

# 談發電機差流保護

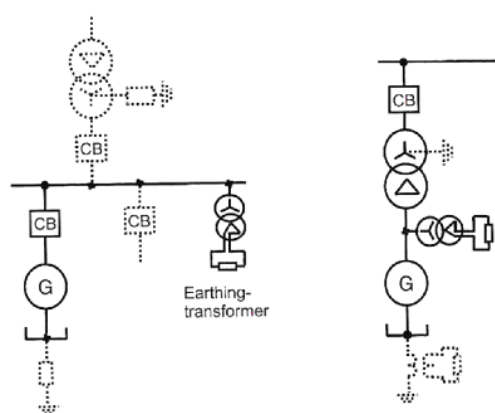
台電供電處電驛技術課 李國楨

## 一、緒言

通常發電機繞組短路事故主要是發生在相位間交叉凸出的地方，其初始（次暫態）短路電流由發電機本身提供，大約為機組額定值的 3~10 倍，與次暫態電抗大小有關；此外必須再加上電力系統流向該事故地點的故障電流部份，因此兩者差電流至少部不低於前項描述狀況電流值。為防禦事故延伸擴大嚴重損害機組設備，亟須快速清除事故成為基本的需求，差流保護電驛正是符合這項需求的理想科技產品。

一般而言機組內部匝繞故障大都無法被差流保護偵測出來，因為大量故障電流循環於短路匝繞之間，因此故障電流進出之間的變化卻不能成為差流保護關鍵性的差電流。

為了偵測出各式各樣接地故障，如圖一所示：



圖一 機組直接聯結系統（左）；單元式聯結系統（右）

在直接聯結系統（直聯母線）與經由一組變壓器聯結系統，兩者結構不同，故如何取得差電流是當務者之本能。

當擁有一組變壓器時，發電機中性點通常被設計經由一高阻抗接地，使得發電機接地事故的故障電流僅限低於 15 安培電流存在，如此防制措施有效避免鑄鐵熔解及嚴重損害定子（stator）鐵芯材質，但結果地差流保護對這麼少量的電流反應靈敏不足，因此一套靈敏的定子接地事故保護必須被提出作為這方面的補償，如果母線接地方式變動，則接地故障電流大小與系統中性點處置方式有密切關係。

高阻抗中性點接地保護在德國是常見的保護方式，限制接地電流少量通過，因此某一特殊的接地事故保護必須被研擬出。然而在小型發電系統接地電流可能量少而必需增設接地變壓器連帶負荷電阻提升到 5~10 安培，放大接地電流使得接地電驛得以維持發揮故障檢測功能。

所幸的是差流保護卻能動作於一雙重的接地事故類型，譬如一端接地事故發生在機組，另一端接地事故發生在系統。如果發電機或電網的中性點改採用低阻抗接地，單相接地故障電流變得更大了，能夠被差流保護電驛偵測到。在盎格魯撒克遜人的一些國度裡，應用中性點接地保護方法已經有一段長遠歷史，當發電機端發生接地故障事件時，電流量通常被限制於中性點對地連接的電阻值。例某一電流範圍限於 200 安培到 1.5 倍機組額定電流通

過，這就決定於接地電阻值大小。如果故障位置不在機組端子，而是在繞組上即介於端子與中性點之間，接地電流依下列式子遞減：

$$I_E = \frac{I[\%]}{100} \cdot \frac{U_N / \sqrt{3}}{R_E}$$

$l =$  從繞組中性點到接地故障點距離

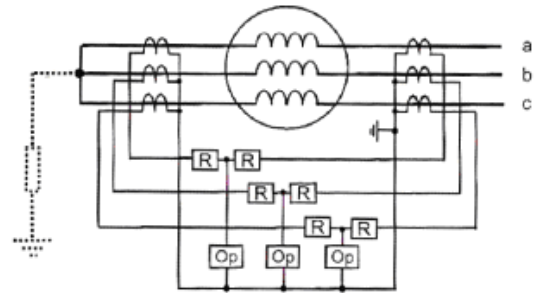
例如：某一接地故障點從發電機中性點起算到繞組的距離為 20%，則本案例接地故障電流僅為機組端子接地故障電流的 20%。如果接地故障電流量被抑制在發電機額定值時，只有 20%  $I_N$  在本案例流通，這意味著差流保護具有 20%  $I_N$  能包含由端子朝中性點方向 80% 的繞組部份，在大型機組接地電流與額定電流的對照上必須採更嚴厲的抑制措施，這樣就造成平常每相差流保護，在接地事故時就顯現靈敏度不足的現象，在這些情況下須要另加一套額外的接地差流保護。假如相電流的 CTs 都相當速配時或採用特殊鐵芯平衡各相 CTs，則這套接地差流保護能進一步提供更低值設定的高靈敏保護。

## 二、應用相位差流保護法則

這是應用於大型機組慣常的短路保護方式，其前提是三相導體位於中性側是分開獨立的，這樣一來每相才能各自對應自身相量及角度互相比對，同時導體兩側 CT 匝比選擇一致，如此達成完美匹配。通常設計一組抑制差動保護，在某些國家可能也使用一組高阻抗循環電流保護。如圖二：

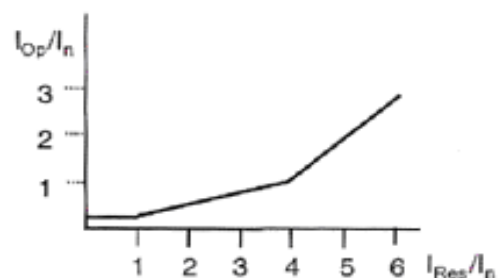
方塊內標註 R 為抑制繞組被設計用來產生抑制力矩去壓制差電流動作力矩；方塊內標註 Op 為動作繞組指示 Op 量測

前述差電流時產生動作力矩。抑制力矩與動作力矩相互對抗，評比結果由強者勝出，得出差流電驛終究係動作或受到抑制的結局，此結局應當符合使用者的期望值，才算是具備高度可信賴的差流電驛。



圖二 發電機差流保護基本結構

隨同傳統的技術理念，機組端子側與中性側都將量測電流回路引接到各自 R 抑制繞組回路再聯合引入共同的動作繞組回路形成直通連結現象，因此僅能選擇機組端子側 CT 二次側中性點單一接地（如圖示），並應防範多重接地形成經由接地造成並聯分流路徑現象。如使用數位式差流電驛，則前述兩組 CT 二次側中性點必須都接地，因為兩組 CT 在電驛內部經類比轉換數位模組後，各自經中性點通路返回現場並已不存在互通現象。



圖三 差流保護特性曲線

如圖三：抑制差流特性在小電流往上

昇到 CT 二次側額定值（國內大多數為 5 安培）部份可能是非常平坦的（譬如僅 5% 斜率）。電驛外接兩組相同結構的 CTs 必然是良好的匹配，不適宜由於加入補助 CTs 而造成額外的誤差，這種做法的結果是：「在擁有慣常的設定 10~20%  $I_N$  時，不但可跨越全部負載範圍，而且又可得到相當優良的靈敏度。」

低阻抗抑制差流保護的一項優勢是允許其他的保護設備串聯一體來應用，例如需搭配傳統個體電驛同時保護設備情況下，突破 CT 二次側負荷瓶頸，顯然低阻抗保護是比較先進的。

在選擇 CT 特性方面必須注重的是：發電機的直流時間常數是相當長久的，假如故障事件發生在機組輸出端子附近（如圖一 直接聯結系統母線故障或主變壓器低壓側故障），CT 特性必須不會發生飽和現象，否則就需要選用更高規格等級的 CT。

若發電機為單元式連接（即機組與主變壓器之間不設斷路器），則 CT 特性等級可被降低，機組差流保護在電力系統關聯的故障事件中仍維持穩定性。在機組與主變壓器聯結系列，單元式連接的直流時間常數仍可應用。即使是選用更高規格等級的 CT 與大型 CTs 相符一致均可被要求在 CT 飽和自由變化不明確時予以替換。當飽和自由時間變化在事故開始之後如能受到限制（例如 150 毫秒），則可使更多的中級規格 CT 被替代通用。

如果 CT 飽和在某一可靠的程度被接受時，則造價成本令人滿意是唯一被流行通用的因素。應用負載在 CTs 兩側等效轉換，於飽和期間穩定度有效改善，如緣於磁化曲線寬限偏移不能被完全地消除而造成差流時，則無法保證非預期性跳脫不

會發生。

在數位保護內的積體飽和檢測電路提供一絕對安全穩健，發電機提供相對的少量短路電流，但直流偏移的持續期間是相當長久（冗長的直流時間常數所造成），因此在 CTs 內部磁通量上升趨於緩慢且飽和僅出現在某些時候之後（經常只在數個周波之後），飽和檢測電路能安全地偵察出外部事故，且啟動跳脫閉鎖延時。此閉鎖延時至少應容忍到外部事故清除，換句話說，假如所有運轉系統設備都在不延遲情況下動作清除事故，則閉鎖跳脫延時應耐受大約 150 毫秒；但如果後衛延時保護電驛必須被考量作為清除事故時，則被要求設定大約 500 毫秒。因此有了數位保護電驛的飽和檢測設備相對地可降低了 CT 規格。

#### 在單元式連接系統發電機典型數據

機組容量 MVA	10~500MVA
機組次暫態電抗 $X_d''$	10~25%
機組直流時間常數 $T_G$	70~100 毫秒
主壓變壓器短路電壓	10~20%
單元式直流時間常數 $T_U$	50~300 毫秒

例題 1：有關發電機差流保護 CT 特性已知在單元式系統情況下

機組容量：100MVA，6 kV

機組次暫態電抗  $X_d'' = 10\%$

直流電阻  $R_G = 0.13\%$  ( $T_G = 318$  毫秒)

主變壓器 6/230kV，120 MVA

短路電壓： $\mu_{X-T} = 15\%$

短路電壓歐姆的  $\mu_{R-T} = 0.3\%$  ( $T_T = 159$  毫秒)

CT 二次側負荷（電驛+引線導體）：

$R_B < 1VA$

試計算發電機於外部事故時確保 CT

特性穩定，假設運轉系統事故都在 150 毫秒內被隔離。

解：CT 匝比應匹配發電機額定電流

$$I_N = \frac{S_N}{U_N \cdot \sqrt{3}} = \frac{100,000 \text{KVA}}{6 \text{kV} \cdot \sqrt{3}} = 9623 \text{A}$$

選擇 CT 匝比為 10,000/1 A

初步檢驗事故影響機組 CT 特性穩定：

外部故障相關機組端輸出最大短路電流為  $I_{F-G}'' = 1.1 \cdot \frac{100}{X_d'' [\%]} \cdot I_{N-G} =$

$$1.1 \cdot \frac{100}{10} \cdot 9632 \text{ A} = 10.6 I_{N-CT}$$

被要求在不明確飽和自由變化採用高規格因子為：

$$K'_{TF} = 1 + \omega \cdot T_G = 1 + 314 \cdot 0.318 = 100$$

在此  $K'_{TF}$  值下求 CT 運轉過電流因子：

$$ALF' = \frac{I_F''}{I_{N-CT}} \cdot K'_{TF} = 10.6 \cdot 100 = 1060$$

一套典型 TPX 的 CT 選用  $P_N = 30 \text{VA}$  額定，內部負荷  $P_i$  按照廠家的數據被設定在 20% (6VA)。對 CT 額定精確極限因子演算為  $ALF = \frac{P_B + P_i}{P_N + P_i} \cdot ALF' =$

$$\frac{1+6}{30+6} \cdot 1060 = 206$$

$$\frac{1+6}{30+6} \cdot 1060 = 206$$

該一 CT 有 30VA， $ALF > 206$  是相當龐大，任何方法包括限制 150 毫秒的飽和自由變換應受檢驗：

$$K'_{TF}^* = 1 + \omega \cdot T_G \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{t_M}{T_G}} \right] =$$

$$1 + 314 \cdot 0.318 \left[ 1 - e^{-\frac{150}{318}} \right] = 39$$

$$ALF'^* = 10.6 \cdot 39 = 413 \text{ 及}$$

$$ALF^* = \frac{1+6}{30+6} \cdot 413 = 80,$$

此符合 CT 30VA， $n > 80$  仍顯現過

大。

當僅要求穩定於系統故障發生在高壓側，重新檢驗 CT 規格可降低到何種等級，在主變壓器低壓測事故非選擇性跳脫是可容忍的（主變在此類任何事故必須被切離，但更困難是故障指示無法選擇及決定故障原因）。

單元式機組的直流時間常數計算如下：

$$\text{求發電機阻抗：} Z_{N-G} = \frac{U_N [kV]^2}{S_{N-G} [MVA]}$$

$$= \frac{6^2}{100} = 0.36 \Omega = 360 \text{m}\Omega$$

$$X_d'' = 10\% \cdot 360 \text{m}\Omega = 36 \text{m}\Omega$$

$$R_G = 0.13\% \cdot 360 \text{m}\Omega = 0.47 \text{M}\Omega$$

$$\text{求變壓器阻抗：} Z_{N-T} = \frac{U_N [kV]^2}{S_{N-T} [MVA]}$$

$$= \frac{6^2}{120} = 0.3 \Omega = 300 \text{m}\Omega$$

$$X_T = 15\% \cdot 300 \text{m}\Omega = 45 \text{m}\Omega$$

$$R_G = 0.3\% \cdot 300 \text{m}\Omega = 0.9 \text{m}\Omega$$

發電機與主變壓器串聯：

$$T_U = \frac{L_G + L_T}{R_G + R_T} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{X_d'' + X_T}{R_G + R_T} =$$

$$\frac{1}{314} \cdot \frac{36 + 45}{0.47 + 0.9} = 188 \text{ms}$$

主變高壓測短路故障電流為

$$I_{F-close-in}'' = \frac{1.1 \cdot 6 / \sqrt{3} \text{KV}}{0.036 \Omega + 0.045 \Omega} = 47 \text{kA}$$

$$= 4.7 \cdot I_{N-CT}$$

$$\text{因此 } K'_{TF}^* = 1 + \omega \cdot T_U \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{t_M}{T_G}} \right]$$

$$= 1 + 314 \cdot 0.188 \left[ 1 - e^{-\frac{150}{188}} \right] = 34$$

針對抑制穩定案例（電網事故時 150 毫秒清除故障）一具 30VA 容量的 CT， $n > 30$  應是充分足夠的規格，相對而言卻是一具大型 CT。下列將敘明數位式保護電驛不會影響到 CT 穩定問題（同樣的事

故緊密關聯到發電機)，還能獲得合理的費用。

如選用西門子 7UM62 (內建積體飽和檢驗電路) 僅需要一高規格因子  $K'_{TF}=1.2$  相對於發電機端事故，其計算結果為：

$$ALF'^{**}=10.6 \cdot 1.2 = 13 \text{ 以及}$$

$$ALF^{**} = \frac{1+6}{30+6} \cdot 13 = 2.5$$

本例仍維持 30VA CT 及規格 CT TPX 1000/1,30VA,5P10 (實務上 CT 應被選擇為更小的 VA 值，其額定 5 或 10VA) 現在查驗選定 CT 是否進入飽和

發生故障緊鄰發電機：

合成超特性因子為

$$K''_{TF \text{ res.}} = \frac{ALF}{ALF^{**}} \cdot K'_{TF} = \frac{10}{2.5} \cdot 1.2 = 4.8$$

在事故期間 CT 暫態高規格因子  $K''_{TF}$

以時間抑制飽和自由轉變

$$K''_{TF} = 1 + \frac{\omega \cdot T_N \cdot T_S}{T_N - T_S} \cdot \left[ e^{\frac{t_M}{T_N}} - e^{\frac{t_M}{T_S}} \right] \text{ 對封閉式}$$

鐵構 CT 鐵芯而言， $T_S \gg T_N$

$$\text{上式可簡化為 } K''_{TF} = 1 + \omega \cdot T_N \cdot e^{\frac{t_M}{T_N}}$$

本例假設  $t_M = t_S$ ， $T_N = T_G$  則  $t_{S-Generator-fault} =$

$$T_G \cdot \ln \left[ \frac{\omega \cdot T_G}{\omega \cdot T_G - K''_{TF \text{ res.}} + 1} \right] =$$

$$0.318 \cdot \ln \frac{314 \cdot 0.318}{314 \cdot 0.318 - 4.8 + 1} = 12.3 \text{ms}$$

故障發生緊鄰電力系統

在本情境之下高規格因子朝向增大趨勢，相當於發電機輸出更低的短路電流。

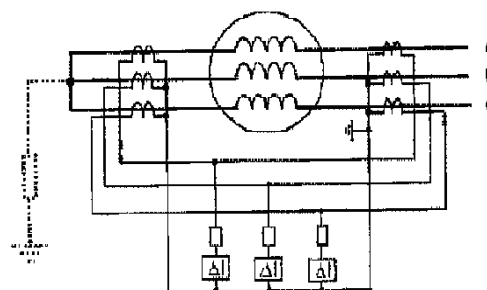
$$K'_{TF-Net-fault} = K'_{TF-Generator-fault} \cdot \frac{I''_{F \text{ Gen}}}{I''_{F \text{ Netz}}}$$

$$= 4.8 \cdot \frac{10.6 \text{KA}}{4.7 \text{KA}} = 10.8, \text{ 代入求得}$$

$$t_s = 0.188 \cdot \ln \frac{314 \cdot 0.188}{314 \cdot 0.188 - 10.8 + 1}$$

= 34ms，在德國線性化鐵芯 CTs (TPZ) 通常被應用於大型機組，它們的特性被選定具有「可獲得最大短路電流的飽和自由轉換」的性向，在此情況下 CT 應用無礙，但必須承受更高昂價格。

### 三、高阻抗差流保護



圖四 高阻抗各相間差流保護

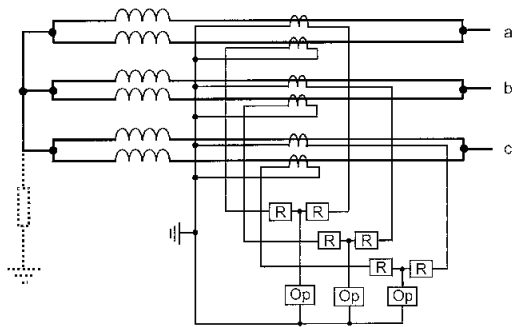
如圖四所示定型 TPS 的 CT 鐵芯遵照 IEC 6044-6 或遵照英國標準 BS 3938 的 X 級，必須提供同樣的轉換比值。以大型機組而言，這不會產生額外的成本，如同分離式鐵芯通常被應考量在任何故障事件中預作合理備援。

此保護系統啟動靈敏度通常被配置在 10%  $I_N$ ，當強大故障電流流經機組時，造成機組兩端 CT 二次側電流上升，此兩股電流必須被檢測，裝置一套抑制電壓 (開流體) 並聯到電驛如圖示：只要決定電驛啟動電壓門檻，在最壞情況下假設外部事故導致 CT 飽和，意即感應一最大電壓跨接到並聯電驛的兩端，產生等壓效應。

### 四、橫向差流保護

發電機各單相設計成兩並聯繞組 (如

水輪機)時，一套橫向差流保護便可派上用場，為符合本用途並聯繞組必須要分離為兩端子，在考量 CT 額外成本下通常適用於大型機組。此種保護方式優點在於並聯路徑之電流正確流向完全被監視到，且短路繞組匝繞故障都被偵測出來。在外部事故兩並聯繞組提供約略相等的相電流，CT 二次側電流產生一股循環電流於抑制繞組上；在內部事故包括短路匝繞，一股電流循環通過並聯繞組，CT 二次側電流通過差流電驛內部 Op (動作繞組) 回路引發跳脫。本設計機組保護接法如圖五所示：

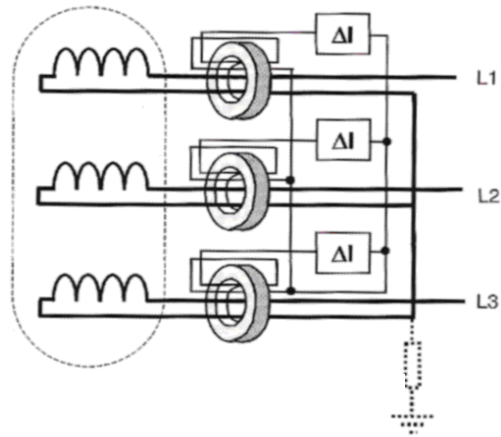


圖五 發電機橫向差流保護

為獲取檢測效益高靈敏度，電驛廠家應考量機組本身繞組的適度配置，從無載到額定情況下循環電流必須是極小化。CT 二次側電流  $< 2\% I_N$  在任何事故中都可被獲得，在外部短路等效的故障電流上升，但機組不存在阻尼繞組(damping winding)。若加入繞組間匹配效應，這些應不超過  $0.5\% I_N$ ，兩者合計設定  $2.5\% I_N$  應是合理值。(此相當於一套電驛設定  $5\% I_N$ ，如 CT 配置在並聯繞組通常為機組額定電流之一半)。至於高阻抗保護作為橫向差流保護也是可行的。

## 五、纜線嵌入 CT 的差流保護

在小型機組通常經由纜線外部裝嵌環狀 CT，一套安全且高靈敏度保護技術設計就可完成。此機組三相結構須 Y 型排列如下圖六所示：



圖六 自身平衡差流保護附屬纜線裝嵌 CT

各單相與機組中性線同時穿過 CT 一次側口徑，正常發電時，發電端子電流輸出至主變，中性線端子則自主變迴流至機組，完成一電流環路，因僅使用單具 CT 情況下故不存在 CT 匹配與 CT 飽和問題，因此單純的過流電驛即可受用，啟動門檻值可設定在機組額定電流的 2% 到 5%。當外部事故時，機組兩端電流流向如前述，差流現象不存在所以電驛不動作；如機組繞組故障則其中一端電流方向改變，導致差電流出現動作電驛。本保護範圍僅圍限於 CT 至機組區間，無法擴及 CT 至機組斷路器之區段，故鮮少被推廣應用。

## 六、機組差流接地故障保護

機組採用低阻抗中性點接地方式，接地故障電流較大必須快速清除，設計一套接地電流差動保護擷取機組端三相 Y 形電流之合成值與機組中性線零相電流做比對，此即將  $I_A + I_B + I_C = 3I_0$  數理概念實體

化。

這類型保護僅用在小型機組，因三相 Y 形 CT 僅作接地保護電驛單一用途，無法同時提供相間故障差流保護用途。在大型機組通常既能提供相間差流保護外，又能兼顧高靈敏度的

接地保護，這須應用特殊繞組使接地故障緊靠至三相端子，產生降低接地故障電流。

機組發生接地故障時，中性點零相電壓產生位移現象，有了靈敏設定來決定跳脫，但須防範保護誤動作於外部相間短路事故帶有大量故障電流，引發機組端不同程度的 CT 飽和，造成合成電流有誤差值出現。

理想的接地差流保護情況是存在於當合成電流被一鐵芯平衡 CT 以小轉換比值所提供，以下案例接地差流保護啟動靈敏度可以低到一次側 10A。

例題 2：設定相間及接地差流保護

已知：發電機 5MVA,4kV

$X_d''=10\%$ , 直流時間常數  $T_G=50\text{ms}$

中性點接地電阻(5.75Ω,400A)

CT 800/5A,5P20,15VA, $R_i=0.16\Omega$ ,

$P_i=4\text{VA}$  機組繞組接地故障保護必須涵蓋 90% 範圍。

首先檢測 CT 在外部事故時是否可能

飽和？ $I_{N-G} = \frac{5000\text{kVA}}{4\text{kV} \cdot \sqrt{3}} = 722\text{A}$

$\frac{I_F''}{I_{N-G}} = \frac{1.1 \cdot 10 \cdot 722}{800} = 9.93$

此需運算精確限制 CT 不明確飽和自

由變換因子： $ALF' = \frac{I_F''}{I_{N-G}}$

$(1+\omega \cdot T_G) = 9.93 \cdot (314 \cdot 0.05) = 156$

實際運算精確極限 CT 因子：

$$ALF' = \frac{P_N + P_i}{P_B + P_i} \cdot ALF = \frac{15+4}{1+4} \cdot 20 = 76$$

( $P_B=0.5\text{VA}$  為電驛+連接電纜估算值)

實務上高規格因子為：

$$K'_{TF} = \frac{ALF'}{I_F''/I_{N-G}} = \frac{76}{9.93} = 7.7$$

外部事故期間假設 CT 飽和

$$t_s = T_G \cdot \ln \left[ \frac{\omega \cdot T_G}{\omega \cdot T_G - K'_{TF} + 1} \right]$$

$$= 0.05 \cdot \ln \frac{314 \cdot 0.05}{314 \cdot 0.05 - 7.7 + 1} = 28\text{ms}$$

如選用數位電驛 7UM62 (西門子製) 僅須高規格因子  $K'_{TF} > 1.2$ , 簡易地依照上述指定要求, 至於分相差流保護設定啟動門檻為  $15\% I_N = 120\text{A}$ 。當機組發生接地故障時, 機組端輸出 400A, 相差流保護僅涵蓋  $1-120/400=70\%$  繞組。接地差流保護 7MU62 擁有設定  $I_N$  倍數從 0.01~1.00 範圍, 對 90% 保護範圍, 啟

動門檻設定必須為  $400/10=40\text{A}$ , 即  $40/800=0.05\text{A}$

有了這非常靈敏的啟動門檻, 加上期望 CT 於外部相間事故期間呈現飽和的臨界條件, 同時  $U_0$  釋放 ( $U_E > 10\% U_{\text{ph-E}}$ ) 必須被選定為一額外的準則, 如此電驛跳脫成為僅限接地事故時被活化運用。為求更進一步安全防禦非必要跳脫於短路電流通過期間, 接地差流保護應於過流保護啟動時被閉鎖。7UM62 可被程式化編輯, 使用者只要經由 CFC 設定邏輯功能, 就可增補供應一暫態閉鎖功能。

當過流保護 ( $I >$ ) 啟動, 接地差流保護立刻被閉鎖跳脫, 然後在短路被清除後, 復原 (re-set  $I >$ ) 需延遲一些時間 (暫態閉鎖時間) 約略 0.5 秒。當相過流保護擁有更高門檻來設定復原更快速於靈敏的接地故障保護, 顯然復原延緩是有必要的。

## 七、高阻抗抑制接地保護 ( 循環電流差動保護 )

如圖七所示：接線方式與正常接地差流保護相同，特殊的 TPS 等級的 CTs 依照 IEC 60044-6 或依照 BS 3938 X 等級都被要求，在本案例分相高阻抗保護方面具備這樣類似規格。一項機組標稱電流介於 5%~10% 啟動靈敏度能夠在 CT 飽和事件取得高安全度。儘管擁有高度啟動靈敏度然而 CTs 必須有一很小二次繞組電阻 ( 導體截面積大 ) 與小激磁電流 ( 鐵芯截面積大 )，茲說明如例題 3：高阻抗接地故障保護的結構

已知：發電機 5MVA, 4kV,  $X_d''=10\%$

中性點接地電阻(5.75Ω, 400A)

CT 800/1, 依照 BS 3938 X 級：

二次繞組電阻： $R_{CT2}=0.7\Omega$

磁化曲線如圖八所示：

試尋求 CT 特性及保護配置提供發電機繞組的 90% 接地故障保護範圍。

解：此發電機額定電流為：

$$I_{N-G} = \frac{5000kVA}{4kV \cdot \sqrt{3}} = 722A$$

階段 1-檢視外部事故期間穩定度：

如接地電流被中性點接地電阻限制於 400A 時，CT 飽和僅發生在相間故障。

在所有外部短路故障期間，三相電流必會增加為零值係緣於並聯關係，因此並無差流流向電驛或中性點 CT。

若發生單相 CT 飽和事件，則其他兩相關聯 CTs 將反應在二次側電阻之上，包括增加連接電纜負荷到電驛，但這些演變在此背景下可以被忽略掉，電壓提升跨接於飽和 CT 二次側電阻，形同跨接在高阻抗電驛。

針對三相故障 ( 最壞情況 ) 敘明如下：

$$\frac{I_{F-max}''}{I_{N-CT}} = \frac{1.1 \cdot 10 \cdot 722}{800} = 9.93$$

最大並聯電壓為：

$$U_{\Delta ED} = \frac{I_F''}{r_{CT}} \cdot R_{CT2} = \frac{9930A}{800/1} \cdot 0.7\Omega = 8.6V$$

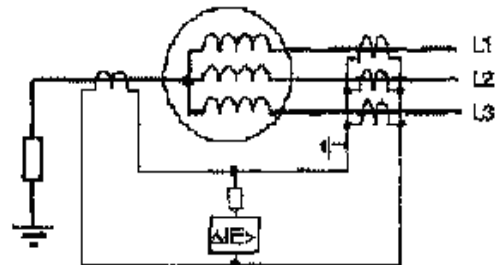
為安全起見電驛啟動門檻至少應該是 20% 以上，次高設定者在 7VH60 電驛選定 12V。

階段 2-檢視啟動靈敏度：

CT 的磁化電流在電驛設定門檻附近從磁化曲線 8mA 得知：電驛電流在啟動門檻(12V)依照圖八磁化曲線對照應為 20mA，轉換成一次側電流，啟動門檻為： $I_{min} = r_{CT} \cdot (n \cdot I_{mR} + I_R)$

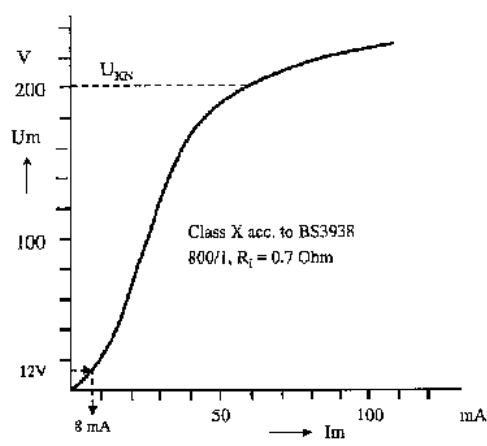
$$= \frac{800}{1} \cdot (4 \cdot 8 + 20) \cdot 10^{-3} = 41.6A$$

參照在某一機組端附近接地事故期間接地故障電流 400A，則  $(41.6/400) \cdot 100 = 10.4\%$ ，表示有效保護範圍可獲得 89.6%。



圖七 高抑制接地故保護





圖八 例題 3 機組配備 X 級 CT 磁化曲線

原理上曲膝點(knee-point)電壓將只有為 12V 的 2 倍，亦即為 24V，在電驛啟動電壓附近可以得知一小量激磁電流，某一 CT 選定  $U_{KN}=200V$ （大概相當於 TPX CT 5P20,10VA）。

階段 3-檢視在內部故障期間是否需要開流體抑制電壓：

有了 12V 電壓設定及激磁電流 20mA，電驛內部電阻能被計算出來  $12/0.02 = 600\Omega$ ，在某一接地故障理論上：假設 CT 飽和不被考慮的情況下，跨接電驛的電壓應可被推算出：

$$U_F = \frac{I_{E-max}}{r_{CT}} \cdot R_{i-RELAY} = \frac{400}{800/1} \cdot 600\Omega = 300V$$

如果 CT 飽和被考慮時，得到下列：

$$U_{peak} = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot U_{KN} \cdot U_F} = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot 200 \cdot 300} = 693V$$

此值遠低於 2kV 額定絕緣電壓峰值 (2.8kV)，因此無開流體需求。

## 八、結語

發電機是一部相當複雜的機器設備，它須要保護防禦許多各式各樣的故障類型，諸如：定子接地故障、短路故障、負載失衡事件、轉子接地故障...等。傳統上技術運用方式，針對每一故障指定一套特殊的保護電驛專責處理，結果大型機組經常須要 10~20 套龐大的保護系統來處置，不只如此還涉及到電廠的設備規模型態及保護備援系統的周延齊備而更加繁複。

近年來電腦科技精進神速再結和光網通訊科技，推動數位資訊傳輸到每個角落的速度可謂一日千里，因此在現代科技流風下保護電驛自然被研發改造為數位式電驛，具體整合系統資訊快速處理，強大軟體提供邏輯運作技術平台，統整主保護系統、備援保護系統集中內建在小規模僅只二套數位電驛，即具足發電機整體周全保護功能，完全顛覆傳統固有的窠臼。

大凡機組容量大於 1MVA 有時需要數位電驛快速清除兩相及三相短路故障，至於 5MVA 以上者就永遠須要應用數位電驛來保護機組運轉的安全及穩定。數位電驛目前已逐漸受國內電力業界重視及採用，未來可預見將成為保護系統的主流，本文著墨論述發電機數位保護在於喚起新保護科技時代已經來臨，洞察機先，奠定學習數位基礎，以迎合未來趨勢打造遠景。

## 參考文獻

Numerical Differential Protection Principles and Applications  
written by Gerhard Ziegler  
March 2005 SIEMENS