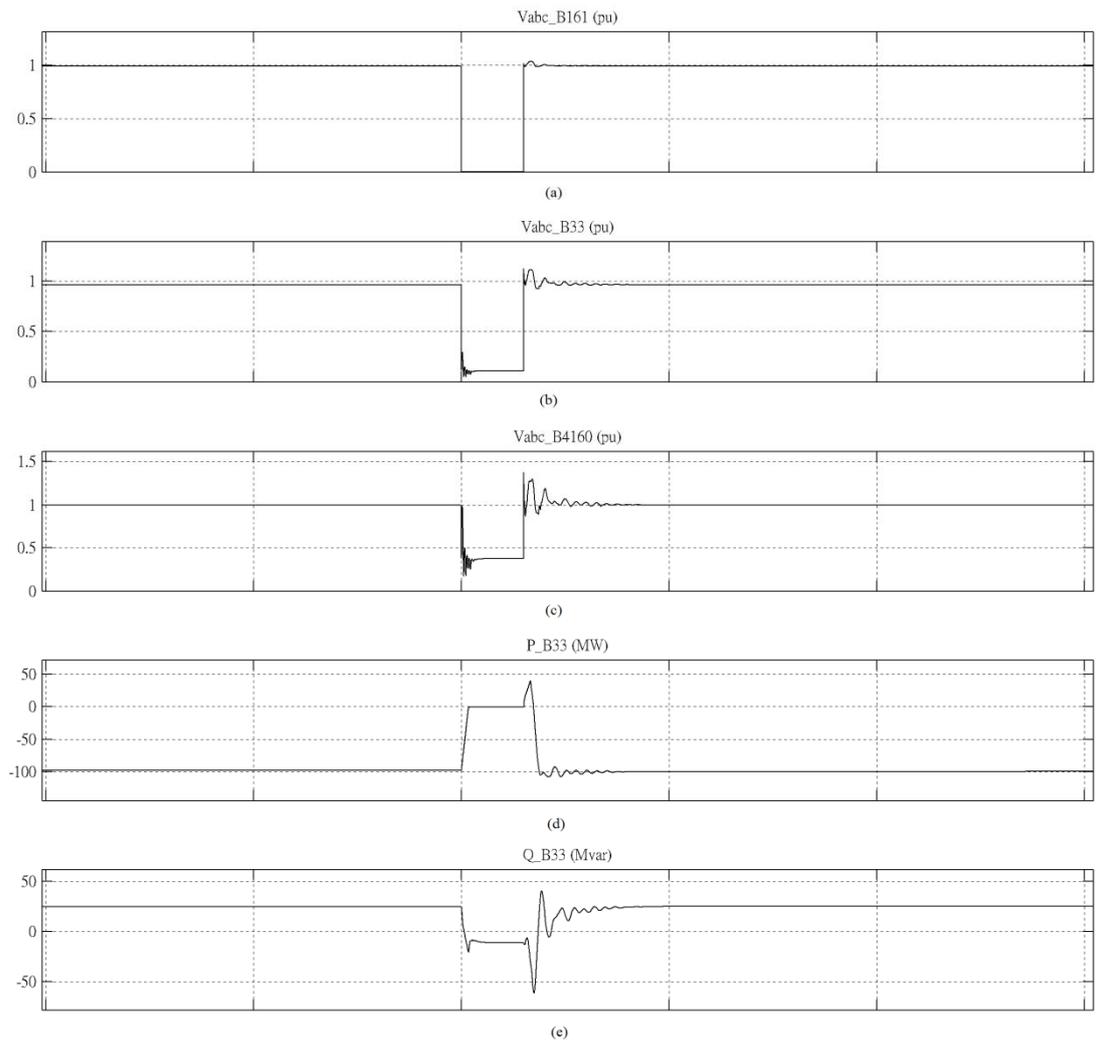


圖 4.15 第二期風機系統連接 STATCOM 之第一群組風機之三相短路故障，
 (a)161kV 匯流排電壓；(b)33kV 匯流排側電壓；(c)4160V 匯流排側電壓；(d)33kV
 匯流排側之實功率潮流；(e)33kV 匯流排側之虛功率潮流。

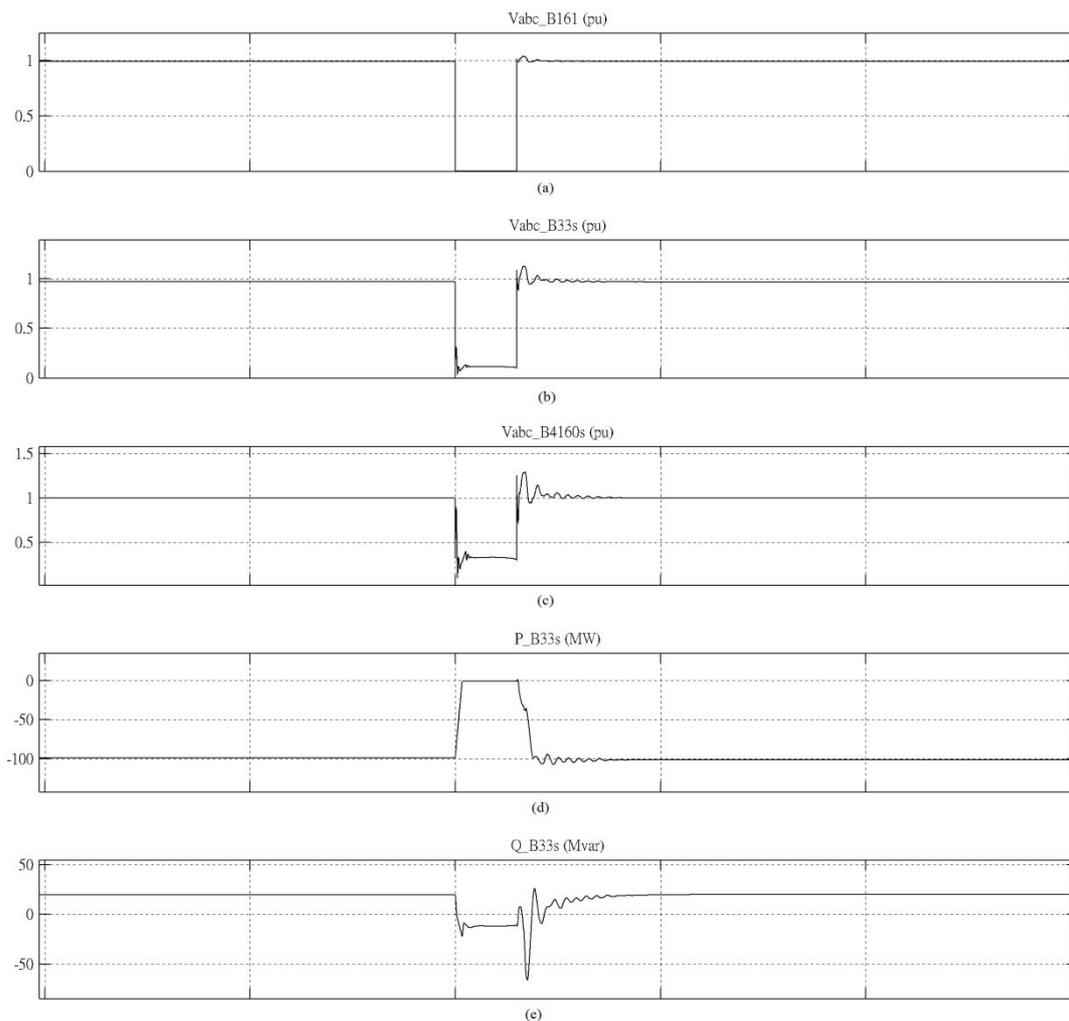


圖 4.16 第二期風機系統連接 STATCOM 之第二群組風機之三相短路故障，
 (a)161kV 匯流排電壓；(b)33kV 匯流排側電壓；(c)4160V 匯流排側電壓；(d)33kV
 匯流排側之實功率潮流；(e)33kV 匯流排側之虛功率潮流。

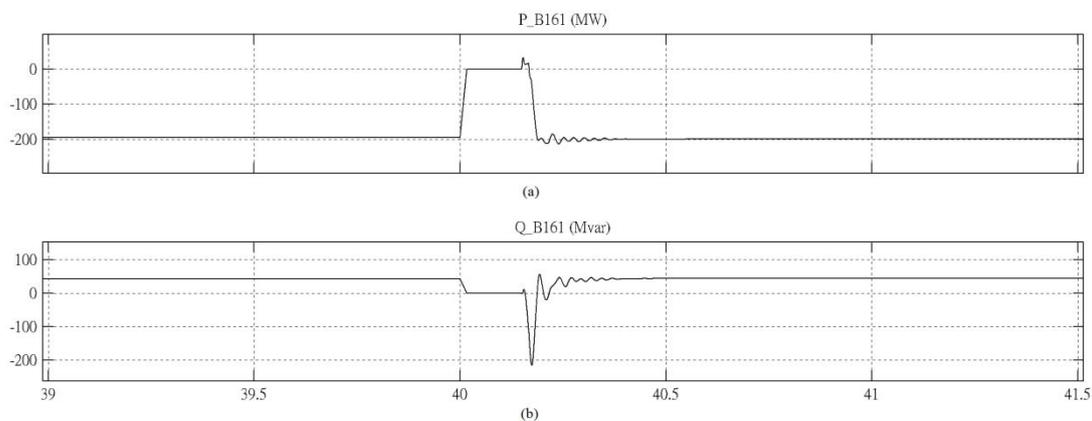


圖 4.17 第二期風機系統連接 STATCOM 在三相短路故障時之 161kV 匯流排電力
 潮流，(a)實功率潮流；(b)虛功率潮流。

第五章 討論

5.1 第一期風機系統之三相故障分析結果討論

在 2.1 節文獻回顧中，以往所研究之 DFIG 大多使用發電機容量之 25% 到 30% 轉換器，然而本研究所使用之 GE 3.6 MW 風機其電壓源控制轉換器係採用 48% 之發電機容量轉換器，在故障期間可產生 1.74 MVAR 之虛功率到電網。因此在第一期系統，32 台 DFIG 風力發電機共可產生 55.68 MVAR 之虛功率以幫助系統重建。第一期風機系統之三相故障波形如圖 5.1 所示，由圖中可見在故障期間風機系統提供 50 MVAR 之虛功率到電網，且在故障清除後的 1.5 秒 32 台風機恢復故障前的狀態。然而在本研究中風機之跳脫訊號並未考慮暫態過載之問題，因此如考慮暫態因數，在圖 5.1 中虛功率波形有三個脈波超過風力發電機組可提供之額定容量，另外實功率部分亦有四個脈波超過額定，而此結果應由風機製造廠家確認是否可行。

在三相故障期間，電壓源轉換器之直流匯流排有三個脈衝波形超過設定跳脫值 8000 V(如圖 4.1.C 所示)，而此暫態過電壓可藉由短路棒(Crowbar)保護。若風機在故障期間運轉，則故障電流流過轉子轉換器 IGBT 元件之容量將遠大於其額定容量，因此此轉換器需要被閉鎖以保護設備不受電氣及熱過載之破壞，此時轉子電路經由短路棒短路，並在電網回復正常後轉子側轉換器也恢復工作。

由模擬結果可知，第一期風機系統發生故障，風力發電機組在未並聯 STATCOM 情況下有足夠的能力忍受故障達 0.15 秒，此結果符合電力運轉公司 E.ON.之要求。

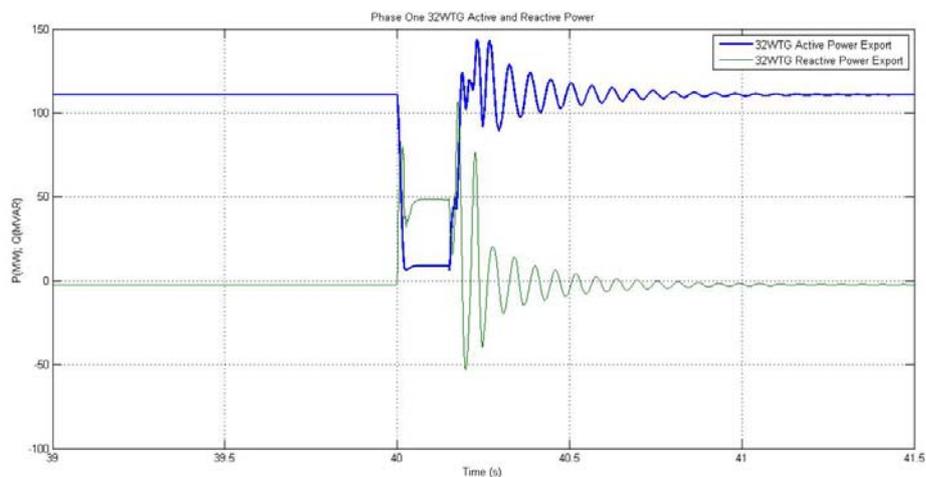


圖 5.1 第一期風機系統在三相故障時，32 台風機之實功率及虛功率圖

5.2 第二期風機系統之三相故障分析結果討論

在第二期風機系統，其風機數量為 64 台 DFIG 風力機，因此數量及容量為第一期的二倍，在故障期間其所能產生虛功率容量到電網為 110 MVAR。在二期風機系統的三相故障分析結果中，故障期間群組一及群組二分別提供 38 及 34 MVAR 的虛功率到電網，其波形如圖 5.2 所示，而在故障清除後風機系統於 0.4 秒恢復穩定狀態，此恢復時間比第一期風機系統短。在第二期系統故障期間風機實功率供應部分如圖 5.3 所示，由圖可知在故障清除後風機群組二提供 41 MW 脈衝之實功率到電網，而群組一則為從電網吸收 38 MW 脈衝之實功率，此實功率互補現象可能對於風機系統恢復正常狀態有所幫助。在前人的研究 STATCOM 對於故障忍受能力有很大的幫助，然而在本研究中其對整個系統的影響並不明顯，這是因為彰化離岸風力一期所連接的電網為一強健的電網，此結論可從 2.1 節中得知，風機在電網系統之最大佔比為 20% 的短路容量(SCC)，然而本研究中，彰化離岸風力計畫第一二期之容量僅為短路容量之 3.8% (最小之系統短路容量為 6,679 MVA，64 台風機之容量為 $64 \times 4 \text{ MVA} = 256 \text{ MVA}$)，且 GE 之 DFIG 風力機之轉換器可提供的虛功率(48%)亦比前人研究之風機轉換器虛功率容量為高(25~30%)，因此第二期的風機系統可忍受三相短路故障而不需加裝 STATCOM。

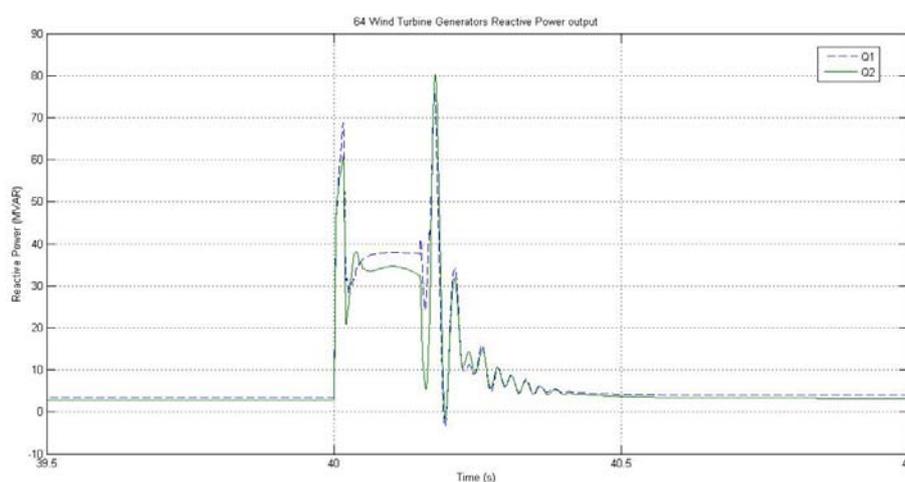


圖 5.2 第二期的風機系統 64 台風機之虛功率輸出(群組一及群組二)

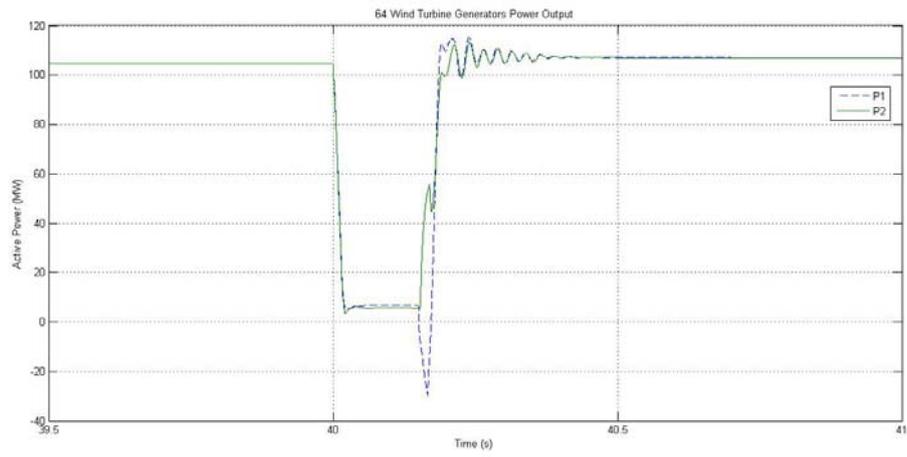


圖 5.3 第二期的風機系統 64 台風機之實功率輸出(群組一及群組二)

第六章 結論與建議

6.1 結論

- (1) 本文模擬彰化離岸風力計畫發電第一期 32 台 DFIG 風力發電機及第二期 64 台 DFIG 風力發電機在 0.15 秒之三相短路故障風機之忍受故障情形，結果顯示在未加 STATCOM 的運轉模式下，第一期及第二期風機系統有能力通過短路故障而不跳脫。
- (2) 第一期及第二期之風機系統在三相短路故障期間分別提供 50MVAR 及 72MVAR 之虛功率到電網。
- (3) 本模擬中 100MVA STATCOM 並未對電網的穩定產生重大的影響，這是由於 64 台 DFIG 風力發電機容量僅佔電網短路容量的 3.8%。

6.2 建議

- (1) 本文採用 GE 3.6MW DFIG 之風力發電機模型作為模擬的對象，其轉換器之控制參數已經由作者因模擬系統需要而做調整，因此參數可能與廠家實際的模型有所出入。
- (2) 本文採用 Phasor-type 之 DFIG 風力機及 STATCOM 進行模擬，此模型僅考慮正相序之值，因此只能計算三相故障之值。
- (3) 由於本文無法精確取得原廠家之控制參數及保護電驛設定值，因此無法精確呈現彰化離岸風力計畫第一、二期是否可忍受故障而不跳脫。
- (4) 為了保護轉子側電路及其轉換器，未來可將短路棒(Crowbar)加入風機模擬。

參考文獻

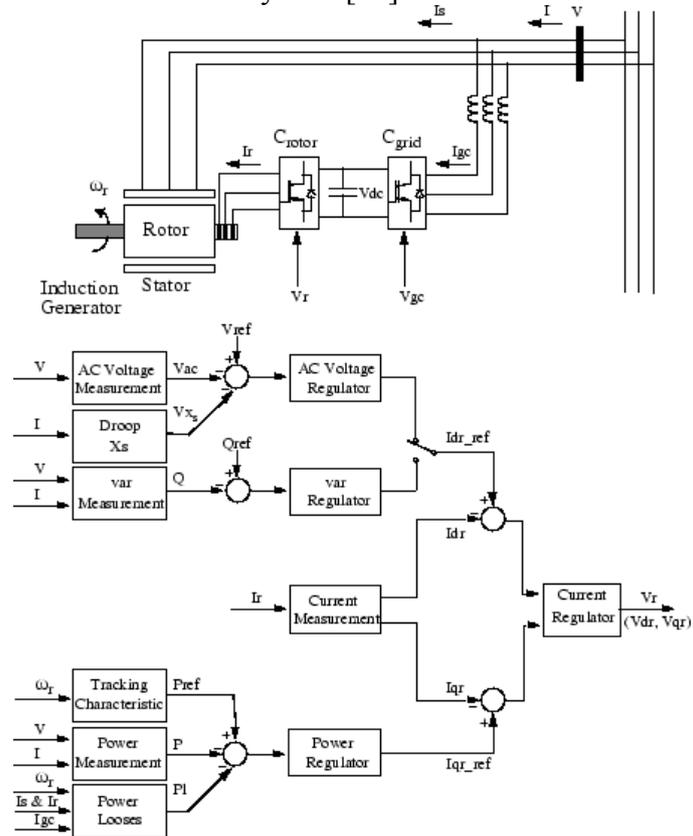
1. *Long-Term Load Forecasting and Long-Term Power Development Programming in Taiwan*. Bureau of Energy, Ministry of Economic Affairs, R.O.C.: Taipei, Taiwan, 2008. (in Chinese)
2. *2007 Energy Technology Development White Paper*, Bureau of Energy, Ministry of Economic Affairs, R.O.C.: Taipei, Taiwan, 2008.
3. Taiwan Power Company (2009). *Renewable Energy*. Available from World Wide Web. Accessed 19 October, 2009, from <http://www.taipower.com.tw/index.htm>
4. Lin, C. J., Yu, O. S., Chang, C. L., Liu, Y. H., Chuang, Y. F. and Lin, Y. L. (2009) 'Challenges of wind farms connection to future power systems in Taiwan', *Renewable Energy*, 34, (8), pp. 1926-1930.
5. Global Wind Energy Council (2009). *Global Wind 2009 Report*. Available from World Wide Web. Accessed 8th August, 2010, from http://www.gwec.net/fileadmin/documents/Publications/Global_Wind_2007_report/GWEC_Global_Wind_2009_Report_LOWRES_15th.%20Apr..pdf
6. BTM Consult (2010), *World Market Update*.
7. The European Wind Energy Association (2009). *Offshore Wind Energy Factsheet*. Available from World Wide Web. Accessed 8th August, 2010, from http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/reports/Offshore_Fact_Sheet.pdf
8. The European Wind Energy Association (2009). *Offshore wind*. Available from World Wide Web. Accessed 8th August, 2010, from <http://www.ewea.org/index.php?id=203>
9. Morthorst, P. E., J. Lemming, and N. Clausen. (2008) 'Offshore wind power: A review of progress', in Twidell, J. and G. Gaudiosi (eds.), *Offshore Wind Power*, Brentwood: Academic Press, pp.1-13.
10. Sinotech Engineering Consultant, Ltd. (2009) *Taipower Changhua Offshore Wind Farm Feasibility Study Report*. Taipei, Taiwan.
11. National Central University (2010). *Windpower in Taiwan*. Available from World Wide Web. Accessed 16th August, 2010, from <http://www.atm.ncu.edu.tw/93/wind/main.asp>

12. Reidy, A. and R. Watson, (2005) 'Comparison of VSC based HVDC and HVAC and Interconnections to a Large Offshore Wind Farm', *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 1, pp. 1-8.
13. Sobrink, K., D. Woodford, R. Belhomme, and E. Joncquel: "AC Vs DC Cable Transmission for Offshore Wind Farm" 4th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind farms, Denmark, 2003.
14. Ackermann, T. (2005) *Wind Power in Power Systems*. John Wiley & Sons.
15. Kirby, N. M., Xu, L., Lockett, M. and Siepmann, W. (2002) 'HVDC Transmission for Large Offshore Wind Farms', *IEE Power Engineering Journal*, 16, (3), pp. 135-141.
16. Abbey, C. and Joos, G. (2005) 'Effect of Low Voltage Ride Through (LVRT) Characteristic on Voltage Stability', *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1-7.
17. Zhou, F., Joós, G. and Abbey, C. (2005) 'Voltage Stability in Weak Connection Wind Farms', *Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1-7.
18. Kirby, N. M., Xu, L., Lockett, M. and Siepmann, W. (2002) 'HVDC Transmission for Large Offshore Wind Farms', *IEE Power Engineering Journal*, 16, (3), pp. 135-141.
19. Xu, L. and Andersen, B. R. (2006) 'Grid connection of large offshore wind farms using HVDC', *Wind Energy*, 9, (4), pp. 371-382
20. Chen, Z. and F. Blaabjerg, (2009) 'Wind farm-A power source in future power systems', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, (13), pp. 1288-1300.
21. Li, H. and Z. Chen, (2007) 'Overview of different wind generator systems and their comparisons', *IET Renewable Power Generation*, 2, (2), pp.123-138.
22. Grid Code: High and Extra High Voltage, E. ON Netz GmbH Tech. Rep., 2006, Status:1.
23. Ullah, N. R., T. Thiringer, and D. Karlsson, (2007) 'Voltage and Transient Stability Support by Wind Farms Complying With the E. ON Netz Grid Code', *IEEE Transactions on Power System*, 22, (4), pp.1647-1656.
24. Ramtharan, G., A. Arulampalam, J.B. Ekanayake, F. M. Hughes, and N. Jenkins, (2009) ' Fault ride through of fully rated converter wind turbines with AC and DC transmission systems', *IEF Renewable Power Generation*, 3, (4), pp. 426-438.

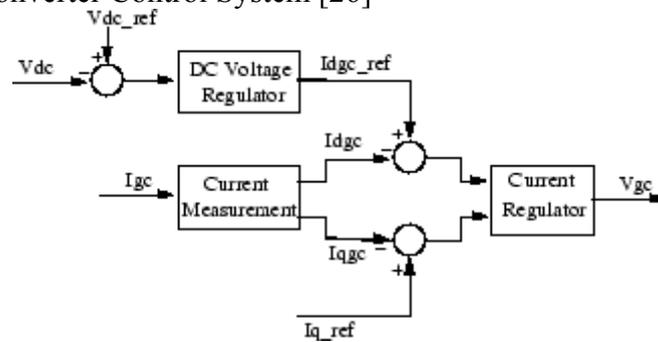
25. Qiao, W., G. K. Venayagamoorthy, and R. G. Harley, (2009) 'Real-Time Implementation of a STATCOM on a Wind Farm Equipped with Doubly Fed Induction Generators', *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45, (1), pp. 98-107.
26. The MathWorks (2010), *Wind Turbine Doubly-Fed Induction Generator (Phasor Type)*. Available from World Wide Web. Accessed 13 August, 2010, from <http://www.mathworks.de/access/helpdesk/help/toolbox/physmod/powersys/ref/windturbinedoublyfedinductiongeneratorphasortype.html>
27. Akhmatov, V. (2005). *Induction Generators for Wind Power*. Multi-Science Publishing Company.
28. The MathWorks (2010), *Static Synchronous Compensator (Phasor Type)*. Available from World Wide Web. Accessed 17 August, 2010, from <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/physmod/powersys/ref/staticsynchronouscompensatorphasortype.html>
29. Hannan, M. A., A. Mohamed, and A. Hussain (2008) 'Modeling and Power Quality Analysis of STATCOM using Phasor Dynamics', *IEEE*, pp. 1013-1018.
30. Taiwan Power Company. (2009) *Taipower Changhua Offshore Wind Farm First Phase Project- power system impact review report*. Taipei, Taiwan.
31. Miller, N. W., W. W. Price, and J. J. Sanchez-Gasca, (2003). Dynamic Modeling of GE 1.5 and 3.6 Wind Turbine-Generators. *General Electric Company*, NY, USA.
32. Miller, N. W., J. J. Sanchez-Gasca, and W. W. Price, (2003). Dynamic Modeling of GE 1.5 and 3.6 Wind Turbine-Generators for Stability Simulations. *IEEE*, pp.1977-1983.

附錄 A.DFIG 風力發電機控制方塊圖

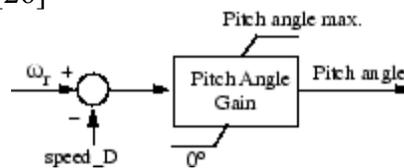
A.1 Rotor-Side Converter Control System [26]



A.2 Grid-Side Converter Control System [26]



A.3 Pitch Control System [26]



附錄 B.GE 風力發電機參數

B.1 WTG electrical controller parameters [32]

Parameter Name	Recommended Value	User Adjustable?	Required?
T_v	0.5	Yes	Yes, if K_p or $K_i \neq 0.0$
K_p	5.	Yes	No
K_i	0.	Yes	No
R_c	0.	Yes	No
X_c	0.02	Yes	No
Q_{max}	0.33/0.48	No	Yes
Q_{min}	-0.48	No	Yes
V_{Lrip}	0.7	No. Unless Specified by Supplier.	Yes
V_{inrip}	1.3	No. Unless Specified by Supplier.	Yes
I_{max}	1.11	No. Unless Specified by Supplier.	Yes
V_{H1}	1.1	Yes	No
V_{L1}	0.9	Yes	No
V_{L2}	0.7	Yes	No
T_{L1}	0.1	Yes	No
T_{L2}	0.5	Yes	No
T_{H1}	0.1	Yes	No
T_{H2}	1.0	Yes	No
Q_{L1}	0.5	Yes	No
Q_{L2}	0.5	Yes	No
Q_{L3}	Q_{c1}	Yes	No
Q_{H1}	Q_{c1}	Yes	No
Q_{H2}	-0.25	Yes	No
V_{hyst}	0.05	Yes	Yes, if other OL controls
ω_{ref}	1.2	No	Yes
ω_{min}	0.7	No	Yes
ω_{max}	1.3	No	Yes

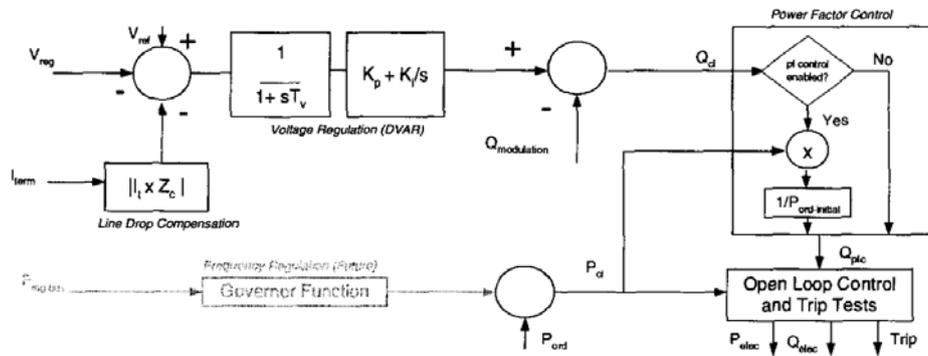
B.2 Turbine parameters [32]

(all quantities are per unit on MW base)

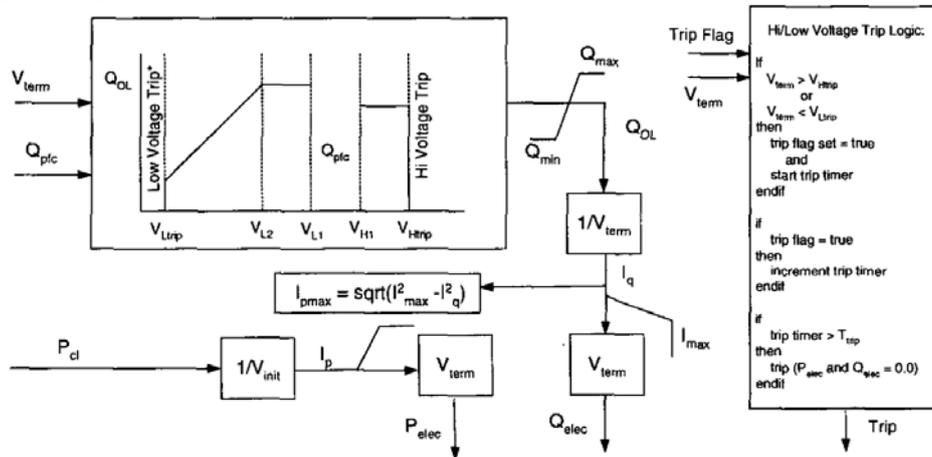
Parameter Name	Recommended Value
H	3.0
K_{pp}	114.0
K_{ip}	76.0
T_p	0.01
θ_{max} (degrees)	27.0
θ_{min} (degrees)	0.0
$d\theta/dt_{max}$ (degrees/second)	10.0
$d\theta/dt_{min}$ (degrees/second)	-10.0
K_{pc}	3.0
K_{ic}	30.0
K_{ptreg}	3.5
K_{ifreg}	1.4
T_{pc} (seconds)	0.05

附錄 C.GE 風力發電機控制模組

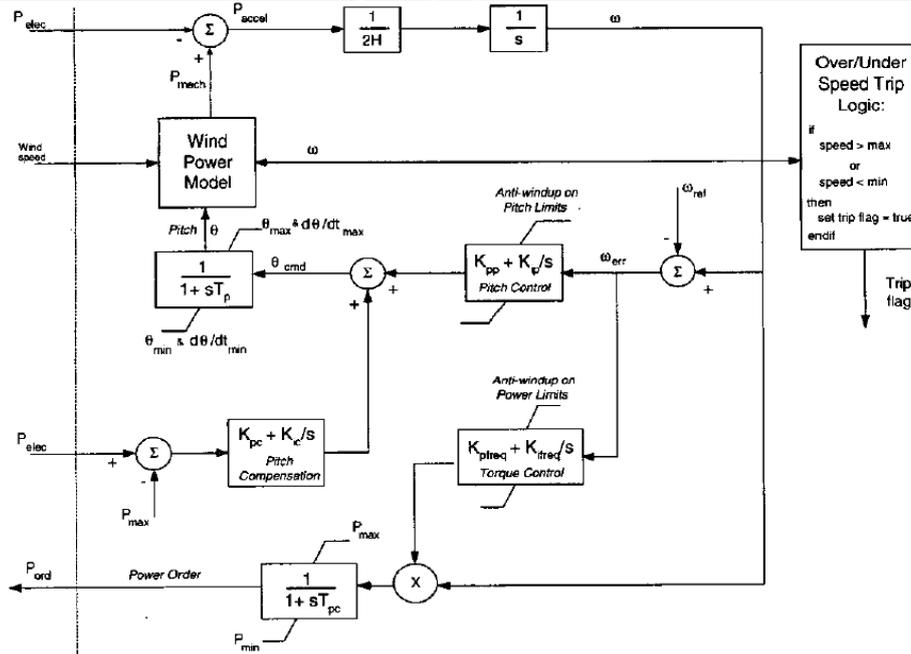
C.1 Closed loop electrical controls [32]



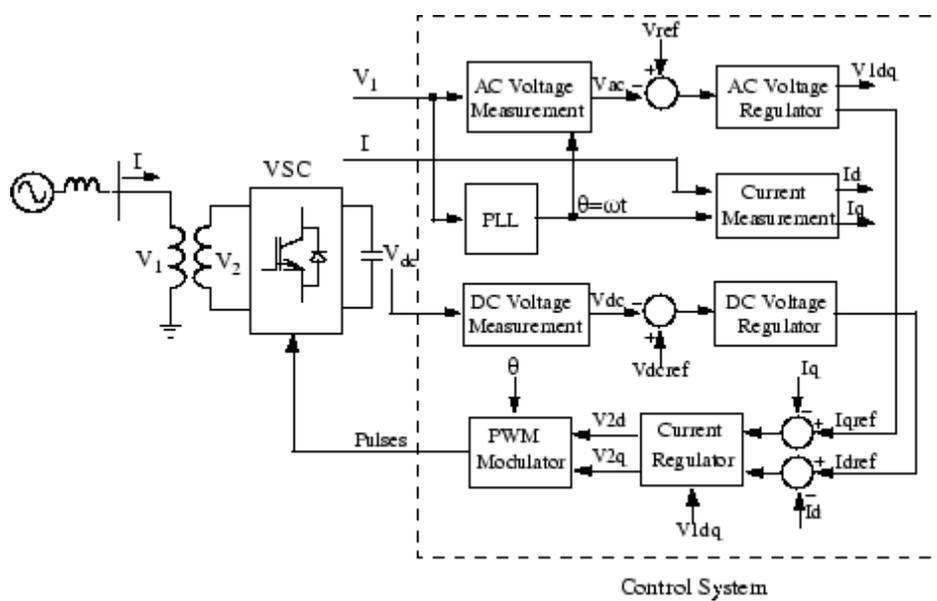
C.2 Open loop electrical controls [32]



C.3 Wind turbine model block diagram [32]



附錄 D.STATCOM 單線圖及控制方塊圖[28]



附錄 E.風力發電機及轉換器跳脫時間及等級[31].

		[pu]	[sec]
ΔV_{trip}	T_{trip}	-0.15	10.0
ΔV_{trip}	T_{trip}	-0.25	1.0
ΔV_{trip}	T_{trip}	-0.30	0.10 ¹
ΔV_{trip}	T_{trip}	-0.70	0.02 ²
ΔV_{trip}	T_{trip}	+0.10	1.0
ΔV_{trip}	T_{trip}	+0.15	0.10
ΔV_{trip}	T_{trip}	+0.30	0.02 ²

¹ Machines equipped with low voltage ride through (LVRT); else 0.02 sec

² Nominally instantaneous trip; 20 ms delay is recommended to improve simulation numerical behavior

伍、 出國期間遭遇的困難與特殊事項

- (1) 投入職場已有相當長時間，對於工程技術皆以務實的觀點切入，加上台灣的教育皆以”背多分”評量學生，這與英國強調的創新思考及批判式的思考有很大的出入，另外考試大多是申論題對於不善於表達的工科學生實在是一大考驗。
- (2) 課程中因上課密集且老師來自世界各地，對於聽力是一大考驗，且周末就考試對於自我抗壓性是一大挑戰。
- (3) “變化多端的英國氣候”，早上起床窗外陽光普照，但一到下午或傍晚，卻是陣陣冷風或細雨。
- (4) 感受四季分明的差異：日出而作，日落而息這句話...在這裡可行不通，冬天下午三點半就天黑，夏天晚上十點半天黑。
- (5) 每天想要吃什麼真煩.....而且怎麼什麼都很貴，以中國城的三寶飯約台幣 350 元，學校餐廳午餐約 200 元，麥當勞套餐約 250 元。
- (6) 在台灣,習慣快節奏步調生活方式,凡走路或吃飯都是“快..快..快快快”爭取效率;然而在英國,也許是文化差異,反倒感覺工作效率,生活態度都是“慢..慢..慢慢慢慢”;不過時間到準時休息倒是一點都不會怠慢。
- (7) 英國人的休閒只有兩個：啤酒及足球，因此要融入英國人的文化這兩個休閒不可少。
- (8) 洗手台是冷熱水分離的：開左邊太燙，開右邊又太冰，在英國冬天，如果你嚐過打開冷水，凍得你根本不想洗手，更不用說洗碗。