

以同步相量量測單元為基礎之超高壓雙迴路輸電線適應保護電驛設計

Design of a PMU-based Adaptive Protection Relay for EHV Double-Circuit Transmission Lines

計劃編號: NSC 89-2612-E-002-083

執行期限: 88年8月1日至89年7月31日

主持人: 劉志文 國立台灣大學電機工程學研究所

計劃參與人員: 陳清山、林穎宏 國立台灣大學電機工程學研究所

摘要:本文提出一種以同步相量量測單元為基礎之超高壓雙迴路輸電線適應保護電驛。將匯流排兩端量測所得之同步電壓與電流相量經由模態轉換來解耦合，推導出故障偵測及定位等兩個指標。利用這兩個指標 $|M|$ 與 $|D|$ 完成輸電線保護電驛設計。本文利用參數評估演算法，來克服線路參數不確定性對故障定位及偵測性能之影響。最後，利用EMTP/ATP作了大量之故障模擬，故障定位準確度達99.9%。此外，本保護電驛之響應時間非常快速，對於大部份之故障皆可維持在6毫秒左右。本文所提出之保護電驛技術其安全性與可靠性分別達99.99%與98.36%。

關鍵詞: 同步相量量測單元、保護電驛、故障定位

Abstract: This paper presents an adaptive relay for EHV double-circuit transmission lines based on Phasor Measurement Units (PMUs). Decoupling the synchronized voltage and current phasors by modal transformation, two novel and composite fault discrimination and location indices are derived. The proposed relay scheme utilizing indices $|M|$ and $|D|$ is described. To overcome the effects of line parameter uncertainties on the performance of the fault location and discrimination, a line parameter estimation algorithm is also developed. Extensive simulation studies using EMTP/ATP have verified that the accuracy of fault location estimation achieved can be even up to 99.9 % for most simulated cases. The designed relay is very fast and response time almost remained well within 6 milliseconds for most fault events. The security and reliability of the proposed relaying scheme can achieve even up to 99.99 % and 98.36 %, respectively.

Keywords: Phasor Measurement Unit (PMU), Protection Relay, Fault Location

I. 前言

基於經濟和電力品質觀點，輸電線故障定位與保護是相當重要的，一旦輸電線發生故障，引發的經濟損失將難以估計。一般輸電線長度達數十至數百公里，其間可能經過各式地形，於故障後的修復過程中，如何精確地找出輸電線故障位置，以利維修人員迅速排除故障而恢復供電，是減少停電時間的一大關鍵。此外，輸電線保護電驛之性能良窳是控制電力系統穩定度及電力品質的至要關鍵，保護電驛的動作時間超過臨界清除時間或是動作不正確時，不僅無法保護輸電線，甚至會引起系統崩潰，而電驛故障判定及響應速度愈快，則故障對系統的衝擊愈小，對於故障清除後之系統穩定度控制亦較容易。因此，本文致力於提出一套以同步相量量測單元為基礎的雙迴路輸電線適應保護電驛技術，並且兼具故障定位之功能。

以下整理目前文獻所提出之保護電驛技術，R. K. Aggarwal 等人[1]利用雙端電壓及電流配合輸電線方程

式，設計出差動型電驛。H. Y. Li 等人[2]提出利用全球定位系統來達到雙端電流同步，對輸電線作差動保護，但此法於長程輸電線時將產生問題，主要是線路電容之影響。Z. M. Radojević 等人[3]於時域作故障定位進而保護輸電線，但因忽略了線路電容效應，因此於長程輸電線時造成了可觀的定位誤差，高阻抗接地故障時，其性能更差。基於系統連接組態可能改變，進而影響測距電驛之性能，A. G. Jongepier 等人[4]針對雙迴路輸電線提出適應型測距保護，以因應電力系統之變化。M. Akke 等人[5]運用時域輸電線微分方程式法(Differential Equation Algorithm, DEA)來保護輸電線，缺點為比流器及比壓器之響應特性先天上有其限制，例如：操作頻寬、飽和等問題，且只能用於短程輸電線，但其響應速度平均值達 5 毫秒。此外，M. H. J. Bollen[6]提出以行進波為基礎之雙迴路輸電線保護，當故障發生時，對於大部分故障情形，電驛判知故障之速度快達 100 至 200 微秒，其缺點為如何偵測行進波，此外，如何判斷行進波是由內部故障所產生或干擾所造成、亦或是外部故障所引起，皆是待克服的問題。

II. 輸電線適應保護電驛系統架構

圖 1 即是輸電線適應保護電驛系統架構圖，主要是由兩大部分所組成，一是同步相量量測單元[7-8]，二是中央監控中心。其動作原理敘述如下：

- (1) 將同步相量量測單元放置於輸電線匯流排的兩端，利用取樣之電壓、電流離散點資料，計算出穩態基頻相量。
- (2) 透過通訊波道，將資料傳送到中央監控中心。藉由故障偵測與定位指標計算公式之運算，即可得到故障偵測指標 $|M|$ 及故障定位指標 $|D|$ 兩個指標值，先判斷指標 $|M|$ 是否大於零，一旦偵測到 $|M|$ 大於零，即判定此時輸電線發生了故障，之後檢查指標 $|D|$ 是否落於 0 與 1 之間，如果答案為肯定，檢查與前一筆 $|D|$ 值之偏差量，當偏差量小於設定值，則計數器加 1，重複此動作，於本論文中吾人設定，當連續維持 4 筆 $|D|$ 值偏差量小於設定值時，即可判定受保護之輸電線，發生內部故障，當確實有故障發生於保護區內部時，即可精確得知故障位置，且迅速地觸發斷路器以隔離故障。於判斷演算法流程中，當有任何階段判斷值與要求不合，這可能即是外部故障或暫態現象干擾所致，此時無須使斷路器跳脫。

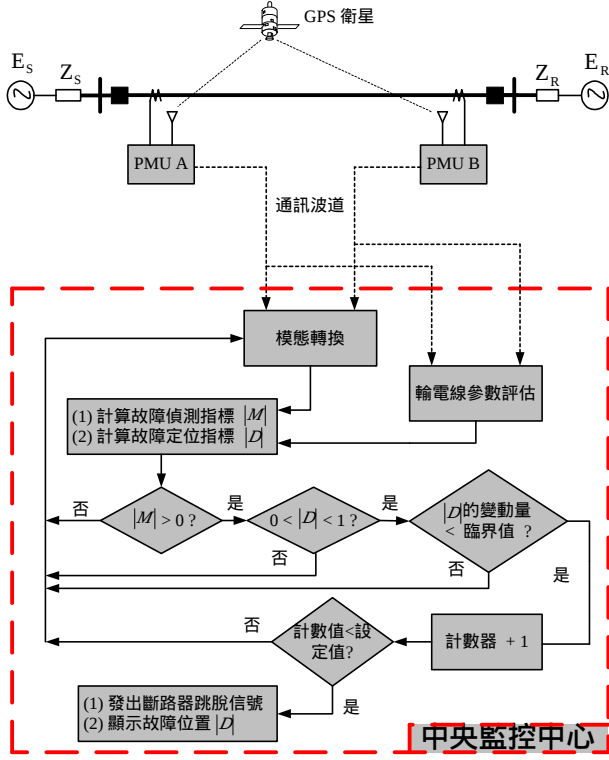


圖 1 輸電線適應保護電驛系統架構圖

- (3) 圖 1 中之輸電線參數評估方塊，為一定時執行的能。由 PMU 量測所傳回之輸電線匯流排兩端之電壓及電流相量，利用本文所提出之參數評估公式，計算出目前輸電線之參數，藉由此種量測法，對輸電線參數做監視、修正之動作，可以確保本文整體之故障定位與保護電驛性能。

III. 故障偵測及定位指標推導

本文將針對同桿共架之雙迴路輸電線，考慮換位與無換位兩種輸電線路型態，作故障偵測與定位指標之公式推導。

(a) 雙迴路換位型輸電線模型:

$$\frac{\partial}{\partial x} [V_{phase}] = [Z_{phase}] [I_{phase}] \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} [I_{phase}] = [Y_{phase}] [V_{phase}] \quad (2)$$

其中

$[V_{phase}]$ 及 $[I_{phase}]$ 均為 6×1 矩陣

$[Z_{phase}]$ 及 $[Y_{phase}]$ 均為 6×6 對稱矩陣

參考文獻[7-8]之方法，將雙迴路換位型輸電線，解耦成六條獨立的單相輸電線路。配合輸電線兩端之邊界條件，吾人可以推得 6 個模態之定位指標：

$$D_i = \frac{\ln\{[N_i]/[M_i]\}}{2\Gamma_{mode}(i,i)L}, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (3)$$

其中

$$N_i = \frac{V_{Rmode}(i,1) - Z_{Cmode}(i,i)I_{Rmode}(i,1)}{2} - e^{\Gamma_{mode}(i,i)L} \frac{V_{Smode}(i,1) - Z_{Cmode}(i,i)I_{Smode}(i,1)}{2} \quad (4)$$

$$M_i = e^{\Gamma_{mode}(i,i)L} \frac{V_{Smode}(i,1) + Z_{Cmode}(i,i)I_{Smode}(i,1)}{2} - \frac{V_{Rmode}(i,1) + Z_{Cmode}(i,i)I_{Rmode}(i,1)}{2} \quad (5)$$

$[V_{Smode}]$, $[I_{Smode}]$, $[V_{Rmode}]$ 及 $[I_{Rmode}]$ 均為 6×1 之模態電壓、電流矩陣。 $[Z_{Cmode}]$: 特性阻抗矩陣, $[\Gamma_{mode}]$: 傳播常數矩陣, 均為 6×6 之對角矩陣, $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 表示了矩陣元素位置之指標。

(b) 雙迴路無換位型輸電線模型:

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} V_{1a} \\ V_{1b} \\ V_{1c} \\ V_{2a} \\ V_{2b} \\ V_{2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} & z_{14} & z_{15} & z_{16} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} & z_{24} & z_{25} & z_{26} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} & z_{34} & z_{35} & z_{36} \\ z_{41} & z_{42} & z_{43} & z_{44} & z_{45} & z_{46} \\ z_{51} & z_{52} & z_{53} & z_{54} & z_{55} & z_{56} \\ z_{61} & z_{62} & z_{63} & z_{64} & z_{65} & z_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{1a} \\ I_{1b} \\ I_{1c} \\ I_{2a} \\ I_{2b} \\ I_{2c} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} I_{1a} \\ I_{1b} \\ I_{1c} \\ I_{2a} \\ I_{2b} \\ I_{2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} & y_{15} & y_{16} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} & y_{25} & y_{26} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} & y_{35} & y_{36} \\ y_{41} & y_{42} & y_{43} & y_{44} & y_{45} & y_{46} \\ y_{51} & y_{52} & y_{53} & y_{54} & y_{55} & y_{56} \\ y_{61} & y_{62} & y_{63} & y_{64} & y_{65} & y_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1a} \\ V_{1b} \\ V_{1c} \\ V_{2a} \\ V_{2b} \\ V_{2c} \end{bmatrix} \quad (7)$$

以更精簡的方式來表示得:

$$\left[\frac{dV_{phase}}{dx} \right] = [Z_{phase}] [I_{phase}] \quad (8)$$

$$\left[\frac{dI_{phase}}{dx} \right] = [Y_{phase}] [V_{phase}] \quad (9)$$

根據特徵值/特徵向量理論，吾人依舊可將(8)式與(9)式作解耦合之動作，得

$$\left[\frac{d^2 V_{mode}}{dx^2} \right] = [T_v]^{-1} [Z_{phase}] [Y_{phase}] [T_v] [V_{mode}] \quad (10)$$

其中

$$[V_{phase}] = [T_v] [V_{mode}], \quad [V_{mode}] = [T_v]^{-1} [V_{phase}]$$

$[T_v]$ 為 $[Z_{phase}] [Y_{phase}]$ 之特徵向量

令

$$[\Lambda] = [T_v]^{-1} [Z_{phase}] [Y_{phase}] [T_v] \quad \text{為一對角矩陣}$$

得到

$$\left[\frac{d^2 V_{mode}}{dx^2} \right] = [\Lambda] [V_{mode}] \quad (11)$$

同理解(9)式，因為 $[Z_{phase}] [Y_{phase}]$ 與 $[Y_{phase}] [Z_{phase}]$ 具有相同之特徵值，故得到

$$\left[\frac{d^2 I_{mode}}{dx^2} \right] = [\Lambda] [I_{mode}] \quad (12)$$

其中

$$[I_{phase}] = [T_i] [I_{mode}], \quad [I_{mode}] = [T_i]^{-1} [I_{phase}]$$

$[T_i]$ 為 $[Y_{phase}] [Z_{phase}]$ 之特徵向量

由上述方程式，綜合整理吾人得到:

$$[Z_{mode}] = [T_v]^{-1} [Z_{phase}] [T_i] \quad (13)$$

$$[Y_{mode}] = [T_i]^{-1} [Y_{phase}] [T_v] \quad (14)$$

$$[T_i] = [T_v^t]^{-1} \quad (15)$$

最後可得到(16)式與(17)式之形式:

$$\left[\frac{d^2 V_{mode}}{dx^2} \right] = [Z_{mode}] [Y_{mode}] [V_{mode}] \quad (16)$$

$$\left[\frac{d^2 I_{mode}}{dx^2} \right] = [Y_{mode}] [Z_{mode}] [I_{mode}] \quad (17)$$

配合輸電線兩端之邊界條件，吾人即可推得 6 個模態之定位指標:

$$D_i = \frac{\ln\{[N_i]/[M_i]\}}{2\Gamma_{mode}(i,i)L}, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (18)$$

其中

$$N_i = \frac{V_{Rmode}(i,1) - Z_{Cmode}(i,i)I_{Rmode}(i,1)}{2} \quad (19)$$

$$M_i = e^{[-\Gamma_{mode}(i,i)L]} \frac{V_{Smode}(i,1) - Z_{Cmode}(i,i)I_{Smode}(i,1)}{2} - \frac{V_{Rmode}(i,1) + Z_{Cmode}(i,i)I_{Rmode}(i,1)}{2} \quad (20)$$

而 $[V_{Smode}]$, $[I_{Smode}]$, $[V_{Rmode}]$ 及 $[I_{Rmode}]$ 均為 6×1 模態電壓、電流之矩陣。 $[\Gamma_{mode}]$ 為傳播常數矩陣，且 $[\Gamma_{mode}] = \sqrt{Z_{mode} Y_{mode}} = \sqrt{Y_{mode} Z_{mode}}$ ， $[Z_{Cmode}]$ 為特性阻抗矩陣， $[Z_{Cmode}] = \sqrt{\frac{Z_{mode}}{Y_{mode}}}$ ，其中 $[\Gamma_{mode}]$ 及 $[Z_{Cmode}]$ 均為 6×6 之對角矩陣， $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 表示了矩陣元素位置之指標。

IV. 參數評估演算法

(a) 換位型輸電線參數評估演算法

將匯流排兩端之取樣離散電壓、電流資料經由計算，得到各相序的電壓、電流相量，將其作模態矩陣轉換得到送電端及負載端之模態電壓、電流相量分別為 (V_{Smode}, I_{Smode}) 及 (V_{Rmode}, I_{Rmode}) ，此時六相輸電線已解耦合，設輸電線總長為 L ，得到六個獨立方程式:

$$[V_{Smode}] = \frac{1}{2} \exp[\Gamma_{mode}L] [V_{Rmode} + Z_{Cmode}I_{Rmode}] + \frac{1}{2} \exp[-\Gamma_{mode}L] [V_{Rmode} - Z_{Cmode}I_{Rmode}] \quad (21)$$

$$[I_{Smode}] = \frac{1}{2} [Z_{Cmode}^{-1}] \exp[\Gamma_{mode}L] [V_{Rmode} + Z_{Cmode}I_{Rmode}] - \frac{1}{2} [Z_{Cmode}^{-1}] \exp[-\Gamma_{mode}L] [V_{Rmode} - Z_{Cmode}I_{Rmode}] \quad (22)$$

其中

$[V_{Smode}]$, $[I_{Smode}]$, $[V_{Rmode}]$ 及 $[I_{Rmode}]$ 均為 6×1 之模態電壓、電流矩陣。

解式(21)與式(22)，最後得到各模態之特性阻抗矩陣為

$$Z_{Cmode}(i,i) = \left[\frac{V_{Smode}^2(i,1) - V_{Rmode}^2(i,1)}{I_{Smode}^2(i,1) - I_{Rmode}^2(i,1)} \right]^{1/2} \quad (23)$$

而傳播常數矩陣為

$$\Gamma_{mode}(i,i) = \cosh^{-1}[K_{mode}(i,1)]/L \quad (24)$$

其中

$$K_{mode}(i,1) = \frac{V_{Smode}(i,1)I_{Smode}(i,1) + V_{Rmode}(i,1)I_{Rmode}(i,1)}{V_{Smode}(i,1)I_{Rmode}(i,1) + V_{Rmode}(i,1)I_{Smode}(i,1)} \quad (25)$$

而 $[Z_{Cmode}]$, $[\Gamma_{mode}]$ 為 6×6 之對角矩陣， $[K_{mode}]$ 為 6×1 之矩陣， $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 表示了矩陣元素位置之指標。

(b) 無換位型輸電線參數評估演算法

考慮雙迴路無換位型輸電線，數學模型表示如下:

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} V_{1a} \\ V_{1b} \\ V_{1c} \\ V_{2a} \\ V_{2b} \\ V_{2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} & Z_{16} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} & Z_{26} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} & Z_{36} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} & Z_{46} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} & Z_{56} \\ Z_{61} & Z_{62} & Z_{63} & Z_{64} & Z_{65} & Z_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{1a} \\ I_{1b} \\ I_{1c} \\ I_{2a} \\ I_{2b} \\ I_{2c} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} I_{1a} \\ I_{1b} \\ I_{1c} \\ I_{2a} \\ I_{2b} \\ I_{2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} & Y_{16} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} & Y_{26} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} & Y_{36} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} & Y_{46} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} & Y_{56} \\ Y_{61} & Y_{62} & Y_{63} & Y_{64} & Y_{65} & Y_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1a} \\ V_{1b} \\ V_{1c} \\ V_{2a} \\ V_{2b} \\ V_{2c} \end{bmatrix} \quad (27)$$

將式(26)與式(27)經過一系列的求解微分方程式運算，最後可得到:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A/B \\ C/D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (28)$$

其中式(28)中之 A 、 B 、 C 與 D 四個矩陣均是由輸電線參數所組成的高度非線性方程式，利用 PMU 量測輸電線匯流排兩端之同步電壓 (V_S, V_R) 與電流 (I_S, I_R) 相量，傳回中央控制中心，透過數值疊代解法即可得到輸電線參數。

V. 模擬結果

A. 模擬系統

本文以 EMTP 建立雙迴路輸電線路模型來作各類故障模擬，進一步測試所提出保護電驛技術之性能。系統之單線圖如圖 2 所示，共有 T1 至 T4 四條輸電線，輸電線路外部的戴維寧等效電路參數如表 1 所示，其中 T1、T2 為同桿共架之雙迴路輸電線，亦是欲保護的輸電線路，其參數見表 2，線路 T3 與 T4 用來作為外部故障測試用，其參數值如表 3 所示。

B. 性能測試

(1) 線路參數評估

當線路有換位時，其線路參數評估準確性可達 99.9%，當輸電線路不換位時，利用式(28)即可完成評估功能，表 4 為非換位雙迴路線路參數之評估結果，利用變化線路電阻增加至原來的 1.2 倍，模擬溫升導致參數變化之效應。但由於利用非線性數值疊代解法，因此其最大誤差約 3.2%，但就整體之性能而言，其平均準確度依舊相當高，可滿足本文之需求。

(2) 故障定位性能

本文之定位距離皆已標么值為單位，其誤差量定義如下：

$$\text{誤差量}(\%) = (\text{計算值} - \text{實際值}) * 100 (\%)$$

圖 3 是當 T1 及 T2 為換位型雙迴路線路時，模態 3 之故障定位結果，其為故障後第三週之誤差量，吾人作了各類型之故障模擬，可發現一般故障之定位誤差相當小，只有單線開路故障時，出現較大之誤差，但隨時間加長，所有誤差量均可縮至一很小的值。圖 4 是當 T1 及 T2 為無換位型雙迴路線路時，T1 發生 a 相接地故障時，不同位置之模態 3 定位誤差結果。

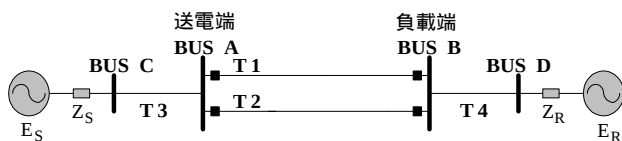


圖 2 模擬系統單線圖

表 1 電力網路外端戴維寧等效電路

Bus C	Bus D
$Z_0 = 2.738 + j10000 \text{ } [\Omega]$	$Z_0 = 0.833 + j5.118 \text{ } [\Omega]$
$Z_1 = 0.238 + j5.7132 \text{ } [\Omega]$	$Z_1 = 0.238 + j6.19 \text{ } [\Omega]$
$E_{CS} = 345 \text{ } [kV]$ (線對線)	$E_{DS} = 345 \text{ } [kV]$ (線對線)
相位角 ($0^\circ, -120^\circ, 120^\circ$)	相位角 ($-20^\circ, -140^\circ, 100^\circ$)

表 2 雙迴路輸電線路參數值

零序線路參數	正序線路參數
$R_0 = 0.1067 \text{ } \Omega/km$	$R_1 = 0.0059 \text{ } \Omega/km$
$L_0 = 2.2341 \times 10^{-3} \text{ } H/km$	$L_1 = 0.6341 \times 10^{-3} \text{ } H/km$
$C_0 = 8.7 \times 10^{-9} \text{ } F/km$	$C_1 = 18.4 \times 10^{-9} \text{ } F/km$

*忽略並聯電導

表 3 三相輸電線路參數值

零序線路參數	正序線路參數
$R_0 = 0.3479 \text{ } \Omega/km$	$R_1 = 0.0321 \text{ } \Omega/km$
$L_0 = 1.370 \times 10^{-3} \text{ } H/km$	$L_1 = 0.4730 \times 10^{-3} \text{ } H/km$
$C_0 = 3.80 \times 10^{-8} \text{ } F/km$	$C_1 = 3.80 \times 10^{-8} \text{ } F/km$

*忽略並聯電導

(3) 電驛響應性能

首先定義本論文保護電驛之跳脫判定時間：

電驛之跳脫判定時間 = 偵測出故障之時間 - 故障投入時間

值得注意的是，本文電驛之跳脫判定時間並不包含資料傳輸時間及斷路器放斷時間。本研究作了雙迴路換位型與無換位型兩種線路之故障模擬，並針對不同故障位置、不同故障電阻、不同負載等狀況，作了大量之測試，以下只展示幾個結果。圖 5 展示了單相接故障、相間短路故障、相間短路接地故障、三相短路接地故障的電驛跳脫判定時間，由於故障位置是不可預期的，因此模擬從 0.05(p.u.)至 0.95(p.u.)等不同故障位置之情況，從圖中可知本保護電驛性能不受故障位置及型態之影響。圖 6 展示在 0.2(p.u.)位置，發生不同

類型故障，且故障電阻之變化由 1 歐姆至 10k 歐姆時，保護電驛之跳脫判定時間，由圖中可看出本保護電驛性能幾乎不受故障電阻之影響。

表 4 非換位雙迴路線路參數之評估結果

實際值 (r)	估測值 (r)	誤差 (%)	實際值 (x)	估測值 (x)	誤差 (%)	實際值 (y)	估測值 (y)	誤差 (%)
5.72E-02	5.62E-02	1.77E+00	6.48E-01	6.49E-01	-1.51E-01	9.19E-06	9.18E-06	4.53E-02
5.08E-02	4.92E-02	3.13E+00	3.24E-01	3.25E-01	-2.00E-01	-2.53E-06	-2.54E-06	-1.97E-01
5.37E-02	5.27E-02	1.91E+00	2.68E-01	2.68E-01	0	-7.32E-07	-7.37E-07	-7.22E-01
4.52E-02	4.45E-02	1.44E+00	2.21E-01	2.21E-01	0	-9.52E-07	-9.61E-07	-1.02E+00
5.00E-02	4.84E-02	3.14E+00	2.38E-01	2.39E-01	-2.36E-01	-6.06E-07	-6.05E-07	1.86E-01
5.37E-02	5.25E-02	2.10E+00	2.33E-01	2.33E-01	0	-3.25E-07	-3.32E-07	-2.14E+00
6.93E-02	6.71E-02	3.11E+00	7.15E-01	7.16E-01	-1.26E-01	9.61E-06	9.62E-06	-2.54E-02
6.55E-02	6.37E-02	2.79E+00	3.80E-01	3.80E-01	0	-2.60E-06	-2.60E-06	0
5.00E-02	4.84E-02	3.14E+00	2.38E-01	2.39E-01	-2.35E-01	-6.06E-07	-6.05E-07	1.86E-01
5.83E-02	5.65E-02	3.11E+00	2.83E-01	2.83E-01	0	-8.06E-07	-8.04E-07	2.73E-01
6.51E-02	6.33E-02	2.81E+00	2.90E-01	2.90E-01	0	-6.39E-07	-6.37E-07	3.41E-01
8.51E-02	8.34E-02	1.99E+00	7.62E-01	7.62E-01	0	8.85E-06	8.87E-06	-1.92E-01
5.37E-02	5.25E-02	2.10E+00	2.33E-01	2.33E-01	0	-3.25E-07	-3.32E-07	-2.14E+00
6.51E-02	6.33E-02	2.81E+00	2.90E-01	2.90E-01	0	-6.39E-07	-6.37E-07	3.41E-01
7.49E-02	7.37E-02	1.55E+00	3.28E-01	3.29E-01	-1.81E-01	-1.19E-06	-1.20E-06	-6.44E-01
5.72E-02	5.62E-02	1.77E+00	6.48E-01	6.49E-01	-1.50E-01	9.19E-06	9.18E-06	4.53E-02
5.08E-02	4.92E-02	3.13E+00	3.24E-01	3.25E-01	-2.00E-01	-2.53E-06	-2.54E-06	-1.97E-01
5.37E-02	5.27E-02	1.91E+00	2.68E-01	2.68E-01	0	-7.32E-07	-7.37E-07	-7.22E-01
6.93E-02	6.71E-02	3.11E+00	7.15E-01	7.16E-01	-1.26E-01	9.61E-06	9.62E-06	-2.53E-02
6.55E-02	6.37E-02	2.79E+00	3.80E-01	3.80E-01	0	-2.60E-06	-2.60E-06	0
8.51E-02	8.34E-02	1.99E+00	7.62E-01	7.62E-01	0	8.85E-06	8.87E-06	-1.92E-01

Mode 3 之故障定位誤差統計表

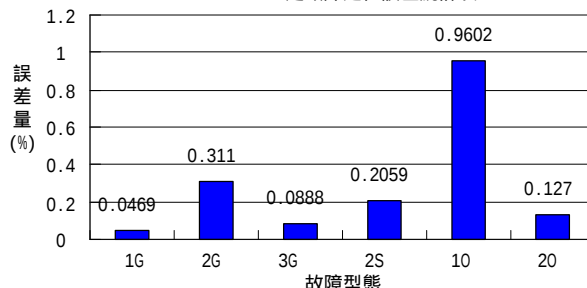


圖 3 換位型雙迴路輸電線故障定位誤差統計圖

Mode 3 故障定位誤差量

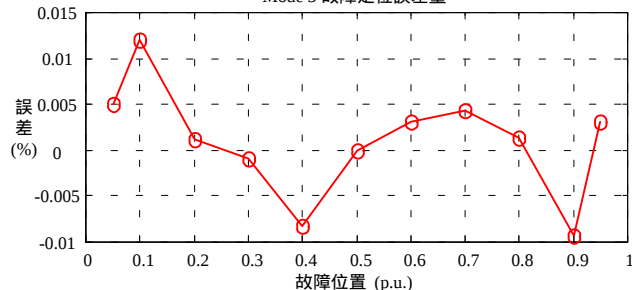


圖 4 無換位型雙迴路輸電線故障定位誤差圖

(4) 可靠性與安全性分析

首先定義可靠性(Reliability)[9]:

$$\text{可靠性} = \left[1 - \frac{\text{Number of failures to trip}}{\text{Total test events}} \right] \times 100\% \quad (29)$$

當設定值不當時，電驛系統可靠性可能就會非常差，亦即電驛會常常發生沒有即時發出訊號，使斷路器跳脫之事件。本文總共模擬 434 個故障，選用 5 組電驛設定值，作電驛可靠性測試，表 5 為 Mode 3 之可靠性測試結果，而 0.0291 為本文所使用之電驛跳脫設定值，其可靠性為 98.62% 至 99.77%，只有 6 個故

障，其偵測時間會超過 1 個週期。經由上述之分析，吾人得知適當地選擇電驛跳脫設定值，可以使保護電驛系統，具有較佳之響應，設定值太大或太小均不洽當。

定義安全性(Security)[9]:

$$\text{安全性} = \left[1 - \frac{\text{Number of incorrect operations}}{\text{Total test events}} \right] \times 100 \% \quad (30)$$

當發生外部故障時，保護電驛是不應該動作的，但是如果電驛跳脫設定值太大，則可能發生誤動作，本文作了大量的外部故障測試，驗證其安全性可達 99.9%之性能，即不會有誤動作之情形。

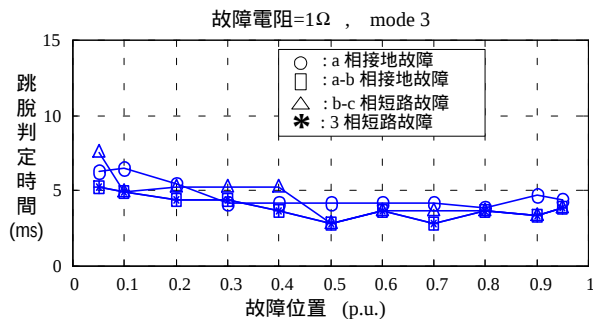


圖 5 不同故障與型態時，電驛響應時間圖

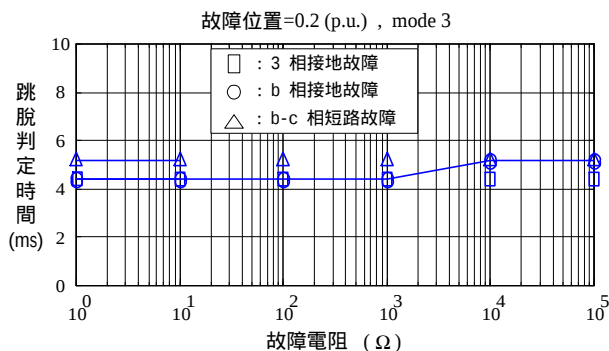


圖 6 不同故障電阻時，電驛響應時間圖

表 5 可靠度測試結果

statistical results		Threshold of D	total tests	success	failure	Reliability (%)
specified decision-limited periods	1.5 cycle	0.0354	434	433	1	99.77
		0.0291	434	433	1	99.77
		0.0195	434	430	4	99.07
		0.0108	434	422	12	97.24
		0.0041	434	396	38	91.24
	1.2 cycle	0.0354	434	431	3	99.31
		0.0291	434	431	3	99.31
		0.0195	434	427	7	98.39
		0.0108	434	417	17	96.08
		0.0041	434	387	47	89.17
	1 cycle	0.0354	434	429	5	98.85
		0.0291	434	428	6	98.62
		0.0195	434	422	12	97.24
		0.0108	434	410	24	94.47
		0.0041	434	361	73	83.18

VI. 結論

本文提出超高壓雙迴路輸電線適應保護電驛系統之完整架構，其為同步相量量測技術之應用，運用參數評估方法，使用量測之同步資料計算輸電線參數，由模擬結果可知，於換位型線路時，所估測之線路參

數值是相當的準確，而對於無換位型輸電線路，由於數值疊代問題，存在些許之誤差，藉此功能可在輸電線未故障前作線上校正，以適應不同的環境變化，進而達到適應性之功能，本法可有效地解決輸電線參數不確定性所增加之故障定位誤差，進而維持保護電驛之性能。文中提出之保護演算法，由 EMTP 模擬結果可知具有性能極佳的跳脫決策時間，對於各種不同的故障型態、故障電阻、故障位置、故障前負載、等效電源內阻，平均響應時間約 6 毫秒(約三分之一週期)。而定位性能無論於輸電線為換位型或無換位情況，皆可有高達 99.9%的準確性，總而言之，只要輸電線參數正確，即可有一模態轉換矩陣，可將輸電線之耦合行為作解耦動作，經過計算即可算出故障位置，因此輸電線是否換位，對本演算法是不太有影響的，此外，採用輸電線之精確模型，因此對於實際輸電線路而言，本文是沒做任何假設的。

VII. 參考文獻

- [1] R. K. Aggarwal and A. T. Johns, "A Differential Line Protection Scheme for Power Systems Based On Composite Voltage and Current Measurements", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 4, No. 3, July 1989, pp. 1595-1601.
- [2] H. Y. Li, E. P. Southern, P. A. Crossley, S. Potts, S. D. A. Pickering, B. R. J. Caunce and G. C. Weller, "A New Type of Differential Feeder Protection Relay Using the Global Positioning System for Data Synchronization", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 12, No. 3, July 1997, pp. 1090-1097.
- [3] Z. M. Radojević, V. V. Terzija and M. B. Djurić, "Multipurpose overhead lines protection algorithm", *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 146, No. 5, September 1999, pp. 441-445.
- [4] A. G. Jongepier and L. van der Sluis, "Adaptive Distance Protection of a Double-Circuit Line", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 9, No. 3, July 1994, pp. 1289-1297.
- [5] M. Akke and J. S. Thorp, "Some Improvements In The Three-Phase Differential Equation Algorithm For Fast Transmission Line Protection", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 13, No. 1, January 1998, pp. 66-72.
- [6] M. H. J. Bollen, "Traveling-wave-based protection of double-circuit lines", *IEE Proceedings-C*, Vol. 140, No. 1, January 1993, pp. 37-47.
- [7] J. A. Jiang, J. Z. Yang, Y. H. Lin, C. W. Liu, and J. C. Ma, "An Adaptive PUM Based Fault Detection/Location Technique for Transmission Lines, Part I: Theory and Algorithms", *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1999.
- [8] J. A. Jiang, Y. H. Lin, J. Z. Yang, T. M. Too, C. W. Liu, "An Adaptive PUM Based Fault Detection/Location Technique for Transmission Lines, Part II: PMU Implementation and Performance Evaluation", *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1999.
- [9] Working Group D5 of the Line Protection Subcommittee, Power System Relaying Committee, "Proposed Statistical Performance Measures for Microprocessor-Based Transmission -Line Protective Relays, Part I: Explanation of Statistics", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, No. 1, January 1997, pp.134-143.