

出國報告（出國類別：實習）

參加 ESIG 2024 年秋季技術研討會

服務機關： 台灣電力公司

姓名職稱： 黃俊穎 專員

派赴國家： 美國

出國期間： 113 年 10 月 19 日至 113 年 10 月 28 日

報告日期： 113 年 12 月 16 日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參加 ESIG 2024 年秋季技術研討會

頁數：40 頁 含附件：是 否

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

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

黃俊穎/台灣電力公司/系統規劃處/專員/(02)2366-6903

出國類別：實習

出國期間：113 年 10 月 19 日至 113 年 10 月 28 日

出國地區：美國

報告日期：113 年 12 月 16 日

分類號/目

關鍵詞：儲能、再生能源、電網形成 (Grid Forming, GFM)、以逆變器併接電網的電源 (Inverter-Based Resources, IBRs)

內容摘要：(200~300 字)

本次出國前往美國羅德島州首府普洛維登斯 (Providence, Rhode Island)，參加在奧姆尼飯店 (Omni Providence Hotel) 舉行的兩個研討會及參觀離岸風力發電場。

10 月 21 日至 23 日參加 ESIG 主辦的 2024 年秋季技術研討會，會中探討歐美各國風力發電發展現況和離岸風電整合規劃、GFM 風力測試相關技術更新、FERC Order 1920 區域輸電規劃方法、GFM 技術建模與應用、配電系統的彈性與分散式能源角色、碳追蹤和排放透明度等議題。

10 月 24 日參加美國能源部 i2X FIRST 複合研討會，聚焦在清潔能源與輸配電網併聯要求的合格評定，特別介紹 IEEE P2800.2 草案內容和進度。10 月 25 日參觀羅德島州布洛克島東南方外海的美國第一個商轉的離岸風力發電場。

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

目錄

目錄.....	i
表目錄.....	ii
圖目錄.....	iii
壹、計畫說明.....	1
一、出國緣由與目的.....	1
二、出返國行程.....	1
貳、參加 ESIG 2024 年秋季技術研討會紀要.....	3
一、ESIG 介紹.....	3
二、研討會出席者背景.....	3
三、研討會議程.....	7
四、研討會內容摘要.....	8
參、參加美國能源部 i2X FIRST 複合研討會紀要.....	17
一、i2X FIRST 介紹.....	17
二、研討會議程及內容摘要.....	18
肆、參觀美國羅德島州布洛克島離岸風力發電場.....	26
伍、心得與建議.....	33

表目錄

表 1.1 出國行程表.....	2
表 2.1 ESIG 2024 年秋季技術研討會議程表.....	7
表 3.1 i2X FIRST 複合研討會議程表.....	18

圖目錄

圖 1.1 本次行程往返航程示意圖.....	2
圖 2.1 研討會於普洛維登斯的奧姆尼飯店（Omni Providence Hotel）舉行.....	5
圖 2.2 研討會現場.....	6
圖 2.3 研討會現場.....	6
圖 2.4 REGFM_A1 和 REGFM_B1 的主要特性.....	11
圖 2.5 參與制定 GFM 模型規格的組織.....	11
圖 2.6 北美的 ISOs 和 RTOs.....	12
圖 2.7 儲能使 CAISO 的鴨子曲線變得較為平坦.....	13
圖 2.8 英國電力系統慣量逐漸下降.....	14
圖 2.9 英國電力系統短路容量逐漸下降.....	14
圖 3.1 i2X FIRST 複合研討會現場.....	19
圖 3.2 會後問答時間.....	19
圖 3.3 IEEE P2800.2 合格評定步驟.....	20
圖 3.4 IEEE P2800.2 第 6 條和第 7 條概述.....	22
圖 3.5 IBR 電廠合格評定或合規責任.....	23
圖 3.6 建議的 IEEE P2800.2 模型驗證評估流程.....	24
圖 4.1 布洛克島位於羅德島州南方，紐約州長島的東方。.....	27
圖 4.2 布洛克島離岸風場位於布洛克島東南方海面.....	27
圖 4.3 由朱迪思角往返布洛克島離岸風場的航行軌跡.....	27
圖 4.4 高速渡輪雅典娜號.....	28
圖 4.5 從海上眺望位於懸崖邊的布洛克島地標東南燈塔（Southeast Lighthouse）.....	28
圖 4.6 由近至遠分別為 1 到 5 號風力發電機，每部機組間距 830 公尺。.....	29
圖 4.7 風力發電機高度 180 公尺，轉子直徑 150 公尺，葉片長度 73.5 公尺。.....	29
圖 4.8 特寫 2 號風力發電機的機艙、葉片及水下基座，基座上標示的 BIWF 即 Block Island Wind Farm	

的縮寫。.....	30
圖 4.9 1 號（遠處）和 2 號（近處）風力發電機.....	30
圖 4.10 特寫 3 號風力發電機的作業平台.....	31
圖 4.11 特寫 3 號風力發電機的水下基座.....	31
圖 4.12 由近至遠分別為 4 到 1 號風力發電機.....	32
圖 4.13 5 號風力發電機及其維修平台，目前 5 號風機暫停運轉。.....	32

壹、計畫說明

一、出國緣由與目的

我國能源政策以減煤、增氣、展綠、非核的潔淨能源為發展方向，確保穩定供電並兼顧減碳，邁向 2050 年淨零排放的目標，近年來積極推動能源轉型，2025 年再生能源發電占比將達 15%。

惟隨著再生能源併網滲透率提高，其易受天候與季節影響所產生的間歇性發電問題更加嚴重，電力系統頻率亦隨之快速變動。電池儲能設備具有快速充放電能力，可參與本公司輔助服務市場交易平台的調頻備轉容量，協助電網快速調整頻率，亦可協助尖離峰電能轉移，達到削峰填谷的功能。

再生能源發電設備和儲能設備主要為以逆變器併接電網的電源（IBRs），多年來，歐美先進國家對於越來越多 IBRs 併網衍生的系統衝擊、設備測試和併聯標準的訂定等問題，持續投入許多的資金和人力進行分析研究，並取得相當的成果。為學習及交流最新的再生能源與儲能技術發展情況及了解併網規範的進程，爰赴美國參加 ESIG 2024 年秋季技術研討會。

二、出返國行程

本次出國計畫共計 10 天（含交通時間），行程概要如表 1.1，往返航程示意如圖 1.1。

表 1.1 出國行程表

日期	行程內容
113/10/19~20	去程：台北~舊金山~波士頓~普洛維登斯
113/10/21~23	美國羅德島州普洛維登斯 參加 ESIG 2024 年秋季技術研討會
113/10/24	美國羅德島州普洛維登斯 參加美國能源部 i2X FIRST 複合研討會
113/10/25	美國羅德島州布洛克島東南方外海 參觀離岸風力發電場
113/10/26~28	返程：普洛維登斯~波士頓~洛杉磯~台北

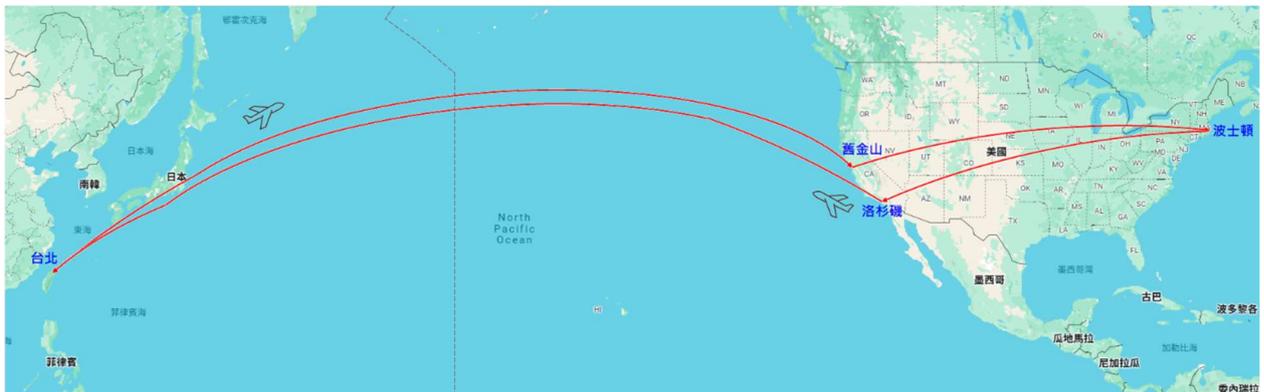


圖 1.1 本次行程往返航程示意圖

貳、參加 ESIG 2024 年秋季技術研討會紀要

一、ESIG 介紹

能源系統整合集團 (Energy Systems Integration Group, ESIG) 之前稱為公用事業風能整合集團 (Utility Wind Integration Group, UWIG)，成立於 1989 年，總部位於美國維吉尼亞州雷斯頓 (Reston, Virginia)，旨在為公用事業應用風能的關鍵分析提供論壇。UWIG 最初專注於風力發電，後來將業務重點擴展到太陽能 and 分散式發電，並於 2011 年更名為公用事業可變發電整合集團 (Utility Variable-Generation Integration Group, UVIG)。2018 年，該協會再更名為能源系統整合集團 (ESIG)，為其會員提供全球能源產業所需的資訊、研究、分析、營運知識及未來的產業趨勢。

ESIG 是一個非營利教育組織，致力於為工程師、研究人員、技術人員和政策制定者提供資源和教育，協助能源系統的整合和營運，讓全球能源產業和大眾了解能源系統和能源相關技術的持續轉型。ESIG 的成員包含電網和市場營運商、公用事業公司、電力生產商和能源營運商、系統和設備製造商、政府實驗室、大學、諮詢公司、預測機構、開發商和其他能源組織。

二、研討會出席者背景

本次會議有大約 180 個組織、300 多人與會；包括政府機關和監管單位例如美國能源部 (U.S. Department of Energy)、聯邦能源監管委員會 (Federal Energy Regulatory Commission, FERC)、西部電力協調委員會 (Western

Electricity Coordinating Council, WECC) 等；電網營運商例如丹麥國家電力和天然氣傳輸系統營運商 Energinet、美國新英格蘭獨立系統營運商 (ISO New England, ISO-NE)、西南電力聯營公司 (Southwest Power Pool, SPP)、德州電力可靠度委員會 (Electric Reliability Council of Texas, ERCOT)、中大陸獨立系統營運商 (Midcontinent Independent System Operator, MISO)、紐約州獨立系統營運商 (New York Independent System Operator, NYISO)、加拿大亞伯達省電力系統營運商 (Alberta Electric System Operator, AESO)、英國國家電網公司 (National Grid) 等；公用事業公司例如美國 Eversource Energy、鹽河計畫 (Salt River Project, SRP)、夏威夷電力 (Hawaiian Electric Industries, HEI) 等；發電公司例如加拿大 TransAlta Corporation、魁北克水電公司 (Hydro-Québec)、美國紐約州電力局 (New York Power Authority, NYPA)、田納西河谷管理局 (Tennessee Valley Authority, TVA) 等；系統和設備製造商例如美國奇異維諾瓦公司 (GE Vernova)、特斯拉 (Tesla)、芬蘭瓦錫蘭 (Wärtsilä)、丹麥沃旭能源 (Ørsted)、維特斯風力系統 (Vestas Wind Systems)、法國電力集團再生能源 (EDF Renewables)、德國西門子 (Siemens) 等；政府實驗室例如美國國家再生能源實驗室 (National Renewable Energy Laboratory, NREL)、西北太平洋國家實驗室 (Pacific Northwest National Laboratory, PNNL) 等；諮詢顧問公司例如德國 Energynautics、美國 Synapse Energy Economics 等；軟體公司例如美國 PowerRunner、德國 encoord、開發 PLEXOS 軟體的澳洲 Energy Exemplar

等；研究機構例如美國世界資源研究所（World Resources Institute, WRI）、PSE Healthy Energy、電力研究院（Electric Power Research Institute, EPRI）等；大學院校例如美國約翰霍普金斯大學、愛荷華州立大學、日本東京大學、英國倫敦帝國學院、澳洲蒙納許大學等，美國 8 所常春藤盟校（Ivy League）之中的哈佛大學、耶魯大學、普林斯頓大學、哥倫比亞大學、康乃爾大學及在地的布朗大學等 6 所藤校也參加了此次研討會。圖 2.1~圖 2.3 為本次研討會現場照片。



圖 2.1 研討會於普洛維登斯的奧姆尼飯店（Omni Providence Hotel）舉行



圖 2.2 研討會現場



圖 2.3 研討會現場

三、研討會議程

本次議題包括歐美風力發電發展現況、離岸風電整合規劃、與 GFM 風力測試相關的技術更新、FERC Order 1920 區域輸電規劃方法、GFM 技術建模與應用、配電系統的彈性與分散式能源的角色、碳追蹤和排放透明度等。議程和議題如表 2.1 所示，其中 Session 3, 4, 5, 7, 8 同時有兩個議題在不同場地進行，故無法同時參加，爰主要選擇參加與負責業務相關的儲能、IBR 技術及併網規範等議題。

表 2.1 ESIG 2024 年秋季技術研討會議程表

日期	議程
10/21	8:00 a.m. – 8:05 a.m. <u>Welcome</u> 8:05 a.m. – 8:20 a.m. <u>Overview of Breakthrough Energy Initiative on Integrated Planning</u> 8:20 a.m. – 9:55 a.m. <u>Integration of Economic and Reliability Tools and Data</u> <u>MISO's Renewable Integration Impact Assessment (RIIA)</u> 9:55 a.m. – 10:15 a.m. <u>Break</u> 10:15 a.m. – 11:55 a.m. <u>Integration of Generation, Transmission, Distribution, and Load</u> <u>LA100: The Los Angeles 100% Renewable Energy Study</u> 11:55 a.m. – 12:00 p.m. <u>Wrap-up</u> 12:00 p.m. – 1:30 p.m. <u>Lunch</u> 1:30 p.m. – 2:45 p.m. <u>Introduction / Opening Remarks</u> 2:45 p.m. – 3:15 p.m. <u>Break</u> 3:15 p.m. – 5:15 p.m. <u>Opening Plenary Session: The Promise and Challenges of Offshore Wind</u>
10/22	8:00 a.m. – 9:45 a.m. <u>Session 2: FERC Order 1920 – Methods and Compliance for Regional Transmission Planning</u> 9:45 a.m. – 10:15 a.m. <u>Break</u> 10:15 a.m. – 12:00 p.m. <u>Session 3A: Modeling, Protection and Application of GFM Technology</u> 10:15 a.m. – 12:00 p.m.

	<p><u>Session 3B: Carbon Tracking and Emissions Transparency</u> 12:00 p.m. – 1:15 p.m. <u>Lunch</u> 1:15 p.m. – 3:00 p.m. <u>Session 4A: Planning and Interconnection of Large Loads</u> 1:15 p.m. – 3:00 p.m. <u>Session 4B: Distribution System Resilience and the Role of DERs</u> 3:00 p.m. – 3:30 p.m. <u>Break</u> 3:30 p.m. – 5:15 p.m. <u>Session 5A: Reliability with High levels of IBRs</u> 3:30 p.m. – 5:15 p.m. <u>Session 5B: 100% Clean Energy or 100% Clean Electricity: The Importance of Energy Sector</u></p>
10/23	<p>8:00 a.m. – 9:45 a.m. <u>Session 6: Cutting Edge Practices in Integrated Planning</u> 9:45 a.m. – 10:15 a.m. <u>Break</u> 10:15 a.m. – 12:00 p.m. <u>Session 7A: Advances in Resource Adequacy</u> 10:15 a.m. – 12:00 p.m. <u>Session 7B: Finding Flexibility in Demand</u> 12:00 p.m. – 1:15 p.m. <u>Lunch</u> 1:15 p.m. – 3:00 p.m. <u>Session 8A: EMT Practices and Applications</u> 1:15 p.m. – 3:00 p.m. <u>Session 8B: Interregional Transmission</u> 3:00 p.m. – 3:30 p.m. <u>Break</u> 3:30 p.m. – 5:15 p.m. <u>Session 9: Closing Plenary on Gas-Electric Coordination</u></p>

四、研討會內容摘要

(一) 美國聯邦能源監管委員會 1920 號命令 (FERC Order 1920) (Session 2)

2024 年 5 月 13 日，FERC 發布了 1920 號命令，這是一項具有里程碑意義的規則制定，要求美國每個輸電區域進行至少 20 年的長期輸電規劃 (Long-Term Transmission Planning, LTTP)，也包括地方輸電監管和區域間協調的重要改革。FERC 1920 號命令主要的要求如下：

1. 預測未來需求並定期更新長期輸電計畫，規劃符合脫碳目標的前瞻性電源擴充。

2. 確定對既設輸電設施進行汰換的機會，以提高其傳輸能力。降低容量成本，減少損失從而節省容量。
3. 在規劃新設施時考慮各種效益，例如緩解可靠度問題、減少極端氣候事故的風險、避免輸電投資等。
4. 客戶只需為他們受益的項目付費。

MISO 在會中表示正在評估 FERC Order 1920，認同更長期的規劃將有助於確保未來的可靠度。ISO-NE 和 Eversource 表示將持續修改輸電規劃流程，以符合適用的 FERC 命令並改善流程以滿足區域需求。

(二) 透過硬體測試 GFM 逆變器互通性 (Session 3A)

GFM 逆變器通用互通性聯盟 (**universal interoperability for grid-forming inverters, UNIFI Consortium**) 由 NREL、EPRI 和德州大學奧斯汀分校領導，致力於 GFM 逆變器建模和模擬，推動技術教育和產品規格的共識，它在 NREL 的能源系統整合設施 (Energy Systems Integration Facility, ESIF) 中開發架構了 1MW 多廠商演示平台 (1MW multi-vendor demonstration)，包括來自 6 個廠商的 7 個 GFM 逆變器、多個 GFL 逆變器、一台柴油發電機和各種負載 (RLC 負載、馬達負載和非線性負載)。該測試平台可以深入了解商用 GFM 逆變器在控制、功能和互通性方面的能力和限制，驗證 UNIFI 規範並與 GFM 逆變器廠商討論問題解決方案，及如何改進其產品，以便在未來的電網中提供更好的性能。

UNIFI 1MW Demo 平台發現 GFM 逆變器的互通性和調度都與下垂(droop)

有關：

1. 並非所有 GFM 逆變器的電壓降係數都與定義值相同，注入和吸收無效功率有不同的下垂特性，例如截距 (intercept) 低於 1 p.u.時，注入無效功率，下垂斜率高於定義值；吸收無效功率，下垂斜率低於定義值。故頻率和電壓降需要特徵化，統一下垂特性。
2. 調節下垂斜率容易導致（或防止）穩定度問題。
3. 透過調整逆變器下垂截距，可以執行二次側控制、調度 GFM 逆變器輸出所需功率和像調度 GFL 逆變器一樣調度 GFM 逆變器。
4. 如果沒有適當控制，多個逆變器共同分擔無效功率可能會意外降低逆變器的輸出功率。
5. GFM 逆變器具有相似的輸出阻抗。

(三) WECC 批准的 GFM 模型 (Session 3A)

WECC 建模和驗證小組委員會最近批准了兩個由 UNIFI 成員提議的 GFM 模型：REGFM_A1 和 REGFM_B1，它們代表了業界使用的兩種主流 GFM 控制：下垂控制和虛擬同步機控制（如圖 2.4 所示）。這兩個模型成為 WECC 批准的第一代 GFM 模型，並已整合到全球電力系統規劃人員使用的模擬工具中，包括 PSS/E (V36.1)、PSLF (V23.2.8.2)、PowerWorld (V23)和 TSAT (V24.1)，如圖 2.5 所示。

	REGFM_A1	REGFM_B1
Normal Mode (No limits reached)	Droop Control	Virtual Synchronous Machine
Abnormal Mode (Hit the limits)	<ul style="list-style-type: none"> Steady state active and reactive power limiting Transient current limiting (\approx virtual impedance) No advanced current limiting/FRT control (There is a critical clearing time) 	<ul style="list-style-type: none"> Transient current limiting (\approx virtual impedance) Steady state active and reactive current limiting PQ priority algorithm to determine steady state I_d and I_q Advanced FRT control (No critical clearing time)

圖 2.4 REGFM_A1 和 REGFM_B1 的主要特性

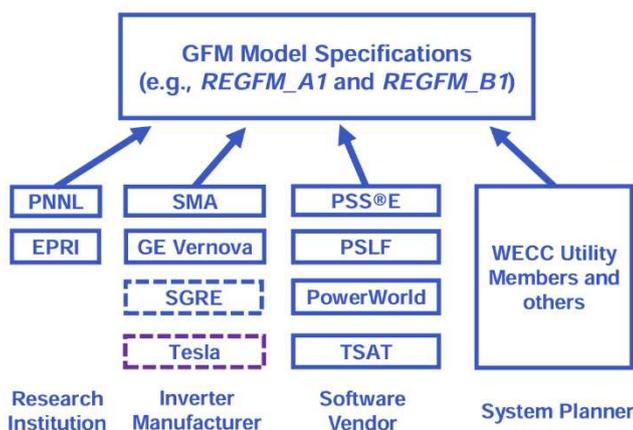


圖 2.5 參與制定 GFM 模型規格的組織

REGFM_A1 模型包括電壓相量落後阻抗表示法、P-f 和 Q-V 下垂控制、穩態 P 和 Q 限制和暫態故障電流限制，模擬和硬體測試均顯示下垂控制的 GFM 可以顯著改善系統頻率響應，大多數控制方塊來自能源部電力可靠度技術解決方案聯盟（Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, CERTS）的微電網專案。雖然 REGFM_A1 模型可用於多種情境，但不包括一些原始設備製造商（Original Equipment Manufacturer, OEM）實施的高階電流限制和故障穿越控制，這是因為許多 OEM 認為這些控制方法是專有技術。

REGFM_B1 包括電壓控制方塊和虛擬同步機/慣量控制方塊，鎖相迴路用來取得端電壓的角度，虛擬同步機/慣量方塊控制角度差，鎖相迴路的使用不

同於 GFL 中的使用，正常工作期間可以認為鎖相迴路不存在。

以此模型模擬持續 1 秒的三相接地故障（真正的同步機無法承受如此長時間的故障），暫態電流限制將電流箝制在 1.5 p.u.，穩態電流限制則箝制電流在 1 p.u.（REGFM_B1 沒有臨界清除時間）。

(四) 加州獨立系統營運商（California Independent System Operator, CAISO）

營運 IBRs 的經驗分享（Session 5A）

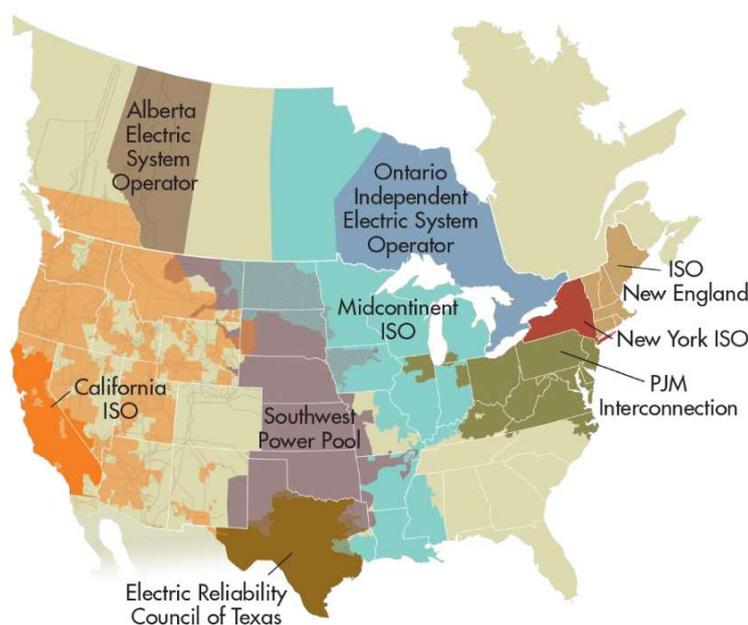


圖 2.6 北美的 ISOs 和 RTOs

CAISO 是受美國聯邦政府監管的非營利組織，管理加州和內華達州部分地區的高壓電網，是北美 9 個 ISO/RTO 之一（如圖 2.6 所示），服務 3,200 萬用戶，尖峰用電紀錄 52,061 MW（2022 年 9 月 6 日），擁有 1,119 座發電廠，總裝置容量 76,184 MW。截至 2024 年 10 月 1 日，擁有 26,000 英里的輸電線路，再生能源發電包含 19,674 MW 太陽能、8,350 MW 風力、1,610 MW 地熱、1,141 MW 小型水力及 778 MW 生質燃料，總計 31,553 MW。CAISO 已建置

10,219 MW 電池儲能，如圖 2.7 所示，由於儲能的調節，緩和了淨負載變化，不至於在傍晚時需要急遽增加傳統機組發電量。

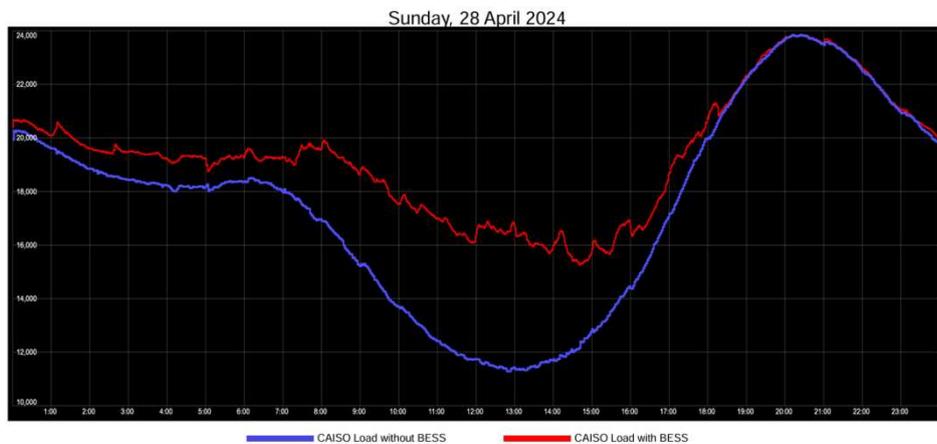


圖 2.7 儲能使 CAISO 的鴨子曲線變得較為平坦

(五) IBRs 高占比下的英國電力系統可靠度 (Session 5A)

英國電力系統脫碳導致四個關鍵領域改變：可調度發電量減少、更多可變的電源、更多非同步電源、電源分散到不同的地區。每個改變都帶來了新的工程挑戰，必須解決以下這些挑戰才能運作零碳電網：

1. 頻率—隨著更多的非同步發電機併網，系統慣量降低，需要更快的響應，系統的更多變化需要快速反應儲備，大大小小的損耗都需要對頻率做出動態反應的服務。
2. 穩定度—更多的非同步發電正在降低電網的穩定度水準（如圖 2.8 所示），為了確保系統在電網故障時保持穩定，需要採購提供慣量和短路容量的服務。
3. 電壓—可調度發電量的減少以及電源遠離負載導致的電力潮流變化，增加了英國電網吸收無效功率的需求。

4. 熱容量—由於更多可變和分布於不同區域的電源，造成電網更多的熱容量限制，在建設電網前需要更多創新的解決方案以管理壅塞。
5. 電源充足性—正確的電源組合、彈性的需求和儲能。
6. 靈活性—我們可以在什麼時候、何地以及何時利用彈性。
7. 系統恢復—如何重新啟動再生能源主導的系統。

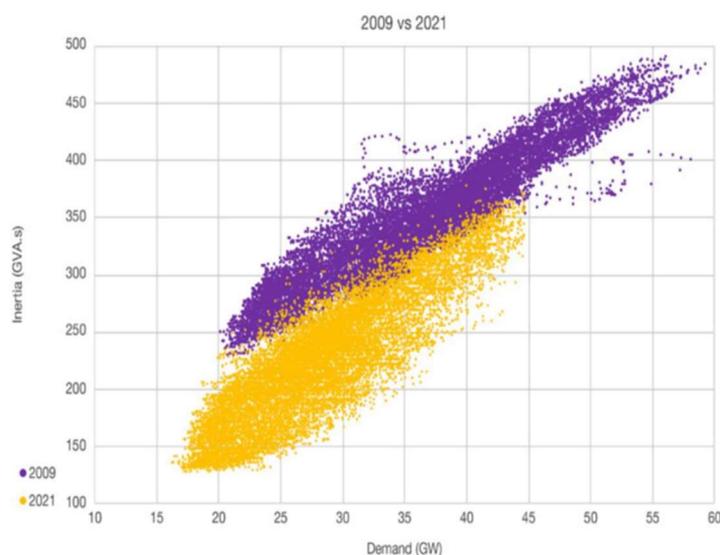


圖 2.8 英國電力系統慣量逐漸下降

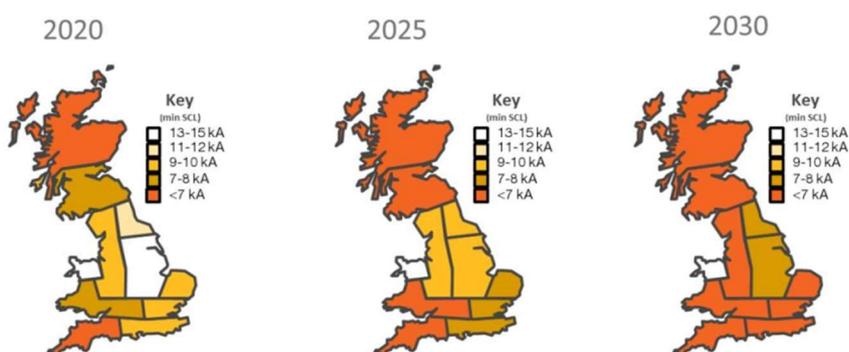


圖 2.9 英國電力系統短路容量逐漸下降

(六) 以頻域工具進行黑盒(blackboxed)IBR 的小訊號穩定度分析(Session 5A)

逐漸增加的再生能源帶來了複雜的穩定度挑戰和振盪風險，2020 年 8 月 20 日，澳洲能源市場營運商 (Australian Energy Market Operator, AEMO) 在有

大量再生能源併網的西莫瑞地區（West Murray Zone）首次觀察到事故後電力系統出現間歇性的次同步振盪，AEMO 以頻率掃描和基於阻抗的穩定度分析工具（Impedance-based Stability Analysis, IBSA），經過一系列監測調查後發現是一個 IBR 導致了問題。

既有的傳統方法難以應對擁有大量 IBR 的電網，尤其是在存在黑盒 IBR 模型的情況下，例如 EMT（electromagnetic transient）模擬雖然非常準確，但相當耗時且不易擴充，而且難以查看時域分析結果來了解系統中發生的情況。IBSA 則為逆變器主導的電網提供更快、可擴充且富有洞察力的穩定度診斷，尤其是在處理黑盒模型時。IBSA 的概念是獲得或識別 IBR 和電網的阻抗頻率響應，經由阻抗掃描從黑盒 IBR 的 EMT 模型獲取頻率響應資料，使用頻域阻抗對系統進行穩定度分析，例如利用奈奎斯特圖（Nyquist Plot）評估穩定度。IBSA 可以深入了解振盪模式，包括不同組件在振盪中的作用，是一種有效的分析方法，不需要無數的時域模擬，可簡化 IBR 電廠設計，有助於再生能源的整合。

IBSA 的使用案例：

1. 控制互動—診斷並減輕多逆變器系統和複雜網路（例如再生能源地區）中的振盪。
2. 早期篩選—在規劃新的 IBR 電廠和其他電網組件階段，即發現穩定度問題。
3. IBR 控制最佳化和調整—洞察 IBR 行為模式，支援各種電網條件下的

穩定度分析以及控制參數最佳化和調整。

IBSA 的限制：

1. 僅用於小訊號—無法擷取故障、孤島等大訊號事故，非線性效應可能會被忽略。
2. 工作點依賴性—不同工作點的阻抗通常有所不同，每個臨界點都需要單獨分析。
3. 需要仔細的擷取阻抗—準確的數據收集和掃描至關重要，否則可能會產生錯誤的模擬結果。

參、參加美國能源部 i2X FIRST 複合研討會紀要

一、i2X FIRST 介紹

併聯創新交流計畫 (Interconnection Innovation e-Xchange, i2X™) 是由美國能源部太陽能技術辦公室 (Solar Energy Technologies Office, SETO) 和風能技術辦公室 (Wind Energy Technologies Office, WETO) 與能源部其他辦公室共同領導，於 2022 年啟動的一項計畫，目的在實現清潔能源 (例如太陽能和風能) 與輸配電網更簡單、更快速、更公平的併聯，同時增強電網的可靠度、彈性和安全性。i2X 團隊已與美國電力相關產業 2,000 多名利害關係人召開了 22 次線上會議，並為 3 個國家實驗室和超過 6 個配電公用事業公司的 12 個技術專案提供資金協助。

為了確保連接到電網的清潔能源可靠且安全地運行，併網標準需要解決以逆變器併接電網的電源 (Inverter-Based Resources, IBRs) 的預期性能、網路安全要求和其他相關問題，其中一些標準，例如電機電子工程師協會 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 制定的 2800 仍需要廣泛採用和實施。

i2X 的輸電可靠度標準執行論壇 (Forum for the Implementation of Reliability Standards for Transmission, FIRST) 促進採用清潔能源併網的新標準，該論壇是每月一次的互動線上會議，包括專家演講和產業界人士討論，會議專注於特定技術面的標準，討論基本原理、技術準備、合格評定和監控的最佳實踐以及未來工作挑戰和實施落差，透過 i2X FIRST 獲得的回饋有助於制

定新的標準開發流程。i2X FIRST 涵蓋的技術主題包括：IEEE 2800 電壓和頻率穿越要求、量測和監控要求、建模要求、頻率支援要求、電壓和無效功率支援要求、GFM 逆變器等。

ESIG、EPRI 和勞倫斯柏克萊國家實驗室（Lawrence Berkeley National Laboratory）是 i2X FIRST 的合作夥伴，今年 10 月的例行會議採取複合研討會（Hybrid Workshop）與 ESIG 2024 年秋季技術研討會同時舉行。

二、研討會議程及內容摘要

10月24日在奧姆尼飯店舉行，約有50人現場出席和大約80人線上與會，參加者主要來自公用事業公司、獨立系統營運商、發電公司、電網公司、軟體公司、顧問公司、設備製造商。本次會議重點在討論 IEEE P2800.2 與大容量電力系統併聯的 IBR 電廠測試和驗證程序的草案以及 IBR 性能合格評定。議程和現場照片如表 3.1 和圖 3.1~圖 3.2 所示。

表 3.1 i2X FIRST 複合研討會議程表

日期	議程
10/24	8:00 a.m. – 9:45 a.m. <u>Session 1: Opening Remarks and Background Information</u> 9:45 a.m. – 10:15 a.m. <u>Break</u> 10:15 a.m. – 12:00 p.m. <u>Session 2: IBR Plant Modelling and IEEE P2800.2 Design Evaluation</u> 12:00 p.m. – 1:15 p.m. <u>Lunch</u> 1:15 p.m. – 3:00 p.m. <u>Session 3: IEEE 2800.2 Design Evaluation, Model Validation and Benchmarking Deep Dive</u> 3:30 p.m. – 5:15 p.m. <u>Session 4: “As-Built” Evaluation and Commissioning Testing</u> 5:15 p.m. – 5:30 p.m. <u>Closing Remarks</u>



圖 3.1 i2X FIRST 複合研討會現場

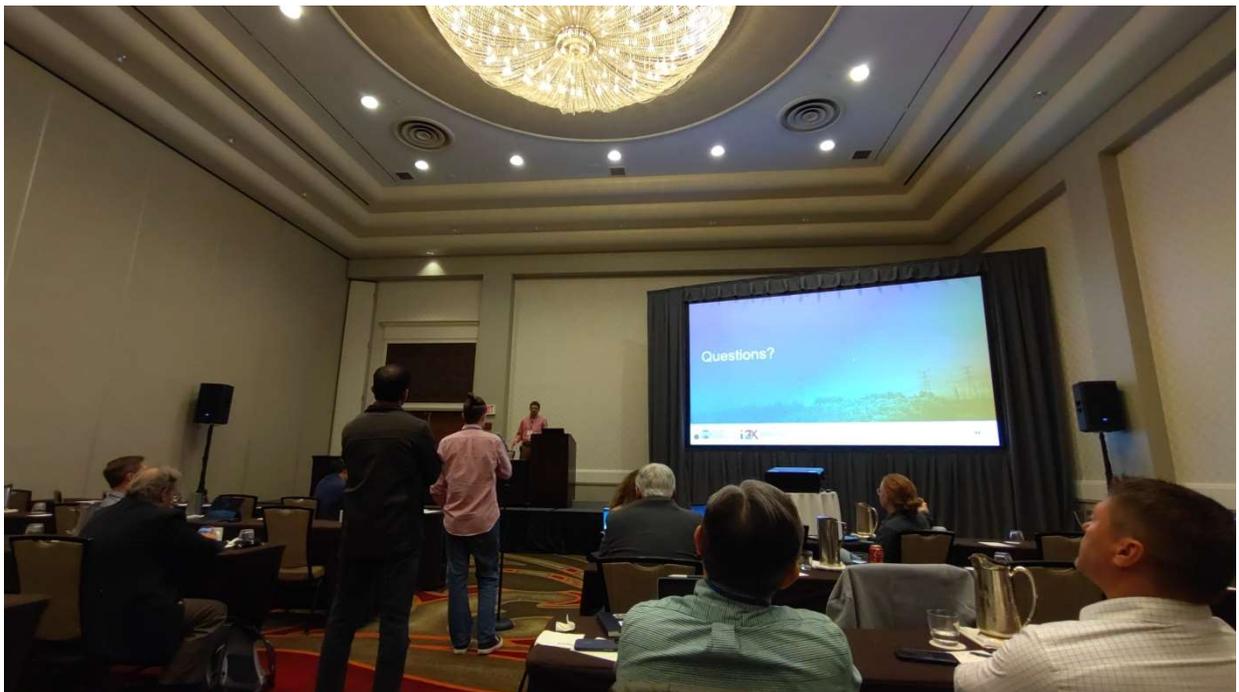


圖 3.2 會後問答時間

(一) 有關 i2X FIRST 合格評定的 IEEE P2800.2 概述

IEEE 2800-2022 於 2022 年 4 月 22 日發佈，是協調大型太陽能、風能、儲能及其他 IBR 的併網要求，由超過 175 名來自公用事業公司、系統營運商、

輸電規劃者和擁有 2 年以上經驗的設備製造商參與的工作小組基於共識所制定的標準。IEEE 標準是自願性的，獨立系統營運商（Independent System Operator, ISO）、區域輸電組織（Regional Transmission Organization, RTO）和輸電公司被鼓勵在 IEEE P2800.2 完成前，在可行的範圍內採用 IEEE 2800-2022，例如 PJM、SRP、NYISO 等已經部分採用，ERCOT、MISO、Southern Company 等已完全採用，要求 IBR 電廠進行一定程度的性能合格評估。

統一併網標準和要求有助於加快併網流程，並產生更準確的 IBR 電廠模型、更可靠的 IBR 電廠設計以及更完善的合格評定。IEEE 2800-2022 和 IEEE P2800.2 等標準可以作為有效的工具，以標準化和協調的方式改善併網要求。

IEEE P2800.2 包含如何進行測試和檢查以了解 IBR 電廠是否符合 IEEE 2800-2022。目前 IEEE P2800.2 的 2.0 草案已發布給標準起草小組成員徵求意見，起草團隊的目標是在 2025 年底或 2026 年初批准和發布 IEEE P2800.2。

IEEE P2800.2 流程圖如圖 3.3，其中列出了建議實施的具體條款以及如何整合，包括：

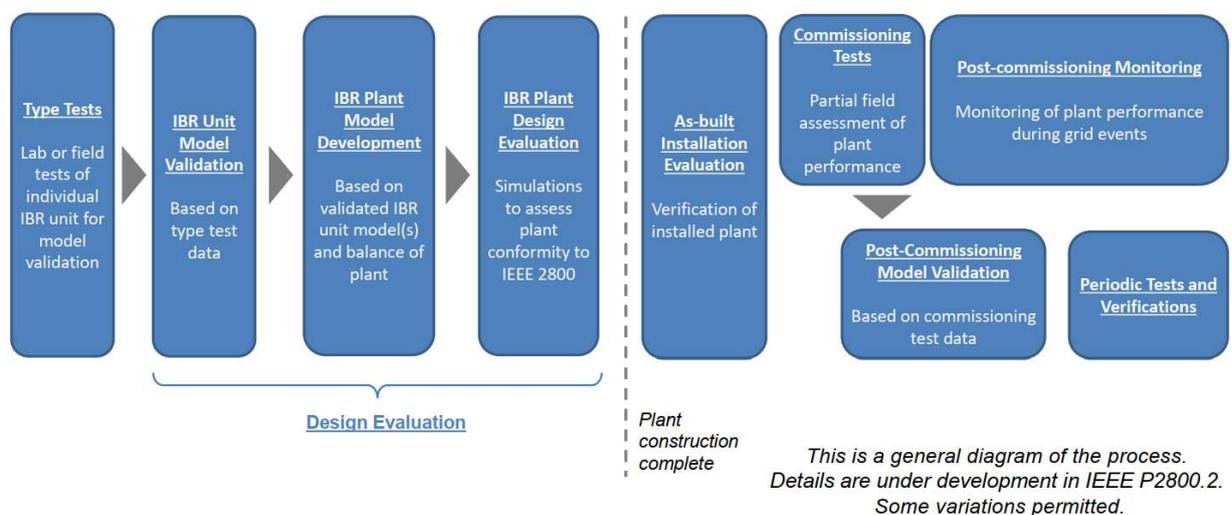


圖 3.3 IEEE P2800.2 合格評定步驟

1. 型式測試：包括對 IBR 單機進行實驗室或現場測試，得到實際 IBR 單機性能數據，以用於後續模型驗證。
2. IBR 單機模型驗證：確保 IBR 單機模型經過一系列條件驗證，能與實際產品相符。
3. IBR 電廠模型開發：建立完整的 IBR 電廠模型，包括 IBR 單機與發電廠設備的協調。
4. IBR 電廠設計評估：使用模擬來評估 IBR 電廠是否符合特定 IEEE 2800-2022 要求。
5. 竣工安裝評估：對已安裝的設備及其各自的配置（控制、保護、設定、參數化）進行驗證，以確保它們與研發的內容相符。
6. 校準及微調測試：如果可行，包括部分電廠性能的現場評估。
7. 調試後模型驗證：校準及微調測試的結果用於驗證 IBR 電廠模型與實際安裝的設備是否匹配。
8. 運轉監控：在電網事故期間監控 IBR 電廠的反應和性能，並根據需要修正問題。
9. 定期測試和驗證：在 IBR 電廠運轉服役後進行測試和驗證。

本次研討會討論前 6 個主題，而與 IBR 電廠運轉後相關的後 3 個主題將在 2025 年 3 月 ESIG 春季研討會期間的複合研討會中討論。

(二) IBR 電廠建模和 IEEE P2800.2 設計評估

北美電力可靠度公司（North American Electric Reliability Corporation,

NERC) 於會中談到 IBR 建模和設計評估的重要性，需要解決 IBR 系統性的效能問題和風險。NERC 認為這些問題源自於模型代表性不佳，敦促應改進 IBR 建模慣常作法，以提高併網流程中進行的工程和可靠度研究的準確性。

IEEE 2800-2022 和 IEEE P2800.2 的設計評估要求和建議的最佳實踐，包括 IBR 單機模型驗證、IBR 電廠模型開發、IBR 電廠設計評估，這些步驟的流程如圖 3.4 所示。

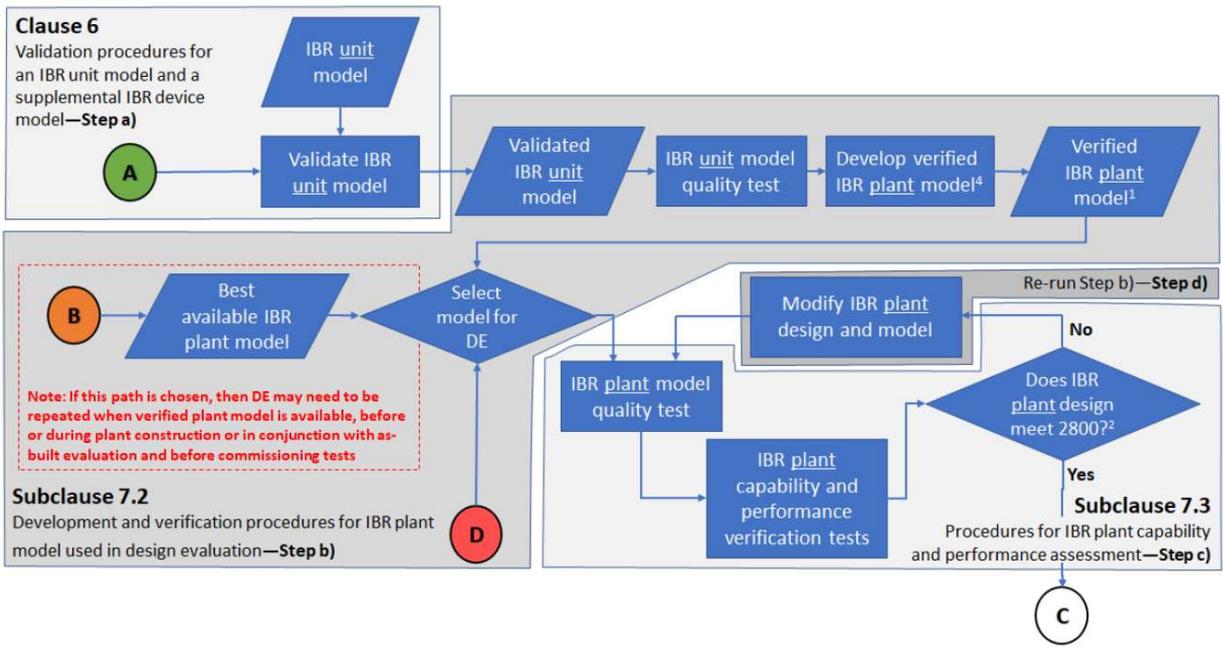


圖 3.4 IEEE P2800.2 第 6 條和第 7 條概述

IBR 單機模型和 IBR 電廠模型經過驗證後，透過品質測試和一系列基於模擬的 IBR 性能驗證測試來運行最佳可用模型，這需要 OEM 和 IBR 電廠開發商之間的密切協調，以確定 IBR 電廠設計是否符合 IEEE 2800-2022 要求。如果在併聯建模和研究過程中正確地遵循這些程序，更準確的 IBR 模型將獲得更好的 IBR 設計評估和更準確的可靠度研究。

維特斯風力系統公司 (Vestas Wind Systems) 也以 OEM 的觀點，分享關

於 IBR 電廠設計評估的考慮因素。Vestas 認為，目前在評估 IBR 電廠是否符合要求方面缺乏明確的責任（見圖 3.5）。OEM 不擁有電廠，且可能沒有電廠設計和配置調整的資訊，由於資訊所有權和其他因素，電廠營運者 (Generation Owner, GO) 缺乏對 OEM 設備能力的全面了解，輸電公司則只能透過文件評估是否符合要求。

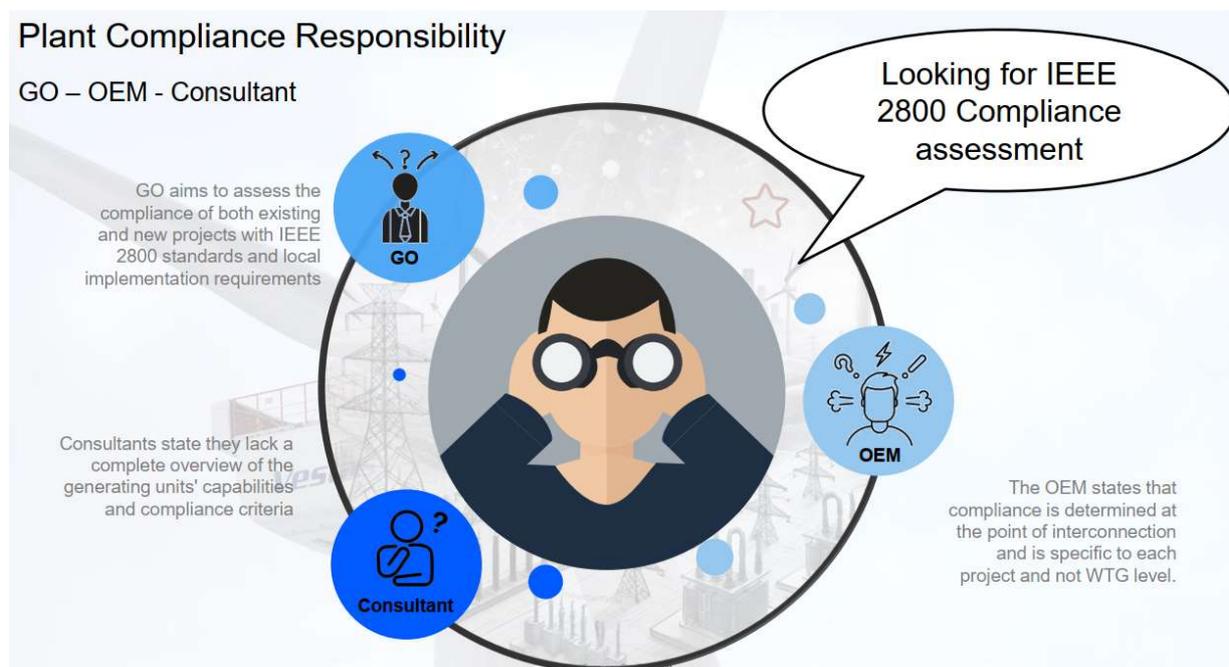


圖 3.5 IBR 電廠合格評定或合規責任

初步模型通常在早期併網階段使用，在研發過程中定期進行模型校準、微調及修正，和進入商轉階段的調試及驗證。Vestas 強調，全面實施 IEEE P2800.2 可能會導致在單一 IBR 電廠併網過程中進行數千個模擬測試，這將大幅增加工作量並可能導致併網延遲，因此可能需要針對 IEEE P2800.2 採用分階段的系統方法。Vestas 表示，所有模型都有侷限性，但只要為任何自動化工具的使用提供足夠的工程監督，自動化和考慮周全的 OEM 模型開發就可以幫助消除人為錯誤或不必要問題的可能性。

(三) IEEE P2800.2 設計評估、模型驗證與基準測試

型式測試通常由 OEM 在受控設施中的特定 IBR 單機上進行，並非對每一個 IBR 單機進行或對每一個 IBR 電廠重複進行。IEEE P2800.2 設計了一種驗證方法，使用定量比較和定性分析來開發模型並建立證明模型性能合理的支援文件（如圖 3.6 所示）。

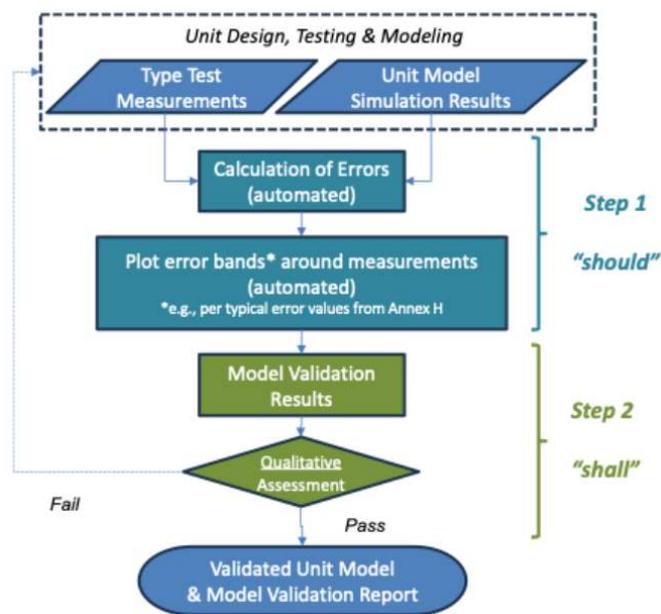


圖 3.6 建議的 IEEE P2800.2 模型驗證評估流程

IBR 電廠設計評估應在 EMT 領域進行，IBR 電廠模型必須通過一系列測試，以證明模型的能力和性能符合適用的要求，這些測試應該在 IBR 的「最終設計」上進行，以避免後續的重工（rework）。這些測試由 IEEE P2800.2 起草團隊開發，符合 IEEE 2800-2022 的要求及一組附加資訊測試，以便深入了解 IBR 電廠的性能。測試可在很大程度上實現自動化，然而在某些情況下，應謹慎審查測試結果並進行工程判斷。

(四) 竣工評估與校準及微調測試

竣工評估和 IBR 電廠校準及微調測試目的並非在測試 IBR 電廠的完整性，而是確保 IBR 電廠的安裝和配置符合 IBR 電廠設計評估步驟，並利用實際量測的數據對整個設施進行模型驗證。

肆、參觀美國羅德島州布洛克島離岸風力發電場

布洛克島 (Block Island) 位於羅德島州南方，距離羅德島州本土約 16 公里，布洛克島風力發電場 (Block Island Wind Farm) 位於布洛克島東南方 5.3 公里的大西洋海上，是美國第一個商業運轉的離岸風電場，由 Deepwater Wind (總部位於普洛維登斯，2019 年被 Ørsted 收購) 開發，裝設 5 部美國奇異公司 (General Electric Company, GE) Haliade 150-6MW 離岸風力渦輪機，總裝置容量 30MW，於 2015 年開始建造，2016 年 12 月完工商轉。電力由 34 公里長的海底電纜傳輸到電網，在羅德島州納拉甘西特 (Narragansett) 斯卡伯勒海灘 (Scarborough Beach) 北面上岸，也通過海底電纜向布洛克島供電，取代該島的 5 部柴油發電機。

此次行程於 10 月 25 日上午 7 時 40 分由奧姆尼飯店搭乘巴士出發，經過將近 1 小時車程後抵達朱迪思角 (Point Judith) 碼頭，9 時許搭乘高速渡輪雅典娜號 (Athena) 出發前往風力發電場，經過約 30 分鐘航程抵達風力發電場海域，渡輪改以約 6~7 節的航速繞行 5 部風力機組，並兩度停泊於風力機組旁供參訪人員近距離觀察，全程有專人解說。在風力發電場繞行參觀將近 1 小時後返航，於 11 時許返抵朱迪思角碼頭，結束歷時約 2 小時的海上行程(如圖 4.1~圖 4.13 所示)。慶幸當天氣候及海象狀況良好，此次得以成行，惟海風相當冷冽，可以體會建造風力發電場工程的艱鉅和運轉維護人員的辛苦。

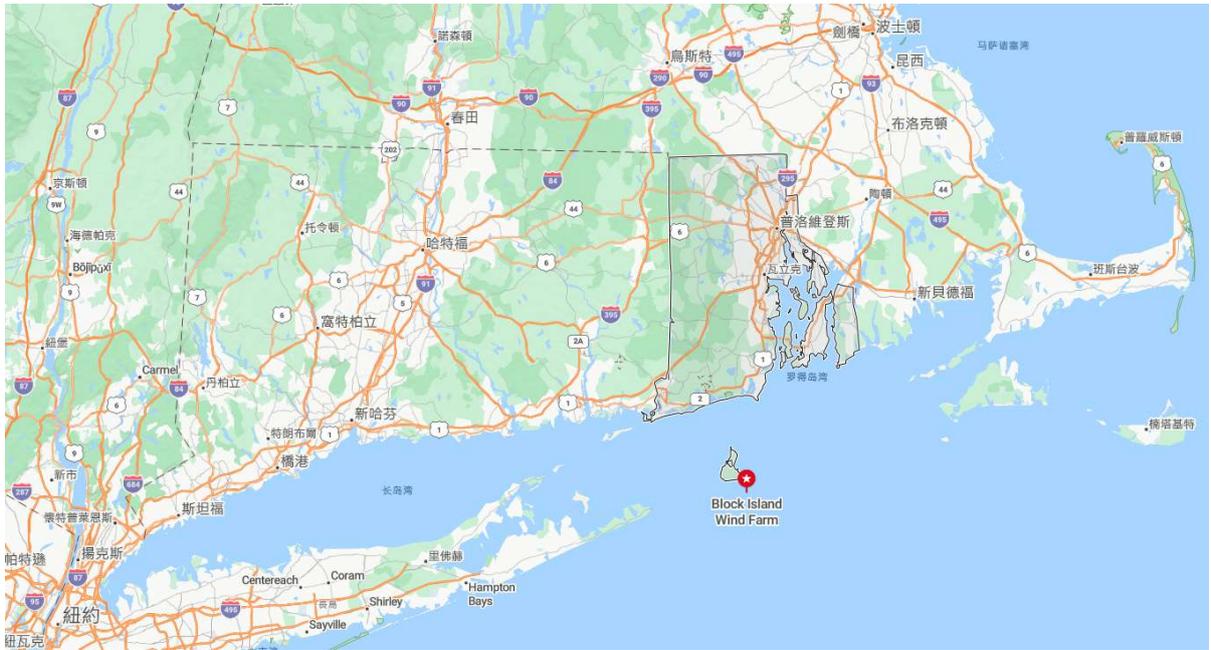


圖 4.1 布洛克島位於羅德島州南方，紐約州長島的東方。

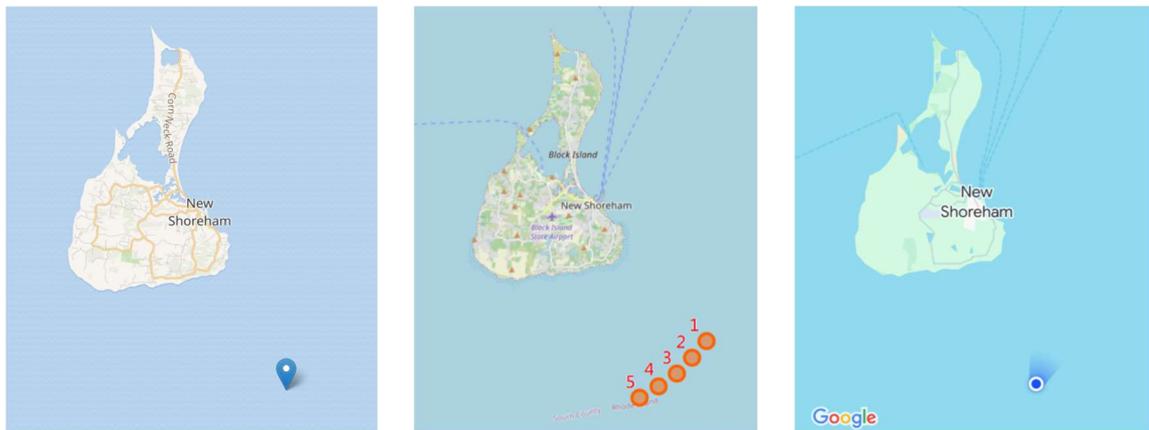


圖 4.2 布洛克島離岸風場位於布洛克島東南方海面

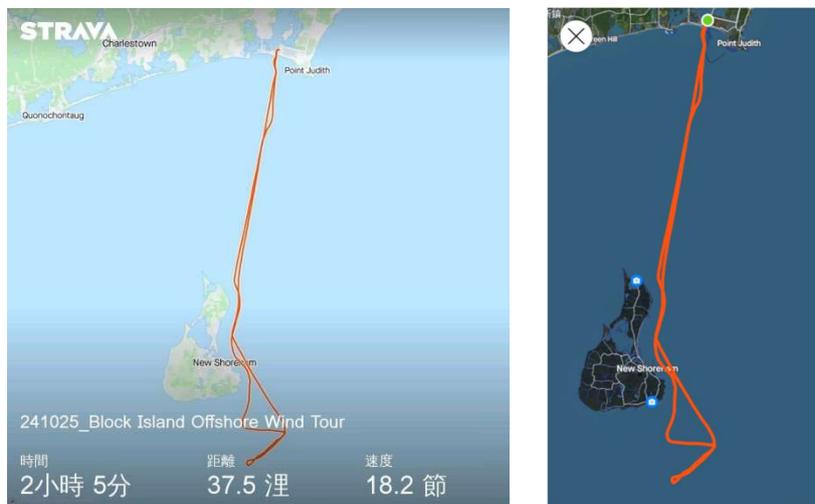


圖 4.3 由朱迪思角往返布洛克島離岸風場的航行軌跡



圖 4.4 高速渡輪雅典娜號

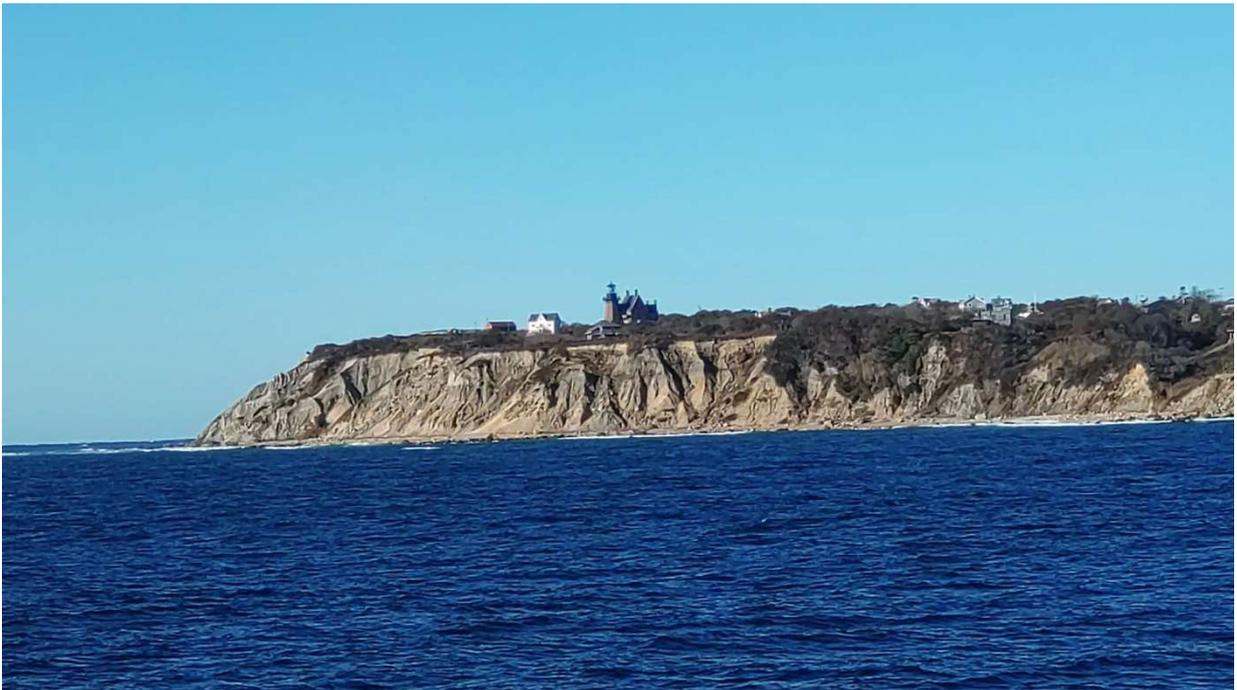


圖 4.5 從海上眺望位於懸崖邊的布洛克島地標東南燈塔 (Southeast Lighthouse)



圖 4.6 由近至遠分別為 1 到 5 號風力發電機，每部機組間距 830 公尺。



圖 4.7 風力發電機高度 180 公尺，轉子直徑 150 公尺，葉片長度 73.5 公尺。



圖 4.8 特寫 2 號風力發電機的機艙、葉片及水下基座，基座上標示的 BIWF 即 Block Island Wind Farm 的縮寫。



圖 4.9 1 號（遠處）和 2 號（近處）風力發電機



圖 4.10 特寫 3 號風力發電機的作業平台

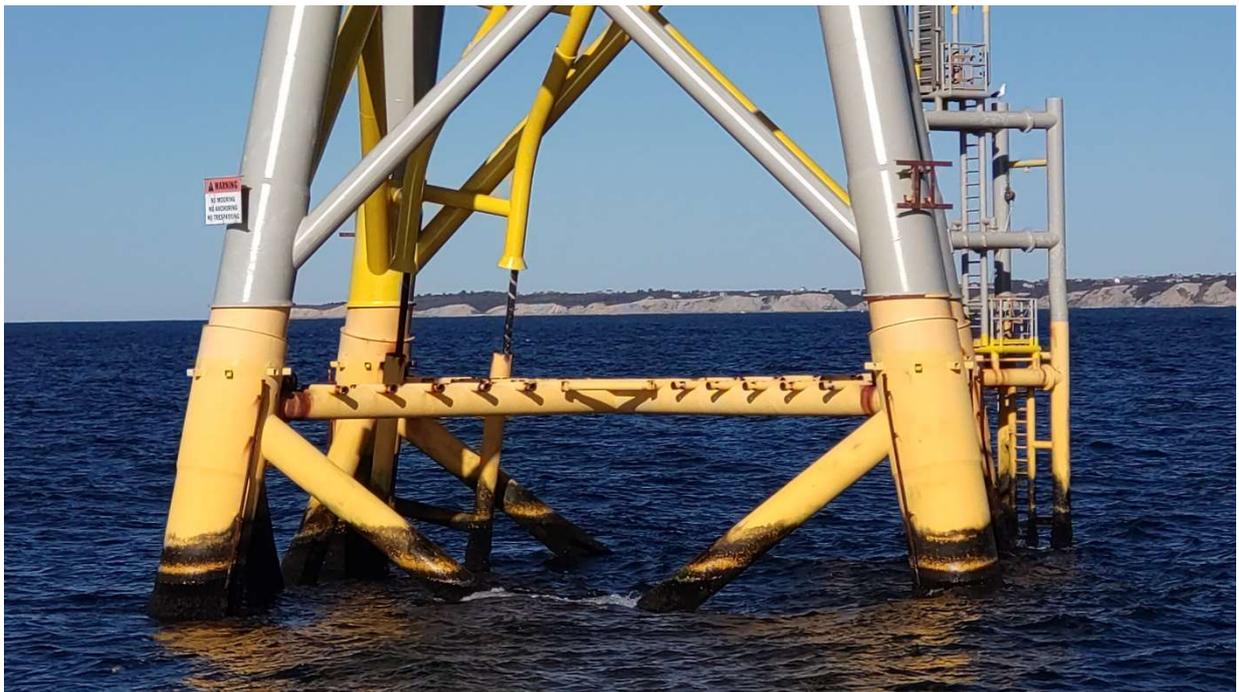


圖 4.11 特寫 3 號風力發電機的水下基座



圖 4.12 由近至遠分別為 4 到 1 號風力發電機



圖 4.13 5 號風力發電機及其維修平台，目前 5 號風機暫停運轉。

伍、心得與建議

本處往年每年均派員參加 IEEE 年會，今年則是首次參加 ESIG 舉辦的技術研討會。本次研討會議題廣泛且內容豐富，除了全體出席者參加討論的共同議題之外，部分議題僅限會員參加，或在不同場地同步進行，故無法參與每個議題，爰主要選擇參加與負責業務相關的儲能、IBR 技術及併網規範等議題。

在為期 4 天的會議中，藉由歐美各國電力相關領域專家的介紹，了解在再生能源占比逐漸提高的情況下，各國電網面臨哪些穩定度與可靠度的問題及其解決方案，如何在規劃、模擬分析、監測、控制技術等層面更加精進，及美國再生能源併網規範未來的修訂方向和目前進度，也了解各國電力系統的發展現況，及如何因應能源轉型和淨零排放的對策。

參與此次會議增進了對電力系統規劃和未來發展趨勢的認知，也學習到許多與工作相關的技術及知識，相當具有啟發性。會後 ESIG 網站上提供各議題的簡報檔，並上傳會議影音檔至 YouTube，讓出席者或對各議題有興趣的人能進一步學習研讀。ESIG 不定期舉辦網路研討會和線上教學演講，每年春秋兩季舉辦技術研討會，邀請北美乃至世界各國電力和能源主管機關、電力產業營運商、專家學者發表和交流電網新技術，發表最近一年關於電力系統規劃、運轉等經驗與成果，對公司未來進行系統規劃有相當助益，建議各相關單位未來可繼續派員參加交流學習，2025 年春季技術研討會將於 3 月 17 日至 3 月 20 日在美國德州奧斯汀舉行。