

EDF 實驗室進行電力變壓器全尺寸內部電弧測試

API ASHWIN PADMANABAN IYER	MK MAËL KERVAREC	AM ANTOINE MAGNIER
SERGI Transformer Protector	SERGI Transformer Protector	SERGI Transformer Protector
France	France	France

摘要

油浸式電力變壓器發生內部電弧故障時，可能導致變壓器發生重大故障，例如災難性的爆炸與火災，進而對人員及廠區設備造成大範圍的實體損害，包括停機及生產損失。全尺寸測試可提供極具價值的資訊，有助於設計及改善爆炸預防策略。2022 年 5 月，SERGI Transformer Protector (SERGI) 在法國電力公司 Électricité de France (EDF) Les Renardières 高壓實驗室，對一部配備 TRANSFORMER PROTECTOR (TP) 爆炸預防系統的電力變壓器進行全尺寸內部電弧測試。雖然 SERGI 過去已進行過此類測試 [1]，但本次測試採用了精度更高的感測器，並在每次測試前後對絕緣油進行溶解氣體分析，同時也更進一步嘗試對氣體產生進行量化。此類測試所面臨的主要挑戰，在於目前沒有針對電力變壓器此類測試的方法制定特定的測試規範。然而，IEC 61869-2023 [2] 及 IEEE C57.13.5 等標準，可以並且確實能為儀用變壓器提供部分參考。但若要將其適用範圍延伸至電力變壓器，則並非簡單直接，主要原因在於電力變壓器可能產生更高的電弧功率。此外，這些標準並未規定可用來判定測試成功的電弧能量或電弧功率閾值，也未規定需要進行多少次重複測試才能表示測試成功。另外，此類破壞性測試的另一項困難，在於必須建立穩定且一致的電弧電壓。電弧電壓的行為會受到不同間隙設定等多項參數影響，因此難以維持一致。電弧電壓會直接影響電弧功率，進而影響變壓器油箱內部所產生的壓力。

一部 7.5 MVA、24/12 kV 的變壓器經過改裝，以供本次測試使用。該變壓器配備了 9 個動態壓力感測器及 2 個靜態壓力感測器、溫度感測器，以及 2 個電弧產生裝置：其中一個安裝於變壓器油箱底部，另一個則安裝於油箱頂部。這些裝置連接至變電站匯流排，透過電弧產生裝置中的保險絲導線產生電弧。電弧電壓可以透過調整電極之間的距離進行改變。本次測試進行了一項前所未有的測試組裝工程，歷時兩週，其中包括安裝管路、油氣分離槽以進行氣體辨識及體積測量、控制櫃，以及油處理設備。

本次共進行 8 次測試，電流及能量等級各不相同，最高能量達 4 MJ；每次測試的電弧持續時間均為 100 ms。基於上述測試，本論文回顧了測試架構，並簡要整理壓力變化

過程以及使用 TP 對變壓器進行降壓所需的時間。在這 8 次測試中，有 6 次測試的電弧 RMS 電流高於 IEC 61869-1 所列出的要求峰值電流，儘管每次測試的持續時間約為 100 ms，而非 300 ms。縮短測試時間是刻意安排的，因為電力變壓器通常配備保護系統，而該保護系統通常會在約 100 ms 的時間範圍內動作。測試結果清楚證明，TP 不僅成功完成了爆炸預防，更重要的是，同一部變壓器在未發生爆炸的情況下，連續完成了 8 次重複性的內部電弧測試。此次全尺寸 TP 測試亦顯示，TP 符合 NFPA 850 [3] 所列出的快速降壓系統相關要求。

關鍵字

電力變壓器全尺寸內部電弧測試、爆炸預防系統、快速降壓系統

前言

電力變壓器可能發生內部短路，進而導致災難性故障，例如油箱破裂及隨後發生火災。雖然此類事故發生的機率很低，但其影響可能相當重大。目前，針對電力變壓器內部電弧，尚無特定的全尺寸測試規範。例如 IEC 61869-1 [2] 等標準適用於儀用變壓器，而儀用變壓器通常在尺寸及額定功率方面均小於電力變壓器。TRANSFORMER PROTECTOR (TP) 是一種被動式機械變壓器快速降壓系統，透過釋放內部電弧事件期間所產生的壓力突波，防止變壓器發生爆炸。

2022 年 5 月，SERGI 於法國電力公司 Électricité de France LME（位於 Les Renardières 的高壓測試實驗室，以下簡稱 EDF）對一部 7.5 MVA 變壓器進行了一系列共 8 次全尺寸內部電弧測試。成功完成的測試取得了壓力資料、TP 啟動時間、TP 降壓時間，以及氣體的體積與種類等資料。測試亦顯示，油枕遮板 TL34 在 8 次測試中均正常運作。TL34 會將油枕內的油隔離，以防止在發生火災時，油枕內的絕緣油持續流入變壓器。

測試架構與資料收集

在測試開始之前，進行了大規模的測試架構建置。SERGI 的測試程序包括在同一部變壓器上重複進行內部電弧測試。TP 系統由降壓腔 (Depressurization Chamber, DC)、爆破片 (Rupture Disk, RD)、排油管 (Oil Drainpipe, ODP)、及油氣分離槽 (Oil and Gas Separation Tank, OGST) 組成，如圖 1 所示。

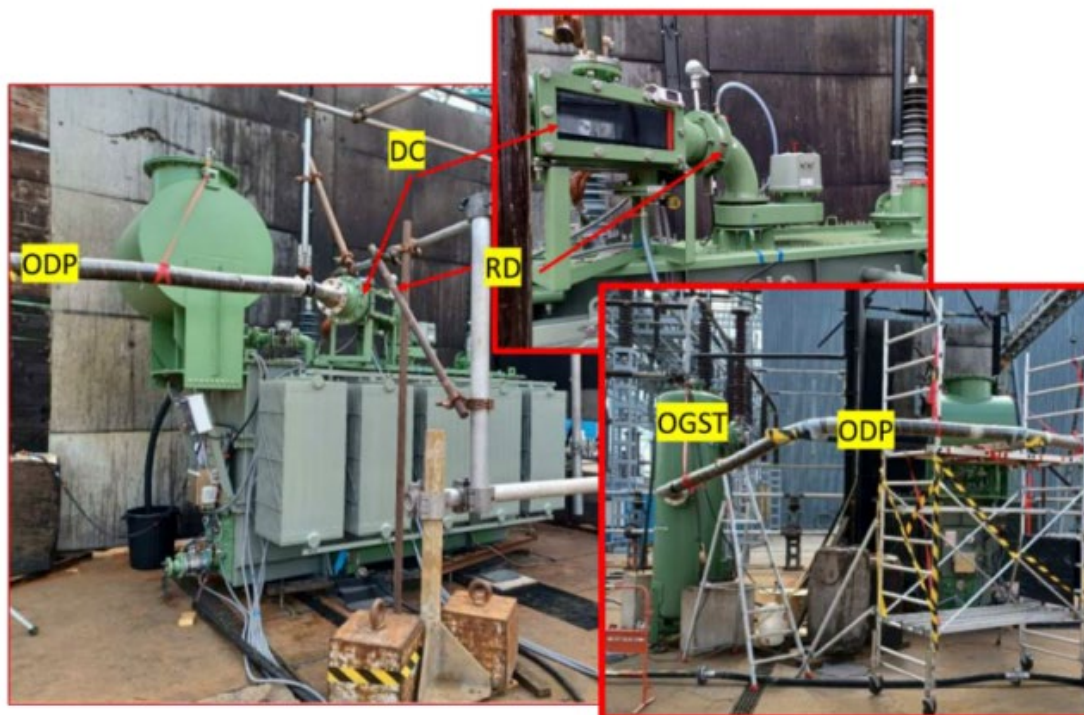


圖 1：EDF SERGI TP 測試架構。

該變壓器經過改裝，以提供兩個可產生電弧的位置。電弧是利用電弧產生裝置啟動。TP 安裝於 PRV 轉接件上，以盡量減少變壓器上額外介面的需求。此外，在變壓器多個位置安裝了 9 個動態壓力感測器 (PCB 113B24 型)，並確保每一面油箱壁至少配置一個感測器。動態及靜態壓力感測器的位置如圖 2 所示。

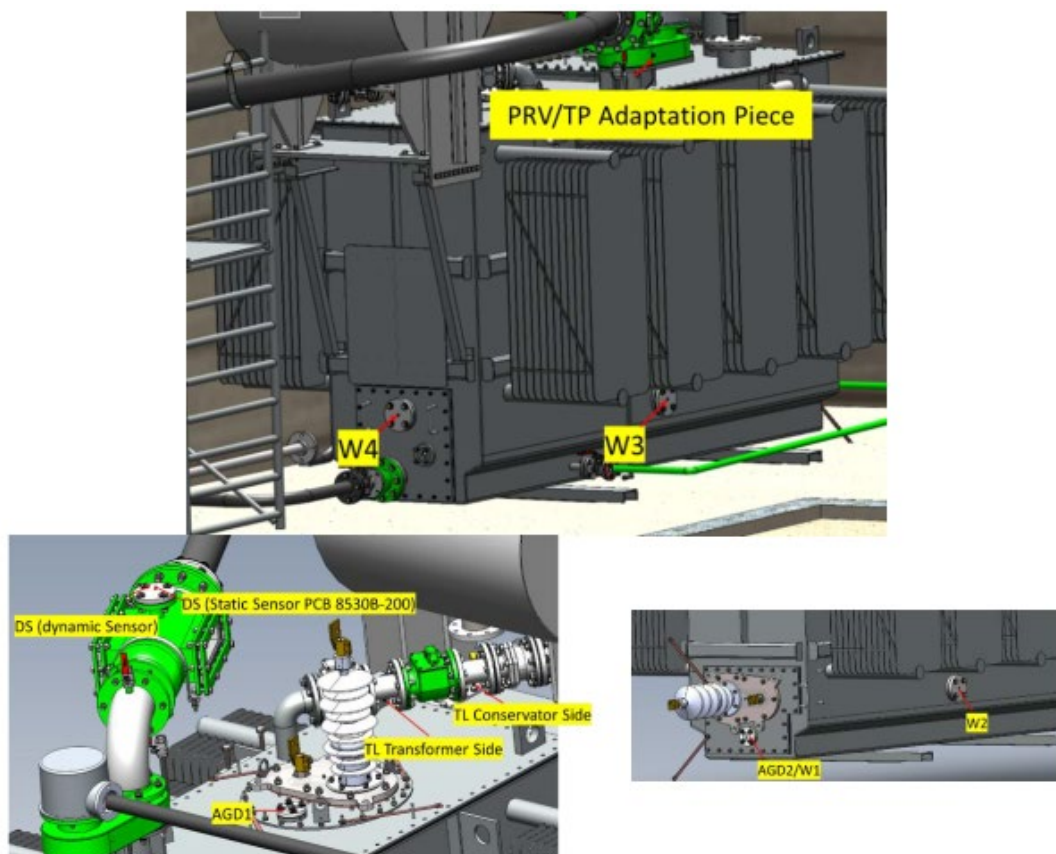


圖 2：9 個動態壓力感測器及 1 個靜態壓力感測器的位置。

除了 9 個動態壓力感測器之外，另配置了 2 個靜態壓力感測器，其上升時間特性與 PCB 動態壓力感測器相近。EDF 提供了一部高速攝影機。此外，使用溫度感測器（K 型熱電偶）測量氣體溫度，其目的是估算所產生的氣體量。最後，資料收集還包括在每次測試前後對絕緣油進行溶解氣體分析，以辨識所產生氣體的種類及數量。需要注意的是，每次進行測試前，所使用的變壓器油都會先經過過濾。為方便透過油液過濾系統，在變壓器與儲油槽之間進行油液交換，建置了一套完整的安裝架構，其中包括一部泵浦及數條配備快速接頭的管路，如圖 3 所示。

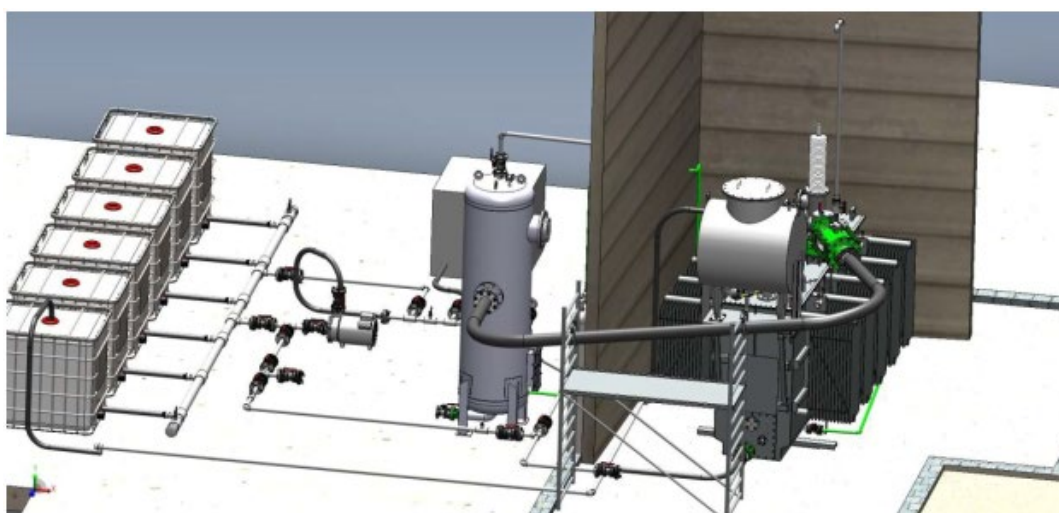


圖 3：測試架構的軟體示意圖。

此外，亦安裝了數個開關，以測量 TP 的啟動時間、油枕遮板 TL34 的動作時間及目視確認 PRV 開關是否啟動。

因此，本次測試量測了大量參數，主要目的是協助改善及驗證 SERGI 的模擬方法。主要量測結果包括：

- 1、 短路能量：此資料由 EDF 高壓實驗室提供，包括實驗室所提供的電弧電壓及電弧電流振盪圖，以及依據 CIGRÉ A2.33 [4] 公式 1 計算的能量及洩漏電流。
- 2、 TP 啟動時間：指 TP 完成啟動所需的時間，透過電弧開始的時間戳與爆破指示器訊號的時間戳之間的差值計算。
- 3、 TP 降壓時間：指壓力下降至 1 barg 以下所需的時間。其量測方式為從電弧開始時間至壓力下降至 1 barg 以下時間的差值。
- 4、 油氣噴流速度：TP 對變壓器進行降壓時，透過降壓室上的觀察窗進行量測，並利用 EDF 提供的高速攝影影像追蹤噴流前緣的位置與移動情形。
- 5、 透過壓力及溫度讀值，並利用理想氣體定律間接測量氣體體積。氣體組成則根據每次測試前後所進行的 DGA 結果進行估算。

本次測試使用一部具代表性的 7.5 MVA/24 kV/12 kV 變壓器。採用 8% 的具代表性阻抗，此數值為此類電力變壓器的典型值，並符合 IEC 60076-5 [5]。變壓器固定於適當位置並進行絕緣，以利電弧形成。除儲油槽之外，幾乎完整的測試架構如圖 4 所示。資料擷取系統設置於變壓器附近，並採用遠端觸發。測試方式是在兩個以銅線連接的電極之間產生電弧。



圖 4：EDF 的完整測試安裝架構。

測試結果與討論

對於每一項測試參數，所獲得的電弧能量各不相同，並發現電弧能量會受到電極之間的距離等因素影響。即使在相同的測試參數下，電弧能量仍會呈現隨機性。鑑於這些測試屬於在同一部變壓器上反覆進行的內部電弧破壞性測試，SERGI 與 EDF 共同合作，謹慎且成功地逐步調整及控制各項測試變數。

Test N°	Test Current			Arc
	RMS Value (kA)	Symmetrical	Duration (ms)	Energy (MJ)
1001	7.6	Yes	99	0.59
1002	10	Yes	100	0.45
1003	15.3	Yes	100	0.41
1004	20.3	Yes	100	0.71
1005	20.3	No	102	0.68
1006	19.9	Yes	99	4.04
1007	15	Yes	100	1.35
1008	15	Yes	100	1.17
Note: the shaded columns are calculated values				

圖 5：EDF 測試報告中的電弧測試參數與電弧能量

由於目前尚無針對快速降壓系統測試方式的相關標準，實驗室與 SERGI 共同評估了此類測試所需的驗收標準。具體而言，評估內容是確認 TP 是否符合根據 NFPA 850 指引 [3] 所制定的兩項特定條件。EDF 所進行的評估結果彙整於圖 6。

References	TP test acceptance criteria	Test n°							
		1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008
NFPA Code 850 Ed.2020	The TP depressurizes the transformer after the occurrence of the internal arc without transformer tank rupture	NA*	NA*	NA*	OK	OK	OK	OK	NA**
	The TP mechanism is passive: i.e., transformer depressurization is triggered by the transient pressure peak generated by the short circuit without the need of an electrical signal, actuator, or sensor.	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
OK: According to the test acceptance criteria NA: Not Applicable * The test neither ruptured the tank nor activated the TP ** A mechanical failure of the arc generation device prevented from validating the test result									

圖 6：EDF 測試結果

前 3 次測試的能量較低，未達到啟動 TP 所需的能量，這與 TP 防止誤啟動的設計理念一致。如測試結果所述，由於電弧能量較低，前 3 次測試中 TP 並未啟動，且變壓器油箱亦未發生破裂。最後一次測試則被認定為不適用，原因是電弧產生裝置 AGD2 中的套管設計存在故障。由於此 AGD2 被視為專用的測試配件，而非變壓器的常規組成部分，因此其故障被認定為不適用於測試結果評估。測試 #1004 至 #1007 均成功使 TP 啟動，並防止變壓器發生爆炸。

因此，EDF-SERGI TP 測試證明，TP 能夠有效地對遭受內部電弧測試的變壓器進行降壓，即使同一部變壓器反覆承受這些負載，TP 仍能有效運作，並符合 NFPA 850 指引 [3] 所列出的兩項條件。

對於 FDS 而言，一項重要的性能參數不僅是防止變壓器爆炸的能力，還包括能否快速對變壓器進行降壓。所需的降壓時間通常取決於變壓器本身，但根據 SERGI 的經驗，300 ms 是一個良好的目標時間。值得注意的是，如圖 7 所示，降壓時間與電弧能量之間呈現某種程度的相關性。對於本次測試所使用的變壓器及其電壓等級而言，典型的電弧能量上限約為 2 MJ [6]。

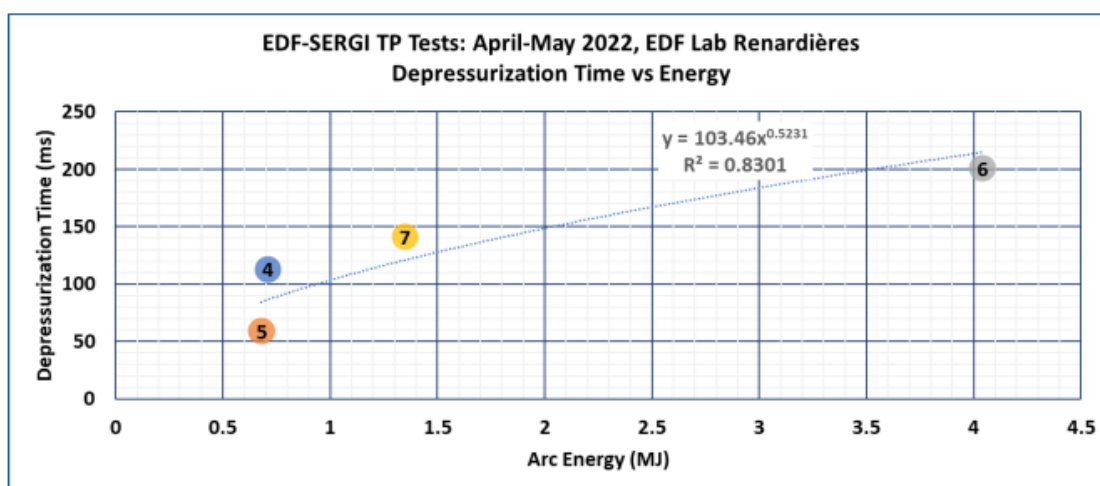


圖 7：測試 1004 (#4) 至 1007 (#7) 的降壓時間

除了降壓之外，要確保快速降壓成功，另一項關鍵特性是啟動時間。在所有測試案例中，啟動時間僅取決於故障位置相對於 TP 的安裝位置。啟動時間的計算方式，是取故障開始時間至爆破指示器訊號開始時間的時間差。如圖 8 所示，啟動時間大致維持在 20-23 ms，呈現近似固定的結果。此結果與壓力波從故障源傳播至 TP 所在位置所需的時間一致，因此證明了 TP 是由第一動態壓力峰值所啟動的事實。

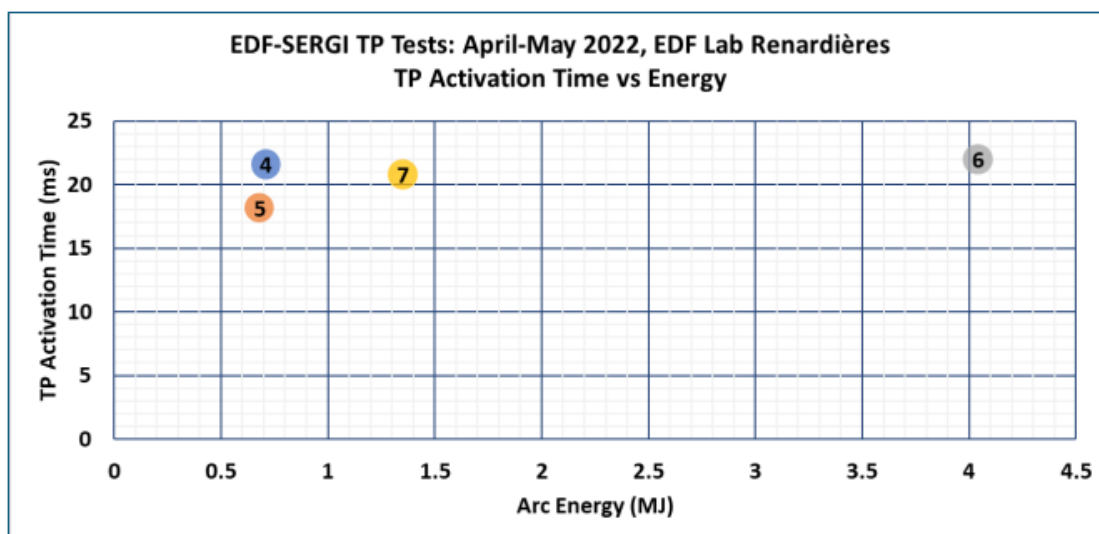


圖 8：TP 啟動時間

除了 EDF 調查及結論的範圍之外，SERGI 也進一步評估了其他感興趣的參數，例如所產生氣體的种类與體積、壓力特徵，以及 TP 啟動期間排油量。這些資料對 SERGI 持續發展計算流體力學模擬方法而言極具價值 [1]。經過驗證的模擬，是進行全尺寸測試之外的唯一替代方案，可用於回答各種獨特且複雜、難以直接理解的「假設情境」。例如，本研究展示了將測試 #1006 (#6) 與模擬結果進行比較。具體而言，針對測試 #1006 (#6)，展示了電流與電壓振盪圖（圖 9）、模擬等值線圖（圖 10）及測試與模擬之間的壓力曲線比較（圖 11）。圖 11 顯示模擬結果具有極高的可信度，因此能夠進一步評估大量不同的設計配置、電弧位置及故障能量。

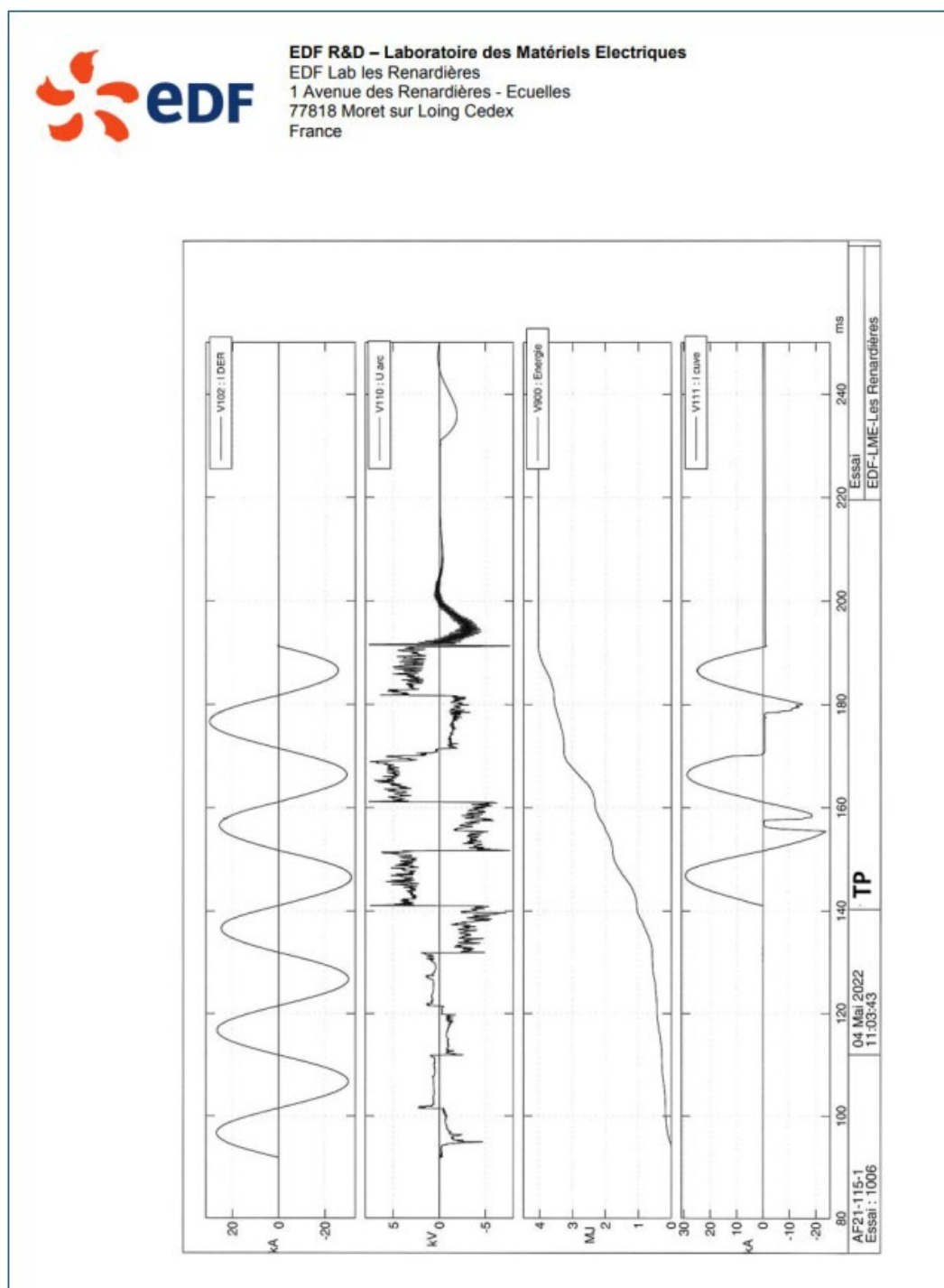


圖 9：測試 #6 的振盪圖

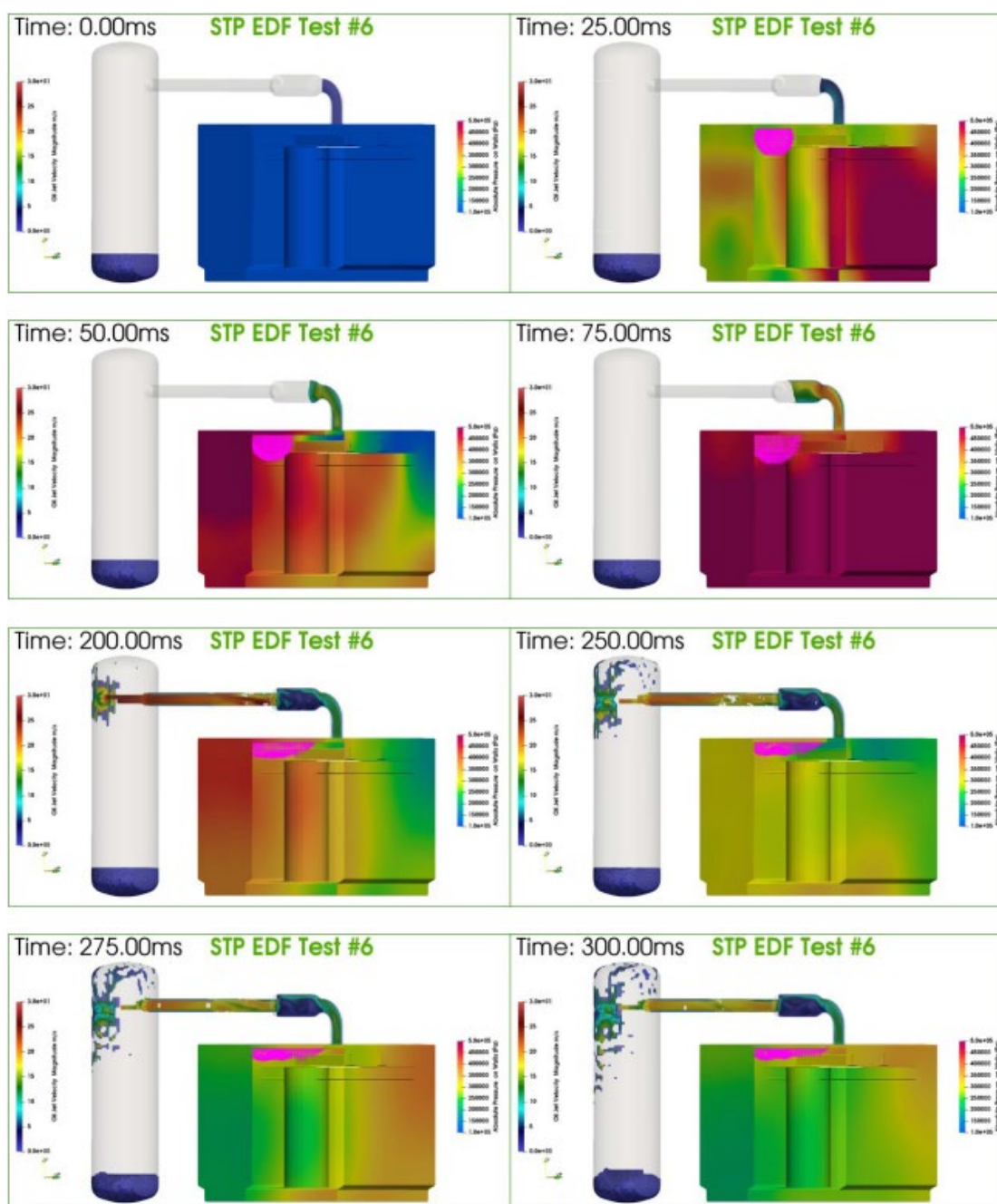
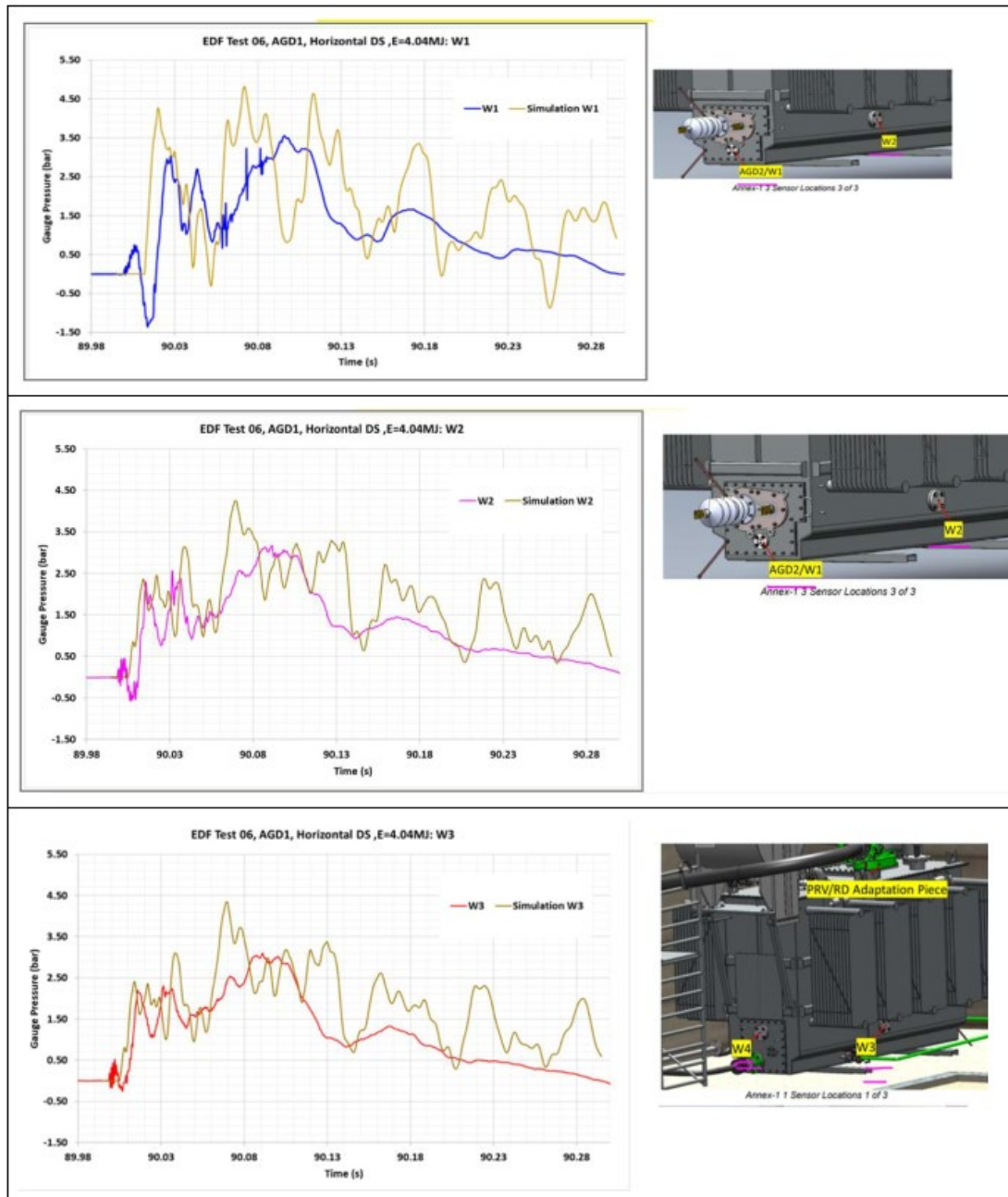


圖 10：EDF 測試 #1006 的模擬等值線圖



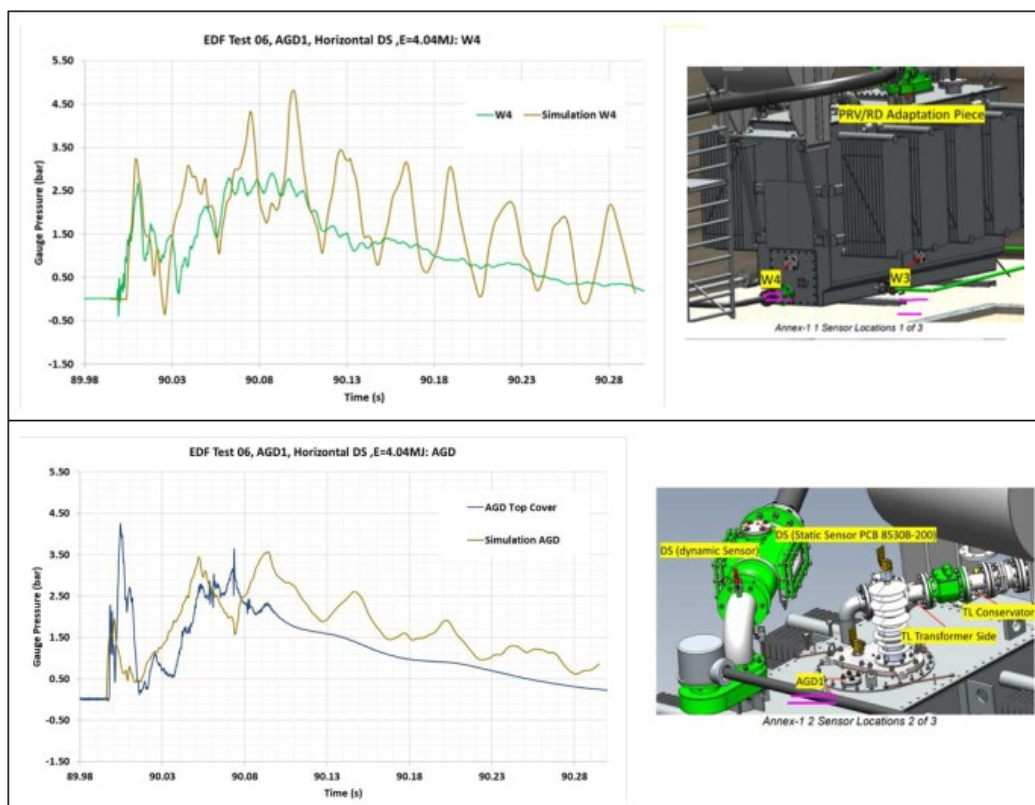


圖 11：測試 #6 與模擬結果的壓力比較。模擬結果以金色表示。

測試參數/結果與業界標準之比較

除了 EDF 對測試結果進行評估之外，SERGI 亦進一步將測試參數與 IEC 61869-1:2023 [2] 進行比較。需要注意的是，目前尚無針對電力變壓器執行全尺寸內部電弧測試的正式官方指南，因此，本次與該標準的比較僅用於提供參考與深入了解，應以此角度看待。此外，亦應注意，我們認為最後一次測試與 EDF 的評估結果並不一致。

IEC 61869-1:2023 [2]：此 IEC 標準提供儀用變壓器的通用要求，其中包括內部電弧故障測試的相關細節。在比較 EDF TP 測試結果與 IEC 61869-1:2023 之前，需要先注意儀用變壓器與電力變壓器之間存在幾項差異。相較於電力變壓器，儀用變壓器可能承受較長時間的故障暴露，因為電力變壓器通常配備某些保護系統。另一方面，由於儀用變壓器的尺寸小得多，且通常採用圓柱形結構，因此預期其耐壓能力可能優於電力變壓器。

IEC 61869-1:2023 要求電弧電流具有 1.7 倍的非對稱性 [7]。電弧電流與短路電流並不相同，其允許值為估算短路電流的 60% [7]。假設 EDF TP 測試變壓器的阻抗約為 8%（依據 IEC 60076-5 中的標準值）[5]，則此變壓器的估算短路電流為 4.5 kA。圖 12 描繪了 EDF TP 測試中的 RMS 電流，與依據 IEC 61869-1:2023（藍色正方形）及 IEC/IEEE 63253-5713-8（紅色圓形）[7] 所預期此變壓器之峰值電弧電流的比值。因此，當數值大於 1 時，表示測試 RMS 電流高於針對該測試變壓器，在 IEC/IEEE 標準中

所規定的峰值非對稱電弧電流。

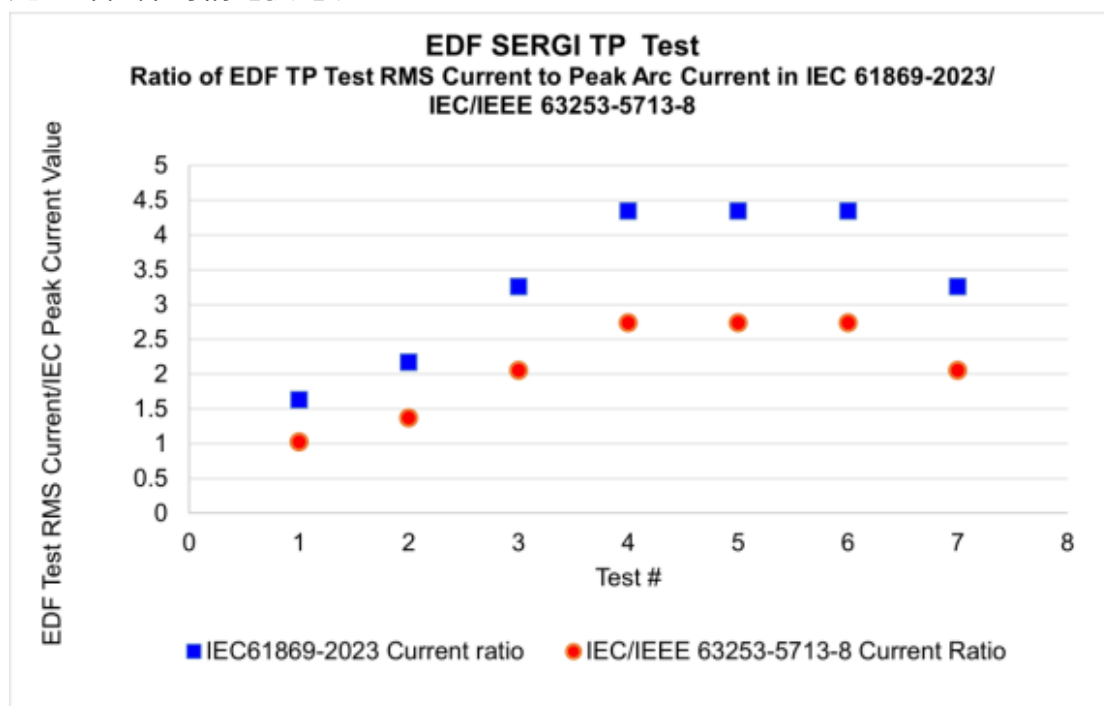


圖 12：EDF TP 測試電流與 IEC/IEEE 標準峰值電流之電流比值，數值大於 1 表示測試電流高於 IEC/IEEE 標準所規定的電弧電流。

然而，上述標準亦規定故障持續時間為 0.3 秒。如前所述，大多數電力變壓器均配備保護系統；若配備此類系統，電流持續時間將限制在 3-5 個週期 (IEEE C57.156) [6]。然而，當我們將 EDF 所有測試的累積故障暴露程度，與峰值短路電流 ($1.7 \times 4.5 \text{ kA}$) 進行比較時，其結果超過 IEC 61869-1:2023 所規定的故障暴露曲線，如圖 13 所示。EDF 測試的累積故障暴露程度，是將各次測試的 I^2t 值加總而得到。

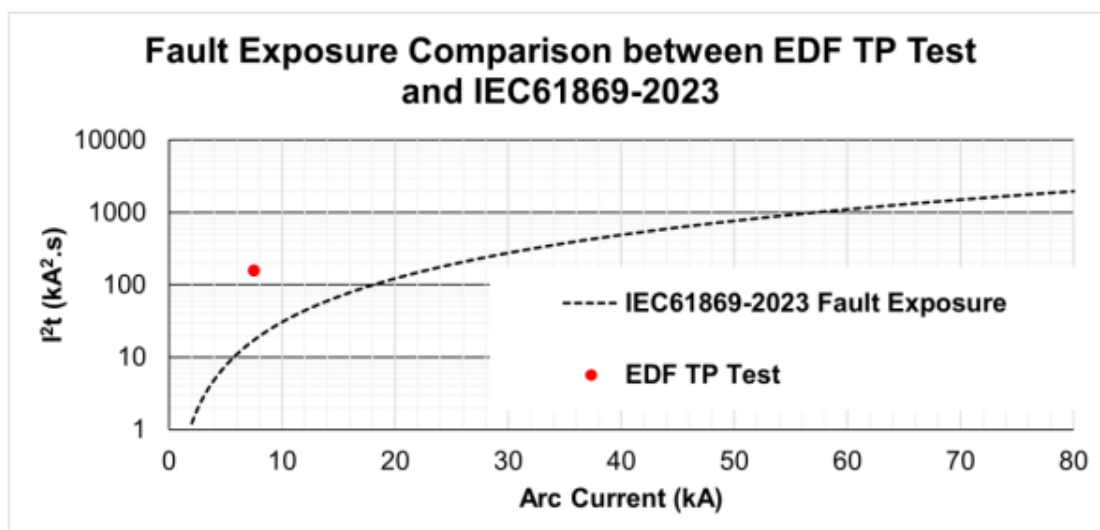


圖 13：EDF TP 測試與 IEC 61869-1:2023 測試曲線之累積故障暴露程度比較

結論

2022 年 5 月進行的 EDF SERGI TP 測試是一項完整且全面的測試活動，包含大量資料的蒐集，例如降壓時間、啟動時間、所產生氣體的种类，以及所產生氣體的量等。這些資料是 SERGI 所開發之模擬研究/模型的重要資料來源。測試亦顯示，模擬可以提供具有高度價值的資訊與洞見。

測試結果進一步證明，SERGI TP 能夠保護電力變壓器避免發生爆炸，並符合 NFPA 850 [3] 所述的兩項條件。此外，測試證明，配備 TP 的變壓器能夠承受反覆的內部電弧負載，且其承受能力遠高於本文件所引用之 IEC/IEEE 等相關內部電弧標準所規定的程度。

最後，TP 能夠保護該 24 kV 變壓器，使其免受通常預期會發生於 115-161 kV 電壓等級變壓器中的電弧能量影響 (IEEE C57.156) [6]。

參考資料

- [1] G. Périgaud, G. de Bressy, S. Muller, R. Brady, P. Magnier, "Investigations on Oil-Filled Transformer Explosion Prevention Experiments and Simulations," in Cigre, 2007.
- [2] IEC, "IEC 61869-1 Ed2.0 2023-06 Instrument transformers - Part 1: General requirements," IEC, Geneva, 2023.
- [3] NFPA, "NFPA 850 Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants and High Voltage Direct Current Converter Stations," NFPA, Quincy, Massachusetts, 2020.
- [4] Cigre A2.33, "Guide for Transformer Fire Safety Practices, TB 537," 2013.
- [5] IEC 60076-5, "Power transformers - Part 5: Ability to withstand short circuit," IEC, 2006.
- [6] IEEE C57.156, "IEEE Guide for Tank Rupture Mitigation of Liquid-Immersed Power Transformers and Reactors," 2016.
- [7] Mihoković, I.; Raćki, A.; Žiger, I.; Plavec, E, "Internal Arc Performance of Instrument Transformers Filled with," Energies MDPI, 2024.