

出國報告（出國類別：實習）

蒐集國外廠商開發之電力變壓器快速 釋壓裝置設計

服務機關：台灣電力公司輸變電工程處南區施工處

姓名職稱：張耀元 電機工程師

派赴國家：法國 德國

出國期間：105 年 8 月 27 日至 105 年 9 月 4 日

報告日期：105 年 11 月 3 日

摘要

變壓器為變電所之心臟，其不僅擔負供電任務亦是電壓調整的舵手；當電力變壓器內部發生異相高壓引線短路時(如樂善 D/S 及峨嵋 E/S 配電變壓器之事故案例)，因短路故障所形成之高溫及高壓等能量現象，將使絕緣油瞬間產生大量可燃性油氣；若前述油氣無法即時排放至安全區域，則可能導致變壓器外殼破裂造成大量油氣與空氣中氧結合引發建築物火災及毀損之情形；此等對現場維護、值班人員之人身及對變電所建物構造等安全均造成威脅，若不幸波及鄰近民房甚至將引發民怨，因此有必要研究當變壓器發生內部引線短路事故時，在箱體內之動態壓力產生到靜態壓力尚未形成前，於 20 毫秒內迅速釋放內部高壓力之油氣，以有效控制事故後釀災之規模。

本文共分四個章節，第一、二章說明出國目的及行程，第三章說明國外變壓器設備廠商實習快速釋壓裝置發展、運用技術及相互交流變壓器設備之知識，第四章為出國實習計劃心得分享與建議事項。

關鍵詞：

電力變壓器(Transformer, TR)

快速釋壓裝置(Pressure Relief Device, PRD)

變壓器保護(Transformer Protector, TP)

目錄

第一章 實習目的	1
第二章 實習行程	2
第三章 實習心得	4
第 1 節 SERGI 變壓器保護(TP)	4
第 2 節 MR 快速釋壓裝置(PRD)	10
第四章 心得與建議	14

圖目錄

圖 2-1 參訪照片	3
圖 3-1 變壓器內部故障啟動快速釋壓裝置流程圖	6
圖 3-2 破裂盤(SERGI 工廠).....	8
圖 3-3 快速釋壓裝置及氮氣噴發系統圖	8
圖 3-4 快速釋壓裝置控制盒(SERGI 工廠).....	8
圖 3-5 短路事故電弧現象與氣化瓦斯之關係.....	9
圖 3-6 氣體膨脹量與壓力關係圖	10
圖 3-7 SERGI 箱體快速釋壓作法及電氣動作流程圖	10
圖 3-8 MR PRD 快速釋壓裝置圖(MR 提供).....	11
圖 3-9 快速釋壓裝置構造圖及防護外罩(MR 提供).....	12
圖 3-10 MR PRD 警報接點及彈簧(MR 提供).....	13
圖 3-11 某廠牌釋壓裝置壓力測試圖	13
圖 3-12 MR PRD 壓力測試平台及出廠測試報告.....	14

表目錄

表 2-1 實習行程.....	2
表 4-1 參訪快速釋壓裝置比較表.....	16

第一章 實習目的

在交流電力系統中，有著大大小小的變壓器裝置存在於系統當中，發電廠所產生的電力需仰賴昇壓變壓器，將大量電壓提升到超高電壓，輸送至鄰近變電所匯流排，變電所在將此電力分送至各負載中心變電所，或部分電力經由變壓器降壓輸送至二次配電所或大型工業用戶，或直接降壓為配電級電壓後，配送到一般用戶，由此可見，變壓器在整個交流電網中扮演極重要角色，故如何防止變壓器因短路故障引起火災事故亦變成台電的重要課題。

變壓器故障原因相當多，但大多歸咎於絕緣能力遭受破壞，變壓器於新品時擁有最大絕緣裕度，但絕緣強度會因為設備老化而慢慢下降，導致喪失其絕緣性能而無法有效隔離具有電位差之兩個電極，例如繞組之間的相間短路、有載分接頭切換器或引出線故障等，上述情況發生時都會對變壓器設備或現場維護人員安全造成威脅，故變壓器周邊保護裝置必須能及時啟動，迅速隔離因短路故障所形成的高溫高壓油氣，降低釀災之規模。

油入變壓器發生閃絡或短路時，由於會產生大量可燃性氣體而使變壓器內部之壓力會突然升高。在此情況下應立即儘速將變壓器由系統隔離，以免使系統遭受干擾或讓變壓器絕緣油由釋壓裝置排出。歐洲先進國家正積極發展此等電力變壓器快速釋壓裝置，在電力變壓器發生引線短路事故時，在箱體(tank)之動態壓力產生到靜態壓力尚未形成前，能於 20 毫秒內迅速釋放內部高壓力之油氣，以免災害波及現場設備及施工維護人員。

本次出國實習至 SERGI 法國總公司及 MR 德國分公司(MESSKO)，實習相關變壓器保護 TP(transformer protector)及快速釋壓裝置 PRD(pressure relief device)之發展並蒐集相關技術資料。

第二章 實習行程

本次出國行程及實習內容如表 2-1 所示：

表 2-1 實習行程

題目：蒐集國外廠商開發之電力變壓器快速釋壓裝置設計		
日期	行程	地點
105 年 8 月 27 日~28 日	往程	台北—巴黎
105 年 8 月 29 日~30 日	SERGI 公司	巴黎
105 年 8 月 31 日	移動日	巴黎—法蘭克福
105 年 9 月 1 日~2 日	MR 公司	法蘭克福
105 年 9 月 3 日~4 日	返程	法蘭克福—台北

105.8.27~28 先至法國巴黎位於郊區的 SERGI 公司先進行快速釋壓裝置的會議討論，會中簡報其設計原理及及相關技術發展，之後再赴工廠參觀其快速釋壓裝置組裝過程，其中可以發現工廠相當乾淨，組裝過程也都隨時有人嚴密監控，產品更是銷售世界各地超過 67 國，實績超過 2213 套快速釋壓裝置。105.9.1~9.2 則是到德國法蘭克福 MR 的分公司 MESSKO 參訪其快速釋壓裝置，首先至辦公室拜訪業務及技術部門主管經理等人後，緊接著聽取簡報以便了解公司的概況，並與業務經理 Eric 討論其快速釋壓裝置設計原理與應用技術，再參觀其 PRD 組裝工廠，受益匪淺。



圖 2-1 參訪照片(上:SERGI 公司 下:MR 公司)

第三章 實習心得

變壓器之保護裝置適用以保護、偵測變壓器使用中的各種狀況，以確保變壓器在使用上的性能及故障發生時之處置狀態，對於變壓器安全性扮演極重要角色，尤其目前大部分變電所已經無人化運轉，故變壓器周邊保護裝置是否能起到養兵千日用於一時的關鍵時候就更顯重要。

基於安全性考量及運轉維護方式，現行保護裝置有警報及跳脫兩種模式，一般而言變壓器無立即性危害情況採用警報接點，如油、線溫度過高警報，反之有立即性情況則採跳脫接點，如變壓器內部因故障產生大量游離氣體，當壓力高於設定限制值時，釋壓裝置應立即動作跳脫，俾能保護變壓器安全。

變壓器故障性質一般可分為「過熱故障」及「放電故障」兩大類。過熱故障指變壓器內部局部過熱、絕緣油及繞組溫度升高，而放電故障指變壓器內部在高電場強度作用下所造成的故障，而這兩類的故障都會使變壓器絕緣性能下降或劣化，一旦有短路事故發生時，在變壓器內部會產生巨大的動態壓力波，此時釋壓裝置必須能迅速啟動電驛跳脫，避免形成靜態壓力導致變壓器槽內壓力達到極限而爆炸並產生後續大火意外災害。故本次赴法國 SERGI 及德國 MR 公司蒐集有關變壓器快速釋壓裝置之設計原理及相關變壓器設備參訪心得，本章將分兩小節論述：

第 1 節 SERGI 變壓器保護(TP)

供電是生活重要基礎設施，對於設有變電所的單位，必須以最專業的態度維護運轉，有鑑於變電所對於設置消防措施要相當求嚴格，原因是油入式變壓器一旦因為外部或內部因素，造成發生短路故障，時常引起火災的事故，往往造成現場周遭環境設施嚴重的破壞及人員可能的傷亡與重建的費用，而損失金額是興建變電站成本的數倍再加上企業體形象不佳等，損失難以估計並徒增日後建置的困難度。

目前市售變壓器，在消防領域分類適用於屋內場所，中小型容量的需求有模鑄型變壓器，強調使用樹脂真空灌鑄成型，不容易因為變壓器由外部或內部因素引起

模鑄型變壓器的短路故障，造成火災，以及 SF₆ 充氣式變壓器，而 SF₆ 充氣式變壓器變電站的建構成本高出油入式變壓器數倍，往後的維護成本是更耗時耗力的費用，因此，依實務的經驗看來是油入式變壓器應用範圍最廣及運轉維護技術成熟等優勢，只是還是有發生由外部或內部因素引起油入式變壓器的短路故障引發的火災事故，需要進一步檢討如何防止這類事故發生。

變電所有例行性的維護保養，對於變壓器還有既設的防範機制，例如：保護電驛與斷路器、撲氣(布氏)電驛、突壓電驛、釋壓閥及油中氣體監控與部分放電監控等，而且設置防火牆及消防措施。然而，實際經驗看到全球油入式變壓器發生火災的事故未曾停止，在完善定期保養變壓器的前提下，如何將變壓器安全標準提升至最高等級，這些設施及保護監控有其必要功能性，例如：資產管理的預知保養，可以充分藉由監控的現象去分析判斷可以掌握的資訊，然而，這些裝置在遭遇到短路故障等大能量事故的條件下，還是會因為機殼爆裂引起火災，因此需要再增設更快速作出反應的防爆防火安全裝置，能夠在油入式變壓器發生短路故障後，於幾毫秒內就釋放出大量膨脹油氣，確保變壓器的機殼不會因急遽上升的內部壓力破裂再引發火災，將事故損失降至最低。

其實，變電所一直是存在油入式變壓器可能發生火災的風險，根據 CIGRE 的統計報告，每年運轉的油入式變壓器有至少 0.1% 的機率發生火災事故，而平均 40 年壽命的油入式變壓器來看，每部機約有 4% 發生火災的可能。或許發生機率不高，一旦發生事故，所造成的波及燃燒週邊設施、可能人員的傷亡及甚至於造成民怨而衝擊既有設施的恢復運轉等，的確不可忽視，需要進一步作出防範機制。

引起如此重大事故的原因複雜而且難以預測，主要原因有電氣及化學作用兩大類，電氣作用方面，例如：電阻發熱、感應發熱、電介質發熱、電弧發熱、靜電發熱及雷擊發熱等；而化學作用是因熱與變壓器絕緣油發生變化等。然而，終究會引起變壓器內部產生靜態壓力將變壓器機殼撐破才是主要的原因，舉例來說，油入式變壓器發生熱油交換作用之後，立刻會產生急劇的膨脹氣體，開始發生動態傳播的

壓力，進而演變為靜態壓力，假設當變壓器內部產生的靜態壓力大於機殼可以承受的壓力就會造成機殼破裂。再加上若斷路器尚未解聯，只要構成火災的三要素有短路電弧當作熱源、變壓器絕緣油是可燃物及外部大氣中的氧氣接觸就會發生火災。

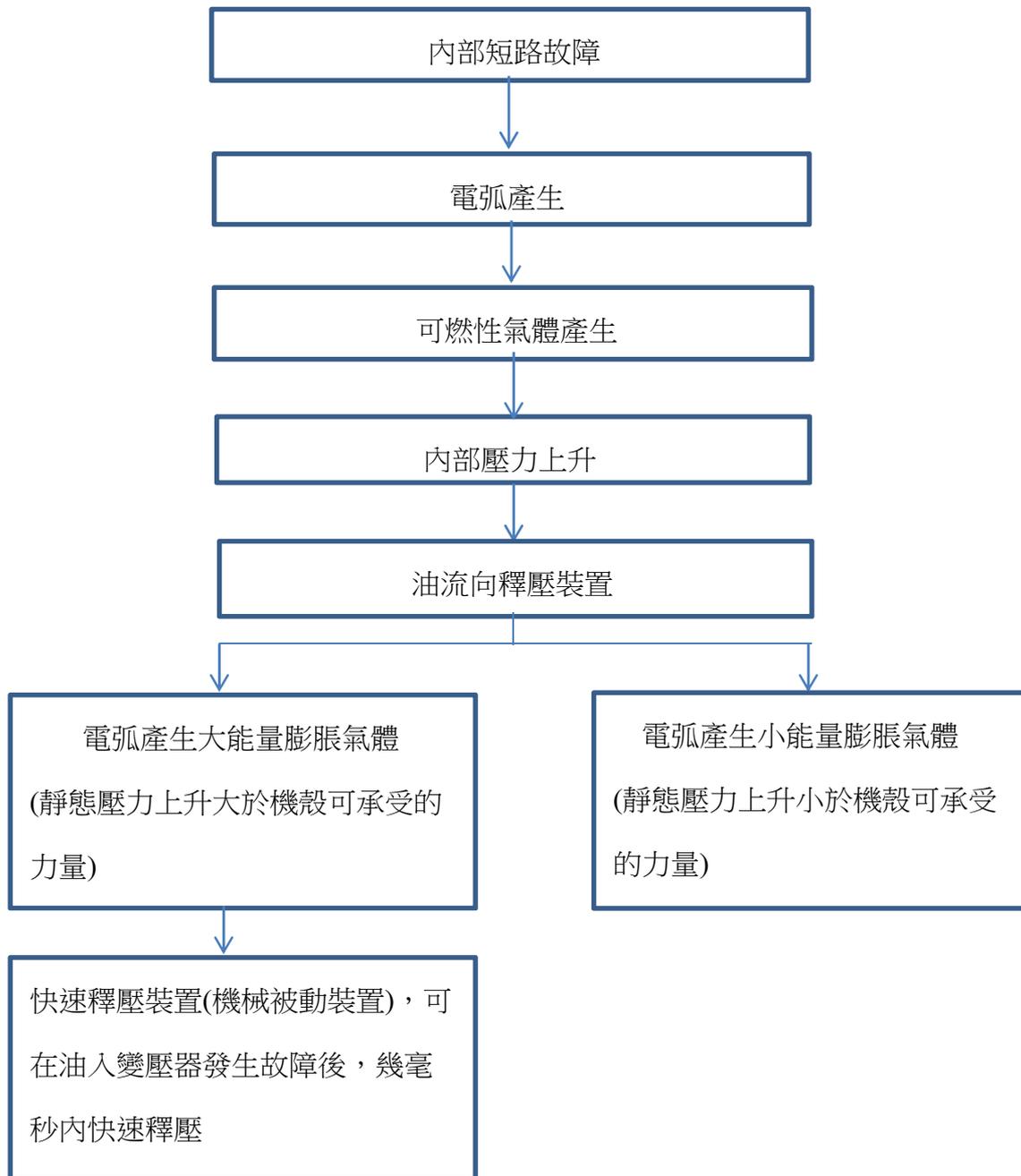


圖 3-1 變壓器內部故障啟動快速釋壓裝置流程圖

探討油入式變壓器產生火災的因素，當然與熱源、可燃物及氧氣三要素有絕對的關係。其變壓器發生故障，不論是從內部或外部因素引發，造成內部電弧閃絡，而有熱油作用，瞬間產生大量膨脹氣體，開始以每秒 1200 公尺的速度動態傳播於變壓器箱體內，接著形成靜態壓力將機殼撐爆破裂，雖然變壓器設置有電氣保護帶動斷路器隔離解聯，但是依據往常的事故經驗看出，這類大能量的電弧故障一旦發生，機殼被撐開的時間通常比變壓器既設監控系統可以作出來的有效反應快上許多，才會引起一發不可收拾的火災。當然，根據 CIGRE 的經驗說明，也曾經有發生大能量短路電弧，引起機殼破裂後卻沒有發生火災的極少數案例，剛好電弧發生的位置於變壓器的下方，在變壓器內部曝露於外部空氣之前已經先啟動保護而中斷電弧熱源。事實上，雖然發生這類事故機率不見得高，檢視防範發生的工作不可忽略，相信油入式變壓器防爆防火的工作如果作得完善，變電所將會發生火災事故將降至最低。

全球防爆防火權威，NFPA(National Fire Protection Association)美國消防協會，明確定義快速釋壓系統：被動式機械系統作用在發生電氣故障後，幾毫秒內釋放變壓器的壓力，"Fast Depressurization System :A passive mechanical system designed to depressurize the transformer a few milliseconds after the occurrence of an electrical fault."。在 2010 年編修 NFPA850 及 NFPA851 章節，此快速釋壓裝置已經確認，建議高電壓等級變電所及水力電廠應用此系統來防止火災。

建構此快速釋壓裝置系統，基本架構是裝設快速釋壓破裂盤(Rupture Disk)、釋壓緩衝室(Decompression Chamber)及氮氣噴發裝置，如圖 3-2、3-3，目的是發生故障後，大量排出變壓器內部的膨脹氣體，在配合控制盤 control box(如圖 3-4)啟動噴發氮氣進入變壓器箱體內，以降低變壓器的溫度及排出殘餘的可燃性氣體，呈現可以安全檢修的作業環境，整合出有效防止油入式變壓器因內部發生短路能量而引起急遽膨脹氣體將機殼撐爆破裂導致火災的變壓器保護設施。

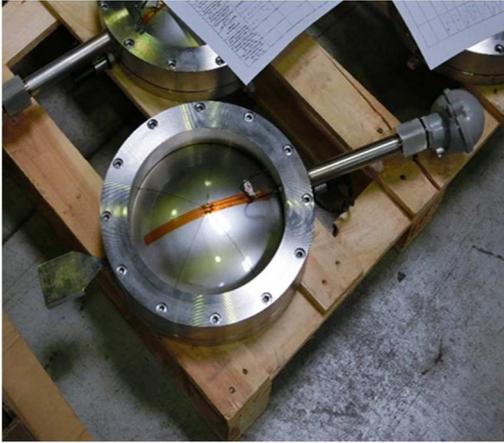


圖 3-2 破裂盤(右:已動作 左:正常 SERGI 工廠)



圖 3-3 快速釋壓緩衝室及氮氣噴發系統



圖 3-4 快速釋壓裝置控制盒(SERGI 工廠)

電弧熱源可達到好幾千度，非變壓器絕緣所能承受的絕緣破壞，而此熱源與絕緣油交換作用後，產生大量的膨脹氣體開始以 1200m/s 的動態速度傳播，基於變壓器箱體的空間，將會在 100ms(毫秒)內轉而形成靜態壓力，這急遽膨脹氣體發生後所形成的靜態壓力會隨著成形能量與壓力而不同，其結果往往是大於既設油入式變壓器機殼所能承受的規格耐受靜態壓力約 0.7~1.2bar(1bar=14.5psi)的量測標準，所以縱使變壓器設置有靜態壓力的釋壓閥，對於這快速成形的靜態壓力是對整個機殼施壓而不是僅針對此釋壓閥排出油氣，所以如何更快速及有效的釋放因故障引發的快速膨脹氣體，才是確保變壓器不會因機殼破裂而且斷路器尚未動作之前引發火災的重要關鍵。

當變壓氣內部發生故障時，電弧於 1ms(毫秒)內會產生大量氣體，進一步與電弧作用後產生飽和電漿，第一個百萬焦耳(Mega Joules)的能量就會產生 2.3 立方公尺可燃性氣體，而其餘之 99 百萬焦耳僅產生 2 立方公尺的氣體，如圖 3-5，因此可以了解在第一次壓力峰值出現後，後續電弧能量所產生之氣體量將趨於緩和，故 TP 設計原理是在第一個動態壓力峰值的衝擊波產生時，就能在幾個毫秒內啟動變壓器保護來防止變壓器爆裂而引起火災。

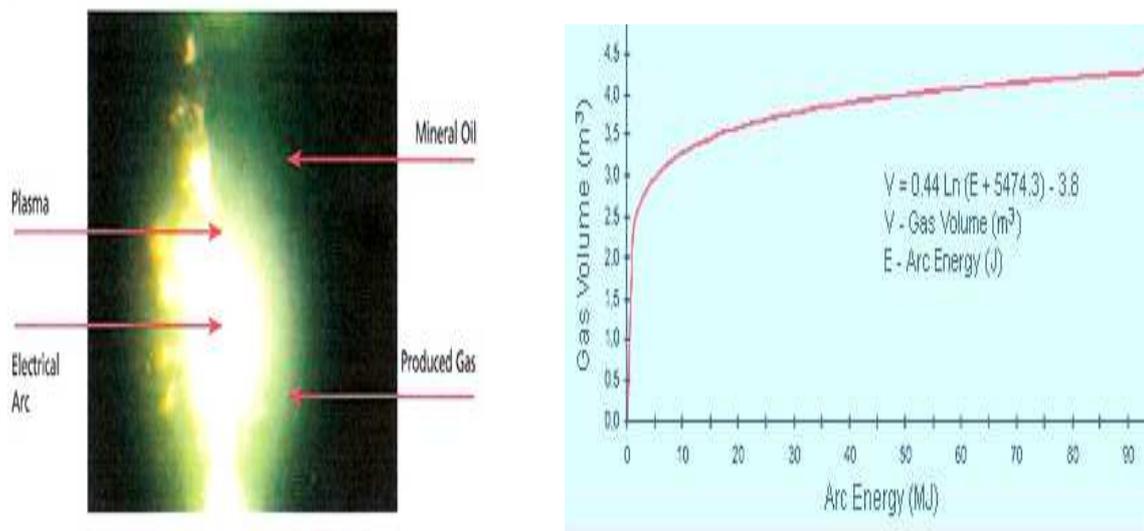


圖 3-5 短路事故電弧現象與被氣化瓦斯關係圖

壓力上升的速度會因箱體壁的膨脹而緩和，此緩和程度依箱體的膨脹係數 $[L / (kg/cm^2)]$ 而定，一般箱體越大膨脹係數也會越大，氣體的膨脹量與壓力特性如圖 3-6 所示，其中 P_e 表示彈性限度壓力(一般為 $2 kg/cm^2$)，當壓力進入塑性領域時，箱體膨脹量可以用兩倍計算。

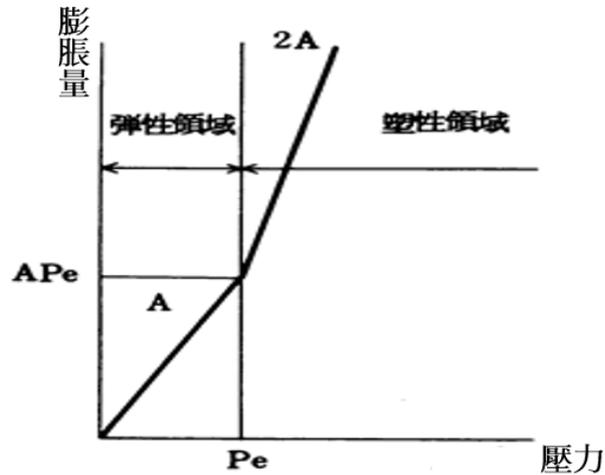


圖 3-6 氣體膨脹量與壓力關係圖

其動作原理分作兩階段，第一階段是利用熱油交換作用產生的膨脹氣體先藉由衝破破裂盤來快速釋壓，將大量的油氣排放釋壓緩衝，確保變壓器機殼安全，後續再由既設變壓器電氣或機械保護系統啟動跳脫保護與系統隔離，即進入第二階段的氮氣噴發，當控制盒接收到電氣及 TP 訊號時可依使用者設定時間噴發氮氣，冷卻其變壓器溫度並且排出箱體內可燃性氣體後，以便安全送修，如圖 3-7。

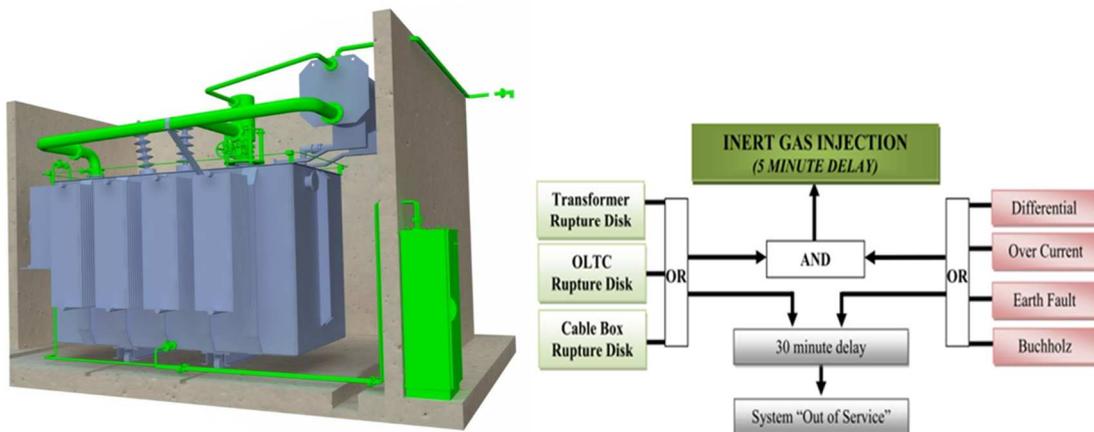


圖 3-7 SERGI 箱體快速釋壓作法(綠色部分為 TP)及電氣動作流程圖

所以對於存在風險偏高及富有重要任務的機組可以考慮優先裝設此安全裝置系統，縱使發生短路故障不會波及其他設施，可以縮短復電時間，且系統設備只需要更換破裂盤等部分零件就可以繼續使用。此系統的適用彈性相當大，任何油入式變壓器既設的人孔蓋都可以經過評估後再裝設，以不需要變更變壓器既設箱體為原則，盡量降低因增設此裝置時可能導致的漏油風險。

第 2 節 MR 快速釋壓裝置(PRD)

參考台灣電力公司大型電力變壓器採購規範，變壓器箱體必須能承受 $1.05\text{kg}/\text{cm}^2$ 之內部壓力，及抽真空時之外部壓力，放壓裝置之動作壓力為 $0.7\text{kg}/\text{cm}^2$ ，也就是說當變壓器內部因故障或短路事故壓力超過 $0.7\text{kg}/\text{cm}^2$ 時須正確自動動作洩油以釋放壓力，壓力釋放後能自動復歸，並裝設一組警報接點及一組跳脫接點，一旦發生短路事故，機械保護釋壓裝置可以順利動作，其構造堅固，保養檢查簡單。此裝置一方面可安裝於變壓器本體孔蓋上或者有載分接頭切換裝置(on load tap changers)OLTC 上，下圖 3-8 為赴德國 MR 公司參訪之快速釋壓裝置 PRD:



圖 3-8 MR PRD 快速釋壓裝置圖(MR 提供)

整個 PRD 裝置構造詳如圖 3-9，利用法蘭及襯墊安裝於變壓器上蓋上，且有外罩加以保護，以免遭受環境或熱油污染。其動作原理是利用筏盤藉由彈簧力頂壓在

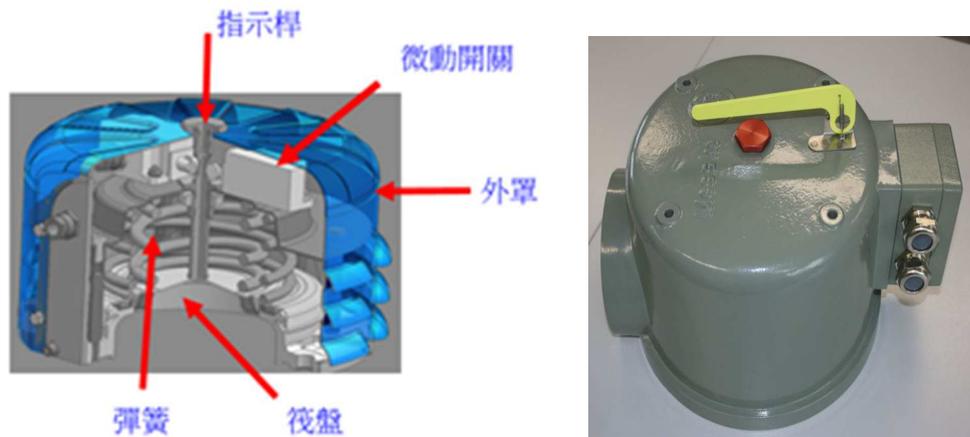


圖 3-9 快速釋壓裝置構造圖及防護外罩(MR 提供)

襯墊上當變壓器內之氣壓上升至 $0.7\text{kg}/\text{cm}^2$ (約 10PSI)以上時，閥盤因承受壓力，迫使彈簧收縮，筏盤隨即上移，此時指示桿亦跟著上移，方便現場維護員在遠處就可查知釋壓裝置狀況，此時油隨即從縫口溢出達到釋壓效果，同時觸動微動開關上警報接點，電驛偵測到此警報訊號後，啟動斷路器進行跳脫動作以保護本身及周遭電力設備，當內部壓力降至 $0.7\text{kg}/\text{cm}^2$ (約 10PSI)以下時，筏盤藉由彈簧回復力復歸回原位，排油縫口隨即封閉，釋壓完畢後指示桿需藉由人工復歸，並勘查現場變壓器有無損害狀況。

MR PRD 的優點在於微動開關警報接點上有做防水處理，可以達到 IP65 等級的外殼保護，相較台電目前快速釋壓裝置容易因為動作接點(極限開關)進水而導致誤動作，故假設能在接點上作好防水處理就能避免如此情況再度發生，畢竟台灣屬於潮濕氣候，變壓器年限動輒就 20 至 30 年，很容易在接點或跳脫回路上有水氣的聚集造成誤動作。另一項優勢是在於它本身彈簧的設計用料，它的精密度可依 DIN2095 標準，不易因使用年限過長而造成彈性疲乏，且反應時間只須 2ms 使得快速釋壓裝置能在設定壓力值隨即釋壓，並使用高規 KTL 塗層，以防止腐蝕及磨損，如圖 3-10。



圖 3-10 MR PRD 警報接點及彈簧(MR 提供)

目前本公司大部分使用某廠牌的釋壓裝置，依照過去測試經驗此裝置可能存在有洩漏及釋壓值誤差等問題，如圖 3-11，其中橫作標為測試時間軸(ms)，縱座標為壓力軸(bar)，可以發現在測試五個週期後，第一次釋壓誤差 1.4psi，第二次釋壓會有筏門洩漏且釋壓時間過久的問題，約 100ms 才完成釋壓，一般而言，箱體內經過 100ms 已由原本動態壓力轉變為靜態壓力，一旦油箱內產生大量障氣而無法在設定

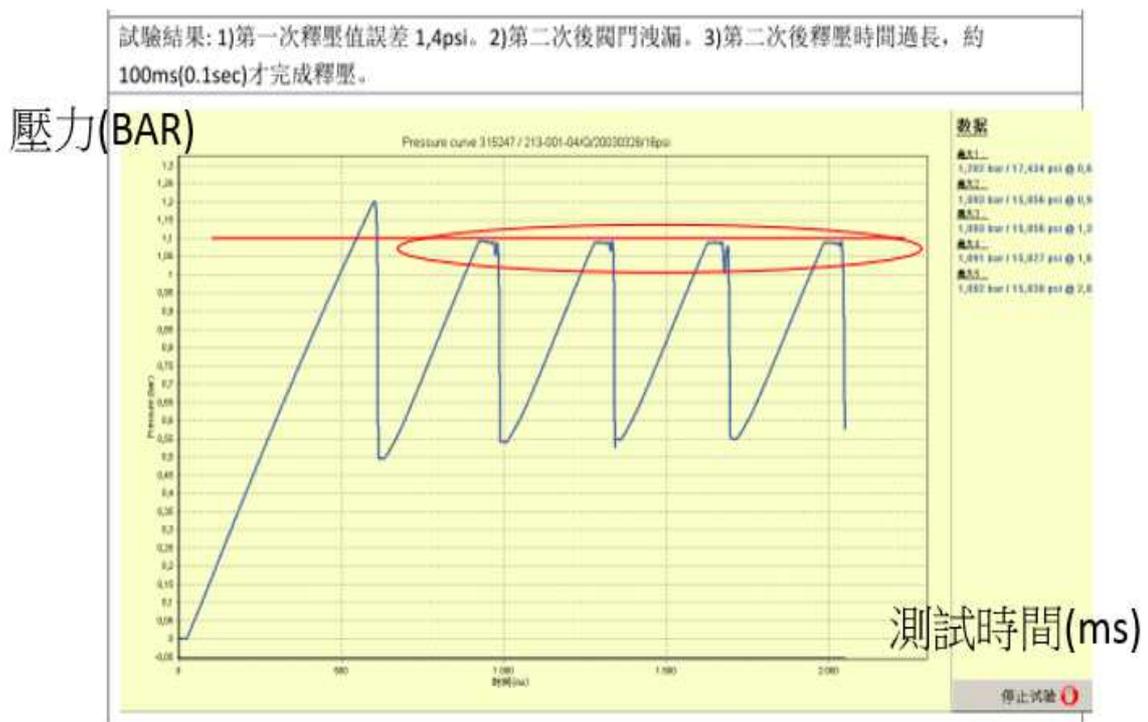


圖 3-11 某廠牌釋壓裝置壓力測試圖

壓力即時釋壓，多少對變壓器本身運轉存在風險。由於台電目前大多使用油入式變壓器，充填的油量不少，一旦發生事故，如未能及時掌控，善後工程想必更加困難。故 MR PRD 釋壓裝置在訂單出廠前均會施作壓力測試及洩漏測試，產品通過測試後會提供完整的測試曲線報告，讓客戶能完全掌握產品品質，如圖 3-12。

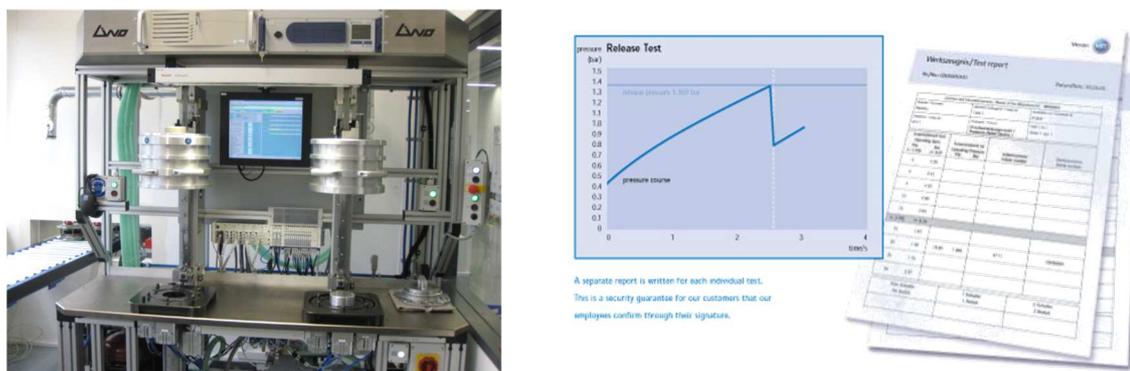


圖 3-12 MR PRD 壓力測試平及出廠測試報告

第四章 心得與建議

- 一 本次奉派前往德國及法國實習電力變壓器快速釋壓裝置設計方式，非常感謝參訪過程中每個曾經協助我之夥伴及長官，雖然變壓器目前已屬國產化設備，但針對變壓器保護裝置與國外先進國家比起來仍有段落差，故利用本次參訪實習機會可與國外廠商相互交流並蒐集相關資料，不僅對本身自己工作上有相當程度上幫助，對往後人生經驗上也是一種層次的提升。
- 二 本次實習參訪德國跟法國的公司，很明顯感受到兩國國家文化間之差異，法國人明顯浪漫且生活步調較為優閒，德國人做事就相較一板一眼，也較為嚴謹，參訪德國 MR 工廠時可以發現場地相當乾淨，且所有零組件都置放相當整齊，且聽 MR 現場員工表示所有組裝設備的工具都是自己生產，外面是完全買不到，每個零組件設備都有各自的工具，正所謂「工欲善其事，必先利其器」，也造就出德國世界工業帝國的稱號。
- 三 快速釋壓保護裝置已附屬在油入式變壓器新購案規範內，變壓器廠商礙於成本考量對於保護裝置的建置成本往往投入的不高，變壓器雖是安全的電力設備，但組裝完成加入系統之後，會受到系統外部因素影響，例如雷擊或系統故障電流通過繞組，這些衝擊是會慢慢累積的，故日後台電採購變壓器時，假設裝機地點位於市中心或人口較密集之處，如多目標變電所、地下變電所、密集住宅區、商業區變電所、屋內式超高壓變電所，建議設備提高釋壓裝置產品規格，例如我們公司也在大安 E/S 345kV 自耦變壓器採購案補充規定 A.TR 須附防止油箱破裂設施(採用大容量快速釋壓裝置或利用變壓器儲油槽採避壓空間方式規劃)，避免日後變壓器因短路事故發生箱體爆裂危及變電所運轉及維護人員安全。
- 四 目前市售變壓器的快速釋壓保護裝置，一種為常見的釋壓閥 96D，此設計針對內部壓力持續的上升，並累積到一定的壓力值時，才真正的卸油釋壓，但並無法針對變壓器槽內電弧產生之快速壓力變化做出即時之反應，只能等到動態壓

力產生後變成靜態壓力後才真正的達到釋壓功能。而快速釋壓保護裝置是針對變壓器油槽內所急遽動態壓力產生後於幾毫秒內，防止變壓器機殼因動態壓力產生轉變為靜態壓力時被撐破而釋壓。兩者的設計與保護目的不同，所以動作與釋壓的方式也不盡相同，如表 4-1，故針對不同形式的變電所如果引入適合的快速釋壓裝置，就能使變壓器運轉更為完備。

快速釋壓產品	設計原理	產品優缺點	適用地點
SERGI TP	利用衝破破裂盤來使動態壓力釋壓，控制盒接收到警報訊號後啟動氮氣噴發系統	釋壓時間即短(約2-20ms)，產品動作完須更換破裂盤及氮氣鋼瓶，價格昂貴，但安全性高	市中心變電所 多目標變電所
MR PRD	利用彈簧機械原理來釋壓，微動開關傳遞訊號給跳脫接點切離送電系統	釋壓時間較久，但價格較為低廉，也無須更換備品	一般變電所 屋外變電所

表 4-1 參訪快速釋壓裝置比較表