

談變壓器故障與保護及影響差動異常之動態試驗分析

台電綜合研究所 吳立成

壹、前言

變壓器 (T6A2) 之差動保護電驛 (87SST) 如圖 1 所示，因 SSD 自低壓側啟動變壓器加壓，瞬間差動保護電驛異常動作跳脫，經研究分析後，判定其主因源起於 SSD 啟動變壓器加壓瞬間之“湧浪電流 (Inrush Current)”所導致，本文將針對此 87SST 動作異常現象分節說明。

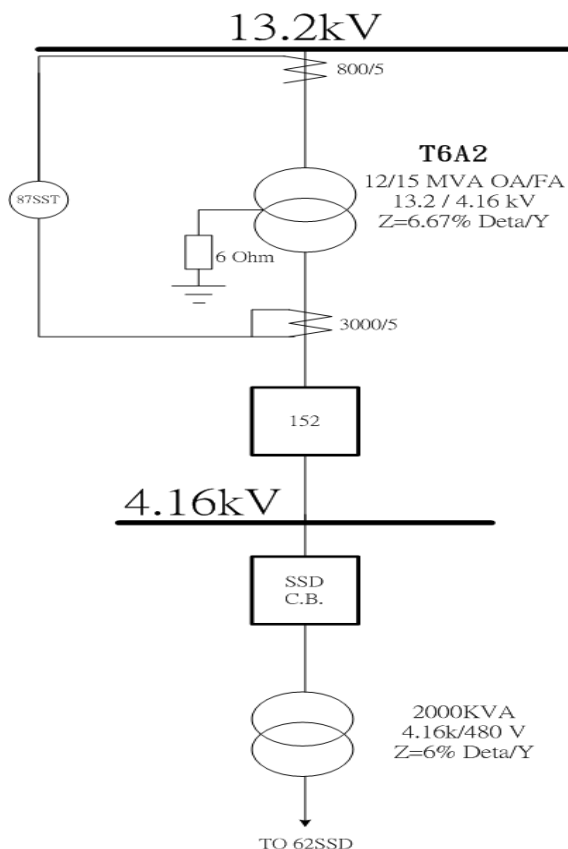


圖 1 變壓器(T6A2)之差動保護單線圖

貳、變壓器保護概論

電力變壓器是電力系統中十分重要的供電電源，它的故障將對供電可靠性和系統的正常運作帶來相當程度的影響力；如為大容量的電力變壓器則更是具備大區域限電的潛能，因此，必須根據變壓器的容量和負載倚賴程度，除考慮設備性能良好外，尚需高可靠度保護電驛。

一、變壓器故障類型及其相關保護

變壓器的內部故障可以分為油箱內和油箱外故障兩種。油箱內的故障包括繞組的相間短路、接地短路、匝間短路以及鐵心的燒損等，對變壓器來講，這些故障都是十分危險的，因為油箱內故障時產生的電弧，將引起絕緣物質的劇烈汽化，進而可能引起爆炸；因此，這些故障應該盡快加以清除。油箱外的故障，主要是套管和引出線上發生相間短路和接地短路。上述接地短路均指與中性點(直接)接地網路同側而言。

變壓器的不正常運轉狀態主要有：

- (1)由於變壓器外部相間短路引起的相間過電流和外部接地短路引起的零相過電流和中性點過電壓等問題。
- (2)由於負載超過額定容量引起的過載，或因漏油等原因而引起的油面降低等問題。

此外，對大容量變壓器，由於其額定工作時的磁通密度相當接近於鐵心的飽和磁通密度，因此在過電壓或低頻率等異常運行方式下，還會發生變壓器的過激磁故障。

根據上述故障類型和不正常運轉狀態，對變壓器應裝設下列保護電驛：

1. 突壓保護

對變壓器油箱內的各種故障以及油面的降低，應裝設突壓電驛保護，它感測油箱內部所產生的氣體或油流而動作。其中第一段保護(輕瓦斯)反應示警信號，第二段保護(重瓦斯)動作於跳脫變壓器高、低壓側的斷路器。

應裝設突壓保護的變壓器容量界限是：800KVA(含)以上的油浸式變壓器。同時對帶負載調壓的油浸式變壓器的調壓裝置(AVR)，也應裝設突壓保護。

2. 差動保護或瞬時過流保護

對變壓器繞組、套管及引出線上的故障，應根據容量的不同，裝設差動保護或瞬時過流保護。

差動保護適用於並聯運轉的變壓器，容量為 6300kVA 以上時；或單獨運轉的變壓器，容量為 10MVA 以上時；或發電廠廠用工作變壓器和產製工業中的重要變壓器，容量為 6300kVA 以上時。瞬時過流保護用於 10MVA 以下的變壓器，且其過電流保護時間協調大於 0.5s 時。對 2000kVA 以上的變壓器，瞬時過流保護的靈敏性無法滿足需求，應加裝差動保護。對高壓側電壓為 345kV 及以上的變壓器，宜裝設兩套差動保護以增強保護安全可靠。上述各保護動作後，均應跳脫變壓器高、低壓側的斷路器。

3. 外部相間短路時，應採用的保護措施

對於外部相間短路引起的變壓器過電流，應採用下列保護作為後備保護。

(1)過電流保護：一般用於降壓變壓器低壓側，保護裝置的設定值，應考慮事故狀態下，可能出現的暫態故障電流；

(2)電壓起動的過電流保護：一般用於升壓變壓器、系統聯絡變壓器及過電流保護靈敏度無法滿足需求的降壓變壓器上；

(3)負序電流及單相式低電壓起動的過電流保護：一般用於容量為 63MVA 及以上的升壓變壓器；

(4)阻抗保護：對於升壓變壓器和系統聯絡變壓器，當採用上述(2)、(3)方式保護仍不能滿足靈敏性和選擇性需求時，可採用阻抗保護。對 345kV 系統聯絡變壓器高、中壓側均應裝設阻抗保護且可分設兩段時間延遲保護，短程時延用於小區間故障範圍的清除；長程時延則用於跳脫變壓器所有相關斷路器。

4. 外部接地短路時，應採用的保護：

對中性點直接接地的電力系統，因外部接地故障引起零序電流，經變壓器接地中性點點形成一環流，中性點應裝設零序電流保護。零序電流保護可由兩段組成，每段可各帶兩個時延，並均以短程時延保護小區間故障範圍，或僅跳脫故障側斷路器，以長程時延跳脫變壓器各側斷路器。

對自耦變壓器高、中壓側 Y 接中性點共同接地的三繞組變壓器，當有選擇性要求時，應增設零序方向元件。

當電力網路中部分變壓器中性點接地運轉，為防止發生接地故障時，中性點接地的變壓器跳開後，中性點

不接地的變壓器(低壓側有電源)仍帶接地故障繼續運行,應根據實際情況,裝設專用的保護裝置,如零序過電壓保護,中性點裝置放電間隙加零序電流保護等。

5.過負載保護:

對 400kVA 以上的變壓器,當數台並聯運轉,或單獨運轉並作為其它負載的備用電源時,應根據可能過載的情況,裝設過載保護。過載保護接入單相電流,並延時提供示警信號。

6.過激磁保護:

高壓側電壓為 345kV 及以上的變壓器,對頻率降低和電壓升高而引起

的變壓器激磁電流的升高,應裝設過激磁保護。在變壓器允許的過激磁範圍內,保護作用僅發出示警信號;當過激磁超過允許值時,應選用跳脫功能。過激磁保護檢測實際工作磁密和額定工作磁密之比(稱為過激磁倍數)而動作。

7.其它保護:

對變壓器溫度及油箱內壓力升高和冷卻系統故障,應按現行變壓器標準的要求,裝設應顯現信號或動作跳脫的裝置。

綜合以上變壓器之故障類型及其所需之保護裝置匯集成表 1。

表 1 變壓器之故障類型與其所需之保護裝置

故 障 類 型	保 護 裝 置
一次繞組相間故障	差動電驛、過流電驛
一次繞組相對地故障	差動電驛、過流電驛
二次繞組相間故障	差 動 電 驛
二次繞組相對地故障	差動電驛、限制型接地過流電驛
內 部 故 障	差動電驛、撲氣電驛(BUCHHOLTZ)
鐵 芯 故 障	差動電驛、撲氣電驛(BUCHHOLTZ)
油箱接地故障	差動電驛、撲氣電驛(BUCHHOLTZ)
過 激 磁	59/81(過激磁電驛)
過 熱	溫 度 電 驛

二、變壓器之非電氣類故障之保護

電力變壓器運轉發生以下任一種現象應注意立即停用:

- 1.變壓器內部發出異音聲響很大且疑似有爆炸聲;
- 2.在正常負載及冷卻條件下,變壓器的油溫異常地不斷升高;
- 3.變壓器油枕和安全氣道(防爆管)噴油、噴煙;
- 4.變壓器油色變化過甚、油內出現碳質

等;

- 5.變壓器套管有嚴重破損以及放電現象;
- 6.變壓器著火。

為提高變壓器設備運轉可靠性,早期的大型電力變壓器,逐步將變壓器的安全氣道(防爆管)更換為壓力釋放閥。作為變壓器非電氣故障的保護安全裝置,壓力釋放閥是用來保護油浸電氣設備的裝置,即在變壓器油箱內部發生故障時,油箱內的油被分解、氣化,產生大量氣體,油箱

內壓力急劇升高，此壓力如不及時釋放，將造成變壓器油箱變形，甚至爆裂。安裝壓力釋放閥可使變壓器在油箱內部發生故障時，壓力升高至壓力釋放閥的開啟壓力，壓力釋放閥在 2ms 內迅速開啟，使變壓器油箱內的壓力迅速下降。當壓力降到關閉設定值時，壓力釋放閥便自動關閉，使變壓器油箱內永遠保持正常壓力，有效地防止外部空氣、水分及其他雜質進入油箱。比安全氣道（防爆管）動作可靠、精確，且動作後無元件受損須予更換。

然而上述的壓力釋放閥安裝絕非一勞永逸仍有其他的問題，例如，不同容量的變壓器安裝的壓力釋放閥動作壓力均相同，導致壓力釋放閥無法靈活適應各種不同程度的需求。另外，其動作後之信號，通常不考量引接跳脫斷路器，可能導致實際故障持續壓力無法排除。目前進口的大型電力變壓器，如西門子、ABB、三菱重工等絕大多數是壓力釋放閥動作接入跳脫斷路器。大型電力變壓器發生內部故障、布氏保護動作或壓力釋放閥動作以後，變壓器故障部位的損壞程度就已到非得“開腸剖肚”進行“器官移植”手術，否則無法修復運轉之地步，特別是無人值班的變電所更是如此。在大型電力變壓器內部故障情況下，通常壓力釋放閥動作反應緩慢於布氏保護，或變壓器重布氏保護動作後，變壓器內部壓力釋放時，壓力釋放閥受制不再動作。

關於電力變壓器的電氣類保護電驛，如差動保護、過流保護、零序電流保護等對變壓器內部匝間短路故障偵測，其靈敏度是不足的，若此類故障從匝間短路開始，少量匝間短路故障電流雖然很大，但反映到線電流可能不夠大，直到故障擴展到多匝間短路或對地短路時，才能檢測反應

切斷電源則變壓器已燒損，而非電氣類的保護，在變壓器內部故障發生時，它在快速檢測氣體或流量後，即能瞬間切除故障設備。

三、變壓器之電氣類保護

在 IEC 60076 標準訂定：為防止變壓器因系統短路瞬間破壞，其變壓器需符合表 2 之基本要求[7]。因此，變壓器需安裝電氣類保護電驛來防制短路性故障破壞。依據 IEEE C37.91-2000 標準中所述，變壓器容量在 5MVA 以下之電氣類保護可使用電力熔絲，變壓器容量在 10MVA 以上需使用電氣類之電驛裝置為其保護，其方式如圖 2 所示。

表 2 變壓器耐短路能力

變壓器電抗(%)	故障電流(額定電流之倍數)	允許時間(秒)
4	25	2
5	20	2
6	16.6	2
7	14.2	2

變壓器之差動保護，如圖 3 所示，其利用高低壓兩側比率差動 (percentage differential) 原理設計，差動保護實用上應注意高低壓兩側相位對稱問題、湧入電流問題、過激磁影響及零序電流等影響。實用上差動電驛大多使用圖 4 之特性曲線，此類三段式差動電驛特性曲線，具有高靈敏性、防制重載誤動作及防制 CT(Current Transformer) 飽和之誤差所引起之誤動作。舉例說明，如圖 5 差動保護電驛模擬試驗模型，當一內部故障(F1)發生時，如圖 6 所示比流器 CT1 之電流波形均未改變，但比流器 CT2 之電流波形在 0.02 秒時由同相轉變為異相，產生差流進入差動元件，

啟動差動保護電驛發出跳脫信號，以隔離故障；反之，當一外部故障(F2)發生時，故障電流自變壓器高壓側流入，低壓側流出，如圖 7 所示變壓器兩側比流器之電流波形極性相反，造成流入差動元件之差流小，因小於動作設定值致無法動作。

另外，過流電驛用於變壓器後備保護，電流設定通常為 1.3 倍以上之變壓器額定電流，但時間標置部份則需和下游過流電驛協調，以免跳脫順序失控而擴大停電範圍。

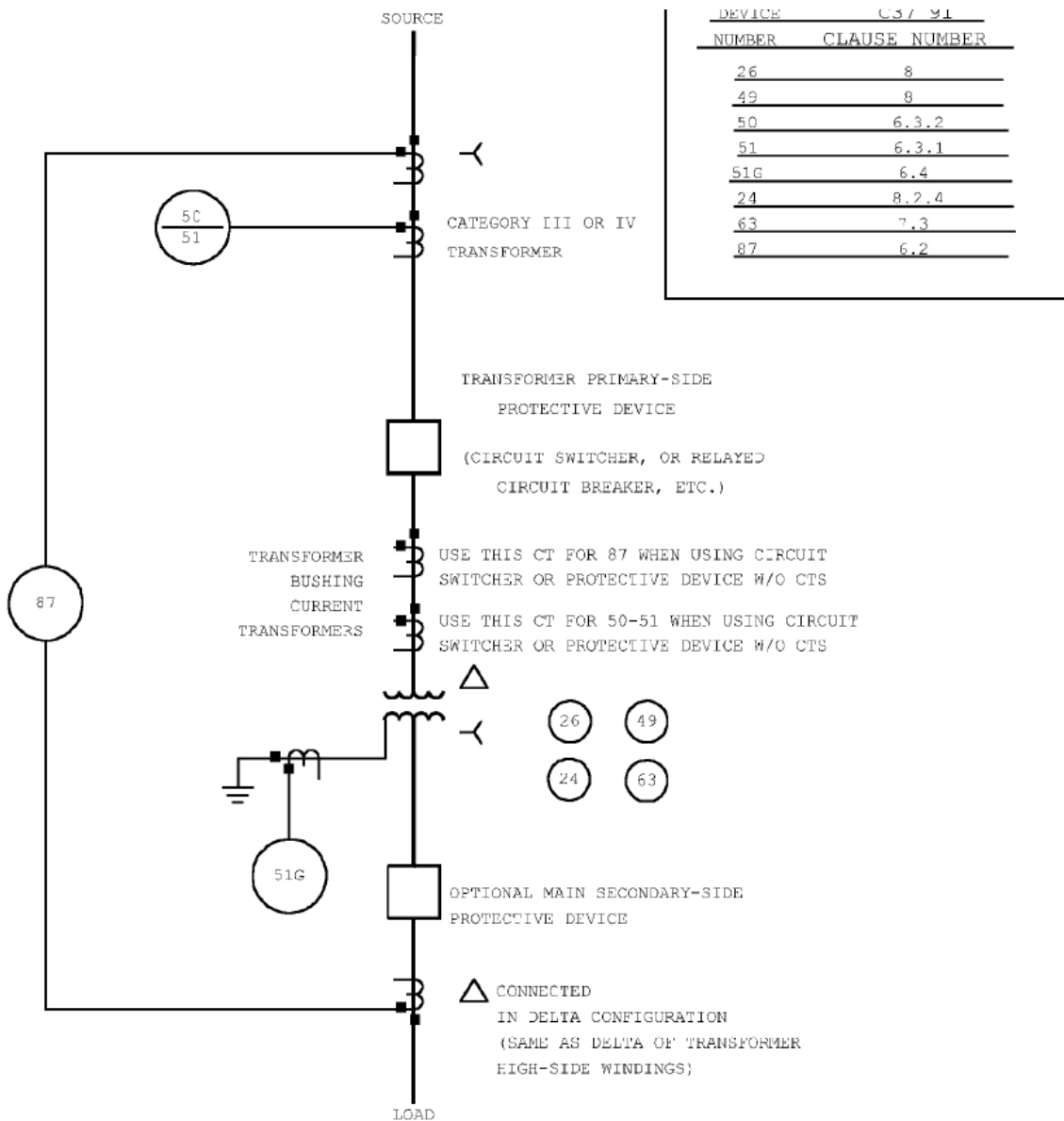


圖 2 變壓器之基本保護配置

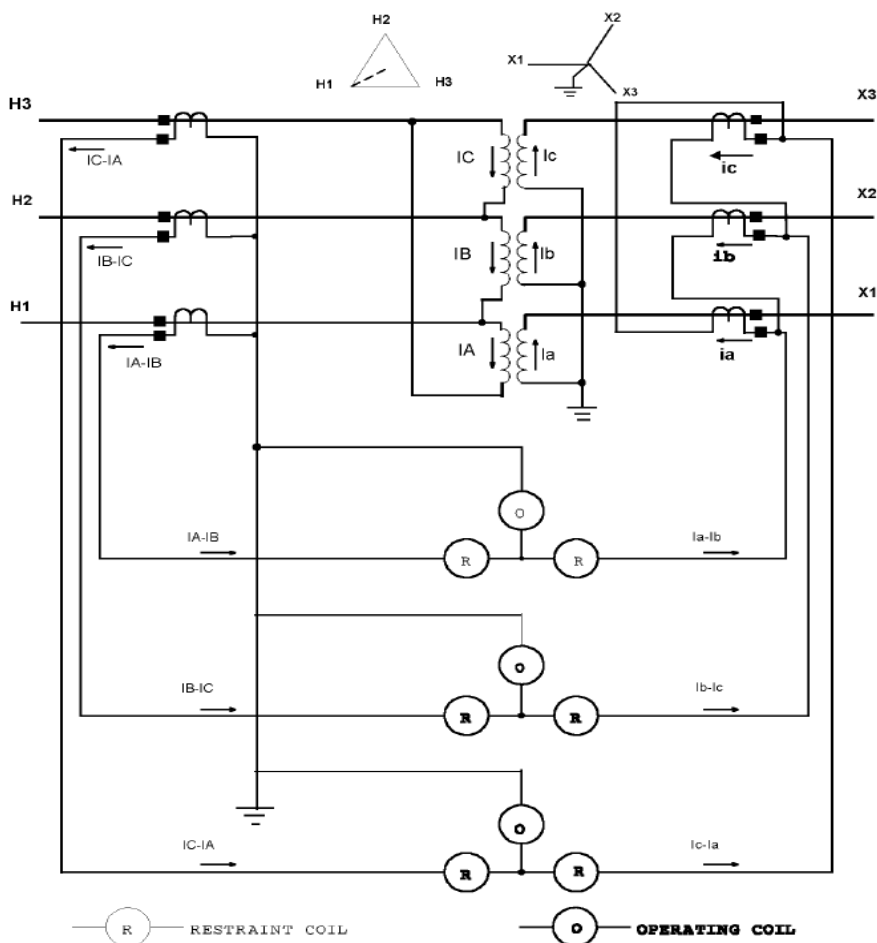


圖 3 變壓器之差動保護電驛

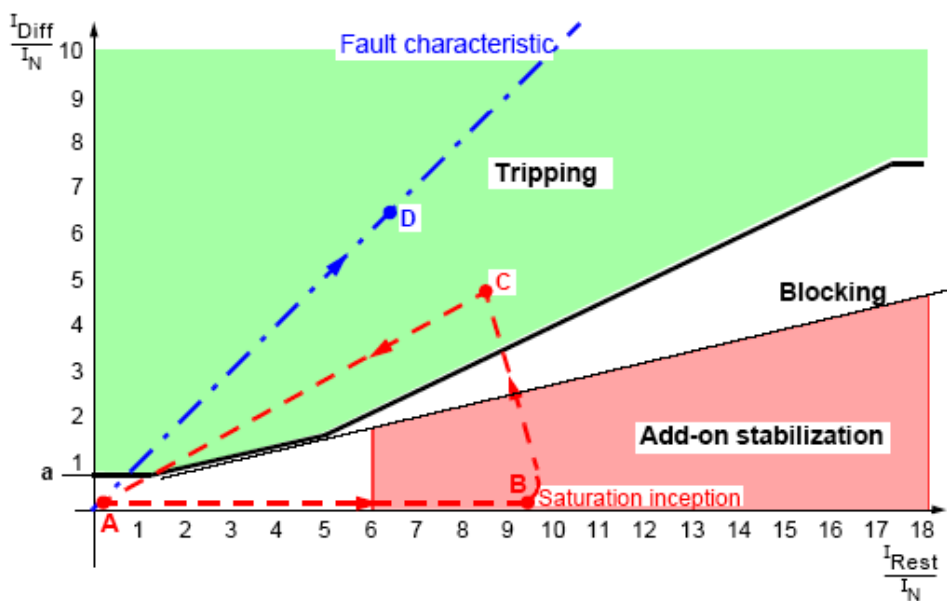


圖 4 差動保護電驛之特性曲線

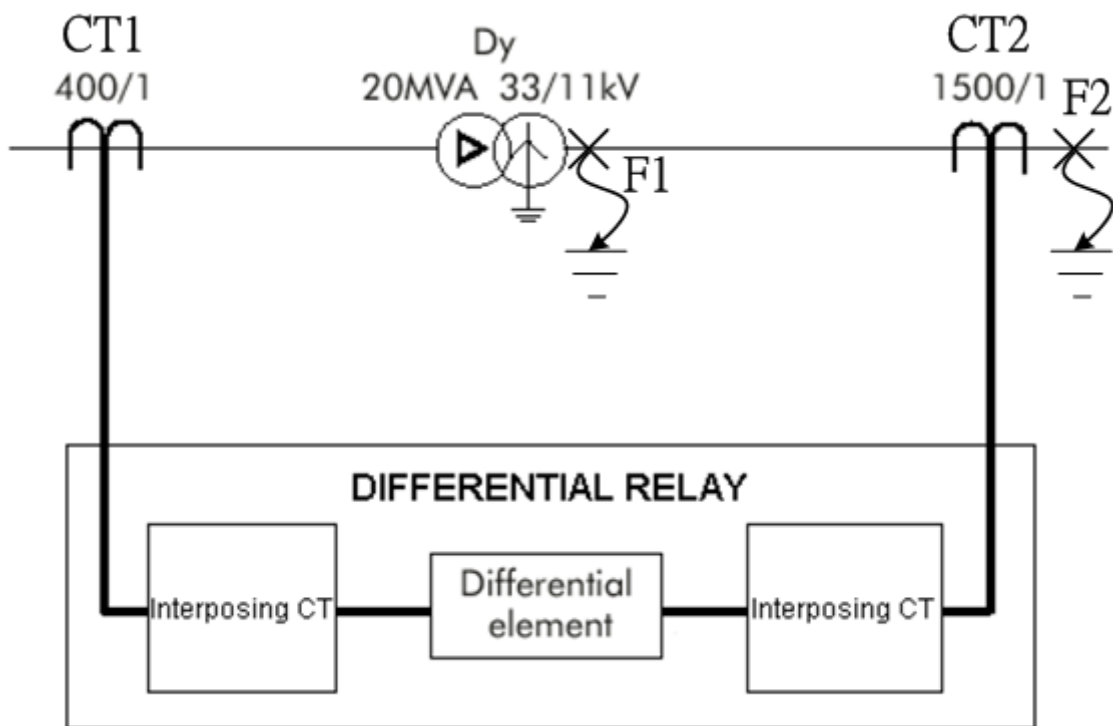


圖 5 差動保護電驛之模擬試驗

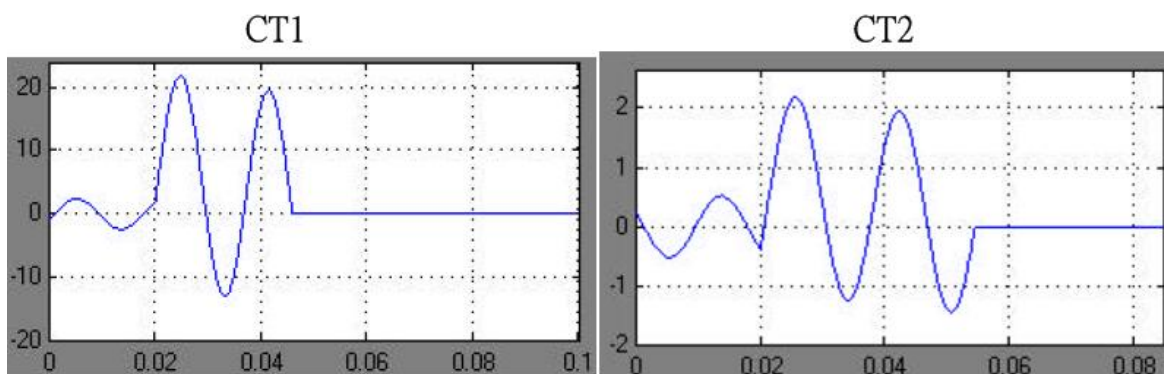


圖 6 變壓器內部故障時差動保護電驛所感受之電流波形

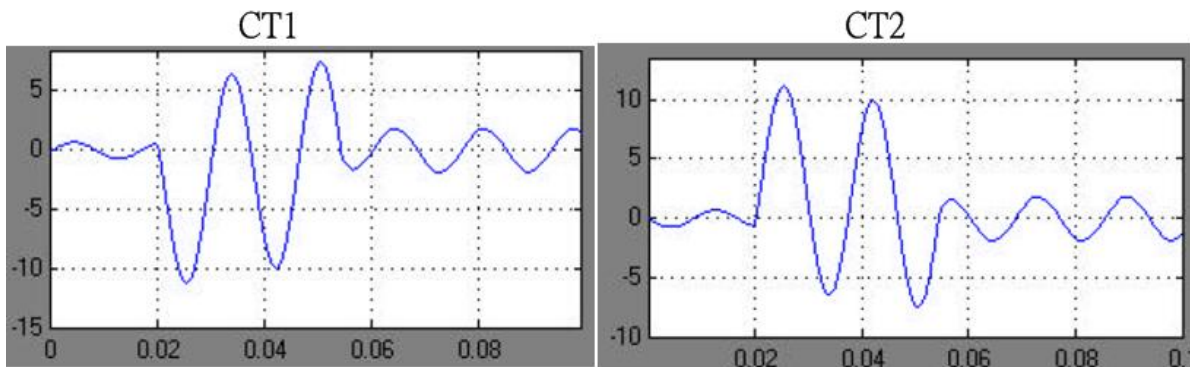


圖 7 變壓器外部故障時差動保護電驛所感受之電流波形

四、變壓器之湧浪電流

在變壓器超過 10MVA 以上的系統中，差動保護為變壓器主要保護，此方法大約有 70 年左右的應用歷史，因其原理簡單、效果良好，且具高經濟效益；然而，變壓器在空載加壓所產生之湧浪電流，也為差動保護電驛帶來困擾惱人之問題。

一般變壓器數位模型之磁滯現象，我們可用方程式(1)佛立啟(Frolich)方程式表示之，依據此方程式所繪製之磁滯曲線如圖 8 所示，另其參數為 $B_{sat}=1.8 \frac{W_b}{m^2}$ 、 $\mu_i=15000$ ，由於此一磁滯曲線之影響，使變壓器有激磁效應及磁飽和情形。

$$B = \frac{\mu_i \mu_0}{\mu_i \mu_0 + \frac{B_{SAT}}{H}} \cdot H \quad (1)$$

其中：
 B：磁通密度($\frac{W_b}{m^2}$)
 H：磁場強度(AT/m)
 μ_i ：相對導磁係數
 μ_0 ：空氣中之導磁係數
 B_{SAT} ：飽和磁通密度

湧浪電流 (inrush current)的發生，就是激磁效應及磁飽和問題，即只要系統電壓一有變動，激磁電壓受到影響，就會產生湧浪電流。在不同的情況下將產生不同程度的湧浪電流，其瞬時尖峰值及持續時間，將視下列各因素之綜合情況而定，如變壓器的容量、變壓器安裝地點與大電源的距離、電力系統容量的大小、由電源至變壓器間電力系統的時間常數 L/R 值、變壓器鐵心特性及其設計時所用飽和磁通密度值、加壓操作前變壓器的剩磁值 (residual flux 殘磁值) 及加壓操作時瞬間電壓的相位角度等等，通常湧浪電流可能會高達變壓器額定電流的 6~30 倍。

此時變壓器差動保護常把此電流誤判為故障電流，造成動作多跳情形；雖然，差動保護電驛有二次諧波抑制功能，來識

別湧浪電流，經大量的模擬及實測顯示，湧浪電流之二次諧波含量一般會大於 15% 以上，因此我們經常會把差動保護電驛二次諧波抑制設定為 15%，此部份將保留於下節探討。湧浪電流不但會影響電力系統運轉之穩定性，也帶給現場操作人員某些困擾。我們利用數位模擬之技巧，為此問題提出一些改善及試驗方法，以利現場人員對此問題之瞭解，進而改善差動保護之暫態問題，使電力系統之運轉更加安全、可靠。

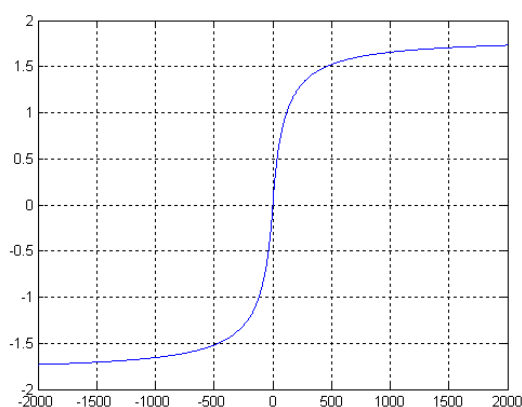


圖 8 變壓器磁滯曲線圖

參、模擬及現場實測

變壓器 (T6A2) 之差動保護電驛 (87SST) 特性曲線實測如圖 9 所示，為證明差動保護電驛 (87SST)，是因其下游 SSD 啟動變壓器加壓瞬間，引起之誤動作跳脫，我們於現場實際測量差動保護電驛 (87SST) 之高、低壓側電流，其結果如圖 10 所示，為分析其差電流特性，將差動電驛之差流波形做二次諧波頻譜分析，如圖 11 所示，清楚發現在湧浪電流發生期間，其二次諧波含量皆大於 15% 以上，接著我們繪製其變壓器 (T6A2) 差動電驛特性曲線與差動電流軌跡如圖 12 所示，可清楚發現本次量測之湧浪電流大小量尚不足以讓差動保護電驛 (87SST) 動作跳脫。假設湧浪電

流高於差動電驛設定則應動作，但受制於二次諧波含量大於 15% 以上時，差動電驛應不會動作，如兩者並存則結果互相矛盾，故推知本案例湧浪電流應低於差動電驛設定。

在現場實測，因湧浪電流皆未進入差動電驛之動作區，故差動電驛(87SST)表現不動作；但這並不表示差動電驛(87SST)在其下游 SSD 啟動變壓器加壓瞬間不會動作多跳。本文擬提出湧浪電流發生之相關因素繁多，因此將以電腦模擬分析方式來找出變壓器(T6A2)之差動保護電驛(87SST)誤判動作之主因。

經大量模擬分析發現，變壓器(T6A2)之差動電驛(87SST)誤動作原因，的確是因為下游 SSD 啟動變壓器加壓瞬間之湧浪電流所引起，如圖 13、14 及 15 模擬結果所示，其下游 SSD 啟動變壓器加壓瞬間之湧浪電流會造成差動電驛(87SST)誤動作跳脫，經以模擬之湧浪電流(如圖 16、17 及 18)實際測試差動電驛時，明顯發現和

模擬結果一致，皆是 B 相之差動電驛動作跳脫。另外，我們提出一湧浪電流 B 相(圖 19)雖進入差動電驛動作區間(圖 21)，但因其 B 相二次諧波含量(25% 以上)大於 15%(如圖 20 所示)，差動電驛受到抑制而不動作，如圖 22、23 及 24 之實際測試差動電驛。

由上述可知，湧浪電流是造成本次差動保護電驛(87SST)發生誤判動作之主因。

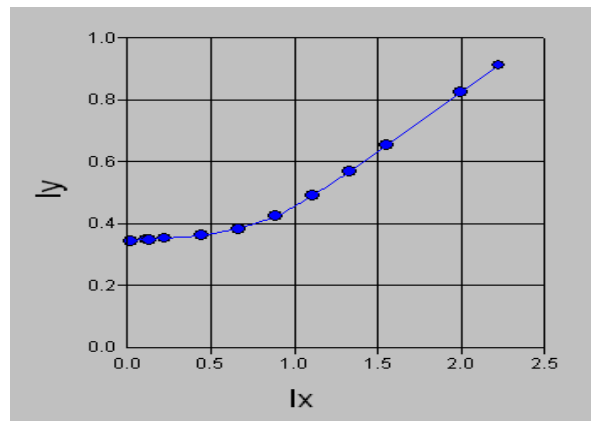


圖 9 變壓器(T6A2)差動電驛特性曲線實測

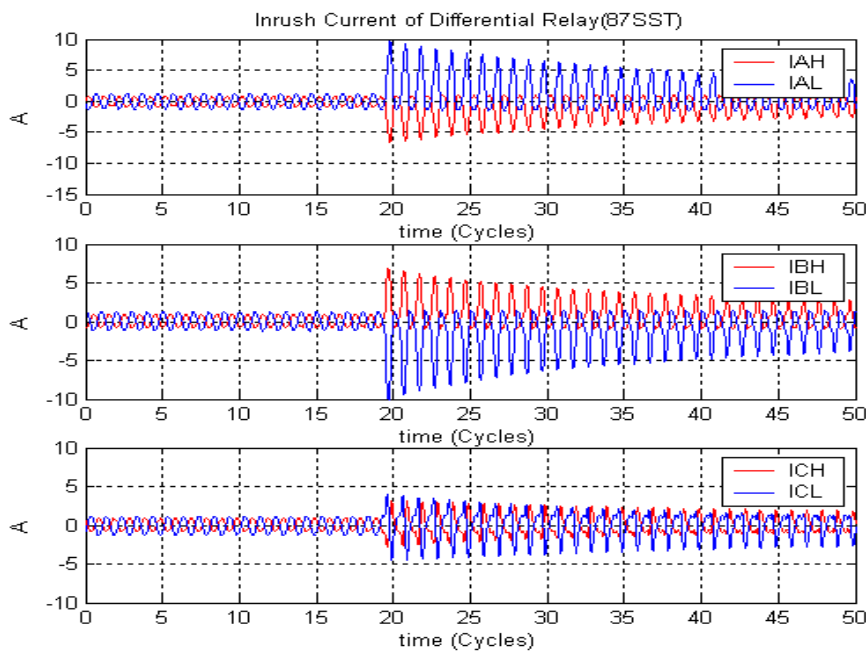


圖 10 現場 SSD 啟動變壓器加壓瞬間於變壓器(T6A2)

差動保護電驛所量測之變壓器高低壓側波形值

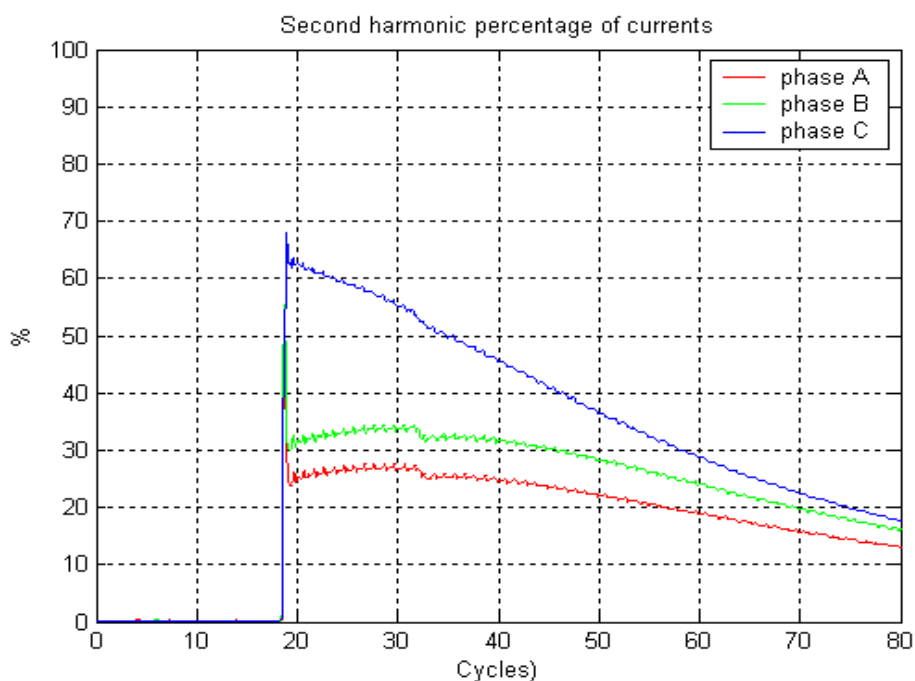


圖 11 現場變壓器(T6A2)差動電驛各相差流
波形之二次諧波含量頻譜分析

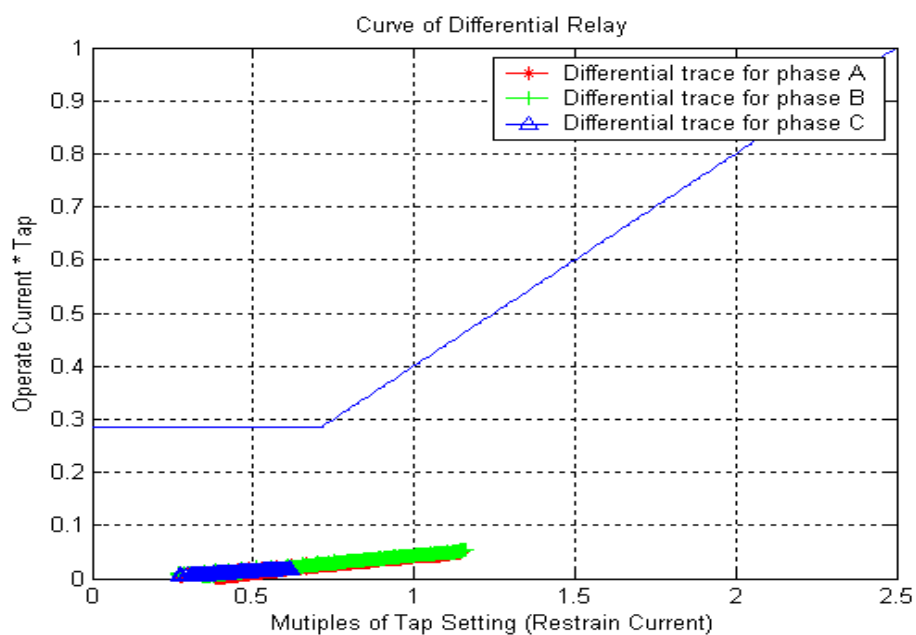


圖 12 現場變壓器(T6A2)差動電驛特性曲線與差動電流軌跡

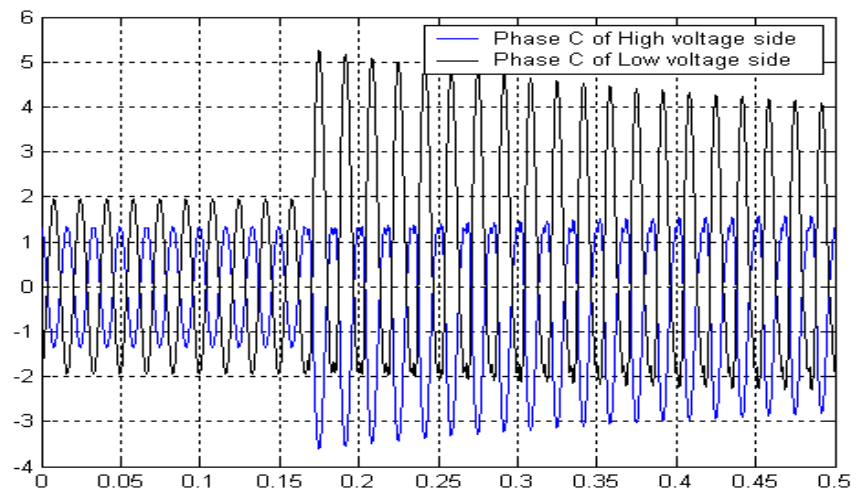
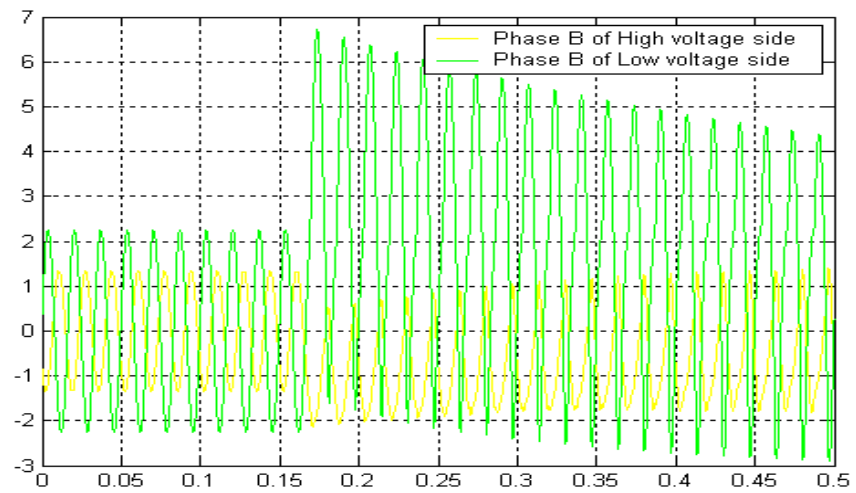
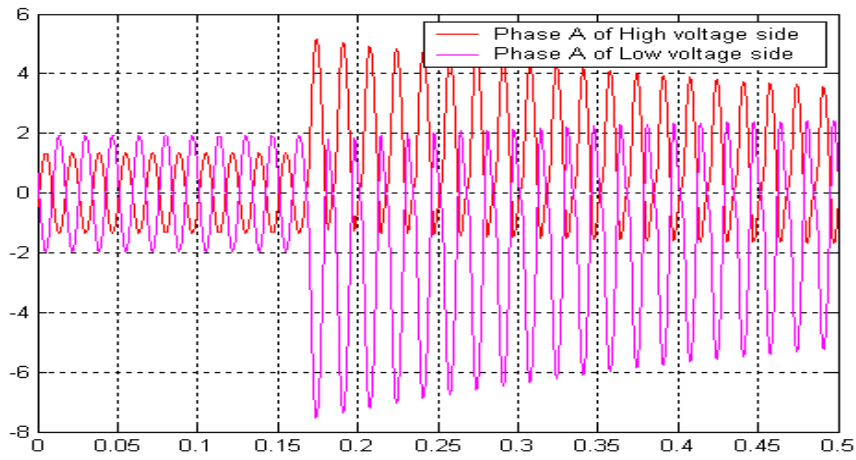


圖 13 模擬 SSD 啟動變壓器加壓瞬間於變壓器(T6A2)
差動保護電驛所量測之變壓器高低壓側波形值

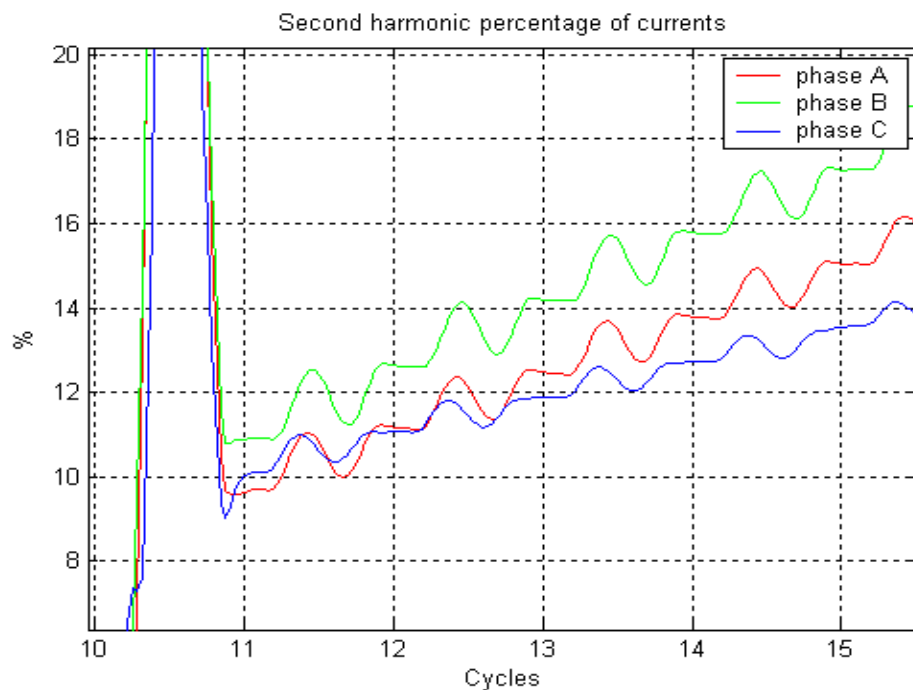


圖 14 上圖波形各相差電流之二次諧波含量

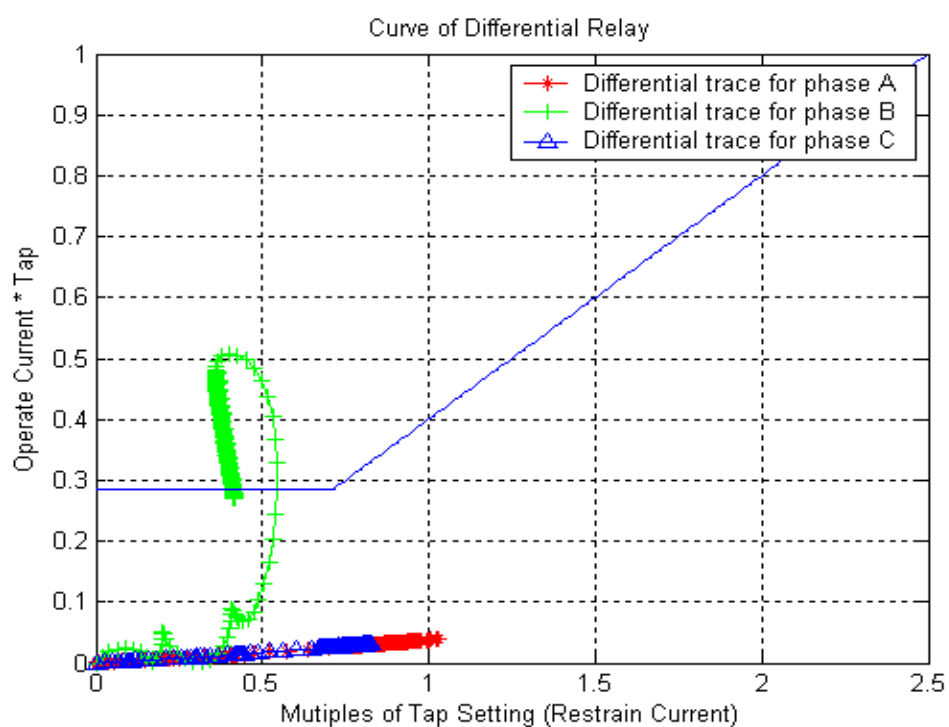


圖 15 模擬變壓器(T6A2)差動電驛特性曲線與差動電流軌跡

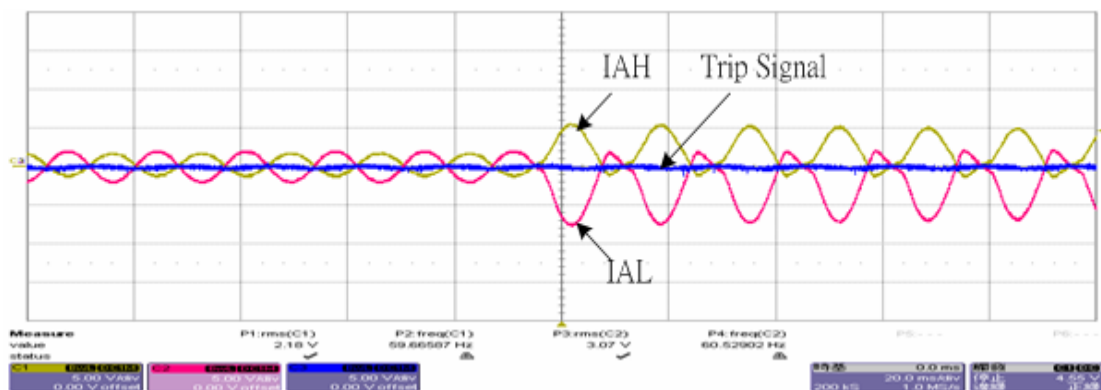


圖 16 變壓器(T6A2)之 A 相模擬電流波形實際測試差動電驛

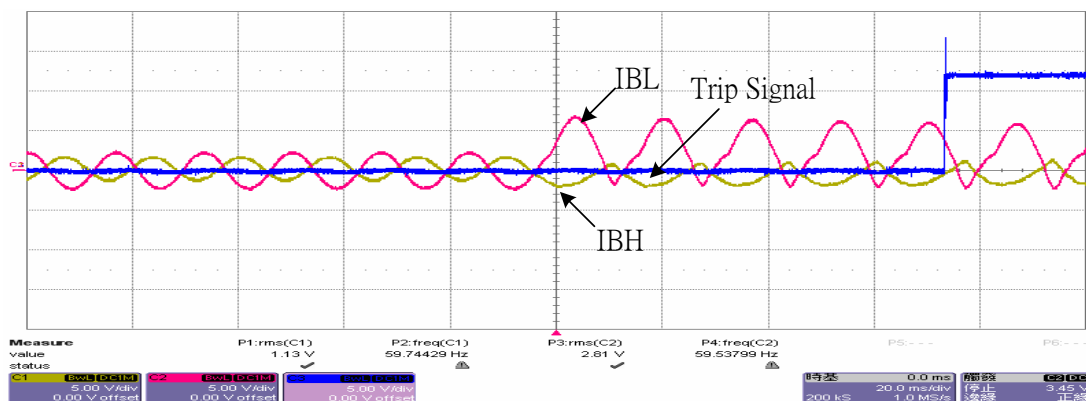


圖 17 變壓器(T6A2)之 B 相模擬電流波形實際測試差動電驛

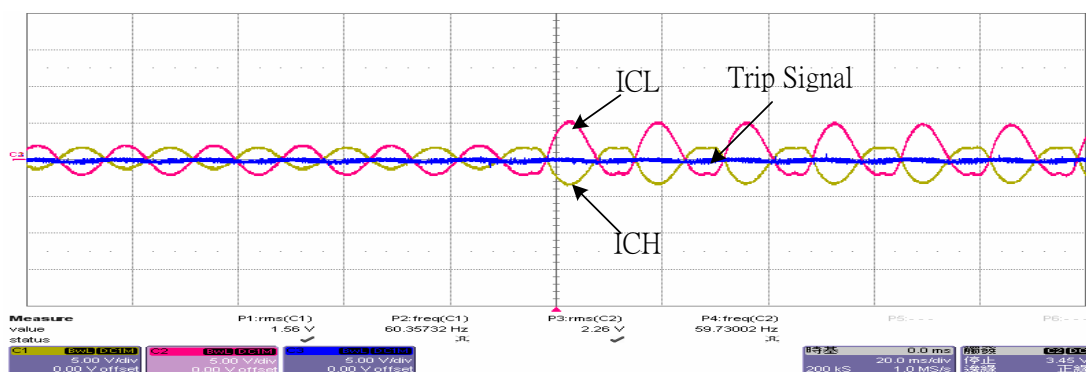


圖 18 變壓器(T6A2)之 C 相模擬電流波形實際測試差動電驛

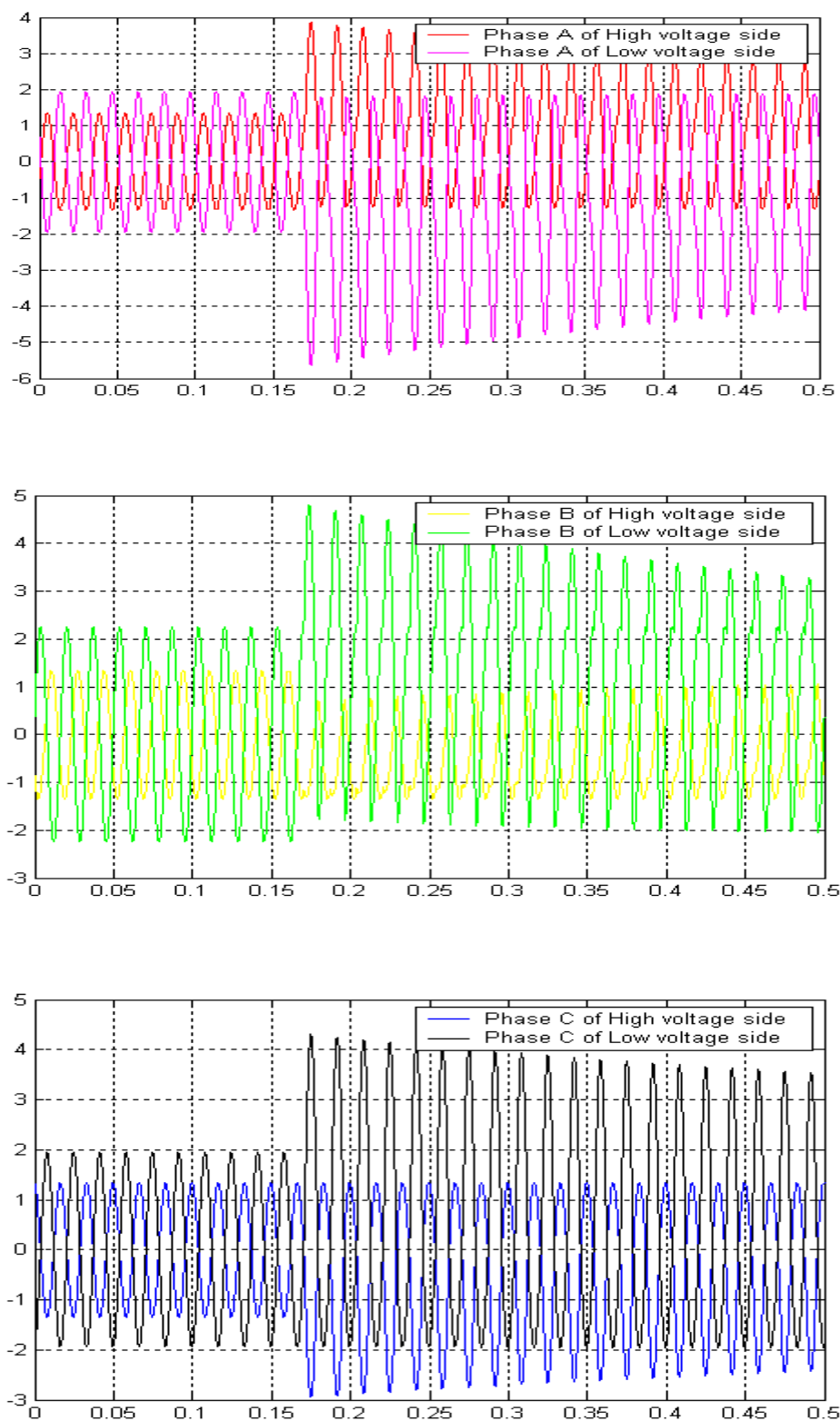


圖 19 模擬 SSD 啟動變壓器加壓瞬間於變壓器(T6A2)
差動保護電驛所量測之變壓器高低壓側波形值

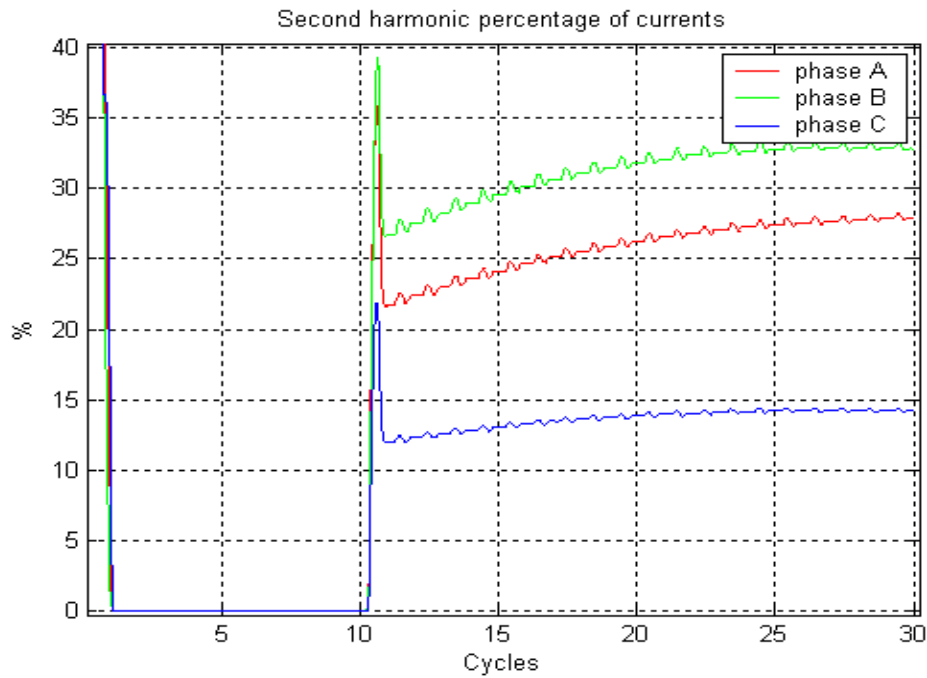


圖 20 為圖 19 中各相差電流之二次諧波含量

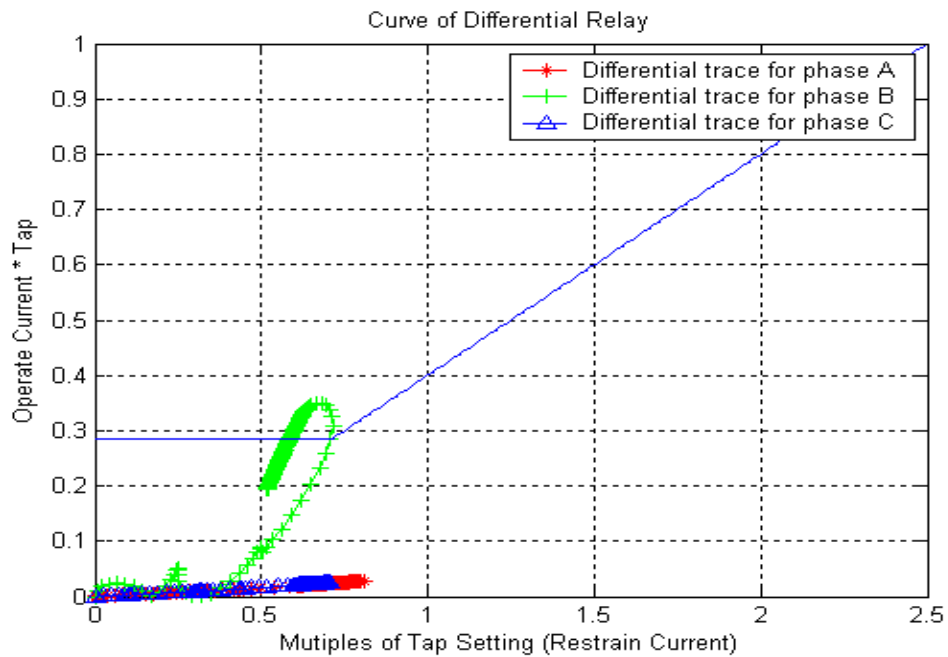


圖 21 模擬變壓器(T6A2)差動電驛特性曲線與差動電流軌跡

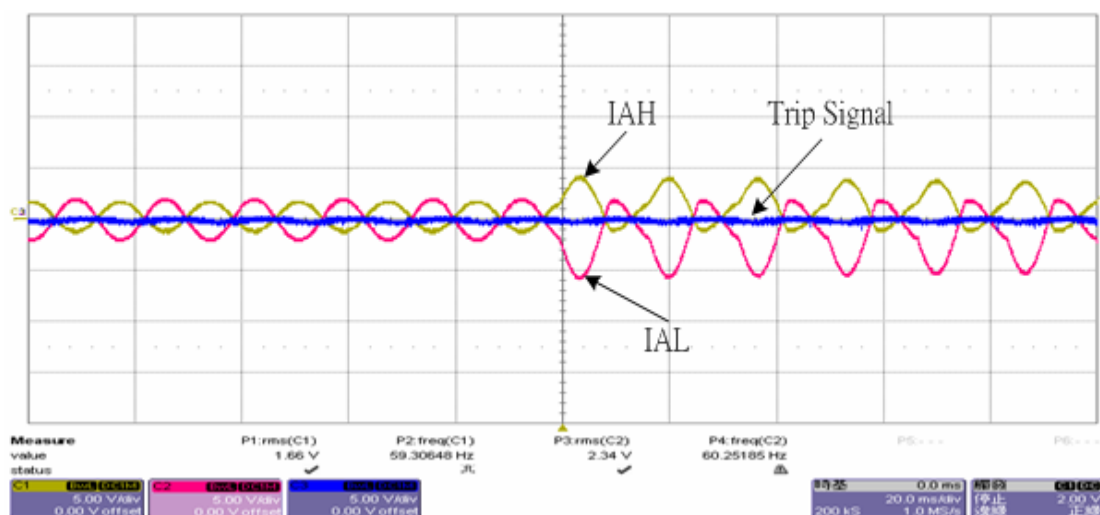


圖 22 變壓器(T6A2)之 A 相模擬電流波形實際測試差動電驛

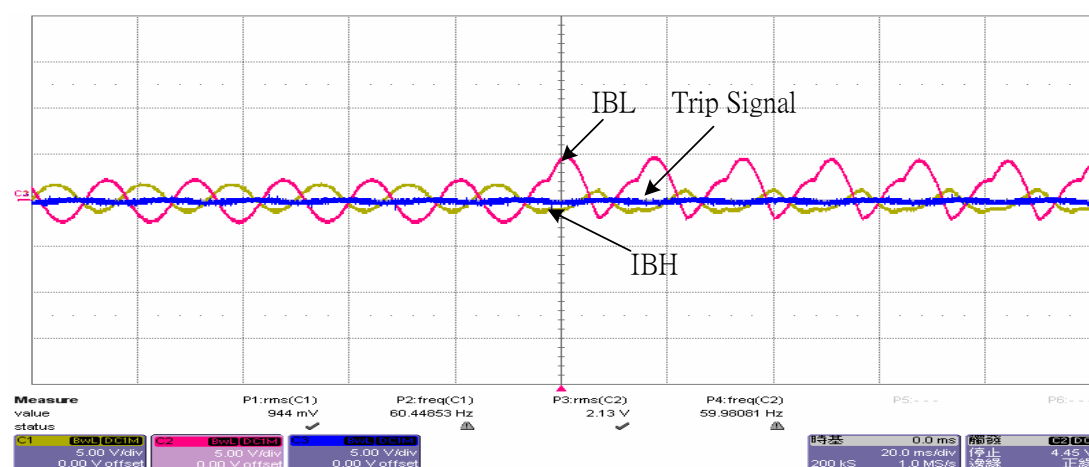


圖 23 變壓器(T6A2)之 B 相模擬電流波形實際測試差動電驛

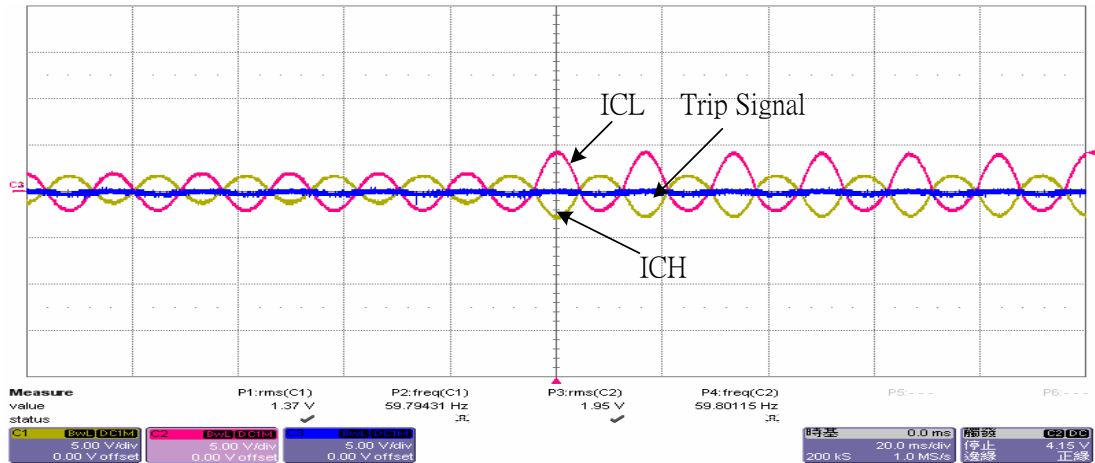


圖 24 變壓器(T6A2)之 C 相模擬電流波形實際測試差動電驛

肆、探討與評析

只要有湧浪電流存在，就會含有二次諧波及高次諧波，如再經比流器(Current Transformer)變換後，其二次諧波含量會更高。如此一來，我們使用含二次諧波抑制型之差動電驛，有利於作為變壓器之主保護，多年來使用經驗上一直認定效果良好；然而，並不是所有湧浪電流的二次諧波含量皆能達電驛抑制範圍，所以含二次諧波抑制之差動電驛還是會因誤判而動作。另外，其湧浪電流之零序分量常會經由變壓器中性線構成回路，如其零序分量夠大時，也可能造成變壓器中性線過電流電驛(51Z)多跳。

經現場實測及電腦大量模擬得知，如圖 11、14 及 20 之六號機輔助變壓器(T6A2)下游 SSD 啟動變壓器加壓瞬間之實測及模擬湧浪電流諧波分析，發現其二次諧波含量皆大於 10%，因此只要將 15% 諧波抑制值調降至 10% 後，其誤判機率將降至最低；但應注意此二次諧波抑制值調降後，應做電流諧波監測工作，預防內部事故時，如二次諧波超過 10%，造成差動電驛抑制或緩跳現象，可能使設備損害加劇。

另外在滿足選擇性之前提下，調高差動電驛之標置值，也是一種防制湧浪電流

引起變壓器差動保護誤判之辦法，但必須犧牲較大之靈敏度，來換取安全性保護，非經深思熟慮通常不為人輕易貿然採用。

伍、結論

變壓器空載投入系統時，所產生之湧浪電流，會使差動電驛誤判而動作，一直困擾保護電驛工程師，迄今尚未有差動電驛能完全(100%)解決此一議題，只能做到讓誤判動作機率降至最低。

由以上之模擬及實測結果探討說明可清楚瞭解，變壓器(T6A2)之差動保護電驛(87SST)之誤判跳脫主因，係因為下游 SSD 啟動變壓器加壓瞬間之湧浪電流所造成，至於如何調降可能性至最低，已於分析與評析一節中做了詳細說明。

陸、參考文獻

- [1] WSCC RELAY WORK GROUP, "Transformer Protection Sudden Pressure Relays", OCT. 21, 1991
- [2] Ralph P Barone and Gary H Young, "Sudden Pressure Relaying Revisited", WPRC 2003
- [3] IEEE Std C37.91-2000, "guide for protective relay applications to power

- transformers”
- [4] ABB, “Sudden Pressure Relay Installation, Operation and Maintenance Guide”
- [5] IEEE Std C37.108-2002, ”Guide for the Protection of Network Transformers”
- [6] IEEE C37.91, “Guide for Protecting Power Transformer”
- [7] ALSTOM, “Network Protection and Automation Guide”, 2002
- [8] Mozina, C.J. , Largo, , “Protection of power plant transformers using digital technology ”, Transmission and Distribution Conference, 1999 IEEE
- [9] Saied, M.M., “A study on the inrush current phenomena in transformer substations”, IEEE , Volume: 2 , 30 Sept.-4 Oct. 2001 Pages:1180 - 1187 vol.2
- [10]Bronzeado, H.; Yacamini, R.,”Phenomenon of sympathetic interaction between transformers caused by inrush transients”, IEE , Volume: 142 , Issue: 4 , July 1995 Pages:323 – 329
- [11]Yabe, K., “Power differential method for discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformers”, IEEE Transactions on , Volume: 12 , Issue: 3 , July 1997 Pages:1109 – 1118
- [12]IEEE Standard “Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems” , IEEE Std C37.111-1999 ,