

探討靜態虛功補償器 (SVC) 之效益

國立台灣海洋大學電機工程學系 黃培華
 國立台灣海洋大學電機工程學系 柯侑寬
 國立台灣海洋大學電機工程學系 黃柏遠

摘要

靜態虛功補償器 (Static Var Compensators-SVC) 是屬於動態之快速無效功率補償設備，目前已廣泛使用於鋼鐵業配電系統，國外目前案例中，SVC 也已應用於輸電系統。以工業系統來說，電弧爐會產生電壓驟降、電壓閃爍、相序不平衡、不良之功率因素及諧波等電力品質問題，煉爐時所產生電壓壓降、電壓閃爍、相序不平衡、功率因素不好之情形最為明顯，並且當煉爐運轉時會有諧波問題發生，相對地對電力品質也會有影響，對臨近之用戶端而言更是會影響其供電品質。SVC 是利用提供或吸收虛功方式來達到補償進而改善系統之電壓穩定，目前 SVC 已具備有先進之控制系統可以主動判別系統電壓並即時針對電壓過高或過低現象立即做虛功補償以穩定及維持電壓。鋼鐵業使用 SVC 並能調節煉爐時所產生相序不平衡現象及具有改善諧波能力並使之具有較佳之功率因素。

此篇文章研究之目的主要是針對配電系統中使用靜態虛功補償器來改善電壓壓降、功率因素、相序不平衡、電壓閃爍及增加電力傳送能力及諧波問題；對輸電系統而言，SVC 具有增加穩態電力傳輸能力、增加暫態穩定度及防止電壓不穩定之功用做探討。

I. 前言

SVC 在輸電及配電之電力系統虛功補償中應用於電壓控制已廣泛使用，大多數電壓不穩定之原因為虛功因素所引起，電壓不穩定嚴重情況下會導致電壓崩潰而影響到系統供電；在配電系統中，應用最多是在鋼鐵業，當煉爐運轉時，電壓壓降、

電壓閃爍、相序不平衡及諧波問題就會伴隨發生；在輸電系統中，電壓動態不穩定之現象是值得探討，因此有必要對虛功方面做進一步探討。改善電壓不穩定之現象可使用 SVC 來做虛功補償。傳統方式是使用固定式電容器和固定式電抗器去提供虛功及吸收虛功去控制系統電壓，固定式電容器和固定式電抗器是屬於被動式補償，而 SVC 是主動式補償並且因有控制系統具有快速判斷之能力。

SVC 具有主動式調整系統電壓變化使其穩定電壓之能力，虛功補償不僅改善電壓不穩定並且使功率因素變好，SVC 濾波機組也可消除部份諧波量使電力品質較佳並具有快速減緩電壓振盪以維持電壓平衡，在研究中還發現，系統無效功率分配不當時，也會增加線路損耗，因此，因 SVC 加入可增加電力傳輸能力。

II. 內容

(1) SVC 組成

1. 開控電抗器 (TCR)

開控電抗器 (TCR) 迴路中，是由電抗及雙向閘流體組成[1]。SVC 控制系統利用送出觸發訊號來控制閘流體導通。從控制系統到閘流體基座路徑大都是使用光纖，主要是光纖可以避免雜訊並且具較快之訊號傳送速度。當電流為 0 時，閘流體會閉鎖住。因此電流 I_{TCR} 可被控制流經開控電抗器，主要是決定於閘流體是否導通。開控電抗器最小電流量發生時候是由於沒有閘流體導通[2-3]。

閘流體觸發角 α 會介於 90 度到 180 度間，如圖 1 所示，當觸發角為 90 度時，閘流體在迴路中全導通。當觸發角為 180 度時，閘流體在迴路中不導通。觸發角與導通角是有相關連性[4]。

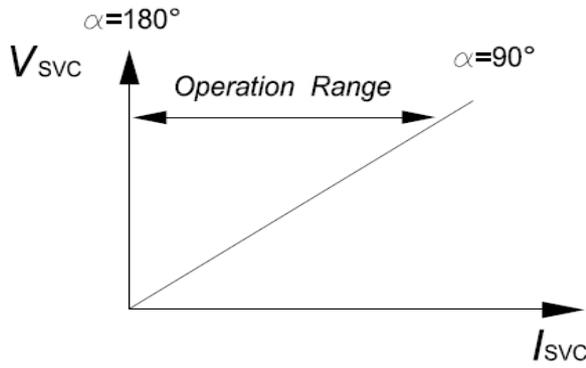


圖 1 觸發角之動作區

σ : 導通角

當開流體觸發角為 90 度時，依公式 $\alpha + \frac{\sigma}{2} = \pi$ 所計算出導通角為 180 度，此時電抗器吸收之無效電流為最大。當開流體觸發角為 180 度時，導通角為 0 度，此時電流為最小。因此觸發角之改變會直接影響到無效分量，而改變無效分量就可達到調整無效功率。

TCR 迴路常見是使用 6-pulse 三角接法，如圖 2 所示 [1]。TCR 電流 i_{AB} ， i_{BC} ， i_{CA} 是屬於線電流。

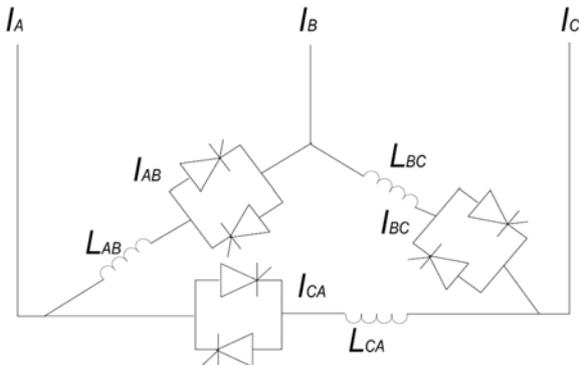


圖 2 TCR 三角接法

6-pulse 三角接法可以消除三次諧波量，TCR 之各相之三次諧波量電流依公式 (1)~(3) 所示可表示為 [1]：

$$i_{AB3} = a_3 \cos(3\omega t + \phi_3) \quad (1)$$

$$i_{BC3} = a_3 \cos(3\omega t + \phi_3 - 2\pi) \quad (2)$$

$$i_{CA3} = a_3 \cos(3\omega t + \phi_3 - 4\pi) \quad (3)$$

以三相平衡 $I_{AB3} = I_{BC3} = I_{CA3}$ 之情況下，TCR 線電流 I_{A3} ， I_{B3} 及 I_{C3} 依公式 (4)~(6) 所示可表示為：

$$I_{A3} = I_{AB3} - I_{CA3} = 0 \quad (4)$$

$$I_{B3} = I_{BC3} - I_{AB3} = 0 \quad (5)$$

$$I_{C3} = I_{CA3} - I_{BC3} = 0 \quad (6)$$

以公式 (4)~(6) 計算所知，三次諧波量經計算後為 0，三次諧波量在平衡狀態下不會流經 TCR 線路中，因此，TCR 迴路常見是使用 6-pulse 三角接法。

從 TCR 迴路中可看出 TCR 是具有可控制相序平衡，因此 SVC 對於改善相序不平衡有其效益。

2. 固定式電容機組(Fix Capacitor-FC)

常見 TCR 與固定式電容機組一起併接運轉 [5]。當 TCR 運轉時會有諧波成份產生，TCR 產生之諧波為單數諧波，因會有諧波產生，所以濾波功能並已設計在 SVC 中，主要是考量 TCR 所產生之諧波問題，對於如煉爐所產之諧波，也可在 SVC 中設計裝置，設計時並須考慮到對系統之共振現象。安裝濾波器來改善諧波問題是必要的，安裝更多較高次諧波濾波器雖可過濾較多諧波成份，但所需費用也就更高。

3. 開流體

常見之一開流體為雙向導通式開流體或是採用反併聯式單向導通式開流體，開流體設計並須整合水冷卻系統 [6-7]，各層之開流體為獨力運行，單一開流體故障時，控制系統會送出開流體故障訊號，SVC 仍可以運轉，多個開流體故障時，控制系統會送出開流體故障訊號並考慮到安全性，SVC 會立即停止運轉。

4. 保護元件

SVC 由幾個成份組成，當然也包括保護成份來保護設備及系統所需。對於電抗器保護方式，保護元件為過載保護、負

序保護、過流保護及接地保護等方式。對於電容器保護方式，保護元件為不平衡保護、過電壓保護、低電壓保護、過流保護等方式。所有保護功能對控制系統來說是獨立的，以目前 SVC 設計，保護功能均具備在控制系統中，對於以往之保護功能均設置在保護電驛盤中之方式有很大之不同點。大部份跳脫事件為過載保護跳脫，對電抗器及電容器而言，主要是設定值較為嚴謹靈敏。當控制系統有跳脫事件發生時，SVC 會立即停止運轉。

5. 水冷卻系統

水冷卻系統 (cooling system) 主要是確保開流體能穩定正常工作，水冷卻系統也會有提供保護方式，當水冷卻系統失效時，SVC 會立即停止運轉。

(2) 諧波問題對 SVC 也是需要檢討，利用傅立葉分析對諧波成份的電壓及電流進行頻譜分析，主要是觀察其波形中，除了原波形的頻率外，還有哪些頻率的諧波干擾主波，其大小是多少，這樣可以針對其產生的諧波進行消除。同理，利用傅立葉分析對諧波成份的電流也可進行頻譜分析。如圖 3 及圖 4 所示為利用傅立葉分析基本波及 2 到 7 次諧波。

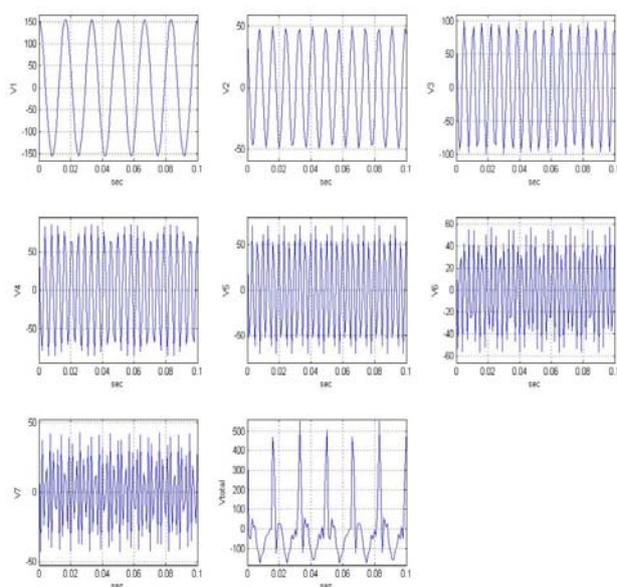


圖 3 時域分析 2-7 次諧波

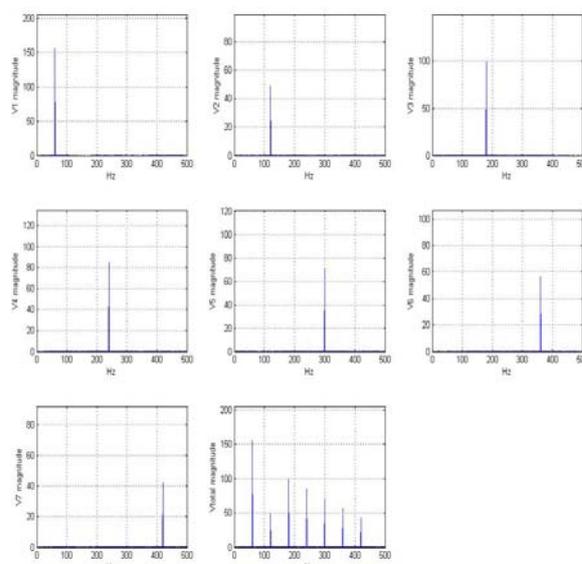


圖 4 頻域分析 2-7 次諧波

(3) SVC 應用

當開流體觸發角為 90 度時，可以產生美好之正弦波。當開流體觸發角為 90~180 度時，此時之波形並非為美好之正弦波，當然觸發時間延長與否需要考慮對波形之影響。

如圖 5 範例所示，SVC 電力來自上游變壓器，電壓及電流端要引進至 SVC 控制系統，主要目的是要讓控制做計算、補償及保護用途。

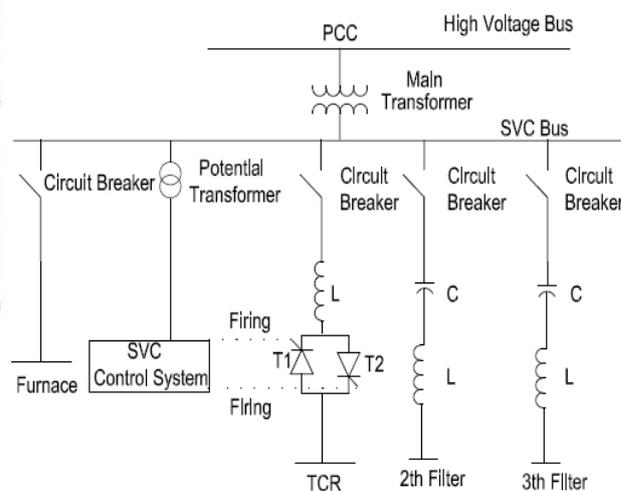


圖 5 SVC 系統架構概要

(4)SVC 成效量測

以鋼鐵業 SVC 範例來說，煉爐不僅需要較大之實功外，也需要較大之虛功。在煉爐過程中，虛功變化也較為大，因此也是導致電壓閃爍之問題發生。因此，為了有效防止煉爐時所產生壓降及電壓閃爍現象，SVC 具有動態虛功補償能力。

為了有效改善煉爐時產生之電壓劇烈變化，需要設備能提供快速補償作法是需要的。SVC 具有下列功效：

1. 在分界點上保持電壓及功率因素穩定。
2. 在分界點上減少電壓閃爍現象。
3. 濾除所產生之特定諧波量。
4. 穩定系統電壓。

當煉爐時，SVC 濾波機組產生之虛功量會等於煉爐產生及 TCR 補償虛功量之和，因此對系統電壓量測點來說，虛功量變化為 0。SVC TCR 具有調整虛功量之能力，所調整之大小虛功量取決於煉爐時所需之虛功量。當系統電壓量測點虛功量變化為 0 時，是不會有電壓驟降及電壓閃爍問題，此外，功率因素值也變得較佳。

煉爐負載不僅存在實功也存在著虛功量，因此，在虛功量之影響下，電壓會跟著虛功量做變化，因此，煉爐時，電壓閃爍更特別容易顯現。為了防止煉爐所產之電壓壓降及電壓閃爍，SVC 可利用虛功做補償是進而來改善系統電壓變化[8]。

從圖 6-1 及 6-2 中可看出當系統電壓等級為 22.8kV 時，SVC 成效量測中可看出煉爐時使用 SVC 及未使用 SVC 電壓變化結果。從圖中可看出，使用 SVC 會使電壓較穩定。以圖 6-1 所示為使用 SVC 時電壓變化圖，系統電壓為 23kV，煉爐時最大電壓約為 23kV，最小電壓約為 22.3kV。而圖 6-2 所示為未使用 SVC 時電壓變化圖，系統電壓為 23kV，煉爐時最大電壓為 24kV，最小電壓約為 19kV。

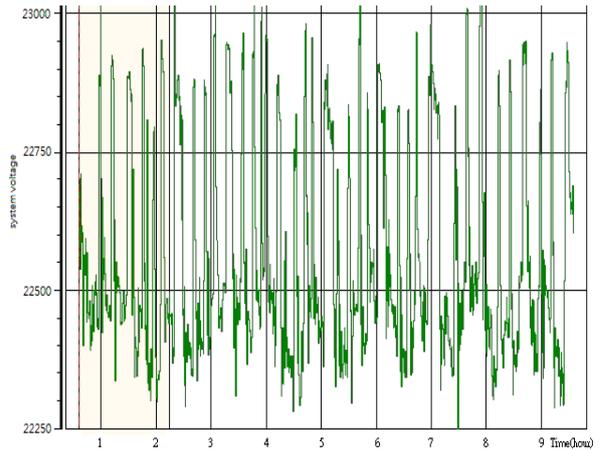


圖 6-1 有安裝 SVC 之電壓變化圖 (22.3kV~23kV)

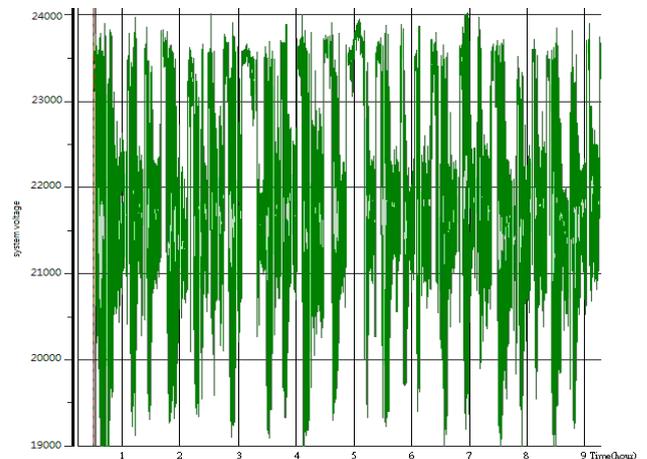


圖 6-2 沒有安裝 SVC 之電壓變化圖 (19kV~24kV)

SVC 也可增加電力的傳輸能力[9]。以一無限匯流排為例，如圖 7 所示，電力是依據負載角 δ 和線路阻抗計算出。最大電力發生為公式(7)所示：

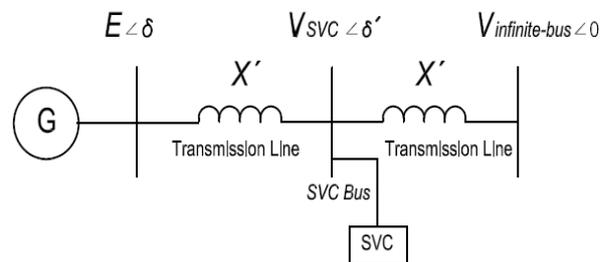


圖 7 無限匯流排

$$P_{max} = \frac{|E| \cdot |V|}{X} \sin \delta \quad (7)$$

當負載角 δ 為 90 度時，電力為最大值。在安裝 SVC 做並聯補償，如圖 8 所示，最大電力數值，如圖 9 所示[5]：

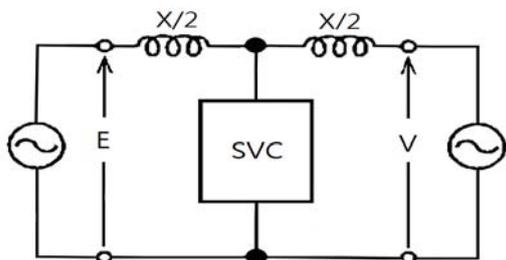


圖 8 加裝 SVC 之等效圖

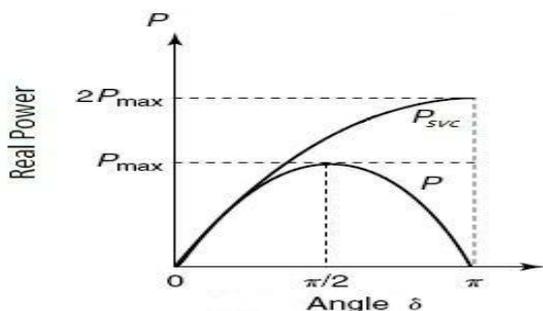


圖 9 SVC 對電力影響之比較圖

從圖 10 及 11 量測資料中可知，有加裝 SVC 對電力傳送值較大。

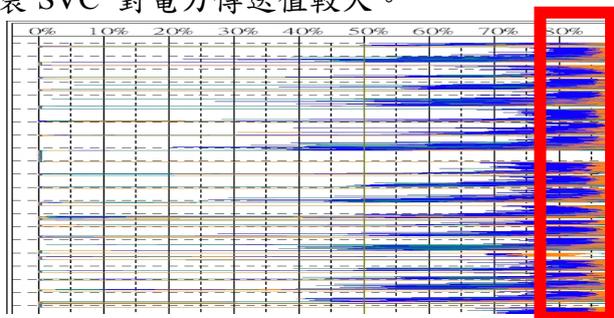


圖 10 有安裝 SVC 之電力傳送能力比較

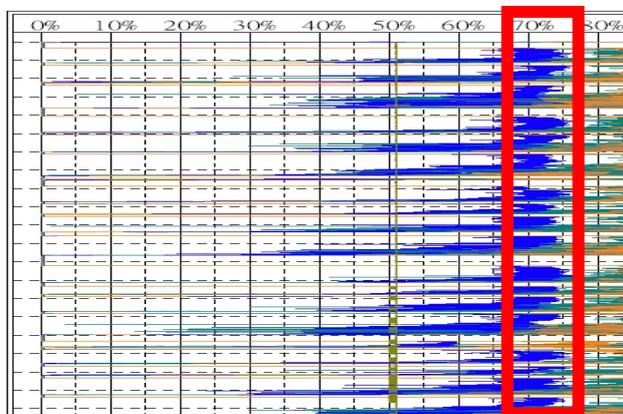


圖 11 沒有安裝 SVC 之電力傳送能力比較

量測範例中，SVC 可以讓系統有較佳功率因素，具有 SVC 量測點所量測出功率因素為 0.96，

P.F 0.96 COS。無 SVC 量測點所量測出功率因素為 0.87，

P.F 0.87 COS。從量測結果可得知，具有 SVC 在 PCC 點量測時會有較佳之功率因素。

(5)SVC 對暫態穩定性之效益

暫態穩定意指遇到突然干擾系統恢復之能力，圖 12 所示，暫態穩定是依 $P-\delta$ 特性所得出故障前、故障發生時及故障後之 $P-\delta$ 特性曲線， δ_0 是開始運轉角，各運轉角都會對應出 P_m ， δ_c 為臨界清除角。A1 面積計算依公式(8)所示：[1]

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_m - P_e) d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_c} P_m d\delta = P_m(\delta_c - \delta_0) \quad (8)$$

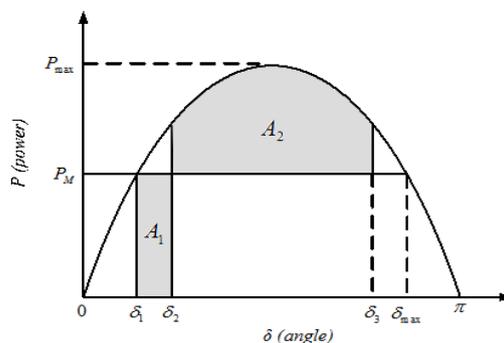


圖 12 $P-\delta$ 傳輸功率及角度之特性曲線

依穩定度之計算準則，A1 要相同於 A2，A2 計算依公式(9)所示：[1]

$$A_2 = \int_{\delta_c}^{\delta_{max}} (P_{max} \sin\delta - P_m) d\delta \quad (9)$$

當 $\delta = \delta_{max}$ 為最大之暫態穩定角，也是為故障清除後之新運轉點， δ_{max} 如公式(10)所示：[1]

$$\delta_{max} = \pi - \delta_0 \quad (10)$$

依圖 12 原理，SVC 具有增加暫態穩定之能力，圖 13 所示，A2 相同於 A1，B1 相同於 B2 [8, 10]。

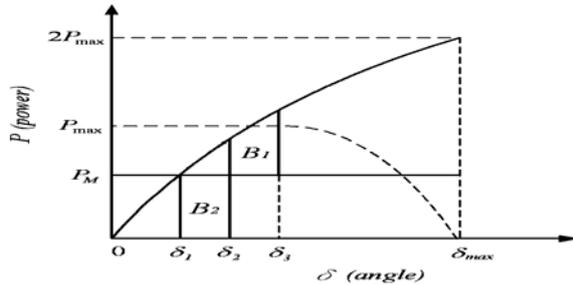


圖 13 具有 SVC 之 $P-\delta$ 傳輸功率及角度之曲線

III. 結論

SVC 不僅可以改善電壓壓降、電壓閃爍、相序不平衡外，也可獲得較佳功率因素。此外，SVC 也可有較佳之電力傳送能力；對於系統穩定度而言，SVC 也提供穩定電壓作用，SVC 特性也具有改善電力品質及功因效果，並具有增加電力傳送之能力及提供較好之暫態穩定性能。

參考文獻

- [1] R. M. Mathur and R. K. Varma, *Thyristor-based facts controllers for electrical transmission systems*, Wiley, 2002.
- [2] L. Gyugyi, "Power Electronics in Electric Utilities: Static Var Compensators," *Proceeding of IEEE*, Vol. 76, No. 4, pp. 483-494, 1988.
- [3] L. Gyugyi, "Fundamentals of Thyristor-Controlled Static Var Compensators in Electric Power System Applications," *IEEE Special Publication 87TH0187-5-PWR of Application of Static Var Systems for System Dynamic Performance*, 1987, pp. 8-27.
- [4] P. V. Goosen, R. D. MacFarlane, H. Pesch, P. Sieber, and M. Schubert, "FC/TCR Type Static Compensators in ESKOM's 132kV Network," *CIGRE Paper 38-09*, Paris, 1984.
- [5] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS*, IEEE Press, New York, 1999.
- [6] ABB, <http://www.abb.com.tw>.
- [7] NR, <http://www.nari-relays.com>.
- [8] A. T. Johns and Y. H. Song, *Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*, London, 1999.
- [9] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, 1994.
- [10] L. L. Grigsby, *Power System Stability and Control*, CRC Press, 2007.