

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

以敏感因子法求解配電系統即時線路流量之研究

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 95-2221-E-270-027-

執行期間：95年8月1日至96年7月31日

計畫主持人：黃維澤 建國科技大學/電機工程系

共同主持人：

計畫參與人員：古煜達、賴文川 建國科技大學/電機工程系

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：建國科技大學/電機工程系

中華民國九十六年九月七日

行政院國家科學委員會
九十五年度專題研究計畫研究成果精簡報告

以敏感因子法求解配電系統即時線路流量之研究

計畫編號：NSC 95-2221-E-270-027

執行期限：95 年 08 月 01 日至 96 年 07 月 31 日

主持人：黃維澤 建國科技大學/電機工程系

中文摘要

本研究提出新的三相敏感因子法以求解三相不平衡配電系統之即時線路流量問題。首先，深入分析、比較現有常用的敏感因子法的特性與優劣，並考量配電系統既有之不平衡特性推導出適用於求解配電饋線實功及虛功流量之敏感因子法，因此，可確實反映各母線負載需求變動對線路功率流量之影響量；其次，採用隱含式 Z_{Bus} 高斯法作為求解三相電力潮流基態解的方法，以基態解所得之線路複數功率流量、母線阻抗矩陣、線路阻抗以及各母線個別相負載之變化量為基礎，再利用所推導之敏感因子即可在不需任何疊代的過程下快速且正確地算出即時線路三相複數功率之流量；最後，所開發的程式將在商用套裝軟體 Matlab 環境下完成，並以 IEEE 公佈之測試系統為例驗證所提方法之正確性。本計畫的完成不僅可提供一快速求解配電系統即時線路流量的方法，同時亦可應用於配電自動化等相關研究。

關鍵字：敏感因子法、配電系統、線路流量、三相電力潮流、配電自動化。

Abstract

Three-phase sensitivity factors that determine calculated real-time active and reactive line flows in inherently unbalanced distribution systems are proposed in this project.

The first step is to analyze the characteristics, advantages and

disadvantages associated with the factors, taking into account unbalanced characteristics in distribution systems. Hence, the proposed three-phase factors reflect load changes to the line flows. Accordingly, the implicit Z_{Bus} Gauss method is applied to solve for the base case three-phase power flow. Based on the power flow solutions, as well as the bus impedance matrix, the line impedance and the changes of the individual phase-active and-reactive power at each bus, the real-time three-phase line flows are determined accurately and rapidly from the presented factors. Finally, programs were implemented in Matlab, and the IEEE test feeders were used as sample feeders to verify the developed algorithm. The results of this study not only support a high-speed computation approach for line flows, but also can be applied to the distribution automation.

Keywords: Sensitivity Factor, Distribution System, Line Flow, Three-phase Power Flow, Distribution Automation.

一、前言

線路流量的問題不論在輸電系統或配電系統均為很重要的研究課題。以輸電系統為例，輸電線路的安全分析與流量之快速計算就顯得非常重要，除了可提供電力工程人員做線上即時(Real-Time)的監控與分析，同時若遇到緊急狀況也可適時快速地調度發電機組以維持電力的穩定，避免系統發生過載。在線上即時之電力系統

應用上，輸電線路流量之計算尤其重要，因負載之變動及電力之調度均會影響線路之流量，故系統調度人員必須時時刻刻注意並監控線路流量是否在安全範圍之內，否則極有可能因某單一線路過載而造成連鎖反應，導致全面性的大停電。因此，為確實掌握線路之實際流量，傳統上均以交流負載潮流(AC Load Flow)法以求解母線電壓大小、相角，以及線路流量[1, 2]，此法雖佳，但因有疊代(Iteration)及收斂(Convergence)之問題，故不論牛頓—拉弗森法(Newton-Raphson method)或高斯—塞德法(Gauss-Seidel method)均不適用於線上即時(Real-Time)線路流量之安全監控(Security Control)與緊急事故分析(Contingency Analysis)之應用。後來 Stott 與 Alsac 於 1974 年提出一快速之負載潮流解法(Fast Decoupled Load Flow)[3]，雖然可以加快計算速度，但還是需要多次疊代方可收斂，故問題仍未解決。此後雖有許多電力潮流解法被提出，但均如上述方法仍須數次或多次疊代方可收斂，結果僅改善計算速度及減少疊代次數。為解決上述之問題，Wood 與 Wollenberg 依直流負載潮流(DC Load Flow)模型建立發電量變動分佈因子(Generation Shift Distribution Factor, GSDF) [4]，以快速計算正常或故障後之線路實功率流量，其最大之優點為不需疊代；然準確性尚可，故早期廣被採用。此後，Ng 亦提出一種新的廣義發電量變動分佈因子(Generalized Generation Shift Distribution Factor, GGDF) [5]，可快速計算當負載變動後之線路流量。而 Chang 等人則提出 GGDF 於電力系統安全評估之應用[9]。最後，Lin 及 Chen 於 1991 年提出一種新的母線阻抗分佈因子(Z_{Bus} Distribution Factor, ZBD) [6]，不但可適應於各母線負載非一致性變動(Nonconforming Change)，而且尚可計算線路實功率與虛功率流量。上述敏感因子法，雖仍有一些缺點，但因計算快速且不需疊代程序，無收斂之問題，故至今仍廣被應用於線路流量計算[7]、經濟調度(Economic Dispatch)[8, 9]、最佳電力潮流

(Optimal Power Flow, OPF)[10, 11]以及故障(Outage)後之線路流量計算等。

綜合以上相關研究可知，敏感因子法的應用研究幾乎侷限於輸電系統，在配電系統的相關應用方面寥寥無幾，因此，敏感因子法在配電系統方面之理論與應用研究的空間極大，本研究乃在輸電級之敏感因子法之理論基礎上，重新推導適用於配電系統之三相敏感因子法，以快速求解負載變動後之饋線個別相線路實功率及虛功率流量，因此，本研究將針對目前國內外與敏感因子法、三相電力潮流分析技巧以及即時線路流量等相關的研究問題作深入的探討與分析，尤其是敏感因子法的理論及其應用方面，然後將所推導之公式與求解之方法於在 Matlab 環境下完成程式設計與測試，使其於未來可應用於配電系統控制、運轉與自動化等方面，藉此提高配電系統整體之供電品質、安全性與可靠度。

二、三相母線阻抗分佈因子法之理論基礎暨公式推導

本研究所提方法乃建構在三相電力潮流(Three-Phase Power Flow)所建立之基態解(Base Case)以及三相母線阻抗矩陣(Three-Phase Bus Impedance Matrix)的理論基礎上，因此，首要之務為探究三相電力潮流的求解方法與技巧。雖然國內外學者專家投入改善三相電力潮流執行速度與收斂性等相關研究不勝枚舉，但綜觀以高斯法(Gauss Method)與牛頓法(Newton Method)為基礎之七種常見的求解方法與技巧中顯示各有其優缺點[12]，其中隱含式 Z_{Bus} 高斯法極適合應用於配電系統，因此，在綜合歸納相關研究論文及技術報告後，選定隱含式 Z_{Bus} 高斯法作為求解三相電力潮流基態解的方法[13, 14]，以基態解所得之線路複數功率流量、母線阻抗矩陣、線路阻抗以及各母線個別相負載之變化量為基礎，再利用所推導之三相母線阻抗分佈因子法即可在不需任何疊代的過程下快速且正確地算出即時線路三相複數功率之流量。

隱含式 Z_{Bus} 高斯法乃 Chen 等人於 1991 年提出的三相電力潮流求解方法，對於放射型以及常閉環路型等配電系統型態的收斂效果佳，亦即較不受系統架構之限制，因此，本研究選定此方法作為求解電力潮流基態解的方法。此法主要應用系統 Y_{Bus} 矩陣及等效注入電流技巧來求解三相電力潮流，其收斂性端視無限母線(Swing Bus)及電壓控制母線(Voltage-Controlled Bus)的個數。在求解的過程中，各母線電壓主要由兩個部分決定，其一為系統電源電壓；另一部分則為等效注入電流，其中汽電共生發電機、電容器、電感器及負載等均分別等效成注入電流源，注入其所連接的個別母線中，其等效注入電流如(1)式所示。

$$I_i^{(k)} = \left(\frac{S_i}{V_i^{(k)}} \right)^* = \left(\frac{P_i + jQ_i}{V_i^{(k)}} \right)^* \quad (1)$$

由等效注入電流，以及取系統 Y_{Bus} 矩陣之反矩陣所得之 Z_{Bus} 矩陣，可計算各母線電壓之變化量，該值用於修正母線電壓，如(2)式所示。

$$[DV_{Bus}^{(k)}] = [Z_{Bus}] \cdot [I^{(k)}] \quad (2)$$

利用(3)式，重複疊代至所有母線電壓差異量直到小於所設定之容許誤差值為止，此時母線電壓即為收斂值。

$$[V_{Bus}^{k+1}] = [V_{NL}] + [DV_{Bus}^{(k)}] \quad (3)$$

有鑑於敏感因子法為本研究計畫之研究重點，因此，在綜合分析、比較目前常見敏感因子法後，選定以 ZBD 法之理論架構為基礎推導三相母線阻抗分佈因子(Three-Phase Z_{Bus} Distribution Factor, TZBD)，以期應用於配電系統。推導過程如下：

依節點電壓法(Node-Voltage Method)的分析技巧，可推導出具 n 個母線之配電系統其各母線注入電流及其與導納和電壓關係式如下

$$[I]_{n \times 1, abc} = [Y]_{n \times n, abc} [V]_{n \times 1, abc} \quad (4)$$

式中， $[Y]_{n \times n, abc}$ 即為母線導納矩陣，且式(4)可進一步展開如下

$$\begin{bmatrix} I_{1a} \\ I_{1b} \\ I_{1c} \\ I_{2a} \\ I_{2b} \\ I_{2c} \\ \vdots \\ I_{na} \\ I_{nb} \\ I_{nc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{11aa} & Y_{11ab} & Y_{11ac} \\ Y_{11ba} & Y_{11bb} & Y_{11bc} \\ Y_{11ca} & Y_{11cb} & Y_{11cc} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} Y_{1naa} & Y_{1nab} & Y_{1nac} \\ Y_{1nba} & Y_{1nbb} & Y_{1nbc} \\ Y_{1nca} & Y_{1ncb} & Y_{1ncc} \end{bmatrix} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \begin{bmatrix} Y_{n1aa} & Y_{n1ab} & Y_{n1ac} \\ Y_{n1ba} & Y_{n1bb} & Y_{n1bc} \\ Y_{n1ca} & Y_{n1cb} & Y_{n1cc} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} Y_{nnaa} & Y_{nmab} & Y_{nnac} \\ Y_{nmba} & Y_{mabb} & Y_{nmcb} \\ Y_{mnca} & Y_{mncb} & Y_{mncc} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1a} \\ V_{1b} \\ V_{1c} \\ V_{2a} \\ V_{2b} \\ V_{2c} \\ \vdots \\ V_{na} \\ V_{nb} \\ V_{nc} \end{bmatrix} \quad (5)$$

此外，式(5)亦可表示為各母線電壓及其與注入電流和阻抗關係式如下

$$[V]_{n \times 1, abc} = [Z]_{n \times n, abc} [I]_{n \times 1, abc} \quad (6)$$

式(6)中， $[Z]_{n \times n, abc}$ 即為母線阻抗矩陣，可利用式(4)以 LU 分解方式求得或由母線阻抗矩陣建構法(Z_{Bus} Building Algorithm)取得；此外，式(6)可進一步展開如下

$$\begin{bmatrix} V_{1a} \\ V_{1b} \\ V_{1c} \\ V_{2a} \\ V_{2b} \\ V_{2c} \\ \vdots \\ V_{na} \\ V_{nb} \\ V_{nc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{11aa} & Z_{11ab} & Z_{11ac} \\ Z_{11ba} & Z_{11bb} & Z_{11bc} \\ Z_{11ca} & Z_{11cb} & Z_{11cc} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} Z_{1naa} & Z_{1nab} & Z_{1nac} \\ Z_{1nba} & Z_{1nbb} & Z_{1nbc} \\ Z_{1nca} & Z_{1ncb} & Z_{1ncc} \end{bmatrix} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \begin{bmatrix} Z_{n1aa} & Z_{n1ab} & Z_{n1ac} \\ Z_{n1ba} & Z_{n1bb} & Z_{n1bc} \\ Z_{n1ca} & Z_{n1cb} & Z_{n1cc} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} Z_{nnaa} & Z_{nmab} & Z_{nnac} \\ Z_{nmba} & Z_{mabb} & Z_{nmcb} \\ Z_{mnca} & Z_{mncb} & Z_{mncc} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{1a} \\ I_{1b} \\ I_{1c} \\ I_{2a} \\ I_{2b} \\ I_{2c} \\ \vdots \\ I_{na} \\ I_{nb} \\ I_{nc} \end{bmatrix} \quad (7)$$

由式(8)之定義，

$$H(m, i) = \frac{\partial S_m}{\partial S_i} \quad (8)$$

並參考圖 1 之三相輸電線等效模型，注入第 i 個母線之個別相複數功率 $S_{i, abc}$ 變動，造成第 m 條輸電線之個別相複數功率流量 $S_{m, abc}$ 變動之影響量，可由式(9)之三相敏感因子表示之。

$$\begin{aligned} H(m_{abc}, i_{abc}) &= E(m_{abc}, i_{abc}) + jG(m_{abc}, i_{abc}) \\ &= \frac{1}{Z_{m_{abc}}^*} \frac{\partial (V_{p_{abc}} - V_{q_{abc}})^*}{\partial I_{i_{abc}}^*} \end{aligned} \quad (9)$$

其中 p 、 q 分別代表第 m 條輸電線之起迄母線編號，上式中 $H(m_{abc}, i_{abc})$ 、 $E(m_{abc}, i_{abc})$ 及 $G(m_{abc}, i_{abc})$ 可分別以式

(10)~(12)表示之。

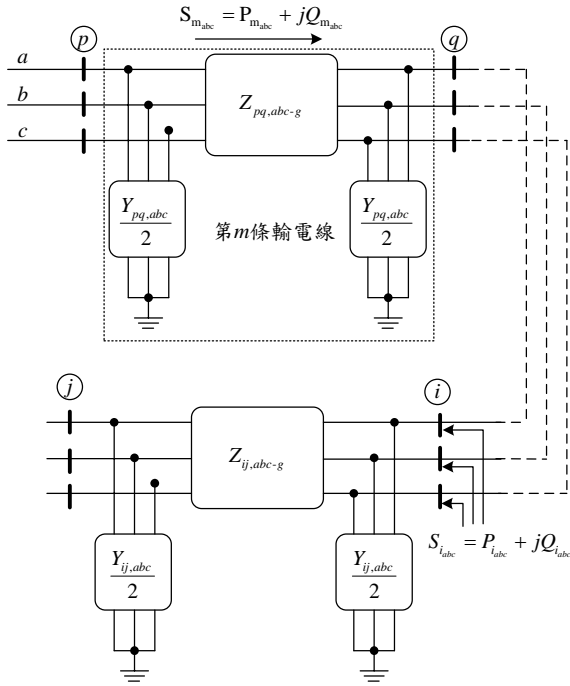


圖 1 三相 π 型等效輸電線路模型

$$H(m_{abc}, i_{abc}) = \begin{bmatrix} H(m_a, i_a) & H(m_a, i_b) & H(m_a, i_c) \\ H(m_b, i_a) & H(m_b, i_b) & H(m_b, i_c) \\ H(m_c, i_a) & H(m_c, i_b) & H(m_c, i_c) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$E(m_{abc}, i_{abc}) = \begin{bmatrix} E(m_a, i_a) & E(m_a, i_b) & E(m_a, i_c) \\ E(m_b, i_a) & E(m_b, i_b) & E(m_b, i_c) \\ E(m_c, i_a) & E(m_c, i_b) & E(m_c, i_c) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$G(m_{abc}, i_{abc}) = \begin{bmatrix} G(m_a, i_a) & G(m_a, i_b) & G(m_a, i_c) \\ G(m_b, i_a) & G(m_b, i_b) & G(m_b, i_c) \\ G(m_c, i_a) & G(m_c, i_b) & G(m_c, i_c) \end{bmatrix} \quad (12)$$

參考文獻[13, 14]所開發之三相輸電線解耦合等效模型、電力變壓器等效模型、電力電容器模型、汽電共生發電機模型以及負載模型等，可進一步將式(9)展開為三相之間自感量與互感量和線路複數功率流量的敏感因子關係。

其中，就第 i 個母線 a 相複數功率 S_{i_a} 變動，造成第 m 條輸電線之 a 相複數功率流量 S_{m_a} 變動之影響量可利用式(13)的三相敏感因子法表示如下

$$H(m_a, i_a) = \frac{1}{Z_{m_a}^*} \left(\frac{\partial (V_{p_a} - V_{q_a})^*}{\partial I_{i_a}^*} \right) \quad (13)$$

式(13)可進一步表示為

$$H(m_a, i_a) = \frac{1}{Z_{m_a}^*} [Z_{p_{i_a}}^* - Z_{q_{i_a}}^*] \quad (14)$$

其中 Z_{m_a} 代表第 m 條輸電線之 a 相串聯阻抗，重新整理式(14)，將 $H(m_a, i_a)$ 之實部 (Real Part) 與虛部 (Imaginary Part) 分別以 $E(m_a, i_a)$ 及 $G(m_a, i_a)$ 表示如下。

$$E(m_a, i_a) = \frac{R_{m_a} [R_{p_{i_a}} - R_{q_{i_a}}] + X_{m_a} [X_{p_{i_a}} - X_{q_{i_a}}]}{|Z_{m_a}|^2} \quad (15)$$

$$G(m_a, i_a) = \frac{X_{m_a} [R_{p_{i_a}} - R_{q_{i_a}}] - R_{m_a} [X_{p_{i_a}} - X_{q_{i_a}}]}{|Z_{m_a}|^2} \quad (16)$$

同理，就第 i 個母線 a 相複數功率 S_{i_a} 變動，造成第 m 條輸電線之 b 相實功率與虛功率流量的變動量，可以式(17)及式(18)表示如下

$$E(m_b, i_a) = \frac{R_{m_b} [R_{p_{i_a}} - R_{q_{i_a}}] + X_{m_b} [X_{p_{i_a}} - X_{q_{i_a}}]}{|Z_{m_b}|^2} \quad (17)$$

$$G(m_b, i_a) = \frac{X_{m_b} [R_{p_{i_a}} - R_{q_{i_a}}] - R_{m_b} [X_{p_{i_a}} - X_{q_{i_a}}]}{|Z_{m_b}|^2} \quad (18)$$

此外，就第 i 個母線 a 相複數功率 S_{i_a} 變動，造成第 m 條輸電線之 c 相實功率與虛功率流量的變動量，可以式(19)及式(20)表示

$$E(m_c, i_a) = \frac{R_{m_c} [R_{p_{i_a}} - R_{q_{i_a}}] + X_{m_c} [X_{p_{i_a}} - X_{q_{i_a}}]}{|Z_{m_c}|^2} \quad (19)$$

$$G(m_c, i_a) = \frac{X_{m_c} [R_{p_{i_a}} - R_{q_{i_a}}] - R_{m_c} [X_{p_{i_a}} - X_{q_{i_a}}]}{|Z_{m_c}|^2} \quad (20)$$

另外，就第 i 個母線 b 相與 c 相複數功率變動，造成第 m 條輸電線之 abc 個別相實功率與虛功率流量的變動量，可分別以式(21)至式(32)表示之。

$$E(m_a, i_b) = \frac{R_{m_a} [R_{p_{i_b}} - R_{q_{i_b}}] + X_{m_a} [X_{p_{i_b}} - X_{q_{i_b}}]}{|Z_{m_a}|^2} \quad (21)$$

$$G(m_a, i_b) = \frac{X_{m_a} [R_{p_{i_b}} - R_{q_{i_b}}] - R_{m_a} [X_{p_{i_b}} - X_{q_{i_b}}]}{|Z_{m_a}|^2} \quad (22)$$

$$E(m_b, i_b) = \frac{R_{m_b} [R_{p_{i_b}} - R_{q_{i_b}}] + X_{m_b} [X_{p_{i_b}} - X_{q_{i_b}}]}{|Z_{m_b}|^2} \quad (23)$$

$$G(m_b, i_b) = \frac{X_{m_b} [R_{p_{i_b}} - R_{q_{i_b}}] - R_{m_b} [X_{p_{i_b}} - X_{q_{i_b}}]}{|Z_{m_b}|^2} \quad (24)$$

$$E(m_c, i_b) = \frac{R_{m_c} [R_{p_{i_b}} - R_{q_{i_b}}] + X_{m_c} [X_{p_{i_b}} - X_{q_{i_b}}]}{|Z_{m_c}|^2} \quad (25)$$

$$G(m_c, i_b) = \frac{X_{m_c} [R_{p_{i_b}} - R_{q_{i_b}}] - R_{m_c} [X_{p_{i_b}} - X_{q_{i_b}}]}{|Z_{m_c}|^2} \quad (26)$$

$$E(m_a, i_c) = \frac{R_{m_a} [R_{p_{i_c}} - R_{q_{i_c}}] + X_{m_a} [X_{p_{i_c}} - X_{q_{i_c}}]}{|Z_{m_a}|^2} \quad (27)$$

$$G(m_a, i_c) = \frac{X_{m_a} [R_{p_{i_c}} - R_{q_{i_c}}] - R_{m_a} [X_{p_{i_c}} - X_{q_{i_c}}]}{|Z_{m_a}|^2} \quad (28)$$

$$E(m_b, i_c) = \frac{R_{m_b} [R_{p_{i_c}} - R_{q_{i_c}}] + X_{m_b} [X_{p_{i_c}} - X_{q_{i_c}}]}{|Z_{m_b}|^2} \quad (29)$$

$$G(m_b, i_c) = \frac{X_{m_b} [R_{p_{i_c}} - R_{q_{i_c}}] - R_{m_b} [X_{p_{i_c}} - X_{q_{i_c}}]}{|Z_{m_b}|^2} \quad (30)$$

$$E(m_c, i_c) = \frac{R_{m_c} [R_{p_{i_c}} - R_{q_{i_c}}] + X_{m_c} [X_{p_{i_c}} - X_{q_{i_c}}]}{|Z_{m_c}|^2} \quad (31)$$

$$G(m_c, i_c) = \frac{X_{m_c} [R_{p_{i_c}} - R_{q_{i_c}}] - R_{m_c} [X_{p_{i_c}} - X_{q_{i_c}}]}{|Z_{m_c}|^2} \quad (32)$$

考慮複數功率之定義、式(21)至式(32)之敏感因子以及三相電力潮流基態解，可推導出三相線路即時實功率與虛功率功流量之計算式分別如式(33)及式(34)所示

$$P_{m_{abc}} = P_{m_{abc}}^0 + \sum_{i=1}^{NB} [E(m_{abc}, i_{abc}) \Delta P_{i_{abc}} - G(m_{abc}, i_{abc}) \Delta Q_{i_{abc}}] \quad (33)$$

$$Q_{m_{abc}} = Q_{m_{abc}}^0 + \sum_{i=1}^{NB} [G(m_{abc}, i_{abc}) \Delta P_{i_{abc}} + E(m_{abc}, i_{abc}) \Delta Q_{i_{abc}}] \quad (34)$$

此外，將上述二式展開後，可進一步將線路個別相實功率與虛功率流量計算式表示如式(35)至式(40)所示。

$$P_{m_a} = P_{m_a}^0 + \sum_{i=1}^{NB} [E(m_a, i_a) \Delta P_{i_a} - G(m_a, i_a) \Delta Q_{i_a}] + \sum_{i=1}^{NB} [E(m_a, i_b) \Delta P_{i_b} - G(m_a, i_b) \Delta Q_{i_b}] \quad (35)$$

$$Q_{m_a} = Q_{m_a}^0 + \sum_{i=1}^{NB} [G(m_a, i_a) \Delta P_{i_a} + E(m_a, i_a) \Delta Q_{i_a}] + \sum_{i=1}^{NB} [G(m_a, i_b) \Delta P_{i_b} + E(m_a, i_b) \Delta Q_{i_b}] \quad (36)$$

$$P_{m_b} = P_{m_b}^0 + \sum_{i=1}^{NB} [E(m_b, i_a) \Delta P_{i_a} - G(m_b, i_a) \Delta Q_{i_a}] + \sum_{i=1}^{NB} [E(m_b, i_b) \Delta P_{i_b} - G(m_b, i_b) \Delta Q_{i_b}] + \sum_{i=1}^{NB} [E(m_b, i_c) \Delta P_{i_c} - G(m_b, i_c) \Delta Q_{i_c}] \quad (37)$$

$$Q_{m_b} = Q_{m_b}^0 + \sum_{i=1}^{NB} [G(m_b, i_a) \Delta P_{i_a} + E(m_b, i_a) \Delta Q_{i_a}] + \sum_{i=1}^{NB} [G(m_b, i_b) \Delta P_{i_b} + E(m_b, i_b) \Delta Q_{i_b}] + \sum_{i=1}^{NB} [G(m_b, i_c) \Delta P_{i_c} + E(m_b, i_c) \Delta Q_{i_c}] \quad (38)$$

$$P_{m_c} = P_{m_c}^0 + \sum_{i=1}^{NB} [E(m_c, i_a) \Delta P_{i_a} - G(m_c, i_a) \Delta Q_{i_a}] + \sum_{i=1}^{NB} [E(m_c, i_b) \Delta P_{i_b} - G(m_c, i_b) \Delta Q_{i_b}] + \sum_{i=1}^{NB} [E(m_c, i_c) \Delta P_{i_c} - G(m_c, i_c) \Delta Q_{i_c}] \quad (39)$$

$$Q_{m_c} = Q_{m_c}^0 + \sum_{i=1}^{NB} [G(m_c, i_a) \Delta P_{i_a} + E(m_c, i_a) \Delta Q_{i_a}] + \sum_{i=1}^{NB} [G(m_c, i_b) \Delta P_{i_b} + E(m_c, i_b) \Delta Q_{i_b}] + \sum_{i=1}^{NB} [G(m_c, i_c) \Delta P_{i_c} + E(m_c, i_c) \Delta Q_{i_c}] \quad (40)$$

利用所推導之線路流量公式以及三

相電力潮流程式所得之基態解，即可正確且快速計算出負載需求變動後之線路流量。

三、以 IEEE 測試系統驗證 TZBD 法

為了驗證所提方法之可行性與正確性，將根據所推導之 TZBD 法數學模型以及隱含式 Z_{Bus} 高斯法三相電力潮流求解技巧，利用商業軟體 MATLAB 作為程式開發工具撰寫程式，並以 IEEE 4-Bus 及 IEEE 13-Bus 之測試系統為例驗證所提方法之正確性。因此，將依照 IEEE 4-Bus(如圖 2)及 IEEE 13-Bus(如圖 3)測試系統，設定相關參數及系統狀態，考慮負載變動後之案例，探討模擬結果之準確度，以驗證此法之可行性與正確性。

首先，執行三相電力潮流程式計算線路實功率及虛功率流量，其結果一方面可作為利用 TZBD 法求取負載變動後之線路流量基態解，同時亦可以從中取得母線阻抗矩陣；接者，再以(15)至(32)式配合 Z_{Bus} 與線路原始阻抗(Primitive Impedance)計算個別母線對各條線路之敏感因子矩陣 $E(m_{abc}, i_{abc})$ 及 $G(m_{abc}, i_{abc})$ 等；最後，再利用(33)及(40)式計算負載變動後之線路流量。綜合而言，TZBD 法計算流程如圖 4 所示。

在分析 IEEE 4-Bus 範例中，假設變壓器負載為滿載時之基態解，並在此基態解下分別考慮負載非一致性變動則假設五個案例(Case 1~Case 5)，如表 1 所示，例如：在 Case 1 情況下，a 相負載實功率及虛功率分別為增加 4% 與 0%、b 相負載實功率及虛功率分別為增加 8% 與 5% 以及 c 相負載實功率及虛功率分別為增加 7% 與 2%。綜言之，表中所列之負載變動量有增量與減量安排，更能契合實際情況，因此模擬結果更具代表性。此外，IEEE 13-Bus 範例中，因篇幅所限，僅列出負載一致性增加 10% 的模擬結果。

各案例模擬結果分述如下：首先，就 IEEE 4-Bus 測試系統而言，Case 1 至 Case

5 的模擬結果分別列示於表 2 至表 11，綜合歸納模擬分析結果可獲知，線路實功率流量之誤差量平均而言低於 1%，優於虛功率流量之誤差值；此外，其誤差百分比與負載變動率為正比關係，換句話說，負載變動愈大誤差愈大；反之，則愈小。整體而言，就應用的觀點來看，其誤差在容許的範圍內，亦即若在程式的執行過程中發現誤差量過大則可以重新執行電力潮流求取新的基態解，再利用 TZBD 法計算負載變動後之線路量流量即可改善負載變動較大時所造成之誤差。

最後，就 IEEE 13-Bus 測試系統而言，就負載一致性增加 10% 之線路與變壓器實功率與虛功率流量模擬結果列於表 12 及 13 中，如前所述，其實功率流量的準確度優於虛功率流量，實功率流量之最大誤差約 3.58%，平均誤差約為 1%；然而，虛功率流量的誤差普遍而言較高。

表 1 IEEE 4-Bus 負載不規則變動表

母線 編號	Case 1		Case 2		Case 3		Case 4		Case 5	
	P _D %	Q _D %	P _D %	Q _D %	P _D %	Q _D %	P _D %	Q _D %	P _D %	Q _D %
4(a 相)	4	0	-4	0	8	6	3	6	-4	-5
4(b 相)	8	5	-8	-5	5	4	4	5	-6	-3
4(c 相)	7	2	-7	-2	4	3	7	4	-2	-1

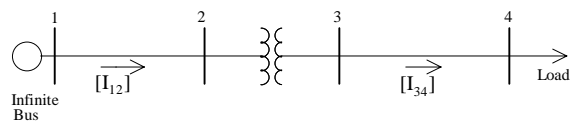


圖 2 IEEE 4-Bus 測試系統單線圖

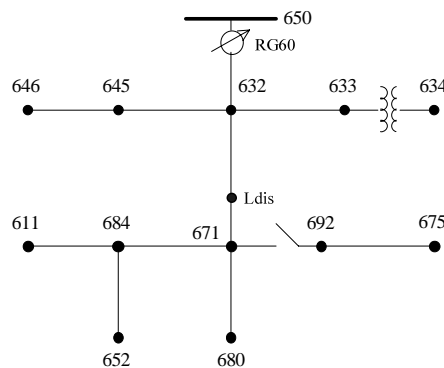


圖 2 IEEE 13-Bus 測試系統單線圖

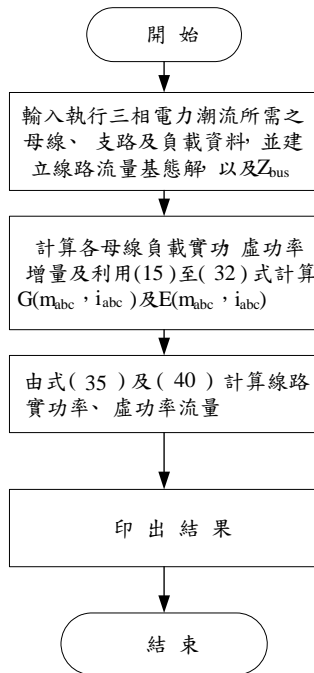


圖 4 以 TZBD 法求解配電線路流量之流程圖

表 2 負載非一致性變動在 Case 1 情況下之線路與變壓器實功率流量模擬結果

求解方法 母線編號		三相電力潮流			三相母線阻抗分佈因子法			誤差百分比%		
起	迄	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
1	2	0.21097	0.20957	0.20971	0.20939	0.20615	0.20853	0.748922	1.631913	0.562682
2	3	0.20922	0.20857	0.2085	0.20776	0.20541	0.2074	0.69783	1.515079	0.527578
3	4	0.20549	0.20485	0.20474	0.20419	0.20217	0.20402	0.632634	1.308274	0.351666

表 3 負載非一致性變動在 Case 1 情況下之線路與變壓器虛功率流量模擬結果

求解方法 母線編號		三相電力潮流			三相母線阻抗分佈因子法			誤差百分比%		
起	迄	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
1	2	0.14221	0.14337	0.14631	0.13972	0.13444	0.13863	1.750932	6.228639	5.249129
2	3	0.13918	0.14065	0.14312	0.1368	0.13221	0.13589	1.710016	6.000711	5.051705
3	4	0.11947	0.12101	0.1232	0.11838	0.11578	0.11842	0.912363	4.321957	3.87987

表 4 負載非一致性變動在 Case 2 情況下之線路與變壓器實功率流量模擬結果

求解方法 母線編號		三相電力潮流			三相母線阻抗分佈因子法			誤差百分比%		
起	迄	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
1	2	0.19334	0.17436	0.1821	0.19494	0.17729	0.1833	0.82755767	1.680431292	0.658978583
2	3	0.19183	0.17385	0.18106	0.19331	0.17655	0.18217	0.771516447	1.553062985	0.613056445
3	4	0.18853	0.17112	0.17808	0.18979	0.17337	0.17882	0.668328648	1.31486676	0.415543576

表 5 負載非一致性變動在 Case 2 情況下之線路與變壓器虛功率流量模擬結果

求解方法 母線編號		三相電力潮流			三相母線阻抗分佈因子法			誤差百分比%		
起	迄	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
1	2	0.13722	0.11793	0.12814	0.13971	0.12569	0.13511	1.814604285	6.58017468	5.439363197
2	3	0.1344	0.11613	0.12581	0.13679	0.12346	0.13237	1.77827381	6.311891845	5.214211907
3	4	0.11724	0.10253	0.11063	0.11838	0.10706	0.11494	0.972364381	4.418219058	3.895869113

表 6 負載非一致性變動在 Case 3 情況下之線路與變壓器實功率流量模擬結果

求解方法 母線編號		三相電力潮流			三相母線阻抗分佈因子法			誤差百分比%		
起	迄	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
1	2	0.22135	0.20058	0.20496	0.21654	0.20069	0.2031	2.173029139	0.054840961	0.907494145
2	3	0.21932	0.19988	0.2037	0.21491	0.19995	0.20197	2.010760533	0.035021013	0.849288169
3	4	0.21515	0.19642	0.20008	0.21139	0.19677	0.19862	1.747617941	0.178189594	0.729708117

表 7 負載非一致性變動在 Case 3 情況下之線路與變壓器虛功率流量模擬結果

求解方法 母線編號		三相電力潮流			三相母線阻抗分佈因子法			誤差百分比%		
起	迄	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
1	2	0.15723	0.13798	0.14319	0.14494	0.13354	0.13947	7.816574445	3.217857661	2.597946784
2	3	0.15356	0.13552	0.14027	0.14202	0.13131	0.13673	7.514977859	3.106552538	2.523704285
3	4	0.13116	0.11744	0.12122	0.12361	0.11491	0.1193	5.756328149	2.154291553	1.583897047

表 8 負載非一致性變動在 Case 4 情況下之線路與變壓器實功率流量模擬結果

求解方法 母線編號		三相電力潮流			三相母線阻抗分佈因子法			誤差百分比%		
起	迄	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
1	2	0.20914	0.2007	0.21076	0.20754	0.19889	0.2085	0.765037774	0.901843548	1.072309736
2	3	0.20739	0.19984	0.20946	0.20591	0.19815	0.20737	0.713631323	0.845676541	0.997803877
3	4	0.2036	0.19636	0.20564	0.20239	0.19497	0.20402	0.594302554	0.707883479	0.787784478

表 9 負載非一致性變動在 Case 4 情況下之線路與變壓器虛功率流量模擬結果

求解方法 母線編號		三相電力潮流			三相母線阻抗分佈因子法			誤差百分比%		
起	迄	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
1	2	0.14937	0.13896	0.14903	0.14494	0.13441	0.14034	2.96578965	3.274323546	5.83104073
2	3	0.14621	0.1365	0.14578	0.14202	0.13218	0.1376	2.865741057	3.164835165	5.611194951
3	4	0.1261	0.11832	0.12549	0.12361	0.11578	0.12017	1.974623315	2.146720757	4.239381624

表 10 負載非一致性變動在 Case 5 情況下之線路與變壓器實功率流量模擬結果

求解方法 母線編號		三相電力潮流			三相母線阻抗分佈因子法			誤差百分比%		
起	迄	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
1	2	0.18976	0.17911	0.19035	0.19494	0.18089	0.1923	2.729763912	0.993802691	1.024428684
2	3	0.18843	0.17843	0.18926	0.19331	0.18015	0.19117	2.589821154	0.963963459	1.009193702
3	4	0.18533	0.17559	0.18607	0.18979	0.17697	0.18782	2.406518103	0.78592175	0.940506261

表 11 負載非一致性變動在 Case 5 情況下之線路與變壓器虛功率流量模擬結果

求解方法 母線編號		三相電力潮流			三相母線阻抗分佈因子法			誤差百分比%		
起	迄	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
1	2	0.12657	0.11991	0.13234	0.13535	0.12743	0.13598	6.936872877	6.271370194	2.750491159
2	3	0.12406	0.11805	0.12969	0.13243	0.1252	0.13324	6.746735451	6.056755612	2.73729663
3	4	0.10815	0.10381	0.11326	0.11402	0.1088	0.11581	5.427646787	4.806858684	2.251456825

表 12 負載一致性增加 10%之線路與變壓器實功率流量模擬結果

求解方法 母線編號		三相電力潮流			三相母線阻抗分佈因子法			誤差百分比%		
起	迄	A相	B相	C相	A相	B相	C相	A相	B相	C相
650	RG60	0.13761	0.10456	0.14866	0.13545	0.10607	0.14762	1.572314	1.444143	0.702634
RG60	632	0.13755	0.10451	0.14861	0.13539	0.10601	0.14756	1.569533	1.439747	0.706418
632	645	-	0.03519	0.00746	-	0.03498	0.00790	-	0.5939	5.883488
632	633	0.01805	0.01346	0.0135	0.01798	0.01343	0.01346	0.414083	0.257437	0.330889
632	Ldis	0.11667	0.05631	0.1219	0.11511	0.05795	0.12154	1.340654	2.909414	0.298728
633	634	0.018	0.01344	0.01345	0.01794	0.01341	0.01342	0.359444	0.258185	0.257993
645	646	-	0.01617	0.00744	-	0.01598	0.00763	-	1.177872	2.539955
671	684	0.01173	-	0.01741	0.01215	-	0.01766	3.581245	-	0
671	680	0	0	0	0	0	0	0	0	0
671	692	0.0594	0.00751	0.04482	0.05919	0.00757	0.04505	0.352424	0.733955	0.516756
684	652	0.01171	-	-	0.01213	-	-	3.586678	-	-
684	611	-	-	0.01737	-	-	0.01762	-	-	1.439263
692	675	0.05379	0.00751	0.03199	0.05370	0.00751	0.03198	0.167219	0.000101	0.031245
Ldis	671	0.11513	0.05166	0.1121	0.10935	0.05326	0.11197	5.020951	3.094195	0.11956

表 13 負載一致性增加 10%之線路與變壓器虛功率流量模擬結果

求解方法 母線編號		三相電力潮流			三相母線阻抗分佈因子法			誤差百分比%		
起	迄	A相	B相	C相	A相	B相	C相	A相	B相	C相
650	RG60	0.07718	0.04186	0.07213	0.07241	0.04245	0.06975	6.174392	1.412436	3.295569
RG60	632	0.07714	0.04182	0.07209	0.07238	0.04242	0.06972	6.168589	1.430005	3.28792
632	645	-	0.01401	0.01281	-	0.01401	0.01307	-	0.016989	2.047943
632	633	0.01285	0.01031	0.01035	0.01271	0.01025	0.01027	1.064949	0.551581	0.74268
632	Ldis	0.05331	0.01353	0.0377	0.05075	0.01487	0.03721	4.804917	9.884261	1.288784
633	634	0.01277	0.01028	0.01032	0.01265	0.01022	0.01024	0.915427	0.553113	0.744767
645	646	-	-2.00E-05	0.01279	-	0.00004	0.01310	-	292.6114	2.454562
671	684	0.00785	-	-0.00309	0.00814	-	0.00264	3.694268	-	0
671	680	0	0	0	0	0	0	0	0	0
671	692	0.01118	-0.01534	0.00275	0.01143	0.01534	0.00305	2.258936	0.025209	10.73527
684	652	0.00784	-	-	0.00813	-	-	3.69898	-	-
684	611	-	-	-0.00312	-	-	0.00267	-	-	14.42308
692	675	-0.00081	-0.01534	0.00131	0.00086	0.01535	0.00131	6.170166	0.064933	0.001069
Ldis	671	0.05033	0.01061	0.03086	0.04819	0.01197	0.03072	4.253544	12.85617	0.450223

四、結論

本研究計畫已推導出適用於求解配電饋線流量的三相母線阻抗分佈因子之數學模型，並配合三相電力潮流程式所得之基態解與母線阻抗矩陣，在 Matlab 環境下撰寫程式成功開發求解配電饋線流量之三相母線阻抗分佈因子程式，且經測試無誤後亦應用於常見之放射型及常閉環路型等配電系統之線路流量的求解，並獲得不錯之成效。綜合而言，本研究計畫不論在相關文獻蒐集與探討方面均具深度及廣度，而且所開發的程式適用於負載變動後之即時線路流量計算，亦可以作為未來配電系統控制、運轉與自動化等相關應用，藉此提高配電系統整體供電品質、安全性與可靠度。

五、計畫成果自評

本研究計畫成果與申請書之預定目標大抵相符，且已達預期目標。研究成果可做為配電自動化之即時線路流量監控等相關應用，以提高配電系統供電可靠度以及安全性，亦可作為求解即時三相電力潮流之基礎。本計畫部分研究成果已整理完畢並投稿至 2007 ICICIC(“Power System Fast Line Flow Calculation for Security Control by Sensitivity Factor,” Second International Conference on Innovative Computing, Information and Control, September 5-7, 2007, Kumamoto City, Japan, pp. A12-5.)且已發表完畢；此外，另有一篇文章投稿至第二十八屆電力研討會中；另部分成果也預定在國際研討會或學術期刊上發表。

六、參考文獻

- [1] W. F. Tinney and C. E. Hart, "Power Flow Solution by Newton's Method," IEEE Trans. On Power App. & Syst., PAS-86, pp. 1449-1460, Nov. 1967.
- [2] B. Stott, "Review of Load Flow Calculation Methods," Proceedings of the IEEE, Vol. 62, No. 7, July 1974.
- [3] B. Stott and O. Alsac, "Fast Decoupled Load Flow", IEEE Transactions on PAS. Vol. PAS-93, no. 3, May/June, 1974.
- [4] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, Power Generation, Operation and Control, Wiley, New York, 91-109, pp. 410-430(1984).
- [5] W. Y. Ng, "Generalized Generation Distribution Factors for Power System Security Evaluations," IEEE Trans. On PAS, Vol. PAS-100, 1981, pp. 1001-1005.
- [6] C. E. Lin, S. T. Chen and C. L. Huang, "A Two-Step Sensitivity Approach for Real-Time Line Flow Calculation," Electric Power Research, 21, 1991, pp. 63-69.
- [7] 姜士均，以敏感因子法求解電力系統即時實功及虛功線路之流量，碩士論文，建國科技大學機電光系統研究所，彰化，台灣，(2005)。
- [8] C. E. Lin, S. T. Chen and C. L. Huang, "A Direct Newton-Raphson Economic Dispatch," IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 7, No. 3, August 1992.
- [9] C. E. Lin and S.T. Chen, "Real-Time Economic Dispatch for Non-Conforming Demand Changes," IEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, November 1991, Hong Kong.
- [10] R. C. Burchett, H. H. Happ, D. R. Vierath and K. A. Wirgav, "Developments in Optimal Power Flow", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 2, pp.406-414, February 1982.
- [11] Jiann-Fuh Chen and Shin-Der Chen, "Multiobjective Power Dispatch with Line Flow Constraints Using the Fast Newton-Raphson Method," IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume 12, Issue 1, pp. 86 - 93, March 1997.
- [12] 楊念哲，配電系統三相電力潮流分析技術研究，碩士論文，國立臺灣科技大學電機工程系，台北，台灣，(2004)。
- [13] T. H. Chen, M. S. Chen, T. Inoue, P. Kotas, and E. A. Chebli, "Distribution System Power Flow Analysis – A Rigid Approach," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 4, pp. 1146-1152, 1991.
- [14] T. H. Chen, M. S. Chen, T. Inoue, P. Kotas, and E. A. Chebli, "Three-phase Cogenerator and Transformer Models for Distribution System Analysis," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 6, No. 4, pp. 1671-1681, 1998.