

一種用於增加安全性維持故障響應性能之改良型變壓器激磁湧入電流抑制演算法

GE Power Management *Bogdan Kasztenny*
Ara Kulidjian

摘要

本文提出一種用於電力變壓器保護之新型激磁湧入電流抑制(inrush restraint)演算法。此演算法為傳統二次諧波抑制法之延伸發展，傳統方法只單純地量測差動電流(differential current)，並計算其二次諧波與基頻成份之大小比值，但本演算法所考量的是差動電流之二次諧波與基頻成份之相量比值，亦即同時考慮此複數相量比值之大小及相位關係，以前此相位關係成分是被忽略的，但藉由利用此額外之相位資訊，本文之新型演算法對於差動電流產生時，辨別其是由激磁湧入電流或由真正地內部故障電流所造成，可以提供更佳強建之鑑別率，文中將對本新型演算法做詳盡之描述，其性能將由數值分析之結果，包含利用電腦數值模擬及實際變壓器記錄所得之實測波形，來加以分析驗證。

1. 簡介

在電力系統中，大型電力變壓器乃屬於一種非常重要且價格昂貴之設備，假使變壓器遭受故障時，必須儘快地將變壓器與系統隔離、停止運轉，防止其遭受損壞，以使損失降到最低，修護損壞變壓器之價格可能非常高，非預期性地發生變壓器損壞或隔離停止運轉，也將可能造成電力公司數億元之損失，同時，減少變壓器

非必要性之停機頻率與時間是非常重要的，因此高性能之電力變壓器保護電驛是極需要的，相關需求及考量，包括可靠度(dependability)：確實發生故障時，電驛應該動作，而電驛亦確實、準確地動作，這種性能之程度稱之，亦即電驛沒有錯失應該動作之情形；安全度(security)：並非真正地內部故障，保護電驛不應該動作，這種性能之程度稱之，亦即無誤跳脫之情形及動作之速度(短的故障清除時間)。

然而，電力變壓器之運轉操作狀態，使得保護電驛之工作變的相對困難，在電力系統保護電驛之領域中，大型電力變壓器之保護，也許是最具挑戰性之問題。

就激磁湧入電流、鐵心靜態過激磁(stationary overexcitation)及內、外部故障等問題，藉由搭配量測計算、安全度、可靠度及動作速度等因素之考量，變壓器差動保護電驛之相關基本問題，可彙整、比較如表 1 所示[1,2]。

由於數字式電驛(numerical relay)能夠執行複雜之信號處理運算，因此使得電驛設計工程師，可以重新檢討傳統之保護電驛原理，以增強電驛之響應性能，例如：加快動作之速度，達成較高安全度與可靠度之電力變壓器保護[3]。

本文主要強調於發生激磁湧入電流之狀態下，抑制變壓器差動電驛，防止電驛誤跳脫之課題。

表 1・電力變壓器保護電驛之相關問題

干 擾 源	量 測	安 全 度	可 靠 度	速 度
激磁湧入電流	2 階及 5 階諧波之精確估測時間，須花費約一週波之時間。處於非標稱頻率，亦即頻率發生偏移時，對於諧波比值之估測，將產生額外之量測誤差。	現今之電力變壓器，由於鐵心之磁化特性之影響，使得於激磁湧入電流發生時之 2 次諧波量及過激磁時之 5 次諧波量，可能會非常小，因而危及保護電驛之安全度。	高階諧波出現於差動信號中時，並不一定隱含發生激磁湧入電流，當嚴重之內部故障發生時，由於 CT 飽和之影響，其所產生之諧波可能將電驛閉鎖。 發生內部故障時，由於 CT 飽和、發電機轉子不對稱及電力電子設備之影響，差動電流中可能含有 5 次諧波。	假如內部故障不致嚴重到足夠利用無抑制型之差動元件來加以跳脫，其通常依據須耗費一週波之時間，來抵制激磁湧入電流及靜態過激磁之影響。
過激磁				
外部故障	量測之電流通常有巨大之變化率且嚴重失真。	當 CT 比率不匹配時，由於外部故障電流之影響，可能產生錯誤之差動信號。於外部故障時，若 CT 發生飽和現象，則會產生一差動電流。	為了於外部故障時，防止電驛誤跳脫，而採用抑制電驛跳脫之各種方式，將會減低電驛之可靠度。	為了於外部故障時，防止電驛誤跳脫，而採用抑制電驛跳脫之方式，將會限制電驛之動作速度。
內部故障		內部故障電流可能非常小，只有額定電流的幾個百分比而已，若為了考量此小的內部故障電流，則會危及電驛之安全度。	內部故障電流可能非常小，只有額定電流的幾個百分比而已，為了於激磁湧入電流、過激磁及外部故障時之安全度要求，可能會限制降低電驛之可靠度。	為了於激磁湧入電流、過激磁及外部故障時，防止電驛誤跳脫，而採用抑制電驛跳脫之方式，將會限制電驛之動作速度。

2. 激磁湧入電流—簡略之分析

變壓器之激磁湧入電流乃由於激磁電壓(magnetizing voltage)瞬間突變所造成，雖然一般吾人最常考量之事例為，送電加壓於變壓器之瞬間，由於激勵電壓之變化，因此可能產生激磁湧入電流，但是激磁湧入電流亦可能由下列原因造成[4,5]：

- (a) 當發生外部故障時。
- (b) 清除外部故障後，激磁電壓回復(voltage recovery)現象，亦會造成激磁湧入電流。
- (c) 故障之狀態或特性變化(例如：原本為單相接地故障，但後來演變成相對相

間接地故障)。

- (d) 所連接之發電機發生失相(out-of-phase)現象。

因為代表鐵心之激磁分支迴路，於變壓器等效電路模型中，為一分路元件，所以此激磁電流干擾變壓器端點間電流之平衡性(由於分流之效應)，因此對於差動電驛而言，其為錯誤之差動電流來源，然而，於激磁湧入電流產生之情形下，電驛必須依舊維持其穩定性，亦即不能發生誤動作，此外，就變壓器使用壽命之觀點而言，於激磁湧入電流發生時，跳脫斷電並非是非常妥善的情況，這是因為啟斷一純電感性元件上之電流，將會產生一過電

壓，其可能會危及變壓器之絕緣，而且可能因此間接產生一個內部故障)。

2.1 開關投入造成激磁湧入電流

開始加激勵電壓於變壓器之初始激磁狀態，可視為產生激磁湧入電流中最嚴重之案例，當電源切離變壓器時，則激磁電壓將被移除，而激磁電流會恢復至零，但磁通並不會隨之降到零，而是會循著鐵心磁滯(hysteresis)迴路，回降至某一殘餘磁通值，所以會造成某程度之剩磁通，殘留於鐵心中，爾後當另一個弦波電壓，重新投入、加壓於變壓器時，則磁通依舊為弦波，但存在一剩磁所造成之直流偏移值，此殘餘磁通可能高達額定磁通之 80% 到 90%，因此其可能將磁通對電流(flux-current)之軌跡移至遠離飽和點(knee-point，膝點)以上，造成具有巨大峰值且嚴重失真之激磁電流(如圖 1 所示)。

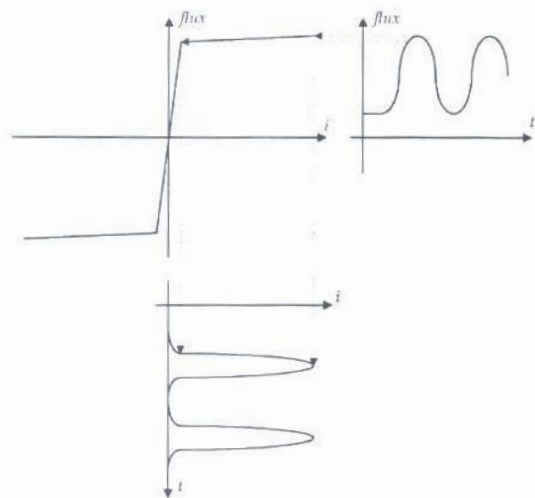


圖 1· 激磁湧入電流之圖解說明

圖 2 展示一典型之激磁湧入電流波形。由此波形可知，激磁湧入電流有一巨大且持續長時間之直流衰減成份，且其含有大量之諧波，假設一開始之峰值可達到

30 倍之額定電流值，則其值在初始零點幾秒內，會有快速之衰減，但其需要幾秒鐘之時間，才能完全衰減至穩定值(即恢復一般變壓器正常激磁之電流值，大約額定電流值之 1 到 2%)，在某些情形下，即使在變壓器加壓數分鐘後，依舊可觀察到激磁電流仍然有小量之變化[4,5]。

激磁湧入電流之波形、大小及持續時間與下列各項因素有關。

A. 變壓器容量

較小型之變壓器，其激磁湧入電流之峰值會較高，但對於較大型之變壓器而言，其激磁湧入電流之持續時間，則較小型之變壓器久，對於小型變壓器(100 kVA 或更小容量)，此衰減性電流之時間常數，大約在 0.1 秒之數量級，而對於大型變壓器則約在 1 秒之等級。

B. 變壓器電源激勵端之系統阻抗

當變壓器由一個大型之電力系統電源激勵運轉時，則其激磁湧入電流較大，而且，由等效電源側至激磁分路所看到的總電阻，提供了此電流之阻尼，因此當變壓器裝設於越靠近發電廠時，其激磁湧入電流之持續時間，將會比變壓器裝置於遠離發電廠持續更久之時間。

C. 鐵心材料之磁化特性

當鐵心之飽和磁通密度較小時，則激磁湧入電流將會更加嚴重。設計者通常讓磁通密度操作於 1.5 到 1.75 特斯拉(tesla)，因此變壓器操作於越靠近後者之情形時，則將產生較少之激磁湧入電流[4,5]。

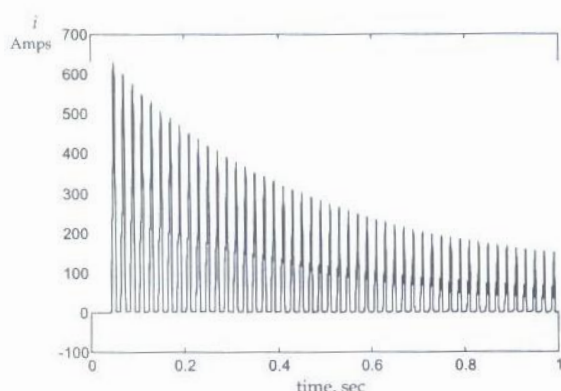


圖 2・典型之激磁湧入電流

D. 鐵心之剩磁

如同圖 1 所示，在最不理想之變壓器激勵電壓投入角與剩磁通正、負極性之組合下，較大之剩磁通將造成較大之激磁湧入電流，此剩磁通之密度可能高達 1.3 到 1.7 特斯拉[4,5]。

E. 激勵電源投入變壓器之瞬間

當加在變壓器繞組之激勵電壓投入角為零度，而且此時產生之磁通與原來殘留於鐵心之磁通具備相同之方向時，將會產生最大之激磁電流(如圖 1 所示)，然而，一般而言此激磁湧入電流之大小是一隨機值，其與激勵電源開關投入時，電壓波形之角度、剩磁通之正負極性及剩磁通之大小值有關，粗估來說，大約每 5 次或 6 次之電力變壓器投入運轉時，才會造成巨大可觀之激磁湧入電流[6]。

F. 變壓器之激勵電源開關投入方式

變壓器鐵心與受電源激勵繞組間之有效截面積，將會影響最大激磁湧入電流之大小，當具有較小直徑之內側繞組先受到電源加壓激勵時，則會產生較大之激磁湧入電流，對於以鋼為鐵心之變壓器，當其外側繞組先激磁時，則其所產生之激磁湧入電流，大約

為額定電流值之 5 到 10 倍，若為內側繞組先激磁，則所產生之激磁湧入電流，大約為額定電流值之 10 到 20 倍，由於絕緣之考量，通常低壓側之繞組會繞製於較靠近鐵心處，因此低壓之繞組受電壓激勵時，會產生較大之激磁湧入電流。

某些變壓器會裝設特殊之開關裝置，其透過一電阻來做開關投入加壓之動作[4,5]，此電阻可減少激磁湧入電流之大小，亦能大大地增加阻尼之效果，在此種情形下，變壓器差動保護之動作需求可變的較為寬鬆。

相形之下，若變壓器裝設一空氣型(air-type)開關來做電源投入之動作，則開關之電弧可能造成連續半週波具相同極性之激磁電壓，此連續相同極性之電壓峰值，將會產生累積剩磁通之效應，進而產生越來越嚴重之激磁湧入電流，此種情形為變壓器保護之極端情形，而且會危害到變壓器本身[2,4,5]。

2.2 激磁湧入電流之諧波含量

吾人將展示於圖 3 之近似波形，用於激磁湧入電流之頻譜分析計算，將角度 x 假設為參數，圖 3 所示波形之第 n 階諧波振幅大小可計算如下：

$$A_n = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{n+1} \sin((n+1)x) + \frac{1}{n-1} \sin((n-1)x) - 2 \cos\left(\frac{x}{n}\right) \sin(nx) \right] \quad (1)$$

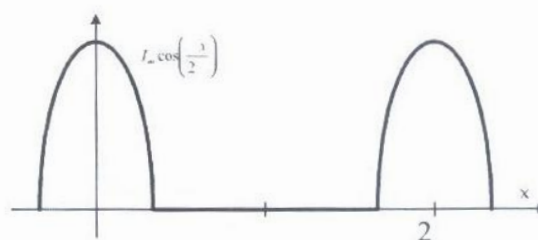


圖 3・用於頻譜分析之理想化激磁湧入電流波形

圖 4 所展現的是，此理想化激磁湧入電流信號之頻譜計算結果，其乃利用(1)式相對於角度 α 分別為 60、90 及 120 度時，所計算出來之結果，如同此圖所示，因為電流中含有一巨大之直流成分，因此 2 階諧波總是占主要之成分，然而 2 次諧波之含量，卻可能低於 20%，最小之 2 次諧波量主要依據變壓器鐵心磁化特性之飽和點來決定，較小之飽和磁通密度，則會有較大之 2 次諧波量，近代之變壓器，因為磁化材料之改良，所以具有較高之飽和點，也因此其激磁湧入電流，相對展現了一較低量之 2 次諧波，由於在激磁湧入電流之情形下，2 次諧波量為穩定差流電驛，使電驛不致發生誤跳脫之基本抑制準則，故此項因素對於近代變壓器之保護，造成了某些困難[3,7,8]。

吾人亦知，當假設大之激磁湧入電流時，則 2 次諧波量之大小會減小[4,5]。

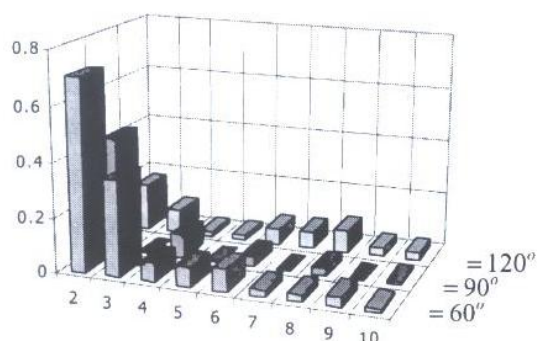


圖 4 · 當角度 α 於 60、90 及 120 度時，理想化激磁湧入電流之諧波含量計算結果

2.3 三相變壓器之激磁湧入電流

對於三相變壓器而言，各相量測所得之激磁湧入電流可能不同，其原因如下列所示：

- 不同相之激磁電壓角度是不同的。
- 當激勵電壓加於一 delta 接之繞組時，其線電壓即為激磁電壓。
- 對於上述第二點而言，某一相之線電流是兩相繞組電流之向量和。
- 依據鐵心型態及其它各種條件之不同，只有某些相之鐵心可能會發生飽和。

由於上述之原因，某一相對地之電流可能會類似於圖 2 所示之單相激磁湧入電流波形，亦或會變成一呈現振盪現象之失真波形，對於後者而言，其 2 次諧波之含量可能會劇烈下降，進而造成差流電驛之問題，圖 5 展現了一個三相變壓器加壓時所產生之波形範例，如此圖所示，A 相及 B 相之電流，為典型之激磁湧入電流波形，但 C 相之電流則為一呈現振盪之波形。

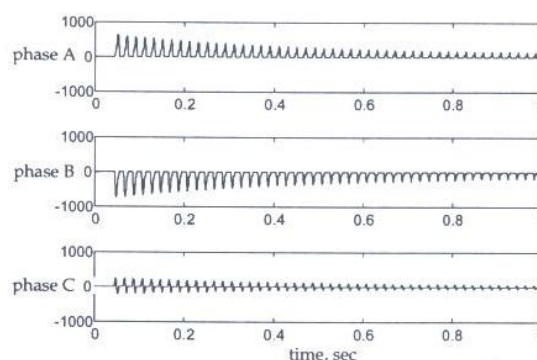


圖 5 · 三相 Y- Δ 接變壓器之激磁湧入電流範例波形(於 Y 接側施加激勵電壓)

2.4 於激磁湧入電流時，CT 發生飽和之情形

由於巨大且衰減緩慢之直流偏移成分影響，即使此電流之振幅相當小，激磁湧入電流亦可能會使得 CT 發生飽和，一但

CT 飽和時，如同圖 6 所示，CT 之二次側之電流將呈現失真狀態，所以在激磁湧入電流時，由於 CT 飽和之影響，則 2 次諧波含量可能會大大地降低[9]。

2.5 清除故障時之激磁湧入電流

當一個近端之外部故障，經由一適當之電驛搭配相關之斷路器，加以清除隔離時，則變壓器之外部端電壓將會恢復至其正常操作值，此時之狀況如同對一變壓器加壓激勵，所以可能會發生激磁湧入電流之現象，然而由於下列兩種因素之影響，造成了不同之狀況：

此電壓之步階式變化(step change)，通常遠小於變壓器初始投入加壓激勵之情況，只有在所連接之匯流排，發生三相直接接地故障且清除故障時，此種情況便等同於變壓器初始加壓激勵之情形。

通常在外部故障時，並不致會造成重大之磁通偏移，也因此變壓器發生鐵心嚴重飽和之機率變小。

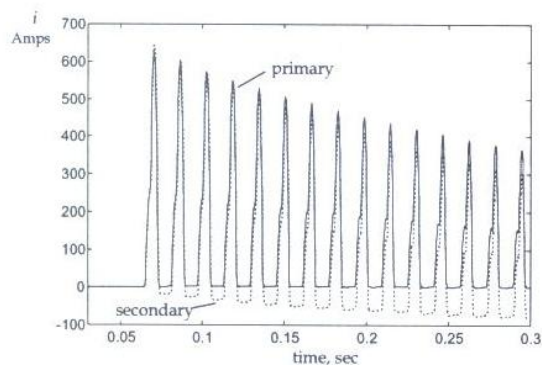


圖 6．在 CT 飽和之情形下，一次側激磁湧入電流及其二次側放大比率後之比較圖

因此，此種回復型激磁湧入電流之大小會遠小於初始激磁時之湧入電流，而此回復型激磁湧入電流之形狀及其諧波含量

會類似於初始激磁之湧入電流。

2.6 共感性(Sympathetic)激磁湧入電流

此現象發生在一變壓器投入與另一已運轉之變壓器並聯時，其示意圖如圖 7 所示，此時原先已運轉之變壓器將受到重新激磁加壓之影響，假設變壓器 T2 有一巨大之正性剩磁通，且其電壓是在最不恰當之相角時投入，明顯地，此變壓器將會由電源側吸收一巨大之激磁湧入電流，此激磁湧入電流之緩慢衰減直流成分，將會於等效電力系統之電阻兩端，產生一巨大之跨壓降(電抗並不會產生壓降，因為此衰減直流偏移成分之時間變化量很小)，此直流電壓降使匯流排 B 之電壓產生劇烈偏移，此匯流排 B 電壓之變化，將減少變壓器 T2 之飽和，因此減少 T2 之激磁湧入電流，然而變壓器 T1 受此劇烈變動電壓之影響，會產生如圖 8 所示之激磁湧入電流，但其方向則和 T2 相反，此動態現象可描述如下：一開始只有 T2 吸收激磁湧入電流，而後當 T2 減少電流時，T1 之激磁湧入電流則會增加，最後當兩變壓器完全激磁後，兩電流將會衰減(如圖 8 所示)。因為電源側電流之直流偏移成分減少，此電流之阻尼亦將下降，所以此種共感性激磁湧入電流之持續時間，可能比單一變壓器單獨投入加壓激勵時之時間更長(甚至可達數分鐘之久[4,5])。

共感性激磁湧入電流時，可能會發生下列兩個問題：

- 早已激磁完成之變壓器 T1，其受到重新激勵所產生之激磁湧入電流，可能大到足夠使此變壓器之保護產生問題。
- 電源側之電流是兩變壓器激磁湧入電

流之向量和，其可能類似於具備直流偏移量之故障電流，因此當兩並聯之變壓器共同使用一個保護系統時，其可能會產生問題。

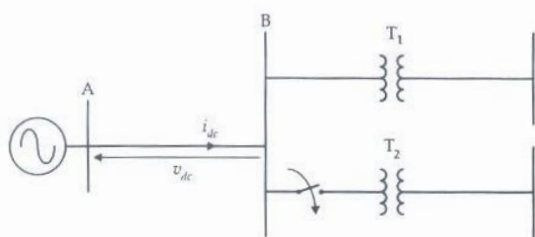


圖 7 · 造成共感性激磁湧入電流之狀況

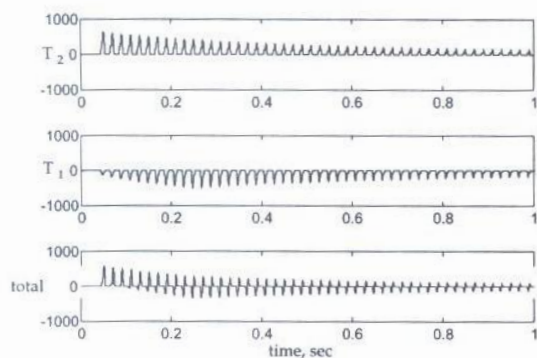


圖 8 · 共感性激磁湧入電流之範例波形

3. 激磁湧入電流抑制演算法-簡略之回顧

傳統上，於激磁湧入電流之情況下，乃運用各種不同之時間延遲法來防止電驛誤跳脫，在變壓器加壓激勵時，無論是將電驛功能暫時閉鎖一段時間或利用其他特殊時間延遲方法，然而，此種運用時間延遲法，來於激磁湧入電流下，抑制差動電驛之方法，已不再是可行之方式，尤其是對於大型之電力變壓器，現今之抑制差動電驛法，於激磁湧入電流時，乃由差動電流之波形，利用間接(諧波分析法，harmonic analysis)或直接法(波形分析法，

waveform analysis)來辨別是否產生激磁湧入電流[8,9,10]。

3.1 諧波抑制法

本法為一種用於抑制電驛之傳統方式，防止於激磁湧入電流之狀況下，產生電驛誤跳脫之方法，如同第二節之分析，保護電驛以差流之信號來判別是否發生故障，而激磁湧入電流存在於此差動電流中，其含有大量高階之諧波，一般而言，低量之諧波可促使電驛跳脫，而高量之諧波則顯示激磁湧入電流之存在，必須將電驛抑制住防止誤動作，對於數位式電驛而言，本法可寫成下式：

$$TP = I_{CH} < \Delta I_{CD} \quad (2)$$

其中

TP 激磁湧入電流偵測器之允許跳脫 (Tripping Permission)命令。

I_{CH} 差動電流中之合成諧波 (Combined Harmonic)量。

I_{CD} 合成差動 (Combined Differential) 電流。

Δ 臨界值設定。

在(2)之條件下，透過電流 I_{CH} 及 I_{CD} 之各種結合方式，可產生一系列之演算法。

最簡單之方式，將某一相差動電流之 2 次諧波量振幅大小做為合成諧波信號 I_{CH} ，而同相之差流信號中之基頻成分大小做為合成差動電流 I_{CD} ，則可得下式：

$$\begin{cases} I_{CH} = I_{D2 \text{ phase}} \\ I_{CD} = I_{D1 \text{ phase}} \end{cases} \quad (3)$$

另一個方式為利用差動電流之均方根值做為合成差動電流 I_{CD} ：

$$I_{CD} = I_{D \text{ RMS phase}} \quad (4)$$

當利用(3)或(4)式之信號時，必須每一相個別地檢查條件(2)式是否滿足，因此還需要另一個額外之邏輯部分，來決定只有一相、兩相或三相皆偵測到激磁湧入電流，進而決定是否須將電驛三相完全抑制。

在此種情形下，保護電驛之動作行為，可以藉由交互極化法(crosspolarization)或三相累積法，完成靈活可變之運作方式。

就經驗而言，三相諧波抑制法會較為安全[3]，三相累積抑制法，其乃定義(2)式之合成電流，為三相之適當操作量總和，分述如下：

$$I_{CH} = \sum_{A,B,C} I_{CH \text{ phase}} \quad (5)$$

及

$$I_{CD} = \sum_{A,B,C} I_{D1 \text{ phase}} \quad \text{或}$$

$$I_{CD} = \sum_{A,B,C} I_{D \text{ RMS phase}} \quad (6)$$

而且，吾人可只使用低階諧波值，來取代真實之完整均方根值，在這個方式下，此合成差動信號可定義如下：

$$I_{CD} = \sqrt{\sum_{k=1}^p I_{Dk}^2} \quad (7)$$

其中 p 乃指最高次諧波(通常在靜態過激磁之條件下，採用 5 次諧波來抑制電驛)。

依據上述用於合成諧波及差動信號之公式，(2)式之臨界值設定 Δ ，將有些許之不同，但一般來說，參數 Δ 設定於大

約 0.15 到 0.20 (15-20%)間。

無論上述合成諧波及差動信號之方法，一般而言諧波抑制法，展現了某些程度之限制，說明如下：

第一點，諧波量(通常只有 2 次諧波)之估測器需要一定之時間來精確地估測其振幅之大小，即使此諧波完全沒有出現在差動信號中，於一開始時， I_{CH} 對 I_{CD} 之比值，亦將會嚴重地過度估測(直到故障資料完全進入估測器之資料視窗中)，也就是說諧波抑制法，於大約估測器完整資料視窗長度之時間內(通常一週波之時間)，通常不會允許發出跳脫信號。

第二點，對於現代之變壓器而言，激磁湧入電流中高階諧波之總含量可能會下降至低於 10% (2 次諧波可能低到 7%，當總諧波含量低到 7.5% 之等級時[4,5])，在此種狀況下，(2)式之設定值 Δ 則應該調整到低於 7%，然而，這會造成時間延遲，甚至會在內部故障時，由於 CT 發生飽和，促使差動電流中之含有諧波成分，進而造成電驛之誤動作，交互抑制法(cross-restraint)或時間控制型之臨界值設定，亦只能解決部份之問題。

第三點，如同第 4 節所述之暫態影響，2 次諧波比值可能暫時地(幾個週波之時間)下降到低於安全設定值 20%。

3.2 波形為基礎之抑制法

基本上，有兩種此類型之激磁湧入電流抑制法[9]：

- 第一，其也是最普遍之方式，觀測監視激磁湧入電流之低且平坦值之持續時間(準則 1)。
- 第二個演算法則是監視激磁湧入電流波形峰值之正負號及其衰減率(準則 2)。

A. 準則 1

參考圖 9 所示，在每個週波中，假如差動電流信號之形狀為平坦且接近零值之波形，其出現之持續時間短於 1/4 週波，則可判定其不是激磁湧入電流，此種保護電驛原理，出現在固態式電驛(static relays)中，而且發展出一些類比技術來實現它，圖 10 展現了一相當普遍化之實現方式[6,7]。

不管其實現方法，這種直接波形抑制法有下列弱點：

- 完成內部故障電流與激磁湧入電流之辨識，須花費一週波之時間。
- 激磁湧入電流發生時，若 CT 發生飽和現象(由於電流中含有直流衰減偏移成分，因此非常可能發生)，在這段時間，CT 則會改變電流波形之形狀，進而可能造成錯誤之跳脫動作。
- 在嚴重之內部故障時，若亦 CT 飽和，則其二次側電流也可能出現低且平坦值之時段，引發電驛錯誤動作。

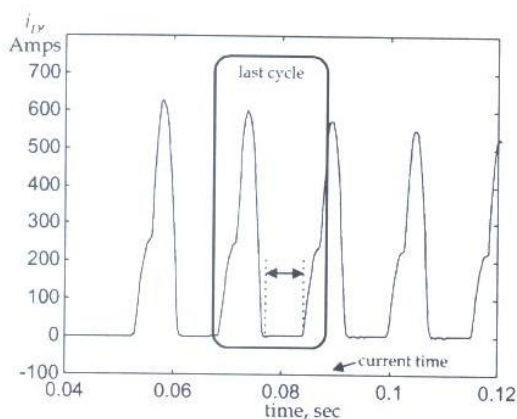


圖 9 · 激磁湧入電流之直接波形辨識法示意圖(準則 1)

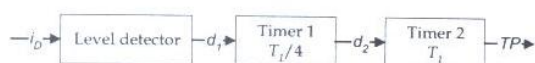


圖 10 · 激磁湧入電流直接波形辨識法(準則 1)之類比實現技術範例

B. 準則 2

若差動電流信號有下列之情況[10](見圖 11)，則吾人可將發生激磁湧入電流之狀況排除：

- 每半週波出現一個峰值。
- 任兩個連續峰值，不具備相同之正負極性。

此種方法需要強健之峰值偵測技術，考量頻率偏移之影響，檢查兩個連續峰值間之時間時，必須加入某些程度之容忍邊限。

理論上，這種方法需要 3/4 週波之時間來區別內部故障及激磁湧入電流之情況，故障電流於 1/4 週波後出現之第一個峰值，於再半週波後之時間，出現下一個峰值，在第二個峰值出現前之時間，此準則會閉鎖激磁湧入電流抑制之動作，而允許電驛跳脫。

此方法之優點為，於激磁湧入電流或內部故障發生時，其可以容忍 CT 高度飽和之情況。

而此演算法之主要缺點為，需要各相之交互極化操作，並非三相都會出現典型激磁湧入電流之單極性波形，而且，受保護之變壓器，於非常柔順之電壓投入激磁時(由於電壓投入角及剩磁通之適當關係配合，此現象可能會意外地發生)，本準則將會失效。

此準則亦可能用其間接之形式，進而將其修正為瞬間差動過電流元件(instantaneous differential overcurrent element)，吾人可定義此過電流之原理如下：

$$TRIP = |i_D| > \Delta \quad (8)$$

且須指定一臨界設定值，吾人需要將此臨界值調至非常高，以防止誤跳脫(高

於最大激磁湧入電流值)，然而，吾人亦可重新定義此動作原理如下(圖 12)：

$$TRIP = (i_D > \Delta_+) \text{ 及 } (i_D < \Delta_-) \quad (9)$$

利用兩個臨界值設定，來偵測信號屬於單極性或雙極性(如圖 12 所示)，當運用此改良後之過電流原理時，其設定值可以較小，約能調至傳統臨界設定值之 1/3，這將使得較多之內部故障，可以利用無抑制型之過電流演算法來加以快速偵測。

3.3 其它方式

A. 模型(model)法

這類型之方法乃採用線上求解無故障時變壓器之數學模型，其可能是利用量測訊號來計算變壓器模型之某些參數，或利用所有端點之信號，計算其某些端點變數之量，而後再與相對應之實際量測值比較，在前述第一個方式中，計算所得之參數值，可以用於區別出內部故障或是其它之干擾(包含激磁湧入電流之情況)所造成，而第二個方式，運用計算與量測信號之差別，來啟動電驛執行判別之工作，這些方式需要量測所有端點之電壓及電流信號。

B. 差動功率法 (Differential power method)

另一變壓器保護電驛之原理，乃利用差動實功率，來鑑別內部故障或其它狀況(包含激磁湧入電流)，此方法藉由計算並監視其差動功率，來取代傳統之差動電流法[13]，本法利用變壓器端點之瞬間功率差做為電驛之動作信號，本方法需要量測所有端點之電壓，但可避開不同繞組之電流與電壓角度差及比例補償，此方法之可

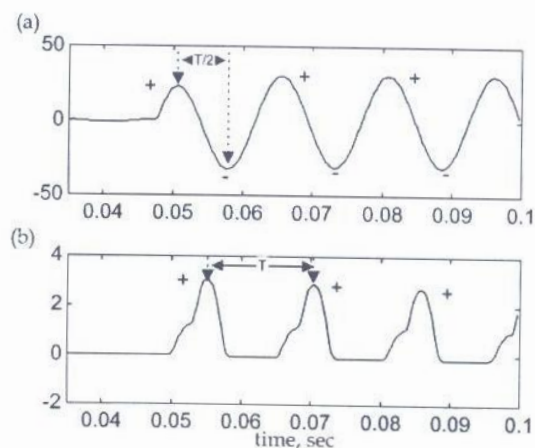


圖 11 · 準則 2 之示意圖。(a)內部故障電流；(b)激磁湧入電流

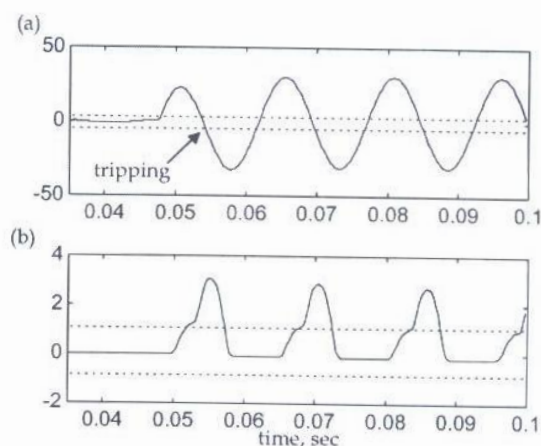


圖 12 · 具雙重臨界值設定之過電流原理示意圖。(a)內部故障電流；(b)激磁湧入電流

靠度可以藉由補償其內部實功率之損失，包括銅損及鐵損，來進一步加以增強。

C. 以磁通為基礎之激磁湧入電流抑制法

這種保護電驛演算法，利用線上計算鐵心之磁通，來加以區別激磁湧入電流、過激磁及內部故障之狀況[14,15]，此方法之優點為，其將產生問題之原因(鐵心飽和為造成電流不平衡之原因)與用於鑑別之現象(鐵心中之磁通)相互連結在一起。

4. 新型演算法

本文所提出之演算法，主要著重於處理在激磁湧入電流之情形下，2 次諧波可能暫時地低於 15% 到 20% 現象。

造成此種狀況之原因，乃由於巨大之激磁湧入電流值，促使用於分析圖 3 之方程式(1)之角度大於 90 度，由圖 4 可知，其可能造成 2 次諧波之量低於 20%。

圖 13 所示為，於時域下之激磁電流範例(a)及 2 次諧波比值(b)響應之描繪，其諧波計算乃利用全週型傅立葉(Fourier)演算法，而取樣頻率為每週 64 點(64 s/c)，在此範例中，2 次諧波比低於 20% 之時間，超過 5 個週波，也因此會造成錯誤之電驛跳脫或迫使使用者必須將臨界值設定調在低於 5%，但這卻會危及電驛之速度及靈敏度。

隨著時間變化，此電流將會越來越近似傳統之激磁湧入電流波形((1)式中之角度參數 α 減小)，而其 2 次諧波比值也會漸漸地增加至安全設定值 20%。

4.1 演算法推導

傳統之 2 次諧波抑制法，乃比較 2 階諧波與基頻成份之大小比值(或者於 3.1 節所說明之各種延伸變形)，利用此種傳統之方式，吾人忽略了另一比值關係(相位比)。

明顯地，2 階諧波之旋轉速度為基頻相量之 2 倍，然而，此困難可以輕易地克服。

因此，有些人可能會提出以下問題：除了單純大小之比值外，激磁電流之 2 階諧波對基頻相量之角度關係，可以對激磁湧入電流及內部故障電流，提供較佳之辨識能力嗎？

為了尋求此問題之解答，吾人定義

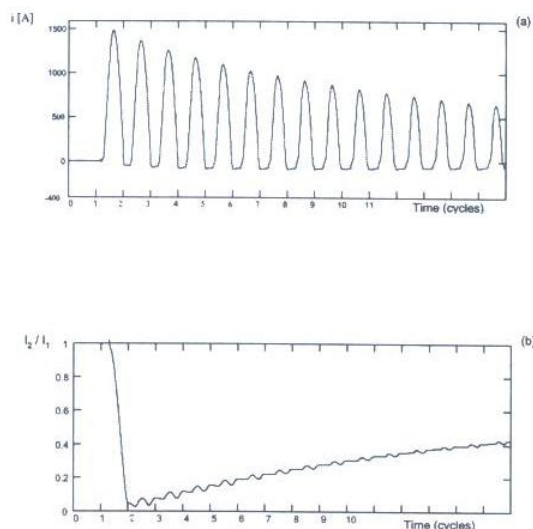


圖 13 · (a)激磁湧入電流範例
(b)其二次諧波比

下述之決策鑑別信號：

$$I_{21} = \frac{I_2}{I_1 \cdot e^{j\theta}} = \frac{I_2}{I_1} \left(\arg(I_2) - 2 \cdot \arg(I_1) \right) \quad (10)$$

其中

I_2 旋轉速度為 2ω 之 2 階諧波相量
(ω 為系統角頻率)

I_1 旋轉速度為 ω 之基頻相量

於上述(10)式中，乃計算出 2 階諧波相位對基頻相量相位(須乘上兩倍)之角度差，於穩態時，複數量 I_{21} 之大小及角度均會維持固定值。

傳統之 2 次諧波抑制法，只利用 I_{21} 之大小，但忽略其相位角之部分。

4.2 性能評估

A. 分析性評估

為了評估 I_{21} 之辨識能力，吾人採用圖 3 所示之理想化激磁湧入電流模型，推導出 2 階諧波及基頻相量之大小比值及相角差關係(其類似於方程式 1)，所得之結論為其角度差值會非常接近 90 度或 -90 度。

將衰減直流偏移成份之時間常數，做大範圍之不同變動，吾人重複地做此波形模型之計算，再次獲得儘管大小之比值降低至 20% 以下，但 2 階諧波及基頻相量之相角差值，依舊非常接近 90 度。

為了說明此現象，圖 14 展示了 I_{21} 之軌跡(一連串之點乃由於資料視窗隨著圖 13 之電流波形滑動變化所形成)，吾人確實可觀察到，儘管 2 次諧波比值降到幾乎零，其軌跡依舊沿著 -90 度之線路前進。

值得注意的是，在於此 I_{21} 之複數平面上，傳統之 2 次諧波操作區間是一個半徑為 0.15 到 0.20 之圓，因此傳統之電驛，於此情形下，將會產生錯誤之跳脫動作。

B. 統計性評估

本演算法已經由數值模擬及實際變壓器所量測記錄等大量波形資料做過測試。

經由以下各種考量狀況，可確保測試資料之多樣性：

- 考量了 Y- Δ 接及 Y-Y 接法之變壓器。
- 無論從 Y 接側或由 Δ 接側施加激勵電源，皆做過測試。
- 內部故障之情況。
- 考量了各種發生激磁湧入電流之因素(包括弱小或強大之激勵電源系統、隨機之殘餘磁通值及隨機之激勵電源投入角度…等)。

經由上述之測試分析，證明了本新型演算法可增進傳統 2 次諧波抑制法之激磁湧入電流鑑別能力。

為了說明其效能，圖 15 展示了在各種激磁湧入電流之狀態下(由 Y 接側及由 Δ 接側施加激勵電源)，本文所提新型決

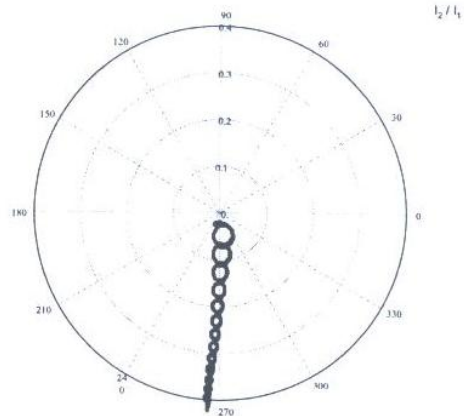


圖 14 · 相對於圖 13 之激磁湧入電流，新型決策信號量之軌跡圖

策信號之響應統計圖，如同此圖所示，此複數 2 次諧波比之數值，集中分佈於 ± 90 度之線上。

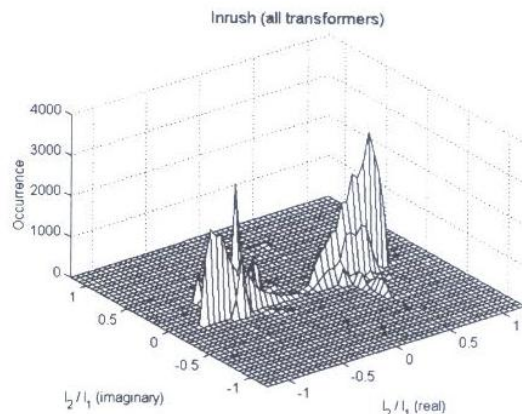


圖 15 · 大量激磁湧入電流波形(各種型式接法之變壓器)之決策量 I_{21} 之統計圖

為了方便做比較，圖 16 及 17 分別展示了 Y-Y 接及 Δ -Y 接之變壓器，於內部故障時之 2 次諧波複數比值統計圖，本新型抑制量收斂於原點，偏離原點之數值乃因暫態之原因所造成，且其呈現相當均勻之分佈。因此對於內於故障(圖 16 及 17)和激磁湧入電流(圖 15)之響應圖形，

存在一相當大之重疊區域，此特性確保本新型演算法具備強健之辨識能力。

4.3 動作及抑制區間

考量上述之各種情形，本新型決策量 I_{21} 之動作區間，可繪製如圖 18 所示。

動作及抑制區間乃由下述各點來加以決定：

- 在角度接近 0 度與 180 度之處，動作區間將於 $\pm 20\%$ 間做伸展(傳統之 2 次諧波抑制法)。
- 當角度接近 ± 90 之附近時，動作區間由兩個類似眼睛之形狀所削減，其乃用於確保低 2 階諧波值時，可將電驛之功能閉鎖。
- 此兩個類似眼睛之動作區間削減區，並非是靜止不動的，其被設計成時間之函數，如圖 18 所示，一開始時，這兩個動作區間削減區，會非常深入動作之區間，但於幾個週波後，此削減動作將會消失，而只保留傳統圓形之動作區間特性(如圖 19 所示)。

由於利用此動態抑制特性，對於此複數型之 2 次諧波比值，吾人可獲得一隨時間變動之動作特性，需要用於將電驛 unblock 之時間(例如：激磁湧入電流抑制功能移除後之時間)為 I_{21} 函數，若其操作特性不隨時間而變，則靜態之 $t-I_{21}$ 之關係，可以繪製如圖 20 所示，上述所得之特性具備下列特殊之特色：

- 當 I_{21} 之角度接近 0 度或 180 度時，無論 2 次諧波比之大小值為何，激磁湧入電流之抑制功能將被立即移除。
- 當 I_{21} 之角度接近 ± 90 度時，在激磁湧入電流之抑制功能被移除前之時間，則須依據 2 次諧波量而定，對於低 2 次諧波比時，其時間延遲非常小，當

比值接近 20% 時，則須將時間延遲提升至 5 到 6 週波，如此可於激磁湧入電流產生時，由於 2 次諧波比值降至低於 20%，防止電驛誤動作之發生。

4.4 實現製作

本文所提出之新型演算法已經利用泛用型電驛(universal relay)之觀念來加以實現，其為模組化、可變更大小及可輕易升級之保護電驛技術[16]，圖 21 展示了此保護電驛之基本硬體模組，而圖 22 則為其實際之硬體。

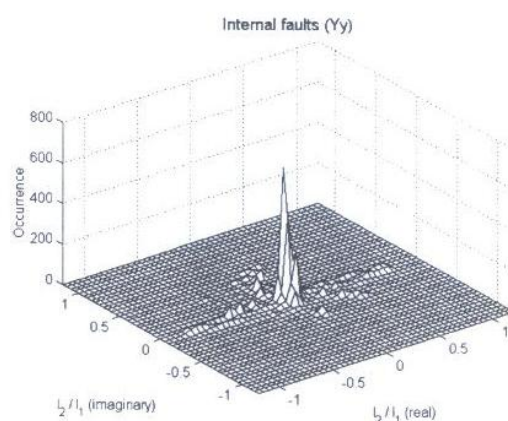


圖 16 · 大量內部故障波形(Y-Y 接之變壓器)之決策量 I_{21} 之統計圖

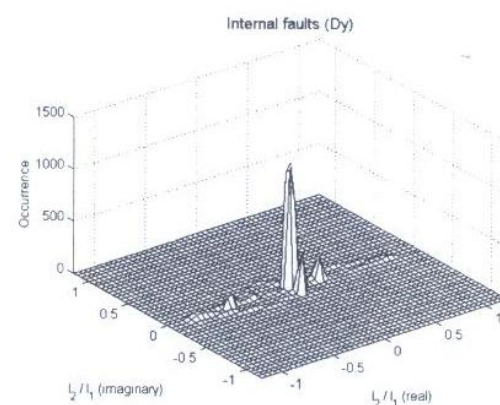


圖 17 · 大量內部故障波形(Δ -Y 接之變壓器)之決策量 I_{21} 之統計圖

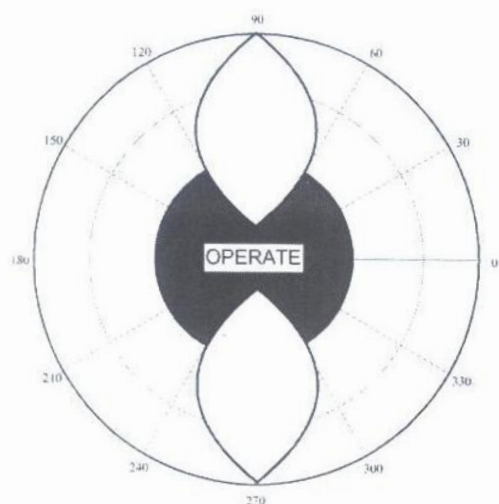


圖 18 · 本新型決策信號之動作區間

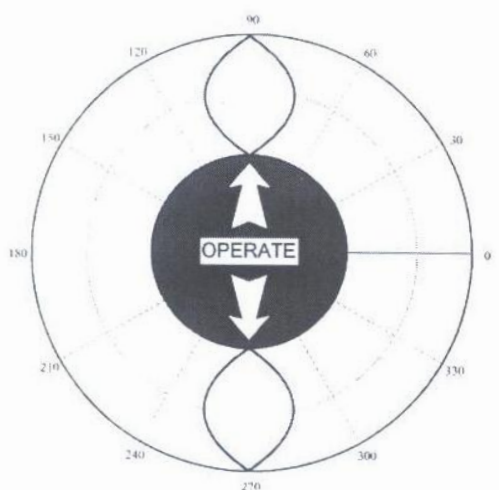


圖 19 · 本新型決策信號之動作區間動態擴展延伸圖

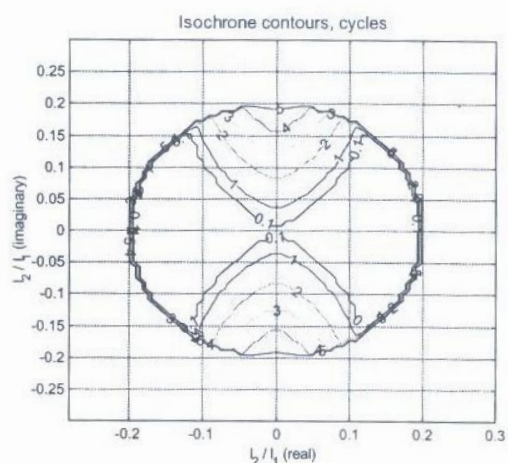
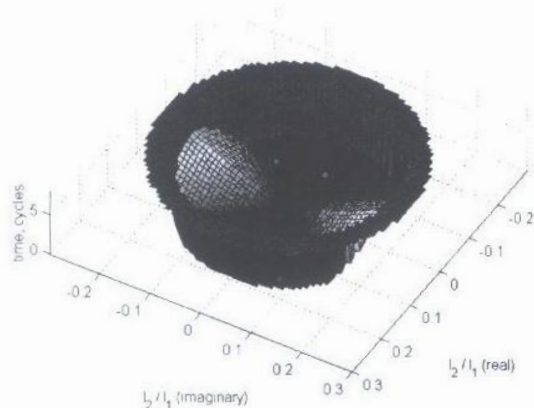
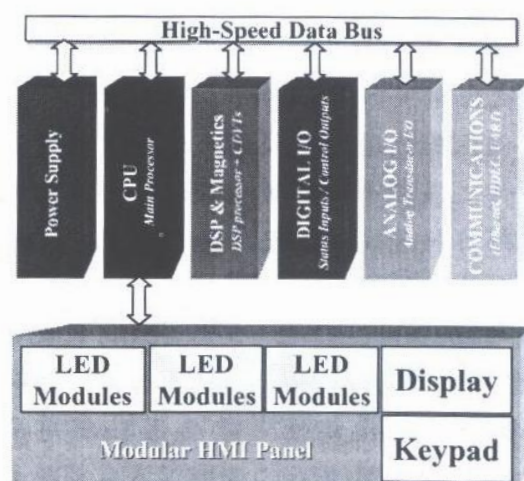
圖 20 · 複數型 2 次諧波抑制法之有效動作特性(t-I₂₁)圖
(3 維立體圖及同時性的輪廓線)

圖 21 · 模組化之硬體架構

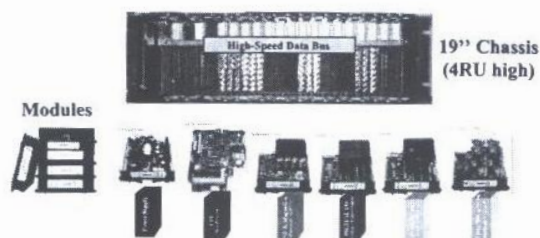


圖 22 · 實際保護電驛架構

4.5 測試

本文所提出之演算法已經利用即時數位模擬器(Real Time Digital Simulator, RTDS [17], 圖 23)來加以測試, 包含了模擬及實際量測記錄之波形。

測試結果證明本新型演算法具備非常優越之性能。

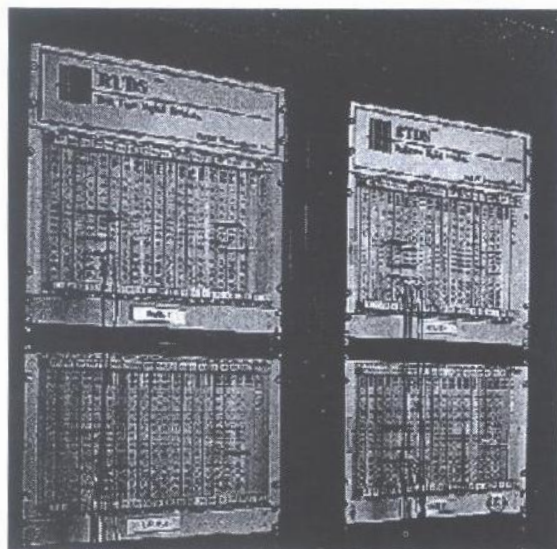


圖 23 · 用於演算法測試之即時數位模擬器(RTDS)硬體

5. 結論

本文提出一種用於變壓器保護之新型激磁湧入電流抑制演算法, 此演算法為傳統二次諧波抑制法之延伸發展, 傳統方法只單純地量測差動電流, 並計算其二次諧波與基頻成份之大小比值, 但本演算法所考量的是差動電流之二次諧波與基頻成份之相量比值, 亦即同時考慮此複數相量比值之大小及相位關係。

同時, 本文一併提出適當的電驛操作區間, 來輔助新型決策信號之判定, 為了使得於內部故障時有最佳之性能, 其操作區間乃採動態決定之方式。

本新型演算法已由泛用型電驛平台(universal relay platform)來加以實現。

大量之測試結果證明本演算法, 於激磁湧入電流之情況下, 可增強電驛之穩定性, 使其不致發生誤跳脫, 再此同時更可確保維持內部故障時, 電驛之響應性能。

6. 參考文獻

1. Kasztenny B. and Kezunovic M.: "Improved Power Transformer Protection Using Numerical Relays", *IEEE Computer Applications in Power*, Vol.11, No.4, October 1998, pp.39-45.
2. *IEEE Guides and Standards for Protective Relaying Systems*, IEEE Publication, 1991.
3. Horowitz S.H. and Phadke A.G.: *Power system relaying*, Wiley & Sons, New York, 1992.
4. Blume L.F.: *Transformer engineering*, Wiley & Sons, New York 1951.
5. Karsai K., Kerenyi D. and Kiss L.: *Large power transformers*, Elsevier, New York, 1987.
6. Elmore W.A.: *Protective relaying. Theory and Applications*, Marcel Dekker, New York, 1994.
7. Giulianti T. and Clough G.: "Advances In The Design Of Differential Protection For Power Transformers", *Texas A&M University Conference for Protective Relay Engineers*, College Station, Texas, April 5, 1995.
8. IEEE Tutorial Course: *Advancements in microprocessor based protection and communication*, IEEE Catalog No. 97TP120-0, 1997.
9. Kasztenny B., Rosolowski E., Saha M.M. and Hillstrom B.: "A Comparative Analysis Of Protection Principles For Multi-Criteria

- Power Transformer Relaying”, *Proceedings of the 12th Power Systems Computation Conference*, Dresden, Germany, August 19-23, 1996, pp.107-113.
10. Habib M. and Marin M.A.: “A Comparative Analysis Of Digital Relaying Algorithms For The Differential Protection Of Three Phase Transformers”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.3, No.3, August 1988, pp.1378-1384.
 11. Inagaki K., Higaki M., Matsui Y., Kurita K., Suzuki M., Yoshida K. and Maeda T.: “Digital Protection Method For Power Transformers Based On An Equivalent Circuit Composed Of Inverse Inductance”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.3, No.4, October 1988, pp.1501-8.
 12. Sidu T.S., Sachdev M.S. and Wood H.C.: “Detecting Transformer Winding Faults Using Non-Linear Models Of Transformers”, *Proceedings of the 4th International Conference Developments in Power System Protection*, IEE Publication No.302, 1989, pp.70-74.
 13. Yabe K.: “Power Differential Method For Discrimination Between Fault And Magnetizing Inrush Current In Transformers”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.12, No.3, July 1997, pp.1109-1118.
 14. Thorp J.S. and Phadke A.G.: “A New Computer Based Flux Restrained Current Differential Relay For Power Transformer Protection”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol.PAS-102, No.11, November 1983, pp.3624-3629.
 15. Sachdev M.S., Sidhu T.S. and Wood H.C.: “A Digital Relaying Algorithm For Detecting Transformer Winding Faults”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.4, No.3, July 1989, pp.1638-1648.
 16. Pozzuoli M.P.: “Meeting The Challenges Of The New Millennium: The Universal Re-

lay”, *Texas A&M University Conference for Protective Relay Engineers*, College Station, Texas, April 5-8, 1999.

17. *Real Time Digital Simulator (RTDS). Reference Manual*. Manitoba HVDS Research Center, 1999.

7. 本文係由 GE 公司免費提供本協會刊載，以饗本會會員。

8. 作者簡介

Ara Kulidjian 於 1991 年畢業於加拿大多倫多大學電機工程系，而後加入奇異公司之電力部門 (GE Power Management)，從事於保護與控制系統之系統及演算法之設計，在安大略州 (Province of Ontario)，其為一名已註冊登記之專業工程師，同時其為國際電子及電機工程學會 (International Electronic and Electrical Engineering, IEEE) 中信號處理協會之會員。

Bogdan Kasztenny 分別於 1989 年及 1992 年，在波蘭之 Wroclaw University of Technology (WUT) 取得碩士及博士學位，同時兩者均獲得獎項 (honor)，在 1989 年，其加入 WUT 之電機工程學系，於 1994 年時，其為 Carbondale 南伊利諾大學 (Southern Illinois University) 之訪問助理教授，而 1994 年至 1997 年，其於艾波比公司從事變壓器及串聯補償線路保護之研究，在 1997/1998 年，Kasztenny 博士於德州農工大學 (Texas A&M University) 做資深會士 (fellow)，而後直到 1999 年時，成為訪問助理教授，現在其工作於奇異公司 (General Electric Company)，職位為資深應用及創新發明工程師，同時 Kasztenny 博士為國際電子及電機工程學會之資深會員，其擁有兩項專利，同時已發表超過 90 篇之技術論文。

