

變壓器後發性事故與故障電流之機械應力

亞東技術學院電機工程系
台電綜合研究所高壓室

盧光常 中山科學院 陳孟嘗
鄭 強 逢甲大學電機工程學系 黃思倫

一、前言

電力系統中變壓器除了需承受異常電壓的電氣應力之外，穿透性故障電流所產生的電磁應力，對變壓器繞組的機械強度也會構成威脅，原因是變壓器結構中高低壓側繞組之間存在有漏磁通之故；當故障電流與漏磁通合成之機械應力，大於繞組的機械強度時，變壓器繞組會產生機械塑性變形。在變壓器內部發生故障時，除電氣絕緣破壞產生電弧放電特徵外，線圈繞組也會伴隨著出現機械變形，而繞組變形的事故特徵顯示，變壓器繞組電氣故障點的損壞傷痕，與其他非事故區域呈現出的機械傷痕存有明顯的差異性；例如，組電氣故障點週遭的機械變形較為凌亂，且多呈現不規則狀是其特徵；而遭受故障電流衝擊引發機械變形之繞組部份，可呈現出規則性的塑性變形。若於嚴重的故障條件下，二者都有可能引起線圈機械結構鬆弛，導致繞組散落的現象，不過彼此間仍會有明顯的差異性可供區分。

另一種情形是當變壓器外部發生事故時，變壓器高低壓側繞組提供外部事故之故障電流，由於故障電流第一個週波之非對稱峰值電流及故障持續時間兩項影響因素，若大於變壓器機械強度設計值，則相對此一故障電流而言，變壓器之機械強度不足以抵擋故障電流所產生的機械應力，則變壓器會因繞組發生永久性變形進而毀損。此類穿透性故障電流引起之變壓器事

故並非正常行為，因此當變壓器外部連接之電力設備發生故障時，例如線路故障、匯流排故障，一方面保護系統應儘速隔離故障區域，另一方向，變壓器本身亦應具備足夠的機械強度以因應故障期間所承受的機械應力。所幸在外部故障條件下，變壓器的內部阻抗會限制故障電流的大小，但與故障電流第一個週波非對稱峰值電流有關的機械強度衝擊係數，亦與變壓器阻抗成反比關係；換句話說，欲降低系統短路電流，可提高變壓器阻抗，變壓器提高阻抗後，一併提高了故障電流作用於變壓器之機械衝擊係數，就變壓器機械強度而言，可謂魚與熊掌實難兼得。前述非對稱及對稱短路電流，是評估變壓器承受最大機械應力的基礎，依此基礎循序發展可於設計製造時，評估並提供變壓器足夠的機械強度。

系統中除異常電壓與故障電流外，也存在尚未為人知的異常條件，此類異常條件形成時，會對變壓器產生影響，甚至於造成破壞。例如伴隨外部接地故障後的變壓器後發性事故即為一例[1]。當此類事故發生時，變壓器繞組通常會出現相當可觀的機械變形，因其現象與故障電流所造成的機械變形相當類似，再加上接續在外部故障之後而且故障相相符的條件，事故原因經常被診斷為變壓器機械強度不足、累積性破壞或是故障持續時間過長等，事故原因誤判事小，強化變壓器的機械強度，弱化系統異常條件的影響以及提升保

護系統的靈敏度均有利於系統強健度與運轉的穩定性，不過積極性的作為仍是防範類似事故再度發生。

區分後發性變壓器事故與外部故障電流所產生的變壓器機械破壞，首要的工作是先了解故障電流可能產生的機械破壞以及其繞組變形特徵，其次是了解現行的變壓器標準規範，以佐證變壓器產生機械破壞時需有的條件，再進一步比對後發性事故的特徵，分辨出二者的差異性與繞組變形特徵，才有機會進一步找尋後發性變壓器的事故原因。

二、變壓器繞組的電磁應力

圖 1 所示為電磁力之示意圖，圖中有“X”之符號表示磁場且方向為垂流入紙面，磁通量為“Φ”。另外左、右兩根柱狀分別表示兩根導體，上面均分別流通 I 的電流，電流方向向上，左方導體位於磁場內部，而右方導體則在外部。此時，左方導體依據安培定律以及夫來明左手定則，會產生一向左之電磁力 F 作用在導體上，此電磁力的大小為：

$$F = k \Phi \times I \dots\dots\dots (1)$$

右方導體雖也有電流通過，但位於磁場的外部，流通之電流未能與磁場產生交鏈，故不會產生電磁力。

圖 1 與式(1)提供電磁力的特徵：1.需由電流與磁場交鏈作用才會產生電磁力；2.磁場與電流產生電磁力之關係為正弦行為，也就是當電流相量與磁場相量相差 90 度時，會有最大的電磁力產生。

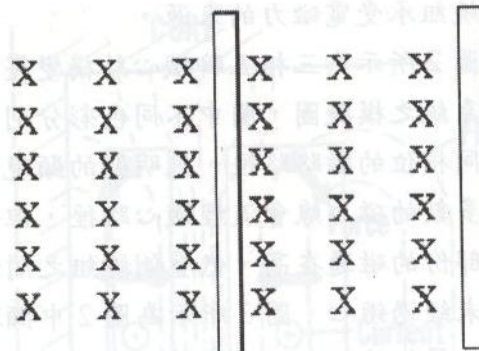
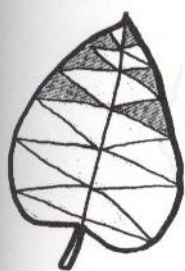


圖 1 電磁力示意圖

變壓器依繞組與鐵心結構可區分為核心型 (core-type) 與薄殼型 (shell-type) 兩種，國內大型變壓器絕大多數採用前者，核心型變壓器的鐵心結構又可區分為內鐵式與外鐵式兩種，但是共同的特徵是高、低壓側繞組會“等高”且以“外高壓、內低壓”的形式繞製於鐵心上，不論是雙繞組或三繞組變壓器，此原則均相同，主要原因是要使高、低壓繞組之間的磁動勢均衡，也是所謂的安匝平衡 (Amper-turn Balance)，以避免產生異常的軸向力[2]。

當變壓器受電時，一次側繞組會流入電流，依據安培定律，通過電流通體的周圍會產生磁力線，此磁力線會通過磁阻最小的路徑，由於繞組是緊鄰著鐵心圍繞，所以大多數的磁通會流入鐵心內部，此磁通再交鏈於二次側繞組，依據法接第定律，會在變壓器二次側繞組感應產生相對應於匝比的電流與電流，此為變壓器運作的基本原理。由於絕緣的要求，一、二次側繞組與鐵心之間並非緊貼著，事實上仍有適當的間距存在，雖然鐵心的磁阻遠小於氣隙，但仍會有部份的磁通未流入鐵心而在此間隙之間流通，此為所謂的漏磁通。當然與流通於鐵心的主磁通相較，漏磁通的量相當的小，由於磁通是由流通於繞組之電流所產生，此漏磁通的存在是變

壓器繞組承受電磁力的來源。

圖 2 所示為三相五腳鐵心結構變壓器磁路系統之模擬圖，圖中不同色彩分別表現不同相位的磁路路徑，很明顯的顯現出絕大多數的磁力線會流經鐵心路徑，但仍有少部份的磁通在高、低壓側繞組之間流通而未經過鐵心。圖 3 所示為圖 2 中擷取出來的單相繞組與鐵心結構，並且去除流通於鐵心內部的主磁通，更可清楚的顯示出高、低壓繞組之間的漏磁通路徑。由於

流入鐵心之主磁通不會再流出鐵心之外，所以不會再與繞組導體產生交鏈，而漏磁通則散落於高、低壓側繞組之間，再因繞組上流通電流而產生交鏈，進而產生電磁力，即使是正常操作條件下，繞組導體仍需承受負載電流與漏磁通之間所產生的電磁力，因此，變壓器繞組在製造時需有適度的締緊度，以因應此電磁力的作用，防止繞組導體發生位移或變形。

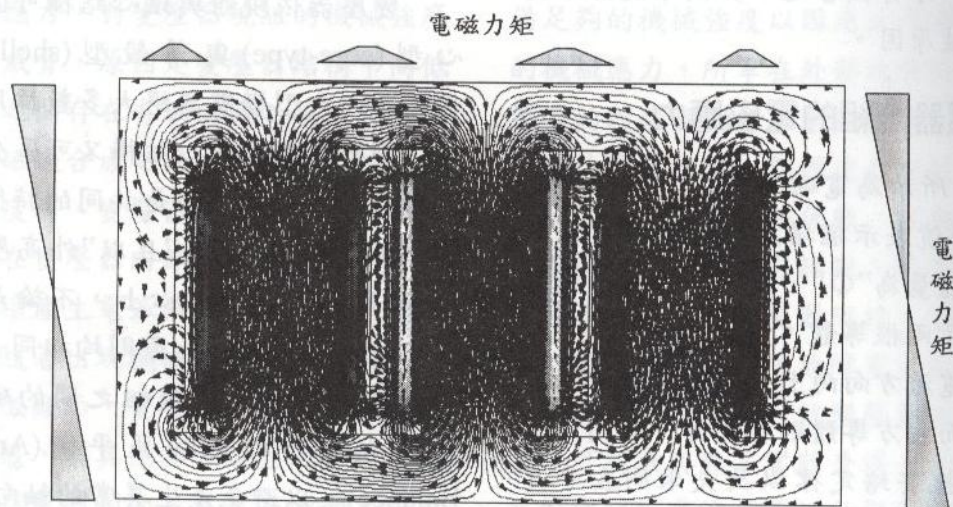


圖 2 三相五腳鐵心結構變壓器之磁路系統

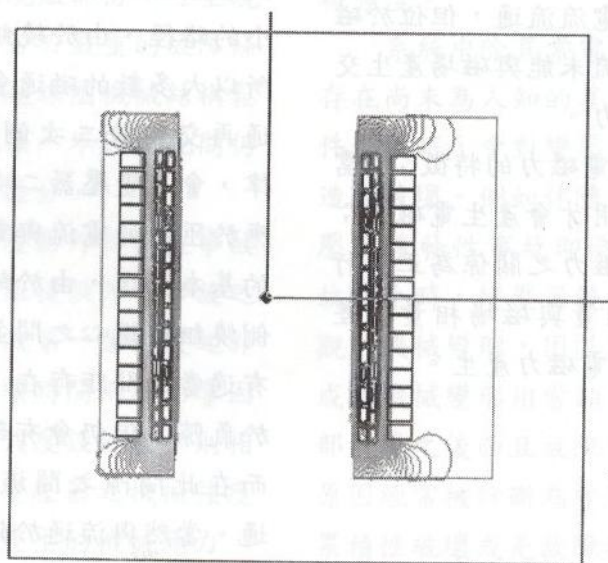


圖 3 單相變壓器繞組結構之漏磁通與電磁力方向

由於變壓器繞組與上、下鐵心之間仍需具備適當的絕緣，因此仍會有間隙存在，此時圖3所顯示的漏磁通磁力線在通過繞組之後，會因上、下氣隙的變化而使磁通密度變為稀疏，此一效應會使因漏磁通所產生的電磁應力方向發生變化，使得在繞組中段位置所產生的電磁力基本上呈現於徑向的水平方向，但是繞組上、下末端的電磁應力則隨著磁通的變化而呈現不同的方向，此為繞組導體旋轉應力的來源。

圖4所示為圖3電流與漏磁通相量示意圖[3]，右方方塊表示高壓側繞組，並令為一次側繞組，而左方方塊則為低壓側繞組，為二次側繞組，外部為鐵心。當一次側繞組電流為流入時，高、低壓側之間的漏磁通方向向上，感應而生的電磁應力會使高壓側繞組承受一向外的力量，因低壓側感應鐵心主磁通時，會在低壓側繞組之間流通一流入的電流，此流入的電流會再度產生漏磁通，此漏磁通相量與高壓側所產生的漏磁通方向相同，再因低壓側電流流向與高壓側相反之故，所以低壓側所承受的機械應力與高壓側相反，係為朝向鐵心之機械應力方向。當高壓側電流反向時，漏磁通方向亦反向，相對的低壓側繞組電流方向也會反向，但是高、低壓側所產生的電磁應力方向仍相同。因此，由繞組電流與漏磁通所產生並作用於繞組導體的電磁應力方向可以下列文字來顯現：外部繞組之機械應力方向恆向外、內部繞組之機械應力方向恆向內。

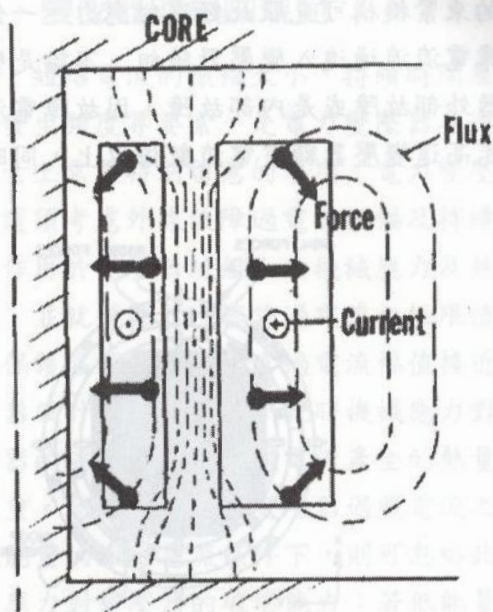


圖4 變壓器繞組之漏磁通與電磁應力方向

因應漏磁通於末匝(End-turn)位置的相量偏移，圖4中以虛線封閉迴路來模擬磁通的路徑，相對應的電磁應力也會伴隨偏移，因此變壓器的繞組線圈在不同位置會受不同方向的電磁力影響，並可將電磁應力區分為徑向力(Radial Force)、軸向力(Axial Force)及周向力(Hoop force)三個方向的應力，圖5所示即為核心型變壓器繞組上應力的分佈情形[4]，圖中所顯現的應力方向，高壓側繞組會承受：向外的徑向力、向中央壓縮的軸向力以及向外擴展延伸的周向力(Hoop Tension)，相對的，低壓側繞組會承受：向內的徑向力、向外擴展的軸向力以及向內壓縮的周向力(Hoop Compression)。

變壓器正常運轉條件時，上述電磁應力產生的機械力矩，亦作用在變壓器繞阻上，也就是當繞組一但有電流通，變壓器高、低壓側繞組就需承受上述所有的機械應力。由於漏磁通佔整體磁通量極少的部份，所以在正常負載條件操作下，變壓

器的束緊機構可克服此類電磁應力，一但故障電流通過進入變壓器繞組，不論是變壓器外部故障或是內部故障，因故障電流可能高達變壓器額定電流數倍以上，同時

也帶動漏磁通量的放大，此時的機械應力會呈現正比於故障電流大小平方值的關係，亦一併放大了機械力矩，此時的機械應力對繞組的變形有決定的影響了。

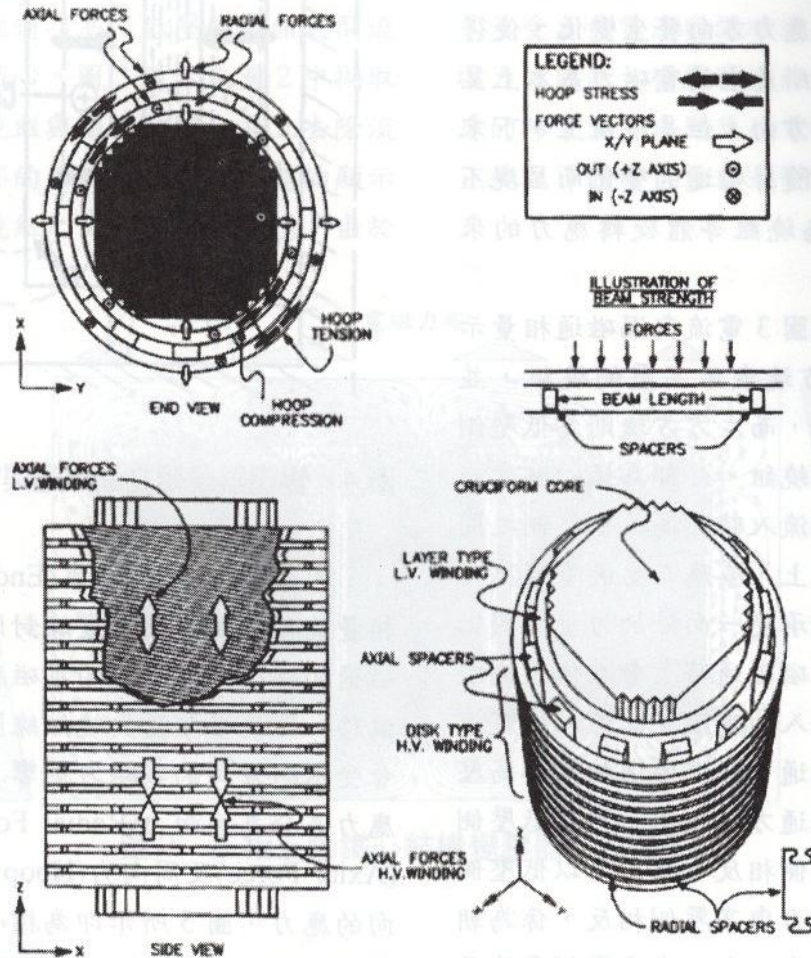


圖 5 核心型變壓器繞組之機械應力分佈

圖 6 所示為變壓器繞組在正常負載電流與外部故障電流條件下的徑向電磁力模擬圖，當變壓器在正常電流條件下，其徑向力最大值約為 4 萬牛頓，一旦在變壓器二次側出口端發生短路故障時，故障電流與直流成分合成並平方之後，其最大值會超過 80 萬牛頓，二者差異超過 20 倍。此模擬結果也提供一個重要資訊，如果變壓器繞組之機械強度不足以抵擋過電流之衝擊係數與力矩時，繞組變形會在故障電流

出現的第一個週期內發生；若事故恰發生於正弦電壓零交越瞬間，此時的直流暫態成分為最大，非對稱短路電流峰值亦為最大值，因第一個電流峰值出現時僅為 1/4 週期，以 60Hz 的系統而言，在 1/240 秒之內變壓器繞組就可能產生破壞性的變形。也就是說故障電流造成繞組機械變形所需的時間相當短，只要條件成立，在不到 1/60 秒的時間，繞組結構及匝間絕緣就會產生變形破壞了。相反的情形，如果

繞組機械強度足以抵抗故障電流第一週期的電磁力，隨著直流暫態成分呈指數衰減，並逐漸進入對稱短路電流，因而電磁力的衝擊係數會逐漸變小，也就是說繞組結構將不會因故障電流而產生機械變形及固體絕緣破壞了。

影響繞組機械變形的因素並不僅限於機械應力，另一個重要因素是熱效應，在過電流條件下，線圈導體導電率與電阻係數與溫升速率有關；在高温的條件下，原有的金屬強度會弱化與鬆弛，並引起導體伸長率劇烈變化；同時故障電流在繞組內部流通，也會帶起鐵心過激磁以及於線圈、鐵心產生局部高温。因此在考慮抵擋繞組機械變形時，特別是大型油浸式變壓器，也要考慮變壓器的散熱能力與故障電流持續的時間，使繞組的機械強度在規定的時間內要足以抵擋最大外部故障電流所產生的電磁力才合格。因此，一定變壓器承受的故障電流與持續時間關係式確定之後，也成為保護協調規劃時的重要時間依據。

除此之外，累積性的破壞也是要考慮的因素，其中包含繞組鬆動、油流速率、金屬弱化等等因素，這類因素並非本文所探討的主題，故暫忽略之。

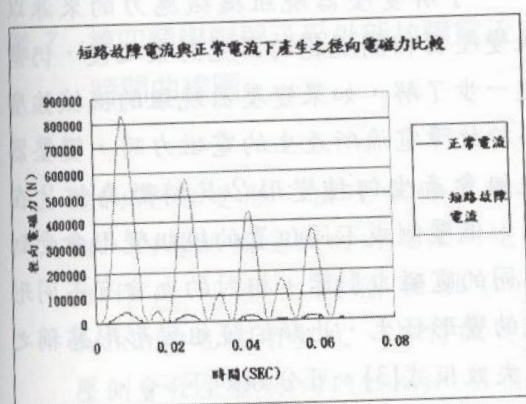


圖 6 核心型變壓器繞組在不同電流條件下之徑向機械應力

三、變壓器的相關規範

短路電流的振幅大小、持續時間及事故發生頻度等要素，是電力變壓器在運轉因素上需要特別留意的事項。電力變壓器保護須考慮外線故障過電流振幅及持續時間作用於變壓器繞組上的機械應力及熱效應，並就變壓器可容許過電流之極限值建立保護協調的基礎。當過電流幅值接近變壓器設計容許裕度時，此時機械應力對變壓器的破壞作用，較過電流產生的熱量為嚴重。反之，在接近變壓器過載電流之較低能量的短路電流條件下，則可忽略此機械應力對變壓器的破壞能力；若低能量過電流發生頻度相當高時，則須注意過電流幅值大於額定千伏安容量時，在有若滴水穿石長期作用影響下，可能引起的變壓器機械性破壞及熱破壞，不過此類的損傷實難以精確評估。因此在此類異常運轉情況下，與故障電流累積性破壞有關的劣化因素應特別考慮[5]。

電力變壓器在運轉年限中可能承受多次外部事故衝擊，變壓器之外部事故發生機率，視電力系統外線結構而定。若外線屬架空線路者，則與其線路連接之變壓器，屬於高運轉風險者；反之，若外線係利用地下電纜作為傳輸線纜者，可排除鹽霧、颱風、雷擊等大氣環境導致外線發生事故的影響因素，因此其發生線路事故之運轉風險相對較架空線路為低，故屬低風險運轉條件者；無論與變壓器高、低壓端連接之外線是架空線或是地下電纜，變壓器於較長的事務週期，或是短時間發生多次外線短路接地事故者，其短路過電流之電磁力及熱應力引起之機械性潛變，可能累積於變壓器繞組結構上，對變壓器機械結構形成劣化作用，並間接或直接影響變壓器的絕緣性能。因此，在工業界尚未產

生出可連續監視，及評估外線事故降低變壓器機械強度之監視設備前，藉由短路分析試驗驗證電力變壓器之機械強度有其必要。辨識電力變壓器的短路機械強度，有助於提升變壓器機械強度之規格，並可改善外線事故短路過電流對變壓器之衝擊[6]。

油浸式變壓器(liquid-filled transformer)之設計與製造，必須考慮變壓器於外部短路事故穿透性故障電流作用於變壓器繞組，並於繞組與鐵心磁路上產生過度的電磁力、機械應力與熱效應。因此變壓器之機械強度、電氣絕緣性能，需考慮抵擋穿透性故障電流之衝擊性與破壞力是變壓器設計時之重點考慮因素。變壓器外部事故，是指與變壓器連接之輸電線路、旋轉電機、靜止電機等任一電力設備可能發生單一事故之運轉情況，如三相短路事故、單相接地事故、兩相短路接地事故以及兩相短路接地事故等，均屬可能發生的單一事故型態。如果系統發生事故時，故障電流與系統短路容量、變壓器阻抗及輸電線路傳輸阻抗有關。因此，為了降低故障電流對變壓器的衝擊，一方面可以調整系統阻抗參數，以降低外線事故之穿透性故障電流大小，必要措施的具體的考慮方向包括：(1)多繞組變壓器需要考慮連接於變壓器繞組上的電源需小於二；(2)考慮提供故障電流之變壓器繞組額定容量大於35%者；上述二因素與外部故障電流流經變壓器產生的短路電磁力、機械力與熱效應有關。另一方面，為確保變壓器之運轉於安全，也必須深入探討與了解變壓器承受短路電流的動態穩定能力，並藉以提高變壓器繞組承受穿透性短路電流之能力。

在 IEEE 之變壓器標準中，依單相或是三相變壓器之仟伏安容量作為分類基

礎，如變壓器單相容量在 5~500 kVA、501~1667 kVA、1668~10000 kVA 及 10000 以上者共分為四類；詳細分類規格，如表一所示：

表 1 變壓器之分類

類別	最低銘牌 kVA 容量	
	單相	三相
1	5-500	15-500
2	501-1667	501-5000
3	1668-10000	5001-30000
4	10000以上	30000以上

雖有不同容量之分類，但各類的變壓器在承受最大外部故障電流壓力的時間都需在 2 秒以上。圖 7 所示為第四類變壓器承受外部故障電流之時間曲線圖，雖然變壓器不同的繞組阻抗對該時間曲線會有影響，但是曲線的最低點均位於 2 秒的時間點上，規範中雖說明此類變壓器在每一次外部故障時均要考慮其機械應力對變壓器的影響，但是至少此類變壓器都要能夠支撐 2 秒間的故障時間週期才能符合規範要求。

四、變壓器繞組的失效模式

了解變壓器繞組機械應力的來源以及變壓器相關規範的因應對策之後，仍需進一步了解，如果變壓器繞組的機械強度小於故障電流所產生的電磁力時，變壓器繞組會產生何種變形？其特徵為何？在高、低壓側或不同位置的繞組變形會受到不同的電磁力影響，相對的也會有不同形式的變形發生，此類的繞組變形形態稱之為失效模式[3]，可分類如下：

1. 徑向拉伸變形：通常出現在高壓側繞組，當高壓側外層線圈受到向外

之徑向電磁力作用所產生向外拉伸(hoop tension)之破壞型式。此類的變形發生的機率不高，因為低壓側繞組導體所承受的徑向力相對的高，多數的情形均是低壓側繞組已產生相當嚴重的變形而造成變壓器失效，但是高壓側繞組僅有相當輕微的拉伸變形。如果此類拉伸變形真的發生，繞組變形的位位置會位於繞組中央且橫向凸出，其變形的範圍不會太大，變形嚴重時，若導體伸長率超過其降伏點時，該部份繞組導體會被扯斷。

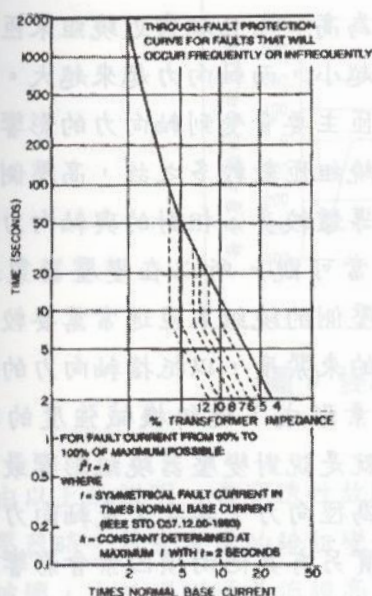


圖 7 第四類變壓器承受外部故障電流之時間曲線圖

2. 徑向壓縮變形：出現在低壓側繞組，內層線圈受到向內之徑向電磁力作用，產生線圈挫曲(hoop buckling)之破壞型式。其特徵是低壓側會發生崩塌(向內凹入)，崩塌位置的左、右兩邊出現挫曲(凸出)，另一個特徵是崩塌的位置通常位於繞

組中央點上、下等幅的位置，在某些條件下，上、下崩塌的幅度可能不對稱，但是最大的幅度不會超過整體繞組的 2/3 高度。

3. 軸向壓縮變形：軸向相對的壓縮力量會使繞組導體傾斜，嚴重時也會造成繞組的崩塌(collapse)，如果導體發生傾斜時，繞組結構呈現不穩定狀態，甚至於造成變壓器失效的情形。此類的機械變形通常發生於高壓側(外部)繞組，而且集中於繞組中間的位置，較少出現於上、下兩端的繞組末匝處。
4. 軸向拉伸變形：軸向相對的拉伸力量會使繞組導體離開其固定的位置而產生彎曲或傾斜等情形，向上與向下的撞擊力也會造成變壓器支撐軛鐵產生彎曲或斷裂的結果。此類的機械變形通常發生在低壓側(內部)繞組，而且集中於上、下兩端的繞組末匝處。
5. 軸向套疊變形：此類變形主要是軸向行為，有兩種形態：外部繞組軸向移到內部繞組的上、下方或是外部匝軸向移到內部匝的上方或下方。其原因是徑向力與軸向力的合成影響，例如當軸向力使繞組上、下導體之間的間距拉長並使同層繞組導體產生鬆動，此時徑向力使外部的繞組或導體向外壓入而嵌入其空隙之間所形成。通常此類變形會發生在低壓側繞組中段的位置。
6. 末匝扭斜變形：因徑向力與軸向力的合成，使外部繞組之末匝向外傾斜、內部繞組之末匝向鐵心方向扭轉。此類變形在高、低壓側繞組上方最為明顯，下方繞組雖承受相同

的應力，但因繞組本身重量的壓制，所產生的變形量較小，有時難以查覺。

7. 繞組扭轉變形：此類變形通常出現在低壓側繞組，受到徑向力與軸向力合成的影響，整體繞組連帶著繞組支援用的間隔器(Spacer)一起旋轉，最明顯的特徵是間隔器以垂直來看不會位在同軸線上。

上述的七種失效模式是穿透式故障電流流經變壓器高、低壓側繞組時可能產生的破壞，在任何一種機械變形發生時變壓器不一定會失效(failure)，除非繞組變形使變壓器發生絕緣破壞，才會引發變壓器的內部故障。如果機械變形未造成變壓器失效，該變壓器仍能正常運作，甚至於可以維持很長的一段時間。

除此之外，由機械應力的影響所演伸出來的問題：

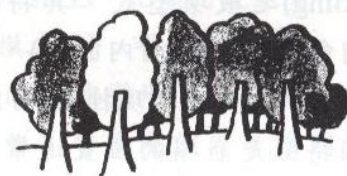
- (1) 上述所有的失效模式是否會同時產生？變形量是否有大小之分？
- (2) 是否會有其他因素組合進來所產生的機械變形？
- (3) 由機械變形再引發變壓器絕緣破壞，是否具備特徵可供分辨？
- (4) 如果是變壓器發生內部故障，則絕緣破壞所產生的機械損傷是否可歸類於上述七種模式之中？
- (5) 由繞組變形所引發的變壓器事故與由絕緣破壞產生的機械變形，二者之間是否可以判別出來？
- (6) 除了故障電流之外，是否還存在著其他造成繞組變形的因素？

這些問題都相當有趣，深入了解之後，對於變壓器事故原因的調查會有相當大的幫助，也更有機會防範類似的事故原因再度發生。其中大多數的問題仍有相當

大的探討空間，下面就比較單純且合乎本文主題的已知結果加以補充說明。

首先考慮第(一)個問題，從圖 4 與圖 5 中已知在漏磁通影響之下，繞組存在的機械應力與方向，但是在徑向、軸向與周向三軸的應力，是否有大小之分？由於繞組結構之故，漏磁通在繞組中段位置基本上是呈現垂直的方向，與高、低壓側繞組流通的電流水平流向是相互垂直，但因漏磁通在繞組上、下末匝位置會向外、向內傾斜，電磁力可分解成徑向力與軸向力兩個分量。圖 8 與圖 9 分別顯示的是同一變壓器繞組結構中因漏磁通所產生的徑向力與軸向力，兩相比較，徑向力的大小遠較軸向力為高，而且越靠近繞組末匝，徑向力越來越小，而軸向力越來越大。因此，繞組末匝主要會受到軸向力的影響，又因高壓側繞組匝數較多之故，高壓側繞組每一層的導體較多，相對的與軸向力合成之力矩相當可觀。所以在變壓器製造時，高、低壓側的繞組末匝通常需要較中段繞組為高的束緊度，以抵擋軸向力的作用。此一因素形成了繞組機械強度的不均勻性，也就是說對變壓器繞組影響最大的機械應力為徑向力，其次才是軸向力。

其實另有其他兩項因素會影響到軸向力的大小：高、低壓側是否位於相同的水平軸或垂直軸？如果有任一項誤差過大，其所產生的軸向力會非常大，甚至於使變壓器無法通過正常的短路強度試驗。因此，只要能夠通過廠試的變壓器，基本上此項因素可以排除。



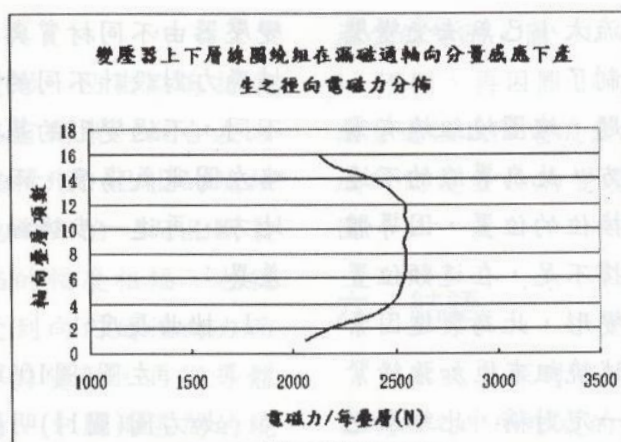


圖 8 變壓器繞組徑向電磁力分佈曲線

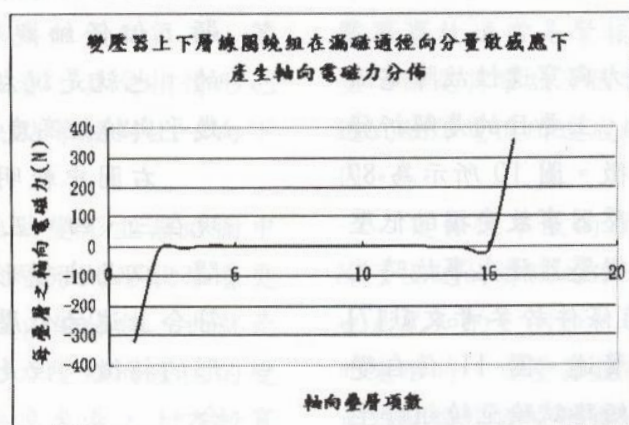


圖 9 變壓器繞組軸向電磁力分佈曲線

由以上的說明，當穿透性故障電流通過變壓器時，最先考慮的繞組變形是徑向力的破壞，由於漏磁通是流經高、低壓側繞組之間，所以第 1 種與第 2 種模式的機械應力會同時出現，而且方向相反。由於高壓側繞組的匝數較多，相對的在等高的繞組結構上會呈現較厚的繞組寬度，雖然低壓側繞組上流通的電流較高壓側為大，但實務上仍是低壓側繞組較容易發生機械變形，高壓側繞組的機械變形相對的小，而且會出現在高壓側繞組的內部導體，外部導體通常還來不及拉伸變形，變壓器就已因低壓側繞組絕緣破壞而失效了。所以，當變壓器的事務原因是因穿透式故障

電流所壓垮的，通常低壓側繞組會有相當明顯的挫曲變形，並且伴隨著較小的電氣傷痕，而高壓側繞組不見得從外觀上可以看出有拉伸變形。由圖 8 所顯現的徑向力特徵以及繞組末匝的強化結構，低壓側繞組挫曲的範圍不會超過繞組總高度的 2/3，此為判別此類事故最重要的特徵。

因為軸向力相對於徑向力為小，在此類事故中其他五種的機械變形不一定會出現，較常伴隨出現的是高壓側末匝導體壓縮傾斜的變形，原因是繞組的厚度與軸向力合成的力矩較大之故。如果其他五種機械變形有多種伴隨低壓側徑向變形一起出現，通常是變壓器發生內部事故時才會發

生，因為此時故障電流大小已無法受變壓器本身的阻抗加以限制了。

再考慮第二個問題，線圈繞組總有需要進行導線連接的地方，此為導線的不連續點，或是繞組進行换位的位置，因導體強度相對較弱或因支撐不足，在這類位置的導體也較容易產生變形，此為製造因素的影響。另外，在上述繞組末匝加強締緊力的位置，上、下不一定對稱，此結果也會造成低壓側在徑向變形時的不對稱。

五、後發性變壓器事故繞組變形的特徵

探討變壓器電磁力與穿透性故障電流對變壓器繞組的影響，主要目的是解析發性變壓器事故的特徵。圖 10 所示為 87 年間松山變電所主變壓器事故受損的低壓側繞組照片之一，此變壓器發生事故時之系統以及電壓、電流條件於參考文獻[7]中已有說明，此不再贅述。圖 11 係自變壓器二次側進行直接短路試驗至繞組發生變形破壞後之低壓側繞組照片[8]，兩類

變壓器由不同材質與不同設計所製造，機械應力對設計不同的繞組，其影響會略有不同，不過變形的基本模式並無二致。忽略左圖電氣傷痕，兩圖相互對照有類似的地方，再進一步詳細比對則可發現其中的差異：

1. 挫曲長度：

左圖(圖10)繞組區間的分隔雖不如右圖(圖11)明顯，但仍可清楚分辨出自上而下共有六層繞組區間，此區間層數與右圖相同。左圖在最下方區間的凸出變形從照片上並不明顯，但仔細觀察仍可發現是存在的，也就是說左圖的繞組挫曲變形幾乎與繞組高度等長。

右圖中較明顯的凸出變形僅出現在三、四、五(自上往下數)三個區間。以凸出變形的長度而言，右圖符合上述的低壓側繞組徑向壓縮變形的特徵，但是左圖的條件並不符合。

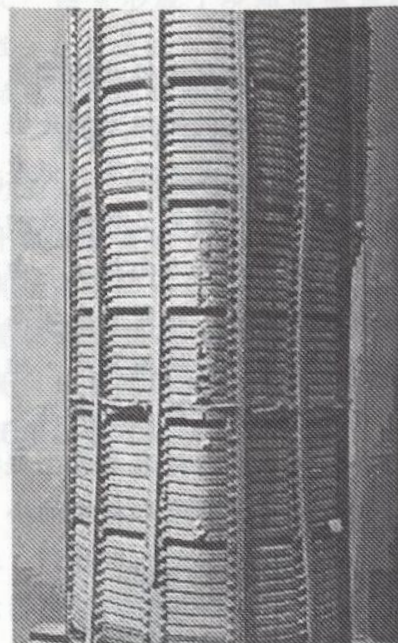
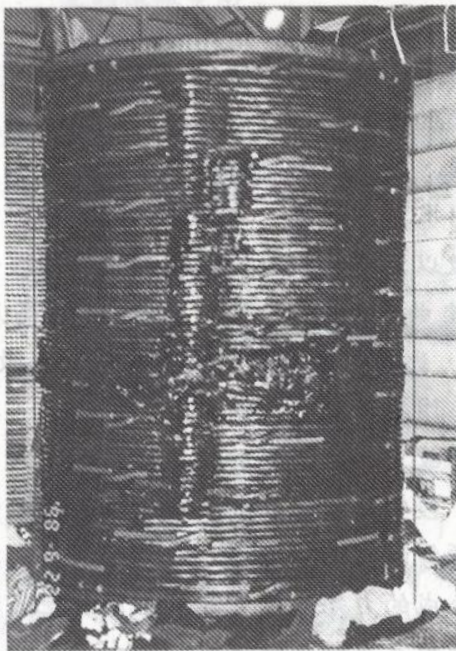


圖 10 後發性變壓器事故受損繞組照片 圖 11 穿透性故障電流破壞之繞組照片

2. 挫曲形狀：

右圖中的變形，凸出點有折痕並使繞組導體略有斷裂，配合左右兩邊的繞組凹陷情形，凸出的繞組導體均有相對應的凹陷，而且斷裂的情形也與凹陷的幅度相幅，也就是說繞組較像受到向內的徑向力而形成“樑(Beam)”的變形。再從導體斷裂的範圍來看，中間兩區間的繞組受損最為嚴重，第五區間的損傷則相對較輕，此結果也符合圖 8 所示的徑向力分配情形，雖然第二區間並無挫曲變形，但僅以第三、第四區間的變形來看，其受損情形也符合自繞組中央點等幅向上、向下擴展的特徵。

左圖中的挫曲變形並無右圖中的折點，從凸出變形的形狀來看更符合挫曲(Buckling)的條件，也就是說繞組較像周向力壓縮而產生的變形。以凸出的幅度來看，上方較寬而下方較窄，另外凸出變形的左右兩邊並無明顯導體凹陷的現象。此種繞組變形特徵並無法歸類於上述的七種失效模式中。

3. 繞組凹陷：

在左、右二圖在繞組兩邊各自繪上兩條垂直線做為參考，右圖的凹陷變形以圓周位置來看並無規則性，而且集中在繞組中段，但左圖的繞組不但無凹陷情形，相對的向上往下的陷縮情形呈現出接近正弦的規則性，此規則性並不完全符合圖 8 所示的徑向力分佈情形。

從以上的比對，實難以將兩種繞組變形的原因歸類在一起，圖 11 是試驗的結果，其原因很明確的是穿透式故障電流所

產生的變形，圖 10 的繞組變形特徵與圖 11 不同，再因圖 10 之變壓器失效之前並無穿透性故障電流出現，至少應可確認形成所謂後發性的變壓器事故，應另有原因。

六、結語

本文中探討穿透式故障電流在變壓器繞組之中所形成的電磁力，也說明各種繞組變形的失效模式，更進一步的比對後發性變壓器事故受損繞組與前述電磁力損傷的繞組變形之間的特徵。雖然後發性變壓器事故通常是緊接於外部事故之後發生，但是其事故原因實不能歸類於是由穿透式故障電流所造成的破壞，應該另有原因。

後發性事故的原因目前尚不清楚，除了上述的資訊之外，還有一些相關資訊也是已知的，例如，當變壓器因此類原因而變形時，變壓器並不一定會失效，也就是說此類原因在形成之後，再經過一段時間可能因其也因素而再度沈潛而消失，此時變壓器繞組雖已有變形但尚不足以產生絕緣破壞。由於繞組變形會使導體的機械強度與絕緣變弱，當下一次外部事故發生時，也可能因此連帶引發變壓器的破壞。這種情形非常容易誤解，也通常會引起事故原因判斷上的爭議。

實務上有些變壓器事故原因與受損情形無法合理解釋，本文中所述之內容僅是其中之一，有可能當此類原因真相大白時，能夠解開部份實務上的迷團，也更有可能是還有其他更複雜的真相等待著我們的挑戰。

參考文獻

- [1] 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。
- [2] 黃思倫，陳孟嘗，劉順財，盧光常，”電機設備的繞組變形之研究分析”，中華民國第二十四屆電力工程研討會。
- [3] W. J. McNutt, W. M. Johnson, R. A. Nelson & R. E. Ayers, “Power Transformer Short-Circuit Strength - Requirements, Design, And Demonstration,” IEEE Transactions on Power Apparatus And Systems, Vol. PAS-89, NO. 8, November/December, 1970, pp.1955-69.
- [4] IEEE C57.125-1991, “Guide for Failure Investigation, Documentation, and Analysis for Power Transformers and Shunt Reactors,” pp55-56.
- [5] IEEE Std. C57.12.90-1999, “IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers”.
- [6] IEEE Std C57.109-1993 (Revision of IEEE C57.109-1985) “IEEE Guide for Liquid-Immersed Transformer Through-Fault-Current Duration”.
- [7] 盧光常，黃思倫，鄭強，”後發性”變壓器事故-事故型態介紹，中華民國電驛協會會刊第十九期。
- [8] 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.

