

保護協調及比流器飽和對保護設備之影響

電機技師 蔡奇生

前言

電力系統發生故障時，為了使故障造成的損害最低，停電範圍最小，保護設備之間必須取得協調方可。電驛保護設備系統則由三個部份組成：比流器負責將實際故障電流訊號轉換為電驛用的小訊號；電驛則是決策單位，判斷是否跳脫；最後則由斷路器執行切斷電源。在暫態狀況下，故障電流中可能有直流成份存在，使得比流器的鐵心可能會更快達到飽和，由於鐵心的飽和特性，致使二次側輸出波形失真。輸出波形的失真時，電驛所得到的訊號將會比原先正確訊號小，如此將會延長電驛的動作時間的，導致保護設備的不協調或是誤動作。本文主要利用電磁暫態模擬程式(Electromagnetic Transients Program, EMTP)所提供之功能、元件模擬比流器之暫態現象，分析其對電力系統保護設備之影響。

比流器模組之建立

EMTP 提供單相變壓器鐵心飽和的模組，這模組是由一個等效電路圍繞一個理想變壓器所組成，如圖 1(a)。磁化支路是用來描述非線性電感的 $\lambda-i$ 特性，通常 $\lambda-i$ 特性無法直接獲得，需利用 EMTP 之輔助方程式轉換 V-I 特性成等效的 $\lambda-i$ 。圖 1(b)則是加入 Type-98 非線性電感器，圖 1(a)和圖 1(b)基本上是相同的，其模擬結果也相同。Type-98 雖然可以表示鐵心的飽和特性，但是並不包括變壓器鐵心磁滯

現象的影響。為了要明確表示磁滯現象的效應，則須以圖 5-4(c)的 Type-96 非線性元件，精確表示鐵心的磁滯效應。根據 M.Kezunovic[1]等針對圖 1 三個等效電路和實際的測量結果相比較，圖-4(c)可以得到較小的誤差。

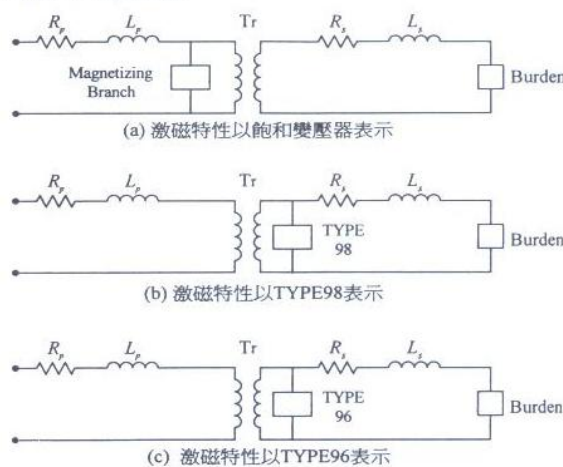


圖 1 · EMTP 之 CT 等效電路

圖 2 為 EMTP 模擬實際 CT 等效電路，圖中 R_p 和 L_p 為電力系統故障時等效阻抗， Z_{LP} 、 Z_{LS} 則是 EMTP 在建立變壓器模組時須輸入的一、二次側繞組阻抗值， Z_{LP} 其值可以為零，而實際 CT 二次側繞組的阻抗值則小於 0.5 歐姆，而且模擬結果顯示 Z_{LS} 在 0~0.5Ω之間結果相同。 R_s 和 L_s 則是 CT 二次側至電驛之線路阻抗， Z_b 則是電驛負載。

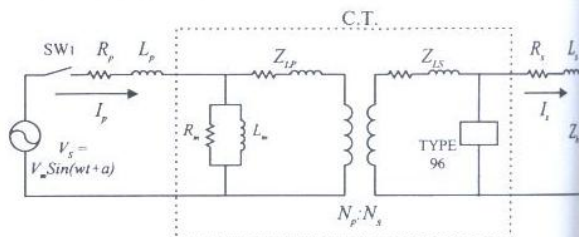


圖 2 · EMTP 模擬之 CT 等效電路

利用 EMTP 之輔助方程式 SATURA 把 V-I 曲線轉換成 $\lambda-i$ 資料集，圖 3 為 C100 600/5 的比流器 V-I 特性曲線，圖 4 則是式轉換後之 $\lambda-i$ 的曲線。根據 $\lambda-i$ 資料集，再利用 HYSDAT 方程式產生磁滯曲線圖 5。由 HYSDAT 轉換所得的資料，即可建立 Type-96 元件[2]。在點取 V-I 時，應盡可能使點與點之間的斜率變化減小，也就是兩點之間距離能夠減小，以避免 EMTP $\lambda-i$ 轉換的資料產生相當高的斜率變化，造成 CT 暫態行為的誤差。

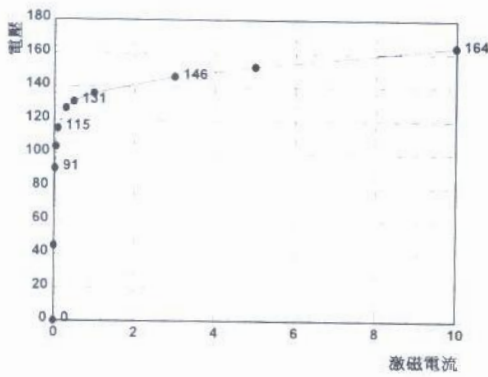


圖 3 - CT 600/5 V-I 特性曲線

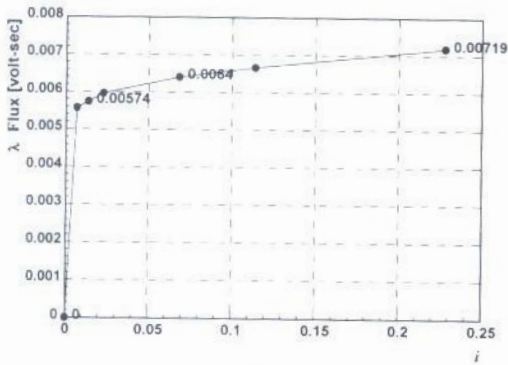


圖 4 - $\lambda-i$ 轉換特性曲線

比流器動作現象之模擬

CT 的飽和特性受到故障電流大小、直流成份、二次側負載及鐵心上剩磁等之影響。本節利用 EMTP 比流器等效模組，實際模擬在不同狀況下，CT 之暫態現象，以確立圖 2 中 CT 等效模組的正確性。表

5-1 為測試資料。

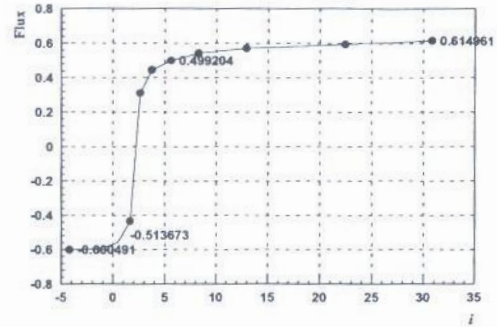


圖 5 - HYSDAT 轉換之磁滯曲線

測試 1：主要驗證圖 2 中 CT 模組的正確性。圖 6 為 M.Kezunovic 等所發表 1993 年 IEEE 報告中之電流波形。圖 7 為模擬波形，比較圖 6 與 7，圖 7 應可以相當明確表示 CT 包括磁滯現象之暫態現象。

表 5-1 - CT 測試資料

測試	CT	故障電流 (A)	二次負載(Ω)	剩磁 (Volt-sec)
1	2000/5	7670	8	2.4
2	600/5	9000	0.5+j0.866	0
3	100/5	1500	j1	0
			0.5+j0.866	
			1	
4	2000/5	30000	0.5+j0.866	6.286
				0
				-5.029

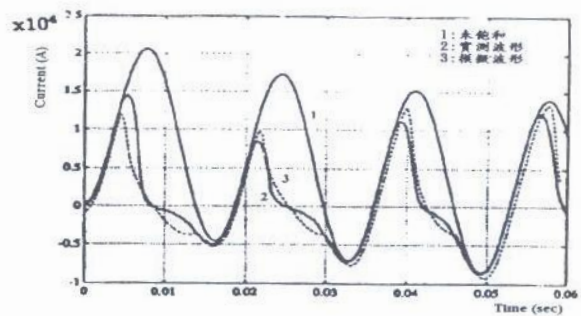


圖 6 - M. Kezunovic 之 CT 模擬與測試測試結果 [1]

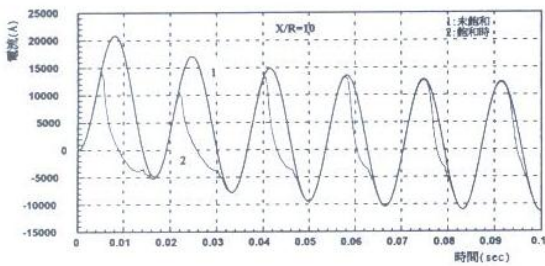


圖 7 · CT 模組驗證之測試結果

測試 2 :

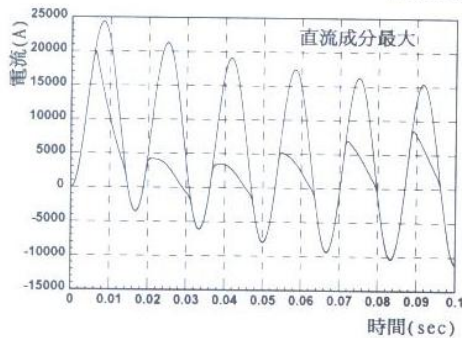
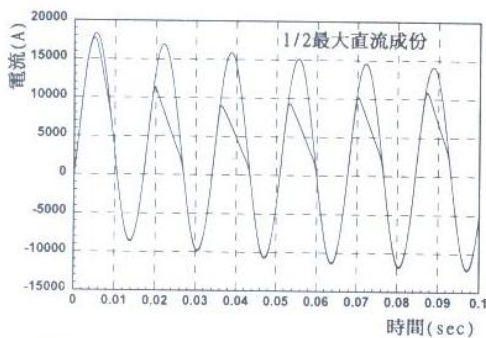


圖 8 · 直流成份對 CT 飽和之影響

測試 3 :

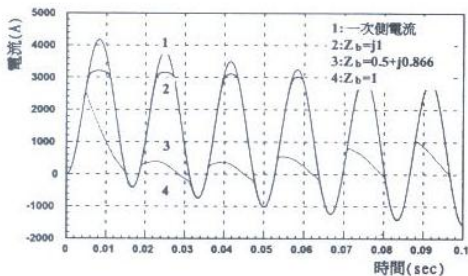


圖 9 · 負載種類不同之測試結果

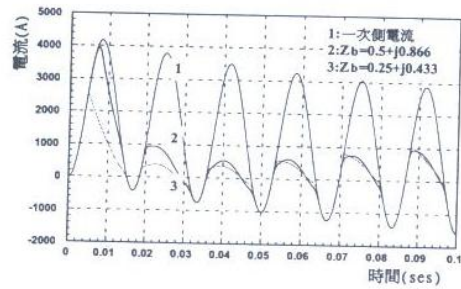


圖 10 · 負載大小不同之測試結果

測試 4: CT 鐵心上的剩磁會加速或減慢 CT 的飽和發生，當剩磁與故障電流方向相同，則會加速飽和

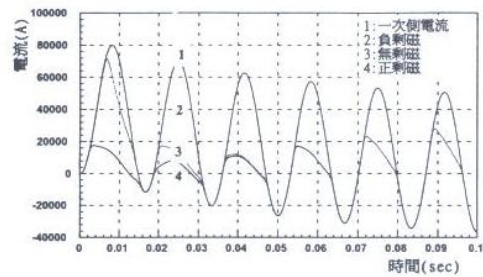


圖 11 · 剩磁對 CT 之影響

由上面四個測試所得結果顯示本文所建之 CT 模組，用以模擬 CT 暫態現象反應直流成份、剩磁及二次側負載對 CT 飽和速度的影響。因此圖 2 應可作為 CT 之等效模組。

保護協調

當電力系統上有兩個或兩個以上的過電流保護設備互為串聯時，當系統發生故障，其異常故障電流將由電源測流向故障點，則最靠近故障點的保護設備應迅速動作將故障部份自系統上隔離，此稱為主保護(Primary Protection)，如果主保護設備失靈未動作，則比其接近電源端(Up-Stream)的保護裝置必須動作，此稱為後衛保護(Backup Protection)。

保護協調時間間隔

主保護與後衛保護的時間-特性曲線必須保持若干間隔，此時間間隔的大小隨著保護設備的不同而有不同的考量，茲將各種過電流保護設備協調時的時間間隔(Coordination Time Interval, CTI)分述如下：

(一)過電流電驛間的協調：

對反時性過電流電驛(Inverse Time Overcurrent Relay)而言，其協調時間間隔通常為 0.2~0.5 秒[2]，包括

1. 主保護斷路器啟斷時間(5 週波) 0.08 秒
2. 後衛保護電驛慣性轉動時間 0.1 秒
3. 安全係數(CT 的誤差、故障電流的誤差) 0.22 秒

一般設定 CTI 為 0.3 秒，然而其間隔會因使用不同形式的電驛而有所不同，譬如若採用數位式電驛時則慣性轉動時間的考量可予以忽略。

(二)過電流電驛與熔絲之協調：

若主保護為電驛，後衛保護為熔絲，則熔絲必須考慮其最小熔斷時間，其 CTI 通常為 0.3 秒。反之，熔絲為主保護，電驛為後衛保護，則必須考慮其全部清除時間，CTI 亦為 0.3 秒，但若熔絲總清除時間在一秒以下者，CTI 可降至 0.1 秒。

(三)熔絲間的協調：

其原則為主保護熔絲之最大清除時間不能超過後衛保護熔絲最小熔斷時間的 75%，使得在主保護設備清除故障前，後衛保護能承受故障電流而不會受損。

輸配電線路之過電流保護

輸配電線路的架構可以區分為輻射式(Radial Circuits)與環狀式迴路(Loop

Circuits)兩種。對於輻射式線路保護設備間的保護協調設定較為簡易，然而若輸電線路為環狀式時，此時必須考慮線路上的電源為單一電源或為多電源，其保護協調亦較為困難。

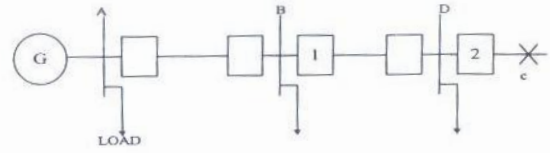


圖 12 · 典型輻射式系統單線圖

圖 12 為典型的輻射式饋線單線圖，若故障發生在 c 附近時，電驛 2 應先動作，電驛 1 跳脫時間則應延遲一個 CTI，如此電驛 1 和電驛 2 即可協調。

圖 13 為單一電源之環狀式系統單線圖，當匯流排 G 發生故障時，故障電流不會流經電驛 1 和 10，所以電驛 1 和 10 可以使用非方向性過電流電驛、電驛 2~電驛 9 則由於故障電流方向不同而必須使用方向性過電流電驛，假如圖 13 中每一個匯流排都有另外電源流入，此時電驛 1 和 10 則必須使用方向性過電流電驛。

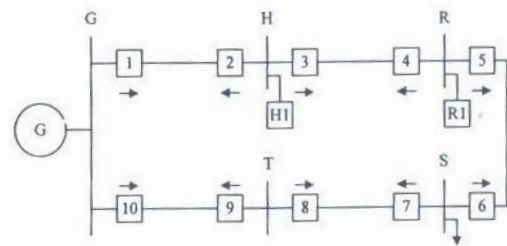


圖 13 · 典型環路式系統單線圖

圖中箭頭方向相同的電驛之間必須互相協調。如順時鐘方向，電驛 1 必須和 3 協調、3 和 5、5 和 7、7 和 9，而 9 又必須和 1 協調。同理，逆時鐘方向時，電驛 10 和 8、8 和 6、4 和 2，2 又必須和 10 協調，此外每一個電驛還必須和其它線路連接的

遠端匯流排的過電流電驛協調。

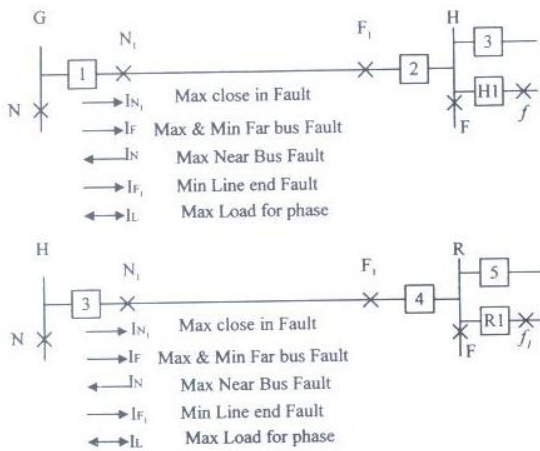


圖 14 · 環狀式過電流電驛之設定

對於單電源環狀式系統之過電流保護設備的設定，可將系統視為兩個輻射式線路所組成，即順時鐘方向和反時鐘方向兩線路。先行設定某方向之保護電驛使之能夠協調，如圖 14 所示。首先設定順時鐘方向電驛 1，若故障發生在 f 時，電驛 H1 動作時間為 t_1 ，則電驛 1 動作時間須為 t_1 加一個 CTI，電驛 H1 和電驛 1 方可協調；接著設定電驛 3，如果電驛 R1 動作時間為 t_2 ，為了能夠協調，電驛 3 的動作時間為 t_2 加一個 CTI；此時，由於電驛 1 為電驛 3 之後衛保護，因此電驛 1、3 之間要協調，其時間差為 CTI，所以要再重新設定電驛 1，使其與電驛 3 能過協調。如此步驟直到電驛間能夠取得協調[3]。

同理適用於反時鐘方向之電驛設定，首先設定電驛 10，再設定電驛 8 如此依序設定。

比流器飽和對保護設備之影響

CT 飽和可能造成電驛的誤動作，通常電驛誤動作的型式可以歸納為三類：1. 誤判有故障存在，2. 未能偵測故障，3. 偵測

到故障，卻無法快速反應動作[4]。若系統沒有後衛保護設備或預警裝置，當電驛發生誤動作時，將會造成嚴重後果。

CT 飽和對差動保護系統之影響

圖 15 為變壓器之差動電驛保護接線圖，變壓器在正常工作狀態時，負載電流及差動電流的變動比例不變，所以動作線圈不會動作。當故障發生時，變壓器兩側電流之差增大，使得流經動作線圈之差動電流增大，差動比例上升，進而差動電驛產生動作。

若發生 CT 飽和，可能會造成差動保護設備於外部故障時的誤動作。外部故障時，假如 CT 可以正確反應一次側電流，則流經動作線圈之差動電流應該很小，使得電驛不動作。然而，由於一、二次側 CT 的不同，其 CT 飽和程度不一，結果二次側電流波形將會失真，造成足夠大的差動電流流經動作線圈，迫使電驛誤動作[5]。

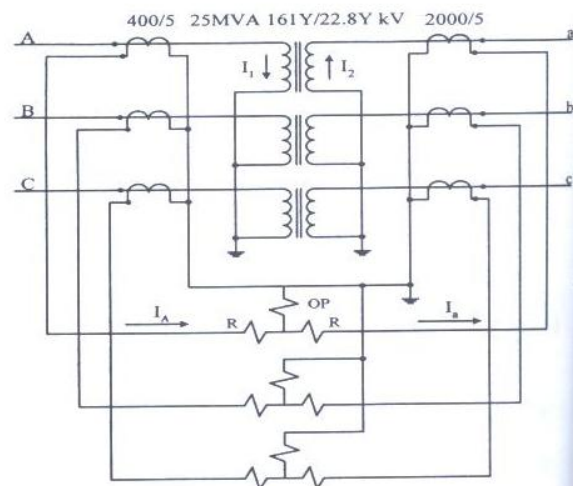


圖 15 · 變壓器差動保護接線圖

本文以圖 15 為模擬實例，圖中變壓器規格為 25MVA、161/22.8kV，一次側 CT 選用匝比 400/5，二次側則為 2000/5，差動比率 50%，經由適當的設計其電驛分接

頭選用 3.5/5.0，此時差動電驛動作電流百分誤差率(m)為 0.5%。假設低壓側外部發生三相短路故障，其故障電流值為 20kA，X/R 比值為 20，CT 二次側負載 1 歐姆，CT 二次側電流波形如圖 16 所示，圖 17 為其差動比率變化。

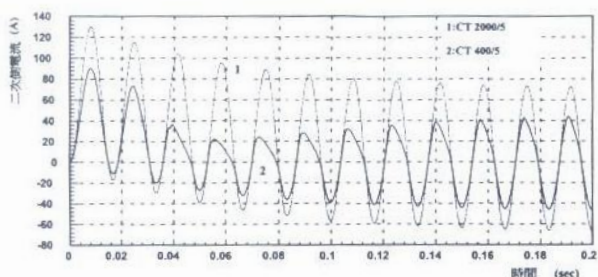


圖 16 · 圖 15 · 之 a 相 CT 電流波形

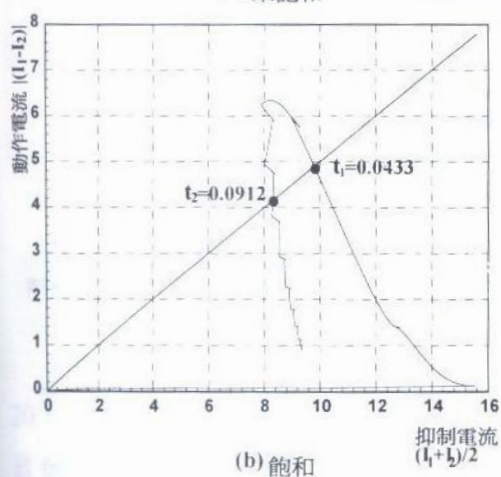
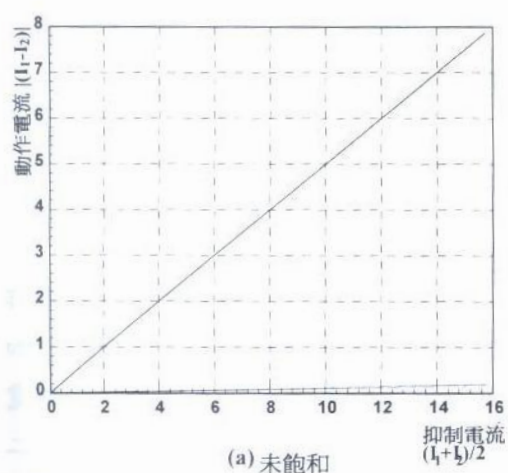


圖 17 · 比率差動電驛動作特性曲線

若 CT 為理想狀況，則差動比率變化

如圖 17(a)，此時差動電驛不會動作。然而實際狀況 CT 400/5 會發生比較嚴重的飽和，造成差動比率上升超過 50% 的設定值，其時間約為 0.0479 秒，即為三個週期。也就是說，發生外部故障時，如果過電流保護設備未及跳脫，而且故障狀況足以使得差動比例超過設定值時，則差動電驛可能會誤動作，造成變壓器下游供電中斷。

同理，由於饋線上電流大小的差異和經濟因素的考量，使得匯流排差動保護系統所使用的 CT 精確度和匝比會有差異，如圖 18 所示。其意謂著當負載側發生故障時，兩個 CT 的飽和程度有可能不同，而造成類似變壓器差動保護時電驛的誤動作。

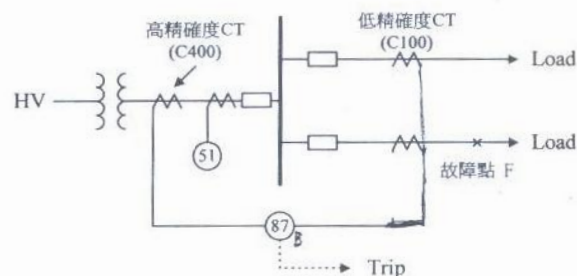


圖 18 · 匯流排比率差動保護

CT 飽和對接地保護系統之影響

接地過電流電驛係連接於三具 Y 接 CT 二次側中性線部份。當發生接地故障，電驛中流過零相序電流時始能動作。在正常情況或相間短路故障情況下，CT 未發生飽和時，都沒有零相序電流通過該電驛，所以其電流標置可以比相電驛低得多，此一特性使其在接地故障情況下，發揮更靈敏的保護。然而，由於故障時各相故障電流不同，CT 二次側負載不同及 CT 本身特性上的差異，如剩磁不同等，使得各相 CT 飽和程度將會不同，則在三相短

路故障時，有可能會造成接地電驛的誤動作。

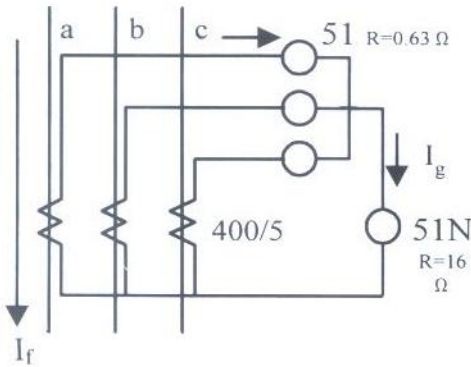


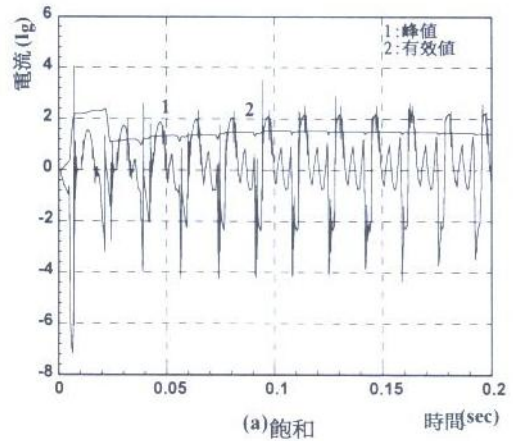
圖 19 · 接地電驛保護接線圖

圖 19 為一般接地故障保護設備圖，本文以 400/5 CT 為例，若故障電流為 8000 安培，且假設故障發生在 a 相電流為最大時，而 a 相 CT 鐵心上剩磁最大、b 相為零、c 相則是負值最大。模擬結果如圖 6-6 所示，由圖 20(a)可知當 CT 發生飽和時，會有 1 至 2 安培有效值電流流經接地保護電驛，而與圖 20(b)CT 未發生飽和時，幾乎沒有電流流經接地電驛，有明顯的差異。若此時接地電驛設定低於 2 安培，則接地電驛有可能在三相短路故障時，產生誤動作。

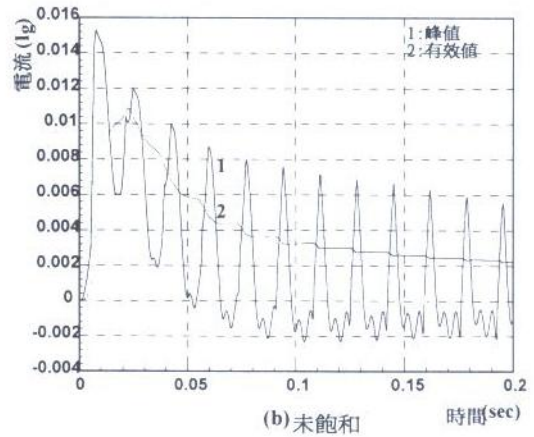
CT 飽和對反時性過電流設備之影響

CT 飽和可能會造成過電流保護設備之間的不協調。感應式電驛其轉盤轉矩力為 $\tau = k \cdot I^2 - k$ ，如果故障電流中有直流成份存在，則失真的流經電驛之動作電流所產生的淨轉矩為各諧波成份產生的轉矩之總和， $\tau = \sum(k_n I_n^2) - k$ 。由於 CT 飽和使得二次電流失真，造成有效值下降，如此轉則是電驛在 CT 嚴重飽和與未接 CT 時，其電驛動作特性比較，由圖可以了解 CT 飽和所造成的影響[6]。

瞬跳設備，其跳脫磁動力正比於電流



(a)飽和



(b)未飽和

圖 20 · 接地電流波形

與磁通密度： $F \propto I \times B$ 。瞬跳設備基本動作原理，當電流超過設定值即立刻跳脫。如果瞬跳設備的設定值大於失真的二次測電流，則瞬跳設備將不會動作，直到 CT 二次側電流大於其設定值，始能跳脫。

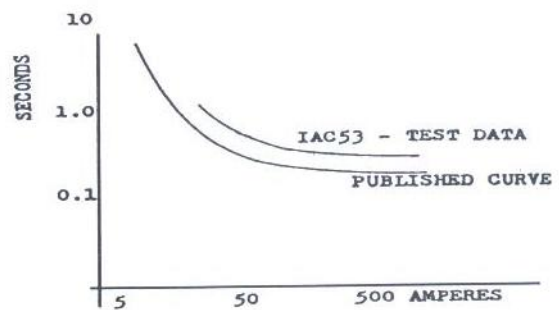


圖 21 · CT 飽和與未接 CT 時之電驛動作特性曲線比較圖

CT 發生飽和時，可能會造成保護設備之間無法協調。假設圖 22 中饋線 35 發生短路故障，電驛 A 應該跳脫，饋線 34 仍能正常供電給下游負載。如果電驛 A 和 B 之間的協調時間間隔不過長，而 A 之 CT 在故障時發生嚴重飽和，使得電驛 A 動作時間延遲，若延遲得太久，則電驛 B 勢必會跳脫，如此變壓器下游將無法正常供電，造成停電面積的擴大。

假設某系統之過電流保護設備設定值如圖 22，饋線 35 之故障電流為 10466 安培，則其峰值為 14801 安培，採用數位式電驛，A 選用非常反時性，始動值設定為 1.2 倍，時間標置為 0.3，B 始動值則為 1.2 倍，時間標置為 0.05，選用正常反時性。此時其保護協調曲線如圖 23 所示，#35 發生故障時，其電驛動作時間分別為 0.08 及 0.2 秒。

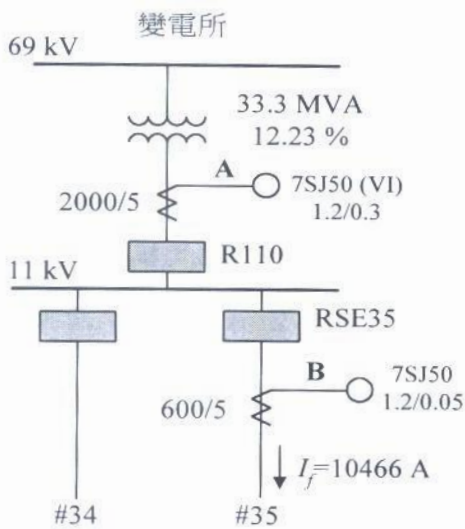


圖 22 · 過電流電驛保護接線圖

假設 SE35 饋線故障時其 X/R 值為 20，CT 二次側負載 0.8Ω，則故障時比流器 600/5 和 2000/5 二次側電流反映至一次側波形及二次側有效值波形變化，如圖 24、25 所示。經由附錄 C 簡易演算法計算，此時電驛 2 從故障發生至真正跳脫所

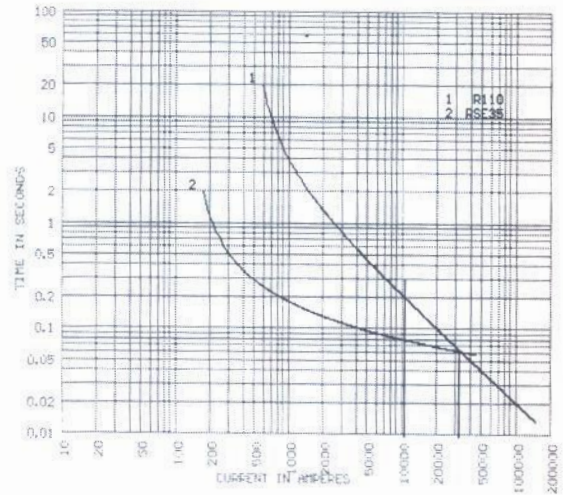


圖 23 · 圖 22 電驛保護協調圖

須時間為 0.133 秒，電驛 1 則為 0.2 秒。

由圖 23 知電驛 2 動作時間應為 0.08 秒，電驛 2 因 CT 飽和延遲了 0.053 秒。在這例子中，雖然電驛 2 因 CT 飽和所延遲之時間，尚不足以造成電驛 1 先行跳脫，然而，對於一般數位式電驛，通常會有濾波設備把直流成份去除，則圖 25 中電

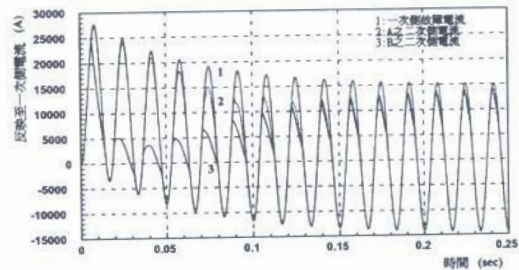


圖 24 · 反映至一次側電流波形

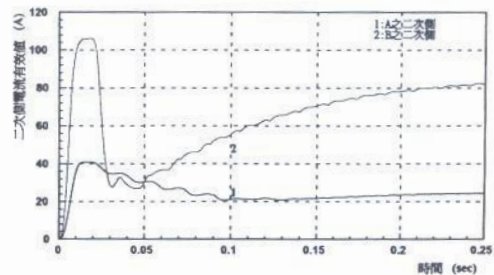


圖 25 · 二次側電流有效值波形

驛 2 之 CT 二次側的有效值勢必會更降低，也就是說，保護電驛會產生更嚴重的延遲。

改善 CT 效率與避免 CT 飽和之方法

對於 CT 因發生飽和而使得二次側電流波形失真之解決方法，可以將之歸納為兩類：一是硬體的補救，二則是數位補償法。而第二種方法主要是使用在數位型電驛。

首先，硬體上的改善方法如下：

- (1) 正確的選用 CT：選用 CT 時，除了需考慮絕緣等級、額定一次側電流、負擔及精確度和精確限制係數(ALF)等因素外，文獻[36]更將鐵心磁通變化納入選用 CT 時的依據，以增加 CT 暫態工作可靠性。
- (2) 利用 CT 的串、並聯改善之：將兩個相同的規格的 CT 串聯如圖 26，如此每一個 CT 只要提供原先一個 CT 時所須的激磁電壓的一半即可，圖 27 為單一 CT 與兩相同規格 CT 串聯時，CT 之激磁電流和二次側波形。

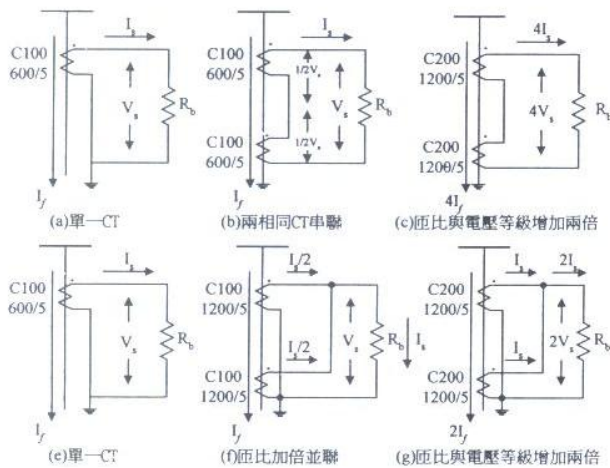
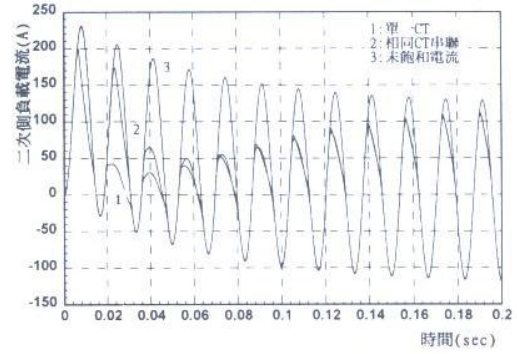
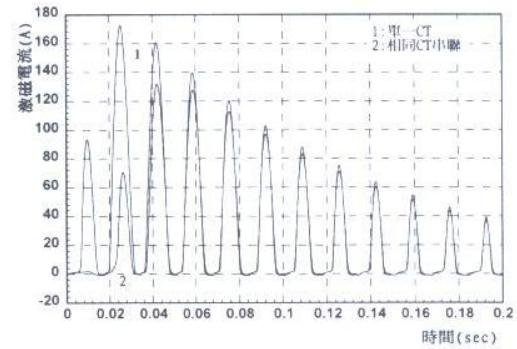


圖 26 · CT 串、並聯補償法

- (3) 加裝輔助 CT：圖 28 為一中壓系統，由於低負載電流，使得設計上為了量測與



(a) 二次側負載波形



(b) 激磁電流

圖 27 · 相同 CT 串聯與單一 CT 之比較

快速反應過載狀況，其往往選用圖 28(a) 中低匝比和低精確度的 CT，然而系統故障電流可能為幾千安培，則如此設計可能會導致電驛在高故障電流時的誤動作。因此可以加裝一組高匝比、高精確度的 CT 如圖 28(b)，當高故障電流發生時，立刻由 CT 3000/5 之 50 瞬跳跳脫，以解決原先設計上的問題。

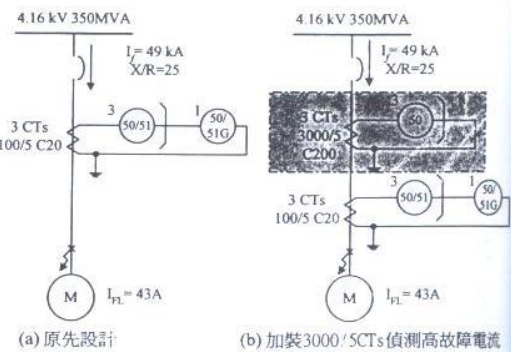


圖 28 · 加裝輔助 CT 補償法

雖然利用上述之方法可以避免或減少 CT 飽和所造成的現象，然而，由於場地的限制或系統容量增加使得故障電流提高等因素而有其缺點。此外，近年來數位電驛已廣泛被用在各種場合，由於其具有可程式化即數位處理等功能，因此文獻[8]提出以磁通和電流之關係，發展出模擬程式以補償 CT 因飽和而失真的電流值，本文稱其為數位補償法。其演算法如下

任何時刻一、二次側與激磁電流的關係為

$$\frac{1}{N} i_p(t) = i_c(t) + i_s(t) \quad (6-1)$$

若可以知道 $i_s(t)$ ，則即可推算出 $i_c(t)$ ，即須要補償之電流。二次側電壓與磁通之關係為

$$\frac{d\phi}{dt} = R_2 i_s(t) + L_2 \frac{di_s(t)}{dt} \quad (6-2)$$

$$\phi(t) - \phi(t_0) = R_2 \int_{t_0}^t i_s(t) dt + L_2 [i_s(t) - i_s(t_0)] \quad (6-3)$$

式子(6-3)中若能知道 $\phi(t_0)$ ，則可以求得 $i_s(t)$ ，再利用式子(6-1)即可算出所須補償之電流 $i_c(t)$ 。由上述可以發現利用數位補償法主要困難在磁通初始值 $\phi(t_0)$ 的決定，由於無法知道其初值，因此通常只能假設之。

參考文獻

[1] Kezunovic, M., C. Wfromem and F. Phillips, " Experimental Evaluation of EMTP-Based Current Transformer Models For Protective Relay Transient Study," IEEE Trans. on Power Delivery,

Vol.9, No.1, pp.405-413(1994).

- [2] Elimore, W. A., Protective Relaying Theory and Applications, ABB Power T&D Company, pp.211-253(1994).
- [3] Blackburn, J. L., Protective Relaying, pp.390-409(1985).
- [4] IEEE Power System Relaying Committee, " Transient Response of Current Transformers," IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol.96, No.6, pp.1809-1814(1977).
- [5] Seeley, H. T., " The Effect of Current-Transformer Residual Magnetism on Blanced-Current or Differential Relays," AIEE Trans., Vol.62, pp.164-169(1943).
- [6] WU, A.Y., " The Analysis of Current Transformer Transient Response And Its Effect on Current Relay Performance," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.21, No.4, pp.793-802(1985).
- [7] Wentz, E. C. and D. W. Allen, " Help for the Relay Engineer in Dealing with Transient Currents," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.12, No.1, pp.116-124(1997).
- [8] Kang, Y. C., J. K. Park, S. H. Kang, A. T. Johns and R. K. Aggarwal, " An Algorithm for Compensating Secondary Currents of Current Transformers," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.12, No.1, pp.116-124(1997).
- [9] 蔡奇生，台北捷運系統之保護協調分析，台灣工業技術學院碩士論文，民國八十六年。

