

出國報告（出國類別：開會）

## 參加美國電機電子工程師學會年會

服務機關：台灣電力公司系統規劃處

姓名職稱：陳建安 電機工程師

派赴國家：美國

出國期間：113.07.20~113.07.27

報告日期：113.09.12

# 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參加美國電機電子工程師學會年會

頁數 20 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/2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

陳建安/台灣電力公司/系統規劃處/電機工程師/2366-6908

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他(開會)

出國期間：113 年 07 月 20 日~113 年 07 月 27 日 出國地區：美國

報告日期：113 年 09 月 12 日

分類號/目

關鍵詞：電力與能源社會委員會(PES)、分散式再生能源(Distributed Energy Resource)、構網型變流器(Grid-forming Inverter)、高占比(High Penetration)、基於變流器的資源(Inverter Based Resources)

內容摘要：(二百至三百字)

2024 年電機電子工程師學會電力與能源技術委員會(IEEE PES)於美國華盛頓州西雅圖舉辦，年會主題為「新電力系統：重塑與韌性」(「The New Electric System: Reinventing & Resilience」)，強調開拓創新解決方案及增強電力系統穩健性的重要性，為期五天的會議提供與會人員一個交流討論電力產業最新研究、新興趨勢和未來方向的平台，並邀請傑出的演講者為當今電力產業所面臨變革提供寶貴的學習機會與實務上的見解。

本次 IEEE PES 年會涉及議題眾多，除深入探討原本電力產業持續關注的電力系統規劃、運轉、調度等議題，亦開啟許多前瞻且新穎的討論，如極端氣候下的電網運營、人工智慧於電網的運用、大眾運輸電氣化下的能源需求特性重塑等議題。透過參與本年會獲取相關電力系統知識、學習相關電網新技術、新設備並蒐集最新技術發展資料，成果將有助於提供電網規劃有利的參考依據，對提升電力系統規劃能力頗有幫助。

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

# 目錄

一、出國緣由與目的 .....	1
二、出返國行程 .....	2
三、2024 IEEE PES 年會摘要 .....	3
(一)年會活動議程概況.....	3
(二)IEEE PES 成員會議(Members Meeting)及全體會議(Plenary Session) .....	5
(三)主題論壇(Super Session).....	6
(四)委員會議(Committee Session).....	8
(五)技術類會議 (Technical Program).....	10
(六)講授課程及技術教學課程(Plain Talk、Tutorials).....	12
四、技術會議內容摘要 .....	13
(一)高占比 IBRs 下的電網穩定性與保護.....	13
(二)IBRs 的動態分析模型 .....	14
(四)構網型(GFM)變流器的應用.....	15
(五)再生能源併網標準與規範.....	16
(六)IBRs 的諧波建模 .....	17
五、心得與建議 .....	18
六、參考文獻.....	20

## 一、出國緣由與目的

為配合國家淨零排放目標，我國政府持續推動再生能源發展政策，依國發會所訂 2050 年再生能源目標，預估將有 40~80GW 太陽光電、40~55GW 離岸風力及 5.7~15.5GW 前瞻能源等。因應未來大量再生能源併入電網系統，於電網規劃面除需持續研議相關再生能源併網系統衝擊之分析方式及併網規則，亦需精進電網強化及擴充規劃經驗；另考量既有電網有其電網容量上限，且新建、擴充電網不易，迫使整體電網之規劃需引進新穎技術及經驗。

電機電子工程師學會 (IEEE) 所舉辦之國際性年度會議，集結全世界各國電力領域專家學者相互交流相關電網新技術、新設備等經驗，並密集召開會議研討、發表最近一年發表關於電力系統規劃、運轉等經驗成果，對公司未來進行系統規劃有相當之助益。

為提升對再生能源併網、電網瓶頸改善於規劃層面認知及見解，期能透過參與本年會獲取相關電力系統知識，學習相關電網新技術、新設備等，開拓對未來電網可能變化趨勢之視野，提供電網規劃有利的參考依據。

## 二、出返國行程

- ◆ 113/7/20 台北 Taipei →西雅圖 Seattle
- ◆ 113/7/21 ~ 113/7/25 參加美國電機電子工程師學會年會
- ◆ 113/7/26 西雅圖 Seattle → 113/7/27 台北 Taipei

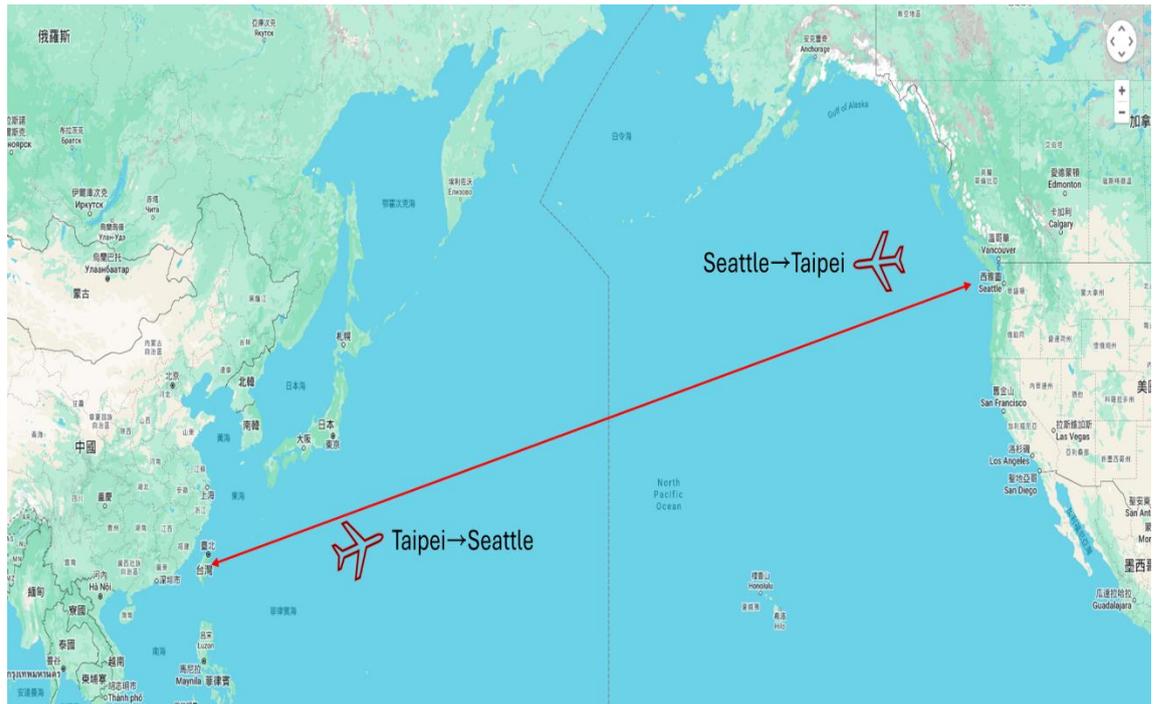


圖 1、出返國行程示意圖

### 三、2024 IEEE PES 年會摘要

#### (一)年會活動議程概況

本年度 2024 電機電子工程師學會電力與能源技術委員會年會(IEEE PES General Meeting)於 7 月 21 日至 7 月 25 日，共 5 天於美國華盛頓州的西雅圖舉辦，大會活動地點主要在西雅圖會議中心 (Seattle Convention Center)，年會主題為「新電力系統:重塑及韌性」(The New Electric System: Reinvention And Resilience)。



圖 2、西雅圖會議中心

本年會匯集來自世界各地的實務電力工程師和學者，讓全世界電力產業相關領域專業人員、學者在這平台透過議題發想、討論交流獲取新知及解決方案，解決當今電力產業所面臨引人關注且重要的問題。本次年會除提供與會人員彼此交流的機會，例如歡迎茶會(Welcome Reception)，議程內容亦多樣且豐富，會議內容主要可分為下列四大類，會議活動議程如表 1。

- ◆ PES 成員及與會成員會議(PES Members Meeting, Plenary Session)

- ◆ 教學課程(Tutorials、Plain Talk)
- ◆ 委員會議(Committee Meetings)
- ◆ 技術類會議與其他技術交流(Technical Sessions and Other Technical Events)



圖 3、年會首日之歡迎茶會盛況

表 1、2024 IEEE PES GM 活動議程

2024 IEEE PES General Meeting Schedule—At A Glance						
	Sunday July 21, 2024	Monday July 22, 2024	Tuesday July 23, 2024	Wednesday July 24, 2024	Thursday July 25, 2024	
7am–8am		Attendee Breakfast Presenter Breakfast Companion Breakfast	Student Poster Session Attendee Breakfast Presenter Breakfast Companion Breakfast	Attendee Breakfast Presenter Breakfast Companion Breakfast	Attendee Breakfast Presenter Breakfast Companion Breakfast	
8am–9am	Workshops/Tutorials Committee Meetings Workshops/Tutorials Committee Meetings	PES Members Meeting	Panel Sessions Committee Meetings Paper Forums	Panel Sessions Committee Meetings Paper Forums Transaction Paper Sessions	Super Session: Trends in Changing Power System Dynamics	
9am–10am		PES President Fireside Chat				Super Session: Late Breaking News Part 1: A Fast Lap: Electric Transportation Around IEEE
10am–11am		Opening Plenary Session Panel				
11am–12pm		Panel Sessions Committee Meetings Paper Forums Best Paper Sessions				SIF Lunch and Career Fair
12pm–1pm						
1pm–2pm						
2pm–3pm						
3pm–4pm	New Attendee Orientation					
4pm–5pm				Panel Sessions Committee Meetings Paper Forums	Panel Sessions Committee Meetings Paper Forums	
5pm–6pm		Poster Session Reception		YP Reception WIP Reception		
6pm–7pm	Welcome Reception		Awards Dinner			
7pm–8pm						
8pm–9pm						

## (二)IEEE PES 成員會議(Members Meeting)及全體會議(Plenary Session)

本次 PES 成員會議由 PES 主席 Shay Bahramirad 主持，除更新各種 PES 活動的成員資格，該會議亦邀請競選 IEEE Division VII 的董事候選人進行演講；另外，PES 主席將會與美國能源部(DOE)及 Park Street Strategies 的 CEO 對談。

全體會議由西雅圖市電力公司(Seattle City Light)的 Uzma Siddiqi 主持，會議邀請來自電力公用事業、設備製造商等業界經驗豐富的專家，為電力領域傳輸、新技術等方面討論他們對其舉措的獨特觀點，以及電力系統如何重塑和適應使社會邁向更具彈性的未來。



圖 4、PES 全體會議

### (三)主題論壇(Super Session)

本次 PES 年會的主題論壇，透過綜合型會議演講方式，從各種不同角度切入與探討，來自數個 PES 技術委員會的專家們針對領域內特別感興趣的主題進行討論，主要重大課題包含以下等項目：

#### ◆ IEEE 在電動運輸的發展

會議旨在重點介紹多個 IEEE 協會針對運輸電氣化正在開發的工程知識範例，包含電氣和電子元件、電源供應、動力傳動系統、儲能系統、通訊和控制等多個領域，並討論確保這項努力成功所需的近期和長期需求。會議中講者所代表的協會都是新成立的 IEEE 運輸電氣化委員會(TEC)的支持者。

#### ◆ 具天氣意識得運轉電網

鑒於氣候變遷下的極端天氣、能源去碳化下的高佔比再生能源等原因，現今的電網運轉與十年前相比變得更加仰賴天氣資訊，本會議邀請業界專家分享運轉、規劃等層面的經驗，聚焦主題如下：

- 基於天氣的電網規劃和運轉：PJM 電力調度中心的經驗。
- 極端天氣事件下的電網運轉：CAISO 電力調度中心的經驗。
- 與天氣相依的電力系統於運轉面的挑戰—澳洲的觀點
- 在轉換至依賴天氣的電能資源下管理能源充足性

#### ◆ 電網運作的不確定性規劃

隨著電力系統的發展，一系列的新技術和極端天氣事件出現，不確定性是電力系統規劃和運轉的關鍵因素，且隨著人為威脅的增加以及供應鏈中斷的影響，這個問題變得更加迫切，本會議討論管理不確定性的工具和方法，以及產業需要如何改變以應對供應、需求和傳輸的變化，聚焦主題如下：

- 電網擴張與用於不確定性管理的先進靈活解決方案之間的妥協。
- 印度於再生能源滲透率不斷提高下的電網運轉情況。

- 天氣和氣候對運轉不確定性的影響。

#### ◆ 使電力系統動態化的趨勢

本會議聚焦主題如下：

- 變流器及變流器保護觀點。
- 非電線和智慧電線技術。
- 彈性資源隨機控制的機會與局限性。
- AEMO 系統的建模和操作。

#### ◆ 人工智慧在電網中的應用

會議由史丹佛大學博士帶來主題為「由電力公司採用人工智慧」的演講，內容包含異常檢測、預測及排程、系統最佳化。

#### ◆ 大眾在電網規劃和運轉中的角色

本會議聚焦主題如下：

- 新技術對基礎設施的要求。
- 選址與建設電網的挑戰。
- 從天然氣轉向電力的影響。
- 環境觀點。



圖 5、PES 主題論壇

## (四) 委員會議(Committee Session)

在本年度的會議舉行期間，主要有 13 個重要的委員會召開委員議 (Committee Session) 召開，由該領域之專家發起相關議題進行討論，其中內含涉及層面較廣之委員會還會召開小組委員會 (Subcommittee Session)，與會成員分別針對各項會議主題進行意見交換與討論。

### ◆ 行政委員會(Administrative Committees)

### ◆ 電力系統分析委員會 (Analytic Methods for Power Systems)

委員會亦包含以下六個小組委員會

- 電腦輔助分析方法(AMPS: Computer Analytical Methods)
- 配電系統分析(AMPS: Distribution System Analysis)
- 智慧型系統(AMPS: Intelligent Systems)
- 大數據分析(AMPS: Big Data Analytics)
- 暫態分析模擬(AMPS: Transient Analysis and Simulation)
- 可靠度與風險分析(AMPS: Reliability and Risk Analysis)

### ◆ 電機機械委員會(Electric Machinery)

### ◆ 能源發展與發電委員會(Energy Development and Power Generation)

### ◆ 能源互聯網協調委員會(Energy Internet Coordinating Committee)

### ◆ 電力與能源教育委員會(Power & Energy Education)

### ◆ 電力系統動態效能委員會 (Power System Dynamic Performance)

### ◆ 電力系統儀表與量測委員會 (Power System Instrumentation and Measurements)

### ◆ 電力系統運轉、規劃與經濟調度委員會(Power System Operation, Planning & Economics)

委員會亦包含以下六個小組委員會

- 大型電力系統運轉(PSOPE: Bulk Power System Operations)
- 大型電力系統規劃(PSOPE: Bulk Power System Planning)
- 配電系統運轉與規劃(PSOPE: Distribution System Operation and Planning)
- 電力系統經濟學(PSOPE: Power System Economics)
- 技術與創新(PSOPE: Technologies & Innovation)
- ◆ 智慧建築、負載和用戶系統委員會(Smart Buildings, Loads & Customer Systems)
- ◆ 輸電及配電委員會(Transmission and Distribution)
- ◆ 再生能源系統併網協調委員會(Renewables Systems Integration Coordinating)
- ◆ 產業技術支援領導委員會(Industry Technical Support Leadership Committee)

## (五)技術類會議 (Technical Program)

2024 PES 年會舉行期間從 7 月 21 日(星期日)至 7 月 25 日(星期四)共 5 天，而技術類會議為本年會的重頭戲。除第一日以技術教學課程為主外，本年會星期一開始至星期四這 4 天內密集舉辦多場次的技術類會議，於同一時間將有多個主題的技術類會議可供與會者依較有興趣的議題自行選擇參加。

本年會技術類會議以探討最新的設備技術、分析方式與電腦技術應用進行專案小組會議 (Panel Sessions)，藉由主講者提出議題之見解，引起與會之產業界、官方及學界廣泛討論，激盪心得獲得最新產業發展方向及最新技術知識。或以期刊論文會議 (Transactions Paper Sessions) 報告當年度最新納入期刊供全體電力界流傳、參考引用重要研究論文；並另外以論文討論會 (Paper Forums)、壁報論文會議 (Poster Session)、學生壁報論文競賽 (Student Poster Contest) 等不同進行方式，發表最新研究發現或技術論文，且這類進行方式可提供與會者能夠直接與論文作者相互學習和進行討論交換心得。



圖 6、PES 技術類會議(panel session)

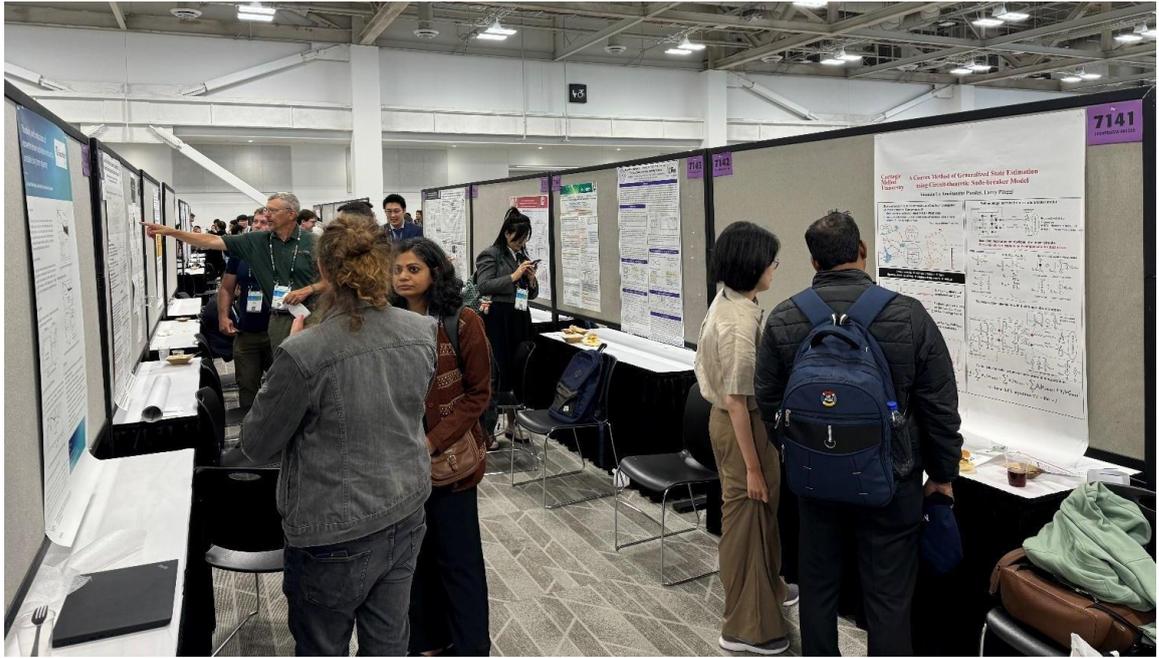


圖 7、PES 技術類會議(poster session)

## (六)講授課程及技術教學課程(Plain Talk、Tutorials)

會議期間亦針對非電力背景之與會成員，設計 3 堂講授課程 (Plain Talk)，分別介紹電力系統基本知識、配電及輸電系統，使聽者瞭解大規模電力系統如何運作、如何輸送電力至用戶、大規模電力系統間的互聯方式等，讓專業人士以簡單清楚的方式帶領門外漢入門。

另針對電力專業背景與會成員，會議亦提供 11 堂技術教學課程 (Tutorials)，課程由各領域頂尖專業人士、教授等主講。內容包括：

- ◆ 構網型電源轉換器：分析與實務間的橋接概念
- ◆ IEEE 2800 教學 - 了解技術最低能力和效能要求的起源和規範
- ◆ 電力系統整合數據及用於穩態和瞬態分析的演算法平台
- ◆ 了解電壓穩定性：考慮基於變流器資源 (IBRs) 下的理論到產業實務
- ◆ 網路攻擊風暴雲：再生能源網路安全培訓實踐
- ◆ IEEE 1547 概述：分散式能源 (DER) 的互連與互通性標準
- ◆ IBRs 電廠互連研究的諧波建模和評估
- ◆ 電力系統輸配電規劃和運轉 - 透過 DER 整合、PMU 數據分析和邊緣設備互通性進行轉型
- ◆ 現代電力系統資源充足性的基礎知識
- ◆ 用於基於 IBRs 的電力電子設備的數據驅動控制方法和即時模擬技術
- ◆ 再生能源併網的電磁暫態 (EMT) 建模與研究

## 四、技術會議內容摘要

本次 2024 IEEE PES 年會在為期 5 天的會期中，針對電力及能源方面的議題同步舉辦了百餘場專案小組會議，主題內容包含電網韌性與現代化、再生能源併網、電力品質議題、IEEE 技術標準及規範、電力系統網路安全、交通電氣化對電網的影響等。為配合國家淨零排放目標，我國政府持續推動再生能源發展政策，太陽光電、離岸風電等 IBRs 占比將逐漸增加。

考量電力系統於高占比 IBRs 下將面臨多重挑戰，包含系統慣量降低、系統短路電流過低、電壓及頻率控制策略、小訊號穩定度問題、建模及模擬困難、電力品質與諧波問題，故本技術會議多參加與 IBRs 相關的再生能源併網議題，綜合介紹及摘述如下：

### (一)高占比 IBRs 下的電網穩定性與保護

隨著再生能源佔比的上升，系統中的同步發電機將逐漸被 IBRs 取代，惟 IBRs 在故障期間提供的短路電流較低，系統強度（一般透過短路容量來衡量）會顯著下降，而我國作為獨立電網，無法通過互聯網絡從鄰近地區獲取電力支持故，這種孤立性將使得系統強度問題更加突出，故有需要採取措施來增強電網的韌性，以適應未來的 100% IBRs 運行狀況。研究[1]以愛爾蘭全島電力系統（AIPS）的真實資料探討了太陽光電併網所實際面臨的運轉挑戰，包含光電降載調度（即棄光）、長期頻率偏差、電壓幅度變化、以及最低運轉需求的變化，並針對前揭運轉挑戰提出相應的應對方向或措施。研究結果顯示目前 AIPS 中的太陽光電佔比儘管較低，但已經對系統運行帶來了顯著挑戰。研究[2]則介紹了波多黎各電網（與台灣同為獨立電網）面臨的能源挑戰，以及過渡到 100% IBRs 的目標，並於模擬分析了不同 IBRs 占比對系統短路容量的影響及系統強度的變化後，討論因短路電流減少，傳統保護設備（如測距

電驛)可能面臨的問題及提出了潛在的解決方案。該研究針對 IBRs 引起的短路電流下降問題提出方法包含系統配置調整、改進保護策略、情境模擬和敏感度分析、引入新技術標準。

另一個因 IBRs (如風電和太陽光電)占比增加可能衍生的問題為傳統同步發電機逐漸被淘汰所導致電力系統的慣量下降,這使得系統在應對突發事件(如負載變化或故障)時更容易出現頻率波動。研究[3]分析了愛爾蘭全島電力系統(AIPS)在高占比 IBRs 下的穩定性問題,特別是頻率穩定性方面的挑戰,研究透過前瞻穩定性評估工具(LSAT)實時監測及模擬來評估轉子角穩定性、頻率穩定性和電壓穩定性,結果顯示目前 AIPS 的主要限制因素是與頻率變化率(Rate of Change of Frequency, RoCoF)相關的頻率穩定性問題。為了進一步提升系統的靈活性和穩定性,愛爾蘭電網運營商(TSO)計劃採取措施(例如提昇 RoCoF 限值)來提高系統慣量和增強動態穩定性評估能力。

IBRs 較低的過電流能力將對系統的穩定性產生的影響,隨著電網中 IBRs 占比的上升,系統下降的過電流能力將導致暫態期間電壓支撐能力下降。在[4]中,研究使用了短路比(SCR)和可用 MVA 指標來識別在不同操作點可能存在的穩定性問題,並提出一個分析多個操作點穩定性的方法,透過電網強度指標和最佳無功功率管理來提升穩定性,並通過時域模擬驗證將 IBRs 替換為構網型控制後的穩定度改善有效性。

## (二)IBRs 的動態分析模型

方均根(RMS)模型因其計算效率高經常被使用於電力系統規劃。然而,隨著大量 IBRs (如太陽光電、風力發電等)的併入,RMS 模型忽略了高頻動態,可能無法精確捕捉 IBRs 的快速響應特性,而 EMT 模型則能提供更詳細的瞬態模擬結果。研究[5]通過比較 RMS 和 EMT 模型,突顯 RMS 模型可能會錯過一些關鍵的高頻動態,從而導致過於樂觀的系統穩定性評估結果。研究顯示

在涉及開關投切事件或瞬態過程（如頻率波動、電壓突變）等高頻動態情境、電壓和電流變化較大的弱電網時，需使用 EMT 模型。

在大規模 IBRs 互連的情況下，特別是電網較弱時，電壓和頻率會發生較大波動，瞬態穩定分析(TSA)往往難以捕捉這些快速變化，而 EMT 模型能更精確地模擬出這些電壓和頻率的暫態特性，並分析其對 IBRs 性能和電網穩定性的影響。在研究[6]中，展示了 ISO New England (ISO-NE) 在進行大規模 IBRs 互連研究時，如何利用混合模擬技術來提高模擬精度，並確保電網穩定性。混合模擬結合了 TSA 和 EMT 模擬，用於更精確地捕捉 IBRs 的動態行為，系統的絕大部分仍使用 TSA 進行大尺度模擬，僅將 IBRs 互連及其周邊系統放入 EMT 域進行詳細分析。這樣不僅保證了整個系統模擬的規模和效率，還能在關鍵區域提供精確的瞬態響應分析。混合模擬 EMT 域的詳細模擬，能準確預測 IBRs 互連引發的暫態不穩定問題，如電壓崩潰或頻率衰減，並透過在 TSA 和 EMT 模擬之間交換電壓、功率和電流等關鍵數據，確保了兩個模型之間的連續性，這種數據交換使得系統模擬的動態行為在不同模擬域之間保持一致，避免了 TSA 模型可能低估的瞬態響應問題。

#### (四)構網型(GFM)變流器的應用

GFL 變流器在弱電網中的性能不如 GFM 變流器主要原因為：

1. GFL 變流器依賴相位鎖定迴路（PLL）來同步電網相位，並生成合適的電流注入信號。然而，在弱電網中，由於電壓波動較大，PLL 可能無法精確地鎖定電壓相位，導致不穩定性或錯誤的電流注入信號。
2. GFL 變流器作為電流源運行，其主要目標是跟隨電網電壓和頻率，無法像 GFM 變流器那樣主動調節電壓或提供頻率支撐。因此，在弱電網中，GFL 變流器無法應對電壓或頻率的快速變動。
3. GFL 變流器不具備物理慣性，且一般也不模擬虛擬慣性，這在慣量較低

的弱電網中導致頻率波動更大，進一步降低了穩定性。

研究[7]提出了一種高效的自動化建模框架，用於在大型電力系統中實現高占比 IBRs 的併網。通過自動化腳本替換傳統發電機併入高占比 IBRs 模擬不同的 IBRs 占比情境(22%、40%)及不同 GFL 和 GFM 變流器占比，研究發現，GFM 變流器在頻率調節中表現出更快的響應，特別是在弱電網和故障情境下，GFM 變流器可以提供更穩定的電壓和頻率支持。

研究[8]探討了在阿拉斯加鐵道電網中，使用 GFM 電池來增強系統穩定性的研究。阿拉斯加鐵道電網是一個獨立電網，且因地理環境和氣候條件極端、化石燃料發電機組的退役和再生能源的增加，系統的動態穩定性變得更加依賴於變流器的控制。該研究針對阿拉斯加鐵道電網的未來脫碳場景進行了動態穩定性分析，特別是比較了 GFM 和 GFL 以及同步電容器在增強系統穩定性方面的效果。研究結果表明，GFM 變流器電池在保持系統穩定性方面具有顯著優勢，可以在不依賴同步電容器的情況下，提供必要的電網強度和頻率響應。

## **(五)再生能源併網標準與規範**

短路電流是電力系統在故障期間產生的電流，準確估算其貢獻對於保護系統安全至關重要。傳統標準對於同步發電機的短路電流貢獻進行了詳細定義，但對於 IV 型風力渦輪機 (WTG) 的貢獻則缺乏具體指導，現有標準 (如 IEC 60909-0) 一般將 IV 型 WTG 和其他 IBRs 簡化為固定電流源，在故障期間提供 1.1 至 1.5 倍的定額電流，而這種簡化假設忽略了 IV 型 WTG 在故障期間的動態行為，特別是它們在故障初期和穩態過程中的電壓依賴性和非線性反應。研究[9]基於現場驗證的 PSCAD 模型進行模擬，展示 IV 型 WTG 在不同短路情境下的電流貢獻行為，模擬結果顯示當 IV 型 WTG 運行在弱電網中時，短路電流貢獻明顯與傳統的固定電流源假設不同；該研究亦在考慮分級標準、模型簡化和精度、標準化靈活性、多方合作下，提出了一系列改進標準化的步驟

建議。

研究[10]詳細介紹了 IEEE 1547 標準及其相關的修訂、測試程序（IEEE 1547.1）、以及其他相關的互連標準（如 UL 1741）的作用。這些標準旨在確保 DER 能夠安全可靠地接入電網，並提供必要的技術支持功能。IEEE 1547 標準為 DER 設備與電網的互連設置了技術要求，包括電壓、頻率、同步性、無功功率支持等方面，IEEE 1547 的最新修訂增加了對動態電壓支持的要求，使得太陽光電變流器能夠在電網電壓波動時進行響應；而 UL 1741 則側重於 DER 設備的安全性和性能認證，與 IEEE 1547 密切相關。UL 1741 的修訂通常會與 IEEE 1547 同步進行，以確保設備能夠滿足最新的技術標準。例如，UL 1741 SA（Supplement A）增加了對“智慧變流器”的要求，這些變流器能夠主動參與電網管理。這些修訂將提高 DER 設備的功能和適應性，促進更多元化的 DER 技術在電網中的部署。

## **(六)IBRs 的諧波模擬**

IBR 使用電力電子設備來將直流電轉換為交流電，而這些設備本身會產生高次諧波，導致電壓和電流波形失真，故當 IBR 占比上升時，系統中的諧波失真水平會顯著上升，影響電力品質。諧波失真會導致設備過熱、壽命縮短，並增加電網中的電能損耗，故理解和量化電力系統中的諧波問題在變得越來越重要。研究[11]使用 IEEE 提供的 14 節點基準測試系統檔進行諧波研究，並說明 PSS®E 和 OpenDSS 這兩個電網模擬軟體的頻率掃描、諧波失真計算方法及比較兩者的諧波模擬性能。該研究模擬了不同負載條件、諧波源分佈和電網強度下的諧波反應，以驗證兩者在應對不同系統情境時的表現，確保工具的靈活性和準確性。另外，研究通過比較 OpenDSS 和 PSS®E 在多個節點和不同頻率範圍內的數據一致性確認這兩個工具在分析大規模系統中的穩健性。結果顯示，兩者在大多數情況下結果一致，因此可作為 IBR 系統模擬的可靠工具。

## 五、心得與建議

電機電子工程師協會(Institute of Electrical and Electronics Engineers，簡稱為 IEEE)是一個國際性的科學和教育組織，涵括電力、電機、電子、通訊、計算機工程、計算機科學等領域。其中的 PES 技術委員會(Power & Energy Society)每年約在 7 月至 8 月期間固定舉辦年會。參加年會的人員遍及全球的會員、學術界、各國電力公司、電力領域研究單位、產業界專家甚至是設備廠商，年會亦邀請業界及學界的專家帶來電力及能源領域相關的精彩演講。本次出國研習透過聆聽演講、參加會議、觀摩研究成果、人際交流互動，可獲得電力系統最新技術發展及知識，頗有助於系統規劃工作思維，值得持續派員參加學習。

2024 年 IEEE PES 年會於華盛頓州之西雅圖會議中心舉辦，本次主題為「新電力系統：重塑與韌性」(「The New Electric System: Reinventing & Resilience」)，顯示電網開拓創新解決方案及增強電力系統穩健性的重要性。因應負載類型改變、再生能源佔比上升、大眾運輸電氣化、氣候變化等趨勢，電網將面對高佔比再生能源、電力電子設備帶來的挑戰，例如：電力品質汙染、系統慣量不足等，爰亟需透過重塑傳統電網架構、引進新穎技術，以達到更具韌性的電力系統，確保電網可以防止大規模停電的發生或限制其範圍及影響，並具備達到快速恢復供電，為未來的事件做好準備的能力。

本次代表系統規劃處參加之 IEEE PES 會議，會議進行方式為多地、多主題同步進行，無法各項主題皆參與，爰主要參加與 IBRs 相關的再生能源併網議題，會議中跟隨著專家學者們探討當再生能源高佔比情況下，電網穩定性與保護如何做出調整、再生能源併網標準與規範改進方向，分析 IBRs 暫態現象時 EMT 模型的重要性、GFM 變流器的應用、分析電力品質時 IBRs 的諧波模擬方式等，進而得知電力系統於高佔比 IBRs 下所面臨挑戰時可能的因應對策

或方向。

藉由實際參與國際會議與來自各國的電力領域專家交流反饋，能夠了解各國電力系統的發展現況、開發或已採用的新穎技術及電力產業未來可能的發展與趨勢，對於規劃技術層面或是領域視野上都可帶來啟發，對日後工作之助益甚大。另大會亦提供電子形式之會議論文集(Conference Proceeding)供與會者下載，故可透過閱讀會議論文初步了解因時程無法參加的會議研討內容。本會議內容豐富且頗具啟發性，故建議各相關單位可持續派員參加學習（下屆 IEEE PES 年會將於 2025 年 7 月 27 日至 7 月 31 日在美國德克薩斯州奧斯汀舉行）。

## 六、參考文獻

- [1] Kerçi, Taulant, et al. "Emerging Challenges of Integrating Solar PV in the Ireland and Northern Ireland Power Systems." arXiv preprint arXiv:2404.04614 (2024).
- [2] Rodríguez Hernández, Misael, and Alexandre B. Nassif. "System Strength Reduction in an Island Grid through Transitioning to 100% Inverter-Based Resources." *Electronics* 13.7 (2024): 1225.
- [3] Hurtado, Manuel, et al. "Stability Assessment of Low-Inertia Power Systems: A System Operator Perspective." arXiv preprint arXiv:2404.04618 (2024).
- [4] EPRI. "Analytical Methods for Determination of Stable Operation of IBRs in Future Power System."
- [5] EPRI. "On the Limitations of RMS IBR Models A Small-Signal Perspective."
- [6] Kalinath Katuri, et al. "Large-Scale IBR Interconnection Studies by Hybrid Simulation: An ISO-NE Operations Paradigm"
- [7] Lyu, Xue, et al. "Modeling and Automation Framework for High IBRs Integration in Large-Scale Power Systems."
- [8] Matthew Richwine, Phylcia Cicilio, et al. "Grid-Forming Inverter Batteries for System Stability in Alaska's Islanded Railbelt Electric Grid"
- [9] Guerreiro, Gabriel Miguel Gomes, et al. "Re-thinking Short-Circuit Current Contribution from Type IV Wind Turbines: A Perspective into How Standardization Can Be Improved." 2024 IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2024.
- [10] EPRI. "Distributed Energy Resource Interconnection Standards and Certifications in the United States: 2023 Overview and Status Update"
- [11] EPRI. "Benchmarking Test Systems for Harmonics Modeling and Simulation against Open Source and Commercial Tools"