

出國報告（出國類別：實習）

參加美國德州大學阿靈頓分校電能系統
研究中心電力系統研習班

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：祁培倫 電機工程監

派赴國家：美國

出國期間：99年12月31日至100年6月23日

報告日期：100年8月23日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參加美國德州大學阿靈頓分校電能系統研究中心電力系統研習班

頁數 69 含附件 是 否

出國計畫主辦機關／聯絡人／電話：臺灣電力公司／陳德隆／23667685

出國人員姓名／服務機關／單位／職稱／電話：

祁培倫	台灣電力公司	電力調度處	電機工程監	02-2366-6617
-----	--------	-------	-------	--------------

出國類別：1.考察 2.進修 3.研究 4.實習 5.其他：

出國期間：99年12月31日至100年6月23日 出國地區：美國

報告日期：100年8月23日

分類號／目

關鍵詞：發電機線上參數識別(On-Line Generation Parameters Identification)、德州電力可靠度委員會 (Electric Reliability Council of Texas, ERCOT)、電能系統研究中心 (Energy Systems Research Center, ESRC)

內容摘要：

電力市場自由化後，在經濟及設備效率因素考量下，電力系統的運轉點比以往更接近系統穩定極限，然而電力系統架構日趨複雜，如何精準掌握系統特性，確保系統安全運轉成為一項重要課題。電力系統運轉特性可藉由動態模型和動態模擬呈現，電力系統規劃及運轉人員並據此改善、維護系統安全及可靠度，然而動態模擬結果是否真實呈現實際電力系統特性，關鍵在於系統動態元件參數是否準確。

為精確掌握系統特性，提高動態模型和動態模擬的準確性，本公司已成立「發電機模型參數量測專案小組」實地測量發電機組參數，而美國德

州大學阿靈頓分校的能源系統研究中心正與美國德克薩斯州 ERCOT 系統進行線上機組參數識別之研究，前往 ESRC 研習「發電機組機組線上參數識別」技術，將有助於提高目前系統動態參數準確性，以期更加掌握系統動態特性，確保電力系統安全運轉。

本文首先介紹北美電力市場概況、德克薩斯州 ERCOT 電力系統及發展現況；其次介紹在電能系統研究中心實習期間 2011 年 2 月美國德克薩斯州 ERCOT 系統輪流限電 400 萬瓩事件，並報告參與北美同步相量發展計畫（North American SynchroPhasor Initiative, NASPI）研討會之心得。

最後，對「發電機組機組線上參數識別」技術進行介紹，包括目前美國北美可靠度委員會（North American Electric Reliability Corporation, NERC）對系統動態資料的要求及報告程序，各種發電機模型包含勵磁系統、調速機、電力系統穩定器等及動態參數識別之流程、應用技術及方法。

目 錄

目 錄.....	I
圖表索引.....	III
壹、出國目的.....	1
貳、出國行程.....	3
參、實習過程.....	4
肆、德州電力市場介紹.....	6
4.1 北美電力市場概述.....	6
4.2 ERCOT 電力現況.....	7
4.3 ERCOT 歷史沿革及任務簡介.....	11
4.4 ERCOT Nodal 電力市場介紹.....	16
伍、研習內容.....	22
5.1 2011 年 2 月美國 ERCOT 系統輪流限電 400 萬瓩限電事件.....	22
5.1.1 概述.....	22
5.1.2 ECORT 電能緊急警報(EEA)分類.....	26
5.1.3 限電事件經過.....	27
5.1.4 事件檢討.....	30
5.1.5 心得感想.....	34
5.2 北美同步相量發展計畫工作小組會議.....	36
5.2.1 議程介紹.....	36
5.2.2 與會心得.....	39

5.3 發電機組機組線上參數識別.....	41
5.3.1 前言.....	41
5.3.2 發電機組機組線上參數識別介紹.....	42
5.3.3 NERC 對系統動態資料要求.....	43
5.3.4 發電機模型介紹.....	45
5.3.5 動態參數辨識流程.....	52
5.3.6 PSS/E 響應測試.....	56
5.3.7 實例研究.....	58
陸、心得與建議事項.....	64
柒、參考文獻.....	68

圖表索引

圖 4.1 NERC 區域可靠性組織分佈圖	6
圖 4.2 2010 年 ERCOT 各類發電機組的裝置容量占比圖	7
圖 4.3 2010 年 ERCOT 各類發電機發電量占比圖	8
圖 4.4 近年 ERCOT 對輸電線路之投資(百萬美元).....	9
圖 4.6 ERCOT 系統與相鄰電網直流互連線圖	10
圖 4.5 ERCOT 歷史沿革	12
圖 4.6 美國電力市場 ISO 分佈圖	14
圖 4.7 ERCOT 之 5 個壅塞管理區域及 6 個 CSC.....	17
圖 4.8 ERCOT 由區域電力市場轉換為節點電力市場	18
圖 4.9 ERCOT 節點電力市場示意圖	19
圖 5.1 2011 年 2 月 1 日至 3 日德克薩斯州重要城市每小時溫度	23
圖 5.3 2011 年 2 月 2 日 ERCOT 負載與扣除故障機組後之機組排程	28
圖 5.4 2011 年 2 月 2 日上午 ERCOT 緊急限電事件處理經過	29
圖 5.5 2011 年 2 月 2 日上午 ERCOT 系統頻率及緊急限電之執行	29
圖 5.6 ERCOT 系統 2005 年至 2011 年最冷 50 天跳脫機組統計圖	31
圖 5.7 2011 年 2 月 2 日 ERCOT 系統各地區氣溫與跳脫機組裝置容量	32

圖 5.8 2011 年 2 月 2 日上午 6:30 ERCOT 系統跳脫機組之燃料別	32
圖 5.9 2011 年 2 月 2 日當日 ERCOT 系統風力預測與實際發電量	33
圖 5.10 2011 年 2 月第一星期(2 日至 7 日)之電價統計	33
圖 5.11 WSCC 停電事故實際與模擬結果比較	42
圖 5.12 水輪機調速系統模型 HYG0V	48
圖 5.13 水輪機調速系統模型 HYG0V	49
圖 5.14 同步調速器	50
圖 5.15 包含降速回授之調速器	51
圖 5.16 串列混合式一次再熱式汽輪機模型	51
圖 5.17 機組參數辨識流程圖	53
圖 5.18 EXPIC1 的參數列表以及模型圖	54
圖 5.19 系統簡化前之系統示意圖	59
圖 5.20 使用理想變壓器進行系統簡化之系統示意圖	59
圖 5.21 系統簡化後系統示意圖	59
表 2.1 出國行程	3
表 3.1 實習課程及研討會	4
表 4.1 ERCOT 與本公司系統概況比較表(統計至 2010 年底)	10
表 4.2 Zonal Market 與 Nodal Market 於市場運轉上之差異	21

表 5.1 ECORT 電能緊急警報(EEA)與外界溝通方式簡表	24
表 5.2 2011 年 2 月 2 日 ERCOT 系統緊急限電之各電力公司卸載量	25
表 5.3 2011 年 2 月 2 日至 4 日 ERCOT 系統各發電公司跳脫機組及燃料別 ..	31

參加美國德州大學阿靈頓分校能源系統研究中心

電力系統研習班

出國報告

壹、出國目的

電力系統運轉的目標為在設備安全的狀況下追求其最佳經濟效益，因此電力系統的運轉點比以往更接近系統穩定極限，然而電力系統架構日趨複雜，如何精準掌握系統特性、確保系統安全運轉成為一項重要課題。電力系統運轉特性可藉由動態模型和動態模擬呈現，電力系統規劃及運轉人員並據此改善、維護系統安全及可靠度，然而動態模擬結果是否真實呈現實際電力系統特性，關鍵在於系統動態元件參數是否準確。

目前系統動態元件如發電機、勵磁機、調速機及負載等其特性參數最準確的量測方式就是現場量測，然而現場量測存在幾項缺點，如：需耗費大量人力、時間及金錢、機組必須停機測試、某些極端測試項目（如全載跳脫）對機組設備可能照成損害，以美國自由化市場為例，要求發電業者實地測試並不可行或甚至不可能，在台灣的電力系統參數量測上也面臨相同情勢。

美國德州大學阿靈頓分校（University of Texas at Arlington）的電能系統研究中心（Energy Systems Research Center, ESRC），自 1968 年成立至今已逾 43 年，為 IEEE 所調查認定前十名之電力系統教育中心，並與美國

各電力公司及電力調度中心有多年合作，本公司曾派員至 ESRC 研習與之合作研究計畫，將理論研究與實際系統運轉相互結合，協助解決系統規劃、運轉等問題。

美國德州大學阿靈頓分校的能源系統研究中心近年正與美國德州 ERCOT 系統進行線上機組參數識別之研究，前往 ESRC 研習「發電機組機組線上參數識別」技術，配合本公司「發電機模型參數量測專案小組」實地測量發電機組參數成果，將有助於提高動態模型和動態模擬的準確性，協助系統運轉與規劃人員更加掌握系統動態特性，確保電力系統安全運轉。並且藉由 ESRC 安排現場參訪電力公司、電廠及調度中心，可與受訪單位進行技術研討與交流，並拓展本公司人員視野，使未來台電公司在運轉觀念上能更與世界先進國家接軌。

貳、出國行程

本次出國計畫，自 99 年 12 月 31 日起，至 100 年 6 月 23 日止，合計 175 天，行程概要如表 2-1 所列。

表 2.1 出國行程

日期	起訖地點	工作紀要
99/12/31	台北(TPE)－洛杉磯(LAX)－達拉斯(DFW)－阿靈頓(Arlington)	往程
100/1/1 ~100/6/20	德州大學阿靈頓分校 (University of Texas at Arlington, UTA)	參加能源系統研究中心 (Energy Systems Research Center, ESRC) 電力系統研習班
100/6/21 ~100/6/23	阿靈頓(Arlington)－達拉斯(DFW)－洛杉磯(LAX)－台北(TPE)	返程

參、實習過程

表 3.1 實習課程及研討會

課 程	
Grid Integration of Renewable Energy Systems	Overview of renewable energy sources and application of power electronics and motor drives in renewable energy systems
	Dynamic modeling of electrical machinery and drive systems
	Wind energy conversion systems
	Photovoltaic energy conversion systems
	Energy storage component, circuits, and systems
	High power converters, HVDC, and grid integration issues
Power Quality	Voltage Sages and Interruptions
	Transient Over Voltages
	Fundamental of Harmonics
	Harmonic Solutions
	Long Duration Voltage Variations
	Distributed Generation and Power Quality
	Wiring and Grounding
	Monitoring Power Quality
Voltage Unbalance	
研 討 會	
February 23 - 24, 2011	North American SynchroPhasor Initiative (NASPI) Working Group Meeting Fort Worth, TX
March 6 – 10, 2011	The Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) 2011

	Fort Worth, TX
Tuesday, March 15, 2011	<p>Wind Farms and Harmonics</p> <p>Dr. Wei-Jen Lee</p> <p>Fort Worth Chapter of IEEE Power & Energy Society monthly meeting</p>
Saturday, April 2, 2011	<p>Introduction to the RTDS Simulator and its applications</p> <p>Dr. Yi Zhang</p> <p>NACPPA Seminar Series #2011-4</p>
Saturday, April 16, 2011	<p>New Developments in Control for Wind Energy Systems</p> <p>Dr. Wei Qiao</p> <p>NACPPA Seminar Series #2011-5</p>
Tuesday, April 19, 2011	<p>Lessons Learned from the Texas Synchrophasor Network</p> <p>W. Mack Grady, Ph.D</p> <p>Fort Worth Chapter of IEEE Power & Energy Society monthly meeting</p>

肆、德州電力市場介紹

4.1 北美電力市場概述

美國負責電力市場運轉、管理、監督的服務性非營利性組織由上至下大致有 5 級，分別是聯邦能源管理委員會（Federal Energy Regulatory Commission, FERC）、北美電力可靠度委員會（North America Electric Reliability Corporation, NERC）、區域電力協調委員會（Area Power Coordinating Council）、州可靠度委員會（State Electric Reliability Council）、州獨立系統調度中心（State Independent System Operator）。FERC 負責市場監管，並負責審訂重要的市場規則，且組織和協調電力市場相關研究及政策分析等；NERC 執行的工作包括制訂和監督可靠度計算標準、AGC 標準等。

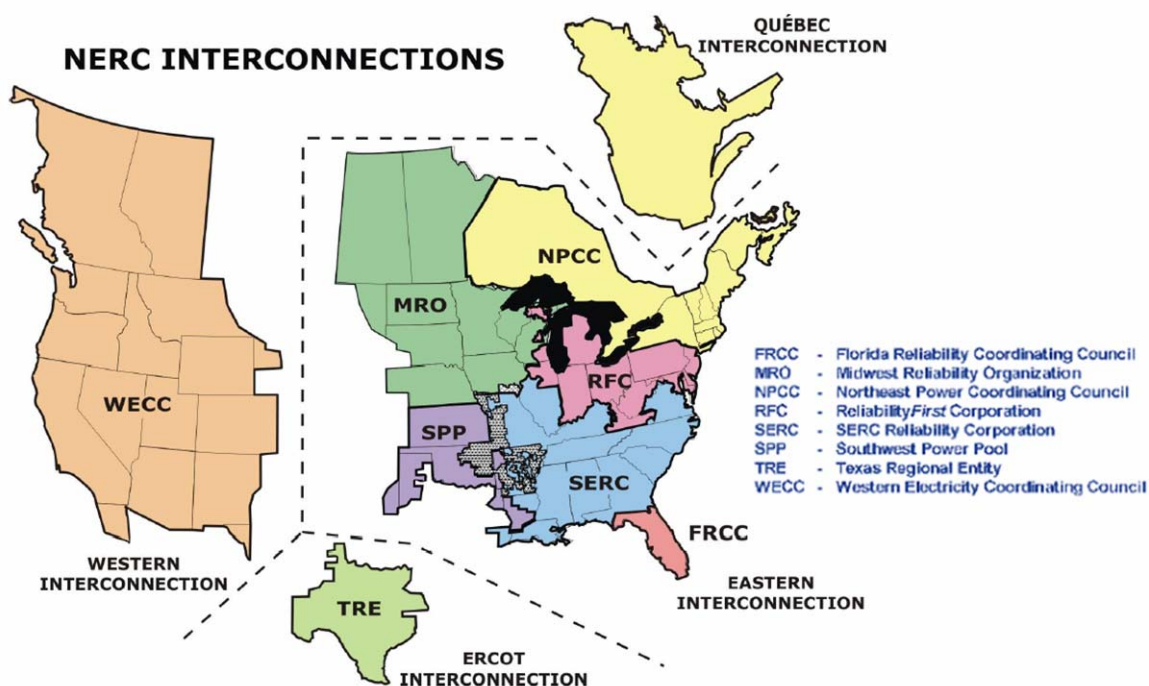


圖 4.1 NERC 區域可靠性組織分佈圖

圖 4.1 為 NERC 地區的 8 個區可靠性組織分佈圖，其中包括德克薩斯州電力可靠度委員會(Electric Reliability Council of Texas, ERCOT)；州可靠性委員會主要是編制和改進可靠性規則和相關標準，保障地區電力系統的安全運行；州獨立系統調度中心則負責和保證州內電網的可靠運轉。

4.2 ERCOT 電力現況

ERCOT 擁有德克薩斯州近 2,300 萬客戶，運轉全州 85%的電能負載涵蓋 75%的德克薩斯州土地面積，ERCOT 的電網有 40,530 哩長的高壓輸電線（345kV：9,249 哩；138kV：19,565 哩）及超過 550 台的發電機，裝置容量達 84,400MW，發電機組類型包括燃煤、燃氣、核能及再生能源機組(風力、水力、生質能等)，容量分別約佔全州總量的 23%、57%、6%和 14%，其中風力機組裝置容量佔德克薩斯州總系統裝置容量 12%，有 9500MW 是全美之最，圖 4.2 為 2010 年 ERCOT 各類發電機組的裝置容量占比。

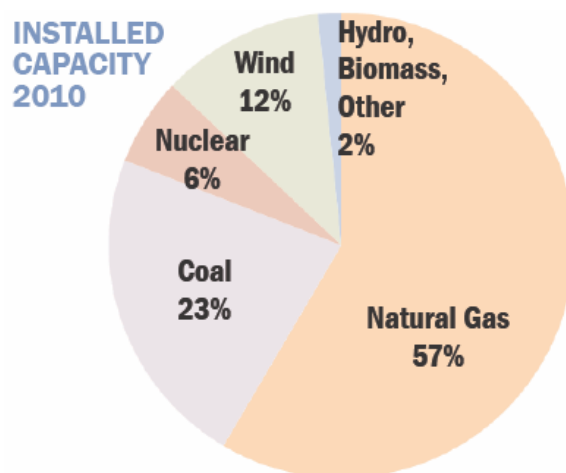


圖 4.2 2010 年 ERCOT 各類發電機組的裝置容量占比圖

ERCOT 除負責管理大額電力躉售競爭市場的財務結算，也管理 660 萬選擇參與競爭電價區域之客戶的電力零售轉供，ERCOT 系統 2010 年系統尖峰負載為 65,776MW(Aug.23, 2010)，當年全年系統總發電量約為 3,190 億度電，圖 4.3 為 2010 年 ERCOT 各類發電機發電量占比。

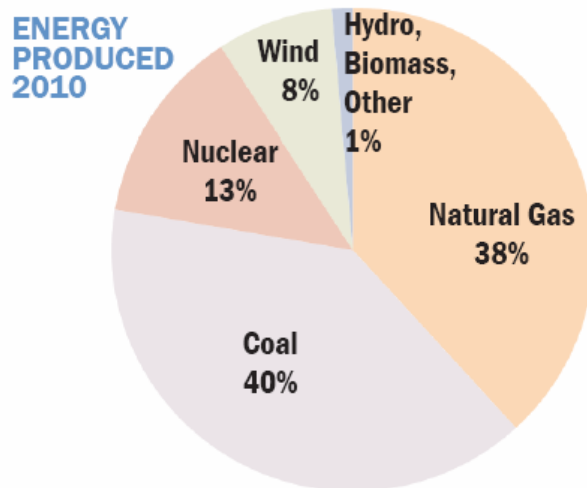


圖 4.3 2010 年 ERCOT 各類發電機發電量占比圖

為了因應德克薩斯州西部風力發電的快速增加(預計由目前 9,000MW 擴展至 18,000MW)，ERCOT 持續規劃及新建輸電線路，自 1999 年以來，德克薩斯州已投資 65.7 億美元於興建輸電線路，未來將再投資 90 億美元興建輸電線路，圖 4.4 為 ERCOT 近年(自 2007 年起)對輸電線路之投資。

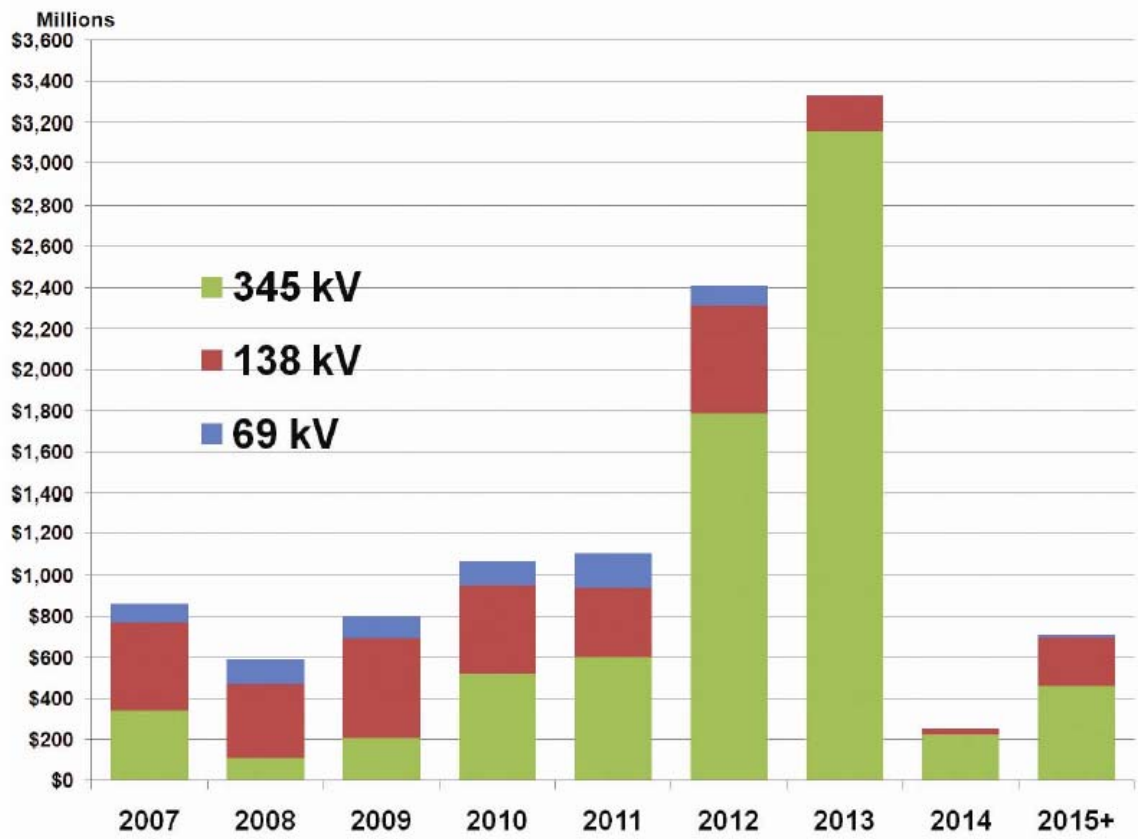


圖 4.4 近年 ERCOT 對輸電線路之投資(百萬美元)

ERCOT 在美國是獨特的 ISO，它並未同步連接至其他北美互連電網內。ERCOT 往北以非同步的連接方式至西南電力池 ISO，往南則以直流互連線接到墨西哥的 Comisión Federal de Electricidad (CFE)，並藉直流互連線控制電力潮流進出 ERCOT 的電網，圖 4.6 為 ERCOT 系統與相鄰電網直流互連圖，由圖中可看出 ERCOT 系統與相鄰電網間之可容許傳輸容量並不高，約 1,106MW，因傳輸功率有限，相對於 ERCOT 系統負載來說比例甚低，故 ERCOT 實際上可視為一個孤島系統，類似於台灣本島電力系統，ERCOT 與本公司系統概況比較如表 4.1。

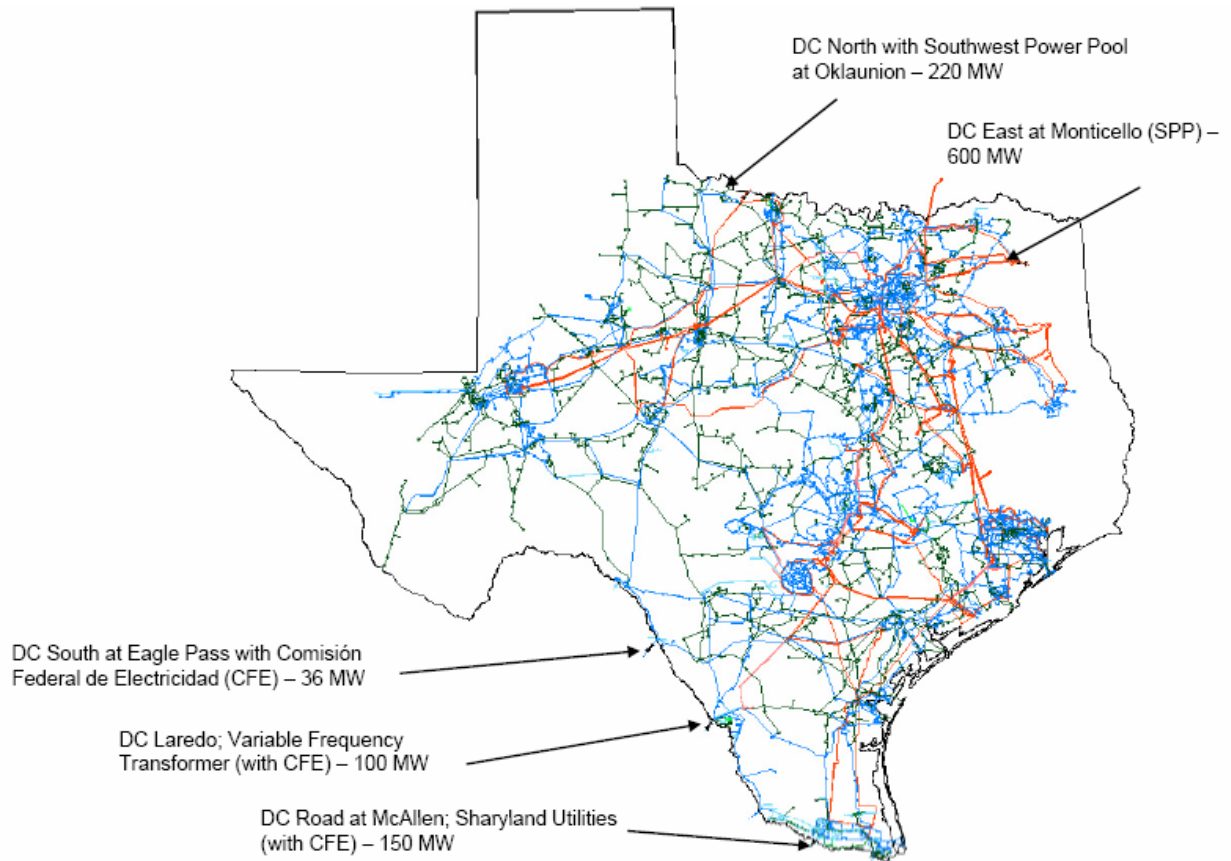


圖 4.6 ERCOT 系統與相鄰電網直流互連線圖

	ERCOT	TPC
Customers served	23 million	12.5 million
Area served	85% of Texas load, 75% of Texas grid	100% of Taiwan load, and Taiwan grid
Generating units	550	566
High-voltage transmission	40,530 miles	10,290 miles
Installed capacity	84,400 MW	4,0912 MW
Reserve margin	17.5%(minimum required 13.75%)	23.4% (minimum required 16%)
Record peak demand	65,776 MW (Aug.23 2010)	3,3023MW(July 7 2010)
Wind generation	9,500 MW	471MW
Demand response	1,063 MW	14MW

表 4.1 ERCOT 與本公司系統概況比較表(統計至 2010 年底)

4.3 ERCOT 歷史沿革及任務簡介

美國德克薩斯州電力可靠度委員會(ERCOT)是依據德克薩斯州參議院第 7 號法案，擔任獨立系統調度中心(ISO)，ERCOT 負責營運電力躉售市場並且確保德克薩斯州調度電網的可靠度。德克薩斯州電網僅有使用直流輸電線與鄰近電網相聯，但傳輸功率有限，向外州購售電量甚低，相較於美國其他以交流輸電線互聯之電網，幾乎可視為獨立電網。

ERCOT 是一個會員制的非營利機構，由委員會管理並接受德克薩斯州公用事業管制委員會(PUCT)及德克薩斯州州議會的監督。ERCOT 的成員包含零售用戶，民營和市立電力公司，鄉村電力合作社，河流管理局，獨立發電業者，電力市場商及零售電力供應者。

ERCOT 是電力自由市場操作者，須承擔的責任有：負載預測、輸電停線協調、排程和監控、費率管理、輸電及發電規劃、輸電操作、可靠度協調、取得可靠度必須運轉服務(機組排程預定)、躉售和零售市場營運、採購熱機備轉容量、備用容量、調節服務、平衡能量、未得標的容量服務、未得標的能量服務、負載卸載管理、平衡電能管理，再生能源推廣計畫管理，停電調查、壅塞管理、輸電壅塞權(TCR)拍賣管理等。

另外，ERCOT 亦須承擔的責任有：維護一個集中登記的資料庫，零售交易清算服務，審查及測試零售市場參與者的資格，彙編零售市場制度且提出報告，作為所有用戶的代理人及零售供應者，每月接收處理 6 百萬

個電錶資料並傳送至適合的零售電力供應商，擔任獨立且中立的角色協助用戶轉換供電商。

ERCOT 提供買方、賣方、發電業者、輸電業者、市場交易者所需的營運，但 ERCOT 並未擁有輸電、發電、配電及終端用戶，也不制定市場政策，ERCOT 不關心躉售或零售價格，只關心市場的功能是否完善，ERCOT 在股東會議上是一個積極但無投票權的參與者。

美國德克薩斯州電力可靠度委員會(ERCOT)之歷史沿革如圖 4.5，茲介紹如后：

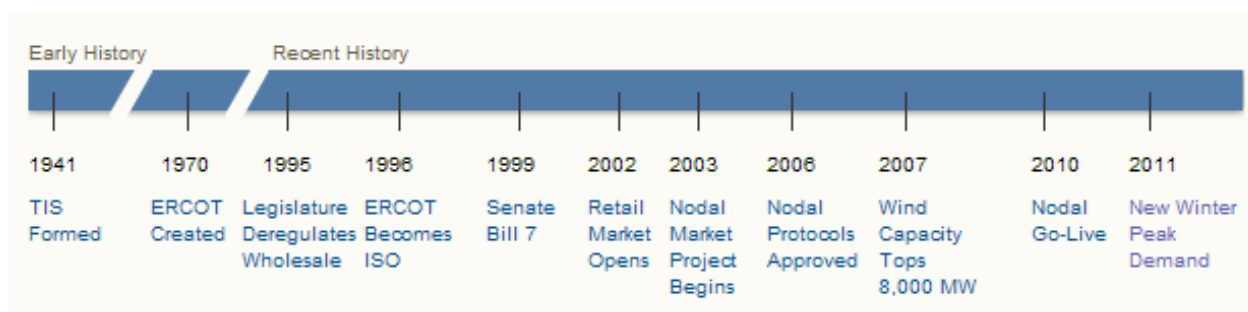


圖 4.5 ERCOT 歷史沿革

■ 1941 年：德克薩斯州多家電力公司聯合供電供應戰爭需求

二次世界大戰期間，德克薩斯州多家電力公司合組德克薩斯州互聯系統 (Texas Interconnected System, TIS)，將多餘的電力提供給在墨西哥灣沿岸工廠製造公司，為能源密集型的鋁冶煉提供可靠的電力供應。

■ 1970 年：德克薩斯州互聯系統 (TIS) 轉型為德克薩斯州電力可靠度委員會(ERCOT)以符合北美電力可靠度委員會 (NERC) 的要求

德克薩斯州互聯系統(TIS)轉型為德克薩斯州電力可靠度委員會(ERCOT)

以符合北美電力可靠度委員會（NERC）的要求，當時 ERCOT 僅僱用兩名電力公司退休員工為其工作。

■ **1981 年：ERCOT 擔任主要調度運轉協調者角色**

1981 年起，TIS 的將所有運轉操作功能轉移給 ERCOT，ERCOT 成為德克薩斯州主要調度運轉協調者。1986 年 ERCOT 成立自己的辦公室，聘請了四名全職員工。

■ **1995 年：德克薩斯州州議會投票通過開放躉售電力市場**

1995 年，德克薩斯州州議會修訂了公共事業管理法開放躉售電力市場。德克薩斯州公共事業委員會（PUCT）賦予 ERCOT 更多的責任，促進躉售電力市場的競爭並所有市場參與者有效地利用電網。。

■ **1996 年：ERCOT 成為美國第一個獨立系統調度中心（ISO）**

1996 年 8 月 21 日，德克薩斯州公共事業委員會（PUCT）通過一項電力事業專門小組的建議，即 ERCOT 成為一個獨立系統調度中心（ISO），以確保 ERCOT 為公正的第三方機構，監督各個參與電網的市場競爭參與者。圖 4.6 為美國電力市場 ISO 分佈圖

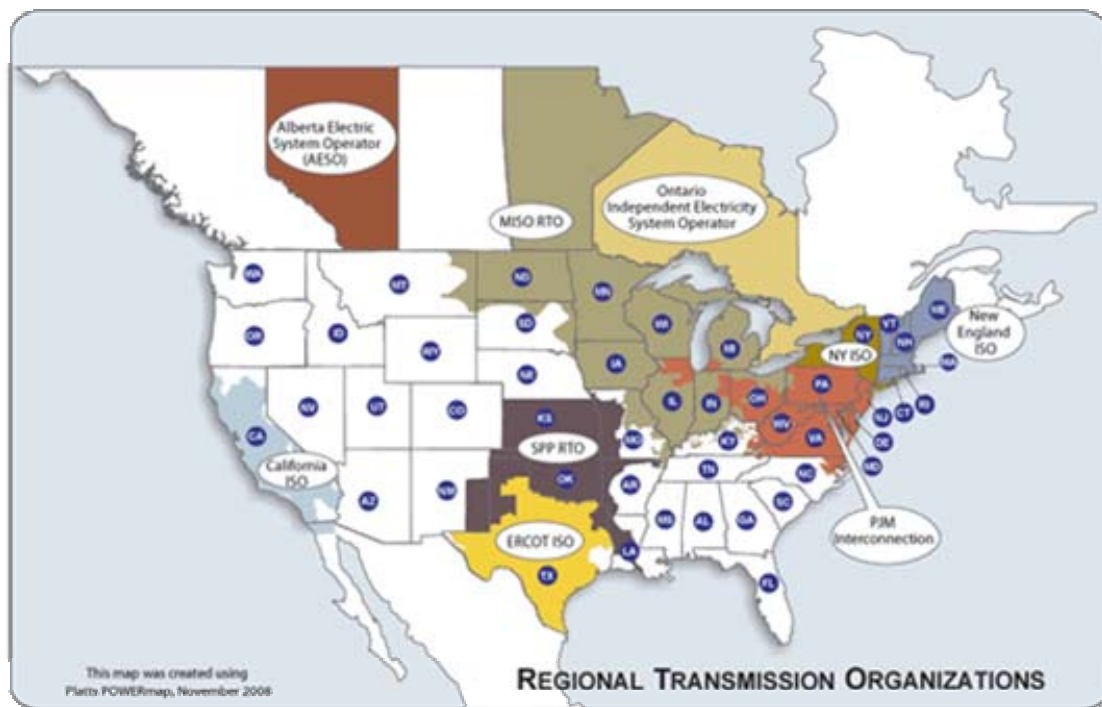


圖 4.6 美國電力市場 ISO 分佈圖

■ **1999 年：德克薩斯州州議會投票通過開放零售電力市場**

1999 年 5 月 21 日，德克薩斯州議會參議院通過的條例草案 (SB7)，建立一個競爭的零售電力市場，使客戶從 2002 年 1 月 1 日能夠選擇他們的零售電力供應商。

■ **2001 年：ERCOT 內十個地區控制中心合併成一個控制中心**

2001 年 7 月 31 日，ERCOT 轄區內 10 個控制區的控制中心合併為一個單一的控制中心，ERCOT 電力躉售市場開始運行。

■ **2002 年：德克薩斯州零售電力市場正式開放，有 650 萬用戶可參與零售電力市場**

2002 年 1 月 1 日，ERCOT 正式開放零售電力的競爭市場，個人及企業用戶在大部分城市可以按時、按預算選擇自己的電力供應商。初期有 650 萬

用戶可參與零售電力市場，約佔 ERCOT 系統負載 24%。

■ **2003 年：開始設計節點 (Nodal) 電力市場的交易制度**

2003 年 9 月，德克薩斯州公共事業委員會 (PUCT) 命令 ERCOT 發展節點 (Nodal) 躉售市場的設計，其目的在透過更精細的定價計算和能源調度服務，改善電力市場和系統運轉的效率。

■ **2006 年：節點 (Nodal) 電力市場的交易協議通過**

2006 年 4 月 5 日，德克薩斯州公共事業委員會 (PUCT) 簽署一項命令，批准節點 (Nodal) 電力市場的交易協議，最初實施日期為 2009 年 1 月 1 日。

■ **2007 年：風力機組裝置容量達 8,000MW；46% 的住宅用戶轉換過電力供應商**

ERCOT 風力機組裝置容量達 8,000MW，風力輸出最高達 3,220MW。

零售電力市場推出五年後，46% 的住宅用戶曾轉換電力供應商。

■ **2010 年：節點 (Nodal) 電力市場於 12 月 1 日正式啟用；風力輸出達 7,227MW；夏季尖峰用電超過 65,000MW**

2010 年 12 月 1 日 ERCOT 系統開始採行節點 (Nodal) 電力市場。

2010 年 12 月 11 日 ERCOT 系統風力發電創歷史新高達 7,227MW，當時風力發電量佔系統負載 25.8%，風力機組裝置容量為 9,528MW。

2010 年 8 月 23 日 ERCOT 系統夏季尖峰用電為 65,776MW，創歷年夏季

新高紀錄。

■ 2011 年：冬季尖峰用電創新記錄

2011 年 2 月 10 日 ERCOT 系統冬季尖峰用電為 57,315MW，創歷年冬季新高紀錄。

4.4 ERCOT Nodal 電力市場介紹

2010 年 12 月以前，德州電力市場採用區域型 (Zonal) 包裹模式提交發電和負載計劃以及輔助服務報價、定價和進行電網壅塞管理。2001 年 7 月 31 日，德州的 10 個調度中心合併為一個調度中心，即現在的 ERCOT 電力調度中心，同日 ERCOT 電力躉售市場開始運行，並建立以區域定價和壅塞管理模式為特點的即時電力市場。2001 年 ERCOT 共設有 3 個壅塞管理區域 (Congestion Management Zone)，壅塞區域的劃分標準是同一區域內的機組和負載對於同一 CSC 上的潮流變化必須有著類似的影響。2002 年 1 月 1 日起調整為 4 個壅塞管理區域，2004 年 1 月 1 日起再調整為現有 5 個壅塞管理區域，即南區 (South)、北區 (North)、休斯頓區 (Houston)、西區 (West) 和東北區 (Northeast)。各區之間設有輸電界面限制，即所謂的 CSC (Commercially Significant Constraint，另稱為商業影響限制)，CSC 實質上是一組輸電線路的組合，目前計有 6 個 CSC 分別為南區→北區、南區→休斯頓區、北區→休斯頓區、西區→北區、東北區→休斯頓區和北

區→西區，如圖 4.7 藍色箭頭所示。

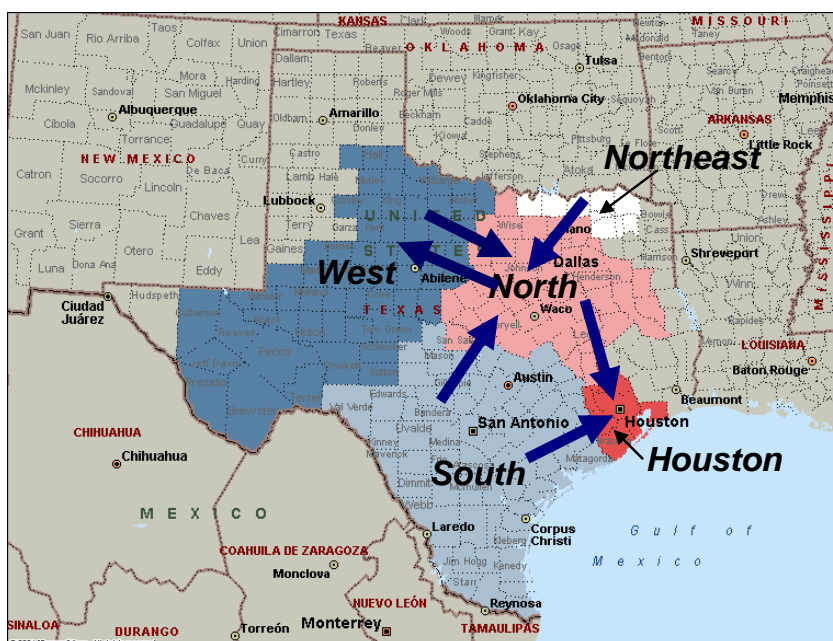


圖 4.7 ERCOT 之 5 個壅塞管理區域及 6 個 CSC

在 ERCOT，造成區域間壅塞的市場參與者必須負責支付其壅塞費用，對於單一區域內的局部壅塞問題，ERCOT 則另採用一個局部壅塞管理(Local Constraint Management)模型進行管理，市場參與者可以購買輸電壅塞權來限制其所在區域的壅塞費用。

2003 年 9 月，德克薩斯州公共事業委員會 (PUCT) 命令 ERCOT 發展節點 (Nodal) 躉售市場的設計，其目的在透過更精細的定價計算和能源調度服務，改善電力市場和系統運轉的效率。2006 年 4 月 5 日，德克薩斯州公共事業委員會 (PUCT) 簽署一項命令，批准節點 (Nodal) 電力市場的交易協議，最初實施日期為 2009 年 1 月 1 日。

但因電力市場轉換牽涉廣泛，需隨之修正之市場規則及運轉準則眾

多，故於 2008 年修改施行日期為 2010 年 12 月。因此 ERCOT 系統於 2010 年 12 月 1 日正式由區域電力市場（Zonal Market）轉換為節點電力市場（Nodal Market），如圖 4.8 所示。

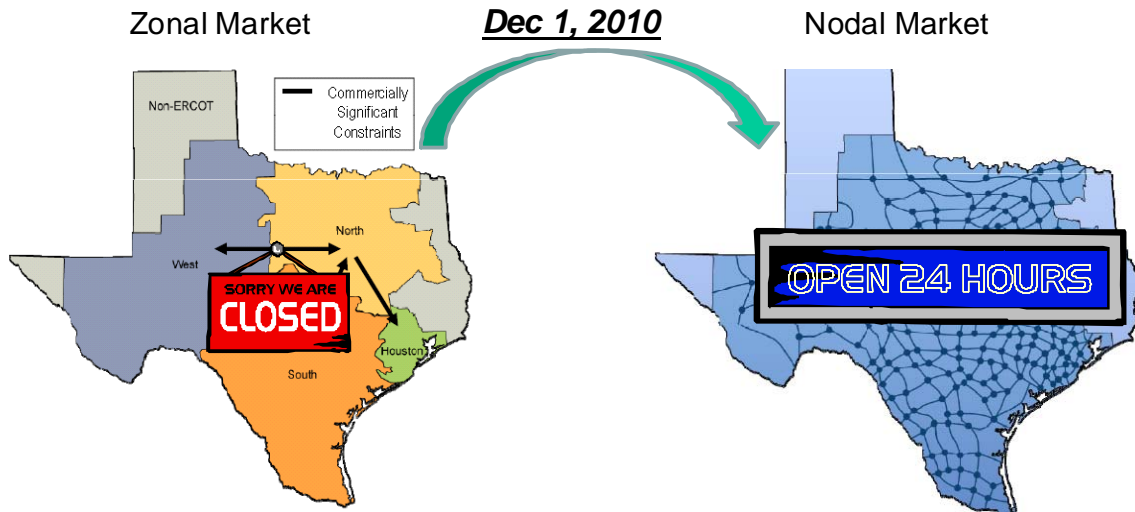


圖 4.8 ERCOT 由區域電力市場轉換為節點電力市場

由區域電力市場（Zonal Market）轉換為節點電力市場（Nodal Market）前，ERCOT 係根據電網內重要的商業限制（Commercially Significant Constraints, CSCs）分成不同的 5 個壅塞管理區（Congestion Management Zones, CMZs）Zonal 運轉實施後發現之缺點：

- 價格透明度不足：各壅塞管理區間的發電機價格及輸電線路價格訊號明顯，但各壅塞管理區本身內部價格信號不明顯，造成管理區內發輸變電設備投資誘因信號不明顯。
- 電源調度受限：在各個壅塞管理區內電源排程供應商以包裹方式送交電源排程上，ERCOT 電源調度靈活性受限。
- 區域壅塞情況無法確實反應：壅塞管理區內對地區性的壅塞有貢獻的

市場參與者無法藉由 Zonal 線有制度直接得到相關分配費用。

由區域電力市場 (Zonal Market) 轉換為節點電力市場 (Nodal Market) 後，ERCOT 將整個電網分為超過 4000 個節點取代原來 5 個區，如圖 4.9，以滿足德克薩斯州公共事業委員會的對解決區域壅塞的要求。Nodal 運轉實施後之優點：

- 節點價格反映系統實際情況：更精細的價格將鼓勵更多的發電機和輸電線路投資在適當的位置
- 提升調度效益：在電源端的直接調度將使整體的發電成本降低。
- 直接反應區域壅塞：Nodal 的結算價格是根據各結點的邊際成本。

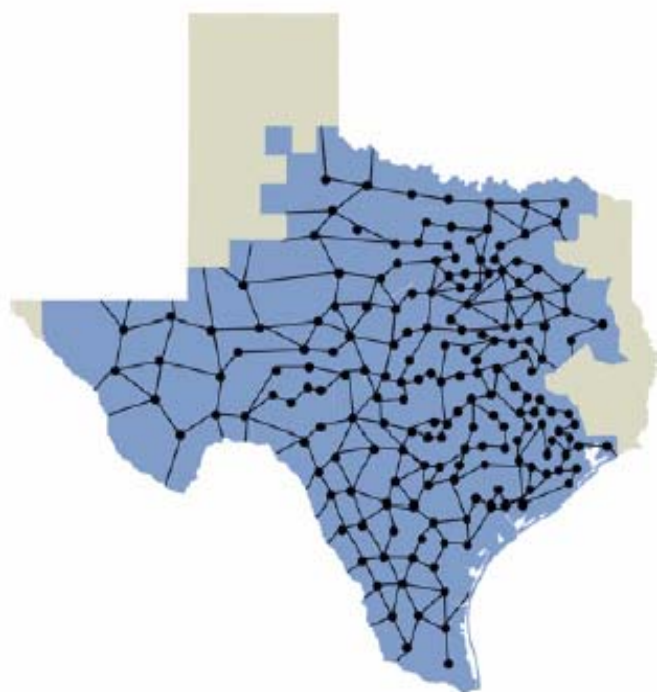


圖 4.9 ERCOT 節點電力市場示意圖

Zonal Market 與 Nodal Market 於市場運轉上之差異如表 4.2，而 ERCOT

受影響幾個主要的商業運轉模式，包括：

- 前一日交易市場 (Day-ahead market, DAM)
- 可靠度機組預定服務市場 (Reliability unit commitment, RUC)
- 即時或考慮系統安全限制的經濟調度 (Real-time or security constrained economic dispatch, SCED)
- 壅塞收入權 (Congestion revenue rights, CRRs)

而仍然維持不變的系統及程序有：

- 零售電力市場的組成成員及結構 (Components or structure of the current retail market)
- 全黑啟動機組合約 (Contracts for black start units)
- 再生能源信用額度程式 (Renewable Energy Credit program, REC)
- 輸電及配電損失的處置 (Treatment of transmission and distribution losses)
- 不平衡能量處置 (Unaccounted for energy, UFE)

	Zonal Market	Nodal Market
Energy Prices	Zonal	All Electrical Buses
Congestion impact on prices	Zonal Congestion Only	All Congestion
Local Congestion Management	<u>Not</u> Market-Based	Market-Based
Resource Dispatch	By Zonal Portfolio	Resource-Specific
Day-Ahead Market	Ancillary Services Only	Energy & Ancillary Services

表 4.2 Zonal Market 與 Nodal Market 於市場運轉上之差異

「經濟因素」為促進電力發展的重大推手，美國德州 ERCOT 系統在採行 Nodal Market 之市場機制後，將系統電力網路發展不足地區之情況直接反映於電力售價上，提供了更進一步興建發電機組及輸電線路誘因，相較於國內發電機組及輸變電設備興建受阻及電價情況，或有值得借鏡之處。

伍、研習內容

5.1 2011 年 2 月美國 ERCOT 系統輪流限電 400 萬瓩限電事件

2 月 1 日至 2 月 4 日受美國暴風雪影響，德州地區公路上積雪結冰造成停班停課，UTA 亦罕見的連續停課四天，感覺其影響雖不若颱風帶來造成之直接破壞，但卻造成許多不便，公路上車禍頻傳，而德克薩斯州可靠度委員會（Electric Reliability Council of Texas ,ERCOT）更於 2/2 上午 6 時至 14 時針對其轄區實施輪流停電（Rotating Outages）。

5.1.1 概述

從加拿大南下的超強冷氣團，遇到密西西比山谷上空吸滿墨西哥灣水氣的風暴，2 月 1 日形成籠罩美國三分之一地區的超級暴風雪，從德州到緬因州約 3200 公里的廣大地區都是冰天雪地，2 日風雪威力將更強。全美 19 州發布大風雪警報，1 日取消 9000 架次航班，2 日取消更多，全美至少有 10 萬戶停電。因為劇烈天候的因素，ERCOT 系統從 2 月 1 日晚間起就陸續有機組因天候影響故障無法併聯系統甚至跳機，至 2 日上午清晨 ERCOT 系統有超過 90 部以上的發電機組(發電容量達 10,000MW 以上)因天候因素無法發電，且系統負載量也因氣候寒冷而持續增加，圖 5.1 為 2011 年 2 月 1 日至 3 日德克薩斯州重要城市每小時溫度，由圖可看出各主要城市之氣溫均低於攝氏 0 度以下。

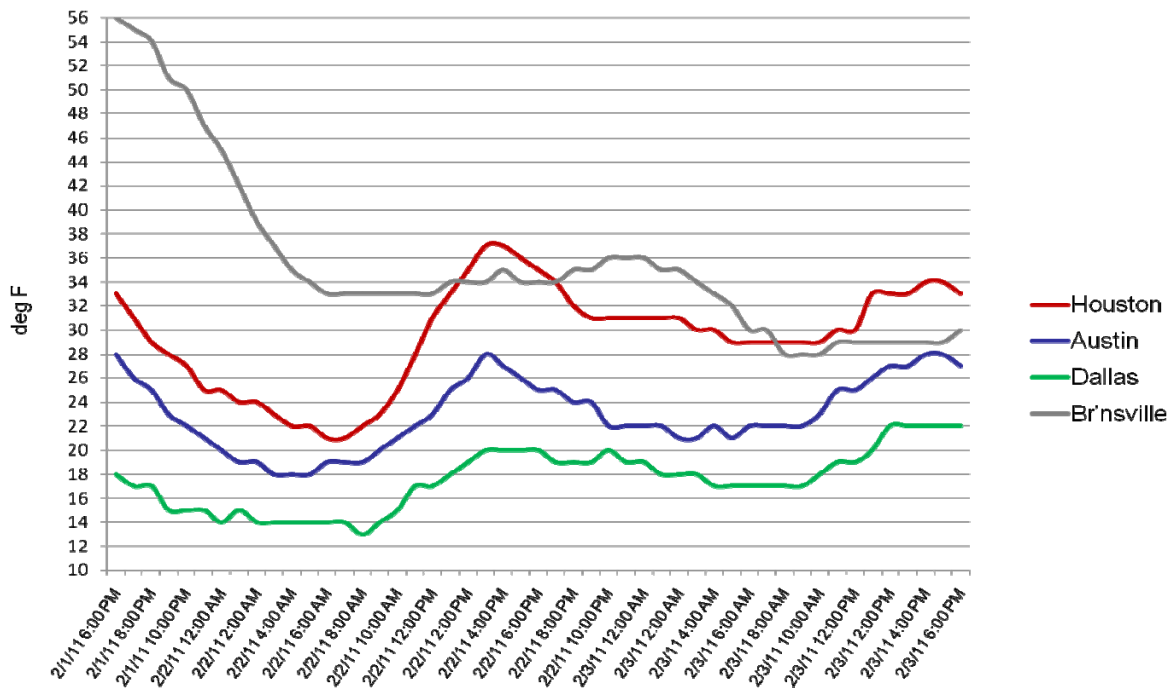


圖 5.1 2011 年 2 月 1 日至 3 日德克薩斯州重要城市每小時溫度

ERCOT 控制區域約佔德州約 85% 負載，圖 5.2 為 2011 年 2 月 1 日至 4 日實際日負載曲線，由圖可看出 2 月 1 日晚間起系統負載就逐漸升高，ERCOT 在 2 月 2 日 6 時至 14 時實施輪流停電，由 2 日及 3 日的負載曲線比較可以看出輪流限電的效果。且依據 ERCOT 當晚發布消息，2 月 2 日(限電日)當晚 19:00-20:00 一小時平均負載 56,334MW 已經超過歷年冬季尖峰負載 55,878MW 紀錄(2010 年 1 月 8 日)。

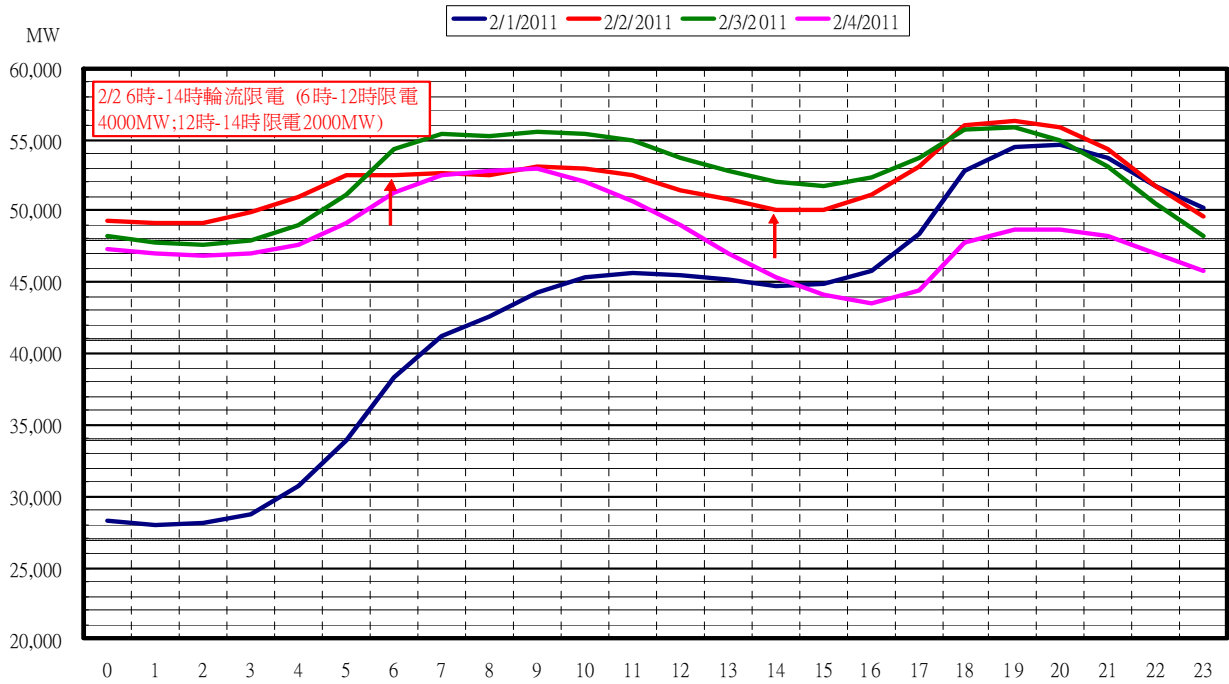


圖 5.2 2011 年 2 月 1 日至 4 日 ERCOT 系統每小時負載

因此自 2 月 2 日清晨 5 時起開始對外發布電能緊急警報 (Energy Emergency Alert, EEA)，ECORT 電能緊急警報(EEA)採取限電措施及與外界溝通方式如表 5.1。

ERCOT Energy Emergency Alert Communications

Emergency Levels	Operating Reserves	Grid Operators' Actions	Automated Emergency Notifications	Follow-up Communications from External Affairs	Media/Public Notifications
Normal Conditions	Reserves > 3000 MW	Normal operations			
Control Room Advisory	Reserves < 3000 MW	Issue "Advisory" to utilities -- informational only -- no additional authority for operators' actions	Public Utility Commission (PUC) and NERC regional entity (TRE) notified via grid report daily emails		
Control Room Watch	Reserves < 2500 MW	Use quick-start capacity and non-spinning reserves (available within 30 minutes)	Automated Emergency Notification System phone call and email to PUC, the independent market monitor (IMM), TRE, and FERC	If potential emergency situation, additional information sent to the GridEmergency email list (SOC, PUC, OPC, Board, Govmt/Lege, IMM, TRE, FERC, and Market Participants' media contacts/PIOs)	
Energy Emergency Level 1 POWER WATCH - Conservation Needed (appeal optional if situation short-lived)	Reserves < 2300 MW	Use capacity available from other grids (via asynchronous connections; 500 MW on average) and dispatch all available units	Above plus State Operations Center (notifies city, county officials & law enforcement), Office of Public Utility Counsel, govmt/lege staff and ERCOT Board	Notify GridEmergency list with additional information	News release, if appropriate; Twitter and Facebook
Energy Emergency Level 2A POWER WATCH - Conservation Needed	Reserves < 1750 MW	Drop interruptible loads (load resources under contract; 1000 MW on average) and begin block-load transfers of load to other grids, if appropriate	Same as above	Same as above	News release, if appropriate; Twitter and Facebook
Energy Emergency Level 2B POWER WARNING - Conservation Critical	Reserves continuing to trend downward or not available	Use Emergency Interruptible Load Service; 300-400 MW on average	Above plus major news services and media contacts for utilities	Same as above	News release, if not already done; Twitter and Facebook
Energy Emergency Level 3 POWER EMERGENCY - Rotating Outages	Reserves continuing to trend downward or frequency at or below 59.8 Hz	Instruct transmission operators to implement rotating outages. Areas affected are at the discretion of the utilities.	Same as above	Same as above	News release; Twitter and Facebook

表 5.1 ECORT 電能緊急警報(EEA)與外界溝通方式簡表

後因發電機組持續發生跳機故障造成備轉容量不足及頻率偏低，ERCOT 為維護系統安全避免全系統全黑事故，自凌晨 5:43 起開始實施輪流停電，每輪 10-45 分鐘，限電量最高達 4,000MW，各家電力公司依其轄區負載多寡分配限電量，各家電力公司分配之限電量如表 5.2，輪流停電一直持續至當日下午 14 時才解除輪流停電。

Transmission Owner	% Shed	MWs Shed
Austin Energy	3.96	158.4
American Electric Power	9.33	373.2
Brazos Electric Power Cooperative	4.62	184.8
City of Bryan	0.57	22.8
CenterPoint	26.56	1,062.4
City of College Station	0.29	11.6
CPS Energy	7.34	293.6
Denton	0.49	19.6
City of Garland	0.74	29.6
Greenville Electric Utility Service	0.17	6.8
LCRA	5.21	208.4
South Texas EC	1.32	52.8
Oncor	35.55	1,422.0
Public Utility Board of Brownsville	0.43	17.2
Rayburn Country EC	0.93	37.2
Texas New Mexico Power	2.35	94.0
Tex-La	0.14	5.6
TOTAL		4,000

表 5.2 2011 年 2 月 2 日 ERCOT 系統緊急限電之各電力公司卸載量

5.1.2 ECORT 電能緊急警報(EEA)分類

- Conservation Encouraged / Normal Conditions :

綠色，電力正常階段，此階段鼓勵用戶能源節約可減少電費支出。

- Conservation Needed / Power Watch :

黃色，電力觀察階段，需採取能源節約措施。此階段包括電能緊急警報(EEA)第 1 級及第 2A 級，第 1 級時須開始採購額外的電力例如由 DC 線路向外州購買電力，若無法獲得足夠電力則進入第 2A 級警報，由大型工業用戶開始啟用可停電力。

- Conservation Critical / Power Warning :

紅色，電力警告階段，所有能源節約措施是必須的以避免進一步的輪流停電。第 2B 級警報，啟用所有可停電力措施必且並請用戶停止非必要性用電，部分交通號誌亦可能會停止供電。

- Power Emergency / Rotating Outages :

黑色，輪流停電階段，第 3 級警報，此階段啟用輪流停電計畫以避免不可預期無法控制的系統全停電狀態發生。

5.1.3 限電事件經過

因為天氣嚴寒，自 2 月 2 日凌晨開始，ERCOT 轄區內機組陸續跳機解聯，圖 5.3 為 ERCOT 當日系統負載與發電機組排程，由圖中可看出自 0 時起原先預定之發電機排程發電量因發電機組跳脫解聯不斷下降，但系統負載卻因天氣寒冷不斷上升，至清晨 5:43 起機組排程發電量已低於系統負載，故開始進行緊急負載限制。

圖 5.4 為 2 月 2 日上午 ERCOT 緊急限電事件處理經過，配合圖 5.5 系統頻率與緊急負載限制關係可知 ERCOT 執行負載限制的時機，和頻率趨勢有關，這點與 ERCOT 規定相符合，而緊急負載限制之經過摘要如下：

00:00AM-05:20AM 系統中 50 部以上發電機組跳脫，容量超過 7,000MW

04:00AM 啟用 1,804MW 冷機備轉容量

05:20AM 備轉低於 1,750MW，ERCOT 宣佈進入電能緊急警告 EEA 2A，
使用負載電源（Load Resources）亦即需量反應

05:43AM 系統備轉不足且系統頻率低於 59.8HZ，ERCOT 宣佈進入電能
緊急警告 EEA 3，發布緊急負載限制 1,000MW

06:04AM 系統頻率偏低，ERCOT 發佈指令再增加緊急負載限制
1,000MW（共 2,000MW）

06:23AM ERCOT 發佈指令再增加緊急負載限制 2,000MW（共 4,000MW）

01:07PM 限電中止，完全復電

01:57PM 恢復負載電源（Load Resources）亦即停止使用需量反應

02:01PM 電能緊急警告 EEA 由 3 降至 2B

03:14PM 電能緊急警告 EEA 由 2B 降至 2A，並保留 2A 等級直至 2 月 3 日上午 10 時

07:15PM 冬季尖峰用電創新高 56,480MW

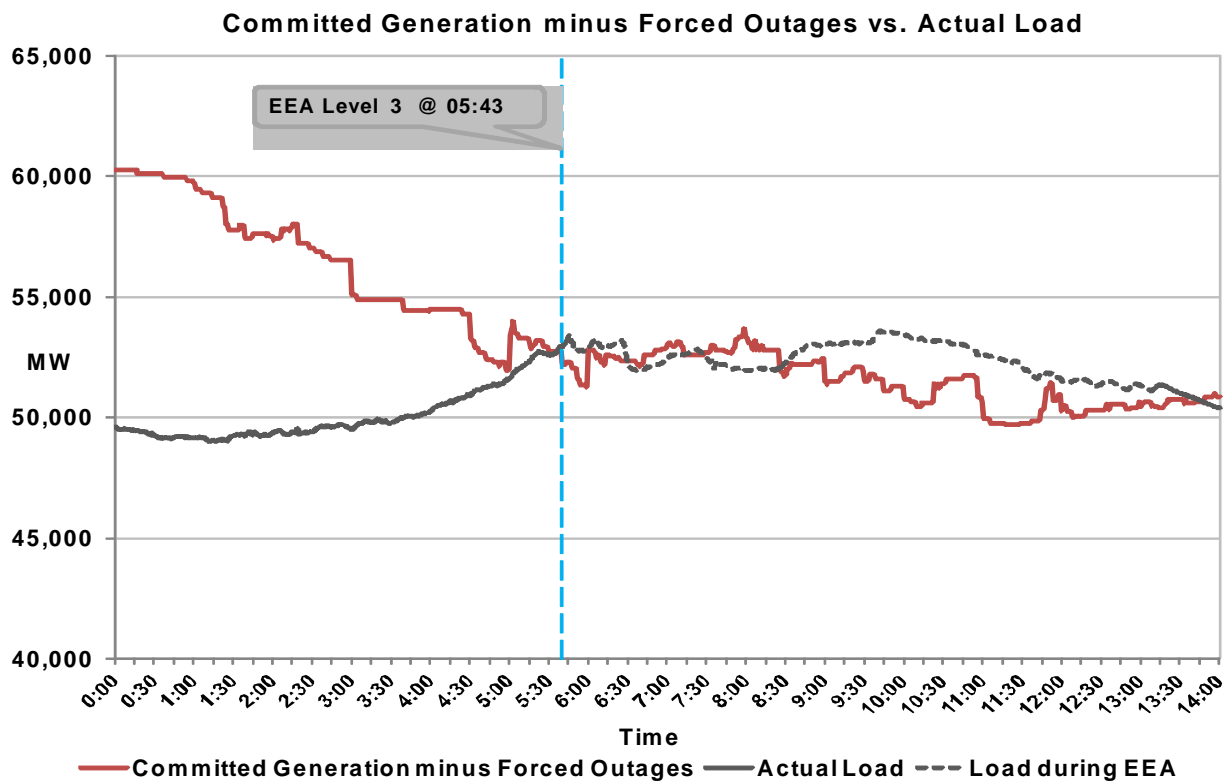


圖 5.3 2011 年 2 月 2 日 ERCOT 負載與扣除故障機組後之機組排程

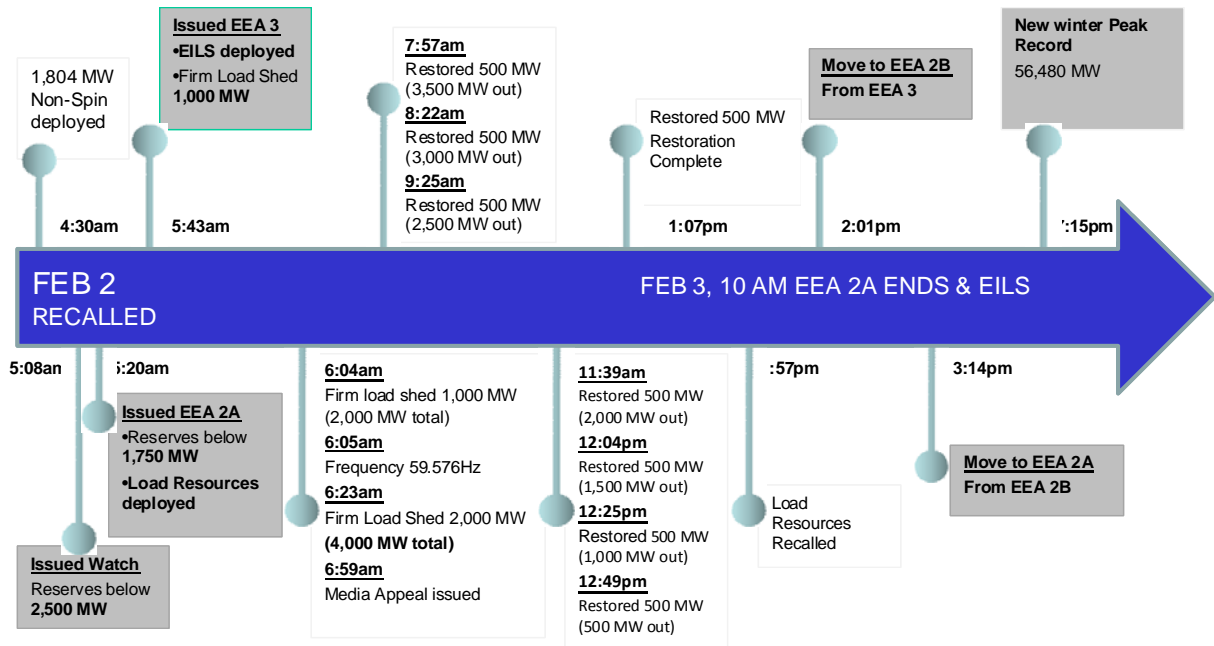


圖 5.4 2011 年 2 月 2 日上午 ERCOT 緊急限電事件處理經過

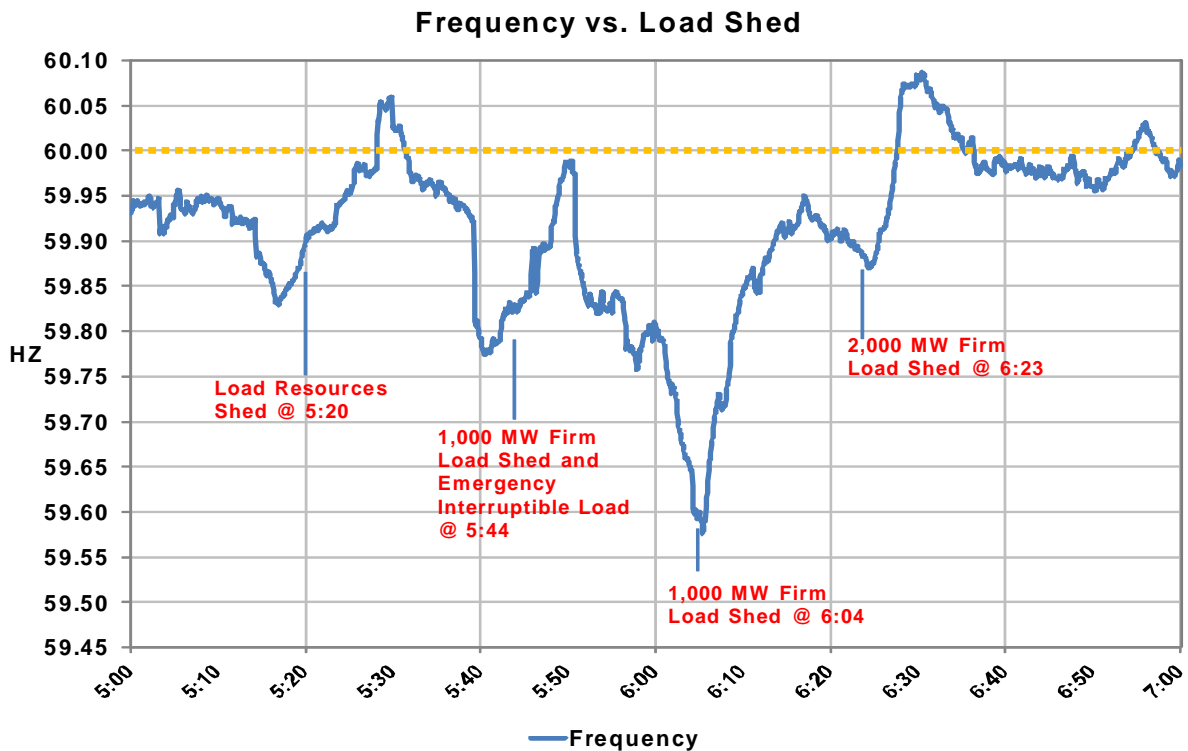


圖 5.5 2011 年 2 月 2 日上午 ERCOT 系統頻率及緊急限電之執行

5.1.4 事件檢討

1. 此次限電事件肇因於氣候異常寒冷導致大量發電機組跳脫解聯，圖 5.6、5.7 及表 5.3 分別為 ERCOT 系統 2005 年至 2011 年最冷 50 天跳脫機組統計、各地區氣溫與跳脫機組裝置容量、各發電公司跳脫機組及燃料別，因此在調查事故報告中建議可靠度協調單位與電力平衡商應要求發電業提供有關機組溫度限制精確資料，以便極端氣候時了解機組可用與否，而發電業本身也應確保防凍設施的適當興建與維護及檢查。
2. 天然氣複循環機組佔系統故障跳脫機組比例甚高，如圖 5.8，部分原因在於天然氣供應設備因氣候因素故障無法使用，調查事故報告中亦建議採防凍標準較高之天然氣生產設備。
3. 圖 5.9 為 2 月 2 日當日 ERCOT 系統風力預測與實際發電量中可以看出風力機組發電於 15 時以前皆低於預測，亦影響此次限電事件。

Daily Cumulative Forced Outage Capacity on 50 Coldest Days
2005 - 2011

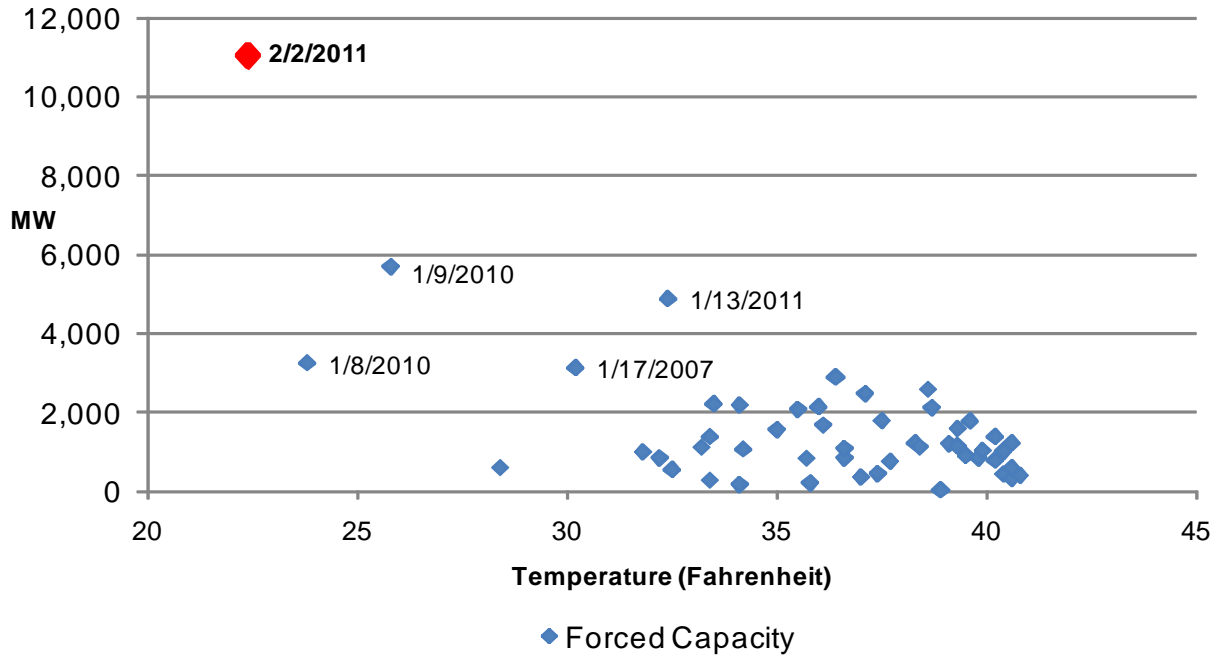


圖 5.6 ERCOT 系統 2005 年至 2011 年最冷 50 天跳脫機組統計圖

發電公司	總計	天然氣	褐煤	次瀝青煤	汽電共生	廢熱	水力
AIR LIQUIDE LARGE INDUSTRIES US LP (RE)	2	2					
BRAZOS ELECTRIC POWER CO OP INC (RES)	3	1		1			1
BRYAN TEXAS UTILITIES (RES)	1						
CALPINE CORP	22	15					7
CER COLORADO BEND ENERGY PARTNERS LP (RE)	1	1					
CITY OF AUSTIN DBA AUSTIN ENERGY (RES)	4	4					
CITY OF GARLAND (RES)	2	1		1			
CPS ENERGY (RE) BRAUNIG_AVR1_CT1	11	9		2			
DENTON MUNICIPAL ELECTRIC (RES)	1			1			
EXTEX LAPORTE LP	4	4					
FPLE FORNEY LLC (RE)	1	1					
FRONTERA GENERAL LIMITED PARTNERSHIP	3	2					1
GEN TEX POWER CORP	3	3					
GEUS (RES)	1			1			
GIM CHANNELVIEW COGENERATION LLC (RE)	2	2					
GUADALUPE POWER PARTNERS LP	3	3					
HAYS ENERGY LP	4	4					
INVISTA SARL_DUPV1_DUPV1_G1	1	1					
INGLESIDE COGENERATION LIMITED PARTNERSHIP	2	1			1		
KIOWA POWER PARTNERS LLC (RES)	3	3					
LOWER COLORADO RIVER AUTHORITY (RES)	2	2					
LUMINANT GENERATION COMPANY LLC	9	7	2				
MIDLOTHIAN ENERGY LP	3	3					
NRG TEXAS POWER LLC (RE)	8	7	1				
NUECES BAY WLE LP (RES)	3	3					
OAK GROVE MANAGEMENT COMPANY LLC (RE)	2		2				
ODESSA-ECTOR POWER PARTNERS LP	1	1					
OPTIM ENERGY ALTURA COGEN LLC (RE)	4	4					
OXY VINYLS LP	3	2			1		
RIO NOGALES POWER PROJECT LP	2	2					
SOUTH HOUSTON GREEN POWER LP_AMOCOIL_AMOCO_S2	1						1
SOUTH TEXAS ELECTRIC CO OP INC (RES)	4	2	1				
TENASKA GATEWAY PARTNERS LTD (RE)	2	1					1
WHARTON COUNTY GENERATION LLC	1	1					
合計	120	93	7	7	2	10	1

表 5.3 2011 年 2 月 2 日至 4 日 ERCOT 系統各發電公司跳脫機組及燃料別

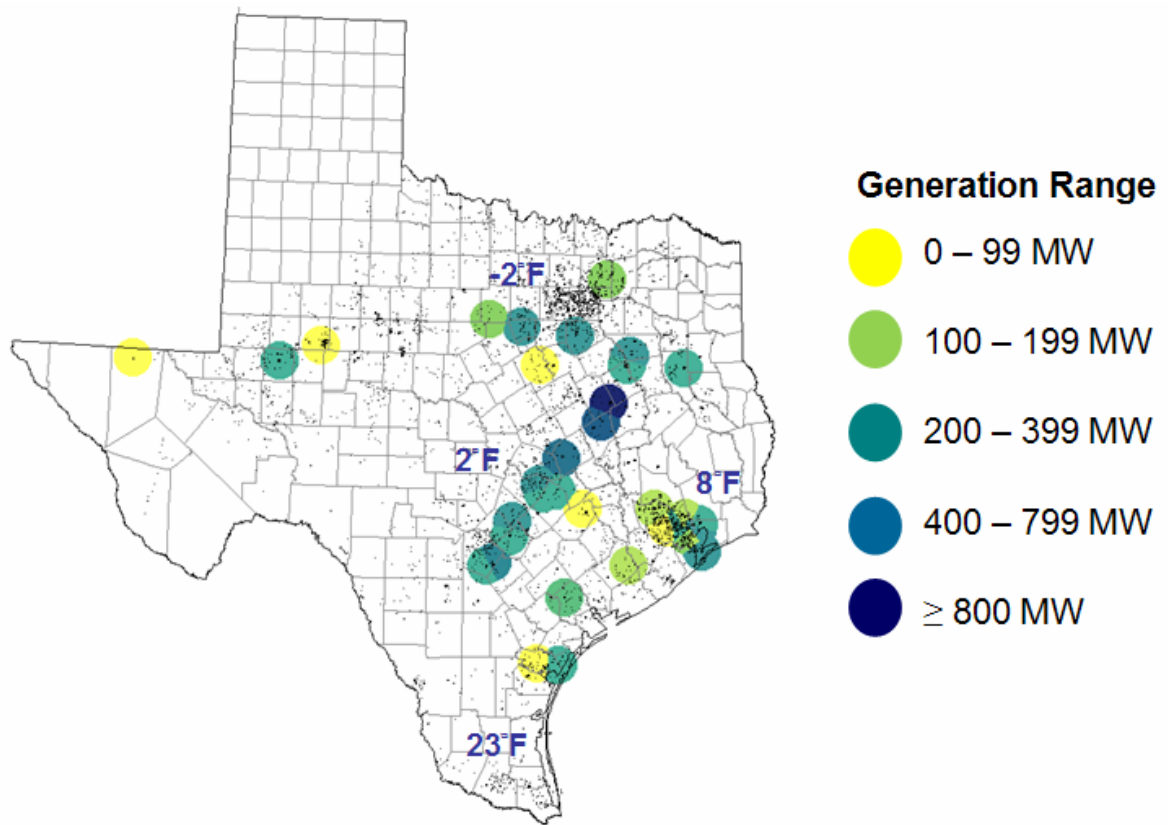


圖 5.7 2011 年 2 月 2 日 ERCOT 系統各地區氣溫與跳脫機組裝置容量

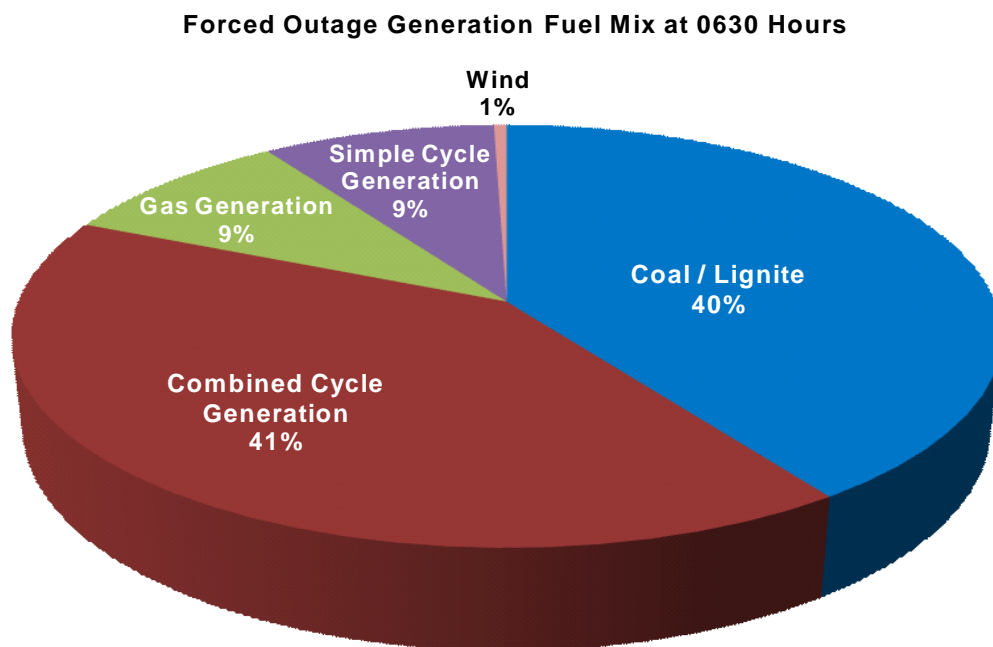


圖 5.8 2011 年 2 月 2 日上午 6:30 ERCOT 系統跳脫機組之燃料別

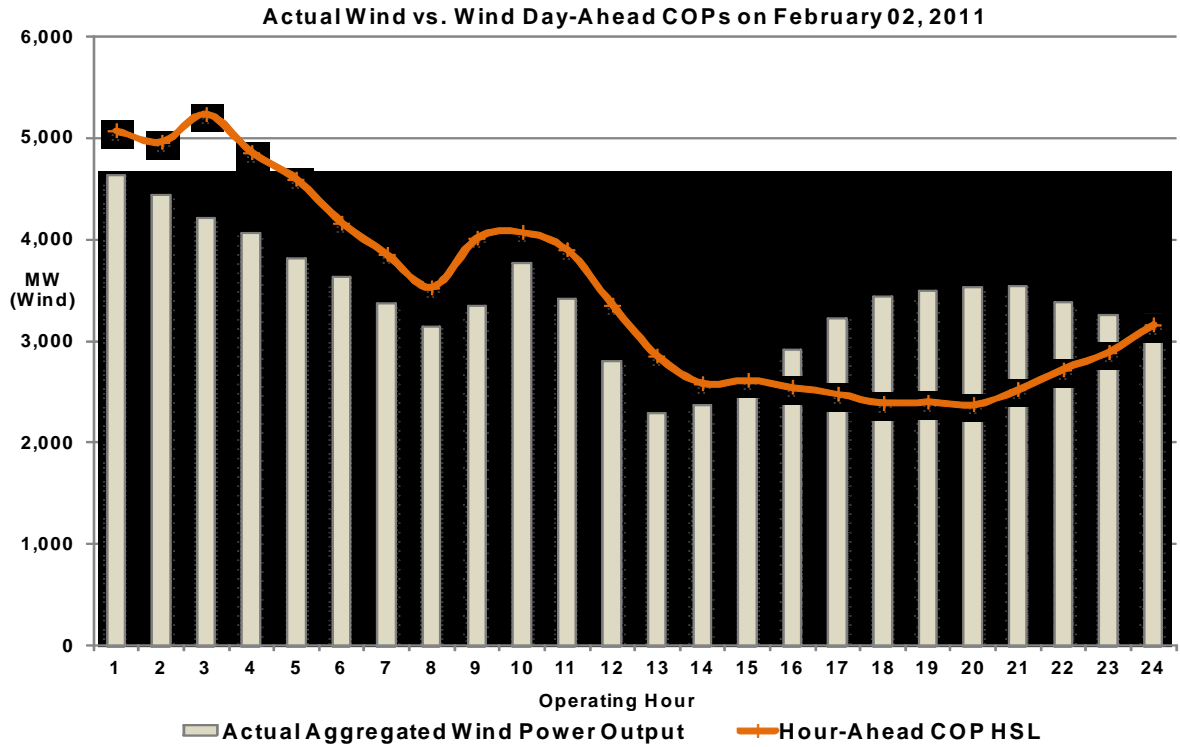


圖 5.9 2011 年 2 月 2 日當日 ERCOT 系統風力預測與實際發電量

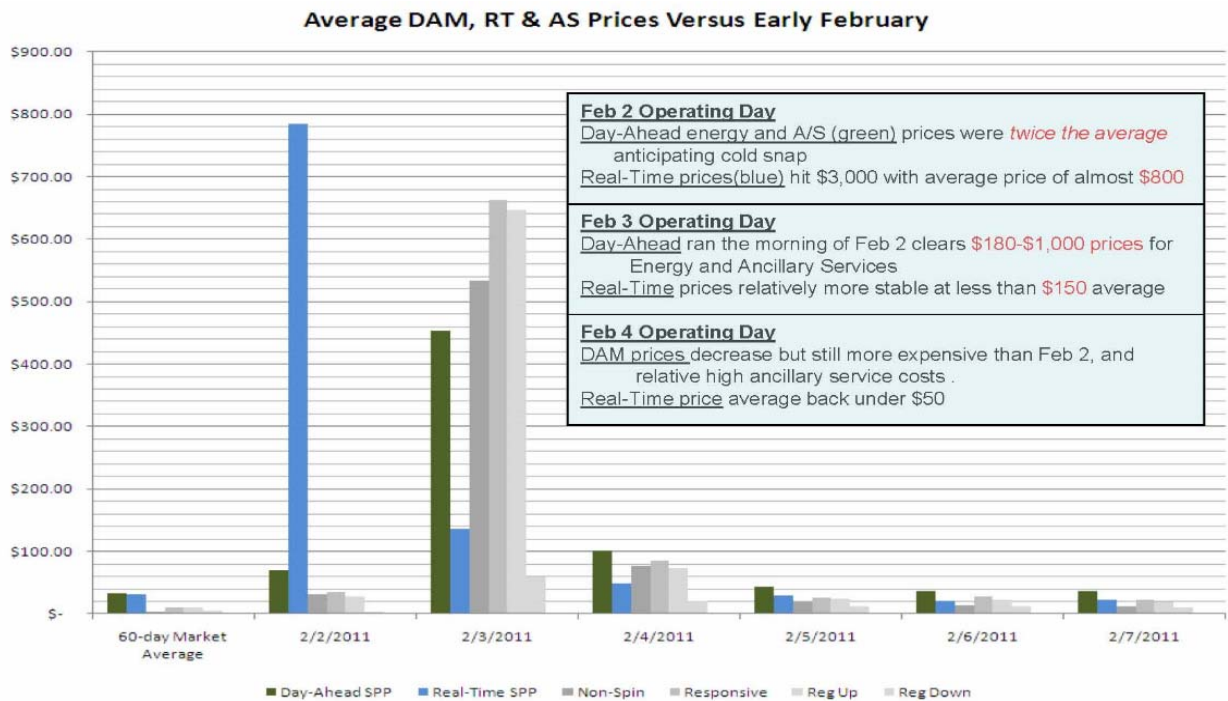


圖 5.10 2011 年 2 月第一星期(2 日至 7 日)之電價統計

5.1.5 心得感想

1. 2月2日當日即時電力市場電價曾衝上3,000美元/MW，如圖5.10所示，雖經過調查無人為炒作跡象，但可以看到自由化電力市場的電價波動幅度。
2. 在 ECORT 電能緊急警報(EEA)與外界溝通方式簡表中，我們可以發現 ERCOT 新聞發佈的方式除了傳統的媒體外，另外增加使用了網路的社群工具如：Twitter、Facebook 等作為對外發佈消息的平台，提升資訊流通速率。
3. ERCOT 調度中心為因應暴風雪來臨，雖然已事先對調度運轉作出調整，調度人員在面對超過運轉準則的系統超大型事故，雖發佈了三次總計 4,000MW 的負載限制，但卻成功地避免了事故擴大並維持系統持續運轉，在專業人員的眼光中表現可圈可點，然而事後卻仍然得面對外界大眾的批評，媒體及民眾對於調度工作的要求標準是嚴格的，這是身為台電調度中心一員的我必須有的體認，而我們能做的除了持續地對外界說明調度工作內涵外，就是不斷的提升自己在調度領域的專業素養，訓練自我危機處理的意識。
4. 在 2011 年 2 月 ERCOT 的輪流限電事件中，由於 ERCOT 事故擴大開始於 2 月 1 日的深夜至 2 月 2 日的凌晨，當緊急輪流限電開

始執行時間點為 2 月 2 日的清晨，ERCOT 調度中心人員雖然依規定提報通知，但因某些通報方式是電子郵件或簡訊方式通知，所以雖然是第一時間發送緊急輪流限電通知，但收訊者卻沒在第一時間得知消息，反而是在早晨藉由新聞媒體得知輪流限電消息，故引起諸多微詞。藉由此事件對我們有一個重要的提醒，那就是對外聯繫通報執行的細膩性是十分重要的。

5.2 北美同步相量發展計畫工作小組會議

北美同步相量發展計畫 (North American SynchroPhasor Initiative, NASPI) 是由美國能源部 (U.S. Department of Energy, DOE) 及北美可靠度委員會 (North American Electric Reliability Corporation, NERC) 所共同推行的計畫組織，其目標為藉由推展大區域的同步相量量測、監視及控制技術，進而改善電力系統的可靠度。

因此 NASPI 的主要任務是在北美電力互聯網內推廣發展一套健全的、廣泛接受且安全的同步資料測量設施，並推展在系統分析、計劃及運轉上的監視控制相關應用。

由於本次研習主題「發電機組機組線上參數識別」必須利用同步向量量測裝置 (PMU) 所量測的資料進行參數的比對，因此在 ESRC 李偉仁教授的推薦下於 2 月 23 日、24 日參加北美同步相量發展計畫工作小組會議 (NASPI Working Group Meeting)。

5.2.1 議程介紹

北美同步相量發展計畫 (NASPI) 每個月召開一次工作小組會議 (Working Group Meeting)，分別在 2 月、6 月、10 月擇地舉行。

會議議題可分為下列幾類：

- 大會致詞：由美國能源部 (DOE)、北美可靠度委員會 (NERC)、北美同步相量發展計畫 (NASPI) 等來賓說明目前政策發展走向及

未來展望。

■ Vendor – Applications：供應商介紹最新軟體應用。各廠家及其應

用展示如下：

- Alstom Grid – Using PMUs to enhance control center capabilities
- OSIsoft – Using PI as a real-time and archival synchrophasor data system
- Electric Power Group & CAISO – Going beyond visualization with synchrophasors at CAISO
- InStep Software & SCE – Supporting SCE’s Smart Grid Initiative
- Space-Time Insight – Real-time event analysis using complex event processing for actionable situational awareness
- Beijing Sifang Automation – PMU application in power system dynamic monitoring and control
- Psymetrix Ltd. – New phasor data applications in Europe
- Siemens Energy – Dynamic network and protection security of transmission systems
- V&R Energy – Region of Stability Existence Software

■ SGIG Awardees Respond to Vendors：各智慧型電網投資補助金

（Smart Grid Investment Grants）獲獎人對供應商之回應。本次會

議回應人員來自：BPA、ISO-NE、MISO、Entergy、CAISO、NYISO、

PJM、WECC 等相關電力公司或調度中心。

■ Technical Demonstration：技術示範。本次由 SISCO、Cisco、OSIsoft、InStep、Space-Time Innovations、GE Digital Energy、EPRI 等進行 IEC61850-90-5 即時互連互通示範。

■ Concurrent Technical Panels：技術小組討論，討論主題為 Phasor data quality and availability – system data quality issues and performance, where do we lose the data?

■ Vendor – Hardware and Communications：供應商介紹最新硬體應用。各廠家及其應用展示如下：

- Schweitzer Engineering Labs – Solutions for the synchrophasor community
- ERLPhase Power Technologies & Manitoba Hydro – Effective use of PMU data for continuous recording and communications using DFR
- Grid Protection Alliance -- Phasor Gateways – sooner better than later
- Harris Corp. – Implementing cost-effective, mission-critical networks without going broke
- SISCO – Integration of phasor data using the IEC Common Information Model and PMU Registry
- Real-Time Innovations – What is NASPInet anyway?

■ Task Team Reports：各任務工作小組報告，NASPI 共有三個任務

工作小組分別為數據與網路管理工作小組（Data & Network Management Task Team）、性能與標準工作小組（Performance and Standards Task Team）、研究及倡議工作小組（Research Initiatives Task Team）。

5.2.2 與會心得

1. NASPI Working Group Meeting 的參加成員包含 DOE、NERC、各 ISO、電網及發電公司、設備製造商、軟體公司、學術及研究機構等，會議依設定的議程討論各發展領域目前概況。
2. 會議上可以看到 NASPI 對相量量測相關設備應用標準的更新，軟、硬體設備公司的最新產品及其應用，各 ISO 及電力公司對相量量測設備目前使用狀況，應用情形及遭遇問題，各學術單位對相量量測裝置的研究應用等，使大家了解目前在北美相量量測各領域發展的情況。
3. 會議並提供面對面的機會，讓相量量測資料的使用者（ISO 及電力公司的運轉人員）提出自身的使用經驗、對監控設備的使用需求，與參加會議的研究機構、軟硬體設備製造商直接對談，藉由使用者的經驗回饋，進行經驗交流，讓希望能提供設備或應用服務的與會者有新發展方向或嗅得新商機。
4. 經過兩天會議行程後，個人對於會議舉辦方式十分佩服，藉由議

程安排，讓使用者與設備供應商有直接溝通對話管道，在 PMU 相關協定的制訂上亦參考各方意見，不同工作小組在主持人帶領討論下，也能發覺潛在問題，將「團隊智慧」發揮到淋漓盡致。

5.3 發電機組機組線上參數識別

5.3.1 前言

電力系統運轉的目標為在系統及設備安全的狀況下追求其最佳經濟效益，在運轉效益的壓力下，電力系統的運轉點比以往更接近系統穩定極限，然而電力系統架構日趨複雜，如何精準掌握系統特性、確保系統安全運轉成為一項重要課題。

電力系統運轉特性可藉由動態模型和動態模擬呈現，因此電力系統規劃人員使用動態模擬分析去預測系統在不同情境可能的反應，並藉由分析結果去制定電力系統擴建計畫以解決系統問題，而電力系統運轉調度人員也根據系統模擬分析結果去制定運轉策略，以確保系統可以在安全運轉的狀況下降低運轉成本。然而，動態模擬結果是否真實呈現實際電力系統特性，關鍵在於系統動態元件參數是否準確。

一個由於系統動態參數的準確性不夠，導致模擬結果不準確的著名例子為：1996年8月美國西部電網（WSCC）停電事故，如圖 5.11 所示，電腦模擬的結果顯示系統並沒有發散，但系統實際的狀況卻是發散的，因此錯誤的動態元件參數將導致系統運轉及規劃人員無法預先藉由動態模擬分析了解系統狀況，排除可能引起事故的潛在因子。

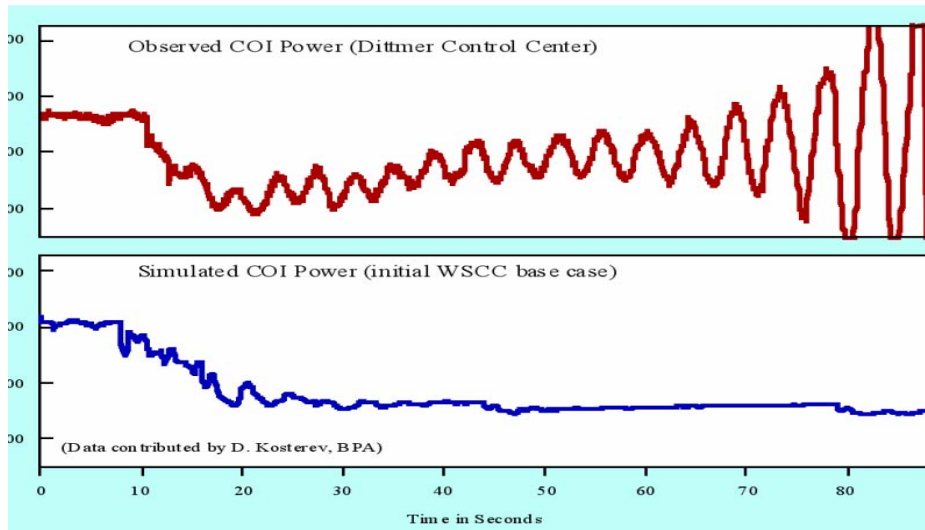


圖 5.11 WSCC 停電事故實際與模擬結果比較

電力系統的動態分析所需模型如發電機、勵磁機、調速機及負載等，其特性參數最準確的量測方式就是現場量測，然而現場量測存在幾項缺點，如：需耗費大量人力、時間及金錢、機組必須停機測試、某些極端測試項目（如全載跳脫）對機組設備可能照成損害，以美國自由化市場為例，要求發電業者實地測試並不可行或甚至不可能。

5.3.2 發電機組機組線上參數識別介紹

為驗證本公司發電機組動態參數之準確性，公司已成立「發電機模型參數量測專案小組」對發電機組之參數進行實地測試，重新確認發電機組模型參數，然而公司內發電機組眾多，所需測試排程極長。

美國德州大學阿靈頓分校的能源系統研究中心近年正與美國德州 ERCOT 系統進行線上機組參數識別之研究，其計畫乃是採用系統中所裝置之相位量測裝置(PMUs)、保護電驛、特殊保護系統 (SPS)、故障資料記錄器、EMS

(Energy Management System) 等設備所擷取之歷史量測數據，配合參數模型辨識方法，以 PSS/E 為動態響應模擬分析工具，透過極小化動態模型與實際系統量測資料之間的誤差準則來確定模型的參數，在不影響發電機組實際運轉的情況下，進行發電機組動態模型響應驗證。

此種以線上實際量測數據作為設備參數估算方式為一新的概念，北美的智慧型電網投資獎助金 (The Smart Grid Investment Grant) 對於此議題亦相當重視，同時挹注相當人力及物力於此相關研究，雖然目前尚無電力公司的具體實際運用，但根據目前研究成果，離實際應用距離已經不遠。

5.3.3 NERC 對系統動態資料要求

為維護北美電力系統互連網系統可靠度分析模型的正確性，北美可靠度委員會 (NERC) 的可靠度標準 (Reliability Standards) 於系統動態資料的要求與報告程序 (MOD-013-1 — RRO Dynamics Data Requirements and Reporting Procedures) 中規定：

1. 在北美三大互聯網 (Eastern, Western, and ERCOT) 內的各區域可靠度組織 (Regional Reliability Organization) 需協同區域內之發、輸電業者及發、輸電規劃部門，共同研商對區域內系統動態參數的要求及資料報告程序，以作為系統模擬及分析使用。各互聯網內的動態資料須包含下列需求：
 - a. 新的或維護更新過的同步機 (發電機及馬達) 勵磁系統的設計資

料，應於加入系統三個月以前提供，若無法於三個月前提供確實資料，也應提供相同類型相似機組的估算資料或製造廠家的設計參數。

- b. 發電機及同步馬達之模型參數 (inertia constant, damping coefficient, saturation parameters, direct and quadrature axes reactances and time constants)、勵磁系統、電壓調整器、渦輪及調速機系統、電力系統穩定器及其他發電機相關設備之動態參數。
 - c. 系統中動態元件如 static VAR controllers, high voltage direct current systems, flexible AC transmission systems, static compensators 之動態參數。
 - d. 反映電力系統電壓、頻率與負載 (Demand) 特性之關係的系統動態參數。
 - e. 前述所提供之系統動態參數須與穩態參數相符合。
2. 各區域可靠度組織應將區域內之動態參數資料要求及資料報告程序予以編輯成正式文件，並定期更新檢視前述資料 (至少每五年更新一次)，並提供給 NERC、其他區域可靠度組織及互聯網系統使用者作為參考 (提出需求五個工作天內)。

5.3.4 發電機模型介紹

有關發電機各控制系統簡介如下：

■ 發電機勵磁控制系統

發電機勵磁控制系統由發電機和電力系統、勵磁功率部件、勵磁控制部件、發電機電壓和無功調差單元、以及電力系統穩定器（簡稱 PSS）組成。發電機電壓測量和虛功調差單元形成需要控制的偏差信號。勵磁控制部件實現勵磁穩定控制和限制功能，由 PID 或軟回授校正部件、功率控制部件、補償勵磁機時間常數的回授部件、頂值限制部件、過磁通（伏/赫）限制部件、過勵限制部分和低勵限制部件等組成。

勵磁系統按照勵磁功率部件不同，分為以下三種類型：

- a) 直流勵磁機勵磁系統；
- b) 交流勵磁機勵磁系統，包括靜止或旋轉、可控或不可控的整流器；
- c) 靜止勵磁系統，包括自並勵靜止勵磁系統、恒定電壓源靜止勵磁系統和
交流側串聯自複勵靜止勵磁系統。

勵磁系統穩態模型的選擇及參數處理方法

- a) 選擇與原型模型相同的勵磁系統類型。
- b) 控制部件、電壓測量、頂值限制和電力系統穩定器部件結構與原型模型一致，或者原型部件模型可以通過等值變換獲得穩定計算用部件模型。

- b) PSS 輸出信號相加點、用作勵磁穩定器的軟回授和用作減少勵磁機時間常數的回授相加點與原型模型一致。
- c) 當並聯型 PID 可以轉換為串聯型 PID 而不出現非負實數根情況，也認為並聯型 PID 與串聯型 PID 有一致的結構。
- d) 原型模型中有多個限幅可以採用穩定計算用模型的限幅替代。
- e) 將原型模型中多個串聯的小時間常數慣性部件合併為一個慣性部件，等效時間常數等於各個時間常數之和。勵磁系統各部件中最小時間常數不得小於 20ms。
- f) 穩定計算用模型中多餘的部件應設置相應參數使其不起作用。如回授部件應設置其增益為零。如超前滯後部件應設置超前與滯後的時間常數相同。
- g) 消除死帶。

■ 發電機組調速系統模型

發電機組運轉狀況與原動機調速系統有著緊密的聯繫，一個良好的調速系統可以保證發電機組和電力系統的安全可靠，並且可以提高發電機組和電力系統的技術經濟指標。機組空載運轉時，它調節發電機的轉速；機組併網運轉時，它根據系統頻率的變化，調節發電機輸出的實功率，與其它機組的調速器共同維持電力系統的頻率在規定的範圍內；電力系統發生故障致使

某些機組跳機時，它可以使備用發電機組迅速啟動和併網，確保電力系統穩定運轉。此外，水力發電機組在電網中常常擔任調頻調峰任務，開停機頻繁，其調速器性能的好壞，自動化水準的高低，直接影響到機組的正常運行。

➤ 水輪機調速系統的數學模型

對於水輪機，由於水流在水輪機及引水管道中存在慣性，產生動態過程，這一過程稱為水錘效應。壓力導管中的水在穩態情況下，水的流速一定，沿導管每處的壓力也一定。當迅速開閉導葉的開度時，導管中的壓力也將急劇發生變化，突開時，壓力下降；突閉時，壓力上升，水輪機的推動功率也隨著改變，這種現象稱之為水錘現象。它使水輪機的功率不能立即隨開度增減，而需要一個時間延遲。

考慮到水錘效應，對於水輪機（包括引水管道）可以建立多種不同詳細程度的模型，比如，假設水流為剛性時的非線性模型，簡化線性模型，行波模型，彈性水力系統非線性模型等，需要根據實際系統，考慮不同的模型特性，選擇最適合研究目的的模型。

圖 5.12 所示模型為水輪機及其調速系統模型 HYG0V。由兩部分組成，上面部分是調速器部分，下面則表示非線性的剛性水流水輪機。由於前面已經介紹過這種水輪機數學模型，故這裡不贅述。調速器部分採用轉速偏差作為輸入信號。模型中 R 為永態轉差係數，典型值為 0.05 (pu)； T_f 為濾波時間常數，典型值為 0.02 秒； T_r 為調速器控制時間常數，取值一

般為 2~20 秒； r 為暫態轉差係數，一般 $r = \frac{T_\omega}{H}$ ，典型值為 0.1~1.0 (pu)；
 T_s 為伺服時間常數（引導閥，配壓閥以及接力器系統），典型值為 0.5 秒。
 D_{turb} 為調速器阻尼係數，典型值為 0.5；模型中還存在水門開啟速度限幅部
 件以及水門開度限幅部件。

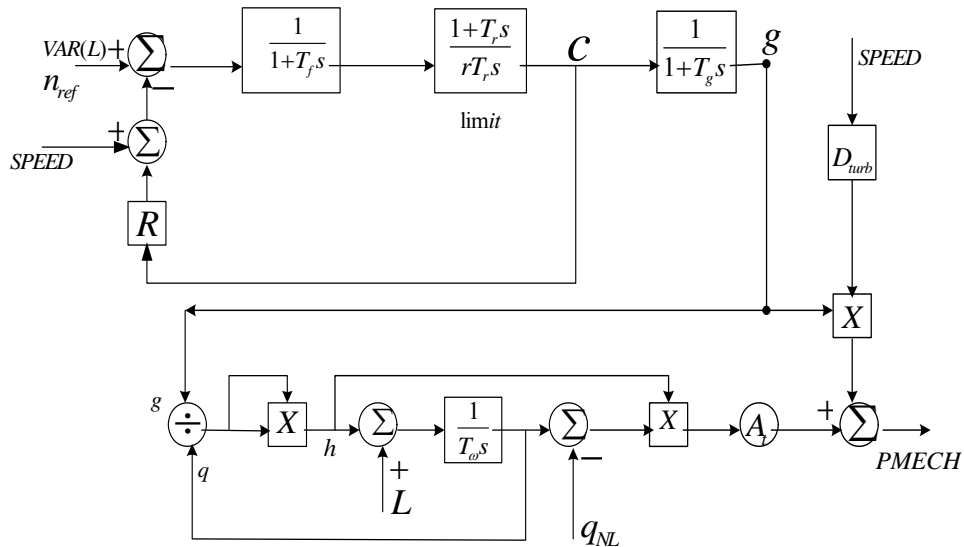


圖 5.12 水輪機調速系統模型 HYG0V

圖 5.13 所示水輪機及調速系統模型 WPIDHY，採用 PID 控制模式，
 同時具有轉速偏差與功率偏差控制模式，輸出為水輪機機械功率。採用線
 性水輪機模型。 D_{turb} 為調速器阻尼係數，典型值為 0.5。

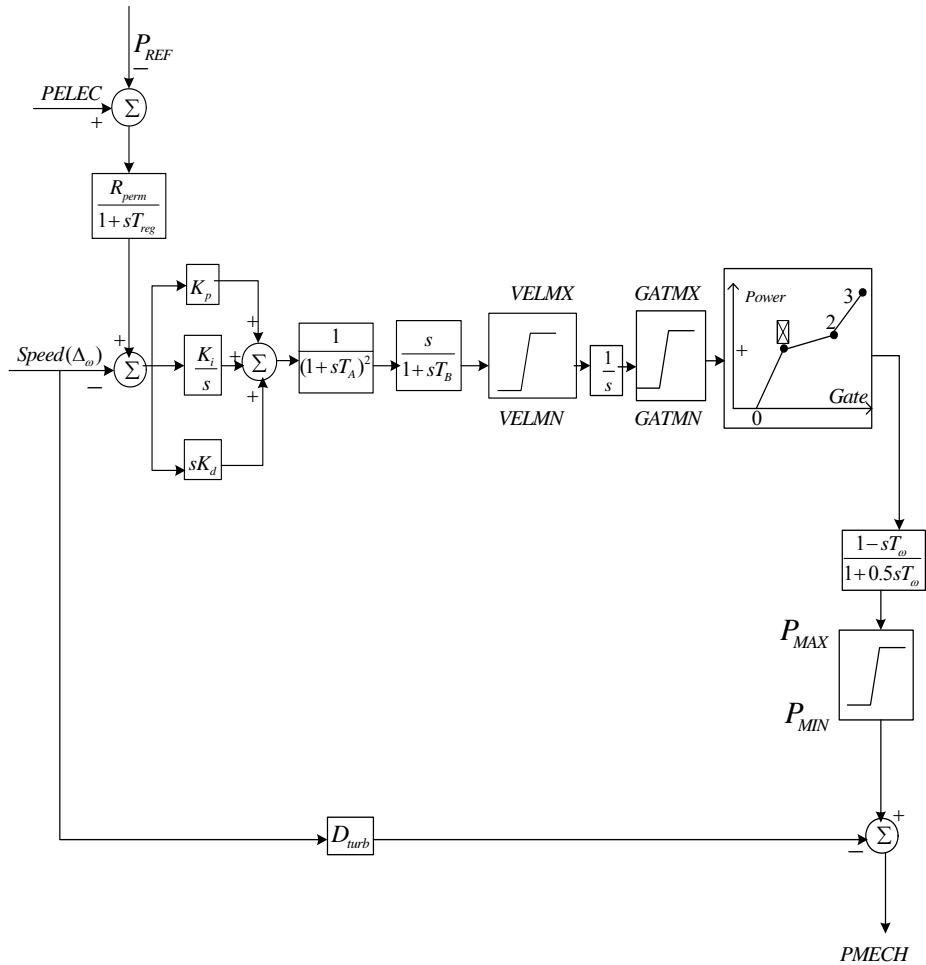


圖 5.13 水輪機調速系統模型 HYG0V

T_A 為配壓閥時間常數， T_B 為慣性部件； $\frac{1}{s}$ 為接力器部件；圖中 $Power-Gate$ 函數根據導葉開度求得對應水門輸入功率。模型中具有三個限幅部件，分別為：導葉開啟速度限幅部件、導葉開度限幅部件以及輸出功率限幅部件。

➤ 火力發電機的調速機模型

假設發電機組操作在固定機械功率輸出的汽輪機下。任何負載改變的結果將造成速度變化，若程度大到足以導致足以影響頻率敏感負載的操

作，此情形發生在系統頻率大幅漂移至可接受的限制外。為了克服這種情況加入管理機械功率的補償機制以及恢復頻率至標稱值。早期，這類的機械裝置利用”飛輪”去偵測速度並對速度變化做出對應的機械動作。現代的調速器利用電子裝置偵測速度變化，並結合電子、機械、流體力學的方式去做出必要的閥門位置改變。一個最簡單的調速器，稱為同步調速器，調節輸入閥門位置使頻率回到標稱值。如果我們將輸出速度偵測裝置簡單的直接連到閥門上，絕對不會使頻率恢復到標稱值。要強迫頻率誤差為零，一定要有一個控制動作去進行調整。剩餘動作就是達成結合實際速度與參考速度所得到的頻率(或速度)的誤差。速度控制機械如圖 5.14 所示。

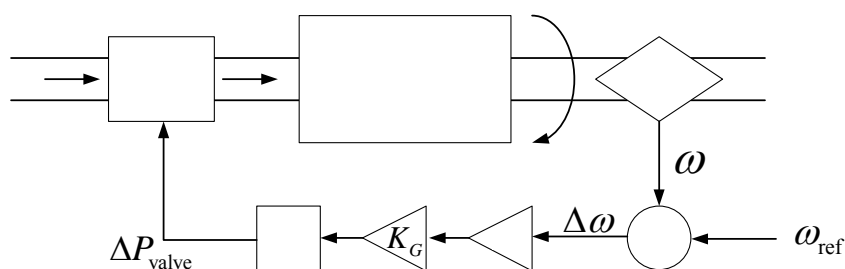


圖 5.14 同步調速器

速度量測裝置之輸出 ω 與參考值比較，產生誤差訊號 $\Delta\omega$ 。這個誤差 $\Delta\omega$ 乘上負號並且經過 K_G 放大作積分產生控制訊號 ΔP_{valve} ，這是由於當 $\Delta\omega$ 為負值蒸氣供應的閥門要打開。 $\Delta\omega$ 當完全等於 ω_{ref} ，蒸氣閥門停在新的位置上，使汽輪發電機滿足增加的電子負載。

圖 5.15 同步(定速)調速機不能被相同系統中連接兩個以上發電機使用。除非每個發電機有相同精確的轉速不然他們會互相”拉扯”，並且會依自己的

設定試著去拉系統頻率。要使發電系統中平行的發電單元能夠運作，調速器為了讓速度差為零必須回授不同的控制訊號給不同的發電機。藉由積分器的回授，就能夠達到調速控制。

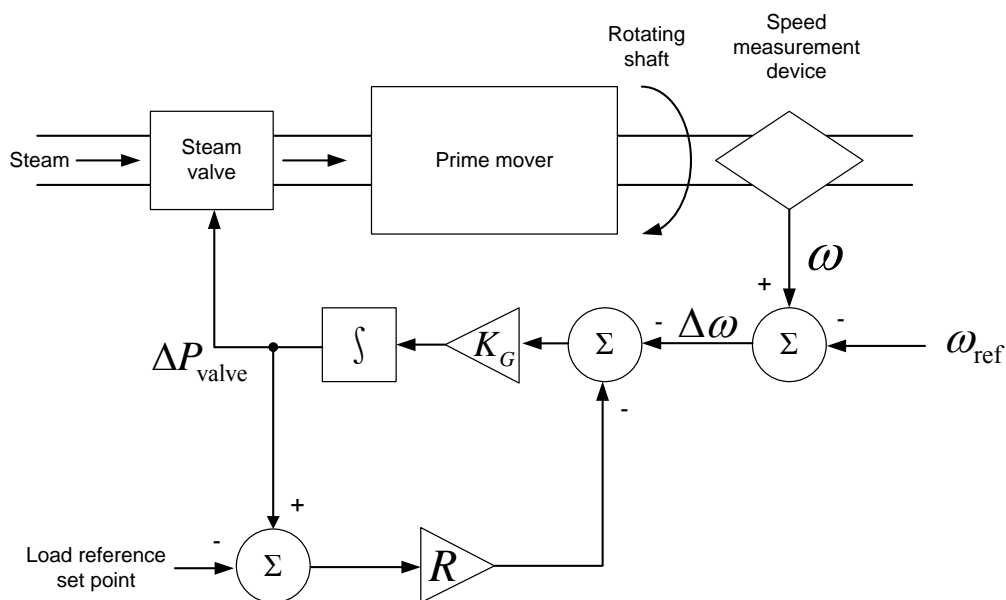


圖 5.15 包含降速回授之調速器

■ 火力發電蒸汽渦輪機模型

在發電廠裡，蒸汽機組包含了鍋爐、再熱器、渦輪機、冷凝器、馬達，還有包含給水預熱器與給水馬達的再熱循環。圖 5.16 一為典型的蒸汽機組。

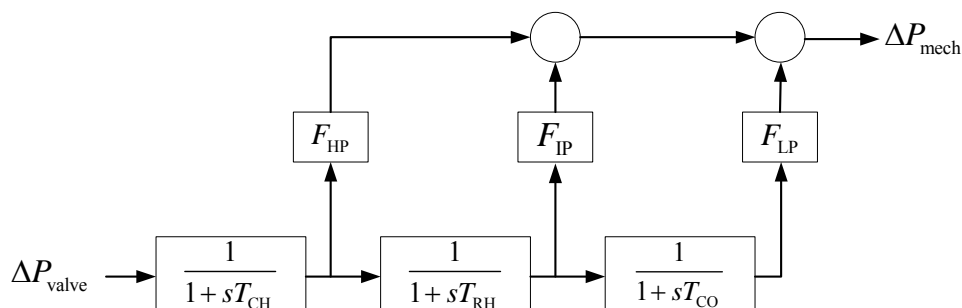


圖 5.16 串列混合式一次再熱式汽輪機模型

圖 5.16 可以表示所有串聯配置的一般蒸汽渦輪機模型。其中， T_{CH} 分別為汽箱、 T_{RH} 再熱、 T_{CO} 交叉的時間常數。 F_{HP} 、 F_{IP} 、 F_{LP} 則是分別為高壓、中壓與低壓渦輪機的權重參數。在圖 5.16 的循環中，蒸汽機產生的蒸汽經過了主控制閥門後，帶著高壓進入高壓渦輪機。然後經過中壓渦輪機、低壓渦輪機，最後到達冷凝器。在高壓、中壓、低壓的渦輪機可能被排出的蒸汽會被送到熱再生循環中的給水預熱器。機組運轉中，蒸汽通過低壓渦輪機，之後直接進入冷凝器進行凝結。在發電機裡，高壓、中壓、低壓渦輪機提供機械動力轉換成電能。然後凝結後的水，經由冷凝機的馬達送到再熱循環裡。為了穩定度分析，閥門控制系統、渦輪機、再熱器互相影響的響應必須納入考量。

在閥門運動與變化中的蒸汽流量之間，由蒸汽室與經由管道進入第一個渦輪機汽缸以及蒸汽進入再熱器與交叉管道均會引發延遲。要建構蒸汽系統動態研究中，需要能建構代表這些延遲的模型。此外，渦輪機的配置也會影響這模型。這些機組配置可能是串聯或者交叉的配置。單層或者兩層的再熱器都可能存在這些分類當中。

5.3.5 動態參數辨識流程

發電機組參數辨識流程圖如圖 5.17，各方塊圖說明如后：

■ 相量量測單元 (PMU Measurement)

PMU 資料須包含匯流排電壓(V)、角度(Angle)及相連各線路實功(P)、虛

功(Q)。為能增進發電機參數辨識的精確度所以資料長度至少要 12 秒以上(事故前 2 秒，事故後 10 秒)，而且取樣頻率應大於等於 30 samples/second。

■ 同步資料 (Sync Simulation time step corresponding to Sampling rate)

由於各個 PMU 所擷取到系統資料之時間標記並不一定與模擬計算所採用之時間間隔不一定相同，因此在計算前須將資料同步。

■ 系統初始狀況 (Initial Case)

系統初始狀態中欲進行參數辨識之發電機模型必須先為正確，如此才可對其既有參數進行辨識。

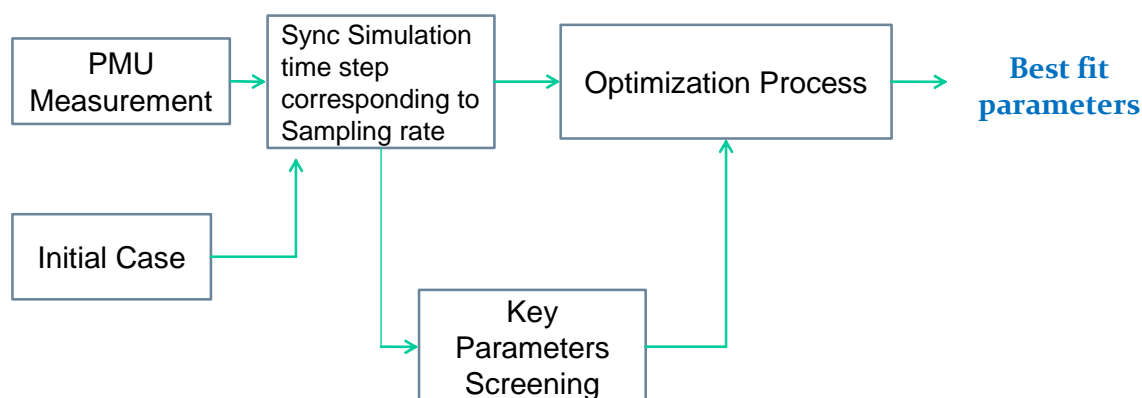


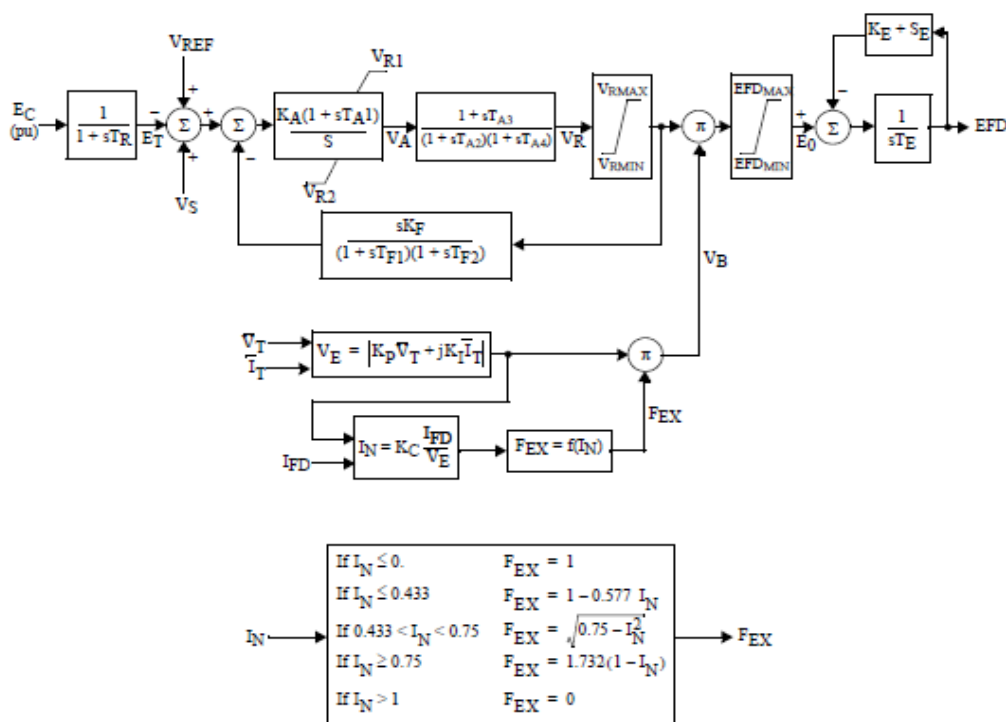
圖 5.17 機組參數辨識流程圖

■ 關鍵參數辨識 (Key Parameters Screening)

在包括勵磁系統、調速機系統及電力系統穩定器等發電機模型中，包含了數十種的發電機參數。以 ECORT 系統中某部發電機機組“EXPIC1”為例，其勵磁系統包含比例、積分的模型，即包含了 24 個動態參數，如圖 5.18 所示。太多的動態參數將會使參數辨識問題過度複雜化，然而根據以往各種

試驗及文獻顯示，並非所有的參數都與發電機遭遇擾動後的動態行為直接相關。

CONs	#	Value	Description	CONs	#	Value	Description
J			T_R (sec)	J+12			T_{F2} (sec)
J+1			K_A	J+13			EFD _{MAX}
J+2			T_{A1} (sec)	J+14			EFD _{MIN}
J+3			V_{R1}	J+15			K_e
J+4			V_{R2}	J+16			T_e (sec)
J+5			T_{A2} (sec)	J+17			E_1
J+6			T_{A3} (sec)	J+18			SE ₁
J+7			T_{A4} (sec)	J+19			E_2
J+8			V_{RMAX}	J+20			SE ₂
J+9			V_{RMIN}	J+21			K_P
J+10			K_F	J+22			K_I
J+11			T_{F1} (>0.) (sec)	J+23			K_C



If ($K_P = 0$ and $K_I = 0$), then $V_B = 1$.

If $T_E = 0$, then $EFD = E_0$.

$V_S = V_{OTHSG} + V_{UEL} + V_{OEL}$

圖 5.18 EXPIC1 的參數列表以及模型圖

因此在進行發電機參數評估之前，將對發電機動態參數依發電機硬體規格限制、模型方塊圖上各區塊表示意義及對動態反應的影響程度進行分類。

為了避免過多的動態參數將使參數辨識問題複雜化，所以在進行發電機參數評估之前，將對發電機動態參數，依發電機硬體規格限制、模型方塊圖上各區塊表示意義及對動態反應的影響程度進行分類。

類型 1：此類參數為發電機的硬體規格、飽和曲線之限制值如：

VRMAX,VRMIN,E1,SE(E1),E2,SE(E2)等，本類參數通常為固定值且極少變動，可合理的視為無需校正之準確值。

類型 2：其值為零之發電參數。此類參數代表此發電機在標準發電機模型方塊圖中並無此類型之子區塊。

類型 3：除類型 1 及 2 以外，影響動態事件輕微的發電機參數均可歸類至此類型。

類型 4：關鍵參數。除類型 1 及 2 以外，明顯影響動態事件的發電機參數均可歸類至此類型。

前述除了類型 4 為關鍵發電機動態參數，需放入演算法中進行辨識，其他類型 1、2、3 之參數由於極少變動或其值為零或影響甚小，因此將其排除在參數辨識的識別運算。如此將可有效減少參數辨識時計算上之龐大運算負擔，可有效減少運算時間。

■ 參數辨識最佳化 (Optimization Process)

機組所需辨識的參數眾多，為一多變數(高維度)的問題，且每次發電機動態響應模擬計算均需花費一定時間，因此最佳化演算法的選擇將影響發電機

機組參數辨識運算的效率，採用不同最佳化演算法所需之運算時間差異極大。

5.3.6 PSS/E 響應測試

使用 PSS/E 做動態響應模擬分析 (Dynamic Event Simulation) 時，程式會對全系統電力設備的模型進行模擬，因此會需要大量的電腦運算並增加計算時間。然而在發電機參數辨識過程中，並不需要對全系統的模型進行運算，而是利用 PSS/E 內的響應測試 (Response Test) 的功能，僅針對須進行分析的個別發電機模型進行模擬，利用此功能與動態響應模擬分析相比，可大幅減少電腦運算及計算時間。

在發電機參數辨識所使用的 PSS/E 的響應測試可分為調速機響應測試 (Governor Response Test) 及勵磁機響應測試 (Exciter Response Test)。

1. 調速機響應測試 (Governor Response Test) 介紹：

PSS/E 的調速機響應測試是模擬當發電機負載逐漸改變時，發電機調速機控制迴路的響應。其原本目的在於確認發電機的調速機增益 (governor gain) 及時間常數 (time constant) 等參數與實際發電機阻尼響應及其調校設定符合一致，所以我們可將其應用在發電機參數辨識中，作為調速機模型的關鍵參數辨識。

一開始會將發電機的出力固定在某一定值，通常設定為 0.8 標么，之後改變發電機渦輪機及調速機控制回路的參數，由發電機的響應觀測

其阻尼變化。接著漸進式地改變發電機的負載，每次約改變 0.1 標么的負載，重複改變渦輪機及調速機參數，由響應變化觀測發電機阻尼。

一般而言，水力機組調速機控制回路的阻尼會隨著負載增加而逐漸減小，所以在水力機組的測試上會以接近滿載的負載量去進行調速機響應測試。

2. 勵磁機響應測試 (Exciter Response Test) 介紹：

PSS/E 的勵磁機響應測試是使用步階響應測試勵磁系統，進而驗證勵磁系統的參數。PSS/E 中有兩個不同的步階響應測試，一為響應比測試 (response ratio test)，一為開迴路設定點測試 (open-circuit setpoint step test)。前述兩種測試原本目的在於確認發電機之勵磁機與調速機的動作行為特性，在此我們將其應用在發電機勵磁機模型的關鍵參數辨識。

在 PSS/E 的響應比測試 (response ratio test) 中，我們會以較大的增量去增加電壓調整器的參考設定點，測試旋轉勵磁系統直至輸出上限，每次測試期間至少須模擬 2 秒鐘，讓旋轉勵磁系統得以變化達其輸出上限，此測試中我們將觀察磁場電壓 (field voltage/ Efd) 變化。

在 PSS/E 的開迴路設定點測試 (open-circuit setpoint step test) 中，我們每次改變 5% 電壓調整器的參考設定點，觀察磁場電壓 (field voltage/ Efd) 及發電機端電壓 (terminal voltage /Eterm) 變化，而每次測試期間至少須模擬 5 秒鐘，讓勵磁系統變化達到穩定狀態。

經由響應比測試我們可以得到旋轉勵磁機的模型，而藉由開迴路設定點測試可以獲取有關電壓調整器的增益及時間常數資訊，所以在進行發電機勵磁機關鍵參數辨識時，我們將同時使用兩種響應測試去模擬發電機勵磁系統反應。

5.3.7 實例研究

在進行發電機參數辨識之前，我們必須要有可供參考比較的實際系統動態擾動資料，通常資料來源為同步相量量測單元(Phase Measurement Unit/PMU)，資料須包含匯流排電壓(V)、角度(Angle)及相連各線路實功(P)、虛功(Q)。為能增進發電機參數辨識的精確度所以資料長度至少要 12 秒以上(事故前 2 秒，事故後 10 秒)，而且取樣頻率應大於等於 30 samples/second。

由於系統中並不是每一個匯流排均有裝置 PMU，因此發電機在進行參數辨識時將須使用鄰近的 PMU 之紀錄資料，而除了須辨識之發電機匯流排及相鄰 PMU 匯流排外，其餘系統將進行系統簡化(System Reduction)。

■ 系統簡化(System Reduction)介紹：

在系統簡化的過程中，我們將使用混合式動態模擬 (Hybrid Dynamic Simulation) 來簡化系統，以下列三圖表示。圖 5.19：為原始系統結構，所需辨識之發電機組位於 subsystem 中，鄰近有 PMU 紀錄資料；

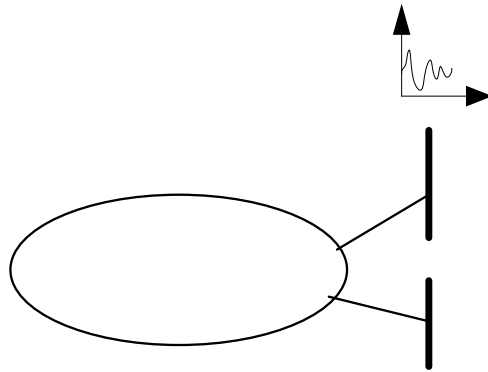


圖 5.19 系統簡化前之系統示意圖

圖 5.20：使用理想變壓器改變角度及電壓大小將系統簡化；

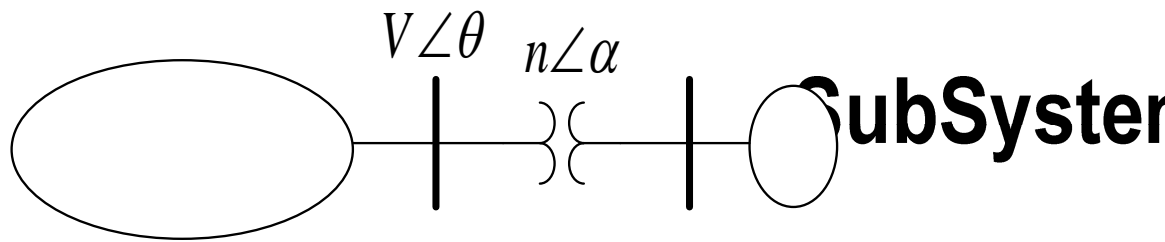


圖 5.20 使用理想變壓器進行系統簡化之系統示意圖

圖 5.21：可開始利用 PMU 量測資料進行參數驗證比對。

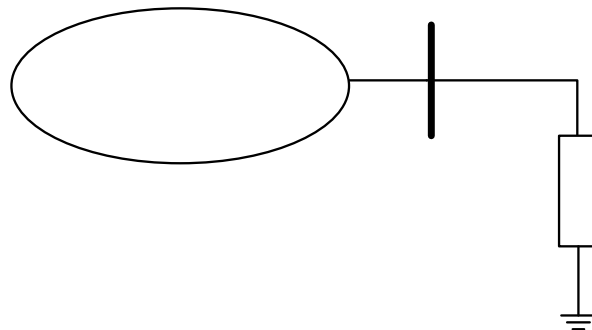


圖 5.21 系統簡化後系統示意圖

在系統簡化(System Reduction)後，接下來就要對發電機組參數改變對發

電機響應產生的影響進行分析，在此採用軌跡靈敏度分析(Trajectory Sensitivity)。

■ 軌跡靈敏度分析(Trajectory Sensitivity)介紹：

藉由改變發電機模型中之參數來觀察對發電機輸出端有效功率(P)及無效功率(Q)的影響。

$$\Delta P(t) = \frac{\partial P(t)}{\partial X_0} \Delta X_0 = P_{X_0}(t) \Delta X_0$$
$$\Delta Q(t) = \frac{\partial Q(t)}{\partial X_0} \Delta X_0 = Q_{X_0}(t) \Delta X_0$$

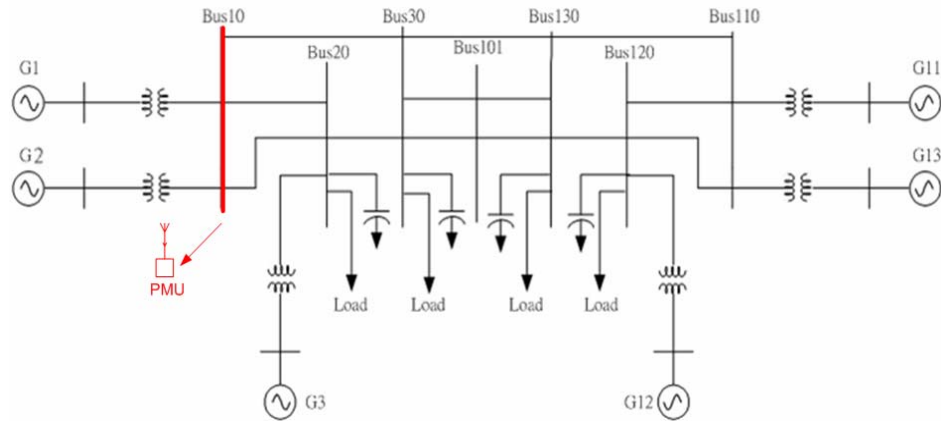
其中 X_0 為發電機模型中之參數。

於辨識運算的子程序中，發電機模型中的各參數將分別的連續改變並進行發電機動態響應模擬，監視參數變化前後對發電機輸出之 P、Q 波形的影響，並藉由比較 P、Q 波形均方根誤差(mean squared error /MSE)，篩選出較為關鍵之發電機參數。

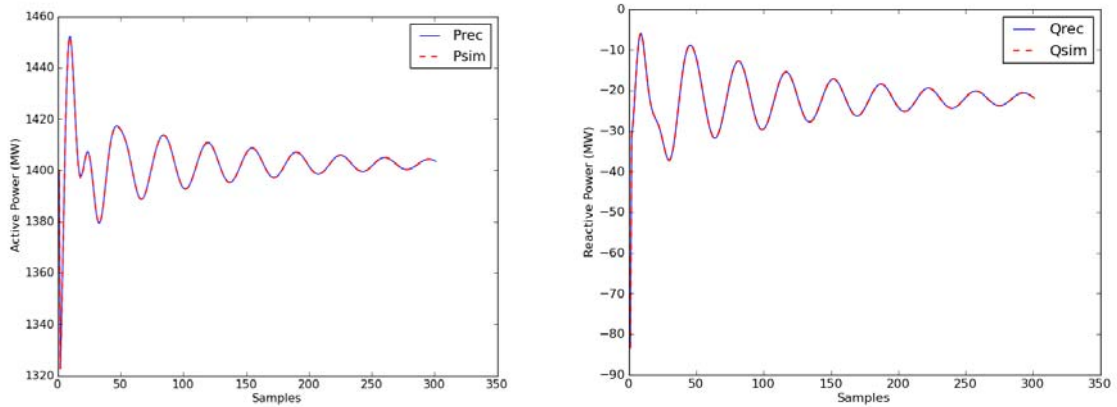
由於機組所需辨識的參數眾多，為一多變數(高維度)的問題，且每次發電機動態響應模擬計算均需花費一定時間，因此最佳化演算法的選擇將影響發電機機組參數辨識運算的效率，不同最佳化演算法間所需之運算時間差異極大。

■ 案例研究

以一個 6 部機組測試系統來評估辨識程序，其中 PMU 裝設在 Bus10。

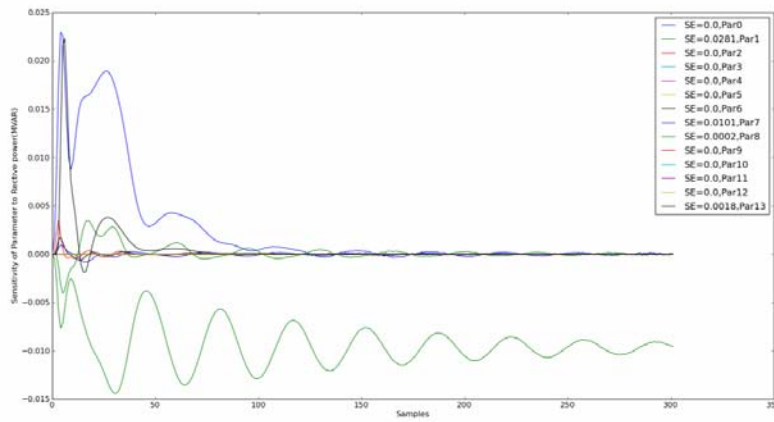
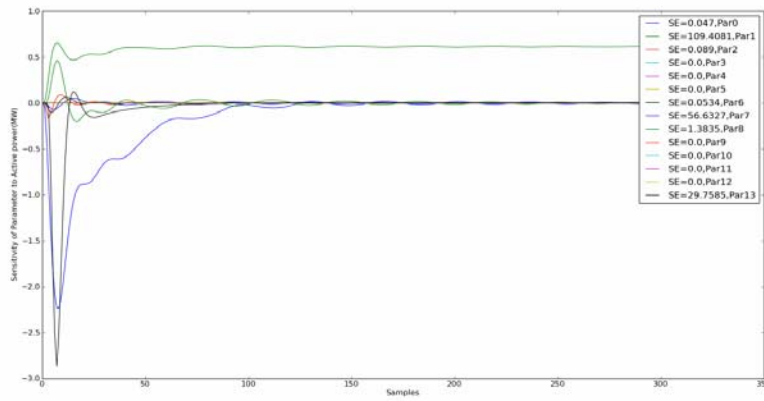


經混合式動態模擬 (Hybrid Dynamic Simulation) 簡化後之網路與簡化前之網路之 P、Q 均相同，如下圖所示：



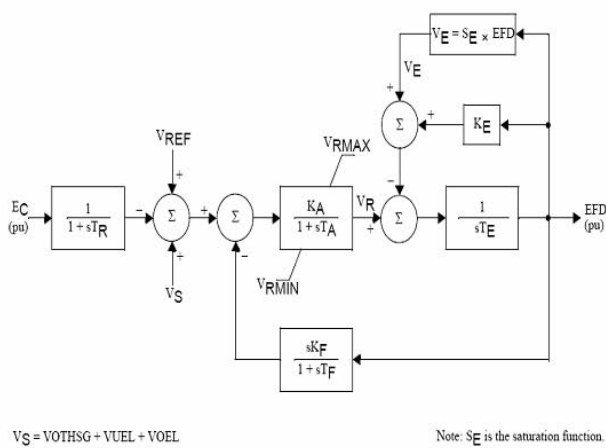
使用軌跡靈敏度分析(Trajectory Sensitivity)進行關鍵參數辨識。

$$SE = \sum_{t=i}^n (y_{rec}(t) - y_{sim}(t))^2$$



針對發電機勵磁機部分辨識出關鍵參數分別為 KA、KF、TF、SE(E1)、

SE(E2)，如下圖紅字部分：

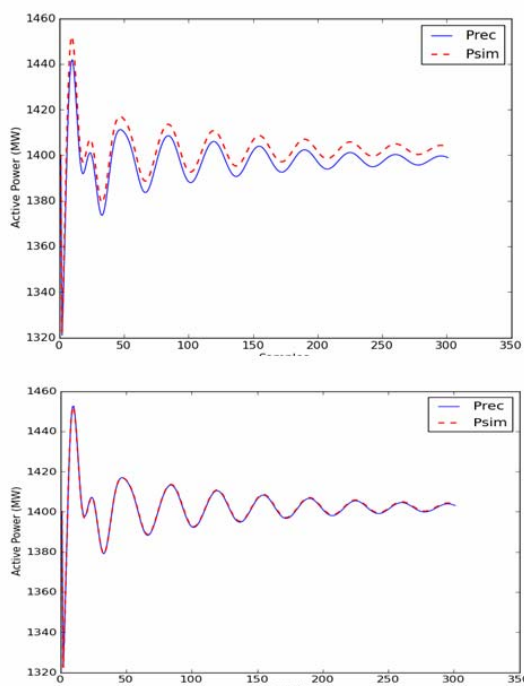


Exciter default value (IEEE1)

CONS	Default value	Key Parameter	Description
J	0.03		TR (sec)
J+1	217.5	*	KA
J+2	0.01		TA (sec)
J+3	10		VRMAX or zero
J+4	0		VRMIN
J+5	1		KE or zero
J+6	0.135		TE (>0) (sec)
J+7	0.019	*	KF
J+8	1	*	TF (>0) (sec)
J+9	0		Switch
J+10	3.15		E1
J+11	0.769	*	SE(E1)
J+12	4.2		E2
J+13	0.771	*	SE(E2)

最後以多維度的最佳化演算法(A multi-dimension optimization algorithm)

進行參數辨識比對，結果如下圖所示，勵磁機於在評估辨識後已接近機組正確初始值，以辨識後的參數去模擬系統擾動，其在 BUS10 上觀測到之發電機輸出有效功率亦為吻合。



Bus10上在評估辨識前後之有效功率比較

勵磁機於在評估辨識前後之比較

COBs	Default value	Initial value	Final value	Description
J	0.08			TR(sec)
J1	2175	251.2	210.4	K _A
J2	0.01			TA(sec)
J3	10			VRMAXorzero
J4	0			VRMIN
J5	1			KEorzero
J6	0.135			TE(>0)(sec)
J7	0.019	0.0217	0.0186	K _F
J8	1	1	1.0237	TF(>0)(sec)
J9	0			Switch
J10	3.15			E1
J11	0.789	0.8175	0.737	SE(E1)
J12	42			E2
J13	0.771	1.042	0.668	SE(E2)

陸、心得與建議事項

- 一、為評估電力系統動態特性確保系統運轉可靠性和安全性，電力系統動態模擬是最常用且最實際方式，然而模擬結果的準確與否卻高度取決於相關設備模型數據之準確性。本公司已成立「發電機模型參數量測專案小組」對發電機組之參數進行實地測試，重新確認發電機組模型參數，然而公司內發電機組眾多，測試排程極長，建議發展本公司「發電機線上參數識別研究計畫」，利用既有 PMU 及數位電驛擷取之系統資訊，進行發電機參數識別，輔助確認發電機組模型參數。
- 二、參訪國外電力市場後深覺「經濟因素」為促進電力發展的重大推手，美國德州 ERCOT 系統在採行 Nodal Market 之市場機制後，將系統電力網路發展不足地區之情況直接反映於電力售價上，提供了更進一步興建發電機組及線路誘因，相較於國內電價情況，有值得借鏡之處。
- 三、ERCOT 調度中心為因應暴風雪來臨，雖然已事先對調度運轉作出調整，調度人員在面對超過運轉準則的系統超大型事故，雖發佈了三次總計 4,000MW 的負載限制，但卻避免事故擴大並維持系統持續運轉，雖然在專業人員的眼光中表現可圈可點，然而事後卻仍然得面對外界大眾的批評，媒體及民眾對於調度工作的要求標準是嚴格的，這是身為台電調度中心一員的我必須有的體認，而我們能做的除了持續地對外界說明調度工作內涵外，就是不斷的提升自己在調度領域的專業素

養，訓練自我危機處理的意識。

四、在 2011 年 2 月 ERCOT 的輪流限電事件中，由於 ERCOT 事故擴大開始於 2 月 1 日的深夜至 2 月 2 日的凌晨，當緊急輪流限電開始執行時間點為 2 月 2 日的清晨，ERCOT 調度中心人員雖然依規定提報通知，但因某些通報方式是電子郵件或簡訊方式通知，所以雖然是第一時間發送緊急輪流限電通知，但收訊者卻沒在第一時間得知消息，反而是在早晨藉由新聞媒體得知輪流限電消息，故引起諸多微詞。藉由此事件對我們有一個重要的提醒，那就是對外聯繫通報執行的細膩性是十分重要的。

五、NASPI Working Group Meeting 於每年二月、六月、十月舉行，參加成員包含 DOE、NERC、各 ISO、電網及發電公司、設備製造商、軟體公司、學術及研究機構等，經由參加會議可以了解相量量測相關設備應用標準的更新，軟硬體設備公司的最新產品及其應用，各 ISO 及電力公司對相量量測設備目前使用狀況、應用情形及遭遇問題，各學術單位對相量量測裝置的研究應用等，並可與相量量測資料的使用者如 ISO 及電力公司的運轉人員進行交流。建議若公司內對 PMU 功能應用需求持續提升，可派員參加會議。

六、德克薩斯州 ERCOT 系統裝置容量及尖峰負載約是台電系統的兩倍，對外僅以直流輸電線與相鄰電網相聯，但傳輸功率有限，且通常不向

外州購售電，相較於美國其他電力系統，ERCOT 系統可視為獨立電網，系統狀況與本公司獨立電力系統類似。因此，ERCOT 有許多相關的電力系統運轉模式可以供台電系統參考，尤其 ERCOT 系統風力機組裝置容量高居全美第一，若於世界排名則為第五位，在大型風場風力機組的規劃及運轉上均有豐富經驗，值得本公司參考借鏡。

七、美國德州大學阿靈頓分校（University of Texas at Arlington）的電能系統研究中心（Energy Systems Research Center, ESRC），自 1968 年成立至今已逾 43 年，為 IEEE 所調查認定前十名之電力系統教育中心，並與美國各電力公司及電力調度中心有多年合作，本公司曾派員至 ESRC 研習與之合作研究計畫，將理論研究與實際系統運轉相互結合，協助解決系統規劃、運轉等問題。培倫此次奉派至 UTA 電能系統研究中心研習，深感獲益良多，除增進電力專業知識、瞭解各類電力技術發展現況、開闊視野及提升英語能力外，更有機會和國外電力相關人員進行交流，對工作有相當大的助益，建議公司持續派員至 UTA 電能系統研究中心研習電力系統相關課程，學習先進的電力系統運轉觀念與技術、拓展視野，使公司電力系統運轉規劃與世界接軌，提升電力系統穩定性與可靠性。

八、ESRC 訓練課程較著重於專題性研究，並有較多機會與各國電力專業人員進行研討，建議日後參加人員先擬定出國研究計畫，以針對研究

主題選修相關課程。

九、本次出國計劃得以順利成行，特別感謝藍處長、劉調度監、曾副調度監、鄭組長及吳組長對於本項出國計畫的支持與協助，有各位長官的支持，培倫才有如此歷練、成長的機會，謹此致上最誠摯的謝意。同時也要感謝葉文松課長、林昭琦課長、李公明、黃保源及蕭勇恒等同仁於出國期間的大力協助，使運用課相關業務得以繼續推動。

柒、參考文獻

- [1] 劉寶華等，美國電力市場，中國電力出版社，2005
- [2] NERC 網站，<http://www.nerc.com/>
- [3] ERCOT 網站，<http://www.ercot.com/>
- [4] 中國國家電網公司，” 同步發電機勵磁系統建模導則” 。
- [5] 楊小東，” 同步發電機組調速系統建模與辨識研究” ，華中科技大學碩士論文，2006 年 4 月。
- [6] P. Kundur, Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [7] IEEE Committee Report, “Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-92, no. 6, pp. 1904 – 1915, Nov./Dec. 1973.
- [8] M. Shen, V. Venkatasubramanian, N. Abi-Samra, D. Sobajic, A new ramework for estimation of generator dynamic parameters, IEEE transaction on PWRs 15/2 (2000), pp. 756-763.
- [9] Z. Huang, R.T. Guttromson, and J.F. Hauer, "Large-scale hybrid dynamic simulation employing field measurements," in Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE , Denver, CO , June 2004.
- [10] Y. Hsu, C. Liu, T. Luor, C. Chang, A. Liu, Y. Chen, C. Huang, “Experience with the identification and tuning of excitation system parameters at the second nuclear power plant of Taiwan power company” , IEEE Transaction on PWRs 11/2 (1996), pp. 747-753.
- [11] J. Ma et al., "Wide area measurements-based model validation and its application," Generation, Transmission & Distribution, IET, pp. 906-915,

November 2008.

- [12] J. J. Sanchez-Gasca, C. J. Bridenbaugh, C. E. J. Bowler, and J. S. Edmonds, "Trajectory sensitivity based identification of synchronous generator and excitation system parameters," IEEE Transaction on PWRs 3/4 (1988), pp. 1814-1822.
- [13] I.A. Hiskens, "Nonlinear dynamic model evaluation from disturbance measurements," Power Systems, IEEE Transactions on , vol. 16, no. 4, pp. 702-710, Nov 2001.
- [14] I.A. Hiskens and M.A. Pai, "Trajectory sensitivity analysis of hybrid systems," Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, IEEE Transactions on , vol. 47, no. 2, pp. 204-220, Feb 2000.
- [15] I.A. Hiskens and M.A. Pai, "Power system applications of trajectory sensitivities," in Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE , 2002.
- [16] Jin-Cheng Wang et al., "Identification of excitation system models based on on-line digital measurements," Power Systems, IEEE Transactions on , vol. 10, no. 3, pp. 1286-1293, Aug 1995.
- [17] J. C. Spall, Introduction to Stochastic Search and Optimization: Estimation, Simulation, and Control. Hoboken, NJ: Wiley, 2003.
- [18] J.C. Spall, "Adaptive stochastic approximation by the simultaneous perturbation method," Automatic Control, IEEE Transactions on , vol. 45, no. 10, pp. 1839-1853, Oct. 2000.