

出國報告(出國類別：開會)

## 參加「2024年國際大電力系統會議」出國報告

服務機關： 台灣電力公司  
姓名職稱： 陳志宏 主管

派赴國家： 法國  
出國期間： 113年8月23日至113年9月1日  
報告日期： 113年10月7日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參加「2024 年國際大電力系統會議」出國報告

頁數：152 頁含附件：是 否

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

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

陳志宏/系統規劃處/主管/02-2366-6898

出國類別：開會

出國期間：113 年 8 月 23 日至 113 年 9 月 1 日

出國地區：法國

報告日期：113 年 10 月 11 日

分類號/目

關鍵詞：再生能源、分散式電源、直流輸電系統、國際大電力系統會議

內容摘要：(200~300 字)

本報告主要以參加 2024 年國際大電力系統會議(CIGRE)之會議主題與分組討論議題，並針對本屆年會主要議題：未來能源系統藍圖：兼具彈性與韌性的去碳化之路等以及開幕演講、專題研討、技術指導、公開論壇、論文分組、參與論文發表等提出報告與建議，以作為本公司系統規劃、調度、設計施工及運轉維護之參考。

本報告內容共分四章

壹、出國緣由與目的

貳、出國行程

參、心得與建議

肆、國際大電力系統會議(CIGRE)

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

## 目錄

壹、出國緣由與目的.....	1
貳、出國行程.....	3
參、心得與建議.....	4
肆、國際大電力系統會議(CIGRE).....	7
4.1 CIGRE 組織及本屆議程.....	7
4.1.1 CIGRE 組織.....	7
4.1.2 本屆年會議程.....	8
4.1.3 輸變電設備展覽會.....	14
4.2 參加第 46 屆 CIGRE 年會紀要.....	16
4.2.1 開幕演講(Opening Ceremony) : .....	16
4.2.2 會議主題(Opening Panel) : 未來能源系統路線圖 : 兼具彈性與韌性的去碳化之路.....	19
4.2.3 專題研討會(Work Shop) : 大擾動.....	20
4.2.4 技術指導(Tutorial).....	23
4.3 CIGRE 重要論文研討.....	34
4.3.1 大規模電網成型儲能系統取代同步發電,使澳大利亞北部主要電網能夠再生能源高滲透佔比和低負載系統(Large scale Grid-Forming BESS replaces synchronous generation, enabling high renewable penetration & low system load in Australia's major northern grid).....	34
4.3.2 離岸風電場與高壓直流連接的電網形成解決方案(Grid Forming Solution for Offshore Wind Park with HVDC Connection).....	53
4.3.3 在加州 500 千伏補償輸電系統中應用大型靜止型虛功補償設備(STATCOMs)提供動態虛功率支援(Application of Large STATCOMs for Dynamic Reactive Power Support in California 500kV Series Compensated Transmission System).....	76
4.4 分組討論主題與論文.....	99
AI-旋轉電機(Rotating Electrical Machines)共有 30 篇論文.....	99

A2-電力變壓器與電抗器(Power Transformers and Reactors)共有 73 篇論文.....	100
A3-輸配電設備 (Transmission and Distribution Equipment) 共有 56 篇論文.....	101
B1 - 絕緣電纜 (Insulated Cables) 共有 56 篇論文.....	105
B2 - 高壓架空線 (Overhead Lines) 共有 66 篇論文.....	108
B3 - 變電站與電氣裝置 (Substations and Electrical Installations) 共有 43 篇論文.....	111
B4 - 直流系統與電力電子 (DC Systems and Power Electronics) 共有 63 篇論文.....	113
B5 - 保護與自動化 (Protection and Automation) 共有 82 篇論文..	116
C1 - 電力系統發展與經濟學 (Power System Development and Economics) 共有 100 篇論文.....	118
C2 - 電力系統運轉與控制 (Power System Operation and Control) 共有 109 篇論文.....	120
C3 - 電力系統的可持續性與環境性能 (Power System Sustainability and Environmental Performance)共 40 篇.....	123
C4 - 電力系統技術性能 (Power System Technical Performance) 共 123 篇論文.....	126
C5 - 電力市場與規範 (Electricity Markets and Regulation) 共有 61 篇論文.....	129
C6 - 主動配電系統與分散能源資源 (Active Distribution Systems and Distributed Energy Resources) 共有 72 篇論文.....	132
D1 - 材料與新興測試技術 (Materials and Emerging Test Techniques) 共有 83 篇論文.....	136
D2 - 資訊系統、電信與網路安全 (Information Systems , Telecommunications and Cybersecurity) 共有 105 篇論文.....	138

## 圖目錄

圖 1-1 年會會場外觀(大會提供).....	2
圖 4-1 輸變電設備展覽會照片.....	15
圖 4-2 開幕演講照片(大會提供).....	18
圖 4-3 Historical and forecast minimum system demand in Darwin-Katherine by season/year (year ending 31 August), 2016-17 to 2031-32 [2].....	37
圖 4-4 Aggregated RMS Model.....	42
圖 4-5 Spurious ROCOF relay operation during a unbalanced fault at POC.....	48
圖 4-6 Inertial response comparison of BESS against Frame 6B Generator for overfrequency event (51 Hz).....	50
圖 4-7 Inertial response comparison of BESS against Frame 6B Generator for underfrequency event (49 Hz).....	50
圖 4-8 Oscillatory (left) and stabilised after tuning (right) frequency profile following a trip of a synchronous generator in the network.....	51
圖 4-9 Overview of the system step.....	59
圖 4-10 Basic GFM control concept.....	60
圖 4-11 Electrical equivalent circuit diagram for GFM control.....	62
圖 4-12 Influence of onshore voltage phase jump. Active power setpoint, $P = 0.5$ pu.....	66
圖 4-13 Influence of onshore voltage phase jump. Active power setpoint, $P = 1.0$ pu.....	67
圖 4-14 Instantaneous voltage support (Active/reactive power @rated active/reactive power base) line color: indicates different voltage drop cases and line style: indicates different signals.....	68
圖 4-15 Robustness against sudden grid strength changes: SCL change from 20 GVA to (1) 5 GVA, (2) 2 GVA, (3) 1 GVA and (4) 0.5 GVA.....	69
圖 4-16 Response to a frequency ramp. Active power setpoint, $P = 0.5$ pu.....	70
圖 4-17 Response to a frequency ramp. Active power setpoint, $P = 1.0$ pu.....	71
圖 4-18 Robustness against sudden grid strength changes: SCL change from 20 GVA to (1) 5 GVA, (2) 2 GVA, (3) 1 GVA and (4) 0.5 GVA.....	72
圖 4-19 Example performance during a solid left: three phase and right: single phase fault (AC currents are per unitized at converter secondary side peak current base).....	73

圖 4-20 Example performance during a solid left: three phase and right: single phase fault (AC currents are per unitized at converter secondary side peak current base).....	78
圖 4-21 V/Q characteristics for continuous voltage control and overload range.....	82
圖 4-22 Effect of STATCOM Controller Gain and Control Mode (VCM vs. FQM) on the Impedance of STATCOM.....	87
圖 4-23 Fault Locations of F1 and F2.....	89
圖 4-24 SSO Due to Faults with Normal Clearing Times(N-1 Cases)....	91
圖 4-25 Multiple Contingencies (CASE3).....	92
圖 4-26 SSO Due to Multiple Outages (Extreme Case).....	93

## 表目錄

表 2-1 行程概要 .....	3
表 4-1 2024 年年會議程.....	10
表 4-1 Main system parameters.....	59
表 4-2 Voltage Regulating Capability of the STATCOMs with one and two blocks in service.....	80
表 4-3 Specified Ride-Through Requirements.....	81
表 4-4 Operating points.....	83

## 壹、出國緣由與目的

國際大電力系統會議(INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS；簡稱 CIGRE)每兩年邀集世界各主要電力公司、電力設備製造商、電力管制機構及電力研究機構，於年會報告分享近年來電業相關議題，包括：電力市場、規劃、工程設計、調度運轉、設備維修、資通訊系統、與新技術應用等各領域之趨勢與經驗。本公司為該組織註冊之團體會員(會員編號 219714004)，自 73 年起每屆年會皆派員參加，鑑於過去自 CIGRE 取得之技術資訊對本公司系統規劃、調度、設計施工及運轉維護等業務之推動影響深遠，頗有助益。

2024 年「國際大電力系統會議(CIGRE)」，於 8 月 25 日至 8 月 30 日共六天於法國巴黎 Palais des Congrès 舉辦(如圖 1-1)。本屆年會主要特色如下：未來能源系統路線圖：兼具彈性與韌性的去碳化之路另針對 4 類 16 組不同議題進行分組討論。值此本公司發展再生能源之際，出席本屆年會，藉此瞭解目前各國電業現階段發展趨勢，俾對公司業務精進有所助益。



圖 1-1 年會會場外觀(大會提供)

## 貳、出國行程

本出國計畫，自 113 年 8 月 23 日起，至 113 年 9 月 1 日止，合計 10 天，行程如表 2-1。

表 2-1 行程

日期	起訖地點	工作紀要
113/8/23~113/8/24	台北-巴黎	去程
113/8/25~113/8/30	巴黎	參加 CIGRE 年會
113/8/31~1113/9/1	巴黎-台北	返程

## 參、心得與建議

此次參加國際大電力系統會議(CIGRE 2024)，議程內容豐富充實。除出席開幕演講、主題論壇及專題研討會及技術指導等共同議題之討論外，值得本公司相關單位參考之攜回研習成果，已依各分組分類方式整理於出國報告，摘要如下：

今年有幸參加了在巴黎舉行的2024年國際大電力系統會議(CIGRE)，這是一個匯集全球電力系統專家與業界重要平台。能夠在這樣的國際性會議中聆聽專家們的演講，了解世界各國的技術發展趨勢，真的是十分寶貴的經歷。

這次會議的主題是「未來能源系統路線圖：兼具彈性與韌性的去碳化之路」。在這個主題下，我們討論了如何在全球推進行能源去碳化的同時，確保電力系統能夠應對各種突發事件，保持穩定運轉。這個話題對於我們當前面臨的全球氣候變化、能源轉型挑戰來說，顯得尤其重要。

首先，感受到全球對於電力系統轉型的高度關注。無論是來自歐洲、澳大利亞還是亞洲的專家，大家都在積極分享如何加速再生能源的佈局與應用，特別是電池儲能系統(BESS)的關鍵角色。BESS技術在穩定電網、應對再生能源波動性方面，發揮著日益重要的作用。這讓我

深刻意識到，儲能技術的創新不僅是提升再生能源佔比的關鍵，還能為電網提供更多的調度靈活性，這對於高比例間歇性能源滲透的電網尤其重要。

其次，會議中的技術展示也讓我大開眼界。像是變壓器可靠性分析、高壓直流輸電系統（HVDC）的應用，以及變電站內設備的零排放技術等，這些領域的技術突破顯示出全球電力系統正逐步向更高效、更多綠能的方向邁進。多位國際專家他們分享了許多具體的技術解決方案和實例，這對今後在技術推廣和實用性中都有非常大的幫助。

能源轉型的全球趨勢，本次會議的另一個亮點是關於全球能源轉型的深度討論。無論是來自德國的風能整合經驗，還是澳大利亞高滲透再生能源系統的案例，都讓我對如何在電網中實務操作上對於再生能源大規模應用有了進一步的認識。另澳大利亞的達爾文-凱瑟琳電網的案例，這個案例展示了電池儲能系統如何替代同步發電，並且成功地應對再生能源高滲透率下的電網運轉挑戰。

該案例中，電池儲能系統不僅能夠提供穩定的電壓和頻率控制，還能在較重負載時段為電網提供支撐，這無疑是解決再生能源間歇性問題的重要技術之一。未來在電力系統的發展中，也可考慮推對這類儲能技術的應用，尤其是在一些再生能源較多的地區，這將能夠顯著提高電網的穩定性與效率。

在這次會議中，我了解到AI在電力系統中的應用前景，不僅限於故障預測與防範，它還能有效提升電力系統的運營效率，尤其是在電網運轉控制、自動調度方面，AI可以根據實時數據調整電力供應，這將對整個電網的穩定運轉產生深遠影響。

回到我國電力系統的現狀，我認為我們需要加快推動電力數位化轉型，尤其是利用大數據、人工智慧等技術提升電力運轉的自動化和智慧化等級。通過這些技術的應用，電力系統的穩定性、效率以及應對突發事件的能力都將大幅提升。

對未來的啟示與建議，通過這次會議，我對未來電力系統的發展有了更全面的認識。全球的能源轉型正在加速進行，特別是在再生能源整合與電網穩定性之間的平衡中，技術創新將發揮至關重要的作用。基於這次會議的經驗，有幾項建議：

推動再生能源與儲能技術的深度融合：再生能源的高滲透率對電網帶來了不小的挑戰，因此需要加強儲能技術的研發與應用，尤其是在具備多樣化再生能源的地區。

強化電網的數位化轉型，AI和數據技術的應用能夠顯著提升電網的運營效率和故障處理能力，建議加強對這些新技術的研究和應用，促進電網的現代化發展。

加強國際合作與知識分享，這次會議的另一個重要收穫是了解到全球

電力系統的發展進程與趨勢。通過國際合作與經驗分享，我們可以吸取其他國家的成功經驗，並結合我國電力的需求，推動電力系統的轉型升級。

總結來說，這次CIGRE會議給我帶來了許多技術上的啟發，在全球能源轉型的浪潮下，我們需要時刻保持學習和創新的態度，才能夠應對未來的挑戰。

## **肆、國際大電力系統會議(CIGRE)**

### **4.1 CIGRE 組織及本屆議程**

#### **4.1.1 CIGRE 組織**

國際大電力系統會議CIGRE為法文(Conseil International des Grands Réseaux Électriques)之簡稱，英文名稱為(International Council on Large Electric Systems)，CIGRE設立於1921年，為一非政府、非營利的永久性國際組織，內容涵蓋電力科技、電力經濟、環境議題、組織架構與管理等議題，透過世界各地專家知識分享、互相合作以改善當前和未來的電力系統。CIGRE總部設在法國巴黎，其宗旨是：

1. 促進世界各國專家、學者在電力系統方面的知識與技術經驗的交流與發展。

2. 通過新技術和大量實務結合的交流，使工程經驗和資訊不斷增值。

3. 使經營決策管理者瞭解電力領域的最新發展趨勢與綜合作用。

CIGRE下設16個研究委員會(Study Committees)協調工作計畫，由技術委員會(Technical Committee)負責監督，其會員來自全球100多個國家，由各國電力公司、電力管制機構、電力調度中心、電力工程專家、學者、設備製造商及貿易商組成。

#### 4.1.2 本屆年會議程

CIGRE每兩年舉辦一次世界上最重要的協作知識開發和分享計畫。其中包括視訊活動，再加上定期的面對面活動，在許多情況下包括世界頂尖專家的參與。這個計畫每兩年就是在巴黎舉行的全球電力系統專業領域的領先盛會。

兩年一度的大會在法國巴黎舉行。它是全球電力系統領域的頂級盛會，來自100多個國家的約9000名電力行業參與者齊聚一堂，其中包括3600名國際專家和其他決策者。這是一個為期一週的獨特互動機會。超過160場工作會議，超過30個研究委員會會議，以及1127多篇涵蓋電力系統的技術論文。

海報會議：800多篇技術論文的作者在互動的海報會議上進行展示。代表們可以與專家作者進行一對一的討論。根據自己感興趣的領域，會見相關作者。

技術指導:在大會期間，CIGRE的16個研究委員會各自就一個關鍵主題舉辦一個技術指導。這些都是高度資訊化的活動，為代表們提供了選擇感興趣主題並吸收相關專業知識的機會。

研討會:在巴黎大會期間，會舉辦多達七場關於影響全球電力系統的問題的研討會。這些必須參加的活動提供了由該領域專家分享的深入技術知識。

技術展覽:通常有300多家國際公司、技術和服務供應商展示他們的創新、產品和服務。

本屆年會論文主題除了旋轉電機、變壓器、電力電纜、架空輸電線、直流輸電系統(HVDC)及保護電驛和電力材料測試等設備新技術開發與運用實務探討外，同時有因應智慧型電網、直流輸電之新變電所設計技術、資訊與STATVOM的應用、電力系統可靠度提升、HVDC系統與分散式電源規劃與運轉以及電力市場經營與挑戰等研究與實務經驗報告。本屆議程如表4-1所示。

表 4-1 2024 年年會議程

日期	時間	議程	場地
8 月 25 日	15:30 - 17:30	開幕典禮(雞尾酒晚宴)	GRAND AMPHITHEATRE
8 月 26 日	08:30 - 12:00	開幕專題討論- “未來能源系統路線圖：兼具彈性與韌性的去碳化之路”	GRAND AMPHITHEATRE
	08:30 - 10:20	技術指導 A2 - 變壓器可靠性分析	TBC
	10:40 - 12:30	技術指導 A3 - 發電廠中的發電機斷路器應用	TBC
	14:00 - 15:50	技術指導 B4 - 混合 LCC/VSC 高壓直流輸電系統	TBC
	14:00 - 18:00	研討會 C2 & C5：大干擾研討會	GRAND AMPHITHEATRE
	14:30 - 17:30	研討會 A2/A3/B3/C3/D1：推動輸配電變電站和設備實現零排放	TBC
	16:10 - 18:00	技術指導 B1 - HV DC Cables, TB 852 & 853	TBC
8 月 27 日	08:30 - 10:20	技術指導 A1 - “大型旋轉電機局部放電監測概述”	TBC
	08:30 - 12:30	研討會 C1/C4：彈性設計	TBC
	08:45 - 12:00	GDM B5 MORNING - 保護與自動化	GRAND AMPHITHEATRE
	08:45 - 12:00	GDM A3 MORNING - 輸配電設備	BORDEAUX
	08:45 - 12:00	GDM D1 MORNING - 材料和新興測試技術	HAVANE
	08:45 - 12:00	GDM C3 MORNING - 電力系統可持續性和環境績效	BLEU
	10:40 - 12:30	技術指導 B3 - 變電站中輸配電設備 (>1 kV) 的 SF6 報廢處理指南	TBC
	14:00 - 15:50	技術指導 C6 - 電池儲能系統和太陽能光伏系統的聚合	TBC

日期	時間	議程	場地
8 月 27 日	14:00 - 16:00	研討會 C5/C6/D2 : 用戶側能源資源管理 - 市場、控制和資訊系統觀點	TBC
	14:00 - 18:00	GDM C3 AFTERNOON - 電力系統可持續性和環境績效	BLEU
	14:00 - 18:00	GDM D1 AFTERNOON- 材料和新興測試技術	HAVANE
	14:00 - 18:00	GDM A3 AFTERNOON - 輸配電設備	BORDEAUX
	14:00 - 18:00	GDM B5 AFTERNOON - 保護與自動化	GRAND AMPHITHEATRE
	16:10 - 18:00	技術指導 C2 - 廣域監測保護和控制系統 - 系統運營商的決策支持	TBC
8 月 28 日	08:30 - 10:20	技術指導 B5 - 保護不斷變化的電力系統	TBC
	08:30 - 12:00	研討會 B4 : 可互操作的多端高壓直流輸電系統: 從夢想變為現實	TBC
	08:45 - 12:00	GDM B3 MORNING - 變電站和電氣裝置	GRAND AMPHITHEATRE
	08:45 - 12:00	GDM C2 MORNING - 電力系統運轉與控制	BORDEAUX
	08:45 - 12:00	GDM C6 MORNING- 主動配電系統和分散式能源	HAVANE
	08:45 - 12:00	GDM A1 MORNING - 發電和機電能量轉換	BLEU
	09:00 - 12:00	研討會 B2 : 現有架空線路支撐、錨固和基礎的腐蝕評估和修復	TBC
	10:40 - 12:30	技術指導 C1 - 能源部門整合及其對電網的影響	TBC
	11:00 - 14:00	NGN Forum	TBC
	14:00 - 18:00	研討會 C4 : 綠皮書“不斷髮展的網絡中的電力系統動態建模和分析”	TBC
8 月 28 日	14:00 - 15:50	技術指導 C5 - 電動汽車在市場中的整合	TBC

日期	時間	議程	場地
8 月 28 日	14:00 - 18:00	GDM A1 AFTERNOON - 發電和機電能量轉換	BLEU
	14:00 - 18:00	GDM C6 AFTERNOON- 主動配電系統和分散式能源	HAVANE
	14:00 - 18:00	GDM C2 AFTERNOON - 電力系統運轉與控制	BORDEAUX
	14:00 - 18:00	GDM B3 AFTERNOON - 變電站和電氣裝置	GRAND AMPHITHEATRE
	16:00 - 18:00	研討會 C1/C5 : 綠色氫在能源轉型中的作用及其對整個價值鏈的影響	TBC
	16:10 - 18:00	技術指導 B2 - 架空線路網絡風險管理：識別、評估和緩解運轉風險的模型 (WG B2.77)	TBC
8 月 29 日	08:30 - 10:20	技術指導 D2 - 5G 在電力公用事業中的應用	TBC
	08:45 - 12:00	GDM B4 MORNING - 直流系統與電力電子	GRAND AMPHITHEATRE
	08:45 - 12:00	GDM C1 MORNING - 電力系統發展與經濟	BORDEAUX
	08:45 - 12:00	GDM B1 MORNING- 絕緣電纜	BLEU
	08:45 - 12:00	GDM C5 MORNING - 電力市場與監管	HAVANE
	10:40 - 12:30	技術指導 D1 - 變壓器絕緣液的功能特性：實驗室方法和介電性能	TBC
	11:00 - 14:00	WiE 論壇	TBC
	14:00 - 15:50	技術指導 C4 - 現代和未來電力系統中的電磁兼容問題	TBC
	14:00 - 18:00	GDM C5 AFTERNOON - 電力市場與監管	HAVANE
	14:00 - 18:00	GDM B1 AFTERNOON - 絕緣電纜	BLEU

日期	時間	議程	場地
	14:00 - 18:00	GDM C1 AFTERNOON - 電力系統發展 與經濟	BORDEAUX
8 月 29 日	14:00 - 18:00	GDM B4 AFTERNOON - 直流系統與電 力電子	GRAND AMPHITHEATRE
	16:10 - 18:00	技術指導 C3 - 可持續走廊管理	TBC
8 月 30 日	08:30 - 12:30	研討會 C5 : 零售市場發展	TBC
	08:45 - 12:00	GDM B2 MORNING - 架空線路	GRAND AMPHITHEATRE
	08:45 - 12:00	GDM C4 MORNING- 電力系統技術性能	BORDEAUX
	08:45 - 12:00	GDM A2 MORNING - 電力變壓器和電 抗器	BLEU
	08:45 - 12:00	GDM D2 MORNING - 資訊系統、電信 和網絡安全	HAVANE
	12:00 - 14:00	GDM B2 AFTERNOON - 架空線路	GRAND AMPHITHEATRE
	14:00 - 18:00	GDM C4 AFTERNOON- 電力系統技術性 能	BORDEAUX
	14:00 - 16:00	GDM D2 AFTERNOON - 資訊系統、電 信和網絡安全	HAVANE
	14:00 - 18:00	GDM A2 AFTERNOON - 電力變壓器和 電抗器	BLEU

### 4.1.3 輸變電設備展覽會

本屆輸變電設備展覽會共有242家設備製造廠家參展，主要展出包括高壓設備；監測、控制和保護設備；量測、試驗和診斷工具；電力公司和顧問公司的技術和專業知識；教育訓練之工具和技術等參展內容。透過廠家說明新的設備及技術與應用，可藉以瞭解現階段電力設備發展趨勢。

技術展覽:2024年巴黎年會的全球技術展覽已圓滿結束，吸引了來自超過300家國際公司、技術和服務提供商的參與，這些公司代表了全球電力系統領域的重要成員。CIGRE的展覽商將利用這次活動向我們的展示最新的創新、服務和產品。展覽場地位於巴黎會議宮Palais des Congrès，佔地17,300平方米，分佈在三層樓，非常適合大型展覽。這使得電力系統專業人士能夠全面展示滿足能源轉型挑戰所需的產品和服務，展示內容包括：最新的高壓和中壓設備、監測、控制和保護設備、測量、測試和診斷工具、電力公司和顧問的專業知識、培訓工具、軟體系統和技術現場照片如圖4-1所示。



圖 4-1 輸變電設備展覽會照片

## 4.2 參加 2024 年 CIGRE 年會紀要

### 4.2.1 開幕演講(Opening Ceremony)：

2024年CIGRE 2024年會的開幕演講強調了應對全球電力系統挑戰的重要性，特別是能源轉型、數位化轉型和加強電網韌性的需求。這場活動於巴黎的會議宮(Palais des Congrès)舉行，來自超過100個國家的數千名專業人士參加。開幕演講中強調了協作與創新的作用，推動電力行業進一步發展，並強調了可再生能源整合、人工智慧 (AI) 在電網管理中的應用進展以及電力系統網絡安全加強等關鍵趨勢。

開幕式為接下來一周的密集技術討論奠定了基調，這些討論包括超過 1,181 篇技術論文和 3,600 名國際專家的貢獻。CIGRE 的領導層重申了其持續承諾，致力於知識共享和國際合作，以解決當前電力行業面臨的重大挑戰，如實現能源效率、降低碳排放以及現代化電力基礎設施。

CIGRE 非常榮幸邀請到國際能源署 (IEA) 能源市場與安全部主任貞森圭介先生，作為 2024 年巴黎會議的主旨演講嘉賓如圖4-2。

憑藉其在能源市場與安全領域的豐富專業知識和領導能力，貞森圭介先生將為我們的會員和參會者提供寶貴的見解。

2024年巴黎會議旨在解決能源行業最緊迫的挑戰和機遇，貞森先生的貢獻無疑將為我們的討論更貼近，推動創新解決方案的發展。

在演講中，貞森圭介先生深入探討再生能源整合的關鍵議題，及其對全球電網安全和能源市場的深遠影響。基於國際能源署（IEA）最新報告和即將發表的研究，貞森先生將提供全球電力行業和再生能源部署的最新概況。他還將分享有關整合再生能源和確保電力安全的寶貴見解。

貞森先生的專業知識將闡明 IEA 在應對這些緊迫問題上的重大努力，並向政策制定者和業界相關人士提供可行的建議，特別是針對目前 CIGRE 成員的相關工作進行的策略強調。本次演講將是所有參與能源行業人士的必備資源，全面了解再生能源與電網安全在不斷演變的能源格局中的挑戰與機遇。



圖 4-2 開幕演講照片(大會提供)

#### 4.2.2 會議主題(Opening Panel)：未來能源系統路線圖：兼具彈性與韌性的去碳化之路

2024年CIGRE巴黎會議的開幕專題討論主題為“未來能源系統路線圖：兼具彈性與韌性的去碳化之路”。討論強調了向更乾淨、可持續能源系統過渡的緊迫性，同時確保這些系統具有足夠的彈性以應對各種擾動，並具有足夠的靈活性以適應未來的技術進步。

主要討論的主題包括：去碳化：如何將太陽能和風能等可再生能源整合到現有電網基礎設施中，以推動潔淨能源的轉型。電網韌性：設計能夠承受並從極端天氣事件、網絡威脅等中斷中快速恢復的能源系統。靈活性：增強能源系統的靈活性，特別是在間歇性可再生能源供應波動的情況下，保持穩定運轉。政策與合作：強調國際合作、監管框架和創新政策措施在實現全球能源目標中的重要性。此次專題討論為整個 2024會議定下了基調，推動了關於如何打造未來能源系統的深入討論，平衡可持續性、安全性與適應性。

### 4.2.3 專題研討會(Work Shop)：大擾動

大型擾動研討會 (LDW) 起源於 1990 年代初期，當時一小群電力系統運營商在 CIGRE 巴黎會議期間聚集，分享他們所遇到的重要運轉事件及應對措施，目的是分享經驗與知識。

在接下來的 20 年裡，參與人數不斷增加，並主要專注於技術性電力系統運營。到了 2012 年巴黎會議，LDW 成為電力系統運營 (C2 研究組) 和市場與監管 (C5 研究組) 共同舉辦的大擾動研討會。

過去 6 屆巴黎會議，每屆 LDW 都有大約 500 名參與者，分享約 10 個來自世界各地的大型互聯電力系統到小型孤立系統的事件，以及不同的市場設計範例。例如，2022 年 (由於疫情，參與人數減少)，討論的事件包括歐洲、日本、以色列、澳洲 (東、西岸)、紐西蘭及印度。

主要事件往往會同時影響電力系統的運轉和該區域的市場，但並非總是如此，且並非所有電力系統都由分散的市場運營。例如，當地方壟斷的電力公用事業運營電力系統時，會發生不同的狀況。LDW 中呈現的電力系統事件範圍從意外不穩定的運轉狀況到大規模停電，而市場影響則通常包括維持安全和穩定運作的能源和輔助服務批發價格波動。

研討會的重點在於了解每個案例中發生錯誤的原因，並探討預防再

次發生的可能方法。

在 2022 年，發現事件原因已從主要與去碳化相關的發電技術變更，轉向包含與外部機構在自然災害(如野火和氣旋)期間的協調問題。

2024 年 LDW 的報告將延續 2022 年的趨勢，涵蓋由於減少慣性／增加逆變器資源參與造成的擾動，以及非技術性事件如洪水、野火和氣旋等對市場與能源價格的影響。

2024 年的報告將來自波蘭、斯堪地那維亞、新加坡、澳洲(東岸)、加拿大阿爾伯塔省、荷蘭、巴西、莫桑比克和印度。此外，還將回顧過去 10 年內的系統事件。

2024 年 CIGRE C2 與 C5 研討會的「大擾動」主題，聚焦於電力系統在面對極端事件及大規模擾動時所面臨的挑戰。此次研討會探討了提高電力系統韌性及其從擾動中快速恢復能力的解決方案。討論內容涵蓋了案例研究及最佳實踐策略，目的是防止大規模停電。會議中還討論了從操作層面應對系統性擾動的問題，尤其是在擁有大量可再生能源的電網中如何加強其靈活性與穩定性。

研討會的主要亮點包括：

(一)對於現實生活中重大擾動事件的深入洞察，包括其成因和恢復策略。

(二)再生能源整合對電網穩定性的影響。

(三)在處理跨區大規模電力中斷時的協作。

(四)預測與減少重大擾動風險的先進工具。

#### 4.2.4 技術指導(Tutorial)

##### 1. 技術指導 1—SC A2 變壓器可靠性技術指導(Analysis of Transformer Reliability)

演講者 Stefan Tenbohlen 報告本主題高壓設備的運轉經驗的準確資訊對於電力公司和設備製造商都具有重要價值。它有助於製造商改進產品，並為電力公司組織維護和基準測試其性能提供重要輸入。對過去故障數據的統計分析可以顯示關於未來故障行為的有用特徵。在評估電力系統的整體可靠性時，包括電力供應安全研究時，也需要設備可靠性數據。此外，適用於高壓設備的國際標準正在根據運轉經驗和可靠性數據進行改進。

本 Tutorial 介紹了 CIGRE WG A2.62 收集的變壓器故障分析。基於超過 425,000 個年和 1,159 次重大故障的變壓器，確定了約 0.3% 的年故障率。介紹了不同電壓等級的故障位置和模式分析，以及外部影響。

##### 2. 技術指導 2—SC A3.46 發電廠中的發電機斷路器應用(Application of Generator circuit-breakers in power plants)

演講者 Pavel Novak (GE) 和 Stanislav Krasnov (CH) 報告本主題，A3.46 工作組正準備一份關於發電機斷路器(GCB)的技術手冊。GCB 是關鍵的開關設備，可提高發電廠運轉的可靠性。本技術指導

將總結工作的主要成果。它將討論典型的電廠配置、所需的操作任務、網絡規模計算和 GCB 的資格認證方法。此外，還將深入介紹所使用的技術和生命週期分析。最後的討論將涉及電網轉換的主題以及對 GCB 性能的相關要求。用戶，主要是發電廠運營商，是目標受眾。發電機和 GCB 製造商以及其他電力系統專家也歡迎參加並為本技術指導做出貢獻。

3. 技術指導 3—SC B4 技術指導混合式 LCC/VSC HVDC 系統(Hybrid LCC/VSC HVDC Systems)由 Erik Berne、Yuebin Zhou、Zhibo Wang 及 Paulo Max Maciel Portugal 講解，本技術指導重點關注混合式 LCC/VSC HVDC 系統，它將 LCC 和 VSC 技術結合在一個 HVDC 線路中。這類 HVDC 近年來獲得了極大的歡迎。技術指導共分為四個部分。首先，技術指導將概述 WG B4.79，包括 HVDC 的背景、為什麼提出混合式 HVDC 以及它可以應用在哪裡等。其次，它介紹了混合式系統的定義，包括其配置、優勢、挑戰和一些應用案例。第三，技術指導重點關注點對點配置的混合式系統，並介紹其考慮因素和典型設備。最後，以南方電網烏東德 UHVDC 工程為例，介紹一些典型的模擬和實驗結果。
4. 技術指導 4—A1 技術指導 (1) "大型旋轉電機局部放電監測調查" (2) "設計帶有負勵磁系統的凸極同步調相機的挑戰"。(1) 本技

術指導將介紹 WG A1.63 對大型電機放電監測調查的重點內容。該技術指導將由 Andre T. Carvalho (巴西) 主講。

(2) 由於能源轉型帶來的挑戰，同步補償器/調相機正在許多國家廣泛應用，以支持電網電能和運轉性能。本技術指導解釋了它們的設計原則、運轉方式與傳統發電機的不同之處、設計挑戰，並將舉例說明如何應用負勵磁來增強虛功能力。該技術指導將由 Johnny Rocha (巴西) 主講。

5. 技術指導 5—SC C6 變電站中輸配電設備 (>1 kV) 的 SF6 報廢處理指南(Guidelines for SF6 end-of-life treatment of T&D equipment (>1 kV) in substations)Maik Hyrenbach 講解 聯合工作組 B3/A3.59 利用國際成員的專業知識，編制了一份關於在設備報廢時從電氣設備中專業回收 SF6 的指南。由於許多用戶，主要是在中壓領域，在這方面的經驗有限，該指南通過解釋所有必要的流程步驟並指導所有工作步驟的規劃來提供支持。指南詳細解釋了關於誰來回收 SF6 以及在哪裡進行回收的重要決策，以便為客戶應用找到具體的最佳匹配解決方案。除了盡量減少排放的目標外，找到最具成本效益的解決方案也很有幫助。指南還解釋了 SF6 的回收或銷毀，並提供了儲存和運輸方面的建議。本技術指

導重點介紹了指南中的關鍵點，這些關鍵點對於高效和有效地管理 SF6 回收過程是必要的。

6. 技術指導 6—SC C6 用於電池儲能與分散式能源的整合 (Aggregation of battery energy storage and Distributed Energy Resources.) 由 Nikos Hatziargyriou 和 Christine SCHWAEGERL, Geza JOOS 協助報告，電池儲能系統 (BESS) 透過在配電層級提供一系列電網服務，成為實現主動配電系統功能的關鍵推動因素。本次技術指導將介紹這些電網支援服務、分散式 BESS 整合方法，以及 BESS 在電池技術、重量、維護、與其他控制器協調方面的運轉限制，還有 BESS 電網服務提供的監管和法律框架、監管和市場考量等。

7. 技術指導 7—SC C2 廣域監測保護與控制系統 - 為系統操作員提供決策支援 (Wide Area Monitoring Protection and Control Systems - Decision Support for System Operators) 由 Giorgio Giannuzzi (Terna)、Cosimo Pisani (Terna)、Tadeja Babnik (ELPROS)、Douglas Wilson (GE)、Asja Derviskadic (Swissgrid)、Walter Sattinger (Swissgrid) 報告，其內容為：將報告目前在全球不同控制室積累的經驗。將描述廣域監測系統 (WAMS) 實施架構的細節。將展示事件記錄和分析的不同解決方案。將比較控制室

SCADA 和 WAM 功能。將介紹專用的 WAMs 衍生警報和測量。將討論 SIPS 和 WAMPAC 系統應用的應用。將介紹如何使用 WAM 系統進行模型驗證。最後，將展示一些電信架構細節和要求。

## 8. 技術指導 8—SC B5 保護不斷變化的電力系統(Protecting a changing power system)

由 Anita Oommen (ZA)， Vladimir Terzija (GB)， Bogdan Kaszteny (CA) 和 Alexander Tsylin (DK) 主講，其內容為高可再生能源滲透率電力系統的保護。

(1) 介紹: 技術指導顧問小組顧問對技術指導進行簡短介紹

(2) 基於逆變器資源 (IBR) 對電網的影響

技術指導的第一部分將重點關注電力系統向可再生能源轉變的格局。還將涵蓋受 IBR 滲透率增加影響的電網動態、可靠性、穩定性問題。將討論降低慣性和故障水平對保護電驛的影響、電力系統慣性和故障水平監測。還將包括區分電網形成(Grid Forming)逆變器和電網跟隨逆變器及其對保護系統的影響。第一部分還將涵蓋對基於頻率的保護和整個輸電系統保護的影響，以及保護系統的新型創新解決方案。

(3) 非常規電源系統中線路和遠程備份保護的最佳實現

技術指導的下一部分將討論具有高滲透率非常規電源的系統中定

向和距離保護元件面臨的挑戰。討論了各種線路保護方案的一些實用解決方案。將介紹獨立於電源提供的電流的行波線路保護原理。還將介紹針對具有非常規電源的系統優化的階梯式距離保護元件用於遠程備份應用的原理。

#### (4) 未來路線圖

技術指導的最後一部分討論了未針對具有高滲透率逆變器電源的電網進行優化的常用保護算法。它概述了當前保護系統設計和應用實踐對於主要基於逆變器電源的電網所面臨的挑戰。介紹了面向未來配備足夠可靠保護系統的電網的路線圖，包括源故障響應和電網規範的趨勢和所需發展。還包括了國際專業組織在促進向未來電力系統轉型方面的作用。

9. 技術指導9—SC C1 能源部門整合及其對電網的影響 (Energy Sectors Integration and impact on power grids) 由Ning Zhang 報告，其內容為：能源部門整合 (ESI) 是指協調不同能源部門、路徑和時間軸上的能源生產、傳輸、轉換和利用的系統。與“傳統”能源系統相比，輸電級和配電級的ESI改變了電力系統的結構。多個能源網絡 (例如電力、天然氣、氫氣、熱/冷網路以及電動交通) 之間的耦合和相互作用變得越來越複雜。人們越來越關注美國和歐洲天然氣市場與電力市場的耦合問題。CIGRE成立了一個名為

“能源部門整合及其對電網的影響”的WG C1.47，以研究輸電網規劃中能源部門耦合的影響。本技術指導源自WG C1.47的工作。本技術指導旨在解決ESI的技術、經濟和監管問題，並評估世界各地不同國家的最新研究。技術指導將確定輸電網級ESI的挑戰和收益。技術指導將回顧面向多區域ESI的建模、運轉、市場分析和規劃的方法和技術。最後，技術指導將總結經驗教訓並介紹ESI的最佳實踐。

10. 技術指導 11-SC C5 電動汽車市場整合(Electric Vehicle integration in markets)由演講者 Aditie Garg、Andre Nekrasov、Anant Venkateswaran、Jessica Harrison 報告，其內容為：電動車輛(EV)勢必將大幅增加全球多個地區的電力消耗。根據國際能源署(IEA)的數據，2020年至2022年間，電動車銷量佔全球總銷量的比例已從4%增長至14%，增長超過三倍。儘管2022年電動車的總能耗不到所有能源使用的0.5%，但個別充電基礎設施的功率範圍從千瓦到兆瓦不等，對電網的部分區域有著重大影響。在本技術指導中，工作組 C5.34 將總結他們探索將電動車輛與電網整合的現有方法的工作，包括互連、運營和市場參與。技術指導將總結幾個地區(包括印度、歐洲和北美)當前合格的服務和定價方法、參與者角色以及監管框架，並建議持續工作的框架，以成功整合電動

車輛。

11. 技術指導11—SC B2架空輸電線路網的風險管理:識別、評估和減輕運營風險的模型(Risk Management of Overhead Line networks: A model for identification, evaluation and mitigation of operational risks (WG B2.77)由演講者Asif Bhangor報告，其內容為：隨著世界向脫碳、可負擔和可持續的能源系統過渡，對天氣條件的依賴對於能源生產和輸送變得越來越重要。然而，這種轉變也使現有的電力資產面臨更頻繁和極端的事件，因為氣候變化的影響正在加速。輸電和配電架空線路(OHL)網面臨各種運營風險，這些風險源於嚴重的氣候事件(如風和閃電)、火災、車輛碰撞、組件故障和基礎設施老化。這些事件影響網路的安全運營和維護、可靠性、客戶服務、公共安全和環境福祉。此外，它們可能給網路運營商帶來巨大的財務成本。隨著能源格局向更多地依賴可再生能源轉變，現有的老化資產對整體電網穩定性構成額外風險。多個利益相關方受到影響，包括資產運營商、技術和資產管理人員、資產所有者、監管機構、法律和財務團隊以及普通公眾。在過去十年中，風險管理工具和流程變得越來越複雜，存在許多相互依賴關係。分析這些風險非常耗時，需要大量的地理、環境和特定網路設計資訊。最終目標是為組織決策提供簡明的見解。為了應對這些挑戰，工作

組B2.77開發了一個通用風險管理框架，可以根據電力線路公用事業的具體需求進行定制。該框架考慮了簡化和詳細的相互依存關係，使廣泛的利益相關方能夠在相對較短的時間內評估給定網路的運營風險，而不是使用可用的複雜框架。關鍵標準包括：網路重要性：通過考慮已連接的發電、需求和電路利用率（包括負荷損失的價值）來評估關鍵性。恢復複雜性：評估事件後恢復服務所涉及的挑戰，包括路線可達性、備件、供應鏈和恢復損壞的資源。歷史表現：檢查過去的表現和可靠性，包括組件的狀況評估、進行的設計規範、歷史中斷和記錄的事件。路線脆弱性：確定網路容易受到極端事件影響的部分，包括火災、風、冰、雪、破壞、洪水等。通用風險管理框架包括一個簡單的基於Excel的應用程式。利益相關方可以在不進行大量數據收集或複雜設計計算的情況下填充它。該工具提供了對提議的緩解措施、剩餘風險以及所選風險降低策略的益處的見解。在本技術指導中，工作組B2.77將分享來自全球各地的極端事件案例研究。這些研究強調了使用建議的框架為所有相關利益相關方進行知情決策的重要性。

12. 技術指導 12—SC B2 變壓器絕緣液體的功能特性：實驗室方法和介電性能(Functional properties of insulating liquids for transformers: laboratory methodologies and dielectric

performance)由演講者 Ivanka Atanasova-Hoehlein 和 Lars Lundgaard 報告，其內容為：本技術指導針對絕緣液體(礦物油、合成和天然酯)在各種應用中的功能特性，並基於 D1-70 的廣泛工作。技術指導將涵蓋工作組活動的兩個關鍵領域:建立模擬其使用行為的新實驗室方法，例如無故障放氣、氧化抑制劑耗盡。將關於絕緣液體介電性能的科學研究與工業實踐和測試標準聯繫起來，並回顧各種絕緣液體的典型介電行為。本技術指導基於 D1.70 製作的兩份技術手冊，即 TB856 和 TB927，分別於 2021 年和 2024 年出版。

13. 技術指導 13-SC C4 變壓器絕緣液體的功能特性:實驗室方法和介電性能(EMC issues in modern and future power systems)由演講者 Rojas 報告，其內容為：本技術指導將首先介紹一些電磁兼電容性(EMC)基本概念、電磁學基本概念以及電磁學與電路理論(通常用於描述電力系統的基本理論)之間的關係。接下來，將描述電力系統產生和影響的各種常見類型的電磁干擾。在技術指導的第二部分，將介紹電力系統與其他系統和自然環境之間的電磁兼電容性問題，以及電力系統內部電磁兼電容性問題的一些示例。最後，將得出一些關於現代電力系統中正在加劇的主要電磁兼電容性問題的結論。

14. 技術指導13 – SC C3 永續廊道管理(Sustainable corridor management)，其內容為：本技術指導將重點關注走廊的定義、通行權的規定、利益相關者參與(特別是土地所有者)以及植被管理，以確保輸電線路的可靠運轉和廊道的同步多用途使用。通過調查回復收集的數據、最佳實踐範例的描述以及工作組成員的經驗，將對電網所有者和其他參與輸電線路走廊活動的利益相關者有所助益。

### 4.3 CIGRE 重要論文研討

本章節數篇與本系統業務較為相關之論文，期望對公司能有幫助。

#### 4.3.1 大規模電網形成(Grid Forming)型儲能系統取代同步發電,使 澳大利亞北部主要電網能夠再生能源高滲透佔比和低負載系 統(Large scale Grid-Forming BESS replaces synchronous generation, enabling high renewable penetration & low system load in Australia's major northern grid)

##### 1. 論文摘要

澳大利亞正處於能源轉型的過程中，這一轉型以向更潔、更可再生的能源來源轉變為特徵。澳大利亞北領地（NT）制定了到 2030 年實現 50%可再生能源的政策，並計劃到 2040 年進一步推動實現 100%可再生能源。作為北領地最大的受管制電網，達爾文-凱瑟琳電網（DKN）正在經歷與這一可再生能源轉型相關的潛在影響。可再生發電和電池儲能系統（BESS）的連接申請顯著增加。

逆變器資源（IBR）快速滲透到電力系統中帶來了新的挑戰。特別是，非同步發電量的增加降低了系統強度，從而影響了傳統上由同步發電機提供的頻率/電壓穩定性。這些挑戰為新的電網形成(Grid Forming)IBR 和虛擬同步機（VSM）技術的實現鋪平了道路。

達爾文-凱瑟琳 BESS（DKBESS）將是 DKN 中首個電網形成(Grid

Forming)BESS，容量為 35MVA，132kV，連接於海峽島發電站 (CIPS)。

這一連接的主要目的是替代即將退役的燃氣發電 Frame 6B 發電機，提供輔助服務 (AS)。服務包括虛功功率和電壓控制、應急和調節頻率控制輔助服務 (FCAS)、慣性和系統強度。除了峰值故障電流貢獻外，DKBESS 可以提供更優質的服務。

作為連接申請過程的一部分，開發了聚合的 RMS 和 EMT 系統模型，用於規劃和運營目的所需的穩態和動態電力系統模擬研究。BESS 的電力系統建模在電網代碼符合相關規定方面提出了許多複雜性，這些要求由 Power and Water (PWC) 的網絡和技術代碼以及發電機和負載模型指南規定。對於某些要求，需要採用新穎的方法，例如基於高壓電壓運轉的 132/11 kV 電力變壓器帶載分接開關 (OLTC)。該項目預計將於 2024 年中期開始符合相關規定和性能測試。

與世界其他地區的電網相比，北領地的受管制電網相對較小，系統負載約為 60MW 至 300MW，因此現代電網形成(Grid Forming)技術的整合影響被放大。項目所有利益相關者之間的合作和務實推理在建模、調試/合規測試以及項目的所有其他運營方面一直並將繼續至關重要。

本文將重點介紹在連接過程中觀察到的挑戰、複雜性和困難，重點關注建模和在高可再生能源滲透率電網中應用電網形成(Grid Forming)技術的現實考量。將詳細介紹如何實施和進一步開發電網形成(Grid

Forming)技術和創新控制系統，以滿足相關電網代碼並使更廣泛的系統受益。由於該項目仍在進行中，隨著項目進展到調試、測試和動態模型驗證階段，預計會有更多的學習成果。

關鍵詞 輔助服務提供、能源儲存、電網形成(Grid Forming)、可再生能源

## 2 論文背景

2.1 達爾文-凱瑟琳電網 “受管制電網”一詞是指澳大利亞能源監管機構負責提供經濟和監管監督的電力網絡——這包括除西澳大利亞以外的所有澳大利亞司法管轄區。作為北領地最大的受管制電網，達爾文-凱瑟琳電網(DKN)正在經歷與這一可再生能源轉型相關的潛在影響。特別是，逆變器資源(IBR)的增加量降低了系統強度，從而影響了傳統上由同步發電機提供的頻率/電壓穩定性。目前，DKN的典型負載曲線範圍在約60 MW至約300 MW之間。如圖4-3所示，隨著系統中安裝的分佈式光伏容量的增長，預計未來5-10年內最低需求將進一步減少至約40 MW。通過電力系統連接研究和持續的合規監測，檢查網絡內的調度和負載的持續變化。



Figure 1: Historical and forecast minimum system demand in Darwin-Katherine by season year (year ending 31 August), 2016-17 to 2031-32 [2]

圖 4-3 Historical and forecast minimum system demand in Darwin-Katherine by season year (year ending 31 August), 2016-17 to 2031-32 [2]

在上 4-3 圖中，POE 代表超過概率。需求預測是使用概率方法開發的，因為需求取決於天氣等因素。因此，根據行業慣例，PWC 的預測需求表示為 POE 分佈，而不是點預測。對於任何給定時期，平均而言：

10%的 POE，或 POE10，預計在十年內超過一年。

50%的 POE，或 POE50，預計在兩年內超過一年。

以此類推。這些挑戰和考慮為電網形成(Grid Forming)IBR 和 VSM 技術的新解決方案來改善，然而，將這些現代技術整合到電力系統中也有其自身的挑戰、複雜性和需要考慮的問題。

2.2 連接過程任何大型發電廠、BESS 或混合安排的整合都遵循澳大利亞能源市場委員會 (AEMC) 在《國家電力規則》(NER) 中定義的連接

過程。這一連接過程的要求和義務已專門為北領地的電網量身定制。適用於北領地的最新 NER (NER (NT)) 是第 114 版。在連接過程中，PWC 從頭到尾參與，為申請人提供便利、支持和建議。在這種情況下，申請人指的是連接資產的連接申請人和/或所有者。

連接過程可以簡單地分為四類：可行性研究前、詢問、申請和完成。顧名思義，這涉及為連接進行的初步可行性評估以及 NSP 和申請人之間的初步接觸，提交和回應連接詢問，提交連接申請並建立技術標準和所有支持文件（包括電力系統模型），以及市場註冊/調試連接以驗證性能。

**2.3 連接的技術要求** 在這四個階段中，申請階段因其複雜性和耗時性而非常繁瑣——這一階段，通過模型性能評估確定和評估技術性能和電網整合要求。在這一階段，申請人需要提交電力系統建模包，以概述其對 PWC 的《網絡和技術代碼》(NTC) 和《發電機和負載模型指南》的性能。NTC 的技術要求是從 NER (v114) 第 S5.2.5 節中規定的要求中得出的，適用於北領地。

**2.4 遵守網絡技術代碼** 考慮這些特定標準/要求的電力系統模型的開發，不論軟體包如何，都是一個需要大量時間和精力的過程——特別是對於新技術/最近開發的技術，。PWC 採用的用於均方根 (RMS) 和電磁(EMT)電力系統分析的指定電力系統建模軟體/工具在 NTC 中概述。

自 2021 年從以前的電力系統軟體過渡以來，所有現有和新連接從那時起仍在進行連接過程，並在新的電力系統建模平台上根據 NTC 的技術要求評估其工廠的連接—最終目標是為連接資產建立可接受的電力系統模型和雙方同意的發電機性能標準（GPS）。

### 3. 達爾文-凱瑟琳 BESS

達爾文-凱瑟琳 BESS (DKBESS) 將是首個連接到 DKN 的電網形成(Grid Forming)BESS。DKBESS 將位於 CIPS，132kV 連接到電網中的一個強節點。總體而言，連接包括 512 個 PCS100 (C 型) 轉換器模塊—每個模塊在 40 攝氏度下的總視在功率容量為 80 kVA。該項目採用的電網形成(Grid Forming)方法是 VSM 實施，更多背景資訊可以在和中找到。

3.1 項目目標和服務 DKBESS 連接的目的是提供以前由 Frame 6B 燃氣輪機發電機 (GTG) 提供的同步和輔助服務 (AS)，有效地替代即將退役的發電機。Frame 6B 提供的服務包括虛功功率和電壓控制、應急和調節頻率控制輔助服務 (FCAS)、旋轉備用、慣性和系統強度。對於所有這些服務，除了峰值故障電流貢獻外，DKBESS 可以提供更優質的服務。考慮到這一點，網絡運營商進行了檢查並確認保護裝置仍能夠正常運轉。DKBESS 在其連接點具有最大連續輸出/輸入 35MVA 的四象限運轉能力。雖然 NTC 中沒有具體的過載要求，但 DKBESS 還可以

通過 60 秒內 45.6 MW 的過載能力進一步支持網絡，並且可以提供高達兩倍連續額定故障電流貢獻—真正最大化其整合的好處。

BESS 連接一直是所有利益相關者之間的關鍵話題—有各方都熱衷於最大化大型電網形成(Grid Forming)BESS 對相對較小的 DKN 系統的好處。挑戰在於以最低成本提供輔助服務—目前由 GTG 提供，但 BESS 提供這些服務可以節省大量成本。另一個挑戰是 BESS 可以提供多種服務，因此需要優先考慮服務提供。優先順序總結如下：慣性、故障電流、電壓控制、旋轉備用、FCAS、虛功和實功功率調度。優先順序基於以前由燃氣輪機提供的服務、DKN 的網絡運營商要求和 BESS 的能力。目前，這一優先順序正在申請人和 PWC 之間的協議運轉協議中記錄。

DKBESS 配置有自動充電算法。自動充電用於根據 SOC 死區和低 MW 設置點將 BESS 的充電狀態 (SOC) 充回理想 SOC (或如果超過理想值則放電)。當連接到網絡並處於空閒狀態時，BESS 將通過小幅充電和放電獨立嘗試維持理想 SOC。這確保了 BESS 具有足夠的容量來提供其範圍內的輔助服務。如果需要或希望，還可以在網絡運營商的許可下手動以更高 MW 水平充電電池。

3.2 電力系統建模過程 DKBESS 單元在 CIPS 的現場安裝於 2023 年底完成，而各方的技術團隊正在進行建模階段。這意味著連接的建模對

於確定已安裝單元的適用性至關重要—通過模擬概述其對 PWC 的 NTC 的技術符合相關規定並識別可能發生的不利影響/風險。

作為連接申請過程的一部分，開發了聚合的 RMS（圖 4-4）和 EMT 系統模型，以進行規劃和運營目的所需的穩態和動態電力系統模擬研究。

DKBESS 的電力系統建模在電網代碼符合相關規定方面提出了許多複雜性，這些要求由 PWC 的 NTC 和發電機和負載模型指南規定。NTC 沒有考慮當前的電網形成(Grid Forming)IBR，因此需要就某些測試、驗收標準和 GPS 進行談判，重點是電力系統安全。在 RMS 和 EMT 平台中都觀察到了複雜性，以證明符合相關規定。

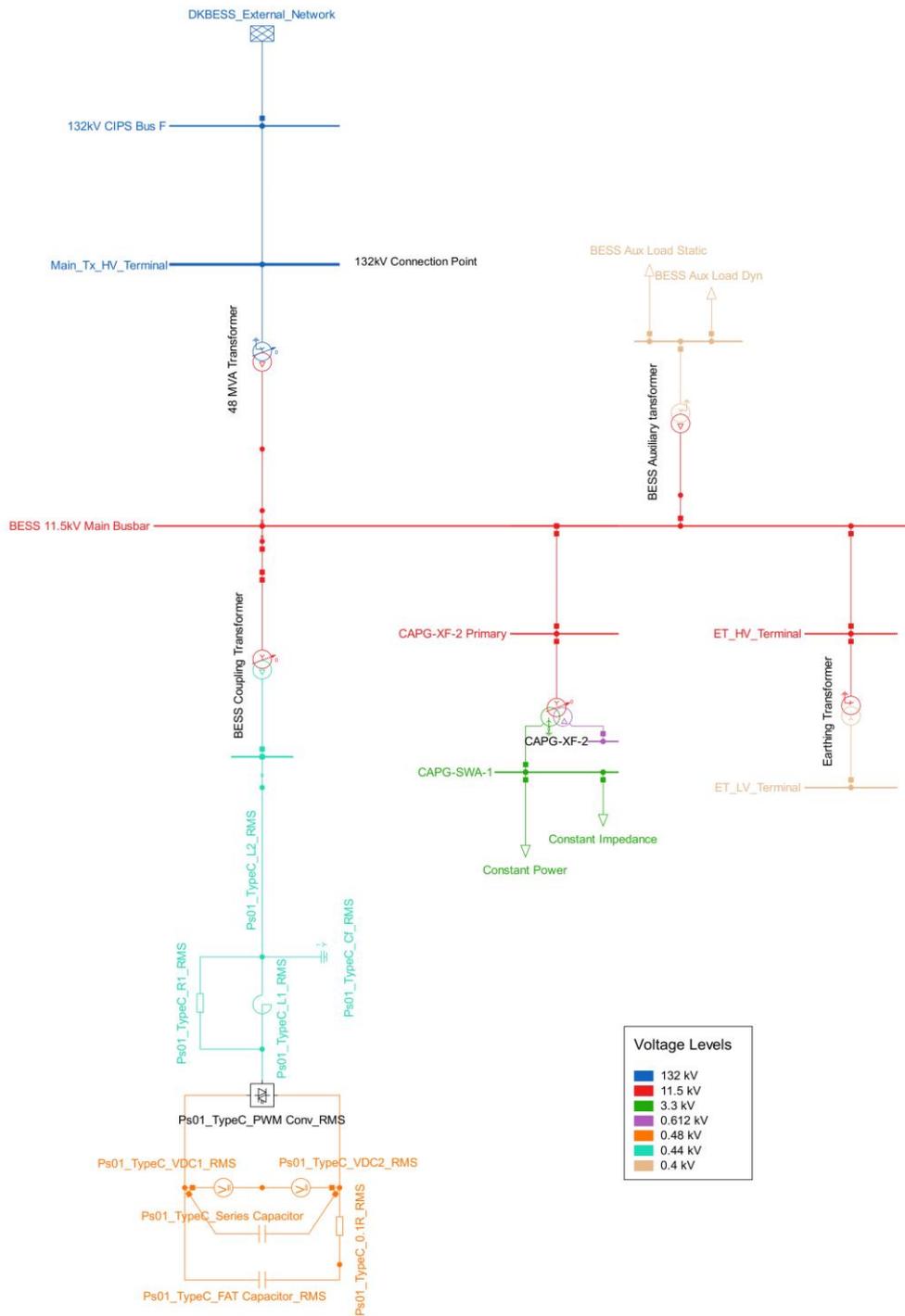


Figure 2: Aggregated RMS Model

圖 4-4 Aggregated RMS Model

作為展示符合相關規定的一部分，申請人需要證明其“……發電系統及其每個發電單元必須在任何由緊急事件引起的擾動中保持連續不

間斷運轉。” NTC 對連續不間斷運轉的定義指出，發電系統或發電單元在電力系統擾動前運轉時，連接設備不得從電力系統跳脫、加劇/延長擾動，或在另一設備上引起後續擾動—同時提供所需的實功和虛功電流以支持電力系統。這一定義適用於所有擾動，包括頻率、電壓、電能質量、負載減少等。

設備設計涉及處理許多特點，以同時滿足客戶規範中提出的要求、網絡技術代碼中規定的要求、網絡運營商的系統控制團隊額外引入的要求，主要努力保持與傳統 Frame 6B GTG 的一致性和熟悉性，並使 DKBESS 的主要目標具有與其替代的 GTG 相似的特性。

在本節中，我們討論了一些導致創新解決方案和概念的挑戰，這些解決方案和概念在 DKBESS 的 VSM 技術基礎上實施並與之協同工作。

3.1 從轉換器端子遠程控制點 DKBESS 的合同連接點 (POC) 和評估與網絡技術代碼符合相關規定並同意一組性能標準的電氣點位於 132 kV 進線端 (參見圖 2 以進一步參考)。在設備內，電壓通過 48 MVA 主變壓器降至 11.5 kV 進入中壓開關板，然後通過 3 繞組 5.2 MVA 耦合變壓器進一步降至 16 個轉換器機櫃，連接於 0.44 kV。此外，BESS 的輔助負載和部分 CIPS 的輔助負載通過各自的變壓器從 11.5 kV 開關板供電。

VSM 轉換器配置為從分佈式 PPC 控制器接收其實功功率和電壓設置點，

並在其 0.44 kV 端子處調節這些量。轉換器代表了設備整體控制系統架構中的主要控制層，而分佈式 PPC 控制器代表了次要控制層，還提供了與上游 SCADA 的接口，以便將設備集成到網絡運營商的自動發電機控制（AGC）基礎設施中。然而，低壓轉換器端子不是設備實功和虛功功率調度或電壓控制的理想位置。這是大多數 IBR 設備連接到配電網電壓水平的典型情況，其中單元變壓器和電纜將轉換器控制點與 POC 分開。一種經典方法是使用由中壓 POC 處的電壓（VT）和電流變壓器（CT）連接供電的電力計量器的反饋來控制實功和虛功功率以及該位置的電壓和功率因數。如果設備的輔助負載連接在計量器下游，這種計量器安排將允許覆蓋這些負載直到 POC。

在 DKBESS 的設備層面，個別電氣量的理想控制點位於整個設備中，如下所示：

11.5 kV 母線處的電壓下垂控制

132 kV 主進線處的實功功率調度，不包括 DKBESS 和 CIPS 輔助負載

11.5 kV 主進線處的虛功功率調度，不包括 DKBESS 和 CIPS 輔助負載

不需要功率因數控制

這種控制點的多樣性是由於希望創建與傳統 GTG 相似的特性，這些 GTG 的同步機直接耦合在 11.5 kV 處，並通過單元變壓器升至 132 kV 母線。因此，DKBESS 不需要補償從其 11.5 kV 開關板供電的輔助負

載，但這些負載仍需要在設備的控制系統中實時考慮，以遵守應用於 132 kV POC 的合同 MW 和 MVar 限制。此外，轉換器限制應用於低壓水平。

將輔助負載排除在 P/Q 調度目標之外創建了虛擬控制點，需要引入特殊的控制方法。OEM/系統集成商在 PPC 上應用了其虛擬饋線的概念，通過在設備中的關鍵位置適當地加總和減去功率流，結合通過這種準閉環方法獲得的測量值的穩定化技術，獨立控制 P/Q 流量在理想（並且實際上是任何）位置。該機制在模擬研究中證明了其穩定性、有效性和精確性。

3.2 帶載分接開關的改進以精細控制現場電壓 雖然帶載分接開關（OLTC）在可再生能源發電廠中廣泛使用，主要是為了減少轉換器上的虛功負載，但其傳統控制方法基於閉環方法，其中分接開關控制裝置從變壓器的低壓側接收電壓反饋並在初級繞組上進行分接。DKBESS 工廠中主變壓器的低壓側是 11.5 kV 開關板，即 PPC 控制電壓的同一電氣位置。CIPS 132 kV 節點的其他發電機也在其各自的 11.5 kV 端子處進行電壓控制，但其單元變壓器未配備 OLTC。兩個電壓控制源都使用閉環反饋針對同一位置可能導致控制點的不利互動、狩獵和不穩定。

OLTC 被認為是一種有效且成本效益高的機制，可以減少轉換器的虛

功功率貢獻，從而釋放容量以供 DKBESS 提供 FCAS。此外，它有助於工廠滿足 NTC 的電壓管理要求。結合 PCS100 轉換器的擴展過載能力，工廠可以在應急事件（例如 DKN 中大型發電機的損失）期間提供超過其銘牌容量的實功功率輸出。項目中部署的分接開關具有二十一個分接點，因此可以對 132 kV 母線的電壓波動進行細粒度分接。

為了實現 OLTC 與 BESS 並行運轉的穩定性，項目工程團隊開發了一種新穎的分接開關控制方法。分接開關控制器設計為測量 132 kV 母線電壓並使用查找表以開環方式操作分接，而不是使用 11.5 kV 側的電壓反饋。對於 132 kV 處的每 1% 電壓變化，分接位置按所需方向改變一個。通過在分接開關邏輯和 BESS PPC 中引入死區來補充這種方法，可以實現出色的電壓控制性能。值得注意的是，即使使用這種開環方法，132 kV 側的電壓也可能受到 11.5 kV 側的影響，這由變壓器的 8% 短路阻抗調節。涉及電壓參考步進變化和擾動的連接研究已確認該設計在所有網絡調度情況下均成功運轉，除了在最低負載網絡情況下，在 CIPS 的倒數第二個 GTG 損失後，132 kV 節點變得足夠柔軟，可能導致 OLTC 電壓失控。在這種情況下，潛在的補救措施可以通過限制允許的最大/最小分接位置或在極低負載網絡情況下完全停用分接來實現。所討論設計的成功應用將在即將到來的調試階段在現場展示。

3.3 適當孤島運轉和可靠並網運轉的 ROCOF 繼電器調整 DKBESS 能夠

在其 11.5 kV 主進線處與 DKN 網絡孤島運轉。由於該發電機的主要目的是為 DKN 網絡提供旋轉備用，它被設計為在所有可能的網絡應急事件下保持在線並提供連續不間斷運轉。然而，如果網絡經歷極端擾動且不太可能恢復，DKBESS 可以無縫孤島運轉，並通過連接到其 11.5 kV 開關板的專用饋線接管其輔助負載和 CIPS 其他發電機的供電。這將支持網絡從全黑事件中更快恢復。

在 DKBESS 中，通過在 11.5 kV 主進線處的冗餘頻率變化率（ROCOF）繼電器檢測網絡中的此類極端擾動。NTC 條款 3.3.5.3 規定了頻率擾動承受能力的自動接入標準，其中發電系統及其每個發電單元必須能夠在  $-4 \text{ Hz/s}$  至  $4 \text{ Hz/s}$  範圍內的 ROCOF 下連續不間斷運轉。因此，最初的拾取幅度設置為  $4 \text{ Hz/s}$ ，操作時間延遲為 0.25 秒。

隨後在 EMT 領域進行的建模研究顯示，這些設置可能不合適，因為繼電器可能會因 POC 處的短路故障而拾取並操作。值得注意的是，故障期間的 ROCOF 可能是由電壓波形的擾動而非系統中機械轉速的實際變化引起的，這在建模配置中尤其如此，其中電網在 POC 處表示為具有固定頻率的電壓源。圖 4-5 展示了這種情況的示例。

為了證實潛在跳閘的指示，從電力系統建模軟體獲得的 11.5 kV 母線電壓波形被導出並注入實際現場繼電器，確認存在跳閘風險。因此，操作時間延遲延長至 0.5 秒以提高穩定性，此外，繼電器邏輯得到增

強，以分辨網絡上的正 ROCOF 和負 ROCOF，分別存在過頻/欠頻，從而減少應急事件期間設備不必要跳閘的風險。

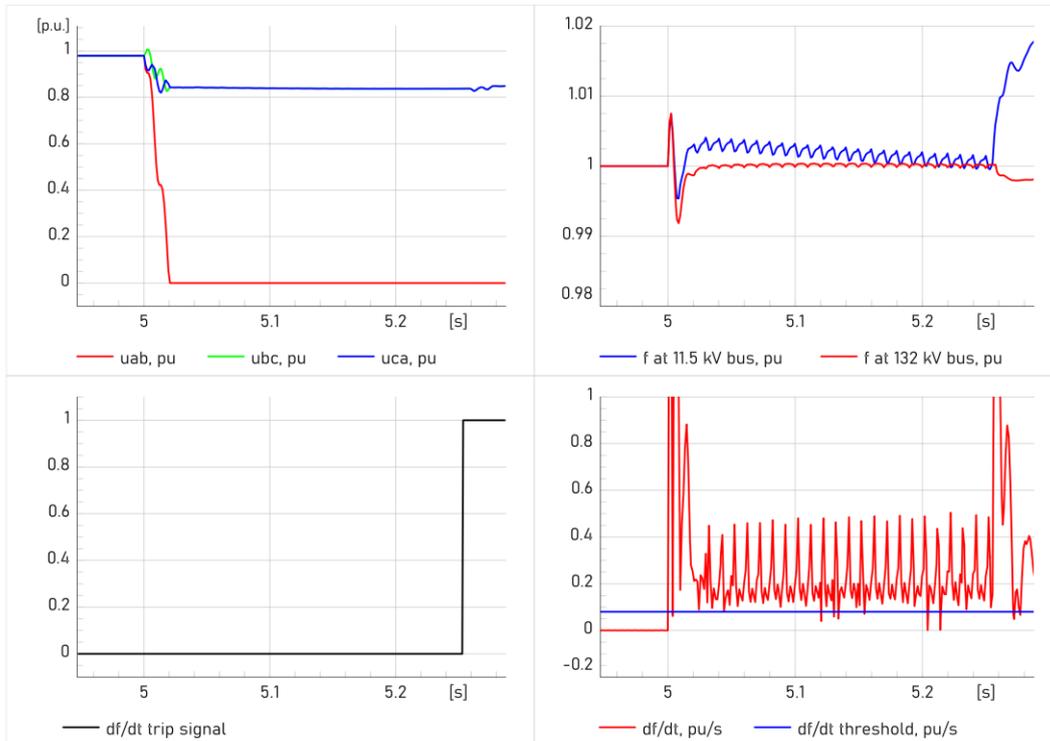


Figure 3: Spurious ROCOF relay operation during an unbalanced fault at POC

圖 4-5 Spurious ROCOF relay operation during a unbalanced fault at POC

3.4 有效替代 Frame 6B 燃氣輪機發電機 如前所述，DKBESS 在 CIPS 中替代了 Frame 6 GTG，該項目努力在傳統同步機的特性方面實現相同或更好的性能。這就是 VSM 技術的作用，它模仿傳統同步機的行為，並迅速在全球範圍內引起興趣，成為實現全面脫碳的可行替代方案。

雖然理解 IBR 與同步機相比在故障電流提供方面的限制，但值得注意的是，先前的工作表明，VSM 在某些方面的性能與同步電容器相似或更優，特別是在提高輸電網絡電壓穩定性方面。在 IBR 主導系統的保

護理念中，可靠的短路故障檢測和清除仍然是研究的重點。

在 DKN 中，DKBESS 將替代 GTG 提供旋轉備用，重點是頻率和慣性支持。在建模研究中，評估了工廠的慣性響應性能並與 GTG 進行了比較。這一比較在圖 4 和圖 5 中展示，其中禁用了 FCAS 功能，以便在兩種技術之間進行清晰的慣性比較。兩個工廠的慣性時間常數均設置為 4.4 秒。可以觀察到，相同的慣性時間常數導致發電機在頻率過低時提供相同的能量，在頻率過高時吸收相同的能量。請注意，配備 VSM 的 DKBESS 的響應已經過調整，具有足夠的阻尼，不會影響在頻率擾動發生時立即提供響應的速度。傳統同步機的阻尼受限於與阻尼繞組中的熱量生成相關的設計考慮，並且通常依賴於使用電力系統穩定器 (PSS)。然而，DKBESS 不受此限制，也不依賴於 PSS。

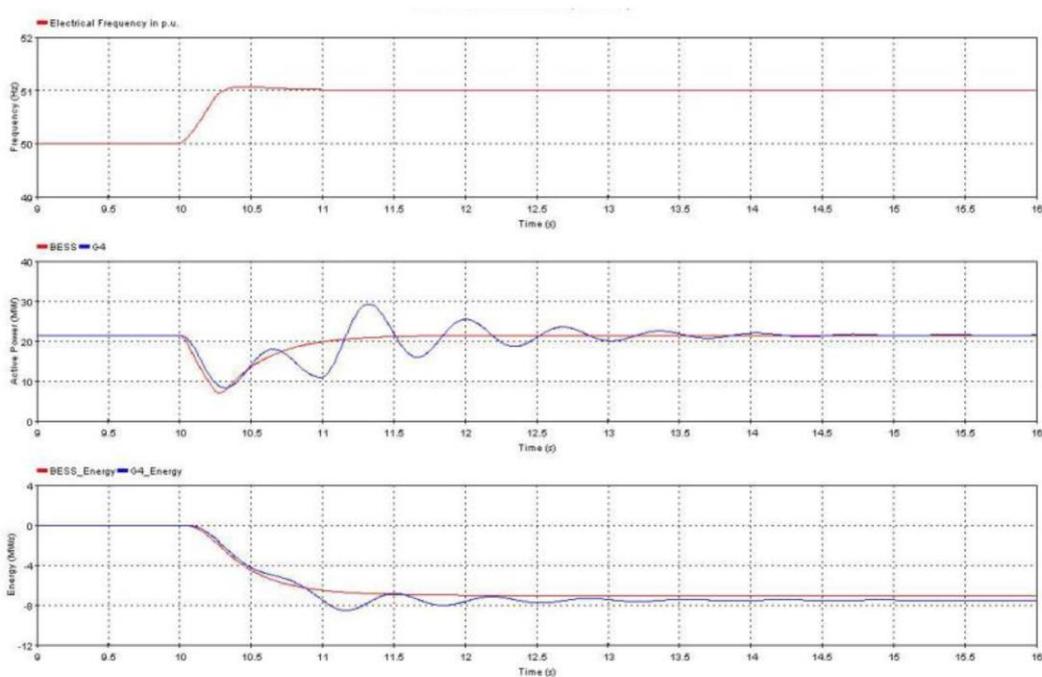


Figure 4: Inertial response comparison of BESS against Frame 6B Generator for over frequency event (51 Hz)

圖 4-6 Inertial response comparison of BESS against Frame 6B Generator for overfrequency event (51 Hz)

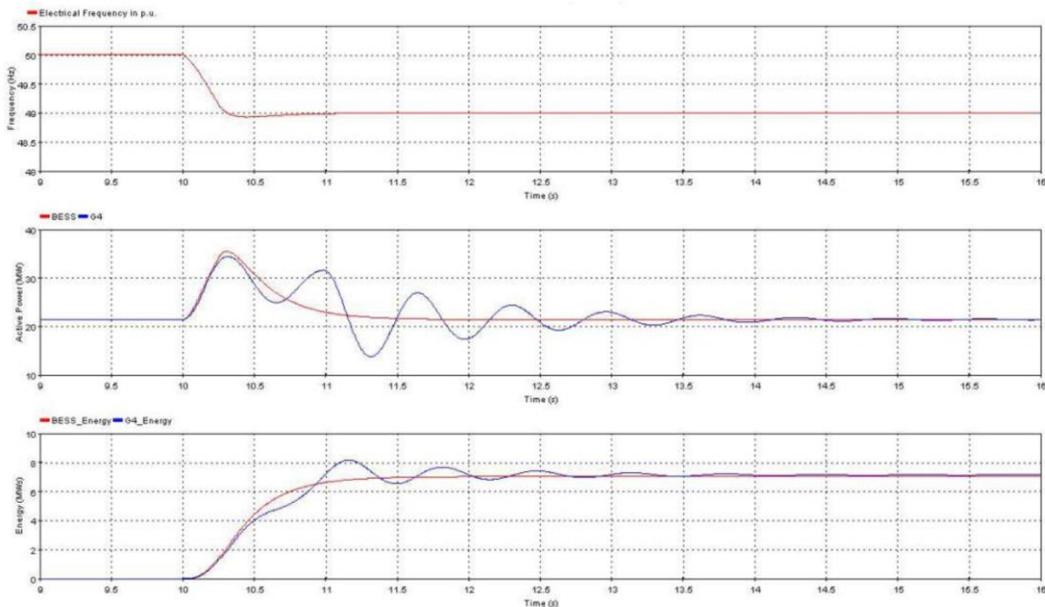


Figure 5: Inertial response comparison of BESS against Frame 6B Generator for under frequency event (49 Hz)

圖 4-7 Inertial response comparison of BESS against Frame 6B Generator for underfrequency event (49 Hz)

在通過 DKBESS 提供 FCAS 響應來調查頻率穩定性時，我們發現如果 BESS 響應配置為過快，網絡頻率可能會變得不穩定。這是由於 BESS 與 DKN 內其他 GTG 之間的相互作用，後者的頻率響應最終由調速器驅動，因燃料調節和傳播而存在固有延遲。當 BESS 對頻率擾動做出響應時，GTG 調速器已經改變了燃料閥門位置以響應頻率擾動，然而，由於燃料迴路的延遲，反應時間延長到頻率擾動已經被 BESS 緩解的時候，導致 GTG 過度補償。在某些情況下，這會導致欠阻尼的頻率振盪，恢復時間更長。為了解決這個問題，DKBESS 的頻率測量過濾時間增加，以避免系統中的這些振盪模式。通過調整參數，DKBESS 能夠保持 FCAS 要求。圖 6 展示了調整前後的頻率曲線。

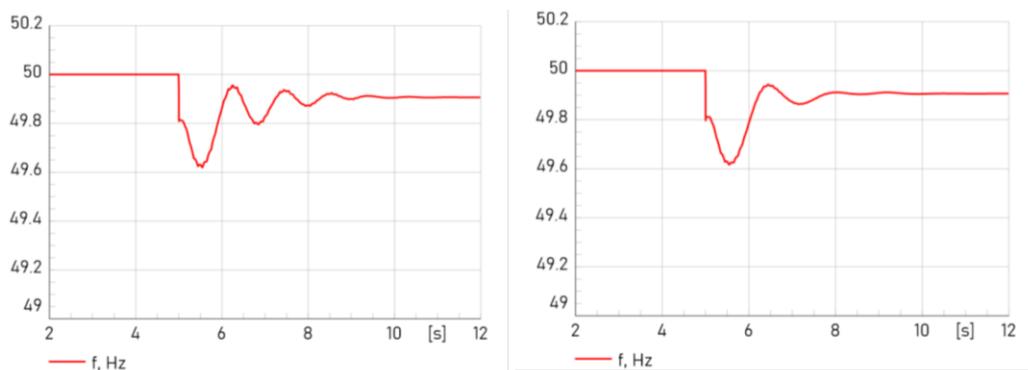


Figure 6: Oscillatory (left) and stabilised after tuning (right) frequency profile following a trip of a synchronous generator in the network

圖 4-8 Oscillatory (left) and stabilised after tuning (right) frequency profile following a trip of a synchronous generator in the network

#### 4 結論

DKBESS 是許多電網形成(Grid Forming)項目中的第一個，這些項目將通過啟用 IBR 和低系統負載來使相對較小的北領地電力系統受益——提供類似同步的服務來支持電網。作為北領地連續電網形成(Grid Forming)連接的試點，DKBESS 的整合面臨許多與建模和技術符合相關規定相關的挑戰，這些挑戰與北領地的代碼和要求有關。這些挑戰的解決僅在經過仔細考慮、務實推理和所有利益相關者的密切合作後才得以實現。

從建模的角度來看，EMT 建模和連接研究仍在進行中，並且 DKBESS 計劃於 2024 年中期開始現場符合相關規定測試，預計在實現商業運營之前需要進一步的調查和問題解決。鑑於 DKBESS 的額定容量相對於預測的最低負載是相當大的，這些結果以及來自連接前和連接後階段的考慮將對理解連接到電網的相關影響至關重要。這將在 BESS 連接

後的另一篇論文中進一步討論。

這個項目的結果將為未來的電網形成(Grid Forming)艦隊樹立先例，這對於維持電力系統安全至關重要，並為更大規模的互聯電網在過渡到更高水平的可再生能源發電時提供經驗教訓。

### 4.3.2 離岸風電場與高壓直流連接的電網形成解決方案(Grid

#### Forming Solution for Offshore Wind Park with HVDC Connection)

##### 1. 論文內容摘要

近年來，隨著可再生能源的大量增加，實現氣候目標變得至關重要。歐洲在這方面處於領先地位，數十吉瓦的離岸風能被連接到大陸交流電網。離岸風電場主要通過高壓直流（HVDC）連接，這意味著這些可再生能源是通過逆變器而不是旋轉機械（如水力發電）進入電網。這帶來了諸多挑戰，例如交流電網的慣性特性顯著減少。到目前為止，風電場連接尚未對交流電網的變化提供固有的慣性響應。為了實現這一目標，連接到交流電網的逆變器必須提供電網形成(Grid Forming) (GFM) 控制。此外，風電場本身必須能夠在需要時固有地提供更多或更少的實功率，因為 HVDC 轉換器只能使用其子模塊電容器中儲存的非常有限的能量。如果 HVDC 轉換器試圖在沒有風電場固有反應的情況下支持交流電網，其支持將非常有限，對電網幾乎沒有實際用途。然而，如果所有附近的轉換器都參與，例如對電壓相角變化的貢獻，總體支持可能具有重要意義。本文展示了一種協調的 GFM 方案的結果，該方案包括離岸風電場的固有反應。這意味著 HVDC 連接可以固有地支持來自風力渦輪機的實功率，以應對電網事件（如角度步

進)。這與現有技術相比是一個顯著的突破，現有技術中風力渦輪機僅會緩慢地（相對於電網事件的時間尺度）調整其實功率輸出，例如通過改變葉片的俯仰角。我們提出了一種控制 HVDC 連接並與電網形成(Grid Forming)風力渦輪機協調的具體控制策略。與當前使用的常規電網跟隨型相比，這些控制需要對 HVDC 和風力渦輪機的控制進行重大更改。這些控制的變化首次允許通過 HVDC 連接利用旋轉風力渦輪機的慣性特性，以在事件發生時直接支持交流電網。

關鍵詞 電網形成 (GFM) 轉換器，HVDC，離岸風電場，慣性支持，相角跳變，頻率支持，電壓支持

1. 引言 全球一致認為，使用傳統熱電廠發電不再是未來可持續的選擇。這些電廠通常燃燒煤炭或其他化石燃料，產生二氧化碳，這是氣候變化的主要驅動因素。為了實現環保的能源生產，這些傳統電廠必須逐步被替代。為此，世界各國正在尋求整合可再生能源，包括風能、水力發電、太陽能等。除了水力發電（具有非常特殊的地理要求），這些可再生能源通常通過逆變器連接到主交流電網。以歐洲雄心勃勃的目標為例，未來幾十年內將數百吉瓦的離岸風能整合到電網中，可以很容易地看出，傳統電廠使用的旋轉同步機將在很大程度上被逆變器取代。不僅發電單元受到這一範式變化的影響。事實上，負載和傳輸系統目前也在向基於電力電子的接口發展，這一點可以從全球高壓

直流傳輸連接數量顯著增加中看出。隨著逆變器在電網中的引入增加，與同步發電機固有的某些穩定特性丟失相關的挑戰也隨之而來。故障電流供應不足和總短路電平（SCL）降低，以及電能質量等，是與電力電子主導的電力系統相關的最相關問題之一。然而，最相關的方面之一是系統慣性的減少。這種慣性特性通常由傳統電廠中直接耦合到電網的旋轉質量的同步機提供。這些機器可以提供相當大的機械慣性，這也轉化為電氣慣性，或有效地對電網頻率的任何變化提供穩定行為。例如，在電網中突然出現實功功率過剩的情況下，電網會出現過頻。旋轉發電機會立即從電網吸收功率，將其轉換並儲存為動能，從而有助於穩定頻率。在慣性非常低的電網中，一個在更強系統中可以恢復的擾動可能會導致整個系統崩潰。為了解決上述問題以及由於逆變器資源（IBR）增加而導致的電網中旋轉機械替代相關的問題，提出了對 IBR 採用的標準控制方法進行修改的建議。在這些方法中，GFM 控制在過去十年中引起了特別關注。與文獻中通常指示的電網跟隨(GFL)控制方法相比，GFM 控制旨在重現阻抗後的電壓源行為。這種方法的優點之一是能夠固有地對電網事件做出響應，類似於真實的同步機的行為。雖然這種行為被認為對系統穩定性有利，但轉換器的硬件組件對 GFM 行為提出了若干限制。其中，過電流能力和能量儲存系統的可用性尤為值得注意。後者，例如，強烈影響 GFM 轉換器的慣性行為。

到目前為止，許多與可再生能源結合的 GFM 控制方法依賴於基於電池的儲能。對於通過 HVDC 連接的離岸風電場，這構成了一個特別的挑戰，因為提供所需電壓水平和充放電特性的適當電池既昂貴，又無法與風力渦輪機或 HVDC 連接的壽命相匹配。目前的離岸風電場通常通過 HVDC 連接到陸上電網，以確保高效的電力傳輸到電網。到目前為止，HVDC 轉換器中實施的控制 在陸上側是 GFL 型。簡單地說，在 GFL 模式下，轉換器將產生的風能注入交流電網，並且不會對電網中的任何相角跳變或頻率斜率固有地做出慣性反應。在進一步的步驟中，陸上 HVDC 轉換器可以應用 GFM 控制，使用 HVDC 轉換器子模塊電容器中儲存的能量對上述類型的電網事件提供慣性反應。然而，在大型交流電網的背景下，這種慣性反應只能是有限的，因為 HVDC 轉換器子模塊電容器中儲存的能量非常有限，遠小於典型的旋轉機械。這種方法在中提出。

2. 電網形成(Grid Forming)功能的需求回顧 近年來，不同的工作組致力於制定提供 GFM 功能的技術指南，以補充最新的電網規範。

CIGRE B4.87 工作組成立，旨在為 HVDC 轉換器制定一套簡明的需求，並最終確定一個測試台模擬電路，以識別 HVDC 轉換器的固有 GFM 功能。最終報告尚未發布。

NGESO GC0137 工作組的最終修改報告 GC0137 明確指出，其目的是在電網規範中添加一個非強制性的技術規範，涉及 GB（大不列顛）GFM 能力。根據提案者的說法，目標是促進短期未來的穩定性市場。然而，提出的需求主要針對同步發電固有的特性，這些特性被轉化為新的定義，描述了典型同步發電機的行為：“主動 RoCoF（頻率變化率）響應功率”、“主動相角跳變功率”、“主動阻尼功率”、“基於控制的主動功率”、“基於控制的虛功功率”、“電壓跳變虛功功率”和“快速故障電流注入”。報告定義了一組數據，應由基於逆變器的 GFM 電廠提供，包括量化上述定義以及特定數量，如慣性時間常數和承受相角跳變角度。

GB Grid Forming (GBGF) 最佳實踐指南於 2023 年 4 月發布，旨在更好地理解 GC0137 最終修改報告中定義的通用需求。該指南描述了不同的合規測試分析工具，將其分為 1) 非線性工具，如 EMT 和 RMS 分析，2) 線性工具，如網絡頻率擾動 (NFP)、阻抗分析和特徵值分析。指南中定義了合規測試程序，並提供了示例結果。

VDE FNN 指南專門針對 HVDC 系統和 DC 連接的 PPM，作為德國電網規範 VDE-AR-N 4131 的補充。該指南重點描述了驗證 GFM 行為的功能細節和方法。GFM 需求在指南中以動態頻率/實功率行為和無反應電流規範的動態電壓控制來表徵。為此，定義了一系列模擬場景來驗證

行為。基於參考行為生成的包絡曲線，具有一定的容差，用於驗證 GFM 行為。與 GC0137 不同，FNN 指南僅關注基於參考行為的非線性時域行為，而不是使用一組量化定義來描述和驗證 GFM 行為。

NREL 提出了一種使用主動和虛功率響應頻率掃描來開發 GFM 資源規範的方法。提出了一種基於網絡頻率擾動的線性分析工具，用於 GFM 合規測試。

“多供應商 HVDC 電網互操作性”項目（InterOPERA）是一項聯合倡議，旨在提高離岸和陸上轉換器的 GFM 能力，為歐洲首個 HVDC 多端、多供應商項目鋪平道路。該項目於 2023 年 1 月啟動。技術報告尚未發布。

總體而言，大多數已發布的技術指南側重於 HVDC 轉換器在互連點提供的站級慣性，而未強調遠端 HVDC 轉換器站所連接的交流電網類型的強依賴性。由於 HVDC 設計上僅提供非常有限的慣性，主要貢獻取決於連接到遠端 HVDC 站的交流電網的慣性儲備。確實提供了 DC 連接的電力公園模塊（PPM）的通用 GFM 需求，但未直接與連接 HVDC 系統的需求同步。需要對整個系統的預期行為有一個清晰的概述，突出提供 GFM 功能在互連點的依賴性和限制。在接下來的部分中，本文將描述整個系統設置，其中 GFM 響應只能通過耦合兩個交流電網通過 HVDC

轉換器的 DC 電壓來實現，從而允許 PPM 對遠端 HVDC 轉換器施加的快速相角/頻率變化做出 GFM 反應。

### 3. 連接離岸風電場的 HVDC 系統

#### 3.1 系統設置

如圖 1 所示，系統配置包括一個連接到歐洲大陸電網的陸上站和一個連接到風電場的離岸站。標稱電壓和功率見表 1。兩個 HVDC 轉換站以及風力渦輪機都在 GFM 模式下運轉。在陸上轉換站的 DC 鏈端子連接了一個 DC 斬波器，以在交流故障穿越 (FRT) 場景中消耗來自離岸風電場的多餘功率。這是現代離岸 HVDC 系統中的必要條件，因為風電場的實功率控制時間常數相當高，能量無法在 HVDC 站內緩衝。

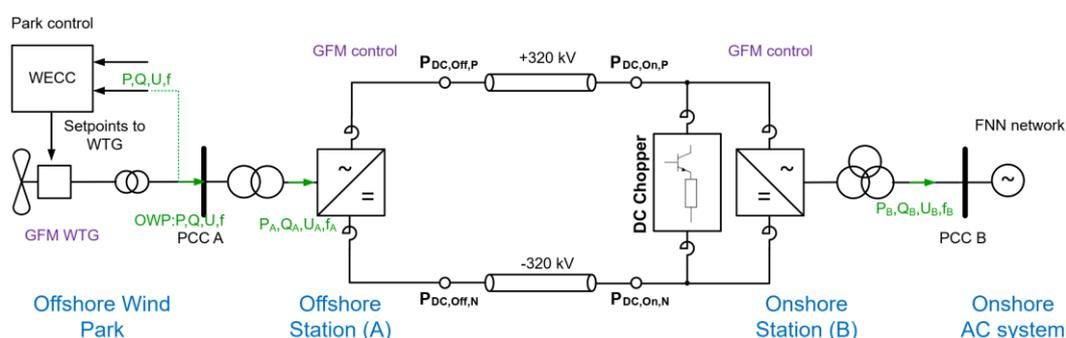


Figure 1: Overview of the system setup

圖 4-9 Overview of the system setup

表 4-1 Main system parameters

Figure 1: Overview of the system setup

Parameters	Value	Unit
Nominal active/reactive power	900/370	[MW/MVar]
AC voltage onshore/offshore	400/66	[kV]
DC voltage	± 320	[kV]

Table 1: Main system parameters

#### 3.2 HVDC 轉換器電網形成(Grid Forming)控制

GFM 控制的目的是促進電力電子主導的交流電網的運轉，並避免該電網內部件之間的任何不希望의相互作用。為此，GFM 轉換器必須模擬阻抗後的正序電壓源行為，結合常規發電機的慣性響應。然而，HVDC 的動態響應必須由其電流能力限制和可用的能量儲備支持。電力電子設備的過電流能力非常有限，這也需要直接考慮在轉換器設計中。通常，穩態裕度僅約為其標稱額定值的 10%。雖然考慮到半導體和冷卻系統的熱容量，短期過載能力可能在幾個交流週期內，但更大的挑戰是可用的能量。快速瞬態響應必須由本地儲存的能量來覆蓋，通常僅在 10 到 15 毫秒的範圍內。因此，傳統發電機先前實現的短路電流能力（例如高達 5 pu）是不可行的，必須有效限制 HVDC 的 GFM 響應在電流幅度和瞬時實功率方面。

為了實現有效的電流限制，本文提出的 GFM 控制包括一個快速內部電流控制迴路和幾個級聯控制迴路，圍繞該電流控制器，以促進第一階段的理想電壓源行為，並在第二階段修改已知的擺動方程實現內部頻率參考，允許模擬慣性以及虛功率支持的電壓幅度控制（見圖 2）。

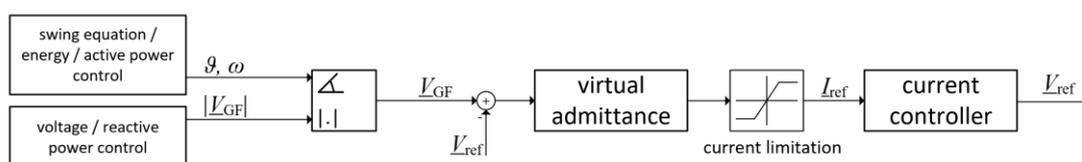


Figure 2: Basic GFM control concept

圖 4-10 Basic GFM control concept

快速底層電流控制器的電流參考是通過將轉換器輸出電壓與內部電壓源之間的電壓差應用於虛擬導納來生成的。這個虛擬導納的設計對 GFM 性能以及轉換器硬件的保護至關重要。本文中，我們定義了一個內部機器 SCR，作為從 PCC 看到的內部電壓源的短路電平除以標稱 HVDC 額定值。作為這兩個需求之間的妥協，內部機器 SCR 為 2 已被證明是合理的。這個 SCR 考慮了虛擬導納、電流控制器的控制阻抗和電氣阻抗、臂電感和變壓器。有效的 X 對 R 比可以自由選擇。這裡的妥協在於在 PCC 電壓快速變化期間對交流電流的瞬態 DC 電流偏移的阻尼和實功率控制之間的良好解耦。X 對 R 比約為 10 已被證明是合理的。請注意，內部設計阻抗（SCR 為 2，X 對 R 比為 10）僅在標稱頻率下實現。對於快速瞬態，短路電流阻抗由於快速電流控制器的電流限制效應而有所不同。

請注意，一旦輸入到底層快速電流控制器的電流被限制，轉換器的 GFM 行為就不再占主導地位，因為此時轉換器的行為由有限的電流參考值決定。關於電流限制期間的等效電路，轉換器的行為就像內部電壓源被斷開一樣（比較圖 4-10 和圖 4-11）。

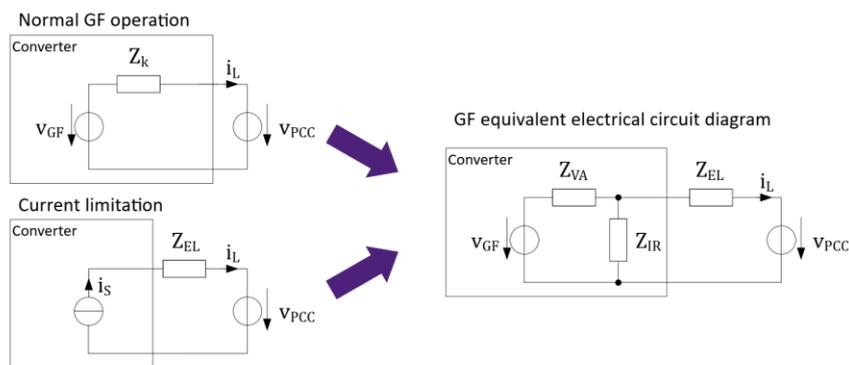


Figure 3: Electrical equivalent circuit diagram for GFM control  
 The terminal behavior differs between normal GF operation at nominal frequency, where the behavior is equal to a voltage source behind an impedance, and the current limited operation for fast transients and high currents, where the current controller is dominant. The frequency domain behavior (right circuit diagram) contains both features simultaneously.

圖 4-11 Electrical equivalent circuit diagram for GFM control

內部電壓的角度是通過已知的擺動方程實現的。內部電壓源的頻率是 HVDC 功率設置點與電網實功功率需求之間的實功功率平衡的結果，分別是 HVDC 本身的能量平衡。這個概念的優點在於，不需要任何 PLL 參與。PCC 電壓的頻率和角度不是內部控制的輸入（除了在電流限制期間允許將電流設置點分離為實功和虛功電流分量）。內部電壓源的慣性特性由擺動方程的參數化定義。設置這種慣性存在一定的自由度。然而，最大慣性響應受限於轉換器中本地可用的能量，而最小慣性響應由電流控制器的動態特性定義。靜態虛功功率設置點通過慢速虛功功率控制器定義內部電壓源的幅度。

在為離岸風電場提供交流電網接入的當前應用中，HVDC 的靜態實功功率設置點由風電場的實功功率輸出定義。鏈路的兩個 HVDC 站都運轉在完全相同的控制下。從結構控制的角度來看，整流器和逆變器之間沒有區別。然而，在參數化方面可能存在差異。為了展示所提出的

GFM 控制的能力，並且由於離岸側轉換器需要跟隨風電場的實功功率輸出，其有效慣性設置為低於陸上側轉換器的值，後者需要為交流電網提供盡可能多的慣性支持。通過這種配置和風力渦輪機在 GFM 控制下運轉，交流電網的慣性支持可以擴展到包括風電場的慣性能力。

3.3 風力渦輪機的電網形成(Grid Forming)能力 本文中使用的 GFM 風力渦輪機模型代表了一種直接驅動、全轉換器（即 4 型）風力渦輪機，其中風力渦輪機轉換器控制器配備了 GFM 控制並編譯成動態庫。風力渦輪機模型基於 8 MW 的硬件，包含所有相關的電氣元件、控制、保護和必要的機械系統部分，用於電氣模擬。所使用的 GFM 控制使風力渦輪機在其硬件的電流和能量限制內運轉時，具有阻抗後的電壓源特性和慣性特性。

該模型代表了一個未考慮 GFM 運轉的風力渦輪機硬件，即沒有專門的能量儲存（例如慣性響應）和轉換器設計中沒有額外的電流裕度。實際影響是，根據事件的嚴重程度或事件前的運轉點，工廠硬件可能無法支持轉換器向電網呈現的 GFM 特性。這一點在中進行了討論。風力渦輪機通常以最大功率點跟踪運轉，調整轉速以優化捕獲的能量。如果提取額外的實功功率並減速轉子，這將反過來減少風力渦輪機從風中提取的功率，直到它恢復轉速。文獻中通常稱這段時間為“恢復期”。實際上，這意味著陸上 HVDC 站必須能夠應對內部硬件限制以

及離岸發電機的限制，以防它們無法提供所需的實功率。具有類似架構的風力渦輪機的現場測試已在中報告，而雙饋感應發電機風力渦輪機的現場測試已在中報告。

4. 性能和討論 本節展示了使用如圖 4-9 所示的測試系統的整體 GFM 控制策略的行為。主要電路參數列於表 4-1 中，代表了具有對稱單極配置的最先進的離岸系統額定值。請注意，HVDC 系統的主要參數假設系統設計遵循最先進的電網跟隨控制，這意味著在 HVDC 轉換器設計中沒有考慮提供 GFM 能力的額外裕度。離岸風電場在離岸開關場、母線、電纜方面進行了簡化，整個電場表示為一個聚合模型，其中一個具有第 3.3 節中概述的控制的風力渦輪機模型通過適當數量的風力渦輪機進行縮放，以達到風力發電廠的額定值。在 GFM 風力渦輪機模型之上，使用了一個通用的西部電力協調委員會 (WECC) 風力發電廠控制模型 (PLNTBU1) 來表示電場級控制，該模型向風力渦輪機提供功率和電壓設置點。陸上系統按照 VDE FNN 指南進行建模，表示為具有可編程角度、頻率和短路阻抗的 Thevenin 源。

HVDC 系統模型使用製造商的 VSC HVDC 標準軟體集成到離線 EMT 模擬環境中。GFM HVDC 控制參數化僅用於演示整體控制概念，並未優化以滿足任何電網規範要求或測試此類離岸 HVDC 鏈接的邊界。在具有電網跟隨控制的常規離岸 HVDC 鏈接中，DC 斬波器是必需的，以便在陸

上交流系統故障期間實現故障穿越。通常，DC 斬波器的激活水平比額定 DC 電壓高出幾個百分點（例如 3%~4%），以有效限制陸上交流系統故障期間的 DC 側過電壓。在本文中，使用了更高的激活水平（例如 6%）作為示例，一方面允許 HVDC GFM 控制的動態範圍，另一方面調查在完整的 GFM 方案中是否可以減少 DC 斬波器的尺寸，與常規電網跟隨控制相比。在實際項目中，整體控制和保護需要協調和優化，以確保安全運轉並實現所需的動態性能。對於 HVDC 量，結果取自陸上和離岸站的主要和次要測量。離岸和陸上量分別標記為 "A" 和 "B"（如圖 1 所示）。實功和虛功功率以表 4-1 中列出的額定實功和虛功功率為單位。

4.1 固有相角支持 考慮到 GFM HVDC 轉換器表現為阻抗後的電壓源，電網電壓的突然相角步進將導致 HVDC 轉換器與陸上交流電網之間的功率突然變化。由於交流系統與陸上轉換器之間的阻抗可以被認為是高度電電桿性的（例如具有高 X/R 比），陸上轉換器與交流電網之間的功率可以表示為：

$$P = \frac{U_c U_g}{X} \sin(\delta) \quad (1)$$

其中，(  $U_c$  ) 和 (  $U_g$  ) 分別是轉換器內部電壓和電網電壓。(  $X$  ) 是兩個“電壓源”之間的電抗， $\delta$  是兩個“電壓源”之間的相角差。圖 4 顯示了應用相角步進時 HVDC 系統的行為示例。如圖 4-12a

所示，當應用負相角步進時，陸上 HVDC 與交流系統之間的功率交換突然增加，這導致陸上轉換器的交流和 DC 側功率不平衡。通過陸上轉換器 DC 側控制，這種不平衡迅速傳播到離岸 DC 側。然後，陸上相角變化通過其交流側控制在一定程度上被離岸轉換器複製，離岸風力渦輪機將看到離岸的“角度變化”，並通過其自身的 GFM 控制對事件做出貢獻。這種機制是通過在陸上和離岸 HVDC 站上使用 GFM 控制實現的，無需直接通信。

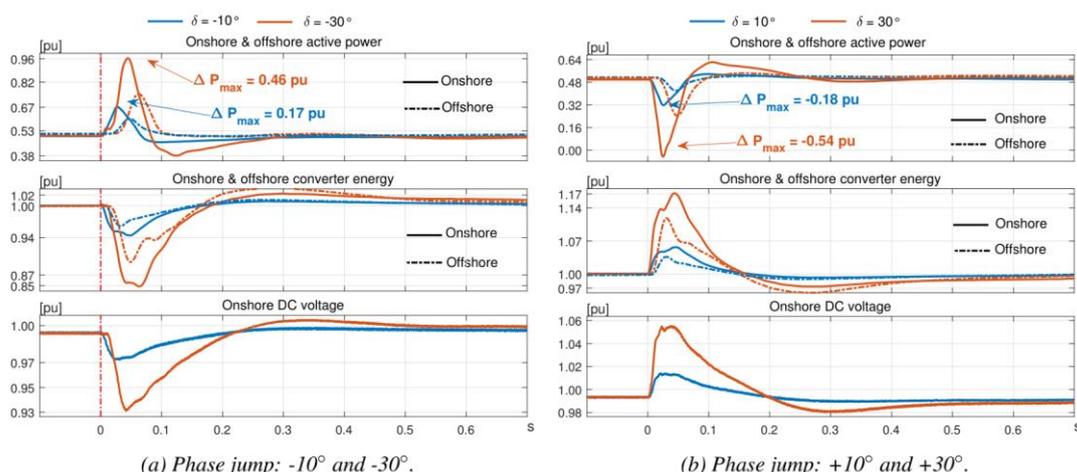


Figure 4: Influence of onshore voltage phase jump. Active power setpoint,  $P = 0.5 \text{ pu}$ .

圖 4-12 Influence of onshore voltage phase jump. Active power setpoint,  $P = 0.5 \text{ pu}$

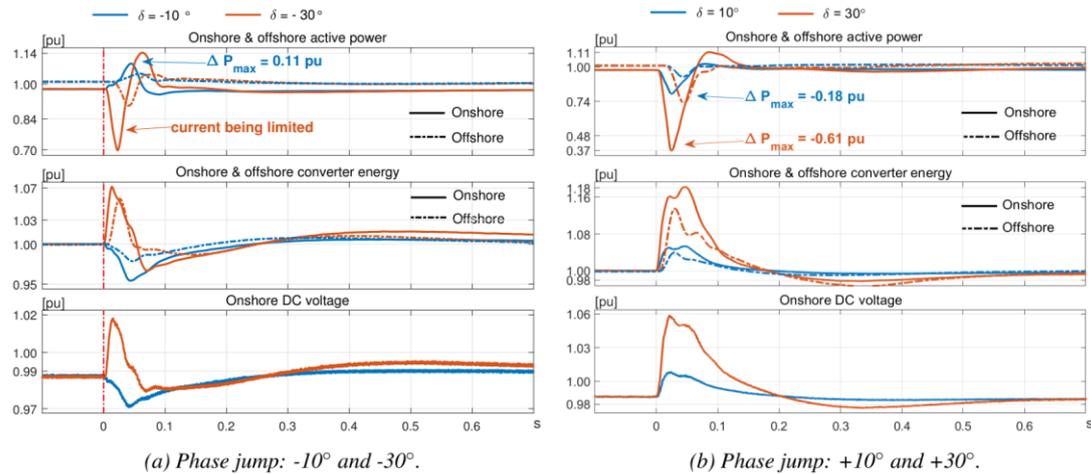


Figure 5: Influence of onshore voltage phase jump. Active power setpoint,  $P = 1.0$  pu.

圖 4-13 Influence of onshore voltage phase jump. Active power setpoint,  $P = 1.0$  pu.

如圖 4-12a 所示， $30^\circ$  相角步進導致的功率峰值遠高於  $10^\circ$ ，例如，對於  $-30^\circ$  和  $-10^\circ$  的相角步進， $\Delta P_{\max}$  分別為  $0.46$  pu 和  $0.17$  pu。整體系統響應對正負相角步進幾乎是對稱的，正相角步進期間功率峰值略高。主要原因是正相角步進期間 DC 斬波器被激活。值得強調的是，GFM 行為高度依賴於運轉點。接近額定設置點運轉將導致任何 GFM 控制行為的裕度非常小。轉換器的硬件必須通過根據電力電子轉換器的能力應用電流限制來保護。圖 4-13 顯示了當 HVDC 鏈接在事件前已經在額定功率下運轉時的相角步進響應示例。對於正相角步進，由於功率會減少，系統響應與較低功率設置點的情況類似。然而，對於負相角步進，初始響應受到電流限制動態的影響，特別是在大相角步進期間（例如圖 4-13a 所示的  $-30^\circ$ ）。

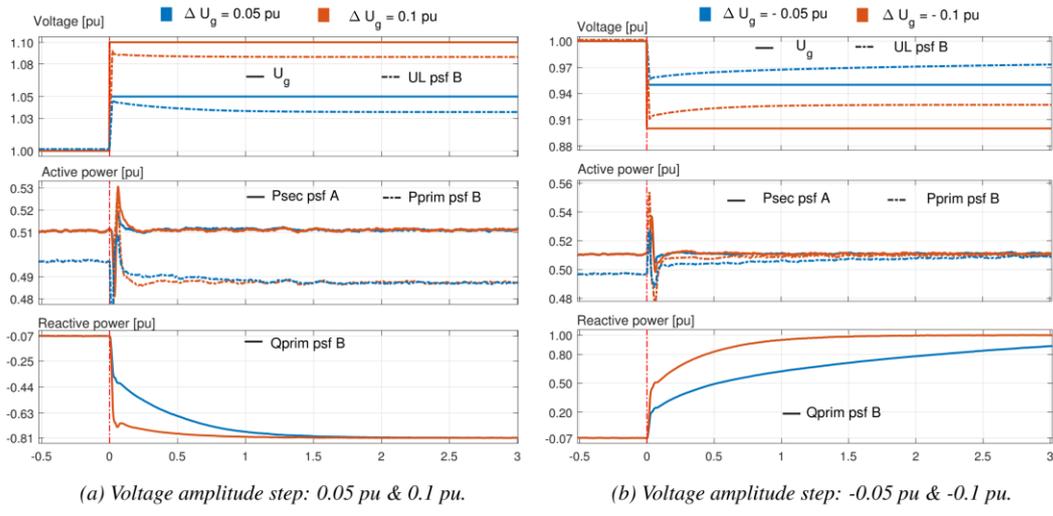


Figure 6: Instantaneous voltage support (Active/reactive power @rated active/reactive power base) line color: indicates different voltage drop cases and line style: indicates different signals.

圖 4-14 Instantaneous voltage support (Active/reactive power @rated active/reactive power base) line color:indicates different voltage drop cases and line style: indicates different signals.

4.2 固有電壓幅度步進支持 通過陸上 HVDC GFM 控制，陸上轉換器能夠為陸上交流系統提供固有的電壓支持。圖 4-14 給出了對電壓幅度步進的響應示例。電壓幅度步進直接應用於陸上交流源（如圖 6 所示的(  $U_g$  )），遵循 VDE FNN 指南。

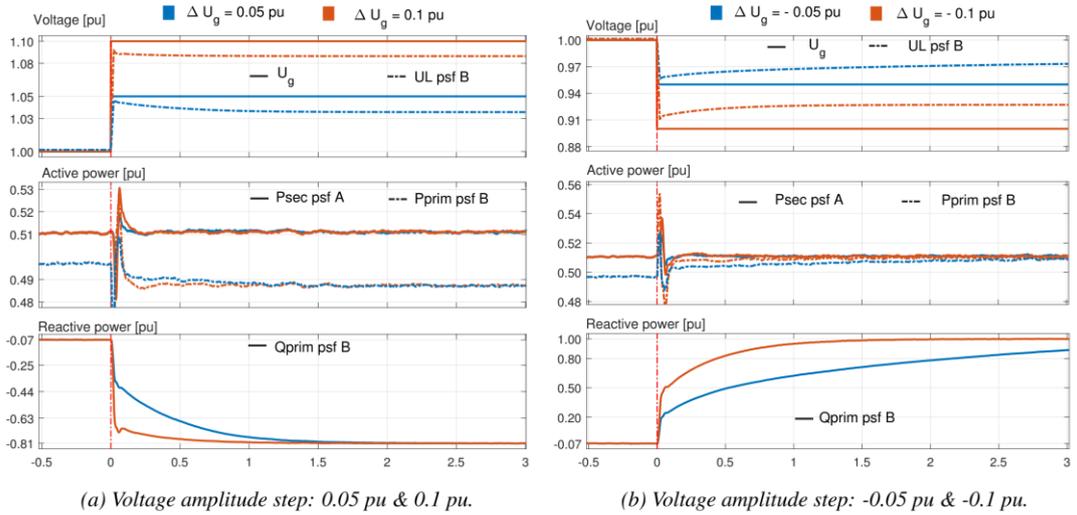


Figure 6: Instantaneous voltage support (Active/reactive power @rated active/reactive power base) line color: indicates different voltage drop cases and line style: indicates different signals.

圖 4-15 Robustness against sudden grid strength changes: SCL change

from 20 GVA to (1) 5 GVA, (2) 2 GVA, (3) 1 GVA and (4) 0.5 GVA. 當交流網絡電壓突然下降時，陸上轉換器會立即提供電容性虛功功率，試圖提高公共耦合點（PCC）電壓。相反，當交流網絡電壓突然上升時，陸上轉換器會立即提供電桿性虛功功率，試圖抑制過電壓。換句話說，GFM 轉換器控制在其電流和能量限制內，將固有地抵消任何電壓幅度的突然變化，類似於電壓源行為。電網電壓的變化會根據 GFM 轉換器與電網之間的阻抗引起虛功功率流的變化。這個阻抗是物理阻抗和虛擬阻抗（在控制結構中設計）的總和。此外，上層控制的作用能夠改變電壓/虛功功率的運轉點，從而在轉換器限制內實現所需的虛功功率流。這兩個貢獻在圖 4-15 中可以清楚地看到，固有反應的幅度（與電壓步進的幅度成正比）可以清楚地區分出來，與上層控制的作用相對應。值得強調的是，上層控制對電壓/虛功功率的動態響應的定義也會影響轉換器的低頻阻尼能力，必須謹慎設計。

在應用電壓幅度步進的瞬間，陸上和離岸轉換器的實功率會出現非常短暫的瞬態尖峰，然後迅速恢復到事件前的運轉點。

4.3 固有慣性支持 圖 4-16 和圖 4-17 顯示了系統對陸上電網 Thevenin 源應用的頻率斜坡的響應。在這次模擬中，為了展示整體系統的純慣性行為，關閉了離岸風電場的功率/頻率下垂控制。

在圖 7 中，當 HVDC 鏈接以其額定實功功率的一半 ( $P = 0.5 \text{ pu}$ ) 運轉時，應用了頻率斜坡，分別顯示了正和負的 RoCoF (頻率變化率)，如圖 4-16a 和 7b 所示。

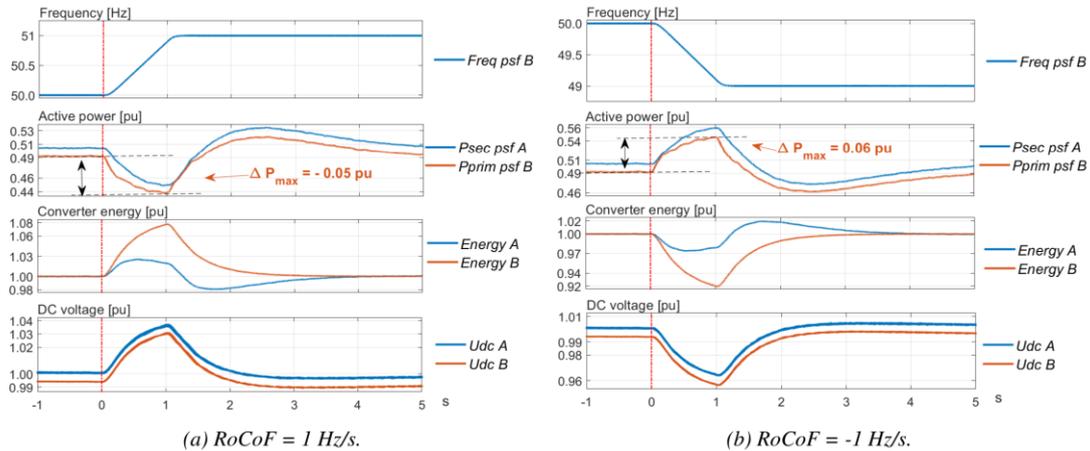


Figure 7: Response to a frequency ramp. Active power setpoint,  $P = 0.5 \text{ pu}$ .

圖 4-16 Response to a frequency ramp. Active power setpoint,  $P = 0.5 \text{ pu}$ .

在這種情況下，由於其慣性響應，GFM 轉換器不會跟隨陸上電網 Thevenin 源強加的斜坡，因此電網電壓和轉換器電壓之間的角度會發生變化，這導致實功功率流和轉換器能量的變化。通過 HVDC 鏈接的 DC 側耦合和離岸轉換器與離岸風力渦輪機的 AC 側耦合，功率流變化的資訊傳遞到鏈接的另一側 (離岸)，這允許 GFM 風力渦輪機做出相應的響應。對於正 RoCoF，轉換器會減少其運轉點以減少不平衡。對於負 RoCoF，轉換器運轉點會增加以向電網提供實功功率，從而減少不平衡。

圖 4-17 顯示了當 HVDC 鏈接以其額定功率運轉時，對正和負 RoCoF 的頻率斜坡響應，如圖 4-17a 和 4-17b 所示。在這裡，轉換器的慣性響

應也可以看到，對於正 RoCoF (圖 4-17a)，轉換器需要減少其實功功率運轉點，因為它在其能力限制內運轉。對於負 RoCoF (圖 4-17b)，轉換器需要增加其運轉點，但由於其限制，這是不可能的。可以看到，在斜坡期間功率保持在限制內，並且在斜坡結束時運轉點恢復。

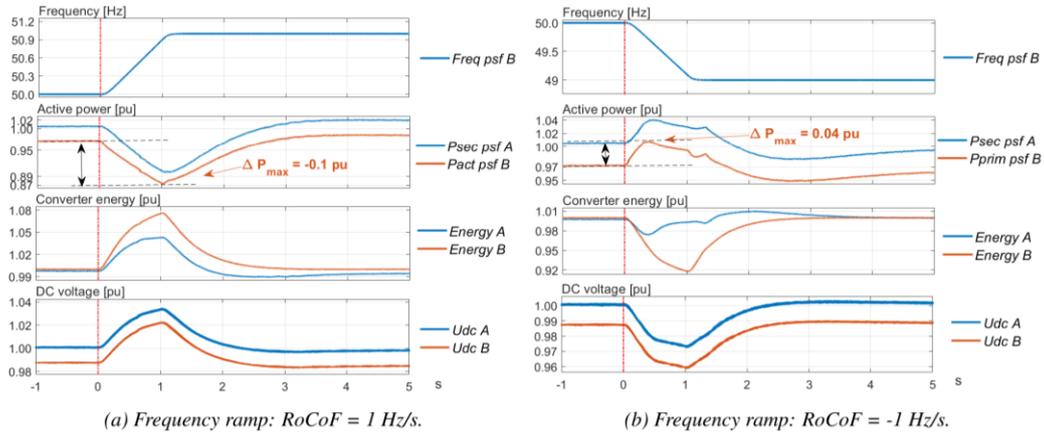


Figure 8: Response to a frequency ramp. Active power setpoint,  $P = 1.0$  pu.

圖 4-17 Response to a frequency ramp. Active power setpoint,  $P = 1.0$  pu.

4.4 對突然電網強度變化的 Robustness 傳統電網跟隨轉換器的一個缺點是其對突然電網強度變化的脆弱性，因為電網跟隨轉換器通常使用 PLL (鎖相環) 與電流控制，這可能在弱交流系統中運轉時導致不穩定。相比之下，GFM 轉換器對突然的電網強度變化更具 Robustness，並且可以在弱交流系統中穩定運轉，這通常發生在系統分裂期間。這種能力如圖 4-18 所示。陸上交流網絡的短路強度從 20 GVA 減少到 5 GVA、2 GVA、1 GVA，最終減少到 0.5 GVA。

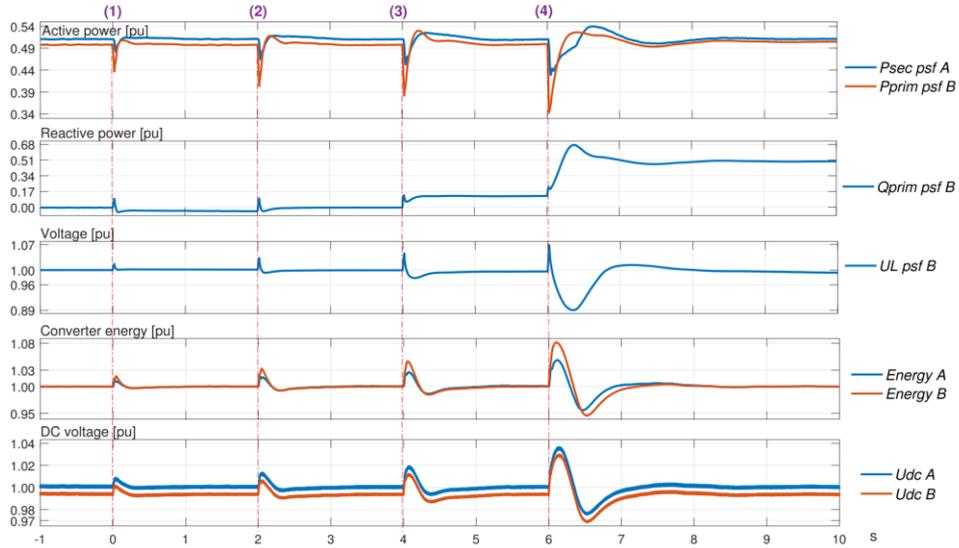


Figure 9: Robustness against sudden grid strength changes: SCL change from 20 GVA to (1) 5 GVA, (2) 2 GVA, (3) 1 GVA and (4) 0.5 GVA.

圖 4-18 Robustness against sudden grid strength changes: SCL change from 20 GVA to (1) 5 GVA, (2) 2 GVA, (3) 1 GVA and (4) 0.5 GVA.

在系統阻抗步進期間，GFM 陸上轉換器與陸上交流系統之間的總阻抗增加。如功率角方程 (1) 所示，陸上轉換器與交流系統之間交換的實功功率將通過固有的 GFM 響應瞬間減少。之後，實功功率通過相關的上層控制器調整回事件前的設置點。陸上轉換器與交流電網之間交換的虛功功率也會隨著突然的阻抗變化而瞬間改變（如方程 (2) 所示）。陸上電壓由固有的 GFM 響應以及疊加的電壓控制模式支持，這將確保相關的虛功功率流。

$$Q = \frac{U_c^2}{X} - \frac{U_c U_g}{X} \cos(\delta) \quad (2)$$

#### 4.5 快速故障電流注入

圖 4-19 顯示了在固體三相接地和單相接地故障期間的示例性能。故障應用於陸上交流系統的公共耦合點 (PCC)。正序和負序 dq 電流以轉換器次級側峰值電流為單位。

在三相接地故障期間，HVDC GFM 控制固有地提供非常快速的虛功電流注入，以支持電壓下陷。本文中，正序和負序計算類似於 IEC 61400 - 21 附錄 C，這對應於一個週期的移動平均。因此，原則上很難評估電壓源行為的瞬時效果。然而，圖 4-19 顯示了電壓源行為的快速響應 - 正序虛功電流（第三個圖中的  $I_{q\ psf\ B}$ ）在故障發生後 30 毫秒內達到 0.9 pu。

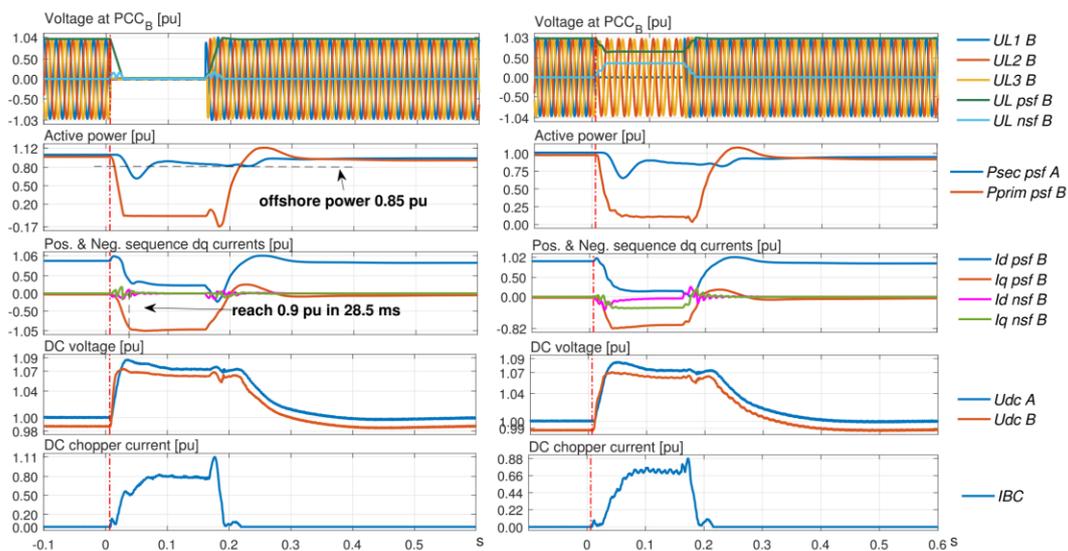


Figure 10: Example performance during a solid left: three phase and right: single phase fault (AC currents are per unitized at converter secondary side peak current base).

圖 4-19 Example performance during a solid left: three phase and right: single phase fault (AC currents are per unitized at converter secondary side peak current base).

此外，提出的 GFM 控制算法(圖 4-10) 允許有效限制轉換器電流，優先支持電壓在交流故障期間的虛功分量。在這個示例中，離岸風力渦

輪機的實功率也在固體三相接地故障期間減少到約 0.85 pu，這與傳統的電網跟隨控制方案不同，後者通常認為離岸功率幾乎是恆定的。因此，制動斬波器需要消耗的總能量也減少了。這個示例表明，在完整的 GFM 離岸方案中，有可能減少斬波器的尺寸。圖 10 展示了 GFM 控制方案在單相接地故障期間的行為。在這裡，結構的限制能力也得到了證明。此外，可以看到，根據設計系統的能力，也注入了一定量的負序電流，以使相位對稱。

5. 結論 本文提出了一種連接離岸風電場的 HVDC 鏈接的新型控制方案，其中 HVDC 轉換器和風力渦輪機都在 GFM 控制模式下運轉。該控制方案在一個具有對稱單極配置的 900 MW HVDC 鏈接上實施，並假設 HVDC 轉換器和風力渦輪機的硬件能力為最先進的系統設計，沒有考慮提供 GFM 能力，例如沒有專門的能量儲存以應對慣性響應，也沒有在轉換器設計中增加額外的電流裕度。使用初步控制調整進行了首次調查，旨在展示在離岸 HVDC 鏈接中應用 GFM 控制的可行性，以利用離岸風力渦輪機的慣性。初步模擬結果表明，該新型控制方案可以在各種電網條件變化期間為陸上系統提供即時支持。特別是，證明了所提出的 GFM 控制方案能夠通過其固有和協調控制將 GFM 風力渦輪機的慣性功率“轉移”到陸上交流電網。通過這種新型控制方案，可以利用 GFM 控制的優勢，例如提供即時電壓支持和快速故障電流注入，

並在遭受突然的電網強度變化時增強系統的 Robustness。GFM 轉換器被認為是在實現淨零目標中不可或缺的。然而，這在離岸風電傳輸和發電領域仍然是一項相對新穎的技術。本文首次表明，在離岸 HVDC 系統中使用 GFM 控制是可行的，以更好地支持陸上交流系統。然而，下一步需要進一步研究如何優化這樣的離岸 HVDC 系統，以充分利用 GFM 風力渦輪機的潛力，並展示這種控制方案的 Robustness，特別是考慮到各種運轉條件。

### 4.3.3 在加州 500 千伏補償輸電系統中應用大型靜止型虛功補償設備(STATCOMs)提供動態虛功功率支援(Application of Large STATCOMs for Dynamic Reactive Power Support in California 500kV Series Compensated Transmission System)

#### 摘要

加州獨立系統操作者公司 (CAISO) 在 2018-2019 年輸電規劃中指出, 在計劃退役 Diablo Canyon 發電廠後, 需要動態虛功功率來進行穩態虛功功率控制, 並緩解 PG&E 500 千伏主幹系統多個變電站的高電壓問題。在 PG&E 系統的北部也需要動態虛功功率支援, 以避免因 PG&E 北部發生三相故障而導致俄勒岡州南部出現低電壓負載跳脫。額外的動態虛功功率支援還有望有助於避免 Gates 區域的太陽能光伏發電機逆變器瞬時停機, 並在輕負載條件下將系統電壓限制在 550 千伏以下。因此, 兩組大型靜止型虛功功率補償器 (STATCOMs), 即  $2 \times \pm 424 \text{Mvar}$  和  $2 \times \pm 264.5 \text{Mvar}$ , 正在安裝於 Orchard 500 千伏變電站(毗鄰 Gates 變電站)和 Fern Rd 500 千伏變電站(Round Mountain 以南約 11 英里處), 以在正常系統條件下和緊急情況下提供所需的連續動態虛功功率支援。

這些新的 STATCOM 裝置是極少數直接連接在具有串聯補償的超高壓 (EHV) 系統中的非常高輸出額定值的應用，這些系統固有地具有次同步振盪 (SSO) 頻率的潛力。本文介紹了與這些大型 STATCOM 裝置和串聯補償網絡相關的技術要求和關鍵工程設計，例如兩個 STATCOM 裝置的控制協調以及動態性能。

## 1. 簡介

加州獨立系統操作者公司 (CAISO) 已在 2018-2019 年輸電規劃中指出，需要動態虛功功率來緩解 PG&E 500 千伏主幹系統北部和南部的 Orchard 和 Fern Road 變電站的高電壓問題，並提供電壓支援。在計劃退役 Diablo Canyon 發電廠後，需要此電壓支援。在 PG&E 系統的北部也需要動態虛功功率支援，以避免因 PG&E 北部發生三相故障而導致俄勒岡州南部出現低電壓負載跳脫。額外的動態虛功功率支援還需要防止 Gates 區域的太陽能光伏發電機逆變器瞬時停機。因此，提議採用兩組大型靜止型虛功功率補償器 (STATCOMs)，以在正常系統條件和緊急情況下提供所需的連續動態虛功功率支援。

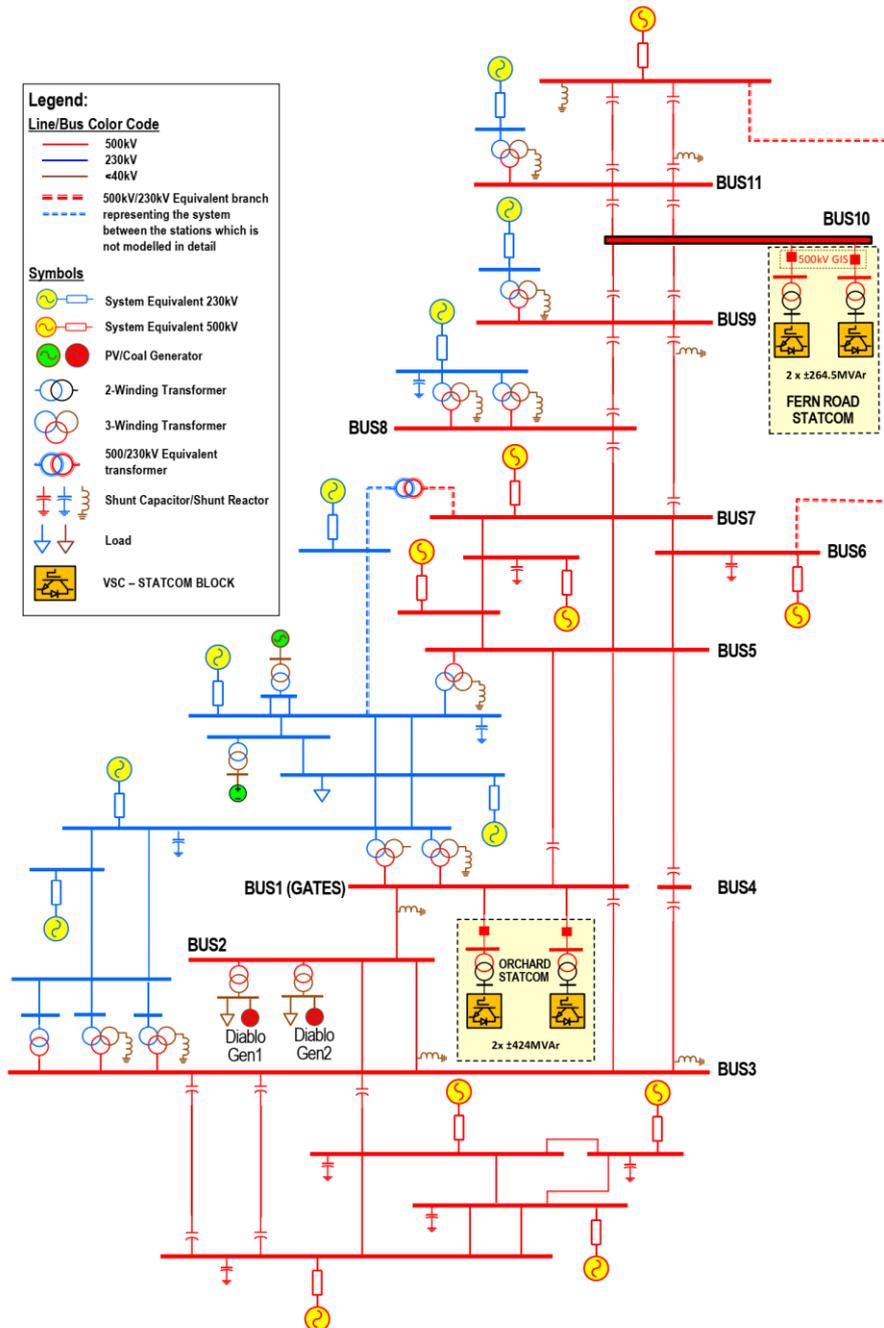


Figure 1 – SLD showing the location of Orchard and Fern Rd STATCOM in 500kV Backbone system

圖 4-20 Example performance during a solid left: three phase and right: single phase fault (AC currents are per unitized at converter secondary side peak current base).

一組靜止型虛功率補償器 (STATCOM) 將安裝在 Orchard 變電站，靠近 Gates 500 千伏變電站，其中包括兩個大小相等的  $\pm 424\text{Mvar}$  區塊，獨立連接到 500 千伏，以確保在虛功率裝置維護和緊急情

況下的容量，如圖 4-20 所示。這些 STATCOM 裝置將在該區域增加電壓支援，以限制 Diablo Canyon 發電廠退役後的高電壓，以及在其退役前的非尖峰條件下的高電壓，並將緩解三相故障和感應電動機失速的動態穩定性問題，以及在故障後恢復條件下的跳脫問題。

第二組兩個 STATCOM 區塊將安裝在 Fern Road 變電站，靠近 Round Mountain 500 千伏變電站。它也將由兩個大小相等的  $\pm 264.5\text{Mvar}$  區塊組成，獨立連接到 500 千伏 GIS 變電站，如圖 4-20 所示，然後通過短的架空線路連接到 Round Mountain。這些 STATCOM 裝置將有助於解決 Round Mountain 區域的高電壓問題，該問題在加州-俄勒岡州聯繫線 (COI) 流量較低的非尖峰條件下的實時運轉中經常發生，並將緩解失去太平洋直流聯繫線後的低電壓問題。它們還將有助於調節因加州太陽能光伏發電而導致的 COI 日常電力潮流波動引起的電壓。

Orchard 和 Fern Road 變電站的 STATCOM 系統都需要提供兩個相等的區塊。這些 STATCOM 安裝在短路容量相對較高的交流系統中，因此需要非常大的 STATCOM 輸出來提供對交流系統電壓的預期影響。

表 4-2 顯示了短路容量的範圍以及 STATCOM 可能對母線電壓產生的影響。應該注意的是，儘管電壓影響似乎不大，但兩個 Orchard STATCOM 區塊的輸出相當於正在退役的兩個 Diablo Canyon 發電機

組的調節能力。Fern Road 的 STATCOM 提供了目前系統中不可用的額外調節能力，這是為了避免低電壓而需要的。

與傳統發電機或基於光伏的逆變器相比，STATCOM 在跟隨負載變化和從故障中恢復方面的響應要快得多。表 4-3 中顯示了為 STATCOM 指定的嚴格的穿越和故障恢復性能，因此可以完全避免在 Diablo Canyon 發電機組退役後可能發生的任何系統性能下降。如表 4-2 所示，STATCOM 的調節能力隨著系統短路電平（SCL）的降低而增加，STATCOM 具有自動控制增益調整功能，可以在短路電平降低到 8000MVA 以下時保持穩定運轉。

表 4-2 Voltage Regulating Capability of the STATCOMs with one and two blocks in service

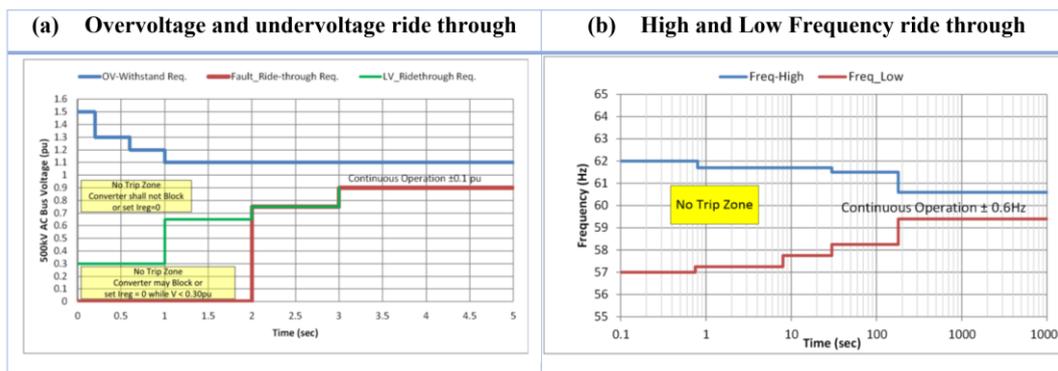
*Table I – Voltage Regulating Capability of the STATCOMs with one and two blocks in service*

System SCL (MVA)	Orchard Substation		Fern Road Substation	
	One block 424 Mvar	Both blocks 848 Mvar	One block 264.5 Mvar	Both blocks 529 Mvar
	Approximate Voltage Regulating Capability(%)			
8000	5.3	10.6	3.3	6.6
16000	2.7	5.3	1.7	3.3
20000	2.1	4.2	1.3	2.6
24000	1.8	3.5	1.1	2.2
30000	1.4	2.8	0.9	1.8

Note : The normal range of SCL is between 20000 and 24000 MVA.

表 4-3 Specified Ride-Through Requirements

Table II- Specified Ride-Through Requirements



### 3. 設計方面

STATCOM 控制系統由廠控(操作員控制)和閉環控制功能組成。閉環控制進一步分為主控制模式和輔助控制功能。主要的控制模式是電壓控制(VCM)和固定虛功率控制(FQM)。

#### (1) 固定虛功率控制模式(手動模式; FQM)

在此模式下，STATCOM 的輸出由一個慢速積分器控制到與 STATCOM 變壓器一次側(QSTATCOM)相關的固定輸出值，直至達到設定值(FQref)。在此模式下，實現了電壓限制控制(VLC)，以防止 STATCOM 對電網產生負面影響。如果電壓超出了預定義的可接受範圍，控制器將緩慢調整 STATCOM 電流限制，以使電壓恢復到範圍內。這種手動控制模式對於調試、維護和測試很有用，但在正常操作中不太可能使用。

#### (2) 電壓控制模式(自動模式; VCM)

STATCOM 標準的比例-積分-微分(PID)電壓控制器可以快速準確地調節系統電壓。由於集成了增益控制器，在寬範圍的短路電平下，可以

實現 50 毫秒的響應時間。系統電壓  $V_{act}$  可以連續控制，最大值為 1.1 pu，最小值為 0.901 pu。電壓參考值  $V_{ref}$  在電容性運轉時限制在 1.08，但在電感性運轉時允許高達 1.10pu 的設定值。允許在全電感性模式下連續運轉，電壓高達 1.20pu。在  $V_{act}$  介於 1.158 pu 和最大可測電壓之間時，STATCOM 虛功率輸出被控制為完全電感性。相反，在  $V_{act}$  從 0.901 pu 降至 0.3 pu 的範圍內，只要未檢測到欠壓，STATCOM 虛功率輸出就被控制為完全電容性。

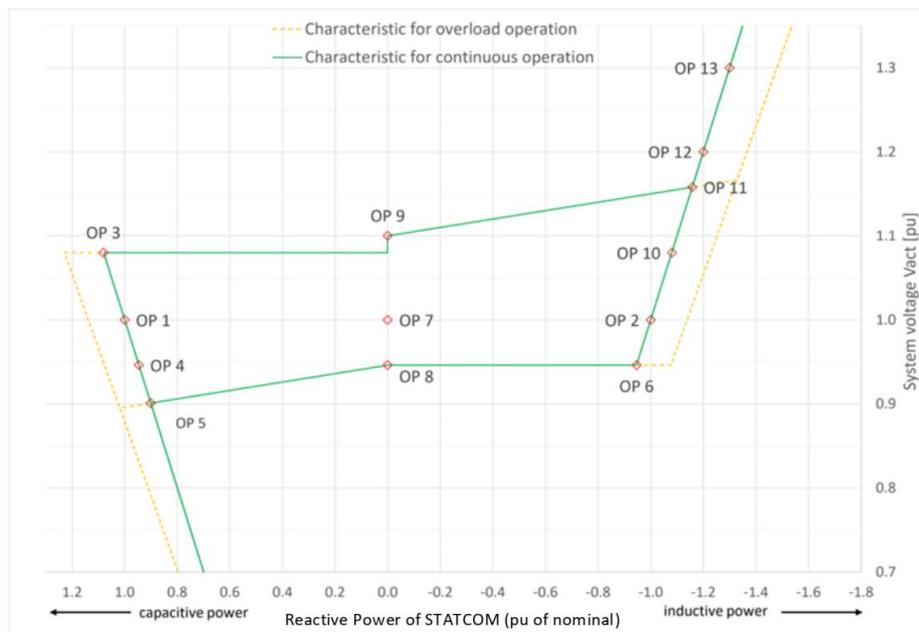


Figure 2 V/Q characteristics for continuous voltage control

圖 4-21 V/Q characteristics for continuous voltage control and overload range

表 4-4 Operating points

*Table III Operating points*

Points	Q (pu)	Vprim (pu)
OP 1	1.0	1.0
OP 2	-1.0	1.0
OP 3	1.08	1.08
OP 4	0.946	0.946
OP 5	0.901	0.901
OP 6	-0.946	0.946
OP 7	0.0	1.0
OP 8	0.0	0.946
OP 8	0.0	1.10
OP 10	-1.08	1.08
OP 11	-1.158	1.158
OP 12	-1.20	1.20
OP 13	-1.30	1.30

control and overload range

(3) 疊加虛功功率控制器(Q 控制器; 僅適用於 VCM)

如果啟用，虛功功率控制器(Q 控制器)將使用誤差信號  $\Delta V_Q$  調整電壓控制器的電壓參考設定值( $V_{ref}$ )，以將 STATCOM 虛功功率輸出維持在由虛功功率設定值( $Q_{ref}$ )給定的指定值。該功能有助於確保始終有一部分 STATCOM 動態虛功功率範圍可用於快速動態調節，或使 STATCOM 保持在具有低損耗的運轉點。

(4) 穩定性和增益控制器(搜索檢測; 僅適用於 VCM)

穩定性和增益控制器提供 STATCOM 的穩定和快速響應，並提供在 500kV 系統短路電平發生非常大變化時的穿越能力。穩定性控制器輸出是在非常弱的系統條件下結合瞬態相互作用提高 PID 控制器穩定性的重要功能。

(5) STATCOM 的虛功功率(標稱值的 pu)

穩定性控制器監測  $I_{reg}$ (電壓控制器輸出，即 STATCOM 變流器所需的調節電流)中高於 4 Hz 的搜索是否存在振盪(搜索檢測)。搜索檢測監測  $I_{reg}$  信號以檢測  $I_{reg}$  信號方向的多次連續變化。如果檢測到多次方向變化，則增益將降低到當前有效值的 80%，直到達到穩定為止。必須選擇搜索檢測電平的設置，以確保有足夠的裕度，避免在對應於系統功率擺動的低頻範圍內出現不必要的增益降低。

要求 STATCOM 在非常寬的電力系統短路電平範圍內提供相對恆定的響應時間，這需要自動調整控制器增益。增益控制器通過運轉增益測試來確定系統的實際短路電平，並評估電壓控制器的最佳增益。

在增益測試期間，在 STATCOM 的實際工作點增加少量電流 $\pm I$ ，導致輕微的電壓偏差。在此修改之前、期間和之後測量 STATCOM 的實際電壓和虛功率輸出。然後根據這些測量計算增益。在增益測試期間，兩個 STATCOM 區塊的電壓控制器被凍結約 250 毫秒以保證準確性。但是，如果檢測到系統干擾，則立即取消測量。

由於每個變電站(Orchard 和 Fern Road)的兩個 STATCOM 區塊(Block1 和 Block2)在網絡中彼此靠近運轉，這可能會導致不必要的影響，如反應過度(超調)或反應不足(非週期性情況)。因此，通過使用控制系統之間的直接光纖連接的快速通信(控制總線通信)實現了每個變電站的兩個 STATCOM 之間的資訊交換。使用控制總線通信交換兩個

STATCOM 的控制模式和運轉狀態。STATCOM 區塊之間通信的主要目的是避免一個 STATCOM 區塊的增益測試受到另一個區塊的干擾，這可能導致錯誤的增益評估。因此，在應用第一個 STATCOM 區塊的增益測試時，第二個 STATCOM 區塊的控制器將被凍結以防止任何反應，並在第一個 STATCOM 區塊的增益測試完成後恢復。在通信故障期間，兩個 STATCOM 區塊的增益測試都被阻止，以防止確定錯誤的增益。由於系統的狀態是未知的，因此選擇最小增益值以防止 STATCOM 反應過強。在增益調整期間，假設只有一個 STATCOM 在運轉時計算增益。但是，當兩個 STATCOM 區塊在電壓控制模式和共同控制模式下並聯運轉時，增益會降低，以避免降低穩定性裕度並減少潛在的超調。

#### (6) 共同控制模式(CCM)

共同控制功能確保連接在同一母線上的兩個 STATCOM 區塊使用相同的參考電壓  $V_{ref}$ 、斜率、增益和  $K_{fac}$ (增益降低因子，一個用於降低控制器增益的設置，可在 0.5 和 1 之間更改)並聯運轉。這是通過使用控制總線通信實現的。如果由於開關或外部斷路器的切換，兩個 STATCOM 區塊不再連接到同一母線，則可以關閉共同控制模式。

要使用共同控制，必須啟用共同控制模式，並且兩個 STATCOM 區塊必須處於 VCM 模式。如果在兩個 STATCOM 區塊都通電之前選擇共同控制模式，則首先通電的 STATCOM 區塊將成為共同控制主機，第二個將成

為共同控制從機。在第二個 STATCOM 區塊通電後，控制主機可由操作員選擇。

當激活共同控制功能時，兩個 STATCOM 的參考值  $V_{ref}$ 、斜率、 $K_{fac}$  和增益將被強制為相同的值。這意味著從控制器的參考值將在激活此功能時自動更新以匹配主控制器設置，無需操作員的額外干預。使用斜坡函數執行參考值的更改，以確保平穩地改變工作點並避免系統干擾。在共同控制有效的情況下， $V_{ref}$ 、 $K_{fac}$  和斜率值的調整只能在主控制器上進行，從控制器將自動更新到主機。

為了防止不必要的增益測試，在共同控制操作期間，只有主控制器會運轉增益測試。在禁用共同控制模式或主控制器切換時，前從控制器將運轉增益測試並更新自己的增益。

如果不再可能在共同控制模式下運轉，例如一個 STATCOM 區塊切換到 FQM，或者如果兩個 STATCOM 之間的通信丟失，並在 HMI 和 SCADA 系統上生成警報消息，則共同控制模式將自動禁用。在恢復通信後，共同控制模式不會自動恢復，但必須手動重新啟用。

#### 4. 頻率掃描

如圖 4-20 所示，加州的 500kV 主幹系統採用了串聯補償。串聯電容和電路電感的組合可能導致系統自然諧振頻率落在次同步諧振/振盪和扭矩相互作用 (SSR/SSO/SSTI) 的範圍內。

此外，在實時模擬器上使用實際控制對 STATCOM 的輸入阻抗進行了頻率掃描，以提供與使用 STATCOM 的 EMT 程式模型進行類似頻率掃描的基準比較。在實時模擬器上確定的 STATCOM 阻抗與使用 EMT 程式模型確定的阻抗之間的良好相關性將提供信心，即 EMT 模型準確反映了實際的 STATCOM 控制。

圖 3 顯示了 STATCOM 的測量阻抗(通過在 STATCOM 端子上施加電壓源，並將每個頻率範圍內測量的電壓除以測量的電流得到)。在整個 SSO 頻率範圍內(從直流到大約電力系統的標稱頻率)確定了阻抗。所示的特性是對正序電壓注入確定的正頻率阻抗。還可以使用正序或負序電壓注入和正序或負序電流響應的不同組合來計算其他 STATCOM 阻抗特性。

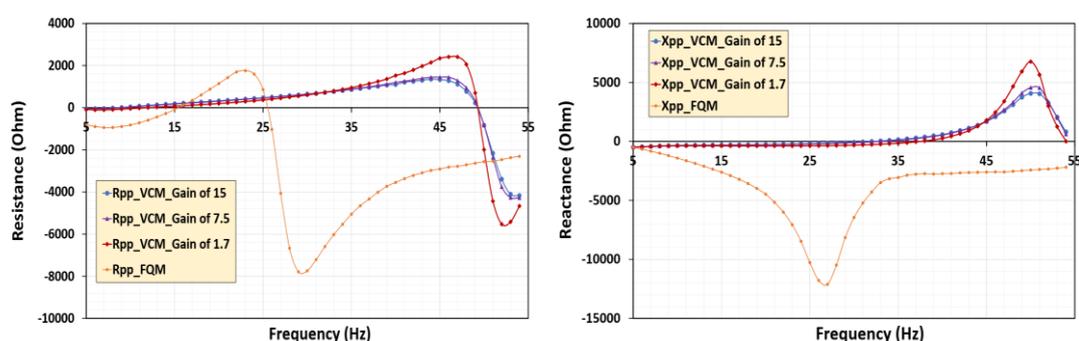


Figure 3 – Effect of STATCOM Controller Gain and Control Mode (VCM vs. FQM) on the Impedance of STATCOM

圖 4-22 Effect of STATCOM Controller Gain and Control Mode (VCM vs. FQM) on the Impedance of STATCOM

STATCOM 的頻率掃描是使用 Orchard 單個 STATCOM 區塊的實際控制(硬體在環路中)和實際的 STATCOM 控制和保護系統進行的。STATCOM 在 SSO 頻率範圍內的阻抗不僅受其主電路電氣元件參數的影響，還受

STATCOM 輸出、運轉模式和控制系统參數(如增益)的影響。在次同步頻率範圍內，STATCOM 阻抗作為頻率的函數在電容性、電感性、電阻性和零輸出下進行了計算。其他敏感度包括外環增益的變化和運轉模式 VCM 和 FQM 的變化。

圖 4-22 顯示了 STATCOM 控制器增益和控制模式(VCM 與 FQM)對 STATCOM 阻抗的影響。考慮到 VCM 和 FQM 控制模式之間觀察到的 STATCOM 阻抗之間的巨大差異，很明顯，在使用頻域阻抗掃描技術標記潛在的 SSO 問題時，應該應用與實際使用的 STATCOM 控制模式和控制器增益相對應的阻抗。

頻域掃描技術涉及在每個頻率下 STATCOM 阻抗與系統阻抗的總和，並確定在已識別的系統振盪頻率下阻抗的電阻分量是否減小。淨負電阻的增加或淨正電阻值的減少可以被認為是減少阻尼的指示，具有破壞預先存在的振盪的潛力。圖 4-22 的特性表明，STATCOM 阻抗的電阻分量在約 47 Hz 以上變為負值，如果 STATCOM 與系統阻抗串聯連接，則在該頻率以上阻尼可能會降低。

頻域阻抗掃描和求和技術不被認為是嚴格的，因為系統中振盪的自然頻率的激勵源通常來自交流系統的特定線路或路徑，而其餘路徑不是串聯的，而是與 STATCOM 阻抗並聯。考慮大量並聯路徑作為潛在的激勵源將大大增加需要的掃描案例的數量。

頻域掃描技術的一個感知優勢是，與使用時域模擬相比，可以更快地離線掃描大量系統條件和 STATCOM 工作點，以確定應該進行更詳細研究的條件。然而，如果考慮不同電壓序列模式下 STATCOM 阻抗特性的差異、不同控制系統運轉模式以及個別線路激勵系統自然頻率的可能性，則在頻域中掃描阻抗的模擬工作仍然可能變得非常繁瑣。

在硬體在環路測試期間，對多種系統配置中 STATCOM 對潛在 SSR/SSO/SSTI 的影響進行了研究，在下一節中將進一步討論。由於在實時模擬器上模擬的情況沒有發現任何無法使用增益降低來管理的情況，因此沒有進行頻域掃描技術和時域模擬之間的直接比較。

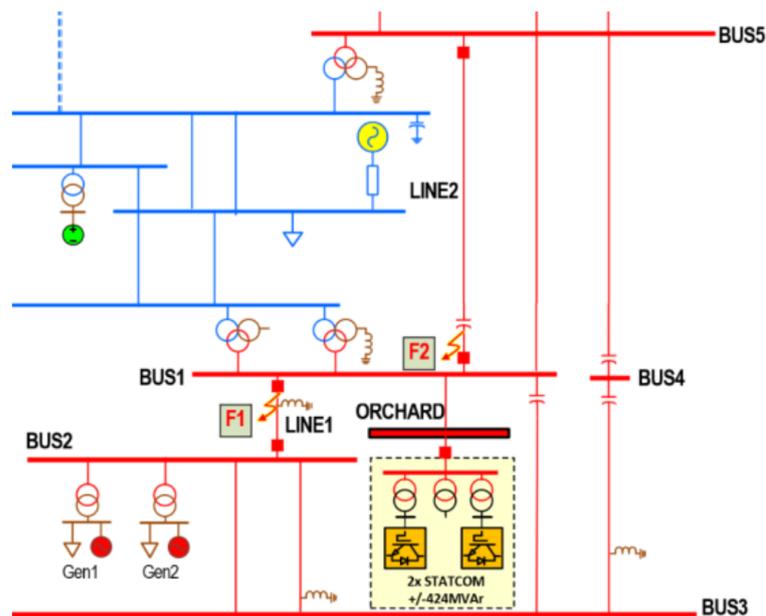


Figure 4 - Fault Locations of F1 and F2

圖 4-23 Fault Locations of F1 and F2

## 5. 動態性能測試

使用如圖 4-19 所示的大型交流網絡系統，在實時 HIL 模擬中對 Orchard 和 Fern Rd STATCOM 的 STATCOM 控制和保護系統的性能進行了出廠驗收測試，以評估在各種系統條件下，例如局部和遠程故障以及負載切除等系統干擾期間指定的所實功能。STATCOM 在故障期間和之後的響應通常符合設計。本文描述了一些選定的測試。

#### a) SSO 現象(Orchard STATCOM 測試)

在許多干擾(如開關和故障)的大型網絡 DPS 測試期間觀察到 SSO 振盪。這在次同步頻率範圍內(例如~40Hz)表現為  $V_{act}$  中的振盪， $V_{act}$  是控制的三相均方根反饋值。 $V_{act}$  中的 40Hz SSO 對應於實際線對地電壓中的 20Hz。

交流網絡有許多串聯補償線路，因此根據系統配置和停運情況，在 20-40Hz 範圍內具有固有的自然諧振頻率。然而，SSO 被穩定控制器有效檢測並通過增益降低進行控制。圖 4-24 顯示了 CASE 1 的測試結果 - BUS1 上 LINE1 的三相接地故障(F1)和 CASE 2 - BUS1 上 LINE2 的單相接地故障(F2)，正常清除時間為 5 個週期(或更短)。

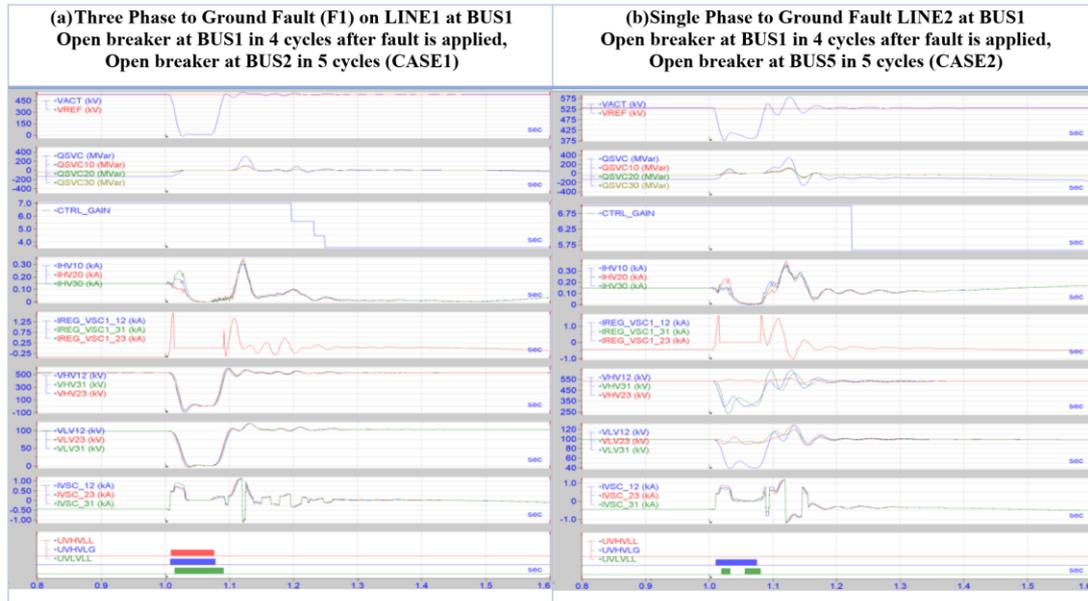


Figure 5 – SSO Due to Faults with Normal Clearing Times(N-1 Cases)

圖 4-24 SSO Due to Faults with Normal Clearing Times(N-1 Cases)

選擇了一個虛擬案例(CASE 3)來演示多個或有事件操作以及相應的 SSO 監測和控制反應，如上所述。在 CASE 3 中，模擬了多個或有事件，以達到短路電平足夠低的系統條件，使得增益測試可以激發 SSO 振盪。此外，SSO 檢測設置被調整得非常敏感(積極)，以便 SSO 檢測功能可以採集，並且預期的增益降低會發生。在正常(不太敏感)設置下，SSO 振盪自然衰減，不需要啟動增益降低。敏感測試設置僅用於證明 SSO 檢測的功能。

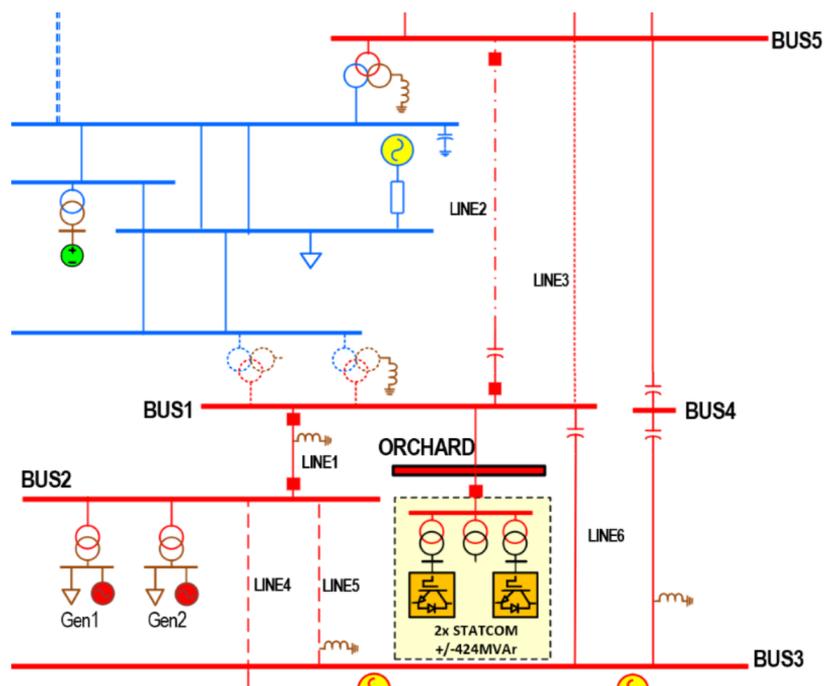


Figure 6 – Multiple Contingencies (CASE3)

圖 4-25 Multiple Contingencies (CASE3)

初始條件:N-3，BUS1 處的兩個 500/230 變壓器和 LINE3 都停運

- 第一個事件:在沒有故障的情況下切斷 LINE4 和 LINE5(N-3->N-5)
- 第二個事件:在沒有故障的情況下切斷 LINE2(N-5->N-6)

圖 4-26 展示了這個案例的結果。

在列(a)中，當系統達到 N-6 或有事件時，在切斷 LINE2 後，電網出現極端振盪。這是因為在沒有 STATCOM 提供電壓支持的情況下，系統在 N-6 或有事件情況下變得不穩定。

在列(b)所示的情況下，STATCOM 處於正常運轉狀態，並且在 STATCOM 提供的虛功支持下，即使在 N-6 或有事件下，系統仍然保持穩定。此外，即使 STATCOM 控制器以正常增益運轉，由增益測試引發的 SSO 振

盪也被阻尼，這表明在這種情況下，沒有特別需要採取任何行動來緩解 SSO 振盪，因為固有的系統阻尼就足夠了。

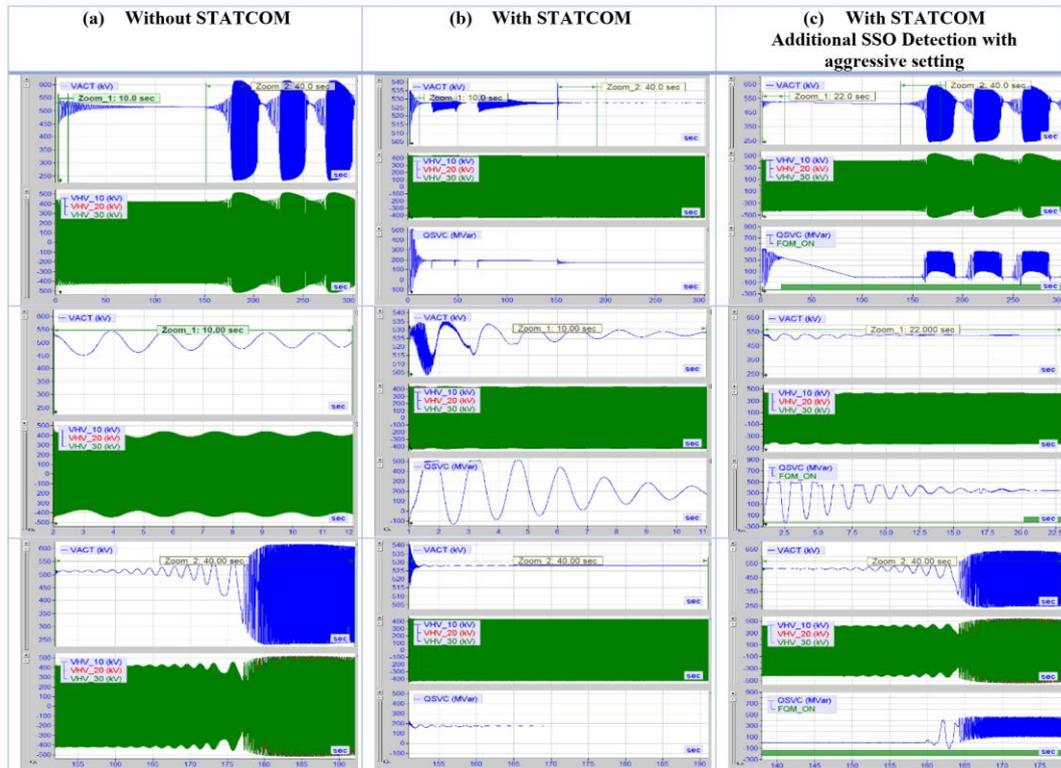


Figure 7 - SSO Due to Multiple Outages (Extreme Case)

圖 4-26 SSO Due to Multiple Outages (Extreme Case)

在列(c)所示的情況下，為了測試目的，設置了搜索檢測(經過修改以進行敏感的 SSO 檢測)以積極響應。SSO 檢測做出響應，在第二次增益測試和增益降低事件之後，系統再次變得不穩定，類似於列(a)中沒有 STATCOM 的情況。

這突顯出 SSO 檢測設置不應過於敏感，以免反應過於激進，將控制器增益降低到 STATCOM 無法有效提供改善系統穩定性所需的虛功支持的程度。因此，對搜索檢測進行了修改，以限制在重複增益測試後允許的增益降低次數。

b) 由於直流偏移而跳閘(Orchard STATCOM 測試)

當在接地不良的系統中跳閘串聯補償的交流線路時，可能會出現長時間的直流偏移。在這種情況下，也從穩態 N-3 條件開始，如 CASE3 中所示，當在切斷 LINE1 後網絡中斷達到 N-4 時，在 BUS1 處的 500kV 電壓中出現直流偏移。如果在 STATCOM 接口變壓器上未對變壓器飽和進行建模，則此直流偏移不會衰減，並會由於變流器直流保護而導致 STATCOM 跳閘，其將流入接口變壓器(次級)。

為了進一步研究這種情況，在實時模擬器中實現了詳細的 CVT 模型，以過濾 Vact 測量中的直流分量。這避免了 STATCOM 的跳閘，但直流偏移仍然存在。當在 STATCOM 變壓器的高壓繞組中適當地對變壓器飽和進行建模時，直流偏移迅速衰減，從而說明在 HIL(硬體在環路)測試中考慮 STATCOM 變壓器飽和的重要性。

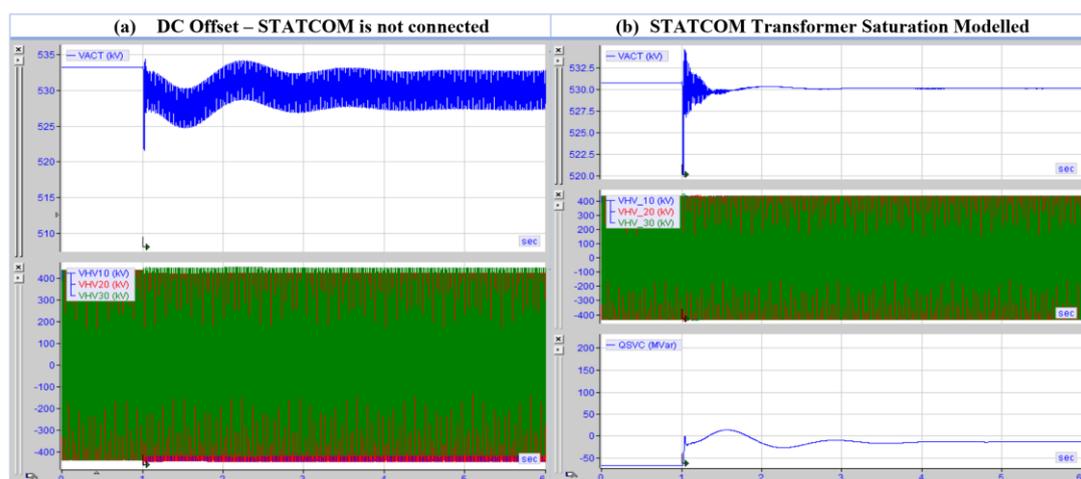


Figure 8 – Effect of DC Offset at STATCOM High Voltage Bus

圖 4-27 Effect of DC Offset at STATCOM High Voltage Bus

c) 在 Orchard 和 Fern Road STATCOM 都在運轉的情況下的遠程故障

在這個測試中，Fern Road STATCOM 被建模為硬體在環路中，而由於實時模擬器的模擬能力限制，Orchard 使用通用模型。在 Bus 7 上施加三相故障，Bus 7 距離 Fern Rd 約 232 英里，距離 Orchard 約 140 英里(見圖 4-19)。測試結果如圖 4-28 所示。由於測試設置的記錄限制，只記錄了 Orchard STATCOM 的電網電壓、虛功率和請求電流。

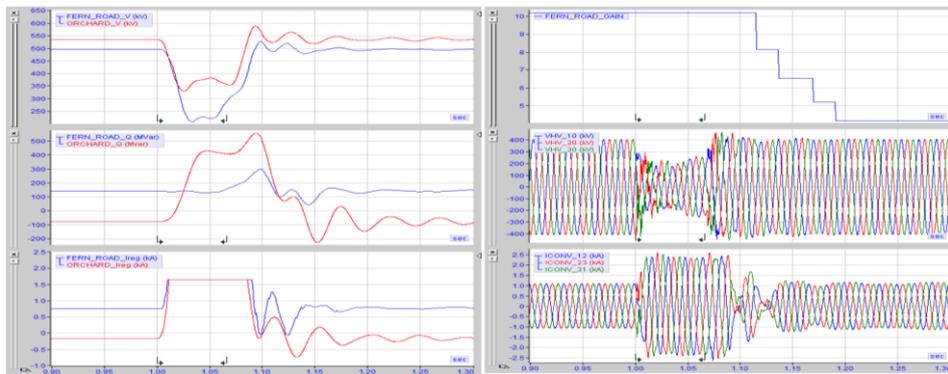


Figure 9 - Remote three phase to ground fault

圖 4-28 Remote three phase to ground fault

Fern Rd 和 Orchard STATCOM 都通過快速注入電容性電流來支持電網電壓。由於電壓降大，Fern Road 注入的虛功率受到限制。由於 SSO，在故障清除後，Fern Road 的增益降低。Orchard 和 Fern Road STATCOM 都獨立地對電壓變化做出反應，結果是穩定和阻尼的。

#### d) 過電壓跳閘(Fern Rd STATCOM 測試)

在多次 FAT 測試中，觀察到當短串聯補償線路上的故障被跳開時，可能會發生 STATCOM 的過電壓跳閘。當故障線路的斷路器觸點打開時，非故障線路的串聯電容器突然插入，在故障清除時會發生電壓階躍。由此產生的陡峭前沿、短時間的過電壓波形可能會觸發瞬時過電壓保

護。通過降低最初提議的 OV 保護的靈敏度，解決了這種情況。這些案例說明，在串聯補償系統中，確保 OV 保護不要過於敏感很重要。理想情況下，除非絕對需要設備保護，否則不應使用瞬時過電壓保護。

## 6. 結論

Orchard 和 Fern Road STATCOM 將是首次在具有非常高短路電平的超高壓串聯補償輸電系統中直接連接到高壓母線的 STATCOM 應用之一。為了提供有用的電壓調節能力範圍，需要非常高額定值的 STATCOM。雖然 STATCOM 尚未投入使用，但使用實時模擬器進行的出廠驗收測試已經證明了擬議安裝的可行性。雖然 FAT 的許多功能測試都是使用簡單的等效交流系統進行的，但也使用了相對較大的交流系統模型進行了許多案例，這允許研究多種系統配置和運轉情景。大型模型包括 Fern Road 和 Orchard STATCOM。理想情況下，所有四個 STATCOM 區塊都應作為實際硬體包含在環路中，但由於可用的實時模擬平台的限制，一次測試一個 STATCOM，使用實際的控制和保護硬體和軟體，而遠程位置的另一個 STATCOM 則使用 OEM 的通用模型進行建模。使用大型系統進行的實時模擬研究有效地證明了以下幾點：

a) 一般來說，響應時間和恢復性能符合規定值，儘管需要自動增益控制才能在要求的非常大的短路電平範圍內滿足性能。

b) 系統可以在 Fern Rd 和 Orchard STATCOM 設置為不同電壓設定值和斜率的情況下運轉，並且沒有觀察到任何問題。此外，在一些明確建模的案例中，也沒有觀察到與 Diable Canyon 發電機組的負面相互作用。

c) 每個位置內的兩個 STATCOM 區塊不會相互影響，也沒有證據表明 Fern Road 和 Orchard 的 STATCOM 之間存在相互作用。

d) 在正常、N-1 和 N-2 或有事件下以及在使用串聯補償進行故障清除期間，對性能進行了全面測試，並解決了可能的 OV 靈敏度問題。

e) 在執行的任何案例中，STATCOM 的存在都沒有引發或加劇 SSO 振盪的阻尼。在所有情況下，無論有無 STATCOM，都觀察到系統提供足夠的固有 SSO 振盪阻尼，以避免持續振盪。然而，在極端多重(N-6)或有事件情況下，在非常低的短路電平下，觀察到增益測試可能會引發 SSO 振盪，但這些振盪仍然被系統固有地阻尼。選擇了一個 N-6 或有事件案例來測試 SSO 振盪檢測(搜索檢測)的功能，該功能在測試期間被設置為人為的低閾值。在這些測試條件下，觀察到重複的增益測試可能導致增益下降到不可接受的低水平。因此，對搜索檢測進行了修改，以限制在重複增益測試後允許的增益降低次數。

雖然實時模擬器研究表明性能穩固，但建議在調試期間監測和確認現場測試中的性能。在調試過程中，應觀察 SSO 搜索檢測的響應，以確

認它不會太過激進。在調試過程中，還應通過在開關測試(例如在 Gates 處或附近的電抗器或電容器)中引發振盪並觀察振盪的衰減來觀察實際 SSO 頻率的固有阻尼。還應通過在有和沒有 STATCOM 運轉的情況下進行開關測試來證明 STATCOM 對 SSO 振盪阻尼的影響。

#### 4.4 分組討論主題與論文

本屆年會共發表 1127 篇論文，區分為 4 類 16 組進行分組討論，以下簡列各組討論主題與主要相關論文：

##### A1-旋轉電機(Rotating Electrical Machines)共有 30 篇論文

###### PS1. 旋轉電機與能源轉型(9 篇)

###### 一、內容重點

(1) 探討旋轉電機在未來電網中扮演的角色與面臨的挑戰。(2) 聚焦於核能、水力、同步調相機等技術在能源轉型過程中的應用。(3) 討論如何提升這些設備的效率、可靠度與靈活性，以因應整合再生能源的需求。

###### 二、主要相關論文

(1) ID: 10306 「核能汽輪發電機對未來電網的效益」(法國) (2) ID: 10692 「深入剖析 IEC 60034-33 新標準 - 抽蓄發電廠的水力發電機與馬達發電機標準」(巴西) (3) ID: 11031 「Moneypoint 同步調相機與飛輪 - 愛爾蘭電網增加再生能源併網與強化電網韌性的零碳方案」(愛爾蘭)

###### PS2. 旋轉電機的演進與發展(9 篇)

###### 一、內容重點

(1) 介紹旋轉電機技術的最新進展與創新應用。(2) 探討新型旋轉

電機設計在提升效能、可靠度方面的潛力。(3) 分享改造既有旋轉電機以因應電網需求變化的案例經驗。

## 二、主要相關論文

(1) ID: 10864 「開發與設計一台 944.5 MVA 的空冷式水輪發電機」(德國) (2) ID: 11022 「依據 IEC 60034-18-42 驗證搭配變頻器運轉之水輪發電機的高壓絕緣系統」(德國) (3) ID: 11171 「同步調相機的設計考量要點」(奧地利)

### PS3. 維持電力供應(11 篇)

#### 一、內容重點

(1) 研討旋轉電機運維、監測與診斷技術的最新發展。(2) 分享旋轉電機故障分析與搶修實務經驗。(3) 探討先進的設備狀態評估方法，以實現旋轉電機的狀態導向維護。

#### 二、主要相關論文

(1) ID: 11047 「水輪發電機非接觸式線上局放監測系統的應用」(日本) (2) ID: 11661 「利用提高勵磁頻率進行旋轉電機低通量鐵心測試」(加拿大、英國) (3) ID: 11712 「同步機運轉資料的評估與應用於狀態導向維修決策」(德國)

A2-電力變壓器與電抗器(Power Transformers and Reactors)共有

## 73 篇論文

### PS1. 韌性變壓器設計(34 篇)

#### 一、內容重點

- (1) 探討如何設計更具韌性與可靠性的電力變壓器與電抗器。
- (2) 介紹新材料、新結構、新製程在提升變壓器抗短路、地磁暴等極端事件能力上的應用。
- (3) 分享業界在極端環境下(如海上風電、核電廠)的變壓器設計經驗。

#### 二、主要相關論文

- (1) ID: 10122 「變壓器衝擊電壓前沿試驗對其絕緣設計的影響」(美國)
- (2) ID: 10259 「漂浮式離岸用途變壓器的應力分析」(法國、印度、土耳其、德國、中國、美國)
- (3) ID: 11352 「法國電力公司(EDF)水力發電變壓器技術規範」(法國)

A3-輸配電設備 (Transmission and Distribution Equipment) 共有 56 篇論文

PS1. 涉及輸配電設備的能源轉型 (Energy Transition Involving T&D Equipment) (25 篇)

## 一、內容重點

- (1) 探討如何設計更具韌性和高效的輸配電設備，以應對能源轉型帶來的挑戰。
- (2) 介紹新材料、新技術以及新製程在高壓和超高壓設備中的應用，以提升系統的可靠性和效率。
- (3) 分享業界在極端應用環境下（如 HVDC、海上風電和核電廠）對於高壓輸配電設備的設計與應用經驗。

## 二、主要相關論文

- (1) ID: 10161 「高壓智能快速斷路器的開發」(中國)
- (2) ID: 10162 「基於新型陶瓷介質的 HVDC 氣體絕緣電力傳輸設備支撐絕緣可靠性增強」(中國)
- (3) ID: 10163 「用於快速控制 UHV DC/AC 可控避雷器的自觸發/自放電間隙的關鍵技術研究、原型開發及工程應用」(中國)

## PS2. 降低輸配電設備的碳足跡 (Lowering the Carbon Footprint of T&D Equipment) (18 篇)

### 一、內容重點

- (1) 探討如何通過替代技術和新材料降低輸配電設備的碳排放，特別是取代 SF6 氣體。

(2) 介紹可持續的絕緣材料、新型氣體混合物以及數位化解決方案在降低碳足跡中的應用。

(3) 分享基於全生命周期評估 (LCA) 減少環境影響的設計和操作策略。

## 二、主要相關論文

(1) ID: 10127 「245kV 及以上的無 SF6 金屬封閉開關設備」(法國)

(2) ID: 10321 「先進乾式絕緣技術在高壓變電站產品中的應用」(美國)

(3) ID: 10580 「如何通過與客戶合作確定規格來降低碳足跡影響」(西班牙)

## PS3. 輸配電資產的維護與管理 (Maintaining and Management of T&D Assets) (13 篇)

### 一、內容重點

(1) 探討如何通過資產性能管理系統 (APMS) 和智能監測技術來提升輸配電系統的運轉可靠性和壽命。

(2) 介紹人工智慧 (AI) 和物聯網 (IoT) 技術在變壓器、斷路器等設備中的應用，以提高故障預測和維修效率。

(3) 分享基於數位孿生技術的風險管理及其在高壓輸配電線路中的應用。

## 二、主要相關論文

(1) ID: 10132 「低功率儀器變壓器在電力網中的應用現狀」(法國)

(2) ID: 10584 「基於 AI 的 245 kV 儀器變壓器狀態評估與運轉優化」(西班牙)

(3) ID: 11150 「通過數位孿生技術進行高壓輸電線路的風險管理」(哥倫比亞)

## PS2. 變壓器分析技術進展(39 篇)

### 一、內容重點

(1) 探討先進的變壓器狀態監測、故障診斷與壽命評估技術。

(2) 應用大數據分析、人工智慧等方法來優化變壓器運維策略。

(3) 研究精確的變壓器電、磁、熱、油流場等多物理場模型，用於指導設計製造。

### 二、主要相關論文

(1) ID: 10403 「變壓器溶解氣體分析的數據分析方法在資產管理中的應用」(英國、美國)

(2) ID: 10663 「線上氣體分析儀中電容式水分傳感器的效用」(南非)

(3) ID: 11432 「變壓器群健康評估中 TSO 與第三方數據主權合作的共享數字孿生方法」(德國)

### PS3. 再生能源用變壓器的可靠性(14 篇)

#### 一、內容重點

- (1) 研究再生能源併網對配電變壓器負載特性與老化的影響。
- (2) 探討適用於風電、太陽能發電等場景的專用變壓器設計。
- (3) 介紹智慧變壓器、電抗器在再生能源接入中的應用。

#### 二、主要相關論文

- (1) ID: 10117 「電動車充電對配電變壓器壽命的影響:來自埃及阿斯旺的研究」(埃及)
- (2) ID: 11063 「屋頂光伏發電對配電變壓器負載曲線與老化的影響」(澳大利亞)
- (3) ID: 11713 「結合快速切換功率電子單元提升可變電抗器性能」(德國)

### B1 - 絕緣電纜 (Insulated Cables) 共有 56 篇論文

#### PS1. 從經驗中學習 (Learning from Experiences) (25 篇)

#### 一、內容重點

- (1) 探討在電纜設計、製造與安裝過程中的經驗教訓，並從實際應用中學習如何提升電纜的性能和可靠性。

- (2) 介紹新技術、新材料及測試方法，應用於海底電纜、高壓直流和交流電纜等特殊環境。
- (3) 分享在高應力應用環境下，絕緣電纜系統的設計、故障檢測、監測與維護經驗，包括在海上風電場及城市地下電纜系統中的實際操作。

## 二、主要相關論文

- (1) ID: 10168 「220kV 三芯海底電纜護層損失測試」(中國)
- (2) ID: 10169 「基於反射係數譜的電力電纜局部缺陷定位方法」(中國)
- (3) ID: 10170 「世界首條 500kV 三芯 XLPE 絕緣交流海底電纜的設計、製造及安裝」(中國)

## PS2. 未來功能與應用 (Future Functionalities and Applications) (20 篇)

### 一、內容重點

- (1) 探討未來絕緣電纜在新技術及電力傳輸領域的應用，包括超導電纜和高壓直流電纜系統。
- (2) 介紹在高壓及高溫環境下，電纜設計的創新，如熱力和機械應力測試，以及新材料的開發與應用。

(3) 分享針對未來電力網路中，大規模輸電需求所需的電纜性能提升方案和測試方法。

## 二、主要相關論文

(1) ID: 10134 「中壓直流電纜系統的電場穩定化與認證程序建議」

(法國)

(2) ID: 10172 「兩段式三相同軸 10kV/1kA 超導電纜的設計與實驗」

(中國)

(3) ID: 10328 「高溫超導電纜系統：解決擁擠項目區域的地下傳輸

線路方案」(美國)

## PS3. 邁向可持續發展 (Towards Sustainability) (11 篇)

### 一、內容重點

(1) 探討如何提高電纜系統的可持續性，包括使用可循環材料與降低環境影響的設計。

(2) 分享如何在電纜製造和使用過程中減少碳排放，並介紹新的環保型電纜材料和替代方案。

(3) 討論在能源轉型過程中，絕緣電纜系統的角色，特別是對可再生能源電網的支持。

## 二、主要相關論文

- (1) ID: 10332 「XLPE 絕緣系統電纜的可持續循環解決方案」(美國、德國、瑞士)
- (2) ID: 10622 「開發與 SF6 替代氣體兼容的壓縮型 GIS 電纜終端」(瑞典)
- (3) ID: 10952 「創新解決方案：降低 HVDC 電纜連接對環境的潛在影響」(挪威、法國)

## B2 - 高壓架空線 (Overhead Lines) 共有 66 篇論文

PS1. 可再生能源整合挑戰與能源轉型對架空線的影響  
(Challenges from Renewables Integration and Influences of Energy Transition on OHL) (25 篇)

### 一、內容重點

- (1) 探討在可再生能源整合與能源轉型背景下，架空線系統面臨的設計與運營挑戰。
- (2) 分享高壓直流與交流架空線路的升級改造技術，如何提升傳輸能力並確保系統穩定性。
- (3) 提出針對高應力環境（如極端氣候和地理條件）的新材料和新技術應用。

## 二、主要相關論文

- (1) ID: 10173 「相間隔板在緊湊型架空線防冰脫落中的應用」(中國)
- (2) ID: 10359 「雙迴路架空線 DC+AC : 500kV DC 與 132kV AC 試點項目中電磁場的研究」(意大利)
- (3) ID: 10900 「通過動態線路評價最大化功率傳輸與可再生能源整合：愛爾蘭輸電系統運營商的經驗」(愛爾蘭)

PS2. 架空線資產管理、策略、技術與方法 (Asset Management, Strategies, Technologies and Methods for OHL) (30 篇)

### 一、內容重點

- (1) 探討如何通過預防性維護、風險管理與新技術應用，提升架空線的資產壽命與運營效率。
- (2) 分享利用無人機與人工智能進行架空線檢測的最新技術發展，及其在日常運維中的應用。
- (3) 討論防止雷擊與腐蝕等常見架空線路故障的策略與最佳實踐。

## 二、主要相關論文

- (1) ID: 10137 「架空線的損壞壽命預測工具」(法國)

(2) ID: 10336 「基於人工智能的輸電線路檢測技術」(美國)

(3) ID: 10980 「基於無人機的自動化架空線檢測技術開發」(日本)

### 一、內容重點

(1) 探討在架空線設計與建設中的技術創新，包括超高壓直流輸電技術與混合系統的應用。

(2) 介紹如何通過創新材料與設備設計，來應對高溫、高風速等極端運營條件下的挑戰。

(3) 分享在不同地理環境下，應用先進技術（如動態線路評價和監測系統）來提升架空線路的運轉可靠性。

### 二、主要相關論文

(1) ID: 11422 「用於架空線功率計算的導體風速測量技術」(德國)

(2) ID: 11550 「用於架空線路調整的新型導線懸垂調整裝置的研究」(韓國)

(3) ID: 11899 「架空導體在 Aeolian 振動下的剩餘壽命評估」(加拿大)

**PS3. 氣候變遷對架空線的影響 (Impacts from Climate Change on OHL) (19 篇)**

## 一、內容重點

- (1) 探討氣候變遷（如颶風、冰雪負荷、火災等）對架空線路系統設計與運營的挑戰，及相應的應對策略。
- (2) 分享防止因極端天氣導致的故障和損害的技術創新，包括改進的防雪設計和雷擊防護方法。
- (3) 介紹如何利用數據分析和氣象模型來提升架空線的韌性與長期運營穩定性。

## 二、主要相關論文

- (1) ID: 10183 「多電壓等級架空線因冰脫落引發的故障分析及其緩解策略」（中國）
- (2) ID: 10307 「颶風 IRMA 在法屬西印度群島的反饋與影響」（法國）
- (3) ID: 10982 「架空輸電線絕緣子的積雪堆積場地監測與大氣腐蝕測量」（日本）

**B3 - 變電站與電氣裝置 (Substations and Electrical Installations)** 共有 43 篇論文

**PS1. 能源轉型中的變電站設計與施工挑戰與新解決方案 (Challenges and New Solutions in T&D Substation Design)**

## and Construction for Energy Transition) (15 篇)

### 一、內容重點

- (1) 討論如何因應能源轉型帶來的挑戰，透過創新設計與施工技術來提升變電站的效能與環保性。
- (2) 聚焦於離岸風電、核能氫氣生產、小型模組化反應堆等新技術在變電站設計中的應用。
- (3) 探討使用替代氣體（如 SF6 替代品）的高壓設備設計，以及如何應對日益嚴苛的環境與操作要求。

### 二、主要相關論文

- (1) ID: 10322 「次世代分佈中心 'DCIAB' 的環保設計與技術」(美國)
- (2) ID: 10338 「半潛式浮動離岸高壓交流變電站的概念設計與測試」(美國)
- (3) ID: 10738 「無 SF6 420kV 氣體絕緣開關設計及其產品足跡」(瑞士)

## PS2. 變電站管理的操作經驗回饋 (Return on Operational Experiences for Substation Management) (28 篇)

## 一、內容重點

- (1) 探討變電站設備的運營經驗，包括資產管理、風險評估、數位化轉型等。
- (2) 分享如何應用自動化、機器人技術來提升變電站的運維效率，並應對不同操作環境的挑戰。
- (3) 討論氣體絕緣開關的長期運營經驗，特別是對 SF6 替代技術的應用以及其環境影響。

## 二、主要相關論文

- (1) ID: 10339 「地震對互聯變電設備的抗震性影響及經驗教訓」  
(美國)
- (2) ID: 10341 「變電站威脅緩解戰術的評估與比較」(美國)
- (3) ID: 11092 「日本變電站設備的先進維護策略與資產管理」(日本)

B4 - 直流系統與電力電子 (DC Systems and Power Electronics)

共有 63 篇論文

PS1. 直流設備與系統 (DC Equipment and Systems) (43 篇)

## 一、內容重點

- (1) 探討不同 HVDC 傳輸技術的應用，包括大規模離岸風力發電的

連接以及多端 HVDC 網絡的發展。

(2) 討論直流系統中的保護策略、電壓控制技術以及直流斷路器的性能測試等。

(3) 研究新型 HVDC 拓撲結構、控制方法以及多端 HVDC 系統的模擬與優化。

## 二、主要相關論文

(1) ID: 10142 「不同 HVDC 傳輸拓撲的技術經濟分析：大規模離岸風力發電連接方案」(法國)

(2) ID: 10193 「白鶴灘-江蘇  $\pm 800\text{kV}$  混合級聯特高壓直流輸電專案的關鍵技術」(中國)

(3) ID: 10772 「 $800\text{kV}$  HVDC 鏈路增強區域互聯以提高可變再生能源的利用率」(巴西)

PS2. 靜態同步補償器與電力電子技術 (FACTS and Power Electronics) (14 篇)

## 一、內容重點

(1) 研究 FACTS 裝置 (如靜態同步補償器 STATCOM、靜態同步串聯補償器 SSSC) 的設計與應用，特別是提高電網穩定性與功率傳

輸效率。

(2) 討論大功率轉換器的健康監測方法及其在動態虛功率補償中的應用。

(3) 針對可再生能源滲透率高的電網，提出新的控制策略來改善弱電網的穩定性。

## 二、主要相關論文

(1) ID: 10197 「220kV 直接連接的靜態同步串聯補償裝置在中國的首次示範應用」(中國)

(2) ID: 10518 「使用網絡敏電桿性特性改進動態電壓控制」(比利時)

(3) ID: 10603 「大功率 STATCOM 在美國加州 500kV 系統中的應用」(美國)

PS3. 促進能源轉型的新技術與概念 (New Technologies and Concepts of DC and FACTS enabling Energy Transition) (6 篇)

## 一、內容重點

(1) 探討新的 VSC-HVDC 互聯系統設計、直流微電網與儲能系統的應用，並評估其在能源轉型中的作用。

(2) 討論電網成形技術在 HVDC 系統中的應用，以及新型 DC 斷路器和保護策略的開發。

(3) 提出用於大規模可再生能源整合的混合 HVDC 系統和新的控制方法。

## 二、主要相關論文

(1) ID: 10623 「伊比利亞半島和巴利阿里群島的新 VSC-HVDC 互聯系統以促進能源轉型」(西班牙)

(2) ID: 10742 「變速全轉換泵儲水力發電的電網成形技術」(瑞士)

(3) ID: 11903 「多端 HVDC 系統中的保護設計與應用」(英國)

## B5 - 保護與自動化 (Protection and Automation) 共有 82 篇論文

PS1. 處理匯流排的實際經驗與新發展 (Practical Experiences and New Developments of Process Bus) (42 篇)

### 一、內容重點

(1) 探討在數位變電站中實現匯流排技術的實際應用，包括基於 IEC 61850 的保護系統的虛擬化和集中化。

(2) 討論智能電子裝置 (IED)、合併單元 (MU) 的集成應用，以及匯流排中各設備的互操作性和同步系統的挑戰。

(3) 實例探討基於處理匯流排的保護與控制系統的實際應用、性能評估與測試方法。

## 二、主要相關論文

(1) ID: 10100 「虛擬化和集中化保護系統的功能測試」(芬蘭/澳大利亞/美國)

(2) ID: 10261 「處理介面單元的要求與產業應用」(法國)

(3) ID: 10420 「處理匯流排統一電網控制平台需求」(美國)

PS2. 保護、自動化與控制系統的驗收、調試與現場測試  
(Acceptance, Commissioning, and Field Testing for  
Protection, Automation and Control Systems) (40 篇)

### 一、內容重點

(1) 探討保護、自動化和控制系統的驗收與調試過程中遇到的挑戰，特別是數位變電站中基於 IEC 61850 標準的測試與優化。

(2) 討論在高滲透率的變流器連接發電資源下，保護電驛的性能表現，以及應用數字雙胞胎技術進行測試的效率提升。

(3) 分享不同電網系統中保護和自動化裝置的現場測試經驗，特別是在同步相量測量裝置、電纜故障定位等技術中的應用。

## 二、主要相關論文

- (1) ID: 10422 「基於 IEC 61850 的數位變電站的調試與現場測試效率的提升」(美國)
- (2) ID: 10849 「基於處理匯流排的 PAC 系統測試挑戰與策略」(巴西)
- (3) ID: 11676 「EHV 變電站的保護、自動化與通信系統的即插即用測試」(印度)

C1 - 電力系統發展與經濟學 (Power System Development and Economics) 共有 100 篇論文

PS1. 推動能源轉型：透過自下而上的投資決策來實現自上而下的目標 (Steering the Energy Transition: Cooperation, Achieving Top-Down Targets Through Bottom-Up Investment Decisions) (33 篇)

### 一、內容重點

- (1) 探討能源轉型過程中，如何透過協作來實現國家政策目標，並同時支援來自地方和市場的投資決策。
- (2) 分析包括電解製氫、電力到天然氣的技術發展，以及全球電網建設中的長期規劃和容量建模。

(3) 強調多能源系統的整合及在發展中國家電力系統改革中的應用案例。

## 二、主要相關論文

- (1) ID: 10266 「電解發展對法國電力系統的挑戰」(法國)
- (2) ID: 10370 「傳輸網投資規劃與發展的優化工具」(義大利)
- (3) ID: 10919 「分佈式能源資源的大規模連接挑戰」(巴西)

## PS2. 彈性作為系統發展的關鍵標準 (Flexibility as Pivotal Criterion for System Development) (34 篇)

### 一、內容重點

- (1) 探討在能源轉型過程中，電力系統如何引入更多的彈性，包括儲能技術、電動車智能充電、虛擬發電廠及其他靈活性資源。
- (2) 分析儲能技術及其在島嶼和偏遠地區電力系統中的潛力，以及如何運用電力-氫轉換技術來實現碳中和目標。
- (3) 強調使用先進數據工具和模型來優化系統規劃和資源分配的必要性。

### 二、主要相關論文

- (1) ID: 10207 「水電解系統的最大效率點追蹤控制」(中國)

(2) ID: 10369 「全球運營商網絡中的儲能實施」(義大利)

(3) ID: 11389 「在約旦的抽水儲能潛力研究」(約旦)

### PS3. 韌性作為系統發展的關鍵標準 (Resilience as Pivotal Criterion for System Development) (33 篇)

#### 一、內容重點

(1) 探討在面對自然災害、系統故障等情況時，如何提高電力系統的韌性與恢復能力，包括基於風險映射的傳輸規劃、電網拓撲優化等方法。

(2) 研究高壓直流傳輸技術在提升系統穩定性與韌性方面的作用，以及在多危險環境下對電力系統的風險評估。

(3) 關注區域電網的管理和治理，並分析如何提升決策者的應對能力，以確保系統穩定運轉。

#### 二、主要相關論文

(1) ID: 10198 「浙江省低頻傳輸技術應用」(中國)

(2) ID: 10433 「創造可持續的國家電力基礎設施，同時保持電網的可靠性和韌性」(美國)

(3) ID: 11576 「提高配電網的氣候韌性」(印度)

### C2 - 電力系統運轉與控制 (Power System Operation and Control)

共有 109 篇論文

PS1. 應對極端/不可預測事件的運轉韌性 (Create Operational Resilience to Extreme/Unpredictable Events) (30 篇)

### 一、內容重點

- (1) 探討電力系統在面對極端事件或不可預測情況時，如何提高其運轉韌性。涵蓋應急調度、供電管理以及提升電網韌性的方法。
- (2) 分析涉及極端氣候下的電力網絡操作，以及地磁干擾對電力變壓器的影響與應對策略。
- (3) 研究如何利用先進技術如機器學習、人工智能和神經網絡技術來增強系統恢復能力。

### 二、主要相關論文

- (1) ID: 10214 「考慮多樣化用戶需求和韌性增強的應急調度和供電策略」(中國)
- (2) ID: 10440 「在電力市場運營中的氣候和運營不確定性：隨機節點充裕定價方法」(美國)
- (3) ID: 10872 「雪天條件下光伏發電預測技術的進展」(日本)

---

PS2. 考慮能源轉型的系統運營與控制變化 (Changes on System

## Operation and Control Considering the Energy Transition)

(45 篇)

### 一、內容重點

- (1) 探討在能源轉型背景下，電力系統運轉與控制的變化。包括變頻控制、分佈式能源整合、主動網絡控制、儲能技術的應用等。
- (2) 分析全球多地案例，特別是如何應對高比例的可再生能源接入對系統穩定性的影響。
- (3) 強調通過數字化、智能化技術來提升電網運轉效率及穩定性，例如運用機器學習和人工智能來優化電力負荷管理與預測。

### 二、主要相關論文

- (1) ID: 10446 「大規模可再生能源對電力系統的影響與建議」(美國)
- (2) ID: 10675 「南非電力系統中的可變可再生能源 (VRE) 對系統慣性的影響」(南非)
- (3) ID: 11574 「針對區域光伏發電的中壓分佈式能源預測」(馬來西亞)

---

PS3. 電力系統中韌性作為發展的關鍵標準 (Resilience as

## Pivotal Criterion for System Development) (34 篇)

### 一、內容重點

- (1) 研究如何在面對氣候變化和極端氣象事件時，提升電力系統的運轉韌性。
- (2) 分析技術如頻率響應控制、電網優化策略、以及電網恢復能力對於保證系統穩定的重要性。
- (3) 探討新的技術框架和數字化解決方案，幫助提升系統在極端條件下的恢復與持續運轉能力。

### 二、主要相關論文

- (1) ID: 10929 「可理解的警報文本分群技術及其在實時支持中的應用」(加拿大)
- (2) ID: 11397 「2021 年約旦停電事件案例研究：電廠恢復能力提升」(約旦)
- (3) ID: 11636 「對重大擾動的分析及其對系統穩定性和可靠性的影響」(阿聯酋)

C3 - 電力系統的可持續性與環境性能 (Power System Sustainability and Environmental Performance) 共 40 篇

---

PS1. 電力系統發電、輸配電基礎設施中的公眾接受度與利益相關者參與 (Public Acceptance and Stakeholder Engagement in Power System Generation, Transmission & Distribution Infrastructures) (10 篇)

**一、內容重點**

- (1) 探討如何透過利益相關者的參與和公眾接受度，促進電力基礎設施項目的順利實施。
- (2) 強調在電網發展和傳輸基礎設施中，通過結合社會影響評估、自然包容設計等方法，達成與生態系統的和諧共存。
- (3) 涉及不同地區的案例研究，特別是在水電站去除和可再生能源設施的公共認可方面。

**二、主要相關論文**

- (1) ID: 10515 「協調自然的交響曲：生物多樣性作為公共接受的有力工具」(荷蘭)
- (2) ID: 10669 「在黑山電力傳輸網絡設施中的公眾接受度研究」(黑山)
- (3) ID: 10938 「結合社會影響和關係評估的定期利益相關者感知地圖」(巴西)

## PS2. 氣候變化與電力系統影響的綜合方法 (Climate Change and Impact on Power System, a Holistic Approach) (20 篇)

### 一、內容重點

- (1) 探討氣候變化對電力系統的多方面影響，並提出應對措施以提高電網的韌性與適應能力。
- (2) 涵蓋氣候變化對光伏發電、電網基礎設施如變電站和傳輸網絡的具體影響，並提出應對氣候風險的設施改進策略。
- (3) 強調氣候變化的極端天氣條件如洪水、颶風等對電力系統穩定性和運營的威脅。

### 二、主要相關論文

- (1) ID: 10381 「影響義大利能源系統的未來極端條件的多災害方法」(義大利)
- (2) ID: 10750 「氣候變化對能源系統規劃的影響」(瑞士)
- (3) ID: 11488 「應對氣候變化下電力傳輸基礎設施的洪水災害風險管理：來自莫科亞災難的教訓」(哥倫比亞)

## PS3. 供應鏈中的可持續性起步 (Sustainability Starting for the Supply Chain) (10 篇)

## 一、內容重點

- (1) 探討供應鏈中可持續性的提升，從產品的設計、原材料的選擇到生產過程的碳足跡管理。
- (2) 關注如何通過循環經濟設計和綠色採購來促進電力系統設備的可持續性，並優化高壓設備的使用壽命。
- (3) 分析減少電力基礎設施建設中對環境的影響，尤其是碳排放和水資源消耗。

## 二、主要相關論文

- (1) ID: 10287 「針對高壓設備的循環經濟設計」(法國)
- (2) ID: 11078 「鑑定減少儲能系統生命周期碳排放的關鍵因素」(日本)
- (3) ID: 11303 「網絡投資的範疇 3 溫室氣體排放處理平台」(比利時)

## C4 - 電力系統技術性能 (Power System Technical Performance)

共 123 篇論文

PS1. 能源轉型中的電力系統動態分析：挑戰、機遇與進展

(Power System Dynamic Analysis in the Energy Transition: Challenges, Opportunities and Advances) (40 篇)

## 一、內容重點

- (1) 探討能源轉型背景下，電力系統動態分析的挑戰與機遇，特別是高比例可再生能源接入後系統穩定性和控制的影響。
- (2) 涵蓋變頻器、電池儲能系統 (BESS)、直流高壓輸電 (HVDC) 和混合能源系統的互動，以及動態穩定性評估。
- (3) 強調使用數值模擬技術和協同仿真方法，分析可再生能源接入下電力系統的動態行為。

## 二、主要相關論文

- (1) ID: 10102 - 風電與太陽能大規模引入對北歐電力系統動態的影響 (北歐國家)
- (2) ID: 10383 - 可再生能源高比例接入下的電力系統強度動態評估 (義大利)
- (3) ID: 10457 - 釋放變頻器潛能以提高電網可靠性 (美國)

PS2. 能源轉型中的電能質量 (PQ) 和電磁兼電容性 (EMC) 分析：挑戰、機遇與進展 (Power Quality (PQ) and Electromagnetic Compatibility (EMC) Analysis in the Energy Transition: Challenges, Opportunities and Advances) (40 篇)

## 一、內容重點

- (1) 研究能源轉型過程中，電能質量和電磁兼容性的挑戰與應對策略，尤其是在風能和太陽能等可再生能源接入後的影響。
- (2) 涵蓋諸如諧波、頻率變化、電壓不平衡等電能質量問題，並提出相應的改進方法。
- (3) 使用先進的仿真工具來評估和預測電磁干擾對電力網絡的影響。

## 二、主要相關論文

- (1) ID: 10293 - 陸上風電場諧波分析的靈敏度分析方法 (法國)
- (2) ID: 10452 - 負載組成對系統諧波阻抗特性的影響 (美國)
- (3) ID: 10794 - 惡劣環境中高頻輻射發射的原位測量方法 (瑞典)

### PS3. 絕緣協調與雷電干擾分析：挑戰、機遇與進展

(Insulation Co-Ordination and Lightning Interference Analysis: Challenges, Opportunities and Advances) (43 篇)

## 一、內容重點

(1)探討電力系統中的絕緣協調和雷電干擾問題，尤其是高壓電纜和變電站設備的保護和可靠性提升。

(2)涵蓋雷電干擾、瞬態過電壓、變壓器絕緣性能評估等內容，並提出改進絕緣保護和減少過電壓的方法。

(3)強調高頻雷擊事件對輸電網絡和基礎設施的影響，並提出具體的技術解決方案。

## 二、主要相關論文

(1)ID: 10278 - 均勻土壤電阻率下雷擊頻率對接地網有效面的影響（埃及）

(1)ID: 10385 - 汙染地圖和設計優化提高輸電可靠性：義大利經驗（義大利）

(1)ID: 10949 - 清潔空氣和 SF6 氣體絕緣變電站中的瞬態過電壓分析（巴西）

## C5 - 電力市場與規範 (Electricity Markets and Regulation) 共

有 61 篇論文

PS1. 韌性市場及其規範體制的特徵 (Characteristics of a Resilient Market and its Regulatory Regime) (20 篇)

### 一、內容重點

(1) 探討如何設計具有韌性的電力市場，以應對外部衝擊，確保市場的穩定運轉和技術創新。

(2) 研究市場規範如何促進可再生能源整合與技術進步，並確保市場效率和公平性。

(3) 涉及全球不同地區的案例研究，特別是在面對能源轉型中的市場調節和治理方面的挑戰與機遇。

### 二、主要相關論文

(1) ID: 10506 「未來電力市場設計以確保穩定和有效運營」(荷蘭、美國、愛爾蘭、印度、丹麥)

(2) ID: 11236 「新加坡批發電力市場中的臨時價格上限分析」(新加坡)

(3) ID: 11371 「印度負荷調度中心卓越和良好治理的標準：印度 LDC 卓越獎的經驗」(印度)

## PS2. 針對移動目標的未來準備 (Preparing for the Future with Moving Targets) (30 篇)

### 一、內容重點

- (1) 探討在能源轉型背景下，如何應對電力市場中的不確定性，並準備應對快速變化的需求。
- (2) 分析市場結構、價格機制、以及配電網整合技術的演變，特別是為促進可再生能源的穩定接入而進行的創新設計。
- (3) 強調通過政策和規範來支持能源轉型，包括碳定價、市場聯結、以及儲能技術的應用等。

### 二、主要相關論文

- (1) ID: 10242 「電力-碳耦合市場中的猜測變動均衡：全場景可行的混合整數規劃」(中國、英國)
- (2) ID: 10466 「分佈式能源提供網絡服務的傳輸與分配協調架構」(美國)
- (3) ID: 11072 「虛擬電力購買協議在俄羅斯電力市場中支持碳中和投資的應用」(俄羅斯、美國、挪威)

## PS3. 新興市場及其形式 (Emerging Markets and Forms of Markets)

(11 篇)

### 一、內容重點

(1) 探討隨著技術進步和政策變革，新興電力市場的發展，包括區塊鏈技術在電力市場中的應用。

(2) 研究儲能、氫能等新技術如何融入現有電力市場架構，並帶來新的市場機會。

(3) 探討分佈式能源資源 (DER) 在批發電力市場中的角色變化及其經濟效益。

### 二、主要相關論文

(1) ID: 10470 「為電池儲能系統進行自動市場競價」(美國、德國、義大利)

(2) ID: 10959 「用於生產氫能的電力認證」(巴西、德國)

(3) ID: 11822 「東盟跨境電力交易：從 LTM-PIP 和 LTMS-PIP 中學到的經驗教訓」(泰國)

## C6 - 主動配電系統與分散能源資源 (Active Distribution

Systems and Distributed Energy Resources) 共有 72 篇論文

PS1. 配電網靈活性管理 (Flexibility Management in Distribution Networks) (37 篇)

### 一、內容重點

- (1) 探討如何通過靈活性管理來提高配電網的韌性與效率，尤其是應對電動車、能源儲存系統等新技術帶來的需求和挑戰。
- (2) 研究市場機制與靈活性資源在不同國家和地區中的應用，包括通過分散式能源資源 (DERs) 來提供電壓控制和壅塞管理等服務。
- (3) 探討電網規劃、需求側響應及分散式能源整合如何提升系統的靈活性與恢復能力，特別是在面對極端氣候和電力需求變化時的應對策略。

### 二、主要相關論文

- (1) ID: 10244 「應用於網絡成形變流器的 50MW/100MWh 能源儲存系統」(中國)
- (2) ID: 10392 「義大利馬焦雷湖綠色港口案例：再生能源與電池儲能結合，用於電動渡輪充電」(義大利)
- (3) ID: 10409 「通過家庭需求響應避免分散式發電限電：本地網絡管理案例」(英國)

## PS2. 智慧配電系統的電力電子解決方案 (Power Electronic Based Solutions for Smart Distribution Systems) (21 篇)

### 一、內容重點

(1) 探討在智慧配電系統中，如何應用電力電子技術提升系統穩定性與效率，特別是針對能源路由器、直流微電網和電動車充電基礎設施的研究。

(2) 分析電力電子變流器在黑啟動、電壓調節、故障保護等方面的應用，尤其是在高比例可再生能源接入的情況下，如何維持電網的可靠性。

(3) 研究針對配電網中的故障分析與保護策略，並探索新型半導體斷路器在低壓直流系統中的應用。

### 二、主要相關論文

(1) ID: 10481 「基於廣義三相降頻控制的網絡成形變流器在不平衡條件下的黑啟動操作」(美國)

(2) ID: 10625 「在 Bermeo 變電站應用軟開關點以提升配電系統的可靠性與承載能力」(西班牙)

(3) ID: 10822 「基於虛擬同步發電機的變流器接口發電系統自適應控制系統的綜合研究」(俄羅斯)

---

PS3. 鄉村、孤島與工業電氣化標準、實踐與技術選項 (Rural, Islanded and Industrial Electrification Standards, Practices and Technology Options) (14 篇)

**一、內容重點**

(1) 探討偏遠地區和孤島電網的設計與運轉標準，特別是在可再生能源整合、能源儲存系統應用與微電網的發展方面。

(2) 分析各國和地區的案例，介紹如何通過技術手段提升鄉村和工業電氣化的可持續性與可靠性，並強調在資源有限的情況下，如何有效管理能源資源。

(3) 探討電力系統韌性與恢復能力，特別是在面對極端氣候條件和偏遠地區的挑戰時，如何通過電氣化方案提升系統效率與可靠性。

**二、主要相關論文**

(1) ID: 10482 「Locks 校區微電網設計與模擬」(美國)

(2) ID: 10683 「南非卡拉哈里沙漠的離網電氣化設計：Noenieput 定居點案例」(南非)

(3) ID: 11737 「成功推動社區參與的實踐：微電網和迷你電網的案例」(南非)

D1 - 材料與新興測試技術 (Materials and Emerging Test Techniques) 共有 83 篇論文

PS1. 測試、監測與診斷 (Testing, Monitoring and Diagnostics)  
(52 篇)

### 一、內容重點

(1) 探討如何通過新興測試技術進行電力設備的監測與診斷，特別針對局部放電、氣體分析、振動聲學測量等診斷技術。

(2) 研究應用於高壓電氣設備和變壓器中的新型傳感技術，如超高頻 (UHF) 監測、氣體洩漏測量等，並對新型絕緣材料的耐用性進行測試。

(3) 探討如何在高負載條件下進行局部放電的在線監測及診斷，並分析電力設備中氣體的產生與老化過程。

### 二、主要相關論文

(1) ID: 10166 「用於局部放電檢測的高性能差分聲發射傳感器」  
(中國)

(2) ID: 10249 「動態密封單元中氣體洩漏的差壓測量方法」(瑞士)

(3) ID: 10395 「局部放電測試、測量和診斷：中壓應用中的實例」  
(意大利)

## PS2. 電工技術材料與建模 (Materials for Electrotechnical Purposes and Modelling) (20 篇)

### 一、內容重點

- (1) 研究新型電工材料的絕緣性能、熱老化行為和耐用性，特別是環氧樹脂、氟腈混合物及天然酯的應用。
- (2) 探討使用有限元方法模擬部分放電的檢測電路，以及在絕緣系統中進行污染模擬。
- (3) 分析材料與絕緣液體的界面兼電容性及其對高壓電纜接頭的影響，並研究不同材料的熱老化和降解行為。

### 二、主要相關論文

- (1) ID: 10250 「環氧樹脂中的電樹發展及部分放電特性研究」(中國)
- (2) ID: 10298 「用於變壓器的替代液體：熱老化比較與老化標記關聯」(法國)
- (3) ID: 10856 「天然酯和礦物絕緣油中的混合紙熱應力行為」(巴西)

## PS3. 支持能源轉型的材料 (Materials to Enable the Energy Transition) (11 篇)

### 一、內容重點

- (1) 探討用於替代 SF6 氣體的環保絕緣氣體，分析其在高壓設備中的應用與兼電容性。
- (2) 研究新能源存儲技術，如鋰離子電池和全固態電池，並探討這些技術在電力系統中支持能源轉型的潛力。
- (3) 使用量子力學和機器學習技術，探索新型環保氣體的介電強度和材料性能，推動替代 SF6 氣體的發展。

### 二、主要相關論文

- (1) ID: 10755 「C4-FN 氣體混合物的化學特性及其在高壓設備中的應用」(瑞士)
- (2) ID: 11057 「納米材料在電池和電容器中儲能的最新進展」(日本)
- (3) ID: 11861 「絕緣紙在礦物油與植物油中的介電特性評估：濕度因素的影響」(西班牙)

## D2 - 資訊系統、電信與網路安全 (Information Systems ,

Telecommunications and Cybersecurity) 共有 105 篇論文

PS1. 改善電力系統效率與韌性的 IT/OT 解決方案 (IT/OT Solutions to Improve the Efficiency and Resilience of Electric Power Systems) (64 篇)

### 一、內容重點

(1) 探討如何通過整合資訊技術 (IT) 與操作技術 (OT) 來提升電力系統的運轉效率與韌性。涵蓋雲端編排、人工智慧、物聯網、數位雙胞胎等創新技術的應用。

(2) 研究如何在配電網中實施智能感測技術，並使用數據模型和標準來促進電力資產的數位化轉型與管理。

(3) 應用人工智慧進行預測性維護與資產檢測，以提升電力系統的運作可靠性，並改善遠端監控和故障檢測技術。

### 二、主要相關論文

(1) ID: 10270 「雲端編排在新電力系統配電場景中的探索與實踐」(中國)

(2) ID: 10344 「OMEGA-X: 利用語義互操作性與人工智慧改善電力系統效率的能源數據空間」(法國)

(3) ID: 10565 「整合人工智慧模型和合成影像數據來增強資產檢測與缺陷識別」(美國)

## PS2. 新興應用領域的網路安全及保護能源機構的技術 (Cybersecurity in Emerging Application Domains and Technologies for Securing Energy Organisations) (29 篇)

### 一、內容重點

(1) 探討在多能源基礎設施中應用「網路安全環路」的安全措施，增強電力系統的韌性與數位防護。

(2) 研究針對電動車充電系統的風險評估方法，分析網路安全風險與攻擊威脅，並提出風險緩解措施。

(3) 使用雲端技術進行保護系統管理，並採用基於屬性的訪問控制機制來保障電力系統中的網路安全性。

### 二、主要相關論文

(1) ID: 10401 「針對多能源基礎設施的網路安全環路」(義大利)

(2) ID: 10656 「進階遠程工程平台在電力網中的應用」(愛沙尼亞)

(3) ID: 11228 「在 AWS 雲端實施保護管理系統的經驗與安全標準」  
(秘魯)

PS3. 通過可靠、可擴展、高效的電信網絡應對能源轉型的挑戰  
(Meeting the Challenges of Energy Transition with Reliable, Scalable, and Efficient Telecommunications Networks) (12 篇)

### 一、內容重點

(1) 探討如何在能源轉型背景下建立可靠且可擴展的電信網絡，特別是應用 5G、MPLS-TP、光纖網絡等技術來提升電力系統的通訊能力。

(2) 研究量子密鑰分配技術在 MPLS-TP 流量加密中的應用，並分析該技術在電力基礎設施中的實施挑戰。

(3) 探討軟體定義網絡 (SDN) 作為管理數位變電站的替代方案，並研究其在電力通訊網絡中的應用。

### 二、主要相關論文

(1) ID: 10101 「探索商業 5G 獨立網絡在虛擬故障通報中的可靠性」  
(芬蘭)

(2) ID: 10758 「MPLS-TP 流量加密的量子密鑰分配應用」(瑞士)

(3) ID: 11209 「在數位變電站中實施軟體定義網絡作為高效流量管理的替代方案」(哥倫比亞)