

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(1/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2213-E-002-114-

執行期間：91年08月01日至92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：許源裕

計畫參與人員：陳昭宏 陳本盛 陳偉倫 蕭益州 胡高健 許熔賓 朱宏傑

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 5 月 21 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(1/3) A prototype static synchronous compensator for power system voltage control

計畫編號：NSC 91-2213-E-002-114

執行期限：91 年 8 月 1 日至 92 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：陳昭宏 陳本盛 陳偉倫 蕭益州 胡高健 許熔賓 朱宏傑
國立台灣大學電機工程學研究所

一、中文摘要

本計畫之主要目的在利用靜態同步調相器，以改善台電系統之穩態電壓與動態電壓響應進而使系統遠離電壓崩潰點。台電系統電壓，長期以來一直受到因各區域的發電量與負載量不平衡情形使峨眉匯流排電壓偏低，更有可能在系統處於尖峰負載狀況下，因為負載劇烈變化產生擾動造成整個輸電系統的不穩定。因此，在第一年計畫中，我們以補償器對峨眉匯流排電壓及其負載的提升率為參考指標，決定出靜態同步調相器的組態、裝設容量，以期能使此系統在最差的 N-1 的跳線情況下，穩態時仍能維持各匯流排電壓在 0.95 p.u. 以上，在第一年的計畫中並同時探討系統的動態響應，在正常運轉及線路跳脫時，加入靜態同步調相器下，當系統發生擾動時峨眉超高壓匯流排的動態電壓響應。

關鍵詞：靜態同步調相器、動態電壓響應、無效電力補償

Abstract

The purpose of this project is to examine the feasibility of applying static synchronous compensators (STATCOMs) to improve the dynamic voltage response of Taiwan power system.

The longitudinal power system in Taiwan suffers from two major problems, i.e., the area generation-load unbalance in the three areas and the disproportionate power flows over the two existing parallel corridors. Consequently, low voltage profiles have been observed on O-MEI bus for the system under normal operation or under some outage conditions. It is thus necessary to devise some proper means to improve the O-MEI bus voltage to prevent the system from voltage instability. Besides, it is also important to improve the dynamic voltage responses under disturbance conditions. In the present work, STATCOMs will be employed to promote steady-state voltages and to improve the dynamic voltage responses on O-MEI bus.

In phase 1 of this three-year project, the steady-state voltage profiles and dynamic voltage responses of O-MEI bus after STATCOMs are installed will be analyzed. The effect of the capacities of STATCOMs on steady-state voltage will be investigated.

Keywords: static synchronous compensators (STATCOMs), dynamic voltage response, reactive power compensation

二、緣由與目的

在電力系統中有兩個主要的課題，其一為傳輸線上的電力傳輸，其二為匯流排電壓控制。在此研究的課題上，便是要能夠以經濟可靠的方式，連續供應符合標準的電力給用戶。尤其是在無法改變現有電力系統的網路結構條件之下，一旦電力系統面臨整體性的負載需求快速成長或區域性的用電需求增加時，如何提供一穩定、安全和可靠性的電力需求給用戶使用，並能確保供電的品質，將是台電公司、相關學術單位與研究機構最重視的課題之一。

台灣為一地形狹長的島嶼國家，故超高壓輸電線系統為一南北走向的長條型結構，主要的發電廠及負載中心集中於北、中、南三個區域。由於工商業的蓬勃發長，使得用電量每年約以 7% 的大小陸續成長[1]，尤其以北部地區的用電需求成長的最快，因此台電公司有鑑於此，便積極開發電源及興建輸電迴路，但由於環保意識的抬頭和路權取得的不易，因此造成台電公司在供電上造成許多瓶頸。造成北部地區缺電，中、南部卻有過剩的電力，因此北部不足的電力，就將完

全依賴連接北中之超高壓輸電線來供應，這也就成為南電北送的狀況，以解決北部的電力不足。以公元 2000 年尖峰時刻，台電系統的供電情形為例，北部的發電量為 6503MW，中、南部發電量為 19296.2MW，而北部的負載量卻高達 11332.2MW，中、南部的負載量僅 13635.8MW，因此北部約缺 4829.2MW，中、南部卻有 5660.4MW 的過剩電力，此種情況下，北中部的電力傳輸，使得依靠這兩迴路四回線的 345kV 線路來傳輸電力，只要有一回線發生事故，其餘三回線便會容易因超載而跳線，進而造成北部電力與中南部電力系統解聯的情形。

連接北部與中部之超高壓輸電線有兩個迴路，第一迴路（天輪至中寮南段的線路）中的線徑為 954MCM 雙導體兩迴線，第二迴路（峨眉至中寮南或中寮北段的線路）的線徑為 795MCM 四導體兩迴線；其容量第一迴路為 $1195 \times 2\text{MVA}$ ，而第二迴路為 $2487 \times 2\text{MVA}$ ，熱容量為第一迴路的 1.83 倍[2]。至於電抗，第一迴路為 $0.3698 \Omega/\text{km}$ ，第二迴路為 $0.3081 \Omega/\text{km}$ ，二者差異不大；但由於第一迴路與第二迴路接至同一匯流排上，因此若增加整體的輸電量時，第一迴路會先達到其線路所能傳輸的最大熱容量，而第二迴路的輸電量將因第一迴路的過載量，無法再增加，導致整個輸電分配不平均。由文獻[2]的研究台電系統而言，當第二迴路之輸電量僅為其熱容量的 68%（中寮南至峨眉段）時，第一迴路已達其熱容量。因此如何調整線路上的電力潮流將是研究的重點之一。

另外，匯流排上電壓的控制，也是電力系統上重要的問題之一。當電力系統有電壓過低的情況時，可能因負載過重、或者是發電機組跳機時所造成的。而當讓電力系統處於此種重載模式下運轉時，將對系統的穩定度將有極大的威脅；因此當系統發生事故或擾動時，將可能造成電力系統的電壓崩潰。以公元 2000 年台電尖峰時刻而言，峨眉匯流排上的電壓，就為全系統的最低，這就會導致輸電線路的輸電能力下降，或者當系統有擾動時，峨眉匯流排的電壓便有可能電壓崩潰，因此使峨眉匯流排的電壓獲得改善也是研究單位所關心的項目之一。

本年度主要目的即為分析公元 2000 年尖峰負載的系統電力潮流，並將系統簡化之，成為所模擬的系統，並針對靜態同步調相器對於改善峨眉電壓及匯流排動態電壓進行模擬與評估。

三、台電系統化簡及電力潮流分析

本計劃所討論的系統是台電公元 2000 年尖峰負載時的系統如圖 1，資料來源是由台電公司所提供，資料格式是 PSS/E 23 版的資料型式。

首先我們以台電系統夏季尖峰及離峰時段之實際運轉資料為基礎，以電力潮流程式計算全系統在各傳輸線之有效電力、無效電力及各匯流排的電壓值。台電系統的超高壓輸電線如圖 1 所示，此系統尚未包括第三輸電迴路，但考慮已商業運轉的麥寮發電廠[3]。

由於整個臺灣的負載中心是在北部地區，而在北部地區又沒有足夠發電量的情況下，中部地區發電廠所發出來的多餘電力必須往北送，以應付北部地區的龐大負載，台電在中送北的輸電線路上，共有兩條迴路，第一迴路的天輪至中寮南段其線路的熱容量為 $1195 \times 2\text{MVA}$ ，其線路阻抗每條為 $0.3698 \Omega/\text{km}$ ；二迴路的峨眉 E 至中寮北或中寮南段其線路的熱容量為 $2187 \times 2\text{MVA}$ ，其線路阻抗每條為 $0.3081 \Omega/\text{km}$ ，由此可知在這兩迴路上容易發生電力潮流分配不均的現象，所以在整個台電系統的超高壓輸電線路上，本年度計畫保留北中地區的超高壓輸電線路而將其他部分化簡，簡化的方式採用區域性發電量等效與區域性負載量等效的方式，首先利用 PSS/E 內匯流排資料中區域（Area）的參數將全部的匯流排分為北部區域、中部區域與南部區域，接著從電力潮流的結果可以得知各區域的總發電量與負載量，最後保留北中區域的超高壓輸電線並保留北部、中部及南部最大發電機組，並假設各別區域所保留的發電機的發電量為原來整個區域總發電量，而負載則分別分佈於被保留的匯流排，簡化後的系統如圖 2 所示。為了確保簡化後的系統仍保留簡化前的系統特性，必須要在簡化的過程中確定中北部超輸電線路之電力潮流分佈比例及大小接近原系統，同時各被保留匯流排電壓值亦和原系統匯流排電壓值一樣，如表 1 所列。而本計畫將利用在圖 2 的系統裝設靜態同步調相器做為接下來的探討。

本計畫採用 Matlab 套裝軟體做為接下來的分析工具，第一步會利用此軟體建立發電機、輸電線、動態負載與靜態同步調相器模型，接著將這些模型帶入簡化的台電系統中，然後先針對此系統做穩態分析，以驗證 Matlab 軟體所建立的系統其電力潮流與各匯流排電壓值和 PSS/E 一樣。

四、靜態同步補償器（STATCOM）基本工作原理

1979 年 Gyugyi 提出三種可行的實現方式，即電壓源型式（VSI）之變流器設計、電流源型式（Current-Sourced Inverter, CSI）之變流器設計與變頻控制方式

(Unrestricted Frequency Converter, UFC) [5]。由於使用 CSI 與 UFC 設計方式之電力電子元件需有雙向阻斷的能力。而 VSI 的設計方式之電力電子元件只需要單向電壓阻斷能力，故 VSI 的設計方式一直為相關研究所採用，而目前已商轉之 STATCOM 也全以此種方式實現。

以電壓源型式變流器所組成之 STATCOM 在基頻且不考慮諧波的條件下可視為一可控制理想電壓源，如圖 3 所示為一典型 STATCOM 系統等效電路圖。STATCOM 輸出電壓 (e) 藉由一等效電感 (L_x) 與匯流排電壓 (v_{bus}) 連接，在穩態運轉下 STATCOM 與系統並無實功交換，因此可假設 e 與 v_{bus} 為同相位。當 e 電壓值大於 v_s 電壓值時，有一遲相電流 (lagging current) 從 STATCOM 流入匯流排，此時 STATCOM 屬於電容性操作 (capacitive mode)，即提供系統無效功率；反之，當 STATCOM 輸出電壓 e 值小於於匯流排電壓 v_{bus} 值時，則表示有一進相電流 (leading current) 從 STATCOM 流入匯流排，此時 STATCOM 屬於電感性操作 (inductive mode)，即從系統吸收無效電力。系統調度員就可以利用調整 STATCOM 輸出電壓大小達到虛功補償的效果。

五、台電簡化系統並聯 STATCOM 及模擬結果

未補償情況下系統的穩態電壓特性，就表 2 來看，在一回線跳線事故(匯流排 1(龍潭北)到匯流排 2(天輪)一回線跳脫)的情況下，峨眉的電壓是系統最低，而且會低於 0.95p.u.，穩態電壓值低至 0.936p.u.，所以在峨眉加裝並聯補償器如圖 4，以提升峨眉的穩態電壓，使之符合台電的運轉電壓標準(1.03p.u.~0.95p.u.)，並經重複正常運轉與跳線模擬，以決定並聯補償器的容量，經測試結果，峨眉的穩態電壓可在 292MVA 之電容性補償下將電壓提升至 0.95p.u.的標準值，如表 3 所示。

而從實際的商轉經驗得知，目前最大容量之靜態同步調相器為 160 MVAR，裝設於美國肯塔基州，故若系統所需之虛功補償量過大時，必須考慮是否能完全以靜態同步調相器來達到所需目的，因為大容量補償器除了有缺乏商轉經驗的問題外，電力電子元件的技術層次上也無相關實證可供參考，而投資成本更是不可忽略的環節。而解決方式除了將全部的補償量分給為多組小容量的靜態同步調相器外，最直接的方式就是以傳統固定電容器並聯靜態同步調相器，經由對峨眉匯流排崩潰點電壓及其負載的提升率為參考指標的測試，且在基於成本和容量上的考量，可取 50% 固定電容器和 50% 的靜態同步調相器來達成補償目的。

在系統動態響應方面，模擬方式為在峨眉匯流排發生四個週期時間的三相接地故障，觀察故障清除後的電壓振盪頻率及阻尼特性，在正常運轉(所有線路正常供電)下，如圖 5 所示，100% STATCOM 的補償容量方式下，峨眉電壓其阻尼比為 0.4642，而在 50% 固定電容器+ 50%

STATCOM 的補償容量方式下，峨眉電壓其阻尼比為 0.4412;而在一回線跳線事故(匯流排 1(龍潭北)到匯流排 2(天輪)一回線跳脫)下，如圖 6 所示，100% STATCOM 的補償容量方式下，峨眉電壓其阻尼比為 0.4218，而在 50% 固定電容器+ 50% STATCOM 的補償容量方式下，峨眉電壓其阻尼比為 0.3642。由上可知 100% STATCOM 的補償容量方式其阻尼比優於 50% 固定電容器+ 50% STATCOM 的補償容量方式。

六、討論

本計劃利用台電公元 2000 年尖峰負載時的系統，分析其電力潮流，經有系統的化簡，在其簡化模型上並聯靜態同步補償器，可有效改善峨眉匯流排電壓太低的現象，使之符合台電的電壓標準，並且在補償器容量上作一測試，採用 100% STATCOM 和 50% 固定電容器+ 50% STATCOM 補償容量的兩種不同補償方式，比較出其阻尼比，和其電壓動態響應。雖然現在台電第三迴路已運作，但本計劃中採用之系統亦可視為現行系統中 n-2 的操作情況，因此本研究結果亦可提供為現行系統運作規劃之參考。

七、計劃結果自評

本計劃針對用於電力系統電壓控制之靜態同步調相器作第一年之研究，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「電力潮流分析」、「台電系統化簡」、「靜態同步調相器補償特性分析」、「分析加入補償器前後系統電壓崩潰點」、「決定靜態同步調相器補償容量與組態」以及「匯流排動態電壓模擬」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] 許源浴等，“串聯補償與穩定器之協調應用已改善台電系統動態特性”，台電計畫完成報告，1997。
- [2] 黃瓊誼，“應用開控串聯電容器提升台電系統輸電能力評估”，台電研究專題報告，1995。
- [3] 台電公司研究報告，“應用開控串聯電容器提升台電系統輸電能力評估”，中華民國八十六年。
- [4] K. Bergmann, B. G. Friddrich, K. Stump, and W. H. Elliott, “Digital simulation, transient network analysis and field tests of the closed loop control of the Eddy County SVC,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 8, no. 4, October 1993, pp. 1867-1873.
- [5] L. Gyugyi, “Reactive power generation and control by thyristor circuits,” IEEE Trans. Industry Applications, vol. IA-15, no. 5, September/October 1979, pp. 521-532.
- [6] C. Schauder, “STATCOM for compensation of large electric arc furnace installations,” Proceedings of the 1999 Power Engineering Society Summer Meeting, 99CH36364, pp.1109-1112.
- [7] Y. Sumi, Y. Harumoto, T. Hasegawa, M. Yano, K. Ikeda, and T. Matsuura, “New static VAR control using forced-commutated inverters,” IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no. 9, September 1981, pp. 4216-4224.
- [8] C. W. Edward, K. E. Mattern, P. R. Nannery, and J. Gubernick, “Advanced static VAR generator employing GTO thyristors,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 3, no. 4, October 1988, pp.1622-1627.
- [9] S. Mori, K. Matsuno, T. Hasegawa, S. Ohnishi, M. Takeda, M. Seto, S. Murakami, and F. Ishiguro, “Development of a large static var generator using self-commutated inverters for improving power system stability,” IEEE Trans. Power System, vol. 8, no. 1, February 1993, pp. 371-377.
- [10] C. Schauder and H. Mehta, “Operation of ± 100 MVAR static condenser for voltage control of transmission systems,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 10, no. 3, July 1995, pp. 1486-1493.
- [11] C. Schauder, E. Stacey, M. Lund, L. Gyugyi, L. Kovalsky, A. Keri, A. Mehraban, and A. Edris, “AEP UPFC Project: Installation, commissioning and operation of the ± 160 MVA STATCON (phase I),” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 13, no. 4, July 1997, pp. 1530-1535.
- [12] 台電公司研究報告，“彈性交流輸電新技術提昇台電系統送電能力之規劃與研究”，中華民國八十七年。
- [13] G. Joos, L. Moran, and P. Ziogas, “Performance analysis of a PWM inverter VAR compensator,” IEEE Trans. Power Electronics, vol. 6, no. 3, July 1991, pp. 380-391.
- [14] C. Schauder and H. Mehta, “Vector analysis and control of advanced static VAR compensators,” IEE Proceedings-C, vol. 140, July 1993, pp.299-306.
- [15] Z. Yao, P. Kesimpar, V. Donescu, N. Lechevin, and V. Rajagopalan, “Nonlinear control for STATCOM based on differential algebra,” Proceedings of the 1998 Power Electronic Specialists Conference, 98CH36196, pp.329-334.
- [16] 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.
- [17] C. Li, Q. Jiang, Z. Wang, and D. Retzmann, “Design of rule-based controller for STATCOM,” Proceedings of the 1998 Industrial Electronics Society, 98CH36200, pp.372-376.
- [18] K. R. Padiyar and A. M. Kulkarni, “Analysis and Design of Voltage Control of Static Condenser,” Proceedings of the 1996 Power Electronic, Driver and Energy Systems for Industrial Growth Conference, 96TH8111, pp.393-398.
- [19] L. Moran, G. Joos, P.D. Ziogas, “Analysis and Design of a Three-Phase Synchronous Solid-State Var Compensator’ IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 25,no. 4, July/August 1989, pp. 589-608.
- [20] 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。
- [21] 鄭振一，“靜態同步調相器之研究，”台灣大學電機研究所碩士論文，中華民國八十九年六月。
- [22] 莊政宏，“應用彈性交流輸電技術改善電力系統的區域間振盪，”台灣大學電機研究所碩士論文，中華民國九十一年六月。

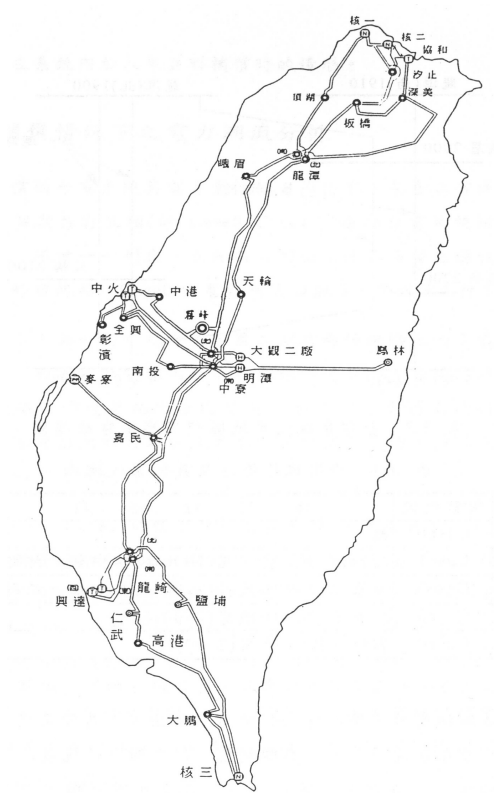


圖 1 台電 2000 年系統超高壓線路圖

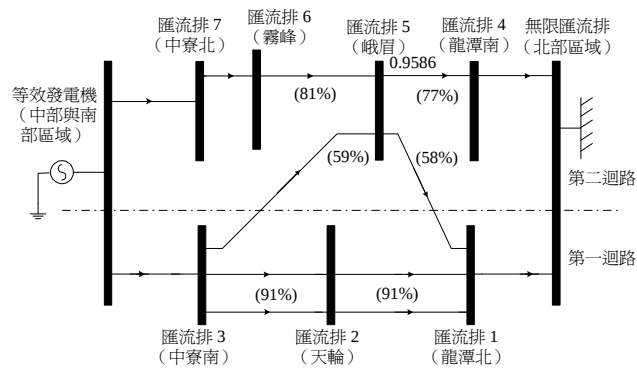


圖 2 未加入 STATCOM 之台電等

效系統線路潮流分佈圖

表 1 未補償系統電力潮流 單位：MW (線路容量百分比)

情 況		正常運轉 (所有線路 正常供電)	一回線跳線事故 (匯流排 1 (龍潭 北)到匯流排 2 (天 輪) 一回線跳脫)
匯流排編號			
第一 迴路	匯流排 1-2	2093(91%)	1587(138%)
	匯流排 2-3	2160(91%)	1638(69%)
第二 迴路	匯流排 1-5	1180(58%)	1526(75%)
	匯流排 4-5	1592(77%)	1840(89%)
	匯流排 5-3	1247(59%)	1585(75%)
	匯流排 5-6	1679(81%)	1927(93%)
峨眉匯流排電壓 (pu)		0.958	0.936

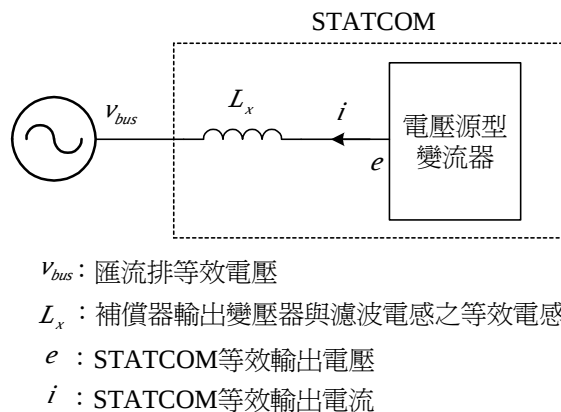


圖 3 典型 STATCOM 系統

表 2 未補償時匯流排電壓(尖峰時段)

情況 匯流排編號	正常運轉 (所有線路正 常供電)	一回線跳線事故 (匯流排 1 (龍潭 北)到匯流排 2 (天 輪) 一回線跳脫)
龍潭北匯流排電 壓(pu)	0.981	0.972
龍潭南匯流排電 壓(pu)	0.979	0.971
峨眉匯流排電壓 (pu)	<u>0.958</u>	<u>0.936</u>
天輪匯流排電壓 (pu)	0.968	0.95
中寮北匯流排電 壓(pu)	0.983	0.963
中寮南匯流排電 壓(pu)	0.987	0.972

表 3 加入 STATCOM 補償時匯流排電壓(尖峰時段)

情況 匯流排編號	正常運轉 (所有線路正 常供電)	一回線跳線事故 (匯流排 1 (龍潭 北)到匯流排 2 (天 輪) 一回線跳脫)
龍潭北匯流排電 壓(pu)	0.985	0.977
龍潭南匯流排電 壓(pu)	0.983	0.976
峨眉匯流排電壓 (pu)	<u>0.971</u>	<u>0.95</u>
天輪匯流排電壓 (pu)	0.973	0.956
中寮北匯流排電 壓(pu)	0.987	0.968
中寮南匯流排電 壓(pu)	0.991	0.977

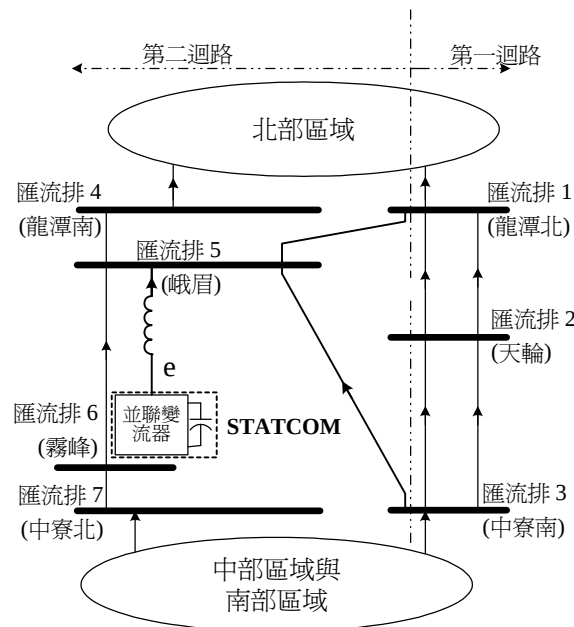


圖 4 連接北部區域與中南部區域之 345 KV 輸電線等效單線圖

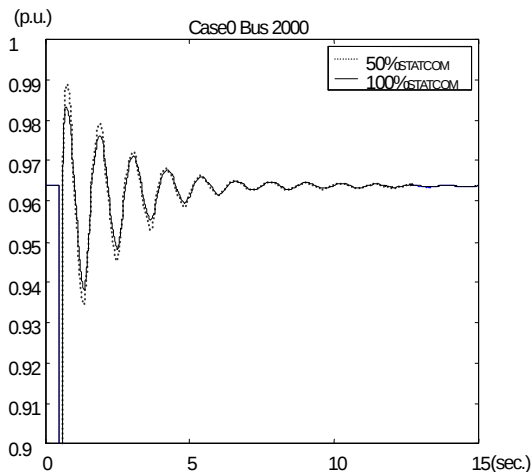


圖 5 正常運轉下峨眉電壓動態響應圖

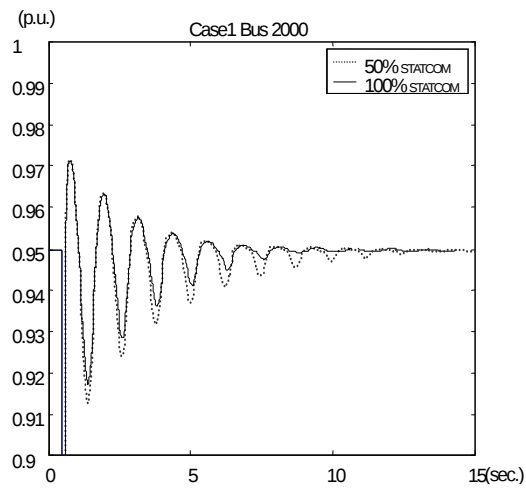


圖 6 一回線跳線事故下峨眉電壓動態響應圖