

## “後發性”變壓器事故-事故型態介紹

1:亞東技術學院電機工程系;中華民國電驛協會第四屆訓練委員會主委 盧光常

2:逢甲大學電機工程學系;中華民國電驛協會第四屆編輯委員會顧問 黃思倫

3:台電綜合研究所高壓室;中華民國電驛協會第四屆訓練委員 鄭 強

### 一、緣起

民國 87 年 3 月的一個午後，天氣有點微涼並飄著細雨，當時有線電視正處於戰國時期，各個公司努力開拓市場，即便是下雨天也不能放棄任何可能的機緣。或因天雨、或因失手，一條有線電線台的電纜線碰觸到當地二次變電所所轄 69kv 的架空線，首先發生了單相接地故障，在很短的時間內，故障演變成線間短路、三相短路，再經過 24 週後，事故線路所屬的變電所電驛動作、斷路器跳脫並將事故區域成功隔離...。除了事故原因外，自線路故障發生、事故區域隔離、復閉試投、故障清除、恢復供電等，整個過程的發展一如預期，是一件再平常不過的事件。但是故障清除後，經過 2 分多鐘，事故架空線所屬的”一次”變電所中，一台變壓器突然發生內部接地故障，負責執行保護任務的差動電驛(87T)、突壓電驛(96P)、布氏電驛(33A)與釋壓電驛(96D)一起動作，而且釋壓電驛也發生噴油現象，變壓器一、二次側的斷路器均跳脫。

二分多鐘對於人的世界或為短暫，但 8200 餘週期的間隔對 60Hz 的電力系統而言，是一段相當長的時間。這兩次事故之間是否有關聯？如果有，何以相隔如此長的時間？這有違一般對於事故的認知與了解，更何況不是二次變電所，而是遠端一次變電所的變壓器遭殃。如果沒有關聯，

何以變壓器事故發生的如此巧合？如果變壓器垮掉是單一事件，為何不在線路事故發生之前、或是再延長一些時間發生？巧合嗎？如果答案是肯定的，應為偶發事件，但是事實似乎不是如此。

### 二、變壓器事故案例

#### 案例一：

此份事故調查報告載於 1992 年[1]，摘錄如下：

- 1.時間：1980 年。
- 2.地點：不詳(美國?)。
- 3.變壓器：138/72 kV，200MVA 三相自耦變壓器，事故發生前已運轉約 26 年。
- 4.事故過程：低壓器匯流排比壓器發生 C 相單相故障，5 週後故障隔離。再經過 95 週後，變壓器發生 A 相與 C 相事故，差動電驛、突壓電驛動作。
- 5.資料蒐集與研判：
  - 5.1 事故前電氣測試與油中氣體分析均無異狀。
  - 5.2 事故發生後，絕緣油中發現有碳分子存在，顯示出曾發生過電弧放電，而且油中氣體分析也出現異常現象。
  - 5.3 絕緣電阻測試結果正常，但是 C 相的低壓阻抗與繞組電阻均顯示

- 出異常的改變，其他的電氣測試則無異常。
- 5.4 電驛動作：除了突壓電驛動作之外，其他的機械式電驛並無反應。
- 5.5 開蓋檢測：在變壓器內部上方發現絕緣油中有霧狀成分以及小片燒燬的纖維與銅微粒。
6. 調查結果：變壓器的繞組事故是跟隨於比壓器事故之後，而且遠端變電所對比壓器事故反應過度，斷路器”過度跳脫(over-tripped)”。
- 自耦變壓器事故點是在共同側繞組發生匝間短路故障。推測事故原因：”可能”是變壓器已達運轉壽命並使絕緣老化所造成。

### 案例二：

1. 時間：民國 93 年 3 月。
2. 地點：台灣雲林。
3. 變壓器：18/345 kV，750MVA 三相  $\Delta$ -Y 接變壓器。
4. 事故過程：因季節性鹽霧害引起發生 R 相單相接地事故，其事故地點鄰近 345 kV 開關場約 100 公尺處，接地故障電流約為 25.6KA；事故前系統各發電機組出力正常；事故發生後，線路差動電驛(87L)及測距電驛(21N)動作，3.5 週後線路斷路器完成跳脫動作並隔離故障線路。之後，各發電機組仍正常出力，功率經由一並聯 345 kV 線路送出。”36 秒”後，發電廠二號主變壓器發生事故，配屬之保護電驛如：差動電驛(87T、87GT)、過電流電驛(50、50N、51MTN)、釋壓裝置、布氏電驛等相繼動作，斷路器跳脫將主變壓器隔離。
5. 資料蒐集與研判：

- 5.1 事故前電氣測試與油中氣體分析均無異狀。
- 5.2 事故發生後，油中氣體分析各項檢測結果均異常。
- 5.3 開蓋檢測：變壓器繞組兩相高壓側發生短路事故、其中一相絕緣筒爆裂。

以上二個類似案例與發生於民國 87 年的案例相較，可以發現其中有相當多類似的部分。事實上 87 年的案例並非首次發生，在同一變電所的另一台變壓器也曾於民國 80 年間發生類似事故。為了方便比較起見，且將 80 年與 87 年的案例編為案例三與案例四，分述如下：

### 案例三：

1. 時間：民國 80 年 7 月。
2. 地點：台灣台北
3. 變壓器：161/69 kV，200MVA 三相 Y-Y- $\Delta$  變壓器。
4. 事故過程：當時有颱風來襲，事故變壓器所屬一次變電所所轄二次變電所之 69kV 架空線發生單相接地故障 [2]，3 週之後再發生二相(S、T 相)故障，再 3 週之後二次變電所的斷路器跳脫，隔離線路事故。不過再經過 5 週，故障電流再度出現，據報告資料所述，故障電流相當大，4 週之後事故變壓器之差動電驛動作，變壓器之一、二次側斷路器均跳脫。變壓器隔離之後，69kV 架空線試送電成功。
5. 資料蒐集與研判：(分解檢查)  
事故發生後，事故變壓器回廠進行分解檢查，其中 R 相未發現有任何異狀，S 相與 T 相之一次(161kV)繞組與分接頭線圈均無損壞，但二次繞組(69kV)則發生徑向嚴重變形，其中 S

相最為嚴重，P-S 絕緣筒破裂、紙包絕緣與填充物亦破損，並有多處發生短路，而且三次(11.4kV)繞組也受壓迫而徑向變形、鐵心絕緣管破裂等損傷。T 相的除二次與三次繞組之徑向變形與 S 相類似外，僅二次繞組之轉位導體紙包絕緣破損、MCT 管破損，無其他毀損報告。

#### 案例四：

- 1.時間：民國 87 年 3 月。
- 2.地點：台灣台北
- 3.變壓器：161/69 kV，200MVA 三相 Y-Y- $\Delta$  變壓器。
- 4.事故過程：如前述。
- 5.資料蒐集與研判：
  - 5.1 事後現場進行匝比試驗、電阻試驗與絕緣試驗，發現除 T 相繞組一、二次側呈現接地現象外，其餘二相繞組初步判定情形良好。
  - 5.2 分解檢查：回廠分解檢查時發現所有 R、S、T 三相線圈的二次與三次繞組均有徑向變形的現象，其中 T 相一、二與三次繞組均毀損，情形最為嚴重。
  - 5.3 值得一提的是事故變壓器事故發生之前，剛好有工作人員在現場，敘述當時變壓器發出”Hum”的異響，時間長達 20 餘秒，之後斷路器就跳脫了。

四個案例、三個運轉場所，所存在的系統條件都不相同，但共同呈現出一個有趣的順序：外部線路發生故障(或為單相、或為多相)、線路故障隔離、經過一段時間(最短 5 週、最長 2 分多鐘)、變壓器發生事故(或為近端、或為遠端)。以至少四個案例與共同順序而言，實難以解釋

線路事故與變壓器事故各為獨立事故，也就是說此類變壓器事故是因線路事故發生且排除之後才”緊接著”發生。

### 三、事故原因調查

變壓器一旦發生事故，最終的事故型態為絕緣破壞並產生故障電流，對大型油浸式變壓器而言，絕緣破壞之後的電弧放電至故障電流湧現，絕緣油會因受熱而汽化。這些特徵也是電驛執行變壓器保護的判斷依據：過電流、差電流、絕緣油氣壓力等。依保護電驛的動作情形也可以提供一部份的故障資訊，例如：故障相、故障電流等級、油氣壓力驟變速率等，但是如果要做為探討事故發生原因的資料並不充分，還需要取得其他包括系統資料與參數、變壓器結構與參數、運轉紀錄、事故波形紀錄、定檢報告、事故後各項試驗報告、開蓋檢查、分解檢查等等的資料。

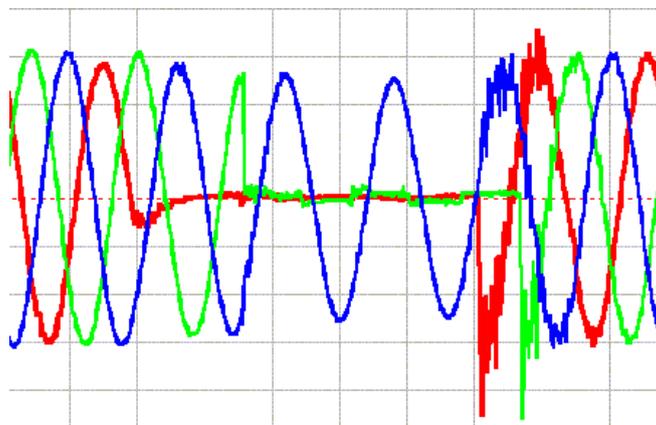
為了了解四個案例之共同特徵，以下將分別以事故波形紀錄以及繞組毀損情形進行比對。

#### 3.1 事故波形紀錄

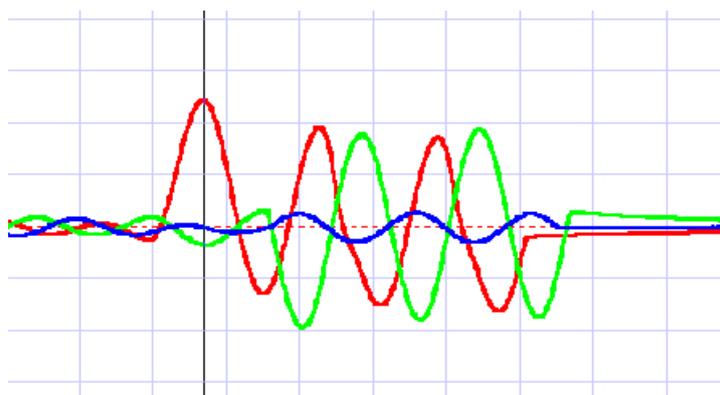
以變壓器事故為著眼，判斷重點可放在變壓器事故前後的波形紀錄。案例一因無法取得波形紀錄圖，依其文字所載，顯示出當時外部事故與變壓器事故之間存在著 95 週的正常運轉時間，也就是說此 95 週的空窗期間並無明顯的異常電壓或電流波形紀錄。

圖一與圖二所示為案例二之變壓器發生事故時之電壓、電流波形紀錄，顯示出變壓器的兩相繞組間隔不到 1 週的時間分別發生短路故障，並在事故發生後約 3 週半的時間成功的隔離。其中除了首先崩潰之繞組在崩潰前 1/4 週的電壓略低之外，其他的電壓與電流紀錄在事故前並無異常

情形出現。



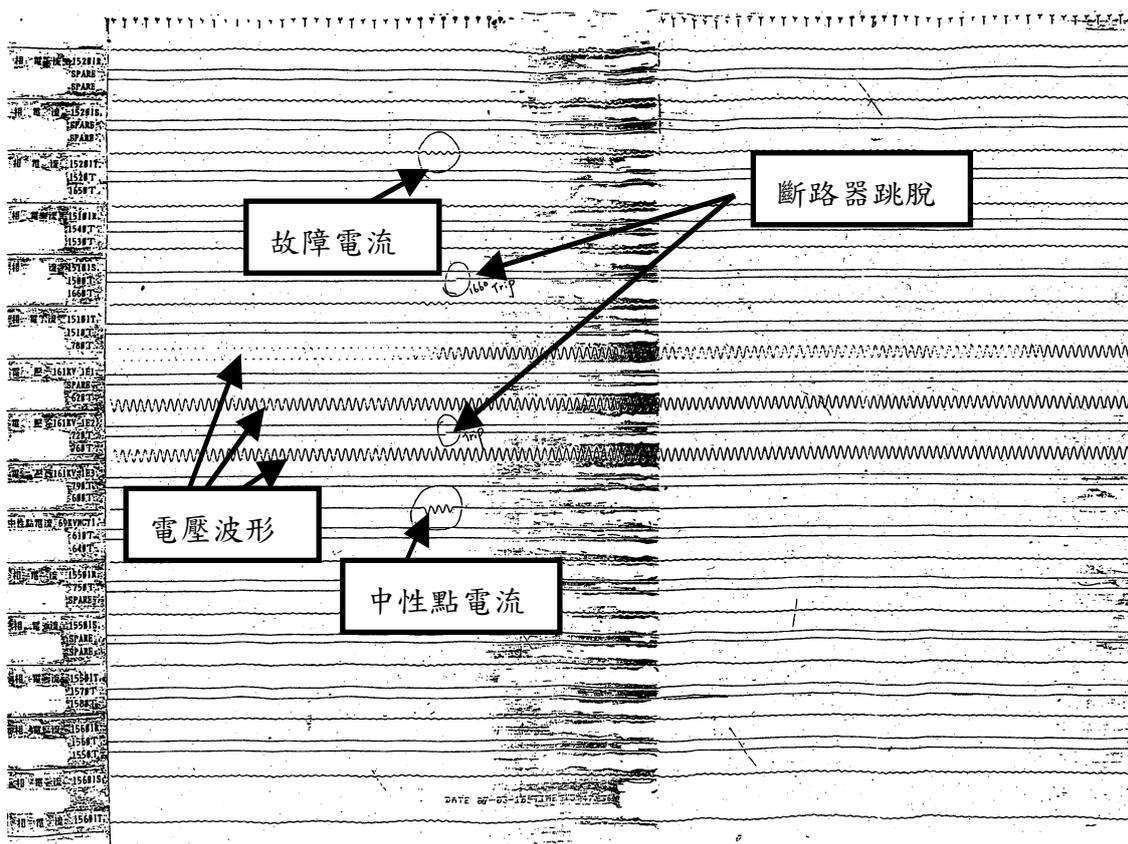
圖一 案例二事故之電壓波形紀錄



圖二 案例二事故之電流波形紀錄

案例三也無當時的波形紀錄，從文字記載上未有說明在線路事故與變壓器事故的5週期間有任何的異常電壓或電流條件出現。圖三所示為案例四之波形紀錄[2]，事故發生4週後，差動電驛動作、斷路器跳脫，事故變壓器被成功隔離。其中最特殊處是在變壓器故障之前波形記錄器並未記錄到任何異常的電壓或電流，即使在變壓器故障期間亦僅僅出現相當小的故障電流，系統電壓也未見到明顯的降

低，此現象與現場人員所述長達20餘秒的變壓器異響以及保護電驛動作所表現的故障情形實難以連結在一起。



圖三 案例四事故之波形紀錄

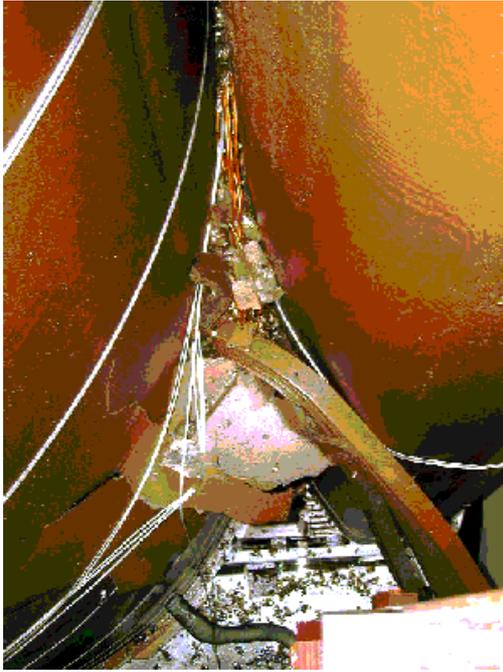
以上述的文字記載及波形紀錄來看，間隔時間或長或短，四個案例從線路事故至變壓器事故之間，系統電壓與電流均無異常的情形出現。也就是說，在無異常的突波電壓侵入或是故障電流通的條件下，變壓器“莫名其妙”的突然發生事故了。如果不是莫名其妙，則先前發生之線路或遠端設備事故定有某種程度上的關聯。

### 3.2 繞組毀損情形

案例一因為事故發生時，變壓器已服役 26 年，或許認為無維修價值，此變壓器並未進行開蓋洩油檢查或分解檢查，因此無繞組損傷報告。以圖一、二所示之案例二事故波形紀錄，有二相繞組發生接地或短路故障，其變壓器為三相一體、五隻

腳的鐵心結構，圖四所示為其開蓋檢查後之結果，其中可以發現有一相(左方)繞組因接地或短路事故造成電弧放電至絕緣筒爆開。

圖五所示為案例三變壓器在分解檢查後所得之照片，圖中明顯看到幾乎有 2/3 繞組高度的徑向挫曲(Buckling)，且在繞組 2/3 高度位置上存在有電氣事故所產生之橫向傷痕，二者呈現十字交叉狀態。此為 S 相的二次側繞組，S 相的一次側繞組並無損傷，三次側繞組則受到二次側繞組的擠壓也產生相同的挫曲，但無電氣損傷。另外，T 相的三個繞組損傷情形與 S 相相似，不同的是 T 相繞組無任何的電氣傷痕。



圖四 案例二變壓器繞組毀損照片



圖五 案例三變壓器二次側繞組毀損照片

圖六所示為案例四變壓器 T 相繞組二次側線圈的毀損照片，很清楚的損傷情形與圖五的照片類似：超過 2/3 繞組高度的徑向挫曲、橫向的電氣事故傷痕、二者呈現十字交叉。此次事故三相繞組均損毀，其餘 R 相與 S 相相繞組之二次側也有與圖六類似之徑向挫曲，三相繞組的三次側線圈也都受到擠壓而出現類似的挫曲傷痕。R、S 兩相的一次側線圈並無明顯傷勢，但 T 相則有電氣傷痕存在。



圖六 案例四變壓器二次側繞組毀損照片

從圖四至圖六的照片來看，雖然案例二尚未進行分解檢查，單從圖四之外層絕緣筒可以發現，右方繞組之一次側線圈當有明顯的徑向挫曲，以其長度而言，至少自繞組中段一直延伸至底部。

以上是資料較完整的四個案例，如果再加上其他具有類似傷勢的事故變壓器，



圖七 某變電所變壓器線圈毀損照片



圖八 變壓器線圈受損照片

#### 四、事故特徵

變壓器的主要結構係將繞組由低壓至高壓分層”箍緊”圍繞於鐵心柱之上，包含匝間、繞組之間、繞組與鐵心之間、繞組與外殼之間，通常有多種絕緣設備來提供足夠的絕緣能力。雖然絕緣破壞主要是由電壓條件所造成，但是發生原因並不僅限於過電壓的情形，至少還包含過電流與振動的因素。變壓器在電機機械中歸類為”靜態電機”，亦即不以動能作為運轉的要件，但在”電、磁、力”共生的條件下，變壓器運轉時在繞組線圈與鐵心都存在著相當複雜的機械應力。所以變壓器運轉時會

如圖七所示的國內中南部某變電所事故變壓器的繞組損傷照片；圖八為國外某變壓器受損繞組的照片[3]等，共同的特徵：大範圍的繞組線圈徑向挫曲，實際的案例應不僅僅只有六案。因此可以說，後發性的變壓器事故雖也不常見，但絕不是偶發事故。

振動、有異響；故障時繞組可能產生位移、與外殼撞擊、膨脹鼓起、塌陷、徑向挫曲、軸向擠壓、線圈扭曲、線圈或導體旋轉等等，都是機械應力的傑作。

除了過電壓、大電流、機械應力外，再加上絕緣油以及電弧放電等條件，不論事故原因為何？每一次的變壓器事故，通常會伴隨產生電氣、機械、燃燒、爆裂等等傷痕，並且在封閉的殼體內混雜在一起。此種情形對於事故原因調查是相當不利的，除了將各種傷痕記錄並分門別類、定出次序、再研判因果關係之外，假設事故原因並模擬事故的演進順序也是相當重要的技巧。不同成因的線路過電壓、過長的貫穿式故障電流、絕緣老化等等不同因

素，所造成的變壓器傷害會呈現出不同的破壞順序與結果，也就是說不同的事故原因會有不同的事故特徵。因此，後發性變壓器事故的真正發生原因在尚未判明之前，先了解其事故特徵是必要的工作。

從以上的資料，後發性的變壓器事故至少具備下列特徵：

後發性：伴隨著外部事故且在外部事故成功隔離後一段時間才會發生。

不對稱性：目前為止已知不論外部事故的故障型態為何？後發性變壓器事故的故障型態表現出來的均為多相繞組受損，也就是說外部事故與變壓器事故彼此有關聯，但事故型態並不一定相符。

機械傷勢：最明顯的傷勢為大範圍的徑向挫曲，其長度往往超過繞組長度的1/3，而最後的絕緣崩潰點是發生在挫曲傷痕的其中一點。

無異常訊號：在最後絕緣崩潰發生之前，產生機械傷勢的過程中無任何的電壓或電流異常訊號，也無過熱使絕緣油汽化的條件。換句話說，以目前各種功能的保護電驛可能都無法偵測出來事故的進行。

除此之外，以國內的案例而言，還有下列的二個特徵：

常發生於設有電纜引接線之場所。

不論是高壓側或低壓側，受損繞組為與電纜連接之一側。

## 五、結語

從不同的文獻、變壓器事故調查報告及運轉人員的實務經驗中發現，後發性變壓器事故在電力系統中存在已久，到目前為止對於事故原因大多採推測並認為是外部故障電流流經變壓器的時間過久所造成

的破壞，但此推測並非受到一致的肯定，也有人因此進行一連串的變壓器破壞試驗[4]，仍無法取得令人滿意的結果，所以真正的原因以各項事故特徵到目前為止仍是爭論的焦點。

大型變壓器發生事故時可以用”損失慘重”來形容，除了變壓器本身的價值之外，運轉損失、復電搶修、損壞設備移除、新設備置入、危險場所對工作人員的阻礙與風險都應列在損失之列。因此，事故發生之後判明事故原因並防範再度發生是重要而且必要的工作。由於事故調查工作的困難度、時間壓力以及其他不利的因素，往往耗時甚久而且最後經常事與願違。一次成功的事故原因調查，需要有各種有利條件的配合，包括完整的資料與事故現場、坦誠的合作、互助與信賴之外，經驗累積與模擬分析也是不可或缺的因素。

本文的提出旨在拋磚引玉，對於後發性變壓器事故的特徵及形成原因相信無法僅以上述的資訊勾勒清楚，相對的反而延伸出更多的疑點。隨著社會發展及技術演進，電力電纜的使用只會逐年增加，若無適當對策，此類事故將如影隨形，不斷的產生困擾。為了早日克服此一難題，需要有政策上的支持，也需有更多夥伴的投入。我們將持續分享此一議題的經驗與心得，也期待有更多的案例、資訊與經驗的協助。

## 參考文獻

[1] IEEE C57.125-1991, “Guide for Failure Investigation, Documentation, and Analysis for Power Transformers and Shunt Reactors,” pp55-56.

[2] 盧光常，黃思倫，許文昌，陳聰榮，

- 張文曜，蔡世育，”線路事故引起變壓器共振之模擬分析”，台電工程月刊 (ISSN 0494-5468)，第六五八期，九十二年六月，pp14-34。
- [3] RSM & Repts Resources, “SFRA and Hoop Buckling,” Doble Engineering Ltd., 2003.
- [4] Robert M. Del Vecchio, Bertrand Poulin, and Rajendra Ahuj, “Radial Buckling Strength Calculation And Test Comparison for Core-Form Transformers,” Proceedings of the 2001 International Conference of Doble Clients - Sec 8-1.