

出國報告（出國類別：實習）

電力系統參數驗證與再生能源最大化之整合

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：王永富 電機研究專員

廖清榮 電機資深研究專員

派赴國家：美國

出國期間：104年08月17日至104年08月27日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

電力系統參數驗證與再生能源最大化之整合

頁數 67 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司 人力資源處/陳德隆/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

王永富/台灣電力公司 綜合研究所/七等電機工程師/02-80782308

廖清榮/台灣電力公司 綜合研究所/十一等電機資深研究專員/02-80782267

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：104.08.17~104.08.27

出國地區：美國

分類號/目

關鍵詞：發電機參數、電力系統、再生能源、風力預測

內容摘要：

電力系統模擬分析之準確性與所建構系統模型之電力參數息息相關，如何取得正確之系統參數（發電機參數、線路參數與負載模型參數等），為系統分析準確與否之必要條件。EPRI 開發發電機參數驗證軟體(PPPD)，以因應 NERC 發電機參數驗證之要求，目前本所已有分析發電機參數之技術，藉由參加 PPPD 訓練課程可與本所之分析技術進行截長補短，並與各國電力公司之工程人員進行交流，取得發電機參數量測與驗證相關技術，藉以引進相關之發電機組參數量測分析技術，確保系統分析之準確性。德州電網與北美其他電網是以高壓直流進行互聯，可視為一獨立電網，美國德州致力於推動陸域風力發電，2005~2011 年間風力機組裝置容量佔比由 1.37%，大幅增加為 13%，德州調度中心 ERCOT 為因應風場出力影響電力系統，減緩對系統的衝擊，陸續提出及運用各種措施，以整合風力發電。藉由此次交流參訪了解大型風場風力預測，以及確保系統穩定度前提下如何增加再生能源滲透率，並且了解針對分散式再生能源併網相關法規，以協助本公司未來再生能源滲透率提升相關因應做法。

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

電力系統參數驗證與再生能源最大化之整合

目 錄

	<u>頁次</u>
壹、 心得與建議	4
貳、 出國緣由	10
參、 出國行程	10
肆、 PPPD 研習內容	11
4.1 靜態勵磁系統 Basler DECS 2100 模型轉換	11
4.2 亞利桑那公共服務公司(APS)分享 PPPD 使用者群組經驗	13
4.3 LG&U 使用數位故障紀錄資料進行參數驗證	15
4.4 南方電力公司之調速機模型驗證	16
4.5 APC 公司利用 PMU 資料進行參數驗證	19
4.6 更新 PPPD 第 8 版及 2016~2018 使用者群組	22
4.7 PPPD 訓練課程	25
伍、 UTA 參訪內容	50
5.1 德州與週邊電力系統	50
5.2 德州 ERCOT 系統	51
5.3 ERCOT 高佔比風力發電面臨的問題	57
陸、 參考資料	66

壹、心得與建議

一、藉由參加 PPPD 使用者群組，引進參數量測分析技術

電力系統模擬分析之準確性與所建構系統模型之電力參數息息相關，如何取得正確之系統參數（發電機參數、線路參數與負載模型參數等），為系統分析準確與否之必要條件。台電系統在經歷1999年729及921大範圍停電事件後，針對「如何穩定電力系統」供電穩定度進行檢討與改善，為此本公司除落實電力系統的基礎建設外，亦藉由系統模擬分析，建置特殊保護系統(Special Protection System, SPS)以強化系統對擾動的免疫力，防止大停電事故發生。然電力系統模擬分析之準確性與所建構系統模型之電力參數息息相關，如何取得正確之系統參數，為系統分析準確與否之必要條件。

EPRI開發發電機參數驗證軟體(PPPD)，以因應NERC發電機參數驗證之要求，目前本所已有分析發電機參數之技術，藉由參加EPRI PPPD使用者群組訓練課程，可與本所之分析技術進行截長補短，並與各國電力公司之工程人員進行交流，取得發電機參數量測與驗證相關技術，藉以引進相關之發電機組參數量測分析技術，進而建立自主之參數驗證技術平台，以確保系統模擬之真實性，進一步防範系統大停電事故之發生。

藉由導入EPRI PPPD發電機參數驗證線上量測與驗證技術，利用系統擾動資訊進行發電機參數驗證，可節省基載機組現場實測所延伸之燃料替代成本。另外，台灣離島地區，如澎湖、綠島以及蘭嶼，目前並未有符合實際系統狀態之發電機參數，且上述島嶼亦未建立同步相量量測系統，雖無法利用該系統進行線上參數驗證，但離島地區皆為柴油發電機組，發電機參數試驗時相較下較為簡易，利用本所監錄設備及相關量測技術，將所獲得之錄波數據，利用PPPD進行驗證後，再進行分析探討。

使用PPPD軟體必須具備電力系統背景，且驗證參數需要反覆操作以獲得正確性，而參數內數值上下限調整也需要累積一定經驗後才能上手，即便擬合非常完美的情況下，仍要將參數匯入PSS/E模擬軟體進行分析，模擬案例與實際案例暫態波型吻合才能確認該組參數的適用性。

值得一提的是，開發 PPPD 軟體的 Dr. Pouyan 與 PSS/E 原廠關係較密

切，使用者會議上有提到 PSS/E 的 34 版中有發電機模型已不被 WECC 認可，反而是需另外選用其他模型，而這部份是我們在使用 PSS/E 時不會得知的訊息。

二、訂定參數驗證準則，建立參數驗證機制

美國西岸在1996年經歷了兩次嚴重大停電事故後，其中8月發生的停電事件電腦模擬的結果顯示，沒有系統的穩定度問題，實際上卻發生停電事故，影響9個州750萬用戶。調查報告提出了許多建議，其中強調發電機相關控制系統模擬模型及數據驗證之重要性，並針對發電機參數進行普查與測試驗證建立相關之機制，以便確保系統模擬之準確度，為此北美電力可靠度委員會（NERC）於1997年發佈之計劃標準中提及此等模型及數據之驗證要求，針對發電機參數進行普查與測試建立相關之機制，以便確保系統模擬之準確度，藉以採取有效之防範措施；北美電力可靠度委員會（NERC）於2014/7/1正式發佈MOD-26、MOD-27標準，要求發電設備所有者至少每10年須測試發電機參數，修正發電機模型參數確保系統模擬準確度。

台電系統並不如北美等聯網大系統而是單獨系統，因此發電機組或發電機群對全系統比重較重。各發電機控制系統，平常運轉情況下對系統事故發生時維持系統穩定條件上所負之責任比較大。另台灣獨立發電業(IPP)發展快速，直接參與連接至輸電幹線之發電業逐漸增加。因此，眾多之發電機組其相關控制是否妥善，將直接會影響電力系統之穩定問題。藉由參考國際上之標準訂定參數驗證準則，並建立發電機參數驗證機制為刻不容緩之事項，以確保系統分析結果之可信度，針對系統弱點進一步採取相關之措施，以增進系統穩定度。

三、藉由系統擾動資料，驗證系統動態參數

電力系統各母線電壓是電力系統的狀態相量，它是描述電力系統最重要的基本物理量、檢驗運轉方式計算結果的最直接資料、評價電網靜態運轉能力的基本指標、也是評價電網動態過程穩定性的最基本指標。它們的大小和相位能直接反應電力系統的實際運轉狀態，特別是節點電壓相位之間的關係，對即時判斷電力系統穩定性及進行相對應穩定控制有著十分重

要的意義。

台電綜研所已利用同步相量量測技術，建置台電電網即時狀態監視系統，進而評估系統監測性能與系統保護功能之應用，並且可做長期電力系統電壓相量監錄，統計與分析電壓相量變化之趨勢，提供系統規劃與運轉控制策略之應用。如何運用此利用線上量測技術資料，進一步做為驗證系統動態參數之準確性，以系統擾動資料進行發電機模型參數驗證，可節省基載機組現場實測所延伸之燃料替代成本，為一重要且值得進一步探討之課題。

例如馬祖地區，因發電機組長期維持在低載運轉情況，造成機組積碳情況嚴重，進而衍生出無法快速扛載的現象，若有一部發電機跳機，其他機組無法快速扛載，可能會使系統全黑之窘境；而目前本所已於馬祖地區建置同步相量量測系統，可利用歷史相關事故數據，導入PPPD軟體進行參數驗證，再利用模擬軟體進行符合系統狀態的低頻電驛標誌設定，以及機組運轉排程分析。

暫態穩定度分析，為系統調度及規劃極為重要參考依據。分析結果的準確性，取決於系統模型參數。利用系統擾動資料進行線上發電機參數驗證，可為下列不同層面獲致效益：

制度面：為廠網分離做準備，建構系統模型參數驗證與更新機制。

運轉面：節省傳統現場實測，基載機組需配合停機之燃料替代成本。

線上量測資料，可即時對相關控制元件進行驗證，發現潛在問題進行預防性維護。

規劃面：系統規劃能更符合實際系統狀況，對公司電網系統規劃，可避免過度樂觀或保守之規劃作為，有效增強電網安全。

調度面：系統調度能得到更精確的分析資訊，可強化離線系統檢討與即時電網分析的正確性，對公司電網特殊保護系統、調度運轉檢討、與即時系統運轉調度有所助益，提升系統調度營運績效，有效增強電網安全，並節省調度成本。

社會效益：大幅提升系統分析準確性，與降低系統事故發生大停電機率，提升公司形象，改善民眾抱怨。

四、 整合公司人力資源，推動參數驗證工作

電力系統模擬分析之準確性與所建構系統模型之電力參數息息相關，如何取得正確之系統參數（發電機、負載模型、輸電線路、勵磁控制系統與調速器系統等參數），為系統分析準確與否之必要條件。

藉由本出國計畫，赴EPRI研習PPPD發電機組參數量測相關技術，而未來公司進行廠網分離，發電機參數量測應為週期性維護工作項目之一，然如何整合公司相關人力與資源，成立專責之驗證組織，其實推動相關之驗證程序，

以確保系統模擬之真實性，進一步防範系統大停電事故之發生，為刻不容緩之課題。

五、 訂定合適併網準則，整合再生能源價值

拜訪德州大學阿靈頓分校能源研究中心(ESRC/UTA)，德州電網與北美其他電網是以高壓直流進行互聯，可視為一獨立電網，美國德州致力於推動陸域風力發電，2005~2011年間風力機組裝置容量佔比由1.37%，大幅增加為13%，德州調度中心ERCOT 為因應風場出力影響電力系統，減緩對系統的衝擊，陸續提出及運用各種措施，以整合風力發電。

併聯準則是影響再生能源發展的要素之一。若準則要求較為寬鬆，則再生能源佔比將可能快速提升，但同時可能無法完全兼顧到系統可靠度。併聯準則修訂的方向雖然可參考國外相關準則，但必須考量國內電力系統的架構與特性進行修訂。藉由此次交流參訪了解大型風場風力預測及太陽光電滲透率高之併網準則，以及確保系統穩定度前提下如何增加再生能源滲透率，並且了解針對分散式再生能源併網相關法規，以協助本公司未來再生能源滲透率提升相關因應做法。

六、 因應備轉容量需求，建立適宜輔助服務

台灣電力系統為獨立系統若遇到高佔比再生能源(特別是風力發電)的併入，勢必增加系統的備轉容量(包括向上與向下備轉容量)，而這些備轉容量的決定，取決於風力預測以及負載預測的誤差。備轉容量將考慮風力

預測不確定度，並依此制訂機組排程。可依據各種預測模型事先評估風力發電量，並依據所預測的風力出力的某一百分比做為所需增加的備轉容量，或是依據過去預測誤差的統計資料進行備轉容量的預估。國外許多高佔比再生能源系統隨時監測目前線上可使用的向上與向下備轉容量是否足夠，以備發生風力變化所可能帶來的系統衝擊。目前國外對於向上與向下備轉容量的設定，大多依據實際系統運轉經驗，考量風力預測以及負載預測的誤差，進行備轉容量的設定。例如風力預測的精確度較低時，則備轉容量的設定亦相對提高。此外，部分地區亦使用風力預測的機率分布進行備轉容量的設定。目前此議題仍持續被電力業界及學界所探討，尚未有固定的公認模式。

七、 建置風力預測模型，因應備轉容量需求

高佔比風力系統下，具備精確的預測模型將可降低系統的不確定度以及操作成本。風力預測應考慮為短期(如數分鐘)與較長期(如一小時以上)的模型，較短期的預測將不考慮大氣數值分析，其預測結果將可應用在系統操作的穩定度控制；而長期的風力預測將考慮大氣數值分析的結果，其預測結果可應用於機組排程的規畫。

八、 規畫最適發電組合，併聯衝擊分析模擬

因應核能發電可能的停役與廢除，必須重新思考與規劃台灣電力系統因應高佔比再生能源下新機組的規劃。以國外高佔比風力地區的經驗為例，一些反應快速的機組佔比亦隨風力佔比提高而增加，例如德州 ERCOT 系統的天然氣機組佔系統 56.4% 的容量，而愛爾蘭系統的天然氣機組佔比亦達到 43%。因此當台灣風力佔比逐漸提高的同時，必須評估風速大幅度變化的情形下，傳統的火力機組是否有足夠的響應速度配合再生能源變動進行增減出力。

國外許多國家或地區為了因應高佔比再生能源所可能帶來的衝擊，已陸續執行一系列的衝擊分析研究，包括各種可能的情境分析。以夏威夷高佔比再生能源系統衝擊研究為例，將系統未來的發電情境分成幾種可能

性，分別考慮分散式太陽光電、集中式太陽光電、離岸風場、以及陸岸風場等不同的發電情境組合，接著對最差情境進行模擬分析，分別模擬在 5 分鐘、10 分鐘、30 分鐘、以及一小時的時間內再生能源發電量急速變化下系統所需要的備轉容量，並分析系統再生能源可能的切除量、因應再生能源變動所需支出的額外操作成本、以及在各種情境下可能的最大佔比。

貳、出國緣由：

電力系統模擬分析之準確性與所建構系統模型之電力參數息息相關，如何取得正確之系統參數（發電機參數、線路參數與負載模型參數等），為系統分析準確與否之必要條件。EPRI 開發發電機參數驗證軟體 (PPPD)，以因應 NERC 發電機參數驗證之要求，EPRI 於 8 月 18~20 日於 Dallas 舉辦 PPPD 軟體使用者群組會議與訓練課程，目前本所已有分析發電機參數之技術，藉由參加該訓練課程可與本所之分析技術進行截長補短，並與各國電力公司之工程人員進行交流，取得發電機參數量測與驗證相關技術，藉以引進相關之發電機組參數量測分析技術，確保系統分析之準確性。

除上述訓練課程外，將拜訪德州大學阿靈頓分校能源研究中心 (ESRC/UTA)，德州電網與北美其他電網是以高壓直流進行互聯，可視為一獨立電網，美國德州致力於推動陸域風力發電，2005~2011 年間風力機組裝置容量佔比由 1.37%，大幅增加為 13%，德州調度中心 ERCOT 為因應風場出力影響電力系統，減緩對系統的衝擊，陸續提出及運用各種措施，以整合風力發電。而本公司之電網系統無論本島或是各離島目前皆為獨立電網，未來再生能源佔比提升勢必影響系統穩定度，藉由此次交流參訪了解大型風場風力預測，以及確保系統穩定度前提下如何增加再生能源滲透率，並且了解針對分散式再生能源併網相關法規，以協助本公司未來再生能源滲透率提升相關因應做法。

參、出國行程

本出國計畫，自 104 年 08 月 17 日起，至 104 年 08 月 27 日止，前後 11 天，詳細行程如下表所示。

日期	起訖地點	工作紀要
08/17	臺北—德州	去程

08/18~08/20	EPRI	發電機參數驗證軟體 PPPD 訓練課程
08/21~08/25	Energy Systems Research Center (ESRC/UTA)	德州大學阿靈頓分校能源研究中心參訪
08/26~08/27	德州—臺北	返程

肆、PPPD 研習內容

電力系統模擬分析之準確性與所建構系統模型之電力參數息息相關，如何取得正確之系統參數（發電機參數、線路參數與負載模型參數等），為系統分析準確與否之必要條件。EPRI 開發發電機參數驗證軟體 (PPPD)，以因應 NERC 發電機參數驗證之要求，目前本所已有分析發電機參數之技術，藉由參加 PPPD 使用者群組會議與訓練課程，可與本所之分析技術進行截長補短，並與各國電力公司之工程人員進行交流，取得發電機參數量測與驗證相關技術，藉以引進相關之發電機組參數量測分析技術，確保系統分析之準確性。

參與本次會議之電力公司共 23 家(涵蓋發電、輸電及 ISO 等)，包括 AECI、AEP、Ameren、APS、ATC、BPA、CPS Energy、Duke Energy、GRE、LG&E and KU Energy、MISO、New England ISO、NRG Energy、NYPA、NYSIO、PJM、Saskpower、Couth Carolina Gas and Electric、Southern Company、TPC、TVA 等

4.1 靜態勵磁系統 Basler DECS 2100 模型轉換

Duke Energy 分享靜態勵磁系統 Basler DECS 2100 模型轉換之經驗。以 IEEE ST4B 模型，如圖 4.1 所示，作為 Basler DECS 2100 靜態勵磁系統模型，如圖 4.2 所示，之標準轉換模型。其中因 DECS 2100 靜態勵磁系統

模型中之 K_p 及 K_I 參數因計算基準值之差異，需調整至以氣隙線為基準之參數。調整後之參數利用 PPPD 軟體進行擬合後之結果如圖 4.3 所示。

簡報內容中亦提到，AVR 設定軟體之功能選項與勵磁機模型方塊圖的對應表，可藉由功能選項的數值來得知勵磁機模型數值，在無參數的情況下可利用該方法獲得調速機參數。

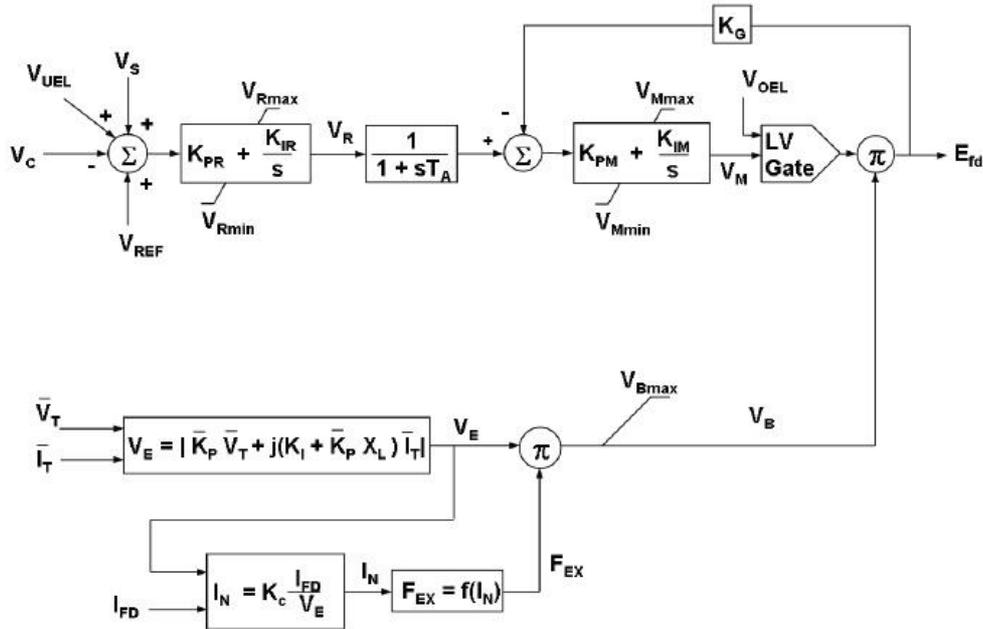


圖 4.1 IEEE ST4B 模型

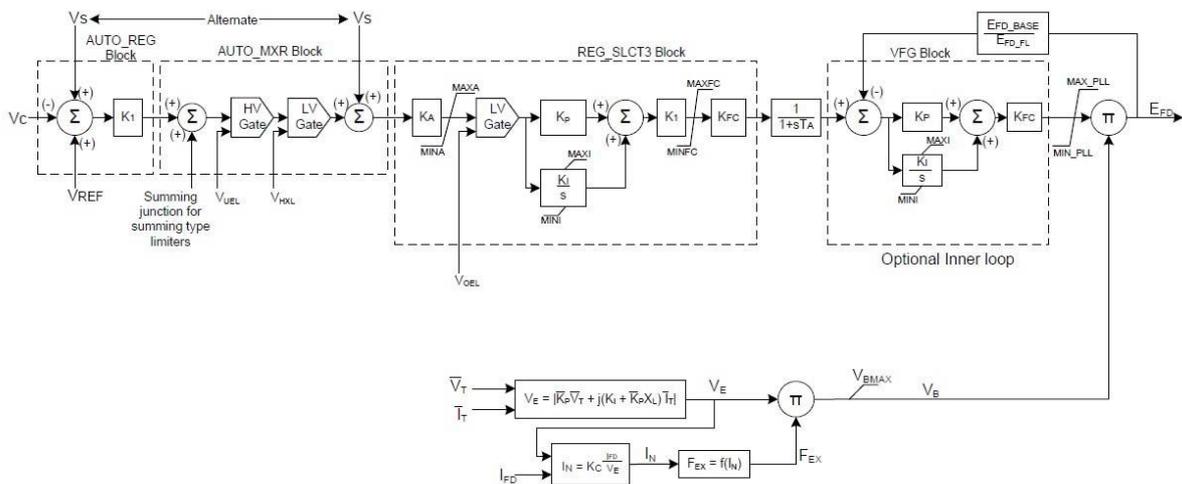


圖 4.2 DECS 2100 方塊圖

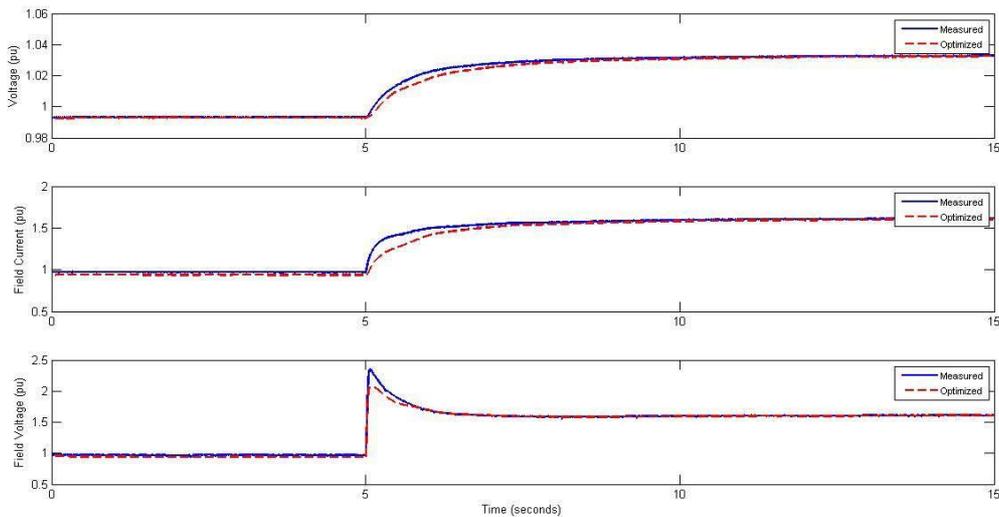


圖 4.3 參數調整後之擬合結果圖

4.2 亞利桑那公共服務公司(APS)分享 PPPD 使用者群組經驗

北美電力可靠度委員會 (NERC) 於 1997 年發佈之計劃標準中提及此等模型及數據之驗證要求，針對容量大於 10MVA 之機組需進行發電機測試與模型之驗證工作，APS 隨即積極利用廠試收集相關資料，進行發電機相關參數之驗證工作，並利用其模擬軟體 GE PSLF 進行模擬分析，調整參數，最後將模型參數在 WECC 系統進行測試，並將結果送交 WECC。

亞利桑那公共服務公司(APS)在 2010 年加入 PPPD 使用者群組，在 PPPD 使用者群組會議，分享其加入 PPPD 使用者群組的經驗，可與其他電力公司及 EPRI 專家在參數驗證方面進行經驗交流，利用 PPPD 自動最佳化之參數驗證，比其傳統利用人工進行疊代與調整之方法，較為方便與省時。目前已利用 PPPD 軟體進行 8 部機組之測試，包括調速機與勵磁機之模型驗證。利用 V 曲線驗證發電機之飽和係數，如圖 4.4 所示。原本之飽和係數為 $S_{1.0}=0.129$ 、 $S_{1.2}=0.49$ ，最佳化後之飽和係數為 $S_{1.0}=0.221$ 、 $S_{1.2}=0.344$ 。圖 4.5 所示為一 ESST4B 勵磁系統驗證結果。

目前 APS 使用 PPPD 進行參數驗證，依他們的使用者經驗，使用勵磁機原廠提供之數據進行擬合時，結果不甚理想，而告知原廠請他們再次確認參數正確性，發現原廠提供數據資料有誤，所以造成比較大的差異。

PPPD 能夠指出可能數據錯誤，以及確定參數獲取更好的擬合。

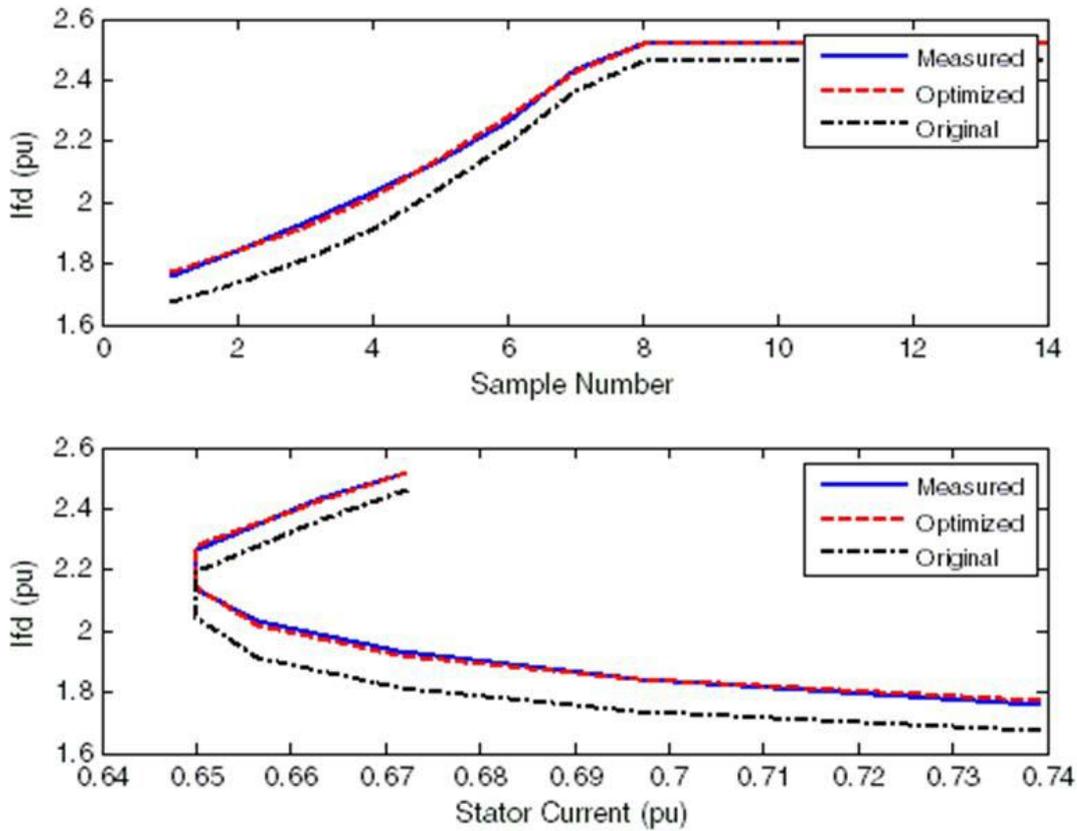


圖 4.4 利用 V 曲線驗證發電機之飽和係數

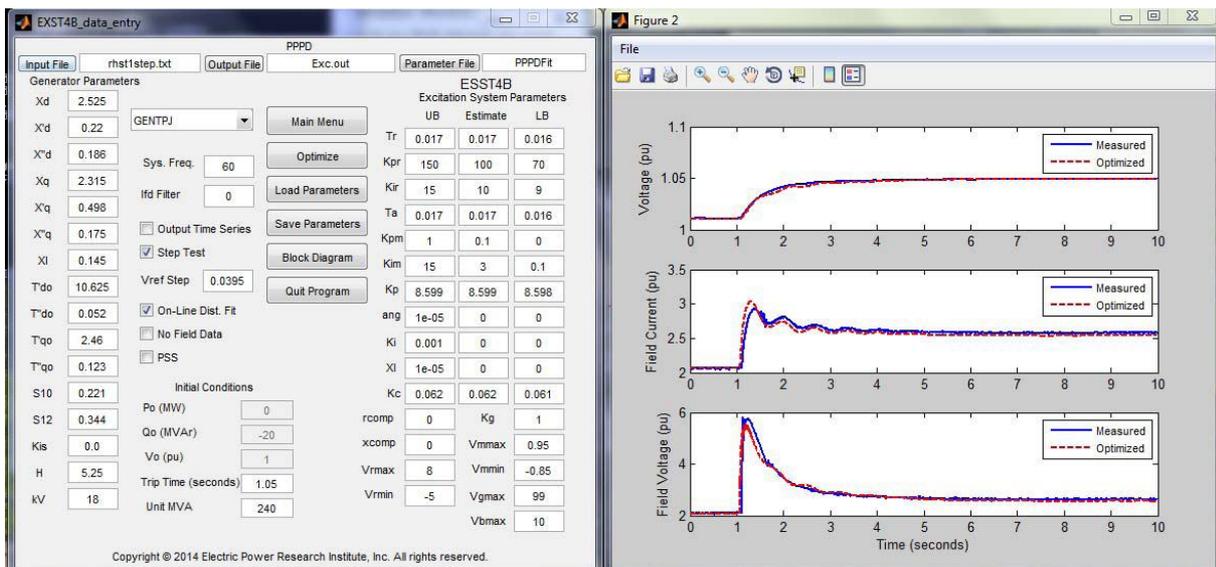


圖 4.5 ESST4B 勵磁系統驗證結果

4.3 LG&U 使用數位故障紀錄資料進行參數驗證

LG&U 及 KU 發電工程部門是一個集中的工程小組，服務區域包括肯塔基州和次要邊遠地區的大部分，對 6 個主要發電廠提供工程設計、技術、以及故障排除服務等，包括 15 部燃煤火力機組、11 部水力機組、1 部 2+1 燃天然氣火力機組、21 部單循環氣力機組。

LG&U 及 KU 在其發電機組安裝數位故障紀錄器的主要理由為增強機組的故障排除和根本原因分析工具；及符合目前和建議的監管標準，北美電力可靠度委員會（NERC）於 2014/7/1 正式發佈 MOD-26、MOD-27 標準。

數位故障紀錄器監測發電機、升壓變壓器及勵磁機之相關位置，如圖 4.6 所示。

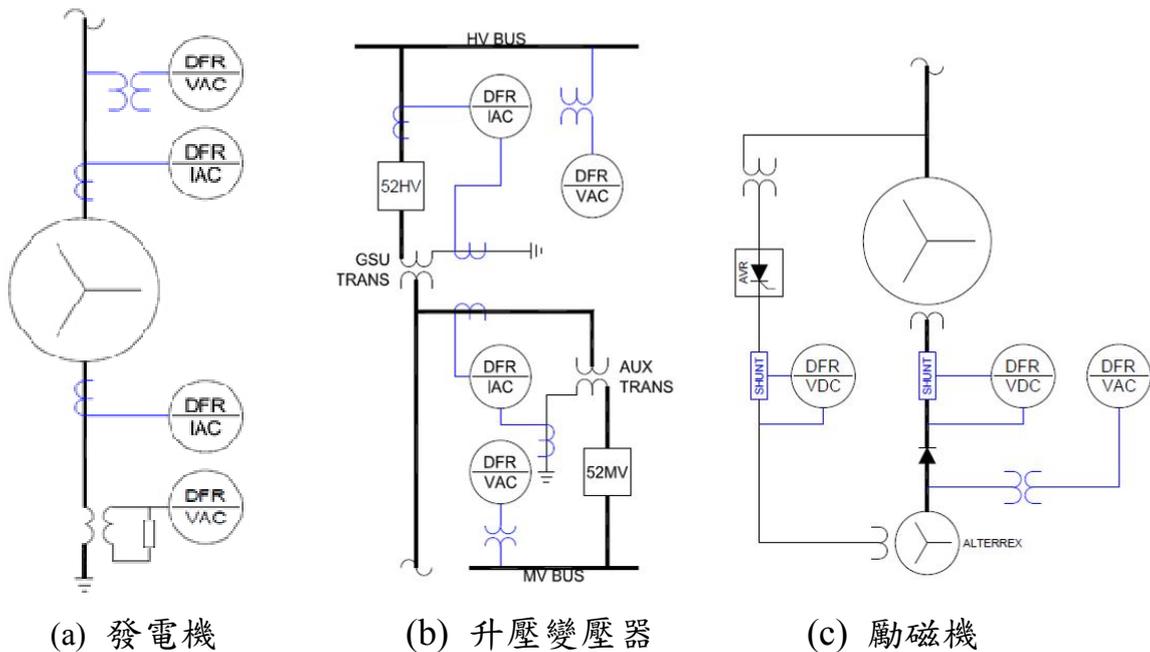


圖 4.6 數位故障紀錄器監測發電機、升壓變壓器及勵磁機之相關位置

利用數位故障紀錄器監測資料進行模型參數驗證，如圖 4.7 所示，為勵磁機 ESST6B 驗證結果。圖 4.8 為在 2015 年 4 月份所監錄到事件資料，用於驗證大型燃煤火力機組之調速機模型 IEEEG1，以符合 NERC MOD-27 標準的需求。

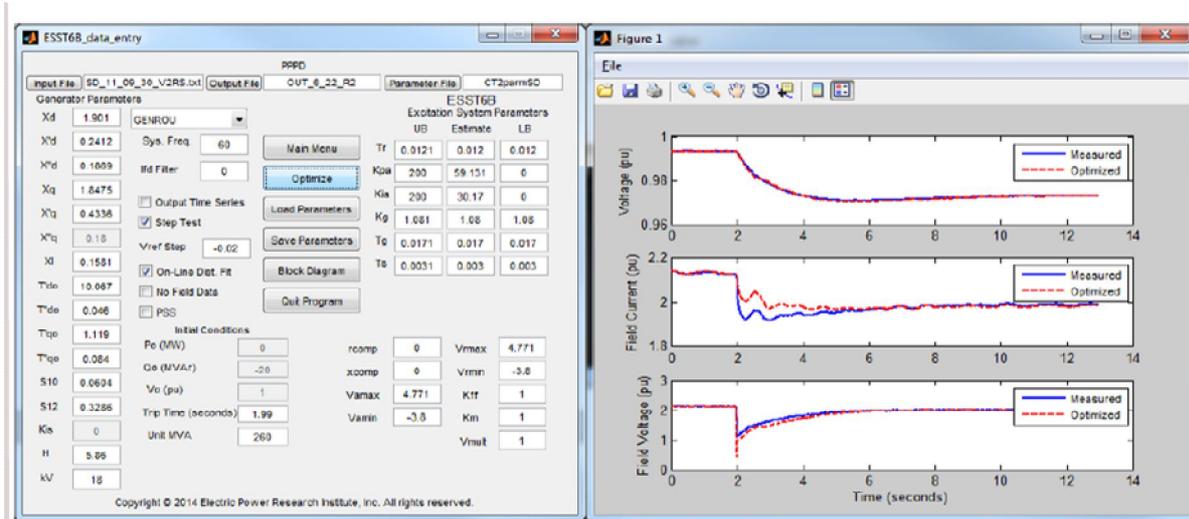


圖 4.7 勵磁機 ESST6B 驗證結果

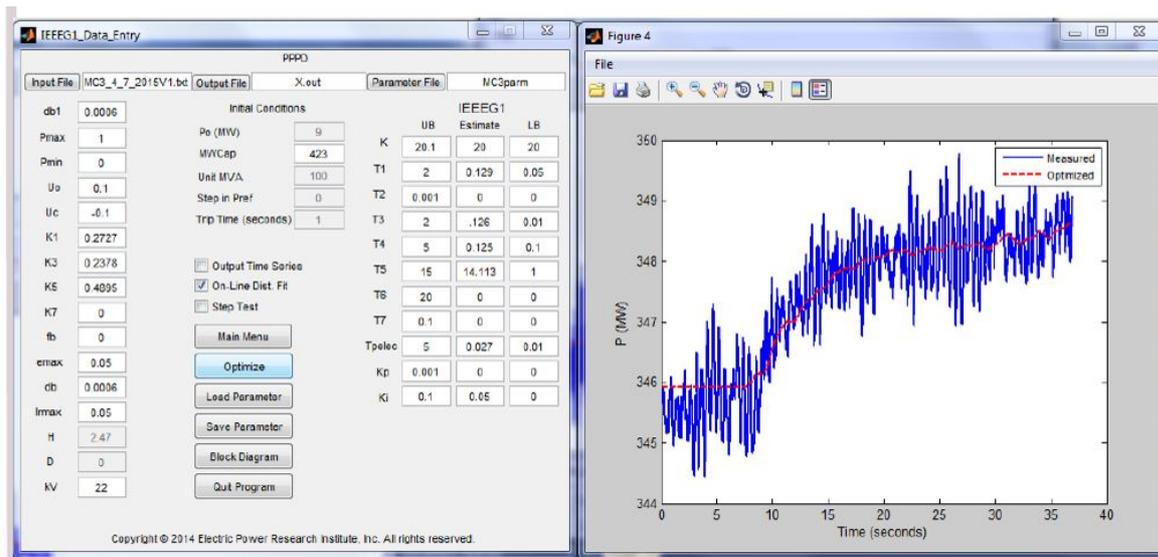


圖 4.8 大型燃煤火力機組之調速機模型 IEEEG1 驗證結果

4.4 南方電力公司之調速機模型驗證

南方電力公司的工作人員花費了顯著的時間，進行大型火力機組調速機模型的規劃測試，在確保工作人員和設備的安全前提下，進一步驗證該模型符合 NERC MOD-27-1 的要求。該測試是在發電機接近滿載運轉條件

下進行，本項測試在調速機回授信號處，透過電腦注入一步階信號，使發電機進入控制其出力以反應步階信號之大小，速度步階信號包括上升與下降兩種狀況。本測試案例之發電機額定為 574MVA，原廠提供之調速機模型為 IEEEG1，調試/測試期間由南方電力公司執行，所加入之步階信號為 0.1~0.2% 之小步階信號，步階信號之加入點如圖 4.9 所示。圖 4.10 所示為加入上升與下降兩種狀況步階信號，機組出力之變化狀況。

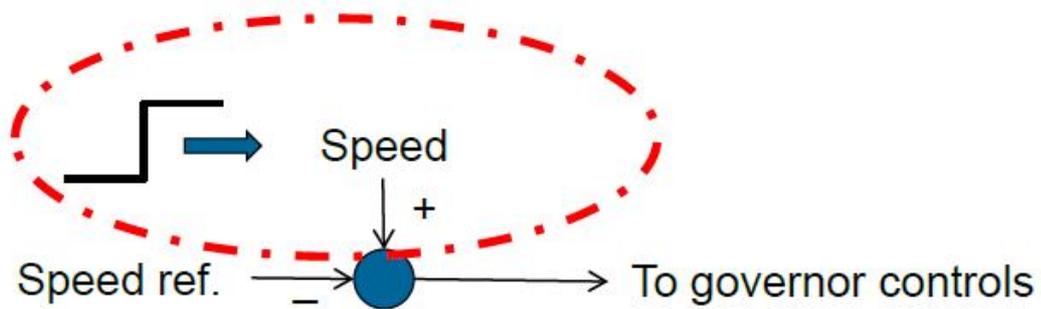


圖 4.9 步階信號加入點

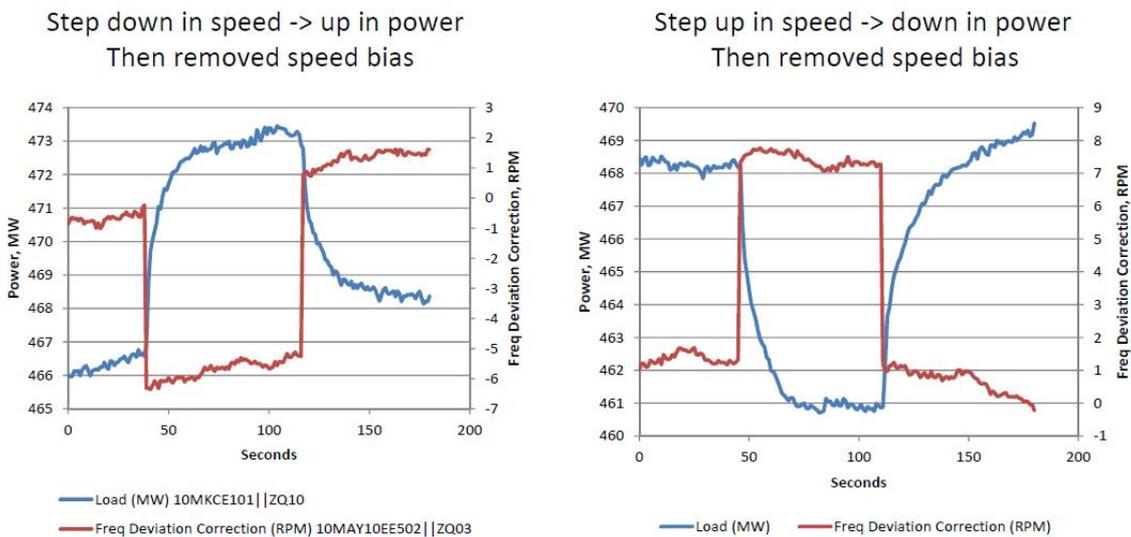


圖 4.10 加入上升與下降兩種狀況步階信號，機組出力之變化狀況

南方電力公司工作人員利用步階響應所到之資料，包括時間(sec)、速度(pu)及發電機出力(MW)，以 PPPD 軟體進行 PSSE IEEEG1 調速機參數之驗證。在未加入調速機之不動帶及未進行最佳化情況下，參數之擬合狀況不是很好，如圖 4.11 所示，另在加入調速機之不動帶(0.0008)後，得到很好之擬合，如圖 4.12 所示。

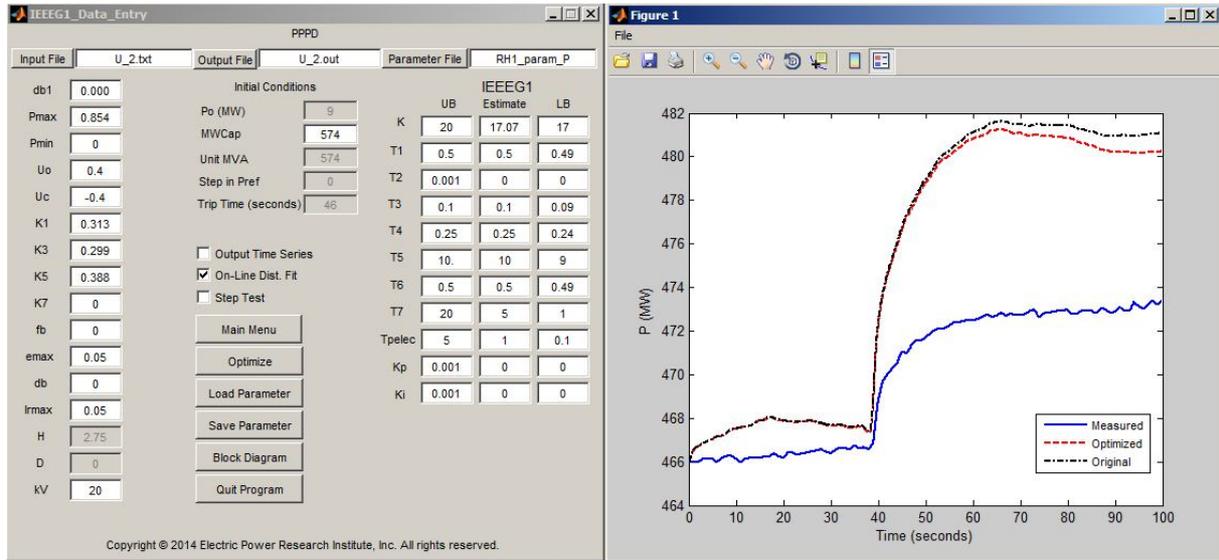


圖 4.11 未加入調速機之不動帶及未進行最佳化情況下

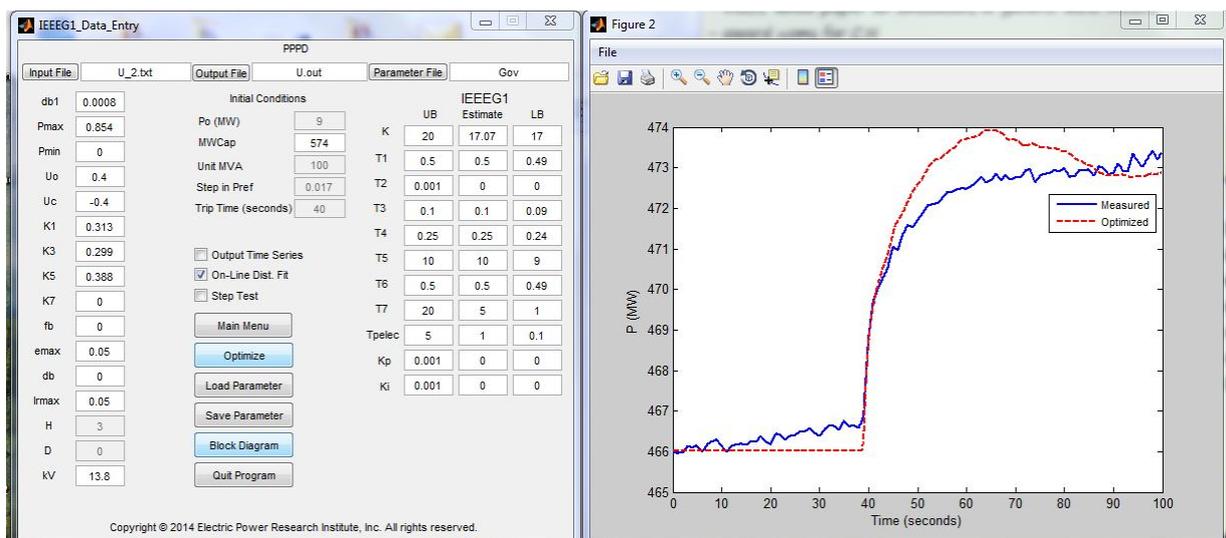


圖 4.12 在加入調速機之不動帶(0.0008)後

在加入調速機之不動帶及進行最佳化情況下，參數之擬合狀況很好，如圖 4.13 所示。根據測試結果原廠的數據是合理及可信的，差異可能發生在速降率、不動帶及量測誤差所引起，基於 5% 的速降率其 K 值應為 17，不動帶估計為 0.0008，改進模型。根據記錄的資料，節流壓力相對穩定，顯示非線性 MW 的反應與壓力變化無關。

利用 PPPD 進行模型之檢查與驗證，原廠的數據似乎是恰當的，在線之調速機步階響應測試，為執行 MOD-027-1 驗證的合理手段，模擬不動帶的設定是重要的。

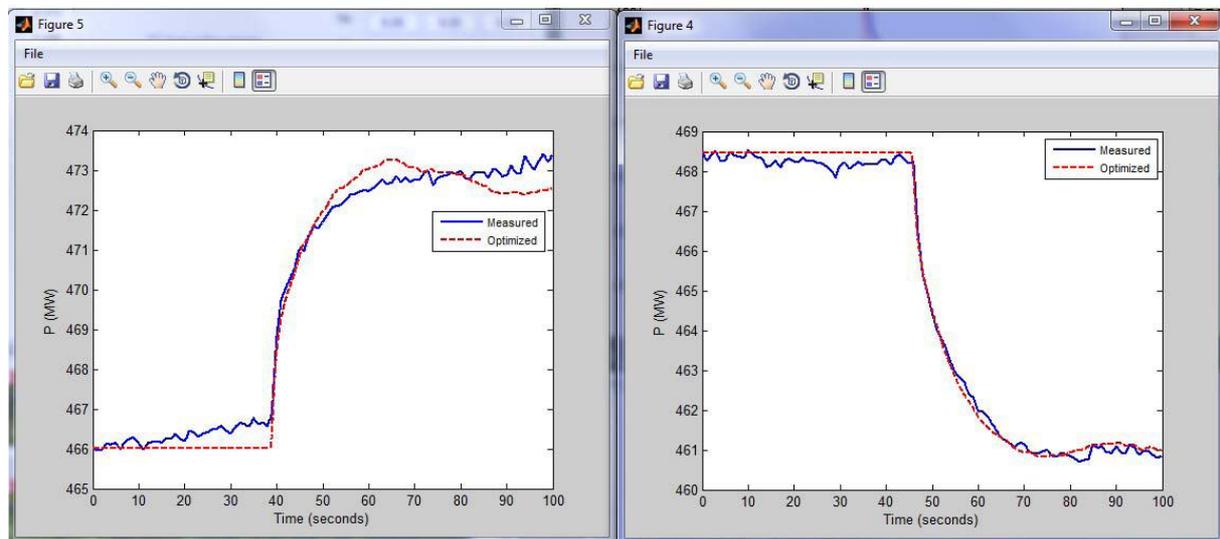


圖 4.13 加入調速機之不動帶及進行最佳化情況

4.5 APS 公司利用 PMU 資料進行參數驗證

APS 公司 Paloverde 電廠的單機容量在 WECC 為最大，其整廠淨發電量為 3.3GW 是美國最大出力的發電廠，Paloverde 電廠包括 3 部核能機組，3 個大型蒸汽渦輪發電機，每部容量為 1.1GW。每部機均安裝 PMU 及 DFR 以監測相關電力數據，其中在 WECC 系統發生的幾件重大擾動事件，均由 PMU 所監錄到，並利用此資料以 PPPD 進行相關發電機參數驗證工作。

APS 公司利用 4 件事件資料進行參數驗證工作，該 4 件事件分別發生於：Event 1 4/15/14、Event 2 4/29/14、Event 3 5/26/14、Event 4 6/12/14。

在未進行最佳化之選項，直接執行 PPPD 之發電機與勵磁機模型驗證，結果如圖 4.14 所示，在進行最佳化之選項，執行 PPPD 之發電機與勵磁機模型驗證，結果則如圖 4.15 所示。

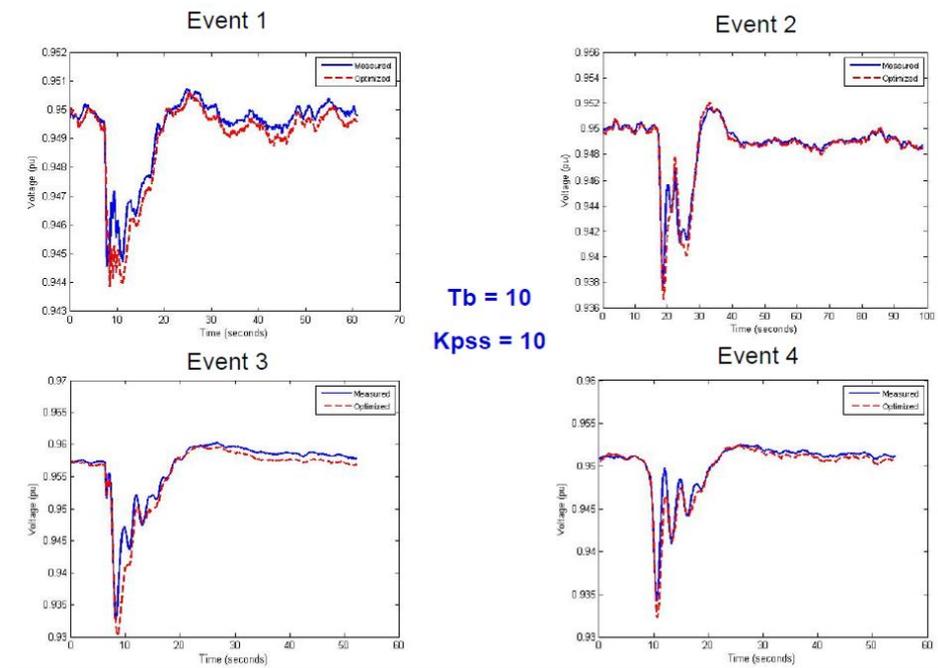


圖 4.14 未進行最佳化之選項，直接執行 PPPD

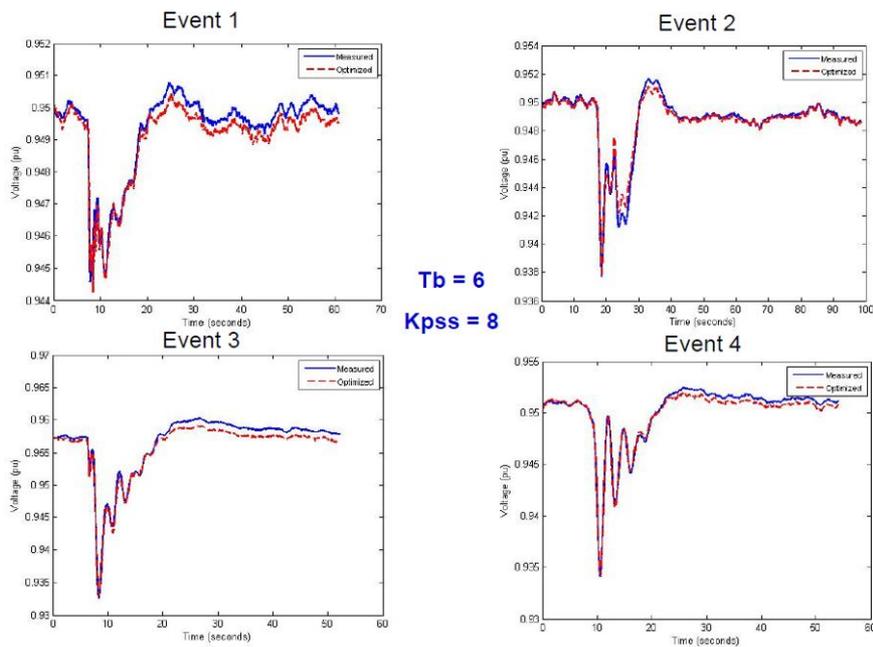


圖 4.15 進行最佳化之選項，執行 PPPD

模擬結果顯示可能的誤差來源，包括量測誤差、模擬與建模的誤差。將檢查這些可能誤差，並嘗試優化參數，單目前結果是至少可信的。

根據此 4 件擾動資料，進行調速機模型之驗證，圖 4.16 為未進行最佳化之選項，直接執行 PPPD 之結果，另圖 4.17 為進行最佳化之選項，執行 PPPD 之調速機模型驗證結果。

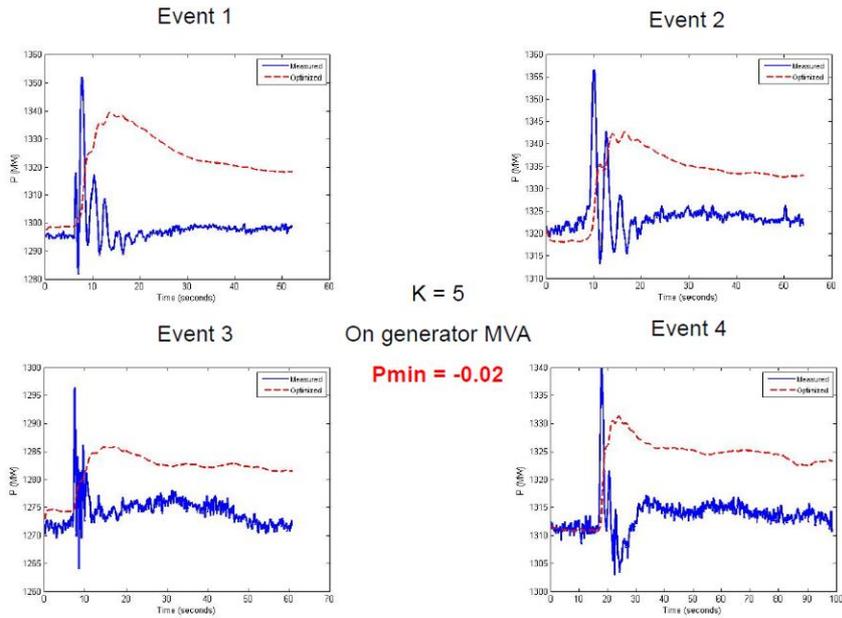


圖 4.16 未進行最佳化之選項，直接執行 PPPD

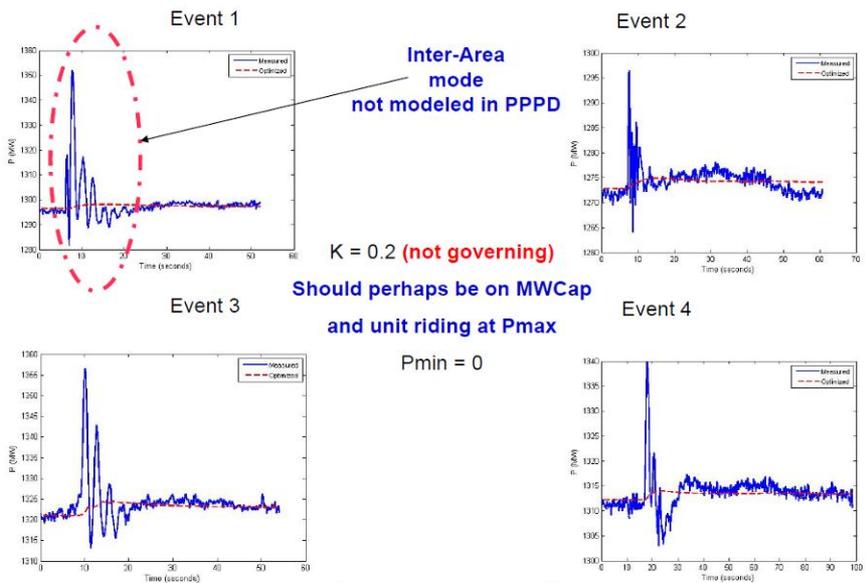


圖 4.17 進行最佳化之選項，執行 PPPD

調速機模型驗證結果實際上是相當不錯的，須作出一些可能的細化調整，包括修正 PSS 的限制、在勵磁系統輕微的變化 PSS 增益及時間常數，使波形擬合的更好，可進一步深入探討此狀況、利用發電機速率與出力的變化得到慣性常數的一致性。

4.6 更新 PPPD 第 8 版及 2016~2018 使用者群組

EPRI 預計於 2015 年底更新 PPPD 版本至第 8 版，第 8 版之介面如圖 4.18 所示，新版增加之功能有：

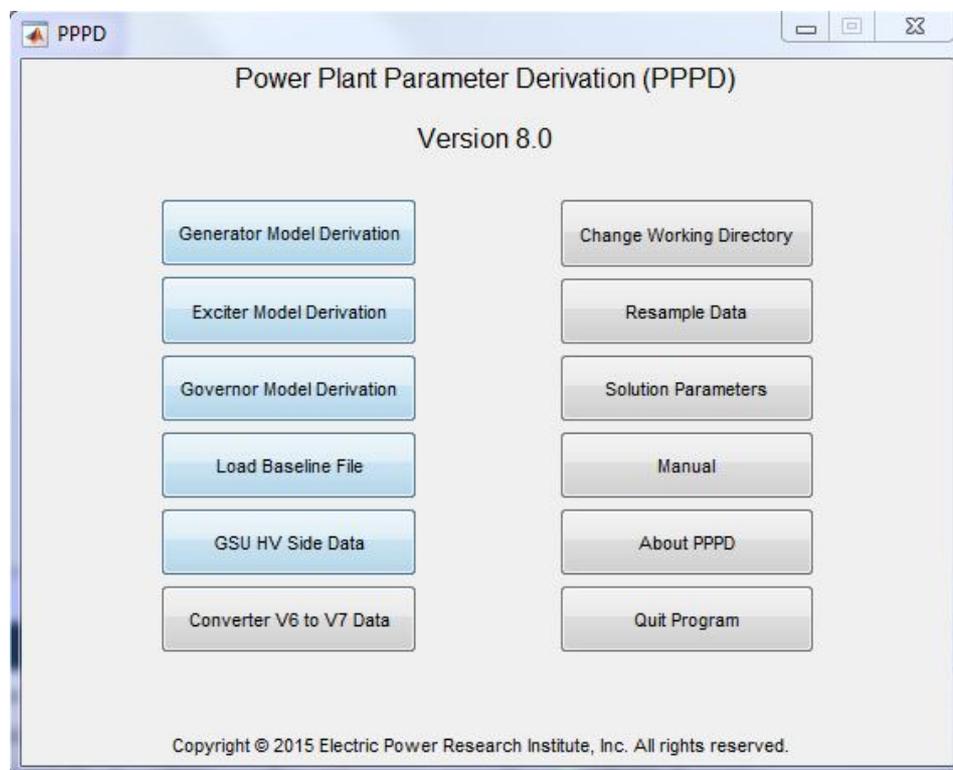


圖 4.18 PPPD 第 8 版畫面

- (1) 增加更多模型轉換至新版 PPPD，將傳統模式轉換到較新的模型，如 GAST 至 GGOV1、AC2A 至 REXS 等。
- (2) 允許在 PMU 量測點，繪製比較測量/模擬結果的數據選項。
- (3) 增加調整 PSS 的功能。
- (4) 增加一個功能來處理原始量測數據（即標么化等）。

- (5) 可以在 PPPD 建立一個獨立的單機無限匯流排模擬選項。
- (6) 擴展 PMU 的功能，包括從升壓變壓器至量測點的線路阻抗。
- (7) 允許在多個事件進行渦輪調速響應的優化。
- (8) 增加 PSLF GE 數據轉換到 PPPD 的功能（類似於 6.0 版增加了對西門子 PTI PSS / E 至 PPPD 的轉換功能）。
- (9) 增加更多調速機模型（WSHYDD 和 WESGOV）到 PPPD。

下一週期模型建立以及驗證使用者群組將從 2016 年至 2018 年，一期 3 年，目標是擴大並覆蓋其他設備及系統級驗證，核心仍然是以 PPPD 為主，增加其他模型驗證功能，包括 SVSMV(Static Var System Model Validation)工具、REMV(Renewable Energy Model Validation)工具、LMPD(Load Model Parameter Derivation)工具及 LDCT(Load Composition Data Tool)工具等。本使用者群組希望能涵蓋 NERC MOD 相關標準：MOD-026-1：驗證發電機勵磁模型。

MOD-027-1：驗證汽輪機/調速器模型。

MOD-032-1：電力系統建模與分析的數據。

MOD-033-1：穩態/動態系統模型驗證。

希望透過公開的標準模型及驗證此模型的方法，來加以驗證。PPPD 之驗證方法如圖 4.19 所示，SVSMV 之驗證方法如圖 4.20 所示，REMV 之驗證方法如圖 4.21 所示，LMPD 之驗證方法如圖 4.22 所示，LDCT 之驗證方法如圖 4.23 所示。

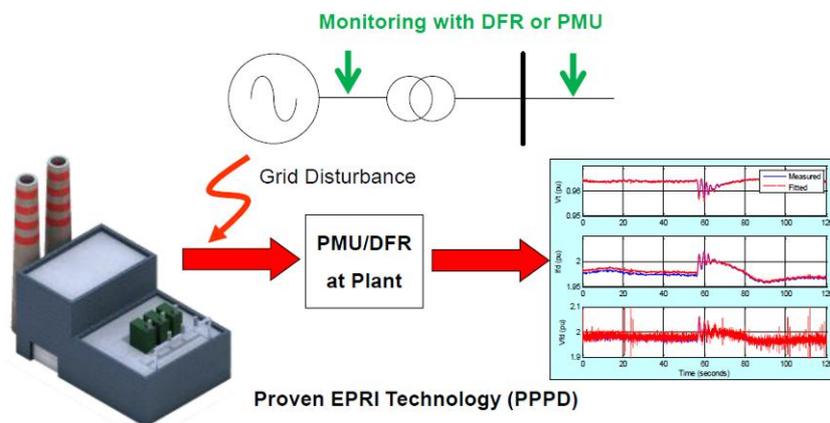


圖 4.19 PPPD 之驗證方法

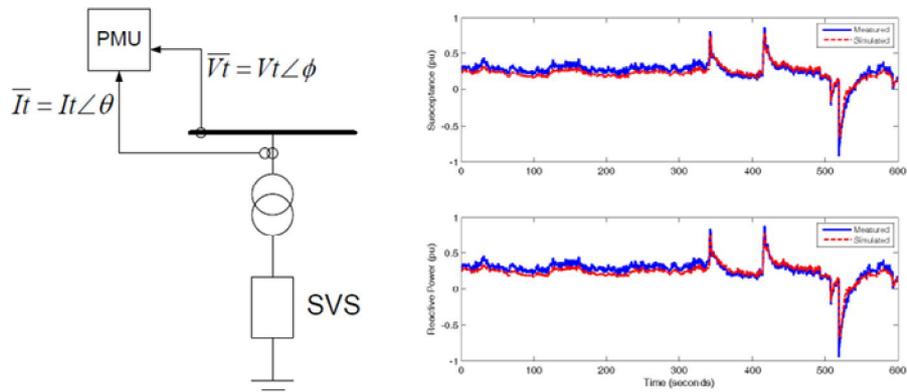


圖 4.20 SVSMV 之驗證方法

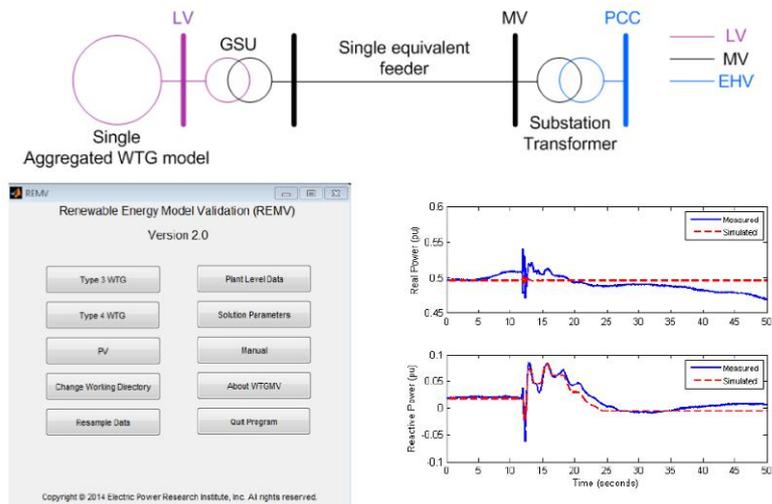


圖 4.21 REMV 之驗證方法

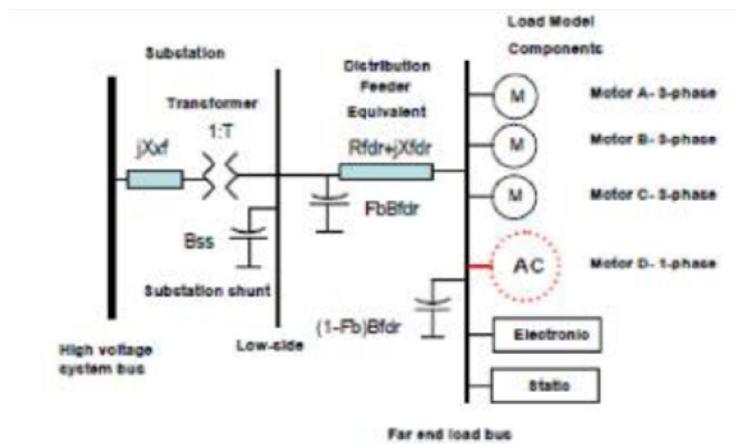


圖 4.22 LMPD 之驗證方法

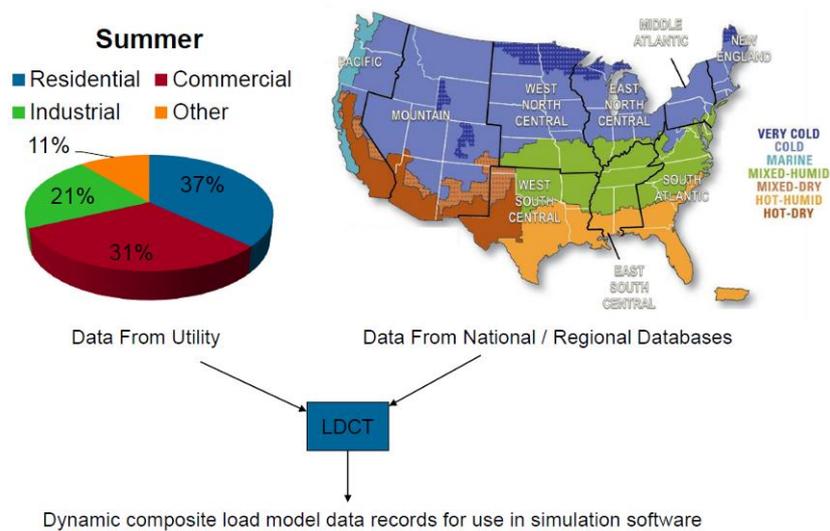


圖 4.23 LDCT 之驗證方法

4.7 PPPD 訓練課程

4.7.1 發電機參數概述

1996 年 8 月，美國西部電網(WSCC)發生了一場停電事故[3]，圖 4.24 為 WSCC 停電事故實功實際波形(上圖)與模擬波形(下圖)的比較，由圖中可看出電腦模擬的結果顯示系統並未發散，然而實際上系統已發散，這是由於發電機組動態模型參數準確性不足而導致模擬結果不準確，影響所及最終使得 WSCC 發生了一場停電事故，有鑑於此，驗證系統發電機組之模型參數是否能確實反映出機組狀況以確保結果的可靠性及準確性對於系統安全是一重要課題。

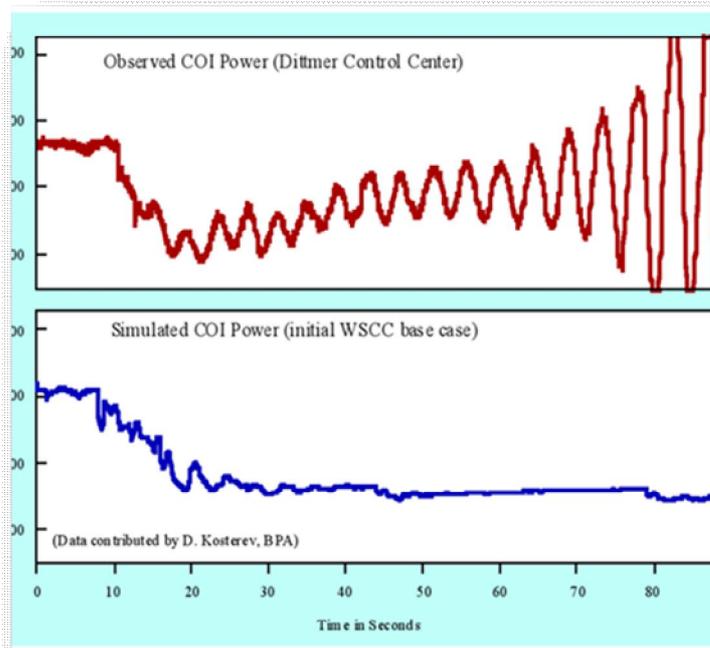


圖4.24 WSCC 停電事故之實功實際波形與模擬波形比較

電力系統運轉的目標為在設備正常且安全的運轉狀況下追求最佳經濟效益，為了評估電力系統承受事故衝擊的能力，利用電力系統的動態分析可以讓規劃及運轉人員檢視電力系統的動態特性，分析電力系統的各项運轉限制。電力系統動態分析結果的可信度取決於模擬中所使用的設備及線路參數，如發電機及線路模型參數等等。電力系統動態分析中發電機組所需模型包含：發電機、勵磁裝置、電力系統穩定器與調速機，而動態分析的模擬結果正確與否，將取決於前述設備動態模型參數之準確性。因此驗證系統發電機組之模擬參數是否能確實反映出機組狀況，以確保結果的可靠性及準確性對於系統安全是相當重要的。

關於同步發電機組參數估測的研究自 1960 年代末開始展開，發電機組參數估測的方法可分為兩類：(1)實地量測、(2)線上量測。藉由實地量測能夠深入地探討各個動態參數因而通常被應用在新發電機組商轉時之模型上，然而隨著發電機組持續運轉後經過歲修等工

作，機組模型參數可能產生偏移或者經由人為調整而改變，此時便需針對參數值予以修正。傳統上採用實地量測以修正參數值，但實地量測必須將量測機組停機離線以執行為期數日的各種測試，這將消耗大量的人力、金錢成本並且可能造成機組損耗，因此為了克服實地量測的缺點，近年來許多研究致力於發電機組的參數線上量測。

PPPD 軟體針對實地量測與線上量測所獲取之資料，均可做為參數驗證之資料，本文以下針對實地量測與線上量測之方法與測試程序進行說明，以做為後續 PPPD 軟體參數驗證之基礎。

4.7.2 實地量測發電機(Generator)參數

一、發電機(Generator)參數量測

(一) 開路特性(飽和)測試

機組必須運轉在額定轉速沒有負載(主斷路器開路)，若為自激式靜態激磁系統之磁場閃激(Flash)後發電機端電壓(V_t)可能高於額定電壓的 30%，可藉由調低機組磁場電壓，使發電機端電壓降至額定電壓的 30%，然後機組磁場電壓可以向前調昇，使發電機端電壓逐步上升(每個步階約 1000 V)，直到機組最大的容忍極限。

a. 測試程序

1. 機組運轉在額定速度。
2. 發電機斷路器開路。
3. 發電機電壓(V_t)遞昇加壓從 30%至 120%(若不允許可加至 105%)。
4. 記錄 V_t , I_{fd} , E_{fd} , $f(\text{Hz})$ 。

b. 問題檢討

1. 可以調整 AVR/MAN 控制範圍，激磁系統必須置於 MAN(手動)。
2. V/Hz 限制器保護設定通常限制要提高，讓測試可以順利進行。
3. 靜態激磁機磁場閃激(Flash)後降至額定電壓的 30%
4. 經由試驗求出飽和參數 S_1 , S_2 。

(二) 磁場短路(T'_{do})測試

機組必須運轉在額定轉速且負載為零(主斷路器開路)，在 100%額定發電機端電壓時，打開激磁場斷路器，移除機組之激磁電壓(E_{fd})，機組磁場繞組被切換至去磁回路，因去磁電阻慎小繞組形同短路。 T'_{do} 時間常數經由磁場短路試驗來求得，方法是依據放電電阻的 V-I 特性和轉子繞組溫度決定，但是這個試驗只能在有刷式激磁系統量測，無刷式激磁系統無引出點，不易進行量測。

a. 測試程序

1. 機組運轉在額定速度。
2. 發電機斷路器開路。
3. 在 100%額定發電機端電壓時，打開磁場斷路器。
4. 記錄 V_t , I_{fd} , E_{fd} , $f(\text{Hz})$ 。

b. 問題檢討

1. 此測試方法無法應用於無刷式激磁系統。
2. 非線性放電電阻或電壓抑制器加在去磁回路中，會影響測試準確度。
3. 手動控制激磁，加步階信號至發電機磁場，同樣也可達到量測目的。

$$T'_{do} = T'_{doR}(R_{fd} + R_D) / R_{fds} \quad (\text{Seconds})$$

其中，

T'_{doR} ：測得之時間常數，包含放電電阻器。

R_{fd} ：量測磁場電阻。

R_{fds} ：特定溫度下之磁場電阻。

R_D ：量測的放電電阻。

(三) d 軸參數測試(MVAr 卸載試驗)

機組要並聯入電力系統，調整有效功率輸出為 0 MW，並且大約輸

入 30%額定進相超前無效功率，激磁系統使用手動控制模式，然後機組斷路器將被打開，無效功率負載跳脫，這個測試結果將被用來推導 d 軸的暫態、次暫態阻抗和時間常數。

a. 測試程序

1. 機組運轉在 0 MW 和 -30% 額定 MVar。
2. 激磁機使用手動控制維持磁場電壓不變。
3. 調速機最低負載限制應設定為 0 MW。
4. 記錄 V_t , I_{fd} , E_{fd} 。
5. 打開發電機斷路器，無效功率卸載試驗。

b. 問題檢討

1. 自激式靜態激磁系統的場電壓供應來自發電機端電壓，磁場電壓無法固定，因此必須改為他激激磁才不會影響測試。
2. 手動電壓若有最低預設值必須暫時失能。
3. 逆功率保護電驛必須暫時失能。

(四) q 軸參數測試(部份 MW 卸載試驗一)

機組並入電力系統，首先調整有效功率輸出為 20% Rated MW，並且在欠激情況下，激磁系統使用手動控制模式，調速機設定在 Speed droop 控制，量測轉子角度(Rotor angle)與負載角度(Load angle)是否相同，若不相同則可調整磁場電壓使之相同，此時發電機電樞電流和轉子 q 軸連成一線，機組斷路器必須在此特定情況下打開，完成卸載試驗，這個測試結果將被用來推導 q 軸發電機參數。

a. 測試程序

1. 機組運轉在 20 % MW 和進相超前-MVar 情況下。
2. 激磁機使用手動控制，調整磁場電壓使轉子角度與負載角度相同(定子電流與轉子 q 軸在同一線上)。
3. 調速機設定為 Speed droop 控制。
4. 記錄 V_t , I_{fd} , E_{fd} 。

5. 打開發電機斷路器，完成卸載試驗。

b. 問題檢討

1. 自激式靜態激磁系統的場電壓供應來自發電機端電壓，磁場電壓無法固定，因此必須改為它激激磁才不會影響測試。
2. 在旋轉激磁系統過速度會引起磁場電壓改變。
3. 手動電壓若有最低預設值必須暫時失能。
4. 轉速慢的機組轉子角度與負載角度對相不易。
5. 發電機斷路器開起信號，輸入調速機控制器必須暫時失能，防止機組速度回到預設值。

(五) 部份負載卸載試驗二

機組並入電力系統，首先調整有效功率輸出為大約 10%~20% Rated MW，並且在欠激情況下，激磁系統使用自動電壓調整(AVR)模式，調速機設定在 Speed droop 控制，然後機組斷路器在此情況下打開，完成卸載試驗，這個測試結果可以推導出(1)渦輪機和發電機之慣性(Inertia)常數，(2)調速機模型參數包括速度低垂(Speed droop)百分比。

a. 測試程序

1. 機組運轉在 10%~20% MW 和進相超前-10% Mvar 情況下。
2. 激磁機使用自動電壓調整(AVR)模式。
3. 調速機設定為 Speed droop 控制。
4. 記錄 V_t , I_{fd} , E_{fd} , $f(\text{Hz})$, Gate position。
5. 打開發電機斷路器，完成卸載試驗。

b. 問題檢討

1. 發電機斷路器開起信號，輸入調速機控制器必須暫時失能，防止機組速度回到預設值。
2. 要確保卸載後無動態煞車動作產生。

二、激磁系統(Excitation system)測試

(六) 電壓調整器步階響應測試

機組運轉在額定轉速無載(主斷路器開啟)，激磁機必須設定在 AVR 控制(Auto mode)額定電壓情況下，個別加入 5 %和 10 %的步階信號到 AVR 的參考設定點，此時發電機對應電壓分別為 100 %和 95 %額定電壓，這個試驗是為了確認激磁機的模型參數。

a. 測試程序

1. 機組運轉在額定速度(AVR mode)。
2. 發電機斷路器開路。
3. 在 100 %額定發電機端電壓時，加入 5 %步階信號。
4. 重複在 95 %額定發電機端電壓時，加入 10 %步階信號，測出極頂電壓和最低電壓。
5. 試驗時記錄 V_t , I_{fd} , E_{fd} , Step signal, AVR 輸出點和可以量測到的點。

b. 問題檢討

確認試驗不受激磁限制器如 V/Hz 和 OEL 等干擾(限制器功能暫時失效)。

(七) 無效功率電流補償(電壓低垂,線路壓降補償)測試

機組要並聯入電力系統，調整有效功率輸出為 0 MW，並且大約輸入 30%額定 MVar 進相超前無效功率，激磁系統使用 AVR 模式，然後機組斷路器將被打開，無效功率負載跳脫，這個測試是為了驗證電流補償設定和激磁系統模型參數，包含 AVR 增益 KA。

a. 測試程序

1. 機組運轉在 0 MW 和 -30% 額定 MVar。
2. 激磁機使用 AVR 控制模式。
3. 調速機最低負載限制應設定為 0 MW。
4. 記錄 V_t , I_{fd} , E_{fd} 。
5. 打開發電機斷路器，無效功率卸載試驗。

b. 問題檢討

1. AVR 電壓設定器預設值和發電機對線路電壓自動追隨調整器必須暫時失能。
2. 逆功率保護電驛必須暫時失能。
3. 另一選擇方法為激磁系統暫態測試，亦可驗證激磁控制系統模型參數。

(八) V/Hz 限制器測試

機組運轉在額定轉速無載(主斷路器開啟)，激磁機必須設定在 AVR 控制(Auto mode)額定電壓情況下，加入 10%的步階信號到 AVR 的參考設定點，時間要比限制器延時動作時間長，這樣可以監視 V/Hz 限制器動作反應是否正確。

a. 測試程序

1. 機組運轉在額定速度(AVR mode)。
2. 發電機斷路器開路。
3. 在 100%額定發電機端電壓時，加入 10%步階信號。
4. 加入 10%步階信號，時間要比限制器延時動作時間長。
5. 試驗時記錄 V_t , I_{fd} , E_{fd} , $f(\text{Hz})$, Step signal 輸出點和可以量測到的點。

b. 問題檢討

1. 為確保設備安全，可降低限制器設定值，來完成測試驗證 V/Hz 功能。
2. 也可不加步階信號至 AVR，而以降低機組轉速來進行此項測試。

(九) 最低激磁限制器(Under(Minimum) Excitation Limiter, UEL)測試

最低激磁限制器測試時機組並聯入電力系統，機組調整有效功率輸出分別為 0%, 25%, 50, 75%和 100% MW 負載，並且逐漸減少發電機磁場電壓直到 UEL 限制器動作，亦可在每個設定的負載情況下，加

入一個負電壓步階信號到 AVR 的參考設定點，來檢驗 UEL 的動態功能。

a. 測試程序

1. 機組運轉在 0%, 25%, 50,75%和 100% MW 負載。
2. 激磁機使用 AVR 控制模式。
3. 根據 1 不同負載，調降激磁電壓直到 UEL 動作。
4. 記錄 Vt, Ifd, Efd, MW, MVar。

b. 問題檢討

若運轉上限制，可由保護電驛測試設備輸出模擬發電機電壓電流至限制器，達到 UEL 靜態特性設定測試。

(十) 最高激磁限制器(Over(Maximum) Excitation Limiter)測試

最高激磁限制器測試時機組並聯入電力系統，機組調整有效功率輸出分別為 0%, 25%, 50 %,75 %和 100% MW 負載，並且逐漸增加發電機磁場電壓直到 OEL 限制器動作，亦可在每個設定的負載情況下，加入一個步階信號到 AVR 的參考設定點，來檢驗 OEL 的動態功能。

a. 測試程序

1. 機組運轉在 0%, 25%, 50, 75%和 100% MW 負載。
2. 激磁機使用 AVR 控制模式。
3. 根據 1 不同負載，調升激磁電壓直到 UEL 動作。
4. 記錄 Vt, Ifd, Efd, MW, MVar。

b. 問題檢討

為了避免機組跳脫，測試最大 MW 與最大 MVar 時，可將 OEL 設定值暫時降低。

(十一) 電力系統穩定器(Power System Stabilizer)測試

對數位式的 PSS 而言，頻率響應測試並不是必要的測試，但是從 PSS 輸入端加入步階信號測試其暫態時間響應則是必要的，最後機組並聯入電力系統，在滿載時測試其動態特性，檢驗 PSS 對小信號穩定度(系統低頻振盪)的貢獻。

a. 測試程序

1. 機組運轉在 100% MW 負載。
2. 激磁機使用 AVR 控制模式。
3. AVR 輸入端加入 3%的步階信號，觀察機組與系統的擾動。
4. 當 PSS OFF 和 ON 時，個別記錄 V_t , I_{fd} , E_{fd} , MW, MVar。

b. 問題檢討

因系統之擾動(低頻振盪)無法預期何時會發生，因此僅能模擬機組本身振動，來檢驗 PSS 的功能，藉以達到調整模型參數之目的。

三、渦輪與調速機(Governor)測試

(十二) 部份負載卸載試驗(同發電機參數量測，但記錄不同參數信號)

機組並聯入電力系統，首先調整有效功率輸出為大約 10%~20% rated MW，並且在欠激情況下，激磁系統使用自動電壓調整(AVR)模式，調速機設定在 Speed droop 控制，然後機組斷路器在此情況下打開，完成卸載試驗，這個測試結果可以推導出(1)渦輪機和發電機之慣性(Inertia)常數，(2)調速機模型參數包括速度低垂(Speed droop)百分比，用以確認調速機模型參數。

a. 測試程序

機組運轉在 10%~20% MW 和進相超前-10%Mvar 情況下。

1. 激磁機使用自動電壓調整(AVR)模式。
2. 調速機設定為 Speed droop 控制。
3. 記錄 V_t , I_{fd} , E_{fd} , $f(\text{Hz})$, Gate position。
4. 打開發電機斷路器，完成卸載試驗。

b. 問題檢討

1. 發電機斷路器開起信號，輸入調速機控制器必須暫時失能，防止機組速度回到預設值。
2. 要確保卸載後無動態煞車動作產生。

(十三) 調速機步階響應測試

機組並聯入電力系統，首先調整有效功率輸出為大約 80% rated MW，激磁系統使用自動電壓調整(AVR)模式，調速機設定在 Speed droop 控制，加入頻率步階信號至調速機控制器速度參考點，藉由測試決定不動帶(Dead band)、速度調整和控制範圍，這個測試結果可以檢查出調速機速度調整設定，並且建立調速機模型參數。

a. 測試程序

機組運轉在 80% MW。

1. 激磁機使用自動電壓調整(AVR)模式。
2. 調速機設定為 Speed droop 控制。
3. 測試不同大小的步階信號至調速機控制器速度參考點，決定不動帶(Dead band)、速度(Droop)調整和其它參數。
4. 試驗同時記錄 MW, Speed, flow, f(Hz), Gate position 和負載設定。

b. 問題檢討

大部份的條調速機很難進行頻率步階響應測試。

(十四) 水始動時間測試(只有水力機組適用)

機組並聯入電力系統，首先調整有效功率輸出為大約 80% rated MW，無效功率輸出相對並不重要，測試時機組負載瞬間由導翼限制器降至 50%，機組穩定後再由導翼限制器調升至 65%，從這個測試可以決定水的時間常數和調速機系統的不動帶(Dead band)。

a. 測試程序

1. 機組運轉在 80% MW。

2. 快速將導翼限制器降負載至 50%。
3. 試驗同時記錄 MW, Speed, flow, f(Hz), Gate position 和緩衝壺 (dashpot)連桿位移。

(十五) 調速機速度低垂(droop)測試(僅適用於水力機組)

調速機速度調整器之操作可得到導翼位置和負載的對應關係，和導翼位置和機組速度的特性，這兩組特性互相連結，可以決定整個調速機操作範圍速度低垂(droop)百分比的設定。

a. 測試程序

1. 依據不同型式調速機實際驗證。
2. 並聯量測機組出力和速度參考值(例如氣渦輪機組)。
3. 量測油壓設定點和機組無載速度及量測油壓設定點和機組負載輸出之對應關係(例如汽渦輪機組)。
4. 量測速度調整器和機組無載速度及量測速度調整器和機組負載輸出之對應關係(例如水輪機組)。

(十六) 緩衝壺(Dashpot)時間常數測試(僅適用於水力機組)

機組運轉在無載額定速度，藉由導翼限制器增加/減少將機組速度快速改變，同時記錄緩衝壺連桿和導翼的位移。

a. 測試程序

1. 依據不同型式調速機實際驗證。
2. 量測記錄緩衝壺連桿位移、翼連桿位移和時間之對應關係。

(十七) 蒸氣室(Steam chest)時間常數測試(僅適用於汽渦輪機組)

機組並聯入電力系統，首先調整有效功率輸出為大約 80% rated MW，無效功率輸出相對並不重要，機組負載瞬間由蒸氣閥開度限制器降至 75%，當穩定之後，再由蒸氣閥開度限制器將負載提升至 80%，從這個測試可以決定蒸氣室的時間常數。

a. 測試程序

1. 機組運轉在 80% MW。
2. 快速將蒸氣閥開度限制器降至 75% 負載，穩定後再提升至 80% 負載。
3. 試驗同時記錄蒸氣閥開度和時間之對應關係。

4.7.3 線上發電機(Generator)參數量測

一、發電機(Generator)參數量測

(一) V 曲線測試

線上量測是在大範圍的發電機負載狀況下進行量測，這樣的量測也可以被稱為 V 曲線測試，其功能主要在驗證發電機 d 軸參數及 q 軸參數的準確性與發電機飽和係數。發電機在不同負載下的端電壓值、實功及虛功狀態，根據不同的負載狀態進行擬合。

a. 測試程序

1. 發電機分別運轉在實功輸出為 100%、75%、50%、25%。
2. 在不同之實功輸出情況下，分別調整虛功輸出，使虛功輸出分別運轉在進相及遲相之穩態條件下。
3. 在各穩態運轉點上分別記錄 V_t , I_{fd} , E_{fd} , MW, MVar。

二、激磁系統(Excitation system)測試

(二) 電壓調整器步階響應測試

機組運轉在額定轉速有載(主斷路器投入)，激磁機必須設定在 AVR 控制(Auto mode)額定電壓情況下，個別加入 5 % 和 10 % 的步階信號到 AVR 的參考設定點，此時發電機對應電壓分別為 100 % 和 95 % 額定電壓，這個試驗是為了確認激磁機的模式參數。

a. 測試程序

1. 機組運轉在額定速度(AVR mode)。

2. 發電機斷路器投入。
3. 在 100 %額定發電機端電壓時，加入 5 %步階信號。
4. 重複在 95 %額定發電機端電壓時，加入 10 %步階信號，測出極頂電壓和最低電壓。
5. 試驗時記錄 V_t , I_{fd} , E_{fd} , Step signal, AVR 輸出點和可以量測到的點。

b. 問題檢討

確認試驗不受激磁限制器如 V/Hz 和 OEL 等干擾(限制器功能暫時失效)。

三、渦輪與調速機(Governor)測試

(三) 調速機步階響應測試

機組並聯入電力系統，首先調整有效功率輸出為大約 80% rated MW，激磁系統使用自動電壓調整(AVR)模式，調速機設定在 Speed droop 控制，加入頻率步階信號至調速機控制器速度參考點，藉由測試決定不動帶(Dead band)、速度調整和控制範圍，這個測試結果可以檢查出調速機速度調整設定，並且建立調速機模型參數。

a. 測試程序

機組運轉在 80% MW。

1. 激磁機使用自動電壓調整(AVR)模式。
2. 調速機設定為 Speed droop 控制。
3. 測試不同大小的步階信號至調速機控制器速度參考點，決定不動帶(Dead band)、速度(Droop)調整和其它參數。
4. 試驗同時記錄 MW, Speed, flow, f(Hz), Gate position 和負載設定。

b. 問題檢討

大部份的調速機很難進行頻率步階響應測試。

四、系統擾動之 PMU 或 DFR 資料

發電機均安裝 PMU 及 DFR 以監測相關電力數據，以在系統發生的重大擾動事件，均由 PMU 及 DFR 所監錄到，並利用此資料以 PPPD 進行相關發電機參數驗證工作。

4.7.4 PPPD 軟體參數驗證

針對實地量測與線上量測所獲取之資料，均可做為 PPPD 軟體參數驗證之資料，下面章節以實地量測與線上量測之資料，進行 PPPD 軟體參數驗證說明。第七版 PPPD 軟體之主畫面如圖 4.25 所示，包括發電機【Generator Model Derivation】、勵磁機【Exciter Model Derivation】與調速機【Governor Model Derivation】模型推導選項，分別針對不同發電機、勵磁機與調速機模型進行參數驗證。目前提供之發電機模型包括 GENROU、GENSAL 與 GENTPJ 等三種模型，勵磁機模型包括靜態勵磁機模型含 ESST1A、ESST2A、ESST3A、ESST4B、ESST5B、ESST6B、ESST7B，交直流勵磁機模型含 ESAC3A、ESAC6A、ESAC7B、ESAC8B、ESDC4B、REXS 等，勵磁機模型之交叉參考如表 4.1 所示，調速機模型則包括 GGOV1、IEEEG1、HYGOV、WEHGOV 等，各模型之方塊圖則參考附錄一所示。本版本亦提供將第六版資料轉換成第七版資料之功能【Converter V6 to V7 Data】，讓使用者在更新版本時更順暢，另提供利用 PMU 監測設備於高壓側監錄到之資料，轉換至發電機側資料之轉換功能【GSU HV Side Data】。

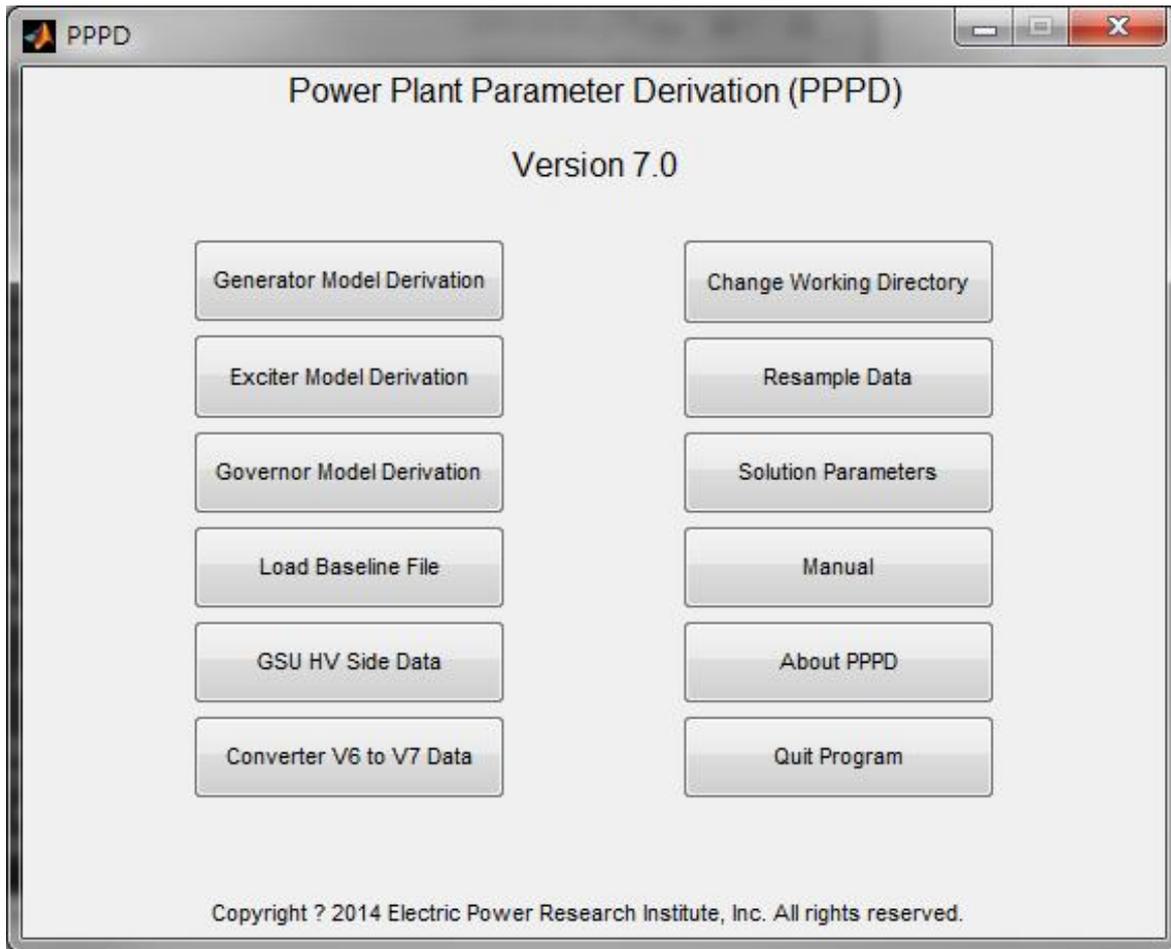


圖 4.25 PPPD 軟體主畫面

表 4.1 勵磁機模型交叉參考表

Model Name From IEEE Std 421 (2006 version)	Model Type	Model Name in GE PSLF®	Model Name in Siemens PTI PSS®E	Model to use in PPPD to fit parameters
DC1A	DC Exciter	ESDC1A	ESDC1A	REXS
DC2A	DC Exciter	ESDC2A	ESDC2A	REXS
DC3A	DC Exciter	ESDC3A	ESDC3A	none
DC4B	DC Exciter	ESDC4B	DC4B	ESDC4B
AC1A	Rotating Exciter	ESAC1A	ESAC1A	REXS
AC2A	Rotating Exciter	ESAC2A	ESAC2A	REXS
AC3A	Rotating Exciter	ESAC3A	ESAC3A	ESAC3A
AC4A	Rotating Exciter	ESAC4A	ESAC4A	ESST1A
AC5A	Rotating Exciter	ESAC5A	ESAC5A	REXS
AC6A	Rotating Exciter	ESAC6A	ESAC6A	ESAC6A
AC7B	Rotating Exciter	ESAC7B	AC7B	ESAC7B
AC8B	Rotating Exciter	ESAC8B	AC8B	ESAC8B
ST1A	Static Exciter	ESST1A	ESST1A	ESST1A
ST2A	Static Exciter	ESST2A	ESST2A	ESST2A
ST3A	Static Exciter	ESST3A	ESST3A	ESST3A
ST4B	Static Exciter	ESST4B	ESST4B	ESST4B
ST5B	Static Exciter	ESST5B	ST5B	ESST5B
ST6B	Static Exciter	ESST6B	ST6B	ESST6B
ST7B	Static Exciter	ESST7B	ST7B	ESST7B

一、發電機

(一) 實地量測

利用燃氣機組之卸載虛功試驗資料，本項試驗勵磁機需設置於手動，經資料處理標么化後進行發電機參數之驗證，圖 4.26 所示為標么化後之輸入資料格式 Gen_Exp_2.txt。該發電機使用無刷式勵磁機，因此所量測到之勵磁電壓與電流為勵磁機之勵磁電壓與電流，並非發電機之勵磁電壓及電流，然因其呈現線性相關之關係，故以勵磁機之勵磁電壓與電流進行標么化後可代表發電機之勵磁電壓及電流。圖 4.27 所示為輸入實地量測資料之畫面，發電機參數以原廠提供之資料為初始條件，上下界限為此初始條件之 $\pm 10\%$ ，其中發電機飽和係數 S10 及 S12 係由發電機開迴路飽和試驗求得，故將其限定在很小的範圍不做調整。在此需輸入試驗時之 P、Q、發電機端電壓、發電機額定與跳脫之時間，並選取無刷式勵磁機選項。圖 4.28 所示為最佳化擬合後之發電機端電壓與勵磁機之勵磁電流，得到很好之擬合，擬合結果之參數則輸出至 Gen_Exp_2.out 文字檔案，檔案內容如圖 4.29 所示。

Time	Vt (pu)	Efd (pu)	Ifd (pu)	Speed (pu)
1 0.000000e+000	9.8760740e-001	8.2695026e-001	8.8055938e-001	9.9807876e-001
2 5.0000000e-003	9.8656634e-001	9.6827258e-001	8.8973365e-001	9.9827737e-001
3 1.0000000e-002	9.8637596e-001	9.5049029e-001	8.9915257e-001	9.9913836e-001
4 1.5000000e-002	9.8673689e-001	8.2743497e-001	8.9704274e-001	9.9979920e-001
5 2.0000000e-002	9.8747965e-001	7.7678825e-001	8.8074187e-001	9.9981526e-001
6 2.5000000e-002	9.8704340e-001	8.9221682e-001	8.6521040e-001	9.9980392e-001
7 3.0000000e-002	9.8669898e-001	1.0035621e+000	8.5730000e-001	9.9981966e-001
8 3.5000000e-002	9.8652576e-001	9.0112658e-001	8.6201354e-001	9.9972866e-001
9 4.0000000e-002	9.8635257e-001	7.9642059e-001	8.7845403e-001	9.9958211e-001
10 4.5000000e-002	9.8634979e-001	8.3403843e-001	8.8387743e-001	9.9944526e-001
11 5.0000000e-002	9.8571429e-001	9.9781632e-001	8.9377536e-001	9.9958008e-001
12 5.5000000e-002	9.8617276e-001	9.5125694e-001	9.0306764e-001	9.9989646e-001
13 6.0000000e-002	9.8591057e-001	8.2967508e-001	8.9984730e-001	1.0001619e+000
14 6.5000000e-002	9.8674692e-001	7.9279688e-001	8.8133201e-001	1.0001096e+000
15 7.0000000e-002	9.8602492e-001	9.3134386e-001	8.6650853e-001	9.9969005e-001
16 7.5000000e-002	9.8680391e-001	9.6120416e-001	8.6668256e-001	9.9953473e-001
17 8.0000000e-002	9.8613312e-001	8.6743833e-001	8.6854179e-001	9.9966664e-001
18 8.5000000e-002	9.8680061e-001	7.9057182e-001	8.8444240e-001	9.9994774e-001
19 9.0000000e-002	9.8654273e-001	8.6101217e-001	8.8884804e-001	1.0001182e+000
20 9.5000000e-002	9.8688040e-001	9.8264823e-001	9.0244615e-001	1.0000634e+000
21 1.0000000e-001	9.8587267e-001	9.4482935e-001	9.0689173e-001	9.9995126e-001
22 1.0500000e-001	9.8646474e-001	8.2004193e-001	9.0201796e-001	9.9981817e-001
23 1.1000000e-001	9.8585350e-001	8.4586727e-001	8.8321676e-001	9.9966146e-001
24 1.1500000e-001	9.8660041e-001	9.6595739e-001	8.6746354e-001	9.9962953e-001
25 1.2000000e-001	9.8614864e-001	9.7973898e-001	8.6118511e-001	9.9975517e-001
26 1.2500000e-001	9.8619677e-001	8.5158433e-001	8.6990139e-001	9.9966323e-001
27 1.3000000e-001	9.8658608e-001	7.7416593e-001	8.7816305e-001	9.9955509e-001
28 1.3500000e-001	9.8668952e-001	9.0293060e-001	8.8571211e-001	9.9996703e-001
29 1.4000000e-001	9.8731992e-001	1.0067396e+000	8.9305401e-001	1.0003840e+000

圖 4.26 標么化後之輸入資料格式

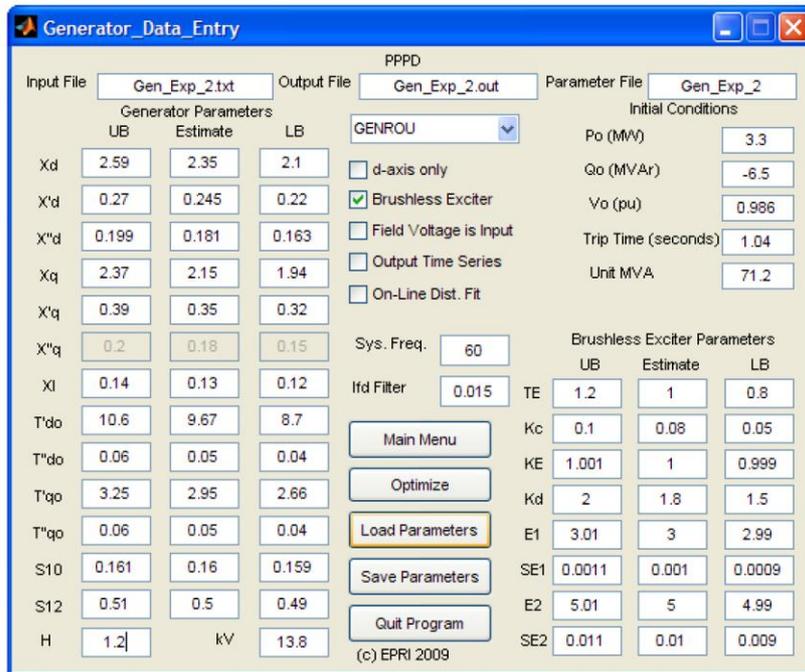


圖 4.27 實地量測資料發電機參數驗證

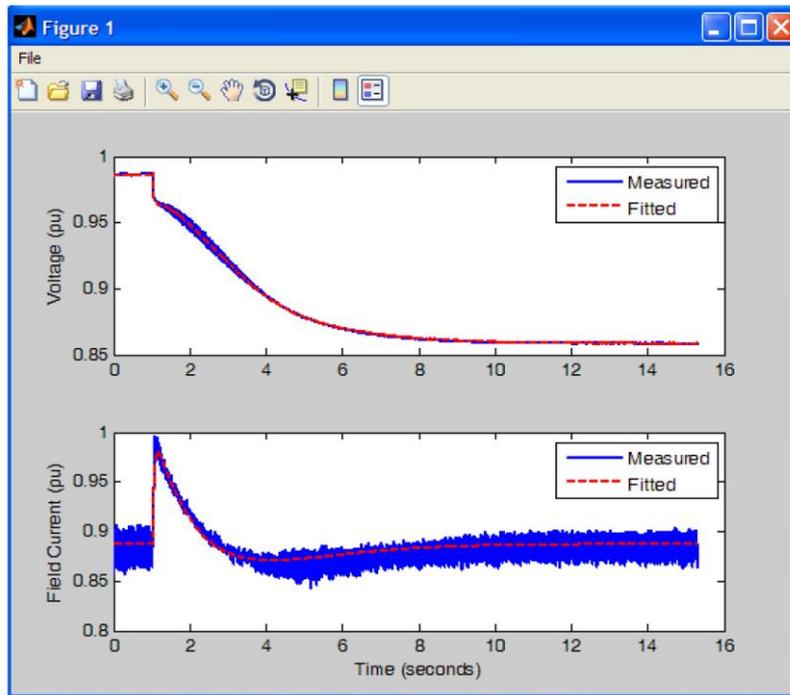


圖 4.28 擬合後之發電機端電壓與勵磁機之勵磁電流

```

1 Generator Parameter Optimization
2 -----
3
4 GENROU Model, Optimized All Parameters
5 Input File: Gen_Exp_2.txt
6 Fo = 3.300 MW, Qo = -6.500 MVar, Vo = 0.986 pu, MVA = 71.200, fo = 60.000 Hz, and Trip Time = 1.040
7 Field Current filtered with a time constant of = 0.015
8
9 Xd      Xpd      Xppd      Xq      Xpq      Xl      Tpdo      Tppdo      Tpqo      Tppqo      S10      S12      TE      Kc      KE      Kd      E1
10 2.469   0.243   0.175   2.137   0.350   0.126   9.755   0.053   2.954   0.052   0.160   0.494   1.130   0.073   0.999   1.731   3.000
11
12 PSLF Format Data Card:
13 -----
14
15 # User must appropriately assign the actual Bus number, name and unit ID. Ra,rcomp, xcomp all set to zero
16 #
17 genrou 99999 "GENROUXX" 13.80 "1" : #9 nva=71.200 9.755 0.053 2.954 0.052 /
18 1.200 0.000 2.469 2.137 0.243 0.350 0.175 /
19 0.126 0.160 0.494 0.000 0.000 0.000
20
21
22 PSS/E Format Data Card:
23 -----
24
25 # User must appropriately assign the actual bus number and unit ID. Ra,rcomp, xcomp all set to zero
26 #
27 99999 'GENROU' 1 9.755 0.053 2.954 0.052 1.200 0.000 2.469 2.137 0.243 0.350 0.175 0.126 0.160 0.494 /
28

```

圖 4.29 擬合結果之 Gen_Exp_2.out 文字檔案

(二) 線上量測

本案例為利用線上勵磁機步階響應試驗，進行勵磁機模型之驗證，該基載汽輪發電機之額定為 496MVA，資料由內建於勵磁系統之 DFR 紀錄所獲得，經標么化之輸入檔案 GeneratorOnline.txt 如圖 4.30 所示，圖 4.31 所示為輸入之參數與畫面，其中選取【On-Line dist. Fit】選項，圖 4.32 為擬合結果之發電機端電壓與勵磁機勵磁電流，擬合結果之參數則輸出至 GeneratorOnline.out 文字檔案。

```

# This is data collected in November
# The data was collected on the John Doe Unit in Any Town, USA
# Time P Q Vt Efd Ifd Speed
0.0000000e+000 5.0373654e+001 1.4098272e+001 9.8690338e-001 1.4783164e+000 1.4739346e+000 1.0001333e+000
1.0000000e-003 5.0386075e+001 1.4068347e+001 9.8665442e-001 1.5016583e+000 1.4739346e+000 1.0001333e+000
2.0000000e-003 5.0522721e+001 1.4009608e+001 9.8636368e-001 1.4160715e+000 1.4739346e+000 1.0001333e+000

```

圖 4.30 標么化之輸入檔案 GeneratorOnline.txt

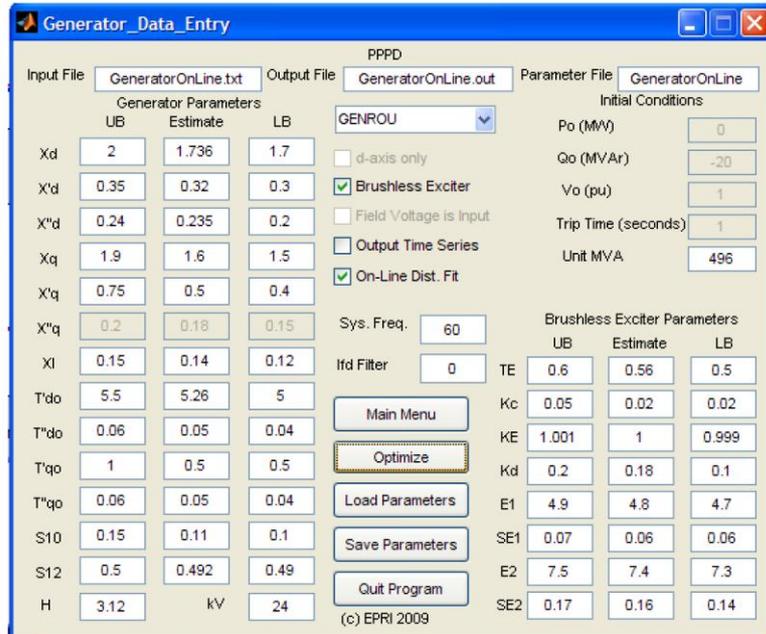


圖 4.31 輸入之參數與畫面

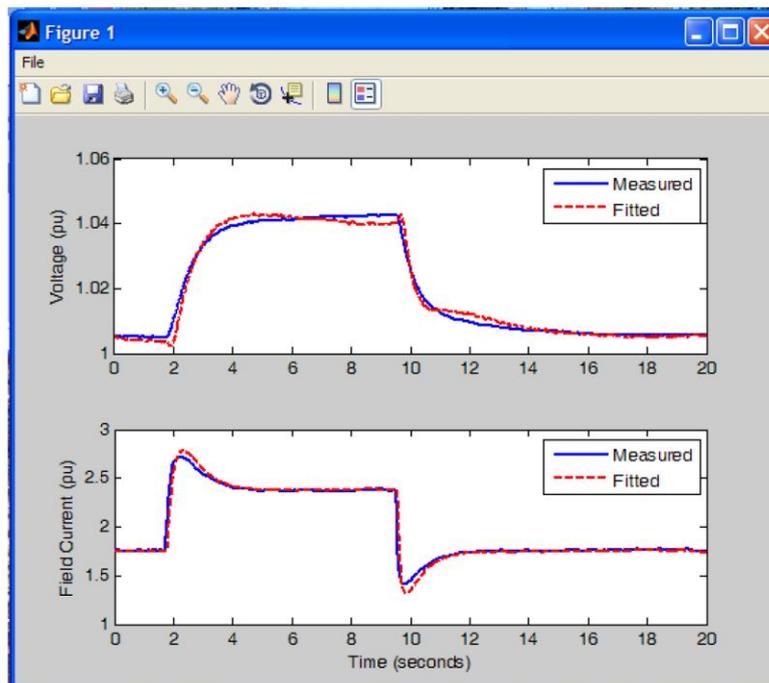


圖 4.32 擬合結果之發電機端電壓與勵磁機勵磁電流

二、勵磁機

針對 PPPD 勵磁機模型之驗證，可利用下述之資料，目前在 PPPD 軟體內建 12 種 IEEE 標準模型可供驗證。

(a) 卸虛功試驗

- (b) 勵磁系統離線步階響應試驗
- (c) 勵磁系統線上步階響應試驗
- (d) 線上系統擾動資料

表 1 所示勵磁機模型交叉參考表，勵磁機模型包括靜態勵磁機模型含 ESST1A、ESST2A、ESST3A、ESST4B、ESST5B、ESST6B、ESST7B，交直流勵磁機模型含 ESAC3A、ESAC6A、ESAC7B、ESAC8B、ESDC4B、REXS 等。

(一) 無刷式勵磁機—ESAC8B

在進行勵磁機模型參數驗證前，需先確認發電機參數，圖 4.33 所示為利用虛功卸載試驗資料進行勵磁機模型參數驗證，擬合結果很好。

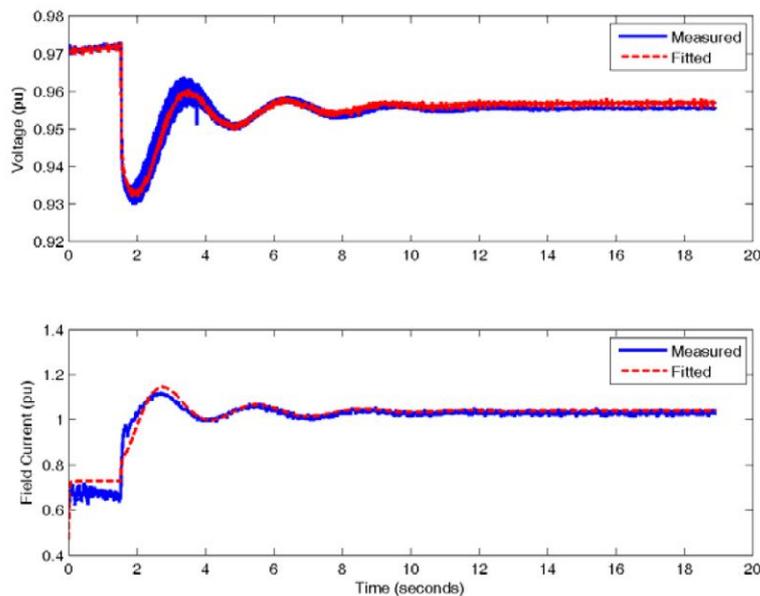


圖 4.33 虛功卸載試驗資料進行勵磁機模型參數驗證

(二) 利用線上擾動資料驗證勵磁機模型

除利用前述之實地量測資料(虛功卸載試驗資料)，進行勵磁機模

型參數驗證外，以可利用計畫性之線上量測資料(線上步階響應試驗資料)或非計畫性之系統擾動資料(如系統平衡故障、大型發電機或負載跳脫導致電壓的波動)。圖 4.34 所示利用線上步階響應試驗資料進行勵磁機模型擬合之結果，圖 4.35 所示則為利用 WECC 在 2008 年 11 月 7 日發生的系統事故，經由發電機本身的 DFR 所記錄到的資料進行擬合。

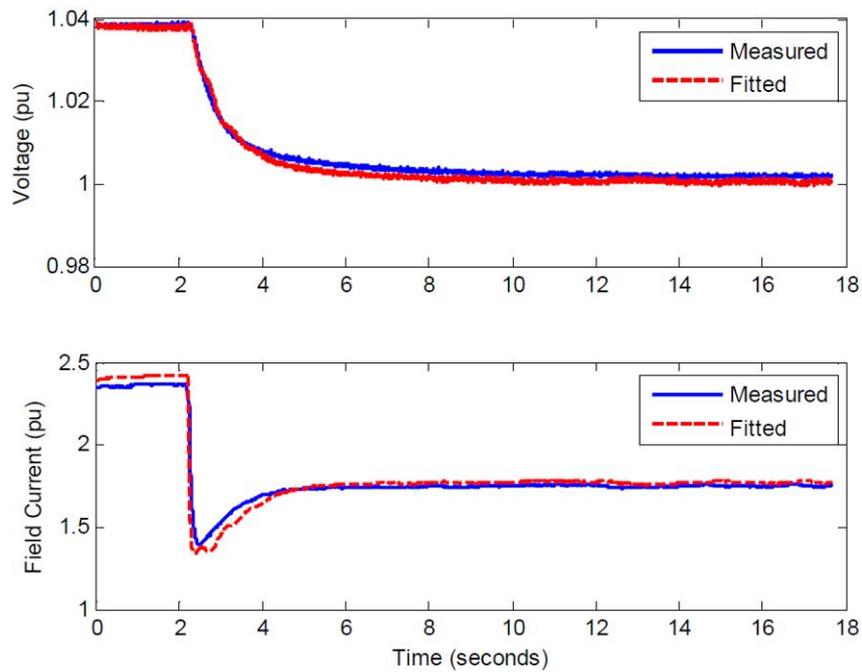


圖 4.34 線上步階響應試驗資料進行勵磁機模型擬合

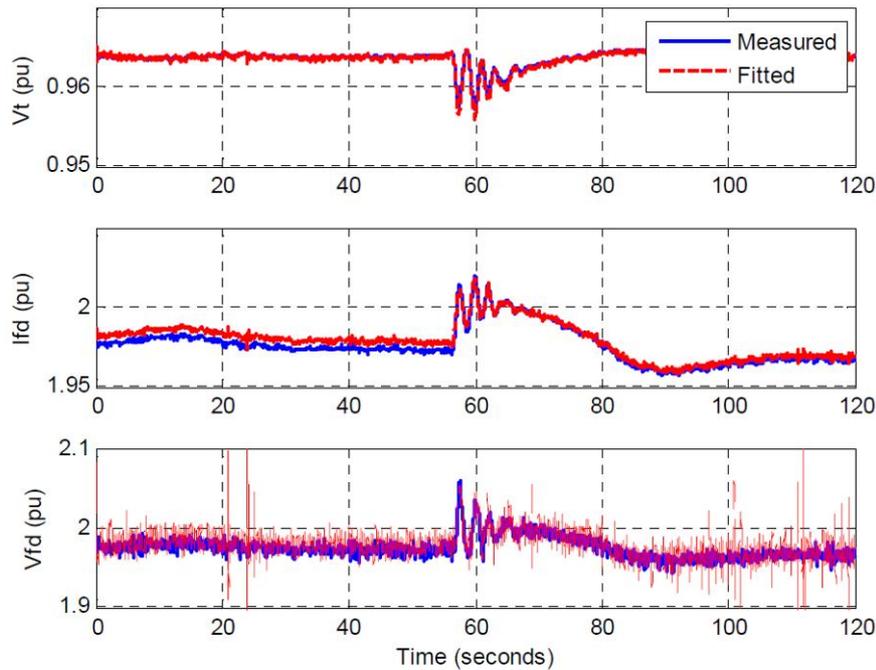


圖 4.35 WECC 在 2008 年 11 月 7 日發生的系統事故，經由發電機本身的 DFR 所記錄到的資料進行擬合

三、調速機

調速機試驗的主要挑戰是，現場測試並不一定證明在系統干擾下能表現出調速機的控制模式。一些典型的原因為：

- (a) 現場測試，例如包括卸載試驗不一定能識別線上調速機的操作模式，根據最近的 IEEE TF 報告建議，某種形式的恆定監測，以確定調速機的模式仍然是穩健的做法。
- (b) 大多數現代數位式調速控制系統中，當發電機斷路器開啟（如為一個卸載測試）調速控制模式有可能改變為定頻模式（許多燃氣渦輪機均設定在此模式）或速度控制模式使其恢復接近額定轉速。這意味著，所得到的反應並不能代表真實的調速器響應，因此不能用於確定機組的速降率。

如前所述調速機卸載試驗，當發電機斷路器開啟後調速控制模式改變，將影響調速機的響應，故在進行調速機卸載試驗時，需模擬一假數位訊號至調速控制系統，使其維持在速降率控制模式，如此才能

真實反應調速機的響應。圖 4.36 所示為 GGOV1 調速機模型參數驗證之輸入畫面，圖 4.37 所示為擬合後之波形。

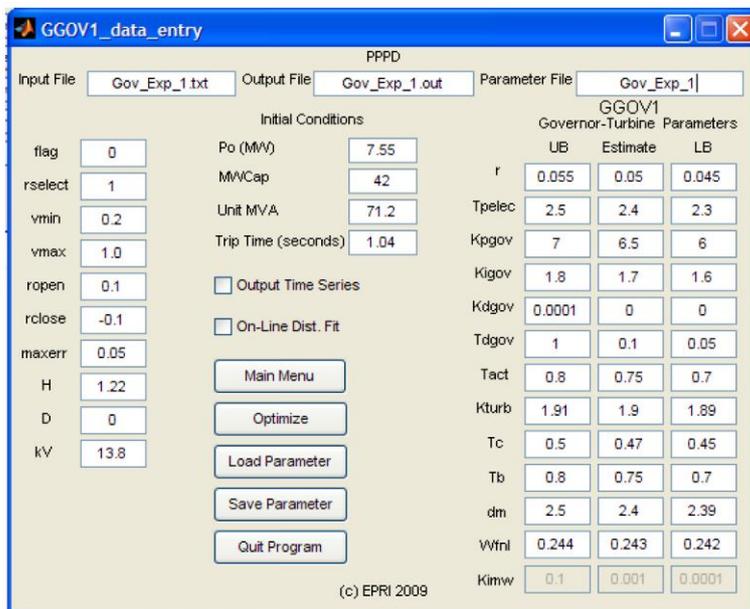


圖 4.36 GGOV1 調速機模型參數驗證輸入畫面

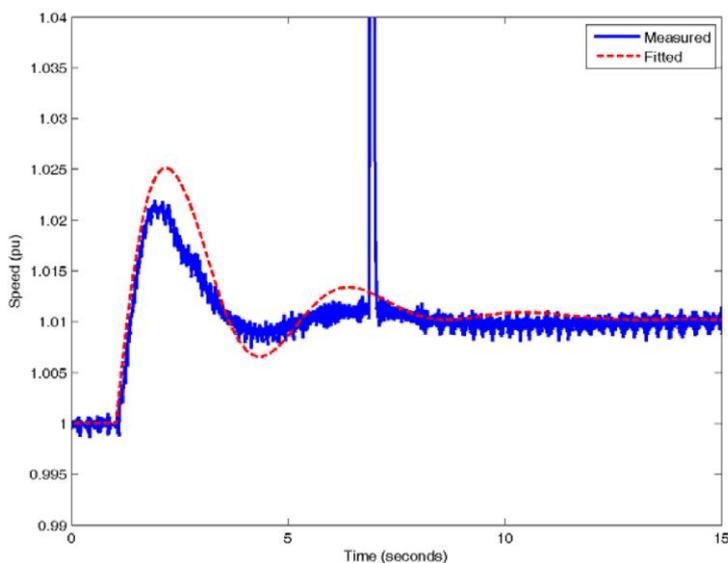


圖 4.37 調速機模型擬合後之波形

亦可利用卸載試驗資料，打開機組主斷路器後約 1 秒內發電機轉速的上昇斜率，做為慣性常數計算之基礎，如表 4.2 所示根據兩次試

驗計算的到之 H 平均值為 1.22。以發電機轉子搖擺方程式 (Swing Equation)，如式 4.1 所示，當系統發生擾動時，如負載跳脫 (卸載) 時，可將此方程式簡化為式 4.2 所示，此方程式反應出發電機卸載時，發電機剛開始加速時速度之反應曲線。當 H 越大，頻率上揚斜率越小(向後傾斜，慣量大)，如 H 越小，頻率上揚斜率越大(向前傾斜，慣量小)。慣性常數 H 值一般介於 1~10 秒之間，視發電機組型態及大小而定 (3600 轉火力機組 H 值介於 2.5~6.0 秒、1800 轉火力機組 H 值則介於 4.0~10 秒、水力機組則介於 2.0~4.0 秒)。

$$2H \frac{\partial \omega}{\partial t} = P_m - P_e \quad (4.1)$$

$$H = \frac{1}{2} \frac{\Delta P}{\Delta \omega} \Delta t \quad (4.2)$$

表 4.2 計算慣性常數

Unit Data	Test1	Test2
Unit MVA	71.2	71.2
Initial speed(Hz)	60	60
Time at Initial Speed(sec)	1.02	0.883
Final Speed(Hz)	63.9	61.4
Time at Final Speed(sec)	2.5	2.5
MW prior to trip(MW)	7.55	2.53
Nominal Shaft Speed(Hz)	60	60
H(MWs/MVA)	1.21	1.23

伍、UTA 參訪內容

德州電網與北美其他電網是以高壓直流進行互聯，可視為一獨立電網，美國德州致力於推動陸域風力發電，2005～2011 年間風力機組裝置容量佔比由 1.37%，大幅增加為 13%，德州調度中心 ERCOT 為因應風場出力影響電力系統，減緩對系統的衝擊，陸續提出及運用各種措施，以整合風力發電。在德州 ERCOT 系統，主要的挑戰來自於傳輸容量的侷限、風力預測、以及電力市場的操作。藉由此次交流參訪了解大型風場風力預測，以及確保系統穩定度前提下如何增加再生能源滲透率，並且了解針對分散式再生能源併網相關法規，以協助本公司未來再生能源滲透率提升相關因應做法。

5.1 德州與週邊電力系統

德州電力系統分別與美國西南電力池 SPP (Southwest Power Pool)、美國東南電力可靠度評議會 SERC (Southeast Electric Reliability Council) 及西部系統協調評議會 (Western Systems Coordinating Council, WSCC) 以高壓直流輸電線路相連結。德州週邊電力系統如圖 5.1 與圖 5.2 所示：

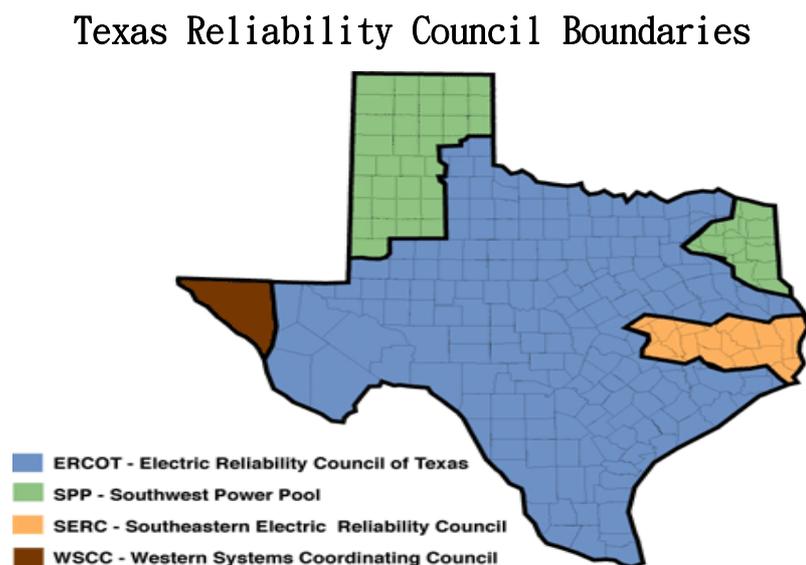


圖 5.1 德州週邊電力系統連結圖

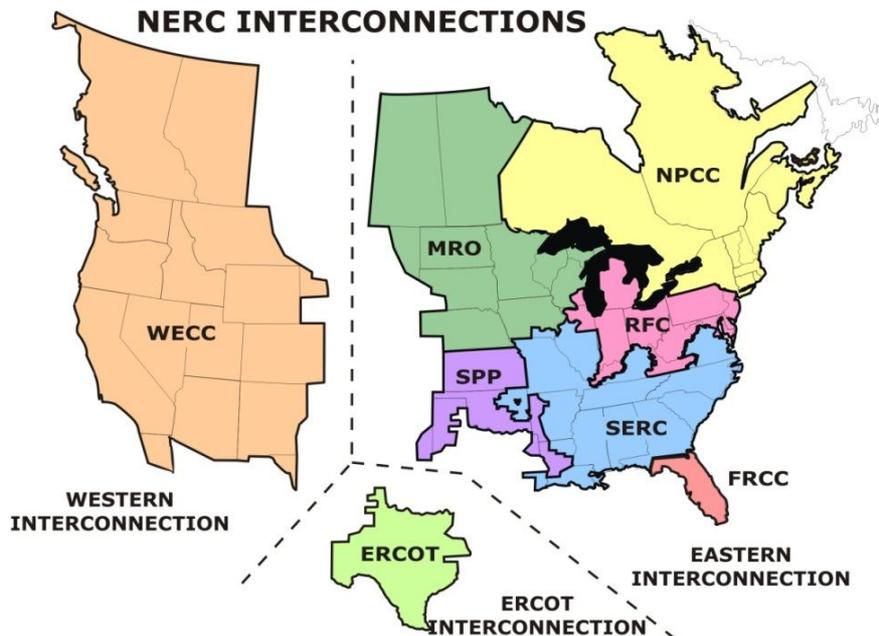


圖 5.2 北美電力連結系統圖

5.2 德州 ERCOT 系統

北美電力可靠度公司(North American Electric Reliability Corporation, NERC)的目標為改進北美電力傳輸系統的可靠度。北美電力系統(亦即 NERC 連結系統)主要連接的系統如圖 5.2 所示：主要包含東部、西部、以及德州系統，其中東西部系統主要以高壓直流傳輸系統進行連結。德州系統幾乎為一獨立電力系統，對外的連接系統總傳輸容量為 1106MW (北:Oklaunion:220MW(直流傳輸)、東:Monticello:660MW(直流傳輸)、南:合計 286MW(直流傳輸))，如圖 5.3 所示為 ERCOT 系統與相鄰電網直流互連圖。然而德州系統的尖峰負載可到 68305MW，因此可將德州系統視為一個獨立系統，它的操作經驗，特別是近年的高佔比風力運行狀況，可以供台灣參考。

德州電力可靠性委員會 (ERCOT) 負責管理 2400 萬用戶電網的電力潮流，約佔全德州 85% 的的電力負載，市場傳輸線總長度約 41500 英哩，550 部發電機組。至 2014 年，該電力市場尖峰負載出現於 2011 年 8 月

3日，達到 68,305MW。圖 5.4 所示為 ERCOT 近 11 年度售電量與尖峰負載。

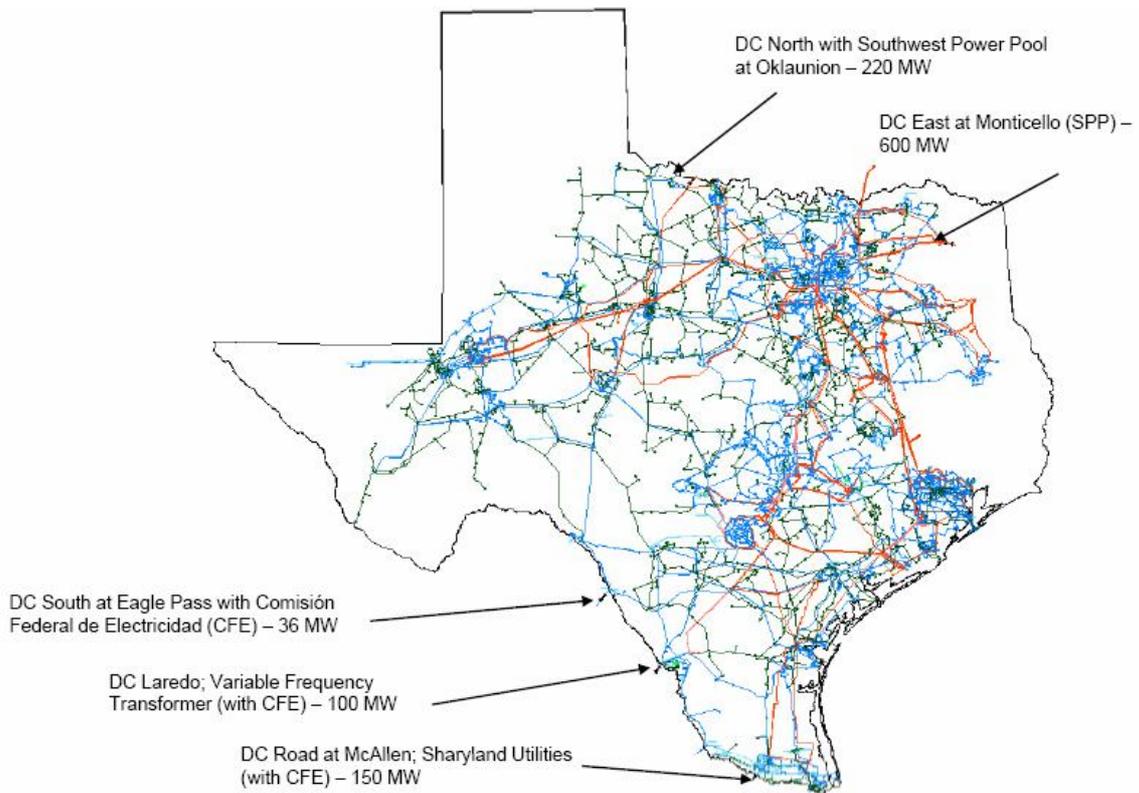


圖 5.3 ERCOT 系統與相鄰電網直流互連圖

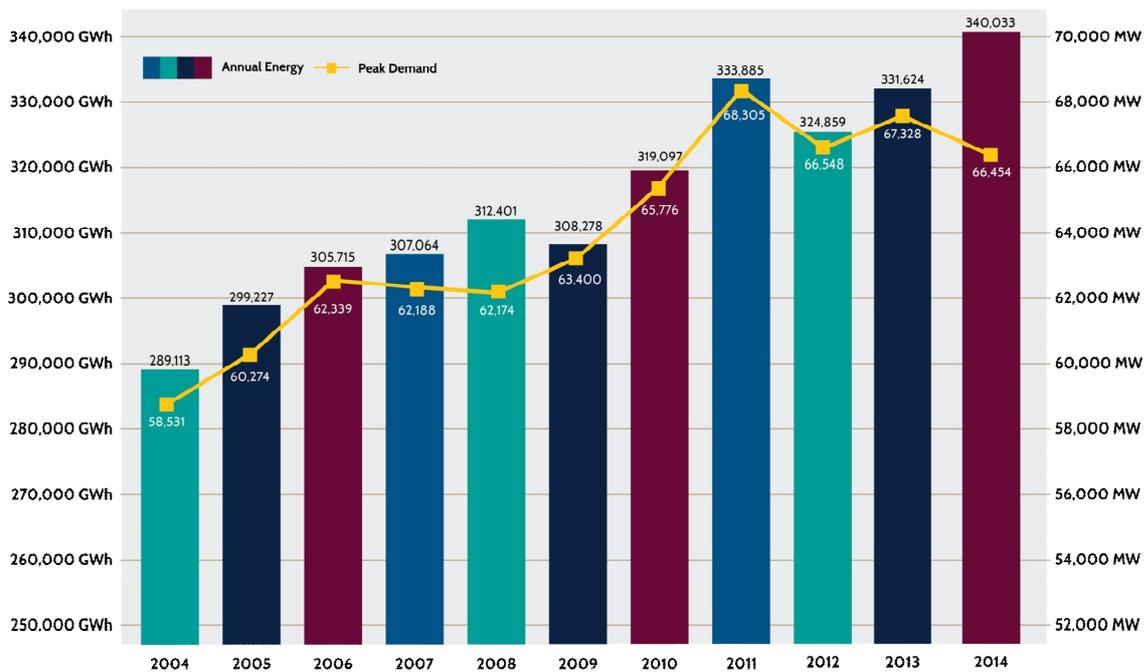


圖 5.4 ERCOT 近 11 年度售電量與尖峰負載

近年 ERCOT 電力市場的風力機組裝置容量不斷增加，至 2014 年，其總裝置容量約 12470MW，至 2017 年將增加 9257MW 的計畫已經正在進行，另外尚有 26700MW 的風力裝置容量正在研究評估，如圖 5.5 所示為 ERCOT 發力發電裝置容量，相關地理位置則如圖 5.6 所示。2014 年 12 月 14 日 02:50 量測到瞬間的風力總輸出達到 10,240MW，約佔當時總負載量 25,814MW 的 39.67%。2015 年 2 月 19 日 22:25 量測到瞬間的風力總輸出達到 11,154MW，約佔當時總負載量 32,614MW 的 34.2%。另外在 2015 年 3 月 29 日 02:12 量測到瞬間的風力總輸出達到 10,308MW，約佔當時總負載量 52,400MW 的 40.58%。

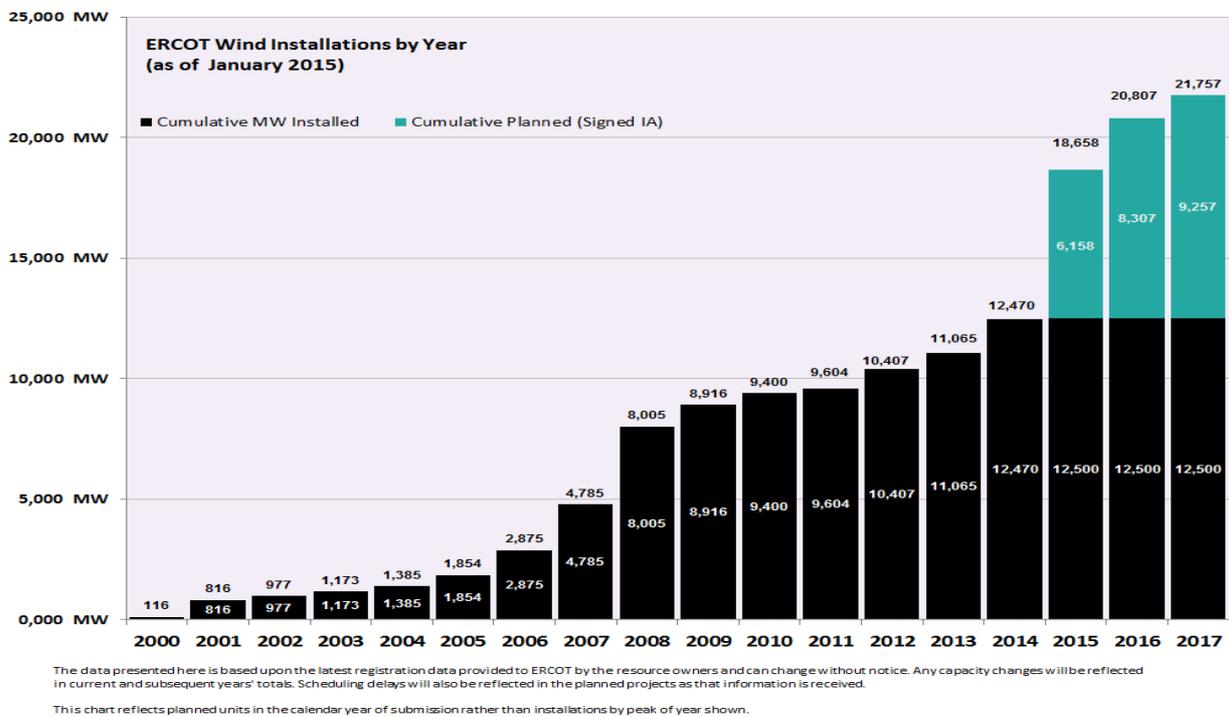


圖 5.5 ERCOT 發力發電裝置容量

ERCOT 不僅擔任獨立電力調度中心(ISO)負責管理德州電網，同時負責電力市場的交易及財務結算業務，並監督電力零售商約 670 萬戶用電選擇權的執行。德州為北美成功實施電業自由化區域之一，且為北美地區唯一州內電力系統獨立運轉的區域，與台灣之獨立電網結構類似。

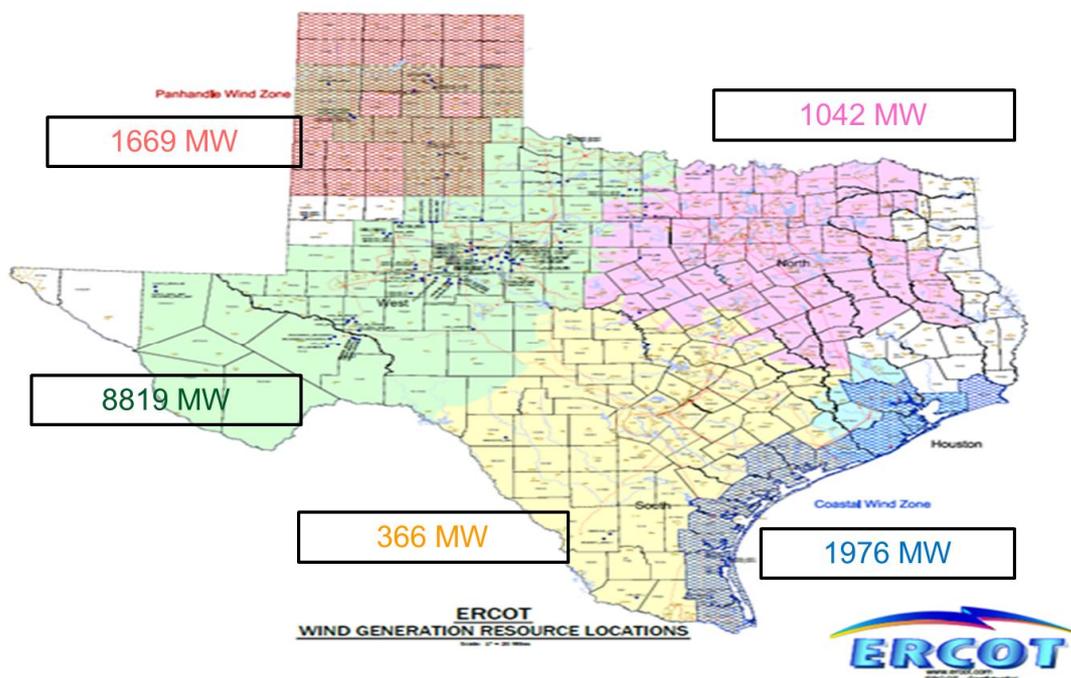


圖 5.6 ERCOT 發力發電裝置容量相關位置

2014 年 ERCOT 系統全年各發電能源發電量的比例分別為天然氣 56.4%、煤 22.9%、核能 6.2%、風力 13.4%、水力機組及其他再生能源佔比約 1.1%，如圖 5.7 所示。根據德州電力可靠度協會（ERCOT）的資料，2014 年德州使用的電力 10% 以上來自於風力發電，從 2009 年的 6.2% 成長到 2014 年的 10.6%，同期間總發電電量上升 11.3%。

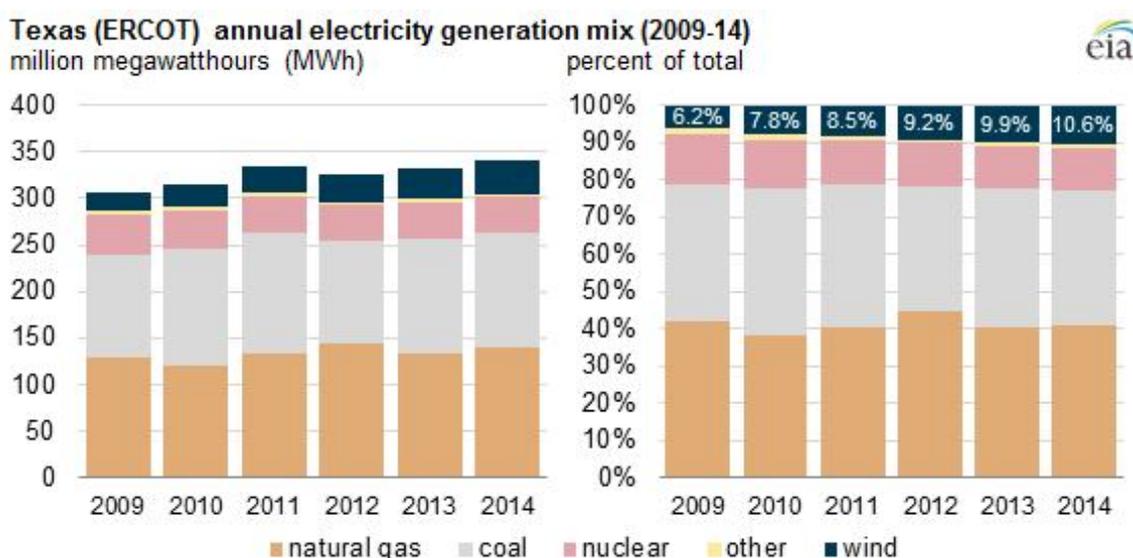


圖 5.7 德州 2009~2014 年風力發電輸出佔比

Source: U.S. Energy Information Administration, based on the Electric Reliability Council of Texas (ERCOT)

其中，天然氣發電量超過燃煤發電量主要是因為德州境內生產大量天然氣，以及頁岩氣的大量開發，使得天然氣價格低於燃煤價格所致，另風力發電量佔比高達 13.4%，主要是西德州地區地廣人稀適合發展大規模的風力發電所致，但因輸電容量不足導致危及系統動態穩定度，使得西德州地區的風電廠無法充分發電。近年來在競爭再生能源區域(Competitive Renewable Energy Zones, CREZ)的傳輸系統計畫已逐漸完成，因此可從西部傳輸更多的風能到德州東部。2008 年德州公共事業委會(Public Utility Commission of Texas, PUCT)要求 ERCOT 進行競爭再生能源地區的研究，並依據風力潛能規劃了五個 CREZ，以及建構 2376 英哩的雙迴路 345KV 傳輸線路來支援風力發電的發展。

風力發電量從 2006 年的 1880 萬 MWh 增加到 2014 年的 3610 萬 MWh，如圖 5.8 所示。在過去六年風力發電裝置容量也大幅增長，但風力發電量增長的速度更快，部分原因是因為以前輸電線路的限制條件，導致風力發電最大出力受到限制，透過德州內部輸電線路的擴張計畫，使風力發電最大出力受到限制的約束因素逐步消除。由於這些輸電限制被移除，更新一代的風力發電廠（主要集中在德州西北部），可將其發電送達負載中心。其結果使 2009 年至 2014 年間，風力發電量比風力發電裝置容量更快速的增長。

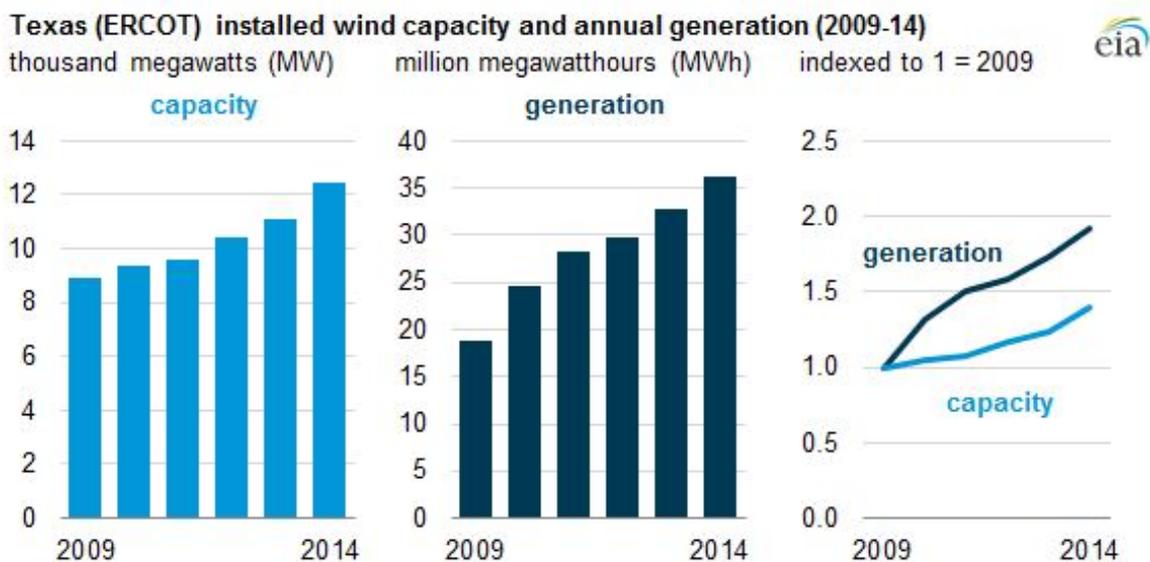


圖 5.8 德州 2009~2014 年風力發電安裝容量與年發電量

Source: U.S. Energy Information Administration, based on the Electric Reliability Council of Texas (ERCOT)

風力發電在 ERCOT 總發電量的貢獻並不是均勻分佈在整個一年。德州最大風速發生在春季(三月至六月)，在夏季(七月至九月)則顯著的下降。根據過去六年的數據，從三月到六月累計的四個月發電量，平均約年風力發電量的 40%。圖 5.9 所示右邊的圖表顯示每年一個相當一致的季節性模式。如同美國其他地區或是台灣，美國德州每日風力變動與系統負載呈現負相關的趨勢，德州在晚上的風力較高，而在白天負載量大的時候反而風力較低，如圖 5.10 所示為 ERCOT 八月期間日負載與發力發電曲線。因此往往造成在低負載時段的風力佔比高。由於 ERCOT 市場抽蓄水力機組的容量並不高，因此當風力佔比提高後，系統內傳統火力或水力機組上線的比例相對會下降，對於風力預測與操作程序更需注意。

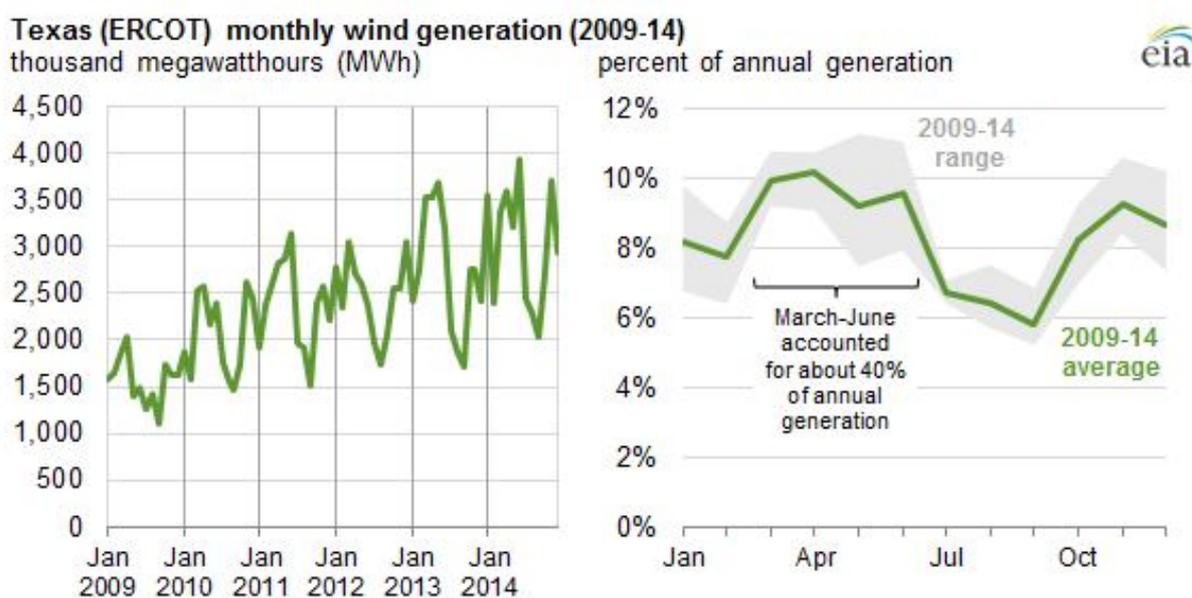


圖 5.9 德州 2009~2014 年月風力發電趨勢圖

Source: U.S. Energy Information Administration, based on the Electric Reliability Council of Texas (ERCOT)

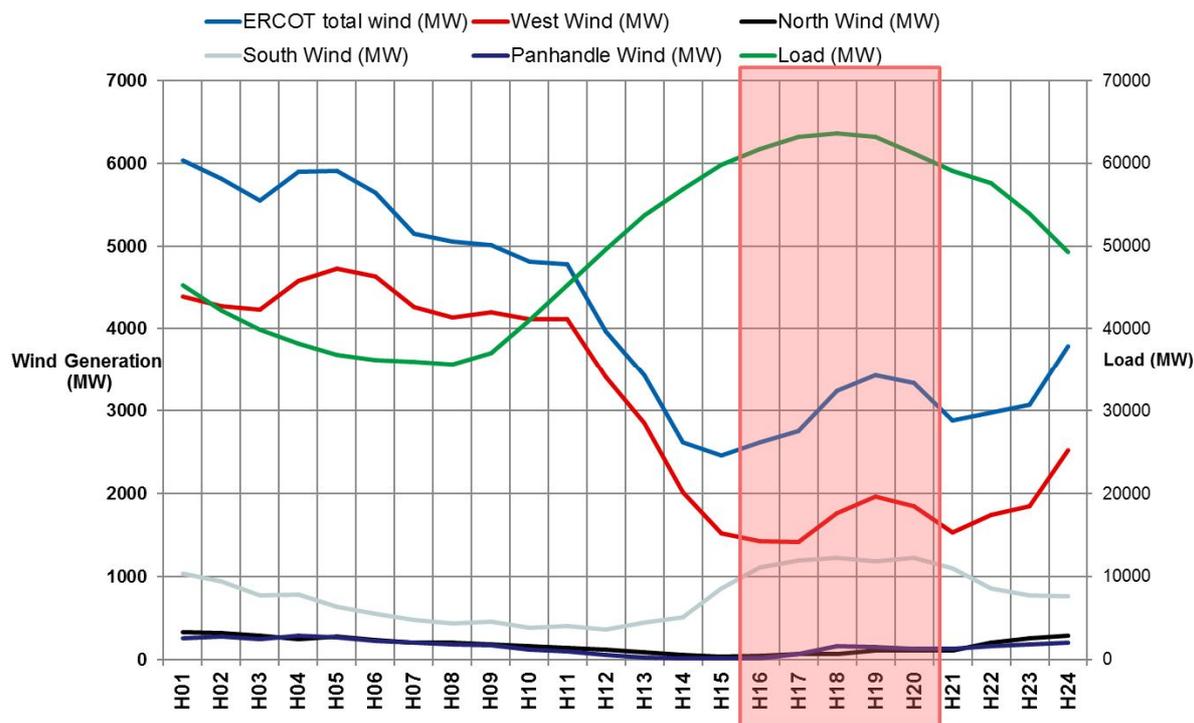


圖 5.10 ERCOT 八月期間日負載與發力發電曲線

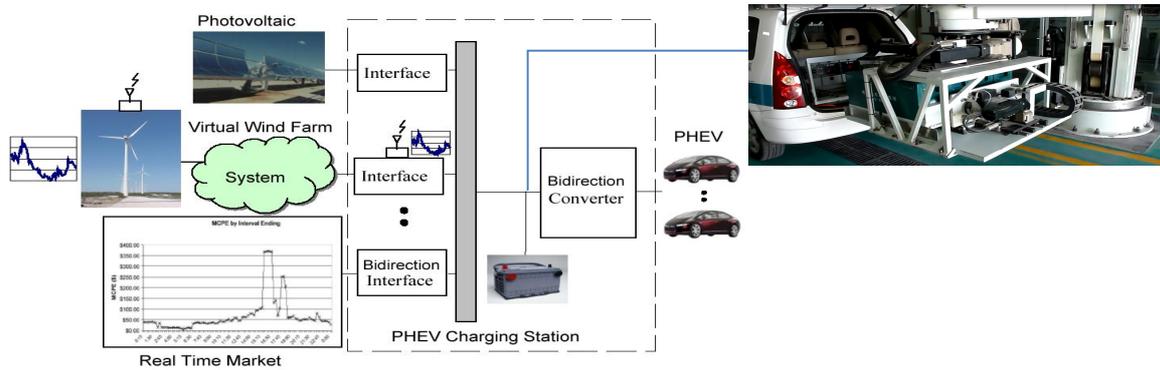
5.3 ERCOT 高佔比風力發電面臨的問題

德州 ERCOT 電力市場為因應高佔比再生能源發電，積極裝設先進型電表以及推動負載需求反應，但目前相關的容量並不高。ERCOT 電力市場已裝設了 6 百多萬的先進型電表(Advanced Meter)，每 15 分鐘記錄一筆資料。為了因應高佔比再生能源發電，利用 AMI 資料進行負載需求反應(Demand Response)策略是 ERCOT 電力市場積極推動的政策之一，至 2013 年中，需求反應的容量已大於 1,950MW(包含大型工業負載的負載反應容量 1,200MW 以及商業與工業用的緊急反應容量 550MW)。

至於儲能系統的應用上，ERCOT 電力市場規劃了 1,017MW 的儲能系統來因應高佔比風力發電系統，包括 317MW APEX 壓縮空氣儲能系統、270MW Chamisa 壓縮空氣儲能系統、36MW Notrees 電池儲能系統、40MW Deepwater ES 電池儲能系統、4MW Presidio 電池儲能系統、以及另外二個 290MW 儲能系統的計畫。不過至目前為止，德州 ERCOT 電力市場實際

操作的儲能系統裝置容量約僅 42MW。

李偉仁教授亦提出一種利用電動車充電站來視為儲能電池站的交易概念，如圖所示，將電動車充電站建置靠近風場端，若遇到風場風速較大時，輸出功率超過目標值，可利用向充電站進行充電來當緩衝；而當風場輸出功率不及目標時，再利用充電站來進行放電，兩種方式都是讓風場輸出較為平滑。而未來再生能源占比增加，李偉仁教授認為勢必要有儲能設備，雖然投資費用較多，但對於再生能源以及既有機組調度上較具有彈性。



此外，ERCOT 電力市場為了因應逐年增加的風力發電量，在系統規劃、市場規劃操作、輸電系統容量、系統衝擊分析、風力預測、系統操作上做了許多的研究與改進，如表 5.1 所示。

表 5.1 ERCOT 高佔比風力系統所面臨的問題

面臨問題	研究與執行方案
系統規劃	電源與傳輸系統的規劃 風力發電可靠度的標準
市場操作	主頻率響應控制 風力突升/突降限制以及調度 輔助服務市場設計與需求計算
輸電系統容量	規劃各競爭再生能源地區(CREZ)以及連接這些地區的輸電系統
併接衝擊	蒐集系統元件動態模型參數以及建立模型 虛功補償能力的研究 低電壓耐受能力的研究
風力預測	風力預測技術 風力突升/突降預測技術與風險管理

德州 ERCOT 電力市場高佔比風力帶來的挑戰，其關鍵考慮因素包括風力預測技術、風力上升或下降變化 ramp 預測及告警機制、輔助服務需求增加、主頻率響應的需求、動態虛功補償能力、併聯相關的技術需求等。ERCOT 電力市場為因應高佔比風力發電，要求除一般火力機組須具備主頻率響應的能力外，風力機組亦需具備有相關的技術能力。例如要求風力機的 ramp 速率不可高於裝置容量的 10%。而所有的發電機組(包含風力機組)必須提供調速響應的能力，且 droop 的設定為 5%。以下特別針對風力發電預測技術、電力市場輔助服務、傳輸線瓶頸與動態虛功補償能力等問題進行探討。

一、ERCOT 電力市場風力發電預測技術

ERCOT 將製作和更新每小時短期風力發電預測 (STWPF)，為每個風力發電資源 (WGR) 提供 48 小時每小時預測的滾動式風力發電潛力。ERCOT 將製作和更新每小時總 ERCOT 風力發電預測 (TEWPF)，為 ERCOT 所有的風力發電廠提供未來 48 小時的每小時生產潛力的機率分佈。每一風力發電實體將安裝氣象信息遙測計，並傳送特定站點氣象信息至 ERCOT，讓 ERCOT 製作和更新 STWPF 和 TEWPF 預測。ERCOT 則制定程序，規定風力發電實體氣象信息遙測的精度要求。

ERCOT 電力市場每小時執行未來 48 小時的風力發電預測，包含 STWPF 的 50% 以及 WGRPP 的 80% 機率超越預測值。圖 5.11 為 ERCOT 電力市場風力發電預測的 STWPF 預測值，STWPF 為發生機率最高的風力值。圖 5.12 為 ERCOT 電力市場風力發電預測的 WGRPP 預測值。

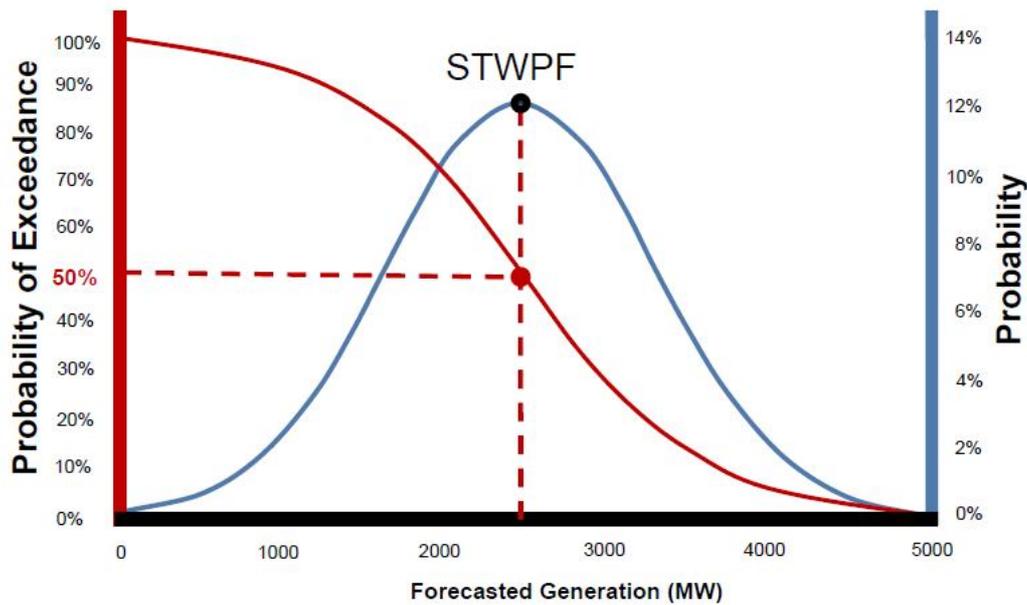


圖 5.11 ERCOT 電力市場風力發電預測的 STWPF 預測值

目前 ERCOT 電力市場輔助服務需求的規劃都需要考慮風力發電預測值，且 ERCOT 系統操作者有義務提供風機可靠度以及氣象資訊，並改善風力發電預測的精確度。

除了風力發電預測外，ERCOT 電力市場並開發風力發電突升/突降告警系統(Large Ramp Alert System)，分析系統中風力發電可能產生突升或突降的機率，系統操作者可藉此系統了解氣象變化對於風速突變的影響。風力發電突升/突降告警系統可顯示在未來的不同時間中(分別為 15 分、1 小時、以及 3 小時)，調節增加或減少需求的機率。ERCOT 電力市場風力發電突升/突降告警系統主要包含以下資訊：(1)風力發電突升或突降事件發生機率的估計(例如在一小時內增加 1000MW 的機率)、(2)可能造成風力發電突升或突降的氣象資訊(例如某一冷鋒過境)、(3)風力發電突升或突降的起始時間、影響時間、以及最大可能的爬升/降低速率、(4)氣象時變圖。該告警系統將提供未來六小時各局部地區以及德州 ERCOT 全系統的風力發電變化機率預測。

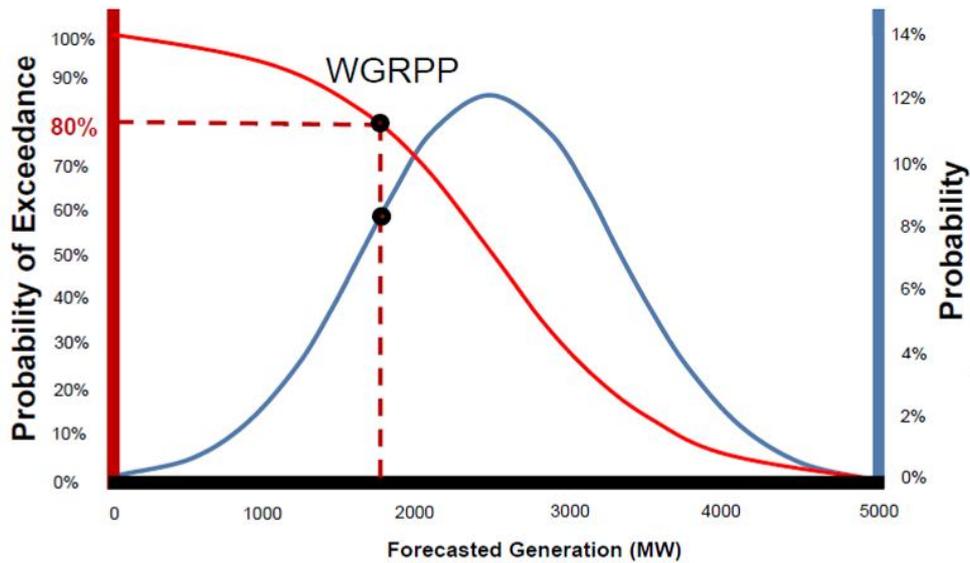


圖 5.12 ERCOT 電力市場風力發電預測的 WGRPP 預測值

ERCOT 電力市場在風力發電預測的挑戰，主要是如何有效蒐集所有風力發電預測的相關數據並獲得精確的風力發電預測值。這些資訊的量極大，包括各地區的氣象資訊以及風機的可利用率，若是這些蒐料蒐集不完整，即使擁有精確度高的風速預測也可能無法精確預測風力發電量。此外，ERCOT 系統操作者另一個挑戰是當風機因故處於切離的狀態(如風速過高或是發生故障)時，如何預測 ERCOT 系統的風力發電輸出。假設風機切離的資訊已知且這些數據已被排除在風力發電預測訓練的資料中，則系統會有許多資料被排除，導致需要更長的量測數據才能有效進行風力發電預測。圖 5.13 顯示 2014 年 ERCOT 電力市場每月平均風力發電預測誤差(一日前風力預測)，其誤差計算的方式基於裝置容量的平均絕對值誤差 (Mean Absolute Percent Error (MAPE) of Installed Capacity)。2014 年平均誤差為 8.3%。若風力發電預測的領前時間拉近至一小時前預測，則預測誤差降低至 5.3%。

WIND POWER FORECAST SYSTEM-WIDE Mean Absolute Percent Error

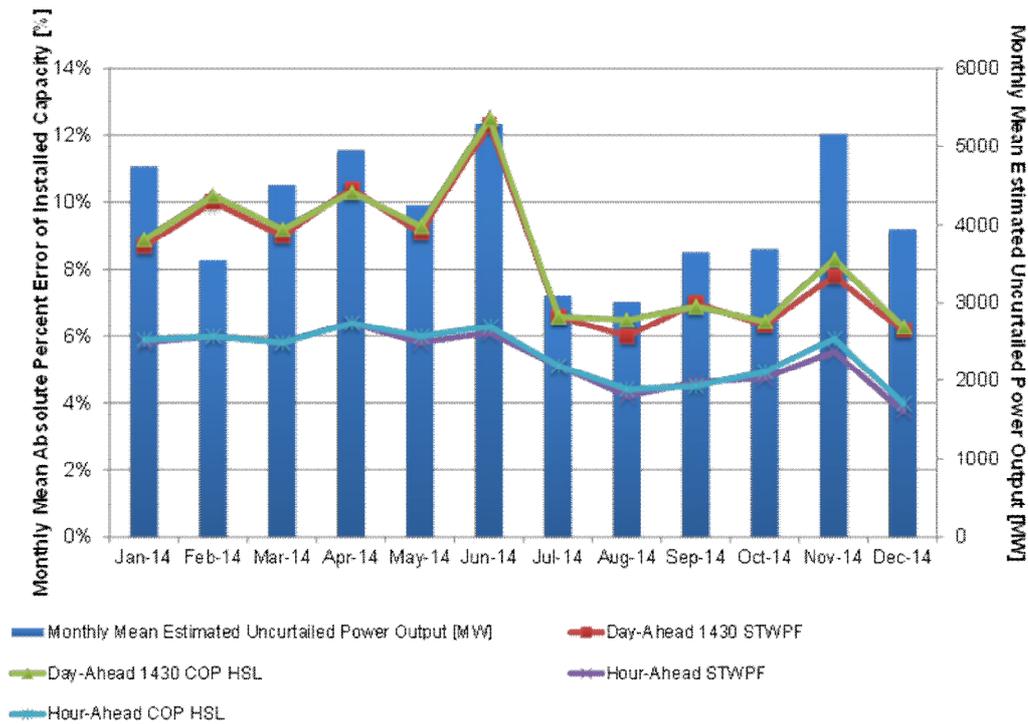


圖 5.13 2014 年 ERCOT 電力市場每月平均風力發電預測誤差(一日前預測)

二、ERCOT 電力市場高佔比風力發電的輔助服務

由於風力變動與預測的不確定性，ERCOT 電力市場必須經常使用高價格的輔助服務來維持系統頻率的穩定，並增加輔助服務的需求。由於風力佔比的提高，德州 ERCOT 市場在輔助服務的需求已經逐年增加。

目前德州 ERCOT 電力市場主要使用各種輔助服務來控制系統頻率以及確保安全的操作。這些輔助服務包含：

- (a) 調節服務：維持瞬時發電與負載間的平衡。
- (b) 響應備載(Responsive Reserve)服務：發電容量中必須存在一定的備載容量來應付可能的發電機跳機以及不可預期發電量的改變。
- (c) 非備轉容量(Non-spinning Reserve) 服務：可在 30 分鐘內上線併網的發電容量，以補償發電機跳機以及負載或風力預測的誤差。此服務可由發電機或負載(透過需量反應)來提供。ERCOT 在電力交易前一日估算「淨負載」的預測誤差，藉此估計所需非備轉容量服務

所需的數量。

(d) 替代的備載容量：可接受調度的發電容量，用來進行負載平衡以及解決線路壅塞。

這些需要的輔助服務需求都需要額外的成本，調節所需的成本可視為風力變動所造成的成本，而非旋轉備載容量可視為因應風力預測不確定度所需要的額外成本。ERCOT 電力市場每年因風力併入需要額外增加的輔助服務成本約 1,800 萬美金(含風力變動以及預測不確定度導致的額外成本)，亦即每產生 1MWh 的風力必須投入 0.65 美金的額外成本，約為電價的 1~2%。

ERCOT 電力市場每五分鐘重新規劃調度線上機組，而調節服務便是被用來使用作為平衡每五分鐘的負載與發電。在調節服務上，ERCOT 電力市場主要依據交易前 30 日和前一年相同月份所需要的量計算所需的調節容量。此外，若交易前 30 日平均的 CPS1 值低於 100，則需要適度增加所需的調節容量。

三、ERCOT 風力發電高佔比後所面臨的傳輸線瓶頸

ERCOT 電力市場的風力發電主要集中在德州西部，德州的負載中心主要集中在東部，因此若不增建傳輸系統，將會限制風力發電的發展。德州系統將風能好的地區區分為五大地區，並規劃高壓傳輸系統將這五大地區的風場連接，將風力發電輸送至東部的負載中心。

在傳輸系統尚未建置完成之前，ERCOT 電力市場每小時利用電力系統計算工具，隨時計算與監控傳輸系統的容量限制。針對區域壅塞問題 ERCOT 電力市場則建置特殊保護機制，以解決地區由於風力發電所造成的壅塞。目前 ERCOT 電力市場共有八座相位偏移器(Phase Shifter)，它們主要用來調節與降低由於風力變動可能造成的線路過載，使得更有效率地將德州西部的風能傳輸至東部負載中心。ERCOT 電力市場自 2011 年 7 月開始已經使用市場管理系統軟體自動地決定最佳化的相位偏移 Tap 設定值。德州西部因為有效的使用相位偏移變壓器的設定，降低線路壅塞的機會，因此區域電價較低，然而德州東部的區域電價則較高。

四、ERCOT 風力機組必須具備動態虛功補償能力

ERCOT 電力市場必須維持系統充足的動態虛功補償能力以應付系統可能的電壓降事件。傳統火力機組可使用標準的自動電壓調節技術來自動提供電壓控制。然而舊型風力發電機組(如 TYPE 1 與 TYPE 2 風力機組)需要有外部的電容器以及電力電子切換設備來提供虛功補償的能力，而新型的風力機組(如 TYPE 3 與 TYPE 4 風力機組)則可藉由風機內部的電能轉換設備提供虛功補償的能力。德州電力市場於 2009 年通過風力發電機組必須具備動態虛功控制的能力，亦即風機必須可以控制運轉在功因 0.95 滯後以及超前的範圍內。

而針對此次參訪，與李偉仁教授討論部分重點茲整理如下：

- (1) 如果風場不能夠穩定輸出，則需要有儲能設備搭配，因為風速變動太劇烈會影響到電力品質。
- (2) 德州目前也面臨電價太低而無法提升太陽能發電佔比。
- (3) 機組運轉排程對於再生能源發電量只考慮其額定容量 50%，實際運轉(沒有儲能系統的條件下)時只考慮 20%，而 50% 為實際操作經驗值。
- (4) 系統備轉容量不夠時，也要適當地加入需量反應以彌補不足的部分，故再生能源加入時需要考慮相關輔助服務，如需量反應、儲能設備以及時間電價等等，以彌補沒有再生能源的情況。
- (5) 德州曾經在 2008 年時 14 秒內風場減少了 243MW 的出力，短時間內失去大量的發電會使頻率驟降，而海上風場風速較為穩定，較能夠與負載匹配。
- (6) 若遇到風速上升時沒有下降備轉容量勢必會使頻率上升，未來風場增加勢必會面臨到該問題。
- (7) 可要求 IPP 業者出力與風場搭配，如發電躉售時需搭配 15% 的再生能源，一同推動再生能源，收購價格可因發電種類而分，亦可以其他再生能源公司合作。
- (8) 因為風機提供的故障電流較小，而未來風機佔比提升時，若線路故障時可能會因為故障電流未達斷路器額定啟斷容量而無法將故障清除，

故未來推動再生能源時亦須考慮保護協調。

- (9) 未來大型風場內風機種類或廠牌時不同時，若要模擬風機等校模型，可在 PCC 點量測實功、虛功、電壓以及頻率，匯入 PSS/E 模擬檔案內的風機等校模型，再進行模型參數調整調電力潮流以獲得正確參數，若有不同類型風機，則必須搭配其對應模型。

陸、參考資料

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw Hill 1994.
- [2] P. Pourbeik and F. Modau, "Model Development and Field Testing of a Heavy-Duty Gas-Turbine Generator", *IEEE Trans. PWRs*, May, 2008.
- [3] CIGRE Technical Brochure 238, *Modeling of Gas Turbines and Steam Turbines in Combined-Cycle Power Plants*, December 2003 (<http://www.e-cigre.org/Search/download.asp?ID=238.pdf>)
- [4] IEEE Task Force on Turbine-Governor Modeling, *Dynamic Models for Turbine-Governors in Power System Studies*, *IEEE Special Publication TP538*, January 2013. (http://sites.ieee.org/fw-pes/files/2013/01/PES_TR1.pdf)
- [5] P. Pourbeik, C. Pink and R. Bisbee, "Power Plant Model Validation for Achieving Reliability Standard Requirements Based on Recorded On-Line Disturbance Data", *Proceedings of the IEEE PSCE*, March 2011.
- [6] IEEE Task Force on Large Interconnected Power Systems Response to Generation Governing, *Interconnected Power System Response to Generation Governing: Present Practice and Outstanding Concerns*, *IEEE Special Publication 07TP180*, May 2007. (http://resourcecenter.ieee-pes.org/files/2013/11/TR13_TP180_Full_Content.pdf)
- [7] F. P. de Mello and C. Concordia, "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control", *IEEE Tran. PAS*, pages 316-329, April, 1969.
- [8] M. J. Gibbard, "Coordinated Design of Multi-Machine Power System Stabilisers Based on Damping Torque Concepts", *Proceedings of IEE Part C*, vol. 135, pages 276-284, July 1988.
- [9] M. J. Gibbard, "Robust design of fixed-parameter power system stabilisers over a wide range of operating conditions", *IEEE Trans. PWRs*, pages: 794-800, May 1991.
- [10] P. Pourbeik and M. J. Gibbard, "Simultaneous Coordination of Power System Stabilizers and FACTS Device Stabilizers in a Multimachine Power System for Enhancing Dynamic Performance", *IEEE Transactions on Power Systems*, May 1998, pages 473-479.
- [11] M.J. Gibbard, P. Pourbeik and D.J. Vowles, Small-signal stability,

- control and dynamic performance of power systems, July 2015, Adelaide University Press (free e-copy at: <https://www.adelaide.edu.au/press/titles/small-signal/>)
- [12] D-M. Lam, *Eigenvalue Analysis and Stabilizer Design for Electrical Power Systems*, PhD Thesis, The University of Sydney, 1995.
- [13] P. Pourbeik, *Design and Coordination of Stabilisers for Generators and FACTS Devices in Multimachine Power Systems*, PhD Thesis, University of Adelaide, Australia, April 1997.
- [14] P. Pourbeik, "Automated Parameter Derivation for Power Plant Models From System Disturbance Data", *Proceedings of the IEEE PES General Meeting*, Calgary, Canada, July 2009.
- [15] IEEE 421.5-2005 *Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*, April 21, 2006.
- [16] ERCOT Training: <http://www.ercot.com/services/training/>
- [17] TCAP, "Deregulated Electricity in Texas": <http://www.tcaptx.com/reports>
- [18] PJM Training: <http://www.pjm.com/training.aspx>
- [19] Brattle Group Publications: <http://www.brattle.com/industry/electric-power>
- [20] Joseph Bowring, "Capacity Markets in PJM", *Economics of Energy & Environmental Policy*, 2013