

以 GNSS 為基礎之全球同步時脈訊號產生器研製及其在電力網路量測應用(1/3)

計劃編號：NSC 88-2612-E-002-005

執行期限：87 年 8 月 1 日 至 83 年 7 月 31 日

計劃主持人：劉志文 國立台灣大學電機系 副教授

摘要：在本計劃中研製一命名為全球同步時脈產生器(CGSG)的高準度同步時脈裝置，無論在任何輸出頻率時脈下，兩步全球同步時脈產生器的上昇緣誤差可維持在 1 微秒內，此裝置可大幅提高相量量測單元間的同步性。此外，亦設計一套以相量量測單元(Phasor Measurement Unit, PMU)為基礎的適應性超高壓傳輸線故障定位/偵測系統，利用裝置於傳輸線兩端的 PMU 所量測的同步電壓、電流相量，經 Clarke 轉換後代入所提出之故障定位/偵測演算法中，可線上偵測故障的發生及精準地評估傳輸線故障位置。此故障定位演算法對於各種不同的故障型態、故障電阻、故障位置、故障前負載、等效電源內阻皆可得到良好結果，在此適應性超高壓傳輸線故障定位系統中提出線上評估超高壓傳輸線參數技術，利用故障前所量測之同步相量可準確的評估傳輸線在老化及周圍環境變動後的參數，以此求得之參數用於故障定位演算法中可克服因傳輸線參數不確定性所引起之故障定位誤差。經 EMTP 模擬結果顯示故障定位準確度最高可達 99.9%且對超高壓傳輸線故障的偵測具有極高的靈敏度。

Abstract: In this project, A new timing device named "Global Synchronism Clock Generator, GSCG" is implemented. The error of rising edge of tow GSCG's clock is able to remain in 1 μ s no matter the clock frequency. Therefore, Using CGSC will greatly increase the synchronism accuracy between different PMUs. Moreover, An adaptive PMU-based fault location/detection system for a EHV transmission line, which utilizes two-terminal measurements to on-line detect the occurrence of fault and estimate fault location. Both novel fault locating method and detecting method in terms of Clarke components of the synchronized voltage and current phasors are derived. This fault locating method allows for accurate estimation of fault location irrespective of various fault types, fault resistance, load currents, fault locations and source impedance.

Uncertainty resulting from line parameters, which usually causes a significant error in the estimated fault location, can be resolved through the proposed parameter estimation algorithm. Simulation results from EMTP have demonstrated that a fault detection index with a high sensitivity and a fault location estimator with the accuracy of up to 99.9% can be obtained.

Keyword: PMU, CGSG, Fault location, Clarke component, EMTP

I 計劃緣由及目的

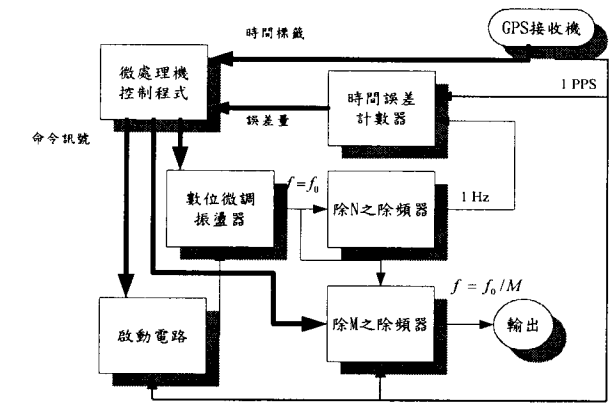
由於工商經濟活動的蓬勃發展，使得電力的需求日益增加，對於電力品質要求也日益嚴格，在電力系統中，超高壓傳輸線扮演著一個重要角色，其負責將電力由發電廠傳送至用戶。從經濟和電力品質觀點來看，傳輸線故障定位的重要性與日遽增。當超高壓傳輸線發生故障時，造成如 729 全台大停電，引發嚴重的經濟損失數以億計，更造成人們許多生活上的不便。一般而言，傳輸線的長度長達數十至數百公里，在故障後的修復過程中，尋找故障位置是相當的耗時且耗費人力的，如何準確定位傳輸線故障點以利維修人員迅速排除故障而恢復供電，是減少停電時間的一大關鍵，故世界各大電力公司皆已投入研究此重要課題。

基於上述的需求，本計劃中提出一命名為全球同步時脈產生器(CGSG)的高準度同步時脈裝置應用於相量量測單元，並提出一套以相量量測單元為基礎的適應性傳輸線故障定位/偵測系統，旨在準確的定位出傳輸線故障位置，以取代以往由人工方式尋找傳輸線故障點或其它故障定位準確度較低的方法，可有效的減低傳輸線故障排除時間和大量的人力，以達到提高電力品質及節省人事費用的目地。

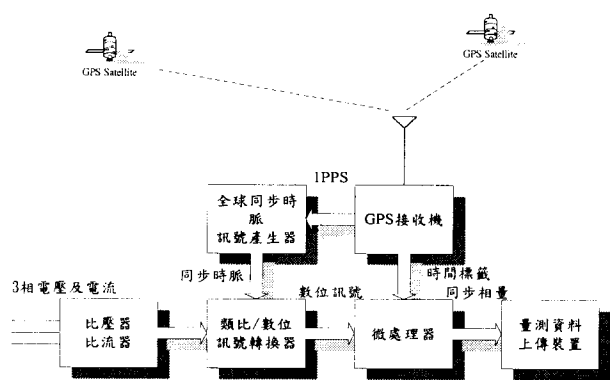
II 研究方法

本計劃中提出全球同步時脈產生器(CGSG)的架構如(圖 1)所示，經實際完成後測得其同步

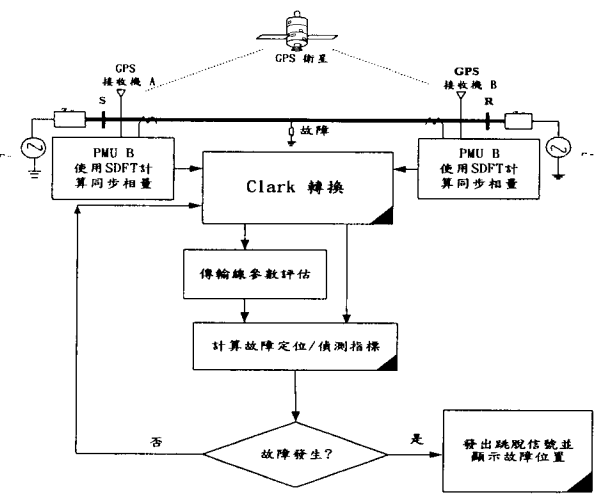
誤差可維持在 1 微秒內，此 CGSG 可做為 PMU 中之同步取樣單元，如(圖 2)所示，另提出一以 PMU 為基礎之適應性傳輸線故障偵測/定位系統，其系統架構圖如下(圖 3)所示。



(圖 1) 全球同步時脈產生器(CGSG)架構圖

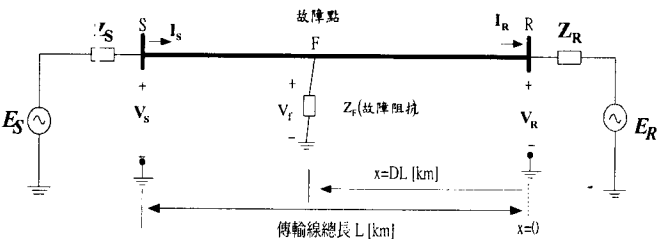


(圖 2) 相量量測單元方塊圖



(圖 3) 以 PMU 為基礎之適應性故障偵測/定位系統架構圖

考慮放置 PMUs 於傳輸線之兩端以測得故障前後之同步電壓電流相量，假設此傳輸線之參數為同質性(Homogeneous)，所有使用之符號對應如圖(4)所示：



(圖 4) 模擬系統單線圖

(1) 單相傳輸線情況：

首先先考慮單相傳輸線情況，其傳輸線微分方程式如下：

$$\frac{\partial}{\partial x} V = R \cdot V + j\omega L I$$

$$\frac{\partial}{\partial x} I = G V + j\omega C V$$

其中

r ：傳輸線每單位長度串聯電阻

l ：傳輸線每單位長度串聯電感

g ：傳輸線每單位長度並聯電導

c ：傳輸線每單位長度並聯電容

定義：

$Z = R + j\omega L$ ：傳輸線每單位長度串聯阻抗，

$Y = G + j\omega C$ ：傳輸線每單位長度並聯電導

$\gamma = \sqrt{Z \cdot Y}$ ：傳輸線傳播常數(propagation constant)

$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$ ：傳輸線特性阻抗(characteristic impedance)

解以上微分方程式可得

$$V = A_1 \exp(\gamma x) + A_2 \exp(-\gamma x)$$

$$I = A_1 Z_c^{-1} \exp(\gamma x) - A_2 Z_c^{-1} \exp(-\gamma x)$$

其中 A_1 、 A_2 分別表示解微分方程式後之未定常數，代入邊界條件($X=0$ ， $V=V_R$ ， $I=I_R$)及($X=L$ ， $V=V_S$ ， $I=I_S$)後，可利用所得之解以求得故障定位指標 D 為

$$D = \frac{\ln(A)}{2\gamma L}$$

其中

$$N = \frac{V_R - I_R Z_C}{2} - \frac{\exp(\gamma L)}{2} (V_S - Z_C I_S)$$

$$M = \left[\frac{1}{2 \exp(\gamma L)} (V_S + Z_C I_S) - \frac{V_R + I_R Z_C}{2} \right]$$

$$A = \frac{N}{M}$$

則故障點位置為 $D \cdot L$

(2) 三相傳輸線情況

考慮三相轉置(Transposed)傳輸線情況，其弦波穩態下傳輸線微分方程式如下：

$$\frac{\partial}{\partial x} [V] = [R][I] + j\omega[L][I]$$

$$\frac{\partial}{\partial x} [I] = [G][V] + j\omega[C][V]$$

其中

$$[V] = \begin{bmatrix} V(x)_a \\ V(x)_b \\ V(x)_c \end{bmatrix}, [I] = \begin{bmatrix} I(x)_a \\ I(x)_b \\ I(x)_c \end{bmatrix}, ([V], [I] \text{ 都相量})$$

R ：傳輸線每單位長度串聯電阻矩陣

L ：傳輸線每單位長度串聯電感矩陣

G ：傳輸線每單位長度並聯電導矩陣

C ：傳輸線每單位長度並聯電容矩陣

定義：

$$[Z] = [R] + j\omega[L]$$

$$[Y] = [G] + j\omega[C]$$

使用如下之 Clarke 矩陣以進行模態(mode)轉換：

$$T = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{2} & 0 \\ 1 & -1/\sqrt{2} & \sqrt{3}/\sqrt{2} \\ 1 & -1/\sqrt{2} & -\sqrt{3}/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

則

$$[V] = [T][V_m], \text{ 其中 } [V_m] = [V_0 \ V_\alpha \ V_\beta]^T$$

$$[I] = [T][I_m], \text{ 其中 } [I_m] = [I_0 \ I_\alpha \ I_\beta]^T$$

使用模態轉換後可將三相耦合的電壓電流相量轉換為解耦的電壓電流模態相量，分別定義為零模，alpha 模及 beta 模相量，仿照上述

之單相作法，可得利用各模態量所得之故障定位指標如下，其中 i 表示模態量：

$$D_i = \frac{\ln \{ (a(k) - c(k)) / (e(k) - b(k)) \}}{2\gamma_i L}$$

各個模態的 M 、 N 為

$$M_i = a(k) - c(k)$$

$$N_i = e(k) - b(k)$$

其中

$i = 0, \alpha, \beta$ 分別對應到 $k = 1, 2, 3$

$$a(k) = \frac{1}{2} ([V_{Rm}]_k + [Z_c]_{k,k} [I_{Rm}]_k)$$

$$b(k) = \frac{1}{2} ([V_{Rm}]_k - [Z_c]_{k,k} [I_{Rm}]_k)$$

$$c(k) = \frac{1}{2} \exp(-[\Gamma]_{k,k} L) ([V_{Sm}]_k + [Z_c]_{k,k} [I_{Sm}]_k)$$

$$e(k) = \frac{1}{2} \exp(-[\Gamma]_{k,k} L) ([V_{Sm}]_k - [Z_c]_{k,k} [I_{Sm}]_k)$$

(3) 故障偵測指標

在前面故障定位指標的公式推導中定義了 M 及 N ，當故障未發生時，此 M 及 N 具有一非常良好的特性即 M 和 N 等於零，當傳輸線發生故障時，移動視窗中的資料只要包含到故障後的資料，即移動視窗跨於故障前及故障後時，則 M 和 N 會以極高的斜率上昇，故可由 M 及 N 是否為零以偵測傳輸線是否有發生故障，亦即此 M ， N 可作為傳輸線故障偵測之指標。當放置於傳輸線兩端的 PMU 完成相量的計算後並將相量值藉由通訊通道傳回中央控制中心，則中央控制中心的主電腦可計算 M ， N 之值，以偵測傳輸線上是否有故障產生。以下是故障偵測指標之證明：

故障前傳輸線方程式為：

$$V_S = \frac{1}{2} [(V_R + Z_C I_R) \exp(\gamma L) + (V_R - Z_C I_R) \exp(-\gamma L)]$$

$$Z_C I_S = \frac{1}{2} [(V_R + Z_C I_R) \exp(\gamma L) - (V_R - Z_C I_R) \exp(-\gamma L)]$$

將上述二式代入故障定位公式中的 M 及 N 可得

$$N = \frac{1}{2}(V_R - I_R Z_C) - \frac{1}{2} \exp(\gamma L) \left\{ \frac{1}{2} \exp(\gamma L) (V_R + I_R Z_C) + \frac{1}{2} \exp(\gamma L) (V_R - I_R Z_C) - \left[\frac{\exp(\gamma L)}{2} (V_R + I_R Z_C) - \frac{\exp(\gamma L)}{2} (V_R - I_R Z_C) \right] \right\} = 0$$

$$M = \frac{1}{2 \exp(\gamma L)} (\exp(\gamma L) V_R + \exp(\gamma L) I_R Z_C) - \frac{1}{2} V_R - \frac{1}{2} I_R Z_C = 0$$

(4) 傳輸線參數評估

傳輸線線路參數的不確定性會引起傳輸線故障定位的重大誤差，本計劃中提出傳輸線參數評估方式以克服參數不確定性所造成的故障定位誤差。一般而言，傳輸線之參數如自電阻，自電感，互電容...等會因線路老化，溫度及濕度變化或負載的變化而改變，有鑒於 PMU 其同步性能高達 1μs 以內，即利用此全球同步時脈產生器之 PMU 所得的相量，其相角的誤差低於 0.0216 度，故利用此高度的同步特性，我們可以利用所量測到電壓電流相量來評估傳輸線的各模態參數，下列是傳輸線傳播常數及特性阻抗之估測公式：

$$\gamma = \frac{1}{L} \cosh^{-1} \left(\frac{V_S I_S + V_R I_R}{V_S I_R + I_S V_R} \right)$$

$$Z_C = \left[\frac{V_R^2 - V_S^2}{I_S^2 + I_R^2} \right]^{1/2}$$

III 結論與成果

(1) 模擬結果

本計劃中模擬一 345kv 輸電線發生故障時，利用位於傳輸線兩端 PMUs 所記錄的故障前後電壓、電流相量代入所發展的演算法中，驗證在各種情況下的故障定位演算法準確度，其效能評估包括了下列幾個項目：

- 不同故障型態的誤差量。
- 不同故障位置的誤差量。
- 不同接地電阻的誤差量。
- 不同故障前負載的誤差量。
- 不同等效電源內阻的誤差量。
- 參數不確定性的影響。

在(圖 5)至(圖 7)展示了單相接地故障、相間短路故障、三相短路故障的各適用模態模擬結果。從這些圖中可清楚的看出，所有模擬結果的誤差量皆小於 1%，甚至在傳輸線常發生的單相接地故障情況下是低於 0.1%，其中誤差

量定義如下

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

從這些圖中可清楚的看出，所有模擬結果的誤差量皆小於 1%，甚至在傳輸線常發生的單相接地故障情況下是低於 0.1%。

(圖 8)展示發生 A 相接地故障時，在不同故障位置及不同故障電阻情況下使用 Alpha 模成份計算所得的故障定位誤差量，由此圖可明顯的看出，縱使故障電阻提高至 10k 歐姆，使用本論文所提出之演算法計算之結果依然能維持在 0.5%之內。

(圖 9)是 A 相接地故障情況下利用改變電源相角差以模擬不同故障前負載所得到的結果，由圖中可看出相角差高達 30 度時對故障定位所造成的影響依然很小，即所提出之故障定位方法不受故障前負載之影響。

(圖 10)展示不同等效電源內阻對故障定位誤差量的影響，以 B 相接地故障作為模擬對象，將等效電源內阻分別提高五倍及降低五倍來探討等效電源內阻變化的影響，提高和降低五倍的原因是因為如此已足夠含括不同等效電源內阻變化的可能情形，圖中之三條曲線分別表示將等效電源內阻乘以 1、乘以 5 及乘以 0.2 所得之結果

(圖 11)及(圖 12)模擬傳輸線參數的不確定性對故障定位誤差量的影響，並使用傳輸線參數評估方法解決此問題，因參數評估方法不適用於零模成份，故所有的模擬結果只展示使用 Alpha 模成份及 Beta 模成份的結果。本圖中使用兩種參數變動方式，(圖 11)為零序、正序及負序參數中的電阻值由 110% 降至 90%，同時相對應的電感及電容值由 90% 升至 110%，(圖 12)為零序、正序及負序參數中的電阻值由 90% 升至 110%，同時相對應的電感及電容值也由 90% 升至 110%，以上的參數變動方式以每次 1% 的間隔來變動。由模擬結果可清楚的看出，利用參數評估方法的結果的確能有效的解決參數變動的問題。

(2) 結論

本計劃成果研製一稱為全球同步時脈產生器(CGSC)的高準度同步時脈裝置，使用此 CGSC 於同步相量量測器中可大幅提高其同步性，又提出一適應性故障定位/偵測系統之完整架構，其為蓬勃發展中的同步相量量測技術之應用，根據模擬結果顯示，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，使用此適應性故障定位/偵測演算法皆可得到故障定位誤差量維持在 1% 以下，甚至準確度高達 99.9%。利用提出之參數評估方法可在傳輸線未故障前線上校正故障定位/

偵測演算法中傳輸線參數的設定，以適應不同的環境變化，達到適應性的功能，可有效的解決傳輸線參數不確定性所增加之故障定位誤差。又因同步相量量測器具有同步誤差維持在1 微秒內的良好同步特性，即理論推導及模擬中所假設的同步取樣是可實現的，故所提出之適應性故障定位/偵測系統極具實用價值。

計劃成果：

本計劃成果已發表於下列國際會議及期刊上：

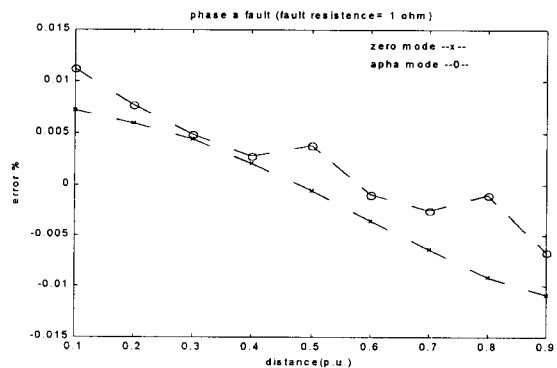
- [1] Joe-Air Jiang, Jun-Zhe Yang, Ying-Hong Lin, Chih-Wen Liu, and Jih-Chen Ma, "An Adaptive PMU Based Fault Detection/Location Technique for Transmission Lines, Part I: Theory and Algorithms", *IEEE Transactions on Power Delivery*. (accepted)
- [2] Joe-Air Jiang, Ying-Hong Lin, Jun-Zhe Yang, Tong-Ming Too, and Chih-Wen Liu, "An Adaptive PMU Based Fault Detection/Location Technique for Transmission Lines, Part II: PMU Implementation and Performance Evaluation", *IEEE Transactions on Power Delivery*. (accepted after revision)
- [3] Joe-Air Jiang, Ying-Hong Lin, Chih-Wen Liu, Jun-Zhe Yang and Tong-Ming Too, "An Adaptive PMU Based Fault Locator System for Transmission Lines", *IEEE/PES Summer Meeting*, July 1999, pp. 930-936.

A Practical Approach To Accurate Fault Location on Extra High Voltage Teed Feeders, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.8, No.3, July, 1992, pp.874-883.

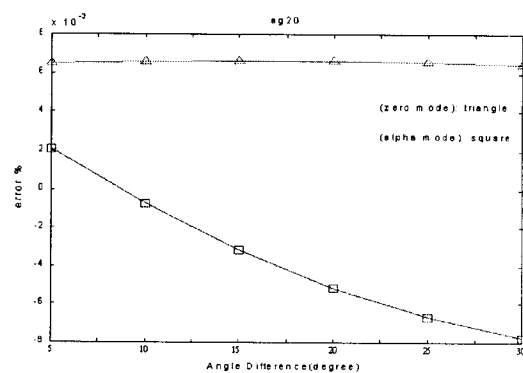
- [7] A.T. Johns, and S. Jamali, Accurate Fault Location Technique For Power Transmission Lines, *IEEE Proceedings*, Vol.137, Pt.C, No.6, November, 1990, pp.395-402.
- [8] A.K.S. Chaudhary, Kwa-Sur Tam, and Arun G. Phadke, Protection System Representation in The Electromagnetic Transients Program, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.9, No.2, April 1994, pp.700-711.

IV 參考文獻

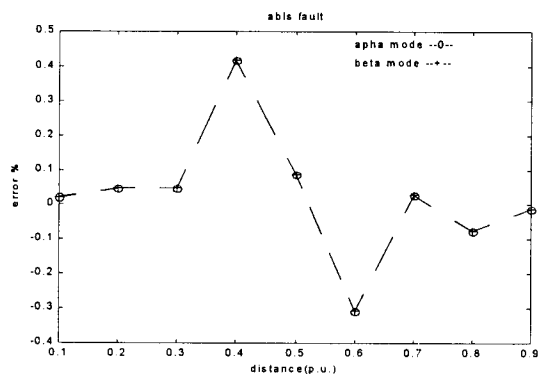
- [1] A.G. Phadke and J.S. Thorp, *Computer Relaying For Power Systems*, John Wiley & Sons, 1988.
- [2] T. Takagi, Y. Yamakoshi, J. Baba, K. Uemura, and T. Sakaguchi, A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: Part I- Fourier Transformation Method, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No.3, March 1981, pp.1316-1323.
- [3] T. Takagi, Y. Yamakoshi, J. Baba, K. Uemura, and T. Sakaguchi, A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: Part II- Laplace Transform Method, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No.3, March 1982, pp.564-573.
- [4] M. Kezunovic, J. Mrkic, and B. Perunicic, An Accurate Fault Location Algorithm Using Synchronized Sampling, *Electric Power Systems Research*, Vol.29, 1994, pp.161-169.
- [5] A.A. Girgis, D.G. Hart, and W.L. Peterson, A New Fault Location Technique For Two-and Three-Terminal Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.7, No.1, January, 1992, pp.98-107.
- [6] P.K. Aggarwal, D.V. Coury, A.T. Johns, and A.Kalam,



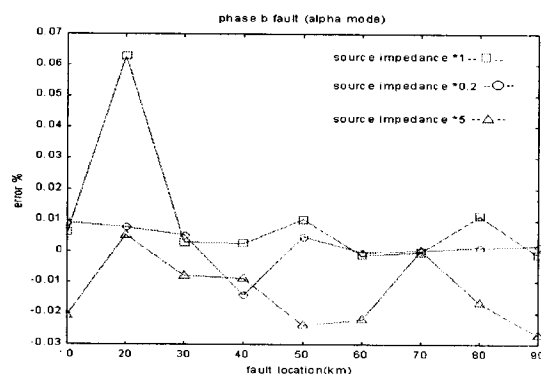
(圖 5) A 相接地故障(接地電阻 1 歐姆)情況下，故障位置與故障定位誤差量比較圖



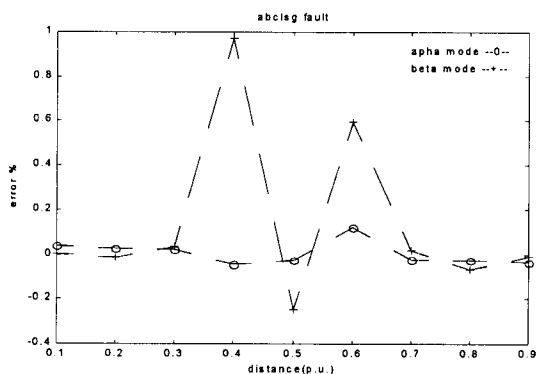
(圖 9) A 相接地故障情況下，不同故障前負載(以相角差表示)與故障定位誤差量比較圖



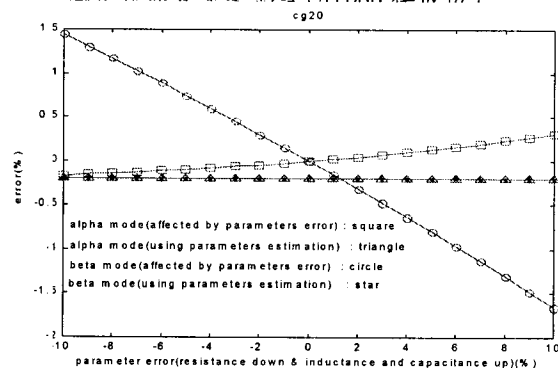
(圖 6) AB 相短路故障情況下，故障位置與故障定位誤差量比較圖



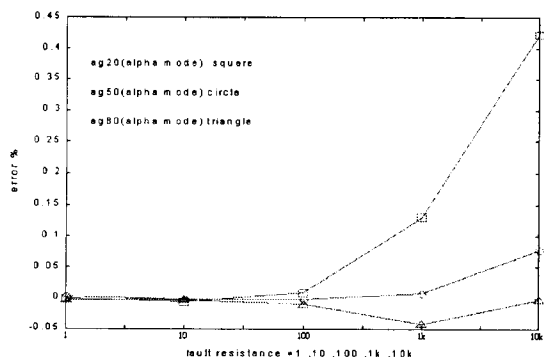
(圖 10) B 相接地故障情況下，不同等效電源內阻對故障定位誤差量之影響(Alpha 模成份)



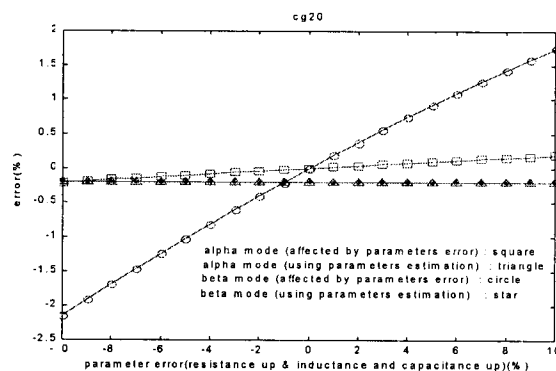
(圖 7) ABC 相短路故障情況下，故障位置與故障定位誤差量比較圖



(圖 11) C 相接地故障情況下，參數不確定性對故障定位誤差量之影響及使用參數評估方法之結果



(圖 8) A 相接地故障情況下，不同接地電阻對故障定位的影響(Alpha 模成份)



(圖 12) C 相接地故障情況下，參數不確定性對故障定位誤差量之影響及使用參數評估方法之結果