



檢驗技術簡訊 90

INSPECTION TECHNIQUE

「專題報導」或「儀器介紹」 第 90 期

2026 年 4 月出刊

每季出刊 1 期

◆ 專題報導

風電設施關鍵零組件耐震性能驗證

財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心 研究員
柴駿甫、黃百誼、徐瑋鴻、林凡茹

國內首例 CNS 62933-5-2 附錄 C BESS 大型燃燒測試案例分析

工研院量測中心 工程師 宋信諺
工研院量測中心 工程師 王鍾元
工研院量測中心 副工程師 楊志輝
工研院量測中心 經理 顏鈺庭
標準檢驗局檢驗技術組科長 簡任技正 林良陽

◆ 儀器介紹

直流斷路器溫升、過負載試驗機儀器介紹

電氣技術科 技士 李定安

出版資料

出版單位 經濟部標準檢驗局檢驗技術組

聯絡地址 臺北市中正區濟南路 1 段 4 號

聯絡電話 02-23431700 分機 3129

傳 真 02-23921441

電子郵件 allen.yen@bsmi.gov.tw

網頁位置

<https://www.bsmi.gov.tw/wSite/lp?ctNode=8849&CtUnit=325&BaseDSD=7&mp=1>

發行人 黃志文

工作小組

主 持 人 楊禮源

召 集 人 李瑋堉

總 編 輯 顏士雄

編 輯 張家維（化性技術領域）

林妤珊（綠能技術領域）

陳明峰（電磁相容領域）

昌衛利（物性技術領域）

黃舜國（電氣領域）

總 校 訂 顏士雄

網頁管理 黃勝雄 吳文正

印 製 顏士雄

G P N 4710003764

專題報導

風電設施關鍵零組件耐震性能驗證

財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心 研究員 柴駿甫、黃百誼、徐瑋鴻、林凡茹
一、前言

再生能源為我國達致淨零碳排與能源轉型之關鍵策略之一，多年前定調以太陽能與風電為主軸發展至今，於 2024 年達成再生能源發電裝置容量超越 20 GW 之里程碑，其中有 18.5% 為風力發電，如圖 1 所示。然而臺灣特有之颱風及地震等天然災害，使風力機與其支撐結構之設計皆需多方考量，為此財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心（以下簡稱國震中心）持續參與標準、指引之制定與建議，目前 CNS 15176-1 風力機—第 1 部：設計要求[1]以及 CNS 61400-3-1 風力發電系統—第 3-1 部—固定式離岸風力機設計要求[2]等國家標準已納入離岸風場設計地震分析流程與地工調查，提供開發商與工程單位設計依據。

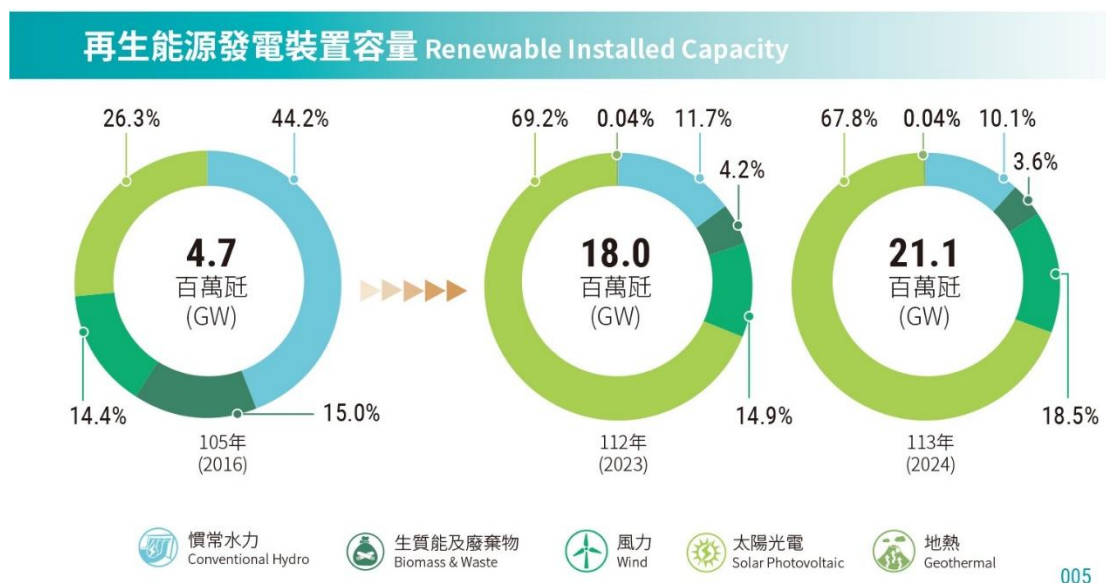


圖 1 再生能源裝置容量統計[3]

二、風電設施關鍵零組件耐震性能驗證

目前國內外相關設計規範於地震議題上多著墨於基礎耐震設計，其中又以場址調查與液化潛勢評估為重，支撐結構之耐震設計則透過地震危害度分析評估不同服務狀態與風險下之地震載重，以檢核支撐結構強度是否可抵禦設計地震力。惟支撐結構以外，風電設施內諸多關鍵零組件一旦震損，亦有可能影響發電穩定性，故於設計階段透過測試等方式確保關鍵零組件具備充足耐震性能至關重要，尤其風力機支撐結構為有效擷取高空中穩定豐富之氣流，通常設計為高瘦之塔型，近似於單自由度懸臂結構，因質量集中於頂部風力機機艙處，因此易產生傾覆彎矩，不若一般建築物強固。相關規範或標準中鮮有針對風電

設施關鍵零組件之耐震驗證要求，研究文獻亦相對稀缺，僅在國際電工委員會(IEC)再生能源應用設備標準認證系統(IECRE)之可操作文件(Operational document)中可見蛛絲馬跡。該系統提供風力機組件驗證、原型驗證與型式驗證計畫(IECRE OD-501)，其範圍不限於特定尺寸、類型、陸域或離岸風力機，內容描述與設計、測試、製造各階段的驗證評估程序，並引用其他標準與技術要求以確保電力網路的安全性及可靠性，其中子文件：再生能源認證機構進行主要電氣元件的合格性評估與認證(OD-501-7)，描述主要電子零組件(Main electrical components)之驗證方法，對象包含發電機、變壓器、轉換器、開關裝置與保護裝置等[4]。OD 501-7 中並未直接要求主要電子零組件進行耐震測試驗證，而是需於設計基準(Design basis)中載明外部環境條件，若專案判定需考量地震條件，則應於設計基準中提出；另一方面，該文件要求各零組件依所列適用標準進行設計與測試，並提交相應測試報告，因此是否包含耐震測試取決於設計基準中所選用或引用之標準與要求。在 OD 501-7 內設計評估(Design evaluation)所指定之標準中，變壓器對應之 IEC 60076 [5] 與高壓開關裝置對應之 IEC 62271-207 [6]及 IEC TR 62271-300 [7]系列產品標準包含耐震測試，並引用 IEC 60068-3-3 [8]或同系列環境測試標準為測試方法。IEC 60068-3-3 為耐震測試指南，提供原則性指導與測試流程說明，因此未有固定之測試參數，使用者需依據地震環境條件與標的物及其支撐結構之特性訂定測試振幅，流程如圖 2 所示，其中 K 為超高因子(Superelevation factor)，代表地表加速度經支撐結構增幅之倍率，其值由標的物安裝於地面或高剛性支撐之 1.0 到低剛性支撐之 3.0 不等 [8]。

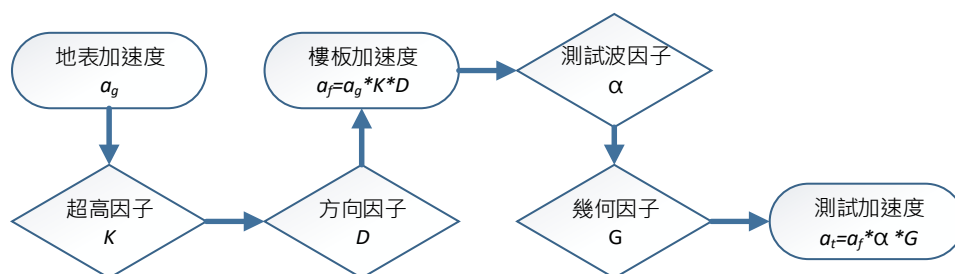


圖 2 IEC 60068-3-3 計算振幅流程

前文說明設計標準中對風電設施關鍵零組件耐震測試之相關內容，然因缺乏監測資料，因此對於零組件所受到的真實振動反應並不清楚，難以合理訂定測試參數，而執行試驗為獲取第一手研究資料之策略之一。美國加州大學聖地亞哥分校(UCSD)於 2009 年曾執行 65 kW 風力機足尺模型振動台試驗，該風力機含塔柱高 22 m、總重約 11 噸，對塔柱結構反應動態分析與相關標準之更新有卓越貢獻[9]。然隨著風電蓬勃發展，風力機之尺寸與重量皆快速增長，如今已難以執行這般全模型實體試驗。而國震中心在經濟部標準檢驗局、金屬工業研究發展中心與台朔重工的支持下，利用約 24 噸重的 660 kW 退役機艙結合模擬塔柱反應，解決逾 40 米高支撐結構難以執行實體試驗之痛點，執行如圖 3 所示之風力機機艙整機振動台試驗，得以記錄各零組件於想定人工地震激振下之真

實振動量。



圖 3 機艙整機振動台試驗。

於整機振動台試驗中可見，機艙內部零組件之振動反應以圖 4 所示之機頂控制器最為顯著，其乃以懸臂形式之 L 型角鋼支架支撐金屬盤體，因此前後向（X 向）剛性較弱，底部與頂部加速度反應峰值放大倍率即可達 2 倍之譜、若與轉向法蘭的反應相比較則達 3 倍左右，由於振動台運動乃模擬塔柱頂端（轉向法蘭）反應，若加計塔柱之增幅，則地表加速度至零組件實際之增幅倍率超過 5 倍。此外，齒輪箱由懸吊裝置支撐、並以傳動軸與發電機及主轉軸相連，皆非剛性固定於機艙主結構上，因此垂直向與軸向反應增幅倍率亦較其他零組件為大。

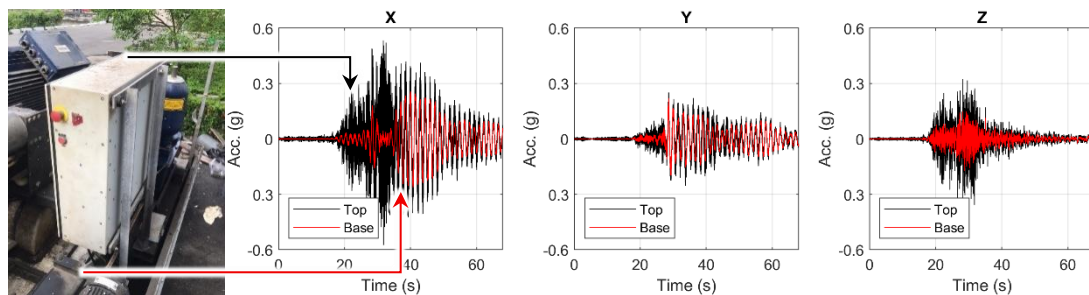
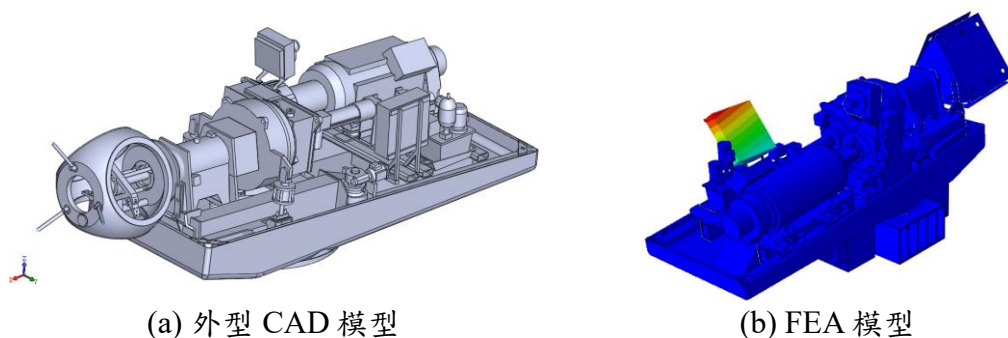


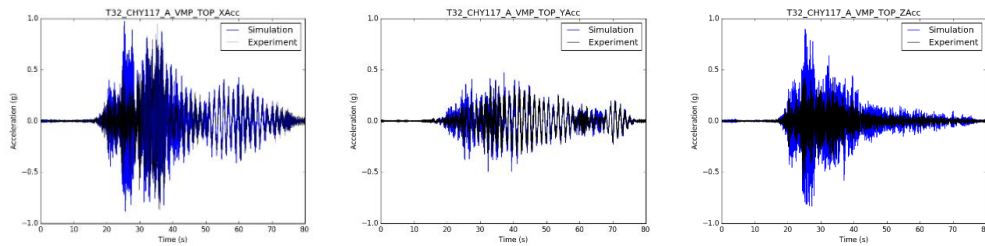
圖 4 機頂控制器頂部與底部振動反應。

另一方面，考量到未來大型零組件實體測試不易，本團隊意欲發展數值模擬技術，故透過 3D 掃描方式取得機艙外型三維電腦輔助設計(CAD)模型（圖 5 (a)），並轉換為有限元素分析(FEA)模型（圖 5 (b)）。雖然無法完整取得精細之材料參數、內部構造與邊界條件等參數，但透過技術文件等文獻盡可能補足模型細節，並利用試驗所得之零組件振動特性校準數值模型，則機頂控制器頂部模擬與實驗數據比較如圖 5 (c)所示，可見儘管資料並不完整，但透過上述流程仍可獲取可信之模擬成果。



(a) 外型 CAD 模型

(b) FEA 模型



(c) 機頂控制器頂部模擬與實驗數據比較

圖 5 機艙數值模型與模擬結果。

三、結論

風力發電在我國能源轉型政策中扮演要角，然欲確保其中關鍵零組件不受颱風與地震等天災侵擾，需更多數據與研究支持。在獲贈退役風力機機艙的機緣下，該試驗應為首次以真實機艙執行振動台試驗之案例，有助於釐清機艙內部零組件之振動特性與互制行為，並識別具有震損風險之關鍵零組件。經由風力機機艙整機振動台試驗，可見 IEC 60068-3-3 標準所建議之超高因子未必能涵蓋風電設施關鍵零組件之真實振動增幅倍率。另一方面，風力機的發展一日千里，單機發電容量從二十年前不到 1 MW 至今已跨越 15 MW，對持續大型化的關鍵零組件執行振動台耐震測試驗證之困難度與成本亦不斷提昇，為確保風電設施關鍵零組件耐震安全，本文提供新的驗證路線，其流程如 6 所示，在可建立可靠數值模型之前提下，透過數值模擬逐次分析塔柱、機艙支撐結構乃至零組件之受震反應，據以獲取合理之測試參數，再對零組件或其元件裝置等進行耐震測試，可兼顧驗證需求與可行性。

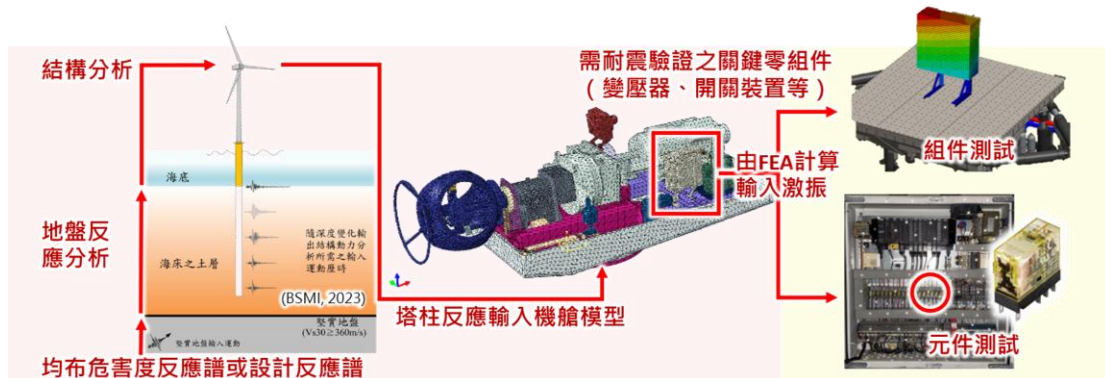


圖 6 結合模擬與測試之流程圖。

四、參考文獻

1. CNS 15176-1:2018，風力機—第 1 部：設計要求
2. CNS 61400-3-1:2023，風力發電系統—第 3-1 部—固定式離岸風力機設計要求
3. 經濟部能源署，114 年 8 月 12 日，能源統計手冊，取自：
<https://ea01.moeaea.gov.tw/a0303/02/publication/handbook/>
4. IECRE OD-501-7: 2019 Conformity assessment and certification of Main Electrical Components by RECB.
5. IEC 60076-11:2018 Power transformers - Part 11: Dry-type transformers.

6. IEC 62271-207:2023 High-voltage switchgear and controlgear - Part 207: Seismic qualification for gas-insulated switchgear assemblies, metal enclosed and solid-insulation enclosed switchgear for rated voltages above 1 kV.
7. IEC TR 62271-300:2006 High-voltage switchgear and controlgear - Part 300: Seismic qualification of alternating current circuit-breakers.
8. IEC 60068-3-3:2019 Environmental testing - Part 3-3: Supporting documentation and guidance - Seismic test methods for equipment.
9. Ian Prowell et al. (2009). Experimental and Numerical Seismic Response of a 65 kW Wind Turbine. *Journal of Earthquake Engineering*, 13(8), pp. 1172 – 1190.
<https://doi.org/10.1080/13632460902898324>

儀器介紹

直流斷路器溫升、過負載試驗機儀器介紹

電氣技術科 技士 李定安

一、前言：

本局目前將純直流用斷路器列為應施檢驗商品斷路器的特殊例外。斷路器品質之好壞，攸關民眾生命安全，其檢驗標準依據CNS 14816-2：2004低電壓開關裝置及控制裝置-第2部：斷路器[1]。試驗項目有：跳脫極限及特性試驗、絕緣介質特性試驗、機械操作及操作性能試驗、溫升試驗、短路試驗、過電流釋放試驗等。

本文將就特性試驗之溫升試驗內容和試驗設備作介紹，提供該領域檢測技術人員參酌使用。

二、試驗設備：

本局112年度建置直流溫升與過負載跳脫設備如圖1所示，提供電流區間：2 A ~ 3700 A之直流電流，可供一般家用斷路器產品試驗使用。



圖1 直流溫升與過負載跳脫設備

三、試驗內容：

依據CNS 14816-2：2004，試驗內容及參數調整摘述如下：

- (一)第4.7.3節-過電流釋放器之電流設定值：對於具有可調式釋放器之斷路器，電流設定值(或設定之範圍，如適用時)應標示在釋放器或其刻度版(scale)上，此標示可直接用安培數或用電流值的倍數標示在釋放器上。
- (二)第7.2.2節-溫升：斷路器的主電路，包括與其相連的過電流釋放器，應能承受開放熱電流，而溫升不超過規定的極限值(例：與外部連接之端子溫升極限為80 K)。

四、試驗範例

- (一)溫升：樣品安裝示意圖如圖2，設定試驗機輸出電流100A，觀察量測點(端子)之溫升($63.1 - 40.3 = 22.8$ K)，溫升值 22.8 K < 80 K(如表1規定)，試驗結果符合標準規定。

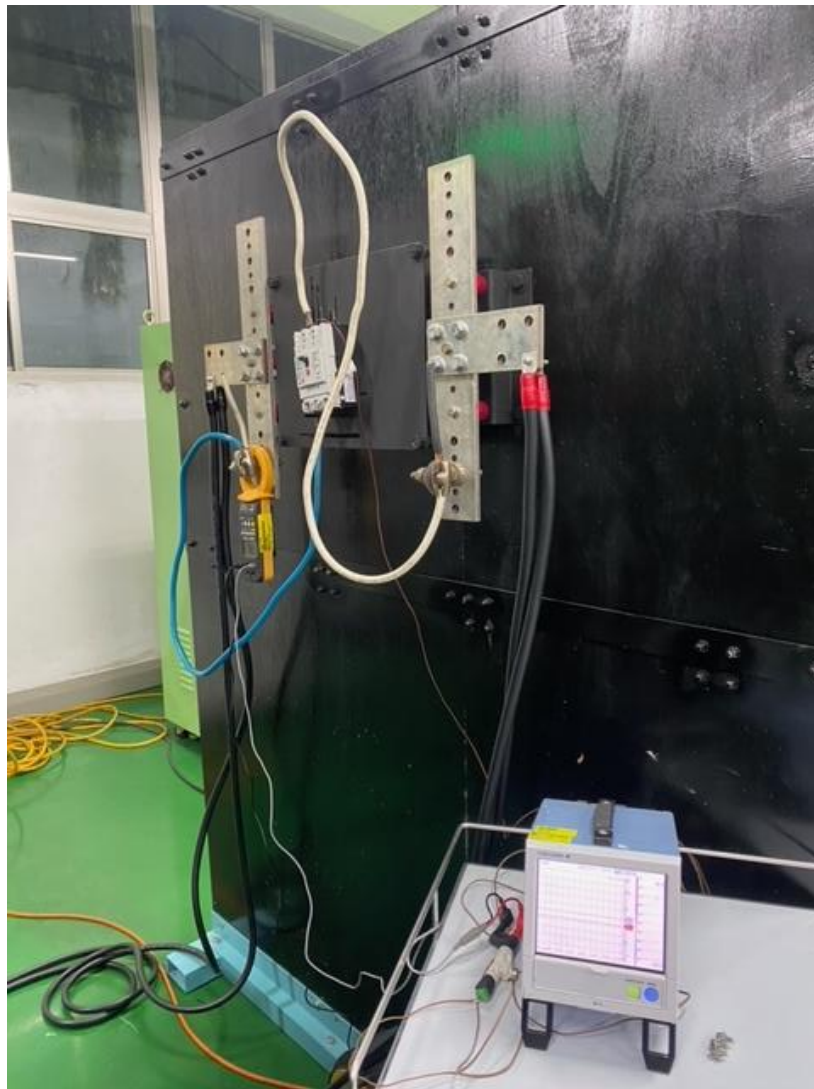


圖2 樣品架設示意圖

表1、端子及可接觸零件之溫升極限值

零件類別	溫升極限 K
— 與外部連接之端子	80
— 人力操作部位：	
金屬的	25
非金屬的	35
— 可觸及但不是手握之零件：	
金屬的	40
非金屬的	50
— 正常使用時不需觸及之零件	
金屬的	50
非金屬的	60

註^(a) 除上述所列零件外，對其他零件不規定極限值，但不應引起鄰近的絕緣材料零件損壞。
 (b) 規定的溫升極限值不適用新樣品，但適用於第 8 節規定的適當試驗順序中之溫升查證。

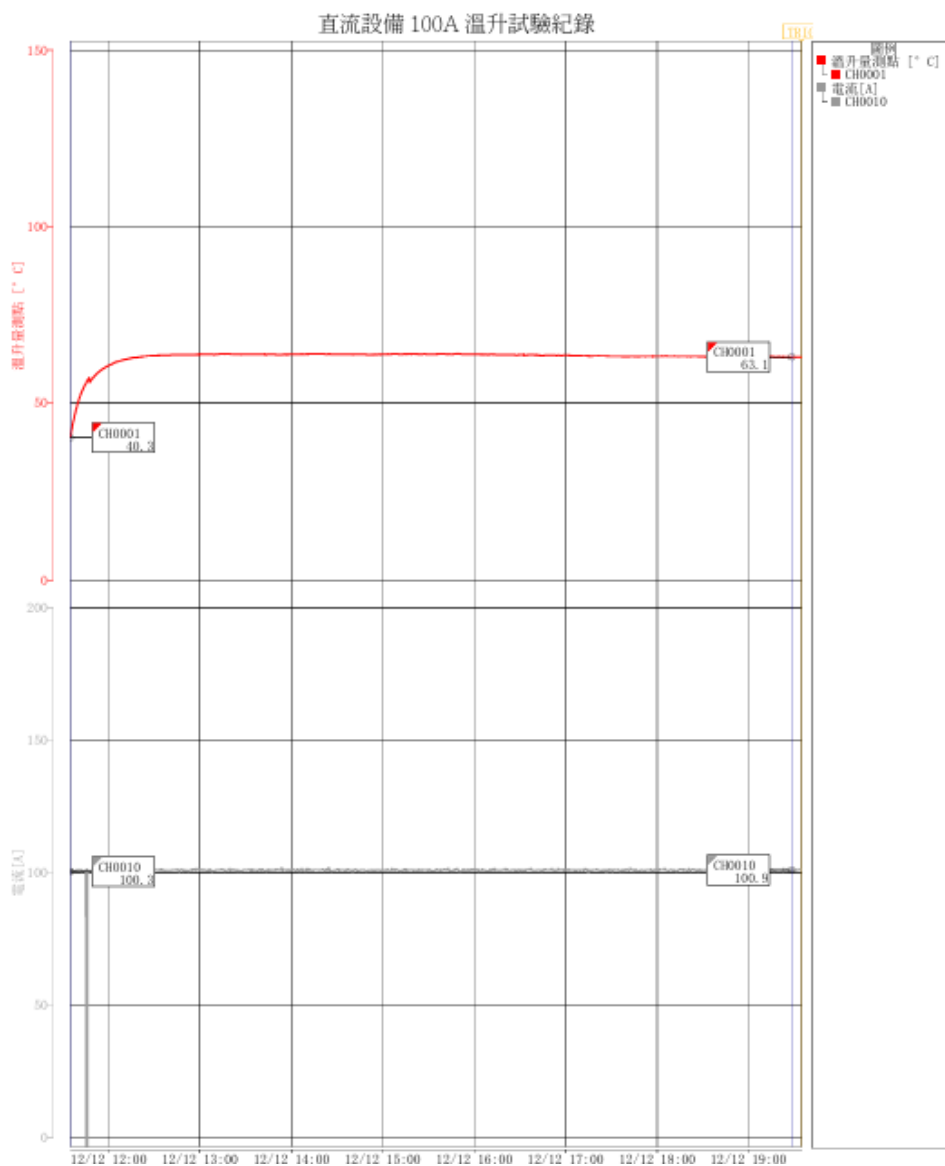


圖3 溫升試驗紀錄波形圖

五、應用

現今日常生活用電以交流電為主，但隨著再生能源如太陽光電及 AI 伺服器用電需求，直流電在日常生活應用日漸廣泛。斷路器在直流電路中執行啟斷，較在交流電路中困難，直流斷路器性能應被驗證，才能確保使用環境、裝置與操作人員的安全。本局目前已具備直流短路試驗、電氣耐久性試驗、溫升、過載跳脫試驗設備，可擴大產品驗證範圍，逐步完善國內直流斷路器檢測能量。

五、參考文獻

- 1.CNS 14816-2：2004，低電壓開關裝置及控制裝置—第2部：斷路器。

國內首例 CNS 62933-5-2 附錄 C BESS 大型燃燒測試案例分析

工研院量測中心 工程師 宋信諺

工研院量測中心 工程師 王鍾元

工研院量測中心 副工程師 楊志輝

工研院量測中心 經理 顏鈺庭

標準檢驗局檢驗技術組科長 簡任技正 林良陽

一、前言

鑒於國內推動綠能政策，再生能源發電占比逐年提升，為減緩再生能源併網對電網造成之衝擊，台電公司於110年推出電力交易平台，採購儲能輔助服務穩定電網。隨再生能源併網率提升，台電公司已上修儲能裝置與採購容量目標至1,000 MW，以符合穩定電網需求。而目前因儲能輔助服務併網申請量已遠大於114年目標，為避免過多儲能容量影響市場秩序，台電公司已暫停受理申請，將於未來視輔助服務需求情況滾動調整。

為因應大型儲能案場建置之安全性驗證需求，標準局於111年8月首次公告「戶外電池儲能系統案場驗證技術規範」（下稱技術規範），作為戶外電池儲能系統案場驗證之依據，並於111年11月公告受理申請戶外電池儲能系統案場自願性產品驗證(Voluntary Product Certification, VPC)，以滿足戶外併網型儲能案場之安全性驗證需求[1] [2] [3]。

依最新版技術規範（114年版），要求併網型儲能案場於115年1月起應執行CNS 62933-5-2 電能儲存系統(EESS)－第5-2部：併網式電能儲存系統之安全要求電化學系統附錄C之大型燃燒試驗，以評估儲能案場安全性[1]。另內政部消防署於111年8月公告，並於114年11月修訂更新「提升儲能系統消防安全管理指引」，亦規定併網型儲能系統之防止延燒性能若經依國家標準CNS/IEC 62933-5-2附錄C或UL 9540A執行大型燃燒測試，並經消防安全設備設計人員評估試驗結果合格者，可縮短消防安全距離[4]。

為提前因應技術規範之儲能系統大型燃燒試驗要求，工研院於114年8月執行國內首次鋰電池機櫃CNS 62933-5-2附錄C(UL 9540A 電池儲能系統熱失控火焰傳播評估測試方法)大型燃燒試驗，包含模組層級(Module Level)及單元系統層級(Unit Level)試驗[5][6]，以建立國內儲能系統燃燒試驗技術與專案驗證對應測試能量，完善儲能系統安全檢驗暨案場專案驗證能量，保障國內大型儲能案場之安全性。

本文將摘要分析工研院執行國內首例CNS 62933-5-2附錄C BESS大型燃燒測試成果，以作為國內未來完備大型燃燒試驗相關檢測能量之參考。

二、試驗方法與實驗設計

本試驗樣品為16顆模組串聯之電池機櫃，電池模組容量約2.6 kWh，電池機櫃容量約41 kWh，試驗電池機櫃規格如下。

表 1 試驗電池機櫃規格

項目	規格
直流電壓	739 V ~ 900 V
安裝容量	41 kWh
試驗容量	21 kWh
最大放電電流	200 A
尺寸	600 mm (W) x 2,000 mm (H) x 700 mm (L)

本試驗於試驗機櫃內放置8個電池模組，並於試驗機櫃旁及對面各設置一機櫃外殼，加熱試驗機櫃內2個起始模組之單電池（模組H4與模組H11），引發起始模組內單電池間熱失控延燒，以評估單一機櫃熱失控下，對於鄰近空櫃、對向空櫃及外牆所造成之影響。



圖1 試驗機櫃內模組設置示意圖

本試驗依據CNS 62933-5-2附錄C（即UL 9540A）[5][6]，量測試驗機櫃、鄰近空櫃、對向空櫃與牆面之溫度，並量測機櫃間走道（含起始模組H4前方及斜前方）及對向空櫃把手處之熱通量，以評估熱傳遞情形。

本試驗採用熱電偶樹量測試驗機櫃鄰近牆面之溫度，熱電偶樹係數個熱電偶計架設於同一垂直線成樹狀，用以量測各高度之溫度變化。本試驗每一熱電偶樹共計13個溫度量測位置。此外，本試驗亦量測鄰近空櫃及對向空櫃中對應起始模組相同位置（模組H4）及上方一模組位置（模組H12），各設置一熱電偶計，每一空櫃內共計2個溫度量測位置。

本試驗溫度及熱通量量測位置如下：

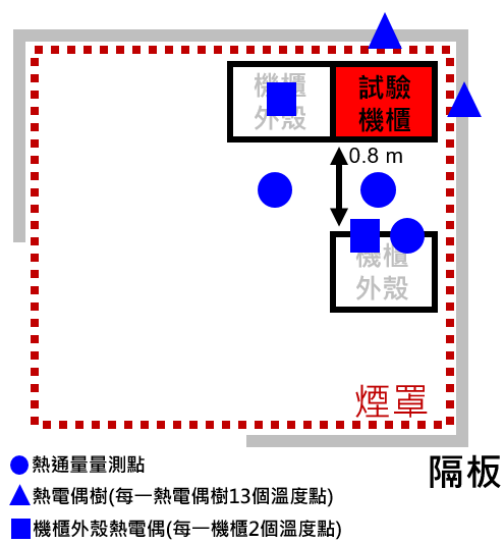


圖2 試驗溫度及熱通量量測位置

本試驗空間設計如下：



圖3 試驗空間設計

三、實驗結果

本試驗加熱2個起始模組之單電池（模組H4、模組H11各加熱2個單電池）引發起始模組內單電池間熱失控延燒，4個起始單電池測得平均熱失控溫度為293.8 °C、平均釋氣溫度為174.0 °C。

另本試驗量測試驗機櫃內非起始模組外殼之溫度，及鄰近空櫃與對向空櫃對應模組H4與模組H12位置之溫度。試驗機櫃內非起始模組外殼最高溫測得828 °C；鄰近空櫃內部溫度最高測得349.5 °C，對向空櫃測得394.4 °C。

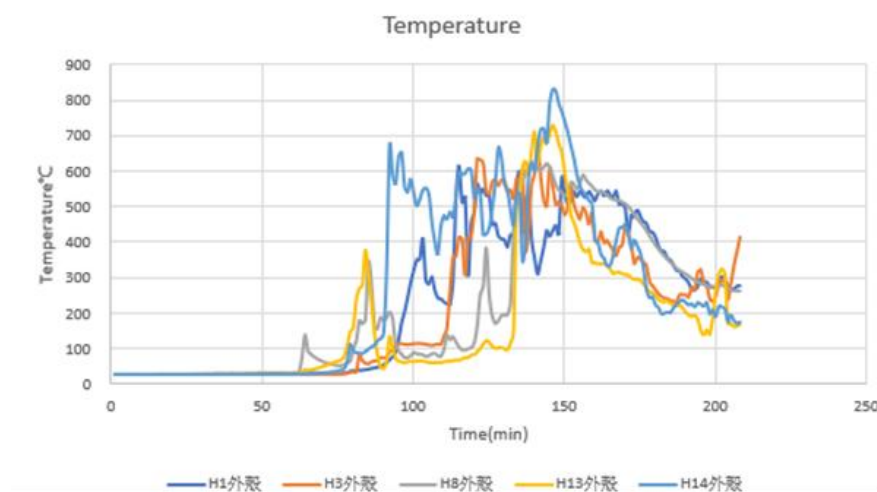


圖4 試驗機櫃內非起始模組外殼溫升圖

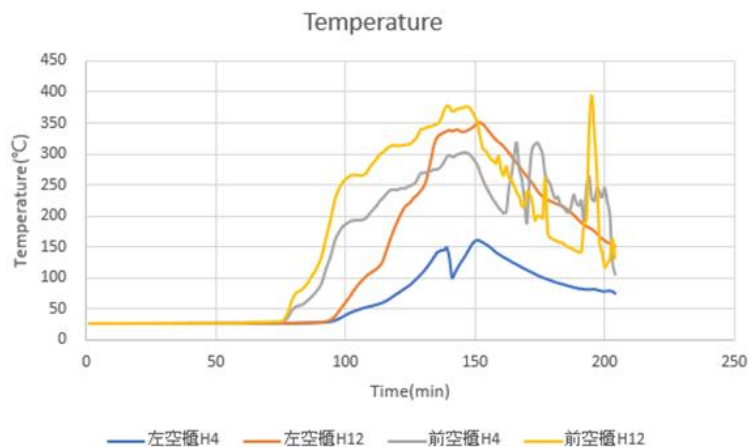


圖5 鄰近空櫃及對向空櫃溫升圖

此外，本試驗量測試驗機櫃後牆及鄰近牆面溫度，每一牆面設置13個溫度點，機櫃後牆最高溫測得352.0 °C、鄰牆測得397.0 °C，皆高於環溫(22 °C)97 °C以上。

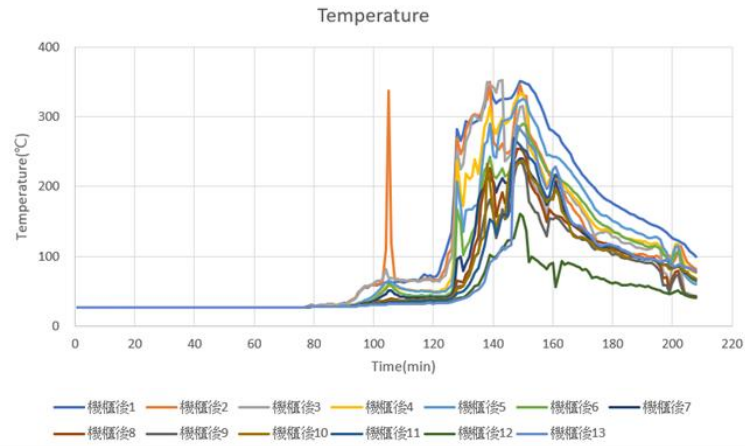


圖6 後牆溫升圖

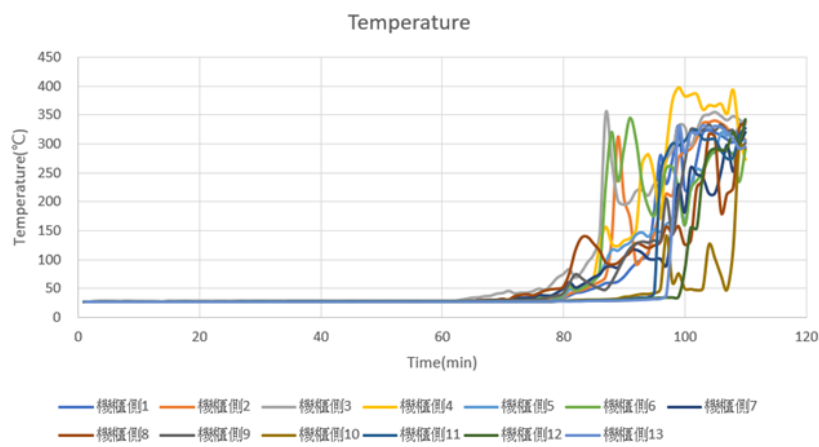


圖7 鄰牆溫升圖

另本試驗亦量測機櫃間走道（含起始模組H4前方及斜前方）及對向空櫃把手之熱通量值，機櫃間走道（模組H4前方）熱通量最高測得 28.9 kW/m^2 ；機櫃間走道（模組H4斜前方）最高測得 21.0 kW/m^2 ；對向空櫃把手處測得 16.4 kW/m^2 ，皆高於人體可承受之熱通量限制(1.3 kW/m^2) [5]。

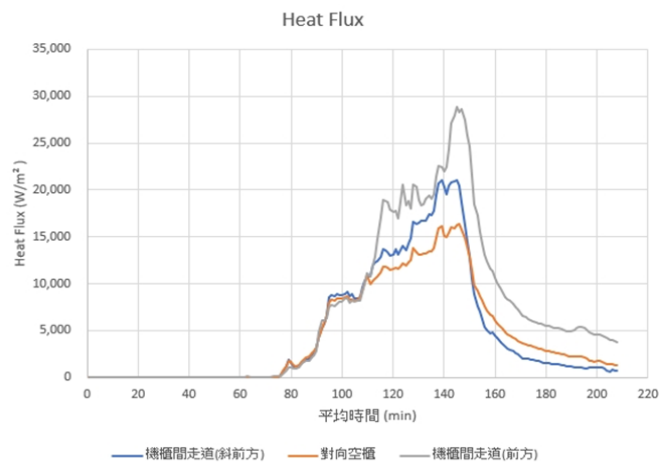


圖8 機櫃間走道及對向空櫃熱通量

本試驗過程觀測到火焰蔓延至機櫃外部如下。



圖9 試驗過程（釋煙）



圖10 試驗過程（明火燃燒）

四、綜合討論

本試驗量測參數包含試驗機櫃內非起始模組外殼溫度、鄰近空櫃、對向空櫃及外牆之溫度、機櫃間走道及對向空櫃把手處之熱通量值等。試驗機櫃內最高溫測得 828°C ，鄰近空櫃最高溫測得 349.5°C ，對向空櫃 394.4°C ，皆高於單電池釋氣溫度 174°C 。牆面溫度最高溫測得 397°C ，高於環境溫度(22°C) 97°C 以上，並觀測到火焰蔓延至機櫃外部。另疏散通道最短距離處最高熱通量值測得 28.9 kW/m^2 ，高於標準要求 1.3 kW/m^2 ，依據UL 9540A單元系統層級(Unit Level)試驗結果判定規則，建議執行安裝層級(Installation Level)試驗，進一步作為儲能系統防火安全距離設計之依據[5]。

本試驗建立國內儲能系統燃燒試驗與專案驗證對應測試能量，完善儲能系統安全檢驗暨案場專案驗證能量，以保障儲能案場安全性。另透過執行全程不干預之鋰電池大型燃燒試驗，使國內得以完整評估鋰電池失效表現，強化國內儲能案場安全建置能力，並配合國內儲能政策推行，完備大型燃燒試驗相關測

試能量。

五、參考文獻

1. 戶外電池儲能系統案場驗證技術規範，114 年，經濟部標準檢驗局。
2. 戶外電池儲能系統案場設計及驗證審查作業要點，111 年，經濟部標準檢驗局。
3. 戶外電池儲能系統案場實施自願性產品驗證相關規定，111 年，經濟部標準檢驗局。
4. 提升儲能系統消防安全管理指引，114 年，內政部消防署。
5. ANSI/UL 9540A, “Test Method for Evaluating Thermal Runaway Fire Propagation in Battery Energy Storage Systems,”2025
6. CNS 62933-5-2 電能儲存系統(EESS)—第 5-2 部：併網式電能儲存系統之安全要求電化學系統。