

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 電力系統穩定度總計畫

### 子計畫三：應用閘控串聯電容器改善台電系統動態穩定度

### Improving dynamic stability of Taiwan power system using thyristor-controlled series capacitors

計畫編號：NSC 89-2213-E-002-094

執行期限：88年8月1日至89年7月31日

主持人：許源裕教授 國立台灣大學電機工程學研究所

計畫參與人員：張權德 劉人龍 鄭振一 黃郁斌 國立台灣大學電機工程學研究所

#### 一、中文摘要

本年度計畫的主要目的是設計閘控串聯電容器的阻尼控制器以改善台電系統區域間低頻振盪的阻尼。先前的研究[1-3]曾經指出，台電系統連接北部中部間的超高壓輸電線，其第一路與第二路之線徑結構不同，導致兩路之電力潮流分佈不均衡，第二路之送電能力常因受限於第一路過載考量而遠低於其熱容量。為了提升北部與中部間之超高壓輸電線之送電能力，選擇在第二路之適當地點加裝串聯電容器。

由上年度的計畫發現閘控串聯電容器的阻尼控制器能有效改善低頻振盪現象之阻尼效果，在本年度計畫中，我們將部份串聯電容器以閘控串聯電容器取代之，利用根軌跡法及相位邊際等技巧設計閘控串聯電容器阻尼控制器以改善台電系統潛藏已久的區域間低頻振盪問題。並且探討不同的控制器輸入訊號及電力系統穩定器對低頻振盪的阻尼效果。

**關鍵詞：** 閘控串聯電容器，區域間振盪

#### Abstract

The purpose of this project is to design a thyristor-controlled series capacitor (TCSC) damping controller in order to improve the damping of inter-area oscillation mode in Taiwan power system. From the results of previous research reports [1-3], it is found that power transfer capability between the northern area and the central area of the Taiwan power system is severely limited by the fact that the power flows over the two parallel corridors connecting the two areas are rather disproportionate to their thermal limits due to different conductor sizes. Placing series capacitors on the corridor which is lightly loaded seems to be a reasonable means to enhance the overall transfer capability.

As mentioned in the project of last year, TCSC is capable of providing possible damping effect to low frequency oscillation modes. The TCSC is inserted in series with fixed capacitors and its damping controller is designed by employing root locus and bode plot techniques in this year. The damping effects of TCSC controller with different input signals and power system stabilizers are also investigated.

**Keywords:** thyristor-controlled series capacitors, inter-area oscillations

#### 二、緣由與目的

開發新電源及擴增輸電設備，乃是因應持續負載成長且確保供電能力的根本解決之道，然而電源的延遲開發及輸電線路路權取得不易一直是台電近年來在供電能力上面臨的困境，為了滿足在未來幾年全島之用電需求，及基於電力市場民營化與自由化的精神，經濟部在1994年宣佈開放發電業經營權，鼓勵民間投資興建電廠乃成為電源有效開發的手段之一。在台電系統中，大部份的民營電廠集中於中部地區，而非在電源開發近乎停頓的北部地區，因此民營電廠加入台電系統併聯發電後（如麥寮電廠），勢必有大量之電力經由連接北中之超高壓幹線往北輸送，區域電力負載不平衡的問題將更形惡化。因此本計畫針對超高壓第三路輸電線尚未完成時的台電系統從事動態穩定度改善。

連接北部與中部之超高壓輸電線中第一路線徑為954MCM雙導體兩回線，而第二路為795MCM四導體兩回線，其容量第一路為1195x 2MVA，而第二路為2187x 2MVA，為第一路之1.83倍[1-3]。至於電抗第一路為0.3698Ω/km，第二路為0.3081Ω/km，兩者差異不大；但是由於第一路與第二路直接或間接的連接在同一個匯流排上，因此若增加整體之輸電量時，第一路會先達其熱容量，而第二路之輸電量會受限於第一路之過載考量，而無法再增加，導致整體輸電能力（各回線上電力相對於熱容量之百分比）不均勻分佈。因此在中、南部之民營電廠加入系統運轉後，限電危機將不是發電量不足的問題，而是由於北中幹線線徑不同導致電力潮流分佈不均勻而造成的輸電瓶頸問題。台電公司系統規劃處在1995年時即針對此一即將面臨的問題提出研究報告[1]，在1996年及1997年台電綜合研究所則分別委託美國電力研究所（Electric Power Research Institute, EPRI）及台灣大學進行研究[2,3]，以期能有效的提昇由中部往北部輸送的電力潮流量，並充份發揮整體的輸電能力。

在輸電線上若串聯固定電容器（fixed series capacitors），可以有效降低線路電感值，以增加輸電容量。世界上最早裝設之串聯電容器為1928年

美國紐約之 New York Power & Light 公司裝設在 33 kV 線路上的 1.25 MVAR 電容器。到目前為止，各國電力公司在 500 kV 輸電線裝設數百 MVAR 之串聯電容器之情形已經相當普遍 [4-8]，各電力公司普遍裝設串聯電容器的主要原因是輸電線路之路權不易取得，此點正與台電公司先前所面臨之土地取得不易之情況相類似。在台電公司的相關研究報告 [1-3] 中均指出，若在北中超高壓輸電線之第二路加裝串聯電容器，則可以有效轉移第一路之電力至第二路，進而提昇整體之輸電能力。

各國電力公司近十年來在擴增輸電設備時常遭遇如環境保護、路權不易取得等非工程技術性的問題，有鑑於此，美國電力研究所 (EPRI) 自 1980 年代末期即著手推動研究，如何利用彈性交流輸電系統 (Flexible AC Transmission Systems, FACTS) 技術來提昇既有輸電設備的電力傳輸能力 [9,10]，其中開控串聯電容器 (Thyristor-Controlled Series Capacitors, TCSC) 這幾年來在國際間受到相當廣泛的討論 [11,12]。目前已經加入電力系統實際運轉的開控串聯電容器包括美國西部電力管理局 (Western Area Power Administration, WAPA) 委託德國西門子 (Siemens) 公司 1992 年在亞利桑那州東北部 230 kV Kayenta 變電所裝設完成的高等串聯補償設備 (Advanced Series Compensation, ASC) [11] 及美國波利維爾電力管理局 (Bonneville Power Administration, BPA) 和奇異 (General Electric, GE) 公司 1993 年共同在波特蘭東方 135 英里處的 500 kV Slatt 變電所內裝設的開控串聯電容器 [12]。Kayenta 變電所之 ASC 主要用以改善輸電線路的送電能力和提高位於線路中點的 Kayenta 變電所匯流排電壓，在補償控制設備併入系統運轉後，可穩定增加 100 MW 之送電能力。而裝設在 Slatt 變電所之開控串聯電容器主要用以控制 Slatt 變電所送往 Buckley 變電所之電力潮流及增加輸電能力，BPA 之開控串聯電容器具有穩態下的送電量控制、提高暫態穩定度、抑制故障電流、避免次同步共振及改善動態穩定度等功能。

開控串聯電容器阻尼控制器在實際電力系統的應用及模擬方面，台電公司系規處 [13] 以 PSS/E 程式所提供的 CRANI 模型探討開控串聯電容器加入台電系統後對線路送電量、匯流排電壓及穩定度的影響，由模擬結果顯示開控串聯電容器能有效改善台電系統的運轉條件，功能值得肯定。在國外方面，文獻 [14] 是探討 345 kV 系統上之開控串聯電容器與鄰近的靜態虛功補償器 (Static Var Compensator, SVC) 間的交互作用，而目前運轉中的 Slatt 變電所的開控串聯電容器，其阻尼控制器之輸入訊號採用合成電壓角度差訊號，並利用鄰近的 McNary 等效機組的輸出情形為指標，找出兩個虛擬阻抗值及控制器之增益值 [15]。另外文獻 [16] 中則討論如何應用 Prony analysis 及頻域辨認 (Frequency domain identification) 方式來估測 Slatt 變電所之開控串聯電容器的阻尼效果。

在本計畫中選擇流經開控串聯電容器的實功率訊號或鄰近匯流排的電壓大小值為控制器的輸入訊號，利用相位邊際法決定控制電路的相位特性，以根軌跡法決定控制器的增益值，在不惡化原本阻尼不錯的振盪模式之前提下，改善阻尼較差的區域間振盪模式，另外也檢討開控串聯電容器控制器和電力系統穩定器 (Power System Stabilizer, PSS) 一同加入系統運轉後的阻尼效果，以期進一步提昇系統運轉的安全性。

### 三、開控串聯電容器阻尼控制器設計

在本計畫中，我們將串聯電容器的 5% 補償比以開控串聯電容器取代之，並設計一個開控串聯電容器阻尼控制器來改善台電系統阻尼較差的區域間振盪模式。圖 1 為台電系統北中超高壓輸電線加入串聯補償後之單線圖，加裝串聯補償的線路為第二路的峨眉至中寮南及峨眉至霧峰段。

開控串聯電容器的數學模型方塊圖如圖 2 所示，其中開控串聯電容器阻尼控制器為超前落後型式 (lead-lag) 和 washout 的組合。選擇峨眉匯流排的電壓大小或流經開控串聯電容器的實功率訊號作為阻尼控制器的輸入訊號，washout 的時間常數  $T_w$  選擇為 0.3 秒。我們的目的則是決定  $K$ 、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  及  $T_4$  的適當值以改善系統中阻尼較差的區域間振盪模式，同時必須不惡化原本阻尼不錯的振盪模式。

在此我們利用相位邊際技巧來決定超前落後的時間常數，藉由在開控串聯電容器的  $X_{ref}$  加入一微小擾動訊號，檢視開迴路系統的頻率響應可得開迴路系統的相位特性，選擇超前落後之時間常數使被補償系統 (回控迴路閉合前) 的相位特性能遠離  $-180^\circ$ ，圖 3 為當系統離峰時，以峨眉電壓大小值為回控訊號時開迴路系統與被補償系統的相位特性。

圖 4 至圖 6 為離峰系統時以峨眉端電壓為開控串聯電容器控制器輸入訊號，不同的三組超前落後時間常數時的根軌跡圖，在這些圖中顯示兩個區域間振盪模式，模式 A 與模式 B，模式 A 為台電系統長期潛藏的北部機組群與南部機組群的相對振盪模式，其阻尼一向都很差，而模式 B 為中部機組群相對南北機組群的區域間振盪模式，繪出模式 B 的原因是因為它對開控串聯電容器控制器的參數變化相當敏感。

由圖 4 至圖 6 可觀察出下列幾點：

1. 不論系統有無加入電力系統穩定器，模式 A 的阻尼均隨著開控串聯電容器控制器增益值的增加而增加。
2. 由圖 4(b) 和圖 6(b) 可知，當電力系統穩定器加入運轉時，開控串聯電容器控制器會對模式 B 產生負的阻尼效果。而圖 5(b) 中，除了較小的開控串聯電容器控制器增益值有正的阻尼效果外，開控串聯電容器控制器之增益值越大時，

模式 B 的特徵值實部會往右半面移動。因此我們必須在有效改善模式 A 的阻尼，且不惡化模式 B 的阻尼之前提下，選擇適當的開控串聯電容器控制器增益值。(台電的運轉要求為阻尼比須大於 0.05)

3. 由圖 4 至圖 6 之根軌跡可選擇出一組適合離峰運轉條件的參數值，如表 1 所示。利用相同的方式也可以決定尖峰運轉時及開控串聯電容器輸入訊號為線路電力潮流時的控制器參數值。

#### 四、模擬結果

利用表 1 中的開控串聯電容器控制器參數值，我們可以求出開控串聯電容器加入運轉後系統振盪模式的頻率及阻尼比，結果列於表 2 中。由表 2 可知開控串聯電容器阻尼控制器能提供振盪模式 A 正的阻尼。當系統沒有加入電力系統穩定器，開控串聯電容器控制器以電壓大小為回授訊號時，此模式在尖峰運轉時的阻尼比由 0.051 增加到 0.1303，而離峰時則由 0.025 改善至 0.1003。當以線路上之實功率為開控串聯電容器控制器之輸入時，尖峰系統之阻尼由 0.051 改善至 0.0733，離峰時則由 0.025 改善至 0.0316。由此可看出，若以改善振盪模式 A 之阻尼為考量，則開控串聯電容器控制器的輸入訊號選擇峨眉電壓大小較選擇線路上之實功率為佳。若以電壓為輸入訊號時，開控串聯電容器在尖峰時幾乎可達到與電力系統穩定器相同的效果，而在離峰時開控串聯電容器的阻尼效果則比電力系統穩定器為佳。若開控串聯電容器及電力系統穩定器同時投入系統運轉，則可更進一步改善系統阻尼。

為了驗證所設計開控串聯電容器控制器的正確性，我們在離峰系統的龍潭匯流排加入 4 個週波之三相短路故障，所得的動態響應如圖 7 所示，開控串聯電容器可有效的改善系統阻尼，開控串聯電容器及電力系統穩定器的組合則可提供最佳的阻尼效果。

#### 五、結論

在本計畫中設計開控串聯電容器控制器的參數以改善台電系統中阻尼較差的區域間低頻振盪模式，所採用的方法乃是觀察系統的相位邊際及根軌跡的走向，由所得的結果可知開控串聯電容器控制器可以有效改善區域間振盪模式 A 之阻尼，在選擇參數的過程中也避免惡化其他原本較穩定的振盪模式阻尼。另外由模擬結果也可知道，當開控串聯電容器控制器和電力系統穩定器一同加入系統運轉時可獲得最大的阻尼效果。

#### 六、參考文獻

- [1]. 黃瓊誼，應用開控串聯電容器提昇台電系統輸電能力評估，台電研究專題報告，1995。
- [2]. EPRI Report RP 3191-04, Taiwan Power TCSC Evaluation Study, Final report of project 6352-21-02, prepared by Powertech Labs Inc.

June 1996.

- [3]. 許源浴等，串聯補償與穩定器之協調應用以改善台電系統動態特性，台電計畫完成報告，1997。
- [4]. G. D. Breuer, H. M. Rustebakke, R. A. Gibely, and H. O. Simmons, Jr., "The use of series capacitors to obtain maximum EHV transmission capability," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 83, no. 11, pp. 1090-1101, 1964.
- [5]. J. A. Maneatis, E. J. Hubacher, W. N. Rothenbuhler, and J. Sabath, "500 kV series capacitor installations in California," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 90, no. 3, pp. 1138-1149, 1971.
- [6]. G. Jancke, N. Fahlen, and O. Nerf, "Series capacitors in power systems," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 94, no. 3, pp. 915-925, 1975.
- [7]. J. L. Batho, J. E. Hardy, and N. Tolmunen, "Series capacitor installations in the B. C. hydro 500 kV system," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 96, no. 6, pp. 1767-1776, 1977.
- [8]. G. E. Lee and D. L. Goldssvorthy, "BPA's Pacific ac intertie series capacitors: experience, equipment, & protection," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 11, no. 1, pp. 253-59, 1996.
- [9]. EPRI Report EL-6943, *Flexible ac Transmission Systems (FACTS): Scoping Study, Volume 1, Part 1: Analytical Studies*, Final report of project 3022-1, prepared by Power Technologies Inc. August 1990.
- [10]. EPRI Report EL-6943, *Flexible ac Transmission Systems (FACTS): Scoping Study, Volume 2, Part 1: Analytical Studies*, Final report of project 3022-2, prepared by General Electric Company, September 1991.
- [11]. N. Christl, R. Hedin, K. Sadek, P. Lutzelberger, P. E. Krause, S. M. Mckenna, A. H. Montoya, and D. Forgerson, "Advanced series compensation (ASC) with thyristor controlled impedance," CIGRE paper 14/37/38-05, 1992.
- [12]. J. Urbanek, R. J. Piwko, E. V. Larsen, B. L. Damsky, B. C. Furumasu, W. Mittlestadt, and J. D. Eden, "Thyristor controlled series compensation prototype installation at the Slatt 500 kV substation," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 8, no. 3, pp. 1460-1466, 1993.
- [13]. 黃瓊誼，張忠良，陳永田，黃江滄，"開控串聯電容器應用於台電輸電系統之分析"，第 15 屆電力研討會論文集，1994。
- [14]. K. Clark, B. Fardanesh, and R. Adapa, "Thyristor controlled series compensation application study - control interaction considerations," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 10, no. 2, pp. 1031-1036, 1995.
- [15]. P. S. Dolan, J. R. Smith, and W. A. Mittelstadt,

“A study of TCSC optimal damping control parameters for different operating conditions,” *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 10, no. 4, pp. 1972-1977, 1995.

- [16].D. J. Frudnowski, M. K. Donnelly, and J. F. Hauer, “Estimating damping effectiveness of BPA’s thyristor controlled series capacitor by applying time and frequency domain methods to measured response,” *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 11, no. 2, pp. 761-766, 1996.

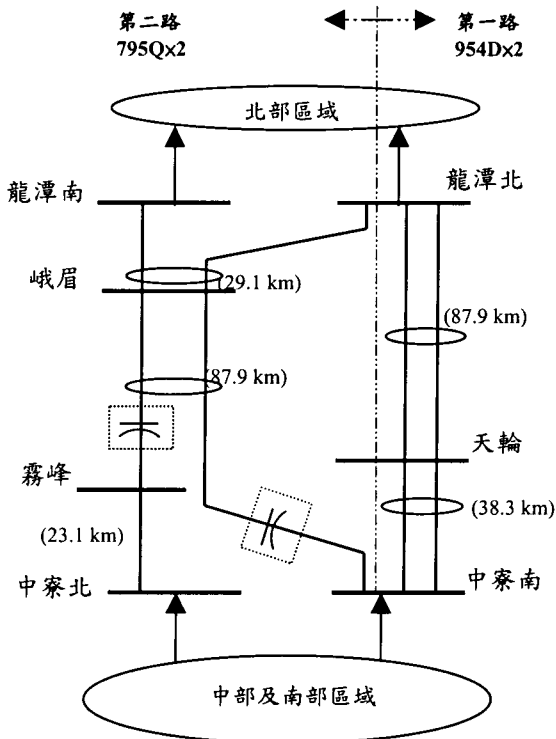
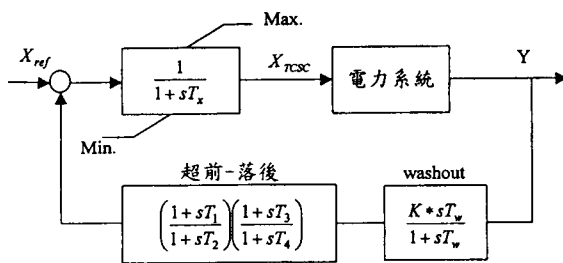


圖 1 台電北中超高壓輸電線單線圖



Y: 峨眉電壓或線路電力潮流

圖 2 開控串聯補償器及阻尼控制器之方塊圖

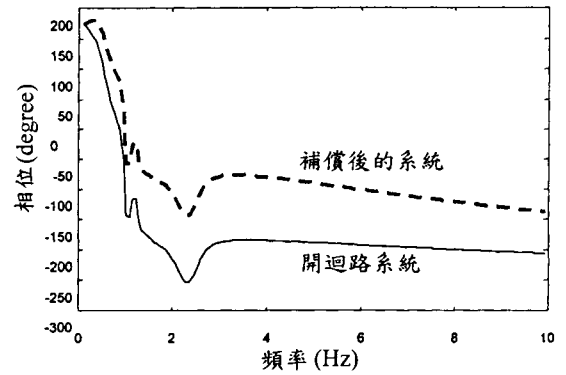
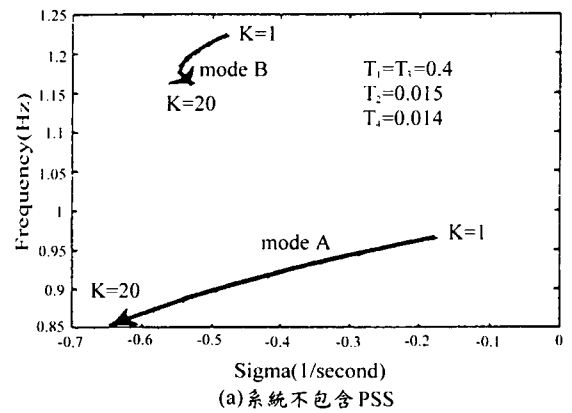
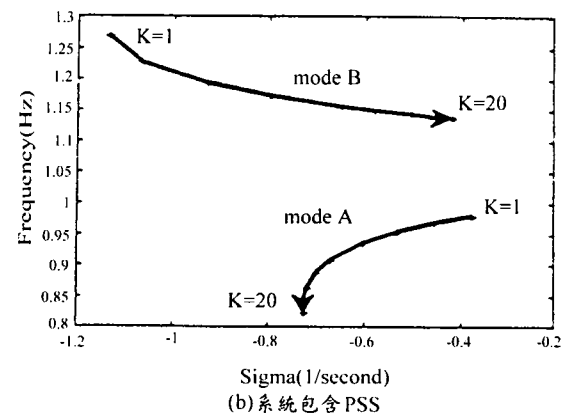


圖 3 離峰系統之頻率響應



(a) 系統不包含 PSS



(b) 系統包含 PSS

圖 4 根軌跡圖

( $T_1 = T_3 = 0.4, T_2 = 0.015, T_4 = 0.014$ )

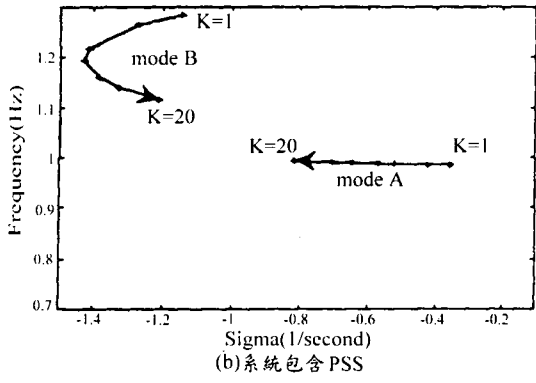
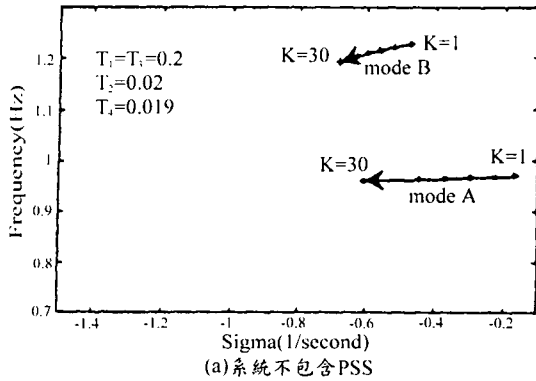


圖 5 根軌跡圖  
( $T_1 = T_3 = 0.2, T_2 = 0.02, T_4 = 0.019$ )

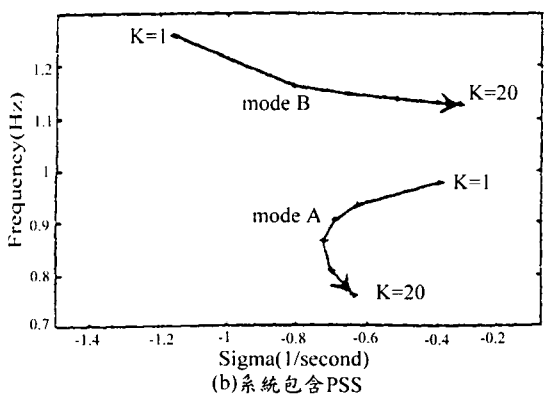
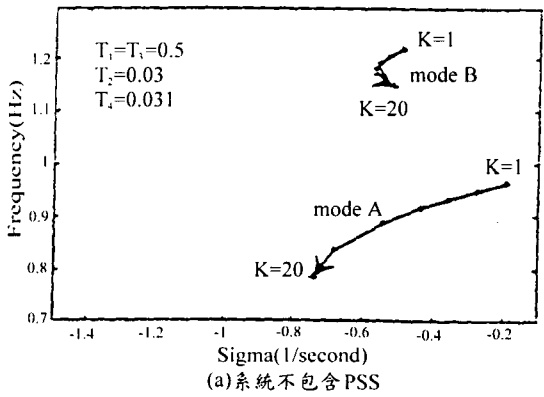


圖 6 根軌跡圖  
( $T_1 = T_3 = 0.5, T_2 = 0.03, T_4 = 0.031$ )

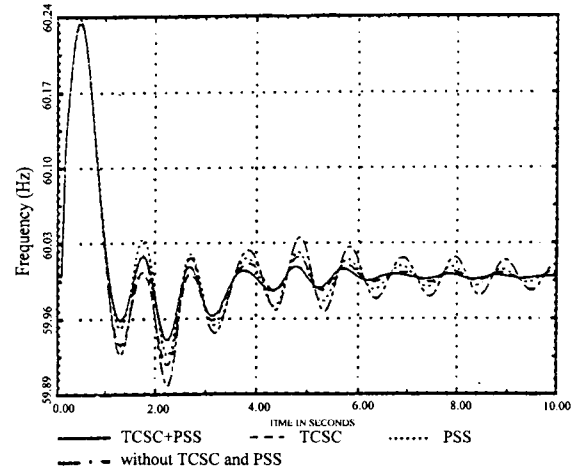


圖 7 四週波三相短路故障後核二機組之頻率動態響應圖

表 1 開控串聯補償器阻尼控制器參數

回授訊號	系統	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$K$
峨眉電壓	尖峰	0.2	0.015	0.2	0.014	15
	離峰	0.2	0.02	0.2	0.019	15
線路實功率	尖峰	0.198	1.59	0.198	1.55	15
	離峰	0.2	1.59	0.2	1.55	15

表 2 區域間振盪模式 A 之阻尼比

		尖峰運轉		離峰運轉	
		頻率 (Hz)	阻尼比	頻率 (Hz)	阻尼比
未補償系統	無 PSS	0.9329	0.0510	0.9622	0.0250
	有 PSS	0.8762	0.1714	0.9775	0.0599
固定電容補償(SC)	無 PSS	0.9487	0.0466	0.9706	0.0254
	有 PSS	0.9179	0.1557	0.9835	0.0551
SC+TCSC 電壓回授	無 PSS	0.9964	0.1303	0.9605	0.1003
	有 PSS	0.8324	0.2578	0.9555	0.2039
SC+TCSC 實功率回授	無 PSS	0.9691	0.0733	0.9756	0.0316
	有 PSS	0.9750	0.2560	0.9936	0.0531