

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

用於電力系統電壓控制之原型靜態同步調相器之研究(2/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2213-E-002-029-

執行期間：92 年 08 月 01 日至 93 年 07 月 31 日

執行單位：國立臺灣大學電機工程學系暨研究所

計畫主持人：許源浴

計畫參與人員：張權德 陳昭宏 陳本盛 陳偉倫 吳勝隆 郭啟田 林松濤 李政道

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 5 月 14 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

用於電力系統電壓控制之原型靜態同步調相器之研究(2/3)

A prototype static synchronous compensator for power system voltage control

計畫編號：NSC 92-2213-E-002-029

執行期限：92 年 8 月 1 日至 93 年 7 月 31 日

主持人：許源浴教授 國立台灣大學電機工程學研究所

計畫參與人員：張權德 陳昭泓 陳本盛 陳偉倫 吳勝隆 郭啟田 林松濤 李政道
國立台灣大學電機工程學研究所

一、中文摘要

本年度計畫之主要目的在設計靜態同步調相器之控制器。在計畫中，延伸第一年之計畫研究成果，使用 Kron 化簡法以求得從補償匯流排(峨眉)往系統端看出之系統戴維寧等效電路，再利用此一簡化等效電路來設計靜態同步調相器之控制器參數。所採用之控制器參數設計法為將系統動態方程式在某一特定工作點線性化之後，利用根軌跡法與極點指定法，將原本較不穩定的振盪模式之特徵值指定至較穩定的區域，即可陸續決定各參數值。將此已選定之控制器架構和參數放入全系統進行時域模擬，並且在匯流排的負載端加入 10% 的擾動訊號，觀察系統加入 STATCOM 但未加入控制器時與加入 STATCOM 控制器後的動態電壓與電流響應圖，驗證所設計的 STATCOM 控制系統確實能改善系統動態特性。

關鍵詞：靜態同步調相器、動態電壓響應、根軌跡法、極點指定法

Abstract

The purpose of phase 2 of this three-year project is to use a systematic procedure to design the controller of the static synchronous compensator (STATCOM). The Thevenin equivalent circuit from O-MEI bus to Taiwan power system is derived by Kron reduction. Based on this Thevenin equivalent circuit, the system dynamic equations are linearized around a nominal operating point, and the parameters of the STATCOMs controller can be designed. The eigenvalues of the poorly damped mode are shifted to a more stable region by root locus method and pole assignment approach. Then, the controller parameters can be determined. To demonstrate the effectiveness of the designed controller, the dynamic voltage responses with/without STATCOM controllers under a 10% change in load and under different operating conditions are investigated using the time-domain simulations. Simulation results indicated that the STATCOM controller designed by the systematic procedure can improve the dynamic voltage

performance over a wide range of operating conditions.

Keywords: static synchronous compensators (STATCOMs), dynamic voltage response, root locus method, pole assignment approach

二、緣由與目的

為改善台灣電力系統所遭遇之輸電瓶頸，台電公司及國內學者已嘗試利用傳統串聯電容器或開控串聯電容器來調整電力潮流不平均分佈之第一、第二輸電迴路[8]，結果顯示不但可提升輸電效率、更可改善電力系統穩定度。但報告[8]中亦指出，串聯補償裝置雖可解決輸電線過載及電力潮流分佈不平均問題，但峨眉匯流排電壓過低的問題仍然存在於台電系統。因此，本計畫希望探討如何應用 STATCOM 裝置改善峨眉匯流排電壓，並進一步提升峨眉電壓之動態穩定度。

STATCOM 控制系統之設計工作主要是在決定包含有解耦合電流調整器參數、交流電壓調整器參數及直流電壓調整器參數[1]，利用極點指定法之技巧決定這些控制器的參數以後，在不同的工作點以時域模擬方式驗證固定增益之 STATCOM 控制器之性能，由結果可知所設計的 STATCOM 控制器可在寬廣的工作範圍內提供不錯的動態特性。

三、系統模型

圖 1 為連接台灣北部與中部的 345KV 傳輸線單線圖，STATCOM 系統裝設在電壓為全系統最低的峨眉匯流排 (bus 5)，使用 Kron 化簡法可以求得系統從峨眉匯流排往系統端看出之戴維寧等效電路，如圖 2 所示。此等效電路還包含了一組連接到峨眉匯流排的等效負載，而以 L_l 則為變壓器漏電感與 STATCOM 濾波電感之和， R_l 則為並聯變壓器之等效電阻，直流端電阻 R_p 則用來代表變流器之切換損失，STATCOM 交流端

電路方程式可以寫成：

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{tha} \\ i_{thb} \\ i_{thc} \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{1}{L'} \begin{bmatrix} -L_{eq1} & 0 & 0 & -L_{eq2} & 0 & 0 \\ 0 & -L_{eq1} & 0 & 0 & -L_{eq2} & 0 \\ 0 & 0 & -L_{eq1} & 0 & 0 & -L_{eq2} \\ -L_{eq3} & 0 & 0 & -L_{eq4} & 0 & 0 \\ 0 & -L_{eq3} & 0 & 0 & -L_{eq4} & 0 \\ 0 & 0 & -L_{eq3} & 0 & 0 & -L_{eq4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{tha} \\ i_{thb} \\ i_{thc} \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L'} \begin{bmatrix} (L_s + L_L)v_{tha} - L_L e_a \\ (L_s + L_L)v_{thb} - L_L e_b \\ (L_s + L_L)v_{thc} - L_L e_c \\ -L_L v_{tha} + (L_{th} + L_L)e_a \\ -L_L v_{thb} + (L_{th} + L_L)e_b \\ -L_L v_{thc} + (L_{th} + L_L)e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， $L' = L_{th} \cdot L_s + L_{th} \cdot L_L + L_L \cdot L_s$ ， $L_{eq1} = R_{th} \cdot L_s + R_L \cdot L_s + R_{th} \cdot L_L$ ，

$L_{eq2} = R_L \cdot L_s - R_s \cdot L_L$ ， $L_{eq3} = R_L \cdot L_{th} - R_{th} \cdot L_L$ ， $L_{eq4} = R_s \cdot L_{th} + R_s \cdot L_L + R_L \cdot L_{th}$ ，而 L_L 及 R_L 則為負載之電感及電阻值。使用同步座標轉換法可以將(1)式轉換到 d-q 座標平面：

$$\begin{bmatrix} i_{thd} \\ i_{thq} \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_{eq1}/L' & \omega & -L_{eq2}/L' & 0 \\ -\omega & -L_{eq1}/L' & 0 & -L_{eq2}/L' \\ -L_{eq3}/L' & 0 & -L_{eq4}/L' & \omega \\ 0 & -L_{eq3}/L' & -\omega & -L_{eq4}/L' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{thd} \\ i_{thq} \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L'} \begin{bmatrix} (L_s + L_L)v_{thd} - L_L e_d \\ (L_s + L_L)v_{thq} - L_L e_q \\ -L_L v_{thd} + (L_{th} + L_L)e_d \\ -L_L v_{thq} + (L_{th} + L_L)e_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

而直流端電路方程式與功率平衡方程式則為

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C} \left(i_{dc} + \frac{v_{dc}}{R_p} \right) \quad (3)$$

$$v_{dc} \cdot i_{dc} = e_d i_d + e_q i_q \quad (4)$$

為了使變流器電流 i_d 與 i_q 達到解耦合之目的，變流器輸出電壓 e_d 與 e_q 必需為

$$e_d = \frac{L'}{L_{th} + L_L} (x_1 - \omega \cdot i_q) + \frac{L_{eq3}}{L_{th} + L_L} i_{thd} + \frac{L_L}{L_{th} + L_L} v_{thd} \quad (5)$$

$$e_q = \frac{L'}{L_{th} + L_L} (x_2 + \omega \cdot i_d) + \frac{L_{eq3}}{L_{th} + L_L} i_{thq} + \frac{L_L}{L_{th} + L_L} v_{thq} \quad (6)$$

將(5)與(6)式代入(2)式中後可得(7)式，

$$\begin{bmatrix} i_{thd} \\ i_{thq} \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_{th} + R_L}{L_{th} + L_L} & \omega & \frac{L_{eq3}}{L'} & \frac{\omega L_L}{L_{th} + L_L} \\ -\omega & \frac{R_{th} + R_L}{L_{th} + L_L} & \frac{\omega L_L}{L_{th} + L_L} & \frac{L_{eq3}}{L'} \\ 0 & 0 & \frac{L_{eq4}}{L'} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{L_{eq4}}{L'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{thd} \\ i_{thq} \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{th} + L_L} v_{thd} - \frac{L_L}{L_{th} + L_L} x_1 \\ \frac{1}{L_{th} + L_L} v_{thq} - \frac{L_L}{L_{th} + L_L} x_2 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

此處新引進了兩個控制變數 x_1 與 x_2 ，

用來代表控制器中電流調整器之輸出，如圖3所示。此時變流器電流 i_d 與 i_q 已和其他電流無耦合項存在，而且分別只和控制變數 x_1 與 x_2 成簡單的一階線性微分方程式之關係。

如圖3所示，STATCOM之控制系統包含電流、交流電壓與直流電壓等三組調整器，其中電流調整器輸出再經過解耦合處理後可以得到變流器輸出電壓之命令值 e_d^* 與 e_q^* 。在實際應用上，欲控制變流器輸出，必須將 e_d^* 與 e_q^* 轉換成調變指標 m_1^* 與變流器相位角 δ^* ：

$$m_1^* = \frac{\sqrt{e_d^{*2} + e_q^{*2}}}{V_{dc}} \quad (8)$$

$$\delta^* = \tan^{-1} \frac{e_q^*}{e_d^*} \quad (9)$$

為了得到 x_1 與 x_2 這兩個控制變數，使用一組包含 K_1 與 K_2 參數的比例積分控制器作為電流調整器。同理，利用比例積分控制器作為直流電壓調整器與交流電壓調整器，其參數分別為 K_3 與 K_4 及 K_5 與 K_6 。電流調整器之輸出變數為 x_1 與 x_2 ，而直流電壓調整器與交流電壓調整器的輸出分別為 d 軸電流命令值 i_d^* 與 q 軸電流命令值 i_q^* 。其中，交流電壓調整器的部分因為流入匯流排虛功率和 q 軸電流有較直接的關係，因此在此交流電壓調整器中比例積分控制器輸出為變流器流入匯流排之虛功率，再由此虛功率經 $i_q^* = Q / (\frac{2}{3} |V_{bus}|)$ 得到變流器 q 軸電流命令值 i_q^* 。

此處共有 $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ 等 6 個參數，分別屬於電流調整器、直流電壓控制器與交流電壓控制器等三組比例積分控制器，其參數選擇將於下節中探討。

四、固定增益控制器

本計畫採用根軌跡法 (root locus method) 與極點指定法 (pole assignment approach) 選擇 K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 與 K_6 等 6 個參數，首先將(7)式與(3)式在某一特定工作點線性化之後，將原本較不穩定的振盪模式指定至較穩定的區域後，即可陸續決定各參數值。線性化之後的系統方程式為

$$\dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t) \quad (10)$$

$$Y(t) = CX(t) \quad (11)$$

其中 $X(t) = [i_{thd}, i_{thq}, i_d, i_q, v_{dc}]^T$ 、

$u(t)$ 是輸入向量而 $Y(t)$ 則是輸出向量。系統特徵值可由 A 矩陣計算得到，表 1 中第一行為包含 STATCOM 但無 STATCOM 控制器之系統特徵值，亦即此時 STATCOM 輸出電壓 e_d 與 e_q 是固定不變的。從表 1 中可以發現此時存在一 STATCOM 模式（特徵值為 $-0.0329 \pm j1.00$ ），此模式阻尼比其他組特徵值都差，可藉由 STATCOM 控制器將此阻尼較差的極點移至阻尼較佳的極點位置。圖 4 為在各種不同組合之 K_1 與 K_2 參數值之根軌跡圖，基於充足相位邊限、較佳阻尼與較快響應時間等控制器性能的考量下，選擇 $K_1=1.3$ 與 $K_2=1.5$ 為電流調整器之參數。

表 1 $P_L=1.01$ 與 $Q_L=0.795$ 工作點之系統特徵值

包含 STATCOM 但無 STATCOM 控制器之系 統	包含 STATCOM 及固定增益控制器之系統 ($K_1=1.3, K_2=1.5, K_3=-0.67$ $K_4=-0.41, K_5=8.732, K_6=0.294$)
$-1.142 \pm j1.000$	$-1.142 \pm j1.000$
$-0.0329 \pm j1.000$	$-0.40 \pm j1.0146$
	$-0.881 \pm j0.869$
	$-0.512 \pm j0.512$

表 2 各種不同 K_3 and K_4 組合下之極點、阻尼比與上升時間

特徵值	K_3	K_4	阻尼 比 ξ	上升時間 t_r (ms)
$-0.2305 \pm j0.2307$	-0.43	-0.11	0.707	35
$-0.3252 \pm j0.3254$	-0.59	-0.19	0.707	25
$-0.422 \pm j0.422$	-0.65	-0.32	0.707	19.2
$-0.512 \pm j0.512$	-0.67	-0.41	0.707	15.8
$-0.504 \pm j0.504$	-0.82	-0.50	0.707	18

表 2 為直流電壓調整器參數 K_3 與 K_4 在各種不同組合下之極點與上升時間分析（在此皆考慮臨界阻尼狀況，即 $\xi=0.707$ ），在此條件下，選擇上升時間最短的控制器參數 $K_3=-0.67$ 與 $K_4=-0.41$ 為直流電壓調整器之參數。最後，利用同樣的方法選擇交流電壓調整器參數 K_5 與 K_6 ，在工作點 $P_L=1.01pu$ 與 $Q_L=0.795pu$ 下，選擇 $K_5=8.732$ 與 $K_6=0.294$ 時可以將原本阻尼較差極點（ $-0.0329 \pm j1.00$ ）移到阻尼較好的位置（ $-0.40 \pm j1.0146$ ）。在工作點 $P_L=1.01pu$ 與 $Q_L=0.795pu$ 之條件下，具有固定增益控制器之閉迴路系統的特徵值都列在表 1 之第 2 行。

五、模擬結果與討論

本計劃在匯流排的負載端加入 10% 的擾動訊號，圖 5 為 $P_L=1.01 pu$ 、 $Q_L=0.795 pu$ ，與 $V_{bus}=0.98 pu$ 之情況下，系統加入

STATCOM 但未加入控制器時的動態電壓與電流響應。圖 6 至圖 8 為當匯流排負載在 $P_L=1.01 pu$ 與 $Q_L=0.795 pu$ ， $P_L=1.22 pu$ 與 $Q_L=0.96 pu$ ， $P_L=0.595 pu$ 與 $Q_L=0.5 pu$ 等三個工作點時，系統加入 STATCOM 控制器後的動態響應圖。

由圖 5 至圖 8，我們可觀察出下列幾點：

1. 如圖 5 所示，系統未加入任何控制器之前阻尼是很差的。因為由表 1 可知開迴路系統之 STATCOM 模式其特徵值為 $-0.0329 \pm j1.00$ ，阻尼比 ξ 僅為 0.03，此阻尼很差的模式在固定增益控制系統加入後已有很大的改善，如圖 6 所示，這是因為 STATCOM 交流電壓調整器將原本的特徵值由 $-0.0329 \pm j1.00$ 移至 $-0.40 \pm j1.0146$ （如表 1 所示）。
2. 本計畫所設計之 STATCOM 控制器不但可以正常工作在重載下，在系統處於輕載下，亦有很好的動態特性。由圖 6 至圖 8 看出，STATCOM 控制器不僅改善原本振盪模式的阻尼，而且能夠改善系統非線性特性相當明顯的第一個搖擺週期的暫態特性。在實際應用上，由於成本等經濟因素的考量下，STATCOM 的補償性能通常會受限於它的補償容量，即補償容量愈大、STATCOM 所能提供暫態補償效果會愈好。
3. 由圖 7 和圖 8 之結果可以發現，在系統負載變化時，直流電壓調整器的參數即使固定不變，對系統動態響應仍然不會有太大之影響。
4. 文獻[14]中曾提及，若利用解耦合法設計 STATCOM 比例積分控制器時，積分器參數若太大將會影響閉迴路系統的相位增益。本計劃所設計 STATCOM 控制系統雖採用電流解耦方法，但三組調整器中的積分參數 K_2 、 K_4 與 K_6 數值都不大，因此應該可以忽略積分器參數對閉迴路系統相位增益之影響。

六、結論

本計畫中提出一套設計 STATCOM 控制系統之方法，並應用於改善電力系統中的匯流排動態電壓特性。主要的特點在於利用根軌跡法與極點指定法來選擇控制器參數，使系統在不同的工作點都能維持良好的動態特性，最後則以時域模擬方式驗證所設計的 STATCOM 控制系統確實能改善系統動態特性。

七、計劃結果自評

本計畫針對用於電力系統電壓控制之靜態同步調相器作第二年之研究，除完成靜態同步調相器應用於台電簡化系統之測試，對於預期工作項目中的「建立系統模型」、「撰寫動態模擬程式」、「撰寫頻域分析程式」、「設計各電壓調整器輸入信號」、「決定調整器參數」以及「結果測試和修正」等項目均順利完成，達成本計畫原先所擬定之進度和目標。

八、參考文獻

- [1] 張權德，“用以改善動態特性之靜態同步補償器與整合型電力潮流控制器之設計，”台灣大學電機研究所博士論文，中華民國九十一年四月。
- [2] C.T. Chang and Y. Y. Hsu, "Design of an ANN tuned adaptive UPFC supplementary damping controller for power system dynamic performance enhancement," Electric Power Systems Research, Vol. 66, pp. 259-265, 2003. NSC90-2213-E-002-131
- [3] G. Joos, L. Moran, and P. Ziogas, "Performance analysis of a pwm inverter var compensator," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 6, no. 3, pp. 380-391, 1991.
- [4] L. Gyugyi, "Dynamic compensation of ac transmission lines by solid-state synchronous voltage sources," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 9, no. 2, pp. 904-911, 1994.
- [5] C. W. Edwards, K. E. Mattern, E. J. Stacey, P. R. Nannery, and J. Gubernick, "Advanced static var generator employing GTO thyristors," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 3, no. 4, pp.1622-1627, 1988.
- [6] C. Schauder and H. Mehta, "Development of ± 100 MVAR static condenser for voltage control of transmission systems," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 10, no. 3, pp. 1486-1493, 1995.
- [7] C. Schauder and H. Mehta, "Vector analysis and control of advanced static var compensators," IEE Proceedings-C, vol. 140, no. 4, pp.299-306, 1993.
- [8] Y. Y. Hsu et al. "Applications of series compensations and stabilizers techniques to improve the dynamic characteristics of Taiwan power system." Research Report of Taiwan Power Company, 1997.
- [9] C. L. Chang, C. S. Liu, and C. K. Ko, "Experience with power system stability in a longitudinal power system," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 10, no. 1, pp. 539-545, 1995.
- [10] Y. Y. Hsu, S. W. Shyue, and C. C. Su, "Low frequency oscillation in longitudinal power system, "experience with dynamic stability of Taiwan power system," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 2, no 1, pp. 92-100, 1987.
- [11] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw Hill, 1994.
- [12] P. M. Anderson and A. A. Fouad, Power System Control and Stability, Iowa State University Press, 1977.
- [13] IEEE Standard 421.5, "IEEE recommended practice for excitation system models for power system stability studies," 1992
- [14] M. Mohaddes, A. M. Gole, and P. G. McLaren, "A neural network controlled optimal pulse-width modulated STATCOM," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 14, no. 2, April 1999, pp.481-488.

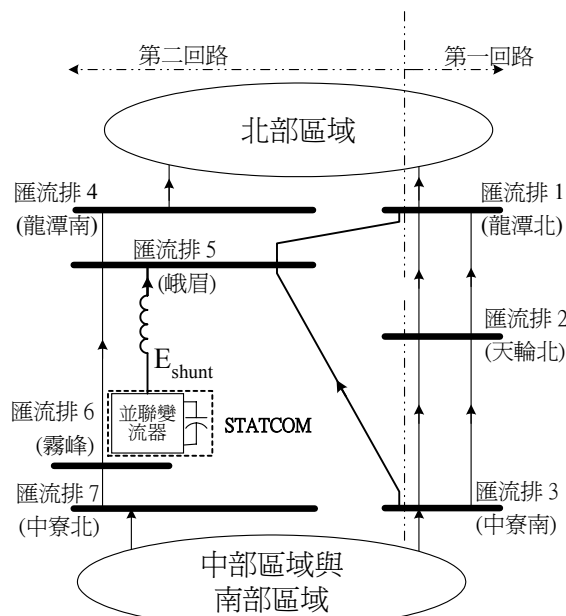


圖 1 連接北部區域與中南部區域之 345 KV 輸電線等效單線圖

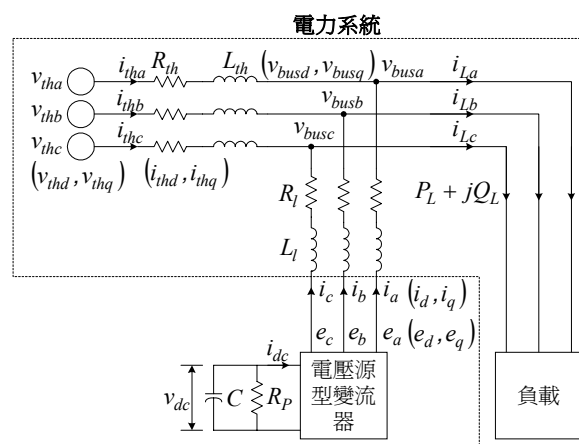


圖 2 從補償匯流排往台電系統端之戴維寧等效電路

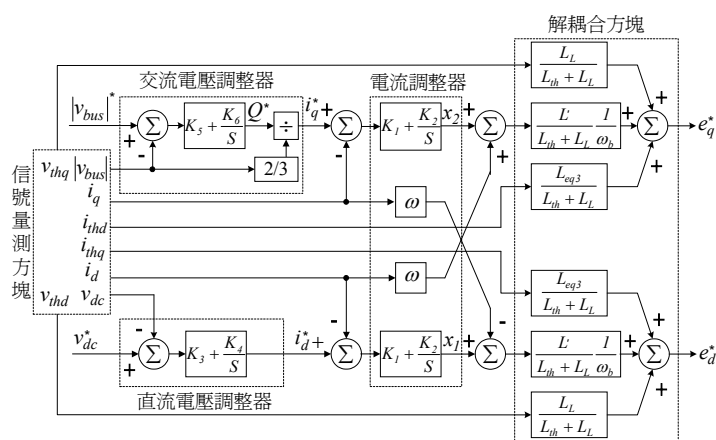


圖 3 STATCOM 控制器方塊圖

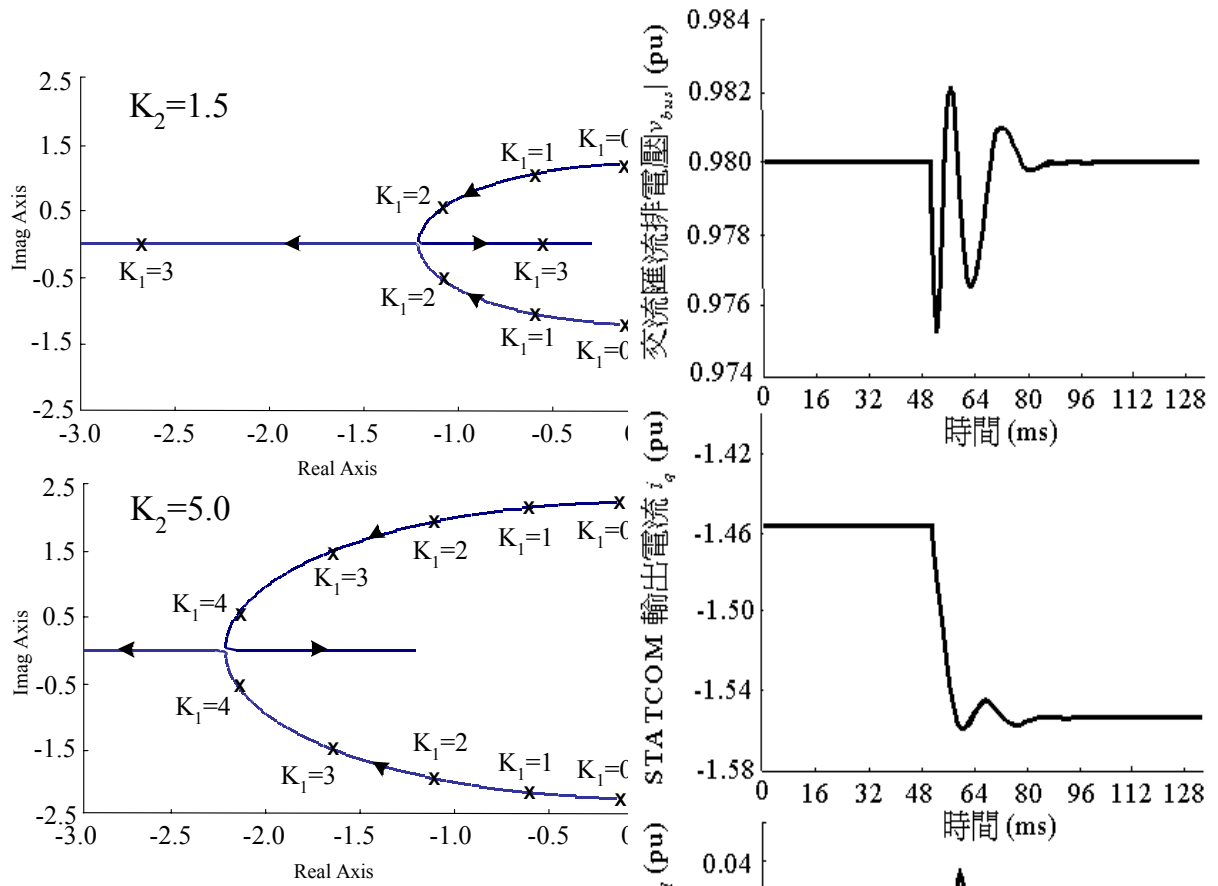


圖 4 參數 K_1 與 K_2 各種組合下之根軌跡圖

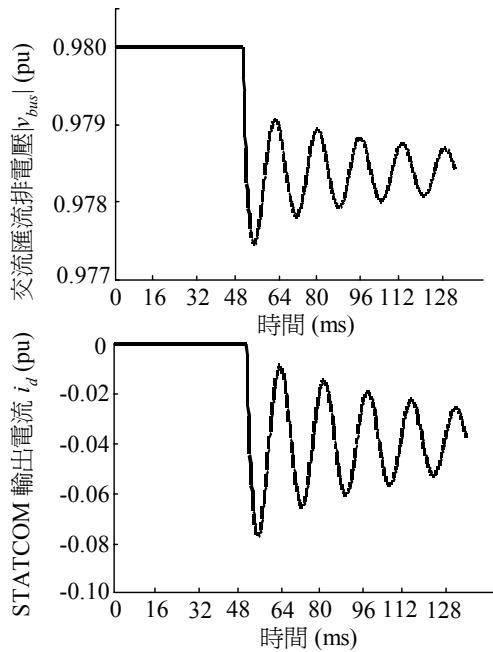


圖 5 系統動態響應圖（無控制器且 $P_L=1.01$ pu, $Q_L=0.795$ pu）

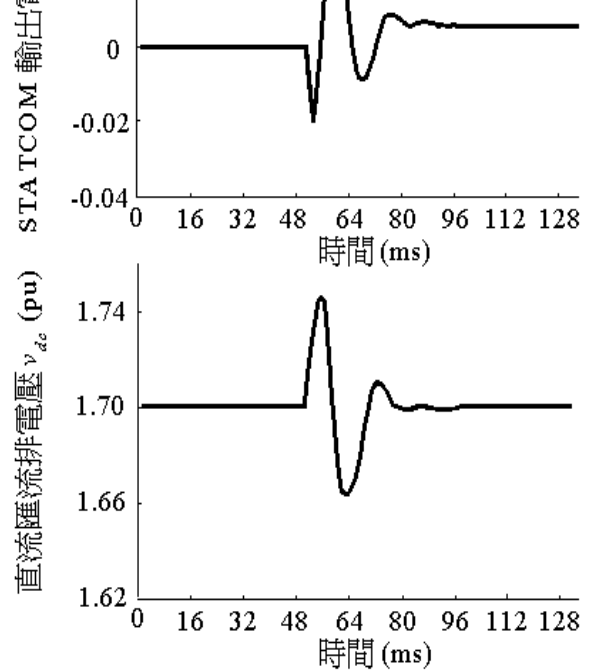


圖 6 系統動態響應圖（有控制器且 $P_L=1.01$ pu, $Q_L=0.795$ pu）

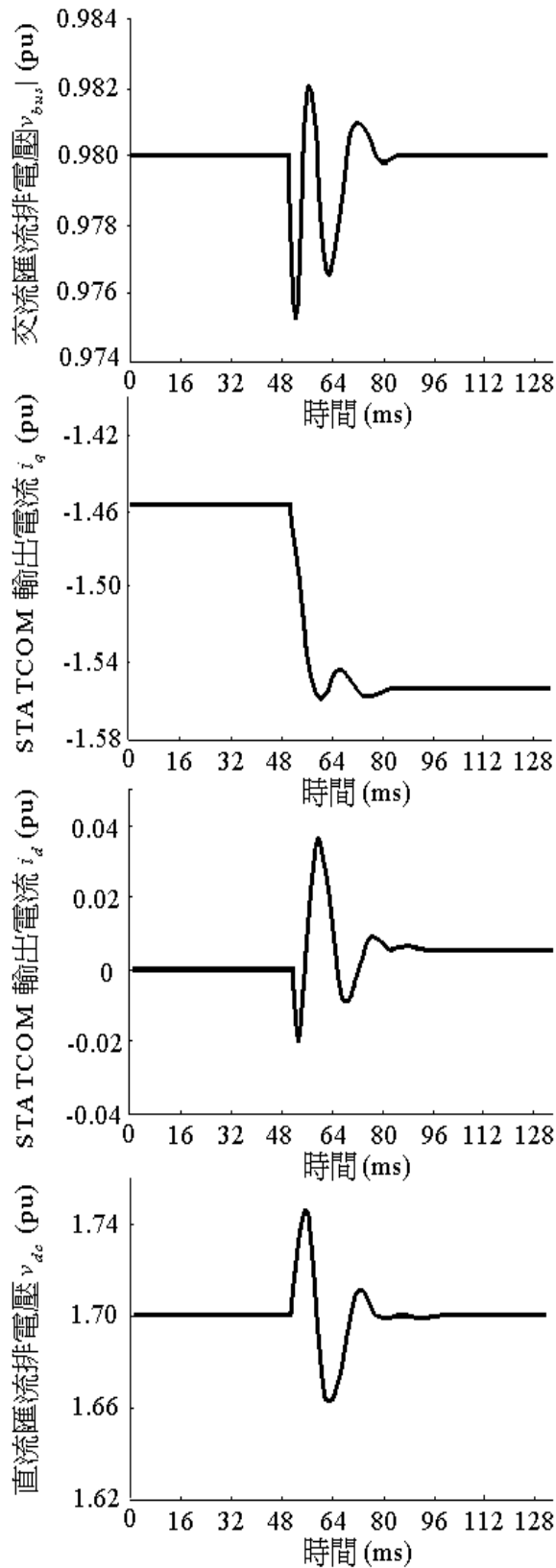


圖 7 系統動態響應圖（有控制器且 $P_L=1.22$ pu， $Q_L=0.96$ pu）

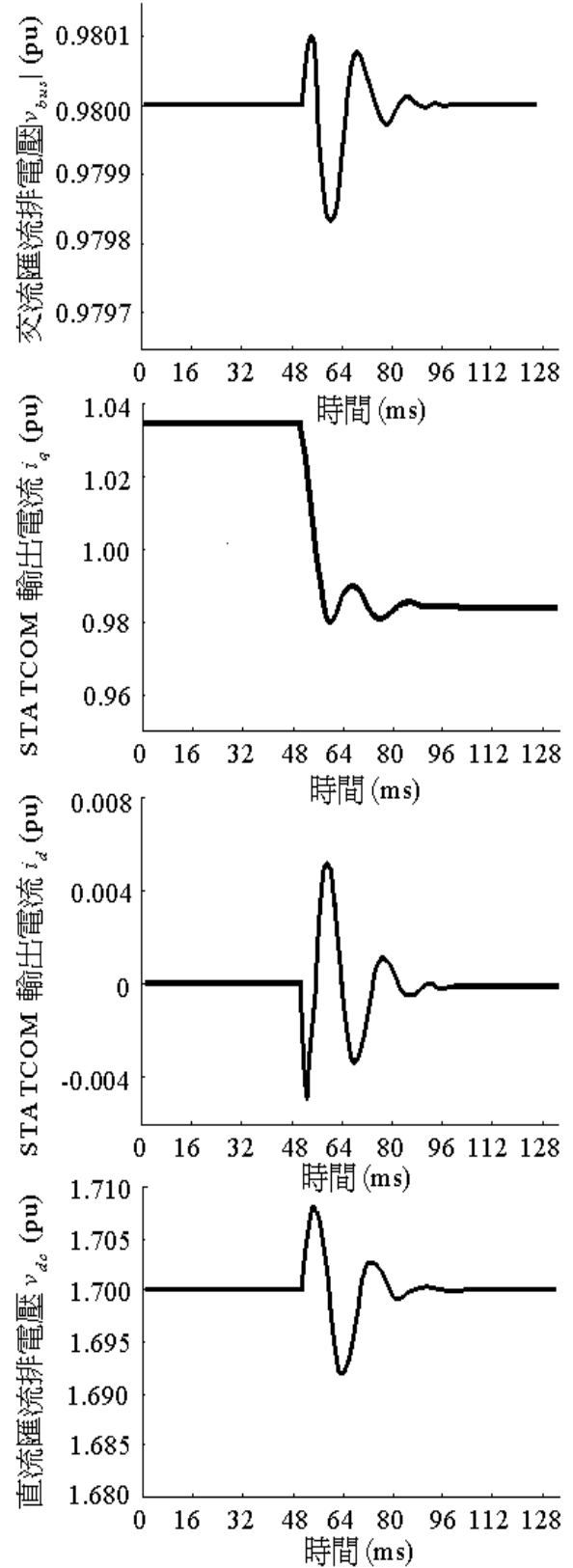


圖 8 系統動態響應圖（有控制器且 $P_L=0.595$ pu， $Q_L=0.50$ pu）