

出國報告（出國類別：實習）

美國能源電力系統中心課程  
及  
參加美國電機電子工程師學會年會

服務機關：台電系統規劃處

姓名職稱：莊政宏 電機工程師

派赴國家：美國及加拿大

出國期間：98.07.20~98.08.02

報告日期：98.9.10

## 出國報告審核表

出國報告名稱：美國能源電力系統中心課程及參加美國電機電子工程師學會年會		
出國人姓名 (2人以上,以1人為代表)	職稱	服務單位
莊政宏	電機工程師	系統規劃處
出國期間：98年7月20日至98年8月2日		報告繳交日期：98年9月10日
出國計畫主辦機關審核意見	<input checked="" type="checkbox"/> 1. 依限繳交出國報告 <input checked="" type="checkbox"/> 2. 格式完整(本文必須具備「目地」、「過程」、「心得及建議事項」) <input checked="" type="checkbox"/> 3. 內容充實完備。 <input checked="" type="checkbox"/> 4. 建議具參考價值 <input checked="" type="checkbox"/> 5. 送本機關參考或研辦 <input type="checkbox"/> 6. 送上級機關參考 <input type="checkbox"/> 7. 退回補正,原因： <input type="checkbox"/> 不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 <input type="checkbox"/> 內容空洞簡略未涵蓋規定要項 <input type="checkbox"/> 電子檔案未依格式辦理 <input type="checkbox"/> 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 <input checked="" type="checkbox"/> 8. 本報告除上傳至出國報告資訊網外,將採行之公開發表： <input checked="" type="checkbox"/> 辦理本機關出國報告座談會(說明會),與同仁進行知識分享。 <input type="checkbox"/> 於本機關業務會報提出報告 <input type="checkbox"/> 其他 _____ <input type="checkbox"/> 9. 其他處理意見及方式：	
層轉機關審核意見	<input type="checkbox"/> 1. 同意主辦機關審核意見 <input type="checkbox"/> 全部 <input type="checkbox"/> 部分 _____ (填寫審核意見編號) <input type="checkbox"/> 2. 退回補正,原因： _____ <input type="checkbox"/> 3. 其他處理意見：	

說明：

- 一、出國計畫主辦機關即層轉機關時,不需填寫「層轉機關審核意見」。
- 二、各機關可依需要自行增列審核項目內容,出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 三、審核作業應於報告提出後二個月內完成。

報告人       ：       單位       ：       主管處       ：       總經理       ：

                  ：       主管       ：       主     管       ：       副總經理     ：

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：美國能源電力系統中心課程及參加美國電機電子工程師學會年會

頁數 85 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/2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

莊政宏/台灣電力公司/系統規劃處/電機工程師/2366-7743

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：98年7月20日~98年8月2日 出國地區：美國及加拿大

報告日期：98年9月10日

分類號/目

關鍵詞：美國能源電力系統中心(ESRC)、彈性交流輸電系統(FACTS)、德克薩斯州電力可靠度委員會(ERCOT)、風力發電(Wind Power)、分散能源(Distributed Energy)、智慧型電網(Smart Grid)

內容摘要：(二百至三百字)

本報告主要以參加美國能源電力系統中心課程(Energy Systems Research Center, ESRC)，及參加美國電機電子工程師學會(2009 IEEE PES)年會會議之訓練與議題資料。於電力系統中心實習中，主要內容包括德州西部風場開發之輸電線規劃、大型風場模擬與系統檢討及德州 ERCOT 電力市場交易介紹；而電

機電子工程師學會年會中，主要內容為目前世界各國於電力產業中之新技術、新能源及新應用層面介紹，包括發電、輸電、配電及用戶等四端的新技術思維，如旋轉電機、風力發電、提昇輸電能力規劃、彈性交流輸電系統技術、系統穩定度、分散性能源、無效電力規劃及電力電子設備技術等，由於會議結合世界各國電力菁英，除可瞭解最近一年所發表關於電力系統規劃、施工與運轉經驗成果外，亦有相關未來綠色能源及智慧型電網發展趨勢；可對於公司未來進行規劃所採取技術策略與經驗參考，對系統規劃及電網發展將有所助益。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://open.nat.gov.tw/reportwork>)

## 報告內容

一、出國緣由與目的.....	1
二、出返國行程.....	2
三、心得與建議.....	3
四、參加美國能源電力系統中心課程摘要.....	7
4-1 德克薩斯州電力可靠度委員會(ERCOT)簡介.....	7
4-2 美國能源電力系統中心(ESRC)簡介.....	11
4-3 德州西部風力發展之輸電線最佳規劃介紹.....	12
4-3-1 風場開發規劃情境.....	13
4-3-2 風場規劃方法.....	16
4-3-3 風場規劃結果.....	25
4-3-4 總結.....	34
五、參加美國電機電子工程師學會年會摘要.....	35
5-1 IEEE會議摘要介紹.....	35
5-1-1 主管會議(Super Session).....	36
5-1-2 會員會議(Plenary Session).....	38
5-1-3 技術會議(technical Session).....	38
5-1-4 委員會會議(Committee Session).....	39
5-1-5 講授課程(Tutorials).....	40
5-1-6 壁報會議(Poster Sessions).....	44
5-1-7 論文討論(Paper Forums).....	44
5-1-8 技術參訪(Technical Tours).....	44
5-2 IEEE會議年會心得.....	45
5-2-1 風機模型介紹.....	45
5-2-2 風場單機等校架構.....	52
5-2-3 雙饋式風力發電機簡介.....	54
5-2-4 PSS/E風機IPLAN模型簡介.....	58
5-2-5 PSS/E內建模型簡介.....	61
5-2-6 智慧型電網概述.....	71
六、出國感想與心得.....	77

## 圖目錄

圖 4.1.1 德州ERCOT服務區域示意圖.....	8
圖 4.1.2 德州發電與購電者之電力自由市場示意圖.....	9
圖 4.1.3 德州ERCOT電力交易市場示意圖.....	10
圖 4.2.1 ESRC機構位置圖.....	11
圖 4.3.1 德州西部風場CREZ開發位址.....	14
圖 4.3.2 情境 2 之德州西部風場與負載關係圖.....	21
圖 4.3.3 情境 1(PPLAN A)之電網架構圖.....	28
圖 4.3.4 情境 1(PPLAN A)之電網架構圖.....	30
圖 4.3.5 情境 2 之電網架構圖.....	31
圖 4.3.6 情境 3 之電網架構圖.....	32
圖 4.3.7 情境 4 之電網架構圖.....	33
圖 5.2.1 風機內部構造圖.....	47
圖 5.2.2 FERC 661 規定風機LVRT功能.....	48
圖 5.2.3 風機有無具備LVRT時域模擬圖.....	48
圖 5.2.4 定速型風力發電機圖.....	50
圖 5.2.5 變速型風力發電機圖-同步型風力發電機.....	51
圖 5.2.6 變速型風力發電機圖-雙饋式風力發電機.....	51
圖 5.2.7 收集系統單線圖.....	53
圖 5.2.8 風機能量轉換示意圖.....	56
圖 5.2.9 GE 3.6MW控制方塊圖.....	60
圖 5.2.10 TYPE1 風機之控制方塊圖.....	61
圖 5.2.11 TYPE1 之調速模型方塊圖.....	62
圖 5.2.12 TYPE2 風機之控制方塊圖.....	63
圖 5.2.13 TYPE2 之電阻插入控制模型控制方塊圖.....	63
圖 5.2.14 TYPE3 風機之控制方塊圖.....	64
圖 5.2.15 TYPE3 之風機模型控制方塊圖.....	65
圖 5.2.16 風速與機械功率關係圖.....	66
圖 5.2.17 風速與旋角關係圖.....	66
圖 5.2.18 旋角控制模型控制方塊圖.....	67
圖 5.2.18 旋角控制模型控制方塊圖.....	67
圖 5.2.19 TYPE3 風機於大型統模擬結果.....	68
圖 5.2.20 TYPE4 風機之控制方塊圖.....	69
圖 5.2.21 TYPE4 之發電機、變流器模型控制方塊圖.....	69
圖 5.2.21 TYPE4 之發電機、變流器模型控制方塊圖.....	70
圖 5.2.22 電業發展遭遇問題.....	73

## 表目錄

表 4.1.1 德州ERCOT與台灣電網比較.....	10
表 4.3.1 德州西部風場CREZ開發情境.....	14
表 4.3.2 輸變電設施單位成本價格.....	15
表 4.3.3 情境 1(PLAN A)開發情境彙整.....	29
表 4.3.4 情境 1(PLAN A)開發情境彙整.....	30
表 4.3.5 情境 2 開發情境彙整.....	31
表 4.3.6 情境 3 開發情境彙整.....	33
表 4.3.7 情境 4 開發情境彙整.....	34
表 5.2.1 不同風場計算之等校阻抗圖.....	53
表 5.2.2 不同風機所採用模型名稱.....	71

## 一、出國緣由與目的

受限於外在環保議題及抗爭因素，使得電源開發及輸變電工程之興建造成極大阻力，迫使整體電網之規劃，往往需配合外在工程因素而有所調整，造成電力開發與系統負載端無法達成區域平衡之規劃，因此形成電網產生若干瓶頸，而需採用新穎的技術或 FACTS 補償設備來改善，導致本公司在輸電系統規劃工作難度更高、更複雜；再加上配合國家再生能源政策，公司亦將配合持續朝向相關大容量之再生能源開發(如離岸風力)，預期未來對系統電網而言，抑將存在若干的潛在衝擊影響。

另為滿足未來負載成長用電需求，在各項大型發電新擴建計畫未完成前，仍須及早對電網進行因應規劃，以提供穩靠電網系統，以穩固電源與負載端的聯繫。遂此，參加美國電力與能源協會舉辦之電機電子工程師學會年會及參加美國能源電力系統研究中心(ESRC)所獲取之相關電力系統知識，可從中學習到相關新技術、新設備的經驗，對未來系統規劃層面或電網瓶頸改善應用，可提供有利的參考依據。

此訓練課程除可提供派訓人員建構更完善之電力實務經驗外，實習期間亦可與國外各產官學界相互交流，俾強化既有規劃能力及技術，更可吸取國外經驗及技術，乃是此次出國目的。



## 二、出返國行程

(一) 行程 1(參加美國能源電力系統研究中心行程)：

- 98/7/20 台北 TAIPEI(18:50) →洛杉磯 LOS ANGELE  
(21:40) →達拉斯 DALLAS(23:45) →美國能源電力系統  
研究中心 ESRC
- 98.7.21 ~ 98.7.24 參加美國能源電力系統研究中心課  
程

(二) 行程 2(參加美國電機電子工程師學會年會行程)：

- 98/7/25 達拉斯 DALLAS (10:40) →卡加利 CALGARY  
(13:20)
- 98.7.26 ~ 98.7.30 參加美國電機電子工程師學會年會  
(2009 IEEE PES)

(三) 返程：

- 98.7.31 IEEE PES 會場 →卡加利 CALGARY (20:50) →溫  
哥華 VANCOUVER (21:15)
- 98.8.1 溫哥華 VANCOUVER (02:20) → 98.8.2 台北  
TAIPEI(05:05)

### 三、心得與建議

此次行程共包含兩項，其中主要以參加2009 IEEE所舉辦之電機電子工程師學會年會，另以參加美國德州阿靈頓大學設置的電能系統研究中心(Energy Systems Research Center, ESRC)課程為輔。經由此次出國研習，獲得許多電力學門相關新技術知識，如在ESRC機構中學習到「大型風場之最佳輸電線規劃流程及考慮事項」；而IEEE年會中，由於集合全世界產官學界人員參加，在開會期間所發表的專題講座、課程或論文，其中涵蓋各國電力公司、工業界與廠家的實務經驗，另有的是學校專業機構、研究單位或顧問公司研究後的創新技術，因此在此次出國研習中獲得許多新技術規劃思維，對系統規劃頗有助益，值得持續派員參加學習，相關心得如下：

- (一) 美國德州阿靈頓大學設置的電能系統研究中心(Energy Systems Research Center, ESRC)，自1968年成立至今已逾30年，為IEEE所調查認定前十名之電力系統教育中心，且與美國各電力公司及電力調度中心有多年合作，亦曾多次與本公司合作相關系統穩定度的研究，將理論研究與實際系統運轉及系統規劃相互結合，協助解決系統規劃及運轉相關問題。
- (二) ERCOT 為配合德州公共事業委員會(Public Utility Commission of Texas, PUCT)所提出德州西部風場開發規模，

需配合提出滿足電源開發需求之輸電線擴展計畫，並建製相關過程與決策。首先依據風力開發狀況與開發時程先後分為四個情境(12GW~25GW)，各情境均研擬多種可能技術擴充方案(包含擴充 345KV 輸電線、新建 765KV 輸電線或新建 HVDC 線路等方案)，經檢討後選定較佳方案，再由近而遠之情境，挑選其中有相關聯或可連結之方案為最佳方案。此輸電線規劃模式，與本公司長期輸變電發展規劃架構之擬定流程類似，皆為研定各種可能之技術擴展方案，再從其中由近而遠選定工程有關聯可連續者為最佳方案。

(三) 由於風力機組單機容量逐年增大(如 2000 年 0.75MW~2009 年 5MW)，且風場整體開發容量也逐漸增加(如本公司彰化離岸風場第一期 300MW 開發規模)。因此當風機大量併入系統後，預期對系統影響層面越來越凸顯其重要性，尤其在對電壓的影響方面。為防止風機因系統電壓低下先行解聯，導致系統產生更嚴重的電壓問題，美國聯邦能源管制委員會(FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION)已要求風機要有忍受低電壓(Low Voltage Ride-Through，簡稱 LVRT)能力，並在 FERC661 及 661A 要求風機在電壓低至 0.2PU(為期 0.625 秒內)及當系統發生三相短路故障電壓降至 0PU(9 週波內)不能脫離系

統，以避免系統產生連續性事故跳脫危機。因此為減少大型風場跳脫對系統帶來之衝擊影響，建議引接至輸電層級之風場風力機組皆須具備低電壓忍受能力(LVRT)功能。

- (四) 本次IEEE PES年會中有許多不同的議題，但主要仍著重在未來電源發展趨勢、智慧型電網、電業發展及綠色能源等項目。其中更以CO<sub>2</sub>減量、發展潔淨能源及有效電網整合等議題為主要討論主軸及未來發展趨勢。能源方面，除仍極力著重在再生能源開發與發展技術提昇外，亦朝向核能發展規劃。預期未來在CO<sub>2</sub>議題前提及未找到最佳替代能源技術下，核能的復甦將是未來發展必然趨勢。
- (五) 近年社會大眾對環保及景觀意識提高，使得各項輸變電設備的興建日益困難。因此為了能在合理可靠度下節省成本及工程投資，以可靠度觀念來規劃、設計輸變電系統已成為各國發展趨勢，亦即以「輸變電系統可靠度規劃(Probabilistic T&D System Reliability Planning)」已成未來發展趨勢。亦即考量公共安全、投資效益及避免大規模停電前提下，以特定可靠度需求及最低線路興建成本來完成規劃設計，如此才有利於未來輸變電工程之興建。
- (六) IEEE 講授課程(Tutorial)中有關「風力發電課程」中，共介

紹九項有關風力知識，第 1 部份為風力簡介(發展趨勢、容量)、第 2 部份為風力機組技術(機械與電力系統介紹)、第 3 部份為風力機組組成(風場匯集匯流排、昇壓變壓器、接地與保護)、第 4 部份為風力電網規劃與運作(電網準則、風機性能要求)、第 5 部份為風機模型(風機技術、廠商模型、WECC 標準模型、穩定度及故障電流檢討)、第 6 部份為風能預測(模型、方法及與即時電網整合運用)、第 7 部份為風機能力(可靠度、風機模型)、第 8 部份為電力公司對風場整合研討(風機行為、備用容量、系統經濟評估)、第 9 部份為介紹歐洲風場經驗。藉由此次風力發電課程內容介紹，可經由業界、學界、電力公司及政策等不同觀點，獲得許多相互關連風力發電知識。從簡單的設備保護及電壓、無效電力的控制，到有效電力的控制(調頻、備轉容量...等)，乃至利用軟體模擬風機特性、暫態穩定度及電壓性能等，有利於作為未來公司推動風場規劃之模擬參考。

(七) 此次實習參加 ESRC 機構課程及參加國際性 IEEE 年會，獲得相關規劃、運轉、發電、輸電及工程領域資訊，並可藉由實際與不同領域專家接觸，可瞭解對於問題的處理及思考方向，使人員能將理論與實務相結合，對日後工作之助益甚大。

## 四、參加美國能源電力系統中心課程摘要

此次前往德州大學阿靈頓分校之能源電力系統中心(ESRC)所安排課程內容，主要由研究中心主任李教授偉仁所妥為安排，並依訓練時程，討論德州西部大型風場開發之輸電線路徑最佳規劃及未來智慧型電網的發展趨勢。並藉由該德州風場開發案例中，獲得ERCOT 對此大型風場開發所扮演角色及輸電方式選定的機制。茲就上述實習主要心得敘述如後。

### 4-1 德克薩斯州電力可靠度委員會(ERCOT)簡介

ERCOT 最早成立於 1941，在第二次世界大戰期間由幾間電力公司聯合提供他們過剩發電量給鄰近海灣之海岸工業區負載使用。然自 1965 年美國東北發生大停電事故後，美國政府鑑於電力電網重要性，遂依照北美電力可靠性公司(NERC)組織規定要求，於美國分為 9 個地區成立電力可靠度委員會，其中 1970 年成立之德克薩斯州電力可靠性委員會(ERCOT)即為其中之一。為全德州互聯電網調度運轉者。ERCOT 在北美電力可靠性公司(NERC)組織下，為 9 個地區電力可靠性委員會之一。

目前，ERCOT服務監督地區之發電機裝置容量及高壓輸電網路回線數約為80,076MW和40,327英哩，ERCOT是德州電力的電網調度管理

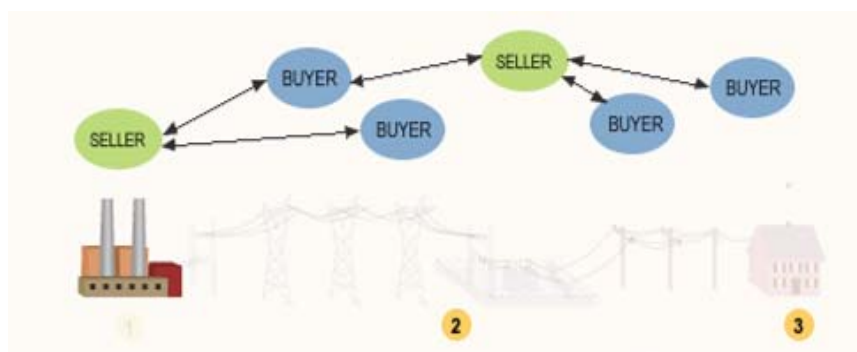
協調者，而不是電網的公用事業公司，因此ERCOT具有獨立性及公正性。另德州的互聯電網亦屬於北美3個小交流電網之一(其他2個為魁北克互聯電網及阿拉斯加互聯電網)，而北美兩大互聯電網是東部的互聯網和西部的互聯電網。德州境內電網之頻率為60HZ與台灣一樣，與外部電網連接係以兩高壓直流與東部系統連接、及以一個高壓直流及一可變頻率變壓器(VFTS)與非NERC系統之墨西哥電網連接。因此ERCOT服務區域約為全德州的75%電網，管理的負載量亦為全德州的85%，如圖4.1所示。



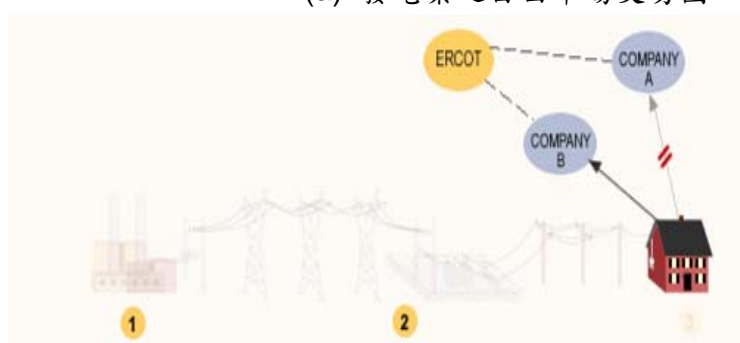
圖 4.1.1 德州 ERCOT 服務區域示意圖

由於 ERCOT 為獨立單位，故主要職責為掌管德州電網電力之規劃、機組排程與調度，及其它電力控制運轉等作為。也由於德州電力為自由化市場架構，因此所有發電與購電業者間可相互簽訂購

售電合約(REP)，如圖 4.1.2 所示。



(a) 發電業之自由市場交易圖



(b) 購電用戶端之自由市場交易圖

圖 4.1.2 德州發電與購電者之電力自由市場示意圖

由於德州電業為競爭市場，各個獨立發電與購電業者間可相互簽訂購售電合約(REP)，但仍需藉由實際輸電電網的電力傳輸才可安全的將電力從發電廠送至用戶端。因此 ERCOT 便扮演此一重要角色，而 ERCOT 基本上在售電與購電兩者間扮演著公平的角色，亦即基於公平合約(Bilateral Contract)原則下，滿足兩者間的需求。但由於 ERCOT 肩負德州電網運轉安全，因此所有發電與購電業者所簽訂之合約電力容量，需由 ERCOT 之安全運轉審核後，輸電容量/排程限制(Qualified Scheduling Entity)，才可安全的運轉整個電網系統，詳細 ERCOT 整個市場交易架構如圖 4.1.3。



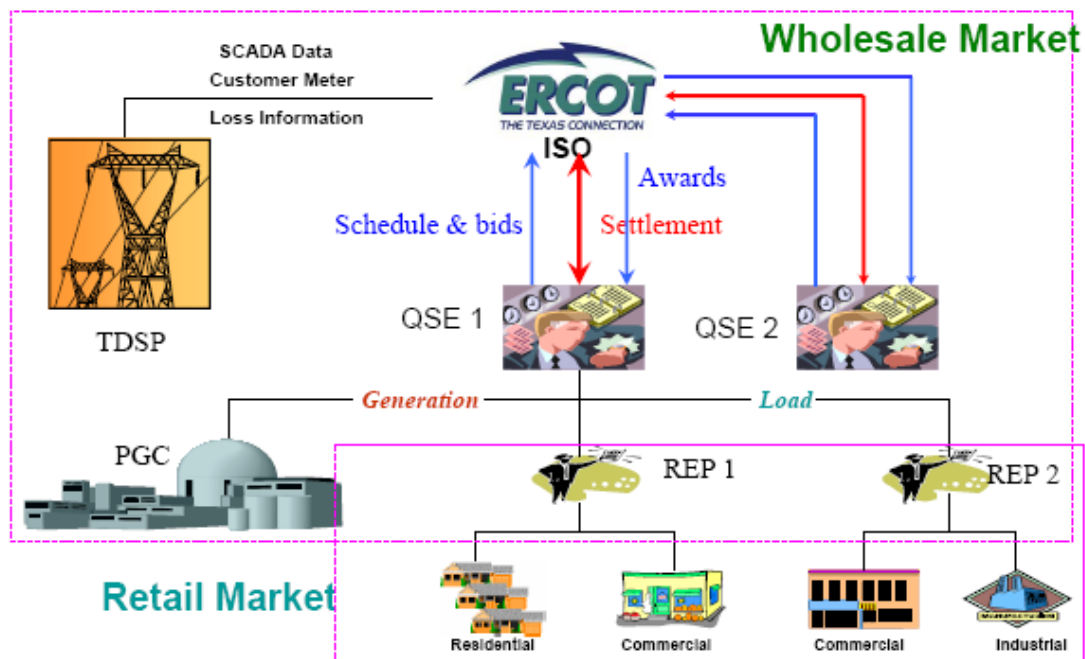


圖 4.1.3 德州 ERCOT 電力交易市場示意圖

另由於 ERCOT 為獨立運轉系統(掌管 75%德州電網及 85%德州負載)，因此與台灣獨立系統運轉類似，而且服務客戶數亦與台灣相近。表 4.1.1 為德州 ERCOT 與台灣電網比較。

表 4.1.1 德州 ERCOT 與台灣電網比較

項目	ERCOT	台電
客戶數	2.2 千萬	2.3 千萬
服務範圍	75%德州電網、85%德州負載	100%台灣電網、100%台灣負載
發電機組數	566	510
裝置容量	80,076MW	39,988(9806 案)
備用容量率	16.8%	30.5%(以 98 年計算)
尖載紀錄	62,339MW(2006.8)	32,791MW(2007.7)
風力裝置容量	8,000MW	347MW

由表 4.1.1 可知，ERCOT 的發電機組裝置容量比台電約多 1 倍，且歷年尖峰負載紀錄亦約比台電多 1 倍。另風力部分，德州就超過

8GW 的裝置容量，比台電大許多。因此可以看出德州風力的發展確實很蓬勃，並為全美風力開發最多的州。

## 4-2 美國能源電力系統中心(ESRC)簡介

美國德州阿靈頓大學設置的電能系統研究中心(Energy Systems Research Center, ESRC)，自 1968 年成立至今已逾 30 年，為 IEEE 所調查認定前十名之電力系統教育中心，如圖 4.2.1。且與美國各電力公司及電力調度中心有多年合作，亦曾與本公司合作系統穩定度研究，將理論研究與實際系統運轉相互結合，協助解決系統計劃及運轉相關問題。



圖 4.2.1 ESRC 機構位置圖

此次出國之ESRC實習，主要由德州大學阿靈頓分校李教授所安排，李教授現今亦為ESRC機構之主任，故在李教授指導下，該ESRC機構目前主要發展領域為：

- (1)電力自由化與負載預測
- (2)電力品質
- (3)配電自動化與負載需量管理
- (4)電力系統模擬與系統即時監測
- (5)再生能源、風力發電及與電網整合之系統模擬

### **4-3 德州西部風力發展之輸電線最佳規劃介紹**

由於德州潛在風能排名全美第 2 名，且該地區不易受風雪所影響，因此具有比其它州更優良的開發潛力。所以德州公共事業委員會(Public Utility Commission of Texas, PUCT)，為積極開發風力發展，頒佈相關開發政策(Docket 33672)，並於 95 年起於德州西部較具開發潛能之風場，擬定 5 個具有競爭優勢之風場開發計畫(Competitive Renewable Energy Zones, CREZs)及 4 個風力開發情境，並要求 ERCOT 進行相關輸電線規劃，並以需滿足風力電能所需輸電容量及維持系統運轉安全為前提下，進行相關輸電網路規劃作業。

由於德州整體風力開發情境高達(12GW~25GW)，因此在最佳輸電線路規劃時，需考量許多層面因素，如投資金額、輸電電壓層級、高壓交流或直流輸電系統(HVAC 或 HVDC)、未來擴充性、線路損失、輸電鐵塔路徑路權、相關準則規定及兼顧電網安全等分析。因此可

藉由德州所進行之輸電網路最佳規劃流程、步驟，可作為未來台電長期系統規劃參考。

#### 4-3-1 風場開發規劃情境

##### (一)前言

依據德州公共事業委員會(PUCT)所規劃風場開發位址及規模情境，其計畫於 PANHANDLE、MCCAMEY、CENTRAL 及 CENTRAL WEST 等 5 個地區規劃興建風力廠址開發，如圖 4.3.1。

ERCORT 部分，就其風力發展擬定 4 個發展情境(SCENARIO)，如表 4.3.1，並配合進行風力發展的輸電系統規劃。考量既有西德州風場裝置容量(6,903MW)後，統計 4 個風力開發情境容量分別為：

- 情境 1：新開發 5,150MW，合計 12GW
- 情境 2：新開發 11,553MW，合計 18GW
- 情境 3：新開發 17,956MW，合計 25GW
- 情境 4：新開發 17,516MW，合計 24GW

其中 12GW 為基本案，主要以考量經濟與未來擴充性兩層面進行考量；而 18GW 與 25GW 為 12GW 基本案之擴充案，亦即未來西德州如欲開發至最大 25GW 情境，則其輸電網路之興建需具有擴充性及延展性；另 24GW 情境為 25GW 之調整案，亦即考量不同風機設置位置情況下之風力開發案。

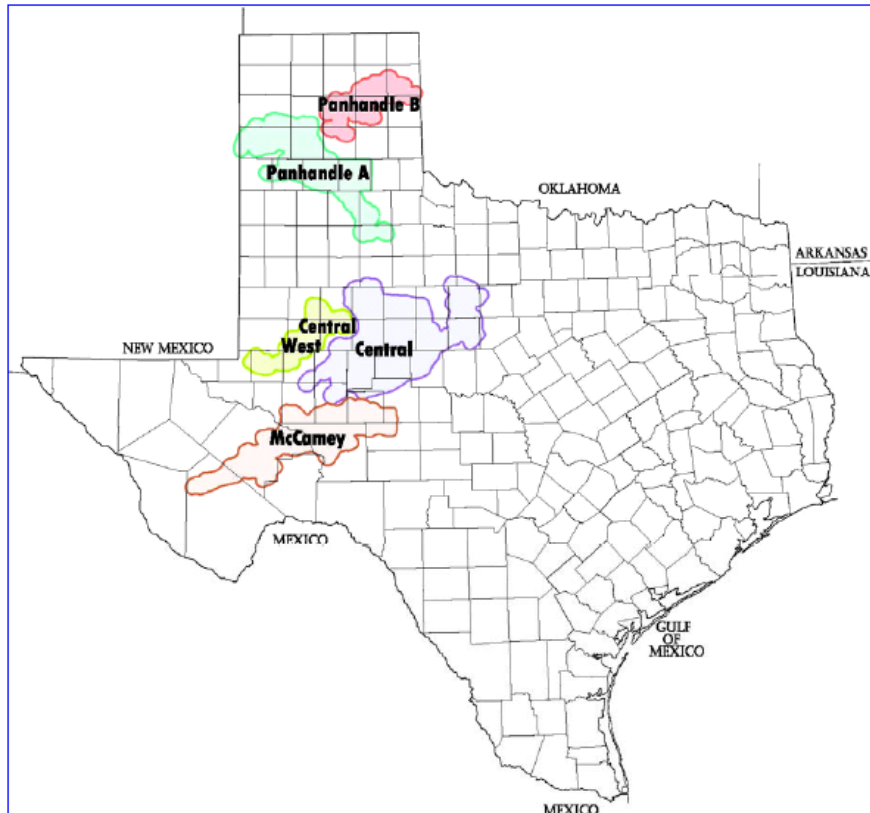


圖 4.3.1 德州西部風場 CREZ 開發位址

表 4.3.1 德州西部風場 CREZ 開發情境

	Scenario 1 (MW)	Scenario 2 (MW)	Scenario 3 (MW)	Scenario 4 (MW)
Panhandle A	1,422	3,191	4,960	6,660
Panhandle B	1,067	2,393	3,270	0
McCamey	829	1,859	2,890	3,190
Central	1,358	3,047	4,735	5,615
Central West	474	1,063	1,651	2,051
CREZ Wind Capacity	5,150	11,553	17,956	17,516

## (二) 輸電成本估算

由於大量風力開發之電力輸送，亦既有西德州電網輸電能力一定不足，因此新建新輸電線或調整電網架構是必須的，而而本案開發亦有涉及不同輸電網路開發模式，因此在評估相關必要輸電線與

建之經濟層面時需考量其單價，表 4.3.2 即為 ERCOT 評估所需輸電線之單位價格。

表 4.3.2 輸變電設施單位成本價格

Component	Cost (\$ Million)
<b>138-KV EQUIPMENT COSTS:</b>	
138-KV NEW CKT./MILE	1.0
138-KV SECOND CKT./MILE	0.25
138-KV RECONDUCTOR/MILE	0.30
138-KV SUBSTATION	10.0
<b>345-KV EQUIPMENT COSTS:</b>	
2-1433 ACSS 345KV SINGLE CKT. ON DOUBLE CKT. TOWERS/MILE	1.5
2-1433 ACSS 345KV DOUBLE CKT. ON DOUBLE CKT. TOWERS/MILE	1.88
2-1590 ACSR 345KV SINGLE CKT. ON DOUBLE CKT. TOWERS/MILE	1.4
2-1590 ACSR 345KV DOUBLE CKT. ON DOUBLE CKT. TOWERS/MILE	1.68
2-959 ACSS/TW 345KV SINGLE CKT. ON DOUBLE CKT. TOWERS/MILE	1.3
2-959 ACSS/TW 345KV DOUBLE CKT. ON DOUBLE CKT. TOWERS/MILE	1.56
345-KV SECOND CKT./MILE	0.4
345-KV RECONDUCTOR/MILE	0.5
SERIES COMP > 100 MILES	30.0
SERIES COMP < 100 MILES	25.0
150-MVAR SHUNT CAPACITOR	6.0
345/138-KV 600MVA AUTO TRANSFORMER	8.0
345/138-KV 800MVA AUTO TRANSFORMER	9.0
Substation - RING BUS 6 - LINE TERMINALS	15.0
Substation - BREAKER & 1/2 > 6 - LINE TERMINALS	25.0
<b>765KV EQUIPMENT COSTS:</b>	
765-KV CKT. COST/MILE	2.6
765-KV COST/SUBSTATION	40.0
765/345-KV AUTO TRANSFORMER	20.0
<b>HVDC COSTS:</b>	
2 x 3,000-MW CONVERTER STATIONS	525.0
345-KV HVDC CKT. COST/MILE	1.05

## 4-3-2 風場規劃方法

### (一) 研究方法

為滿足不同風力開發情境需求，ERCOT 發展一種分析的方法，以確保輸電容量及降低輸電線新建數量為考量因素下，確保每個情境皆有最近似的最佳發展計畫，以使風力發展能有足夠的充分考慮。

首先第一步是確認不同的傳輸方案的發展概念，發展這些不同的概念的目的，將迫使產生不同的發展結果，包括 CREZ 輸送的全部可行的範圍和包括所有可能合理考慮的解決辦法的不同類型傳輸方案。一旦各種相當不同的概念被鑑定，第二步則是開發每個情境的具體傳輸方案，基於每個方案的不同概念，需切中要點、清楚說明及計算每個發展概念所需的最低建造費用，以滿足每個情境 CREZ 輸送的性能需求。第三步則是優化出一個具體的可行計畫。最後，再另外進行分析所確定的優選方案，並且確定什麼輸電方案是必要做為未來擴充至情境 3 或 4 的必要工程。

### (二) 核心技術發展擬定

由於風場發電後，需藉由收集、傳送和分發等階段，以將電力送至鄰近負載用電地區。因此在規劃輸電線時，ERCOT 採用規劃發展核心為：

- ◆增加德州西部地區之345KV輸電線。

- ◆整合德州西部地區345KV輸電線。
- ◆為減少345KV線路路徑，提升最高電壓為500kV或765KV。
- ◆低阻抗輸電網幹線或風場、負載端採環路的連接。
- ◆從電廠到負載中心或兩負載中心間採HVDC輸電系統或以HVDC輸電系統整合345KV輸電系統。

這些發展概念的每個將各有其獨特的屬性，以幫助滿足 CREZ 系統要求，然而每一個概念亦也有其潛在的缺點。因此開發時，基於這些概念中的每個的詳盡的傳輸方案，然後比較最終的計畫需求及確認最佳可被執行的概念。然而，每個發展概念皆有其優劣點，因此規劃發展時，需整合不同概念，才可獲得最佳的輸電網路規劃。

#### 1. 整合德州西部地區之 345KV 輸電線概念

此概念為酌情地把風場與現有德州西部的系統整合連結起來，並且在德州西部之外地區增加輸電轉移能力，必要時亦包括現有的系統的擴充。此計畫概念中，是與目前 ERCOT 系統一致的概念。當然，整合系統分析法的一個潛在的缺點為如果新 CREZ 產生電力在德州西部之互連產生問題，則部分潮流將流動到現有的系統低電壓上，將造成系統存有潛在的風險。

#### 2. 增加德州西部地區之 345KV 輸電線概念

此概念為因應需求於西德州風場部分興建新的輸電線路，以增



加風場間的聯繫，最後在與現有東部 ERCOT 系統連接。此概念恐將導致「重疊效果(overlay)」，而且效益亦不高，因為增加的系統僅連接風場輸出電力，而在利用既有 ERCOT 輸電網路輸送電力至德州東部負載中心地區。另重疊的系統架構，存有潛在問題，需利用整合技術確保系統穩定，而且必要時亦需增加其它額外輸電設施去解決。因此考量經濟因素，風場直接昇壓至 345kV 系統後，興建新輸電線路引至既有 ERCOT 電網，還是利用既有低電壓系統匯集後，整合既有輸電網路的構思，將需要相互搭配，並以確保系統安全下獲得較低的費用所需。

### 3. 減少 345KV 線路路徑，提升最高電壓為 500kV 或 765KV

為能精確獲得新建345kV線路鐵塔路權(ROW)，在上述整合及增加345KV輸電線概念恐無法獲得精確數值。因此這次評估方式亦包括如何降低輸電線路鐵塔路徑需求得需求項目，如採用高壓交流輸電系統(765kV)降低德州東西電網輸電線路鐵塔路權數量，亦即採用高壓輸電系統，將可有效減少345kV興建線路鐵塔所需路徑數。

### 4. 低阻抗輸電網幹線或風場、負載端採環路的連接

超超高電壓輸電具有高輸電容量、低輸電阻抗、低線路損失的特性，因此若與同樣輸電距離之345kV比較，其除線路輸電損失較低外，以高容量輸電能力亦可取代幾條新建345kV線架構。也許超

超高壓輸電有上述優點，但考量經濟因素下，這些高電壓產品將更昂貴，與345kV系統相比，預期將有更高的資金支出。因此同時考量這些問題及是否有足夠輸電能力前提考量下，兼顧系統安全(在輸電線路事故時，需具有足夠其它並聯輸電能力，並可保持輸電設備在使用中不會產生超載及不符合準則規定項目)。

另一個超超高壓概念為使用環路設計於通過的風場裝置地區，並可藉由穿過其它州和大負載中心地方，形成環路方式引供。如此可解決需要相當多的345kV收集匯流排(collect bus)的需求；其次，可將電力充分利用輸送至超超高壓輸電網路，提供更加的輸電選擇。因此採環路概念卻能解決上述所提之問題，但是這些環路建造所需成本可量，亦將為另一考量課題。

#### 5. 從電廠到負載中心或兩負載中心間採 HVDC 輸電系統或以 HVDC 輸電系統整合 345KV 輸電系統

最後的概念為使用單一或更多交流高電壓輸電網路，或高壓直流輸電網路(HVDC)。目的在於減少傳輸線路徑可能被增加的需求性，或者同時結合既有345kV輸電網路的概念，達到最佳輸電發展規劃。

HVDC的特性功能，主要可用來控制輸電線路的電力潮流量，達到較佳的潮流控制目的，如降低線路輸電損失與減少傳統交流輸電技術

所需之無效電路補償、電壓問題。即使目前HVDC的造價仍高於傳統交流輸電設備，但若考量長距離輸電的可能性(通常幾百英里長)，則採用高壓直流輸電技術HVDC將是一個較佳的選擇策略，且其成本效益亦是好的。然而考量事故後，系統輸電網路仍需有足夠輸電能力要求下，HVDC之背後替代方案(如背後骨幹電網需有足夠交流輸往輸送)亦需考量。因此預期未來高壓交流系統及高壓直流系統兩者，未來肯定是電業發展相互考量因素。

### (三)CREZ 風場開發位置

德州西部風場開發位址之位置選定(Panhandle B、Panhandle A、Central、Central West、McCamey等五個風場開發)，主要還是由德州公共事業委員會PUCT所訂定，並遵照其Docket 33672條款辦理。

### (四)設計考量

根據ERCOT報告指出，針對不同風場開發情境，其輸電線路設計考量主要有兩項考慮方案。首先有大的比例新風場開發(大約45%)主要來自德州的Panhandle，如情境2中可知其CREZ風場開發佔比較高。因此考量輸電潮流循最小阻抗路徑流動之特性下，大多風能從Panhandle及Central發電後，大多數朝向最近的負載中心移動，如Dallas或Fort Worth地區，如圖4.3.2之情境2所示。故考量輸電線

因以最近負載中心新建為主。

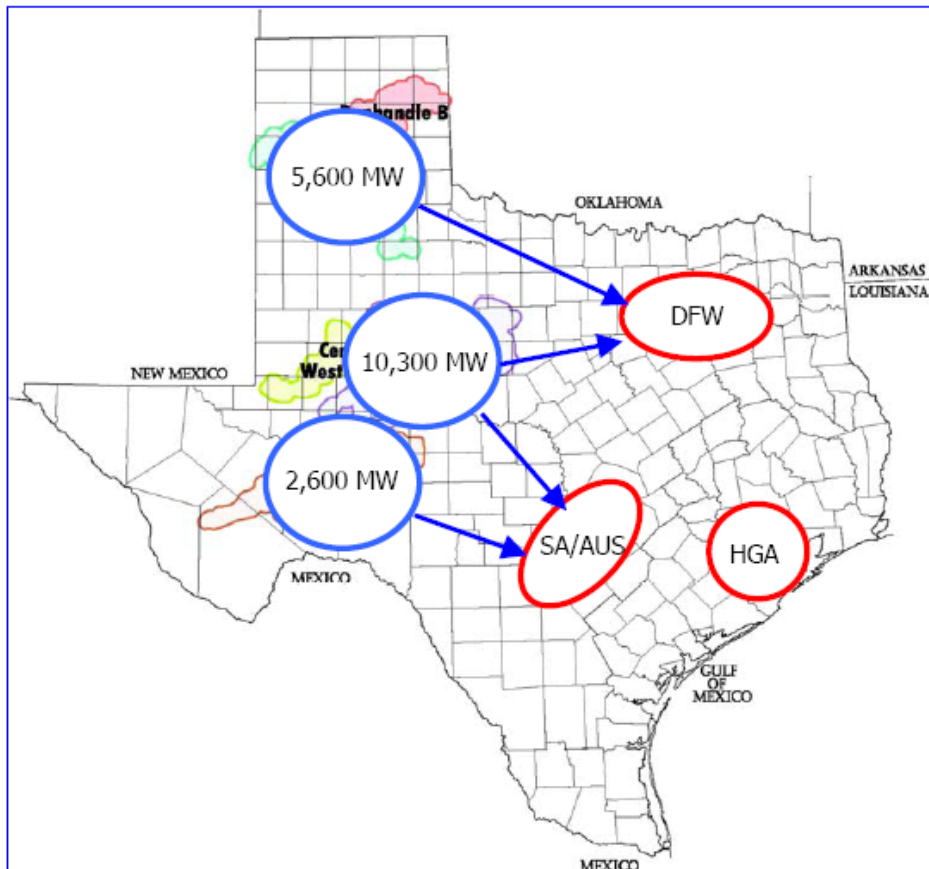


圖 4.3.2 情境 2 之德州西部風場與負載關係圖

第2項考慮因素為CREZ風場發電後，應考量直接輸送至負載中心，除可減少線路輸送損失外，亦可增加能源使用效率。而德州主要的負載中心集中在三個地區，如東北部地區的Dallas與Fort Worth、中部地區的Austin與San Antonio、東南地區的Huston等地區。因此，在這項研究過程中的一個基本的問題是輸送的什麼類型或者什麼類型的輸電網路架構將最好適合於收集風能產生的電力輸送。

#### (五)模型假設與分析

## 1. 分析軟體

- (1) 穩態潮流發展及瓶頸改善模擬檢討：PSS/E(30 版本)及 Powerworld(12 版本)。
- (2) 輸電傳輸容量及事故分析：PSS/MUST(8.3 版本)。
- (3) 可靠度、機組排程與經濟調度：UPlan(7.4 版本)。
- (4) 動態特性分析：PSS/E。

穩態模型主要用來評估電力潮流估算，而 UPlan 軟體主要用來確定每月和每年風能的削減情況。

## 2. 動態穩定度模型

除了上述測試風場穩態性能之外，測試系統故障或遭遇擾動後之動態性能亦是必須的。因為完善的系統規劃，需有足夠的系統裕度，不致因遭遇外在系統擾動、事故後發生系統運轉運題，並且在事故後，能重新回到新的運轉操作點。

做模擬系統動態特性分析時，首先需要整體電網的拓撲架構模型，而且需要每個獨立發電機和其它電器負載(如電動機及燈具等)的動態模型。既有機組部分，ERCOT 已保有現有的發電機模型資料庫，但是並沒有相關新風力機組之模型。因此 ERCOT 在模型假設上，係採用西門子 PTI 所採用之雙饋式感應發電機模型(Type3 DFIG 模型)，其模型中亦包括低電壓忍受能力的技術(Low Voltage Ride

Through, LVRT)，相關規定如 FERC 裡之 661A 所規定。

### 3. 情境 3 與情境 4 模型假設

由於情境 3 和 4 的開發規模超過 24GW，而這風力所產生的電力總量不太可能在 2012 年被建造完成，因此 2012 年主要仍在以情境 1 及情境 2 之藍本下，進行相關系統規劃。因此 2012 年超過 24GW 之風力容量在 ERCOT 分析中將不預期與情境 1、2 分析內容一致。亦即 2012 年後之分析並無法利用安全性分析、機組排程及經濟調度等作為進行分析。

首先進行情境 3 與 4 的開發，將類似發展情境 1 和 2 的方案相近，亦即系統仍需有足夠輸電容量滿足風力的開發。因此全部總量的風能削減評估，將由情境 2 的在最大的風能輸出的百分比作適合的調整(如 CREZ 風場 88%及現有風力 55%為基礎下之調整)。由於情境 3 與 4 開發年度久遠(2018 年)，故 ERCOT 在進行長期系統規劃時，亦同時考量 24GW 風能與其它燃煤、燃氣機組進行開發比例規劃；亦即倘考量 24GW 風力開發規劃需求，則考量長期最小負載用電需求下，未來燃煤或燃氣複循環機組開發比例將設定不超過 50%負載用電需求。

### 4. 變電所位置選定與設計概念

由於不同開發情境，ERCOT 已初步選定相關變電所位置，而這

些變電所亦規劃連接至既有輸電基礎設施上。然而，新變電所設置位置基於某些實際因素仍應可被靈活的調整，這些原因可能包括 CREZ 分發過程中的風力設備的實際位置與實際風場座落位置和路線選擇的問題，以及將來的風力整體發展規劃的調整等措施。

除部分變電所建立時，有所調整之外，其它建設作為將依照 CREZ 計畫內容進行建造：

- ◆新設變電所將設計為標準環狀匯流排或1又1/2的匯流排架構。
- ◆既有變電所擴充部分，需有足夠斷路器設備與保護設備，亦即每個新設備能夠被單獨進行切入/離動作。
- ◆如果事故後系統保護和系統規劃已事先共同決定將有最有利的變壓器跳脫，則斷路器和電驛仍然需有能力獨立跳脫變壓器或線路的能力。

這些目的即在於防止當系統發生不確定的事故情況時，匯流排能夠獨立跳脫相關事故設備或線路，而不造成任何安全的疑慮。

## 5. 就有風場考量

這份報告裡所提出的每個計畫，由於考量輸電擁擠效應，其所設計的風能削減量係以 2%估算。因此在每個計畫的發展期間，其既有存在和新的 CREZ 風場設備的削減量的輸電能力影響將被評估。經常這些影響變化顯著可從設備間相互影響看出。在許多場合中，最

小降低總風能削減的方法，係以增加另外的輸電設施，並將連接點換至一個現有的風代設備。然這些新輸電設備的新增，仍需以考量全系統效益、經濟評估後，才可有效確認。

### 4-3-3 風場規劃結果

#### (一)概述

如 4-3-2 所描述，這項研究的方法被用於允許 5 類不同的方案(情境 1A、情境 1B、情境 2、情境 3 及情境 4)解決辦法，並在 PUCT 臨時命令中被指定以 4 個開發情境進行每個情境的評價。

首先分析時，若假設以 345kV 電路組成為第一選擇方案，則可適用於不同的情境內容中。但僅一個解決的辦法，看起來僅非常適合於情境 1，這種方案(345kV 的電路架構)對情境 1 將是最節省成本的，但對於情境 2 或 3 而言並不是。因為情境 2 除包括一個 345kV 的電路網路外，並需包括其他解決辦法，才可能是最節省成本的。因此每個情境，再考量經濟層面因素上，將需納入不同開發規模，以獲得較佳開發方案。

首先用於將低 345kV 輸電鐵塔路徑(ROW)的概念，是第一個替代的解決辦法概念。在用於情境 3 或 4 的 ROW 設計上，一個計畫從德州西部到東部的過程中，除幾個大的 345kV 環路被要求於德州西部進行收集風能外，另外輸送大量的電力於德州東部的負載中心，採



用新的 765kV 的輸電架構亦較新建的 345kV 的電路費用來的更有效率。

第 2 個替代概念為額外增加 345kV 路徑的解決辦法。於德州西部新建部分新線路，並在安全性分析、機組排程及經濟調度等分析後，這類辦法看起來可有效為新風力所產生電力提供較節省成本的能力。但事實上，這類辦法無法解決強化西部與東部電網的電力輸送，故以現有的風力設備仍看不見任何好處。此外，在輸電系統方面，最值得注意的是那些現有系統僅僅適合 CREZ 風設計，而哪些是需擴展線路。因此整體考量時，若當它是一種節省成本的選擇時，則增加的計畫需更被進一步分析。

綜上所述，ERCOT在進行風場規劃分析時，先從風力風電量較小的風力發展情境最佳執行技術方案開始，發展下一風力發展情境之最佳執行技術方案與擴展路徑，而後在循序考慮這些技術方案未來擴展的需求。亦即：

1. 第一個發展情境階段，為蒐集系統資訊，確定從西部到東部地區的輸電網路系統並整合東部地區輸電電網，經檢討後建議擴充到第二個風力發展情境適合計畫方案。有關這個階段之分析檢討 ERCOT已完成，輸電線的擁有者已同意風機連接至系統的彈性，並允許配合輸電限路徑的分析稍微改變是應該的。

2. 第二個發展情境階段，為確定從西部到東部地區的輸電網路系統。並為了整合德州東部系統，能持續且接近最佳技術執行方案已被認定，在最後完成整合西部輸電系統完成前，未來的工作及末端的小改變可能是需要的。
3. 第三、四個風力發展情境，為基於電力潮流及穩定度，從西部到東部的輸電線及整合東部電網系統之持續執行方案已被認定。基於額外系統需求的考量，從西部到東部輸電線之擴展計畫之容量和路徑位置是可以改變，且東部電網系統的升級是必需。

## (二)情境 1 開發說明(12GW)

情境 1 共包含兩個發展計畫。第一個計畫為西德州未來無擴充風力開發之計畫，因此這個計畫將被提出最經濟的開發模式，並能確保風場所產生的電力與風場位置，系統能提供足夠的輸電能力。但是，ERCOT 比較推薦第 2 個計畫，這是一個為未來情境 2 發展的計畫的子計畫，如果委員會決定在這個時期選擇此情境，則可作為有效擴大將來風場開發情境 2 和 3 的推動。因此，情境 1 之第 2 個計畫將為將來的情境 2 風能開發的能力提供一條較節省成本的思維，並將為未來風力能力發展提供更多的靈活性。

### 1. 情境 1 第 1 個計畫內容(Plan A)

此情境主要以最經濟的價格，規劃情境 1 的輸電網路規劃，

由於係以最有經濟價格作為考量，故其未來擴充性亦將最低。其降低價格主要因素為此規劃大多以新建 138kV 輸電線路為主，因此在價格上會比採用新建 345kV 電網來的便宜，而且電網架構部分，亦採用輻射狀電網架構(Radial Circuits)，因此亦降低風場輸電可靠度。統計整個風場(Plan A)計畫的發展規模及電網發展架構如圖 4.3.3 及表 4.3.3。

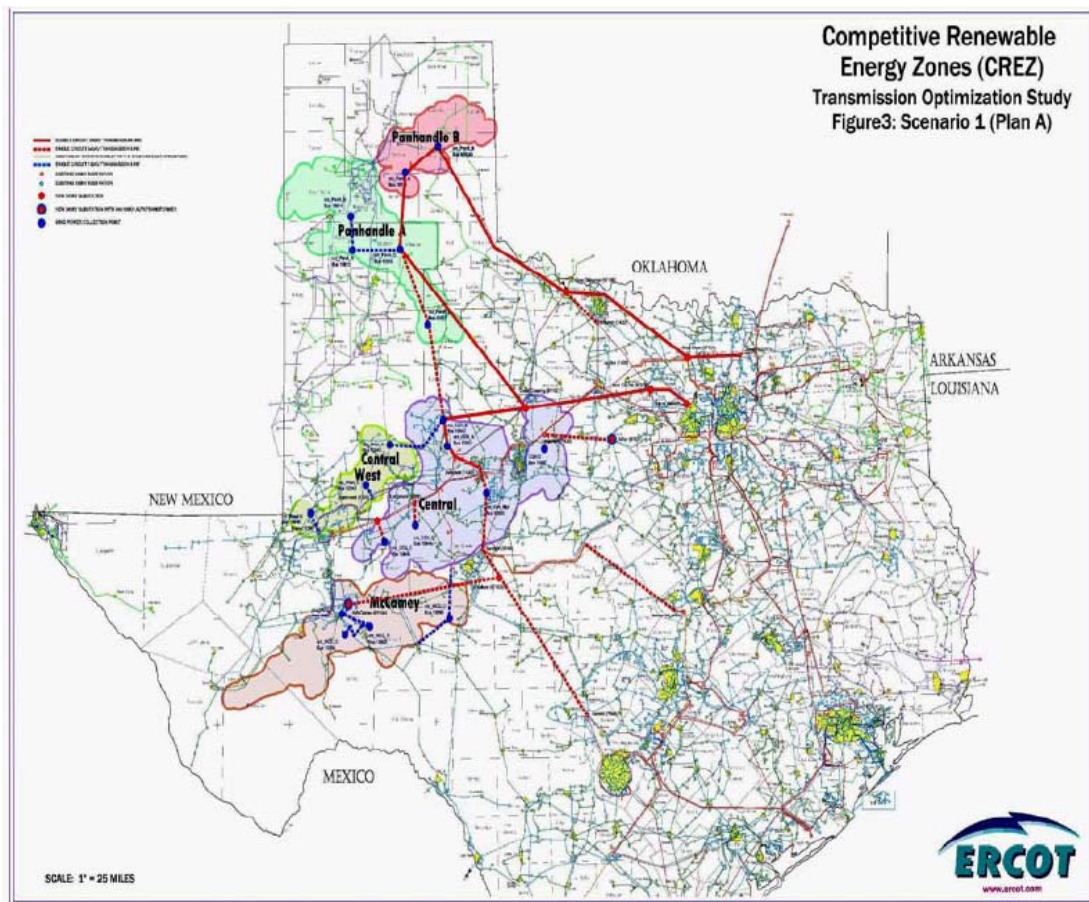


圖 4.3.3 情境 1(Plan A)之電網架構圖

表 4.3.3 情境 1(Plan A)開發情境彙整

項目	說明
整體風場開發	29.5 億美元
風場匯集系統(collection system)	3.50-4.10 億美元
新 345kV 鐵塔路徑(ROW)	1435 英里
新 138kV 鐵塔路徑(ROW)	203 英里
擴充性	無法擴充至情境 2

## 2. 情境 1 第 2 個計畫內容(Plan B)

本計畫(Plan B)完全係以未來擴展至情境 2 所規劃之開發計畫，因此規劃輸電線路時，需整體混合與情境 2 相互考量，並且證明何種輸電規模、架構是最適合及最節省成本的選擇。這種混合計畫適合開始從情境 1 當子計畫後，再向外發展。這個計畫最初設定為 18456MW 的風力開發總量(其中 11553MW 為 CREZ 風力)，並採用 345kV 的網路，而不是 138kV 的網路架構，並用來收集大多數 CREZ 的風力輸出。因此，與計畫 A(Plan A)相比較，這個計畫為新計畫得延伸提供更多的擴大能力和可靠性。統計整個風場(Plan A)計畫的發展規模及電網發展架構如圖 4.3.4 及表 4.3.4。

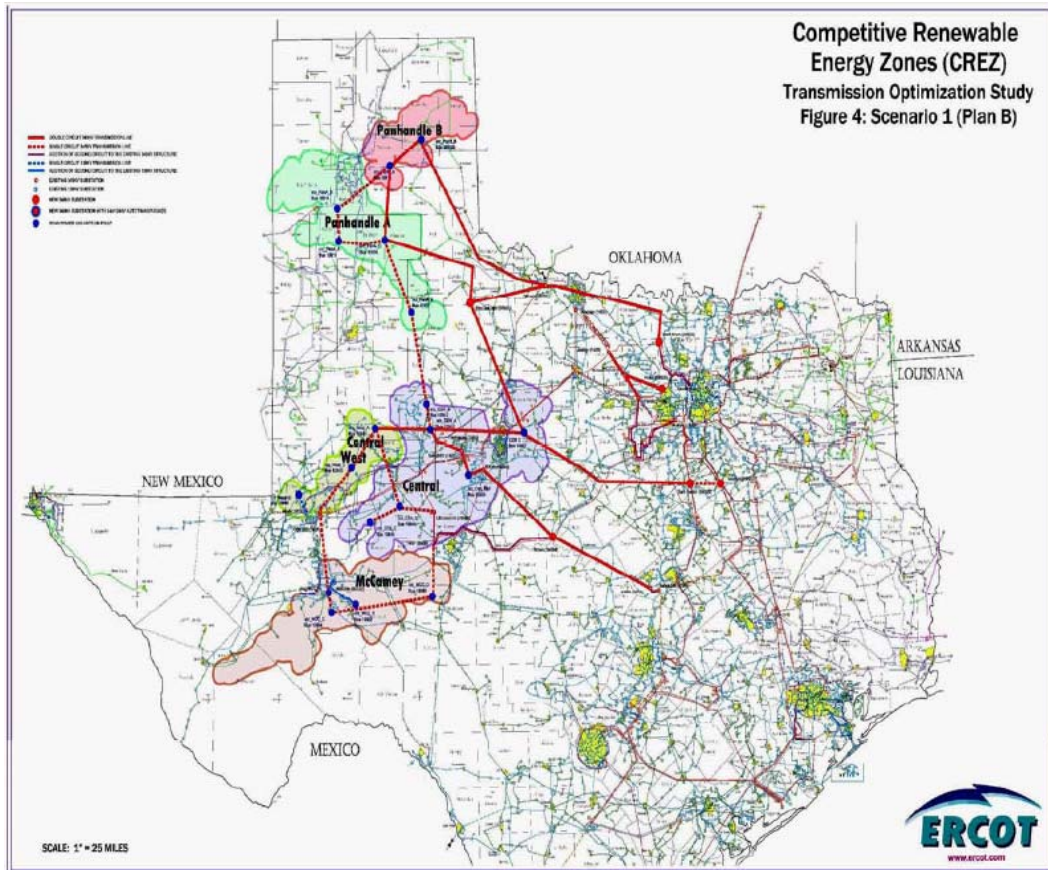


圖 4.3.4 情境 1(Plan A)之電網架構圖

表 4.3.4 情境 1(Plan A)開發情境彙整

項目	說明
整體風場開發	37.8 億美元
風場匯集系統(collection system)	4.10-5.30 億美元
新 345kV 鐵塔路徑(ROW)	1789 英里
新 138kV 鐵塔路徑(ROW)	42 英里
擴充性	可擴充至情境 2

### (三)情境 2 開發說明(18GW)

本方案主要由上述情境 1(Plan B)所延伸發展下來，並且亦作為情境 3 或情境 4 的子發展發案。本情境主要整合兩條新的西德州輸電路徑、部分 Panhandle 風場網路連接工程、及情境 1(Plan

B) 中新增兩路輸電線工程。而風場發電後之電力，主要輸送至 Dallas、Fort Worth、Austin 與 San Antonio 等負載中心，為主要規劃藍本。統計整個風場(情境 2)計畫的發展規模及電網發展架構如圖 4.3.5 及表 4.3.5。

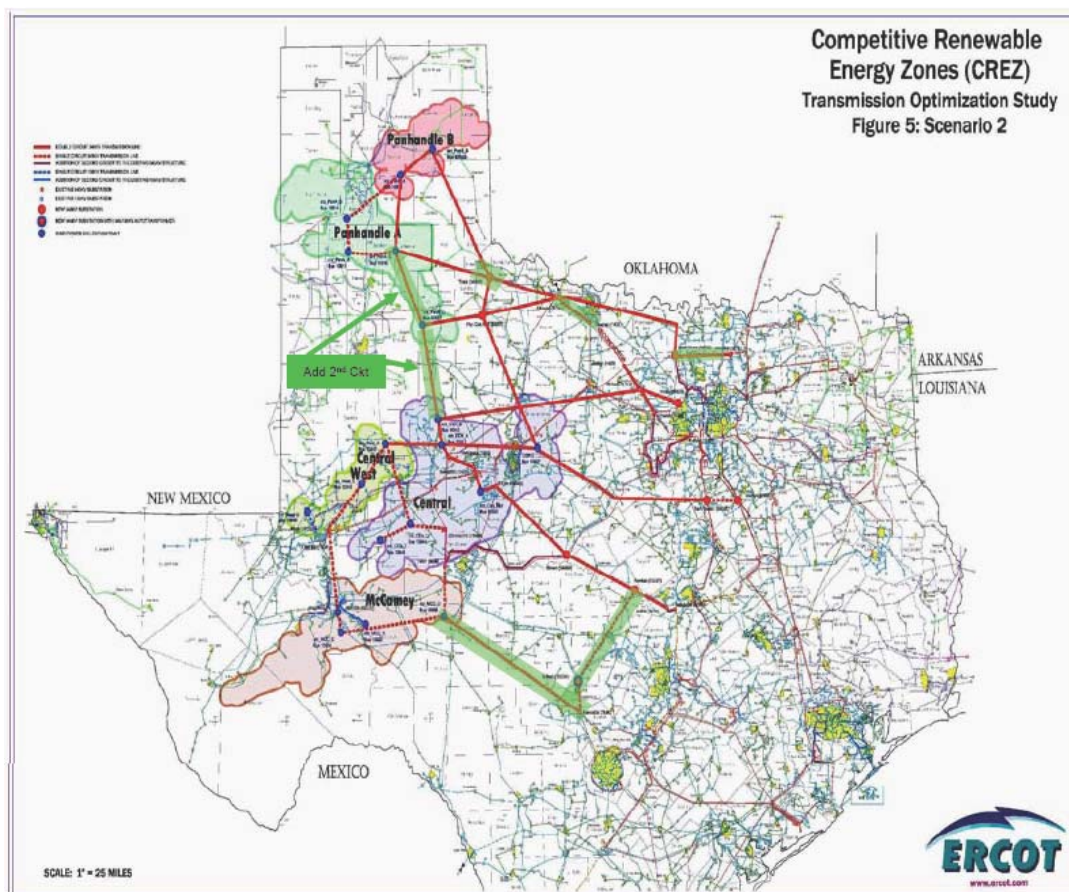


圖 4.3.5 情境 2 之電網架構圖

表 4.3.5 情境 2 開發情境彙整

項目	說明
整體風場開發	49.3 億美元
風場匯集系統(collection system)	5.80-8.20 億美元
新 345kV 鐵塔路徑(ROW)	2334 英里
新 138kV 鐵塔路徑(ROW)	42 英里
擴充性	可擴充至情境 3

#### (四) 情境 3 開發說明(25GW)

本方案主要由上述情境 2 所延伸發展下來。本情境主要整合一些新的西德州 Panhandle 輸電網路，其包括新線路從 Panhandle AC 到 Jacksboro 變電站，HVDC 工程從 Central A 變電站到休士頓附近之 Zenith 變電站。此情境中採用 HVDC 容量為 2000MW，可提供足夠輸電容量，滿足整體風場開發至 24859MW 之需求。統計整個風場(情境 3)計畫的發展規模及電網發展架構如圖 4.3.6 及表 4.3.6。

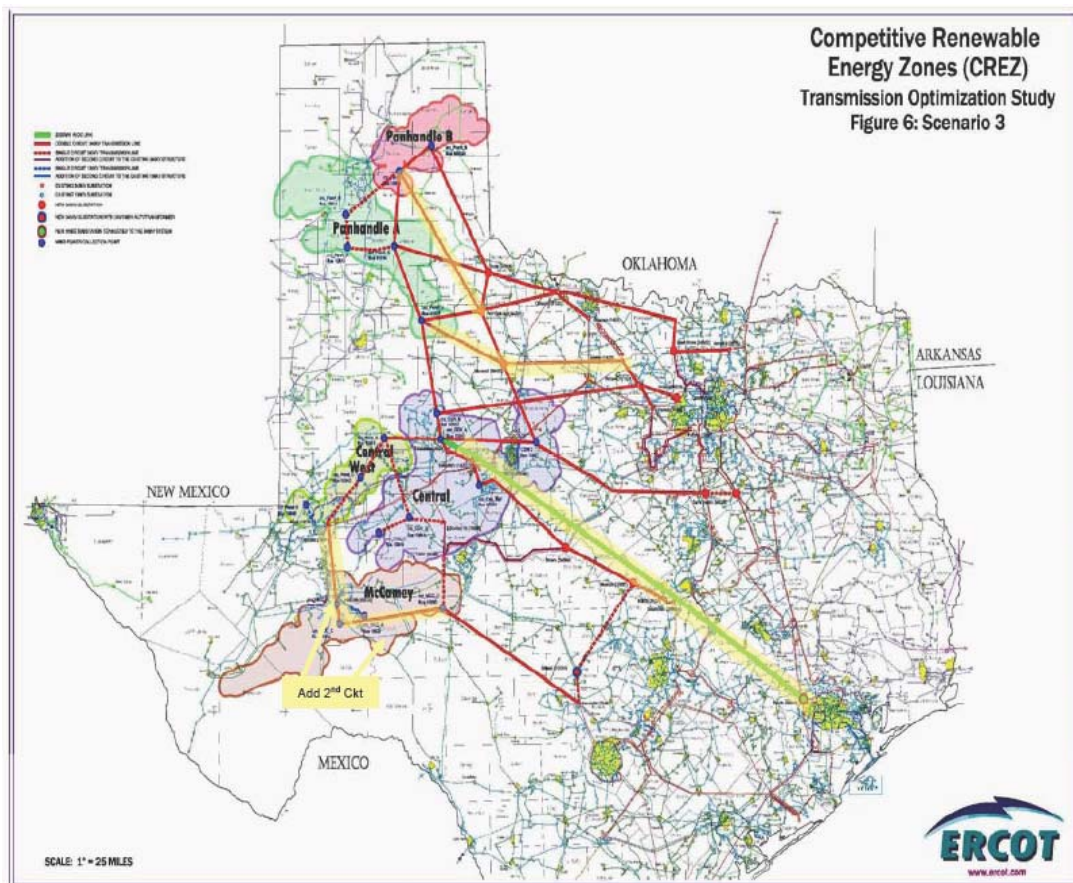


圖 4.3.6 情境 3 之電網架構圖

表 4.3.6 情境 3 開發情境彙整

項目	說明
整體風場開發	63.8 億美元
風場匯集系統(collection system)	7.20-10.30 億美元
新 345kV 鐵塔路徑(ROW)	2634 英里
新 138kV 鐵塔路徑(ROW)	42 英里
HVDC 系統鐵塔路徑(ROW)	360 英里

(五)情境 4 開發說明(24GW)

本方案主要以情境 3 所發展之方案。本情境主要不同於情境 3 係為部分調整 Panhandle B 風場之輸電線路，其主因為部分風場位置進行調整而做的輸電線路調整。統計整個風場(情境 4)計畫的發展規模及電網發展架構如圖 4.3.7 及表 4.3.7。

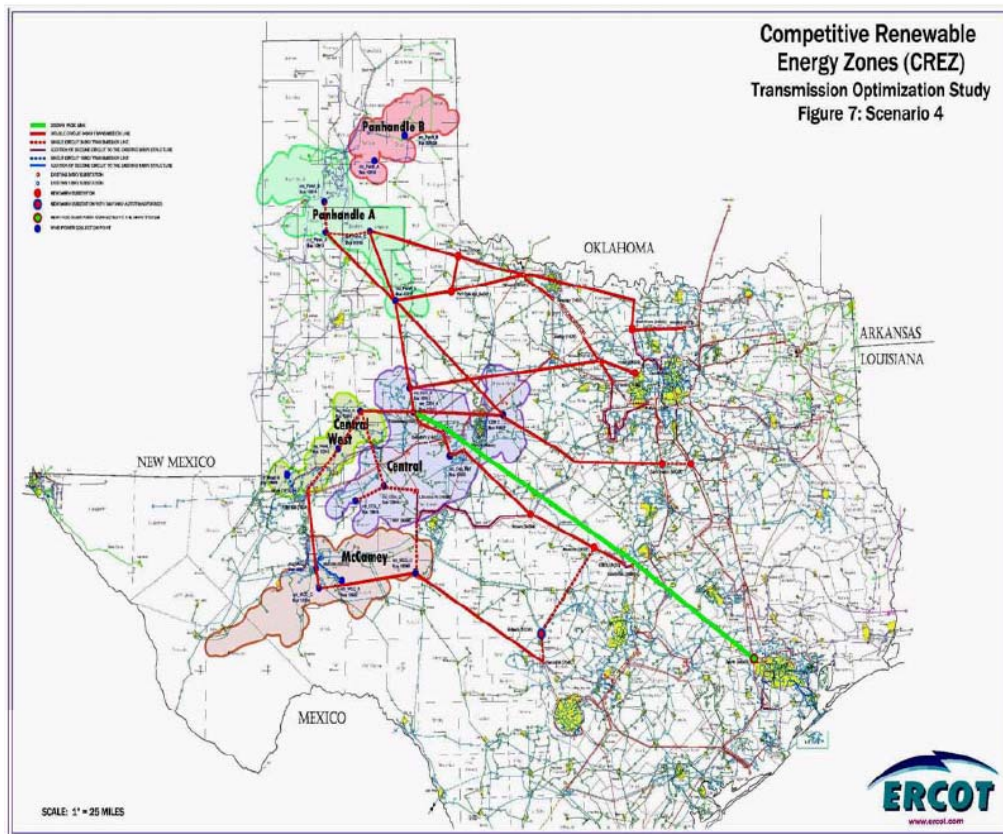


圖 4.3.7 情境 4 之電網架構圖



表 4.3.7 情境 4 開發情境彙整

項目	說明
整體風場開發	57.5 億美元
風場匯集系統(collection system)	6.70-9.40 億美元
新 345kV 鐵塔路徑(ROW)	2087 英里
新 138kV 鐵塔路徑(ROW)	42 英里
HVDC 系統鐵塔路徑(ROW)	360 英里

#### 4-3-4 總結

(一)ERCOT配合德州公共事業委員會(PUCT)，進行德州西北部風力擴展規劃，並將西北部風力產生之電力輸往德州東部地區如達拉斯、休士頓(HOUSTON)或南部之聖安東尼奧(SAIN ANTANIO)等地區負載中心使用，故擬定多種技術方案進行系統擴充，如擴充345KV輸電線、新建765KV輸電線及新建HVDC等線路。經以不同風力發展計畫檢討結果，ERCOT認為近期2012年仍以建議開發情境1(Plan B)為主軸，並作為未來西部德州風場擴展至情境2或情境3之子計畫，初期並以擴充345KV輸電線為發展要項，並俟為來風場以興建HVDC為主。有關345kV新建輸電線部分，已提報德州公共事業委員會討論，預計將可獲得通過。

(二)從此次ERCOT所檢討之大型風場最佳輸電線規劃案中，可獲得其擴展輸電線的模擬方法與方案選擇方式，值得本公司作為未來執行相關長期系統檢討、長期電源開發之參考與借鏡。

## 五、參加美國電機電子工程師學會年會摘要

此次 IEEE 2009 年 PES 年會主要主題為「人力資源的投資與電力系統的創新」議題上，並提供國際性觀點，達到促進、分享與相互討論的平台，並專注在關於今日電力系統與能源工業的發展。

本次會議內容主要包括六大部分：

- ◆ 技術類別資訊概要，包括主管會議(Super Session)，和其他分類的會議(如 panel sessions, paper sessions, poster session 與 paper forums )等議題。
- ◆ 個別詳細的 technical session 與技術工作，如本次年會中之教學課程(tutorials)，技術導遊(technical tours)等。
- ◆ 同伴的行程類別(companions' program)
- ◆ 學生行程類別(student program)
- ◆ 委員會會議(committee meeting)
- ◆ 報告者行程類別(presenters)

### 5-1 IEEE 會議摘要介紹

本次 IEEE PES 年會中舉辦許多不同技術議題，故以下簡要說明如下。

### 5-1-1 主管會議(Super Session)

本次年會中有很多型式，如(paper, panel, poster, short course, tutorial, super session)，但主要 Super Session 仍著重在未來電源發展趨勢、智慧型電網、電業發展及綠色能源等項目。

#### (一)分散電源的整合

主要討論內容有燃料電池 (FC)、太陽能(PV)、風力(WP)與小型同步機之整合、運用與未來發展，並以分散型電源網路安全管理及分散能源之提升等項目進行說明。不過，在FCS作為可靠的能源之前，許多障礙尚需克服。政府的政策和目標、研究與發展、應用地位和發電應用過程中的FCS的前景，被工業界和政府研究實驗室的代表在這個小組裡提出討論。

#### (二)綠色能源發展

此會議涵蓋最近再生能源發展的技術及政策，而會議中所報告內容不僅包括一些常見的水力、風力、太陽能之外，亦包括燃料電池、潮汐、生質能源及廢棄物利用等能源整合應用。此外電動汽車及綠建築的概念亦於本會議中說明。另針對CO<sub>2</sub>議題上，核能電廠議題亦為會議中重點，雖核能並非完全屬於綠色能源類型，但考量未來能源發展及全球溫室效應上，核能議題亦扮演重要角色。IEEE/PES核能工程委員會針對過去40年中對核能電廠之建造

與維修及建立之IEEE標準，另美國反應爐執照申請之改變、核能發電部署的更新也被提出，並對21世紀的電力需求將寄望核能更新的发展。

### (三) 21 世紀之傳輸容量提昇作為

由於系統容量逐年成長，且受於輸電線建造不易，因此許多電力業者上面臨輸電容量不足，造成系統在短、中、長期規劃運轉層面上遭遇許多難題。本會議許多專家學者提出相關增加輸電容量作為與技術，如 FACTS 設備、市場機制，以維持系統運轉可靠度。

### (四) 電力工業未來挑戰

由於近來電力工業新的發展趨勢著重在需量反應、再生能源、電力市場及電動汽車等範疇，迫使電業發展日益複雜。本會議主要介紹一些發展管理上所遭遇問題，並經由電力業者本身及其它專家學者分享相關經驗、開發程式及人力培訓，以共同提昇電業未來發展。

### (五) 智慧型電網

主要討論智慧型電網之新興技術。由於外在環境條件和電力品質需求日益提高，系統管理者需擬定一些智慧型電網控制之新計畫，以有效提昇能源效率、增加再生能源容量和改進電網可靠

性。而在能源資產部分(例如風力、太陽)等大量併入系統，智慧型電網規劃變得更有吸引力。

智慧型電網係以先進技術的使用，來改進電氣的實用系統與提升效率和使用、電力品質、可靠性及電力工業技術等。目前正進行很多研究與發展行動，在本會議上，工業界提出一些關鍵技術支援智慧型電網，並介紹一些新技術，及執行廣泛的區域監測器、保護、控制等實例，並為將來的智慧型電網發展勾劃出一片遠景。

### **5-1-2 會員會議(Plenary Session)**

本次會員大會主要由 PES 總經理 Wanda K. Reder 主持，並邀請前任 EPRI 總經理及執行長 Kurt E. Yeager 擔任主講人，主講相關「通往完美電力系統路徑(The path to perfect power)」，並同時接受與會人員提問，並從環境、經濟、及電網安全三部分詳細說明，並介紹相關未來電業發展里程。由於會議中集結世界各國電力菁英專家，故提問中涵蓋最近電力系統規劃、施工運轉及綠能發展之經驗及成果，供與會者相互討論與學習觀摩。

### **5-1-3 技術會議(technical Session)**

技術會議於此年會中包含許多完整的技術論文發表與相關技術摘要說明，主要從 7.21(星期一)下午及晚上與 7.22~7.24(星期二~

星期四)每天早中晚各時段舉行。其技術議程共包括多項技術議題討論，可供與會者相互討論與學習觀摩。內容包括 Super Sessions(SS)、Panel Sessions(PN)、Paper Sessions(PP)、Paper forums(PF)、Poster Session(P0)、Tutorials(T)與 Technical Tours(TT)等技術議題。

#### **5-1-4 委員會會議(Committee Session)**

技術會議於此年開會期間每天都有委員會會議，總計 IEEE 的委員會計有 17 項：

- ◆行政委員會(ADMINISTRATIVE COMMITTEE)
- ◆電機機械委員會(electric machinery committee)
- ◆能源技術協調委員會(emerging technologies coordinating committee)
- ◆能源發展與發電委員會(energy development and power generation committee)
- ◆電力工程教育委員會(power engineering education committee)
- ◆電力系統分析、計算與經濟委員會(power system analysis, computing, and economics committee)
- ◆電力系統通訊委員會(power system communications

committee)

- ◆電力系統動態性能委員會(power system dynamic performance committee)
- ◆電力系統建造與量測委員會(power system instrumentation and measurements committee)
- ◆電力系統運轉委員會(power system operations committee)
- ◆系統規劃與實現委員會(power system planning and implementation committee)
- ◆系統電驛委員會(power system relaying committee)
- ◆變電所委員會(substations committee)
- ◆突波保護委員會(surge protective device committee)
- ◆變壓器委員會(transformers committee)
- ◆輸電及配電委員會(transmission and distribution committee)
- ◆其它委員會(自動化、風力、電力市場、整合分散式電源及未來能源發展等議題)(multiple committee)

### **5-1-5 講授課程(Tutorials)**

IEEE PES 2009 年會中共舉行 6 場講授課程，每天 1~2 場為整天或半天的課程，聘請大學知名教授、有經驗之電力公司、顧問公

司及製造廠共組成授課小組講課，概述如下：

(一)風力基本介紹(Fundamentals of Wind Energy)

(7/26, 8:00AM~5:00PM)

本課程主要介紹風力機組加入電力系統時之基本考量項目與系統規劃、運轉所需注意事項。此外針對風機本身部分，介紹目前工業界中的風機發展狀況及基本瞭解風機的內部構造技術與設計考量。電網部分，則從單一風機對系統的影響評估，擴大到大型風場對整體電網的衝擊影響，包括電力潮流、暫態穩定度、與短路電流的影響。另針對風能預測部分，本課程亦提出相關說明，其預測的準確將關係到電網運作的效率於經濟。最後本課程亦以歐洲實際大型風場實例作為說明。

(二)變電所及線路之絕緣協調(Gas Insulated Substations and Lines)

(7/26, 8:00AM~5:30PM)

本課程主要給予實際資訊，針對實際從事變電所(substations)或線路(GIL)、開關場等氣體絕緣(氣體 SF6)的從事人員，提供更明確的訊息資料。本課程主要架構在針對其體絕緣部分，提供更深入探討。此課程過去已成功的在美國內、外辦理超過 15 場次之實際說明，其中亦包括 IEEE 技術研討會



中。課程中，邀請實際經驗從業人員說明及相關知名製造商與會。

(三) 電力電子技術於再生能源整合及儲能裝置上 (Understanding Power Electronics for Integrating Renewables and Storage into the Grid)

(7/27, 1:00PM~5:00PM)

本課程主要介紹認識電力電子技術與設備，並在現今熱門的再生能源及儲能設備上扮演的角色說明。因此本課程將以概略性介紹相關電力電子技術在電力工程上的應用，並提供相關從事電力人員瞭解相關電力附屬設施的發展技術進步。其主要課程內容涵蓋：

1. 整合再生能源中，電力電子所扮演角色
2. 電力電子元件說明
3. 開關設備(Switch-Mode Converter)技術介紹
4. 應用層面說明

(四) 二次配電系統網路 (Secondary Power Distribution Network)

(7/28, 8:00AM~5:00PM)

本課程主要回顧基本二次配電網路的設計與運轉說明，並且討論主要二次配電系統的組成元件，此外亦介紹一些二次配

電網路設計與運轉概念的改變介紹。如傳統的 120/208V 系統進化為 277/480V 電網系統架構之遭遇潛在問題。

此外在此課程配電系統中，亦介紹相關擴大資料收集、增加警報設施、即時控制與監測等條件作為。及變壓器改接、一、二次側電纜引接線改變、增加客戶端之緊急發電機與不斷電系統等訊息資料，可提供配電從事人員或得更多新知識技術。

#### (五)變電所自動化(Substation Automation)

(7/28, 8:00AM~5:00PM)

本課程為 2003 夏季會議(summer meeting 2003)中之自動化議題的更新，與新技術介紹。本課程除介紹一般常見之自動化作為外，並包括通訊使用之 IEC-61850 協定，及為系統可靠度所訂定之 NERC CIP 規範內容說明。

#### (六)電壓穩定度(Voltage Stability)

(7/29, 8:00AM~5:30PM)

本課程介紹不同觀點下之電壓穩定度介紹，並提供實際世界上發生電壓不穩定的實例，如東京大停電、北美大停電等事件。此外此課程亦介紹基本電壓穩定度分析與數學模型、電壓穩定度分析方法、事故後電壓裕度安全指標等事項。

### **5-1-6 壁報會議(Poster Sessions)**

IEEE PES 2009 年會中共舉行 6 場講授課程，每天 1~2 場為整天或半天的課程，聘請大學知名教授、有經驗之電力公司、顧問公司及製造廠共組成授課小組講課，概述如下：

此會議主要於 7.27(星期一)晚上 5:00P.M.~7:00P.M. 召開，主要參與人員為各界工商學界人員，並邀集上百作者出席，提供相關著作及論文配合展出。

### **5-1-7 論文討論(Paper Forums)**

從 7.27~7.30 為期四天，連續安排相關技術論文報告與討論，每天按不同主題安排讓作者簡報，並與參加者面對面溝通討論，交換彼此心得與經驗，本次年會共發表論文 898 篇。

### **5-1-8 技術參訪(Technical Tours)**

此次年會 PES 於 7.28~7.29 兩日內安排兩項不同技術參訪活動，參加者必需自行報名繳費。本年會安排之技術之旅，計如下：

(一)7.28(星期二)及 7.29(星期三)之 8:30 A.M.~12.30P.M.，參訪 Calgary 能源中心。

(二)7.28(星期二)及 7.29(星期三)之 12:30 P.M.~5.30P.M.，參訪加拿大 TransAlta Hydro Facilities on Bow River 水力電廠。

## 5-2 IEEE 會議年會心得

本次 IEEE PES 年會，主要仍以綠色能源為未來電業發展主軸下，所舉辦之年會主要議題。而以輸電人員角色觀點看來，預期未來衝擊台電電網將分為兩部分，一是再生能源的推廣，如目前最熱門之風力發電；其次為輸電電網的整合，亦即智慧型電網的推動。因此以下將以風力發電及智慧型電網兩部分進行詳細說明。

### 5-2-1 風機模型介紹

由於台灣地區自產能源貧乏，絕大部份的能源消費均須仰賴進口，因此積極開發本土新能源，乃成為攸關國家發展的重要課題。加上政府於98年全國能源議題中，亦表明未來朝向CO<sub>2</sub>減量已為明確努力目標，因此使得開發自產綠色能源的重要性更形彰顯。由於再生能源種類繁多，而目前風力發電之發展技術已達成熟階段(甚至單機容量高達10MW以上)，其發電成本已可與傳統發電成本相抗衡，因此風力發電已成為世界各國爭相發展之標的。

參照世界各國趨勢，各國均已積極朝向開發風力發電著手，各國再生能源比例也日益增加。以美國為例，統計至98年中為止，美國風力機組裝置容量已高達25,170MW，且97~98年之新增風力機組裝置量更高達8,358MW，其增設量為全世界第一名。因此為因應未來電業發

展趨勢，瞭解相關風機模型種類及特性將顯的格外重要。因此，本報告係參考IEEE講授課程內容就風機之特性、功能、模擬及PSS/E內風機模型進行說明。

### (一)風機機械構造

風力發電系統包括風力發電機、變電系統及監控系統三部分所組成，而風力發電機之組件構成、部件名稱及功能說明如下：

1. 葉片轉子：受氣動作用，繞軸旋轉，將風能變為機械能。
2. 增速裝置：傳統的設計主要是利用增速齒輪箱提昇葉輪的低轉速，以達到發電機所需的轉速；惟為減少經由增速齒輪箱所影響的發電效率，目前已有新型的變轉速無齒輪箱之風力機發電機組。
3. 發電機：將機械能（由風力帶動）轉成電能。發電機轉子利用其繞線控制電流產生強弱磁場，合併風速、葉片角度、煞車及轉子勵磁電流等控制因素，提高風力機效率與穩定轉動。採用感應式或同步式發電機，三相60赫，電壓約690V，H 級繞組絕緣等級。
4. 控制系統：包括阻止風力機超轉速的調速控制，自動迎風轉向的方向控制(YAW SYSTEM)，以及確保風力機安全運轉之安全控制等。

5. 塔架：用來支撐風力機，並使風力機的迴轉中心有一定的高度。
6. 機艙（NACELLE）：保護風力機的傳動發電機構與部份機電控制系統。包含底座、平台及機艙罩，其內部構造如圖5.2.1所示。

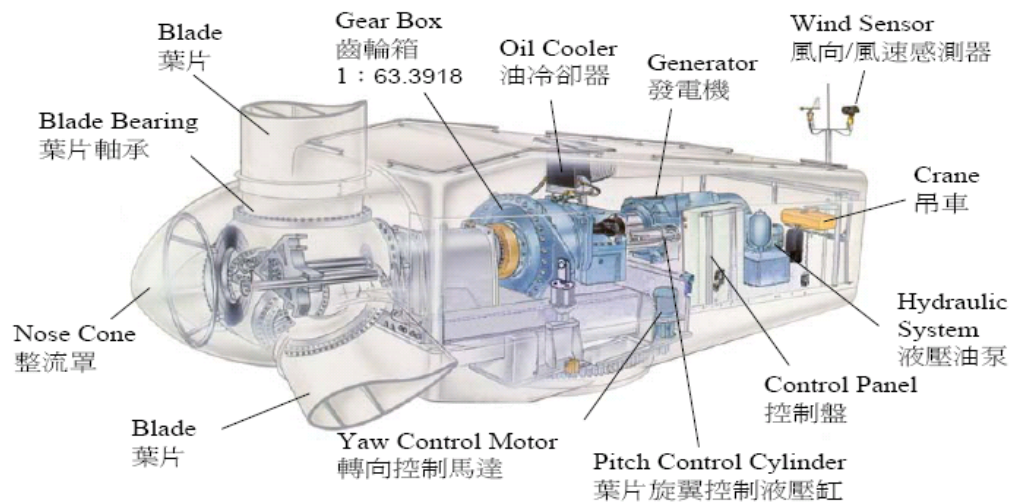


圖 5.2.1 風機內部構造圖

## (二)風機低電壓忍受能力(LVRT)

舊型的風力發電機大都為感應發電機，會從系統吸收無效電力，而導致當系統電壓偏低時，造成更加惡化系統電壓偏低之情形，而FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION (FERC)之FERC 661 及FERC 661A 即要求風機需有維持系統電壓的能力並將功率因素控制在 $\pm 0.95$  範圍。FERC 規定風力發電機組在系統故障時須有一定的電壓降忍受能力，以避免系統發生故障時，風力發電機又跳脫可能影響系統之穩定度，因此FERC 661 規定風機設備制定短時間渡過低電壓(Low Voltage Ride-Through)能力之規

範，如圖5.2.2。而FERC 661A 則更加嚴格要求在系統發生三相  
 接地故障電壓降為0 時須維持9 週波。另WESTERN ELECTRICITY  
 COORDINATING COUNCIL (WECC)更規定高電壓忍受能力的規定。

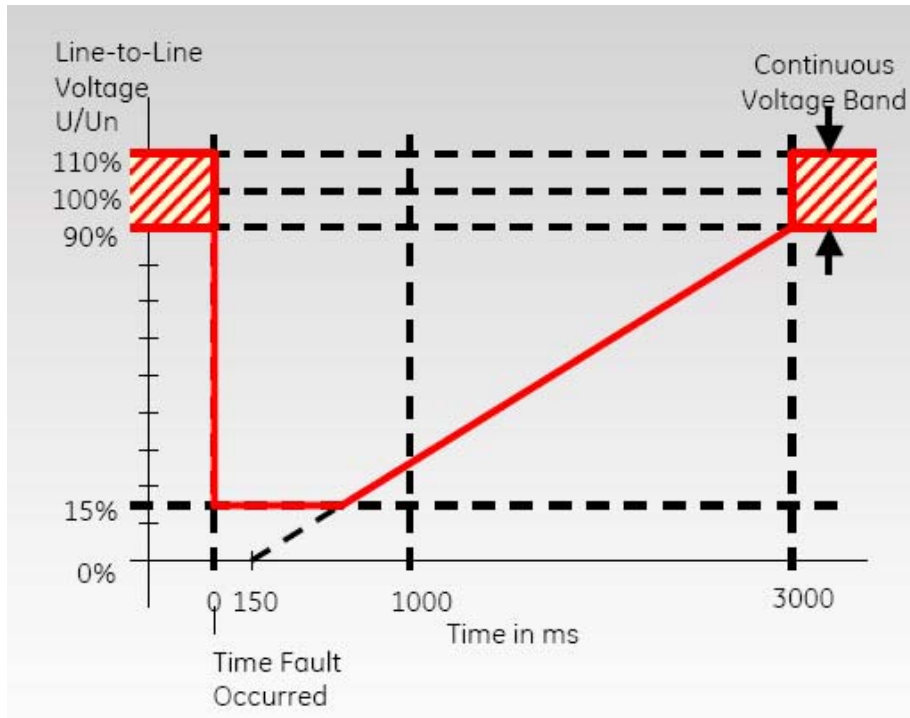


圖 5.2.2 FERC 661 規定風機 LVRT 功能

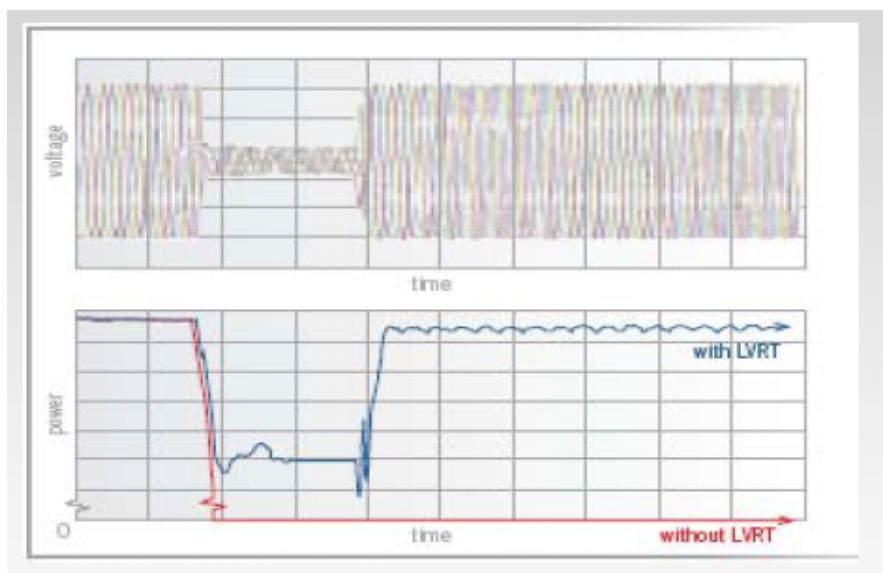


圖 5.2.3 風機有無具備 LVRT 時域模擬圖

圖5.2.3為風機有無LVRT功能之時域波形圖，由圖可看出當風機無具備LVRT功能時，當系統發生事故造成風機並接點之電壓過低時，風機將無法渡過低電壓危機，隨之伴隨風機跳脫。而若風機具備LVRT功能，則當低電壓發生時，風機仍能支撐過去，對系統電壓有所助益。

### (三)風機型式

風力發電機基本上可劃分為定速度與變速度兩大類。定速型的風力發電機，如圖5.2.4所示，其通常是使用鼠籠式感應發電機進行能量的轉換，由於它缺乏一個獨立的磁場電路，所以無法產生虛功率；實際上，它會消耗虛功率，因此運用時會加上電容組而成為自激式感應發電機（Self-Excitation Induction Generator, SEIG），使其可單獨運轉；至於在併入系統時，電容組亦可補償虛功率與修正功率因素，而端電壓可由併聯的電力系統作控制。此外，在系統發生頻率事件時，系統頻率與感應發電機之電磁轉矩的關係將決定出慣性響應，因為感應發電機的定子與轉子之間有著強健的耦合，所以當系統頻率偏移時，會影響到電磁轉矩，並牽動發電機之轉子轉速的改變，使感應發電機產生慣性響應。此響應之振幅大小將決定於轉子的儲能及系統頻率變動量。



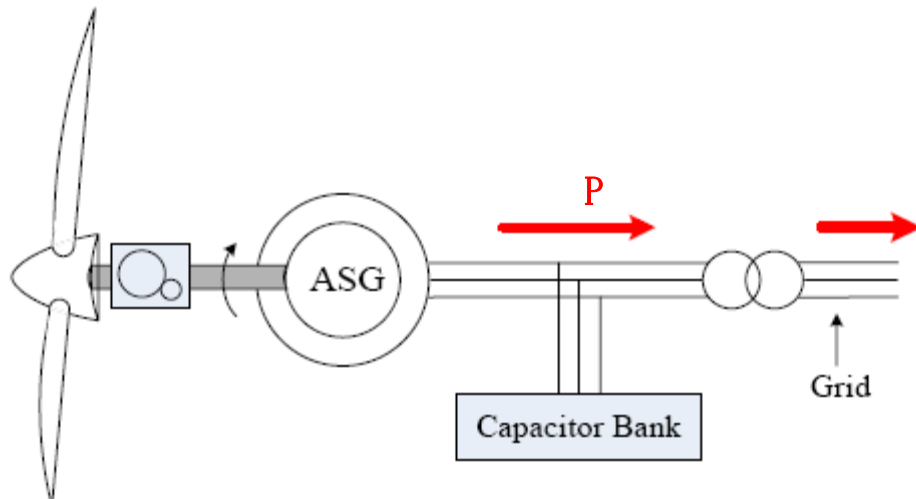


圖 5.2.4 定速型風力發電機圖

第二類為變速型風力發電機，其除了轉速範圍較寬之外，更具有較佳的電力品質與調整功率因素之能力，最典型的是以同步發電機或雙饋式感應發電機 (Doubly-Fed Induction Generator, DFIG) 為能量轉換架構之機型，分別如圖 5.2.5 與 5.2.6 所示。其中同步式風力發電機之定子透過電力電子轉換設備與電網連接，另外雙饋式感應發電機是將電力電子設備裝置於轉子側，而定子側則是直接與電網連接；因為這些電力電子與控制器設備的緣故，使其可以進行變速操作，但也因此在系統頻率事件發生時，這類風力發電機的輸出幾乎不會受到影響，相對地，也不會有慣性效應的產生，這樣的結果對系統頻率而言似乎並不是優點。近來有一些研究指出，雙饋式感應發電機之定子側依然是與電網直接連接，因此只需透過外加的輔助控制迴路或轉子側控制器參數的調整，也可使得雙饋式感應發電機提供慣性效應，而改

善風機頻控之效能。

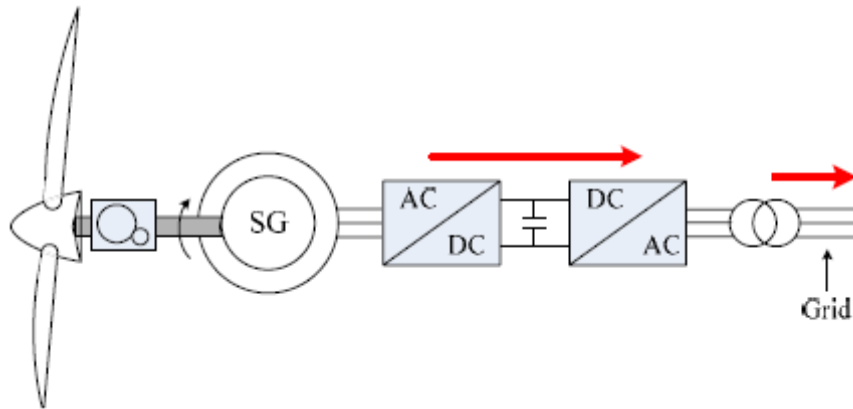


圖 5.2.5 變速型風力發電機圖-同步型風力發電機

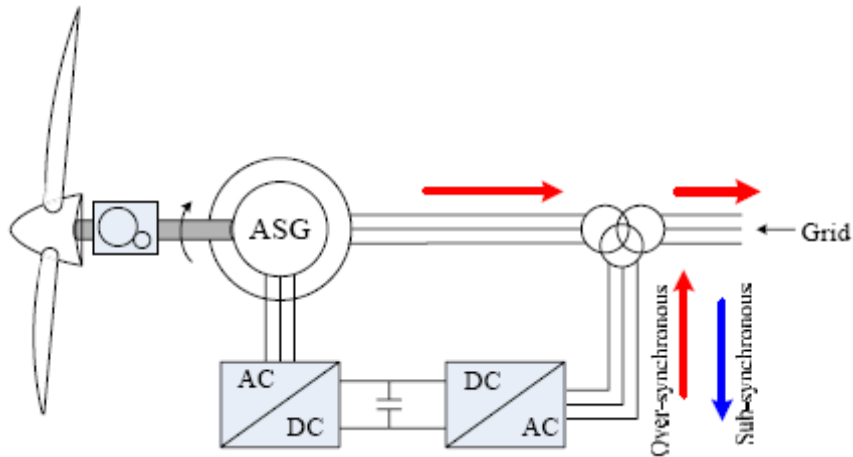


圖 5.2.6 變速型風力發電機圖-雙饋式風力發電機

由於目前風力模型各家廠商皆有不同，因此在系統檢討模擬時，常因模型無法確認而困惑。有鑑於此IEEE為統一目前市面上所看到的各類型風機有一統一模型，供所有電力業者使用，制訂了四種不同機型的風機模型。

- ◆TYPE1：鼠籠式感應發電機，定轉速，構造最簡單。
- ◆TYPE2：WOUND-ROTOR 感應發電機，有轉子電阻可調整。
- ◆TYPE3：雙饋式應發電機，可變速，轉子側有CONVERTER。
- ◆TYPE4：直接傳動同步發電機，可變速，FULL-POWER CONVERTER。

TYPE1 和TYPE2 風機會由系統吸收無電力，需加裝補償設備； TYPE3 和TYPE4 風機可控制吸收或提供無效電力。風場之無效電力補償需考量，電壓控制、功率因素控制、無效電力控制及補償設備(SC、SVC、DVAR、STATCOM 等)。

### 5-2-2 風場單機等校架構

風場之單機等效表示如上圖所示，包括三個部份：風機及電容等效表示整個風場的有效及無效功率，風機本身升壓變壓器等效及各收集饋線(COLLECTOR SYSTEM)的等效。風機等效須考量整個風場的發電量及無效電力補償量。饋線的等效，需考量線損及電壓降等問題。典型變壓器的正序阻抗值約7~%，X/R 比值約40~50。

收集饋線(collection system)的等效，通常收集饋線設計時需考量成本、線路損率失及電壓，典型設計平均損失低於2%，即使在風機滿載輸出線損也維持在3~5%。依據國際再生能源實驗室(NREL)所提出之計算方式，其等校計算方法如下式(1)所示：

$$Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^I Z_i n_i^2}{N^2} \quad (1)$$
$$B_{eq} = \sum_{i=1}^I B_i$$

其中，I 是收集系統的饋線數，N 是風機總數，以下圖5.2.7例子作計算可得表5.2.1之結果。

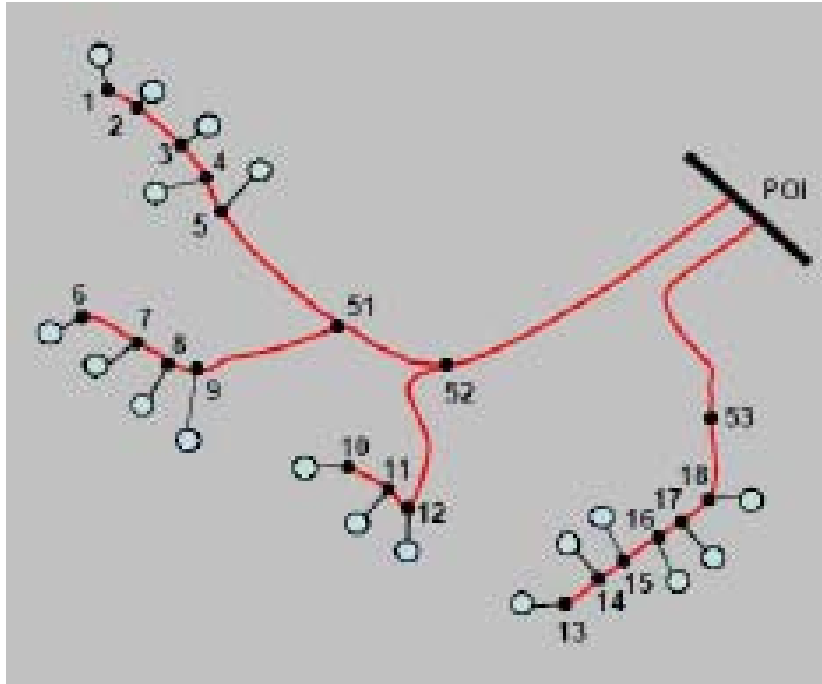


圖 5.2.7 收集系統單線圖

表 5.2.1 不同風場計算之等校阻抗圖

From	To	R	X	B	n	$Rn^2$	$Xn^2$	
1	2	0.0035	0.0263	0.0000	1	0.0035	0.0263	
2	3	0.0018	0.0254	0.0013	2	0.0071	0.1015	
3	4	0.0080	0.0226	0.0008	3	0.0722	0.2030	
4	5	0.0023	0.0193	0.0005	4	0.0364	0.3080	
5	51	0.0074	0.0248	0.0000	5	0.1861	0.6200	
5	7	0.0031	0.0171	0.0014	1	0.0031	0.0171	
7	8	0.0061	0.0143	0.0015	2	0.0244	0.0572	
8	9	0.0069	0.0107	0.0004	3	0.0617	0.0965	
9	51	0.0070	0.0033	0.0004	4	0.1113	0.0525	
10	11	0.0078	0.0371	0.0003	1	0.0078	0.0371	
11	12	0.0001	0.0005	0.0004	2	0.0005	0.0021	
12	52	0.0083	0.0259	0.0004	3	0.0747	0.2330	
13	14	0.0049	0.0349	0.0004	1	0.0049	0.0349	
14	15	0.0041	0.0483	0.0008	2	0.0163	0.1931	
15	16	0.0059	0.0116	0.0002	3	0.0528	0.1040	
16	17	0.0079	0.0002	0.0003	4	0.1262	0.0029	
17	18	0.0089	0.0146	0.0007	5	0.2224	0.3656	
18	53	0.0018	0.0342	0.0008	6	0.0664	1.2302	
51	52	0.0074	0.0034	0.0011	9	0.5957	0.2776	
52	POI	0.0049	0.0456	0.0002	12	0.7102	6.5633	
53	POI	0.0003	0.0338	0.0012	6	0.0125	1.2177	
				0.0132			2.3962	11.7438
						0.0074	0.0362	

Sum =  $B_{EQ}$  → 0.0132

$R_{EQ}$  → 0.0074

$X_{EQ}$  → 0.0362

風機及風機升壓變壓器等效，可由式(2)計算：

$$Z_{Teq} = Z_T \quad (2)$$

$$MVA_{Teq} = N \times MVA_J$$

其中， $Z_T$  及  $MVA_T$  表示單部風機之數值， $N$  是風機總數， $Z_{TEQ}$  及  $MVA_{TEQ}$  表示等效後之數值。風機之發電量等效需視檢討的目的而定，除考量整個風場滿載發電之情形外，亦可視各風場不同季節之風況，其風場之發電量亦有不同。如風機TYPE1 和TYPE2 為感應發電機，在風機出力為50%~100%之間時，沒有補償之功因約0.85~0.9，需加裝補償設備至滿足系統要求；TYPE3 和TYPE4 風機可控制吸收或提供無效電力，並參與併接點電壓的控制，如當功因超出 $\pm 0.95$  時風機即自動調整無效電力補償。

### 5-2-3 雙饋式風力發電機簡介

雙饋式風力發電機主要是由風力機 (Wind Turbine) 與雙饋式發電機所構成，其中風力機的架構幾乎大同小異，葉片大多為三葉式，通常不採用偶數葉片的原因在於，當某一葉片轉到最頂端時，與其對應之葉片會與塔架重疊，造成風力機受力不平衡，而增加故障率。且大多數風力機會具有可變旋翼控制 (Pitch Control)，其功能在於增加低風速期間之風能擷取量、而高風速期間降低風能擷取量、即時煞車而不傷害風力機各機構與降低運轉噪音等，當然在成本與故障率方面相對地會比固定旋翼來的高。另外，雙饋式感應發電機架構如圖

5.2.6所示，其可利用繞線式感應發電機改製，最大特色在於將繞線式感應發電機之轉子側加入電力電子轉換控制設備，以達到速度可變與固定頻率之目的。而總輸出功率為定子側與轉子側功率之總和。其運轉模式可分為三種：

1. 次同步運轉：此時機械能較低，轉子轉速以低於同步轉速運轉，為維持固定範圍內的轉差，轉子側將透過電力電子轉換控制設備，吸收電網能量與機械能合併，使定子側得以正常輸出電力至電網。
2. 同步運轉：轉子轉速以同步轉速運轉，轉子側此時負責激磁，而定子側輸出電力至電網。
3. 超同步運轉：此時機械能較高，轉子轉速以高於同步轉速運轉，除了定子側可輸出電力至電網外，轉子側也將透過電力電子轉換控制設備，提供部份電力至電網，而轉子側輸出的最大量約可占總輸出電力的20%~30%。

#### (一)發電機模型建構概念

風力發電機最主要之功能是在進行風能與電能的轉換，若以能量轉換的觀點來建立雙饋式風力發電機模型時，可將其分為風力機、齒輪箱（Gearbox）與雙饋式感應發電機等三大部份，其中風力機主要之功能是将風能轉換成旋轉的機械能、而齒輪箱是負責風力機與發電機之間轉子轉速的匹配、最後雙饋式感應發電

機則是將機械能轉換成電能，所以連接這三者之間的主要係數即為功率與轉子轉速，其能量轉換示意圖，如圖5.2.8所示。首先由風的流動產生風能 $P_w$ ，進入風力機轉換成旋轉的機械能 $P_t$ 與旋轉角速度 $\omega_t$ ，接著透過齒輪箱改變轉子轉速，進而產生雙饋式感應發電機的輸入機械功率 $P_m$ 與轉子角速度 $\omega_m$ ，最後再經由雙饋式感應發電機產生送至電網的電能 $P_{grid}$ 與角頻率 $\omega_s$ ，藉由此機制即可將風能轉換成電能。當然目前風力發電機中，多極式同步發電機與多極式永磁同步發電機等兩種可不需使用齒輪箱，而風力機與發電機之轉子轉速即可直接耦合運轉，這是因為此類發電機設計的極數較多，所以轉子轉速不需很高，發電機即可正常運作，但基本上風力發電機的能量轉換流程大多都相同。

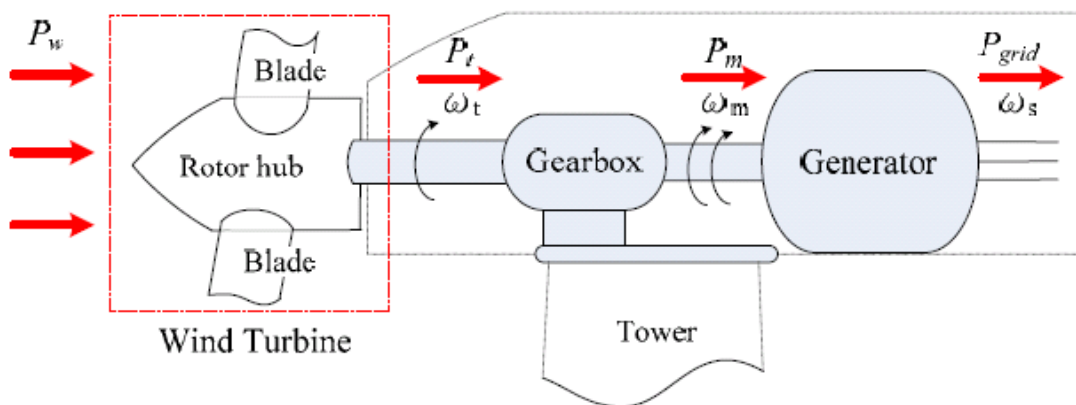


圖 5.2.8 風機能量轉換示意圖

## (二)風機功率方程式

依照風力機之能量轉換流程，如圖5.2.8所示，由此可知風力機主要是利用空氣的流動推動其葉片，而產生風力機的轉動能

量，在空氣動力學中有提到，由風推動葉片之動能方程式 $P_w$ ，如公式(3)所示。

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (3)$$
$$A = \pi r^2$$

其中  $\rho$  : 空氣密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$A$  : 風力機葉片之旋轉面積 ( $\text{m}^2$ )

$V$  : 迎面風速 ( $\text{m}/\text{s}$ )

$r$  : 風力機葉片之旋轉半徑 ( $\text{m}$ )

由於公式(3)為風力推動葉片之動能方程式，但考量實際效益風能並無法完全轉換為機械能，故機械能部分需考量風能轉換係數 $C_p(\theta, \lambda)$ ，故由(3)式修正機械能如(4)式所示。

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p(\theta, \lambda) \quad (4)$$

其中 $C_p(\theta, \lambda)$ 效能係數代表著風力機將風能轉換成機械能的轉換效率，其 $\lambda$  (Tip Speed Ratio) 為尖端速度比和 $\theta$ 為葉片旋角的函數。

由於齒輪箱主要功用是在進行轉速的變換，所以假設齒輪箱消耗功率極小可忽略情況下，輸入功率與輸出功率一樣( $P_t = P_m$ )。發電機電磁轉速部分，將與齒輪箱齒輪比及發電機極數有關，因此發電機電磁轉速關係如(5)所示。



$$\omega_r = \frac{pole}{2} \omega_m = \frac{pole}{2} G \omega_t \quad (5)$$

其中  $G$  : 齒輪轉換比、 $\omega_t$  : 風力機轉速

$\omega_m$  : 發電機機械轉速、 $\omega_r$  : 發電機電磁轉速

### 5-2-4 PSS/E 風機 IPLAN 模型簡介

目前工業界主要針對風機模型的模擬，概可區分為兩類。一個是單相等效模型(即僅考量正序模擬)，另一個是三相模型。例如：單相模型中有GE的PSLF/PSDS及PTI的PSS/E軟體程式，其為一簡化近似且可接受的模型。另三相模型為PSCAD、EMTP及MATLAB/SIMULINK程式，為較詳細之模擬。

目前公司所採用之電力系統模擬軟體，係採用PSS/E，目前最新版本已更新至32版。目前32版中針對風機部分共提供四種風力機組型式(Type1~Type4)，其已標準內建於軟體中。不像以往29版~31版，需以IPLAN程式將不同風機讀入PSS/E軟體中執行。故往後只要欲模擬風機對系統影響，僅需參考該風機屬於何種型式(TYPE)，即可用PSS/E所內建好的模型使用。也由與PSS/E所提供模型為標準典型模型，故於短時間模擬時，其動態反應應與實際風機模型差異不大，但若用於長時間模擬，則其恐較不準確。以IPLAN程式讀入之風機模型以GE 3.6之風機為例，其包括下列8大模型，風機之控制系統方塊圖，如圖5.2.9所示。

其中

**DFIGP**：雙繞組感應發電機模型(DOUBLY-FED INDUCTION GENERATOR MODEL)

**CGECN**：轉子控制模型(ACTIVE ROTOR CONTROL

MODEL)  
**MODELTGPITCH**：葉片旋角控制模型(PITCH ANGLE CONTROL MODEL)

**TWIND**：風速模型(WIND GUSTS AND RAMPS)

**TSHAFT**：雙軸模型(2-MASS SHAFT MODEL TO REPRESENT THE EFFECTS OF THE ROTOR/HUB CONNECTED VIA A 'FLEXIBLE' SHAFT TO THE GENERATOR)

**GEAERO**：空氣動力能量轉換(AERODYNAMIC MODEL WHICH CALCULATES THE AERODYNAMIC TORQUE APPLIED TO THE ROTOR TAKING INTO ACCOUNT WIND SPEED)

**FRQTRP**：頻率上下限之電驛設定(UNDER/OVER FREQUENCY GENERATOR TRIPPING RELAY)

**VTGTRP**：電壓上下限之電驛設定(UNDER/OVER VOLTAGE GENERATOR TRIPPING RELAY)

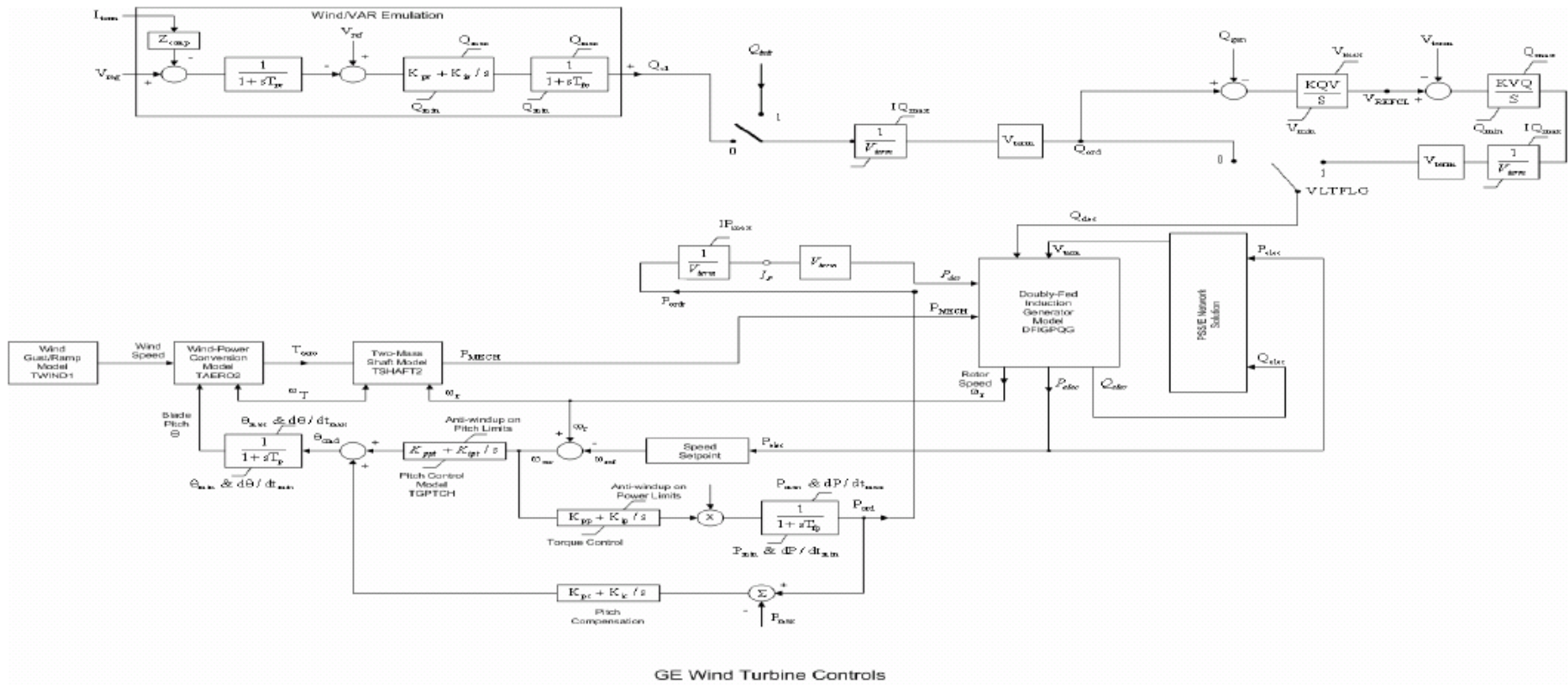


圖 5.2.9 GE 3.6MW 控制方塊圖

## 5-2-5 PSS/E 內建模型簡介

### (一)Type1 風機標準模型

此模型包括三個部分，發電機模型(Generator model, WT1G)、風機模型(Wind turbine model, WT12T)及調速模型(Pseudo governor model, WT12A)。其控制方塊圖如圖5.2.10所示。

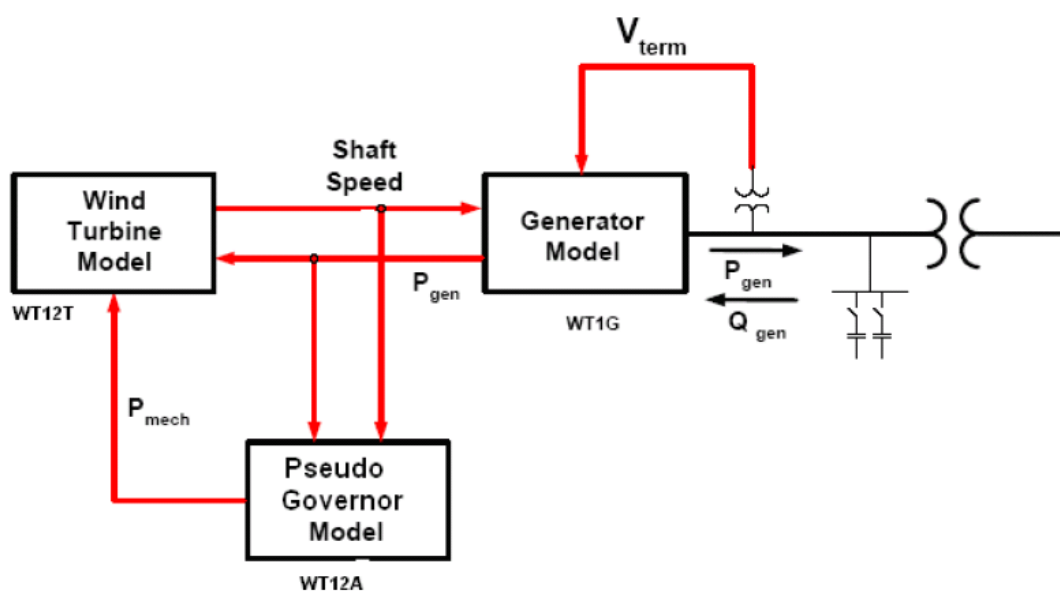


圖 5.2.10 Type1 風機之控制方塊圖

其中類似調速模型(WT12A)主要功能為模擬空氣動力對機械轉矩的關係。經由此模型可獲得模擬空氣動力的特性，及風機葉片旋角(pitch control)控制的模擬。其相關輸入與輸出訊號如下，控制圖如圖5.2.11：

1. 輸入：發電機轉速、發電機端輸出功率
2. 輸出：轉子葉片之輸出功率

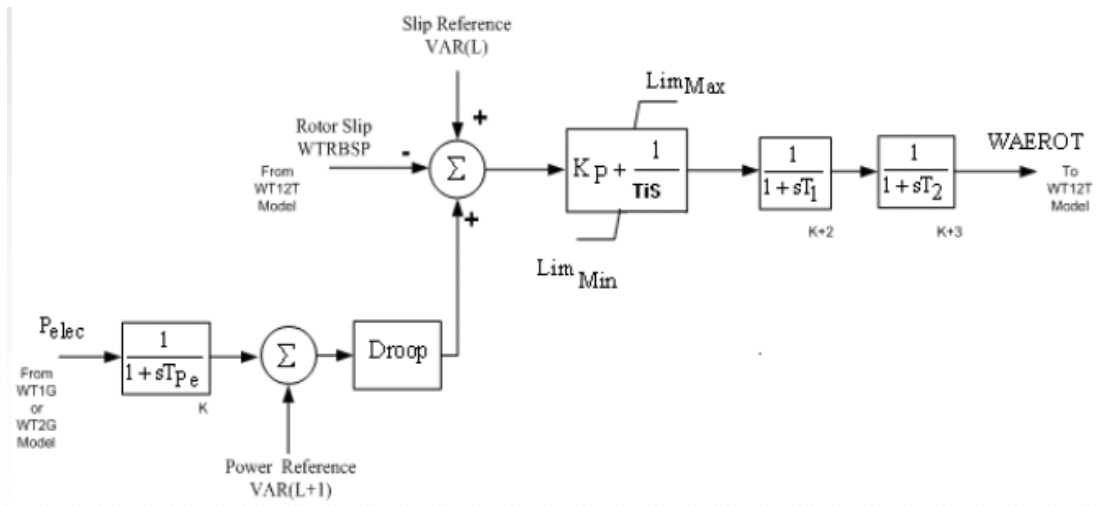


圖 5. 2. 11 Type1 之調速模型方塊圖

## (二) Type2 風機標準模型

此模型包括四個部分，其中三個與Type1型式發電機模型一樣，皆有發電機模型(Generator model, WT1G)、風機模型(Wind turbine model, WT12T)及調速模型(Pseudo governor model, WT12A)等三種模型。另多出的模型為電阻插入控制模型(Rotor resistance control model, WT2E)，其控制方塊圖如圖5. 2. 12所示。

其中電阻插入控制模型(WT2E)主要藉由於感應發電機轉子側插入一可變電阻，控制發電機的輸出功率。其相關輸入與輸出訊號如下，控制圖如圖5. 2. 13：

1. 輸入：發電機轉速、發電機端輸出功率
2. 輸出：調整加入轉子側可變電阻阻抗

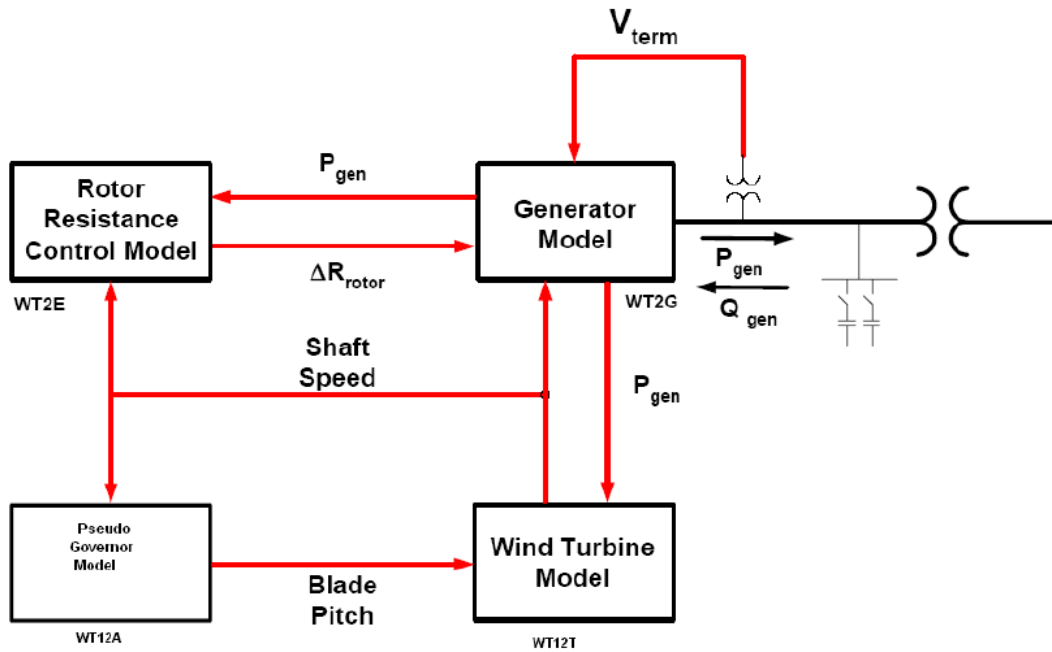


圖 5. 2. 12 Type2 風機之控制方塊圖

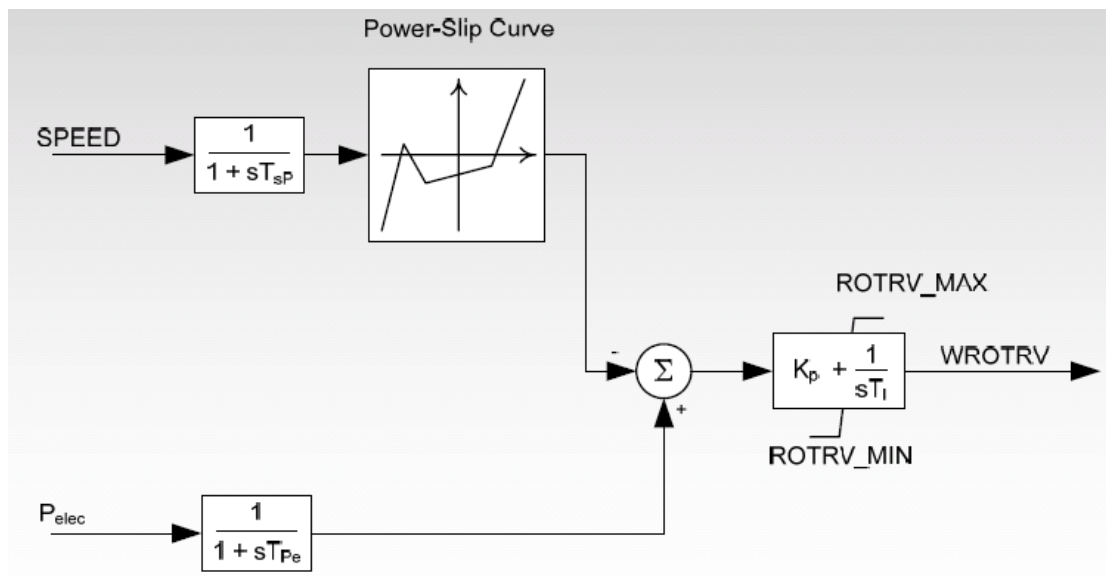


圖 5. 2. 13 Type2 之電阻插入控制模型控制方塊圖

### (三)Type3 風機標準模型

由於Type3風力發電機型式與傳統Type1或Type2有所不同，故整體架構此模型亦有所不同。其控制方塊共包括四個部分，發電機

變流器模型(Generator/Converter model)、風機模型(Wind turbine model)及旋角控制模型(Pitch control model)、變流器控制模型(Converter control model)等四種模型。其控制方塊圖如圖5.2.14所示。

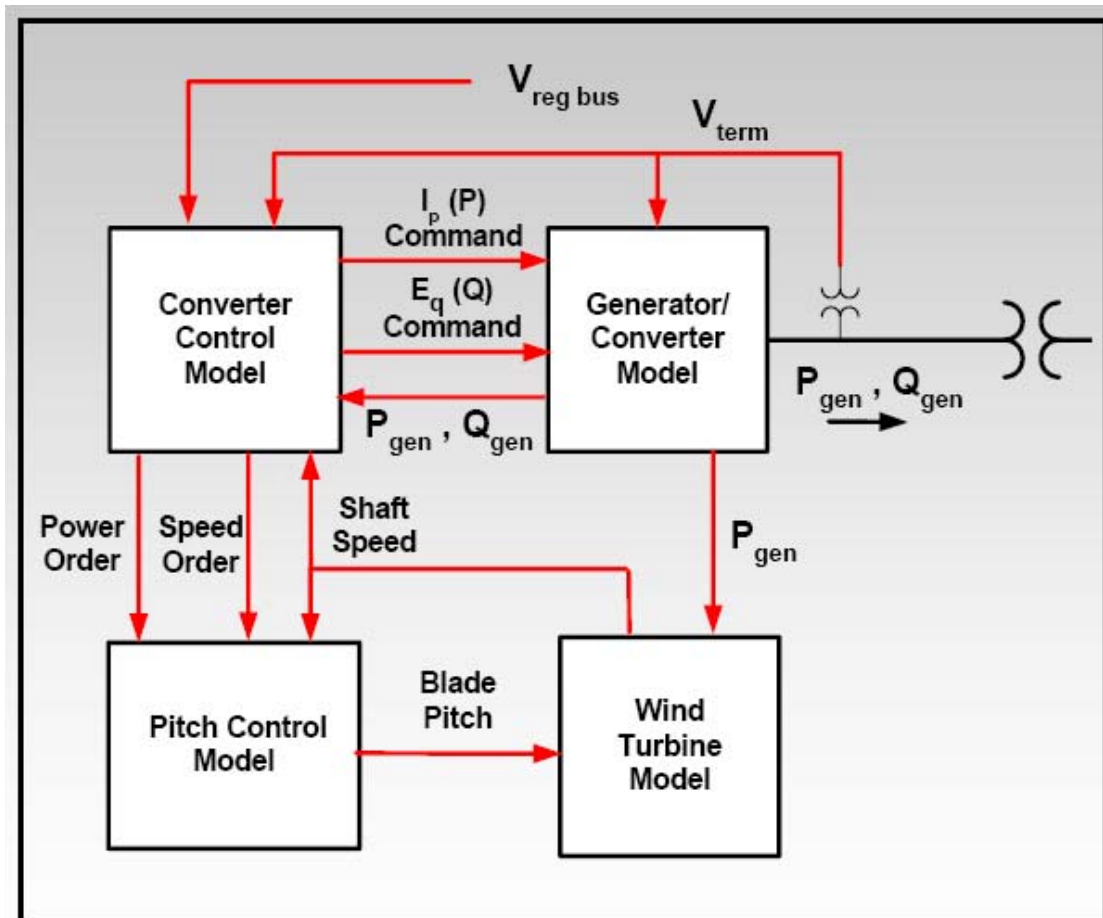


圖 5.2.14 Type3 風機之控制方塊圖

### 1. 風機模型(Wind turbine model)

由公式(4)可知，風機輸出功率與風速成3次方關係，故在Wind turbine model模型中，主要為控制風機能再不同風能大小下，控制風機所擷取的功率( $P_t$ )為最大，亦為最大功率追蹤。相關控制方塊如圖5.2.15。

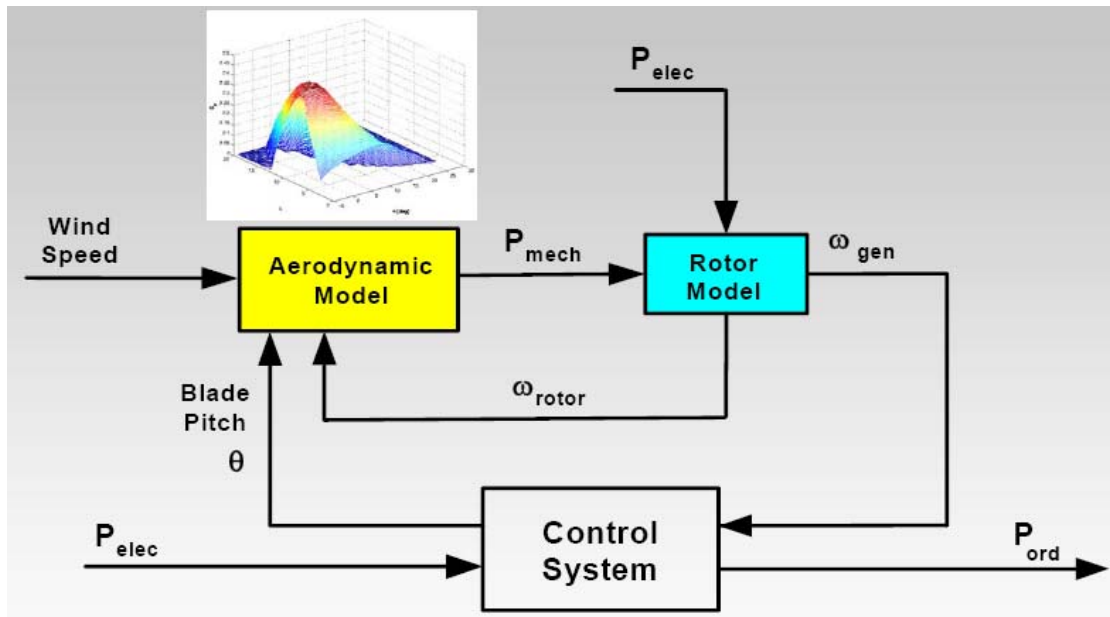


圖 5. 2. 15 Type3 之風機模型控制方塊圖

## 2. 空氣動力模型(Aerodynamic model)

風機模型中另有一空氣動力模型，在PSS/E中假設在模擬動態期間之風力速度假設為固定，通常為30秒內。故若模擬Type3的風力的變化，則需遵守下列原則：

- (1)風機機械輸出功率( $P_{mech}$ )線性於旋角控制( $\theta$ )的變化量，通常 $0 < \theta < 30$ 度。
- (2)旋角控制( $\theta$ )的變化量，線性於風速 $V_w$ ( $V_w > \text{額定速度}$ )。

圖5. 2. 16及圖5. 2. 17即為 $P_{mech}$ 與 $\theta$ 對風速的關係圖。由圖可看出當風速上升時 $P_{mech}$ 與 $\theta$ 與風速成線性關係成長，亦即當風速增加時，葉片旋角 $\theta$ 將隨之增加，以擷取更多風能，隨後風能增加後，則轉為機械能 $P_{mech}$ 亦增加，以使風機在次同步運轉時，能獲得最大輸出功率。



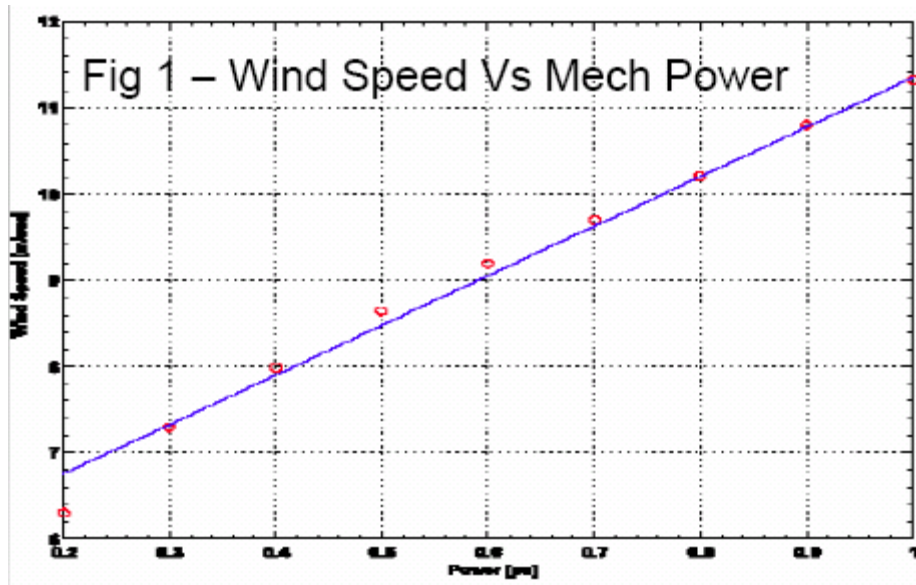


圖 5.2.16 風速與機械功率關係圖

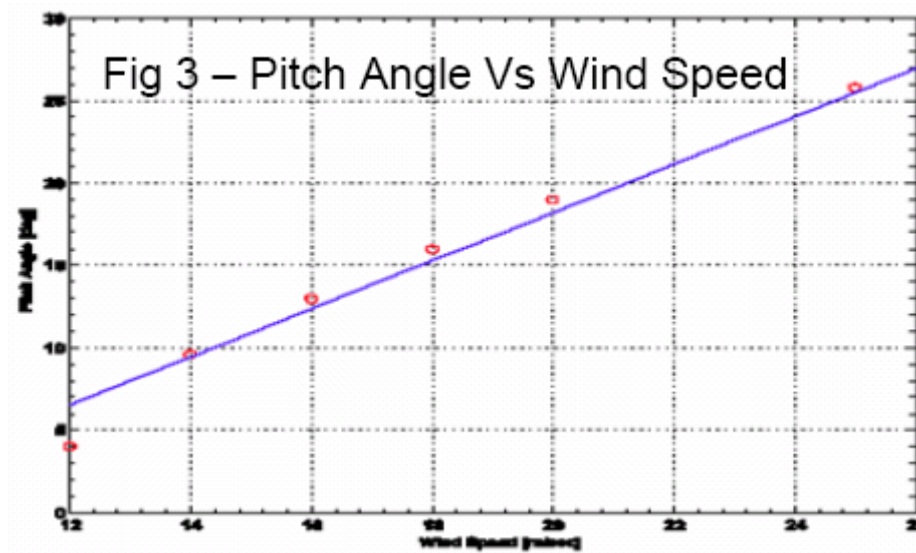


圖 5.2.17 風速與旋角關係圖

### 3. 旋角控制模型(Pitch control model)

旋角控制(pitch control)主要目的在於藉由風機模型(wind turbine model)的輸入速度 $\omega$ 訊號，及變流器控制模型(Converter control model)的輸入P訊號，控制風機旋翼之角度，以達最佳功率控制目的。相關控制圖如圖5.2.18所示。

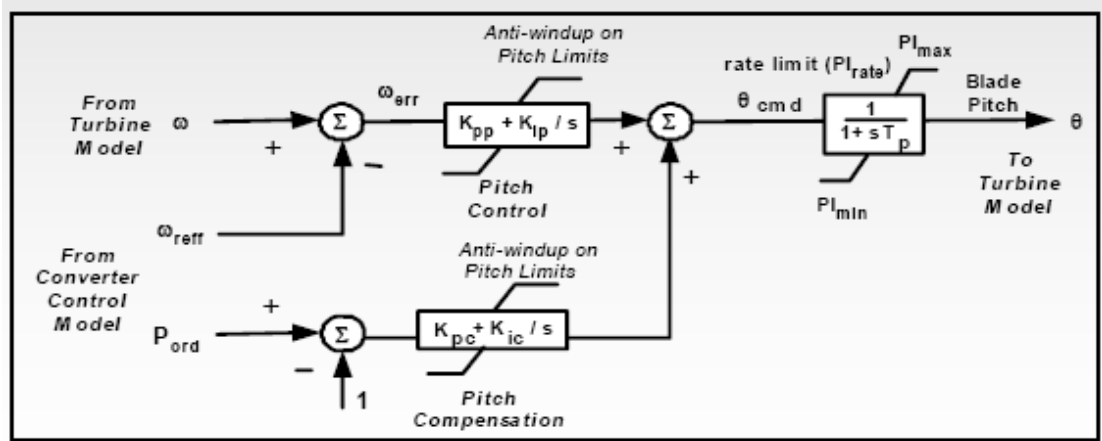


圖 5.2.18 旋角控制模型控制方塊圖

#### 4. 發電機變流器模型(Generator/Converter model)

此控制方塊主要目的在於控制風力機組輸出與電網間之相互關係，亦即變流器部分為發電機定子側之變流器，主要控制風機加入系統之端電壓控制或功因控制，其控制圖如圖5.2.19所示。

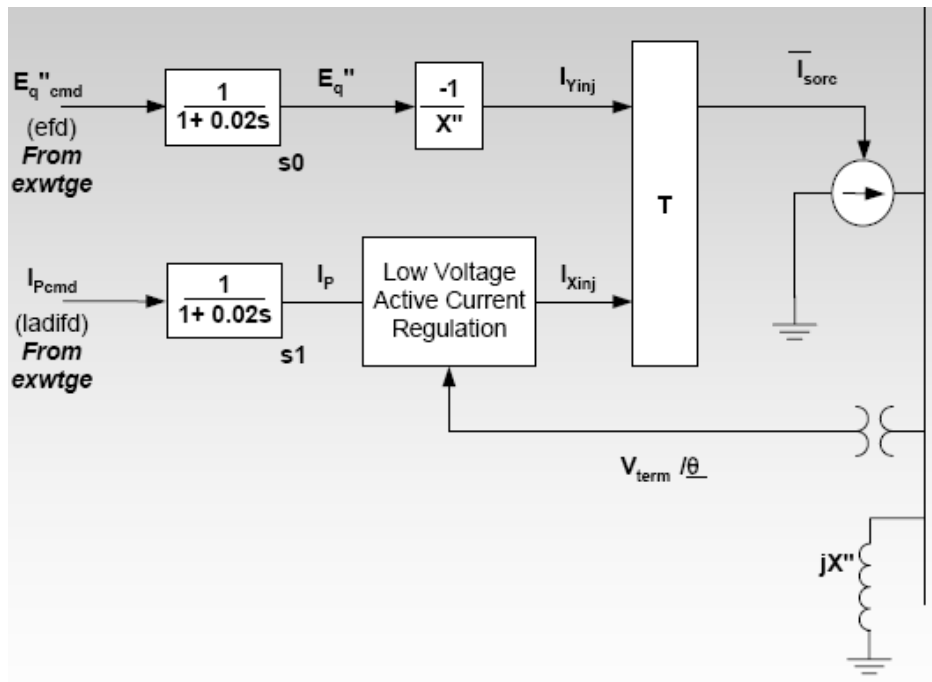


圖 5.2.18 旋角控制模型控制方塊圖

## 5. PSS/E Type3風機模擬結果

圖5. 2. 19為PSS/E Type3機組接於大系統下與實際廠商所提供之Type3風機模型(GE3. 6MW)之模擬結果比較，由圖之模擬結果可知，其PSS/E之模擬結果與實際風機模型模擬結果相近，故可知PSS/E所提供之標準風機模型，應可採用。

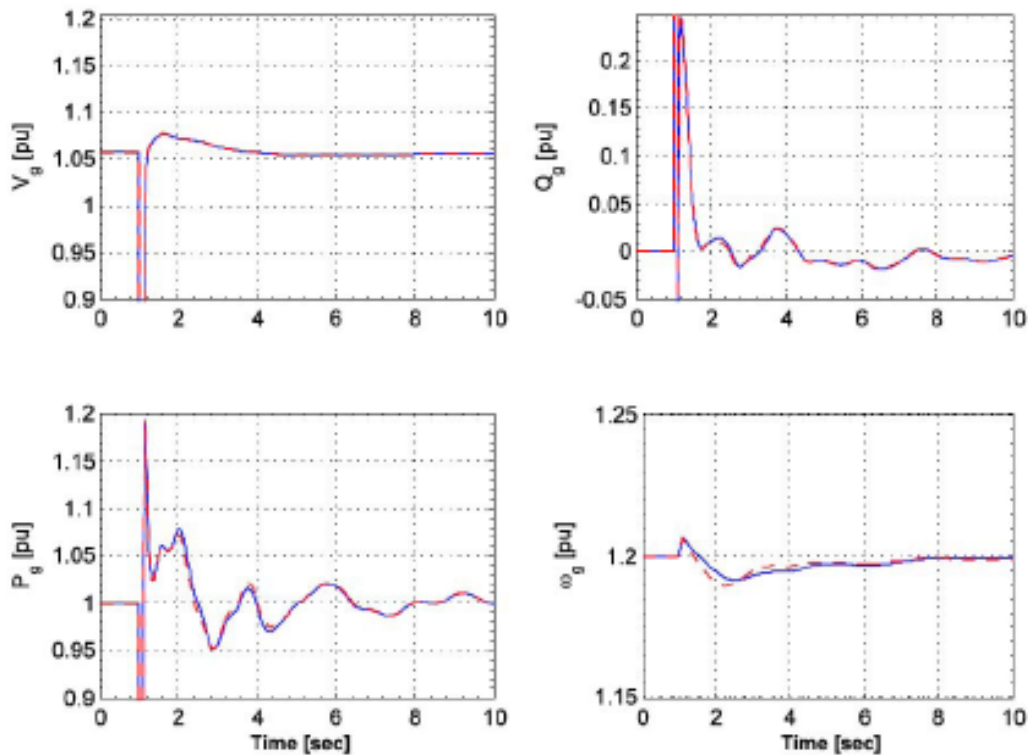


圖 5. 2. 19 Type3 風機於大型統模擬結果

### (四)Type4 風機標準模型

由於Type4之風力發電機架構又與Type1~Type3型式不同，主要差異在於發電機輸出電力，完全經由變流器(Full Converter)將電力轉換至系統端。其主要包括兩部分，發電機/變流器控制模式(Generator/Converter mode, WT4G)及電氣控制模式(electric

control mode, WT4E)兩種，其架構突如圖5.2.20所示。

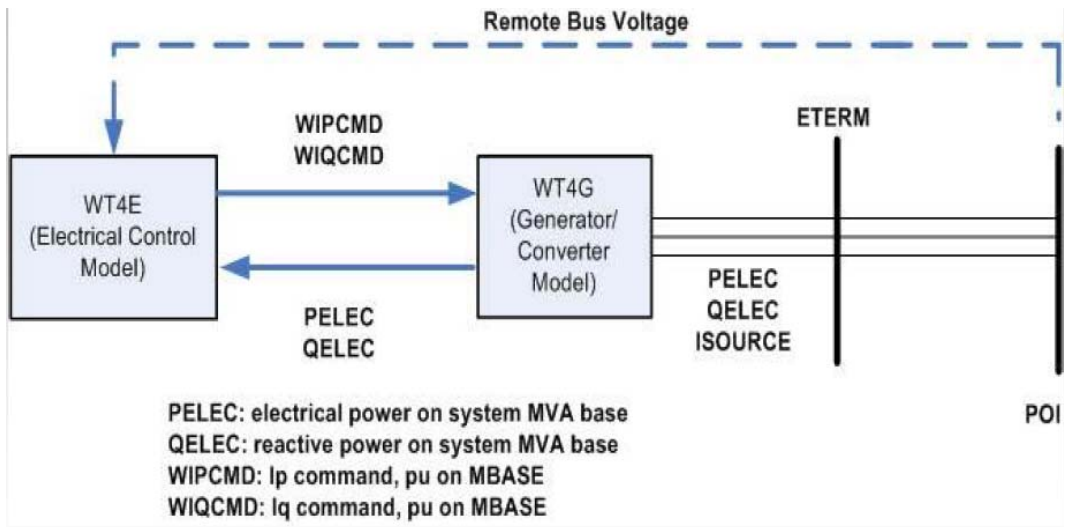


圖 5.2.20 Type4 風機之控制方塊圖

### 1. 發電機/變流器模型(Generator/Converter model)

計算加入系統之電流(I)，主要受從電氣控制模式之實功與虛功輸入控制訊號所控制輸出電流的大小。另併接於系統端電壓控制部分，亦主要受輸入控制訊號實功與虛功而控制電壓大小。其相關WT4G控制方塊模型如圖5.2.21所示。

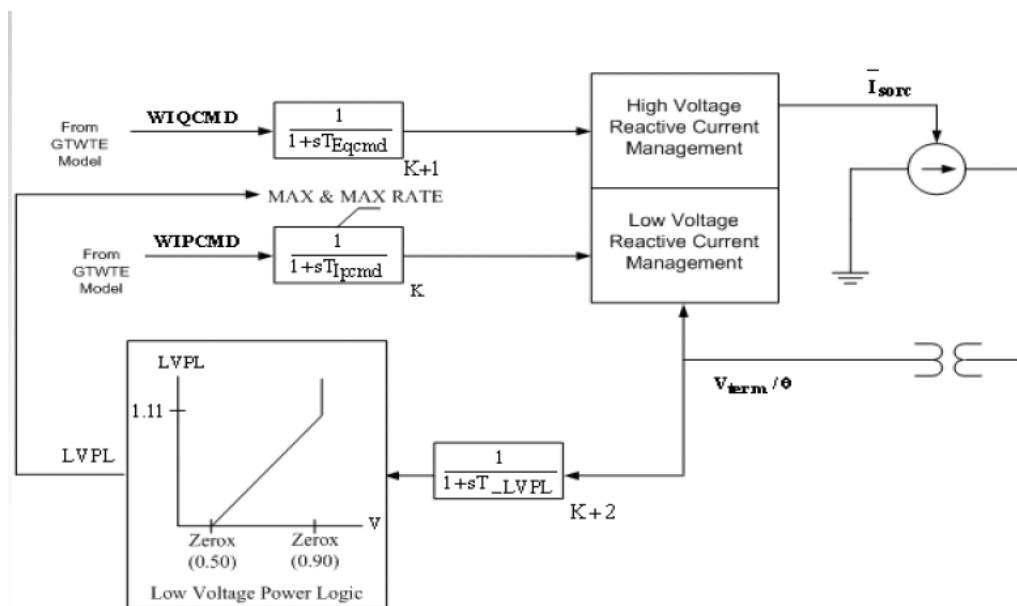


圖 5.2.21 Type4 之發電機、變流器模型控制方塊圖

## 2. 電氣控制模型(Electric control model)

其主要控制實功及虛功兩部分控制設計。虛功部分的計算命令主要可由(1)遠端電壓控制(2)功率因素控制(3)虛功控制等3項輸入命令決定。實功部分由於僅需控制發電機輸出電力可轉移至電力系統中，因此只要兼顧好發電機、變流器及輸出端之電力平衡關係，即可。其電氣控制模型如圖5.2.22所示。

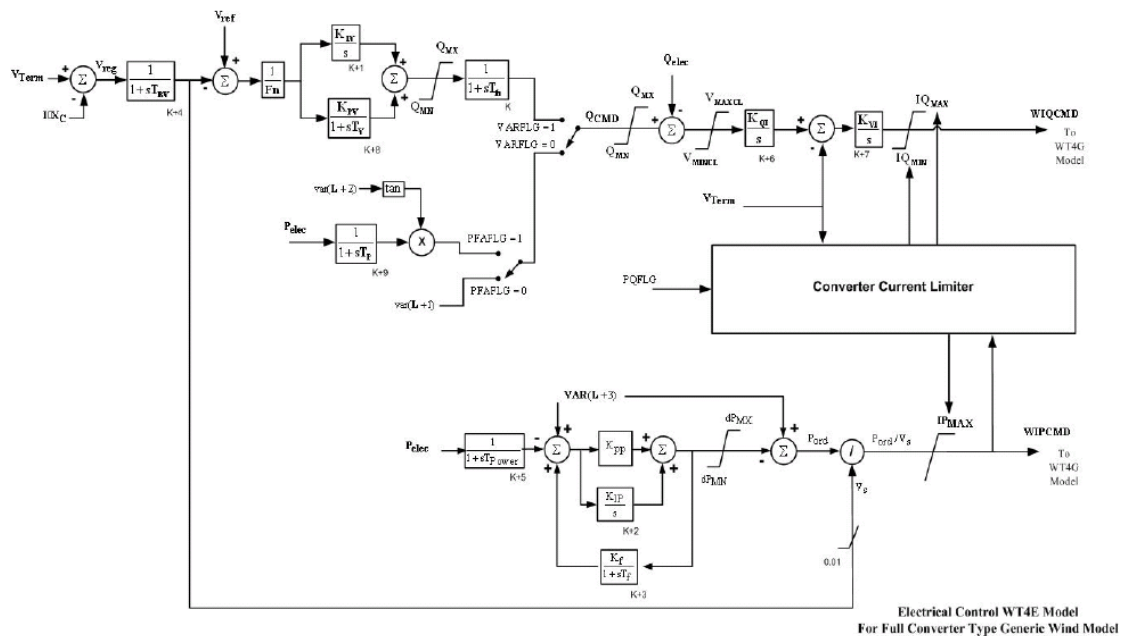


圖 5.2.21 Type4 之發電機、變流器模型控制方塊圖

### (五) 結語

由於各模組之方塊圖及所需參數於本報告中並無詳細說明，但使用者可進一步參考PSS/E 32 版使用手冊，其手冊中將有詳細說明各模型之控制方塊功能與參數建議值。最後，總結上述四種風力發電機模型，其各所採用控制模型概述如表5.2.2。

表 5.2.2 不同風機所採用模型名稱

Generic model	WT1	WT2	WT3	WT4
Generator	WT1G	WT2G	WT3G	WT4G
El. Controller		WT2E	WT3E	WT4E
Turbine/shaft	WT12T	WT12T	WT3T	
Pitch control			WT3P	
Pseudo Governor: aerodynamics	WT12A	WT12A		

### 5-2-6 智慧型電網概述

現在的電力系統基本上架構在於一個大而集中的發電系統，較難於隨負載變化而適時、適當調整。因此，配合數位時代的來臨，需要有更可靠的電力供應。智慧型電網(Smart Grid)係指透過自動化的電力監控系統與各種保護設備達到監控及維護保養的工作，另再由穩定的資訊傳遞系統進行整合及遠端控制，確保供電品質且節省人力及成本支出。所以為讓電力公司與用戶的關係經由智慧型電網(Smart Grid)更形親密互動，電力公司可以做到自動監測電網的運轉情形、遠距偵測設備損害情形與派遣維修組員、更佳的需電負載預測與供電營運管理；用戶則可選購最便宜時段電力獲利、生產自有電力回售電網、選擇潔淨能源促進減碳。

因此智慧型電網包含電力來源、能源儲存裝置及負載，相對於完整系統電網路，智慧型電網可以達到改善區域可靠性和提高效率，還有提供不間斷電源供應的功能。這些特點使智慧型電網為基礎的電力

系統，特別適合應用需要高度可靠的電力供應。微電網應用可以避免傳統電力系統配置單點故障，提升電網的可靠性及自然災害期間與之後緊急情況下運轉可用性。

### (一)智慧型電網演變趨勢

由於以往石化能源並非很昂貴，且溫室暖化效應亦非主要關注議題，因此過往世界上電力系統的發展，主要仍以架構在傳統能源上，單方向的配合負載端用電需求，投資相關電源開發發展，以滿足用電需求，並討論電網可靠度的維持、裕度增加等相關系統研究課題。

然受限外在環境影響，輸變電建設亦已無法如同以往順利建設完成，除造成電網硬體設備投資短缺外，其以往投資設備之使用年限亦已超過 40 年之久，不僅輸電效率變差，故障率亦增加，對系統供電可靠度及供電品質隱藏了不穩定潛在因素。此外追求高效率發電，減少碳排放的議題亦已逐漸成為電力業者重視目標之一。

另一項造成電業衝擊的因素為氣候環境的變遷，由於全球暖化現象(電力業者對造成全球暖化因素約佔25%)及石化燃料逐年短缺價格飆漲，電力業者需另覓改善之道，以因應未來電業發展趨勢。因此電業在未來發展上，將逐漸面對環境、市場及電力安

全等三方面議題，如圖5.2.22所示。

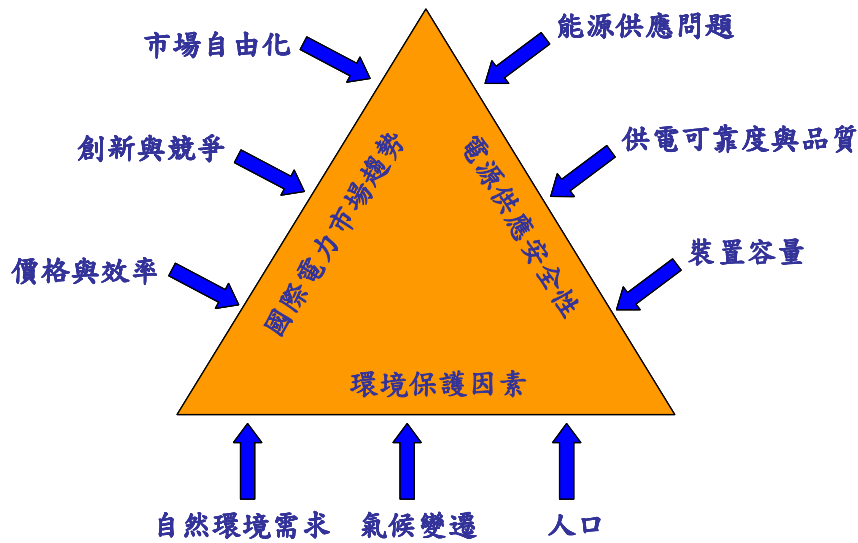


圖 5.2.22 電業發展遭遇問題

如何同時兼顧三方面議題，尋找新的電業發展平衡點，已成為未來發展主要課題。並採取下列幾項因應措施：

- 1.針對環境改善部分：鼓勵再生能源及分散式電源開發，除可減少依賴傳統石化能源需求外，亦可減少溫室效應二氧化碳排放，對環境改善有其助益。
- 2.針對能源使用效率提昇部分：提昇能源使用效率部分，可分別針對用戶端及電源端進行考量。用戶端部分，可進行用電需求面管理，實施需量管制或時間電價等策略，以有效降低全系統尖峰用電需求。電源端部分，可針對既有機組部分進行發電效率提昇及相關設備改善工程；新設機組部分，即採用高效率、低污染排放機組。如此同時用電並提昇既設機組發電效率，以降低全系統電力能源消耗需求。



3. 針對電網安全提昇部分：為增加電網可靠度即使用率，針對電網部分進行即時監測管理，可有效降低系統全黑 (Blackouts) 機率，與增加既有輸電設備使用率。

## (二) 智慧型電網優點

1. 智慧型電網具有遠端監控、即時資料傳輸及維持最佳化性能。
2. 系統設備之各項數值，透過資料傳輸進而整合，做設備故障前的預防措施。並且同時紀錄系統與設備的資訊，便利於事故的研判。
3. 智慧型電網結合電驛與保護系統，於故障時，能有效率的將故障排除，減少因故障所造成的破壞，確保供電的品質。
4. 智慧型電網整合整個電力系統組織(包含發電、輸電、配電及用戶端等)，便於電力系統相關人員管理及監控。
5. 整合相關分散性電源(如蓄電池系統、風力發電、太陽能板等)，便於作業人員管理，同時節省人力。
6. 企業的發展建構在可靠且易於管理的基礎設施上，因此智慧型電網能拓展更多的商業機會。
7. 智慧型電網能藉由電力狀態監視來做電力調度，如尖峰離峰時，超載及卸載的自動控制，以及空調與照明的管控等，進而節省能源的消耗。

### (三)智慧型電網特徵

智慧型電網受重視的關鍵特徵為電力電子的應用及控制技術，及允許智慧型電網以一個半獨立(SEMI AUTONOMOUS)的電力系統輸送電力。微電網電力電子關鍵的特徵如下：

#### 1. 新發電技術與低的環境衝擊相互密合的技術

- 它是能夠支援各種不同複雜電網的能源技術。
- 它將使當地完全整合分散電源例如燃料電池、光電、風力、熱和電混合系統或者其他新電源傳統集中式發電模式。

#### 2. 建築和通訊標準

- 現有系統建築架構和設備，均需具有互控性(INTER OPERABILITY)和自我治療(SELF-HEALING)的能力，避免系統事故擴大，達到穩定供電目的。

#### 3. 先進技術和操作的概念

- 併聯新技術、先進變電所和設備、智慧型電力設備(IED)及進步的系統操作概念(如獨立運轉，微電網等)。

#### 4. 監控和負載管理

- 結合通信、分析和控制技術之故障的檢測、預測和電力品質的監控。
- 工業、商業和民生用電之需求管理與監控。

## 5. 模型與模擬

- 系統偶發或大干擾事件後系統之操作規劃包括與不同數據庫、系統重組、復電與電網運行最優化的整合等。

### (四)結語

國際能源環境趨勢與我國的永續能源策略，建立智慧電網係我國創建低碳經濟新格局策略目標。因此參照國內98年4月所召開之「全國能源會議」內容，亦針對提高能源利用效率、發展潔淨能源及確保能源供應穩定等不同議題提出相關指標說明。因此未來朝向智慧型電網發展已是世界所趨，其相關重點如下：

1. 當今的老化電力傳輸系統，將不能滿足資訊時代的電力需要。
2. 微電網將是智慧型電網組成的一部分。
3. 微電網的可能的挑戰需要被為收集，並獲得充份的機會全力處理。
4. 電力系有關電力電子介面、公共通信和監控系統做全面、先進及有深度的研究與發展是需要。
5. 使用當地自然分散型電源有效地減少使對環境的衝擊。

## 六、出國感想與心得

本次出返國行程橫跨美國及加拿大兩地。其中在美國部分，主要至德州能源研究中心 ESRC 學習德州電網 ERCOT 規劃西部大型風場最佳輸電線規劃及瞭解 ERCOT 電力自由市場之實習課程。實習期間感謝 ESRC 機構李偉仁主任的安排及調度處蔡金助同學的協助，使之於德州實習過程中順利解決不少日常生活上之事情。

ESRC 自 1968 年成立至今已逾 30 年，為 IEEE 所調查認定前十名之電力系統教育中心，故至 ESRC 參與 ESRC 機構之訓練除可獲得許多先進電力知識外，亦可結識許多從事電力研究的專家學者。其中在輸電線路規劃部分，藉由此次 ERCOT 配合德州西北部風力擴展輸電線擴建過程與決策中，學習到不同風力開發狀況的情境分析，及各情境所研擬之多種可能技術擴充方案，並由近而遠的規劃思維，挑選其中相關聯或可連結之方案作為最佳方案。未來本公司長期輸變電架構之擬定亦可仿照此模式，並可依系統負載輕重不同標準，及不同電源開發方案的組合方式，進行各情境之分析及各種可能技術擴展方案(可包含擴充 345KV 輸電線、新建 500KV 或 765KV 輸電線及新建 HVDC 線路等)。最後，在依各情境中，選擇較佳方案，再從其中由近而遠選定有關聯工程進行編列計畫實行。

加拿大部分，主要參加 2009 年 IEEE PES 年會，IEEE PES

年會為每年舉行之定期會議，全世界產官學界均會派人參加，在開會期間所發表的專題講座、課程或論文，有電力公司、工業界或廠家的經驗累積成果非常實用，有的是學校專業機構、研究單位或顧問公司研究後的創新技術，值得本公司各相關單位持續派員參加學習。而此次會議中，以 Smart Grid 及 CO2 減碳議題最為熱門，參與會議人員最多，可見目前世界研究趨勢仍著重在綠色能源的應用及電網整合上。