

取樣頻率對數位測距電驛保護之影響

The Effect of Sampling Frequency on Digital Distance Protection

台電新桃供電區營運處運轉課

孫政啓

國立臺灣工業技術學院電機工程技術系

吳瑞南

摘要

數位式保護電驛需要準確的濾波與電驛演算法，藉以使得保護系統更為安全、可靠。

當系統發生故障時，系統頻率將產生偏移；此時若以固定取樣頻率取樣，將可能對數位保護電驛演算法的準確性造成影響；故本文嘗試根據系統實際頻率，利用軟體達成鎖相迴路功能，隨時調整取樣頻率，以期增進濾波之準確性。

文中以全周期遞迴式離散傅立葉轉換演算法濾波，應用於三種不同的測距演算法，而比較得出以第一種測距演算法較佳；而後，再評估調整取樣頻率之效果，以及對數位測距電驛保護所造成的影響，結果顯示，其確能增進數位保護電驛的準確性。

簡介

絕大多數的數位電驛與監控系統應用中，多假設系統頻率固定，且取樣頻率亦為固定不變。這個假設在系統正常時足可適用，但當系統不正常時，例如：發生嚴重故障，或重要電源跳脫電力不足時，所導致的系統頻率變動；或當無故障發生，因電力潮流關係，造成動態不穩定，甚而

產生低頻振盪現象，此時固定的取樣頻率便將可能影響量測的準確，進而影響保護動作的可靠度。

既然系統實際頻率產生變動，則針對固定頻率所定的每周期取樣點數即會不符，而為得每周期固定間隔取樣，而使每週期取樣點數一定，調整取樣間隔應可使取樣與濾波後信號大小更為準確。

在電路上，是以達成相位同步功能的鎖相迴路（Phase Locked Loop，PLL）達，追隨輸入信號變化，同步改變輸出取樣頻率，參 [1] [2]。而若能以程式模擬，以軟體達成此一功能，可用各種測試信號加以驗證，評估其效益；故本文將針對此構想提出演算法則，並應用於濾波與測距演算法，比較其差異，藉以選用較佳性能的演算法，結合鎖相迴路功能，使電驛整體性能更為精進。

數位測距電驛保護

測距保護電驛廣泛使用於輸電線之保護，尤其是長程高壓的輸電線快速保護，兼具準確度與速度，應用於輸電網路之保護協調，更有其優點與不可替換性。圖1所示為數位測距保護之演算法流程圖。

濾波演算法

本文濾波演算法乃採用全周期遞迴式離散傅立葉轉換演算法(Full cycle recursive Discrete Fourier algorithm, Full RDFT)，其性能頗佳，較為常用[3]；考慮若以 y_L 代表目前資料窗的最新取樣值， y_o 代表前一資料窗的最舊取樣值，則全周期式傅立葉演算法僅需取 y_L 與 y_o 的差值，加上前一資料窗結果 $\hat{Y}^{old}$ ，遞迴用於最新資料窗結果

$\hat{Y}^{new}$ ，如(1)(2)兩式。

基本波之實部份

$$\hat{Y}_c^{new} = \hat{Y}_c^{old} + \frac{2}{N} [y_L - y_o] \cos(L\theta) \quad (1)$$

虛部份

$$\hat{Y}_s^{new} = \hat{Y}_s^{old} - \frac{2}{N} [y_L - y_o] \sin(L\theta) \quad (2)$$

其中： N =每週期取樣點數； $L=1, 2 \dots 12$ ，
1, 2...循環；

$$\theta = \frac{2\pi}{N}$$

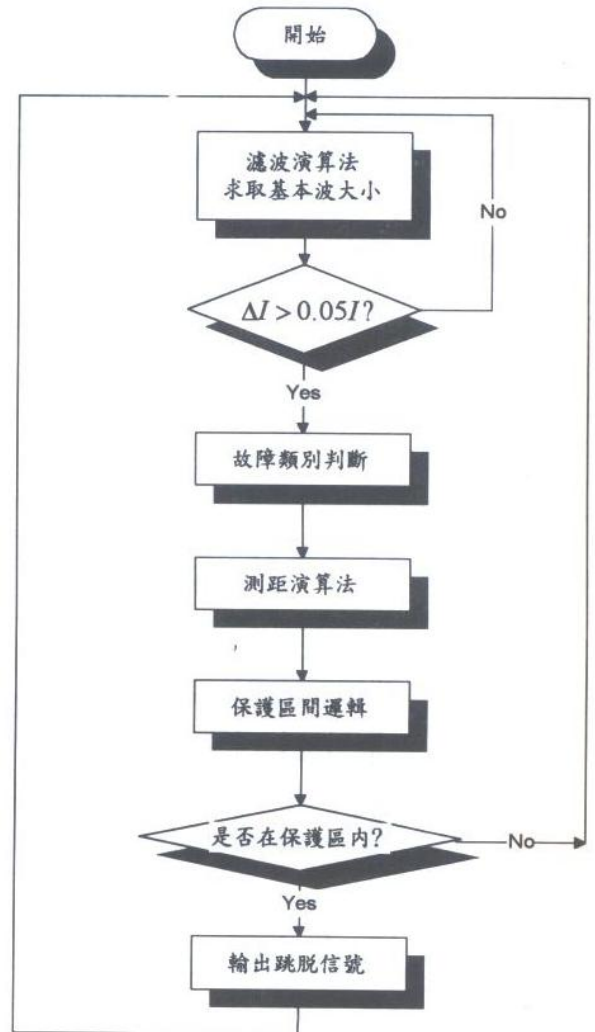


圖1 數位測距保護演算法流程圖

故障的檢測與類別判斷

故障的檢測與類別判斷步驟，可使數位測距電驛(藉以選用相關系統量，用於測距計算)兼具相間保護與接地保護

功能，其方法如下[4]。

比較相鄰周期相對應的信號點取樣值，當電流大小變動突然超過5%，判定為有故障發生，進入故障類別判斷副程式，方法如表1；考慮零相電流成份，則其相電流變化量為

$$\Delta I_a = I_a - I_L - I_0 \quad (3)$$

$$\Delta I_b = I_b - I_L - I_0 \quad (4)$$

$$\Delta I_c = I_c - I_L - I_0 \quad (5)$$

其中

I_L ：故障前負載電流

I_0 ：零相電流大小

表1 故障類別判定法則

故障類別	AG	BG	CG	AB	BC	CA
				ABG	BCG	CAG
$ \Delta I_a > 2 \Delta I_b $	×					×
$ \Delta I_a > 2 \Delta I_c $	×			×		
$ \Delta I_b > 2 \Delta I_a $		×			×	
$ \Delta I_b > 2 \Delta I_c $		×		×		
$ \Delta I_c > 2 \Delta I_a $			×		×	
$ \Delta I_c > 2 \Delta I_b $			×			×

AG：A相對地故障；BG：B相對地故障；CG：C相對地故障。

AB、ABG：AB相間故障或雙相對地故障；BC、BCG：BC相間故障或雙相對地故障；CA、CAG：CA相間故障或雙相對地故障。

×：表示不等式成立。例如，當同時滿足 $|\Delta I_a| > 2|\Delta I_b|$ 及 $|\Delta I_a| > 2|\Delta I_c|$ ，則判定為A相對地故障。若不滿足上述條件者，則判定為三相故障；雙相短路或雙相接地板故障，則由零序電流之有無來判斷，確定故障發生後，進入測距演算法副程式。

測距演算法

由於CT飽和失真、故障電阻及故障前負載潮流的未知，使得獲知故障確切位置並不容易，故有不少學者提出一些解決的方法。本文參考三篇不同學者所發表的演算法，簡單地加以介紹，並加以模擬。圖2所示為本文所介紹及電磁暫態程式(EMTP)所模擬之電力系統輸電線接地故障等效圖。

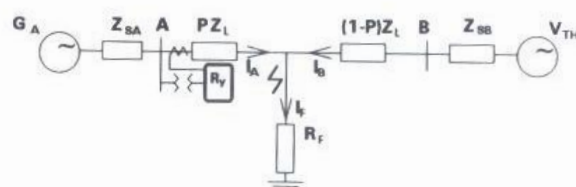


圖2 電力系統輸電線接地故障等效圖

文中

P ：電驛至故障點距離(以線路總長的百分比表示)

V_F ：故障點電壓

I_F ：故障電流

Z_L ：線路阻抗值

R_F ：接地故障電阻

I_F ：接地故障電流

ΔV_A ：電驛端故障前電壓與故障後之電壓差

ΔI_A ：電驛端故障後與故障前之電流差

I_{AF} ：電驛 A端所貢獻之故障電流成份

Z_C ：突波阻抗

Z ：輸電線單位長度阻抗

Z_S ：輸電線各相單位長度自阻抗
(Self Impedance)

Z_m ：輸電線相間單位長度互阻抗
(Mutual Impedance)

γ ：傳播常數

I_m ：虛部分量

$*$ ：共軛

I_L ：故障前負載電流

K ：故障電流分佈因素(電驛A端所貢獻)

θ ：故障電流分佈因素之相角

ϕ_L ：線路阻抗之相角

法一：

Takagi等[5]提出一種測距方法，其假設故障點電流與電驛端所量得電流同相，可推導計算得到電抗值，以之用來決定故障距離。

則故障距離 x 可導出如下式：

$$x = \frac{I_m(V_A \times \Delta I_A^*)}{I_m(Z I_A \times \Delta I_A^*)} \quad (6)$$

所以 $P = x / \text{線路全長}$

表2 不同故障類別法一所需使用電壓、電流、阻抗量

故障類別	V_A	I_A	ZI_A
AG	V_a	ΔI_a	$Z_m I_a + Z_s I_b + Z_m I_c$
BG	V_b	ΔI_b	$Z_m I_a + Z_m I_b + Z_s I_c$
CG	V_c	ΔI_c	$Z_m I_a + Z_m I_b + Z_s I_c$
AB ABG	$V_a - V_b$	$\Delta I_a - \Delta I_b$	$(Z_s - Z_m) I_a - (Z_s - Z_m) I_b$ $(Z_s - Z_m) I_a - (Z_s - Z_m) I_b$
BC BCG	$V_b - V_c$	$\Delta I_b - \Delta I_c$	$(Z_s - Z_m) I_b - (Z_s - Z_m) I_c$ $(Z_s - Z_m) I_c - (Z_s - Z_m) I_a$
CA CAG	$V_c - V_a$	$\Delta I_c - \Delta I_a$	$(Z_s - Z_m) I_c - (Z_s - Z_m) I_a$ $(Z_s - Z_m) I_c - (Z_s - Z_m) I_a$
ABCG	$V_a - V_b$	$\Delta I_a - \Delta I_b$	$(Z_s - Z_m) I_a - (Z_s - Z_m) I_b$

表3 不同故障類別法二所需使用電壓、電流量

故障類別	V_A	I_A
AG	V_a	ΔI_a
BG	V_b	ΔI_b
CG	V_c	ΔI_c
AB或 ABG	$V_a - V_b$	$\Delta I_a - \Delta I_b$
BC或 BCG	$V_b - V_c$	$\Delta I_b - \Delta I_c$
CA或 CAG	$V_c - V_a$	$\Delta I_c - \Delta I_a$
ABCG	$V_a - V_b$	$\Delta I_a - \Delta I_b$

法二：

Wiszniewski[6]提出另一種測距方法，其考慮故障點電流與電驛端所量得電流不同相，加以補償修正。

$$\text{令 } \frac{I_A - I_L}{I_A e^{j\theta}} = a + jb$$

$$PX_L = X_A - \frac{R_A \tan \phi_L - X_A}{\left(\frac{a}{b}\right) \tan \phi_L - 1} \quad (7)$$

求得P。

法三：

Rockfeller等[7]亦提出一種測距方法，其考慮補償遠端流入電流所增加視在電抗值的誤差，用以決定故障距離。

$$P^2 - PK_1 + K_2 - K_3 R_F = 0 \quad (8)$$

求得P。

其中

$$K_1 = \frac{V_A}{I_A Z_L} + 1 + \frac{Z_{SB}}{Z_L}$$

$$K_2 = \frac{V_A}{I_A Z_L} \left(\frac{Z_{SB}}{Z_L} + 1 \right)$$

$$K_3 = \frac{I_{FA}}{I_A Z_L} \left(\frac{Z_{SA} + Z_{SB}}{Z_L} + 1 \right)$$

表4 不同故障類別法三所需使用電壓、電流量

故障類別	V_A	I_A	I_{FA}
AG	V_a	$I_a + k_0 I_0$	$\frac{3}{2}(\Delta I_a - I_{0a})$
BG	V_b	$I_b + k_0 I_0$	$\frac{3}{2}(\Delta I_b - I_{0a})$
CG	V_c	$I_c + k_0 I_0$	$\frac{3}{2}(\Delta I_c - I_{0a})$
AB、ABG	$V_a - V_b$	$I_a - I_b$	$\Delta I_a - \Delta I_b$
BC、BCG	$V_b - V_c$	$I_b - I_c$	$\Delta I_b - \Delta I_c$
CA、CAG	$V_c - V_a$	$I_c - I_a$	$\Delta I_c - \Delta I_a$
ABCG	$V_a - V_b$	$I_a - I_b$	$\Delta I_a - \Delta I_b$

$$\text{其中 } K_0 = \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{Z_{1L}}$$

調適取樣頻率原理

傳統上以電路達成相位同步的鎖相迴路(Phase Locked Loop)功能，追隨輸入信號，同步改變輸出取樣頻率。這裡嘗試以軟體達成此一功能，節省所需硬體成本，如圖3為所使用之鎖相迴路控制方塊圖。

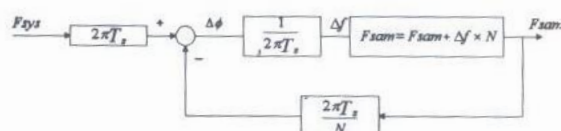


圖3 鎖相迴路方塊圖

其中

Fsys：系統實際頻率

Fsam：調整後取樣頻率

Ts：前後兩點間取樣間隔的時間

 $\Delta\phi$ ：頻率變動所導致的相位差 Δf ：求出之頻率變動值

N：每週期取樣點數

頻率之估測

本文採用全周期式離散傅立葉轉換演算法，移去諧波及直流成份，再結合相位差法做頻率之量測[8]，此法經不同學者評估比較，皆證明其不論在速度與準度上都較為優異[9][10]。

此法首先須求得周期信號，如系統電壓正序成份之相量值，乘上對應之時延。在正常情況下，任一點取樣值大小及相角均相同，但當系統有擾動發生時，將使系統頻率產生變動；例如當大型機組跳機(將

使系統頻率下降)或當重要輸電線路發生三相故障(將使系統頻率上升)，這時利用此法求得之大小及相角均將改變，此變動值再應用相位差法，即可求得變動之頻率值，且這裡應用三相電壓計算處理，得正序成分用於頻率演算，較之單相信號準確，若以 V_{aL} 、 V_{bL} 、 V_{cL} 分別代表 a、b、c 三相電壓目前資料窗的最新取樣值， V_{ao} 、 V_{bo} 、 V_{co} 代表前一資料窗的最舊取樣值，將前一資料窗計算所得結果實部成份 V_{1c}^{old} ，虛部成份 V_{1s}^{old} ，加上乘以固定時延後之最新取樣值成份，遞迴用於最新資料窗結果實部成份 V_{1c}^{new} ，虛部成份 V_{1s}^{new} ，應用之數學式如下：

$$V_{1c}^{new} = V_{1c}^{old} + 2/12 \{ (V_{aL} - V_{aC}) \sin L \Theta + (V_{bL} - V_{bC}) \sin (L+4) \Theta + (V_{cL} - V_{cC}) \sin (L-4) \Theta \} \quad (9)$$

$$V_{1s}^{new} = V_{1s}^{old} + 2/12 \{ (V_{aL} - V_{aC}) \cos L \Theta + (V_{bL} - V_{bC}) \cos (L+4) \Theta + (V_{cL} - V_{cC}) \cos (L-4) \Theta \} \quad (10)$$

因而可應用相位差法得到頻率變動值

$$\frac{\Delta \phi}{\Delta t} = \frac{\tan^{-1}[(V_{1s}^{new} - V_{1s}^{old}) / (V_{1c}^{new} - V_{1c}^{old})]}{1/fN} = \Delta \omega = 2\pi \Delta f \quad (11)$$

調適取樣頻率

得知輸入信號頻率變動情形，進而可利用回授的觀念，改變取樣觸發間隔，調整取樣時間，即可達成調適取樣頻率功能[11][12][13]，可追蹤輸入信號的改變，利用差值調整取樣頻率，完成類似軟體之鎖相迴路功能。圖4為其整體的簡單示意與流程圖，P為預設值，因著取樣頻率 F_{sam} 而變，而取樣頻率因著系統真正頻率 f 而變；

因而可改變取樣觸發間隔，調整取樣時間，達成可調適取樣頻率功能。

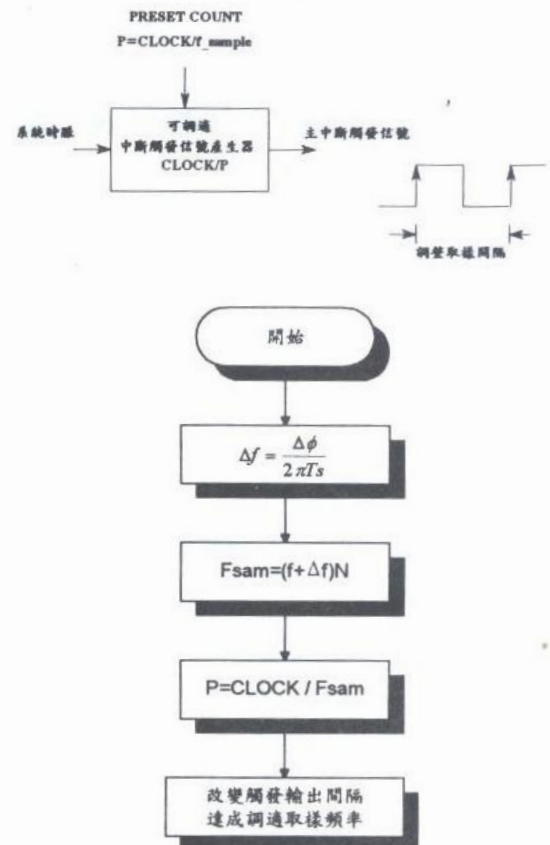


圖4 調適取樣頻率原理簡要示意與流程圖
取樣頻率 = $(f + \Delta f)N$ (12)

取樣頻率若能隨著系統頻率而變，將可使數位濾波器的中心頻率隨著系統頻率而變，使演算法更為準確，得到所要的精確電驛參數，增進保護的可靠度。

模擬結果

首先利用一測試信號大小為100，頻率變化情形如圖5所示[14]，模擬頻率估測的效能，並對有、無調適取樣頻率後，濾波之結果作比較。

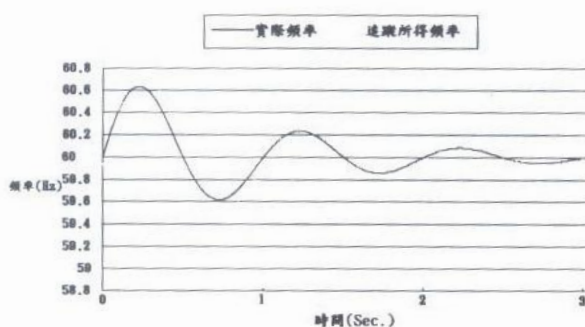


圖5 模擬系統發生三相短路故障，故障清除並復閉後，頻率變化曲線，經所提頻率演算法追蹤情形

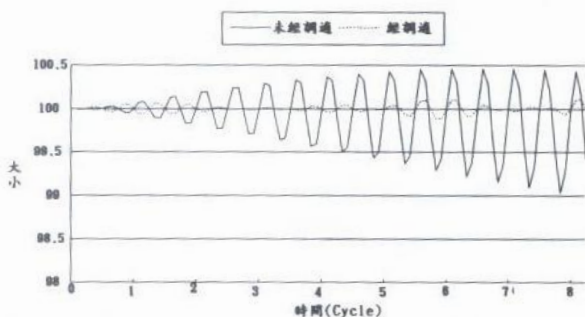


圖6 固定取樣頻率與經調適取樣頻率後，對上述信號利用 Full Rdf 濾波，所得信號大小，以EMTP模擬輸電線故障[15][16]，得到故障時，包含暫態成分之電壓、電流值，再經由濾波與測距演算法模擬，模擬之電力系統如圖2，系統參數如下：

$$\begin{aligned} G_A &= 161.68 \angle 15^\circ \text{ Kv} \\ V_{TH} &= 160.46 \angle 0^\circ \text{ Kv} \\ Z_{SA} &= j0.459 \Omega \\ Z_{SB} &= 0.3486 + j3.5146 \Omega \\ R_F &= 20 \Omega \\ R_0 + jX_0 &= (0.4099 + j1.491) \Omega/\text{Km} \\ R_1 + jX_1 &= (0.0701 + j1.491) \Omega/\text{Km} \\ P &= \text{故障距離/線路全長} \\ \text{線路全長} &= 80 \text{ Km} \end{aligned}$$

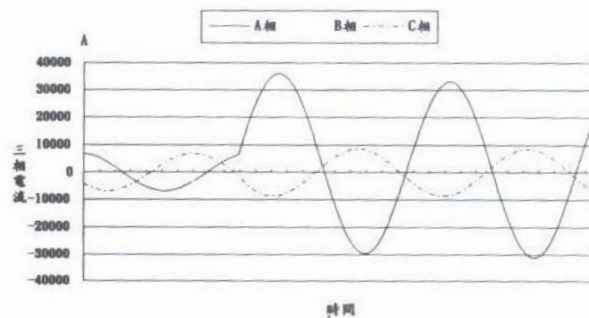


圖7 利用EMTP模擬輸電線在5Km處發生A相接地故障時三相電流變化情形。

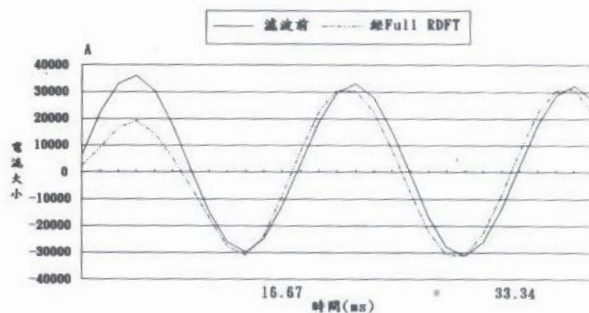


圖8、圖7所示A相故障電流，經 Full RDFT 與改良式Half RDFT，兩種不同方法濾波後之情形。

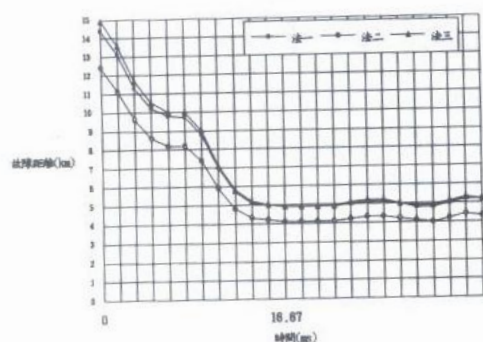


圖9 EMTP模擬系統在5Km處發生A相接地故障數據經 Full RDFT金濾波後,利用三種測距演算法所得結果

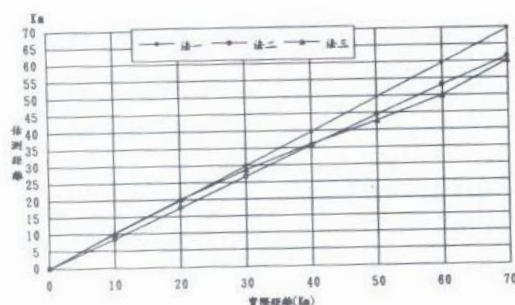


圖10 經 Full RDFT濾波後,利用三種測距演算法測距, 經故障後兩週期收斂所得故障定位結果, 用於故障定位器。

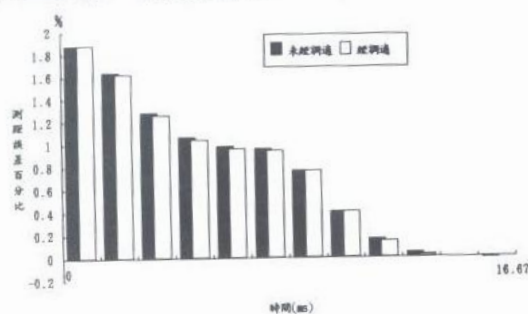


圖11 有、無採用調適取樣頻率對5Km處發生單相接地故障, 測距結果之比較

總結

本文以PC個人電腦編寫C語言程式, 模擬取樣頻率, 對數位測距電驛保護之影響, 其模擬結果: 就所比較的三種測距方法而言, 針對各種不同的模擬情況, 其中以第一種方法表現較為穩定。

就可調適取樣頻率產生器之運用, 雖然對於較大之系統, 例如台電系統, 當系統有故障發生時, 頻率不會在短時間內急速變化, 但或許對於汽電共生等容量較小之系統, 頻率變化較快, 而會對保護系統產生更大的影響, 故此功能值得加入應用, 使得保護的速度更快, 可靠度更好。

未來研究方向

以本文所比較之演算法, 選取性能較優者, 加入鎖相迴路, 調整取樣頻率, 以單晶片微處理器, 實現完整的數位電驛硬體, 發展不同功能的保護電驛, 如測距、過流、頻率電驛等, 實際測試其性能, 觀察其在實際電路的穩定性、可行性, 與對系統性能保護的影響。

參考文獻

- [1] Arrillaga J., D. A. Bradley and P. S. Bodger, Power System Harmonics, John Wiley & Sons, New York, U.S.A. (1985)
- [2] 許俊木『單晶片之數位保護系統之研製』碩士論文,國立台灣工業技術學院,民國81年6月.
- [3] 孫政啟『取樣頻率對數位測距電驛保護之影響』碩士論文,國立台灣工業技術學院,民國83年6月.
- [4] ABB Corporation, "Microprocessor-Based Line Relaying,"
- [5] Takagi, T., Y. Yamakoshi, "Development of A New Type Fault Locator Using The One-Terminal Voltage and Current Data," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 8, pp. 2892-2898 (1982).
- [6] Wiszniewski, A., "Accurate Fault Impedance Locating Algorithm," IEEE Proceedings, Vol. 130, PTC, No. 6, pp. 311-314 (1983).
- [7] Eriksson, L., M. S. Murari, G. D. Rockefeller, "An Accurate Fault Locator with Compensator for Apparent Reactance in The Fault Resistance Resulting From Remote-End Infeed," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 2, pp. 424-436 (1985).
- [8] Phadke A. G., J. S. Thorp and M. G. Adamiak, "A New Measurement Technique for Tracking Voltage Phasors, Local System Frequency, and Rate of Change of Frequency," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 102, No. 5, pp. 1025-1038 (1983).
- [9] Denys, P., C. Counan, L. Hossenlopp and C. Holweck, "Measurement of Voltage Phase for The French Future Defence Plan Against Losses of Synchronism," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, pp. 62-69 (1992).
- [10] Phadke, A. G., M. M. Begovic, P. M. Djuric and S. Dunlap, "Frequency Tracking in Power Networks in the Presence of Harmonics," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 2, pp. 480-486 (1993).
- [11] Benmouyal, G., "An Adaptive Sampling-Interval Generator for Digital Relaying," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 3, pp. 1602-1609 (1989).
- [12] Benmouyal, G., S. Barceloux and R. Pelletier, "Field Experience with a Digital Relay for Synchronous Generators," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 4, pp. 1984-1992 (1992).

- [13] Phadke A. G., J. S. Thorp, S. H. Horowitz and M. M. Begovic, "Some Applications of Phasor Measurements to Adaptive Protection," IEEE Transactions on Power Systems, Vol.3, No.2, pp.791-798(1988).
- [14] 翁基振『汽電共生廠卸載之研究』碩士論文，國立台灣工業技術學院，民國七十九年六月。
- [15] Mauser, S. F., Electromagnetic Transients Program (EMTP)Primer, EL-4202, Westinghouse, Pennsylvania(1985).
- [16] Leuven, K. U. EMTP Center, Alternative Electromagnetic Transients Program (EMTP) Rule Book, Leuven EMTP Center, Belgium (1987).

何謂 RELAY ？

親愛的-----今天晚上-----

一對新人在洞房花燭夜你濃我濃時，絕不會說：『今天晚上不行哪？』但是經過一段時間及溫柔的沖淡，開始漸漸以輕聲細語推辭：『我實在是心情不好呀！』繼而迅速變成一聲聲的懊惱，『達令：拜託！請諒解！然後語氣漸漸變成厭惡，你真要嗎？』或『這個厭惡的你，真要嗎？你不明白，我已當媽媽了，你不懂我還有工作要做嗎！看在老天份上，難道你腦裡只有"性"這件事嗎！』

親愛的朋友！您能否創造出一種方法，不讓配偶感覺被壓抑及內心感覺極端的無奈，你可別忘了"RELAY"是一種"溝通""協調"的泉源，您是否想成為一位在工作上・家庭中，一個成功的"RELAY"人！

