

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(3/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2213-E-002-011-

執行期間：93年08月01日至94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：陳本盛 劉建宏 陳如元 黃國禎 魏堂宇 許明杰

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 7 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(3/3)

A prototype static synchronous compensator for power system voltage control

計畫編號：NSC 93-2213-E-002-011

執行期限：93年8月1日至94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：陳本盛 劉建宏 陳如元 黃國禎 魏堂宇 許明杰

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於靜態同步調相器硬體的實現。此計劃延續第一年和第二年計畫的分析規劃與研究成果，並且以台電系統為對象，實作一縮小比例之原型 STATCOM，以便對 STATCOM 實際運用的性能進行了解。另外，在硬體電路方面由一個三相四臂脈波寬度調變 (Pulse Width Modulation, PWM) 的電壓型變流器連接一個直流電容器所組成。在系統平台方面，則採用數位式架構，以個人電腦為基礎，配合研華科技公司 PCL-1800 資料擷取卡來完成靜態同步補償器的控制核心。最後，觀察實驗測試結果可發現，本計劃所設計之靜態同步補償確實具有可降低電壓不平衡率以及改善電壓驟降的能力。

關鍵詞：靜態同步調相器、動態電壓響應、對稱成分法。

Abstract

The purpose of final phase of this three-year project is to conduct experiments on a prototype static synchronous compensator (STATCOM) and to investigate the capability of the SATATCOM to regulate bus voltage when the power system is subjected to disturbances. The STATCOM comprises a three phase voltage-sourced pulse width modulated inverter with a dc capacitor. The control kernel of the STATCOM is implemented by a PC-based digital system with Adventec PCL-1800 data acquisition boards. Finally, based on the results from experiments of this project, it can be concluded that voltage unbalance and voltage sag can be effectively reduced by the proposed STATCOM.

Keywords: static synchronous compensators (STATCOMs), dynamic voltage response, symmetrical component algorithm.

二、緣由與目的

近年來台電公司及國內學者為改善台灣電力系統所遭遇之輸電瓶頸，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]，由研究成果顯示不但可提升輸電效率、更可改善電力系統穩定度。但研究中亦指出，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特性。

對於 STATCOM 實體之實現，本計劃設計工作主要包含硬體設計、控制軟體設計，控制器設計等，並於最後由實驗測試得知所設計的 STATCOM 確實提供不錯的動態特性。

三、系統實體線路

為驗證計畫所提之靜態同步補償器可應用於電力系統電力品質之改善，在本節中利用計畫第二年時使用 Kron 化簡法求得系統從峨眉匯流排往系統端看出之戴維寧等效電路，此等效電路即為簡化後之台電系統線路，如圖 1 所示，電路詳細內容為連接台灣北部與中部的 345KV 線路，STATCOM 系統裝設在電壓為全系統最低的峨眉匯流排。此等效電路還包含了一組連接到峨眉匯流排的等效負載 ($R_L + \omega L_L$)，如圖 1 所示。實驗時所採用之實作系統參數值分別為 $R_s = 0.5\Omega$, $\omega L_{s1} = 0.5\Omega$, $\omega L_{s2} = 0.75\Omega$, $L_f = 12\text{Mh}$, $C_f = 20\mu\text{F}$, $C_{dc} = 6800\mu\text{F}$, $R_L = 22.4\Omega$, $\omega L_L = 12\Omega$, 故障電阻 $R_f = 2\Omega$ 及 4Ω ，為討論系統平衡故障與不平衡故障補償，在圖 1 中我們分別投入一故障電阻 R_f 的三相電阻測試系統模擬發生一三相平衡接地故障，之後投入一單相接地的故障電阻模擬發生一三相不平衡接地故障，之後由本計畫所提出之靜態同步補償器來開始進行補償。以實驗的方式驗證本計畫所設計之靜態同步補償確實具有可降低電壓不平衡率以及改善電壓驟降的能力。

四、靜態同步補償器 (STATCOM)

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) [4]。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。

1. STATCOM 硬體設計

硬體系統架構圖如圖 2 所示。主要是採模組化

的設計理念，以電壓型變流器為主，構成整個硬體系統中的電力電路部分，以供給負載所需之補償電壓。然而為了補償線路電壓，必須送出一組參考信號給變流器電路來產生我們所要的正確半導體開關切換模式。此參考電壓之產生是經由四組霍爾電壓感測器及一組霍爾電流感測器，分別將負載端電壓、直流電容器之電壓信號及零序電流由資料擷取卡之類比輸入端輸入至由個人電腦所構成之控制器，而此控制器透過撰寫之補償演算法，決定出變流器之開關切換動作，再經由資料擷取卡之數位輸出端送出信號至互鎖電路。此互鎖電路為了避免造成上下臂同時開啟或閉合的情形，因此對上下臂開關的死域時間(Dead Time)作設計。最後由驅動電路來驅動變流器之八個半導體開關之導通或截止。而在驅動電路部分，採用六組分開之+15V的直流電流供應驅動電路所需之隔離直流電源；其他硬體所需之直流電源亦如圖2所示，其中+5V為專供互鎖電路與同步電路所需之直流電源。一般而言，必須嚴格的將數位電路和類比電路之電源分開，以避免不必要的雜訊干擾造成不正確之誤動作，而本年度計畫特別對此可能錯誤加以防範。

另外，本計畫所提三相四臂靜態同步補償器之電力電路係採用電壓型變流器的電路架構。在變流器部份，在此是採用日本三菱公司所生產之三相智慧型功率模組 (Intelligent Power Module, IPM) 變流器，編號為PM50RSA060，內部的半導體開關元件其最大汲極到源極承受電壓 (Drain-Source Voltage, V_{DS}) 為 600 伏特，而額定汲極電流 (Continuous Drain Current, I_D) 為 50A，並能承受最大脈衝電流 (Pulse Drain Current, I_{DM}) 100A，同時內含過電流、短路電流、過熱和欠壓等故障保護電路及煞車電路與故障輸出，當有故障發生時，會快速的關閉 (shut down) 以避免半導體開關元件輕易燒毀及防止直流端瞬間產生電壓突波；而待故障清除後，才會恢復正常動作。在直流電容器部份，是採用一個6800 μ F的直流電容器，其主要功用是提供變流器一個直流電壓，使其能正常運作，並抑制直流漣波。在變流器交流輸出側部份，每相均串接了12mH之電感器，其主要功用是緩和補償電流的變化率及當作一低通濾波器，以減少電流諧波流入系統電源端。

2. STATCOM 控制軟體撰寫

本計畫實作的部分其軟體是採用 C 語言來撰寫，程式在作業系統中直接對資料擷取卡做直接的輸出和輸入控制，使硬體的速度提至最高，而其中控制程式的撰寫雖可採用組合語言以提高運算速度，但因現在個人電腦已進入高速處理器時代，故可不作此考慮，即用 C 語言來撰寫程式即可。就整個系統的運作而言，軟體扮演著相當重要的角色，也可以說是整個系統的核心。在程式的執行速度要求上，軟體程式設計的好壞，有絕對的影響，所以本計畫採用易於設計撰寫的 C 語言。就整個

軟體程式而言，大致可分成三個部分：

- (1) A/D 輸入取樣及資料轉換。
- (2) 欲補償電壓值之計算。
- (3) 輸出開關切換命令以達電壓補償。

其整個控制程式的流程，如圖 3 所示；其中 A/D 為輸入取樣及資料轉換，以週期性的方式自系統電路中擷取類比資料，並將取樣之類比資料轉換成數位資料，再經由演算法分析的對稱成份法算出當時系統的正序、負序及零序電壓值，而由系統中的正序電壓成分即可訂出負載端的參考正序電壓值，此參考值和實際正序電壓成分之差經由一 PI 控制器即可求得電壓調整器所需輸出的補償電壓，其負序、零序成分也以相同方式計算出來，而此電壓再經 PWM 輸出後即可得到變流器開關之切換命令。如此週而復始計算出正確的補償命令而達到補償電壓以及降低不平衡率之目標。

3. STATCOM 控制器設計

圖 4 為主系統控制方塊圖，由此圖可看出首先利用 Clark Hochgraf 所提出的同步座標矩陣[6]將匯流排電壓轉成 V_{qa} 、 V_{da} 、 V_{qb} 、 V_{db} 、 V_{qc} 及 V_{dc} 六個電壓相量。之後將此六個電壓分量利用對稱成份法[19]可將三相電壓相量轉成正負零序電壓相量，之後利用轉出的正負零序電壓相量可把系統分成正負零序三個迴圈作各別控制。從物理意義可以預期在設計時，我們會把正序電壓參考值設為一標么，而負序電壓參考值會設為零標么，以減少匯流排電壓不平衡率。在追逐參考值的過程中，是採取前饋回授控制器來達成。至於零序不平衡率，本計畫以圖 5 的方式達成改善。

五、STATCOM 與系統整合控制之應用性能測試

為驗證本計畫所提之靜態同步補償器可應用於電力品質之改善，利用先前所建立的小型電力系統與靜態同步補償器，以實驗的方式驗證本計畫所提理論之可行性，實驗結果驗證採取本計畫所提出之靜態同步補償器對發生故障之系統，其電壓及不平衡率均獲得極大之改善效果。在實驗之波形量測方面，主要是利用安捷倫 (Agilent) 之數位示波器 (Digitizing Oscilloscope ; 54624A) 搭配 1:19.8 的電壓霍爾感測器做波形的測量。本計畫對三相四線式系統平衡故障補償和三相四線式系統不平衡故障補償分別做實驗分析如下：

1. 三相四線式系統平衡故障補償

首先對三相四線式系統平衡故障作補償，在系統圖 1 中我們在補償器投入前 2.406 秒時投入一 4 Ω 的三相電阻模擬系統發生一三相平衡接地故障，在 1.62 秒時，由本計畫所提出之靜態同步補償器開始進行補償。圖 6 為未發生平衡 4 Ω 接地故障時之負載端電壓，負載端峰值電壓為 $V_l=26.73$ 伏，其中由於三相平衡故障不會造成負載端電壓不平衡，因此僅以單相電壓表示負載端電壓。圖 7 為發生平衡 4 Ω 接地故障後之負載端電壓，負載端

峰值電壓降至 $V_l=22.27$ 伏，圖 7 中很清楚可看到在補償器投入前 2.406 秒時有一因三相電阻投入而產生的暫態波形。圖 8 為補償器投入補償後之負載端電壓，負載端峰值電壓升至 $V_l=25.34$ 伏，在圖 8 中可看到會有大約 50 毫秒的暫態現象，造成負載端電壓恢復的延遲。

另外探討不同故障接地電阻值 2Ω 的補償情形，在圖 1 中我們在 0.398 秒時投入 2Ω 的三相電阻模擬系統發生一三相平衡接地故障，在 1.84 秒時，由靜態同步補償器開始進行補償。圖 9 為未發生平衡 2Ω 接地故障時之負載端電壓，負載端峰值電壓為 $V_l=26.73$ 伏，同樣地由於三相平衡故障不會造成負載端電壓不平衡，因此僅以單相電壓表示負載端電壓。圖 10 為發生平衡 2Ω 接地故障後之負載端電壓，負載端峰值電壓降至 $V_l=16.83$ 伏，圖 10 中很清楚可看到在 0.398 秒時有一因三相電阻投入而產生的暫態波形。圖 11 為補償器投入補償後之負載端電壓，負載端峰值電壓升至 $V_l=24.26$ 伏，在圖 11 中可看到會有大約 108 毫秒的暫態現象，造成負載端電壓恢復的延遲。

由實驗波形圖 8 與圖 11 中可看到暫態現象，這是因為並聯補償器是利用電流去推動電壓來達到電壓支撐之目的，因此實際作實驗與模擬會有速度上的差別。此外，平均法濾波器在第一個週期僅讀取資料不送出補償信號，也會造成時間上的延遲。這代表 50ms 可能還要外加一個週期的時間。最後還可考慮當補償器投入匯流排造成的擾動亦有可能造成零交越線錯誤，控制器與系統無法同步，以上的因素皆有可能影響補償器達到穩態的速度。在圖 8 及圖 11 中可算出在平衡 4Ω 接地故障中，補償器能將負載端電壓升至 $V_l=0.95$ pu，在更嚴重之平衡 2Ω 接地故障中，補償器僅能將負載端電壓升至 $V_l=0.90$ pu。這是由於演算法分析中的四個 PI 控制器，選擇不同的值，會使系統穩定至不同的操作點。

2. 三相四線式系統不平衡故障補償

在此對三相四線式系統不平衡故障作補償，在系統中我們投入一 4Ω 的單相接地電阻模擬系統發生一三相不平衡接地故障，在 1.44 秒時，由計畫所提出之靜態同步補償器開始進行補償。圖 12 為未發生不平衡 4Ω 接地故障時之負載端電壓，負載端峰值電壓為 $V_l=26.73$ 伏，圖 13 為發生不平衡單相 4Ω 接地故障後之負載端電壓，負載端峰值電壓如圖 13 下方所示，分別為 20.39 伏 27.13 伏及 27.52 伏，並且在故障相有些許相位移的情況發生。圖 14 為補償器投入補償後之負載端電壓，負載端峰值電壓恢復至 $V_l=27.02$ 伏，在圖 14 中可看到故障相電壓到達穩態的時間較其他相久，並且略大於原先的負載端峰值電壓 $V_l=26.73$ 伏，這是由於電力電子開關元件切換時所造成之諧波所致。圖 15 為補償器投入後達到穩態後之負載端電壓，負載端電壓維持接近 $V_l=26.73$ 伏，可驗證補償器在經較久

的時間後足以維持穩定。

另外探討不同故障接地電阻值 2Ω 時的補償情形，在系統中我們投入一 2Ω 的單相接地電阻模擬系統發生一三相不平衡接地故障，在 6.48 秒時，由計畫所提出之靜態同步補償器開始進行補償。圖 16 為未發生不平衡 2Ω 接地故障時之負載端電壓，負載端峰值電壓為 $V_l=26.73$ 伏，圖 17 為發生不平衡單相 2Ω 接地故障後之負載端電壓，負載端峰值電壓如圖 17 下方所示分別為 17.52 伏、27.42 伏及 27.82 伏，並且在故障相有點相位移的情況發生。圖 18 為補償器投入補償後之負載端電壓，負載端峰值電壓恢復至 $V_l=26.63$ 伏，在圖 18 中可看到故障相電壓到達穩態的時間較其他相長。圖 19 為補償器投入後達到穩態後之負載端電壓，負載端峰值電壓維持接近 $V_l=26.63$ 伏，同樣地可驗證補償器在經更遠的時間後足以維持穩定。

比較圖 15 與圖 19 可以看到本計畫所提之靜態同步補償器能對單相 4Ω 接地故障作回復至 1pu 的能力，但對較嚴重之單相 2Ω 接地故障，就有力有不逮的現象。並且可觀察到故障相因需求較大之補償電流，故障相的電壓恢復也會較其他久，同時系統達到穩態的時間會比平衡故障時久。

六、討論

本計畫提出一以個人電腦作為控制主體的靜態同步補償器，主要是研究如何以變流器為主體電力架構來達成其應用於電力系統電壓驟降以及不平衡改善之目標。最後利用實驗來測試本計畫所提之靜態同步補償器之應用效能；並由結果顯示，本計畫所提之靜態同步補償器確實能達到調整負載端電壓以及降低負載端電壓不平衡率之功能。

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三年之研究，完成了原型靜態同步調相器應用於電力系統之應用性能測試，對於預期工作項目中的「STATCOM 硬體製作設計」、「STATCOM 控制軟體撰寫」、「STATCOM 控制器設計」、「STATCOM 性能測試」、「STATCOM 系統整合測試」以及「STATCOM 在系統控制之應用」等項目均順利完成，達成本計畫原先所擬定之進度和目標。最後實體性能測試的結果亦相當令人滿意。

八、參考文獻

- [1] 陳如元，“三相四線式靜態同步補償器，”碩士論文，台灣大學，民國九十三年。
- [2] E. Muljadi, R. Shiferl, and T. A. Lipo, “Induction Machine Phase Balancing by Unsymmetrical Thyristor Voltage Control,” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-21, No. 4, pp. 669-678, May/June 1985.
- [3] A. Campos, G. Joos, P. Ziogas, and J. Lindsay, “Analysis and Design of A Series Voltage Compensator for Three-Phase Unbalanced Source,” IEEE Trans. on Industry Electronics, Vol.

39, No. 2, pp. 159-167, April 1992.

[4] Gyugyi, "Reactive power generation and control by thyristor circuits," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. IA-15, no. 5, pp.521-531, 1979.

[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. Hochgraf and R. H. Lasseter, "Statcom Controls for Operation with Unbalanced Voltages," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, pp. 538-544, April 1998.

[7] S. Chen, G. Joos and L. T. Moran, "Dynamic Performance of PWM STATCOMs Operating under Unbalance and Fault Conditions in Distribution Systems," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 2, No. 2, pp. 950-955, 2001.

[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] N. G. Hingorani, and L. Gyugyi, "Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, IEEE Press, 2000.

[10] 李瑞欽, "以反流器設計三相固態虛功補償器," 碩士論文, 台灣大學, 民國八十七年。

[11] L. Moran, D. Z. Phoivos, and G. Joos, "Performance Analysis of a PWM Inverter VAR Compensator," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 6, no.3, pp.380-391, July 1991.

[12] 翁永財, "應用於電壓調整之靜態同步補償器設計," 碩士論文, 台灣大學, 民國九十一年。

[13] L. Moran, D. Z. Phoivos, and G. Joos, "A solid-state high-performance reactive-power compensator," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 29, no.5, pp. 969-978, 1993.

[14] 江炫樟, "電力電子學", 全華出版社, 1997.

[15] W. N. Chang and K. D. Yeh, "Design of D-STATCOM for Fast Load Compensation of Unbalanced Distribution Systems," International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Vol. 2, 22-25 Oct. 2001.

[16] 江榮城, "電力品質實務(一)," 全華科技圖書股份有限公司, 2000.

[17] C. Schauder and H. Mehta, "Vector Analysis and Control of Advanced Static VAR Compensators," IEE Proceedings-C, Vol. 140, No. 4, pp. 299-306, July 1993.

[18] H. Saadat, "Power System Analysis," McGraw-Hill, 1999.

[19] 王興良, "新型數位式主動電力濾波器," 碩士論文, 台灣大學, 民國八十八年。

[20] M. Grandpierre and B. Trannoy, "A Static Power Device to Rebalance and Compensate Reactive Power in Three Phase Network: Design and

Control," in Conf. Rec. 1977 Annu. Meet. IEEE Industry Applications Society, pp. 127-135.

[21] Y. Sumi, Y. Harumoto, T. Hasegawa, M. Yano, K. Ikeda, and T. Matsuura, "New static var control using force-commutated inverters," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no. 9, pp. 4216-4224, 1981.

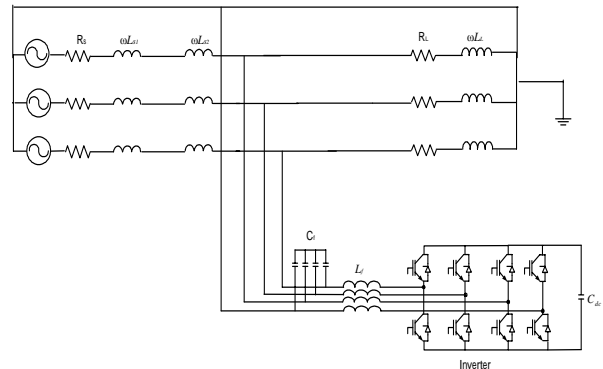


圖 1 系統等效電路圖

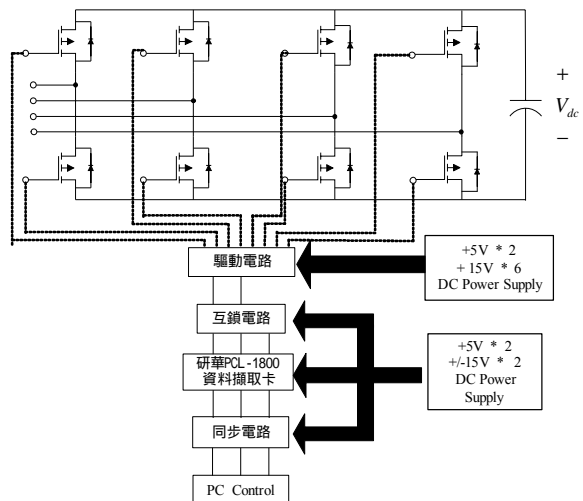


圖 2 靜態同步補償器之硬體系統架構圖

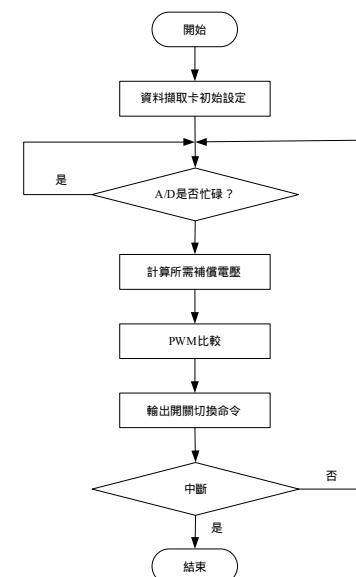


圖 3 靜態同步補償器之程式控制流程圖

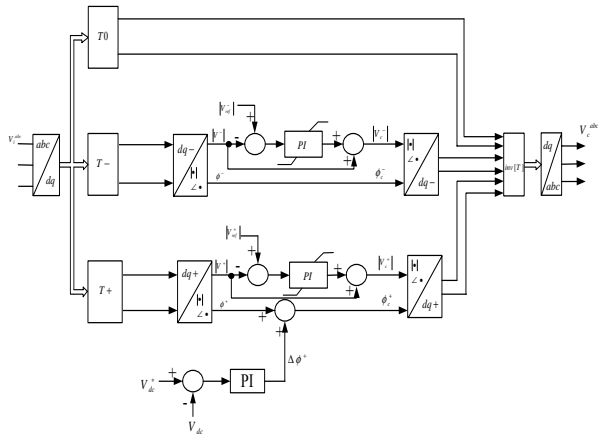


圖 4 電壓控制方塊圖

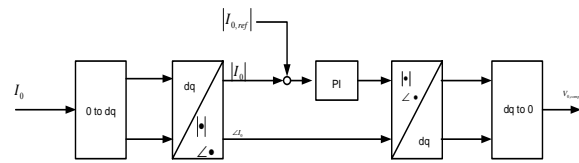


圖 5 第四臂零序電壓控制迴圈

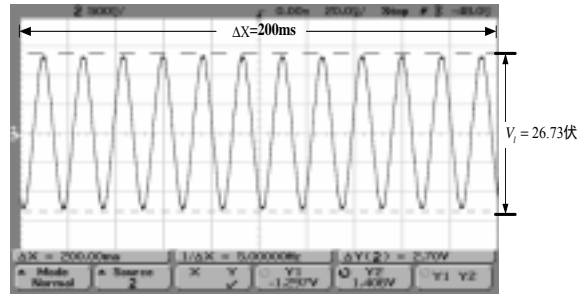


圖 9 未發生平衡 2Ω 接地故障時之負載端電壓

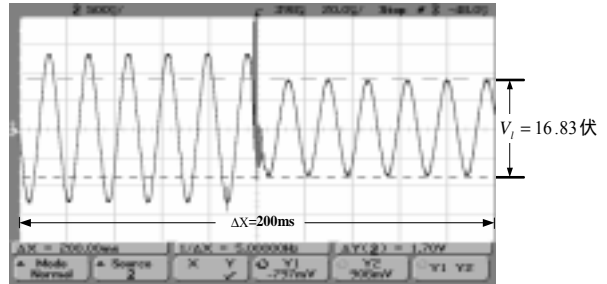


圖 10 發生平衡 2Ω 接地故障後之負載端電壓

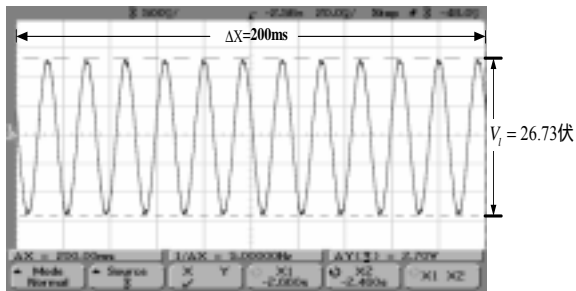


圖 6 未發生平衡 4Ω 接地故障時之負載端電壓

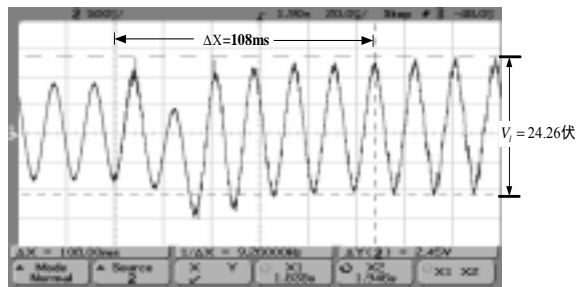


圖 11 發生平衡 2Ω 接地故障補償器投入補償後之負載端電壓

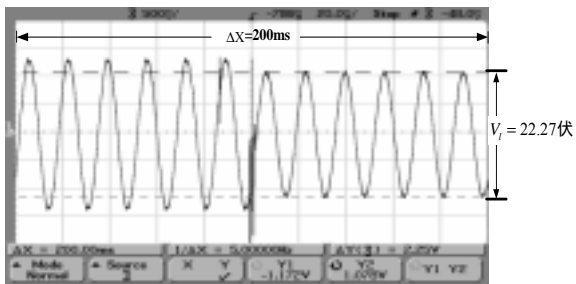


圖 7 發生平衡 4Ω 接地故障後之負載端電壓

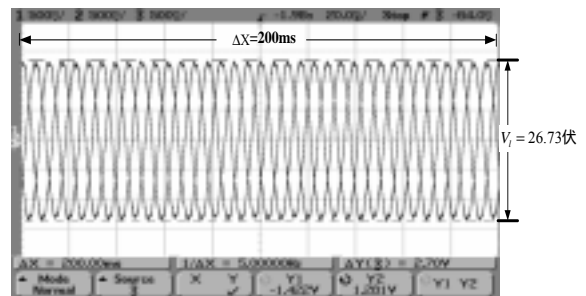


圖 12 未發生不平衡 4Ω 接地故障時之負載端電壓

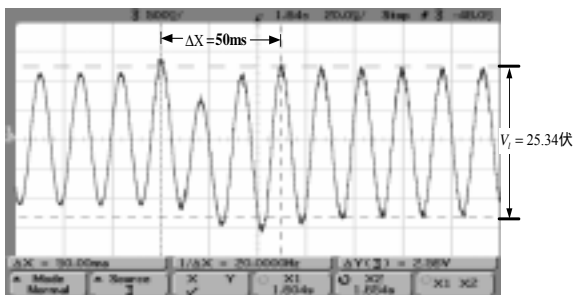


圖 8 發生平衡 4Ω 接地故障補償器投入補償後之負載端電壓

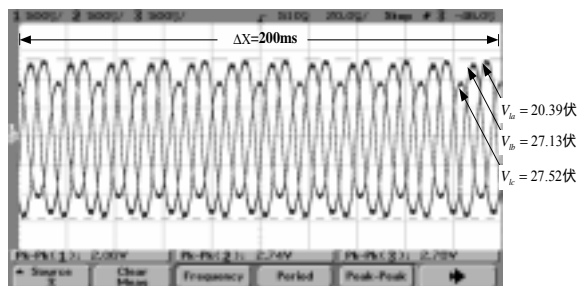


圖 13 發生不平衡 4Ω 接地故障後之負載端電壓

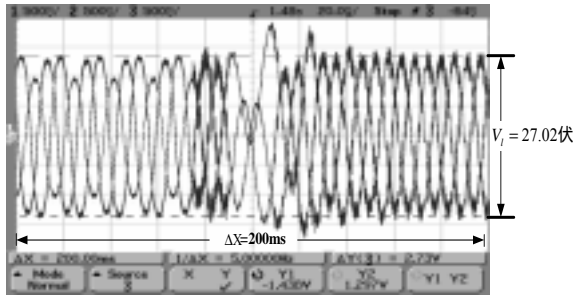


圖 14 發生不平衡 4Ω 接地故障補償器投入補償後之負載端電壓

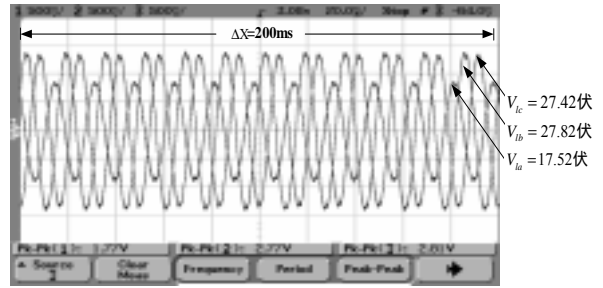


圖 17 發生不平衡 2Ω 接地故障後之負載端電壓

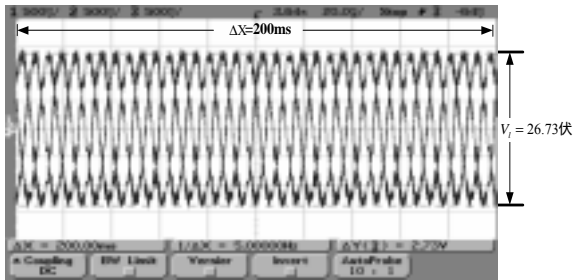


圖 15 發生不平衡 4Ω 接地故障補償器投入達到穩態後之負載端電壓

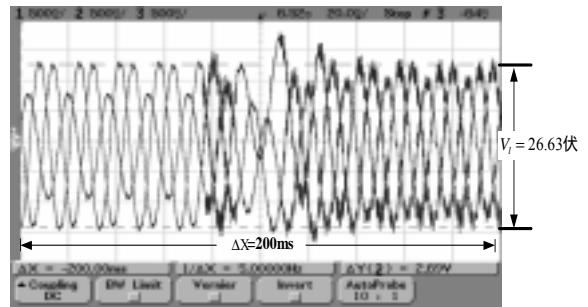


圖 18 發生不平衡 2Ω 接地故障補償器投入補償後之負載端電壓

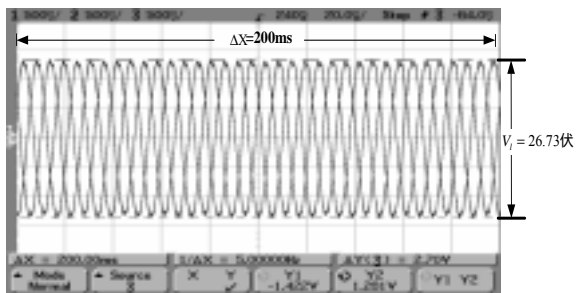


圖 16 未發生不平衡 2Ω 接地故障時之負載端電壓

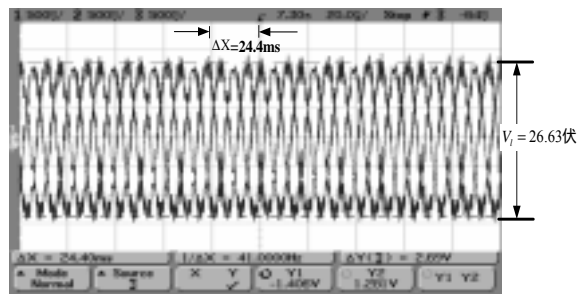


圖 19 發生不平衡 2Ω 接地故障補償器投入達到穩態後之負載端電壓