

出國報告（出國類別：洽公）

赴麻省理工學院(MIT)交流並順道參訪
美國電力研究院(EPRI)實驗室

服務機關：台灣電力股份有限公司

姓名職稱：張志聲 副所長

曹昭陽 主任

派赴國家：美國

出國期間：中華民國 113 年 10 月 29 日~113 年 11 月 8 日

報告日期：中華民國 114 年 1 月 7 日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：赴麻省理工學院(MIT)交流並順道參訪美國電力研究院(EPRI)實驗室

頁數 104 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/翁玉靜/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

張志聲/台灣電力公司/綜合研究所/副所長/ (02)2360-1007

曹昭陽/台灣電力公司/綜合研究所/主任/ (02)8078-2221

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 開會6 其他

出國期間：113 年 10 月 29 日~11 月 8 日

派赴國家/地區：美國/波士頓、萊諾克斯、夏洛特

報告日期：114 年 1 月 7 日

關鍵詞：淨零碳排 (Net Zero Emission)、碳捕捉(Carbon Capture)、容量擴充建模(Capacity Expansion Modeling)、電網韌性(Grid Resiliency)、儲能(Energy Storage)、微電網(Microgrid)、電網強化技術(Grid Enhance Technology)、機器人(Robot)、配電系統(Distribution System)、無 SF6 斷路器(SF6 Free Breaker)、變壓器(Transformer)、光纖感測器(Optical Fiber Sensor)

內容摘要：(二百至三百字)

1. 為掌握國際電業研究發展趨勢，本公司持續強化與全球頂尖學術機構及研究單位合作，奉派赴 MIT 技術交流並參訪美國 EPRI 實驗室。
2. 訪 MIT 期間一共與 MITeI 安排的教授或專家們個別進行了 11 場面對面技術交流，討論主題涵蓋淨零碳排策略、容量擴充建模、碳捕捉、儲能、微電網與電網韌性、配電系統狀態估測以及電力系統振盪監測等。
3. 參訪 EPRI 萊諾克斯與夏洛特實驗室，與專家交流討論的主題包括電網強化技術、機器人在變電所巡視應用、地面型配電系統、變壓器專家系統、無 SF6 斷路器技術、光纖作為架空輸電線路監測感測等技術之研究。
4. 所蒐集相關研究資料及成果，可作為相關業管單位運用及本公司後續研究之參考。此次出國之心得及建議詳如本出國報告。

目錄

目錄.....	i
表目錄.....	ii
圖目錄.....	iii
壹、背景及目的說明.....	1
貳、參訪機構及交流內容.....	2
一、赴 MITeI 技術交流.....	2
(一) 背景說明.....	2
(二) 與 MIT 教授們技術交流.....	3
二、赴 EPRI 技術交流.....	54
(一) EPRI 簡介.....	54
(二) Lenox 實驗室參訪與技術交流.....	55
(三) Charlotte 實驗室參訪與技術交流.....	79
參、心得與建議.....	99
Part 1-MIT.....	99
Part 2-EPRI.....	100
肆、參考資料.....	102

表目錄

表 1 常見各種容量擴充模型及其開發者或擁有者[6].....	13
表 2 Verdox 技術與傳統碳捕捉技術的比較.....	25

圖目錄

圖 1 本公司代表與 MITeI 專家們的合影.....	4
圖 2 連接加拿大魁北克和紐約市的高壓直流(HVDC)輸電線路專案計畫，突顯了策略性輸電規劃以調適再生能源滲透率增加的必要.....	8
圖 3 本公司代表與 John Parsons 博士合影	10
圖 4 容量擴充建模(Capacity Expansion Modeling, CEM)示意圖	11
圖 5 典型的容量擴充模型的模擬輸出結果	12
圖 6 本公司代表與 MIT 資深研究科學家 Audun Botterud(右二)合影，左二則是 2024 年 4 月 1 日起擔任 MITeI 總監的 William H. Green 教授.....	14
圖 7 利用由六個行業模型組成的 Dolphyn 進行能源投資規劃建模	16
圖 8 依現有政策之電網建模(Grid modelling)	17
圖 9 本所代表與 Ruaridh Macdonald 博士合影.....	20
圖 10 Brineworks 的 DOC 方法，捕捉碳並且產生氫氣副產品	22
圖 11 本所代表與 T. Alan Hatton 教授合影	26
圖 12 從蒸汽控制、超級冷凝器和超級鍋爐等強化火力發電機組整體效率之示意圖	28
圖 13 美國德州 PetraNova 計畫碳捕捉廠，採燃燒後碳捕捉技術，效果有限並且昂貴 ..	30
圖 14 以霧捕獲系統替換大型填充床塔可縮小設施所需空間，且顯著降低成本.....	31
圖 15 本所代表與 Kripa Varanasi 教授合影	33
圖 16 Fikile Brushett 教授藉由簡報概述開發 RFB 的動機	34
圖 17 RFB 的基本原理示意圖.....	34
圖 18 本所代表與 Fikile Brushett 教授及兩位協助實驗室導覽的研究生合影	36
圖 19 現代電網使用各式新型感測器，如何利用電網數據進行電網最佳化是項挑戰	37
圖 20 理論導引機器學習演算法可利用有限資料進行配電網估測，以及輸電網的最佳化	38
圖 21 本所代表與 Deep Deka 博士合影.....	40

圖 22 梯度下降法很容易收斂在局部最佳點.....	42
圖 23 換個角度看最佳化：利用 MALA 等技術進行抽樣，能找回多樣性.....	42
圖 24 本所代表與范楚楚副教授合影.....	44
圖 25 Annaswamy 提出的一種階層式本地電力市場 (LEM)結構.....	47
圖 26 涵蓋 100,000 結點且結合階層式在地電力市場的 EUREICA 框架.....	48
圖 27 本所代表與 Annaswamy 教授合影.....	49
圖 28 故障發生時引起的跨地區低頻震盪.....	51
圖 29 大量再生能源引起的極快速電磁次同步共振.....	51
圖 30 本所代表與 Marija Ilic 教授合影.....	53
圖 31 EPRI 美國三大實驗室地理位置分佈圖.....	55
圖 32 EPRI Lenox 實驗室的主要測試項目.....	55
圖 33 Lenox 實驗室配置空照圖，圖中紅色標示為配合 GET SET 倡議中新增的 DLR Test Line 和 APFC Test Platform 試驗項目.....	57
圖 34 美國能源部估計採用四項關鍵技術分別能釋放的電網傳輸容量.....	58
圖 35 GETs 技術的部署可望快速釋出電網傳輸容量.....	59
圖 36 三種不同類型的高溫低垂度導體以及連接器.....	60
圖 37 EPRI 目前在 DLR 技術現場評估的執行現況.....	62
圖 38 EPRI 對 DLR 技術現場評估的六種典型分析.....	63
圖 39 採用各種不同技術的 DLR 供應商，以不同顏色代表其採用的技術類型.....	64
圖 40 電力從超載線路轉移到有剩餘容量的並聯線路，以提高再生能源案場輸出.....	64
圖 41 美國 Central Hudson 使用 APFC 增加傳輸容量，並減少所需變電所空間.....	65
圖 42 哥倫比亞 ISA TRANSELCA 使用 APFC 解決限制該國北部潔淨能源可靠併網的短期和長期電網擁塞問題.....	66
圖 43 澳洲 Transgrid 使用 APFC 來解決兩個州之間輸電線路上的熱容量限制問題.....	66
圖 44 英國國家電網使用 APFC 解決英格蘭北部邊界間的電網擁塞問題.....	66

圖 45 EPRI 藉由 Smart Valve 測試計畫，參與測試和評估 APFC 技術.....	67
圖 46 EPRI 拓撲優化的主要功能示意圖.....	68
圖 47 對比 2010 年，EPRI 認為現在是推動 GET SET 的適當時機.....	69
圖 48 EPRI 在 138kV 研究用變電所部署 4 種機器人並進行評估.....	71
圖 49 EPRI 針對 4 種移動式機器人進行測試的評估準則.....	71
圖 50 EPRI 測試評估後認為容易藉由機器人蒐集天氣和現場儀表資料.....	72
圖 51 EPRI 研究並評估 ANYmal 執行巡邏變電所周邊的能力.....	74
圖 52 EPRI 研究如何利用 ANYmal 執行無人機入侵偵測任務.....	74
圖 53 GLDS 的關鍵組件.....	77
圖 54 GLDS 耐用性研究.....	78
圖 55 GLDS 電流性能研究.....	78
圖 56 GLDS 可修復性研究.....	78
圖 57 EPRI Charlotte 實驗室的主要測試項目.....	79
圖 58 應用 PTX 找出絕緣紙退化最嚴重的 10 台變壓器，並根據異常情況找出最差的 10 台變壓器.....	83
圖 59 PTX 分析 500203 號變壓器，指出其產生乙炔，表示存在不良接頭，並因油品質不佳導致油過度劣化.....	83
圖 60 PTX 在 NGUK 的應用大幅提高了年度變壓器健康審查的效率.....	84
圖 61 EPRI 變壓器專家系統 PTX 的演進史，第 11 版於 2024 年發佈.....	85
圖 62 EPRI 在其研究專用變電所部署一系列無 SF6 斷路器技術.....	87
圖 63 進行基於 IEC 60071-2 的落雷過電壓研究.....	88
圖 64 EPRI 無 SF6 斷路器技術的評估計畫.....	89
圖 65 光纖架空輸電線路監測感測器原理，光纖附近任何移動均可以被偵測到.....	91
圖 66 以光纖作為架空輸電線路監測感測器的應用情境.....	91
圖 67 位於 Lenox 的架空輸電線路光纖監測感測器測試場域.....	92

圖 68 P180.001 架空配電資產專案計畫總覽.....	94
圖 69 P180.002 地下配電資產專案計畫研究主軸	94
圖 70 P180.003 配電自動化資產專案計畫研究主軸	95
圖 71 EPRI 對復閉器進行失效分析採用的方法.....	96
圖 72 EPRI 配電安全和工作實務專案計畫研究主軸	96
圖 73 本所代表於 EPRI Charlotte 實驗室外合影.....	98

壹、背景及目的說明

本公司致力於電力產業的研究與發展，為掌握研究領域發展趨勢，持續強化與全球頂尖學術機構及研究單位合作，自 112 年起成為麻省理工學院能源倡議(Massachusetts Institute of Technology Energy Initiative, MITei)的會員。此外，本公司為美國電力研究院(Electric Power Research Institute, EPRI)的合作夥伴，長期參與其多項研究計畫，雙方已建立緊密的合作關係。

本次赴美旨在分別與 MITei 及 EPRI 專家面對面交流電力與能源領域的最新研究技術、成果和發展趨勢。其中與 MITei 就淨零碳排下 IRP(Integrated resource planning) 及碳捕捉、儲能、電網等議題進行技術交流，共同探討並評估未來合作的可能性；參訪 EPRI Lenox 實驗室和 Charlotte 實驗室，雙方研討其高壓電力實驗設備和研究方法，並進行電網與電力設備韌性強化策略及技術交流，聚焦在(1)因應大量再生能源下低轉動慣量與低故障電流之電網韌性強化策略，(2)因應極端天候電力設施韌性強化策略，(3)汲取其在電力設備狀態監測與應用 AI 在智慧診斷上的經驗。

此次參訪及技術交流由綜研所張副所長及曹主任出席，並由曹主任分別在 MITei 及 EPRI Charlotte 實驗室進行簡報，簡報題目為：「R&D Activities of TPC (台電公司研究與開發活動)」，受訪的兩個機構也分別進行多場簡報，透過本次相關議題之經驗交流與分享，瞭解 MITei 及 EPRI 在能源轉型及潔淨能源下技術之研發方向，所蒐集相關研究資料及成果可作為研究主軸及題目規劃之參考以提升本公司研發成果。

貳、參訪機構及交流內容

一、赴 MITei 技術交流

(一) 背景說明

本公司致力於電力產業的研究與發展，為掌握研究領域發展趨勢，持續強化與全球頂尖學術機構及研究單位合作，於 112 年加入 MIT 能源倡議(MIT Energy Initiative, MITei) 成為會員。本次赴美國與 MITei 專家面對面交流能源、淨零碳排與電力領域的最新技術研究、成果和發展趨勢，探討 IRP 技術及電網韌性等議題，並探索未來合作的可能性。

MITei 是 MIT 能源研究、教育和推廣的中心，致力於推動零碳和低碳解決方案，以應對氣候變化和擴大能源取得，也是研究人員和教育工作者的重要聚集地，其共同的願景和承諾就是透過開發新技術和提供基於科學的分析來大幅減少碳排。他們延續 MIT 與工業界、政府和民間社會合作和透明的悠久傳統，致力於全球能源系統的去碳。

MITei 使命的實現方式

- ◆ 研究：MITei 將 MIT 各個領域的研究人員組織起來，並促進與工業界、非營利組織和政府的合作，以加快從實驗室到市場的零碳和低碳技術的商業化速度和規模。MITei 及其成員推動數百個研究專案，包括通過 MITei 種子基金計畫資助的創新前瞻能源專案。
- ◆ 教育：MITei 的教育作用是其全球能源系統去碳使命的核心。MITei 為數千名希望為能源轉型做出貢獻的 MIT 研究生和大學生們，以及全球線上學習者提供豐沛的教育資源。
- ◆ 推廣：MITei 提供基於事實的能源主題分析，為公共政策提供資訊，促進學術研究界內部的對話，並向公眾提供有關重要問題的背景資訊。

MITei 的歷史可以追溯到 2006 年，當時由 MIT 校長 Susan Hockfield 和一個由 MIT 教職員工和資深職員組成的多元化團隊共同創立。MITei 的創始總監是 Ernest J. Moniz，他

現在是 Cecil and Ida Green 物理與工程系統榮譽教授和 MIT 校長的特別顧問。Moniz 還曾擔任過美國能源部長。

MITeI 與 MIT 許多從事跨學科能源和環境活動的中心、系所和實驗室教職員工聯繫密切。MITeI 支援某些專案的財務管理，並與這些組織合作辦理研究和教育活動，其中包括一些附屬組織，例如能源與環境政策研究中心 (CEEPR)等。

(二) 與 MIT 教授們技術交流

1. Welcome & Discussions

感謝 MITeI 特地為我們安排了 Welcome & Discussions，一開始是雙方自我介紹，依序是 MITeI 研究總監 Randall Field 教授、MITeI 未來能源系統中心執行總監 Morgan Andreae 博士、亞太能源夥伴計畫總監 Wendy Duan、本所張副所長及曹主任，並由曹主任簡報介紹台電公司推動淨零碳排、強化電網韌性政策方向及本所對應的研發策略及動態，雙方並就簡報及 MITeI 在推動全球能源系統減碳的努力進行討論。因為此三位總監是 MITeI 核心成員，特此簡介其背景如下：

Randall Field 教授是 MITeI 的研究總監，監督科學家們及其團隊所進行的研究。他也是 MIT 核融合研究的執行總監，該研究檢視全球能源轉型的數十年動態，以及核融合能源如何有助於全球能源系統減碳。他曾擔任 MIT 交通系統中心的執行總監，評估車輛和燃料技術、服務和商業模式以及消費者行為在客貨運輸方面的轉型影響。他同時是 MIT 未來交通研究的執行總監，該研究產出了《未來交通洞察報告》，涵蓋全球替代燃料車隊和能源消耗的預測、充電和加油基礎設施的部署、對交通的影響，以及創新技術和商業模式對城市交通的影響。

Morgan Andreae 博士是 MITeI 未來能源系統中心(Future Energy Systems Center)的執行總監。在加入 MITeI 之前，他是某企業的技術與創新執行總監，領導團隊開發新型電池、燃料電池、電解槽和電動牽引技術。Morgan 在其職業生涯中，曾擔任技術開發、策略和

產品開發等多個職位，始終專注於將可更永續的技術推向市場。

Wendy Duan 是 MITeI 的亞太能源夥伴計畫總監。Wendy 與 MIT 在多個領域建立研究合作，為國家和省級官員、企業董事會和 CEO 規劃安排能源政策、能源經濟、能源技術和能源管理方面的會議和討論。Wendy 代表 MITeI 在整個亞洲地區介紹 MIT 的能源研究、教育工作。她與美國國務院國際領導力計畫合作，接待來自世界各地的領導人，並且與許多亞太國家的大使館保持夥伴關係，促進能源問題的合作與對話。本次技術交流行程之安排主要便是透過 Wendy 規劃，居中與相關領域 MIT 教授們聯繫，並全程陪同與接待。圖 1 是歡迎與討論後本公司代表與 MITeI 專家們的合影，左起 Wendy Duan 計畫總監、Morgan Andreae 執行總監、Randall Field 研究總監，右一則是下一場交流討論的專家資深講師 John Parsons 博士。

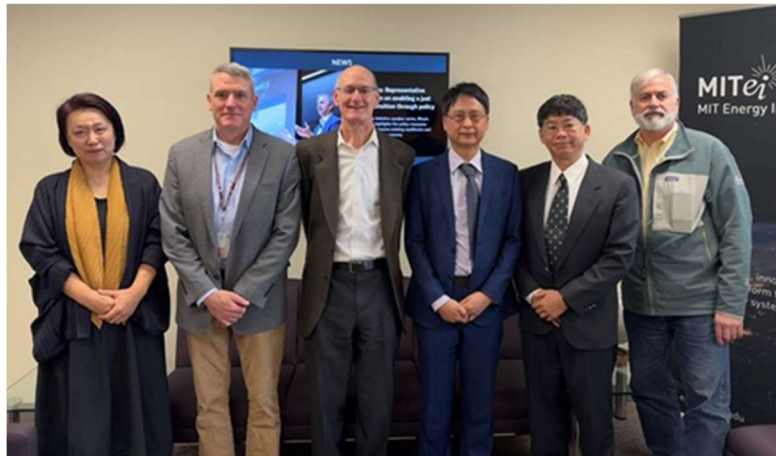


圖 1 本公司代表與 MITeI 專家們的合影

討論過程中提及 MITeI 執行中的「台灣創新綠色經濟藍圖聯盟(Taiwan's Innovative Green Economy Roadmap (TIGER) consortium)」，TIGER 是一個由 10 家台灣企業組成的聯盟，致力於探索先進能源技術領域的最新發展，包括氫能、儲能、先進核能和碳捕捉[1]。這些台灣企業正在探索多種替代途徑，期推動國家能源相關產業的未來發展。透過每年舉辦兩次的會議和網路研討會，這些企業可了解 MIT 最先進的能源研究。

聯盟第一年的主題包括：

- ◆ 先進核能系統

- ◆ 氫能：技術與應用
- ◆ 智慧電網，包括電網分散化
- ◆ 再生能源：技術與供應鏈
- ◆ 儲能系統與先進電池技術
- ◆ 碳排放調查與貿易策略

第二年的研究主題擴展至碳捕捉、低碳運輸、穩定能源與電力供應、轉型風險、供應鏈和國際碳權等相關議題。

TIGER 聯盟的主要研究人員是 Robert Armstrong（前 MITeI 總監、榮譽化學工程教授）和 Sergey Paltsev（MIT 永續科學與策略中心副總監、MITeI 資深研究科學家）。

目前的 TIGER 成員包括：

- ◆ 億光電子股份有限公司
- ◆ 中信金融控股股份有限公司
- ◆ 國泰世華商業銀行股份有限公司
- ◆ 台達電子工業股份有限公司
- ◆ 富邦金融控股股份有限公司
- ◆ 許世賢聯合法律事務所
- ◆ 大亞電纜股份有限公司
- ◆ 華新麗華股份有限公司
- ◆ 緯創資通股份有限公司
- ◆ 正鼎科技控股有限公司

MITeI 曾邀請台灣創新綠色經濟藍圖聯盟(TIGER)會員企業於 2024 年 9 月 27 日至 MIT 參與專屬研討會，針對氫能、碳捕存、碳排與碳權、長期供電和再生能源供應鏈等議題，與 MITeI 教授面對面交流討論。MITeI 預計 2025 年上半年來台舉辦 TIGER 聯盟研討會，由於該聯盟的研究主題大多與本公司密切相關，其成果及後續發展值得本所持續關注。

2. The global net-zero transition: Strategic Discussion [2]

第一位技術交流的專家是 John Parsons 博士，他是 MIT 史隆管理學院資深講師兼 MIT CANES 低碳能源中心聯合總監，專精於能源和環境市場的風險管理、企業融資和鑑價。他同時也是 MIT CEEPR(Center for Energy and Environmental Policy Research)的研究員。

CEEPR 成立於 1977 年，是 MIT 能源與環境政策研究的重點。該中心旨在為政府和民營企業提供嚴謹、客觀的研究，以改進決策，並透過與全球產業合作夥伴的密切合作來確保其工作的相關性。

有鑑於全球邁向淨零排放的轉型是一項多層面的挑戰，需要策略性的討論和明智的決策，Parsons 透過學術研究和專家觀點的洞察，和我們分享並討論對全球淨零轉型關鍵考量因素的看法，重點摘要如下：

(1) 低碳世界中的核能

核能是一種重要的零碳能源，可在實現去碳化目標中發揮關鍵作用。MIT 的研究強調了需要「穩定」和「可調度」的潔淨能源，以有效地將電網去碳化。核電廠具有這些特性，可提供穩定可靠的能源供應，彌補間歇性再生能源如太陽能和風能。以加州迪亞布羅峽谷核電廠為例，研究指出延長現有核電設施運營壽命潛在的經濟和環境效益。維持該核電廠的運轉可每年減少加州電力行業碳排放量超過 10%，減少對燃氣發電廠的依賴，並可大幅節省電力系統投資成本。此外，該電廠的持續運轉可避免裝設太陽光電所需的大面積土地，潛在節省 90,000 英畝土地。

然而，核電廠（例如迪亞布羅峽谷）是否延役最終取決於政治。利害關係人，包括政府機關和民營企業，必須仔細評估核能的成本和效益，並化解與核廢料處理、地震安全和公眾認知相關的疑慮。

電網系統成本和核能的作用：

- 核電廠通常前期資本支出高，但由於燃料效率高、運轉壽命長，營運成本相對較低。
- 核能在低碳世界中的作用很大程度上取決於電網系統的設計和運營方式。來自核能的穩定、基載發電，對於平衡太陽能和風能等間歇性再生能源非常有價值。

批發市場和核能的盈利能力：

- 核電廠在價格波動的自由化電力批發市場中往往難以競爭。這是由於其運轉不靈活且固定成本高。
- 可能需要新的市場機制和監管框架，以適當評估核電的零碳屬性和對電網可靠性貢獻。

熱電聯產的價值：

- 熱電聯產(CHP)，或稱汽電共生，可以藉由將廢熱用於工業製程，或區域供熱來顯著提高核電廠的整體效率。
- 這可以提高核能的經濟可行性，特別是在供暖氣需求大的地區。

小型模組化反應爐(Small Modular Reactor, SMRs)的商業模式：

- SMRs 是一種較小且可能更模組化的核反應爐，因其服務於利基市場和偏遠地區的潛力而受到關注。
- 其商業模式仍在不斷發展，可能涉及與工業用戶、公用事業公司甚至政府的合作夥伴關係。

能源密度和大型負載共址的電網價值：

- 核能的高能量密度的優勢，可以從相對較小的佔地面積產生大量電力，這在土地有限的地區是有利的。
- 將核電廠建在大型工業負載附近，可以大幅減少輸電損耗並增強電網穩定性。此概念和本公司推動的電廠電源線路就近連接到科學園區，以減少輸電損耗並增強電網穩定的作法不謀而合。

(2) 輸電基礎設施對於淨零電網的重要性

強健的輸電基礎設施是促進再生能源整合，和確保淨零能源系統之電網穩定的關鍵。高效率的輸電線路使電力能夠從再生能源豐富地區輸送到高能源需求地區。Parsons 強調了輸電基礎建設在促進淨零轉型的重要性。Parsons 提出了一個以尚普蘭-哈德遜電力快線(CHPE)為重點的案例研究，這是一個連接加拿大魁北克和紐約市的高壓直流(HVDC)輸電線路專案計畫[2]。該專案計畫的電網規劃建模係採用 MIT 開發的 GenX(一

種可規劃電力資源容量擴充模型的工具)，計畫考量重點包括 2050 年的需求、全年的每小時概況、深度去碳目標、優化發電投資及優化調度。研究強調了策略性輸電規劃以因應再生能源滲透率增加的必要性。這些模型著重在優化發電和調度投資，以經濟有效地實現深度去碳化目標。例如，新加坡屬高能源需求地區，目前正積極規劃透過輸電線路進口再生能源。其政府在 2024 年 10 月 22 日宣布有條件通過從澳洲進口低碳電力，透過總長 4300 公里的 HVDC 海底電纜輸送，預計最早 2035 年開始商轉輸電[3]，此外也在加速推動透過輸電線路從東南亞國家進口綠電[4]。

Parsons 強調需要將目前以加拿大水力發電作為美國基載電力的作法，轉變為允許雙向利用輸電基礎設施的未來模式。這種雙向電力流動將使電網系統更具靈活性和韌性，以利因應再生能源的間歇性。

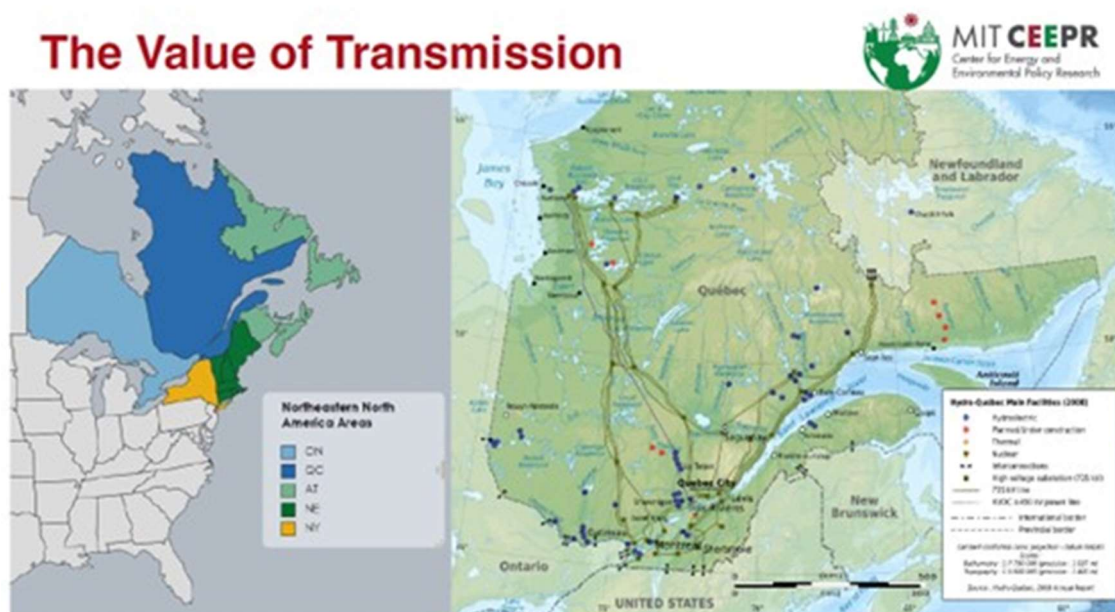


圖 2 連接加拿大魁北克和紐約市的高壓直流(HVDC)輸電線路專案計畫，突顯了策略性輸電規劃以調適再生能源滲透率增加的必要[2]

(3) 儲能備轉(reserve)市場

Parsons 建議建立儲能備轉市場。他認為這個市場將激勵對儲能技術的投資，並為越來越依賴再生能源的電網系統提供供需平衡機制。雖然囿於時間他沒有提供有關儲能市場的更多細節，然而他認為儲能對於間歇性再生能源整合到電網有很大的助益。藉由建立儲能市場，電網運營商可以採購儲能容量來平衡供需波動，確保電網的穩定性和可靠性。

透過交流討論，我們也分享台電公司自 2021 年成立電力交易平台，透過新型態電力交易商業模式吸引民間分散式電力資源(特別是儲能系統的投資)投入電網，提供輔助服務，共同協助全國電力系統穩定的成功經驗。

(4) 小結

- a. Parsons 認為全球邁向淨零排放的轉型需要全面而策略性的方法，包括技術創新、政策介入和公眾參與，而核能、輸電基礎設施和儲能是關鍵要素，需要審慎評估和策略規劃，以確保成功且永續的轉型。
- b. 然而，誠如 Parsons 所說，核電廠是否延役最終取決於政治。前提是利害關係人，包括政府機關和企業，必須審慎評估核能的成本和效益，並化解與核廢料處理、地震安全和公眾認知相關的疑慮。
- c. 將電廠建在大型工業負載附近可以大幅減少輸電損耗並增強電網穩定性。此概念和本公司推動的電廠電源線路就近連接到科學園區，以減少輸電損耗並增強電網穩定的作法不謀而合。
- d. 透過高效率的輸電線路從再生能源豐富地區進口綠電，未來可能逐漸成為國際趨勢，新加坡的例子值得參考，本公司正密切關注中。
- e. Parsons 認為建立儲能備轉市場可激勵對儲能技術的投資，並為越來越依賴再生能源的電網系統提供平衡供需機制。台電公司成立電力交易平台，以新型態電力交易商業模式吸引民間投資儲能系統，投入電網提供輔助服務，印證了 Parsons 此一概念的可行性。此一創新做法於 2024 年 11 月 25 日榮獲美國研究暨顧問機構 Gartner

2024 全球電力及公用事業數位創新服務獎競賽首獎。

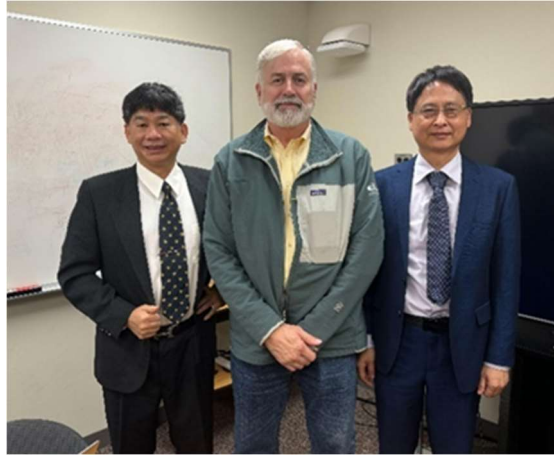


圖 3 本公司代表與 John Parsons 博士合影

3. Capacity Expansion Modeling for Low-carbon Electricity Markets and Asset Resilience to Extreme Weather Events [5]

這場技術交流的對象是資深研究科學家 Audun Botterud，是 MIT 資訊與決策系統實驗室(Laboratory for Information and Decision Systems)的主要研究科學家。他的研究目標是提高對電力市場中工程、經濟和政策之間複雜相互作用的理解，並最終實現成本效益高，且可靠低碳能源系統的轉型。因為對再生能源和儲能系統整合到更智慧的電網中特別感興趣，他的研究結合作業研究和決策科學的分析方法，以及電力工程和能源經濟的基本原理。更廣泛地說，研究重點是複雜系統中的不確定性決策。

電力系統在應對氣候變遷方面扮演重要角色。為了實現具有成本效益的去碳，必須發展電力市場以因應越來越多的間歇性再生能源。Botterud 藉由簡報和我們探討電力系統去碳相關的挑戰和解決方案，重點關注於美國的電力市場設計。美國電力行業正在經歷顯著的轉變，再生能源的發電比重不斷增加。然而，為了實現雄心勃勃的去碳目標，需要加速潔淨能源投資。

(1) 低碳電力市場

設計高效率的低碳電力市場，對於整合再生能源並確保電網可靠性非常重要。以下是需要注意的關鍵觀察結果：

- ◆ 觀察結果 1：需要更有效的工具來分析日益複雜的電力系統和電力市場。
- ◆ 觀察結果 2：需要結合各種不同學科專業知識，應對與零碳電力系統相關的挑戰。
- ◆ 觀察結果 3：需要了解零碳系統中的規劃、營運和市場價格動態。
- ◆ 觀察結果 4：儲能將在未來的電力市場中發揮越來越重要的作用。
- ◆ 觀察結果 5：輸電是低碳電力市場和更具韌性電力系統的關鍵推動因素。

(2) 電力市場設計選項

Botterud 認為有幾種電力市場設計選項可以促進低碳電力系統的發展：

- ◆ 增強型純能源市場：這包括諸如稀少性定價(scarcity pricing)和機會成本等機制。
- ◆ 改進的容量市場：靈活本地容量要求和容量訂購可以增強資源充足性。
- ◆ 長期能源市場：遠期合約和標售可以為潔淨能源投資提供長期確定性。
- ◆ 其他解決方案：擺動選擇權(swing options)和基於成本的監管可以補充現有的市場機制。

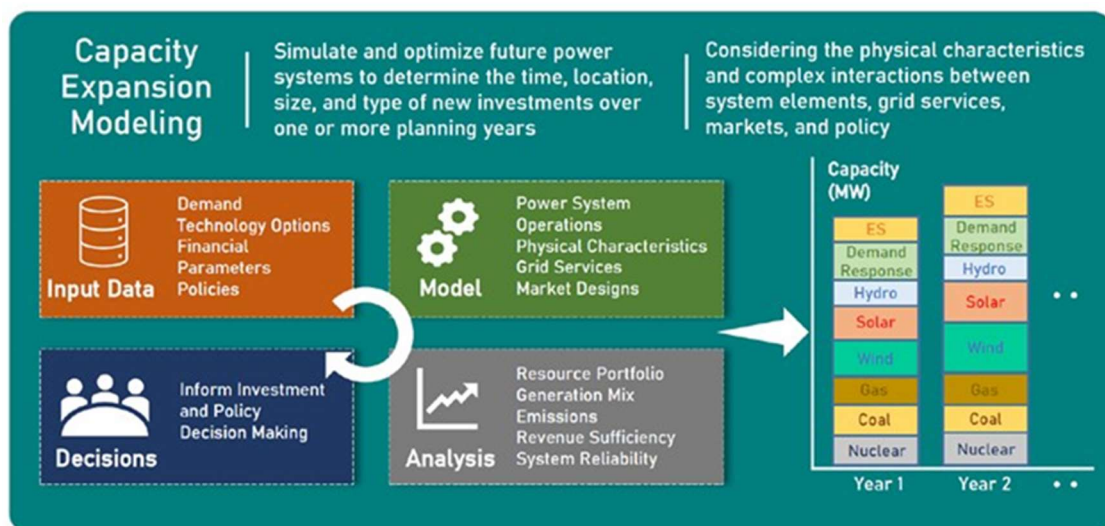


圖 4 容量擴充建模(Capacity Expansion Modeling, CEM)示意圖[5]

(3) 容量擴充建模

容量擴充建模(Capacity Expansion Modeling, CEM)是一種用於分析電力系統長期規劃的建模方法，用於評估不同發電技術的最佳組合、政策和市場設計的影響，在給定未來電力需求、燃料價格、技術成本與性能，以及政策與法規的假設下，模擬發電與輸電容量的投資。例如：我們應該採用什麼樣的發電機組組合來滿足負載需求？政策是否以不同的方式影響服務成本區域和競爭區域？圖 4 是容量擴充建模流程以及模擬結果示意圖，圖 5 則是典型的容量擴充模型模擬後輸出結果。

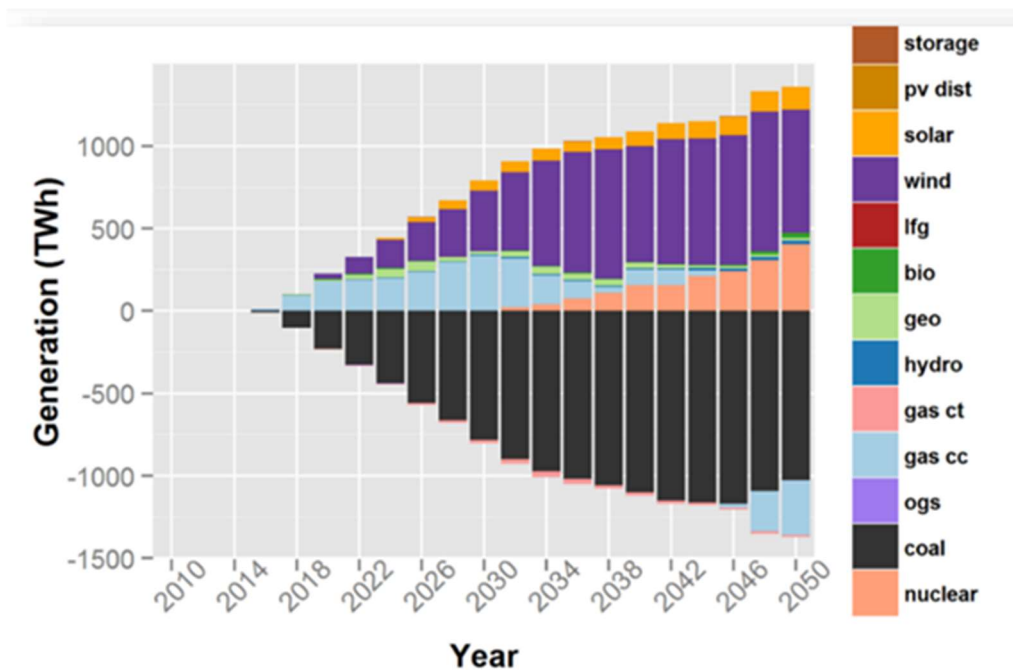


圖 5 典型的容量擴充模型的模擬輸出結果[6]

表 1 常見的各種容量擴充模型以及其開發者或擁有者[6]

Model	Writers or Owners
National Energy Modeling System (NEMS)	U.S. Energy Information Agency
Regional Energy Deployment System (ReEDS)	National Energy Renewable Laboratory
Integrated Planning Model (IPM)	ICF
Haiku	Resources for the Future
MARKAL (MARKet Allocation)	International Energy Agency
Resource Planning Model (RPM)	National Energy Renewable Laboratory
Aurora	EPIS
System Optimizer	ABB
Strategist	ABB
PLEXOS	Energy Exemplar

表 1 列出常見的各種容量擴充模型以及其開發者或擁有者。本公司和 EPRI 合作之 TPC ISSP(Integrated Strategic System Planning)專案，整合策略系統規劃與韌性分析，便是以 Taiwan REGEN 模型情境為基礎進行上位分析，模擬分析的結果當作 PLEXOS 模型的輸入，進行可靠性與資源適足性分析。

Botterud 認為為了更準確地模擬未來的低碳電力系統，需要改良 CEM。建議採取的行動領域包括：

- 掌握儲能在跨產業行業和地點的作用和價值。
- 改進 CEM 中氣候和天氣不確定性的呈現方式。
- 考慮製造挑戰和材料供應鏈限制。
- 在 CEM 中納入社會目標，例如能源正義和公平。
- 改進 CEM 中儲能的呈現方式，包括時間關聯和充電狀態管理。
- 納入不斷發展的市場營運，例如修訂後的備轉和靈活性產品。
- 加強產業、政府和學術界之間的合作，以有效地傳達 CEM 結果和見解。
- 增強 CEM 公式、計算效能和資料可用性。
- 改進 CEM 中天氣驅動系統影響的時間和空間呈現方式。

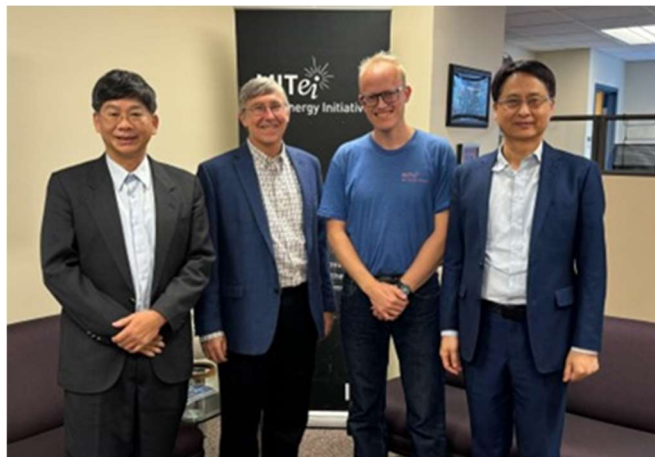


圖 6 本公司代表與 MIT 資深研究科學家 Audun Botterud(右二)合影，左二則是 2024 年 4 月 1 日起擔任 MITe 總監的 William H. Green 教授

(4) 小結

- a. 電力系統和電力市場攸關能源轉型，需要加快潔淨能源投資，並且必須解決與整合天氣驅動資源相關的挑戰。解決方案包括儲能、輸電、改進的演算法和電力市場設計。此外，儲能分析很重要，需要進行進一步研究以支持電力行業的去碳。
- b. Botterud 對設計美國高效率低碳電力市場的 5 項觀察結果，以及所提出可促進低碳電力系統發展的 4 種電力市場設計選項，值得我國設計高效率低碳電力市場之參考。

- c. Botterud 有關改良 CEM 所建議採取的各項行動領域，可供本公司未來採用類似建模工具之需求評估參考。

4. Improve Planning for Reliable, Low-Carbon Power Systems [7]

這場技術交流討論的對象是 Ruaridh Macdonald 博士，他是 MIT 能源計畫的能源系統研究主管，研究探討如何有效地讓電網和其他能源行業去碳，以及哪些技術和政策可能降低能源轉型的成本，同時確保電網的韌性和安全。他正在開發新的宏觀能源系統建模方法，允許在較長時間內優化較大的多行業能源系統。這使得能夠以更高的真實度對技術進行建模，並考慮能源供需的不同年份變化。Macdonald 是 GenX 和低碳電力與氫氣決策最佳化宏觀能源系統模型 Dolphyn (Decision Optimization of Low-carbon Power and Hydrogen Networks) 的主要共同開發者。以下說明他如何藉由 Dolphyn 進行低碳電力系統規劃研究及模擬成果。

(1) Dolphyn 簡介

能源投資規劃模型用於模擬和分析能源系統，因應新技術、政策和市場設計發展的情況。這些模型允許研究人員評估不同能源系統的成本、碳排放和可靠性。其中一個模型是 Dolphyn，這是在 MITeI 開發的多行業能源投資規劃模型。Dolphyn 建立在 GenX 架構之上，由六個行業模型組成，如圖 7 所示，這些模型共同優化以滿足各種商品的外部需求，行業包括：

- ◆ 電力
- ◆ 氫氣
- ◆ 天然氣
- ◆ 液態燃料
- ◆ 二氧化碳捕捉、運輸和儲存
- ◆ 使用碳捕捉與封存技術的生質燃料生產和使用

共同優化這些行業可以深入了解一個行業的需求如何影響其他行業的投資。

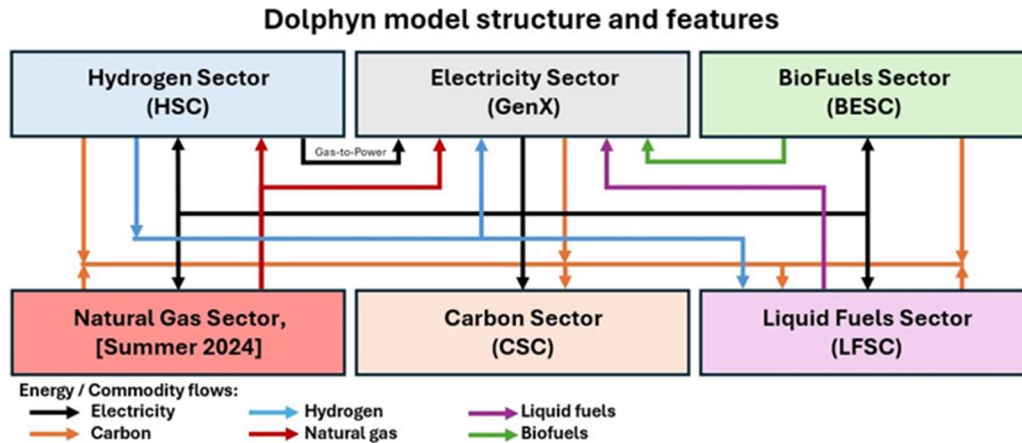


圖 7 利用由六個行業模型組成的 Dolphyn 進行能源投資規劃建模[7]

(2) Dolphyn 的工作原理

在 Dolphyn 中，使用者首先定義輸電線路和本地配電線路。接下來，電網中的每個區域都由年度電力和其他需求的時間序列定義。發電、儲能和輸電技術的定義基於其經濟、性能和可用性參數。公共政策和資源限制則是視區域或全系統的需要而納入。這些政策和限制可能包括：

- ◆ 容量儲備(Capacity reserves)
- ◆ 二氧化碳上限
- ◆ 二氧化碳價格
- ◆ 再生能源配額制度（Renewables Portfolio Standard, RPS）
- ◆ 未能提供服務之罰則

最後，Dolphyn 找到滿足需求的最便宜技術組合，並報告系統和區域結果，例如成本、平均價格、排放量和輸電損耗。

(3) Dolphyn 的應用

Dolphyn 用於模擬電力系統，並了解其因應各種因素的潛在發展，包括：

- ◆ 燃料和資本設備成本的變化
- ◆ 技術的改進
- ◆ 未來的政府政策，例如二氧化碳價格和再生能源指令

Macdonald 博士以利用 Dolphyn 模擬 2030 年台灣電網來評估儲能的作用為例，依現有政策之電網建模(Grid modelling)進行說明，如圖 8 所示：

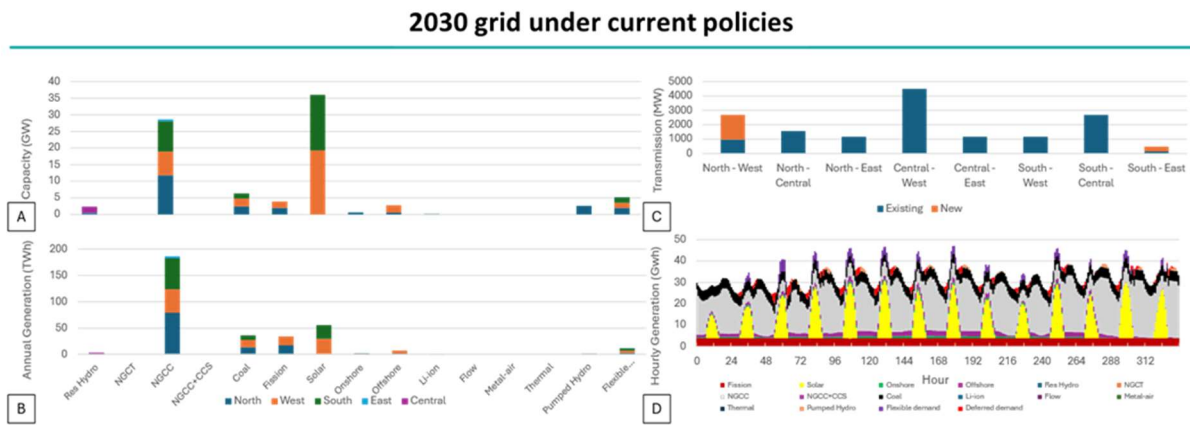


圖 8 依現有政策之電網建模(Grid modelling) [7]

- 由於價格低廉且靈活性較高，天然氣在競爭中優於儲能。
- 隨著台灣電網去碳，儲能將發揮更重要的作用，特別是鋰離子電池和廉價的長效型儲能。
- 儲能是對天然氣供應或價格中斷非常具有成本效益的對沖工具，但對輸電中斷的效果較差。
- 限制新的天然氣複循環發電廠數量將有助於儲能更早進入電網，進而減少任何一年中的投資。

在較低的碳排放限值下，儲能在台灣電網中變得很重要。在現行政策下，現有的鋰離子電池和抽蓄水力發電廠主要用作每日和每週儲能是足夠的。然而，在太陽能設定為 50GW 且離岸風電設定為 30GW 的情況下，鋰離子電池和液流電池是在較低排放限值下安裝最多的儲能技術，可以在多個時間尺度上儲存能量。鋰離子電池、氧化還原液流電池和金屬空氣電池(metal-air batteries)的組合，有助於滿足不同的功率和能量需求。

(4) 電網建模的注意事項

停電和極端天氣是電網建模中的重要考慮因素，可以透過多種方式納入。由於 Macdonald 博士本身是 TIGER 研究團隊的成員，他指出在對台灣的研究中，評估了北部

地區與電網之間發生兩天和兩週的輸電故障，以及天然氣進口減少 1 到 28 天（50%或 100%）的情況。結果顯示：

- 輸電故障對總成本沒有顯著影響。
- 天然氣進口中斷的影響要大得多，藉由儲能可以減輕這種影響。
- 在天然氣進口中斷 50%的情況下，熱儲能(thermal storage)成為電網的重要組成部分，可減少停電次數 25%，但總體成本節省有限。
- 在天然氣進口中斷 100%的情況下，金屬空氣電池將停電次數減少到幾乎為零，在除了 28 天中斷以外的所有情況下，年成本都降低了 10-20%。

納入關鍵設施並評估額外的基礎設施，對如何減少電網特定部分的停電也很重要。

在對電力系統進行建模時，必須考慮供需的不同年份變化。對電網進行優化時，如果考慮的年份太少，就會低估企業的電力需求並高估儲能的價值。必須對電網進行至少十年的評估，以考慮不同年份變化。對兩個特定月份的電網進行優化，其結果與考慮所有 23 年的電網設計的結果相差不到 1%。

此外，在技術模型納入更多細部因素也很重要，如此一來我們的評估就會涵蓋運轉限制條件，而不只是成本。例如，現有模型假設大型熱儲能(thermal storage)的充放電容量是恆定的。然而，對於許多更便宜的技術來說，情況並非如此，這導致了運營支出(OPEX)與資本支出(CAPEX)之間的權衡，而目前的模型沒有評估這種權衡。

(5) 多行業系統和方法開發

Dolphyn 被用於研究氫氣和生質燃料對脫碳(decarbonized)狀況下的美國國家電網設計的影響。該模型涵蓋了美國大陸的 64 個區域和 7 年的數據，我們發現需要 10 年以上的數據來評估可靠性。

該研究調查了電力、氫氣、二氧化碳捕捉、運輸和儲存，以及使用碳捕捉與封存技術的生質燃料生產和使用行業之間的相互作用。藉由分析接近最優的解決方案，研究人員確定了各種可行的電網設計，並評估了資源之間的相關性。主要見解包括：

- 擴建輸電線路有助於鼓勵發展陸域風電。

- 安裝更多氫氣電解槽會增加電力需求，導致太陽能 and 陸域風電的裝機容量增加。
- 氫氣的靈活性降低了對電池的需求。
- 由於這些因素，太陽能和電池容量呈負相關，但在沒有燃氫發電和氫能儲存的情況下，這種趨勢則會逆轉。

(6) 未來的研究方向

- 優化多行業能源系統的投資，考慮一個行業的政策對電網其他部分的影響，並將更多技術細節納入容量擴充模型。
- 藉由開發更快解決十年容量擴充問題的方法、生成具有不同年份變化的合成時間序列、找出對決策有重大影響的年份和天氣模式，以及使用基於代理(Agent-based)的模擬來評估電網在發展過程中的韌性，來解決不同年份變化和電網可靠性問題。
- 研究團隊正在開發和驗證一個設施級優化模型。該模型包括以下組件：
 - ◆ 電解槽
 - ◆ 壓縮機
 - ◆ 氫氣儲存
 - ◆ 液化
 - ◆ 液態氫氣緩衝器
 - ◆ 卸料站

該模型可以模擬設施的功率消耗、儲能狀態和輸出，允許對整合系統進行詳細分析，包括對高溫核電廠和高溫蒸汽電解槽 (high temperature steam electrolyzer)等組件的溫度和流速優化。

高效率運營大規模設施將涉及複雜的運營支出與資本支出權衡。例如，生產更多氫氣可以透過安裝更多電堆模組(stacks)，或以更高的電流密度運行來實現。雖然較高的電流密度會降低電氣效率，但安裝更多電堆模組則會降低平均電流密度，兩者之間如何取捨是一種挑戰。

以高電流密度運行電解槽會在其整個生命週期內降低其效率。當考慮到退化時，這

種對價格的敏感性變得更加明顯，尤其是在電解槽壽命的早期，這進一步區分了高資本支出、長壽命電堆模組和短壽命電堆模組。

此外，在幾乎去碳和完全去碳的情況下，氫氣儲存看起來有很大差異。在現有排放政策的情況下，氫氣生產和地上儲存與氫氣需求位於同一地點。然而，在零排放的情況下，氫氣將經由管道輸入地質儲存場(geological storage)或從地質儲存場輸出，透過這種高效率、大規模的氫能輸送與儲存方式，對間歇性再生能源和電力儲能的依賴將減半。



圖 9 本所代表與 Ruaridh Macdonald 博士合影

(7) 小結

- a. Macdonald 博士簡介其在改進能源投資規劃模型方面的研究，特別關注低碳電力系統的發展。他採用 MIT 開發的 Dolphyn 多行業模型模擬電網，其中包含多種技術（風能、太陽能、儲能、天然氣）、政策（二氧化碳限值、再生能源指令）和極端事件（停電、資源中斷）。關鍵重點是提高模型的逼真度，以考慮非線性細節，例如熱儲能(thermal storage)與充電狀態相關的性能，以及長期影響，例如資源可用性和需求的不同年份變化，這會顯著影響最佳電網設計和資源分配。最終目的在提供更準確和詳細的模型來指導可靠和永續的能源系統規劃。
- b. Macdonald 博士以利用 Dolphyn 模擬 2030 年台灣電網來評估儲能作用的相關結果，建議後續本公司相關業務同仁可透過本公司和 EPRI 合作之 TPC ISSP 專案計畫，進

行交互比對驗證，並了解其異同處之背後影響因素。

5. Project Presentation on Carbon Capture

這場技術交流的對象是 T. Alan Hatton 教授，他是一位非常和藹的長者，他表示父親自南非國營電力公司 Eskom 退休，對台灣也有一定認識，因此對我們的來訪表示歡迎。他在南非取得學士和碩士學位，於 1981 年取得威斯康辛大學博士學位，1982 年加入 MIT 化學工程系迄今，是該系的終身教授，也是化學工程實務 David H. Koch 學院的主任。以下重點說明 T. Alan Hatton 教授分享在碳捕捉技術方面的研究工作以及交流討論。

全球暖化是當今世界面臨的一項重大挑戰。在過去幾十年中，全球氣溫顯著上升，導致野火、乾旱和洪水等極端氣候事件更加頻繁。科學證據顯示，氣溫上升與二氧化碳排放量之間存在直接關聯。如果不採取措施減少二氧化碳排放，到本世紀末，全球氣溫可能會上升攝氏 4.5 度，造成災難性的後果。此外，海洋吸收了大量的二氧化碳，導致海洋酸化，威脅海洋生態系統的健康。

為了減緩氣候變化，需要採取多種策略，包括從化石燃料轉向再生能源、碳捕捉、利用和封存（CCUS）等。現有的碳捕捉技術可分為 3 大類，包括點源捕捉、直接空氣捕捉(Direct Air Capture, DAC)和直接海洋捕捉(Direct Ocean Capture, DOC)。

- ◆ 點源捕捉：從發電廠和工業設施等排放源捕捉二氧化碳。
- ◆ 直接空氣捕捉：從大氣中捕捉二氧化碳。
- ◆ 直接海洋捕捉：從海水中捕捉二氧化碳。

直接海洋碳捕捉的經濟和環境影響

經過進一步調查，我們得知直接海洋碳捕捉 (DOC) 是一種相對較新的技術，旨在從海水中去除溶解的二氧化碳，以便儲存或再利用，這項技術仍處於早期發展階段。以下是世界經濟論壇針對 DOC 與直接空氣碳捕捉(DAC)的效率和成本效益比較[8]，「由於海洋中的二氧化碳含量是大氣的 150 倍，因此 DOC 可能比 DAC 更具成本效益。Brineworks 是 DOC 技術的先驅公司之一，該公司聲稱其方法的成本低於每噸二氧化碳 100 美元，

不到 DAC 典型成本的一半。」

DOC 技術也有可能透過副產品產生收入。例如，Brineworks 的方法會產生氫氣作為副產品，如圖 10 所示，隨著對綠色氫氣的需求增加，氫氣會成為一種有價值的資源。

就環境效益而言，DOC 具有對負排放和減緩氣候變遷的潛力。這是因為 DOC 從海水中去除溶解的碳，能使海洋從大氣中吸收更多的二氧化碳。某些 DOC 技術，例如 Ebb Carbon 的技術，還有助於降低海洋酸度。海洋酸化會對魚類和貝類等海洋物種產生負面影響。Ebb Carbon 的工藝還會產生碳酸氫鹽，據稱碳酸氫鹽是一種穩定的二氧化碳儲存形式，可儲存 10,000 年。

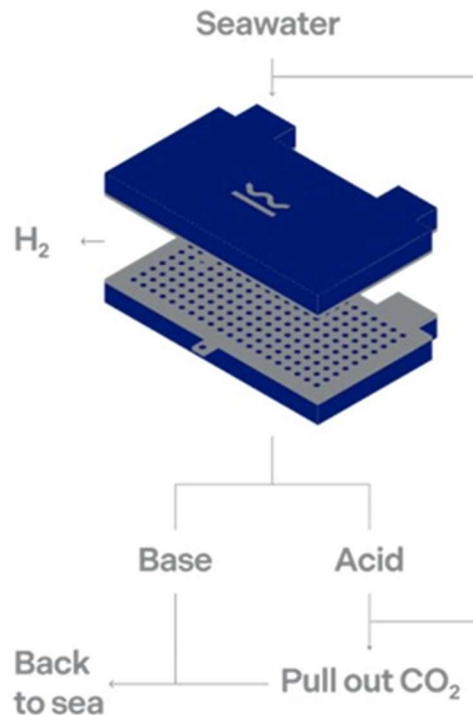


圖 10 Brineworks 的 DOC 方法，捕捉碳並且產生氫氣副產品[9]

(1) 電化學調變碳捕捉

Hatton 的研究重點是開發電化學調變的碳捕捉技術，這是一種利用電化學過程捕捉和釋放二氧化碳的方法。與傳統的熱再生胺捕捉技術相比，電化學調變碳捕捉技術具有多項優點，包括：

- ◆ 等溫(isothermal)操作：無需外部熱源。
- ◆ 模組化設計：易於安裝和擴充。
- ◆ 能源效率高：能源消耗低於傳統方法。
- ◆ 可使用非碳能源：可由再生能源驅動。

電化學調變碳捕捉技術可應用於各種規模和濃度的二氧化碳排放源，包括：

- ◆ 發電廠
- ◆ 工業排放源（如鋼鐵、水泥工業）
- ◆ 移動排放源（如卡車、輪船、火車和汽車）
- ◆ 室內環境（用於調節二氧化碳濃度）
- ◆ 直接空氣捕捉
- ◆ 直接海洋捕捉

(2) 電化學調變碳捕捉的機制

電化學調變碳捕捉技術利用**氧化還原**活性物質的氧化態變化來調節二氧化碳的捕捉和釋放。透過施加電位，可以改變氧化還原活性物質的氧化態，因而改變其對二氧化碳的親和力。

(3) 電化學調變碳捕捉的類型

電化學調變碳捕捉技術主要有三種類型：

- ◆ 直接法：氧化還原活性物質直接與二氧化碳反應形成錯合物(Complexes)。
- ◆ 半直接法：氧化還原活性物質在還原時被質子化，釋放氫氧根離子，氫氧根離子與二氧化碳反應形成碳酸鹽或碳酸氫鹽。
- ◆ 間接法：電化學過程用於再生胺溶液，胺溶液用於捕捉二氧化碳。

(4) 提高電子利用效率

為了提高電化學調變碳捕捉技術的能源效率，需要提高電子利用效率，即每個轉移的電子捕捉的二氧化碳分子數。

(5) Verdox 公司碳捕捉技術[10]

Hatton 也是 Verdox 公司的共同創辦人，致力於將電化學調變碳捕捉技術商業化。該公司開發了一種電化學調變碳捕捉技術，該技術具有多項優點，包括高能源效率、模組化設計和多功能性，並且開發了一種用於高溫碳捕捉的熔鹽溶劑技術。以下是 Verdox 技術特點與傳統碳捕捉技術的比較。

Verdox 公司致力於開發電化學二氧化碳捕捉技術，與傳統方法（主要是需要熱再生的胺基系統）相比，Verdox 的技術具有多項優勢。以下總結了 Verdox 的主要技術特點，以及它們與傳統方法的不同之處：

Verdox 技術特點：

- 電化學調控：Verdox 不使用熱能來釋放捕捉的二氧化碳，而是利用電力來活化和再生捕捉材料，因此能夠精確控制捕捉和釋放過程。
- 等溫操作：Verdox 系統在恆定溫度下運行，無需外部熱源，也免除了大型熱質量加熱和冷卻帶來的能量損失。這使得系統更加精緻、高效和迅速響應。
- 低電壓需求：Verdox 技術使用低電壓，進一步提高了能源效率，並使其與再生能源相容。
- 模組化設計：Verdox 系統的模組化特性使其易於安裝、擴充和維護。單一組件可以隨插即用(plug and play)，亦即可在不影響整個單元運行的情況下進行更換，進而提供更大的靈活性。
- 多樣化的應用：Verdox 的電化學捕捉系統適用於各種二氧化碳來源，包括燃燒煙氣、工業廢氣、室內環境和直接空氣捕捉。該技術可以根據特定需求進行調整，例如去除二氧化硫，同時保留二氧化碳。

表 2 Verdox 技術與傳統碳捕捉技術的比較

項目	傳統碳捕捉技術	Verdox 的技術
能源來源	主要依賴熱能（通常來自蒸汽）來再生捕捉材料	使用電力，可以使用再生能源，並提高整體能源效率
操作溫度	傳統的胺基系統需要較大的溫度波動（從 50-60°C 左右到 120°C）才能釋放二氧化碳	等溫運行，無需加熱和冷卻循環
系統複雜性	通常涉及大型熱質量和複雜的熱整合，使其 體積龐大 且響應速度較慢	模組化設計簡化了安裝、操作和維護
靈活性和可擴充性	靈活性通常較低，擴充也更具挑戰性	模組化和電化學方法為各種應用提供了更大的適應性和可擴充性

表 2 是 Verdox 技術與傳統碳捕捉技術的比較，Verdox 的技術以電化學調控、等溫操作、低電壓需求和模組化設計為重點，為傳統碳捕捉技術提供了一種很具前景的替代方案。這些特性使其能夠為各種應用提供更高效、更靈活和更永續的二氧化碳排放捕捉和管理解決方案。

(6) 碳捕捉技術的未來發展方向

Hatton 教授認為未來碳捕捉技術的發展方向包括：

- ◆ 進一步提高電子利用效率
- ◆ 開發更穩定、更耐用的氧化還原活性物質
- ◆ 降低電化學調變碳捕捉技術的成本
- ◆ 擴大電化學調變碳捕捉技術的應用範圍

(7) 小結

- a. 電化學調變碳捕捉技術是一種充滿前景的碳捕捉技術，具有多項優點，包括等溫操作、模組化設計、能源效率高和可使用再生能源。隨著技術的進一步發展和成本的降低，電化學調變碳捕捉技術可望在減緩氣候變化方面發揮重要作用。需要注意的是，Hatton 介紹了 Verdox 技術的優勢，看起來具有一定應用潛力。然而碳捕捉技術眾多，包括化學吸收法、物理吸收法、薄膜法等，此新興的碳捕捉技術可供相關同仁評估與參考，以更全面掌握碳捕捉技術最新發展，俾利提供公司未來推動相關專案之決策參考。
- b. 正如世界經濟論壇 2023 年關於自願碳市場(Voluntary Carbon Market)的報告所指出的，海洋、森林和其他天然碳匯是「當今為數不多已準備好進行碳移除的解決方案」。如果未來 DOC 捕捉碳的成本可以大幅降低，且會產生氫氣作為副產品，對碳權取得不易，且大部分的氫氣需要仰賴進口的我國而言，採用 DOC 製造負碳排放以取得碳權，同時在地產氫降低進口及輸送成本，或許是個值得關注的解決方案之一。

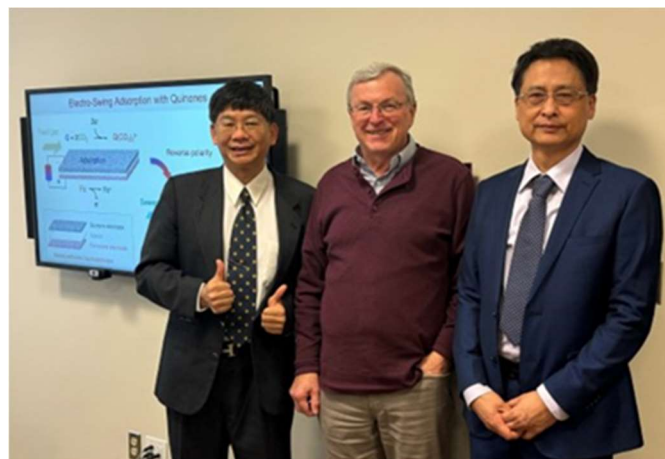


圖 11 本所代表與 T. Alan Hatton 教授合影

6. Innovation at Interfaces: Advanced Technologies for Decarbonization and Energy Transition [11]

這場技術交流的對象是 MIT 機械工程系的 Kripa Varanasi 教授，他曾擔任 GE 公司

全球研究中心的首席研究員及專案負責人。在 GE 公司期間，因其傑出貢獻獲得多項獎項，包括最佳專利獎、最佳技術專案獎和領導力獎。Varanasi 研究團隊致力於應對各產業的社會挑戰，包括能源、水、生物醫學、交通運輸、農業和消費性產品。團隊的研究重點是透過介面工程(Interfacial Engineering)革新產業，提升效率、發展永續製程並改善人類生活。該團隊利用對介面物理化學交互作用的理解和控制，設計出跨越多個產業的突破性解決方案。他們專精於操控介面交互作用以達成變革性進展。

Varanasi 研究團隊運用其在介面工程方面的專業知識，應對能源和發電領域的各種挑戰，以提高以下領域的效率、促進永續和改善整體性能，說明如下：

(1) 研究架構

Varanasi 研究團隊的研究架構包含對基本原理的深入機制理解，結合新穎的實驗、比例定律和設計規則，以開發創新產品和製程。他們應用熱力學來瞭解自由能障礙並探索動力學途徑，以達成預期的成果。

(2) 創新走向市場

該團隊透過促進創業精神和建立新創公司，將其研究積極轉化為現實世界的應用，以將其創新推向市場。他們建立一個強大的流程，可以將創新從機會階段推進到重點研發、試驗規模開發，最後是大規模商業化。方法包括與策略夥伴合作以執行和部署解決方案，最終創造獲利並造福客戶。

(3) 介面工程的應用實例

Varanasi 研究團隊開發了幾項值得注意的技術：

極度不沾濕表面

這種表面可大幅地減少摩擦力並增強各種製程，例如冷凝、濕度控制和分離。應用包括非潤濕結構(non-wetting fabrics)和發電廠中增強的冷凝效率。以下探討其提升發電廠整體效率的概念，圖 12 是從蒸汽控制、超級冷凝器和超級鍋爐等 3 大面向，強化火力發電機組整體效率之示意圖，摘要如下：

- 從根本上改變蒸汽與表面的相互作用：透過修改冷凝器組件的表面特性，可以

促進滴狀凝結，其中蒸汽凝結成明顯的液滴，而不是形成連續的薄膜。

- 滴狀凝結比薄膜狀凝結傳熱更有效：這會導致顯著的效率提升，Varanasi 聲稱約可達 8-10%。對於 1000MW 的發電廠，這相當於節省約 100MW 的能源。
- 堅固的奈米級塗層：使用諸如起始化學氣相沉積 (initiated chemical vapor deposition, iCVD) 之類的技術，可以在表面上形成耐用的非潤濕塗層。這些塗層有助於實現滴狀凝結，並提高蒸汽循環中的熱傳遞效率。
- 低表面張力流體：iCVD 塗層還可以增強低表面張力（小於 20 mN/m）流體的滴狀凝結，而提高液化過程的效率。這些塗層可以使熱傳遞提高 7 倍。

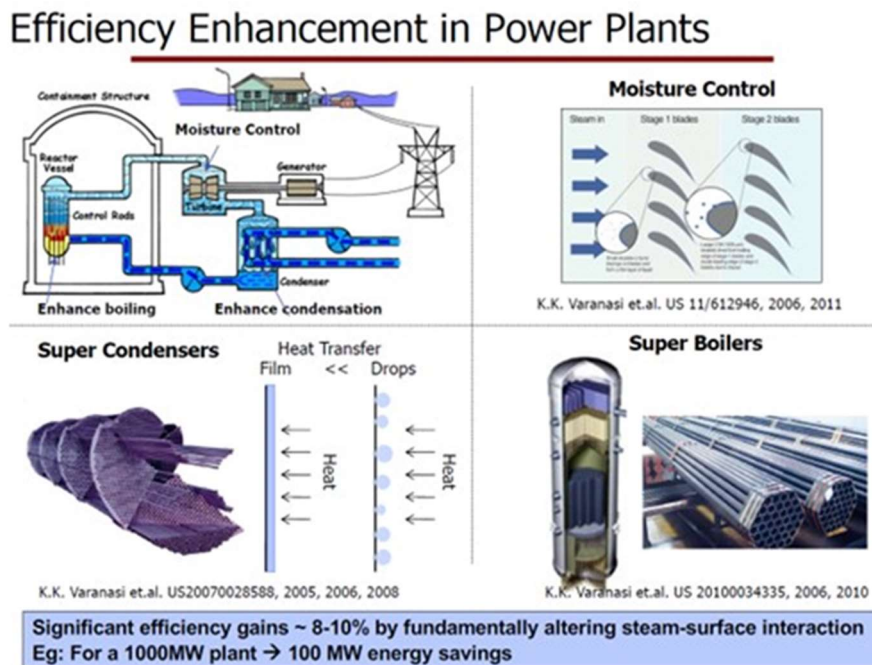


圖 12 從蒸汽控制、超級冷凝器和超級鍋爐等強化火力發電機組整體效率之示意圖[11]

Varanasi 也介紹了一些如何實現增強凝結的例子：

- ◆ 非潤濕結構：可用於促進滴狀凝結並改善熱傳遞。
- ◆ 非潤濕渦輪葉片：在蒸汽渦輪葉片上使用奈米工程非潤濕陶瓷表面，可以透過改變蒸汽和葉片表面之間的交互作用來提高約 5%的效率。

潤滑劑浸漬表面 (LIS)：

這種表面可防止黏性流體的黏附，解決流動保證、防冰和水合物緩解方面的挑戰。這項技術促成了 LiquiGlide 的開發，這是一種成功的產品，已被高露潔等公司採用。

Varanasi 研究團隊積極參與開發減緩氣候變遷的解決方案，說明如下：

碳捕捉和轉化

點源捕捉、直接空氣捕捉：

研究團隊正在開發用於二氧化碳捕捉和轉化的創新技術。他們開發了一種靜電霧捕捉系統，用霧和空間電荷注入取代了傳統的填充床塔，進而降低了成本並可以使用毒性較低的吸附劑。這項技術適用於點源捕捉、直接空氣捕捉，其優點包括：

- 更大的介面面積以增強吸收：該系統利用液滴霧而不是傳統的填充床吸收器。

這在含 CO₂ 氣流和洗滌液之間產生了顯著更大的介面面積，而獲得更有效的 CO₂ 吸收。Varanasi 教授提供了一個定量比較，指出與填充床吸收器中典型的 600 μ m 薄膜相比，小液滴尺寸的介面面積/體積比(interfacial area per volume, A/V) 大很多。這種增強的吸收效率轉化為更小的吸收塔尺寸，因而降低了資本支出。Varanasi 教授以美國德州 PetraNova 計畫碳捕捉廠為例，說明燃燒後(Post combustion)的碳捕捉技術效果有限並且昂貴，如圖 13 所示。

- 環境毒性較低的催化劑：該系統能夠以高液氣比(L/G)運轉，允許在洗滌液中使用環境毒性較小的催化劑。與通常依賴更苛刻的化學物質來捕獲 CO₂ 的傳統系統相比，這是一個顯著的優勢。
- 降低資本支出和佔地面積：用靜電霧捕捉系統替換大型填充床塔可顯著降低成本。研究團隊估計，安裝在一座 400MW 發電廠的系統尺寸可縮小 5 倍，成本可降低 2.6 倍。這種較小的佔地面積也使該系統更適合於改造現有設施，如圖 14 所示。

- CO₂ 氣流輸入的靈活性：靜電霧捕捉系統在處理不同的 CO₂ 氣流輸入方面具有靈活性，減少了對昂貴且能源密集型運輸和壓縮步驟的需求。這對於分散的 CO₂ 排放者特別有利。
- 直接空氣捕捉(DAC)的應用潛力：基於霧的方法在降低 DAC 系統的資本支出方面也具有巨大潛力，而 DAC 系統成本是目前朝向負碳排放轉型的瓶頸。靜電霧捕捉系統可以與 DAC 技術整合，以提高其效率並在美國環境保護署(EPA)排放限值內實現大規模部署。

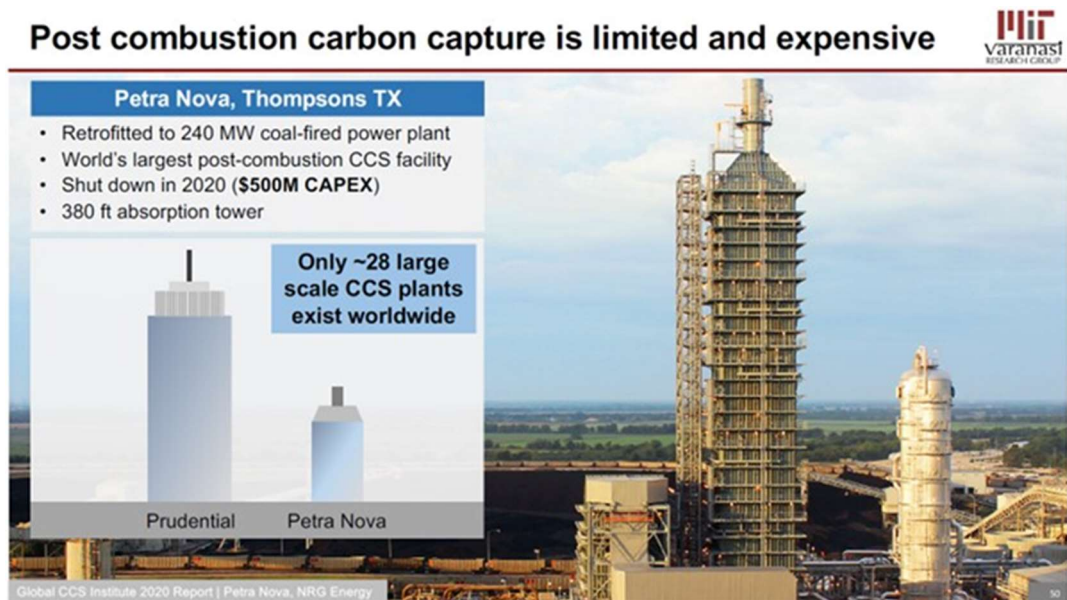


圖 13 美國德州 PetraNova 計畫碳捕捉廠，採燃燒後碳捕捉技術，效果有限並且昂貴[11]

Concept: Replace packed bed towers with mist

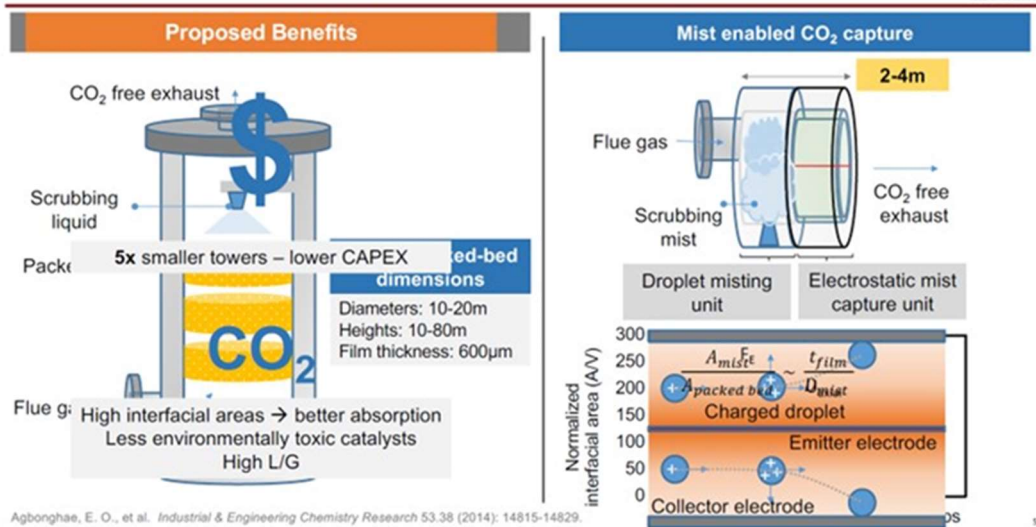


圖 14 以霧捕獲系統替換大型填充床塔可縮小設施所需空間，且顯著降低成本[11]

直接海洋捕捉(DOC)：

該團隊意識到海洋作為碳匯(carbon sink)的潛力，開發了一種無膜 pH 值擺動碳捕捉方法，該方法使用電化學活性材料從海水中釋放二氧化碳。這種方法不太複雜、可擴充，並且電化學能耗(electrochemical energy cost)可低到 2.6 GJ/tonne CO₂。

氫氣生產與儲存：高效電解槽和屏障

Varanasi 研究團隊意識到氫氣作為潔淨能源的潛力，正在開發提高氫氣生產和儲存效率的技術，說明如下：

- 無膜電解槽：這項創新技術使用主動氣泡捕捉來增加催化面積、免除對膜的需求並降低離子電阻，進而降低資本支出和平均成本。
- 氫氣屏障：為了解決氫脆問題，該團隊正在開發使用潤滑劑浸漬表面的自修復氫氣屏障，以大幅減少氫氣滲透到材料中，增強氫氣基礎設施的安全性和使用壽命。(註：氫脆 (hydrogen embrittlement) 是指金屬材料在冶煉、加工、熱處理等過程中，或在含氫介質中長期使用時，材料由於吸氫或氫滲透而造成機械性能嚴重退化，發生脆斷的現象。)

- 連續甲烷熱解：該團隊正在探索一種永續的氫氣生產方法，正在開發用於甲烷熱解的活性液態金屬液滴反應器，以在沒有溫室氣體排放的情況下實現永續的氫氣生產，提供一種可擴充的模組化方法，無需移動組件，並且具有與現有系統整合的潛力。

永續熱能儲存

Varanasi 團隊意識到冷卻的需求日益成長及其對電網的影響，正在開發永續熱能儲存解決方案：

- 冷卻系統的能源效率改進：該團隊利用相變材料(Phase Change Material, PCM)的高儲能密度、溫度調節和可重複使用性，正致力於將 PCM 整合到建築設計中，在離峰時段儲存熱能並在尖峰需求期間釋放，實現高效離峰充電和尖峰放電，而減少能源消耗並促進電網穩定性。
- 非鋰離子蓄電池：Varanasi 研究團隊還透過一家新創公司 Alsym Energy 參與開發非鋰離子充電電池。Alsym Energy 專注於開發高性能、低成本、不易燃且無毒的電池，可用於固定儲能、海運和海事應用以及電動車。

太陽光電運維

- 太陽光電板靜電除塵：Varanasi 研究團隊正在應對太陽能電池板上積塵的挑戰，積塵會顯著降低效率。他們開發了一種不需要水且非接觸式的靜電除塵方法，該方法利用主動式感應電荷(Active Charging via Induction)使得灰塵顆粒帶有電荷，而得以被清除。這項創新可以提高太陽能板的效率，減少清潔用水量，有助於太陽光電系統的運維。

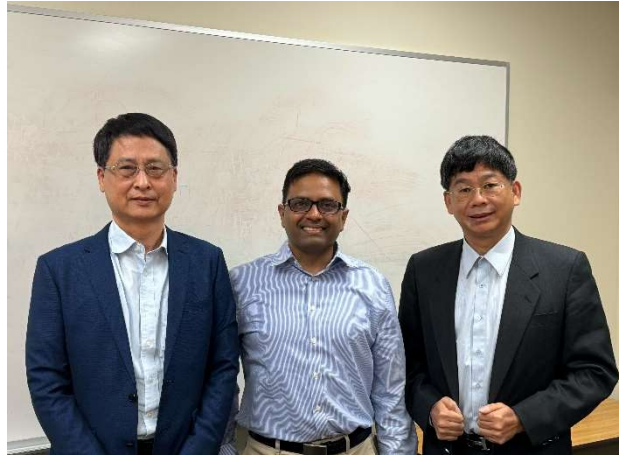


圖 15 本所代表與 Kripa Varanasi 教授合影

(4) 小結

- a. Varanasi 研究團隊在介面工程方面的開創性工作展現了他們致力於為全球挑戰開發永續和高效解決方案的承諾，其跨學科研究和創新方法有可能徹底改變多個產業，並為更永續的未來做出貢獻。
- b. 我們在其簡報過程中注意到該研究團隊和美國 DominionEnergy 及法國電力公司 EDF 在發電廠議題上有合作計畫，顯示其研究成果具備實際應用的潛力。在碳捕捉技術方面，Varanasi 教授指出了靜電霧捕捉系統的潛在優勢，然而這項技術仍處於開發階段，需要進一步的研究、先導計畫測試和技術經濟分析來充分驗證這些優勢，並評估該系統商業可行性，值得密切關注其後續發展。

7. Lab Visit & Project Presentation on Energy Storage [12]

這場技術交流的對象是 Fikile Brushett 教授，探討氧化還原液流電池(Redox Flow Battery, RFB)技術：一種用於電網規模儲能，頗具前景的技術。Brushett 教授首先藉由簡報概述開發氧化還原液流電池的動機，如圖 16 所示。其基本原理以及作為電網級儲能技術的潛力如圖 17 所示。RFB 是一種電化學儲能系統，近年來因其獨特的特性而備受關注，包括能量和功率的解耦合、簡單的製造、高耐用性和低維護成本，以及位置獨立性。



圖 16 Fikile Brushett 教授藉由簡報概述開發 RFB 的動機

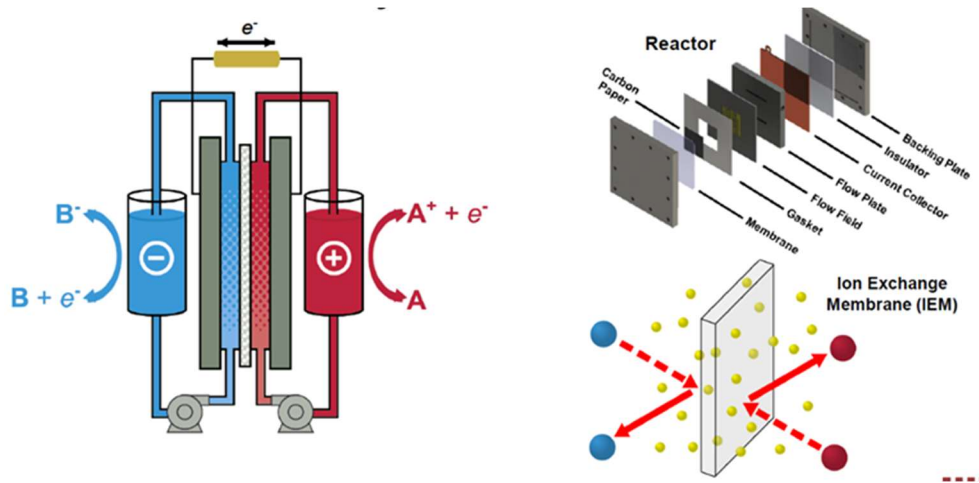


圖 17 RFB 的基本原理示意圖[12]

隨著我們朝向以再生能源為基礎的能源系統轉型，電網儲能變得越來越重要。在電網儲能技術中存在眾多選擇，Brushett 教授認為 RFB 具備許多優點，使其成為電網規模應用中頗具前景的技術。

(1) RFB 的基本原理

RFB 是一種電化學儲能系統，其基本工作原理涉及含有活性物質電解質的流動，這些活性物質經由氧化還原反應（還原和氧化）以儲存和釋放能量。

RFB 由一個離子交換膜 (IEM) 隔開的兩個反應器構成。電解質由溶劑、支持電解質和活性物質組成，在反應器中循環。當電解質流過反應器時，活性物質在電極處經由氧化還原反應而產生電能。IEM 允許離子通過以保持電荷平衡，同時防止兩種電解質混合。

RFB 中的能量和功率大小是可以分開設計的。電解質盛放罐的尺寸決定了電池的儲能容量，而反應器的尺寸和電解質的流速則決定了電池的功率輸出。這種解耦合特性允許靈活的設計以滿足特定的應用要求。

RFB 被認為特別適用於電網儲能應用，因為具有以下幾個優點，包括：

- ◆ 能量和功率解耦合。
- ◆ 簡單的製造工藝。
- ◆ 高耐用性和低維護要求。
- ◆ 位置獨立性，意味著可以安裝在不同的位置。

(2) 邁向具有成本競爭力的 RFB 系統之路

為了使 RFB 成為具有成本競爭力的儲能解決方案，需要特別關注以下領域的研發：

- ◆ 開發廉價的水性氧化還原化學物質，包括無機、有機和配位化合物(coordination compounds)。
- ◆ 改良化學和組件的開發，以提高性能和降低成本。
- ◆ 測試用原型電池、電堆和系統的開發，以優化設計和運轉。
- ◆ 流程成本和技術經濟建模，以評估經濟可行性和確定改進領域。

(3) 邁向廉價電荷儲存材料之路

開發具有成本效益的電荷儲存材料對於 RFB 的廣泛應用至關重要。以下有兩條具前景的途徑，包括：

- 商品化規模的無機材料：利用大量、材料生產基礎設施以及廢物回收/再利用的優勢。挑戰包括升級要求（例如雜質）、技術屬性（例如效率、可逆性）以及其他系統組件的成本。
- 藉由有機化學“工程化”分子：提供可調的技術性能、豐富的組成元素以及大規模生產的潛力。挑戰則包括分子穩定性以及所需高性能目標的潛在成本和可擴充性。



圖 18 本所代表與 Fikile Brushett 教授及兩位協助實驗室導覽的研究生合影

(4) 小結

RFB 是一種具前景的電網級儲能技術，未來有可能應對永續能源經濟挑戰。Brushett 教授藉由持續的研究和開發工作，著重在低成本化學品、先進組件和系統優化。RFB 具備為更清潔、更可靠和更永續的能源未來做出重大貢獻的潛力，後續發展值得持續關注。

8. Measurement and Mitigation Techniques for System Strength Shortfall [13]

這場技術交流討論的主題是確保電網可靠運作的測量與改善措施，對象是 MITeI 的研究科學家 Deep Deka 博士，他的研究著重在資料驅動的可靠性優化、未來電網系統的脫碳化、分散式能源資源的聚合控制，以及網路實體安全。Deka 博士在這次交流中探討在面對電網各式各樣新型感測器，如何設計**理論導引機器學習**（physics-informed machine learning）演算法，在再生能源和智慧設備不斷增加下，利用電網數據進行估測和電網最佳化，如圖 19 所示。為強化電網的韌性，著重在以下兩個主要應用：

- ◆ 配電網的狀態估測
- ◆ 不確定性下的輸電網最佳化

- **New sensors:**
 - Smart meters, PMUs, micro-PMUs, IoT
 - **Big Data:** High fidelity measurements
 - Over 2500 networked PMUs
 - Realistic issues: noise, limited sensor presence, privacy
 - **Black Box data-science tools not safe**



圖 19 現代電網使用各式新型感測器，如何利用電網數據進行電網最佳化是項挑戰[13]

(1) 配電網的狀態估測

配電網是電力傳輸線路的末端，由於分散式能源和電動車的興起，正在朝向雙向能量流型態轉變。這種轉變帶來了新的營運模式，如虛擬電廠和營運範圍。然而，這也產生了對估算計量(metering for estimation)和協調(coordination)的需求。

囿於低壓電網中感測器數量有限，準確估測電網狀態的挑戰性極高。機器學習演算法可以利用有限的測量，如節點電壓和注入(injections ($S=P+j Q$))，來學習電網拓撲結構和識別故障。

遞迴分組(recursive grouping)演算法可用於估測運轉拓撲和線路阻抗，利用配電網中有效電阻的加法特性，該特性意味著配電網中兩個節點之間的有效電阻等於連接這兩個節點的各個線段有效電阻之和。此特性用於遞歸分組算法，以從已知的有效阻抗中學習配電網的拓撲和距離。該演算法首先識別兄弟節點，然後引入父節點，最後更新節點之間的距離。

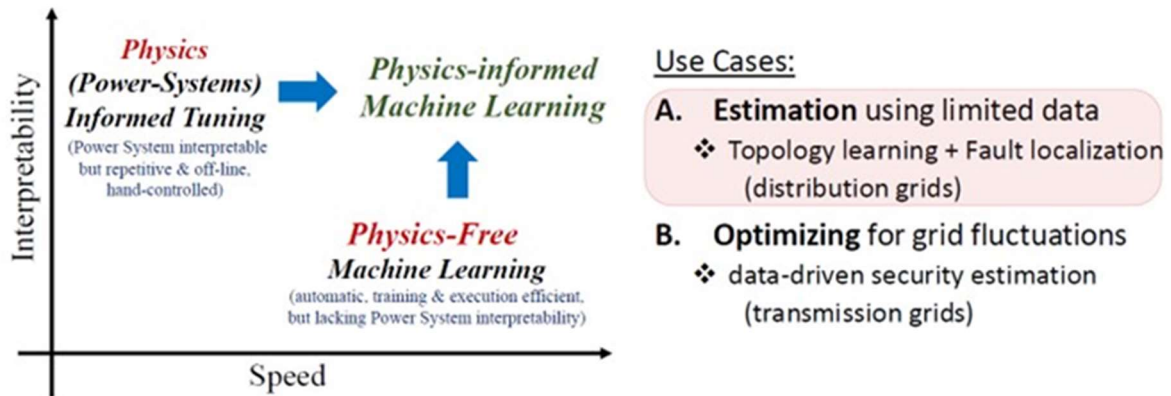


圖 20 理論導引機器學習演算法可利用有限資料進行配電網估測，以及輸電網的最佳化

[13]

樣本複雜度分析保證了這種方法的效能，訂定了極可能恢復真實拓撲結構所需的樣本數量。用來學習電網拓撲結構所需的樣本數量大小，取決於各個注入間彼此是否相關。

在 IEEE 33 匯流排上進行的模擬結果顯示，比起其他方法，這種方法具備一定有效性。然而，但由於故障的非線性特性，在處理故障方面存在局限性。

為了解決這些限制，理論導引神經網路可用於故障定位。這些網路利用基於電網鄰域特徵(grid neighborhood-based features)來提高定位精度，尤其是在標記數量有限的情況下。圖 20 指出理論導引機器學習演算法，兼具物理理論的可解釋性和傳統機器學習的速度優勢，並可利用有限資料於配電網進行估測，以及輸電網的最佳化。

兩階段神經網路方法增強了可觀測性，並利用標記和未標記數據樣本之間的相關性來提高準確性。這種方法優於 CNN、NN 和 GCN 等傳統方法，尤其是在感測器測量有限的情況下。

對雜訊數據的強健訓練是確保對數據變動下電網韌性的重要因素。這可以藉由將物

理限制納入訓練過程來實現，進而提高訓練效率和定位精度。

(2) 不確定性下的輸電網最佳化

最佳電力潮流 (Optimal power flow, OPF)

OPF 旨在最小化發電成本，同時滿足不確定的注入/需求和技術限制。傳統的 OPF 方法依賴於近似、機器學習替代模型和電力潮流物理學，但計算成本可能很高。在此研究目標是開發一種可以有效利用有限數據且更快速的風險評估方法。

Deep Deka 教授藉由簡報介紹了一種貝葉斯(Bayesian)機器學習方法，利用網路感知 (network-aware) 高斯過程 (Gaussian Process, GPs) 在輸電網優化中建立電壓模型。這種方法解決了使用有限數據有效地將注入 (S) 映射到電壓 (V) 以進行更快風險評估的挑戰。

傳統挑戰：OPF 目的在考慮注入和需求不確定性的同時，最小化發電成本，但計算成本可能很高。傳統方法依賴的近似和模擬過於耗時。

解決方案：這種貝葉斯機器學習方法採用網路感知 GP 來建立一個明確的 $S \rightarrow V$ 映射。此映射提供以下優勢：

- ◆ 明確的：直接建模注入和電壓之間的關係。
- ◆ 易於評估：該模型允許在給定注入的情況下快速計算電壓。
- ◆ 可微分的(Differentiable)：模型的特性有助於最佳化和敏感性分析。
- ◆ 可解釋的：網路結構反映在模型中，使其更容易理解變量之間的關係。
- ◆ 可重新訓練/可轉移的：可以使用新數據更新模型，也可以將其應用於不同但相似的電網。

工作原理：

- 高斯過程迴歸：構建一個非參數模型，將 V 表示為 S 的函數。該模型生成信心程度(confidence score)，並促進對新注入樣本的預測。
- 鄰近核(neighborhood kernel)：GP 通過鄰近核得到增強，以利用電網中固有的相關性。該策略基於以下觀察結果：

- ◆ 相鄰注入對電壓有相關影響。
- ◆ 距離較遠的注入之影響近似無關。
- ◆ 這種方法的好處是降維，以提高計算效率。
- 頂點度核心 (Vertex-Degree Kernel, VDK)：VDK 是一種特定類型的鄰近核，它考慮每個匯流排的連接度。具有較多連接的匯流排對決定電壓較具影響力。

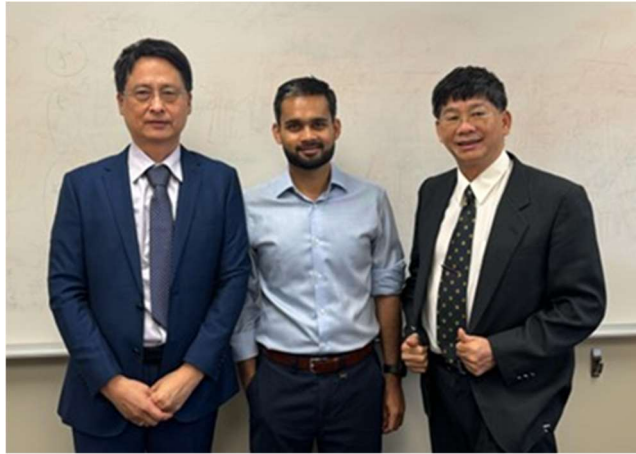


圖 21 本所代表與 Deep Deka 博士合影

VDK GP 的優勢：

- ◆ 用更少的樣本就可以獲得準確的結果（減少 3 倍）。
 - ◆ 顯著加快風險評估計算速度：33.2 秒，而傳統方法需要 4205 秒（加速 120 倍）。
- 這種速度提升使該方法得以適用於電網即時運轉。

(3) 小結

Deka 博士使用網路感知高斯過程的貝葉斯機器學習方法是一種在不確定性下高效可靠地優化輸電網的解決方案之一。這種方法利用機器學習的能力，並結合電網物理領域知識，在兼顧準確性和可解釋性的同時加快決策速度。其研究成果未來實際應用，包括在配電網利用有限量測資料進行估測，以及輸電網波動最佳化的具體成效值得本公司持續關注。有關配電系統狀態估測，本所刻正與研究機構合作進行相關議題研究。

9. Build Robust Power Grid and EV Charging [14]

這場技術交流的對象是范楚楚副教授，她在 2013 年獲得北京清華大學自動化系學士學位，後於伊利諾伊大學厄巴納-香檳分校獲得電機和計算機工程博士學位。她曾榮獲多個著名獎項，包括中國優秀海外留學生獎（2019 年）等。她於 2020 年 8 月加入 MIT，領導 REALM(Reliable Autonomous Systems Lab at MIT)實驗室，該實驗室專注於開發用於設計、分析和驗證複雜系統的技術。她的研究興趣在於安全自動化的形式化方法和控制，並應用於電網和電動車(EV)充電基礎設施。

范副教授這場技術交流主要是分享她在解決建構強健電網和電動車充電系統最佳化問題的研究成果，說明如下：

(1) 建構強健的電網

范的研究重點是利用人工智慧和基於抽樣的演算法來提高電網的強健性。她展示解決傳統電網故障預測方法局限性所採用的方法，包括：

- 透過基於抽樣的演算法，優先考慮測試案例的多樣性：范的研究強調，現有的電網故障預測方法往往過度擬合簡單的測試案例，導致對電網強健性產生虛假的信心。她利用基於抽樣的演算法來優先考慮測試用案例的多樣性，確保對潛在故障進行更全面的評估。這種方法主要是透過在測試期間將電網暴露於更廣泛的情境來防止非預期的失效(unexpected failures)。
- 利用貝葉斯法重構故障預測：梯度下降法很容易收斂在局部最佳點，如圖 22 所示，范副教授提出從傳統以最佳化為中心的故障預測方法轉變為貝葉斯方法。這種方法在故障的可能性及其嚴重性間取得平衡。透過從風險調整事後概率分布(risk-adjusted posterior distribution)中抽樣，該方法識別了各種不同的潛在故障，而不僅僅關注最壞情況。此方法利用 Metropolis-adjusted Langevin (MALA)和 Metropolis Hastings 演算法等技術進行抽樣，如圖 23 所示，進而能夠探索更廣泛的故障空間，並對電網漏洞進行更務實的評估。
- 順序對抗推理(Sequential Adversarial Inference)：范副教授導入了一種稱為“順序對抗

推理”的概念。該方法涉及預測當前電網設計的各種不同故障模式，然後使用這些故障模式來指導進一步的設計迭代。這種故障預測和設計更新的迭代過程有助於創建一個更具韌性的電網，以便更能應對各種突發事件。

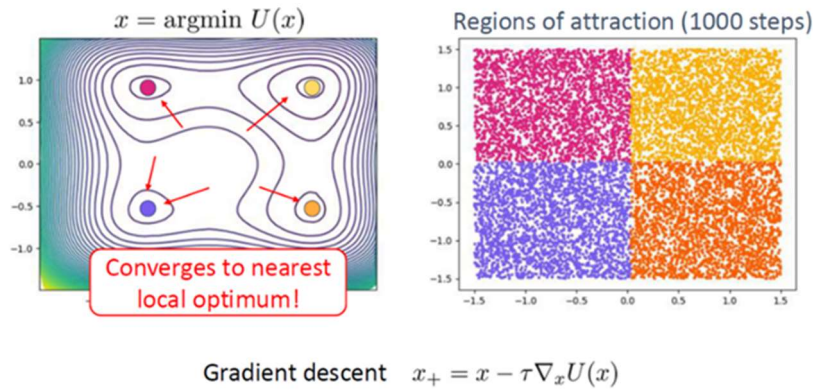


圖 22 梯度下降法很容易收斂在局部最佳點[14]

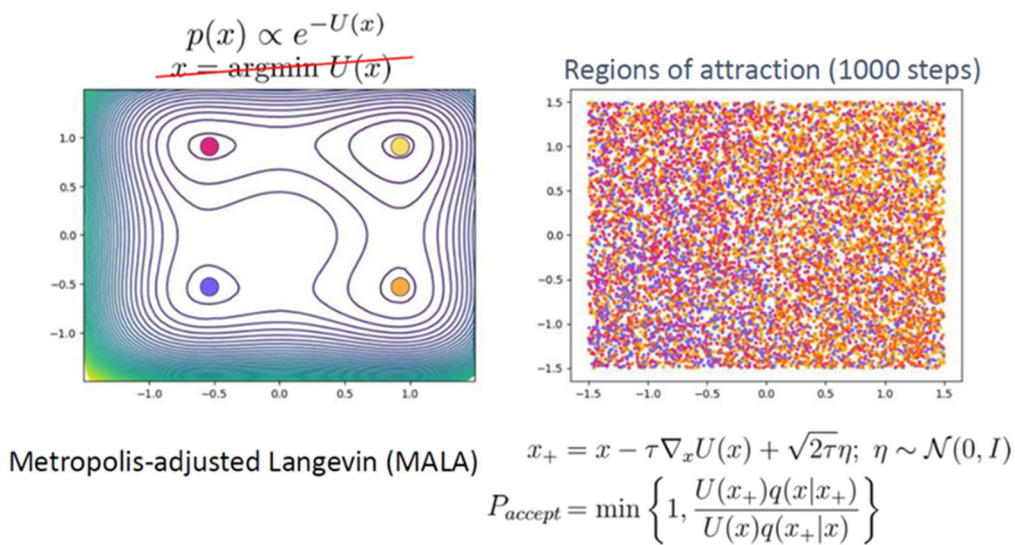


圖 23 換個角度看最佳化：利用 MALA 等技術進行抽樣，能找回多樣性

(2) 優化電動車充電網絡

范的研究還延伸到優化區域電動車充電站網路佈設，解決了計算複雜性和電動車用戶異質性等挑戰。研究工作使用基於人工智慧的方法，包括強化學習 (RL)，來優化充電站的分佈和管理，同時考慮交通模式和電網條件等因素。

主要貢獻：

- 電動車路線規劃和充電：開發了 RL 技術來規劃大量電動車的路線，同時避免在充電站造成擁塞。
- 最佳充電時刻表：在各種數據集（包括路線圖和醫院網路）上展示了改進的電動車充電時刻表。
- 高效率的解決方案：提出了在解決方案品質和可擴充性(scalability)方面優於傳統的方法，進而為大規模問題(large-scale problems)提供了可行的解決方案。
- 動態定價和使用時間管理：正在研究基於需求、供應商狀態和電網條件動態調整充電價格的方法。

案例研究：加州電動卡車路線規劃

范的研究包括一個關於優化加州電動卡車路線規劃的案例研究，目標是在中距離配送網路中以電動卡車取代燃油卡車。該案例研究涉及充電站位置、卡車能量限制和配送需求等因素。

案例研究使用考慮各種因素的優化模型：

- ◆ 目標函數：最小化總行程時間、等待時間和充電時間。
- ◆ 限制條件：包括與卡車重量容量、貨物流動、能量水平、充電站容量和時間相關的限制條件。
- ◆ 技術方法：利用基於人工智慧的方法和強化學習(RL)來優化路線規劃和充電策略。

後續研究：基於 AI 的區域電動車充電站網路優化

技術方法

- ◆ 能源系統分析：擴展現有的基於 AI 的方法，利用大量的真實交通歷史數據和新穎的 RL，有策略和動態地優化電動車充電站的分配和管理。
- ◆ 技術經濟分析：建立一種時間電價(time-of-use)管理方法，根據交通需求、供應商狀態和電網狀況動態調整充電價格。

(3) 小結

范副教授重點介紹了她對電動車充電優化和加州電動卡車路線規劃案例研究的貢獻。她的工作突顯了測試案例多樣性、基於抽樣的算法和貝葉斯方法在確保複雜系統的可靠性和效率方面的重要性。在討論過程中我們也注意到范副教授之電動車研究還未包含對配電網路的影響，因此有建議請其納入研究。她在基於 AI 的區域電動車充電站網路優化的後續研究成果值得持續關注，未來或有可能應用在國內電動車充電站配置和管理的優化上，將關係到台電公司的饋線負載管理以及時間電價。

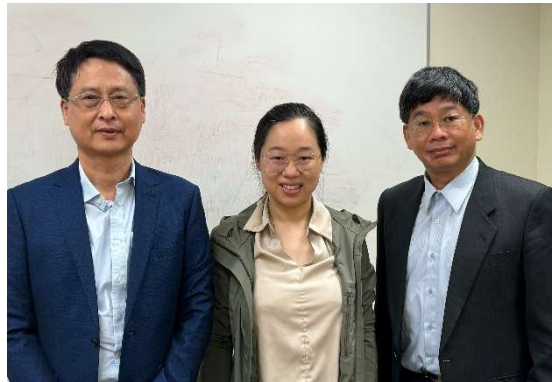


圖 24 本所代表與范楚楚副教授合影

10. Building Resilient Smart Grids: Optimal Resource Allocation and Microgrid Operation [15]

這一場技術交流討論的主題是打造具備韌性的智慧電網：最佳的資源分配與微電網運轉，對象是 MIT 機械工程系主動式適應控制實驗室(Active-Adaptive Control Laboratory)的創始人兼主任 Anuradha Annaswamy 博士。她的研究興趣涵蓋自適應控制理論及其在航太、汽車、推進力(propulsion)、能源系統以及智慧電網、智慧城市和智慧基礎設施等網路實體系統中的應用。她曾獲得最佳論文獎 (Axelby, 1986; CSM, 2010)，以及 IEEE 控制系統學會 (CSS) 的傑出會員和傑出講師獎，2021-23 年 IFAC 期刊《控制年度評論》的

最佳論文獎，以及 1991-97 年 NSF 的總統青年研究員獎。她是 IEEE 院士，也是國際自動控制聯合會的院士，並獲得了印度科學研究所傑出校友獎。

Annaswamy 針對討論主題，強調電網從 20 世紀的集中式、可預測系統轉變為 21 世紀的複雜、分散式系統。這種轉變是由太陽光電、風力發電、電池儲能和電動車等分散式能源(DER)的整合日益增加所推動的。這種新型態需要創新的解決方案來確保電網可靠性和韌性。以下摘要討論內容：

(1) 研究背景

隨著全球對可靠且可永續能源需求的增加，智慧電網的發展變得很重要。智慧電網利用先進技術來提高效率、可靠性和永續性。然而，日益複雜的智慧電網也容易受到網路攻擊，這可能導致嚴重的停電和破壞。因此，建立具有韌性的智慧電網對於確保能源供應的穩定性和安全性至關重要。

(2) 資安挑戰

智慧電網面臨的主要挑戰之一是日益增加的資通訊安全威脅。隨著更多分散式能源資源 (DER)和物聯網(IoT)設備連接到電網，攻擊者利用漏洞發動網路攻擊的機會越來越多。這些攻擊可能針對各種電網組件，包括發電廠、變電所和配電系統。網路攻擊的後果可能非常嚴重，導致停電、資料洩露和財務損失。

(3) 解決方案

為了增強智慧電網的韌性，Annaswamy 提出多面向的方法：

階層式架構

階層式架構將電網劃分為較小的、更易於管理的區域。這種方法允許在網路受攻擊的情況下進行在地化決策和控制，因而大幅減少對整個系統的影響。階層式架構還促進了分散式能源資源(DER)的整合，增強了電網的靈活性。

圖 25 是 Annaswamy 提出的階層式在地電力市場 (Local Electricity Markets, LEM) 結構，她認為此結構應包括：

- ◆ 批發市場：由獨立系統營運商(ISO)營運的傳統市場。

- ◆ 配電系統營運商(DSO)：管理配電網並參與批發市場。
- ◆ 初級市場：促進較大負載和發電機的參與，包括 DER 聚合商和微電網。
- ◆ 次級市場：使較小的負載和 DER 所有者能夠透過次級市場代理人(如聚合商)和消費者市場營運商參與。

這種階層式方法允許跨電網不同級別進行協調優化，以滿足各個利害關係人的需求。

分散式最佳化

分散式最佳化技術使電網中的眾多代理人能夠協調其行動，而無需中央控制器。這種方法增強了韌性，因為即使某些代理人無法發揮功能，電網仍然可以運行。分散式最佳化可用於各種電網操作，例如電壓調節和資源分配。

Annaswamy 強調分散式最佳化和狀態感知(Situational Awareness, SA)在實現可靠且具備韌性的電網邊緣(grid edge)的重要性：

- 分散式最佳化：採用多目標最佳化和賽局理論等技術來優化 DER 營運，同時考慮電網限制、預算限制和市場動態。這確保了有效的資源分配並大幅降低了營運成本。
- 狀態意識：Annaswamy 導入了 LEM 中代理人和設備的可信度(TS)和承諾(CS)分數的概念。這些分數結合到韌性分數(RS)中，掌握代理人履行其承諾的可能性和網路漏洞的可能性。

這些資訊對於在市場營運和攻擊緩解期間做出明智的決策有重大影響。

Proposed hierarchical local electricity market (LEM)

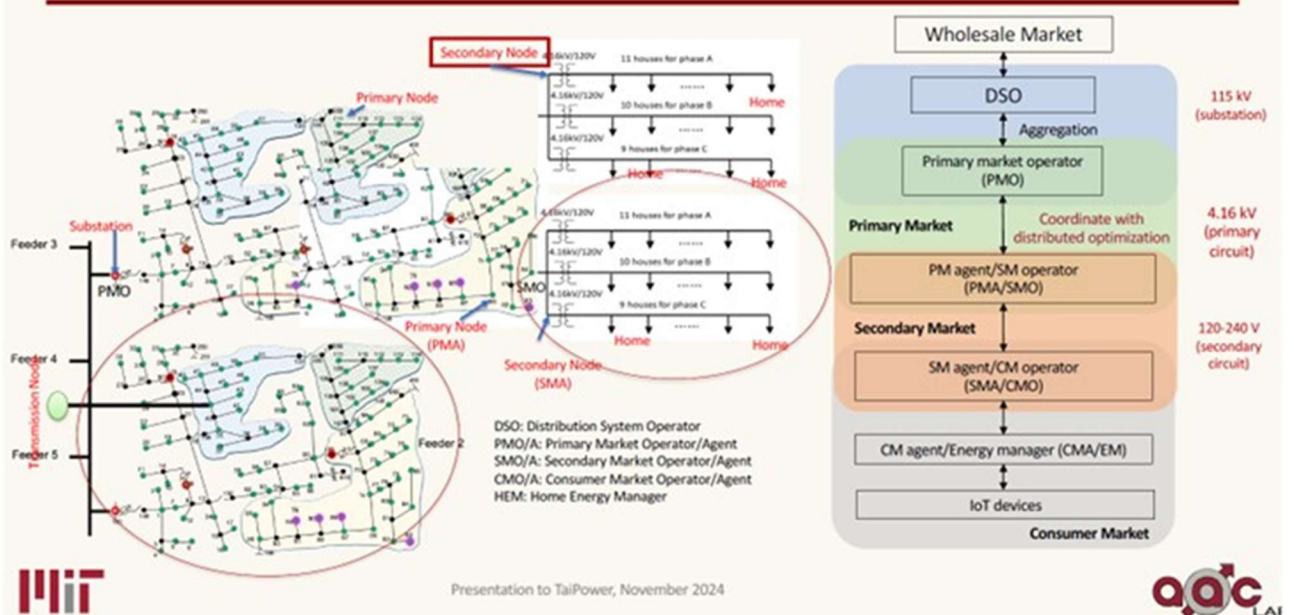


圖 25 Annaswamy 提出的一種階層式本地電力市場 (LEM)結構[15]

以微電網做為韌性電網的構建模組

微電網是一種能夠獨立於主電網運轉的能源系統。微電網還可以藉由減少對主電網的依賴來提高電網的整體可靠性和效率。Annaswamy 概述了微電網的主要特徵：

- ◆ 深度去碳：整合熱電聯產(CHP)等技術，以提高效率並減少碳排放。
- ◆ 韌性：在網路受攻擊或其他主電網中斷期間，微電網可以提供備用電源，而增強電網的韌性。
- ◆ 階層控制：初級、次級和三級控制級別確保安全運轉、電壓和頻率調節，以及微電網與主電網之間的有效電力交換。

可信的物聯網協調資產

利用可信的物聯網(IoT)設備在網路受攻擊期間提供額外的安全層。藉由監視和控制電網的各個層面，可信的物聯網設備可以幫助檢測和減輕攻擊。此外，它們可以透過提供有關電網狀況的即時數據來強化狀態感知。Annaswamy 提出了一個高效超效率物聯網協調資產(Efficient Ultra-efficient IoT-coordinated Assets,

EUREICA)，這是一個增強電網韌性，以抵禦網路攻擊的框架，圖 26 為涵蓋 100,000 結點且結合階層式在地電力市場的 EUREICA 框架。

- ◆ 攻擊面開發：研究涉及模擬針對 DER 和通訊網路的大規模攻擊，以評估潛在的漏洞。這和本所資通室規劃引進 Digital Twins 技術模擬針對 IE C 61850 變電所或樹林微電網場域資安攻擊的概念類似。本所的作法是建置資安攻防平台，透過攻擊腳本評估數位變電所的安全狀態以及資安攻擊對運轉之影響。
- ◆ 狀態感知：EUREICA 利用即時數據和韌性分數(resilience score, RS)來識別受損資產並了解攻擊的影響。
- ◆ 緩解策略：採用分散式靈活性、智慧降載和 DER 重新配置來最大限度地減少對主電網的依賴，並在受攻擊期間維持關鍵負載運轉。

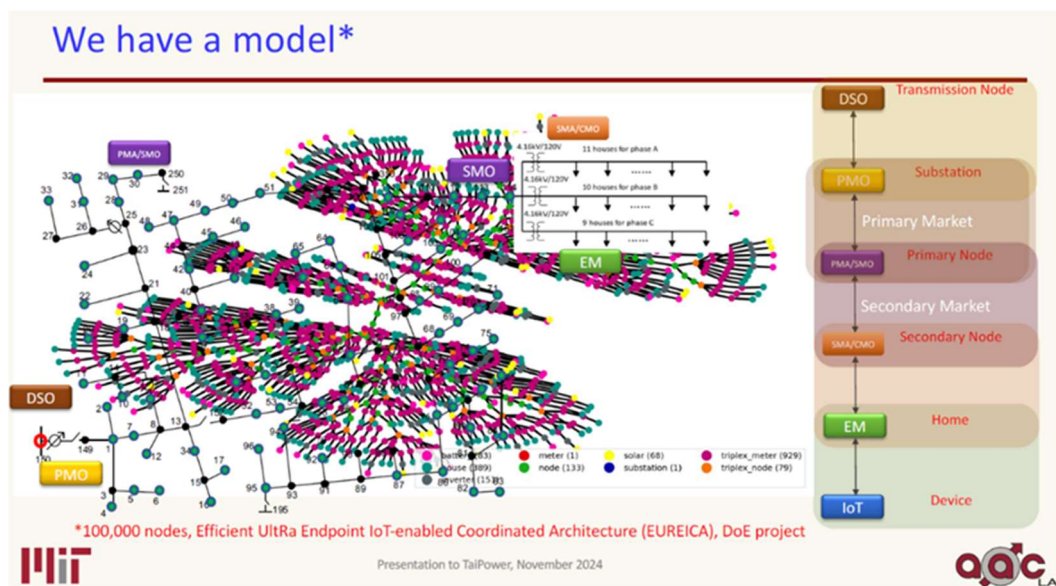


圖 26 涵蓋 100,000 結點且結合階層式在地電力市場的 EUREICA 框架[15]

(4) 主要成果和應用

Annaswamy 的研究證明了所提方法的有效性：

- ◆ 改進電壓調節：DER 的協調控制可提高在 DER 滲透率高的情況下電壓調節效果。
- ◆ 緩解大規模攻擊：EUREICA 成功地緩解了對 IEEE 123 線路的模擬大規模攻擊，防止了大規模負載中斷。

- ◆ 透過微電網增強韌性：微電網與 EUREICA 相結合，在模擬故障後促進了有效的負載復電，確保了關鍵負載運轉。



圖 27 本所代表與 Annaswamy 教授合影

(5) 小結

- Annaswamy 為構建具備韌性的智慧電網提供了願景。階層式 LEM 結構、分散式最佳化、以微電網做為韌性電網構建模組和透過 EUREICA 的狀態感知，為有效管理 DER、緩解網路威脅以及增強電網邊緣的可靠性和韌性，提供了具前景的解決方案。這項研究強調了整合先進控制、優化和網路安全措施，以充分發揮去碳和韌性未來電網潛力的重要性，後續實際應用成效值得密切關注。
- 本所近年來投入微電網技術研究開發不遺餘力，對微電網在電網韌性重要性的看法與 Annaswamy 不謀而合。
- Annaswamy 設計抵禦網路攻擊的框架 EUREICA，模擬針對 DER 和通訊網路的大規模攻擊以評估潛在的漏洞，此做法可供本所參考。因為這和本所資通室規劃引進 Digital Twins 技術建置資安攻防平台，模擬針對 IE C 61850 變電所或樹林微電網場域資安攻擊的概念頗類似。

11. Unified Modeling and Control for Stable end-to-end Operations of Changing Electric Energy Systems [16]

這一場技術交流的對象是 MIT 資訊與決策系統實驗室(LIDS)的高級研究科學家 Marija Ilic 教授。她也是林肯實驗室能源系統第 73 組的高級成員，以及 MIT 數據、系統與社會研究所的客座教授。

Ilic 教授的職業生涯悠久而傑出。她在 1980 年獲得華盛頓大學系統科學與數學博士學位。在德雷塞爾大學和康奈爾大學任教後，移居伊利諾伊大學 (UIUC, 1984-89)，並晉升為終身副教授。從 1989 年到 2003 年，擔任 MIT 的高級研究工程師。此外，從 2002 年到 2017 年，擔任卡內基美隆大學的終身教授，在此期間，她還擔任荷蘭代爾夫特理工大學的名譽主席。目前是卡內基美隆大學的榮譽教授。

Ilic 教授是電力系統領域的世界級領導者，研究工作涉及系統、優化和控制的工具箱，但也結合了對電力系統真實世界的深刻了解以及與電力行業的密切合作。她發表了數百篇期刊和研討會論文，指導了約 50 名博士論文，並與 J. Zaborszky 合著了關於“大型電力系統的動力學和控制”的主要教科書。除其他幾項獎項外，她還是 IEEE 終身院士，在電力系統社群具有影響力。

Ilic 教授分享將再生能源整合到電力系統中的看法，包括面臨的挑戰、解決方案、關鍵概念、所提解決方案的優點等，摘要如下。

(1) 面臨的挑戰

- 新技術部署緩慢，且控制調整需依個案情況進行，阻礙了再生能源的有效整合。
- 在包含間歇性再生能源的電力系統中，由於電壓和電磁振盪，往往易導致風能和太陽能大規模棄風、棄光。
- 現有的控制機制在故障和系統重新配置期間不足，使再生能源的整合更加複雜。圖 28 顯示故障發生時引起的跨地區低頻震盪[16]，圖 29 則顯示大量再生能源引起的極快速電磁次同步共振[16]。

- 德州電力可靠性委員會 (ERCOT)、愛爾蘭、澳大利亞和夏威夷等地區的實際問題突顯了再生能源整合管理的難度。

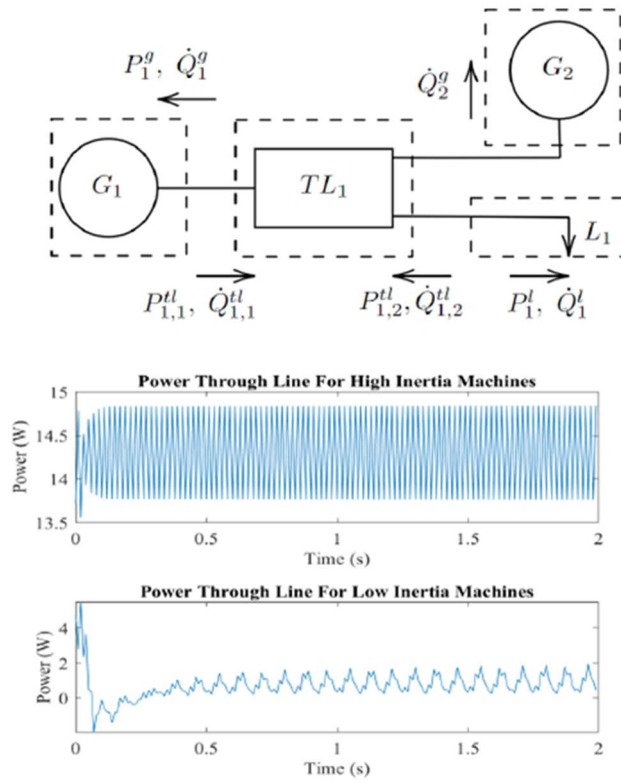


圖 28 故障發生時引起的跨地區低頻震盪[16]

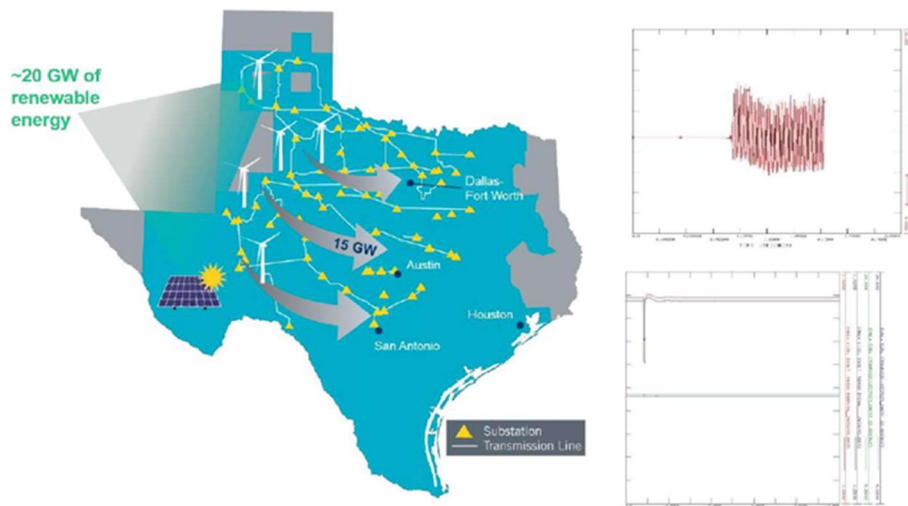


圖 29 大量再生能源引起的極快速電磁次同步共振[16]

(2) 提議的解決方案

- 開發新一代的非線性能源控制器以提供解決方案，能夠顯著擴大可用的間歇性能源規模，同時避免系統產生快速振盪和不穩定的情況。
- 建議開發 Grid Forming 變流器控制技術，以確保穩定的系統運轉，並結合電動車、空調、風力發電、太陽光電和儲能電池等元件。
- 建議採用統一的能量建模和控制方法來設計實功和虛功變化率的變流器控制器。
- 前項提案涉及利用模擬器來展示具有變流器控制設備的典型配電系統，以及具有公用事業規模間歇性能源的大規模電力系統的潛在性能。

(3) 關鍵概念

- ◆ 區域間振盪：這些振盪對電力系統運轉構成挑戰，特別是在分散式能源滲透率不斷提高的情況下。傳統的分析技術通常無法解釋負載波動，這是分散式能源整合日益受關注的問題。
- ◆ 監控區域間振盪：Ilic 教授提出了一種監控區域間振盪的方法，該方法直接考慮負載擾動，而無需負載等效或難以測量的匯流排角度。
- ◆ 變換狀態空間分析(Transformed State Space, TSS)：該方法使用節點電力注入(nodal power injection)作為狀態而不是匯流排角度，在分析系統動態的同時考慮負載波動方面具有優勢。
- ◆ 交互變量：這些變量提供了對電力系統不同區域之間交互的洞察，有助於了解互連系統的動態和穩定性。

(4) 所提解決方案的優點

- ◆ 增強穩定性：先進的變流器控制可以調適由間歇性再生能源引起的振盪和不穩定性，進而確保更穩定的電網。
- ◆ 增加再生能源整合：藉由解決穩定性問題，所提出的方法允許更高比例的再生能源滲透。
- ◆ 提高可靠性和韌性：更穩定、適應性更強的電網更能承受干擾和故障，因而提高整

體系統可靠性。

- ◆ 支持脫碳：藉由促進可再生能源的整合，所提出的方法有助於減少電力行業的碳排放。

(5) 小結

- a. Marija Ilic 教授和我們討論間歇性再生能源（如風能和太陽能）整合到電網中所產生的不穩定性問題。核心問題是現有的變流器控制器難以在波動期間維持穩定性，導致電壓振盪和停電。建議的解決方案包括開發用於變流器的下一代非線性能量控制器，並透過對配電和大規模電力系統的模擬來驗證其有效性。最終目標是實現再生能源的無縫整合，以實現穩定和脫碳的電網，克服當前由不易預測、由再生能源發電引起的連串故障等障礙。
- b. 有關電力系統低頻振盪議題，本所目前係透過廣域監測系統(Wide Area Measurement System, WAMS)利用分散於各變電所內之 PMU 設備，傳送同步相量值至伺服器主機進行分析，以監測低頻振盪；Marija Ilic 教授則是提出了一種監控區域間振盪的方法，該方法直接考慮負載擾動，而無需負載等效或難以測量的匯流排角度，這種用於監測區域間振盪而無需投資昂貴設備的新方法，值得本所相關研究室深入評估甚至投入研究。

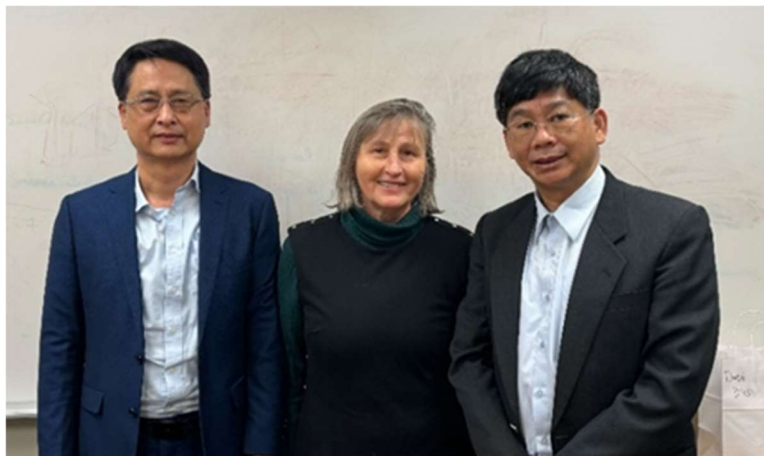


圖 30 本所代表與 Marija Ilic 教授合影

二、赴 EPRI 技術交流

(一) EPRI 簡介

EPRI 於 1972 年成立，其成立係由 1965 年美國東北部大停電事件所觸發，該事件突顯了美國對電力的日益依賴以及電力系統的脆弱，同時也標誌著電力行業的轉捩點。EPRI 是獨立的非營利組織，致力於與電力生產、傳輸和使用相關的研究和開發以造福公眾。EPRI 與科學家、工程師、學者和產業專家合作，共同應對電力產業的挑戰，目前會員規模已達到 450 家公司，涵蓋 45 個國家，也是本公司長期合作的國際研究機構。

EPRI 的使命是透過全球合作、思想領導力以及科學和技術創新，為社會推廣安全、可靠、負擔得起和為環境負責的電力，其重點領域包括藉由效率和電氣化使用更潔淨的能源，生產更清潔的能源，以及整合能源資源。EPRI 在美國有三大實驗室，其地理位置分佈如圖 31 所示，其中標示字母 L、C、K 分別代表 Lenox、Charlotte 和 Knoxville 實驗室。本次參訪 EPRI 位於麻州的 Lenox 實驗室以及位於北卡羅萊納州的 Charlotte 實驗室。參訪與技術交流行程之安排主要是透過蔡富豐顧問居中聯繫，並由 EPRI 負責業務協調的資深全球業務經理－華裔的 Tiangan Lian 博士(以下稱連博士)全程接待。感謝連博士特地在我們參訪 Lenox 實驗室的前一天從 EPRI 加州 Palo Alto 總部飛往紐約州首府 Albany，再輾轉搭乘 Uber 到 Lenox 實驗室附近的 Pittsfield，抵達旅館時已經是當地晚間 9 點半，翌日上午再陪同我們前往 Lenox 試驗場，據悉這也是連博士在 EPRI 服務逾 20 年來第一次蒞臨 Lenox 試驗場，可見 EPRI 對台電此行技術交流的重視。以下謹針對本次參訪的 Lenox 和 Charlotte 兩座實驗室參訪與技術交流情形進行說明。

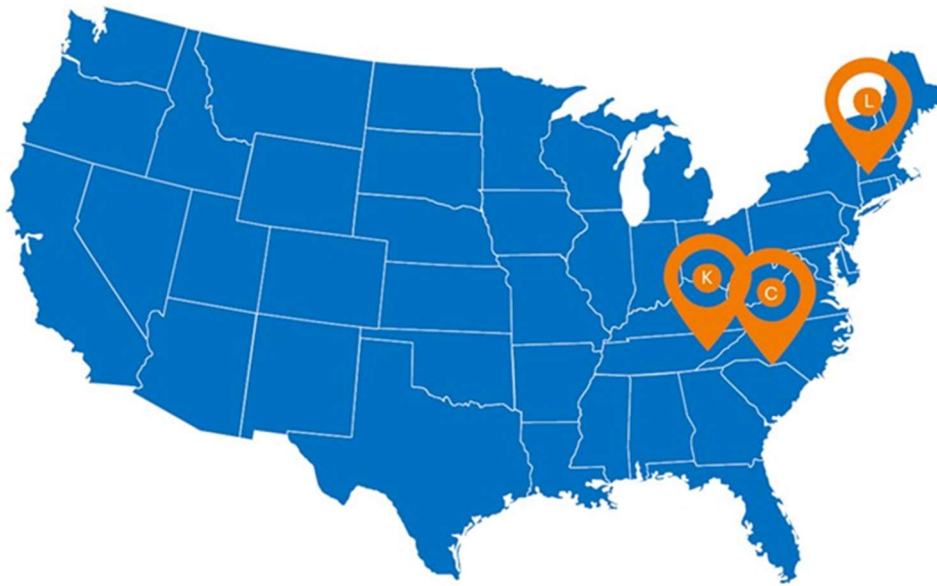



圖 31 EPRI 美國三大實驗室地理位置分佈圖[17]

Lenox, MA



AC -3 Φ 1200kV	138kV 3 Φ Sensor Testing Substation
DC 1500kV	Insulator/Conductor Mechanical Tests
Long & Short Lines	Incidental Contact Test Site
5.6 MV Impulse	Configurable Distribution Circuit
AC, DC Impulse Out/Indoor	UAV Test Site
Dist. OH Resiliency Testing	Manhole Explosion
Pole Mech & Aging Testing	Arc Flash
230kV Aging Chamber	
Salt Fog Chamber	

圖 32 EPRI Lenox 實驗室的主要測試項目[17]

(二) Lenox 實驗室參訪與技術交流

Lenox 實驗室位於美國麻州西部，是 EPRI 主要實驗室之一，始建於 1959 年，最初由 GE 公司建造，1985 年由 EPRI 接管。Lenox 實驗室擁有各式各樣的設施，涵蓋輸電、配電、住宅、地下、變電所、環境試驗室、老化試驗室、電動車等，其實驗與試驗內容

涵蓋配電架空線路韌性測試、電桿機械和老化測試、高壓測試、5.6MV 衝擊電壓發電機、交流&直流衝擊室內/室外測試、230kV 老化實驗室、鹽霧實驗室、138kV 三相感測器測試變電所、絕緣體/導體機械測試、可規劃的配電線路、無人機測試場、人孔爆炸、電弧閃絡等項目，如圖 32 所示。實驗設施少部分在室內而大部分在戶外，整體占地 37 英畝，因此英文名稱雖是 Lab，但是實際上是一個大規模試驗場域，圖 33 是 Lenox 實驗室配置空照圖。其占地面積很大，但其工作人員寥寥可數，主要是試驗人員，而背後相關研究則是由 Charlotte 輸配電實驗室(T&D labs)研究部門負責。

為了親自介紹 Lenox 實驗室，Charlotte T&D labs 研究部門總監 Drew McGuire 特地在前一天從 Charlotte 搭機到 Albany，翌日一早再驅車前來 Lenox 實驗室為我們導覽。整個參訪與交流過程概述如下：(i)一開始是在來賓接待室電腦線上填寫訪客資訊並簽名，完成訪客管制程序；(ii)由專人透過簡報進行場域危害告知，並要求我們在工安文件上簽名以確認了解現場危害風險，這點和本公司工安要求類似；(iii)接下來由 Drew 進行 Lenox 實驗室以及相關研究簡報，雙方並進行技術交流；(iv)最後是 Drew 進行實驗室及試驗場域導覽。

Drew 在簡報一開始便特別強調 EPRI 輸配電實驗室(T&D labs)不是認證標準測試實驗室、教育實驗室或設備開發實驗室，其用途是：

- ◆ 了解資產老化和故障模式
- ◆ 了解新興資產的性能
- ◆ 開發可能成為標準的新測試方法
- ◆ 評估新興的檢查和監測技術
- ◆ 評估和開發先進的公用事業設計和實務技術

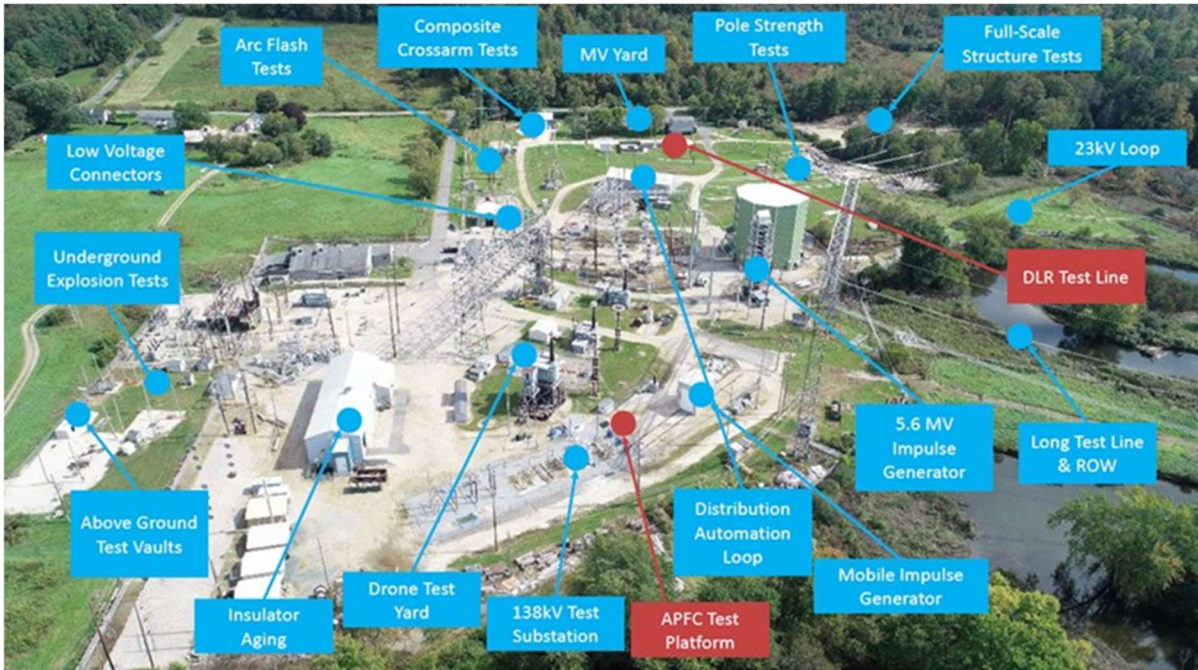


圖 33 Lenox 實驗室配置空照圖，圖中紅色標示為配合 GET SET 倡議中新增加的 DLR Test Line 和 APFC Test Platform 試驗項目[17]

Lenox 實驗室在 EPRI 對各種輸配電基礎設施策略問題的研究中扮演重要角色，例如環境韌性和相容性、管理現有資產和可靠性、提高輸電容量、監測、檢查、分析、氣候和安全。該實驗室參與了許多研究計畫，囿於篇幅，以下謹就 Drew 當天簡報重點摘要如下。

1. Grid Enhancing Technologies for a Smart Energy Transition (GET SET)

(1) 背景說明

美國正面臨著電力需求激增與電網現代化的挑戰，然而，現有的電網基礎設施建設速度遠遠落後於需求增長，導致電網擁塞加劇，潔淨能源發展受阻，電費上漲等問題。這些問題不僅影響了經濟的穩定發展，也阻礙了其在應對氣候變遷方面的努力。2023 年美國聯邦能源管理委員會（FERC）發布 FERC Order 2023[18]，這是針對美國電力系統進行改革的一項重要命令，目標包括簡化電網接入程序，讓新的發電設施（特別是再生能源）能夠更快速、更容易地接入電網，並解決電網擁塞問題等。根據美國能源部在 2024

年 4 月發布的報告指出[19]，部署現成的先進電網解決方案，可以採低成本的方式提高現有電網的容量，以支持日益增加的用電尖峰需求，同時提高電網的可靠性、韌性和可負擔性，圖 34 是該報告估計採用四項關鍵技術在美國所分別能釋放出的電網傳輸容量。

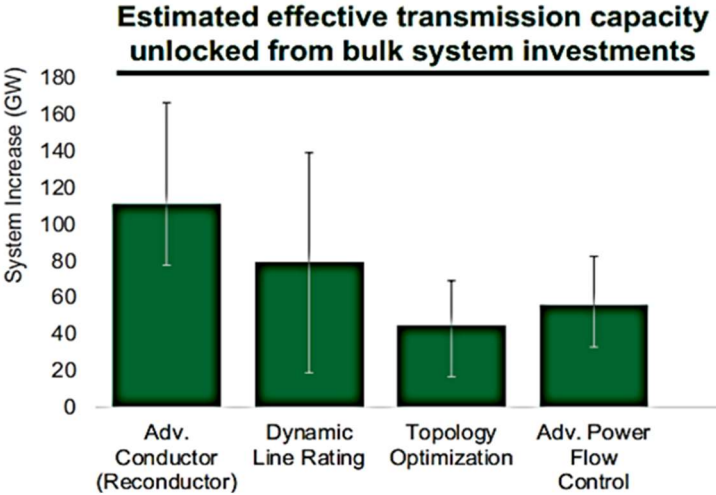


圖 34 美國能源部估計採用四項關鍵技術分別能釋放的電網傳輸容量[19]

針對以上四項關鍵技術，EPRI 提出 Grid Enhancing Technologies for a Smart Energy Transition (GET SET)倡議，期望採用硬體和/或軟體技術，提高現有輸電線路的容量、效率、可靠性或安全性，此外可以降低擁塞成本，改善再生能源的整合[20]。

我們注意到 MIT 能源與環境政策研究中心(Center for Energy and Environmental Policy Research, CEEPR)也在今年 9 月發表” A Roadmap for Advanced Transmission Technology Adoption” [21]，在此所指的先進輸電技術(ATT)涵蓋四項創新技術，包括動態線路額定值(DLR)、高性能導體(HPC)、先進潮流控制器(APFC)和拓撲最佳化，雖然名稱與前述能源部及 EPRI 四項關鍵技術有些微差異，但實質內容其實並無不同。由此可見此一政策受到之重視。

(2) 技術簡介

EPRI 的 GET SET 倡議為期三年，旨在推動關鍵研究，加速前述電網強化技術 GETs 的部署，可望促使既有電網快速釋出傳輸容量，並降低部署和運維相關的風險，為公用事業單位提供規劃、營運和維護這些技術所需的資訊和資源。GETs 四項關鍵技術，如圖

35 所示，依序為：先進導體(Advanced Conductors)、動態線路容量額定(Dynamic Line Ratings)、先進電力潮流控制器(Advanced Power Flow Controller) 和拓撲最佳化(Topology Optimization)。



圖 35 GETs 技術的部署可望快速釋出電網傳輸容量[17]

I. 先進導體(Advanced Conductors)

目的在開發和推廣高溫運轉、低弛度、高電流導體，也稱為高溫低弛度導體，設計用於在高於 150°C 的條件中工作。與傳統導體相比，能夠承載更高的電流，且弛度更小。先進導體的高電流承載能力可以顯著提高現有輸電線路的容量。圖 36 顯示三種不同類型的高溫低垂度導體以及連接器。說明如下：

- ◆ 鋁外層絞線：這種絞線可以是完全退火的，由鋁合金製成，並且可以是圓柱形或梯形形狀。
- ◆ 金屬芯：複合金屬芯或鋼芯。
- ◆ 碳纖維芯：單一大直徑芯或絞合芯。
- ◆ 連接器：這種連接器比傳統導體使用的連接器更大。

High Temperature Low Sag (HTLS) Conductors



圖 36 三種不同類型的高溫低垂度導體以及連接器[17]

EPRI 正在就先進導體的幾個面向進行研究，包括：

- ◆ 材料特性：了解材料在高溫和應力下的特性與變化。
- ◆ 選擇和應用：為特定應用選擇和採用合適的導體制定指南。
- ◆ 安裝實務：建立安裝先進導體的最佳實務，以確保長期性能。
- ◆ 長期性能：研究先進導體在各種運轉條件下的長期性能。
- ◆ 檢查、評估和維護：開發檢查、評估和維護先進導體的方法。
- ◆ 預期壽命：確定先進導體的預期壽命。

事實上，在本公司 111 年公布的《強化電網韌性建設計畫》中就已納入電網擴充更新[22]，以 345kV 龍崎南～仁武線容量擴充為例，全線更換為 340 超耐熱導線，就是為了解決電網送電瓶頸，導線更新後可以提升輸電容量，一旦供電裕度增加，電網也會更穩定。如今 EPRI GETs 正在開發和推廣高溫低弛度導體，除印證本公司的做法符合國際電業發展趨勢，EPRI GETs 研究也可作為本公司之參考。

II. 動態線路容量額定(Dynamic Line Ratings, DLR)

目的是研究提升現有輸電線路容量的方法，以(i)減少擁塞—更有效地利用現有輸電線路，減少對新建線路的需求；(ii)提高可靠性—提供線路狀況的即時容量評估值，允許主動維護並降低停電風險；(iii)整合再生能源—透過準確評估容量可用性，促進再生能源的整合。說明如下：

- ◆ 即時熱容量額定評估：DLR 技術使用即時數據（包括天氣條件）來評估輸電線路的實際額定容量。這與依賴保守假設的靜態額定值不同。
- ◆ 提高容量利用率：透過準確評估線路容量，DLR 允許公用事業單位在其容量值下限附近運轉，可將輸電容量提高 10-40%。
- ◆ 數據收集和分析：DLR 系統收集各種數據，包括(i)天氣數據—風速和風向、環境溫度、太陽輻射和降雨量；(ii)導體溫度—沿線路多個點的導體溫度精確測量值；(iii)線路弛度和張力—線路下垂幅度和張力的測量值。

EPRI 正在對 DLR 技術進行現場評估，執行現況如圖 37 所示，目前已有 6 家公用事業參與、16 處現場測試場域、涵蓋 13 個系統，採用的方法如下：

採用研究等級的氣象數據

- 在輸電線路相關範圍內收集高精度的天氣數據，以便使用 IEEE 標準 738 作為基準。
- 這種數據比商業 DLR 的數據更準確。
- 取樣率高於導體的時間常數。

長期的數據收集

- 在每個地點收集 1 至 5 年的數據，以掌握地形效應和季節性趨勢，並確定可能發生的極端事件。理想情況下，應該有多個測試場域，以涵蓋不同的地形效應。

精準的導體溫度測量

- 使用多個精確的導體溫度測量方法，以彌補 IEEE 標準的不足，例如在雨天時的測量誤差。這也有助於計算跨距(span)內的溫度偏差。

基於特定風險評估

- 根據特定的導體、設計和操作實務，評估系統的風險，以定義「可運轉/不可運轉」的標準。這些風險評估乃是基於逾 15 年美國和國際經驗的評估研究而發展出來。



圖 37 EPRi 目前在 DLR 技術現場評估的執行現況

EPRi 對 DLR 技術現場評估採用了六種典型分析方法，如圖 38 所示。包括(i)DLR 量測與輸入資料的檢視、(ii)覆蓋範圍的估測、(iii)容量增加、減少和準確度的評估、(iv)季節性極端和非典型事件的分析、(v)短期與長期預測的考量、(vi)在給定不確定程度下的風險評估。

EPRi 的這項研究和本所於 109 年初執行完畢的「動態熱容量系統精進及整合研究」分項計畫[23]有密切關聯性。該案研究實際運用動態熱容量技術，開發工業級動態熱容量監測設備，並進行各項必要商業認證，包含：高壓、大電流、突波、震動、耐風壓、通訊等測試，透過研究案設計之圖資管理平台，可監看各設備即時資訊，運用地圖資訊遠端監視電網狀態，研究成果顯示技術具有一定可行性。

EPRi 持續對 DLR 技術發展現況進行調查，列出了眾多 DLR 技術供應商和方法。有些是基於硬體的測量，而另一些則使用基於軟體的分析和建模，圖 39 列出 DLR 技術供應商，並以不同顏色區分其採用的技術類型。

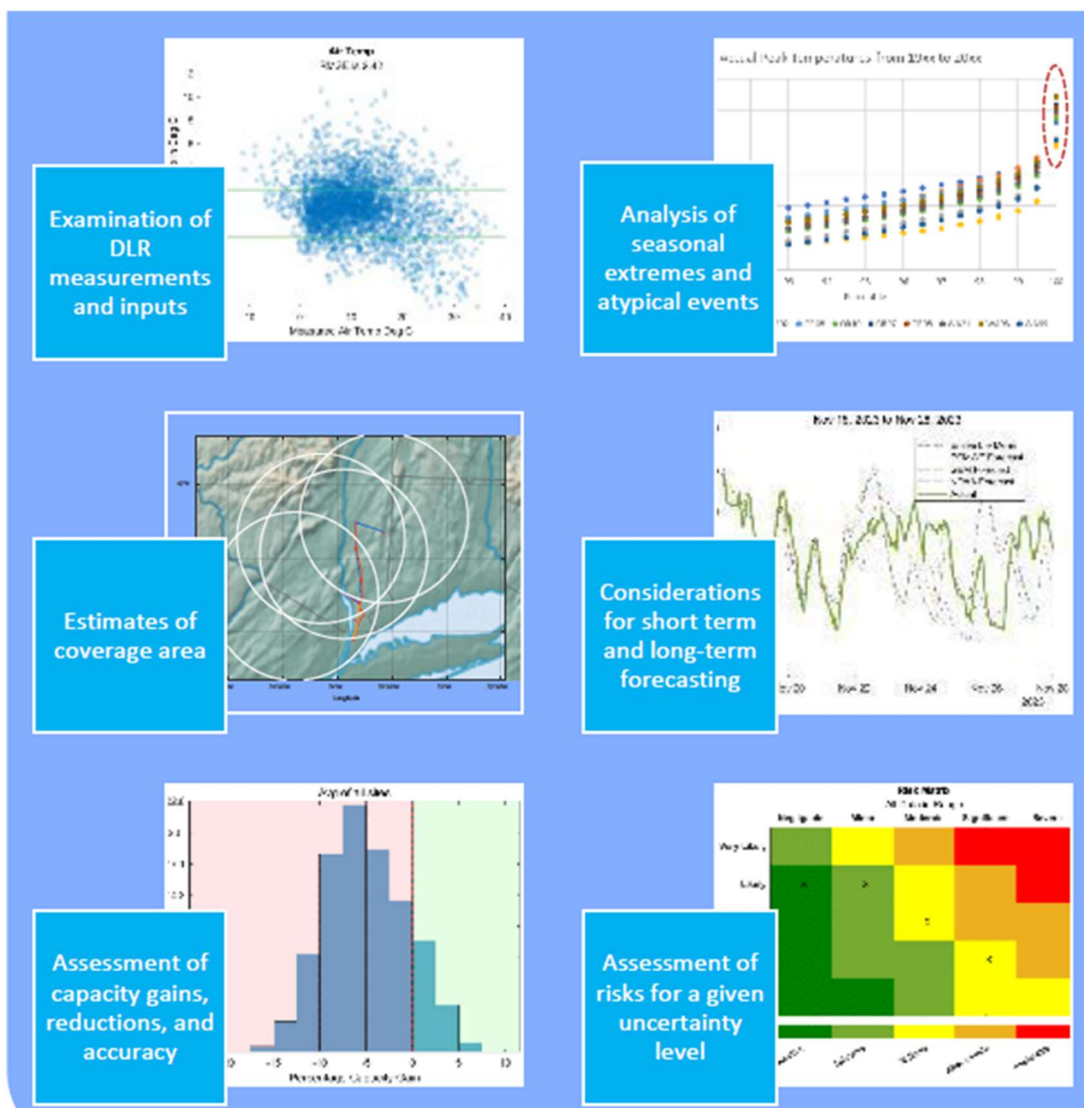


圖 38 EPRI 對 DLR 技術現場評估的六種典型分析[17]

III. 先進電力潮流控制器(Advanced Power Flow Controllers, APFC)

APFC 是一種創新裝置，旨在提高電網的效率和可靠性。該裝置利用模組化電力電子技術來控制電力潮流，透過調整傳輸線的電抗來改善電壓穩定性，以更有效地整合再生能源。圖 40 是 APFC 的功能示意圖，安裝前，由於一迴路傳輸線因維護而停用，導致並聯的另一迴路傳輸線負載過重（超載 110%），此超載線路已成為系統瓶頸，限制了電網傳輸容量，進而限制了再生能源發電的輸出電力。安裝後，部署在預估可能超載線路上的 APFC 可以輕易地將電力從超載線路轉移到尚有剩餘容

量的並聯線路。如此一來，便平衡了整個網路的電力潮流，無需再抑制再生能源案場的輸出電力，減少對替代發電或需量反應措施的需求。以下概述其工作原理：

- ◆ 串聯阻抗調整：APFC，也稱為智慧控制閥，調整輸電線路的串聯阻抗以控制電力潮流。這有助於優化電力潮流分配並防止過載。
- ◆ 容量提升：藉由重新調整潮流分配，APFC 可以提高輸電線路的有效容量。
- ◆ 即時控制：APFC 可以反應電網狀況的即時變化，提供對潮流的動態控制。



圖 39 採用各種不同技術的 DLR 供應商，以不同顏色代表其採用的技術類型[17]

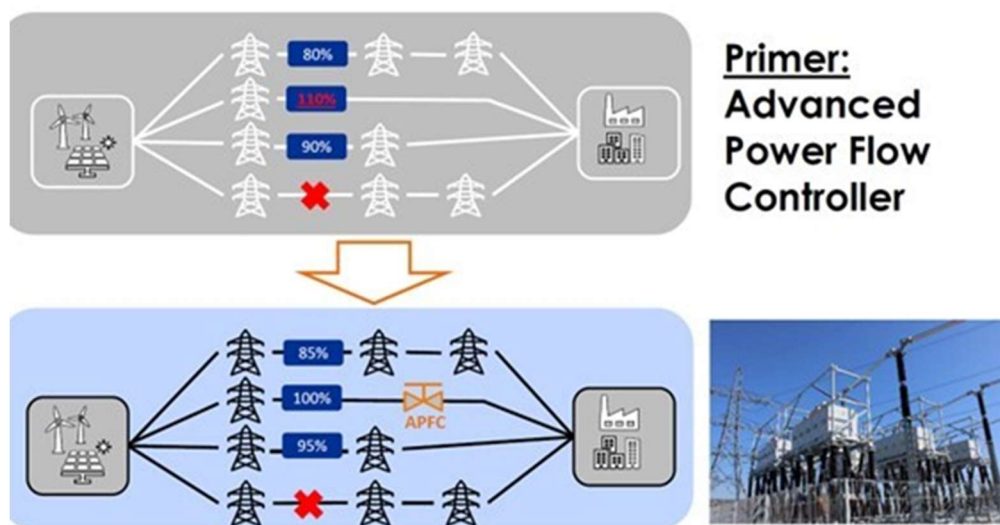


圖 40 電力從超載線路轉移到有剩餘容量的並聯線路，以提高再生能源案場輸出[17]

目前國際上生產 APFC 的廠家至少有 Smart Wires、ABB 等，其中 Smart Wires 在其官網分享一些公用事業在電網強化項目中使用其 APFC 產品 Smart Valve 的應用案例，摘述如下[24]：

- 在美國，Central Hudson 正在使用 APFC 來增加傳輸容量，以支持再生能源的經濟高效連接，作為一種更具成本效益的靈活解決方案，與固定式串聯電容器(Fixed Series Capacitor)相比，所需的變電所空間減少了 25%，如圖 41 所示[24]。
- 在哥倫比亞，ISA TRANSELCA 正在使用 APFC 來解決該國北部潔淨能源可靠併網的短期和長期電網擁塞問題，相較於重新更換導線、建設新線路或限縮再生能源發電，此為具有成本效益及快速完成的方案，如圖 42 所示[24]。
- 在澳洲，Transgrid 使用 APFC 來解決不同州之間輸電線路的熱容量限制問題，以允許更多的再生能源在不同州之間傳送，提供比重新更換導線和在國家公園內建造新變壓器更低的風險，和高達 1100 萬美元的市場效益，如圖 43 所示[24]。
- 在英國，國家電網正使用 APFC 來解決英格蘭北部多個邊界之間的電網擁塞問題，以加速整合新的風力發電，提供更具成本效益的解決方案，不但可以快速建置，而且與建造移相變壓器(Phase Shifting Transformer)或新線路相比，可以節省巨額建置成本，如圖 44 所示[24]。



圖 41 美國 Central Hudson 使用 APFC 增加傳輸容量，並減少所需變電所空間[24]



圖 42 哥倫比亞 ISA TRANSELCA 使用 APFC 解決限制該國北部潔淨能源可靠併網的短期和長期電網擁塞問題[24]



圖 43 澳洲 Transgrid 使用 APFC 來解決兩個州之間輸電線路上的熱容量限制問題[24]



圖 44 英國國家電網使用 APFC 解決英格蘭北部邊界間的電網擁塞問題[24]

目前 EPRI 正在推動 APFC 技術測試和評估，包括：

- ◆ Smart Valve 測試計畫：在各種操作條件下熱功能測試，包括轉換器、冷卻系統、真空保護、電子元件等，及全額定高壓送電、全注入電流、脈衝，以評估 APFC 的性能，如圖 45 所示[17]。
- ◆ 制定指南：提供公用事業單位關於 APFC 規格、安裝、操作和維護的指南。
- ◆ 增長知識：關於 APFC 技術，仍然存在一些未知數，例如預期故障率、所需的維護實務和長期性能。



Representative Unit: Thermal Testing While Operating
Converter / Cooling System / Vacuum Protection / Electronics



Full Scale: HV Energized – Full Injection Current – Impulse
Outdoor Environment with Artificial Wetting

Smart Valve Interest Group

圖 45 EPRI 藉由 Smart Valve 測試計畫，參與測試和評估 APFC 技術 [17]

IV. 拓撲優化(Topology Optimization)

在 EPRI 的 GET SET 倡議中，拓撲優化是一種關鍵的軟體技術，旨在提高電力傳輸網路的整體效率和可靠性。這項技術藉由分析現有的傳輸網路結構，尋找更具成本效益的配置，以增加電網電力潮流量、降低運營成本並保持系統的可靠性。主要功能如圖 46 所示，說明如下：

- ◆ 輸電網路重構(reconfiguration)：拓撲優化是指使用軟體工具來找出輸電網路的最佳配置，以提高效率和可靠性。
- ◆ 擁塞管理：藉由重新配置輸電網路，拓撲優化有助於緩解擁塞，並防止線路過載。
- ◆ 與現有系統整合：拓撲優化工具可以與現有的能源管理系統(EMS)和營運管理系統整合，為電網營運商提供即時決策依據。
- ◆ 成本降低：藉由優化傳輸線路的配置，該技術能夠降低建設和運營成本。這包括減少對新建設施的需求，因而節省資金和資源。

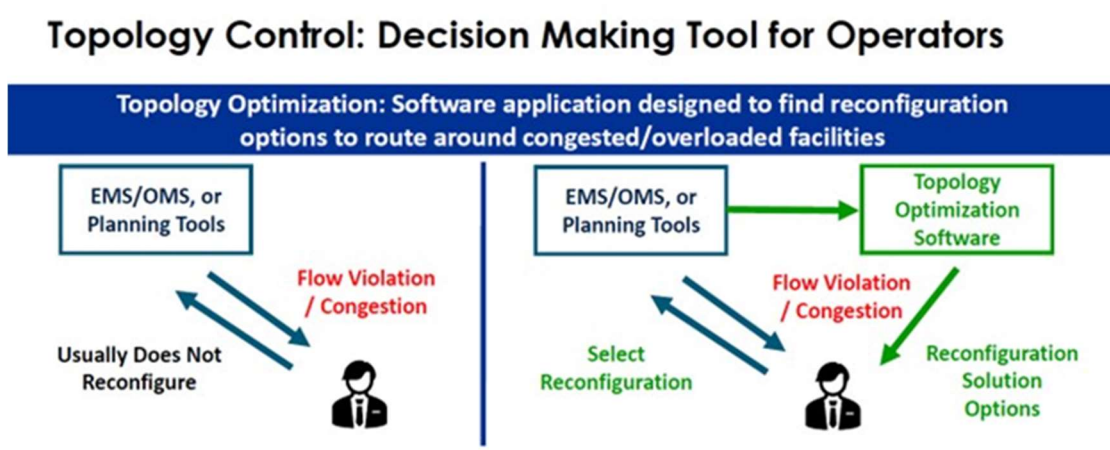


圖 46 EPRI 拓撲優化的主要功能示意圖[17]

應用情境

- ◆ 電網現代化：隨著對電力系統需求的增加，拓撲優化可以幫助公用事業公司更有效地利用現有基礎設施，提高電網的整體性能和效率。
- ◆ 再生能源整合：在再生能源日益普及下，拓撲優化技術可以幫助電網更有效地整合風能和太陽能等可再生資源，提高其穩定性和靈活性。

挑戰與未來方向

儘管拓撲優化技術具有顯著的潛力，然而實施拓撲優化會帶來多項挑戰：

- ◆ 增加複雜性：重新配置線路會增加系統操作的複雜性。
- ◆ 市場影響：潮流模式的變化會對電力市場產生影響。

- ◆ 斷路器操作次數增加：重新配置通常涉及開關操作，這會影響斷路器的壽命。
- ◆ 潛在的穩定性影響：線路變化會影響系統穩定性，需要仔細分析。

因此，EPRI 正在研究將拓撲優化整合到公用事業單位規劃和運營中的方法。未來如有參加此倡議且評估具有效益，可配合各單位未來監控系統更新汰換時，將此功能納入新監控系統內。

(3) 推動時機

EPRI 特地參照 FERC 1920 說明為什麼現在要推動 GET SET，主要是因應負載在未來的快速成長，以及目前各種技術日趨成熟且可選擇性提高，先導計畫與實際安裝建置案例增加等，如圖 47 所示。GET SET 的目標是希望幫助公用事業單位在 2050 年前將輸電容量提高 40% 以上，以適應電氣化、工業化和數據中心的負載增長，並整合新的再生能源成長。

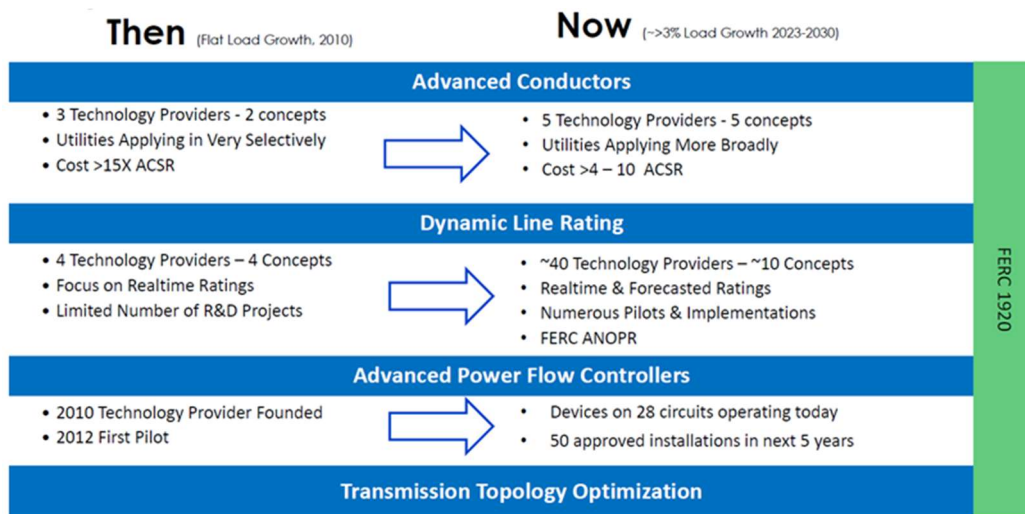


圖 47 對比 2010 年，EPRI 認為現在是推動 GET SET 的適當時機 [17]

(4) 小結

- 美國電力系統涉及多個互連系統，需要處理複雜的跨州跨區域輸電問題，系統規模龐大，協調難度較高。相較之下，台灣電力系統是相對集中的單一系統，地理範圍較小，較沒有跨區域、跨系統協調的問題，然而電網同樣面臨再生能源大幅增加以

及負載快速成長的挑戰。

- b. EPRI GET SET 倡議目的在加速採用電網強化技術釋出電網輸電容量，以期在舒緩投資新電網基礎建設下，滿足日益增長的電網需求。透過為公用事業單位提供必要的知識、資源和支持，力求促進向更智慧、更具韌性和更永續的能源未來的平穩和高效轉型。
- c. 本公司在《強化電網韌性建設計畫》中已納入電網擴充更新，並針對部分擁塞線路將導線更換為耐熱導線以提升傳輸容量；在 DLR 技術方面，過去也曾執行動態熱容量評估研究。值此美國產官學研全力推動電網強化技術之際，建議本公司相關業管單位根據現況及未來挑戰，審慎評估是否加入該倡議，並密切關注 EPRI GET SET 倡議之後續發展。

2. Robotic and Drone Technologies for Substation Inspection [17][25]

EPRI 研究團隊近年來投入在變電所機器人及無人機應用巡視技術評估與研究不遺餘力，說明如下：

(1) 機器人在變電所巡視之應用評估

- EPRI 已測試多種機器人系統在變電所的巡視應用。這些測試包括在 Lenox 實驗室場域 138kV 研究用變電所之不同地面環境，進行的基本機器人移動測試、視覺和紅外線(IR)影像測試，以及自主導航功能測試。圖 48 所示為 EPRI 在 138kV 研究用變電所部署 4 種機器人並進行評估。請注意紅色虛線是巡視路線，而藍色箭頭指出行進方向。
- EPRI 的研究著重於評估機器人的各種能力，包括：安裝、自我充電電池、導航、夜間操作、在電場和磁場中的操作、遠距控制、數據儲存、網絡安全、開放式架構、室內/室外操作、維護、產品支援和 AI 整合等。圖 49 所示為 EPRI 針對 4 種移動式機器人進行測試的評估準則。
- 在 Lenox 實驗室的 138kV 研究用變電所進行了部署，收集了數位錶頭數值、油位計

數值、狀態指示器和油槽過熱等數據。EPRI 測試評估後認為藉由機器人蒐集天氣和現場儀表資料是容易的[17]，如圖 50 所示。

- EPRI 的測試結果協助 Con Edison 公司的決策，該公司在部署機器人之前先在實驗室環境中驗證了使用案例。
- Entergy 發現機器人自主功能仍在開發中，但有意在適當情況下應用機器人。
- 測試發現，機器人在重複性、危險和骯髒的環境中可以提高工作人員的安全性。

Robotic Autonomous Inspection

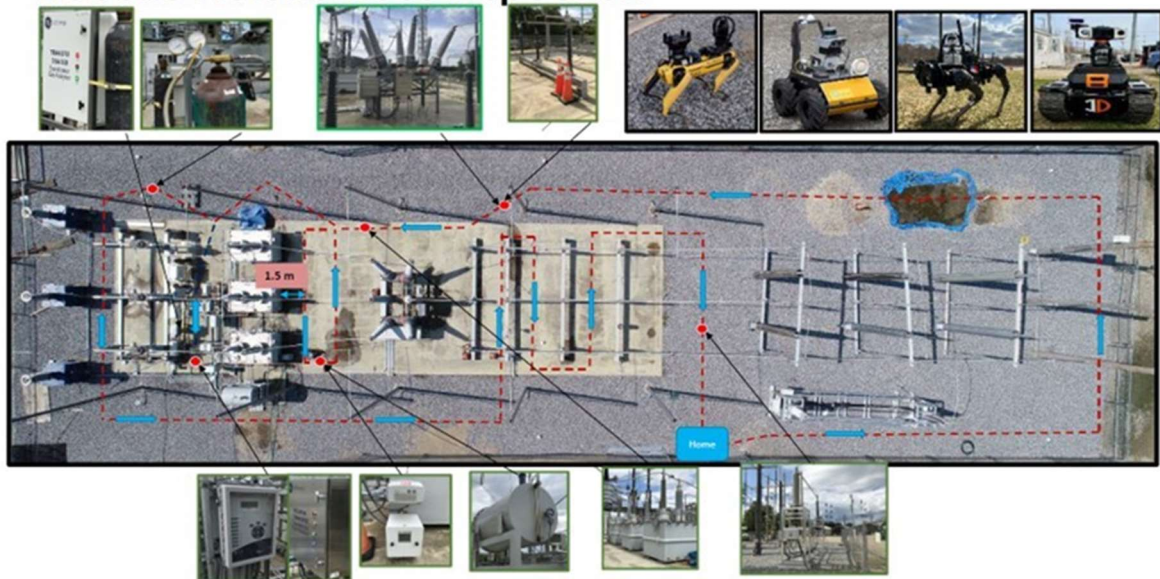


圖 48 EPRI 在 138kV 研究用變電所部署 4 種機器人並進行評估[17]

Evaluation Criteria

	Installation	Communication requirements and protocols Data storage Cyber security Open Architecture Outdoor/Indoor operation Maintenance Product Support AI integration and algos Capable to do Security function
	Self-Charging Batteries	
	Basic robot movement testing on various surfaces- Lenox campus	
	Visual Camera and IR-images	
	Navigation for Autonomous mission	
	Autonomous Navigation features	
	Night Testing (energized yard)	
	Electrical Field Operation	
	Magnetic Field Operation	
	Teleoperating	

圖 49 EPRI 針對 4 種移動式機器人進行測試的評估準則[23]

Collecting data is easy.



圖 50 EPRI 測試評估後認為容易藉由機器人蒐集天氣和現場儀表資料[17]

(2) 機器人/無人機資料與影像分析的機器學習/AI 應用

EPRI 的研究不僅僅是收集機器人和無人機的資料，更著重於如何利用這些數據來提高變電所巡檢的效率和準確性。機器學習和 AI 在數據分析中扮演關鍵角色，以下是具體應用：

- 自主資料分析：EPRI 的目標是開發能夠獨立收集和分析數據的自主機器人系統，無需人工干預。這表示，機器人不僅能執行自主巡視任務，還能即時處理收集到的數據，並識別潛在的問題。
- 影像辨識與分析：
 - (i) EPRI 正在評估各種分析平台，以處理機器人所收集的數據和影像。這些平台利用 AI 演算法，來自動識別設備異常、損壞或需要關注的區域。
 - (ii) AI 可以分析視覺影像、紅外線影像，甚至聲學影像，以提供全面的設備健康狀況評估。
 - (iii) 透過機器學習模型，系統可以自動辨識變電所設備的缺陷，例如：過熱的組件、洩漏、或損壞的絕緣體。

- 數據分析平台：

- (i) 包括研究可用的分析工具，這些工具可以與移動機器人解決方案整合或通信。這些工具利用 AI 演算法，從機器人和無人機收集的數據中萃取出有價值的見解。

- (ii) 這些平台可以分析數據並發出警報，以便工作人員可以快速處理潛在的問題。

- 機器人控制與導航：

- (i) 機器學習可用於提高機器人的自主導航能力，以在複雜的變電所環境中，安全有效地移動。

- (ii) AI 演算法有助於機器人避開障礙物，並根據預設的巡檢路線自主移動。

- 預測性維護：

- (i) 透過分析機器人和無人機收集的數據，AI 可以識別設備退化的早期跡象，以實現預測性維護。這有助於公用事業公司，在設備故障之前就解決問題，減少停機時間並延長設備的使用壽命。

- (ii) 使用 AI 可以根據歷史和即時數據，預測設備何時需要維護或更換。

(4) 後續研究

- EPRI 正在進行多項研究計畫，包括在 2024 年測試來自 Clearpath Robotics 的 Husky Observer、來自 ANYbotics Inc. 的 ANYmal、來自 Indro Robotics 的 Sentinel 和來自 Unitree Robotics 的 B2 機器人。

- 後續研究包括在挑戰性環境中導航、避開靜態障礙和執行變電所周邊巡邏。例如，圖 51 所示為 EPRI 研究並評估 ANYmal 執行巡邏變電所周邊的能力[17]；圖 52 所示為 EPRI 研究如何利用 ANYmal 執行無人機入侵偵測任務[17]。

- 未來的研究將專注於開發機器人的分析工具，包括充電能力、自主能力、控制、感測器、底盤和平台評估。

- EPRI 將繼續研究無人機在變電所的自主巡視，重點是性能評估和數據擷取的工作流程。



圖 51 EPRI 研究並評估 ANYmal 執行巡邏變電所周邊的能力[17]

Drone Detection

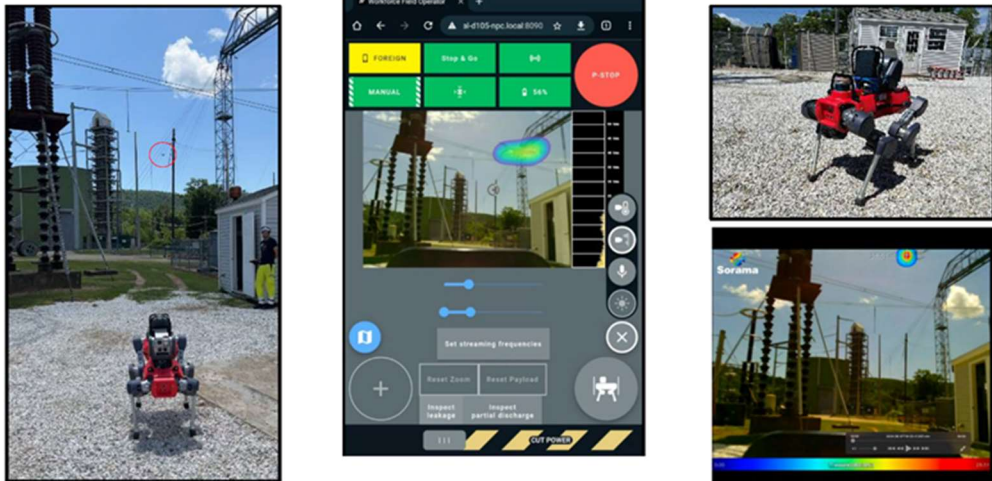


圖 52 EPRI 研究如何利用 ANYmal 執行無人機入侵偵測任務[17]

有趣的是我們在參訪 Lenox 戶外測試場域過程中，恰遇 Boston Dynamics SPOT 機器狗執行戶外變電所自主智慧巡視。目前在國內台積電擁有兩隻 SPOT 機器狗、台北科技大學一隻、另亦曾出現在台灣大學的媒體報導，可惜國內尚無代理商，原廠目前亦無意願將其推廣至台灣，現階段只能密切關注其後後續發展。

(5) 小結

- a. EPRI 機器人和無人機的應用研究為公用事業公司提供了寶貴的經驗與看法。Lenox 實驗室的機器人測試結果使得 Con Edison(聯合愛迪生能源公司)決定實施機器人進行內部先導計畫。Con Edison 的經驗突顯了在實際變電所部署機器人之前，在實驗室環境中進行測試的價值。Entergy 是另一家公用事業公司，意識到自動化能力正在發展中，並積極地在適當場合使用機器人。EPRI 研究的協作方法也有助於公用事業公司更快地學習並避免單打獨鬥。
- b. EPRI 團隊 2024 年已開始針對源自瑞士的 ANYmal 進行評估，由於本所近期已以租賃方式引進 ANYmal，初期規劃應用在變電所、高潛在工安風險場域以及無人水力電廠之巡視，因此後續 EPRI 的應用經驗和評估結果值得我方參考。
- c. 本所過去亦曾執行研究計畫「變電所巡檢機器人之研究」，研究重點在於開發具備執行智慧巡檢、遠端監控、紅外線熱點偵測、異常警報通知及門禁管理等功能的輪型機器人—瓦力，並於萬華變電所進行實測驗證。瓦力可依照中央控制室排定的巡檢時程，每天進行 2 次、各 20 分鐘的巡檢任務，替空斷開關、電容器、主變壓器等設備安全做把關。透過設定好的行進路線，即時回傳影像到中控室，讓人員可以了解現場即時狀況，視需要派遣相關人員前往維護。然而輪型機器人的應用仍受環境限制，例如無法執行無人水力電廠廠房巡視，因為不具備爬階梯能力。
- d. 無論以機器人或無人機進行變電所的巡邏，過程中所記錄下來的影片仍需要運轉維護人員以肉眼檢視是否有異常狀況，理想的狀況是透過深度學習後在這類無人載具上以 Edge Computing 直接判斷是否有異常。然而，和 EPRI 專家討論後得知其團隊仍在努力研究中，這是因為變電所環境需辨識的設備、儀表種類多、高度及視角等

均不相同，在影像辨識上比車牌辨識等複雜得多。後續進展仍值得密切關注。

- e. 有關 EPRI 研究無人機偵測技術，以應用在變電所實體安全防護。Drew 告知在美國電力公司只能偵測是否有無人機入侵變電所場域，而不能採取其他行動。而在韓國電力公司一旦偵測無人機入侵變電所場域，是允許將其擊落的。本公司發電廠、變電所等關鍵基礎設施已引進無人機電子偵蒐與干擾系統，相較之下應該是更為先進有效。

3. Ground Level Distribution System [17]

(1) 研究背景

傳統的地下電纜佈設方式在某些情況下會遇到挑戰，例如受污染的土壤、多岩石的地質、在具有考古或宗教敏感性的地區必須取得施工許可、挖掘土壤的測試、處理與棄置等。在這些情況下，可能無法滿足美國國家電氣安全規範（National Electrical Safety Code）的傳統埋設深度要求。因此，EPRI 正在研究替代方案，即地面配電系統（Ground Level Distribution System, GLDS）。

GLDS 的目標是提供一種更具彈性、適用性更廣泛的地下配電解決方案，以應對各種地形和環境限制。

(2) 技術說明

GLDS 是一種淺層埋設的配電系統，其組件包括：頂板(為系統提供保護蓋)、防火混凝土密封劑、導軌系統(支撐結構並有利於安裝)、電纜或電纜導管、接地錨、非金屬鋼筋。主要金屬組件包括：電纜（導體和金屬屏蔽）、接地錨，如圖 53 所示。GLDS 的主要尺寸為：高度 5 英寸、寬度 24 英寸、電纜/導管上方至少 2 英寸的混凝土覆蓋。

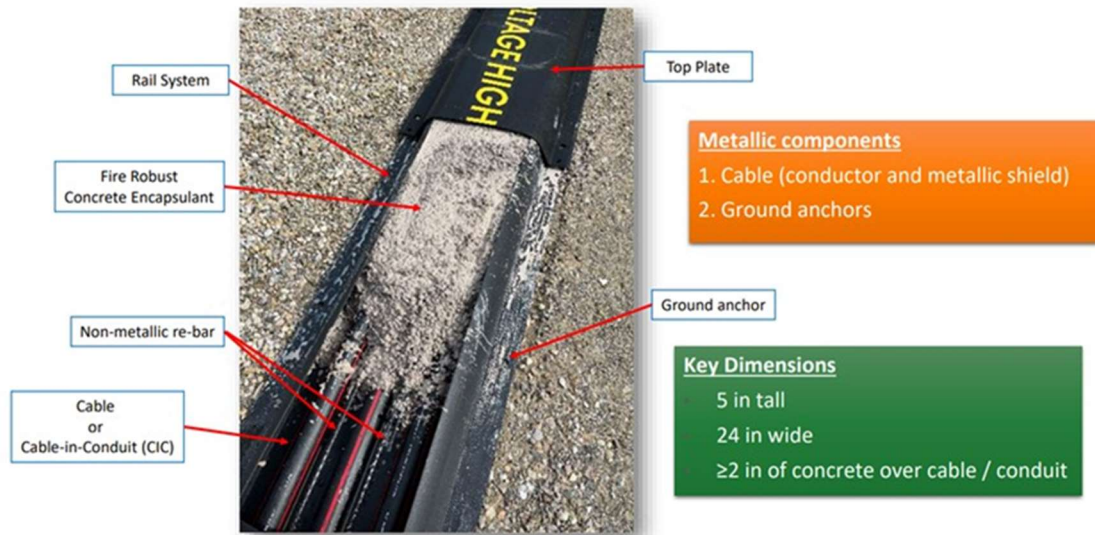


圖 53 GLDS 的關鍵組件[17]

GLDS 的設計重點在於確保電纜的安全性和可靠性，並在淺層埋設的同時提供必要的保護，這種設計具備多層次的防護，包括(i)混凝土封裝：提供防火和結構保護。(ii)非金屬鋼筋：減少腐蝕的風險，頂板：提供額外的機械保護。

(3) 研究重點

EPRI 在其 Lenox 實驗室戶外場域進行 GLDS 研究。研究重點在三個關鍵領域：

- ◆ 耐用性測試，包括：評估系統承受各種應力的能力，包括抗擠壓、防火、抗衝擊、抗車輛碾壓，如圖 54 所示。
- ◆ 電流性能，包括：評估載流量、磁場效應和載流量的季節性變化，如圖 55 所示。
- ◆ 可修復性，包括：探索 GLDS 中故障定位、接頭修復和從導管中移除電纜所需拉力等工法，如圖 56 所示。

研究包括模擬各種條件，以評估 GLDS 在不同情況下的性能。

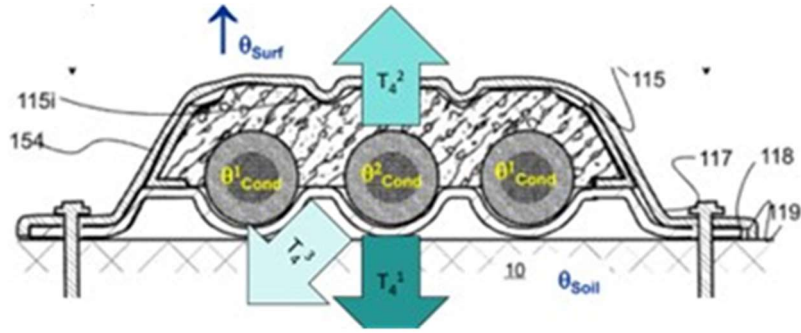


圖 54 GLDS 耐用性研究[17]

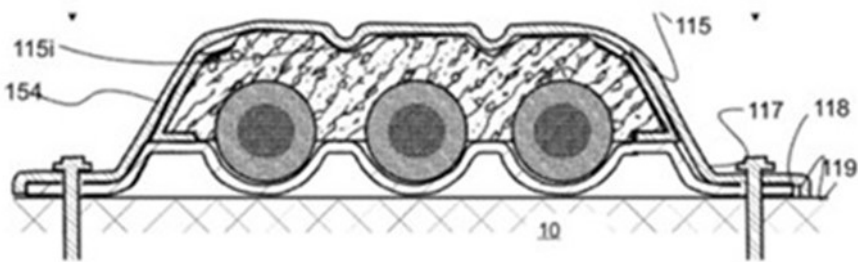


圖 55 GLDS 電流性能研究[17]

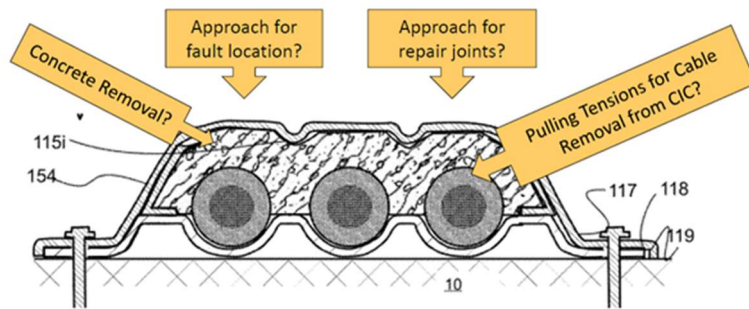


圖 56 GLDS 可修復性研究[17]

(4) 執行現況

EPRI 的 Lenox 實驗室設有一個專門用於 GLDS 研究的戶外測試區，專案計畫於 2024 年 10 月啟動。該設施使研究人員能夠收集與耐用性、載電流量和可修復性等相關的關鍵性能數據。

(5) 小結

- a. EPRI 的 GLDS 旨在應對傳統地下電纜佈設的挑戰。透過淺層埋設，可以在各種環境條件下提供靈活的配電。
- b. EPRI 的研究重點在於評估 GLDS 的性能和可靠性，並開發適合公用事業使用的解決方案，以加速 GLDS 技術的發展和部署，使其成為未來電力基礎設施的關鍵組成部分。

(三) Charlotte 實驗室參訪與技術交流

Charlotte 實驗室佔地 107,600 平方英尺，聚焦於非破壞性評估、焊接技術研究、材料測試和特性研究、輸配電(T&D)組件老化和測試、輸配電感測器開發、電磁脈衝(EMP)研究等，主要測試項目如圖 57 所示。

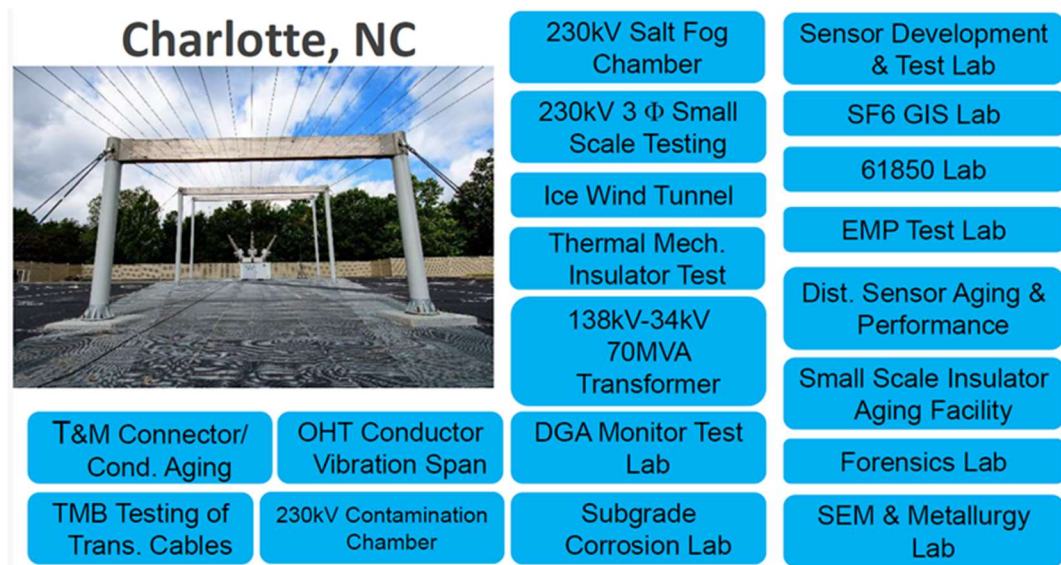


圖 57 EPRI Charlotte 實驗室的主要測試項目[17]

EPRI 的輸電與變電所研發部門致力於為輸配電資產、網路安全和資訊通訊的研發工作，該部門負責執行 EPRI 四項研究計畫，擁有逾 150 名工程師和科學家，目標是提供先進的知識、技術和工具，以協助做出有關資產生命週期的決策。參訪 Charlotte 實驗室的行程，在資深全球業務經理連博士的陪同下，由 EPRI Charlotte T&D labs 研究部門總監 Drew McGuire 率 4 位專家接待，除了雙方自我介紹外，本所由曹主任簡報介紹台電公

司推動淨零碳排、強化電網韌性政策方向及本所對應的研發策略及動態，特別強調極端天候下電網與電力資產韌性強化、高再生能源滲透率電網低轉動慣量和低故障電流量測與調適技術等議題，EPRI 則是由幾位專家輪流進行簡報，重點摘要如下。

1. Power Transformer Expert System [26]

EPRI P34 資產管理計畫經理 Bhavin Desai 藉由簡報簡介其團隊所開發的電力變壓器專家系統(Power Transformer Expert System, PTX)軟體的主要議題和關鍵內容。PTX 變壓器資產管理軟體利用基於規則的 MYCIN 專家系統(一種源自史丹佛大學的早期專家系統)，透過現有的狀況和變壓器描述（銘牌）數據，評估變壓器的狀況。最終結果是一系列針對每個變壓器的指標，這些指標提供了對絕緣系統狀況和潛在異常初始故障的洞察，可用於指導進一步診斷測試和維護作為，以及指導整體資產的管理決策。

(1) 電力變壓器設備群管理的挑戰和需求

公用事業公司在管理其電力變壓器設備群時面臨的重大挑戰：

- ◆ 基礎設施老化：故障風險增加，可能導致代價高昂的停電。事實上台電公司正面臨此風險，因輸供電系統許多電力變壓器運轉多年已陸續進入運維的浴盆曲線後期，故障風險正逐年提升。
- ◆ 專業知識減少：經驗豐富的變壓器專家數量減少，對有效的資產管理構成挑戰。台電公司因近年來公司遭逢大退休潮，許多經驗豐富的領班、師傅陸續屆齡退休而大量新進人員遞補，正努力採取各種方法加強技術與經驗傳承以降低技術斷層的風險。
- ◆ 數據量不斷增加：來自各種離線及線上來源的大量數據需要有效的分析和解釋。台電公司近年來致力於數位轉型，大力提倡大數據分析以及透過 AI 技術分析並加以應用。

為了應對這些挑戰，EPRI 強調需要：

- ◆ 風險指標：清晰的指標來識別有故障風險的變壓器。

- ◆ 緩解措施：基於數據的維護、修理或更換建議。
- ◆ 設備群健康評估：全面了解變壓器設備群的整體狀況。
- ◆ 更換優先順序：基於風險和重要性客觀地決定變壓器汰換的優先順序。

(2) EPRI 的解決方案：PTX 軟體

PTX 是由 EPRI 開發的專家系統軟體，旨在應對前述挑戰。PTX 的主要功能包括：

- ◆ 整合專家知識：PTX 在基於規則框架中運用了數十年的電業知識和實務經驗。
- ◆ 數據驅動分析：PTX 分析各種數據來源，包括油中溶解氣體分析(DGA)結果、絕緣油量測數據、變壓器量測數據及設計資訊，以產生風險指標和建議。
- ◆ 穩健的算法：PTX 算法設計用於處理有限或欠缺的數據，確保在實際情境中的可用性。
- ◆ 透明度：PTX 背後的方法和知識庫是透明的，使用戶能夠理解軟體建議的依據。
- ◆ 可擴充性：PTX 可應用於具有不同數據取樣頻率的大型變壓器設備群。
- ◆ 演進和整合：PTX 不斷發展，具有新的特性和功能。該軟體提供各種整合選項，包括桌面應用程式和用於與第三方資產管理平台自定義整合的.NET 庫 (DLL) 等。

(3) PTX 輸出和價值

PTX 提供多個關鍵輸出以供決策參考：

I. 狀態指數類別：PTX 為每個變壓器分配各種類別的狀態指數，包括：

- ◆ 正常老化：識別由於預期老化而接近使用壽命終止的變壓器。
- ◆ 異常狀態（熱、電、鐵芯）：識別由於製造缺陷或運轉使用而出現意外問題的變壓器。
- ◆ 有載分接頭切換器(Load Tap Changer, LTC)指數：指示 LTC 元件中潛在的故障情況。
- ◆ 套管指數：評估各個套管的的健康狀況。
- ◆ 絕緣油指數：提供絕緣油可用性的指示。

II. **門檻值和風險評估**：PTX 對每個指數使用預先定義的門檻值來識別需要關注的變壓器。這些門檻值基於對大型變壓器設備群的分析，並提供合理的信號雜訊比。

III. **優先順序和建議**：PTX 識別需要立即關注的變壓器、接近使用壽命終止的變壓器，以及需要進一步檢查的潛在問題的變壓器。

EPRI 團隊藉由案例分享突顯 PTX 的價值：

(i) **哥斯達黎加電力研究所(ICE)**：PTX 分析幫助 ICE 識別需要關注的特定變壓器，並排定變壓器汰換的優先順序。重點說明如下：

- PTX 被應用於分析 608 台電力變壓器的狀況。此分析基於七年的油中溶解氣體分析和油品質數據。
- 專家參與：ICE 的變壓器專家參與了審查結果。通過多次線上會議，收集了關於軟體性能問題的回饋，並將這些回饋納入最新版本。
- 持續支援：EPRI 持續提供支援，包括更新先前的分析和結果審查，協助 ICE 團隊自行使用軟體，並協助將 PTX 結果納入整體變壓器健康指標中。
- 價值：PTX 幫助識別需要關注的特定變壓器，例如，增加取油送試頻率、離線測試、線上監測或汰換變壓器等。這有助於更有效地分配運營和維護資金，並識別待汰換之變壓器。PTX 的應用有助於根據絕緣紙老化找出最差的 10 台變壓器（待更換之候選者），並根據異常情況找出最差的 10 台變壓器(近期須人工介入候選者)，如圖 58 所示。
- 分析細節：PTX 能夠分析個別變壓器的細節。例如，針對 500203 號變壓器，PTX 指出其產生乙炔，表示存在不良接頭，並因絕緣油品質不佳導致絕緣油過度劣化，如圖 59 所示。

Top 10 Worst Transformers by Paper Degradation: (Replacement Candidates)

Serial Number	Vintage	Manufacturer	HV Voltage (kV)	Normal Degradation
500203	1973	Siemens	132	0.67
07600909	1976	KITASHIBA*	138	0.62
H879400	1973	GENERAL ELECTRIC*	34.5	0.58
335286	1973	UNION*	34.5	0.47
5BA186801	1977	OSAKA*	132	0.47
AG69065T1	1983	FUJI EL.*	230	0.46
AX69030T23	1981	FUJI EL.*	230	0.42
G851511B	1974	GENERAL EL.*	138	0.42
5A1651001	1976	OSAKA*	138	0.41
11120592	1994	COEMSA*	230	0.41

Top 10 Worst Transformers by Abnormal Condition: (Candidates for Near Term Intervention)

Serial Number	Vintage	Manufacturer	HV Voltage (kV)	Abnormal Thermal	Abnormal Electrical	Abnormal Core
500203	1973	Siemens	132	0.43	0.94	0.12
07600909	1976	KITASHIBA*	138	0.48	0.94	0.19
AX69030T23	1981	FUJI EL.*	230	0.49	0.83	0.64
AX69030T22	1981	FUJI EL.*	230	0.52	0.8	0.64
9146994	1992	PAUWELS*	138	0.46	0.79	0.55
C0031B	2004	EFACEC*	230	0.43	0.71	0.49
58999	1991	ABB	138	0.44	0.74	0.57
1113074U	1994	COEMSA*	138	0.46	0.79	0.6
59001	1991	ABB	138	0.46	0.79	0.6
500201	1973	Siemens	138	0.48	0.72	0.49

圖 58 應用 PTX 找出絕緣紙退化最嚴重的 10 台變壓器，並根據異常情況找出最差的 10 台變壓器[26]

Transformer 500203 Analysis Details

Station	Designation	Serial Number	Vintage	Manufacturer	HV Voltage (kV)
SIQUIRRES	08-73	500203	1973	Siemens	132

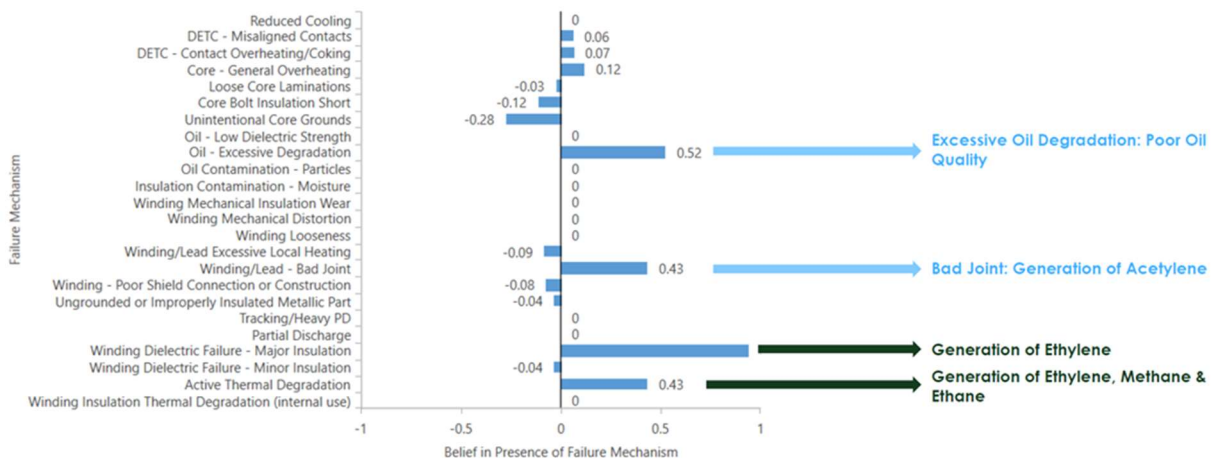


圖 59 PTX 分析 500203 號變壓器，指出其產生乙炔，表示存在不良接頭，並因油品質不佳導致油過度劣化[26]

(ii)英國國家電網(NGUK)：PTX 透過根據風險有效地篩選變壓器，大幅減少了年度資產健康檢查所需的時間，說明如下：

- PTX 在 NGUK 的應用：自 2019 年起，NGUK 將 PTX 作為年度資產健康審查 (AHR)的一部分。在此過程中，共審查了 1019 台變壓器。
- 資產篩選：藉由將 PTX 正常分數(normal score)門檻設定為 ≤ 0.24 ，篩選出 591 台變壓器。(在 2020 年篩選出 617 台，並在 2021、2022 和 2023 年對所有變壓器中應用此標準) 若僅使用傳統的「使用壽命終止(end of life, EOL)分數 ≤ 2 」的標準，則只會篩選出 266 台。
- 節省時間：藉由使用 PTX 篩選，NGUK 在篩選這 325 台變壓器上節省了大約 21 個工程師工作天。
- 持續改進：目前正在進行的工作旨在提高對 PTX 分析的信心，並使其與 NGUK 的標準一致，預計將帶來額外的改進和節省時間。
- 總結來說，PTX 在 NGUK 的應用大幅提高了年度變壓器健康審查的效率，如圖 60 所示。藉由使用 PTX 的篩選功能，NGUK 節省了大量的工程師時間，並且能夠更快速地識別出需要關注的資產。

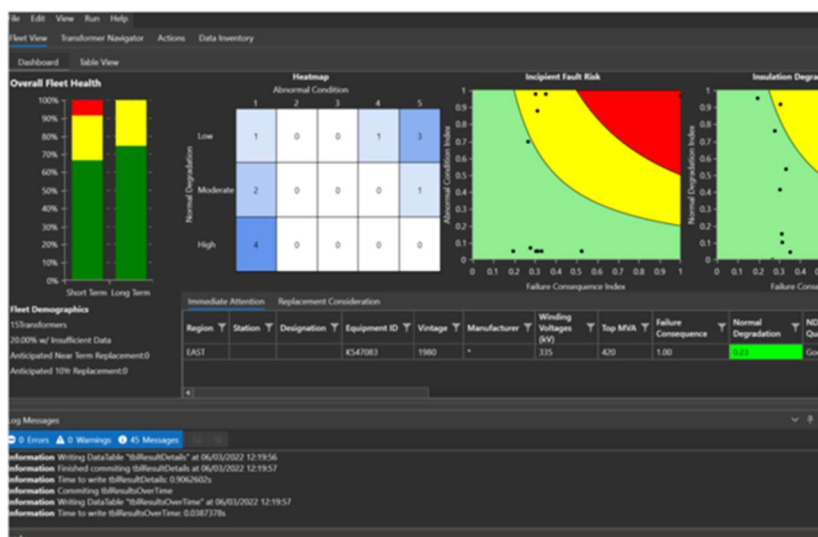


圖 60 PTX 在 NGUK 的應用大幅提高了年度變壓器健康審查的效率[26]

(4) PTX 演進和未來方向

PTX 自 2007 年以來持續發展，演進過程如圖 61 所示，陸續增加新的特性和功能，包括：

- ◆ 強化的 LTC 分析：整合演算法以評估整體故障風險。
- ◆ 線上 DGA 監測器數據分析：分析來自線上 DGA 監測器數據的能力。

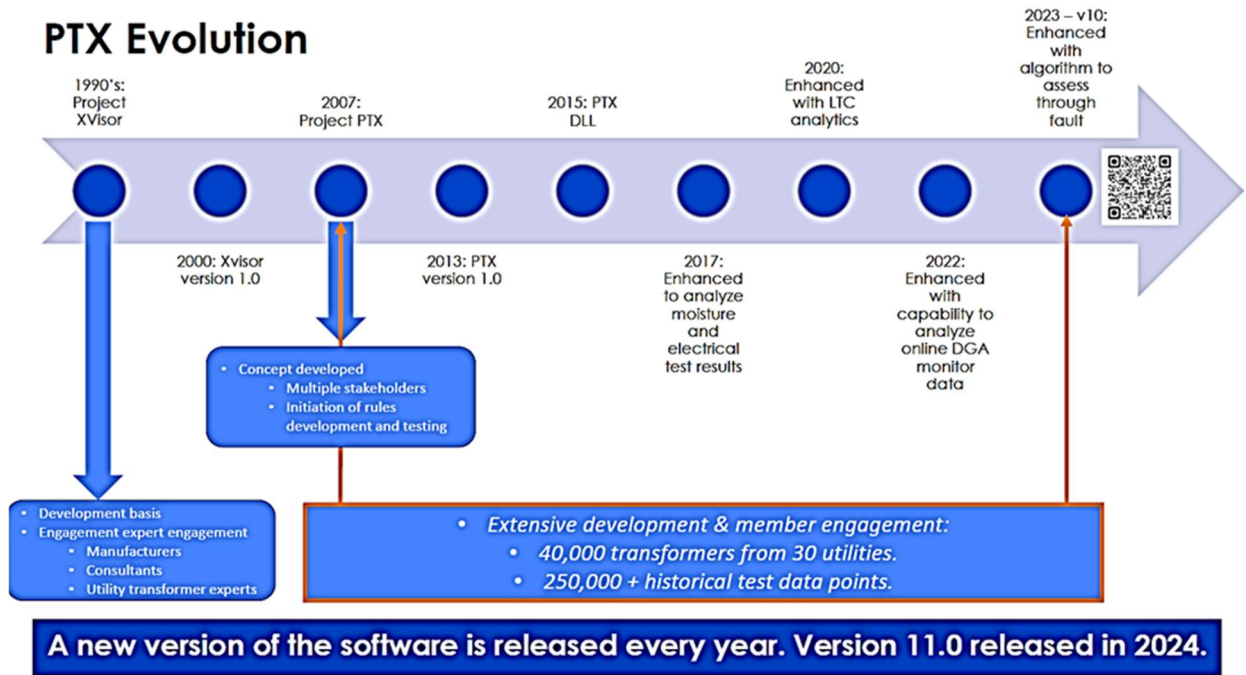


圖 61 EPRI 變壓器專家系統 PTX 的演進史，第 11 版於 2024 年發佈[26]

(5) 小結

- EPRI 的 PTX 對於面臨變壓器老化挑戰的公用事業公司是一個有價值的工具。PTX 提供數據驅動的洞察力，以支持風險評估、優先順序的排序和決策，使公用事業公司能夠優化維護策略、降低風險並確保電網可靠性。PTX 與先進分析技術的持續發展和整合可望進一步強化變壓器設備群管理能力。
- 電力變壓器是電力系統的關鍵設備之一，其正常運轉對穩定供電極為重要。本所長期致力於利用變壓器油中氣體分析進行變壓器故障預警及事故診斷，累積豐富的經驗。依本公司輸工處 111 年材規，要求新裝設之 69kV 以上電力變壓器必須安裝線

上 DGA 和 PD 監測設備，以提供更完整的即時監測資料，因此本所正積極推動變壓器狀態監測與智慧診斷技術研究，期能建置變壓器狀態監測與智慧診斷平台。EPRI PTX 有助於運維人員以客觀科學的方式，迅速識別出故障風險高的特定變壓器，除了穩定供電外，更可提高工作效率、減輕運維壓力。若能引進此系統，本公司可望站在巨人的肩膀上就變壓器診斷技術加速精進，並且可以與國際電力同業交流分享經驗，共同成長。

2. SF6-Free Breaker Pilots [27]

Luke van der Zel 博士簡報由 EPRI 領導的合作研究專案 SF6-Free Breaker Pilots，旨在加速無六氟化硫（SF6）斷路器技術的採用。該專案對各種新技術在 EPRI Lenox 實驗室研究用變電所內進行加速老化測試，針對這些技術進行快速、安全的評估，為未來廣泛的現場部署預為準備。摘要說明如下。

(1) 產業挑戰

- **減少 SF6 使用的壓力日益增加：**業界面臨著減少使用 SF6 氣體的壓力，此壓力來自監管機構，以及電力公司內部減少二氧化碳排放的目標。
- **沒有簡單的替代方案：**現有的 SF6 替代技術各有優缺點，需要進一步的研究和測試。
- **每種新技術都有優點、挑戰和新的學習：**例如，真空和潔淨空氣技術的優點是環保，但可能需要更複雜的設計和維護程序。
- **目前沒有單一的替代方法：**不同的電力公司可能需要根據其特定需求選擇不同的 SF6 替代技術。

(2) 替代技術

- ◆ **真空和清潔空氣技術：**使用真空和潔淨空氣作為絕緣和消弧介質。
- ◆ **Fluoronitrile(FN)混合氣體：**採用 FN 混合氣體作為 SF6 的替代品，其地球暖化潛勢較低。

(3) EPRI 的研究專案計畫

- ◆ 目標：加速採用無 SF6 技術，降低電力公司採用新技術的風險。
- ◆ 方法：在 EPRI 研究專用變電所部署一系列無 SF6 斷路器技術，包括真空/潔淨空氣、CO₂ 混 O₂，和 C₄-FN 混和氣體技術，如圖 62 所示，同時開發並執行針對每種技術的斷路器老化測試程序。

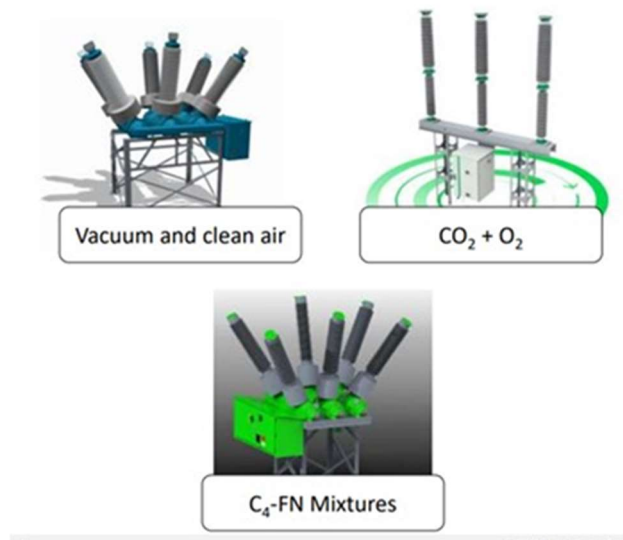


圖 62 EPRI 在其研究專用變電所部署一系列無 SF6 斷路器技術[27]

其中 C₄-FN 混和氣體是氣體混合物，主要用於取代傳統的高壓電力設備中所使用的六氟化硫(SF₆)氣體。相較於 SF₆ 對環境造成極大的危害，C₄-FN 混和氣體則是一種較環保的替代方案。

C₄-FN 混和氣體的組成與特性

- ◆ C₄-FN：是一種含氟的有機化合物，是 C₄-FN 混和氣體的主要成分。
- ◆ 其他氣體：除了 C₄-FN，混合物中通常還包含其他氣體，例如氧氣(O₂)、二氧化碳(CO₂)和氮氣(N₂)等。這些氣體的成分比例會根據不同的應用需求而有所調整。

C₄-FN 混和氣體具備以下優點：

- ◆ 環保：相較於 SF₆，C₄-FN 混和氣體的地球暖化潛勢顯著降低，對環境的影響

較小。

- ◆ 性能優異：C4-FN 混和氣體具有優異的絕緣性能和消弧性能，可以滿足高壓電器設備對絕緣氣體的要求。
- ◆ 應用廣泛：C4-FN 混和氣體可以應用於各種高壓電力設備，例如斷路器、氣體絕緣開關設備(GIS)等。

測試：在為期 12 個月的時間內，對無 SF6 斷路器技術進行一系列加速老化測試，包括：

- 極端天氣條件，如炎熱潮濕的夏季和寒冷多雪的冬季。
- 每小時 5 分鐘的淋雨測試，以模擬極端潮濕的環境。
- 交流和落雷衝擊電壓極值，如圖 63 所示。
- 在 12 個月內完成斷路器整個生命週期的機械操作，如圖 64 所示。
- 以人為方式製造氣體洩漏，以了解檢測和性能。
- 定期進行離線測試以確認斷路器老化情況。

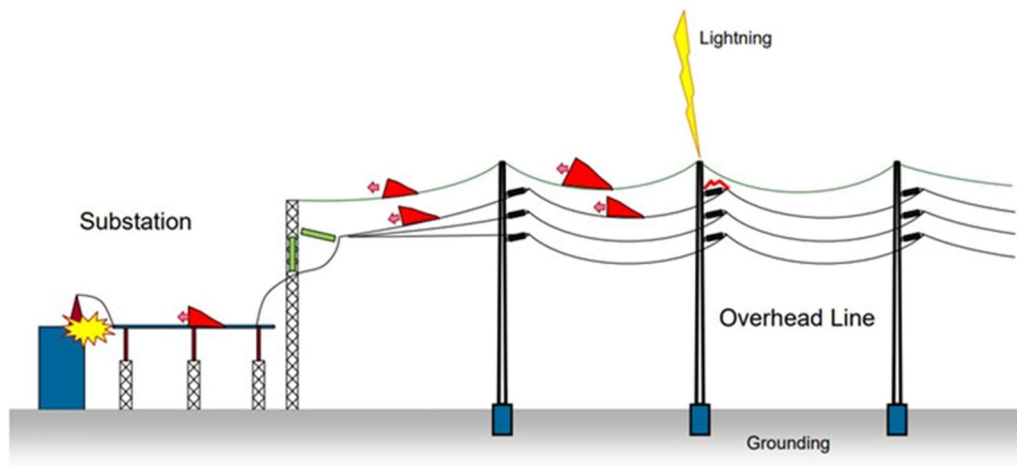


圖 63 進行基於 IEC 60071-2 的落雷過電壓研究[27]

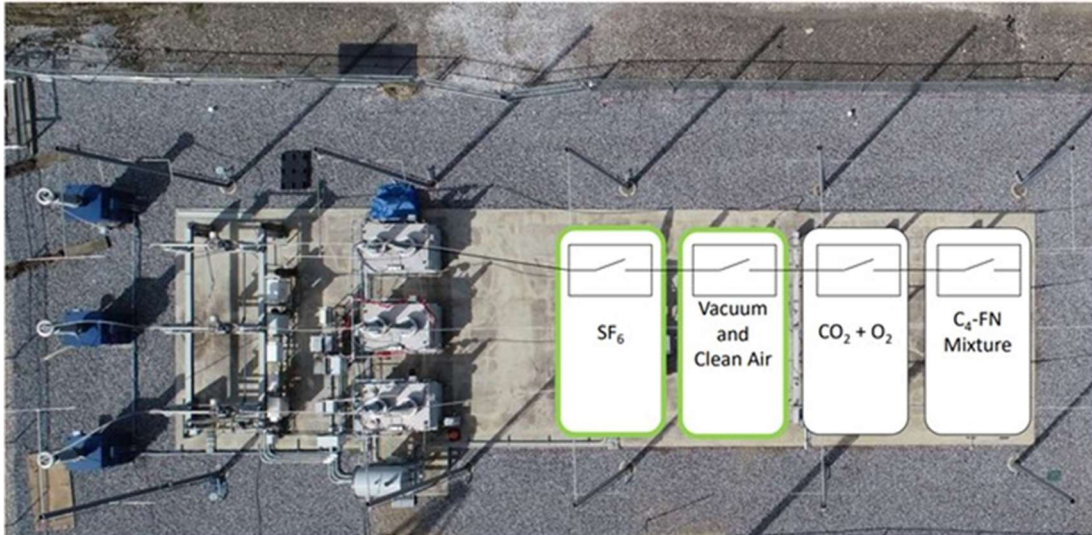


圖 64 EPRI 無 SF6 斷路器技術的評估計畫[27]

預期效益：

- 降低電力公司採用無 SF6 斷路器技術的風險。
- 快速、動手學習各種無 SF6 技術，包括真空/潔淨空氣和 Fluoronitrile 混合氣體技術。
- 在新斷路器技術的調校、操作、氣體處理、離線測試、維護和報廢評估方面獲得寶貴的見解。

(5) 小結

- a. 由於 SF6 對地球暖化的影響是 CO2 的 23,500 倍[12]，SF6 替代方案或減量已是國際趨勢且影響重大，例如歐盟已提出禁止六氟化硫(SF6)氣體用於電氣開關設備禁用期程，2026 年新設 24kV(含)中壓 GIS 禁止使用 SF6，2032 年新 145kV(含)高壓 GIS 禁止使用 SF6。本公司早在 103 年便曾派員出國進行「新型 SF6 減量及無 SF6 絕緣開關設備實習」[29]，因應未來 GIS 設備逐漸汰換為非 SF6 電氣開關設備的趨勢，目前已在玉里變電所導入 23kV 空氣式 GIS 試辦，正持續評估中。
- b. 此外本所也自 109 年起成立「SF6 減量及無 SF6 23kV 開關設備技術」研究計畫[30]，進行深入研究探討，研究成果重點包括：(i)建議本公司未來在中壓配電等級以空氣

CGIS 替代 SF6 CGIS，然而因絕緣性能較差，故需提高空氣壓力或加大導體間距以達到相同絕緣能力，目前適合本公司一次配電系統標準設計額定電壓/電流 24kV/2000A 規格之空氣 CGIS 上市產品較少，建議視市場成熟狀況逐步引入。(ii)若需維持與 SF6 CGIS 相同的緊湊體積，空氣 CGIS 需較高氣壓以提高絕緣能力，若有漏氣，氣壓降至一大氣壓，空氣 CGIS 可能有絕緣不足之虞，此為採用較高壓力空氣代替 SF6 時所需之代價，目前市售空氣 CGIS 最低操作壓力皆大於 1 大氣壓，建議空氣 CGIS 需安裝氣壓監測警報裝置，並定期查驗校正。

- c. 雖然 EPRI 評估技術涵蓋 C4-FN，因為其溫室效應潛勢較 SF6 低，在大氣中壽命亦短，然而值得注意的是其最終分解產物可能形成 CF₃COOH、CF₃CH₂OH 及其它多種長壽命、有生物毒性物質[30]，因此採用 C4-FN 技術衍生的疑慮及未來在各國電力產業應用狀況與禁用規定有待進一步觀察。
- d. 無 SF6 斷路器技術是電力產業因應氣候變化和減少溫室氣體排放的重要技術。EPRI 的研究專案旨在加速這些技術的採用，並為電力公司提供必要的知識和工具，以便成功轉型到無 SF6 的未來，後續發展值得本公司相關業管單位密切關注。

3. Evaluation of Optical Fiber as an Overhead Transmission Line Monitoring Sensor

[31]

EPRI 專家 Daniel Malan 藉由簡報概述了關於評估以光纖作為架空輸電線路監測感測器的關鍵資訊。該技術使用架空光纖（如 OPGW）作為連續感測器，以檢測輸電線路上或附近的各種干擾，監測範圍可達 100 公里到 200 公里，準確度從短於 1 米至數米不等。圖 65 為光纖架空輸電線路監測感測器原理示意圖，光纖附近任何移動均可以被偵測。討論過程中，經 Daniel 確認此感測器僅需要用到 1 芯光纖。

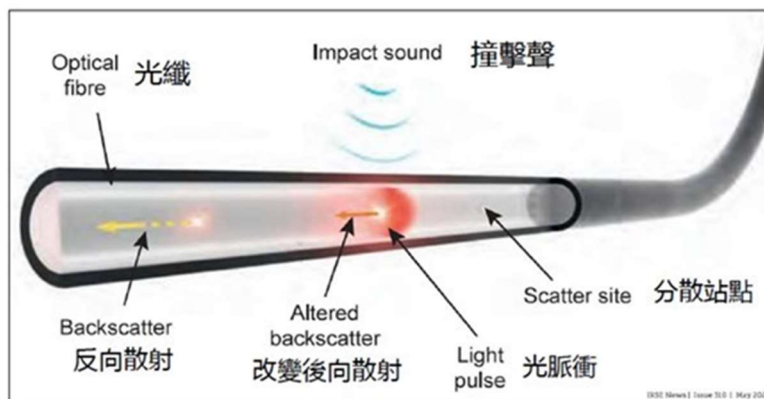


圖 65 光纖架空輸電線路監測感測器原理，光纖附近任何移動均可以被偵測到[31]

(1) 專案目標和效益：

主要目標：

- 評估該技術在不同應用情境下的準確性，包括雷擊、動態線路容量額定、閃絡、盜竊、野火、斷線、電暈放電、風、結冰和架空輸線路線下植物碰觸，如圖 66 所示。
- 該專案計畫預期確認該技術應用於這些應用案例的能力，並分析其準確性，包括誤報和漏報。圖 67 所示為位於 Lenox 的架空輸電線路光纖監測感測器測試場域。

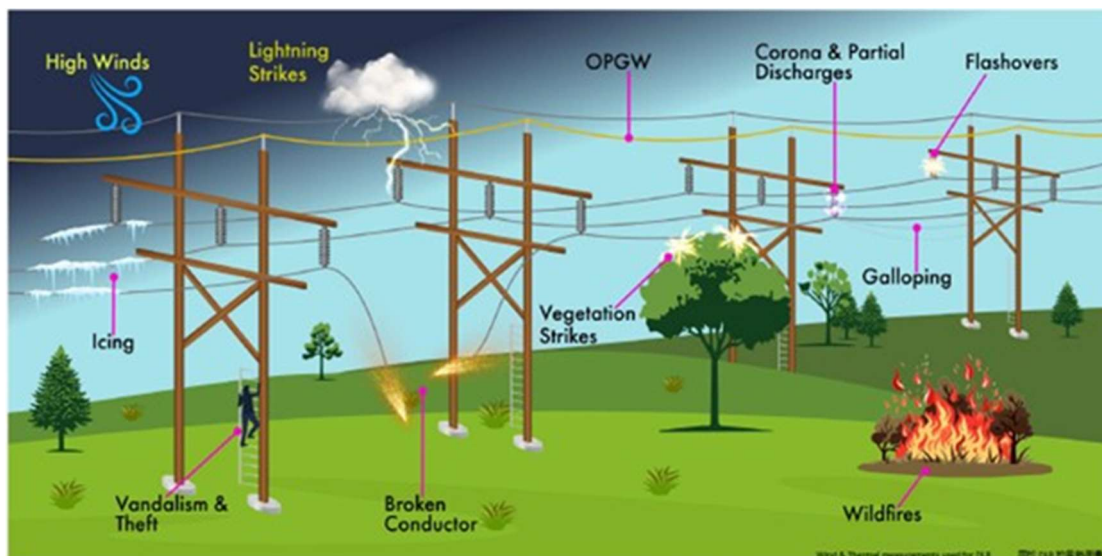


圖 66 以光纖作為架空輸電線路監測感測器的應用情境[31]

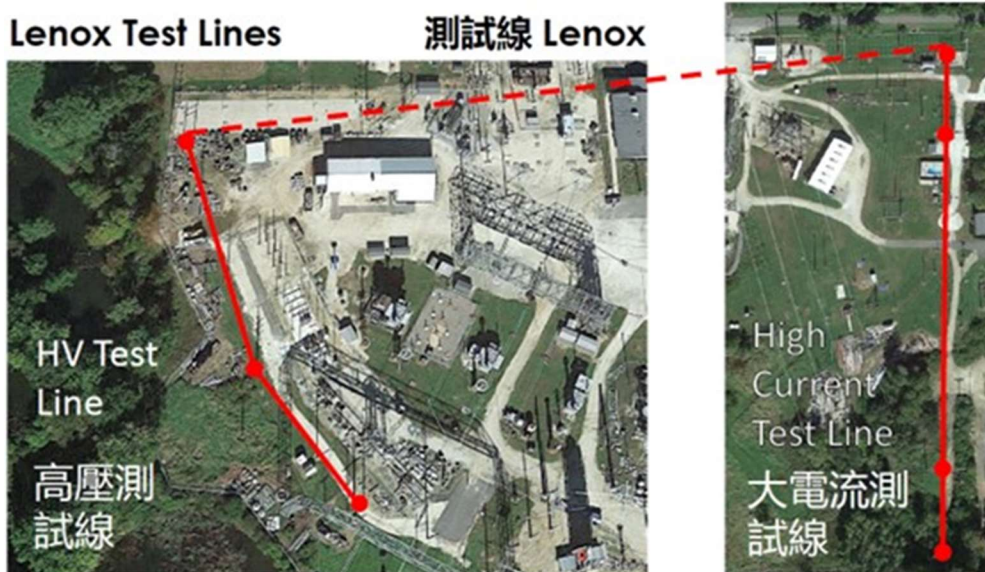


圖 67 位於 Lenox 的架空輸電線路光纖監測感測器測試場域[31]

效益包括：

- 作為惡劣天氣條件的預警系統，尤其是在偏遠地區。
- 提高系統出現不穩定問題時的預警能力。
- 提供準確的回饋，以便在停電後加速重新送電。
- 協助公用事業公司規劃維護和檢查。
- 為動態線路容量額定提供潛在的低成本解決方案。

(2) 技術和供應商：

- 該技術的工作原理是使用光纖作為一個長而連續的感測器。光纖附近的任何移動都是可檢測的。
- 以下列出了參與這項技術的各個供應商，包括：
Prisma Photonics、Sintela、Oz Optics、Prysmian OPGWatch、Bandweaver、LIOS Sensing - Luna Innovations、NEC Spectralwave、FORM 和 FiberSense

(3) 小結

- a. EPRI 的這項專案旨在評估光纖作為架空輸電線路監測感測器的準確性。該技術利用架空光纖（如 OPGW）作為連續感測器，以偵測多種可能發生的異常或干擾。

- b. 此技術可協助電力公司即時監控大範圍的架空輸電線路資產。相較於傳統的動態線路額定值感測器，本技術可能提供低成本的解決方案。此計畫適用於任何使用或計畫使用架空光纖的電力公司，鑒於本公司輸電系統大多已建置 OPGW，建請相關業管單位評估是否參與該專案，並密切關注此技術之發展。

4. Research Update – Distribution Assets[32]

EPRI 配電資產專家 Joe Potvin 為我們進行簡報，說明 EPRI P180 Distribution Systems 研究計畫執行現況。因應電網現代化和電氣化正在推動配電系統的設計、建造、維護和管理方式發生重大變化，EPRI 配電系統研究團隊進行引領產業的研發，以使公用事業公司能夠有效管理配電系統。該研究重點關注配電資產，例如電桿、變壓器、復閉器 (reclosers)和電纜，涵蓋其整個生命週期，從規格制定到拆除等。

計畫涵蓋面向

- ◆ 架空線路資產
- ◆ 地下電纜資產
- ◆ 配電自動化資產
- ◆ 安全和工作實務
- ◆ 資產和可靠性分析

目標

提供先進的知識、技術和工具，使公用事業單位能夠在配電資產生命週期內做出明智的決策。

(1) P180.001 - 架空配電資產

架空配電資產專案包括 (i) 結構設計：電桿連鎖失效調查、替代電桿和橫擔材料評估、(ii) 組件可靠度：架空連接器性能、導體性能和新型材料評估、新型變壓器技術評估、(iii) 檢查和維護：電桿檢查技術評估、線上狀態監視、目視檢查和基於狀態的監視，如圖 68 所示。



圖 68 P180.001 架空配電資產專案計畫總覽[32]

(2) P180.002 - 地下配電資產

地下配電資產專案計畫研究主軸包括(i)失效分析：出了什麼問題？(ii)診斷：如何找到潛在的問題？(iii)性能：它運作得如何？(iv)資產健康狀況：如何維持系統運作？(v)供應和標準：如何取得合適的資產？如圖 69 所示。

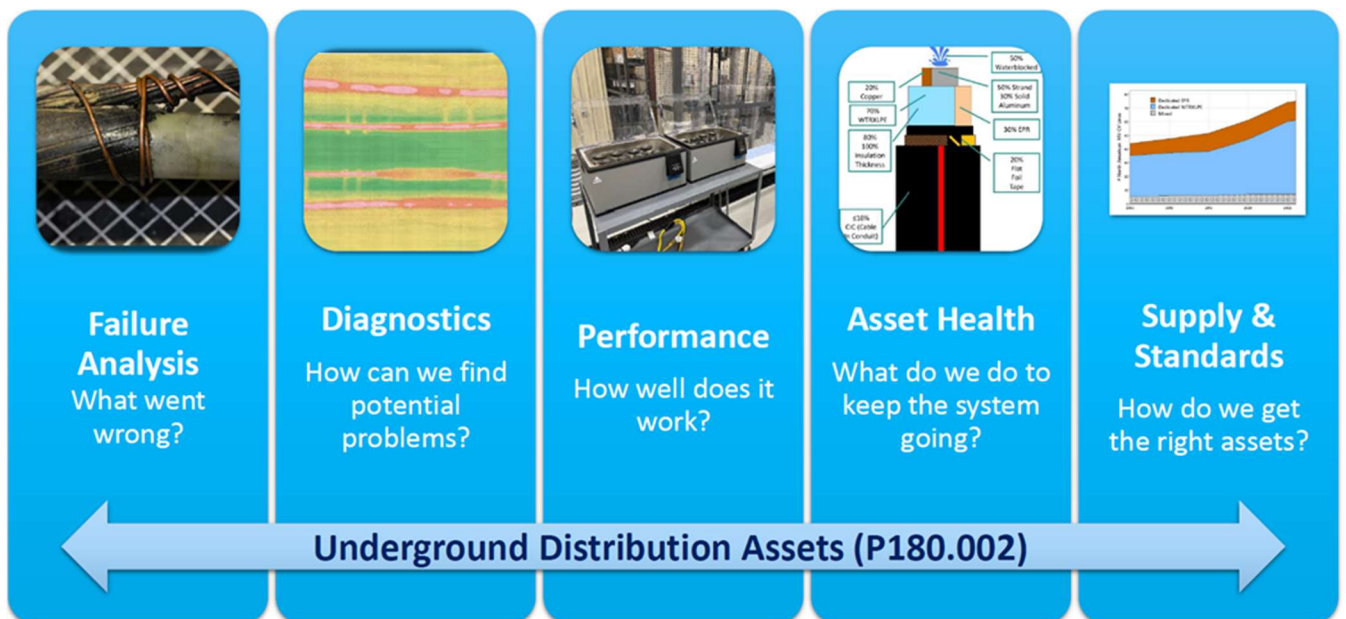


圖 69 P180.002 地下配電資產專案計畫研究主軸[32]

(3) P180.003 - 配電自動化資產

配電自動化資產專案計畫研究主軸包括(i)實驗室評估和測試、(ii)復閉器失效分析、(iii)配電控制生命週期管理、(iv)先進的檢查技術和工具、(v)資產健康監視、(vi)地下 DA 控制電纜和連接器、(vii)復閉器指南、(viii)配電網上的電力電子應用等，如圖 70 所示。

Joe 特地以「如何對復閉器進行失效分析？」為例進一步說明，包括所需的基本知識：調查和初步觀察、額定測試、系統拆卸、組件鑑識分析、成員支持細節，以及專業技術：氣相層析質譜法、放射線成像、材料專業知識等，如圖 71 所示。復閉器失效主要研究結果，歸納失效模式和退化機制主要為 4 大類，包括水氣侵入、野生動物碰觸、雷害、製造缺陷。

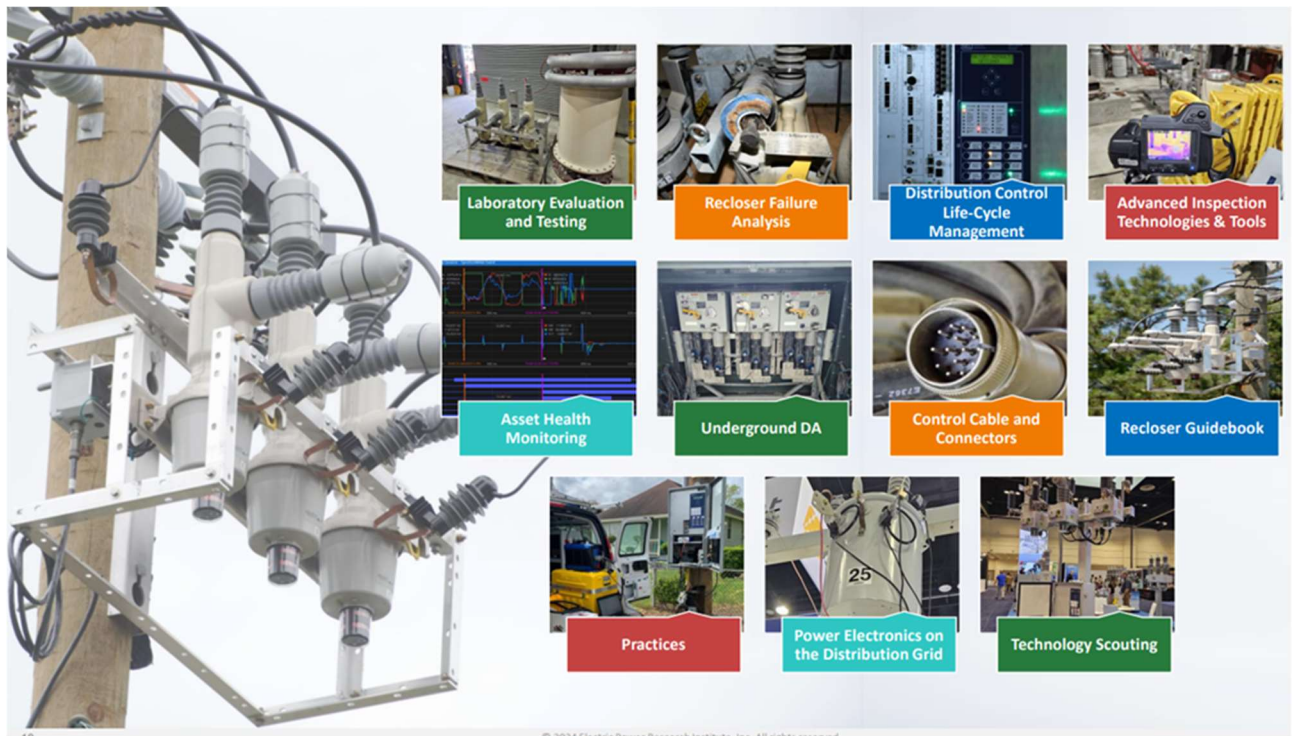


圖 70 P180.003 配電自動化資產專案計畫研究主軸[32]

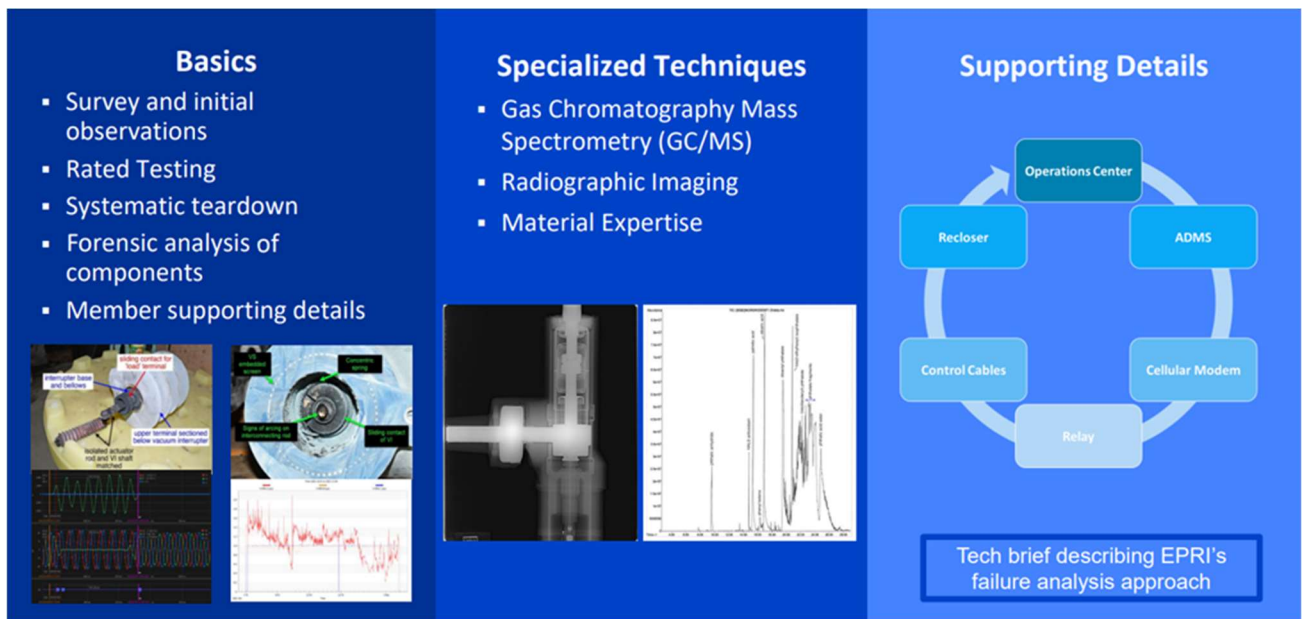


圖 71 EPRI 對復閉器進行失效分析採用的方法[32]

(4) P180.004 - 安全和工作實務

配電安全和工作實務專案計畫研究主軸包括(i)召開重大傷害研討會、(ii)掉落導體測試結果、(iii)工作服電弧閃絡測試、(iv)電氣接近感知和三維測繪、(v)提高昇空車安全性的技術等，如圖 72 所示。



圖 72 EPRI 配電安全和工作實務專案計畫研究主軸[32]

EPRI 也驗證日常穿著服裝的電弧額定抗燃 (arc-rated flame-resistant)。測試結果顯示，網路上購買的襯衫電弧熱性能值與標籤上的標示不符。此外，EPRI 研究發現正確穿著電弧額定抗燃服裝的關鍵重點在於將襯衫扣好並塞入褲子中。

(5) P180.005 - 資產和可靠性分析

許多電力公司正在考慮或已經實施資產管理計畫，以將設備生命週期成本和風險最小化，但大部分的努力歷來都集中在較昂貴的設備，例如變電所電力變壓器。而配電資產所需的數據、分析工具和模型因尚未建立，導致公用事業公司越來越難以量化、證明和衡量資產投資的效益，因此實施配電資產管理計畫，可為配電系統提供顯著的評估數據，以有效地提高可靠性和韌性。

架空和地下配電資產分析研究，以及可靠性/韌性分析研究，旨在透過開發決策支持工具和方法，來應用從分析資產性能和可靠性數據（例如維護、狀況評估、故障史、圖像、專家知識和停電數據）中萃取的新見解和推論，包括：

- 開發數據模型和資料庫結構，以彙集歷史和目前的架空和地下配電資產性能和可靠性數據
- 建立由公用事業相關數據組成的行業資料庫，並進行後續數據挖掘，以建立可為決策提供資訊的看法
- 開發更有效評估設備和系統性能的指標
- 分析和整合專家徵詢以及從架空線路組件的狀況評估/實驗室測試中收集的數據
- 開發創新方法來整理數據，以提高其效益

研究結果將支持資源分配決策和系統性能任務，並為公用事業提供有效資產和可靠性管理所需的新知識和數據。

(6) 小結

EPRI P180 計畫主要聚焦於配電系統資產的研究，目標是提供先進的知識、技術和工具，協助公用事業公司在配電資產的整個生命週期中做出明智的決策。該計畫所涵蓋多個研究領域，均與本公司配電系統密切相關，值得本公司相關業管單位持續關注其發

展並參考。



圖 73 本所代表於 EPRI Charlotte 實驗室外合影

參、心得與建議

Part 1-MIT

1. 台灣企業界和 MITeI 合作的台灣創新綠色經濟藍圖聯盟(TIGER)針對氫能、碳捕存、碳排與碳權、長期供電和再生能源供應鏈等議題進行研究，研究主題大多與本公司密切相關，其成果及後續發展值得本所持續關注。此外，該合作案的執行成效也很適合做為評估未來和 MITeI 合作的參考。
2. Parsons 認為將電廠建在大型工業負載附近可以大幅減少輸電損耗並增強電網穩定性。這和本公司推動的電廠電源線路就近連接到科學園區，以減少輸電損耗並增強電網穩定的作法一致。
3. 強健的輸電基礎設施是促進再生能源整合和確保淨零能源系統的電網穩定關鍵，高效率的輸電線路使電力能夠從再生能源豐富地區運輸到高能源需求地區。例如，新加坡屬高能源需求地區，目前正積極規劃透過輸電線路分別從澳洲和東南亞地區購入再生能源，值得參考並持續關注其發展。
4. Botterud 對設計美國高效率低碳電力市場的 5 項觀察結果，以及所提出可促進低碳電力系統發展的 4 種電力市場設計選項，值得我國設計高效率低碳電力市場之參考。此外，其有關改良 CEM 所建議採取的各項行動領域，可供本公司未來採用類似建模工具之需求評估參考。
5. Macdonald 利用 Dolphyn 模擬 2030 年台灣電網來評估儲能作用的相關結果，建議後續本公司相關業務同仁可透過本公司和 EPRI 合作之 TPC ISSP 專案計畫，進行交互比對驗證異同處，並了解其背後影響因素。
6. 本公司及國內企業目前專注在 CCS 點源捕捉技術的評估與引進，然而各種技術百家爭鳴，例如 Hatton 開發推廣的電化學調變碳捕捉技術，以及 Varanasi 認為可大幅縮小體積和降低建置成本的靜電霧捕捉系統。因此有必要持續關注各種技術發展及應用成效，以供未來公司投資決策參考。

7. 如果未來 DOC 捕捉碳技術的成本可以大幅降低，且可產生氫氣作為副產品，對碳權取得不易，且大部分的氫氣需要仰賴進口的我國而言，採用 DOC 製造負排放以取得碳權，同時在地產氫降低進口及輸送成本，或許是個值得關注的解決方案之一。
8. Varanasi 研究團隊開發的極度不沾濕表面技術應用在發電廠中增強的冷凝效率等提升整體效率的概念，建議本所相關研究同仁進一步了解與評估。
9. RFB 儲能技術具備為更清潔、更可靠和更永續的能源未來做出重大貢獻的潛力，後續發展值得持續關注。
10. Deka 博士應用理論導引機器學習（physics-informed machine learning）演算法結合機器學習和電網物理領域知識，在兼顧準確性和可解釋性的同時加快決策速度，研究成果倘未來有機會實際應用於配電網，利用有限量測資料進行估測，以及輸電網波動最佳化，其具體成效值得本公司持續關注。
11. Annaswamy 設計用來抵禦網路攻擊的框架 EUREICA，模擬針對 DER 和通訊網路的大規模攻擊以評估潛在的漏洞，和本所資通室規劃引進 Digital Twins 技術建置資安攻防平台，模擬針對 IEC 61850 變電所或樹林微電網場域資安攻擊的概念頗類似，可供本所業務相關同仁參考。
12. Ilic 教授提出的監控區域間振盪新方法，直接考慮負載擾動，而無需負載等效或難以測量的匯流排角度，這種無需投資昂貴設備的新方法，值得本所相關研究室深入評估是否投入研究。

Part 2-EPRI

1. EPRI GET SET 倡議目的在加速採用電網強化技術，釋出既有電網輸電容量，以滿足日益增長的電網需求，以舒緩新電網投資壓力及解決電網建設緩不濟急的問題。美國電網面臨的挑戰與解決方案值得我們借鏡。值此美國產官學研全力推動電網強化技術之際，建議本公司相關業管單位，密切關注 EPRI GET SET 倡議之後續發展，並根據現況及未來挑戰，審慎評估是否加入該倡議。

2. EPRI 在機器人和無人機應用變電所巡視研究之結果有助於本公司在後續機器人應用研究之參考，特別是該團隊已針對 ANYmal 進行評估，後續經驗和結果值得我方在應用與評估 ANYmal 之參考。此外，機器人和無人機的協同合作已成功應用在烏俄戰爭，未來可望應用在公用事業資產巡視與管理，因此 EPRI 在此研究之進展有必要保持密切關注。
3. EPRI 研究中的創新技術－地面型配電系統(GLDS)是否可為本公司在傳統架空或地下配電系統外，提供第三種選擇方案，有待相關業務單位同仁持續關注評估。
4. 電力變壓器的正常運轉對穩定供電極為重要。本所長期致力於變壓器故障預警及事故診斷分析，累積豐富的經驗，刻正積極推動變壓器狀態監測與智慧診斷平台之建置。EPRI PTX 歷經 17 年持續升級與強化，在國際上已有許多應用實績，建議本公司相關業管單位評估是否引進此系統，期能站在巨人的肩膀上，加速變壓器狀態監測與智慧診斷平台之建置，為供電穩定做出貢獻。
5. 無 SF6 斷路器技術是電力產業因應氣候變化和減少溫室氣體排放的重要技術。EPRI 無 SF6 斷路器技術專案計畫，包括真空/潔淨空氣、CO2 混 O2 技術的測試與評估，後續發展值得本公司相關業管單位密切關注。
6. EPRI 正在評估光纖作為架空輸電線路監測感測器的準確性。該技術利用架空光纖作為連續感測器，以低成本解決方案，即時監控大範圍架空輸電線路資產。鑒於本公司輸電系統大多已建置 OPGW，無需重新建置架空光纖，建請相關業管單位評估是否參與該專案，並密切關注此技術之發展。
7. EPRI P180 計畫聚焦於配電系統資產的研究，以協助公用事業公司在配電資產的整個生命週期中做適當決策。該計畫所涵蓋的各個研究領域，均與本公司配電系統密切相關，值得本公司相關業管單位持續關注其發展並參考。

肆、參考資料

- [1] <https://energy.mit.edu/project/taiwans-innovative-green-economy-roadmap-tiger-project/>
- [2] “Global Net Zero Transition: Strategic Discussion” Presentation, Dr. John Parsons, Deputy Director for Research of Center for Energy and Environmental Policy Research, Massachusetts Institute of Technology, October 31, 2024.
- [3] <https://e-info.org.tw/node/240170>
- [4] <https://ember-energy.org/latest-insights/regional-grids-key-to-singapores-energy-future/>
- [5] ” Towards Zero-Carbon: Challenges and Solutions for Electricity Markets” Presentation, Dr. Audun Botterud, Energy Analytics Group, Laboratory for Information and Decision Systems, Massachusetts Institute of Technology, November 1, 2024.
- [6] https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/02/f30/EP_SA_Power_Sector_Modeling_FINAL_021816_0.pdf
- [7] ” Improved Planning for Reliable, Low-Carbon Power Systems” Presentation, Dr. Ruairidh Macdonald, Research Scientist, MITeI, October 31, 2024.
- [8] <https://www.weforum.org/stories/2024/10/direct-ocean-capture-carbon-removal-technology/>
- [9] <https://brineworks.tech/applications>
- [10] <https://verdox.com/technology>
- [11] ” Innovations at Interfaces: A Ubiquitous Platform for Energy & Sustainability” Presentation, Dr. Kripa K. Varanasi, Massachusetts Institute of Technology, November 1, 2024.
- [12] “Advancing the science & engineering of electrochemical energy technologies” Presentation, Chevron Professor Fikile R. Brushett, Department of Chemical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, November 1, 2024.
- [13] “Measurement and Mitigation for Reliable Power Grid Operations” Presentation, Deep Deka, Research Scientist, MITeI, October 31, 2024.

- [14] ” Build Robust Power Grid and EV Charging” Presentation, Chuchu Fan, Associate Professor of AeroAstro and LIDS, REALM Lab: REliable Autonomous systems Lab at Massachusetts Institute of Technology, November 1, 2024.
- [15] ” Building Resilient Smart Grids: Optimal Resource Allocation & Microgrid Operation” Presentation, Anuradha Annaswamy, Active-adaptive Control Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, November 1, 2024.
- [16] ” Unified Modeling and Control for Stable end-to-end Operations of Changing Electric Energy Systems” Presentation, Professor Marija Ilic, Laboratory for Information and Decision Systems (LIDS) at Massachusetts Institute of Technology, November 1, 2024.
- [17] “ Transmission & Substations R&D” presentation, Drew McGuire, EPRI, November 4 2024.
- [18] <https://www.ferc.gov/media/order-no-2023>
- [19] “ Pathways to Commercial Liftoff: Innovative Grid Deployment” , United States Department of Energy, April 2024.
- [20] <https://interactive.epri.com/get-set/p/1>
- [21] “A Roadmap for Advanced Transmission Technology Adoption” , Center for Energy and Environmental Policy Research (CEEPR), MIT, September 2024.
- [22] “強固電網，汰舊更新多管齊下” ，台電月刊 719 期 | 2022 年 11 月號
- [23] ” 動態熱容量系統精進及整合研究完成報告” ，台灣電力公司綜合研究所，109 年 3 月。
- [24] <https://www.smartwires.com/2024/02/07/what-is-advanced-power-flow-control/>
- [25] ” Robotic Substation Inspection: Ground based Evaluations” presentation, Dexter Lewis, EPRI, October 28 2022.
- [26] ” Power Transformer Expert System Software (PTX) Enabling Data Driven Risk Informed Decisions” presentation, Bhavin Desai, EPRI, November 5 2024.

- [27] ” SF6 -Free Breaker Pilots” presentation, Luke van der Zel, EPRI, November 5 2024.
- [28] <https://www.epa.gov/eps-partnership/sulfur-hexafluoride-sf6-basics>
- [29] ” 新型 SF6 減量及無 SF6 絕緣開關設備實習” 出國報告，邱信穎，台灣電力公司輸變電工程處，104 年 1 月 22 日。
- [30] ” SF6 減量及無 SF6 23kV 開關設備技術研究” 完成報告，張家豪，台灣電力公司綜合研究所，113 年 6 月。
- [31] ” Evaluation of Optical Fiber as an Overhead Transmission Line Monitoring Sensor” , Daniel Malan, EPRI, November 5 2024.
- [32] ” Research Update - Distribution Assets, Program 180 - Distribution Systems” , Joe Potvin, EPRI, November 5 2024.