

配電系統接地保護應用技術之探討



鄭 強
台電試驗所



壹、前言

台灣地區配電系統採11.4 kV或22.8 kV兩類電壓等級以三相四線式〔Y接線〕供電，並以多重直接接地方式架設配電線路，故配電系統以二次輸電線〔69 kV〕、二次變電所、饋線、配電變壓器、二次〔低壓〕線路與接戶線為一整體，在送電品質與安全上須予全盤周詳考量為之；電力品質之定義分為：電壓之穩定性、頻率之穩定性、供電之連續性與安全性四大部分。由電力品質定義倡導之安全性而言，有賴積極性的必要措施來完成，例如架空線路的被覆化與地下電纜化，均在於隔離人與帶電導體接觸之機會；應用保護電驛於故障之偵測與事故之隔離，確保人員與設備安全並縮小停電範圍之要求。配電線路於保護裝置之設備基本要求如下：斷路器、C100 比流器三具、相間過電流電驛三具、接地過電流電驛一具暨相關電控回路等等。配電線使用的接地電驛有兩個

主要任務：一、接地事故保護。二、限制過大之不平衡負載電流。接地保護所安排之過電流電驛屬低能量〔Low energy over-current time relay〕過電流延時電驛，就接地事故發生時之故障電流，相間電驛與接地電驛均流過等量之比流器二次電流，接地電驛負責偵測阻抗接地之較小故障電流；直接接地故障時，高能量的故障電流大於電驛標置時，相間、接地電驛均動作，並由動作時間較快者指令斷路器跳脫清除故障電流。不平衡負載限制的主要目的在於抑制不平衡電流所引起之負相序分量比例，以維持系統之穩定性與機組之運轉安全。

保護電驛發展至今，依型式構造上之異同，可區分為電磁感應型與數位型兩大類，二者具備相同之保護任務，於應用功能項目上兩者有顯著的差異；電磁感應型保護電驛僅具有單一項目之功能，同時於更改電驛標置與維護試驗均須派員赴現場執行工作；數位電驛多屬

複合式有多重保護模組供選擇使用，更可結合自動控制系統發展應用模式，充分發揮保護藝術之境界。從保護是一種藝術的觀點出發，我們來探討電磁感應型過電流時間電驛利用分流裝置，自動化更改電驛電流分接頭〔Tap〕等效值之相關技術問題。

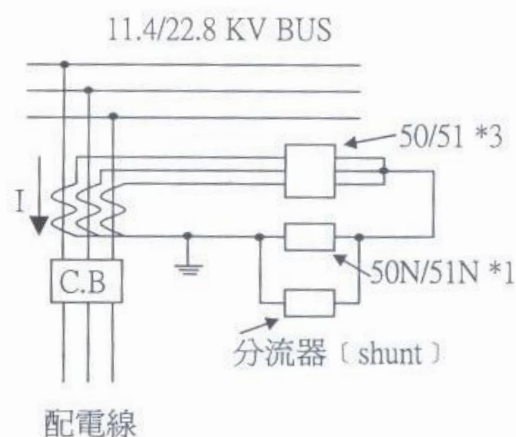
貳、三相四線制配電線路之零相序電流成因

三相四線制直接接地系統可靈活應用於單相或三相負載，當負載於平衡狀態下，中性線上並無電流通流，三相負載電流於不平衡狀態下，中性線上流有零相序分量之電流流動；若發生接地事故時，視接地阻抗高低，將產生較非接地系統高的接地故障電流，強大的故障電流所產生之熱量易引起供電設備損壞。故於此系統中於負載不平衡時，含有正相序、負相序與零相序的成份，故零相序電流成份產生的原因分屬負載特性與接地事故。於運轉作業上，不平衡負載與接地事故之零相序電流的處理方式、時效與原則並不相同；接地事故發生時要求電驛反應靈敏與快速，系統管制作業上依據負載管理條件，負載不平衡率，則有較寬的容忍裕度；若於保護電驛上僅監視電流一個要件，則無論於數位電驛或是電磁感應型過電流電驛均難以判別零相序電流之屬性。當零相序

電流大於接地過電流電驛標置時，所裝置之數位電驛或電磁感應型過電流電驛均會動作；如何區分兩著之異同，可由設備裝置目的選用適當功能之保護電驛發揮功效。

參、系統介紹

一、保護回路圖



圖一、保護回路示意圖

二、設備說明

- 1、比流器（C.T.）：C100、25VA、600/5 A。
- 2、相間過電流電驛：超反時性過電流電驛（extremely inverse time relay）。
- 3、接地過電流電驛：超反時性過電流電驛。
- 4、分流器（shunt）

肆、電磁感應型過電流電驛特性 (E.M. type overcurrent time relay)

過電流電驛的型式依時間特性可區分為：短時性〔short time〕、長時性〔long time〕、定時性〔definite time〕、次反時性〔moderately inverse time〕、反時性〔inverse time〕、極反時性〔very inverse time〕、超反時性〔extremely inverse time〕等共七種型式。

一、動作曲線定義：〔依據 ANSI P37.112公式〕

1、反時性：

$$T = TD \left[\frac{0.0103}{M^{0.02} - 1} + 0.0228 \right]$$

2、極反時性：

$$T = TD \left[\frac{3.922}{M^2 - 1} + 0.0982 \right]$$

3、超反時性：

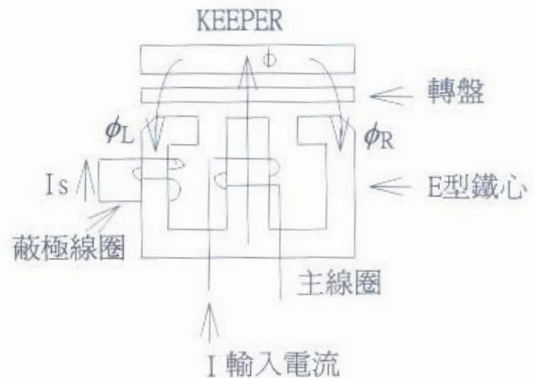
$$T = TD \left[\frac{5.64}{M^2 - 1} + 0.02434 \right]$$

T=時間〔秒〕

TD=時間刻度

M=始動值倍數

二、電磁感應型過電流電驛原理簡介



圖二、過電流電驛動作原理簡圖

1、工作原理

當電流輸入主線圈，在中央鐵心感應出磁通 ϕ ， ϕ 經過氣隙、轉盤到達衛鐵 (KEEPER)，然後經由 ϕ_L 、 ϕ_R 回到中央之鐵心，此三路磁通在轉盤上分別產生感應渦流。依據楞次定律其方向為：此渦電流所感應之磁通方向，在於阻止原磁通的變化。 $i\phi_L$ 、 $i\phi_R$ 分別與 ϕ_L 、 ϕ_R 相互作用，於轉盤上產生 F_L 與 F_R 之轉動力矩，其作用力之大小與方向之方程式如下：

$$\phi_R = \phi_M \sin \omega t$$

$$\phi_L = \phi_M \sin(\omega t + \theta)$$

$$\theta = \phi_L \text{ 與 } \phi_R \text{ 之相角差}$$

假設因感應所產生之渦電流所通過之路徑僅有電阻，則 $i\phi_L$ 與 $i\phi_R$ 之相對關係為：

〔1〕電磁感應線圈電路應用於非飽和線性區域暨飽和非線性區域。

〔2〕應用特性：（飽和電壓：約 10~30 VAC）

A、非飽和線性區域： $(L = \frac{d\phi}{di} = C)$

電驛於非飽和工作區域之動作時間與電流大小成指數關係縮短。

B、飽和非線性區域： $(L \neq \frac{d\phi}{di} \neq C)$

電驛於磁飽和工作區域之動作時間，就斷路器完成跳脫動作所需之時間而言；其毫秒間的動作時間差異已非屬重要。

2、動作力矩方程式：

$$i\phi_R = K_1 \frac{d\phi_R}{dt} = K_1 \phi_M \cos \omega t$$

$$i\phi_L = K_1 \frac{d\phi_L}{dt} = K_1 \phi_M \cos(\omega t + \theta)$$

$$F_R = K_2 \phi_R i\phi_L$$

$$= K_2 \phi_M \sin \omega t K_1 \phi_M \cos(\omega t + \theta)$$

$$= K_1 K_2 \cos(\omega t + \theta) \sin \omega t$$

$$F_L = K_2 \phi_L i\phi_R$$

$$= K_2 \phi_M \sin(\omega t + \theta) K_1 \phi_M \cos \omega t$$

$$= K_1 K_2 \phi_M^2 \sin(\omega t + \theta) \cos \omega t$$

由上式知 F_L 與 F_R 兩者方向相

反，故其淨力為：

$$F = F_R - F_L$$

$$= K_1 K_2 \phi_M^2 \sin \omega t \cos(\omega t + \theta)$$

$$- K_1 K_2 \phi_M^2 \cos(\omega t + \theta) \sin \omega t$$

$$= K_1 K_2 \phi_M^2 \sin(\omega t + \theta - \omega t)$$

$$= K \phi_L \phi_R \sin \theta$$

3、由動作力矩方程式得知，影響動作力矩大小之變數是：電流〔I〕與角頻率〔 ω 〕。

即電流增高或頻率升高均可提昇動作力矩。

三、過電流電驛特性試驗：〔參考標準作業程序〕

- 1、始動值
- 2、動作特性（倍率：時間特性）
- 3、量測伏--安負擔值（burden volt-amps）註一
- 4、記錄試驗數據。

註一：驅動電驛圓盤轉動之最小伏-安值。

伍、接地過電流時間電驛並聯分流器之應用

目的：以自動方式變更電驛標置。

方法：提高驅動電驛圓盤轉動之最小伏-安值。

一、分流器之種類與型式

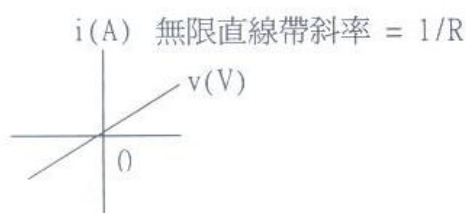
- 1、主動式：利用電力電子元件製作分流電路。〔說明略〕
- 2、被動式：利用 R、C、L 被動元件製作分流電路。
- 3、電容器於交流電路中易發生串、並聯共振，不予考慮。

二、被動式分流電路元件分析

1、電阻性元件：

〔1〕線性關係：理想電阻器

定義 $v = Ri$



〔2〕電阻值於交流電路中不受頻率變化影響。

〔3〕於交直流電路中皆為耗能元件，電阻值受溫度變化影響。

〔4〕瓦特數安全容量須為工作最大容量之四倍。

2、電感性元件：

電感器製作之兩種基本型式：

a. 空芯電感器：工作範圍易受設計頻率所限制，品質因數（Q值）較低。

b. 鐵芯電感器討論如下：

〔1〕電感定義

$$mmf = i_e = \int_{\tau} H \cdot dl$$

安培定律（Ampere's circuit law）

mmf = 封閉路徑 τ 之磁動勢（安培-匝）

i_e = 封閉路徑 τ 所包圍之瞬時總電流

H = 磁場強度之向量（安培 - 匝 / 米）

dl = 微小之路徑長度向量（米）

其中， θ 為 H 與 dl 之夾角，

磁通量 ϕ (Flux)

假設磁通量密度 B 與 H 之間具有線性關係，即

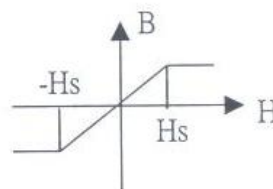
$$B = \mu H$$

B = 磁通量密度（偉伯 / 米）

μ = 導磁係數（Permeability）

若 $B = \mu H$ 式子成立，即表示磁通量密度與磁場強度成線性關係，則線圈上流過之電流與其所交鏈之磁通鏈成正比，定義電感為單位電流所產生之磁通鏈，即

$$L = \frac{\lambda}{i} \text{ (亨利)}$$



圖三、磁化曲線圖

磁化曲線圖顯示 H 加強時，磁通量密度 B 呈線性而升高，此段範圍稱為線性區間 (Linear region)。當 $H > H_s$ ($-H_s$) 時，磁性物質到達飽和 (Saturate) 即非線性區間，此時磁通量密度已不隨激磁電流增大而快速增加，且 B 增大之比率將趨近於空心式者之所為。電機工業廣泛應用電感原理於各項用途，在大多數情況下均應用其電磁特性於線性區域，以保

障磁通量密度與磁場強度呈線性關係，使得 L 為一常數。若 B 與 H 不呈線性關係時，則 L 就不再等於常數，其特性將難以數學方式分析與運用。

三、交流電路之並聯電路相關公式：

1、並聯阻抗計算

若 $v = di/dt$

則 $V = L(j\omega)I$

$$Z_R = R + j0 = R \angle 0^\circ$$

$$Z_L = j\omega L = 0 + j\omega L$$

$$= \omega L \angle 90^\circ$$

$$Z_{Ry} \angle \theta_1 = R + jX_L$$

$$Z_{Sh} \angle \theta_2 = R + jX_L$$

$$Z_{Ry} // Z_{Sh} = Z_{Ry} Z_{Sh} / (Z_{Ry} + Z_{Sh})$$

2、分流電路

$$I_{Ry} = \frac{Z_{Sh}}{Z_{Ry} + Z_{Sh}} I_T$$

$$I_{Sh} = \frac{Z_{Ry}}{Z_{Ry} + Z_{Sh}} I_T$$

$$\frac{I_{Ry}}{I_T} = \frac{Z_{Sh}}{Z_{Ry} + Z_{Sh}}$$

$$\frac{I_{Sh}}{I_T} = \frac{Z_{Ry}}{Z_{Ry} + Z_{Sh}}$$

3、 $L // L$ 並聯電路

$$\begin{aligned} (1) Z_t &= Z_{Ry} // Z_{Sh} \\ &= Z_{Ry} \times Z_{Sh} / (Z_{Ry} + Z_{Sh}) \\ &= (R_{Ry} + j\omega L_{Ry}) (R_{Sh} + j\omega L_{Sh}) \\ &\quad / (R_{Ry} + j\omega L_{Ry} + R_{Sh} + j\omega L_{Sh}) \\ Z_t &< Z_{Ry}, Z_{Sh} \end{aligned}$$

(2) 電感器並聯於保護電路之電驛上，首要考量分流裝置之飽和特性。

4、 $R // L$ 並聯電路

$$\begin{aligned} (1) Z_t &= Z_r // Z_{Ry} \\ &= Z_r \times Z_{Ry} / (Z_r + Z_{Ry}) \\ &= R(R_{Ry} + j\omega L_{Ry}) / (R + R_{Ry} + j\omega L_{Ry}) \\ Z_t &< Z_r, Z_{Ry} \end{aligned}$$

(2) 電阻器並聯於保護電路之電驛上之考量：額定瓦特容量。

A、須能承受電感電路於狀態改變時，反抗電勢之電壓暫態突波，免於電阻器燒毀。

B、阻抗接地事故發生時，故障電流中含有大量高次諧波成分，故障電流通過電阻式分流裝置之分電流比例將提高，延緩電驛動作時間。

C、同理負載特性引起之零相序電流，若含諧波成分亦同。

四、交流電路阻抗變數

分 路 元 件	阻 抗 變 數	組 合 方 式	備 註
1、過 流 電 驛	I, f	1//2	二者於線性區間不 改 變 交 流 阻 抗 特 性。
2、電感性 分流器	I, f	1//3	頻率改變時，交流 阻抗特性改變。
3、電阻性 分流器	I		

陸、討論與分析：

依據 C100 之比流器、分流器激磁特性、過電流接地電驛等特性資料分析如下。

一、比流器

配電線之保護電驛用比流器，於額定負擔下飽和電壓為 100 伏特，當比流器於非飽和區域中，二次側均可依匝比感應一次側電流，當比流器二次側負擔所產生的電壓降大於一百伏特時，由公式： $(L \neq \frac{d\phi}{di} \neq C)$ ，此時鐵心將發生磁飽和現象，亦即比流器一次側與二次側電流不呈線性關係；最極端的狀況將影響到保護電驛動作線圈無足夠之動作電流輸入，導致電驛無法偵測故障與清除事故，引發擴大事故範圍之嚴重後果。故比流器規格之選定需視故障電流之大小、電控迴路上裝置設備的特性而定。

二、電磁感應型過電流電驛

1、電磁感應型過電流電驛動作力矩由公式：

$$F = F_L - F_R = K \phi_L \phi_R \sin \theta$$

因磁力線依輸入電流的正弦函數變化，其相位 θ 固定不改變；於非飽和線性區域中，磁通量 ϕ 正比於主線圈上之電流大小，其靈敏度與常數 K 值有關。

2、超反時性過電流電驛轉盤之動作時間將依據下式動作：

$$T = TD \left[\frac{5.64}{M^2 - 1} + 0.02434 \right]$$

當電驛之動作線圈於飽和非線性區域中，磁通量 ϕ 與主線圈上之電流大小不成比例增加。電驛轉盤之動作時間將與上式之計算時間有所差異，但電驛完成動作之時間與斷路器完成跳脫動作所須之時間作比較，電驛轉盤之轉速快慢於毫秒之間的差異已可忽視。此乃電磁感應型過電流電驛之特點。

三、分流器特性

裝置輔助分流器的目的，若在於改變接地過電流保護電驛之電流標置，以提供作業上之需求，分流器的規格必須詳加考慮，避免影響電驛的可靠性與安全性。

- 1、電抗型之分流裝置於交流電路上的響應性能，優於電阻型之分流裝置。
- 2、電抗型之分流裝置於任何種類事故發生時，於過電流狀態下，其鐵芯磁通密度須於非飽和（線性）狀態下工作。
- 3、電抗型之分流裝置之飽和電壓必須大於過電流電驛，須考慮其品質因數 ($Q=\omega L/R$)。
- 4、電阻式須考量電阻溫度係數〔Temperature coefficient of resistance〕與功率容量。

柒、結論

配電系統因電網密佈於城鄉之間，天然災害、設備劣化與人為疏失引起之事故種類與型態繁多，系統中無論發生任何種類之事故，迅速地排除故障縮小停電範圍，維護公共安全是首要的任務。傳統的保護方式在可靠性、安全性、快速性與簡單性具有優良的性能，但於選擇性與靈敏性的要求則難以涵蓋週延，因環境變遷與用電型態隨著工業發展，與往昔有著顯著的差異。目前應以蒐集相關負載與故障電流資料數據為首要任務，利用交流電力之各項特性：如正常運轉狀態時電壓、電流之正相序、負相序、零相序、三個相序分量與故障狀態時的正相序、負相序、零相序三個相序分量分析與比較，針對不同特

質之故障種類（例如：高阻抗接地、線路斷落等）與負載限制條件制定保護模式，發展數位式電驛之運轉經驗，期以填補傳統保護系統在靈敏性與選擇性之不足，並於 SCADA 系統架構中，結合現代電子科技，經由電腦硬、軟體資訊充分支援下，建立全新的運轉模式。藉以達成提供用戶穩定的電壓、穩定的頻率與連續供電之品質目標。

參考資料：

- 1、電子裝置測試技術 全華圖書
蘇奕肇 編譯
- 2、中國電機工程師手冊
電力類配電篇
- 3、電工系統與電路
原著者 Charles Belove M M. Drossman
譯述者：薛雅全
科技圖書股份有限公司
- 4、電工學導論 東華書局
郭雙發 譯
- 5、電磁學 經世書局
黃敏章、李 訓 合譯，陳 卓 校訂