

透過模擬支援耐受內部電弧故障之變壓器設計

Ashwin Padmanaban	Didier Hamoir
Transformer Protector Corp USA	Transformer Protector Corp USA
apadmanaban@transproco.com	dhamoir@transproco.com

摘要

電力變壓器內部發生電弧時，可能造成災難性的油箱破裂，進而引發爆炸與火災，導致重大的人員、經濟及環境損失。透過設計有效的事故減緩策略以提升變壓器的韌性，可以避免這些後果。然而，要設計此類事故減緩策略，必須具備良好的模擬方法，以提供準確的分析結果，因為全尺寸測試並不容易實施。本文詳細說明如何利用計算流體力學 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 模擬，正確預測油浸式變壓器發生低阻抗內部電弧故障期間的壓力變化。為此，將模擬結果與 Tadokoro 等人所進行的實驗測試結果 [1] 進行比較。由於該測試的參數已公開，因此可以對模擬結果與測試結果進行充分比較，以驗證模擬工具的有效性。由於此類事件發生於數毫秒之內，因此採用暫態模擬被認為是適當的。本文亦彙整模擬結果與法國 EDF Les Renardières 實驗室所進行的變壓器全尺寸內部電弧測試結果之間的壓力變化進行比較。

總而言之，模擬結果持續顯示，CFD 模擬是估算變壓器內部電弧故障期間壓力變化的可靠工具，因此能夠為設計有效的事故減緩策略提供足夠的信心，例如變壓器快速降壓技術。

關鍵字

低阻抗故障、內部電弧、電力變壓器、計算流體力學 (CFD)、流固耦合 (FSI)、快速降壓系統

1 引言

油浸式變壓器的內部電弧是一種複雜的現象，其起始狀態為奈秒時間尺度的電弧，之後轉變為毫秒時間尺度的氣泡，並產生流體動力效應 [2]。準確量化此類流體動力負載，是設計具備韌性的變壓器或保護策略的關鍵，因為變壓器油箱的設計並不適用於壓力容器相關的任何計算方法規範。為此，本文詳細說明透過計算流體力學 (CFD) 及流固耦合 (Fluid Structure Interaction, FSI) 模擬所得到的分析結果 (流體動力負載估算)，並將其與日本電力中央研究所 (Central Research Institute of Electric Power Industry, CRIEPI) Tadokoro 等人所進行的小尺寸實驗結果 [1] 進行比較。比較的項目包括壓力以及電弧氣泡體積的行為。這是一項關鍵參數，因為它會影響作用於油箱上的壓力，同時也代表電弧在壓縮周圍液體/油時所做的功。

因此，本文建立了電弧壓縮周圍絕緣油時所做的功之分析結果。同時也詳細說明其他形式的能量分配，以及它們與電弧總能量之間的關係。據作者所知，這是首次針對電力變壓器內部電弧相關模擬，詳細證明能量守恆的方法。此外，本文顯示，氣體體積生成速率以及氣體溫度均與 CIGRE A2.33 [3] 所記載的實驗觀察值一致。具體而言，本文採用的電弧模型與 CIGRE A2.33 第 4.2 節中所整理的多位研究人員之實驗結果一致，其中氣體組成約為 75% H_2 (CIGRE A2.33 為 70%) 及 25% C_2H_2 。在標準溫度與壓力下，平均氣體生成率為 70 cc/kJ，而電弧平均溫度為 2000 K。

採用類似的建模方法後，研究人員進一步將模擬應用於法國 EDF Les Renardières 實驗室所進行的全尺寸內部電弧測試，並將油箱內的壓力變化與模擬結果進行比較。

本文內容安排如下：首先簡要介紹小尺寸實驗的測試架構；接著討論分析方法；然後說明分析結果；之後說明分析的限制；最後簡要討論模擬結果與全尺寸內部電弧測試結果之間的比較。

2 Tadokoro 實驗架構摘要

為完整呈現本文內容，本節簡要說明 Tadokoro 等人 [1] 所進行的小尺寸測試實驗架構；但讀者若需要更詳細的資訊，建議參閱原始論文。該實驗架構由兩個相互交叉的圓柱體組成，其直徑分別為 310 及 396 mm（以及其他主要尺寸），其他測試條件如圖 1 所示。

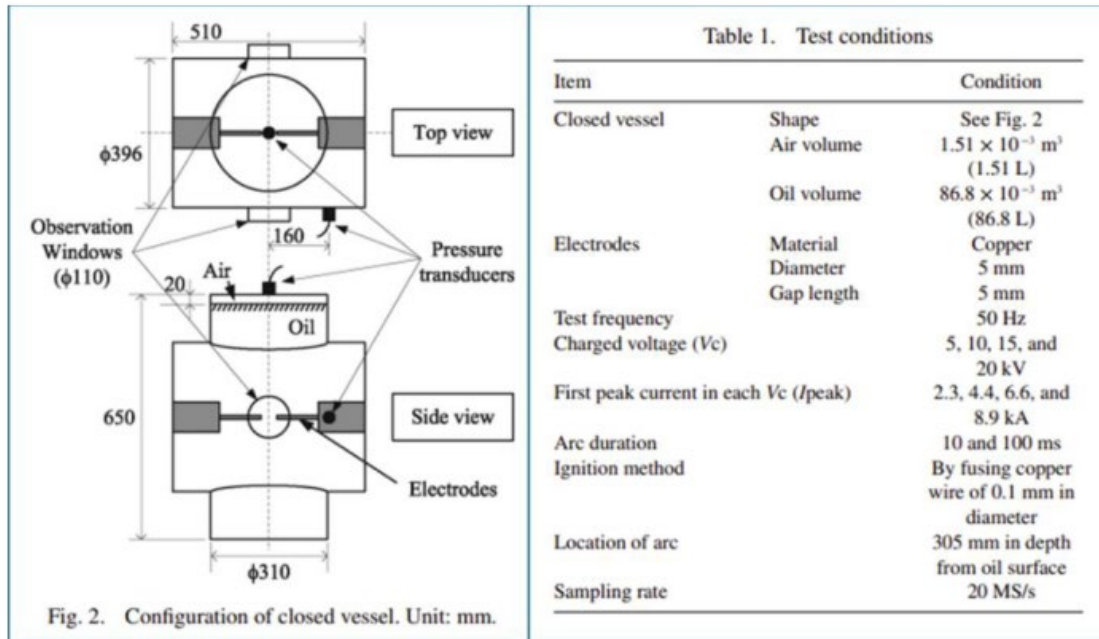


圖 1：實驗架構，圖片取自 Tadokoro 等人 [1]

實驗在測試區域的中央引入一道電弧，位於油面下方 305 mm。實驗配置了兩個壓力感測器，其中一個位於油中，另一個位於空氣中，其位置如圖 1 所示。電弧持續 104 ms，產生的總能量為 60 kJ。電流與電壓振盪波形，以及量測到的壓力結果如圖 2 所示。

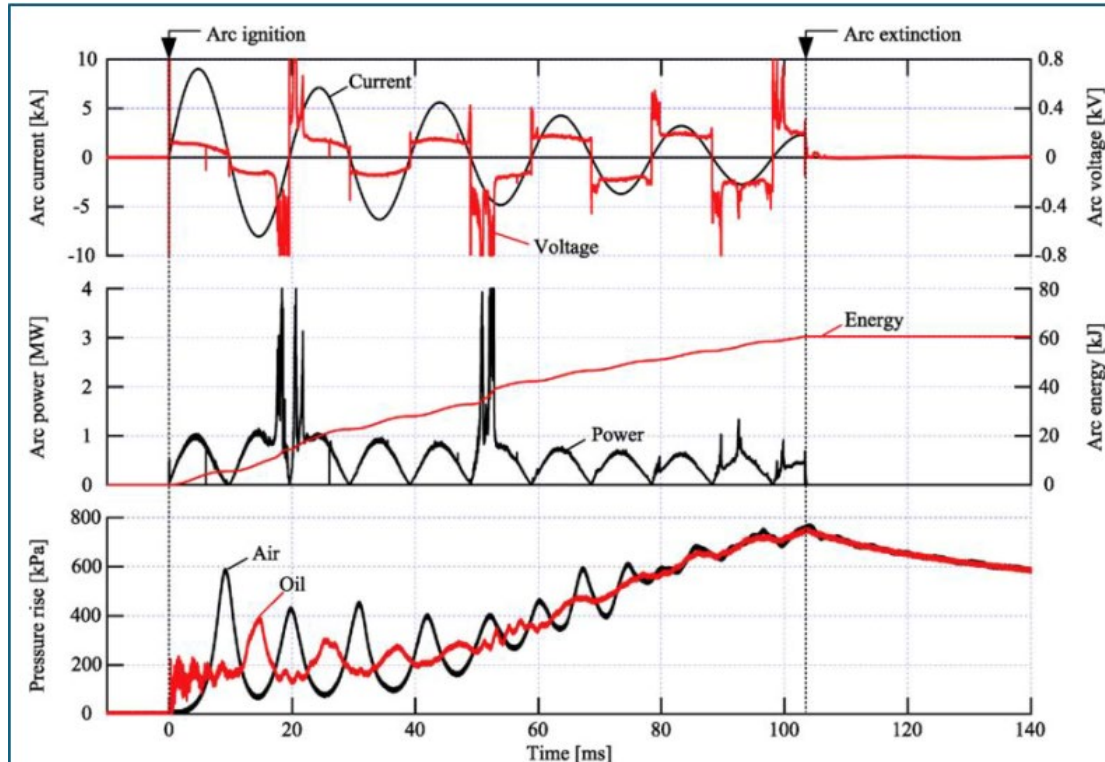


圖 2：壓力特徵、電流與電壓振盪波形及能量曲線，圖片取自 Tadokoro 等人 [1]

3 模擬設定

本研究分別分析了獨立 CFD 模型與 FSI 模型。由於所取得的變壓器油箱結構細節有限，因此根據直徑 400 mm 的標準可用管材尺寸，假設油箱壁厚為 15 mm。另外，也建立了一個壁厚 10 mm 的模型，以觀察油箱壁厚對結果的影響；該結果僅供參考與了解其影響。

3.1 電弧模型建立方法

模型包含一道電弧，其氣體組成為 75% 氫氣及 25% 乙炔，溫度約為 2000 K。上述兩項條件均與 CIGRE A2.33 [3] 所報告的實驗觀察值一致。在目前的模型中，電弧在標準溫度與壓力下氣體生成率為 70 cc/kJ；此數值同樣與實驗觀察值一致。圖 3 顯示以 70 cc/kJ 的氣體生成率進行模擬的結果。在 104 ms 結束時，總氣體體積約為 4200 cc (0.0042 m^3)。同樣地，在持續 104 ms 的故障期間，電弧溫度約維持在 2000 K。氣體的組成對於正確計算氣體所含的熱能相當重要，因為這與氣體的比熱值有關。

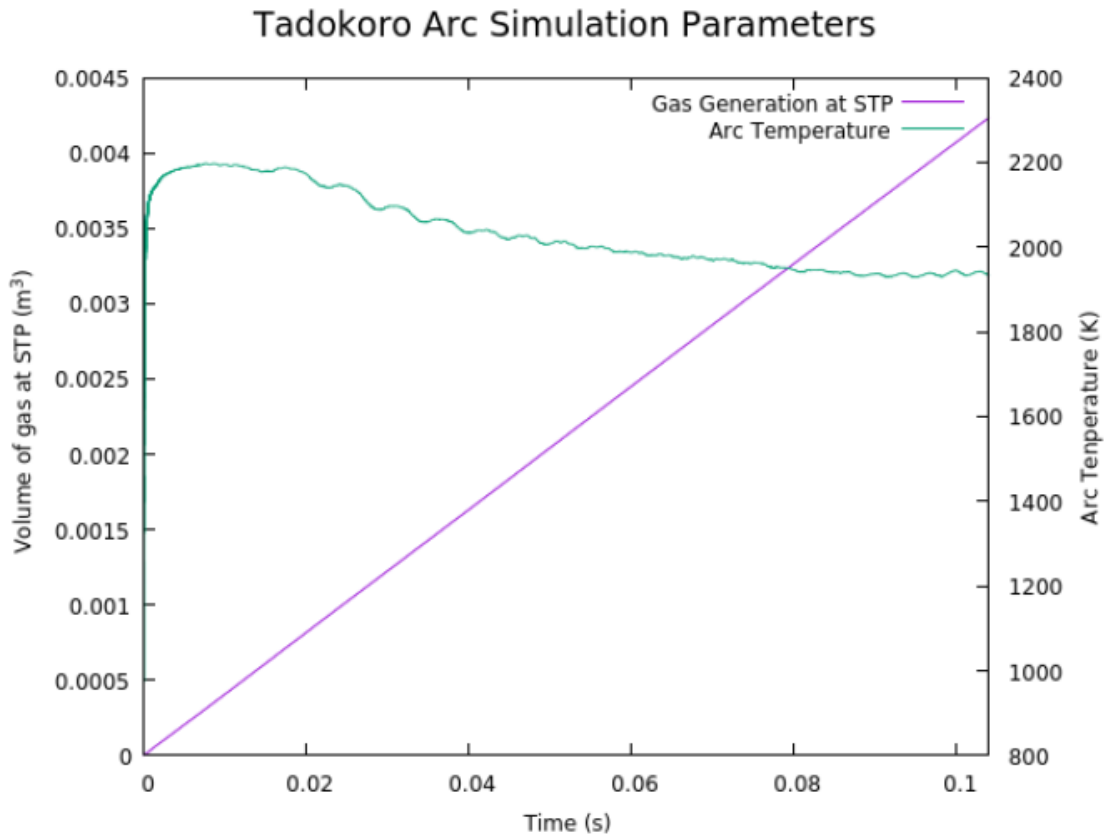


圖 3：電弧氣體的體積與溫度，與 CIGRE A2.33 [3] 實驗觀察值一致

3.2 CFD 模型與 FSI 耦合設定

CFD 模型約由 260 萬個以六面體為主的單元 (hex-dominant cells) 組成，並使用能夠處理能量方程式的 OpenFOAM [4] 搭配兩相可壓縮流求解器 (two-phase compressible solver) 進行求解。至於 FSI 方面，則使用 CalculiX [5] 作為結構求解器，以進行結構動態分析的耦合。變壓器油箱結構採用三角形殼元素 (triangular shell elements) 進行網格劃分。模擬採用雙向 FSI，亦即結構求解器與流體求解器之間會相互交換各自的壓力資料與位移資料。FSI 模型中的流體計算域採用與獨立 CFD 模型完全相同的設定進行求解，而流體域的邊界則會根據結構動態分析所得到的結果進行變形。流體域與結構域的初始條件及網格細節如圖 4 所示。

FSI 的耦合時間窗設定為 0.25 ms，並透過 preCICE 耦合函式庫 [6] 以顯式方式進行耦合。此 0.25 ms 的時間窗，是根據所取得的外殼/油箱自然頻率所決定 (約 600 Hz)。因此，為了實現有效的耦合，耦合時間窗應至少高於 2400 Hz。在本研究中，較保守地採用了 4000 Hz，亦即 0.25 ms 的耦合時間窗。在此時間間隔內，流體壓力與固體位移資料會相互交換，以確保 FSI 耦合穩固。

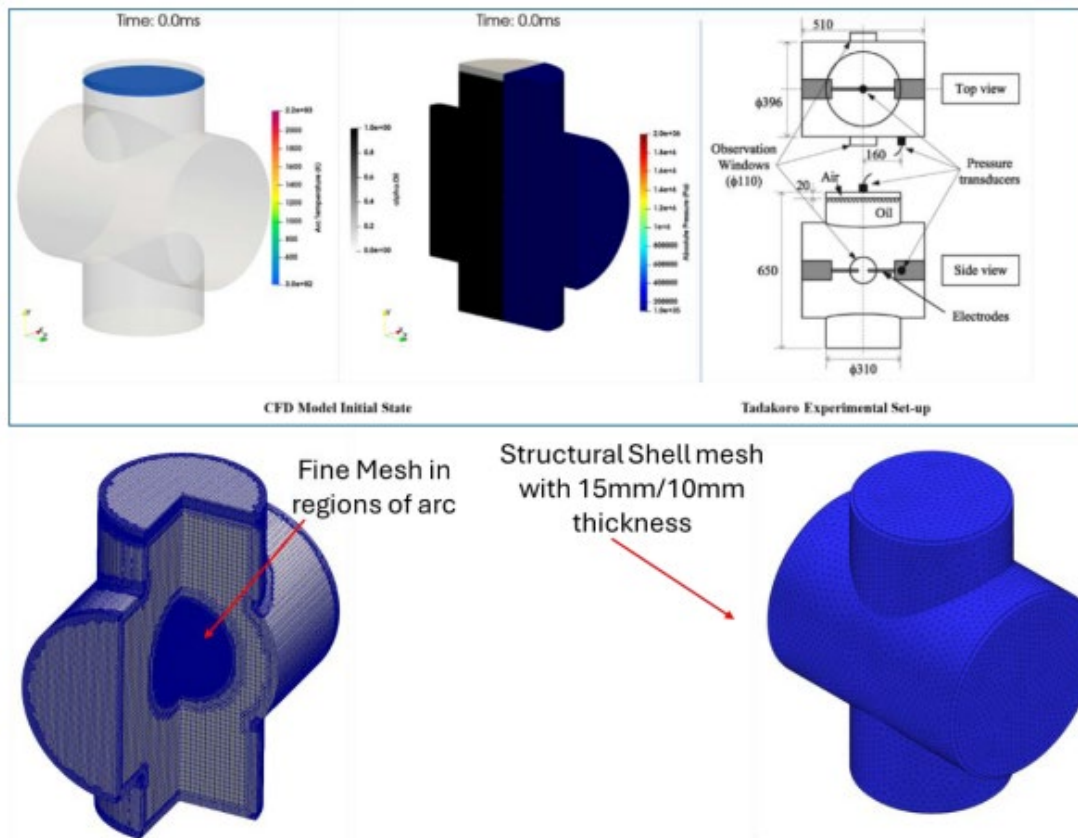


圖 4：初始條件及網格細節

4 分析結果

本節彙整獨立 CFD 模型所得到的壓力變化與實驗結果之間的比較。接續的子章節將獨立 CFD 結果與 FSI 研究結果進行比較，以了解結構響應對壓力變化的影響。之後說明結構動態分析結果。接著，簡要說明能量分配，以驗證模擬中確實包含實際/總電弧能量 60 kJ。這一點值得注意，因為即使模擬輸入參數，例如氣體生成率、氣體種類、氣體溫度，以及體積彈性模數、密度、狀態方程式等準確的流體性質，全部都設定正確，也無法單獨保證模擬中具有正確的電弧能量，因為不可逆功例如電弧氣泡演變等屬於路徑函數。從氣體生成率由 50 cc/kJ 至 110 cc/kJ 的變化，也可以觀察到電弧能量的變化（CIGRE A2.33 所記載的平均值為 70 cc/kJ）。

4.1 實驗與 CFD 模擬之壓力及氣泡成長行為比較

圖 5 展示 CFD 模型在實驗中兩個測量位置所得到的壓力特徵。圖 6 展示模擬結果(截面視圖中的壓力及體積分率等值圖，以及完整等角視圖中的電弧演變)。

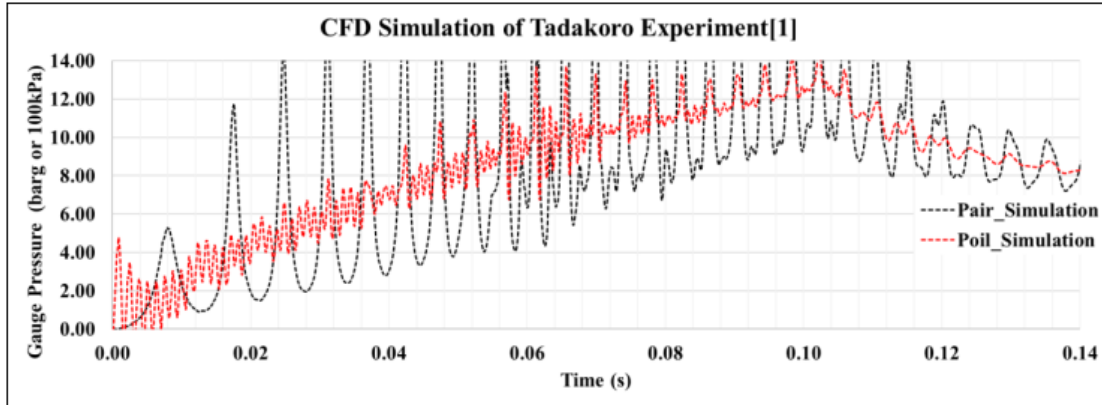


圖 5：Tadokoro [1] 60 kJ 小尺寸內部電弧測試之 CFD 分析，油中與空氣中的壓力讀值

CFD 模型中油內壓力的頻率成分與實驗觀察結果一致，其中包含 500 Hz 的高頻成分。Tadokoro 等人 [1] 的論文作者將油中的壓力訊號進行濾波，即濾除（或移除）頻率高於 500 Hz 的壓力訊號。同樣地，空氣中探測器的壓力特徵也與 CFD 所得到的結果一致，包括第一次過壓的幅值及其到達壓力感測器的時間。然而，如同所有模型一樣，兩者仍可觀察到一些差異。這些差異包括：在 CFD 結果中，第一次壓力峰值之後，空氣壓力出現後續較窄且壓力更高的峰值，而實驗中的此現象則較不明顯。這是因為模型未考慮真實氣體效應。在 CFD 模型中，經過 104 ms 後的壓力達到 12-13 barg，而實驗中則為 8 barg。此差異可能是由實際環境中存在的耗散機制所造成。此外，在實驗中的壓力振盪衰減後，其平均壓力上升速率約為 100 bar/s；CFD 模型中的壓力上升速率則約為 120 bar/s。整體而言，與小尺寸測試相比，CFD 模擬在壓力幅值方面得到令人滿意的結果（雖然屬於保守估計），同時也能良好地重現壓力的頻率成分。

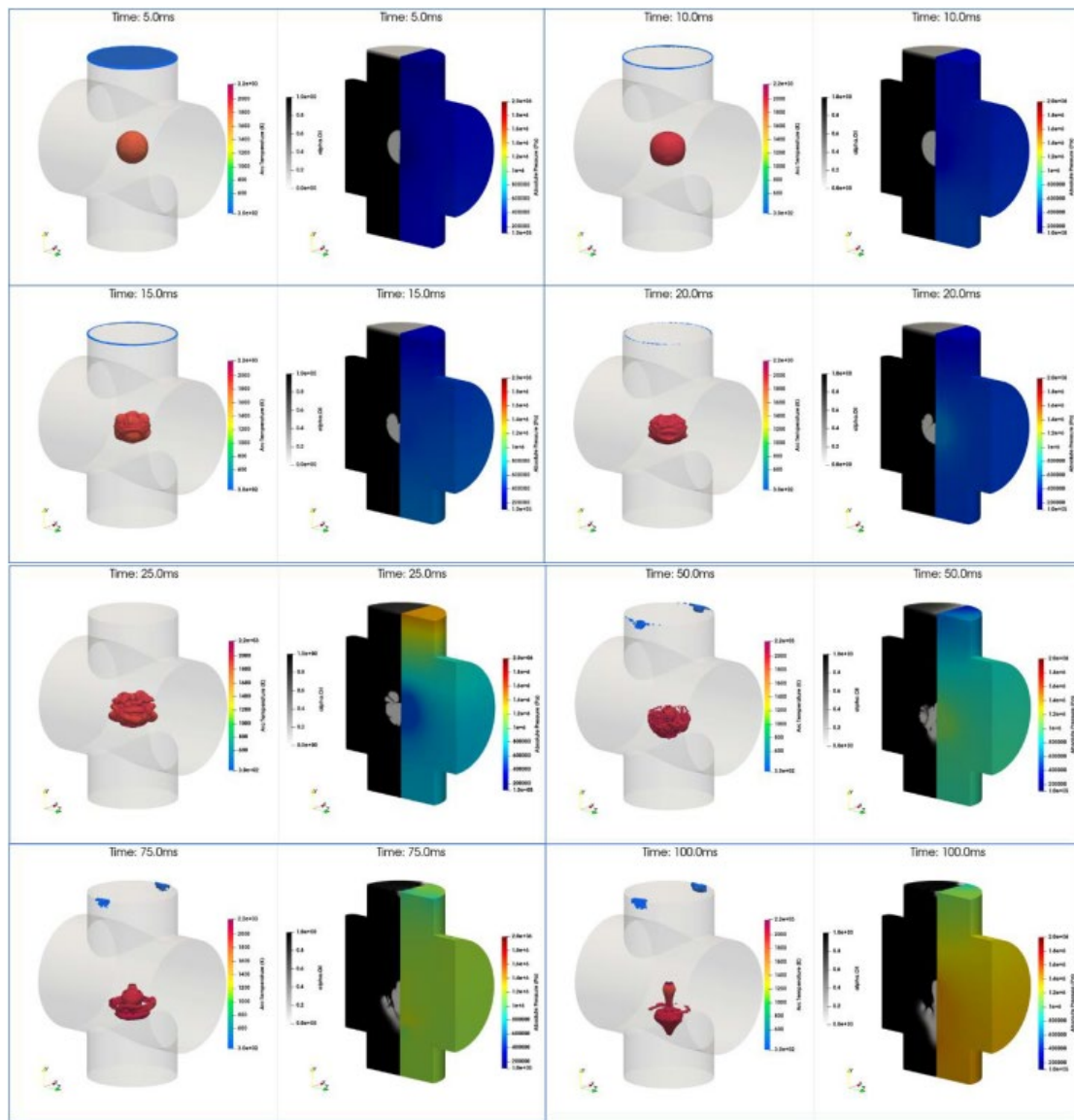


圖 6：Tadokoro 等人 [1] 小尺寸測試的 CFD 模擬結果

除了壓力之外，實驗與模擬結果之間另一項比較內容，是氣泡半徑隨時間的演變。這一點非常重要，因為氣泡半徑決定電弧在壓縮周圍流體時所做的功，並會影響油箱最終的壓力變化。在圖 7 中，黑色實線代表 Tadokoro [1] 根據實驗所得相關式計算出的氣泡半徑；黑色虛線則代表 CFD 模擬得到的氣泡半徑。將 Tadokoro 論文 [1] 中的圖表與 CFD 模擬結果疊加，以凸顯兩者之間的差異。基本上，黑色實線與虛線比較的是隨著故障發展，油箱內實際電弧氣體體積的變化。因此，除了氣泡的熱力學壓力及溫度之外，正確掌握氣泡實際體積隨時間的演變，也非常重要，才能正確估算壓縮周圍液體時所做的功。氣泡的振盪行為也與實驗觀察結果一致。這一點相當重要，因為它表示模型正確估算了壓縮液體所做的功。

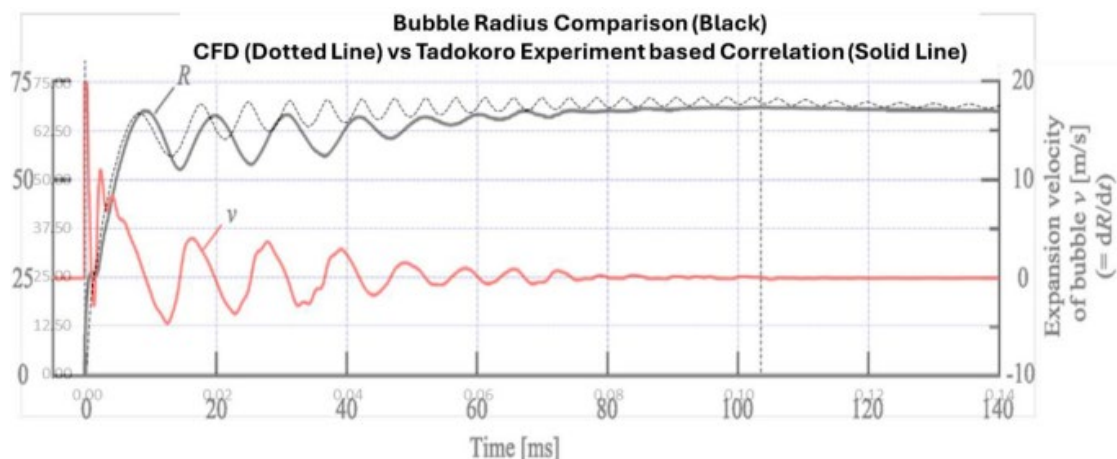


圖 7：實驗與模擬之氣泡半徑比較

4.2 FSI 結果

除了獨立 CFD 模型之外，本研究另外執行了兩項 FSI 研究。由於無法取得油箱的實際結構細節，因此根據典型管徑選擇具有代表性的 15 mm 與 10 mm 壁厚。其中 10 mm 壁厚的結果僅供了解其影響，不作為主要分析結果。

本節比較所分析的兩種 FSI 案例與獨立 CFD 模型的結果。油中壓力及氣泡半徑數據製成圖表，並提供油箱變形體積及油箱結構動態分析的應力等值圖。

4.2.1 獨立 CFD 與 FSI 比較

本節針對相同的電弧模型輸入條件，比較 FSI 與獨立 CFD 模型的壓力變化及氣泡半徑，以了解順應式結構如何影響壓力變化。比較參數為壓力 (kPa) 及電弧氣泡半徑 (mm)。

另外也評估了一個油箱壁厚 10 mm 的案例，目的僅在於進一步了解其影響；該案例僅模擬至約 50 ms，因為此時氣泡已達到其完整體積。如結果所示，氣泡在最初 10-15 ms 內即達到完整體積，而這可以作為判斷 104 ms 故障持續時間結束時所達壓力的一項重要指標。針對本研究所分析的案例，獨立 CFD 預測的平均壓力約為 12-13 barg (13-14 bar 絕對壓力)，而 FSI 預測的平均壓力約為 17-18 barg (18-19 bar 絕對壓力)，如圖 8 所示。

造成此差異的原因之一，可能是油箱膨脹的相位差行為。這種現象在動態分析中確實可能發生，也就是結構的變形可能與負載階段不同相。例如，當氣泡處於膨脹階段時，油箱可能暫時處於收縮狀態，因此會產生更大的壓力。另一個原因是，由於壓縮功屬於路徑函數，因此其結果取決於油與氣泡之間的複雜交互作用、結構的可變形性、壓縮液體所做的功，以及電弧氣泡所做成的壓力－體積功 (PV work done) 等因素。最後，也是另一個重要原因，是氣泡破裂行為會受到氣泡密度與界面紊流的影響。在 104 ms 結束時，FSI 中氣泡密度為 0.98 kg/m^3 ，而 CFD 中氣泡密度為 1.07 kg/m^3 ，這表示 FSI 模型中的氣泡較晚發生破裂。當氣泡密度越高，其破裂速率越快 [7]。無論如何，在最初 40-50 ms 的響應期間，也就是電弧氣泡大部分成長的階段，兩種模型的結果被發現是相近的。獨立 CFD 與 FSI 模型之間均維持相同的參數，包括流體域的網格設定。

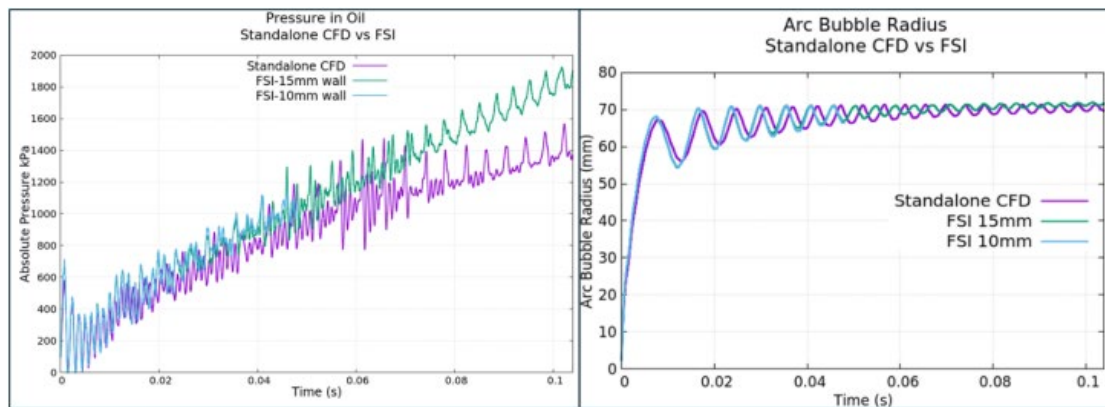


圖 8：油中壓力與氣泡半徑比較：獨立 CFD 與雙向 FSI

4.2.2 結構分析結果

本節詳細說明 15 mm 壁厚 FSI 案例中變壓器油箱的馮米賽斯應力 (von Mises Stress) 及體積變化。最大包絡馮米賽斯應力（局部應力）約為 190 MPa；最大平均膜應力（亦是局部應力）約為 67 MPa；而平均膜應力約為 50 MPa。

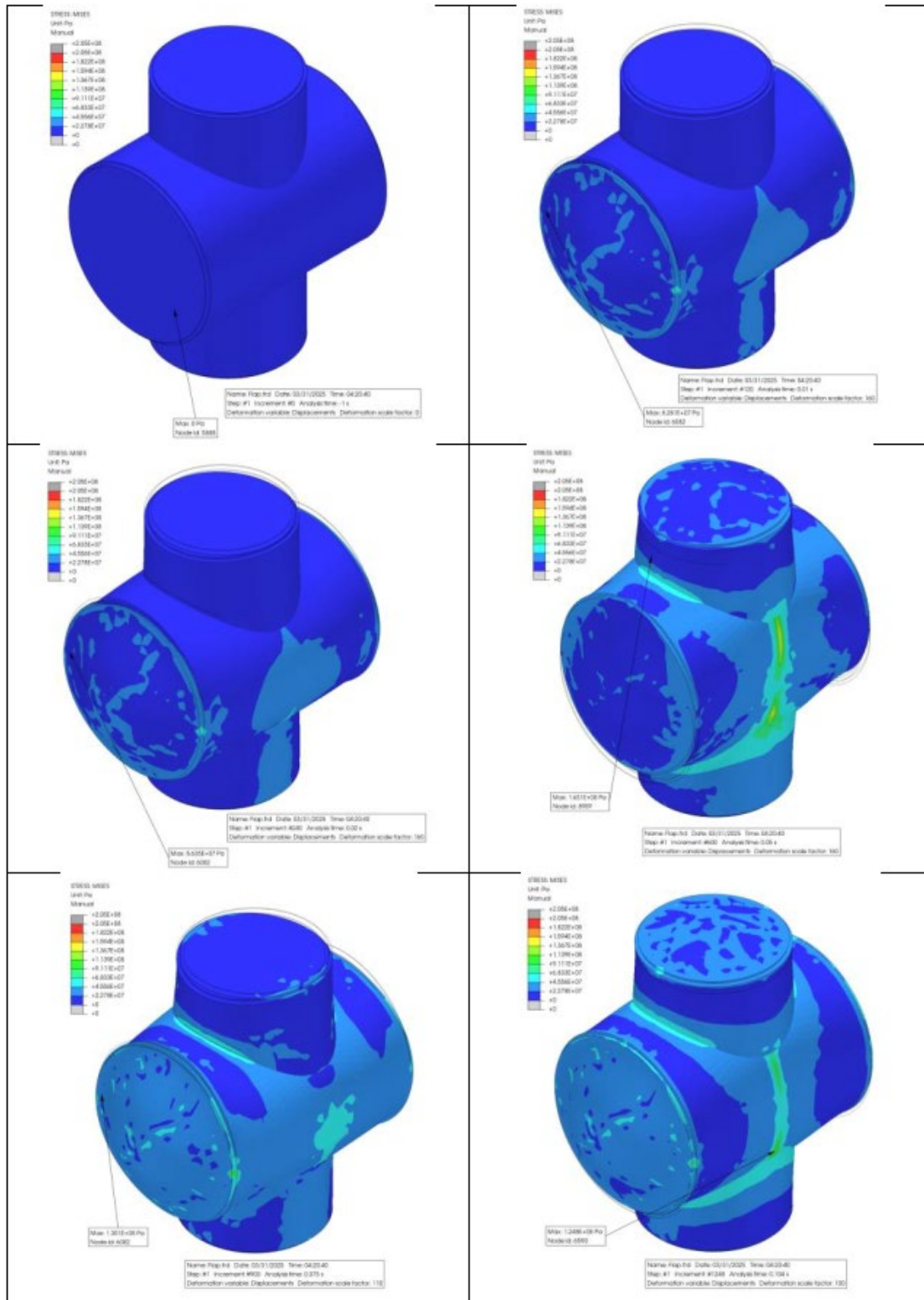


圖 9：不同時間點的馮米賽斯應力

雖然油箱體積變化呈現振盪行為，且與約 630 Hz 的第一主導模態及頻率一致，但其體積膨脹量為 0.14%。任一時間點的最大體積膨脹量為原始體積的 0.15%；在 104 ms（故障持續時間）結束時，最終膨脹量約為 0.14%。圖中顯示油箱體積隨時間的變化。起始體積為 84.465 L。

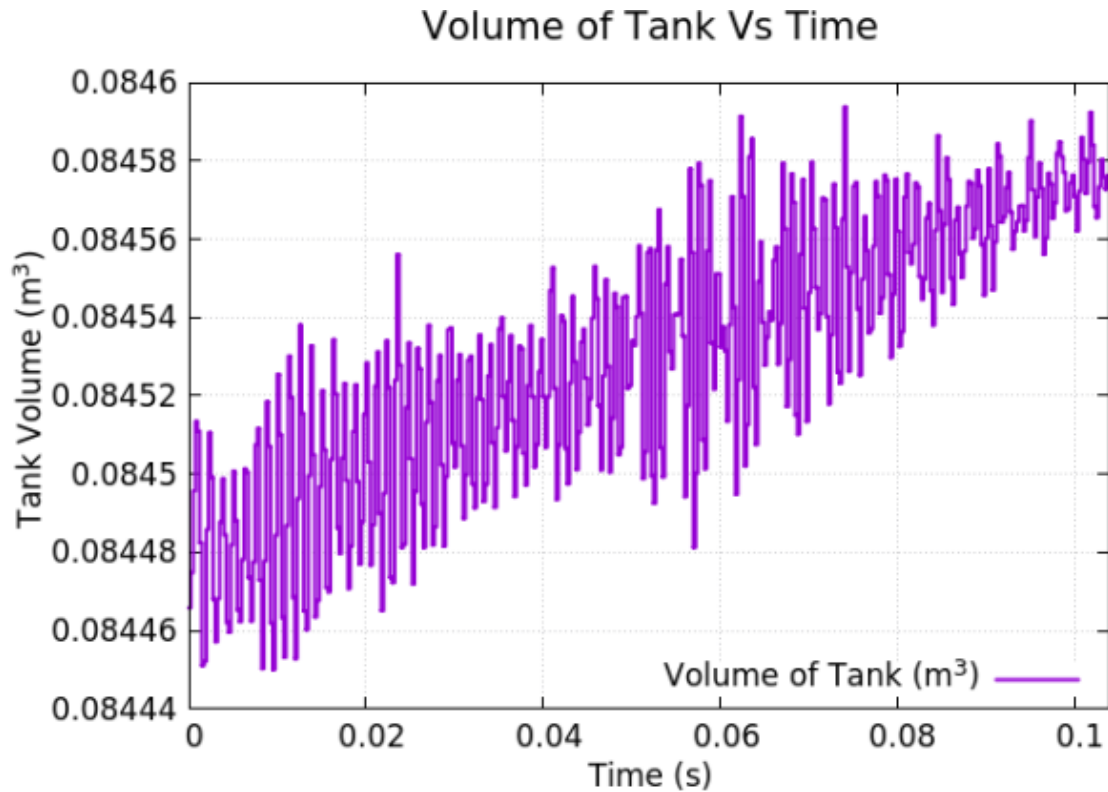


圖 10：油箱體積變化

4.3 透過能量分配驗證電弧能量

本節說明模擬如何計入 60 kJ 的電弧能量，並藉此以所指定的電弧能量對模擬進行驗證。60 kJ 的電弧能量被分配至電弧氣泡的熱能、氣泡振盪所做的功、儲存在氣泡中的能量及電弧壓縮周圍液體所做的功。儲存在液體中的能量可以忽略，因此未予計入。

值得注意的是，如圖 11 所示，計算出的總能量約為 56 kJ，略低於 60 kJ。此差異可能歸因於耗散效應，或其他未被計入的功，例如液體中儲存的能量。這也可能表示需要提高氣體注入速率、修改氣體組成或改變氣體溫度。

電弧能量的大部分轉化為氣泡的熱能以及壓縮周圍液體所做的功。需要注意的是，此熱能可能導致後續的壓力累積，除非故障被排除，或直到氣泡解體為止。大部分的損害發生於初始階段，原因是周圍的液體受到突然壓縮，進而導致壓力上升。氣體則在持續變化的壓力下膨脹，而該壓力由周圍液體的體積及體積彈性模數所決定。此類能量估算約

有 10% 的誤差，因為不可逆功屬於路徑函數，而使用簡化的熱力學方程式估算這類複雜過程中的能量具有一定限制。然而，即使採用簡化方法，相較於更嚴謹的分析方式，此類方法仍可讓使用者確認，在所述的誤差範圍內，模擬確實包含了正確的電弧能量閾值。

以下說明用於計算電弧能量各部分分配的方程式。

1. 在固定壓力條件下從開始加入氣泡的總熱能：由於所加入的熱能並非在固定容量或固定壓力條件下加入，因此根據氣泡的 PV 曲線（圖 12）所觀察到的結果進行簡化。根據 PV 曲線，在氣泡初始膨脹的主要階段，採用固定壓力條件較為適當。 $Q = mCPT$ 。為易於應用，T 設定為 2000 K，與前述圖 3 所示的溫度曲線一致。
2. 氣體在膨脹過程中所做的功，是透過對圖 12 所示的 PV 曲線進行數值積分取得。
3. 氣體在任一時間點儲存的能量，採用以下簡化公式計算： $PV/(\gamma-1)$
4. 電弧壓縮周圍液體/油所做的功，是透過對 PdV 進行積分取得，其中 P 是體積變化量與流體體積彈性模數的函數。將液體從原始體積 V_0 壓縮至最終體積 V_1 時所做的功，可透過下列公式求得。其中 V_0 與 V_1 的數值取自模擬結果。

$$W = \frac{\beta}{2} * \left(\frac{V_1^2}{V_0} - V_0 \right) + (\beta - p_0)(V_0 - V_1)$$

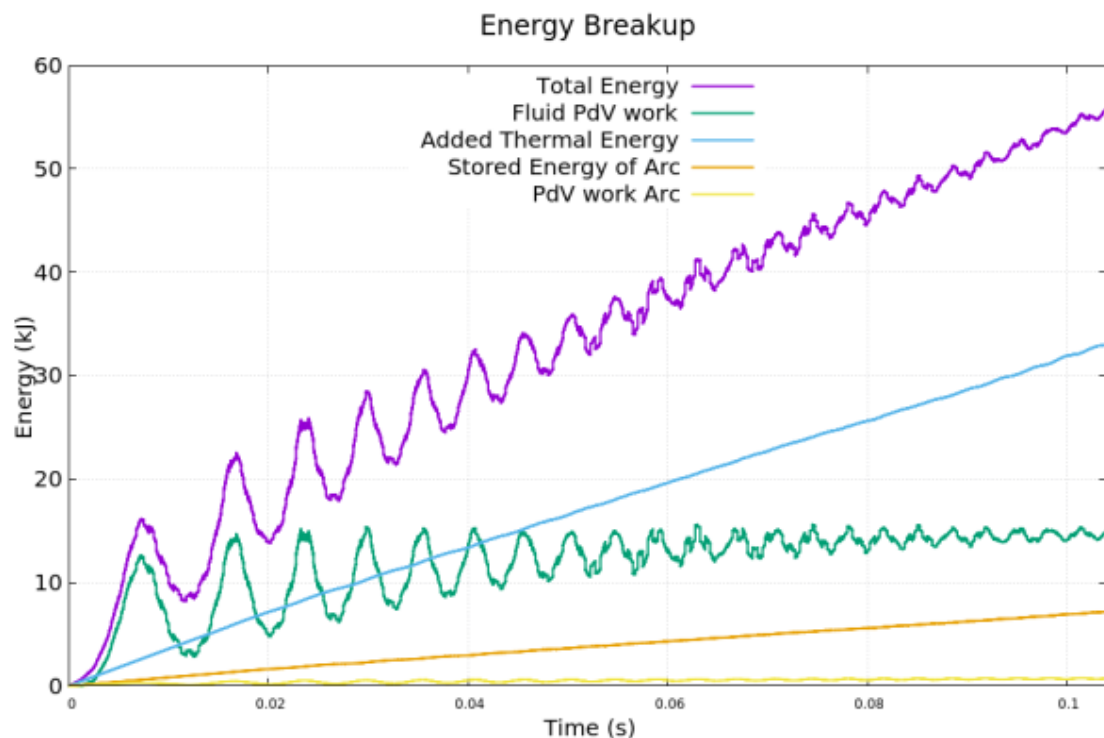


圖 11：電弧能量分配，用於驗證能量守恆

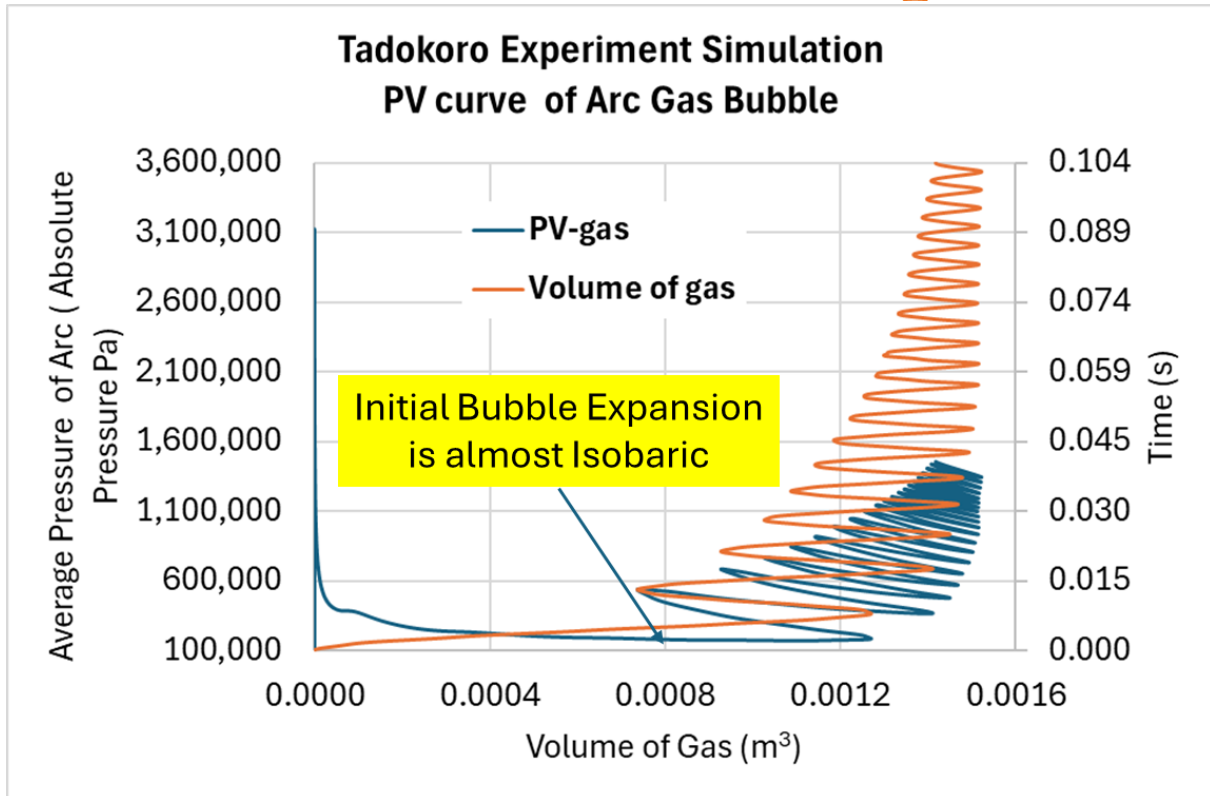


圖 12：電弧氣泡演變的 PV 曲線

5 進一步改善

其中一項可改善的參數，是透過匹配輸入功率來提供更高的解析度。目前功率僅以平均值的方式進行匹配。模擬假設 RMS 功率值為 0.58 MW，峰值功率為 0.8 MW。從測試資料中可以觀察到功率峰值突波。理想情況下，模擬的輸入參數應能夠追蹤此振盪圖，以獲得更精確的結果。壓力演變方面，另一項改善方向是採用更精確的狀態方程。理想氣體定律並不可能適用於所有條件下。

6 模擬方法與全尺寸電力變壓器內部電弧測試之比較

2022 年 5 月，EDF 在 Les Renardières 進行了一次 7.5 MVA 變壓器內部電弧測試。作為測試工作的一部分，安裝了數個上升時間為 $\leq 1 \mu s$ 的動態壓力感測器。研究人員採用與上述所記載方法類似的方法進行模擬，結果顯示模擬結果與實際測試結果之間具有合理的一致性，因此可對此建模方法建立更高信心。模擬結果與測試量測結果以時間為函數繪製於圖 13 中。

關於測試參數、測試方法及模擬結果的更多詳細資訊，請參閱所引用的文章 [8]。

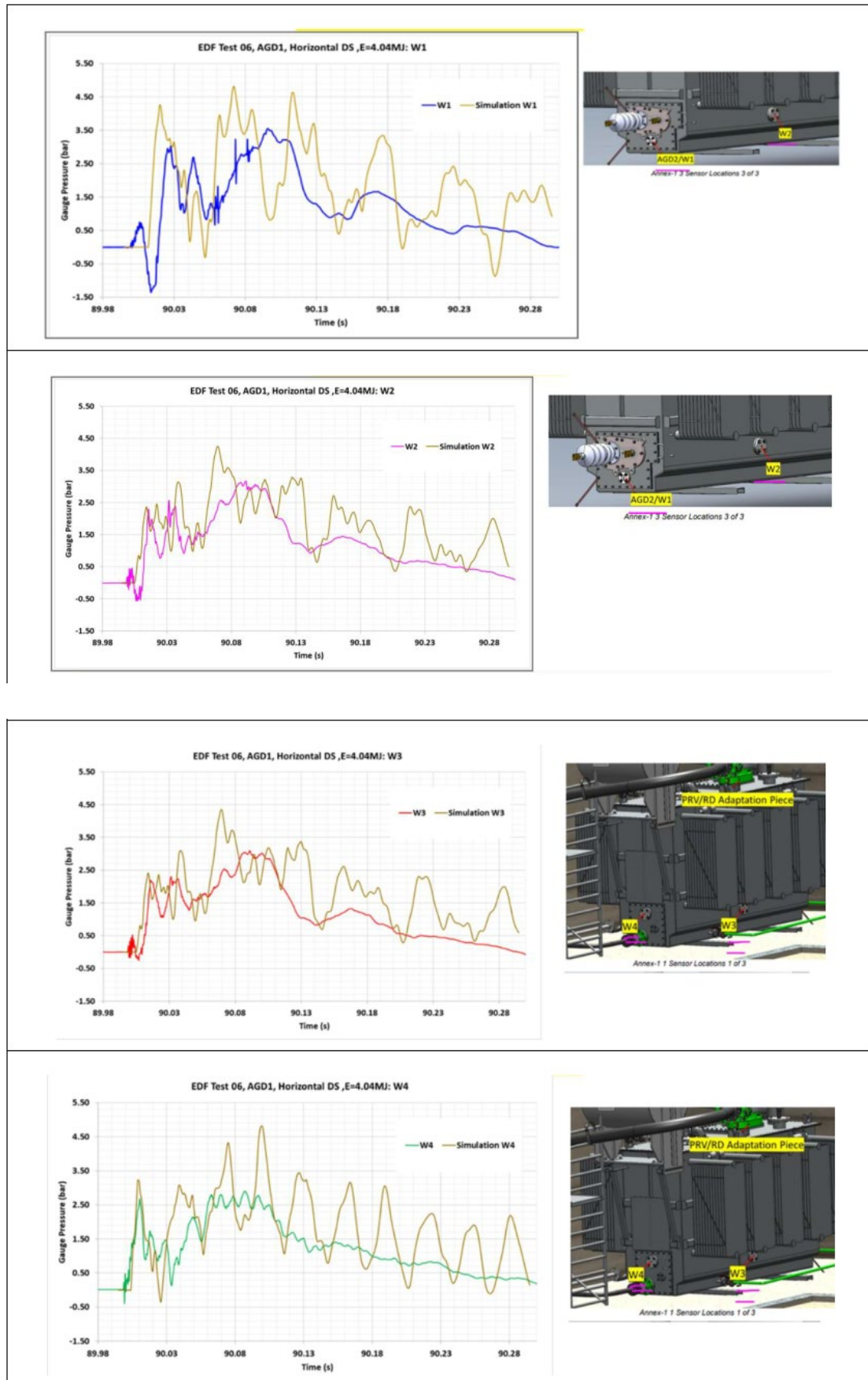


圖 13 EDF 全尺寸測試資料與模擬壓力之比較

7 結論

本文旨在說明一些建模方法，以便正確地界定變壓器內部電弧事件中的壓力演變。結果顯示，模擬所得的壓力演變與實驗結果相符，尤其是平均壓力上升速率，與 Tadokoro [1] 所進行的小尺寸實驗結果具有良好的一致性。此外，代表電弧所佔體積的氣泡行為，與實驗所確定的相關性呈現極佳的一致性。研究亦說明如何利用能量守恆來驗證特定電弧能量模擬結果的正確性。本文也簡要整理了一項全尺寸測試案例，其中將模擬結果與 EDF 的全尺寸測試結果進行比較。

在模擬中納入 CIGRE A2.33 所觀察到的實驗數據，是進行精確模擬的一個良好起點；然而，透過能量守恆進行驗證，可以進一步提高對模擬結果的信心。

本文的目的，是讓使用者能夠更有效地進行變壓器內部電弧模擬，並運用本文所列出的部分方法，來設計相關系統/方法，以建立更具韌性的變壓器，或設計能夠減輕內部電弧影響的系統。

參考資料

- [1] Tomo Tadokoro, Masashi Kotari, Toshiya ohtaka, Mikimasa Iwata and Tadashi amakawa, “Pressure Rises Due to Arc Under Insulating Oil in a Closed Vessel-Relationship between,” Electronics and Communications in Japan, pp. vol. 99, p. 12, 2016.
- [2] Svetlana Starikovskaia, Antoine Rousseau, “Dynamics of Plasma evolution in nanosecond underwater discharge,” Journal of Physics: Applied Physics, 2014.
- [3] CIGRÉ A2.33, “Guide for Transformer Fire Safety Practices, TB 537,” 2013.
- [4] H. G. Weller, G. Tabor, H. Jasak, C. Fureby, “A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques,” COMPUTERS IN PHYSICS, Vols. VOL. 12, NO. 6, 1998.
- [5] Wittig, Guido Dhondt and Klaus, “<https://www.calculix.de/>,” August 2024. [Online]. Available: <https://www.calculix.de/>.

[6] Gerasimos Chourdakis, Kyle Davis, Benjamin Rodenberg, Miriam Schulte, Frédéric Simonis, Benjamin Uekermann et al, “preCICE v2: A sustainable and user-friendly coupling library,” Open Research Europe, p. 2:51, 2022.

[7] Huahai Zhang, Yuelin Wang, Ali Sayyar, Tiefeng Wang, “Experimental study on breakup of a single bubble in a stirred tank: Effect of gas density and liquid properties,” AiChe Journal: TRANSPORT PHENOMENA AND FLUID MECHANICS, vol. aic.17511, 2021.

[8] Ashwin Padmanaban Iyer, Mael Kervarec, Antoine Magnier, “Full Scale Internal Arcing Test of Power Transformer at EDF Laboratories,” in XI WORKSPOT- 11th International Workshop on Power Transformers, Transmission and Distribution Equipment, Substations, Materials and Emerging Technologies, RIO DE JANEIRO, RJ, 2024.