

# GE Bus2000

## 匯流排差動保護原理介紹

台電試驗所 鄭 強

肇明工業公司副理 熊金台

### 1.前言

匯流排保護的範圍包含斷路器、隔離開關、比壓器、比流器、斷路器、避雷器及匯流排本身和其他等等多項電力設備。匯流排是系統中電力匯入及匯出的重要節點，在任何地點的匯流排發生故障時，均會促使系統產生嚴重的擾動。因此匯流排保護必須具有快速、可靠和安全的性能，保護結構必須符合簡單性的基本要求，以達穩定系統的保護目的。匯流排保護廣泛應用差動電流法 (Differential Current Method)，其基本原理是以克希荷夫電流定律(KCL)為基礎，保護區間正常運轉時，流入與流出一節點的電流總和必定等於零；反之，當保護區間發生異常事故時，流入與流出此一節點的電流總和不等於零。在實務工作上，匯流排保護電驛常因外部故障比流器磁飽和引起誤動作，此一意外結果，常常造成

巨大的停電損失。比流器發生磁飽和，係受到一次電流值及二次側負擔值大小等因素所影響，這些影響因素均可能令系統整體保護協調失效。因此為解決外部故障、比流器飽和、電驛誤動作及變電所全黑的事實，檢討保護失敗的紀錄資料，探討飽和效應，發展保護電驛的可調適 (Adaptive) 性能，有助於提昇電流差動保護的安全性能；運轉調度及維護匯流排線路及電力設備時，即時調適變更後的作業環境，簡化匯流排保護的配合措施，是屬可調適性的具體措施之一；在任何型式的包互區間外部或是內部故障，皆產生正確之抑制或是動作響應，是可調適性的措施之二。掌握系統動態之變異量，應用數位保護電驛的可調適性能，可健全系統的保護功能，降低電驛誤動作的發生機率，此一特點亦是傳統之保護電驛所不足的重要功能。本文即以 GE

BUS 2000 匯流排保護電驛為基礎，闡述其中之差動保護原理。

### 2.匯流排保護基本原理

匯流排保護原理可應用克希荷夫電流定律充分說明，匯流排可視為電網結構中的一個節點，可將複雜性高的互聯網路簡化之，假設匯流排導體上無任何阻抗，因此電流在其上流動時，不會產生任何電壓降，故無阻抗消耗與能量損失。因此，在此理想狀況下，流進任一節點之電流總和必須等於流出此一節點之電流總和。圖-1 指出匯流排發生外部故障與內部故障時，兩者相似之處是故障電流均湧向故障點；流入與流出節點的電流總和，為零或不為零是其特徵。

A.匯流排發生外部故障時，流入匯

流排的電流等於流出匯流排的電流，如圖-1a 所示，流入與流出匯流排的電力潮流仍然處於平衡狀態，可以式 1 表之；

$$I_f = I_6 = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 \text{----- (式 1)}$$

B.匯流排發生內部故障時，改變原有的平衡狀態，此時從電路節點觀察，在匯流排上僅有注入匯流排的電流，而無流出匯流排的潮流，故節點電流總和不為零，方程式 2 表示內部故障之狀態；

$$I_f = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \text{----- (式 2)}$$

在理想狀況下，差動保護係比較流進與流出節點的電流和，節點電流和僅有等於零以及不等於零兩種情況，電流和等於零表示系統正常或是故障點發生在保護區間外。當故障點發生於保護區間內，電流和必不等於零；故差動保護係以偵

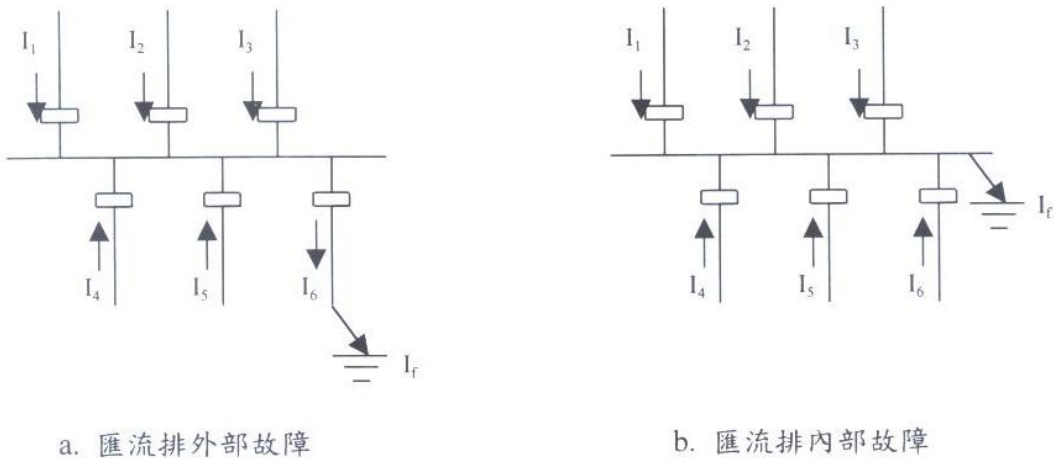


圖-1 匯流排等效單線圖



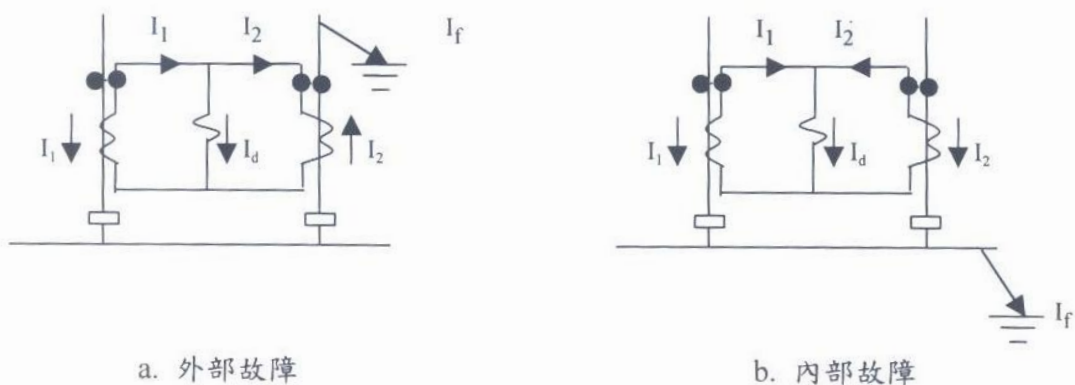


圖-2 基本之匯流排差動保護等效單線圖

測電流和作為匯流排保護的基本原則。調查與分析實際運轉中的匯流排差動保護節點電流，大部分的運轉條件都不是處於理想狀況下，因此問題的重心設定在嚴苛的非理想運轉條件下，探討比流器飽和以及其他特性與電磁感應型保護電驛在應用上的經驗，並更進一步的探討數位電子電路的應用技術，提升匯流排差動保護性能的具體做法。

基本的差動保護方式如圖-2所示，保護區間的比流器的非極性點均指向匯流排保護區間，以保持極性相同，同時須考慮比流器二次側具備相同的匝比，因此可以保持正常運轉與發生外部故障時(參考圖-2-a)，流經差動電驛動作線圈的電流可相互抵消，故

$$I_d = I_1 - I_2 = 0 \text{----- (式 3)}$$

反之當故障點發生在匯流排保護區

間內時(參考圖-2-b)，差動電驛動作線圈上將流過全部的故障電流，亦即

$$I_d = I_f = I_1 + I_2 \text{----- (式 4)}$$

### 3. 影響匯流排保護的因素

假設選擇使用理想比流器，也就是比流器在任何情況下均不會發生飽和效應，那麼在最嚴重的外部故障發生時，以簡單的過電流電驛組合運用在電流差動保護結構中，亦不會存有誤動作的困擾因素。在實際的運轉經驗及記錄中，外部故障及比流器飽和是引起差動電驛誤動作的主要原因，因此不得不重視及考慮比流器的飽和因素。

#### (1) 比流器飽和

比流器飽和的問題，完全起因於鐵心的磁滯特性，可從比流器二次側電流波形及振幅失真的程度，

作為探討飽和問題的重點；以下幾個因素是影響比流器飽和的條件：

- A. 比流器的匝比。
- B. 鐵心的橫截面積之大小。
- C. 比流器連接二次側負擔之導體阻抗。
- D. 二次側負擔之大小。
- E. 鐵心剩磁量的大小。
- F. 直流飽和效應。
- G. 鐵心的飽和磁通密度。

圖-3 是說明典型的比流器飽和發生過程，一、二次側電流波形如圖所示；初始之故障電流含有直流成分時，比流器鐵心磁路在直流抵補電流波形效應下，二次側電流產生嚴重的電流波形畸變，並約持續 30 毫秒。(詳細資料請參考資料 1)

一次側電流是引起比流器飽和的重要原因，發生磁飽和的比流

器，必將導致二次側電流波形產生畸變，圖例是設定在最惡劣的狀況下，說明比流器將在極短暫的時間內發生飽和，同時嚴重畸變波形的二次側電流至少持續 5 週波以上。飽和期間將維持多長，則視上述之影響因素而定。因此比流器飽和及二次側電流失真，對匯流排差動保護以及其他種類的保護電驛產生負面的效應。

## (2) 比流器等效電路

套管式比流器，因其二次側繞組線圈平均分布在環形鐵心上，故在應用上可忽略漏電抗效應，因此在圖-4 之飽和比流器僅以等效電阻表示。假設比流器飽和，鐵心之磁阻抗降低至零歐姆時，二次側輸出電流亦同時降至零安培，因而導致電流輸入比流器一次側，在二次側

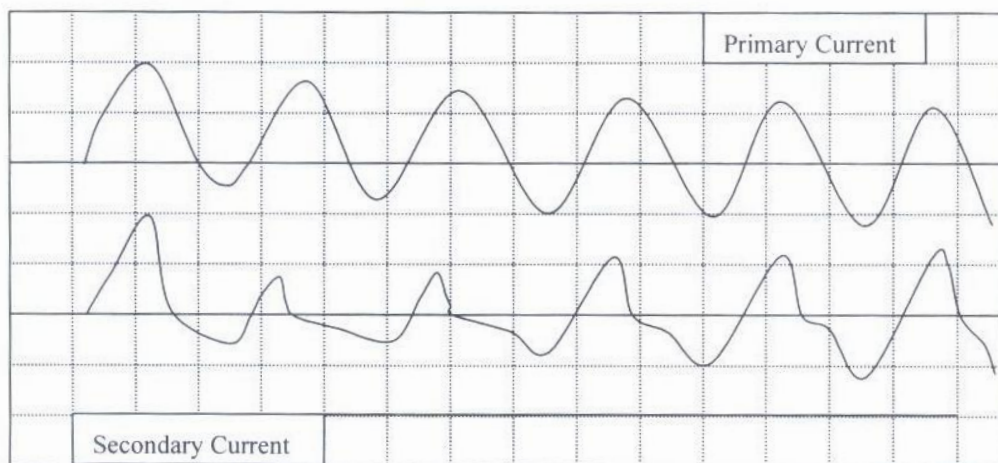


圖-3 比流器飽和之波形



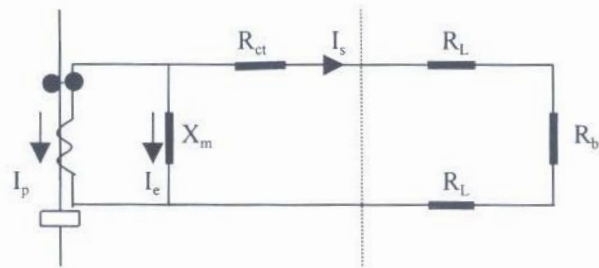


圖 4 比流器及負擔等效電路

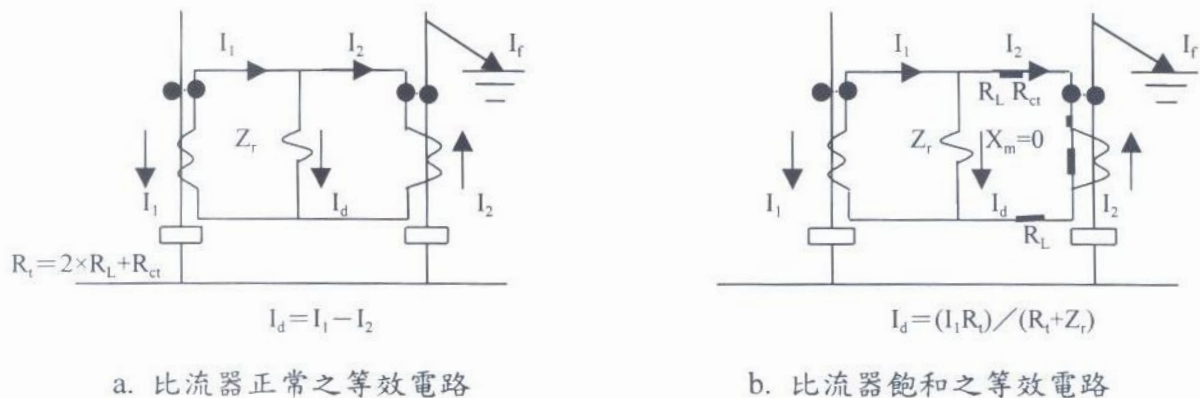


圖-5 過電流電驛應用於匯流排差動保護

無輸出響應。因此保護電驛的性能必將受到比流器飽和效應而降低。

#### 4. 匯流排保護之應用方式

##### (1) 過流電驛

應用過電流電驛的差動保護電路如圖-5 所示，圖-5-a 說明事故發生於匯流排外部，且比流器未飽和。圖-5-b 顯示比流器飽和的等效電路；當比流器工作正常且未發生飽和，故障點在保護區間外部，此時差動電流  $I_d = 0$  (A)，過電流電驛不會動作。假設比流器在完全飽和情形下，此時  $I_d$  將不為零，計

算差動電流如式 5，如果  $I_d$  大於過流電驛的設定值，則電驛將動作；

$$R_t = 2R_L + R_{ct}$$

$$I_d = (I_1 \times R_t) / (R_t + Z_r) \text{-----(式 5)}$$

因外部故障造成比流器飽和而導致電驛誤動作，電驛誤動作的預防措施之一，是將電驛的設定值提高且大於式 5 的計算值，提高過流電驛設定值後，相對降低了電驛的靈敏度，可能引起最小故障電流在保護協調上的盲點。其次若是考慮運用過電流延時動作的性能來克服此一問題，則問題點移至需要延長多久的時間來防止誤動作，假設能夠正

確地計算出所需的延時時間，還必須檢討此一延時動作，將對系統穩定度造成的影響。

**(2)高阻抗差動電驛**

匯流排高阻抗差動保護是改良低阻抗母線差動保護演進而來，其做法是提高差動電驛的阻抗值，可以改善低阻抗差動保護電驛靈敏度的問題。其保護結構及電驛應用參考圖-6；假設匯流排的#3線路發生故障時，流出匯流排的故障電流引起#3比流器飽和，比流器飽和後其  $X_m$  電抗降至零歐姆，因而可以負載端視之。從差動保護之電流集結點(Junction Point)檢討各分路阻抗，此時電驛阻抗值遠大於#3比流器之阻抗值，故可以開路視之，故#1、#2比流器二次側電

流  $I_1$  及  $I_2$  流經電流集結點後，全部電流流入#3比流器迴路，再返回共同點，此一電流大小亦等於流出匯流排的故障電流  $I_f$ 。若比流器為全分布繞組的環形鐵心結構，則比流器的等效電路可以電阻性元件  $R_{ct}$  表示，在#3比流器迴路上產生的電壓降  $V_r$ ，此一電壓降亦為橫跨在電驛動作線圈( $Z_r$ )上的電壓降，以式6表示；

$$R_t = 2R_L + R_{ct}$$

當  $Z_r \gg R_t$  時

$$V_r = I_f \times R_t \text{ ----- (式 6)}$$

此時，高阻抗差動電驛的設定值，是以可能產生最大的飽和電壓作基礎，再加上適當之協調裕度設定之。

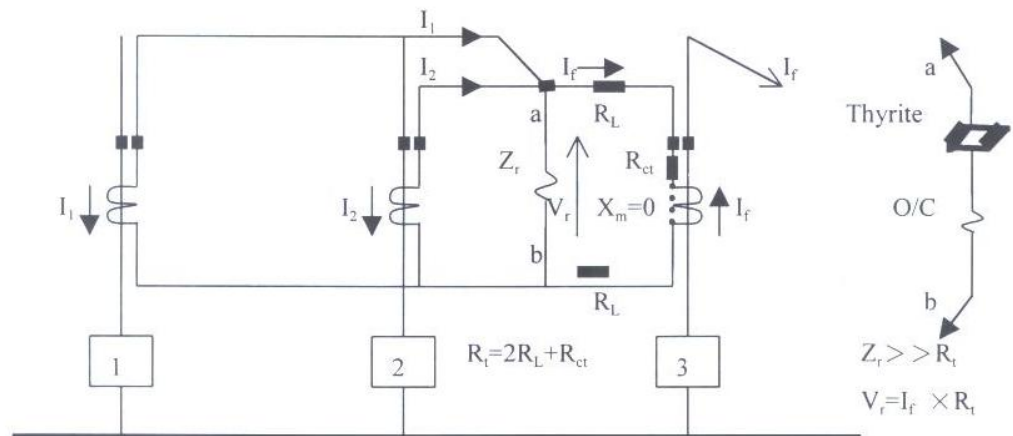


圖-6 高阻抗(電壓型)差動電驛

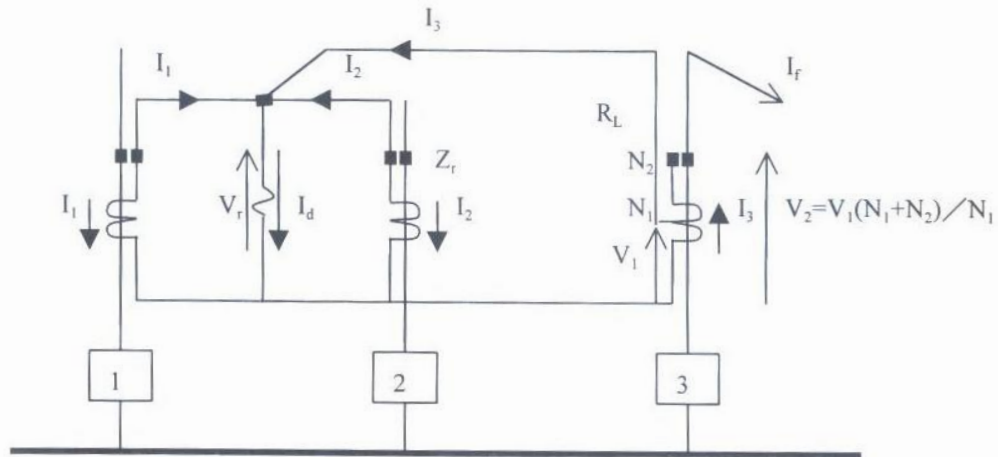


圖 7 多重繞組比流器之匹配

#### A. 應用高阻抗差動電驛在外部故障的考慮方向

若比流器為環形鐵心、且為全分佈繞組結構，可將漏電抗忽略不計，並簡化磁飽和之阻抗特性以電阻視之。在設定電驛時，必須查明與知道所搭配使用的比流器漏電抗值，若是漏電抗值過高，可能導致高阻抗差動電驛設定值過高，而喪失保護靈敏度的需求。

#### B. 應用高阻抗差動電驛在內部故障的考慮方向

若比流器二次側負載是高阻抗電路，在匯流排發生內部故障時，比流器二次側線圈上，將同時產生非常極端的高電壓，它橫跨於比流器二次側輸出端及電驛輸入端上。因此必須將異常過電

壓箝制在安全合理的範圍內，以避免電驛或是比流器絕緣破壞，進一步可保障運轉維護工程師的工作安全。圖-6 之高阻抗差動電驛，其內部電路中的 a-b 端點間，共有兩條並聯分路，分路一之開流體(Thyrite)串聯一過電流元件與分路二之電壓動作元件並聯；開流體具有負電阻特性，當橫跨在開流體兩端之電壓上升時，開流體之阻抗呈現下降趨勢，因此可將比流器二次側之異常過電壓，箝制在合理的範圍內。當發生重度故障時，開流體快速導通，導通後的開流體其阻抗與電流呈反比，過電流元件亦可偵測此故障電流而動作；因此在匯流排發生外部事故時，亦須同時考慮過電流元件的始動電流設定



值，以降低電驛發生誤動作的可能性。

**C. 匹配高阻抗差動電驛與比流器的考慮方向**

匯流排上各差動保護使用之比流器，選擇最大匝比是匹配應用的基本原則；若所選用之各組比流器匝比規格不一致，調整比流器分接頭以滿足差動保護之要求時，可能產生各比流器分接頭未使用於全匝數位置上，形成自耦變壓器之升壓效應，並在二次側繞組上擴散異常過電壓，引起絕緣上的問題。參考圖-7；全繞組間的分布感應電壓與所應用之匝比成反比(如式-7)。比流器匝比若不匹配時，可使用輔助比流器將各線路之一二次電流比例補

償之，使用輔助比流器時，需要注意在差動保護內部故障時，比流器必須有足夠的能力提供電驛所需的動作電壓。

$$V_2 = \frac{V_1(N_1 + N_2)}{N_1} \text{-----(式 7)}$$

$N_1$  = 比流器使用之匝比

$N_2$  = 比流器未使用之匝比

**(3) 線性耦合器**

線性耦合器(Linear Coupler)是以非磁性的物質替代磁性鐵心，因此能夠克服比流器鐵心之磁飽和問題。因線性耦合器具有良好的直線性特性，故在高倍率電流流過線性耦合器時，其一次側輸入電流與二次側輸出電壓之間的比例，亦可保持直線特性；圖-8 是匯流排保護應

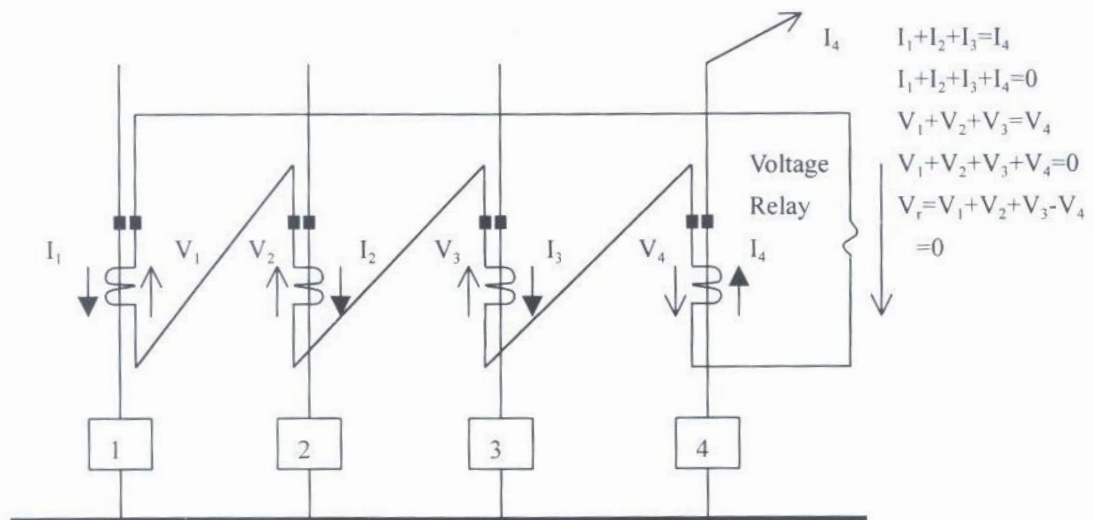


圖-8 線性耦合比流器



用線性耦合器的例子，當匯流排保護區間外部發生故障時，可保持在電壓電驛上的電壓降等於零或是趨近零，如式 8；反之，故障點在差動保護區間內時，線性耦合器二次側之電壓和，等於保護電驛電壓線圈上的電壓降，線性耦合器二次側產生的故障電壓，足以促使保護電驛動作。雖然線性耦合器擁有良好的使用條件，但是受制於其特殊的應用特性，使得線性耦合器並未廣泛應用於匯流排及輸電線路等各級保護系統上。

$$\begin{aligned}
 I_1 + I_2 + I_3 &= I_4 \\
 I_1 + I_2 + I_3 - I_4 &= 0 \\
 V_1 + V_2 + V_3 &= V_4 \\
 V_1 + V_2 + V_3 - V_4 &= 0 \\
 V_r = V_1 + V_2 + V_3 - V_4 &= 0 \text{--(式 8)}
 \end{aligned}$$

#### (4) 比率抑制差動電驛 (Percentage Restrained Differential Relay)

針對故障點位於保護區間外時，防範故障電流引起比流器飽和引起保護電驛誤動作，應用比率抑制差動電驛的電流抑制特性，是降低差動電驛誤動作的方法之三，圖-9 說明比率抑制差動電驛之抑制線圈及動作線圈的基本電路結構。當 #2 斷路器之比流器飽和時，抑制電流 ( $I_{rest.}$ ) 可作如下的定義；抑制電流等於流過各個抑制線圈上的電流平均和。因此可利用此一特性，適當調整抑制電流與差動電流的比率，當動作電流小於抑制電流時，電驛將產生抑制轉矩或是閉鎖跳脫信號；反之，當差動電流 ( $I_d$ ) 大於抑制電流一定比率時，電驛將產生

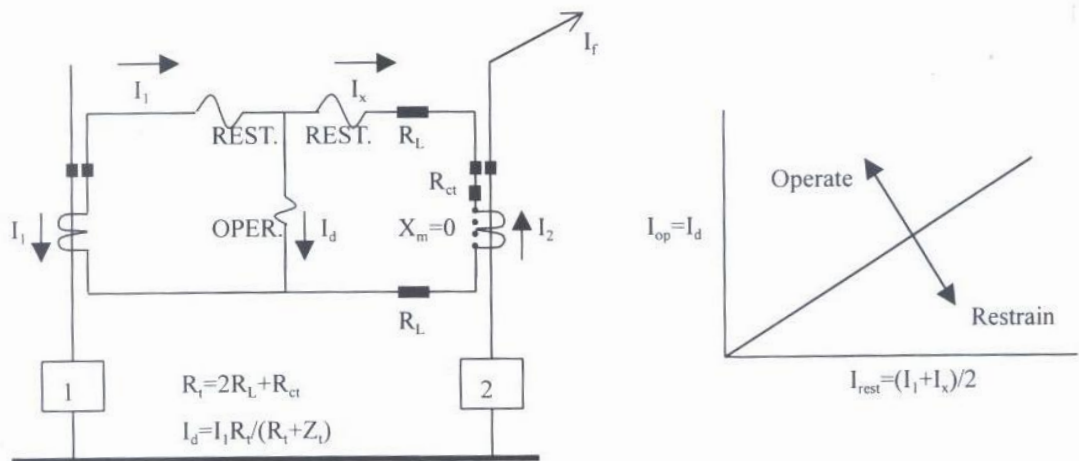


圖-9 比率抑制差動電驛

足夠的動作轉矩或是輸出跳脫信號，令斷路器跳脫清除及隔離故障。比率抑制差動電驛的特性如圖-9-b 所示，此一直線的斜率(Slope)可由抑制電流之設定值決定，在直線下方之區域屬於抑制區間，直線上方的部分則屬於動作區間，所以流過抑制線圈的電流愈大時，電驛所需的動作電流也愈大。

$$R_t = 2 \times R_L + R_{ct}$$

$$I_d = \frac{I_1 \times R_t}{R_t + Z_r}$$

$$I_{op} = I_d$$

$$I_{rest} = \frac{I_1 \times I_x}{2} \text{-----(式 9)}$$

多重保護與保護區間重疊是系統保護協調的基本原則，比流器可能同時供應不同性質的保護電驛使用，因此可能影響差動保護結構

中，比流器匝比必須保持一致的條件。各比流器匝比不同時，可使用輔助比流器，將比流器調整為匝比相同一致的應用條件，以方便差動電驛之應用；如圖-10 所示。此外，針對外部故障比流器飽和的異常狀況，適當提高電流集結點的分路阻抗，可降低動作線圈之分路電流，亦可降低誤動作的可能性，並增加電驛的穩定性，因此稱此一串聯阻抗為「穩定電阻器」(STAB R)。選擇穩定電阻的條件是基於以下的考慮：

- (1) 電驛的靈敏度。
- (2) 考慮斜率之設定值。
- (3) 比流器二次側之主要分路阻抗。

在最惡劣的情況下，亦即比流器完全飽和時，所選擇的穩定電阻器之

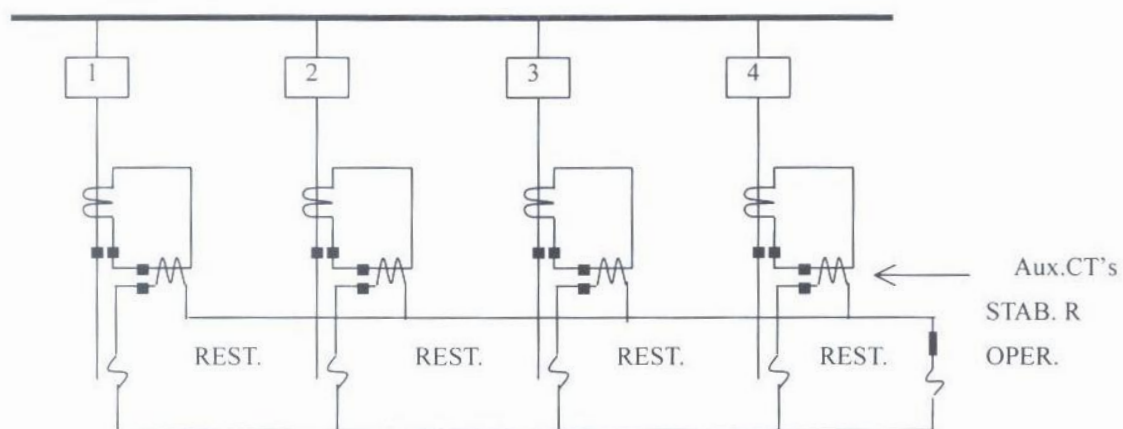


圖-10 比率抑制差動電驛應用輔助比流器



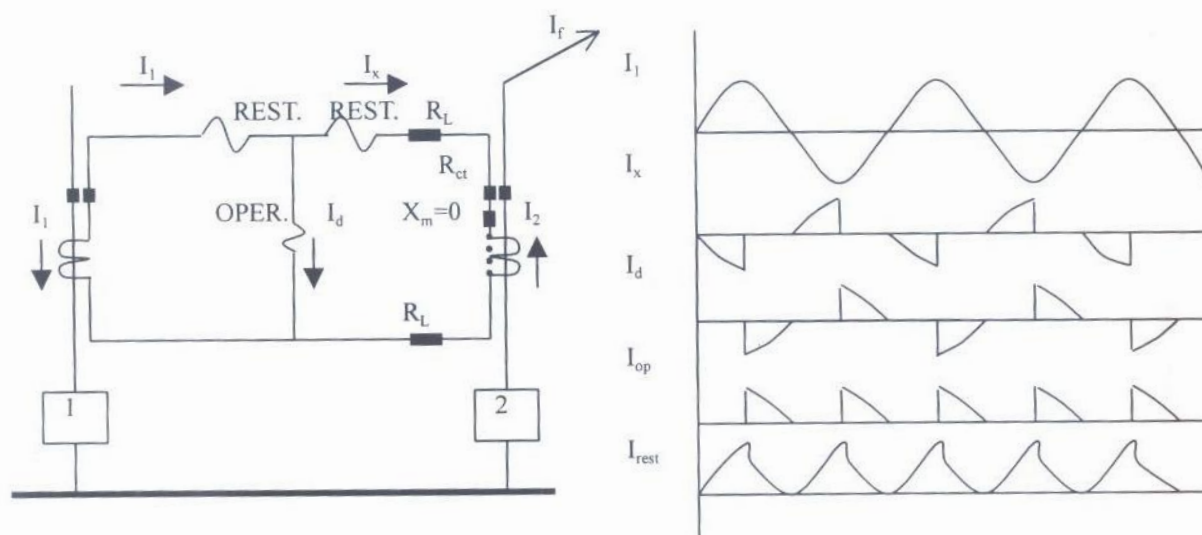


圖-11 比流器飽和電流之分析圖例

最小匹配阻抗值，必須能限制流過動作線圈之電流值，小於電驛的設定值。

## 5. 低阻抗電流差動數位電驛應用技術

匯流排主保護應用低阻抗電流差動電驛時，為排除因外部故障引起比流器飽和，導致電驛誤動作的可能因素，在早期的差動保護文獻中提出：以較高的差電流設定值或是延長動作時間，作為解決問題的對策。

現在屏除上述兩種做法，針對比流器飽和特性，一步步地分析飽和效應，研討提昇低阻抗電流差動電驛安全性與可靠性的技術。圖-11說明應用低阻抗電流差動電驛，分

析比流器飽和效應的步驟。

在#2比流器全飽和時，圖-11b是從整體迴路上說明各分路電流，以每1/2週波之波形為基準，量化描述 $I_1$ 、 $I_d$ 、 $I_x$ 、 $I_{op}$ 、 $I_{rest}$ 各分路電流變化的情形，簡化描述各分路電流的目的是為方便闡明此一概念。假設#2比流器崩潰後，差動電流 $I_d$ 大於零且在動作線圈迴路上流動，在電流匯入點(Junction Point)上，流入與流出電流和之絕對值，與動作電流 $I_{op}$ 、差動電流 $I_d$ 、抑制電流 $I_{rest}$ 的絕對值有關。比流器在飽和前是圖-11所要表示的重點：此時抑制電流大於動作電流是特徵之一，動作電流等於或是近似零是特徵之二。

在匯流排外部故障導致比流器嚴重飽和的情況中，為發揮低阻抗差動電驛的優點，應用上述的想法與做法，可預防外部事故發生時、比流器故障，導致電驛誤動作的事實。若是匯流排保護範圍內發生故障時，此一電驛高速動作的特性，不會產生任何形式的動作延誤，可在 5~10 milliseconds 時間中，排除任何形式的匯流排故障。

應用數位技術的低阻抗電流差動電驛，是以差動電流元件(Current Differential Element)以及波形元件(Wave Shape Element)兩大主要元件組成，如圖-12 所示；並保留著百分比率抑制能力等多項傳統功能，以下分別敘述電流差動以及波形元件的動作特性，再綜合討論整體性能；

### (1)電流差動元件

當電流差動元件中，在  $K_r$  迴路中，輸入的動作電流( $I_{op}$ )大於百分率抑制電流( $I_{rest}$ )時，電流差動元件將迅速輸出一個跳脫訊號。

### (2)波形元件

波形元件在同一時刻，比較抑制電流信號與動作電流信號之  $K_s$  百分率，若是抑制信號大於動作信號時，波形元件將輸出閉鎖跳脫信

號。注意；抑制電流的控制功能，在比流器磁飽和起始階段，當輸入電驛的抑制電流信號大於動作電流信號時，波形元件會及時響應並輸出跳脫閉鎖信號。

若是將匯流排的電壓信號並輸入電驛中，那麼啟動元件(Starting Elements)可在匯流排發生電壓降時，以”及/或(and/or)”的抑制電流條件，使得啟動元件產生動作信號。啟動元件的輸出信號，輸入至波形元件中，是波形元件產生動作的首要條件；當比流器已飽和，啟動元件信號輸入之波形元件中，且動作電流升高並大於抑制電流時，元件上的計時器(Timer)經過 20 毫秒的預設脫離時間(Dropout)後，將解除跳脫閉鎖信號。

本電驛亦不例外的在電驛室中，將所有比流器的引入導線與電驛連接，圖-12 電路包含類比輸入、數位信號處理過程及輸出，數位電路含有下述幾項優點；

#### A.自我偵測(Self-Checking)功能

：可增進安全性及可靠性。

#### B.具有選擇性(Selection)：可依據匯流排、開關型態及比流器迴路，可更正確的選擇匯流排型式與保護軟體。



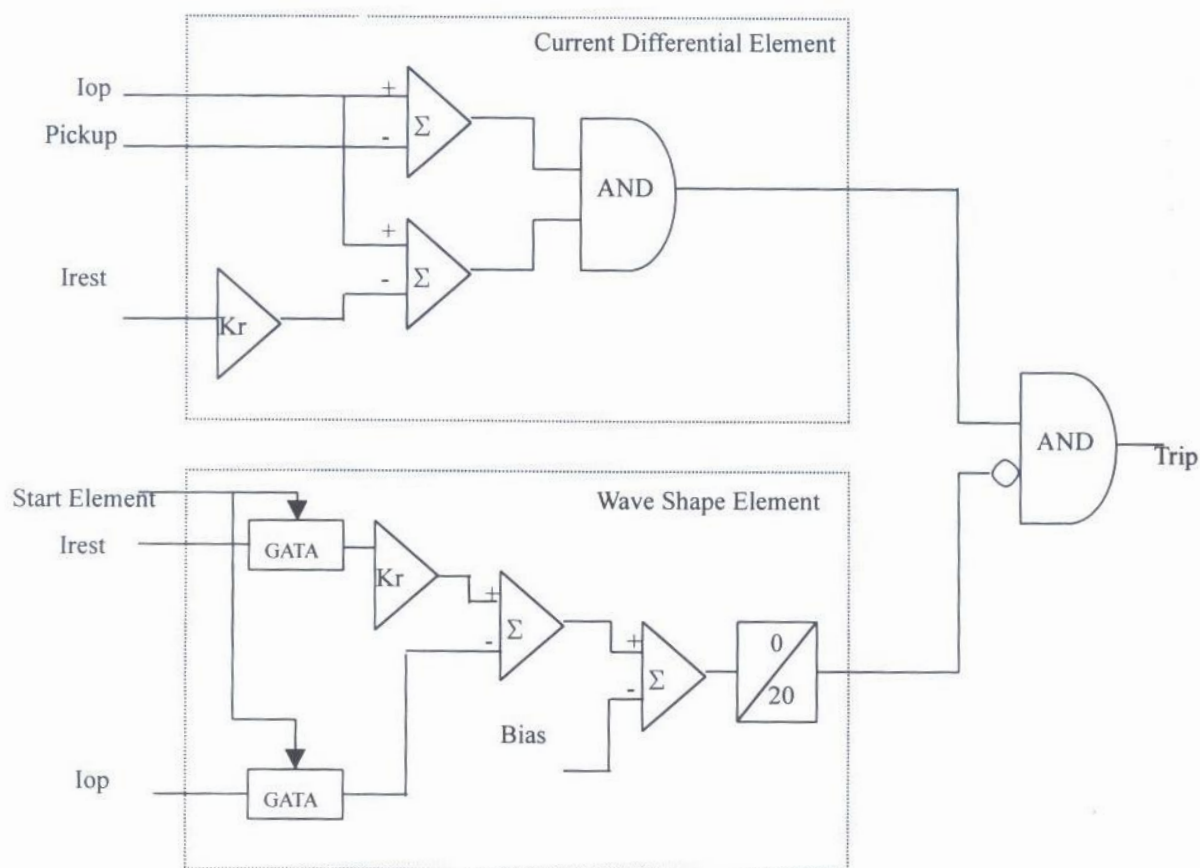


圖-12 低阻抗電流差動電驛之比流器飽和檢測電路

## 6. 匯流排之配置

### (Bus Arrangement)

以下將介紹兩種不同型式的匯流排，圖-13 表示主匯流排及轉供匯流排之結構，圖-14 係說明雙匯流排及轉供匯流排之結構。

#### (1) 主匯流排及轉供匯流排的結構

採用主副匯流排的變電所，線路可經由開關選擇連接於於不同的匯流排上，匯流排之間使用聯絡斷路器(Tie Breaker)連接，可使得運

轉操作”或/及(and/or)”維護作業更具有彈性及便利性。運用聯絡斷路器的功能，以及經由線路及斷路器開關切換，可方便執行線路開關的運轉維護計畫。

低阻抗電流差動數位電驛的保護區間，可由軟體、線路開關(Line Switch)附屬之輔助 a/b 接點，及主斷路器之輔助接點所定義。如此，保護電驛可經由開關之輔助接點狀態，定義線路、匯流排之間連接與切換的狀態，同時亦可確立保護區

間。比流器二次側不得經任何形式的開關切換，必須始終與電驛保持直接地連接，是基於考慮安全的理由所制定之。匯流排保護在發生故障時，電驛須具備分散式輸出跳脫信號，並同時跳脫相關斷路器，以確保故障隔離。

## (2) 雙匯流排及轉供匯流排

### (Double Bus with Transfer Bus)

基本的匯流排結構加上一些複雜的開關排列，可以組成如上述的主副匯流排，再增加更多的開關排列，可延伸到複雜的匯流排，如圖-14 所示。

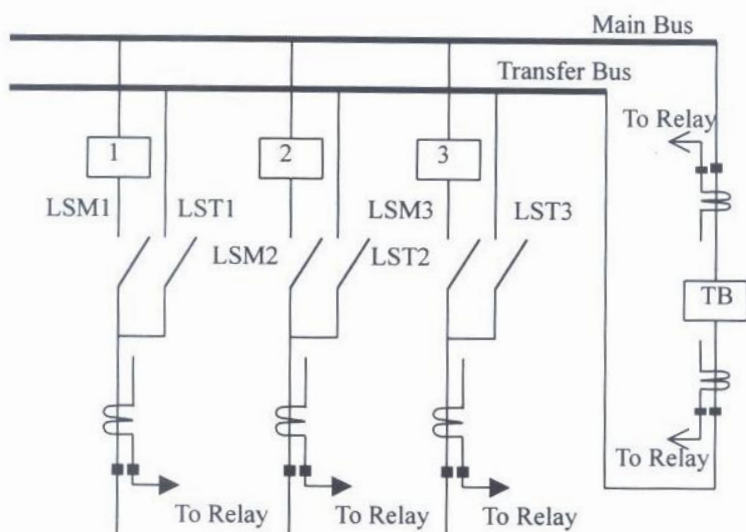


圖-13 主副匯流排的結構

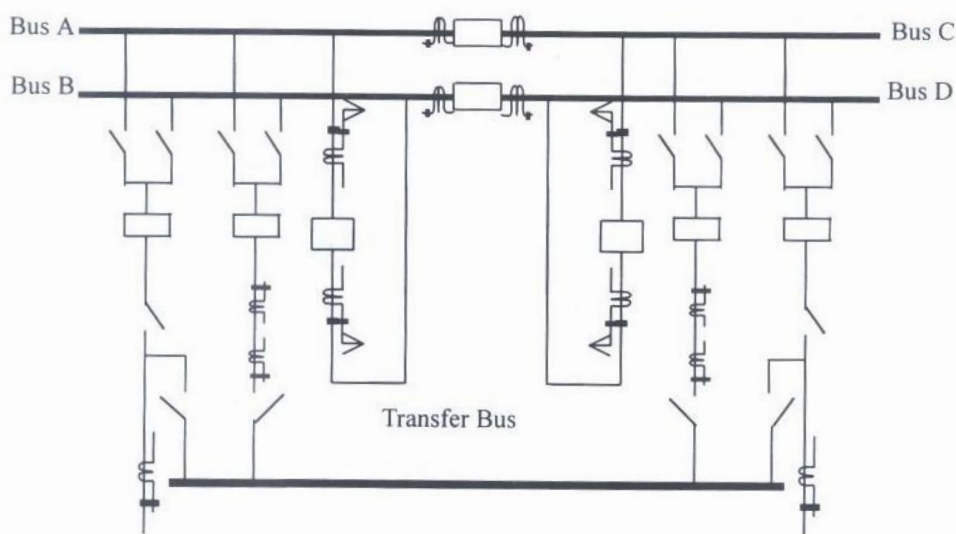


圖-14 雙匯流排及轉供匯流排



本電驛含有一個引用全新觀念的匯流排結構程式，使用者在應用程式時，依循接線圖形產生器的說明及步驟順序輸入資料，可在保護電驛中建立起自己特定的匯流排保護結構。在硬體結構上，尚包含比流器選用不同匝比時，因應匹配匝比所需的輔助比流器軟體。數位電路應用技術的優點，以下補充六點：

- A. 具有記錄故障數據的能力。
- B. 具備量測功能。
- C. 可分別設定檢測各個線路之電流。
- D. 可監視比流器二次側繞組是否開路。
- E. 線路開關三相接觸子操作不同步(Line Switch Pole Disagreement)，可輸出警報信號。
- F. 具有斷路器故障(Breaker Failure)之保護功能。

## 7. 結論

高阻抗之差動電驛受制於應用多重匝比的比流器及結構複雜之匯流排，因成本低廉，故多年來廣為應用在匯流排保護上。低阻抗電流差動電驛亦受制於比流器飽和的困擾之中。GE BUS 2000 應用數位技

術所產生出的低阻抗電流差動電驛，具有波形檢測元件，則克服了比流器飽和效應所衍生出的問題。其次，數位化技術也帶來使用者更多的好處。

## 8. 後記

感謝中興電工公司 賴周良處長赴廠研習與指導，並於新桃電廠採用 GE BUS 2000 匯流排差動保護電驛，始有此機會發表本篇文章。

## 9. 參考文獻：

- (1) Transient Response of Current Transformers, IEEE publication 76 CH 1130-4 PWR
- (2) Application of GE BUS 2000 Relay Using Different Ratio Current Transformers, GE publication GEK-106212B
- (3) IEEE C37.97-1997 (Reaff. 1990) Guide for Protective Relay Applications to Power System Buses
- (4) The Art and Science of Protective Relaying, C. Russell Mason
- (5) Protective Relaying, Principles and Applications, J. Lewis Blackburn