

出國報告（出國類別：洽公）

訪問國外電力公司
(廣域量測系統及適應性保護技術交流)

服務機關：台灣電力股份有限公司

姓名職稱：許國隆 總經理副總經理室/專業總工程師

張宥嫻 輸供電事業部策劃室/資深策劃師

柯喬元 綜合研究所/電機資深研究專員

派赴國家：美國

出國期間：113年6月17日至113年6月28日

報告日期：113年8月7日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：訪問國外電力公司(廣域量測系統及適應性保護技術交流)

頁數 51 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台灣電力公司人資處/翁玉靜/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

許國隆/台灣電力公司/總經理副總經理室/專業總工程師/(02)2366-6564

張宥嫻/台灣電力公司/輸供電事業部策劃室/資深策劃師/(02)2366-5026

柯喬元/台灣電力公司/綜合研究所/資深研究專員/(02)8078-2303

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 開會 6 其他：洽公

出國期間：113 年 6 月 17 日至 113 年 6 月 28 日

派赴國家/地區：美國

報告日期：113 年 8 月 7 日

關鍵詞：同步相量量測、廣域監測系統

內容摘要：(二百至三百字)

因應全球能源低碳轉型趨勢，電網韌性隨之面臨日漸嚴峻的挑戰，傳統 SCADA 系統已不足以因應日趨複雜的電力系統結構和動態特性，運用同步相量量測技術和廣域監測系統可提供電力系統縱觀且即時的運轉資訊外，同時也為電力系統的安全分析及穩定控制提供新的方法。

本次實地訪問有廣域監測系統實際應用經驗之國外電力機構，深入了解其廣域監測系統之建置架構、功能應用情形及實際運轉維護經驗，並進一步探討國外應用廣域監測系統於保護系統之現況及未來規劃方向，俾利提升本公司電力系統防禦能力及供電可靠度，確保供電穩定。

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

目錄

壹、訪問目的	3
貳、訪問行程	4
參、廣域監測、保護及控制系統現況及發展趨勢	5
一、系統架構	5
(一) 廣域監測(WAM)系統.....	5
(二) 廣域監測、保護與控制(WAMPAC)系統.....	6
(三) 廣域監測、保護與控制系統結合	8
二、通信架構及規範	9
(一) 同步相量標準.....	9
(二) 通訊協定.....	10
三、時間同步方式	13
四、應用情形及實績	16
(一) 即時監測.....	16
(二) 事故後分析.....	23
(三) 電力系統穩定器(PSS)調整	23
五、最新發展及研究趨勢	26
(一) 動態線路額定容量及可用最大傳輸能力估測.....	26
(二) 快速頻率響應解決方案.....	27
(三) 慣量估測.....	28
肆、訪問國外電力機構及設備廠家之技術交流	30
一、道明尼能源公司(Dominion Energy).....	31
(一) 公司概況.....	31
(二) 同步相量技術應用討論.....	32
(三) 參觀 MARC (Monitoring Analysis Restoration Center).....	36
(四) 參觀保護電驛測試實驗室	39
(五) 參觀 RTDS 模擬實驗室	40
二、紐約電力局(New York Power Authority).....	41
(一) 公司概況.....	41
(二) 同步相量技術應用討論.....	41

三、 Electro Industries/Gauge Tech 公司	44
(一) 公司概况.....	44
(二) PMU 設備及相關技術討論.....	44
(三) 參觀產品製造生產線.....	45
伍、心得與建議：	47
一、心得	47
二、建議	48
參考資料	51

訪問國外電力公司 廣域量測系統及適應性保護技術交流

壹、訪問目的

因應全球能源低碳轉型趨勢，電網韌性隨之面臨日漸嚴峻的挑戰，傳統的監控及資料採集系統(SCADA, Supervisory Control and Data Acquisition)已無法因應日趨複雜的電力系統結構及動態特性變化。因此，需藉由廣域監測系統(WAMS, Wide Area Monitoring System)中同步相量量測及高解析等先進技術，來提供縱觀且即時的運轉資訊，並為電力系統的安全分析及穩定控制提供新的方法，以提高電力系統之可靠度和穩定度。

近年來，廣域監測系統已成為全球電力系統運轉和診斷系統問題及弱點（特別是從動態穩定度角度）的必要工具，其主要係利用高精度、高頻率的核心同步相量測量技術，實現對電力系統的即時監測和動態分析，亦可提供故障偵測定位、穩定性評估、資料存儲與長期趨勢分析等功能，幫助辨識系統潛在穩定度問題，提供決策參考進而防止大規模事故，旨在提高電力系統的穩定性、可靠性和安全性。本公司電力調度處刻正規劃於新一代 EMS 系統導入廣域監測系統，若可藉由該系統之視覺化界面顯示電網即時數據，將可使運轉調度人員能夠更直觀且更全觀地觀察電力系統動態變化，幫助調度人員評估和預防潛在的穩定度問題，提前採取因應措施，防止大規模事故發生。

藉由本次訪問國外電力機構，觀摩及汲取國外實際應用經驗及成效，同時考量本公司需求後，可評估引進相關技術。另一方面，廣域監測系統目前也朝向電力系統的控制及保護領域發展，因此本公司可先規劃電驛監測系統介接廣域監測系統，即時監測電網狀態，並依系統狀態或特性，適時調整保護策略或相關邏輯設定，提升保護系統之可靠度及安全度。本次由許專業總工程師國隆帶領之參訪團隊(輸供電事業部策劃室、綜合研究所)，亦建立了本公司與國外電力機構/專家長期合作管道，利於後續專業核心技术交流及研討。

貳、訪問行程

本次出國訪問對象，包括位於美國維吉尼亞州的道明尼能源(Dominion Energy)公司及喬治梅森大學(George Mason University)，以及位於美國紐約的紐約電力局(New York Power Authority)及 Electro Industrie / GaugeTech 公司；為期 12 天，相關行程及工作紀要列示如下：

日期	起訖地點	工作紀要
113/06/17~113/06/18	台北~舊金山~華盛頓	往程
113/06/19~113/06/20	Dominion Energy(道明尼能源公司) 美國 維吉尼亞州	瞭解廣域量測系統應用情形及實際運轉維護經驗，並討論應用於保護系統之現況及未來規劃方向。
113/06/21	George Mason University(喬治梅森大學) 美國 維吉尼亞州	討論目前全球 WAMS 技術應用情形。
113/06/22~113/06/23	美國 維吉尼亞州	報告撰寫(假日)
113/06/24~113/06/25	New York Power Authority(紐約電力局) 美國 紐約	瞭解廣域量測系統應用情形及實際運轉維護經驗，並討論應用於保護系統之現況及未來規劃方向。
113/06/26	Electro Industries Gauge Tech 美國 紐約	PMU 量測設備技術研討。
113/06/27~113/06/28	紐約~台北	返程

參、廣域監測、保護及控制系統現況及發展趨勢

廣域監測系統主要係基於同步相量量測核心技術對電力系統進行即時監測和分析的系統，其主要組成部分包括相量量測設備(PMU, Phasor Measurement Unit)、相量資料集中器(PDC, Phasor Data Concentrator)、通信網路及控制中心(應用分析)。全球的輸電系統在過去 15 年中已累積大量應用經驗，目的在於防止或減輕大規模的系統擾動，提升系統的穩定性和可靠性。目前全球廣域監測系統主要應用於監測電力系統特性及穩定度相關議題，包括低頻振盪監測、電壓大小監測、電壓相角差監測、頻率及頻率變化率(ROCOF, Rate-of-Change-of-Frequency)監測等；此外，近年來廣域監測系統對於事故後分析報告、電力系統穩定器(PSS, Power System Stabilizer)的微調或效率線上驗證及長期穩定性的改進也做出許多巨大貢獻，此系統也將朝向電力系統的控制及保護領域發展。本章節將針對廣域監測、保護及控制系統現行架構、最新通信架構和規範、應用實績及最新發展及研究趨勢進行介紹。

一、系統架構

本節將針對廣域監測(WAM, Wide Area Monitoring)系統及廣域監測、保護與控制(WAMPAC, Wide Area Monitoring, Protection and Control)系統的架構進行介紹，此架構已在許多電力公司應用並有良好成效及達到預期目標。

(一) 廣域監測(WAM)系統

典型廣域監測(WAM)系統分層架構圖如圖 1 所示[1]。最底層為分散於各變電所內之 PMU 設備，其主要功能為接收所需量測設備之電壓/電流值，並在精確時間同步校時系統支援後，經由區域網路(LAN, Local Area Network)傳送同步相量值至變電所內之 PDC；變電所 PDC 接收這些同步相量值並將其整合至單一資料流後，再透過廣域網路(WAN, Wide Area Network)進一步發送到更上一層之 PDC(Central/corporate PDC)，而該上層 PDC 收集及預先處理從底層 PMU 或 PDC 傳送之同步相量測量值後，最後會傳送至控制中心進行應用分析及資料存檔。其中，有關變電所內是否需建置 PDC，可視是否考量變電所與中央系統間通信網路之可靠度，若於變電所內建置 PDC，則當

變電所與中央系統間的通信網路中斷時，變電所內之 PDC 可作為數據記錄器存取資料，若同一變電所內安裝許多 PMU 設備時，變電所內建置 PDC，亦可減少通訊資料流，可視應用需求再選擇所需資料傳送以減少通訊頻寬需求。此外，建置變電所內之 PDC 亦可將 PMU 介面與廣域網路(WAN)隔離，提高資安安全性。

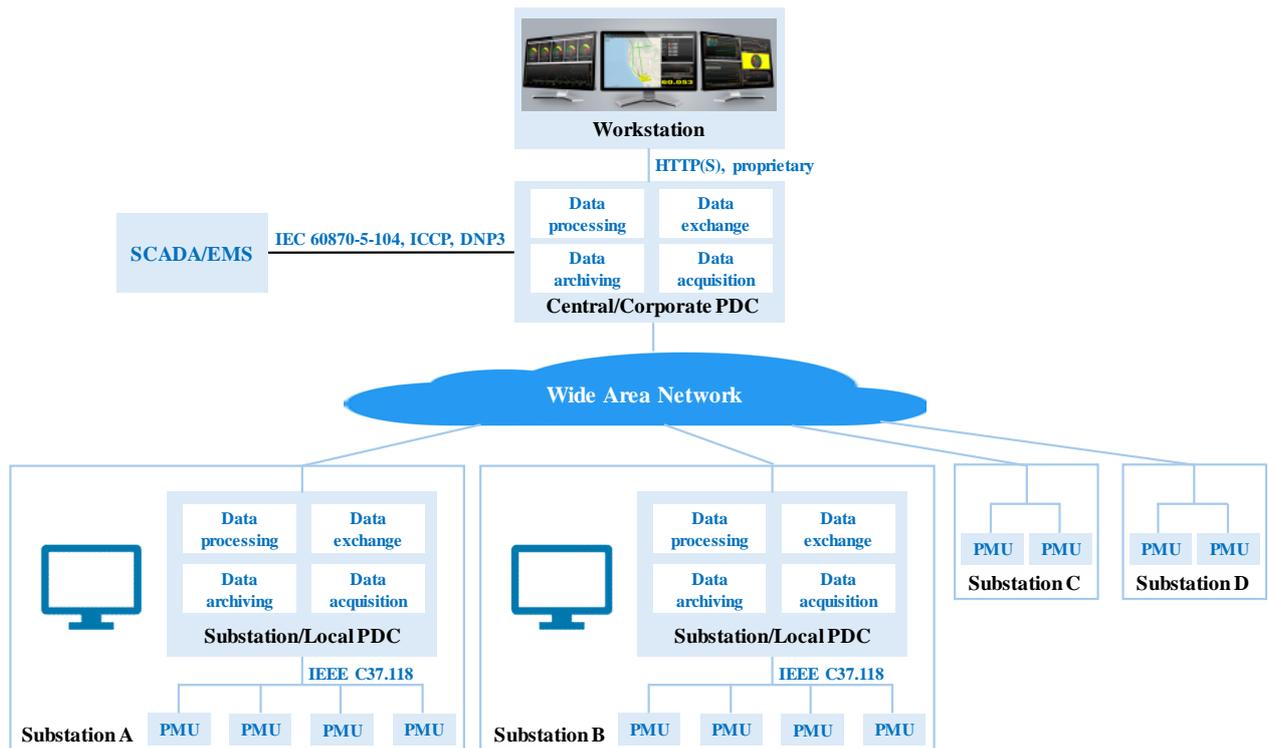


圖 1 典型廣域監測(WAM)系統架構[1]

(二) 廣域監測、保護與控制(WAMPAC)系統

目前世界電業針對廣域監測系統也朝向電力系統的控制及保護領域發展，本次參訪之美國道明尼能源公司(Dominion Energy)，今年也甫爭取到一筆美國能源局研究經費(約台幣兩億)，正啟動一項有關應用同步相量技術於保護和控制之研究計畫專案。因此，該章節將介紹一種應用於廣域保護與控制(WAMPAC)系統之可能架構，WAMPAC 系統架構如圖 2 所示 [1]。來自 PMU 或 IED 的測量數據在圖 2 中以綠色箭頭表示，從變電所位

置傳送至中央位置，以允許對所有資訊進行中央處理，在 WAMPAC 系統中，通常使用 PMU 數據資料協定 IEEE C37.118 或 IEC 61850-90-5。來自 PMU 或 IED 的測量數據由中央 WAMPAC 系統中基於同步相量的邏輯處理器進行處理，附加資訊可從具有典型 SCADA 協定(IEC 61850、IEC 60780-5-104、DNP3 或其他協定)的變電所自動化系統傳送至 SCADA 或作為中央 WAMPAC 系統一部分的自動化單元。而控制指令如圖 2 中黃色箭頭表示，可使用控制協定(IEC 61850 GOOSE、IEC 60780-5-104、DNP3 或其他協定)，或透過 SCADA 系統路由以滿足額外之安全需求(虛線箭頭)。

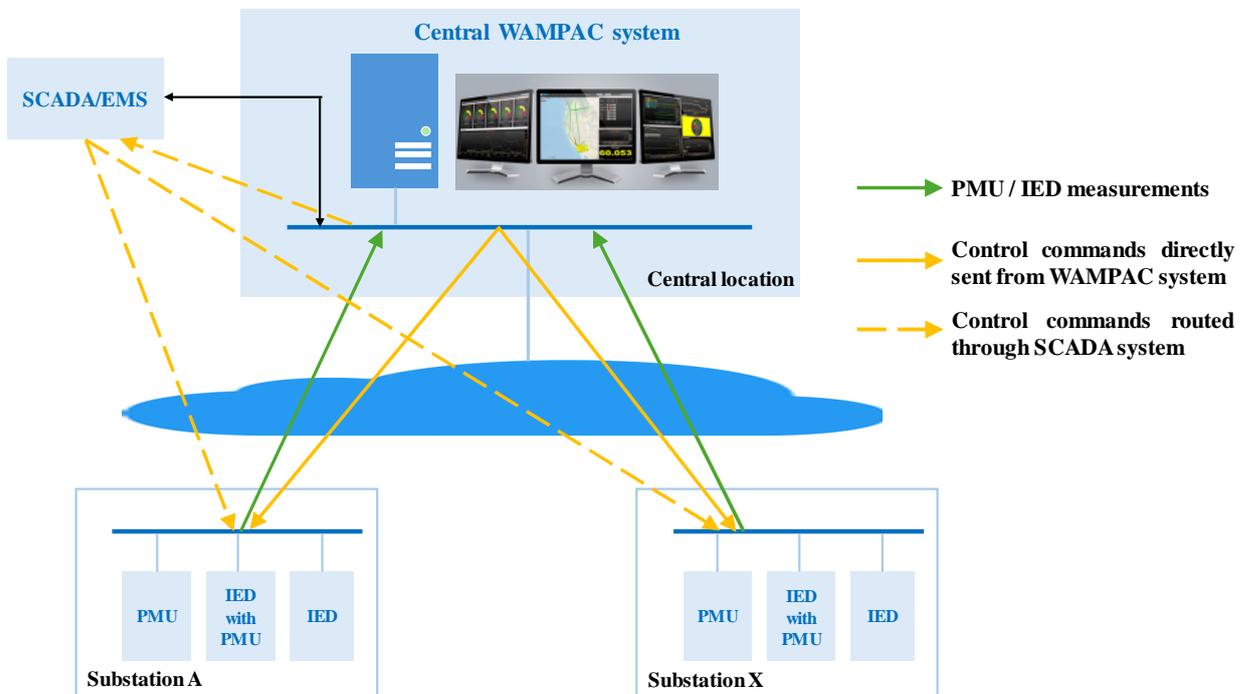


圖 2 廣域保護與控制(WAMPAC)系統架構[1]

若應用於保護方面，則建議 WAMPAC 系統集中於單一場(廠)所，簡化架構的複雜性以減少風險。傳統的保護設備要求快速性，因此 WAMPAC 系統之動作時間將規劃設計於傳統保護設備之後，或做為傳統設備保護之備援系統。

(三) 廣域監測、保護與控制系統結合

廣域監測系統和廣域保護與控制系統，其分別對資料的要求和應用目的皆不相同，廣域監測系統主要目的在於瞭解整個電網之動態特性，並幫助提升運轉調度人員對整個電網狀態的認知，因此資料的完整性相較於傳送延遲時間要求更重要；反之，對於廣域保護與控制系統而言，對於反應時間要求則相對較高(幾百毫秒內)，傳輸延遲時間將為設計規劃時之考量重點，因此，廣域監測系統和廣域保護與控制系統應採用不同規劃設計並分別運作，若應用目的同時需具有監測、控制及保護功能時，使用 PMU 設備方式可採用圖 3 中三種不同架構[1]。

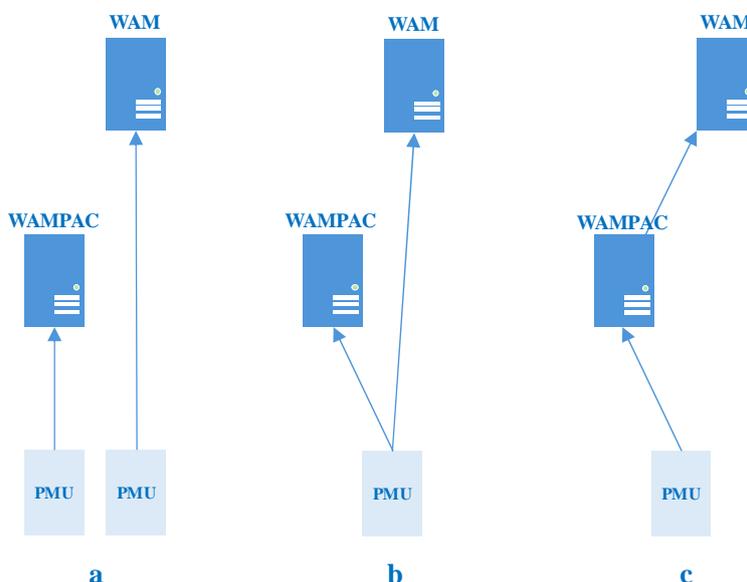


圖 3 廣域監測、保護與控制系統結合架構[1]

圖 3 中之 a 架構係採個別獨立之 PMU 設備，而 b 架構則是採用同一 PMU 設備，惟分別採用不同協定(TCP、UDP)及不同報告率(reporting rates)傳送。c 架構同 b 架構一樣來自於相同 PMU 設備，惟 PMU 之同步相量數據係先傳送至廣域保護與控制系統，再從廣域保護與控制系統傳送至監測系統，此係因為廣域監測系統對於時間延遲之要求較寬鬆，故可以接受 PMU 數據先傳送至廣域保護與控制系統所導致之延遲時間。

依據 IEEE C37.118.1-2011 及 IEEE C37.118.1a-2014，PMU 設備有分不同性能等級：P Class 及 M Class，而在前述 a 架構和 b 架構中，可以對不同資料流選擇不同 PMU

性能等級，架構 C 中則因通訊頻寬需求減少，若需較低之延遲時間，則建議可選擇 P Class。(以每秒取 50 個樣本為例，P Class 之延遲時間約為 40ms、M Class 約為 140ms。)

二、通信架構及規範

廣域監測、保護及控制系統的運行係建立於通信網路之上，因此通信網路之即時性及可靠性決定了廣域監測、保護及控制系統的可用性；此外，廣域監測、保護及控制系統中的另一重要構成元件—同步相量量測設備(Phasor Measurement Unit)—該設備之間的互操作性(Interoperability)、量測功能及精確度的提升、測試及認證方法、網際安全問題(Cyber Security Issue)以及變電所自動化整合等，亦逐漸被重視與檢討。因此，本節將介紹及探討目前現有的標準通訊通道架構、時間延遲、通訊協定、時間同步源及網路資安問題。

(一) 同步相量標準

多年來，為實現不同廠家 PMU 設備之間的互通性，通用之同步相量標準已陸續訂定發布，同步相量標準起源於 1995 年電機電子工程師學會(IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers)發表的 IEEE Std. 1344 技術規範，然而該規範僅定義了同步相量之時間同步及取樣要求，並無針對相量量測及精確度的需求進行規範。因此，2005 年 IEEE Std. 1344 即被 IEEE Std. C37.118 技術規範所取代，IEEE Std. C37.118-2005 較完整的定義了同步相量量測標準、量測精確度的測試及認證方法(例如定義了總相量誤差：Total Vector Error(TVE))、資料傳輸格式及即時(Real-time)資料通訊協定等。

此後，2011 年在電機電子工程師學會(IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers)和國際工程技術學會(IET, Institution of Engineering and Technology)合作下，IEEE Std. C37.118-2005 被分為兩個子標準：IEEE Std. C37.118.1-2011 及 IEEE Std. C37.118.2-2011。IEEE Std. C37.118.1-2011 主要係針對相量量測之精確度及電力系統暫態情形下之動態特性進行規範，包括報告率(reporting rate)、準確度等技術

規範；而 IEEE Std. C37.118.2-2011 則僅關注於資料交換的通信要求，確保不同設備之間的數據傳輸和互操作性。而和 IEEE Std. C37.118-2005 相比，IEEE Std. C37.118.1-2011 增加定義了兩個 PMU 性能等級：P Class 及 M Class，P Class 的 PMU 係針對保護及控制應用，具有最小濾波及最短量測時間延遲的要求以增加快速響應，然而也同時犧牲了相量量測之精確度；而 M Class 的 PMU 主要係針對電力系統監測應用，因此需具有更高的精確度，但因著重於濾波和使用較長之觀測視窗，因而導致時間延遲更長，量測響應更慢；此外，IEEE Std. C37.118.1-2011 亦要求了頻率及頻率變化率(ROCOF, Rate-of-Change-of-Frequency)需為 PMU 輸出之一部分。接著，因 IEEE 和 IET 的合作，2012 年發布了 IEC 61850-90-5：2012，定義了基於 IEC 61850 系統中的同步量測數據傳輸規範。

隨後，2014 年又發布了 IEEE Std. C37.118.1a-2014 修正案，放寬了 IEEE Std. C37.118.1-2011 中對於同步相量測量標準的要求，然而，經過多年後，經 IEEE 及 IEC 聯合委員會的通過，IEEE Std. C37.118.1-2011 已被 IEEE/IEC 60255-118-1-2018 國際標準 (Measuring relays and protection equipment) 中第 118-1 部分取代 (Part 118-1：Synchrophasor for Power Systems – Measurements)。

(二) 通訊協定

在廣域監測系統中，最常使用於交換同步相量數據之通訊協定是基於 IEEE Std. C37.118 標準規範，然而，隨著標準不斷演進改版，支援各種標準版本之 PMU 及 PDC 設備已被廣泛使用，因此確認既有 PMU/PDC 設備與新設備之間的相容性是非常重要的，因此，在擴展既有系統時，應特別注意相容性問題，以確保 PDC 支援所有版本之標準。

而另一種用於 WAM 或 WAMPAC 系統中交換數據之通訊協定是基於 2012 年發布之 IEC 61850-90-5 標準，儘管目前應用不廣泛，然而該技術標準係以符合 IEC61850

概念的方式進行傳輸，提供可路由配置 IEC 61850-8-1 GOOSE 及 IEC 61850-9-2 SV 數據包，進一步增強了 WAM 及 WAMPAC 系統。

1. 報告率(Reporting Rates)

在 IEEE Std. C37.118.1a-2014 標準規範中[2]，相量量測設備(PMU)報告率(reporting rate)規範如表 1 所示。在系統頻率 50Hz 和 60Hz 情況下，其報告率分別最高可達每秒 100 幀(100 frames/second)及每秒 120 幀(120 frames/second)，最低則是每秒 1 幀(1 frame/second)之頻率。在 IEEE C37.118-2011 和 IEC61850-90-5 標準規範中，雖然都可支援以高於電力系統頻率的速率傳輸同步相量數據，然而，增加數據傳輸報告率和 WAM/WAMPAC 系統中的 PMU 數量，將容易在傳輸數據資料時遇到瓶頸。

表 1 IEEE Std. C37.118.1a-2014 報告率(reporting rate)

系統頻率(System Frequency)	50Hz				60Hz						
報告率(reporting rate) (Fs - frames per second)	10	25	50	100	10	12	15	20	30	60	120

選擇 PMU 報告率時，需考慮多項因素，包括電力系統的動態特性、應用需求、數據傳輸能力及處理能力等。若需要即時監測與控制(如快速故障偵測、保護及控制)，或電力系統中頻率和相量變化迅速時，則需要較高之報告率(每秒 30 幀、60 幀或甚至 120 幀)來捕捉這些快速動態特性；反之，若僅是應用於長期趨勢分析或負載監測，或是對於變化緩慢且穩定之系統，則低報告率已足夠。此外，如同前段所述，高報告率將產生大量數據傳輸，需評估通信網路的頻寬是否能夠支持，同時亦需考量高報告率所增加的數據儲存容量及處理能力的負荷。因此，選擇合適之報告率，方能確保同步相量數據有效且可靠的傳輸及利用。

2. 同步相量傳輸方式

IEEE Std. C37.118.2 規範定義了量測訊息框架的要求(應用層)，包括訊息的類型、應用、內容及資料格式，但並無對所使用之通信媒介及通訊協定給予限制。基

於網際網路協定(Internet Protocol)的快速光纖電信網路，傳輸控制通訊協定(TCP, Transmission Control Protocol)及/或使用者資料封包通訊協定(UDP, User Datagram Protocol)，通常是首選方案。

同步相量資料交換是以伺服器端-客戶端導向(server-client oriented)的通訊架構，使用指令或自發的通訊模式。在指令模式中(伺服器端-客戶端雙向通訊)，係由中央 PDC 或中央控制中心資料應用端(接收方)觸發與 PMU 資料來源端(發送方)之間的連線，接收方向發送方發送特定資料請求命令後，發送方才回覆所請求的資料。而自發模式中(伺服器端-客戶端單向通訊)，配置和同步相量資料交換係由發送方以連續方式觸發，無需與接收方進行任何協商。另一方面，有關同步相量資料傳播方式，可以是單播(unicast-發送方和接收方之間)、多播(multicast-發送方和一組接收方之間，經由一個資料流)或廣播(broadcast-發送方和所有網路節點之間)的方式。一般而言，單播方式一般應用於同一個網域網路，而多播則適用於不同網域之間的同步相量資料交換，廣播方式則因其資源成本較高，因此僅在特殊情況下使用。

在 IEEE Std. C37.118.2 規範中定義的常用資料傳輸方式有(1)TCP-only(2)UDP-only(3)TCP/UDP(4)UDP 自發方式(單向通訊)。TCP 通訊協定(Transmission Control Protocol)是一種基於連接(connection-based)的通訊協定，適用於對資料傳輸的可靠性要求較高之應用(對於傳輸延遲較無要求)，該協定可保證數據資料傳輸到目的地(應用層)時保持完整，且按發送順序到達，因此，若使用 TCP 協定的連續 PMU/PDC 數據資料流在接收端遇到損壞或亂序的 TCP/IP 封包時，可能會經歷重傳或中斷。嚴格來說，TCP 協定是一對一的連接，因此若需將數據發送給多個用戶端，則需將資料流分別發送到每個目的地，此種情形將增加流量，並且需要 PMU 設備支援多個 TCP 連線。因 TCP 協定需要雙向通訊才能建立連線，如果安全措施阻止來自保護區域的傳入流量，TCP 客戶端將無法連接。而 UDP 通訊協定(User Datagram Protocol)則是一種訊息導向(message-oriented)的通訊協定，由於伺服器端和

客戶端之間無直接關係，因此可支援單播(unicast)、多播(multicast)及廣播(broadcast)傳輸方式。UDP 適用於快速且高效率資料傳輸的應用，但不保證資料封包可到達最終目的地，也無傳輸順序，因為所有資料封包皆是彼此獨立。如果資料需要排序或恢復，則必需由伺服器 and 用戶端的應用層來處理。

一般來說，UDP 是較常被選擇應用的通訊協定，因為與 TCP 協定相比，UDP 資料傳輸更快且連續，此外，若使用多播或廣播傳輸方式，因多個用戶可接收資料，因此可進一步減少網路流量。然而，UDP 的缺點是伺服器端與客戶端間的通訊並未被確認，因此若通訊沒有如預期進行，將很難找出問題點。UDP 可被應用於廣域監測系統，但不可應用於廣域保護與控制系統，因 UDP 協定無法保證資料封包傳送到目的地，且無固定的傳送順序。因此，廣域保護與控制系統中應使用 TCP 協定。

三、時間同步方式

精確的時間同步是 WAM 和 WAMPAC 系統中關鍵考慮因素之一，因其對同步測量之精確度至關重要。對 60Hz 系統而言， $1\mu s$ 的時間誤差會導致 0.02° 的同步相量角誤差，最大允許誤差為 1% TVE(Total Vector Error)時，若相量大小值誤差為 0 時，最大允許相量角度誤差則為 0.573° (約 $26.53\mu s$ 誤差)。因此，若發生嚴重時間同步問題或誤差，將影響 WAM 或 WAMPAC 系統之效能，甚至可能導致大停電事故發生。為實現精確時間同步系統，目前分為無線(wireless)及有線(wired)兩種方式，說明如下：

無線(wireless)：

最常用的無線時間傳播方案是基於全球導航衛星系統(GNSS)的方式，例如全球定位系統(GPS)、伽利略定位系統(Galileo)及全球導航衛星系統(GLONASS)等。此種方式原則上是由 PMU 設備中 GNSS 接收器，根據其位置和從 GNSS 時間參考系統接收到的每秒一個脈衝(PPS, one pulse per second)訊號來確定其時間。無線方案主要優點為成本低，然而，無線方案卻容易遭受網路攻擊，例如訊號干擾(寬頻發射器干擾或阻止 GNSS 訊號)或是欺騙(偽造之 GNSS 發射器至偽造位置)，這都是需要考慮的重要因素。

有線(wired)：

有線方案雖在設計上更具網路安全性，但一般需要特殊之高成本設備(如原子鐘)及專門之網路設施，因此，為了簡單化及降低成本，有線的時間傳播方案也使用全球導航衛星系統(GNSS)作為時間參考，這使得該方式也同樣容易受到干擾和欺騙攻擊。而目前應用於同步相量系統中常用之兩種有線的時間同步標準為 IRIG-B 及 PTP，以下將分別說明使用任一時間同步方式應考慮之要點：

(一) IRIG-B：IRIG 標準於 1960 年首次發布，並經過多次修訂後，最近一次更新版本為 2004 年 9 月之 200-04 標準。IRIG 訊號採用不同格式、調頻、頻率解析度及編碼表達，IRIG 200-04 標準中代碼參考指南如圖 4 所示。當進行時間同步源(GPS clock)與 PMU 及 PDC 匹配時，應考慮 IRIG-B 源是否與接收到的訊號相容。例如，GPS 時鐘源中實現的訊號為脈衝調變代碼(B0XX)，而 PMU 設備僅支援正弦波、調幅訊號(B1XX)，此種情況將無法進行時間同步，同時影響 WAM 或 WAMPAC 系統的運作。另一方面，採用 IRIG-B 方式一般係使用同軸電纜實現，在設計時間同步佈線時，應考慮電纜及相關設備(PMU、PDC)所衍生之負載，還應考慮電纜長度造成之時間延遲；在某些情況下，亦需使用終端電阻來抑制因反射所引起之訊號過衝現象。

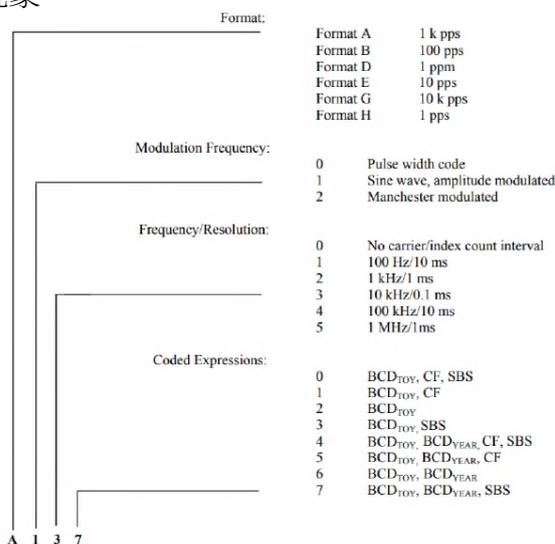


圖 4 IRIG 200-04 標準之 IRIG 代碼參考指南

(二) PTP：精確時間協定(PTP, Precision Time Protocol)是一種用於網路上高精度時鐘同步的協議，標準為 IEEE 1588，亦為常應用於 WAM 及 WAMPAC 系統中一種時間同步方式，相較於 IRIG-B 方式，其優點如下：

- A. PTP 是基於以太網路的協定，無需同軸電纜佈線。
- B. 若使用光纖將可進一步提升以以太網路方式進行時間同步之距離和性能，滿足 WAM 及 WAMPAC 系統的高標準。
- C. 支援時鐘源(clock level)及網路路徑備援機制，可在網路故障或干擾情況下維持時間同步之穩定性。

時間同步採用 PTP 協定時，應注意以下幾點：

- A. 使用虛擬區域網路 (VLAN) 來分隔流量，因為這不會影響時間同步的準確性，而且可對 PTP 主時鐘提供一定程度的保護。
- B. 在主時鐘 (Grand Master Clock) 和從時鐘 (Slaves) 之間保持最少的中間跳躍 (hops)，以避免由透明時鐘 (Transparent Clocks) 引入的小時間誤差。
- C. 安裝備援時鐘(clock)，以使主時鐘故障時，時間同步仍可有效運作，並增強時間同步系統之穩定性。
- D. 使用備援網路機制，例如環網。需注意的是，為了在環網中提供 PTP 定時，所有時鐘必須是透明時鐘，並符合 IEEE C37.238 標準。

四、應用情形及實績

本節將介紹目前整合 WAM 和 WAMPAC 系統的最新應用情形，並同時說明目前同步相量和相量量測設備(PMU)技術的最新進展，將分別以即時監測、事件後分析報告及使用 PMU 量測技術進時即時控制調整來介紹及說明。

(一) 即時監測

針對即時監測、控制與決策方面，目前廣域監測系統的主要核心應用在於監測電力系統特性及相關穩定度問題，如下所列：

- 低頻振盪(Low-frequency Oscillations)
- 電壓大小(Voltage Magnitude)
- 電壓相位角差(Voltage Phase Angle Difference)
- 系統頻率及頻率變化率(Fundamental Frequency and related ROCOF)

1. 低頻振盪偵測(Low-frequency Oscillations Monitoring)

監測無阻尼振盪是廣域監測系統中典型的應用之一，因無阻尼振盪將可能是電力系統不穩定的首要徵兆，通常稱之為低頻振盪，一般位於 0.1~2.5Hz 範圍間，而對近年來大規模再生能源併網之電力系統而言，低頻振盪則大約在 10Hz 左右的範圍內。電力系統的低頻振盪現象，主要是來自於當輸電線路上功率發生變動或電力系統受到擾動時，發電機組會產生轉子間的相對搖擺，而當電力系統低頻振盪產生後，一種情況是持續一段時間後發電機轉子間的搖擺逐漸恢復穩定，另一種情況則是發電機轉子間的相對搖擺恢復很慢或甚至持續增大，以致破壞了互聯系統的穩定狀態，最終可能導致整個電力系統崩潰，而由於電力系統的低頻振盪頻率較低、週期較長、影響範圍較廣，可能造成電力系統更大的危害，所以低頻振盪監控是維持電力系統穩定性的重要課題之一。所謂電力系統低頻振盪是指電力系統受到擾動或調節控制的影響，因同步發電機的電磁特性和機械特性而產生的一種動態過程，低頻振盪發生後，可能會出現三種現象：

- (1) 無阻尼振盪(Undamped oscillations)：此種振盪現象振幅將不斷增大，限制了電力系統的穩定性，甚至可能導致系統分裂。此外，一些輔助服務可能面臨非預期的跳脫，引發潛在的連鎖效應。
- (2) 中等阻尼振盪(Moderately damped oscillations)：此種振盪現象的振幅相當穩定，但仍有可能會再次干擾系統的運轉並導致非預期的跳脫。
- (3) 阻尼振盪(Damped oscillations)：此種振盪現象的振幅會逐漸減小，或可以藉由適當的控制措施來抑制振盪。

低頻振盪可分成兩種類型，其一為區域間振盪(inter-area oscillations)，另一則為局部地區振盪(local oscillations)。區域間振盪是互聯電力系統中各區域之間的相對應振盪，頻率範圍為 0.1~1.0 Hz 之間，影響系統的廣泛區域，通常，在系統的邊緣會觀察到較大之頻率振盪，亦即在系統中心的傳輸線上會觀察到大的實功功率波動。而頻率和功率振盪的影響也會導致顯著的電壓振幅偏差，在某些關鍵情況下，嚴重的振盪現象可能會導致系統部分或全停電。而另一類型-局部地區振盪，是區域內發電廠之間轉子相對振盪行為，如單部發電機或多部機的發電廠相對於其餘電力系統之間的振盪，振盪頻率為 1~2 Hz，通常不會對電力系統造成大部分的影響，但對受影響之電廠的完整性卻很重要。

近年來，有關基於電力電子逆變器控制的穩定性日漸受到關注，在電網因線路故障、發電損失或其他電壓調節設備損壞而變弱的情況下，功率電子轉換器的控制可能變得不穩定，快速控制器之間也有可能互相作用，導致系統不穩定性。

目前監測電力系統低頻振盪現象的唯一有效方式是使用 PMU 量測，可採用不同的檢測技術，但較完整且有效的方法是模態分析(Modal Analysis)，可藉由同步相量技術以線上或離線方式執行。以下將介紹德國應用同步相量技術偵測系統低頻振盪的實際應用案例，該振盪是由於法國系統與西班牙系統互連之一條輸電線路意外跳脫所致[3]：

圖 5 為德國基於 PMU 所量測到之低頻振盪的可視化監測界面(2016 年 12 月 1 日)，該圖顯示了量測值(振盪偵測器之輸入訊號是系統頻率)、3D 趨勢圖(顯示全動態振盪模式)、振盪幅度及阻尼比，時間窗口為 4 分鐘，並可以辨識出三種阻尼低頻振盪模式：(1) 0.152Hz 模式，具有顯著幅度(12.77mHz)，阻尼僅 0.7%；(2) 0.337Hz 模式，具有較低幅度(1.541mHz)和 1.4% 阻尼；(3) 1.803Hz 模式，僅具有 0.212mHz 幅度，阻尼為-1.9%。在此案例中，0.152Hz 模式為臨界模式，將可能產生廣域功率振盪。此外，廣域監測系統亦能分析檢測振盪來源，並分析不同位置的振幅、阻尼和振盪模式，以利調度人員採取因應調度運轉策略或調整控制參數。

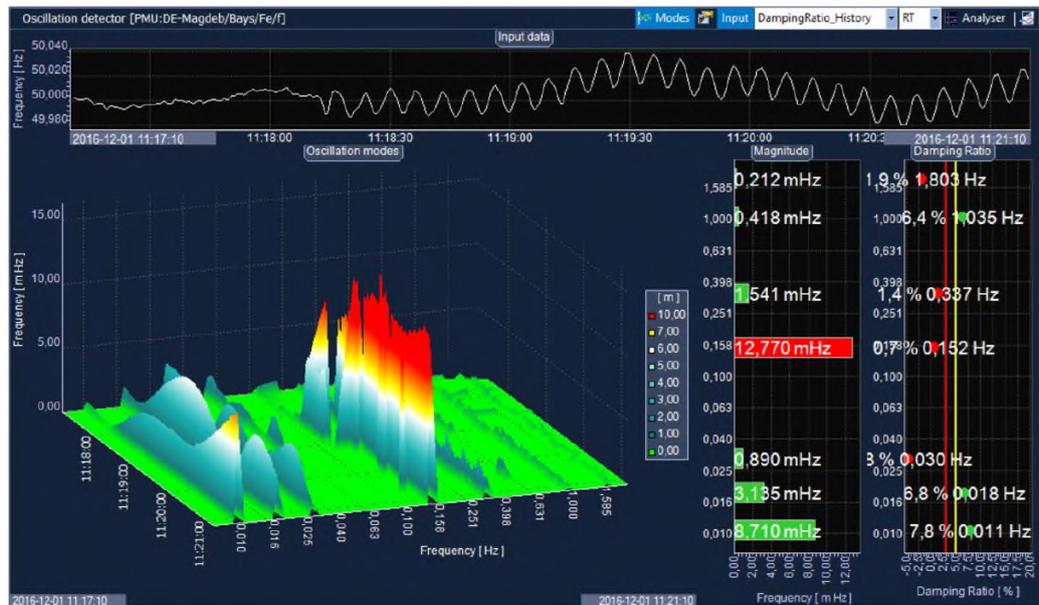


圖 5 德國基於 PMU 所量測到之低頻振盪現象[3]

2. 電壓大小監測

基於同步相量技術的電壓監測通常包括電壓範圍的偵測，即依據電壓幅度對電壓狀況進行監督。當電壓幅度超出容許的範圍時，該監測系統可向控制室發送警報提醒。電壓監測的應用與電網安全相關議題包括有電壓穩定度（即崩潰或無法控制的增大）、電壓下降（即故障）、廣域的電壓狀況、因電壓而造成之虛功變化及支援系統的重新同步或恢復等。

西班牙輸電網即有使用同步相量技術進行電壓大小監測的實際應用案例，藉由同步相量技術可以比較來自不同地點的時間同步電壓幅值。圖 6 即顯示了在 2021 年 7 月 24 日發生的歐洲大陸同步區域分離期間，西班牙不同變電所的電壓幅值熱圖[4]。另一方面，因同步相量技術亦能提供每相的電壓大小值，因此亦能即時評估電網中的不平衡狀況，不僅能及早發現系統的問題，同時也能檢測出相關設備的故障，如 PT 故障，圖 7 顯示了西班牙輸電網中某些 400kV 變電所的電壓不平衡 (電壓負序/電壓正序) 現象，然而圖中顯示的最大值其實並非代表系統真的發生不平衡事件，經查後是由於 PT 故障所造成的，因此，使用同步相量技術應用於即時電壓監測，亦能及早檢測出 PT 或相關設備的故障情形[1]。

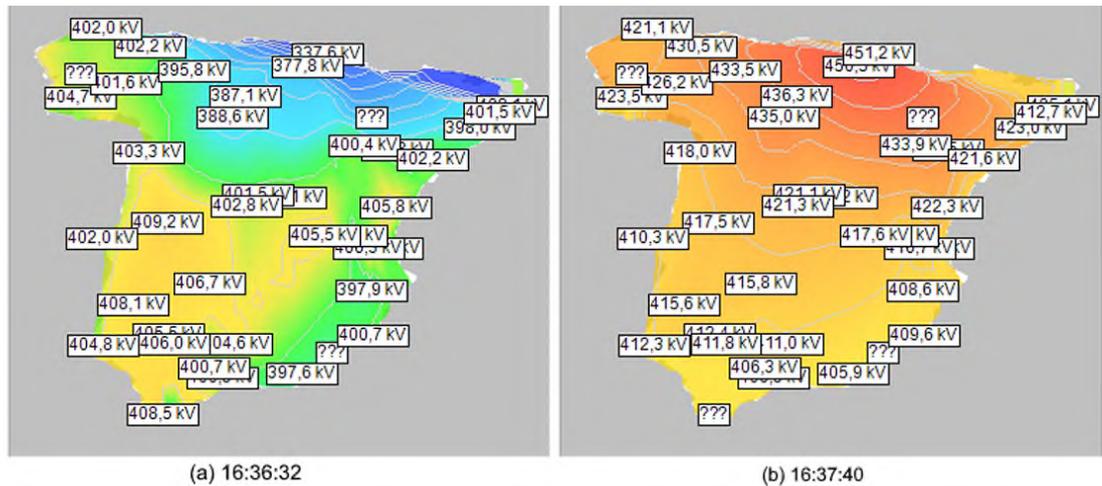


圖 6 西班牙 400 kV 變電所在兩個不同時間的電壓幅值[4]
 (a)事件發生時(b)事件之後(西班牙電力系統與歐洲系統於 2021 年 7 月 24 日分裂)

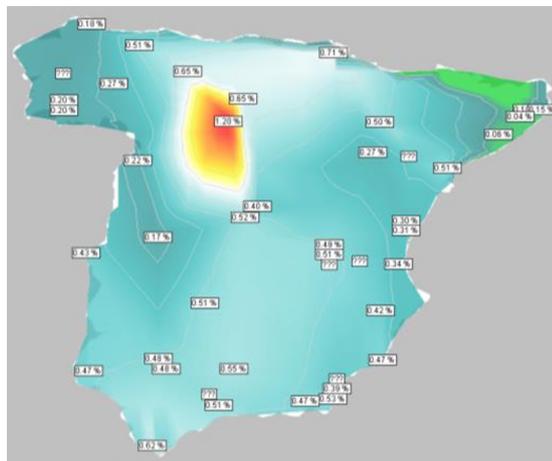


圖 7 西班牙 400 kV 變電所的電壓不平衡現象[1]
 (2017 年 12 月 17 日)

3. 電壓相角差監測

同步相量技術的另一主要特點是能夠比較電力系統中不同位置的電壓相位角差。電壓相位角的差異是因為線路負載過重而產生的電力系統重要指標，並能進行孤島偵測；同時，作為系統重新併網時同步併聯檢測應用，其亦具有重要價值。使用同步相量技術進行廣域系統之電壓相位角差偵測在許多國家電網都已有實際使用案例，如西班牙(REE)、義大利(Terna)及印度(Grid-India)等，圖 8 即顯示了一個電壓相位角差監控的圖形呈現案例。

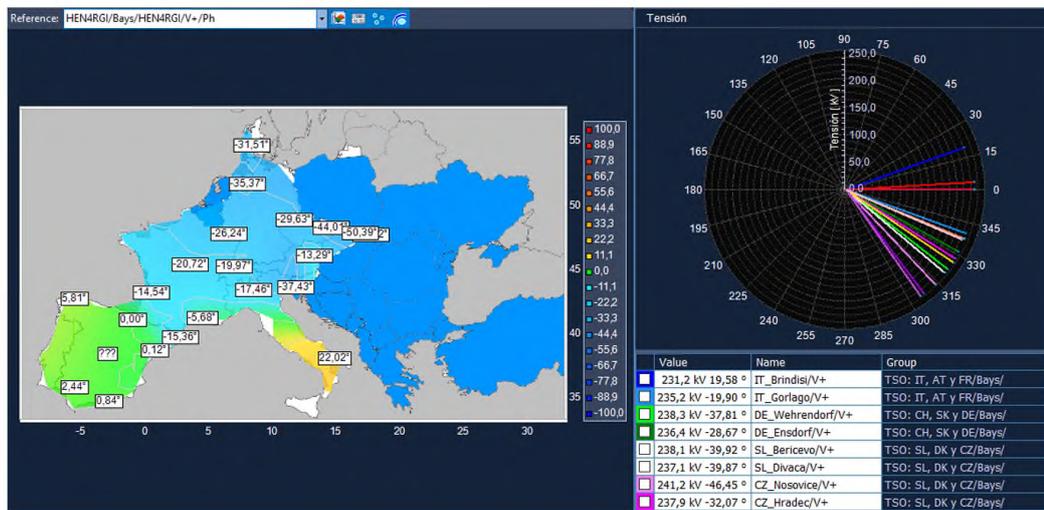


圖 8 電壓相位角差異監控圖

而另一種顯示角度差異的方法是使用儀表方式顯示，並透過不同色彩明確地向使用者提示角度分散的嚴重程度，如圖 9 所示。

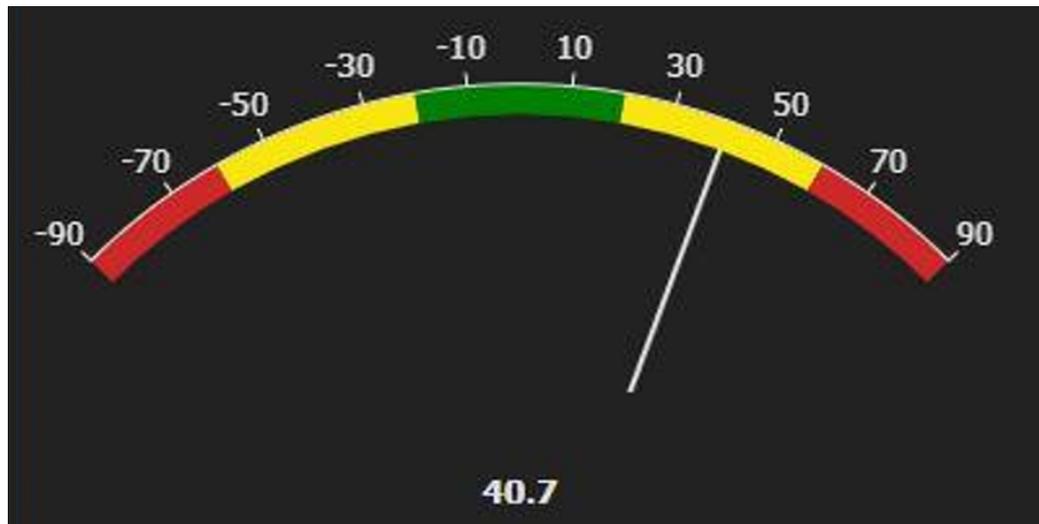


圖 9 儀表顯示電壓相位角度差方式

4. 系統頻率監測

基於同步相量技術的系統頻率監測通常包括系統頻率範圍、頻率變化率(ROCOF)範圍及孤島情況的偵測。頻率範圍偵測主要在於監控電力系統頻率是否在允許運轉範圍內，而頻率變化率偵測可在頻率變化率超過預設設定值時提醒運轉人員，孤島偵測則主要是基於頻率或/和電壓相角差來判斷的方法。應用同步相量技術於頻率監測也已在許多國家輸電網路實際應用，其中亦有針對發電機頻率響應的監測應用，可以在檢測到 ROCOF 超出限制時自動生成報告，該方法可以依據各種標準（如 ENTSO-E、NERC 等）自行進行定義。ENTSO-E 係採基於準穩態頻率偏差法(quasi-steady-state frequency deviation)，依圖 10 之方程式進行定義。該值是從系統發生擾動後 10 到 30 秒之間繪製的“平滑線”，要求相對於該線的頻率偏差總和 ε_i 為零。參數 f_0 表示擾動發生時的頻率值，破壞發電和負載之間平衡的擾動皆會導致頻率偏差，其涉及來自發電機在幾秒內的初級控制反應。WAM 系統可在發電機藉由 PMU 監控時，當頻率突然發生變化的情況下，能夠監控發電機的初級響應，如圖 11 所示。

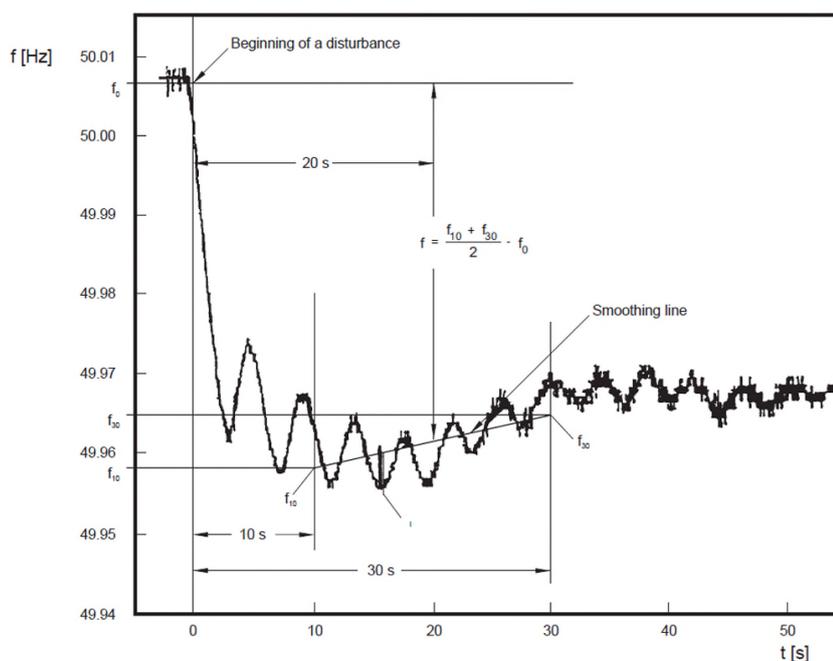


圖 10 ENTSO-E 準靜態頻率偏差法

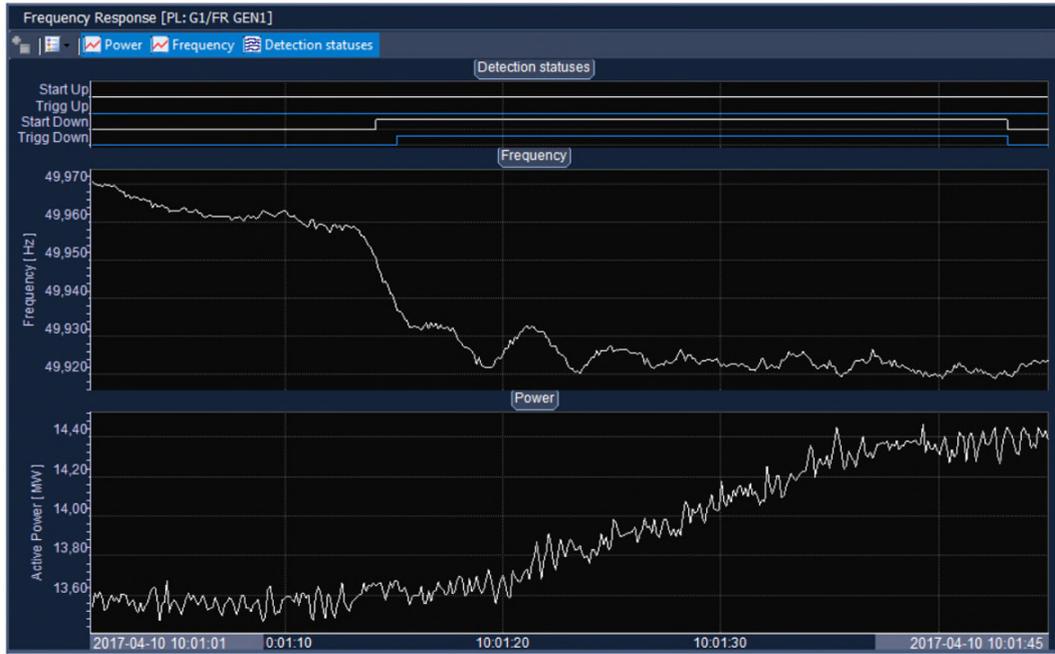


圖 11 ENTSO-E 頻率變化時發電機的頻率響應

而 NERC 則是採基於事件前後頻率的平均值方式，如圖 12 所示。事件發生的時刻標記為時間 0，時間 A (-16 秒到 0 秒) 代表事件前的時間，瞬變時間從 0 到 20 秒，而時間 B (20 秒到 56 秒)則代表事件後的時間，圖 13 即為其觸發產生報告時之發電機頻率響應圖。

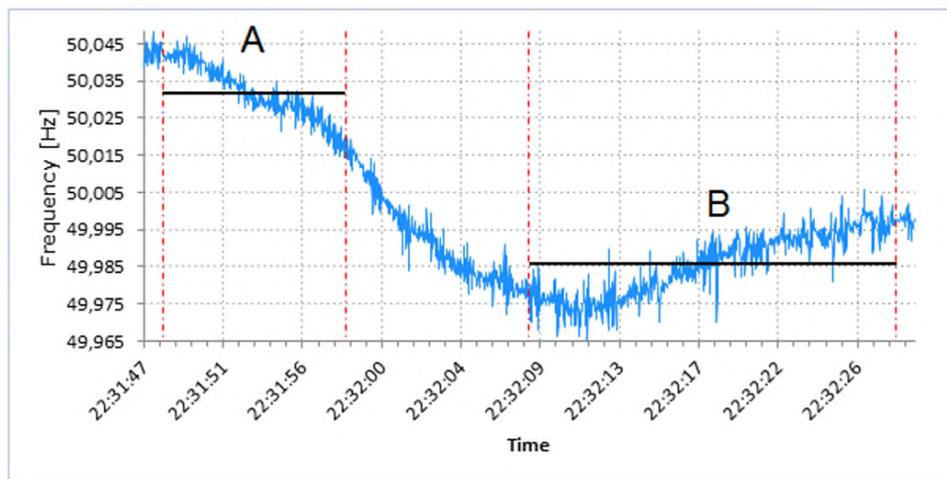


圖 12 NERC 頻率偏差法

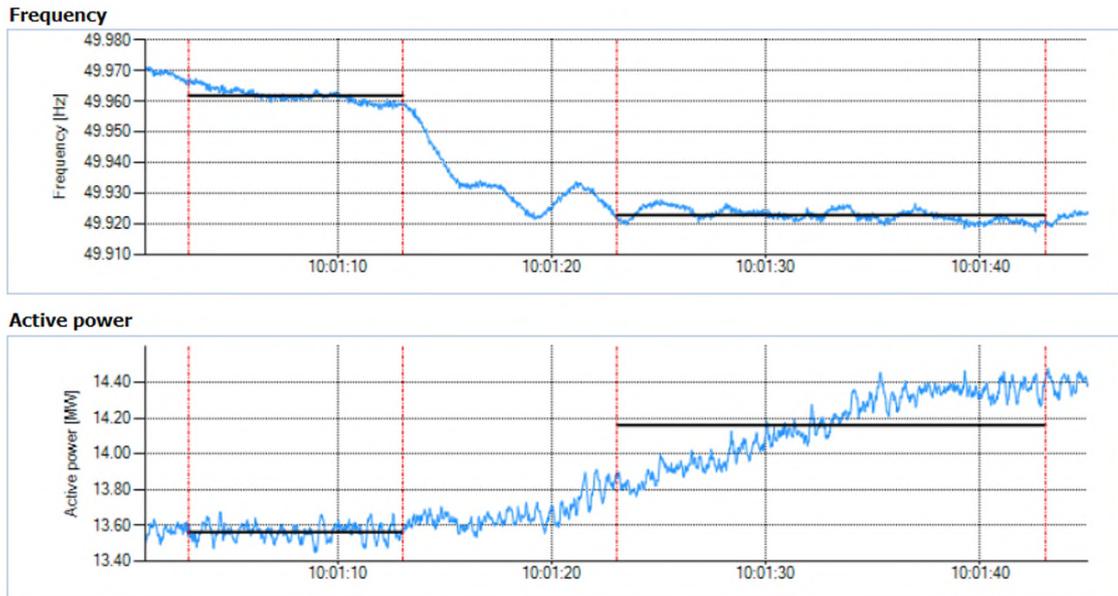


圖 13 NERC 頻率變化時發電機的頻率響應

以上實際應用案例突顯出廣域監測系統工具對於系統調度員的重要性，亦對於評估系統的穩定度有極大的幫助，可成為電力調度員的重要支援，同時亦能在任何觸發條件的情況下獨立儲存具有足夠解析度的同步量測值，並持續一段相當長的時間視窗以利解讀分析。

(二) 事故後分析

廣域監測系統除了可對系統狀態進行即時監測，近年來，幾次大停電事故發生後，進行事件分析及調查事故原因時，過程中主要資訊來源是來自各地收集的 PMU 數據，如事故前後的頻率演變、電壓變化、電壓相位角差及功率流向等，能有效協助釐清事故原因，並進一步採取對策，以避免或減輕未來類似事件再發時對系統的影響。另一方面，應用同步相量技術可提供調度人員事故發生時該事件即時且清晰的指示，並能在事故發生幾秒鐘後，瞭解整個系統的動態行為。此外，藉由廣域監測系統亦有助於立即分析說明保護電驛或防禦系統(SPS)的動作情形。

(三) 電力系統穩定器(PSS)調整

低頻振盪是現今互連電網中的重要問題，它會導致電力傳輸能力下降，甚至因為潛在的弱阻尼或無阻尼振盪而威脅電力系統安全。為了向電網引入阻尼貢獻，所謂

的電力系統穩定器（PSS, Power System Stabilizer）即是目前用於基於同步發電機的發電廠以及同步調相機之措施。由於同步調相機不產生實功，它透過調節勵磁電流產生或消耗虛功，改變同步調相機匯流排端電壓振幅及相位後，增加阻尼，進而影響系統功率，提高系統穩定度。

而廣域監測系統亦可為電力系統穩定器(PSS)的微調和 PSS 效率的驗證做出巨大的貢獻。主要有下列有三種應用：

- (1) 對頻率、電壓的連續監測及主要指標的模態分析(主模態、振幅、阻尼)
- (2) 直接監測電廠或鄰近電廠之重要匯流排
- (3) 利用已安裝或可攜式的 PMU 對發電機輸出進行即時監測

藉由連續監測頻率及採用即時模態振型(mode shape)矩陣計算，可偵測到弱阻尼的情況並能聚焦於主動節點，這樣的方式可讓我們能夠確定那些電廠的 PSS 可能需要改善和測試。

另一方面，直接監測電廠或相鄰重要匯流排節點是 PSS 有效性的另一個重要指標。事實上，對匯流排上頻率和電壓之間的角位移進行即時監控，可以有效地檢查 PSS 運作的效能。以圖 14 說明：左側藍色顯示的是量測到的電壓，紅色則是匯流排的頻率，當電壓與頻率同相之成分 (V_f) 愈多，則代表負載改善的阻尼效果愈好，此是因為負載吸收的實功率 (P) 與 V_f 平方成正比 ($P \propto V_f^2$)。

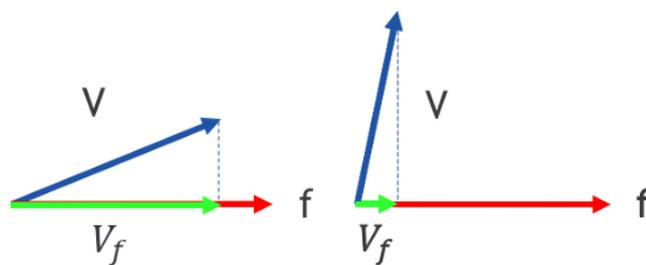


圖 14 PSS 效能比較(左邊好、右邊差)

此外，對發電機輸出進行即時監測亦是一種對 PSS 非常有效的驗證方式。PSS 測試期間的即時監測可達到下列目標：

- 估算發電機的慣量
- 驗證勵磁機模型
- 測量阻尼比
- 在機組正常運行的情況下驗證 PSS 調相後之效果

所有這些測試和估算皆是藉由控制中心的遠程 WAM 系統介面進行的。

五、最新發展及研究趨勢

本節將介紹目前基於同步相量技術的最新應用及因應下一代電力系統發展的研究應用趨勢。

(一) 動態線路額定容量及可用最大傳輸能力估測

當電力需求不斷上升，輸電線路負載隨之不斷增加，加上再生能源不斷併網的情況，電網壅塞問題將是近年來需面對的課題之一，而緩解線路壅塞的傳統解決方案包括擴建、升級或重建電力基礎設施，雖然從長遠來看，這些傳統解決方案確實是必要的，然而動態線路額定容量估測(DLR, Dynamic Line Rating)新技術將可在短期內以較低成本的方式緩解壅塞。雖然 DLR 系統是解決電網壅塞眾多選擇方案之一，但其優勢是可提高輸電系統的態勢感知能力以及對輸電線路進行狀態監控的潛力。因此，在傳統解決方案施作及改造困難的情形下，提高輸電線路的利用效率技術在近幾年即受到高度關注。輸電線路的最大傳輸能力傳統上係以最保守(最壞)情況下決定的，雖然可靠，但由於天氣條件與最壞情況不同，溫度通常被預估過高，因此，若藉由 PMU 即時量測的動態線路額定容量估測(DLR)技術，可提高輸電線路的利用效率。

輸電線路的熱狀態可以藉由線路參數進行適當的迴歸模型來推斷，目前相關文獻中[72]有介紹了四種基於 PMU 之動態線路額定容量估測方式，包括單及雙量測方式(Single and double measurement methods)、非線性最小平方法最佳化估算(Non-linear least square optimal estimator)、校準方式(Calibration method)及最佳化方式(Optimization-based methods)，然而這些方法仍存在一些共同弱點，依估測結果，不論計畫性或隨機量測的誤差，在相當程度上會影響分析估算法之準確度，因此基於 PMU 之動態線路額定容量評估仍需更進一步研究，此外，對於更長時間、更高負載及極端多變之氣候條件下之動態線路額定容量評估(DLR)，目前也在進行研究並需在更複雜的條件下進一步確認。

(二) 快速頻率響應解決方案

隨著再生能源不斷增加及傳統機組占比逐漸降低，系統慣量議題亦逐漸受到關注，系統慣量直接影響事故初期的頻率變化率(ROCOF)，系統慣量愈低，系統受擾動之影響程度將愈大。為因應此種變化，採用基於 PMU 之快速頻率響應控制已漸為大家所感興趣之研究方向。由於 PMU 能以相對較高之精度測量電力系統頻率，採用 PMU 的即時通訊協定，提高通訊響應速度，利用 PMU 演算法實現動態高精度測頻，可滿足動態過程測頻誤差不大於 0.002Hz、有功功率誤差小於 0.5%的要求[5]。圖 15 即為一再生能源快速頻率響應控制系統[6]，係藉由再生能源案場之能源管理系統和快速頻率響應控制裝置構成，主要是能源管理系統根據 PMU 即時量測數據，調節風力或太陽光電變流器輸出，實現併網點的有效功率調節，系統功能包括一次調頻、AGC 和 AVC，PMU 設置於併網點，PDC 連接至 WAM 系統主站，PMU 同時接收 AGC 指令，疊加後控制變流器(inverter)。如此，再生能源案場即可參與有效功率調節。

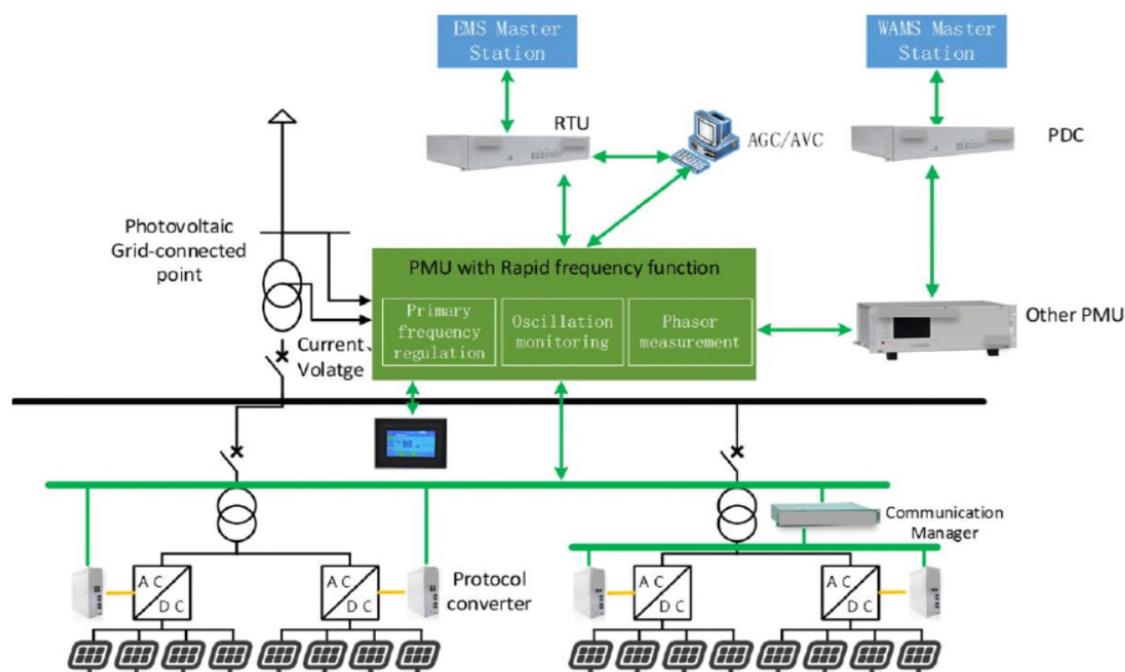


圖 15 基於 PMU 之再生能源案場調頻系統[6]

(三) 慣量估測

隨著全球低碳能源轉型，再生能源併網量不斷增加，使得再生能源滲透率逐漸提高，導致系統慣量顯著降低，造成系統運轉更具挑戰性。系統慣量是決定電力系統發電與負載不平衡時初始頻率響應的重要因素，隨著系統慣量減少，當發生大型發電機組或輸電線路跳脫造成電力供需嚴重不平衡時，系統頻率將下降更快且更深。因此，為維持供電穩定度，系統慣量估測成為現今全球電網日漸關注的議題。傳統系統慣量計算方式是採發電機廠家提供之發電機參數來計算，然而現今則愈來愈需要採用直接量測系統慣量之方法，方能考量負載端影響慣量的部分。

所謂有效慣量係包含旋轉機、被動負載響應和發電機主動控制的綜合類慣性效應。目前除了經由系統擾動期間測量 ROCOF 來得到系統慣量方法之外，為能在電網擾動期間外亦能掌握系統慣量，另一種方法則是藉由遠端監測發電機總動能來計算，此種方法也已被廣泛應用及驗證。此慣量估測方法係著重於在電力系統中所觀測到的廣域振盪現象，具體來說，是藉由圖 16 所示的兩部發電機系統模型來等效模擬實際電力系統，利用 PMU 量測之兩同步機間的相位差和潮流數據進行快速傅立葉轉換 (Fourier transform)，以得到廣域振盪成分來估算慣量。此快速傅立葉轉換方式可以依據持續量測之即時同步量測值進行慣量估測。

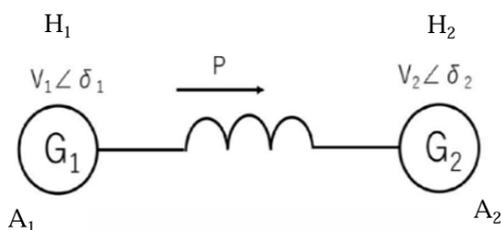


圖 16 兩部同步發電機組等效模型

$$M_2 = \frac{K(A_1 + A_2)}{A_2 \omega_0^2} \quad M_1 = \frac{K(A_1 + A_2)}{A_1 \omega_0^2}$$

公式 1

以公式 1 來說明，若假設廣域振盪成分被圖 16 中兩部同步發電機(G1、G2)之慣性所吸收，則可根據各同步發電機之振盪振幅(A1、A2)、振盪頻率(ω_0)及同步功率(K)，利用 FFT 方法得到慣性常數 M1 和 M2，而每部同部發電機之慣量常數 H1、H2 則可由 $H=M/2$ 之關係式求得，此利用多點收集的 PMU 數據來估算慣量之有效性已被驗證，且估算精度也有所提升，此方法計算的動能考慮了用戶端及與輸配電系統相聯之所有旋轉機之動能總和。另一方面，利用 PMU 進行小擾動的同步穩定度估測也同時在進行研究中。圖 17 為日本之系統慣量監控配置圖，而圖 18 則為其系統慣量估測結果及趨勢圖。

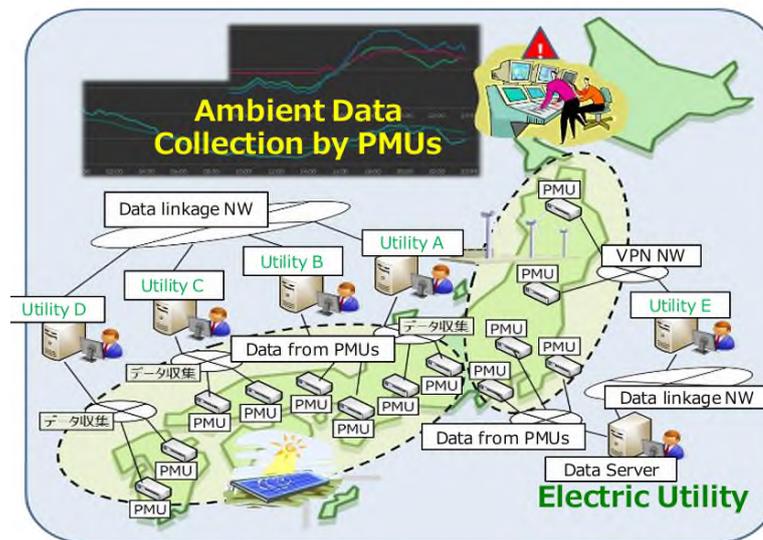


圖 17 系統慣量監控配置圖

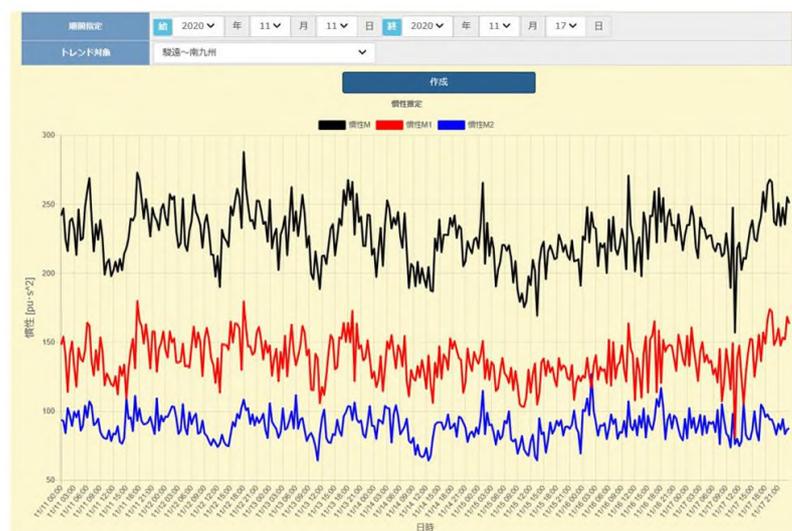


圖 18 系統慣量估測結果及趨勢圖

肆、訪問國外電力機構及設備廠家之技術交流

本次出國訪問主要目的，是為了解國外電力機構廣域監測(WAM, Wide Area Monitoring)系統之建置架構、功能應用情形及實際運轉維護經驗，並進一步探討國外應用同步相量技術於保護之現況及未來發展趨勢，俾提升本公司電力系統防禦能力及供電可靠度。

本次出國訪問係由本公司參訪團隊及美國喬治梅森大學(George Mason University)電機與電腦工程學系黃麗玲教授與 Dr. Mark Adamiak(IEEE Fellow)，共同實地訪問經研究團隊問卷調查較有實際廣域監測系統應用經驗之國外電力機構，分別為位於美國維吉尼亞州的道明尼能源(Dominion Energy)公司及位於美國紐約的紐約電力局(New York Power Authority)，另外亦參訪 PMU 設備廠家 Electro Industrie / GaugeTech 公司。本章節將分享本次訪問所獲得之國外電力機構同步相量技術應用及經驗分享。表 2 為本公司與本次訪問之兩家電力機構(道明尼能源公司、紐約電力局)之基本概況表。

表 2 台灣電力公司、美國道明尼能源公司及紐約電力局基本概況表

	台灣電力公司 (Taiwan Power Company)	道明尼能源公司 (Dominion Energy)	紐約電力局 (New York Power Authority)
供電範圍	台灣、澎湖、金門及馬祖地區	美國維吉尼亞州、西維吉尼亞州和北卡羅來納州的部分地區	紐約
員工人數	28,213 人	17,000 人	2,077 人
裝置容量	5,543.9 萬瓩 (台電自有3,256.3 萬瓩)	3,000 萬瓩	600 萬瓩
輸電線路總長度	18,238 回線公里	10,750 回線公里	2,348 回線公里
輸電系統 電壓等級	345 kV (4,123 回線公里) 161 kV (7,755 回線公里) 69 kV (6,360 回線公里)	500 kV (2,092 回線公里) 230 kV (4,710 回線公里) 138 kV (103 回線公里) 115 kV (3,720 回線公里) 69 kV (125 回線公里)	765 kV (250 回線公里) 345 kV (1,495 回線公里) 230 kV (544 回線公里) 115 kV (59 回線公里)
用戶數	1,514 萬戶	700 萬戶	1,091 戶 (地方政府、州政府機構、教育機構 等非營利組織)
PMU 數量	104 (綜合研究所)	1184	70

一、道明尼能源公司(Dominion Energy)

(一) 公司概況

道明尼能源公司(Dominion Energy)是一家美國大型能源公司，總部位於維吉尼亞州 Richmond 城市，其總發電裝置容量約 3,000 萬瓩，輸電線路總長度約 10,750 回線公里，並擁有 900 個以上變電所，為維吉尼亞州、西維吉尼亞州和北卡羅來納州的部分地區供電，輸電線路電壓等級分為 500 kV(2,092 回線公里)、230 kV(4,710 回線公里)、138 kV(103 回線公里)、115 kV(3,720 回線公里)及 69 kV(125 回線公里)。道明尼能源公司之發電設備及輸電系統電網分佈圖分別如圖 19 及圖 20 所示。

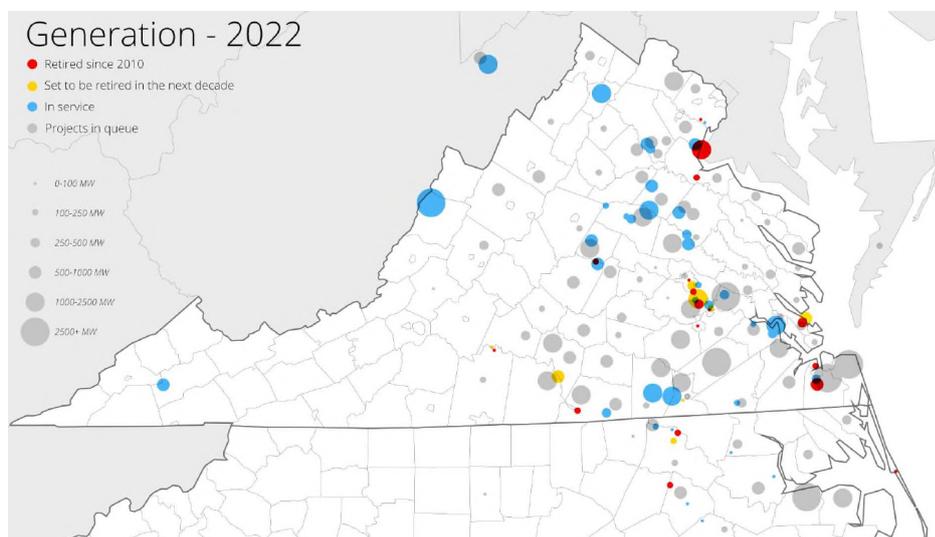


圖 19 道明尼能源公司發電設備分佈圖(2022 年)

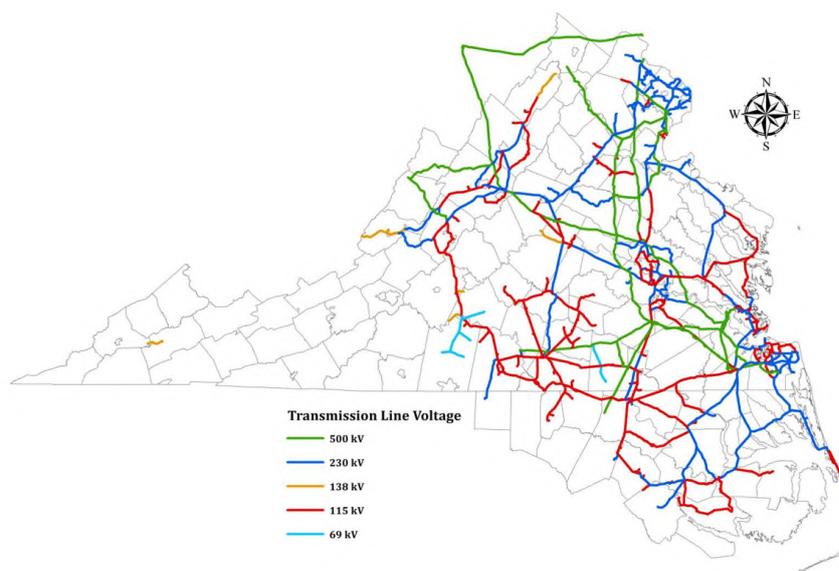


圖 20 道明尼能源公司輸電系統電網分佈圖

(二) 同步相量技術應用討論

道明尼能源公司參與本次交流會議之團隊為輸電系統之 PMU 數據資料分析小組，成員包括專案經理 Mr. Kelvin Jones 及多位成員(圖 21)。本次會議流程，由本公司先簡報介紹台電的基本資料及目前 PMU 之應用，再由道明尼能源公司說明其應用現況。



圖 21 道明尼能源公司會議室合影(經理 Mr. Kelvin Jones 為左 4)

道明尼能源公司的同步相量數據資料來源主要是由數位故障記錄器(DFR, Digital Fault Recorder)及保護電驛(Protective Relay)設備提供，惟大部分是來自於數位故障記錄器(DFR)，亦即其 PMU 設備主要是數位故障記錄器及少部分的保護電驛，而非另外裝設獨立之 PMU 設備。其同步相量數據資料觸發條件包括過壓、欠壓、零序電流或變電所內直流電源電壓等。道明尼能源公司的同步相量技術應用除了事故波形資料記錄功能外，其主要應用於系統電壓角度及低頻振盪現象偵測，因當系統電壓角度漸漸偏離極可能是大規模停電的前兆，如將監測點資料的所有角度繪製在極座標圖上，若在低負載或無壓力條件下，這些角度將非常接近，並緊密耦合；反之，在系統面臨擾動或突發情況下，角度將可能開始發散，在大停電前將看到角度開口比實際情況要大得多，如圖 22 所示。



圖 22 PMU 即時監測系統電壓相量相角功能

雖然目前道明尼能源公司進行電壓相角監測仍處於初期階段，但他們認為此有潛力成為防止大規模停電的寶貴工具，並能提供電力調度人員視覺化界面，同時幫助判斷採取因應措施。另一方面，隨著電網再生能源(例如太陽能 and 風能)佔比提升，分析再生能源引起的電網振盪現象，也是道明尼能源公司的數據分析小組重點工作，團隊幾乎全專注於系統的振盪分析，PMU 數據可用於識別這些振盪且對於了解電網動態很有價值，但需要仔細要求數據品質。道明尼能源公司之 PMU 數據資料分析小組曾在 2009 至 2013 年間嘗試將這套監測系統結合至調度中心的控制室，但遇到阻力，而後方轉向建立目前的團隊，其運用更多 PMU 監測資訊來確保電網穩定，例如檢測電壓相位角的異常，可做為即將發生停電之預警。

另外，目前道明尼能源公司係使用 PingThings 平台蒐集 PMU 數據，平台可提供高解析度資料視覺化、支援不同資料集以及長期資料儲存，並可支援大量不同格式的即時串流數據和歷史資料存檔。

資料分析主要分為兩種模式：即時處理(Real-time Processing)、追溯查詢(Retrospective Query)，兩者都需要快速處理數據的能力。即時處理模式下，資料一到達時須馬上處理，能即時反應數據變化，提供實時數據。然而，為了確保數據顯示流暢，需要以每秒 30 幀的速度進行處理，就像渲染遊戲畫面一樣。追溯查詢模式下，

資料到達系統後，再針對特定時間區間的數據進行批量處理，好處是可以針對歷史數據進行深入分析，發現長期趨勢。

未來 PMU 數據存儲的數據量會持續增加，存儲成本會隨著時間的推移而下降，利用此平台可非常快地存儲新數據，資料被提取到專門為密集時間序列感測器資料設計的資料庫中，可即時快速分析大範圍時間的數據。較久遠的數據則可儲存在一個較慢的磁碟中，節省其存儲成本。該平台包含一個分散式分析和計算框架，進行跨時間序列平行運算，以快速處理實時數據。

即時分析平台必須為所有串流提供此類處理，即時處理單一串流可能看起來微不足道，但即時處理一百萬個串流並就需要幾個數量級的額外運算資源和頻寬。為了滿足高頻率、大規模數據處理的需求，平台需要具備強大的硬體、高效的演算法和靈活的架構。同時，平台還需提供豐富的 API 和開發工具，方便用戶進行數據分析和應用開發。PingThings 平台提供了大量 API，不僅可以直接連接到 Web 應用程式（包括資料瀏覽器、儀表板），還可以在該環境中編寫程式碼連接到公用事業營運軟體，此平台也支援即時數據視覺化，無論感測器的取樣率或串流的數量如何，可輕鬆地與所有資料連結使用。

道明尼公司也分享了其建置同步相量技術過程的經驗，在建置初期面臨的挑戰涉及多個部門，例如保護電驛部門原是負責保護電驛規劃、標置設定、測試及維護，若需再增加規劃啟用 PMU 功能，以保護電驛部門角度而言此屬於額外增加的工作，而數據通訊部門則需要負責配置設備來發送數據，控制室則需要對使用 PMU 數據感興趣。因此，跨部門的協作至關重要，也非常困難。公用事業通常對於採用新技術持保守態度，同仁可能不了解 PMU 的好處並會抵制這些額外的工作，公司領導者對於克服這些挑戰至關重要。因此，PMU 數據資料分析小組經理 Mr. Kelvin Jones 認為從簡單可做的部分啟動 PMU 應用，例如道明尼能源公司先由單一團隊管理規劃建置 PMU，持續建立溝通管道，讓控制室對使用 PMU 資料感興趣。總而言之，Mr. Kelvin

Jones 認為佈署 PMU 過程所面臨的最大的挑戰，並非是技術本身，反而是公司文化和組織的協作才是廣泛採用 PMU 的最大障礙。

對道明尼能源公司而言，建置 PMU 有許多優點，不僅可為電網監測提供數據、提高控制室對於系統穩定態勢的感知能力，並有助於防止大規模停電的發生。然而建置規劃 PMU 過程中有許多挑戰，除核心技術外，亦需要不同部門（如保護電驛、資料通訊、控制室）之間的協作，因目前並無強制使用 PMU 的法規。而道明尼能源公司分享其做法，是循序漸進，先成立一個 PMU 資料及數據分析小組，接著再進一步成立大型 PMU 數據資料監測中心(MARC, Monitoring Analysis Restoration Center)，有關 MARC 之詳細介紹請參如下一章節。

另外，有關應用同步相量技術估算系統慣量，目前道明尼能源公司尚未實施持續監控慣量的系統，但有正在進行開發一種軟體程式來估算系統慣量。而關於 PMU 時間同步問題，目前道明尼能源公司主要採取 IRIG-B 方式進行時間同步，這是一種使用銅線傳輸定時訊號的傳統方法，但未來可朝向使用更新、更準確的 PTP 時間同步方式(IEEE 1588 標準)。另外，採取 IRIG-B 時需考慮 GPS 被干擾的風險，對於替代建議方案，可採用地面時間同步，這涉及到電網內的一個主時鐘，它可以同步所有其他設備，並在 GPS 中斷的情況下提供備援。

(三) 參觀 MARC (Monitoring Analysis Restoration Center)

會議結束後，由道明尼能源公司首席工程師 Mr. McVey 帶我們參觀 PMU 數據資料監視中心，該中心簡稱 MARC (Monitoring Analysis Restoration Center)，如圖 23 所示。



圖 23 MARC (Monitoring Analysis Restoration Center)

MARC 是道明尼能源公司最先進的 PMU 數據資料中心，今年年初方建置完成啟用，該中心最前方為一超大顯示螢幕，螢幕中間主要為地理圖資，可結合各種氣象資訊，如溫度、風向、風速、雷擊等情報，在暴風雨天或晴天遇到調度操作問題時，此螢幕可提供現場狀態的視覺化服務。大螢幕左側顯示區列出各變電所方塊，方塊內資訊包含目前在該變電所的主要負責人及各種告警資料，告警資料方塊則以橙色或綠色來標示不同狀況；大螢幕右側則包括多種功能視窗顯示電網狀態，包括變電所、輸電線路和電壓等級，並可識別電壓驟降和角度不穩定等問題。這個系統目前不會準確地告訴您該操作什麼，但它會提醒我們似乎系統中出了什麼問題，並需要做點什麼，所

以道明尼能源公司認為這絕對是一個必不可少的工具，而且操作起來非常簡單。雖然目前 PMU 資料並無結合自動控制應用，但道明尼能源公司仍強調此監視系統的重要性，該系統將是一個簡單而重要的工具，不僅可以檢測大停電事故的早期跡象，亦可以向調度人員發出告警並協助他們採取因應措施。當詢問首席工程師，如果只能在資料數據中心放一種 PMU 即時顯示看板，會是哪種功能？他認為系統電壓相角監測的極座標是最重要的，因為那是一種早期預警停電的系統，如果看到特定區域的角度以異常的方式散開，將需立即採取因應作為。

道明尼能源公司最初構想規劃建置 MARC 之主要原因，主要是為降低事故發生機率及加速系統復電時間，因此，當發生極端氣候(如風暴)、大停電事故或緊急狀況時，將會緊急召集公司各部門主管及專家集合於該中心，結合 PMU 資訊、電網縱觀狀態及事故資訊等，進行討論以決定緊急應變措施或相關運轉策略，以提升系統穩定度或加速復電。

MARC 亦設置有辦公位置並配置專職工程師，分為不同小組，其中一組為**系統保護、自動化及分析組(SPAA, System Protection Automation and Analysis)**，係專門負責規劃安裝數位故障紀錄器(DFR)、後續數位故障紀錄器(DFR)的維護、輸電等級之故障定位分析、變電所的故障分析及自行開發程式進行一些自動化應用等。**Sixth Man** 即為該組自行研發程式中其中一款程式，所謂 Sixth Man 就如同籃球比賽中第六人(Basketball Sixth Man)，在籃球比賽中能在球隊先發主力球員休息時可以繼續保持這個得分點的球員，**Sixth Man** 這款程式就如同籃球場上最佳第六人，於事故發生後，在既有人力工作團隊運作中，**Sixth Man** 會同時自動抓取事故波形紀錄、故障位置、天氣狀況、歷史資料、輸電線路資訊、可能肇因及相關事故資料等，並彙整於一封郵件後自動發送給相關人員(約事故發生後 10 分鐘左右，因需收集各設備檔案資料並取決於網路速度)。其中，故障位置判定，是利用程式自動收集來自不同系統，包括數位故障紀錄器(DFR)、保護電驛(Relay)、ASPEN 模擬、行波故障定位系統(Traveling Wave

Systems)、落雷相關偵測系統(FALLS lightning correlation)所偵測或計算的故障位置，將故障距離全顯示出來，並以標準差方式來判定這些數值是否可靠，以供巡修人員參考，提升故障排除效率。當然，系統保護、自動化及分析組(SPAA)亦會根據來自所有系統之事故資訊進行比對、核算及分析後，再發一封確認信以雙重覆核確認，確實做到反饋機制。

(四) 參觀保護電驛測試實驗室

圖 24 為道明尼能源公司之保護電驛測試實驗室，該實驗室設置有一組專職人員，專責於該實驗室進行電驛故障檢測、新購入電驛之特性試驗及相關標置設定測試等工作，讓系統上保護電驛儘量標準化，同時利於現場維護工作。該實驗室工程師說明，當現場有電驛故障情形發生時，皆一律統一送至該實驗室由專職工程師進行檢測、分析；此外，新購入之保護電驛亦皆會先送至該實驗室進行嚴格把關測試，包含特性試驗及邏輯標置設定測試等，確保電驛運送至變電所時可正確執行保護功能，當然，加入系統前，仍需於現場進行相關接線試驗。

另一方面，此要特別說明的是，道明尼能源公司輸電系統保護電驛幾乎全統一使用 SEL 廠牌保護電驛，主要係考量品質和技術支援因素，雖然電驛本身價格成本較高，但考量總擁有成本(包括維護、可靠度、安全度及使用壽命)，其認為此對輸電系統之穩定度更為重要，且州內法規可能會對設備故障處以巨額罰款，因此，採購保護電驛時，保護電驛的可靠度及安全度是其考量因素中重中之重。



圖 24 保護電驛測試實驗室

(五) 參觀 RTDS 模擬實驗室

道明尼能源公司亦設置有 RTDS 模擬實驗室(圖 25)，進行實際系統狀況、控制設備及保護設備的實時模擬分析，同時道明尼能源公司亦會藉由實際事故波形紀錄，以 RTDS 模擬驗證保護電驛邏輯規畫及標置設定之正確性。除此之外，道明尼能源公司亦應用於不同設備加入電網後的模擬分析，例如，道明尼能源公司曾向西門子訂製了 125MVAR 的移動式 STATCOM (SVC PLUS Mobile)，並建立模型後利用 RTDS 模擬其運作，以確保其加入系統後之電壓調整能力，模型如圖 26 所示。交流過程中，道明尼能源公司提到，為快速恢復特定電壓等級的電力，其建置使用移動變電所、行動電容器組/STATCOM，用於緊急需求或停電施工時提供穩態/動態電壓支援。



圖 25 RTDS 模擬實驗室



圖 26 移動式 STATCOM 模型

二、 紐約電力局(New York Power Authority)

(一) 概況

紐約電力局(NYPA)為美國最大州立電力管理局，其主要行政辦公室位於紐約州懷特普萊恩斯，營運 16 座發電設施，總發電裝置容量約 600 萬瓩，輸電線路總長度約 2348 回線公里，提供紐約西部到全州部分地區供電(主要客戶為地方政府、州政府機構、教育機構等非營利組織)，輸電線路電壓等級分為 765 kV (250 回線公里)、345 kV (1,495 回線公里)、230 kV (544 回線公里)及 115 kV (59 回線公里)。紐約電力局輸電系統電網分佈圖如圖 27 所示。

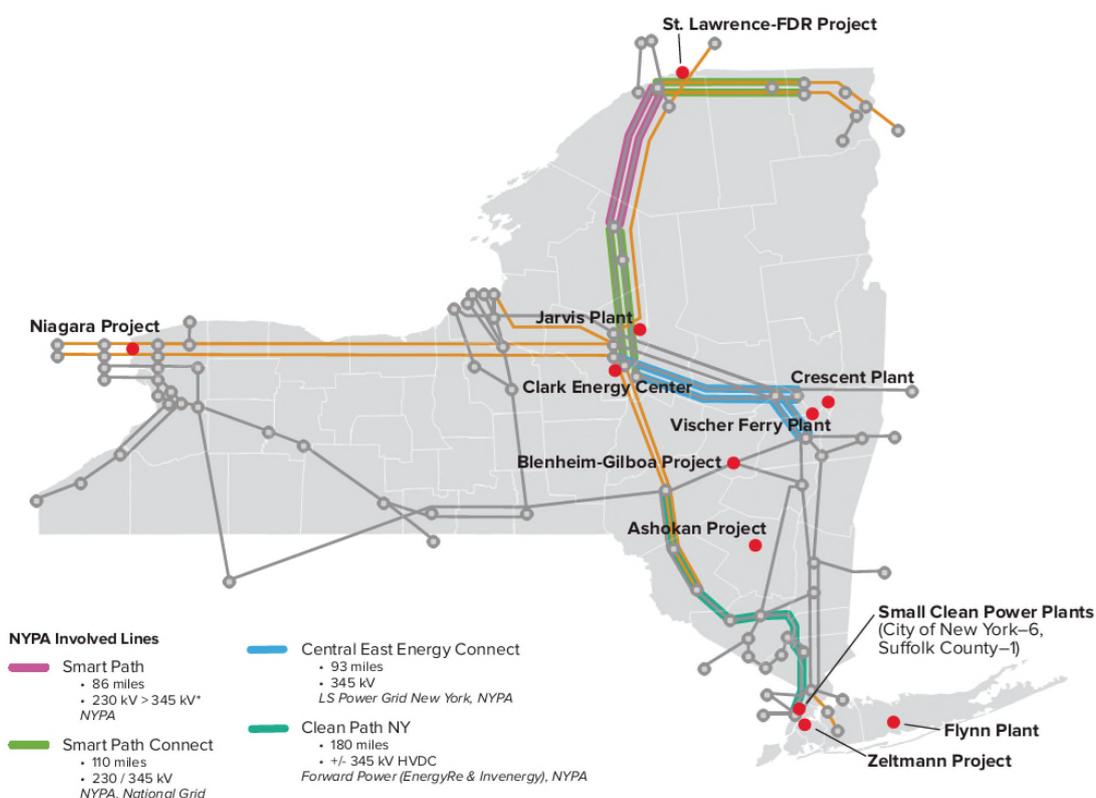


圖 27 紐約電力局輸電系統電網分佈圖

(二) 同步相量技術應用討論

本次訪談主要聚焦於紐約電力局應用同步相量技術的經驗及所遭遇的挑戰，與會交流人員有紐約電力局副總 Dr. Fardanesh 及一位系統規劃部門主管。Dr. Fardanesh

曾是紐約電力局首席電機工程師，目前也是 IEEE 院士及 NAE (National Academy of Engineering) 院士，他負責指導所有與電力系統規劃、營運、系統保護控制、電力系統設備和計量相關的活動，也是 100 多篇期刊論文及技術報告的作者或合著者。Dr. Fardanesh 的專業領域包括電力系統最佳化運轉、利用相量測量開發新型電力系統監控、控制和分析工具，以及先進的 FACTS 控制器在電力系統中的應用。

紐約電力局已在 25 個變電所建置約 70 個 PMU 設備，大多數設置於重要變電所及關鍵線路，目前主要應用於電力系統狀態監測及事故分析應用。其中，紐約電力局與喬治亞理工學院的教授有共同研發一套諧波監控系統，以監控異常諧波現象，此系統也確實為紐約電力局的電力系統做出貢獻，曾經檢測出系統上的諧波成分，幫助及早發現問題進而提出改善。

另一方面，紐約電力局於 20 年前即開始進行動態線路額定容量估測研究，並安裝了許多溫度計、風速計、電流測量及磁力測量，直至今日 NYPA 仍持續進行。惟安裝許多感測器，將造成後續維護問題，一旦發生感測器故障或無法運作時，即需派出一組人員處理設備或通信問題，而通信問題往往是最令人頭痛的。依過往經驗，紐約大都會區的輸電線路尚未發生線路容量瓶頸問題，因此 NYPA 向監管機構反應，使用輸電線路動態熱容量如同正在用大錘殺死一隻蒼蠅。(美國聯邦能源管理委員會發布的規範，要求每間電力機構必須對其所有超高壓線路實施動態熱容量監測。)此外，調度人員可依監測電壓限制輸電線路潮流，因此，對 NYPA 而言，動態線路額定容量估測對於系統安全提升目前尚未看到實質效益。

未來，紐約電力局也將朝向廣域控制的發展應用，期能在檢測到系統的擾動或不正常情況時，可進行自動矯正或控制措施。此外，結合廣域監測系統與電力調度中心之 EMS 系統是紐約電力局現階段努力的方向，以期在 EMS 系統出現問題時提供備份，且 PMU 數據可以實現更主動、更智慧的電網管理方法。紐約電力局建議本公司有策略地選擇安裝地點，方能發揮廣域監測系統最大效能。

另外，有關使用 PMU 實現保護之應用，Dr. Fardanesh 表示目前紐約電力局尚未有這方面的應用，其認為有難度並存在許多不確定和不穩定因素，原因包括通訊及延時問題，對於要求快速且正確動作的保護系統而言，尚需更多研究及驗證，方能應用於實際系統，否則可能衍生更多系統潛在問題。

最後，Dr. Fardanesh 強調，基於同步相量技術的廣域監測系統，確實可實現更可靠的電網，然而，充分利用該技術並將其與系統有效整合，在現階段仍需繼續努力。

圖 28 與紐約電力局副總於會議室合影。



圖 28 與紐約電力局副總於會議室合影(副總 Dr. Fardanesh 為左 3)

會議結束後，Dr. Fardanesh 邀請我們至 NYPA 的 PMU 數據資料中心參觀，該數據資料中心簡稱為 ISOC (Integrated Smart Operation Center)，由數片大型螢幕連接，總長度約 10 公尺，蒐集轄區各種資訊，包含即時影像、即時發電情況(含大型水力機組各機組狀態視覺化)、輸電電力潮流視覺化、資訊流及資訊安全及地下電纜運轉情形(載流量、溫度、壓力、部分放電偵測)等。資料中心的數據或警告資訊，目前尚未傳遞至調度中心，負責處理這些資料的同仁多為 IT 背景，屬於獨立的一個部門。

三、 Electro Industries/Gauge Tech 公司

(一) 公司概況

Electro Industries/GaugeTech(EIG)是一家全球領先的電力監測和電能計量產品供應商，成立於 1975 年，擁有超過 45 年的歷史。EIG 專門設計和製造高性能電力儀表、電力品質監測器、電能表、多功能儀表、SCADA 系統、電力監控系統和能源管理系統。其產品被廣泛應用於電力公用事業、工業、商業和機構等領域。EIG 也參與多項國際標準的制定，包括電力品質、電能計量和變電所數據採集/控制等，其產品被世界各地的電力公用事業廣泛使用，在美國也有高市佔率，然而，EIG 公司在 2023 年第四季時已被 HUBBELL 公司收購，但仍維持原品牌銷售。此外，美國電驛製造廠家 BECKWITH 公司亦被 HUBBELL 公司收購，本公司部分電廠即是採用 BECKWITH 公司之數位式發電機保護電驛。

(二) PMU 設備及相關技術討論

本次參訪 EIG 公司的行程主要由 HUBBELL 公司副總 Dr. Murty V.V.S. Yalla (IEEE Fellow)協助安排及參與討論。EIG 公司製造之 PMU 設備為 Nexus 1500+，如圖 29 示。Nexus 1500+具有一組三相電壓及一組三相電流輸入接點，為一種高精度儀表，同時也是電力品質分析儀，可提供電力品質測量，包括電壓突波、電壓驟降、故障電流、相位不平衡、諧波或頻率等，並能為變電所 SCADA 和 EMS 提供多種通訊選項，包括串行、乙太網路和 USB。此外，Nexus 1500+亦支援多種協定，包括 RTU、TCP、DNP3、IEC 61850、FTP、SMTP、SNTP 及 HTTP 等，並使用 EIG 的端口控制，可獨立控制協定和端口，以限制存取並提供互聯網安全。



圖 29 Nexus 1500+

Nexus 1500+之 PMU 性能等級可依客戶需求自行設定選擇 M Class 或 P Class，而報告率(Reporting rate)在系統頻率為 60Hz 時可為 10/12/15/20/30/60(frames per second)，而在系統頻率為 50Hz 時可為 10/25/50(frames per second)，並至多可有兩個 PDC 同時接收相同之 PMU 數據。另一方面，有關時間同步系統，Nexus 1500+可支援 IRIG-B 及 PTP(Precision Time Protocol)兩種時間同步系統，惟為獲得較精準之時間同步相量值，EIG 公司建議使用 PTP 方式(IEEE 1588)進行時間同步，架構如圖 30 所示。為了能夠以最佳的準確度獲得 PTP 時間同步，PMU 如何接入 PTP 主時鐘是很重要的，兩種合適的配置是 PMU 直接連接到 PTP 主時鐘或通過 PTP 集線器/交換機，而在前者的配置中，甚至可以有多個 PTP 主時鐘。如果網路中有多個 PTP 主時鐘，Nexus 1500+的最佳主時鐘（BMC）演算法可依時鐘 ID 作為選擇優先順序來決定選擇哪個主時鐘為最佳主時鐘，因此，在主時鐘 ID 列表中，可按優先順序添加時鐘 ID，以利 BMC 演算法使用。

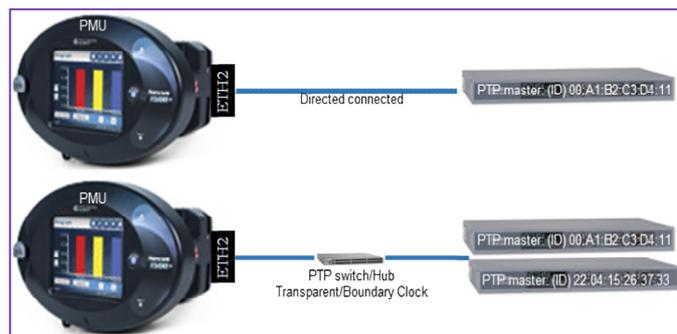


圖 30 PTP 時間同步方式

(三) 參觀產品製造生產線

EIG 公司產品製造流程，主要分為八個工作站，第一個工作站為確認材料的可用性(Material Availability)，第二站進行 IC 電路板測試(Board Level Test)，第三站進行組裝(Assembly)，第四站為耐壓測試(Hi Pot)，第五站則是對產品進行環境溫度測試(Heat Chamber)，驗證其產品在正常或極端環境條件下的強度、耐用和性能，第六站為校準及最後測試(Calibration and Final Test)，第七站為最後檢查，而最後一站則為運送

(Shipping), 流程圖如圖 31 所示。圖 32 為本次參訪 EIG 公司產品製造生產線時與其副
總及主管合影。

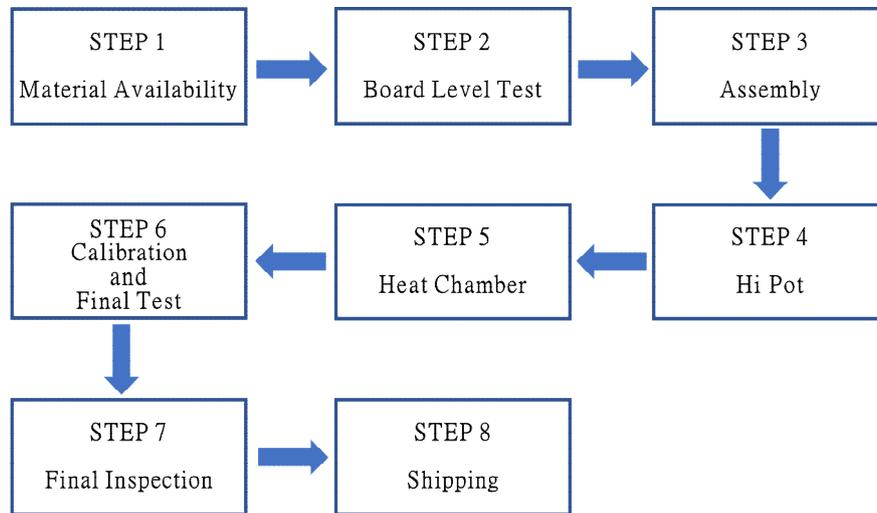


圖 31 EIG 公司產品製造流程圖

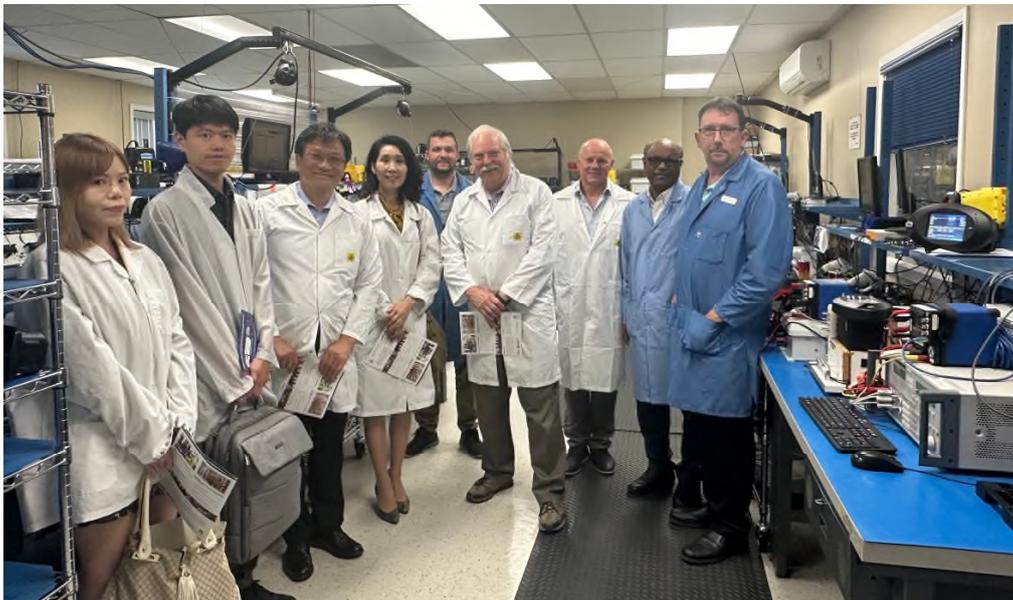


圖 32 參觀 EIG 公司產品製造生產線(副總 Dr. Murty V.V.S. Yalla 為右 2)

伍、心得與建議：

一、心得

感謝公司長官給予此次出國機會，可實地造訪兩家有實際應用廣域監測(WAM)系統經驗之美國道明尼能源公司(Dominion Energy)及紐約電力局(New York Power Authority)，不僅能與其工程師當面研討交流實現同步相量技術之經驗及挑戰，更經由參觀兩家電力機構之大型 PMU 數據資料監測中心(MARC / ISOC)後，深刻感受到國外電力機構對廣域監測系統之投入與重視，並持續擴展中。深信此行對我們未來在工作上有很大的助益，我們也很樂意將此行所見所學，與公司各位長官同仁分享。

廣域監測系統已成為全球電力系統運轉和診斷系統問題及弱點的必要工具，2003 年美東大停電後，北美電力可靠度公司(NERC)亦要求電力公司皆需建置 PMU 設備。根據國外應用經驗顯示，該系統確實可幫助辨識系統潛在穩定度問題，尤其是動態穩定度，能提供決策參考進而防止大規模事故發生，對提高電力系統的穩定性和可靠性有相當程度的助益。此外，對於事故後分析及事件重現，PMU 設備提供之同步相量數據更是一大利器，並能有助於立即分析說明保護電驛的動作情形，本次參訪之兩家電力機構即已廣泛應用同步相量技術進行監測。有關應用同步相量技術於控制方面，加拿大魁北克水電公司(Hydro Quebec)有藉由同步相量監測系統進行電壓穩定度控制之實績，但對設備或系統保護而言，因考量快速性及可靠性，目前國外尚無應用實績。然而，隨著廣域保護與控制系統的發展，本公司可先藉由規劃電驛監測系統介接廣域監測系統，即時監測電網狀態，並依系統狀態或特性，適時調整保護策略或相關邏輯設定，以精進保護系統之可靠度及安全度。

在此，特別感謝美國喬治梅森大學(George Mason University)電機與電腦工程學系黃麗玲教授與 Dr. Mark Adamiak(IEEE Fellow)，給予本公司在本次參訪行程之所有協助及安排，由於兩位專家的引介，本公司才能有機會及順利參訪國外電力機構並由高層主管接待，實屬難得之機會。

二、建議

(一)跨系統合作：

國外應用同步相量技術進行監測電網狀態已有數十年，為能及早因應日趨複雜的電力系統結構及動態特性變化，本公司也正規劃建置一套廣域監測系統(電力調度處於新一代 EMS 系統之採購規範中已納入廣域監測系統之應用需求)，惟建置一套廣域監測系統涉及跨系統各單位的協作，包含 PMU 設備之採購安裝、PMU 設備之設定、測試及後續維護、通信網路系統之建置、應用平台之建置及研發應用，需不同系統各單位間的合作，方能完成該系統的建置。為能發揮建置 PMU 及應用平台之最大效能，建議可成立跨系統之專案小組定期討論追蹤，同時做為各系統間的溝通管道。

(二)設置 PMU 數據資料應用分析部門：

此次參訪之兩家電力機構皆有建置大型 PMU 數據資料監測中心，道明尼能源公司建置 MARC(Monitoring Analysis Restoration Center)、紐約電力局建置 ISOC(Integrated Smart Operation Center)，並依兩家電力機構應用經驗，此兩中心對系統穩定度確實有做出貢獻。建議本公司可仿效建置 PMU 數據資料監測中心(如同道明尼能源公司亦做為緊急應變中心基地，結合 PMU 資訊、電網縱觀狀態及事故資訊等，進行討論以決定緊急應變措施或相關運轉策略)，或可先設置 PMU 數據資料應用分析部門，再循序漸進，以利後續同步相量數據資料之應用，並發揮部署 PMU 設備之最大效能，提升系統穩定度，也可做為公司 AI 學習的數據庫。

(三)電驛測試實驗室：

保護電驛動作之可靠度及安全度係影響系統穩定度之關鍵因素，本公司保護電驛廠牌型式不一，各家廠牌保護電驛之設計理念及應用方式皆不相同，內部邏輯標置設定更是繁雜瑣碎，為能精進本公司保護系統之可靠度及安全度，建議

仿效道明尼能源公司設置電驛測試實驗室，並配置專責工程師。道明尼能源公司之保護電驛測試實驗室，設置有一組專職工程師，專責於該實驗室進行電驛故障檢測、新購入電驛之特性試驗及相關標置設定測試等工作，讓系統上保護電驛儘量標準化，利於現場維護工作；另一方面，當現場有電驛故障情形發生時，皆一律統一送至該實驗室由專職工程師進行檢測及分析，新購入之保護電驛亦皆會先送至該實驗室進行嚴格把關測試，包含特性試驗及邏輯標置設定測試等，確保電驛運送至變電所時可正確執行保護功能。本公司若可建置此一電驛測試實驗室，並培養專責核心技術人才，結合現場運轉維護經驗，方能考慮更周全找出系統潛藏弱點，規劃設計更完善之保護策略及標置設定，在系統上佈下天羅地網，有效提升系統防禦能力。



(四)設置專責事故分析部門：

道明尼能源公司在 MARC(Monitoring Analysis Restoration Center)設置有一系統保護、自動化及分析組(SPAA, System Protection Automation and Analysis)，係專責輸電等級之故障定位分析、變電所的故障分析及自行開發程式(如 Sixth Man)等。顯見道明尼能源公司對事故分析的重視，投入了大量人力資源，培育專責人才、設置專責組織及建置完整系統，目的是為降低停電時間並能儘速恢復系統正常狀態。而本公司目前在事故發生後，僅由電驛室或各供電區營運處電驛組下載

電驛事故波形後進行事故分析，惟事故發生當下，現場電驛組同仁可能正面臨設備加入系統或進行維護、汰換工作的壓力，無法分身處理事故突發狀況，而總處電驛室亦僅有 3~4 位同仁負責事故分析(需負責六區業務)，突顯本公司事故分析人力及人才培養仍有精進之處。建議可仿效道明尼能源公司，設置專責事故分析部門，提升本公司事故發生後之分析處理能力，以儘速釐清事故原因，進而提出有效改善對策，同時培養事故分析核心技術及經驗傳承，強化本公司系統防禦能力。

(五)結合電驛監測系統：

建議規劃電驛監測系統結合廣域監測系統，即時監測電網狀態，瞭解系統實際情況，並依系統狀態或特性，適時調整保護策略或相關邏輯設定，以精進保護系統之可靠度及安全度。

(六)持續與國外專家交流：

藉由本次參訪，認識了國外許多優秀專家及工程師，未來在工作上可持續交換專業及實際應用意見，並持續追蹤國外同步相量技術之最新發展，尤其是道明尼能源公司最新之廣域監測、保護與控制研究計畫，吸取經驗。

參考資料

- [1] CIGRE Technical Brochure 917 (2023) : Wide Area Monitoring Protection and Control Systems – Decision Support for System Operators.
- [2] “IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems” , IEEE Std C37.118.1a-2014.
- [3] ENTSO-E System Protection and Dynamics WG, Technical Report: “Analysis of CE Inter-Area Oscillations of 1st December 2016” , July 2017.
- [4] ENTSO-E Final Technical Report: “Power System Separation of Iberia from Continental Europe on 24 July 2020” , March 2022.
- [5] “Reply of Northwest regulatory bureau of State Energy Administration on the promotion and application of rapid frequency response function of new energy stations in Northwest Power Grid” , Northwest energy regulatory market[2018] No. 41 document.
- [6] Technical specification of PS-6000+/NES new energy station energy management system, GUODIAN NANJING AUTOMATION CO., LTD[2018].