

# 數位式變壓器保護電驛 SEL-387 應用技術報告

台電供電處 張宥嫻

## 一、前言

變壓器為電力系統中一重要設備之一，其扮演著將電能在不同電壓等級轉換的角色，它的故障將對供電可靠度和系統的運轉帶來嚴重的影響，因此變壓器保護的快速性和可靠性也就相形重要。

因變壓器含括不同電壓階層，故在規劃變壓器保護系統時，應考慮變壓器各側不同電壓等級、變壓器 Y- $\Delta$  結線而形成的相角差、比流器分接頭使用值及其結線法…等；此外，當變壓器空載投入時或外部故障被清除後電壓恢復時所產生的激磁湧流，常會導致變壓器差動保護的誤動作，因此，變壓器的差動保護設備亦需擁有可正確辨認激磁湧流和故障電流之技術，使其能正確、快速地動作，提高系統之穩定性。

目前台電輸電系統中，已有多處使用 SEL-387 數位式變壓器差動保護電驛作為變壓器保護之應用，近期許多新加入之變電所亦皆使用 SEL-387 電驛作為變壓器之保護設備，本文將針對 SEL-387 變壓器差動保護電驛之特性及應用作一心得報告。



## 二、變壓器繞組接線方式

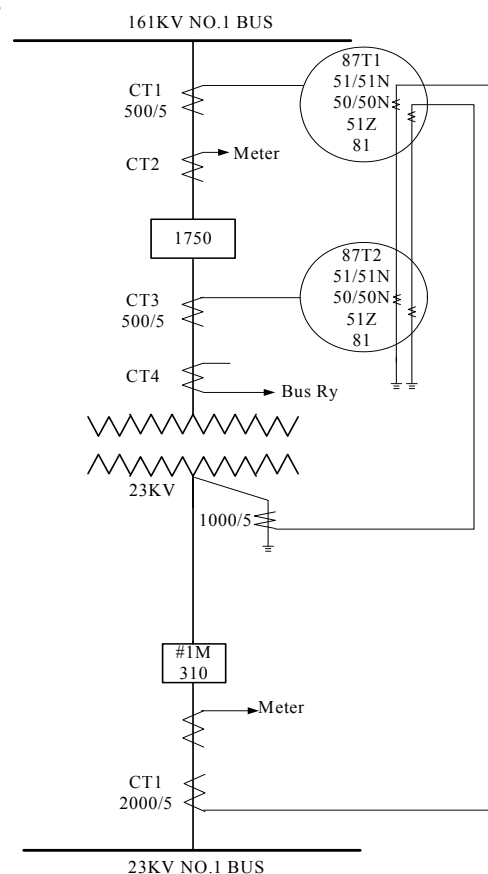
依 ANSI C57.12.70 標準定義，變壓器不論 Y- $\Delta$  或  $\Delta$ -Y 接法，其高壓側正序量領先(Lead) 對應的低壓側正序量  $30^\circ$ 。而台電變壓器之繞組接線方式即符合此 ANSI 標準，圖一表示台電輸電系統中各電壓層級之變壓器接線方式。

	345kV	161kV	69kV	11/22kV
345kV ATR	自耦變壓器			
161kV MTR		Y-Y 接線		
161kV DTR		$\Delta$ -Y 接線		
69kV DTR			$\Delta$ -Y 接線	

圖一 台電變壓器各電壓層級接線方式

## 三、變壓器保護方式

目前台電輸電系統之變壓器保護以採取差動保護作為變壓器之主保護，而後衛保護方式則採瞬時過電流方式(50/50N)及延時過電流方式(51/51N)，變壓器之中性點保護則採用延時過電流方式(51Z)。圖二為 161kV 配電變壓器之保護規劃應用方式。

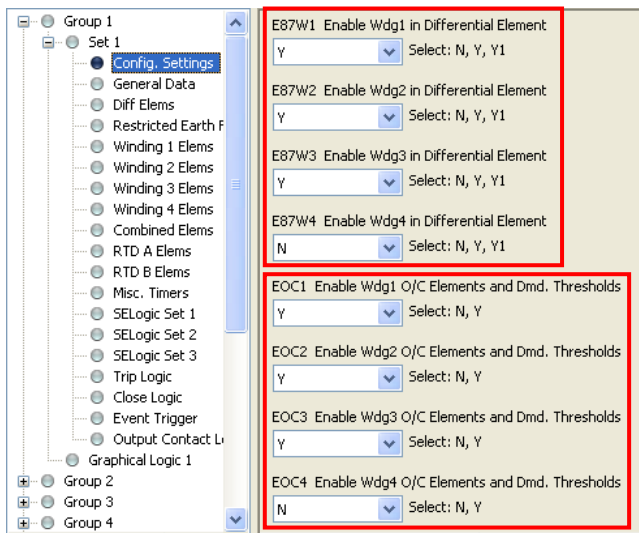


圖二 161kV 配電變壓器之保護規劃應用方式

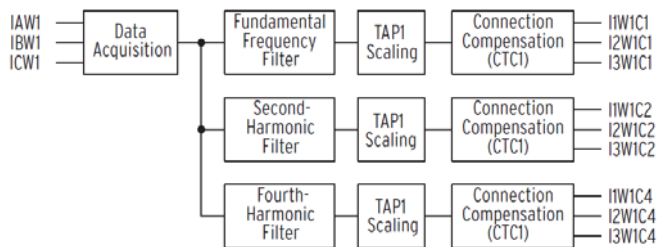
### 四、SEL-387 之差動保護

#### 1. SEL-387 差電流計算方式

SEL-387 為一可輸入 4 組 3 相電流之變壓器差動保護電驛，每一組電流可分別設定是否投入差動和過電流保護，針對投入差動保護之電流，SEL-387 將對其進行差電流計算。



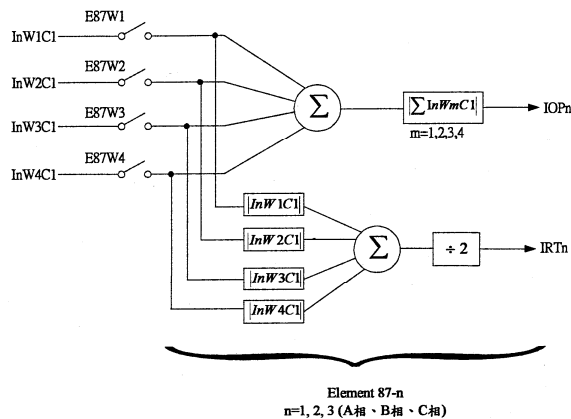
每一組 3 相輸入電流將先經過 SEL-387 之 4 個帶通濾波器，此 4 個帶通濾波器分別擷取輸入電流之基頻波、二次諧波、四次諧波及五次諧波，再將通過濾波器之電流標么化(1/TAP)和相角補償運算(CTC)，如圖三所示。



圖三 繞組 1 之補償電流

經標么化及相角補償後之電流，SEL-387 將對其分相計算出差動元件之動作電流及制動電流值。變壓器各側電流相量和之絕對值大小即為動作電流(IOPn, n=1, 2, 3)；而變壓器各側電流相量之絕對值大小相加後除以 2 則為制動電流

(IRTn, n=1, 2, 3, 分相表示)，圖四即為 SEL-387 電驛之差動電流計算方式。



圖四 SEL-387 差動電流計算方式

#### (1) TAP 計算方式

$$TAPn = \frac{MVA \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot VWDGn \cdot CTRn} \cdot C$$

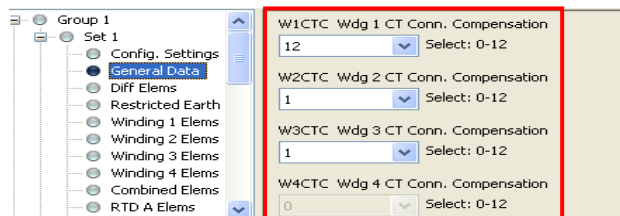
$$C = 1 \text{ for Y-connected CTs}$$

$$C = \sqrt{3} \text{ for } \Delta\text{-connected CTs}$$

MVA：變壓器最大額定容量  
 VWDGn：繞組 n 之線對線電壓值(kV)  
 CTRn：繞組 n 之比流器匝比

#### (2) 相角補償設定方式

變壓器因高、低壓側繞組接線不同而形成之高低壓側間的相角差，在傳統電磁式變壓器保護電驛應用中，以採取比流器實體接線方式來補償其相角差，但此種方式將增加接線錯誤之機率，而數位式變壓器保護電驛 SEL-387 則可依 WnCTC 設定值對任何變壓器繞組和比流器接線方式進行角度補償和去除零序電流。



SEL-387 電流相角補償運算公式如下：

$$\begin{bmatrix} IAW_{nC} \\ IBW_{nC} \\ ICW_{nC} \end{bmatrix} = [CTC(m)] \cdot \begin{bmatrix} IAW_n \\ IBW_n \\ ICW_n \end{bmatrix}$$

其中

$IAW_n$ ：繞組  $n$  之輸入電流

$IAW_{nC}$ ：補償後之電流

$[CTC(m)]$ ： $3 \times 3$  補償矩陣

$m$ ： $W_nCTC$  之設定值 ( $0, 1, \dots, 12$ )

➤  $m = 0$ ：單位矩陣、無變化

$$[CTC(0)] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$IAW_{nC} = IAW_n$$

$$IBW_{nC} = IBW_n$$

$$ICW_{nC} = ICW_n$$

➤  $m \neq 0$  去除零序電流、補償角度

•  $m = 1$  表示補償 30 度：

$$[CTC(1)] = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$IAW_{nC} = \frac{(IAW_n - IBW_n)}{\sqrt{3}}$$

$$IBW_{nC} = \frac{(IBW_n - ICW_n)}{\sqrt{3}}$$

$$ICW_{nC} = \frac{(ICW_n - IAW_n)}{\sqrt{3}}$$

•  $m = 11$  表示補償 330 度 ( $11 \times 30$ )：

$$[CTC(11)] = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$IAW_{nC} = \frac{(IAW_n - ICW_n)}{\sqrt{3}}$$

$$IBW_{nC} = \frac{(IBW_n - IAW_n)}{\sqrt{3}}$$

$$ICW_{nC} = \frac{(ICW_n - IBW_n)}{\sqrt{3}}$$

➤  $m = 12$  去除零序電流、無角度補償

$$[CTC(12)] = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$IAW_{nC} = \frac{(+2 \cdot IAW_n - IBW_n - ICW_n)}{3}$$

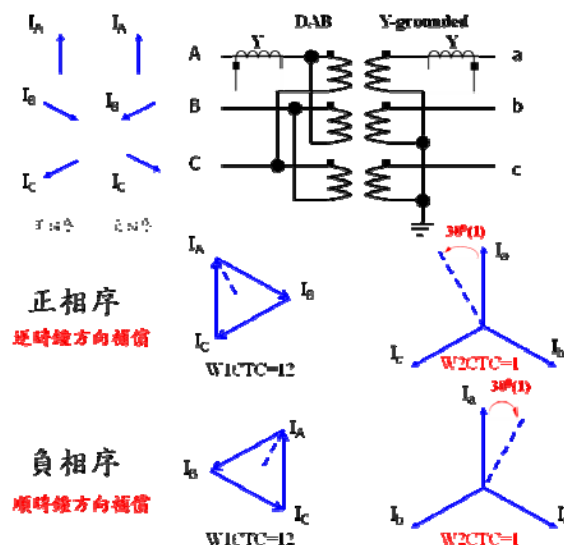
$$IBW_{nC} = \frac{(-IAW_n + 2 \cdot IBW_n - ICW_n)}{3}$$

$$ICW_{nC} = \frac{(-IAW_n - IBW_n + 2 \cdot ICW_n)}{3}$$

SEL-387 之  $W_nCTC$  設定方式，本文將以圖五舉例說明之。

圖五中假設一 3 相變壓器其一次側繞組為 DAB 接線、CT 為 Y 接；二次側繞組為 Y-grounded 接線、CT 為 Y 接，若此變壓器一次側輸入電流為正相序，則該變壓器一次側電流將領先二次側電流 30 度。在 SEL-387 電驛中，若輸入電流為正相序時，其補償方向為逆時鐘方向，故二次側電流逆時鐘補償 1 個 30 度即可和一次側電流同相位。因此，若  $W1CTC$  設定值為 12，則  $W2CTC$  設定值需設定為 1，即代表逆時鐘補償 1 個 30 度。

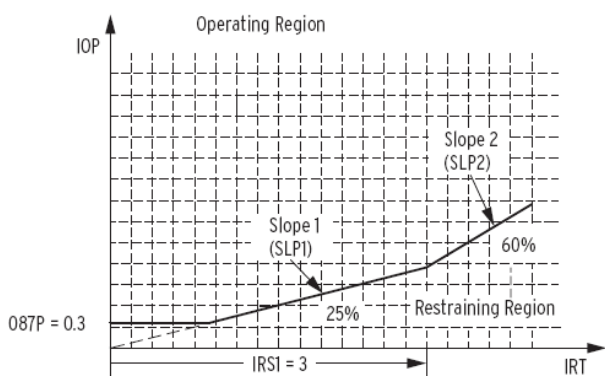
若一次側輸入電流為負相序，則該變壓器一次側電流將落後二次側電流 30 度。在 SEL-387 電驛中，對於輸入電流為負相序時，其補償方向為順時鐘方向，故二次側電流順時鐘補償 1 個 30 度即可和一次側電流同相位。因此，若  $W1CTC$  設定值為 12，則  $W2CTC$  設定值仍需設定為 1，即代表順時鐘補償 1 個 30 度。



圖五 電流相角補償方式

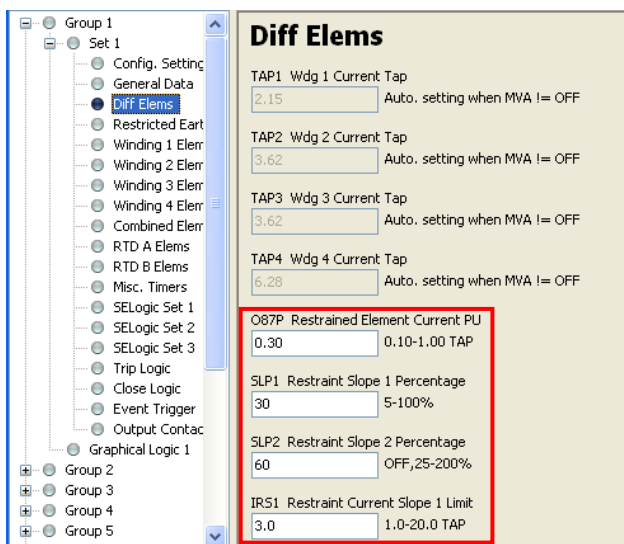
## 2. 制動差動電流保護元件(87R)

SEL-387 電驛共有 3 個制動差動保護元件(87R-1、87R-2 及 87R-3)，分別代表每一相電流之制動差動保護，其保護原理採百分比率制動式差動保護，即利用外部故障發生時之故障電流來實現制動，使差動保護元件之動作電流值隨著制動電流的增加而增加，以達到避開外部故障時所造成之不平衡電流，並提高內部故障發生時之靈敏性。



圖六 百分比率制動差動特性曲線

圖六為 SEL-387 之百分比率制動差動特性曲線，其可藉由 4 個標置設定值來決定其特性，此 4 個標置設定值分別為 O87P、SLP1、IRS1 及 SLP2，分別定義說明如下：



### (1) O87P(動作電流 IOP 始動值)

O87P 之設定範圍為 0.1 至 1.0 pu，該設定值須足以避免穩態 CT 誤差及變壓器激磁電流所引起的差電流，為確保電驛正

確動作，其設定值需符合下列方程式：

$$O87P_{MIN} \geq \frac{(0.1 \cdot I_N)}{TAP_{MIN}}$$

### (2) SLP1(第一段制動斜率百分比設定值)

SLP1 之設定範圍為 5~100%，該段斜率設定值之考量主要為避開變壓器分接頭、激磁電流、比流器誤差及電驛測量誤差所引起的差電流。

### (3) IRS1(兩段制動斜率轉折點之制動電流值)

IRS1 之設定範圍為 1.0 至 20.0 pu，表示第一段制動斜率曲線之最大制動電流值。

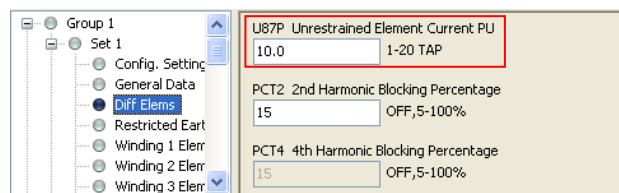
### (4) SLP2(第二段制動斜率百分比設定值)

SLP2 之設定範圍為 OFF, 25~200%，該段斜率設定主要為避免在大電流穿越性故障時，比流器容易發生飽和而產生誤差的情況。

圖六百分比率制動差動特性曲線上方為動作區(Operating Region)，曲線下方則為抑制區(Restraining Region)，當前述 SEL-387 計算出之動作電流值(IOPn)及制動電流值(IRTn)落於動作區，則制動差動電流保護元件(87Rn)即會動作。

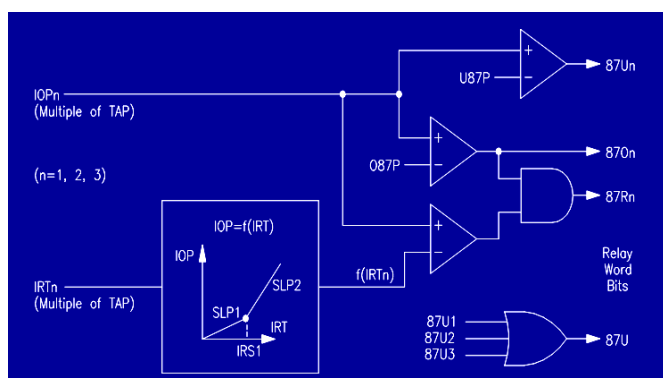
## 3. 無制動差動電流保護元件(87U)

無制動差動電流保護元件的目的是考量變壓器內部若發生嚴重故障情況時，該保護元件可快速動作清除故障，而不受百分比率制動差動特性及諧波閉鎖等影響，即動作電流值(IOP)大於門檻值 U87P 時，無制動差動保護元件即會動作。



SEL-387 電驛之差動保護邏輯圖如圖七所示，當電驛計算出之動作電流值(IOPn)及制動電流值(IRTn)經百分比率制動特性判斷後落於動作區中(Operating Region)，則 SEL-387 電驛之邏輯標置字元 87Rn 將輸出為"1"；若動作電流值(IOPn)大於無制

動差動保護之門檻值 U87P 時，則邏輯標置字元 87Un 將輸出為”1”，此時無制動差動保護元件(87U)即會動作，且不受任何諧波閉鎖條件影響。



圖七 SEL-387 差動保護邏輯圖

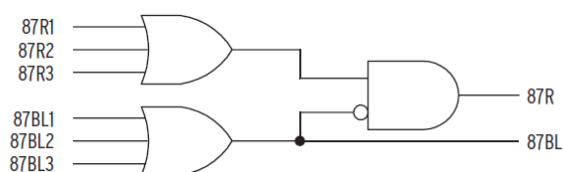
4. SEL-387 鑑別故障電流和激磁湧流之方式

由於激磁湧流含有甚高之諧波成分，其中以二次諧波為主，因此 SEL-387 為提升差動保護元件動作之可靠性及正確性，採用了諧波閉鎖、諧波制動及直流閉鎖方式來鑑別故障電流和激磁湧流，其說明分述如下：

(1) 諧波閉鎖(Harmonic Blocking)

SEL-387 電驛可利用其分相諧波閉鎖元件(87BL1, 87BL2, and 87BL3)來監視制動差動保護元件(87R)，其監視方式主要分為交錯諧波閉鎖方式(IHBL=N)及獨立諧波閉鎖方式(IHBL=Y)。

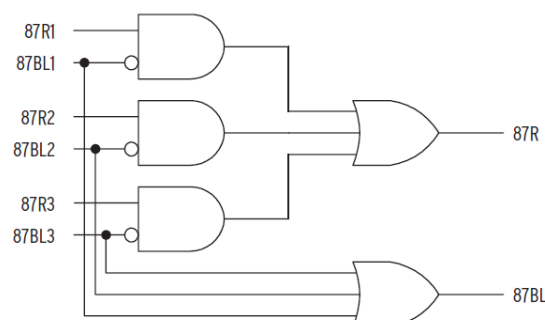
交錯諧波閉鎖方式表示當任何一相之諧波閉鎖元件動作時，所有相別的制動差動保護均被閉鎖，如圖八所示。



圖八 交錯諧波閉鎖方式(IHBL=N)

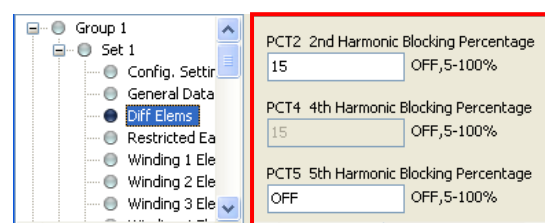
獨立諧波閉鎖方式則表示本相的諧波閉鎖元件與其它相別的制動差動保護元

件無關，如圖九所示。



圖九 獨立諧波閉鎖方式(IHBL=Y)

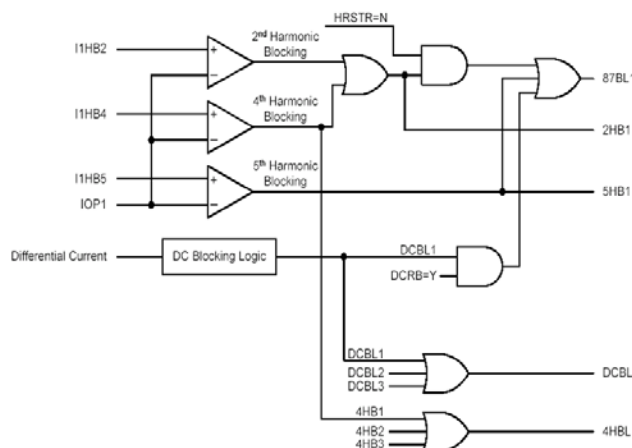
SEL-387 之差動保護諧波閉鎖邏輯如圖十所示，其表示當每一相二次、四次或五次諧波之動作電流值占基波的動作電流值之百分比率超過 PCT2、PCT4 或 PCT5 門檻值時，則其相對之諧波閉鎖元件(87BL1, 87BL2, or 87BL3)即會動作。



其中 I1HB2 代表每一繞組電流的二次諧波相量和之絕對值大小乘以一係數(100/PCT2)，I1HB4 則代表每一繞組電流的四次諧波相量和之絕對值大小乘以一係數(100/PCT4)。

$$I1HB2 = \left| \sum I1WnC2 \right| \times \frac{100}{PCT2}$$

$$I1HB4 = \left| \sum I1WnC4 \right| \times \frac{100}{PCT4}$$



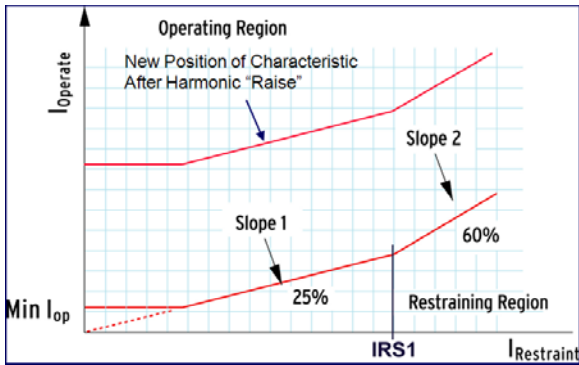
圖十 差動保護諧波閉鎖邏輯圖

(2) 諧波制動(Harmonic Restraint)

SEL-387 電驛亦可採用諧波制動方式來監視制動差動保護元件(87R)，此功能開關為 HRSTR，若啟用諧波制動功能(HRSTR=Y)，則代表同時關閉了交錯諧波閉鎖方式(IHBL=Y)及二次、四次諧波閉鎖方式。

SEL-387 電驛所採用之諧波制動方式原理如圖十一所示，其將二次及四次諧波量加至制動差動保護元件之動作電流值，使得百分比率制動差動特性曲線將向上位移一數值 C，其中

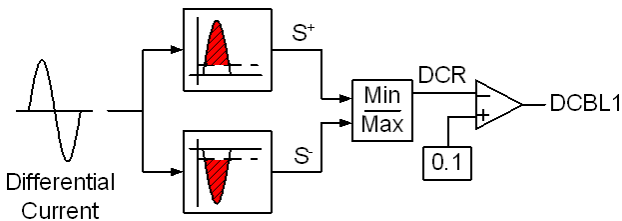
$$C = \left( \frac{100}{PCT2} \times \sum I1WnC2 \right) + \left( \frac{100}{PCT4} \times \sum I1WnC4 \right)$$



圖十一 偶次諧波制動方式原理

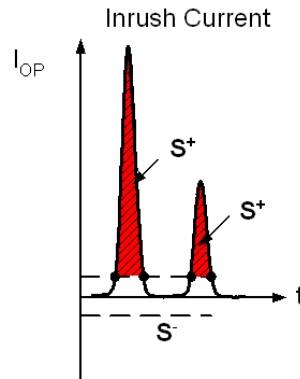
(3) 直流閉鎖(DC Ratio Blocking)

直流閉鎖是一種採取波形識別原理來區分激磁湧流和內部故障電流的方式，其直流閉鎖邏輯如圖十二所示。



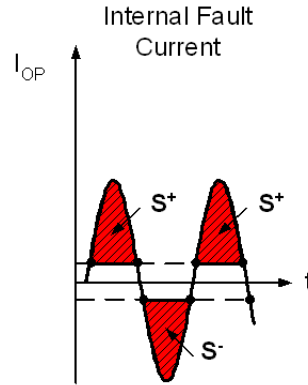
圖十二 直流閉鎖邏輯

(1) 激磁湧流



S+ = 1  
S- = 0  
0/1 = 0  
0 < 0.1  
DCBL is asserted

(2) 內部故障



S+ = 1  
S- = 1  
1/1 = 1  
1 > 0.1  
DCBL is not asserted

五、SEL-387 之過流保護

SEL-387 可提供每一繞組 11 個過流保護元件供使用者設定，包含有定時延時過流元件、瞬時過流元件、反時性延時過流元件，表一為每一繞組可供設定之過流保護元件。

	定時元件	瞬時元件	反時性元件
(I <sub>相電流</sub> I <sub>2</sub> ) (I <sub>a</sub> , I <sub>b</sub> , I <sub>c</sub> )	50Pn1	50Pn2 50Pn3 50Pn4	51Pn
負序電流	50Qn1	50Qn2	51Qn
中性點電流 I <sub>R</sub> = I <sub>a</sub> + I <sub>b</sub> + I <sub>c</sub>	50Nn1	50Nn2	51Nn

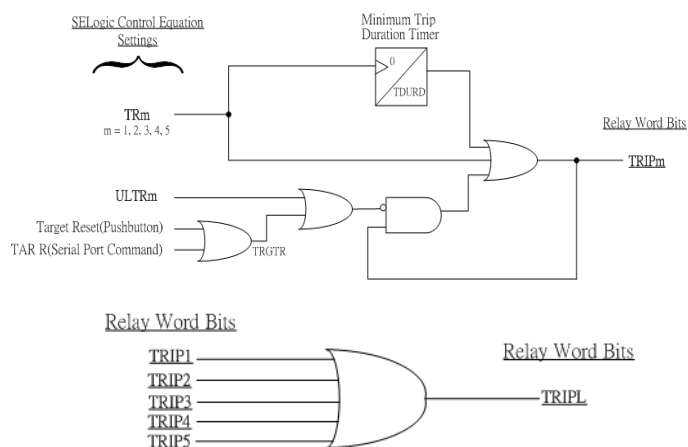
表一 過流保護元件(for each winding n)

目前台電應用 SEL-387 之過流保護元件規劃如下：

- 50P11：變壓器高壓側相間瞬時過電流保護 (30A or 35A，依標置單)
- 50Pn2：斷路器失靈(BF)之相間過電流監視 (一般為 5A)
- 50N11：變壓器高壓側接地瞬時過電流保護 (10A，依標置單)
- 50Nn2：斷路器失靈(BF)之接地過電流監視 (一般為 1A)

## 六、SEL-387 之跳脫邏輯

SEL-387 內共有 5 個跳脫邏輯方程式 (SELogic Control Equation) 可供編寫，其每一方程式對應之變數名稱稱為 TR<sub>m</sub> (m=1,2,3,4,5)，而每一跳脫邏輯方程式之輸出電驛字元為 TRIP<sub>m</sub>，若任一跳脫邏輯方程式輸出之電驛字元 TRIP<sub>m</sub> 由 0 為 1 時，則電驛字元 TRIPL 即會由 0 為 1，SEL-387 電驛之跳脫邏輯圖如圖十三所示。圖十三跳脫邏輯圖中 TDURD 表示最短跳脫訊號維持時間，即當 TR<sub>m</sub> 等於 1 時，其至少會維持 TDURD 這段時間，表示跳脫訊號至少會維持住 TDURD 這一段時間。



圖十三 SEL-387 電驛之跳脫邏輯圖

目前台電應用 SEL-387 於變壓器保護之跳脫邏輯規劃如下：

- TR1：變壓器差動元件  
TR1=(87R+87U)\*S1LT1  
啟斷變壓器高、低壓側斷路器
- TR2：高壓側延時過流元件  
TR2= 51P1T+51N1T

## 啟斷變壓器高壓側斷路器

- TR3：高壓側瞬時過流元件

$$TR3= 50P11T+50N11T$$

## 啟斷變壓器高、低壓側斷路器

- TR4：斷路器失靈動作元件

$$TR4=IN203*S1LT1*(50P12+50N12+50P22+50N22+50P32+50N32)$$

## 啟斷變壓器高、低壓側斷路器

其中 S1LT1 代表 87T 功能是否啟用，而 IN203 表示斷路器失靈保護電驛傳送過來之跳脫訊號。

## 七、結論

傳統電磁式保護電驛只具有單一保護功能，故一個完整之變壓器保護需多具保護電驛來實現，而數位式 SEL-387 電驛則具有多重保護功能，並提供靈活的、可編寫的邏輯方程式供使用者使用，使用者可依設備及系統的不同需求來規劃多種不同的保護方式，加上 SEL-387 具有二次、四次及五次諧波制動功能，可有效防止激磁湧流引起差動元件誤動作，因此 SEL-387 在精度、靈敏性及可靠性等方面都較傳統電磁式電驛提高許多。此外，SEL-387 可編程 512 條順序事件紀錄，並提供最長達 60 週波之事故波形記錄功能，亦提高對事故的分析能力。由於 SEL-387 應用方式之靈活性，使用者更需了解其保護原理及特性，才能設定正確之標置而規劃出可靠的保護系統。

## 八、參考資料

- [1] IEEE Std. C37.91-2000, IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers.
- [2] SEL-387 Relay Instruction Manual, Schweitzer Engineering Laboratories, inc., December 2007.
- [3] 實用保護電驛/李宏任編著 二版 89 年 4 月/全華科技圖書股份有限公司