

彈性交流輸電系統中動態制動電阻控制系統之研製

王孟輝 陳鴻誠 趙貴祥

國立勤益技術學院電機科

摘 要

本研究旨在設計一種可實驗的動態制動電阻控制系統，以測試其在電力系統發生重大擾動(如三相短路或負載切離等)時之控制效能。考量系統硬體成本和應用之可靠度，本文僅使用一組三相整流器及一只功率半導體元件組成動態制動電阻之主控制電路，並利用波寬調變(pulse width modulation, 簡稱 PWM)技術完成其功率消耗控制。最後，為驗證本研究之實用性，本文以一單機電力系統和比例積分控制電路測試，由實測結果顯示，所設計的動態制動電阻控制系統，能有效的抑制系統振盪，在電力系統負載突然切離時，可在二秒內使系統回復穩定狀態。本文之測試結果除可供學術之研究外，亦可提供台電公司未來規劃彈性交流輸電系統時之參考。

關鍵詞：彈性交流輸電系統、動態制動電阻、暫態穩定度控制。

一、前言

本(88)年7月29日深夜，由於台電345KV輸電系統，中寮-龍崎山線第326號和嘉民-龍崎海線第199號共架之鐵塔倒塌，造成台灣五十年來最大規模的斷電，全台約80%的用戶斷電，導致工商業高達50億元以上的損失[1]。此一現象顯示，現存之台電系統北部地區嚴重缺電、南北輸電系統承載量不足和系統暫態穩定度控制不良；依據台電的評估，目前北部地區發電容量不足3700MW，必須依賴中、南部供電，到九十年時北部地區將不足4500MW。以台電現有的輸電能力，僅能輸送3500MW，未來四年內若無法提昇輸配電能力或順利擴建電廠，北部地區會發生供電不足的現象。然而，最近幾年，台電公司電力開發卻在環保的抗爭下受到相當的限制；核四及蘇澳火力尚未興建，第三路輸電幹線也在地方抗爭下目前停工。因此，如何在既有的發變電設備下，增加供電和輸配電的能力，或建立彈性交流輸電系統(flexible AC transmission system, 簡稱FACTS)，已經是台電公司未來電力建設的重點項目之一。國外相關研究部份，美國電力研究所(Electric Power Research Institute, 簡稱EPRI)，自1990年起已著手為期七年的彈性交流輸電系統研究計畫[2]，目前全世界的彈性交流輸電系統有美國奇異、德國西門子和瑞典ABB三家公司[3-5]，EPRI預期在西元二千年彈性交流輸電系統將普遍為各國電力公司所採行，並成為輸電系統的主流。因此，台電公司實有必要結合國內各學術研究機構開始進行研究。

彈性交流輸電系統主要是利用電力電子元件直接控制系統網路的阻抗或相位，進而彈性調整系統有效和無效功率的傳輸，使其在正常或緊急事故時發揮最大的運轉靈活度，以期提昇系統輸電能力和穩定度。目前彈性交流輸電系統的研究重點可分為兩項，第一項為控制設備的研究，文獻上已發表的可應用裝置包括：閘控制動電阻、閘控串聯電容、閘控相移變壓器和閘控同步調相電

容等[2-16]。其中，動態制動電阻之主要功能是在系統發生重大擾動(如三相短路)時，迅速吸收系統多餘之能量，使系統快速穩定，以期提高系統安全調度範圍。另一項研究重點則為控制策略探討或控制器之設計，目前已發表的文獻中大部份仍以簡單的邏輯控制(logic control)策略、傳統控制理論設計控制器[5-16]、強健控制[17]或如筆者採用的自我組織類神經模糊控制器(robust-self organizing neural fuzzy controller, 簡稱 SONFC) [18]等。唯目前國內有關彈性交流輸電系統之實測結果仍然相當缺乏，因此本文提出之目的在於設計一種可測試之動態制動電阻控制系統，並以硬體實現，以了解當電力系統安裝動態制動電阻後，對電力系統穩定度及電力品質之影響。

二、動態制動電阻控制之系統架構

(一)、系統數學模式

圖一為單機接無限匯流排時，動態制動電阻控制系統方塊圖。一般於電腦模擬時，發電機部份以三階非線性微分方程表示，激磁機若採用第一種模型 (Type-I) [19]和調速機採二階模型，整個動態制動電阻控制系統可用下列八階微分方程表示其動態行為 [20]：

$$\dot{\delta} = \omega \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_0}{2H} P_m - \frac{D}{2H} \omega - \frac{\omega_0}{2H} \left\{ \frac{X_{DL} E'_q V_s \sin(\delta + \delta_0) + U[X_d X_L E'_q V_s \cos(\delta + \delta_0) + (X_L E'_q)^2]}{(X'_d X_L U)^2 + X_{dL}^2} \right\} \quad (2)$$

$$\dot{E}_q = \frac{1}{T'_{do}} E_{FD} - \frac{X_{dL}}{T'_{do} X'_{dL}} E'_q - \frac{(X_d - X'_d) V_s \cos(\delta + \delta_0)}{T'_{do} X_{dL}} \quad (3)$$

$$\dot{E}_{FD} = \frac{1}{T_E} V_R - \frac{(S_E + K_E)}{T_E} E_{FD} \quad (4)$$

$$\dot{V}_F = \frac{K_F}{T_F} E_{FD} - \frac{1}{T_F} V_F \quad (5)$$

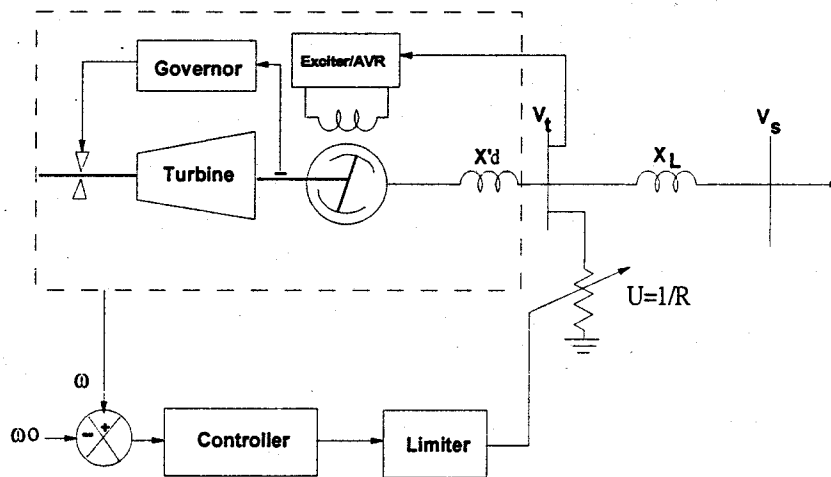
$$\dot{V}_R = \frac{K_A}{T_A} V_e - \frac{1}{T_A} V_R \quad (6)$$

$$\Delta \dot{P}_V = \frac{-K_G}{T_G} \omega - \frac{1}{T_G} \Delta P_V \quad (7)$$

$$\Delta \dot{P}_m = \frac{1}{T_T} \Delta P_V - \frac{1}{T_T} \Delta P_m \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} U = 1/R \\ V_e = V_{REF} - V_t - V_F \\ S_E = f(E_{FD}) = A_{EX} \exp(B_{EX} E_{FD}) \\ U_{min} \leq U \leq U_{max} \\ V_{Rmin} \leq V_R \leq V_{Rmax} \end{cases} \quad (9)$$

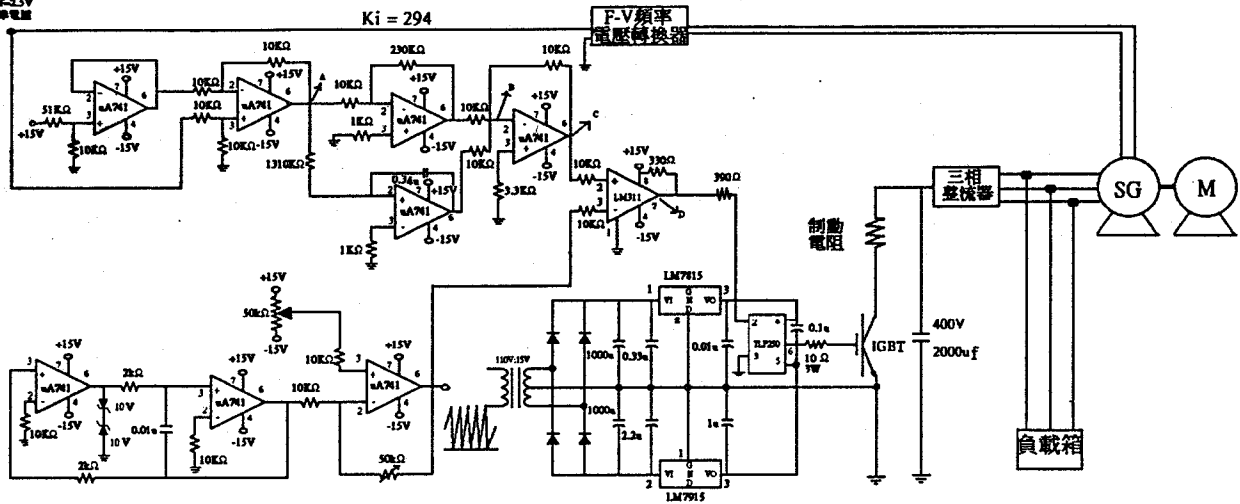


圖一 動態制動電阻控制之系統架構

(2)式中 U 為制動電阻器之電導值，利用 U 值之變化，可控制動態制動電阻吸收系統之暫態功率。當系統發生三相短路或負載突然切離時，原動機會因負載量突然降低而加速，致使發電機頻率上升，當控制器 (controller) 接收到頻率誤差時，即刻產生控制信號驅動主電路中之功率半導體元件，藉以調整制動電阻吸收之功率，使系統能迅速回復穩定狀態。由於實際系統其控制量有上下限，故控制信號需經一限制器 (limiter) 後輸出。

(二)、實測硬體之設計

由於要完整的構建圖一之硬體系統相當昂貴和複雜；考量成本因素，本研究設計如圖二之實測硬體線路圖，圖中利用他激式直流電動機當作原動機帶動三相同步發電機組，構成一單機之電力系統。利用他激式直流電動機當作原動機之目地，在於其速度調整非常簡單。因此，可輕易調整發電機之穩態頻率。發電機之激磁線圈暫時以定電壓供電，如此可充份測試僅動態制動電阻控制時之效果。同步發電機的輸出頻率透過頻率/電壓轉換器取出正比於頻率之電壓位準，經由頻率參考信號比較後產生誤差信號。此誤差信號經比例積分控制器產生控制信號和 10kHz 之三角波比較後，產生波寬調變信號觸發開極絕緣式雙載子電晶體 (insulated gate bipolar transistor, 簡稱 IGBT)。藉由控制 IGBT 之導通和截止時間之長短，即可控制動態電阻吸收功率之大小；當發電機頻率越高，IGBT 導通時間越久，制動電阻所吸收之功率越大。圖中發電機電壓先經三相整流後，藉由一組電力電子元件控制功率，其主要特點在於實際的電力系統中，流過動態制動電阻的電流相當大，假使只使用一只功率控制元件可大量降低系統和硬體之裝置成本，同時也可以使系統保持三相平衡。



圖二 動態制動電阻控制系統實驗電路圖

由於本次研究之重點在於測試動態制動電阻動作時對系統之影響，圖二之線路圖已足以初步的實驗。進一步結合微電腦和其他智慧型控制方法[21]之硬體架構，目前已進行研製及測試中。

三、實測結果與討論

(一)、測試狀況

本研究使用額定電壓為190V，1HP之他激式直流電動機帶動三相220V，1/2HP 同步發電機，其負載量由1 (pu) 重載切換至 0.5 (pu)。動態制動電阻使用 100 歐姆1000瓦之繞線電阻，比例積分控制器之 K_p , K_i 經測試調整後設為 23, 294。實驗時先將發電機加至滿載並維持額定電壓及額定頻率，再將負載量由 1 (pu) 重載切換至 0.5 (pu) 輕載，使系統遭受重大擾動後，即進行動態電阻制動控制之測試。

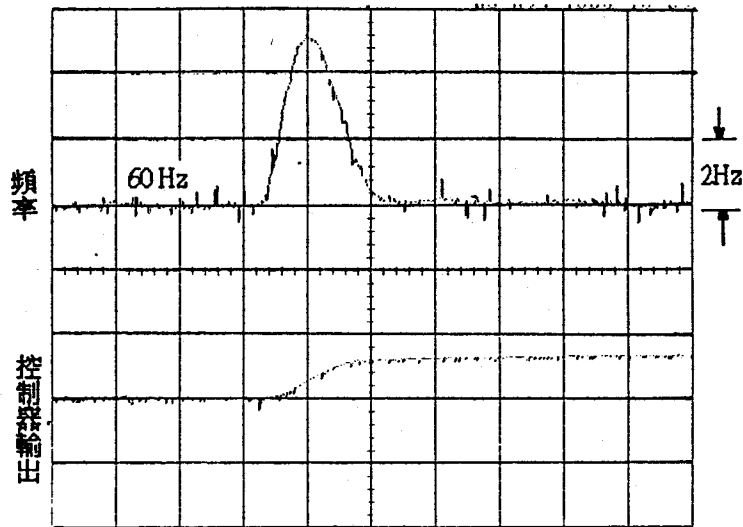
(二)、測試結果：

1. 動態制動電阻控制之效果

圖三為發電機之負載量經由重載突然切至輕載時，發電機加入動態制動電阻時，其頻率變化和控制信號之曲線。圖中顯示系統在負載切離時，頻率上升峰值達到65Hz，假始未加入任何控制，於實際的電力系統中，有可能引起如台電系統連鎖跳機之大停電事故，因此有必要加入動態制動電阻加以控制。圖三中顯示加入動態制動電阻後，系統在 2秒後即回穩定狀態，足見動態制動電阻控制之優越性。

2. 動態制動電阻控制產生之諧波

為量測動態制動電阻控制對電力系統產生之諧波，本研究測試動態制動電阻動作時，負載兩端電壓之諧波成份。圖四為控制電路之波寬調變觸發信號及動態制動電阻兩端之電壓，圖中顯示因IGBT之切換速度相當快速，故制動電阻兩端之電壓接近直流；但負載兩端



圖三 動態制動電阻之控制效果

之電壓經電力分析儀量測後，其各諧波成份如表一所示，表中顯示第三次及第五次諧波較為嚴重，其諧波因數分別為 1.47% 和 1.24%。

表一 動態制動電阻動作時負載端電壓之諧波成份

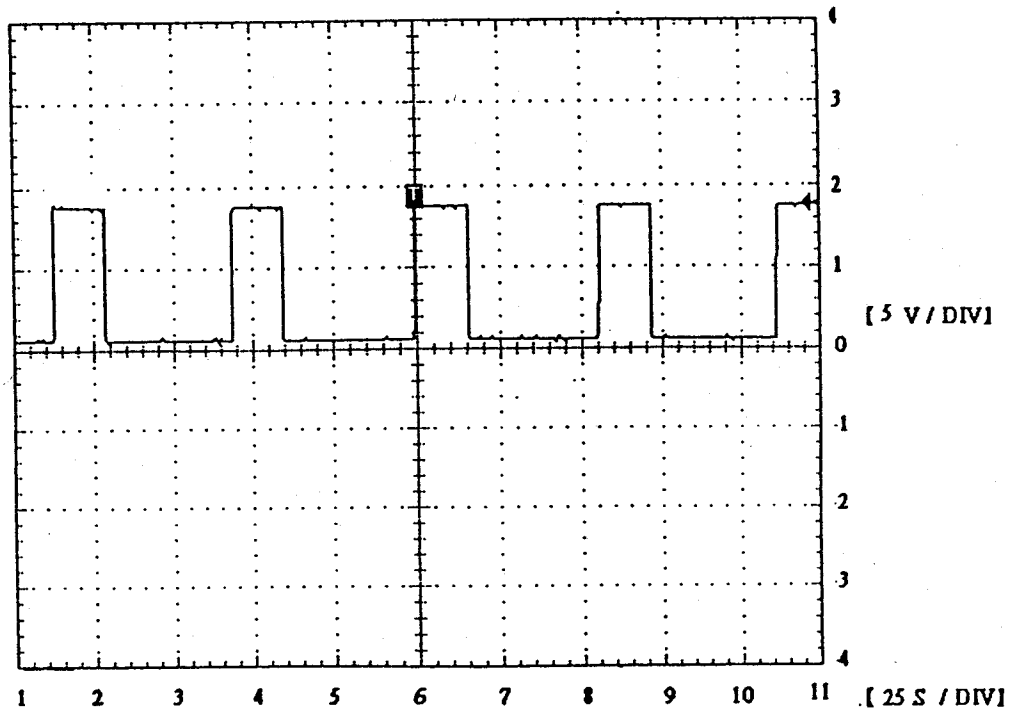
諧波成份	基本波	二次諧波	三次諧波	四次諧波	五次諧波
諧波因數(%)	100%	0.03%	1.47%	0.02%	1.24%
電壓值(V)	189.1	0.49	2.78	0.36	2.35

3. 制動電阻值對諧波之影響

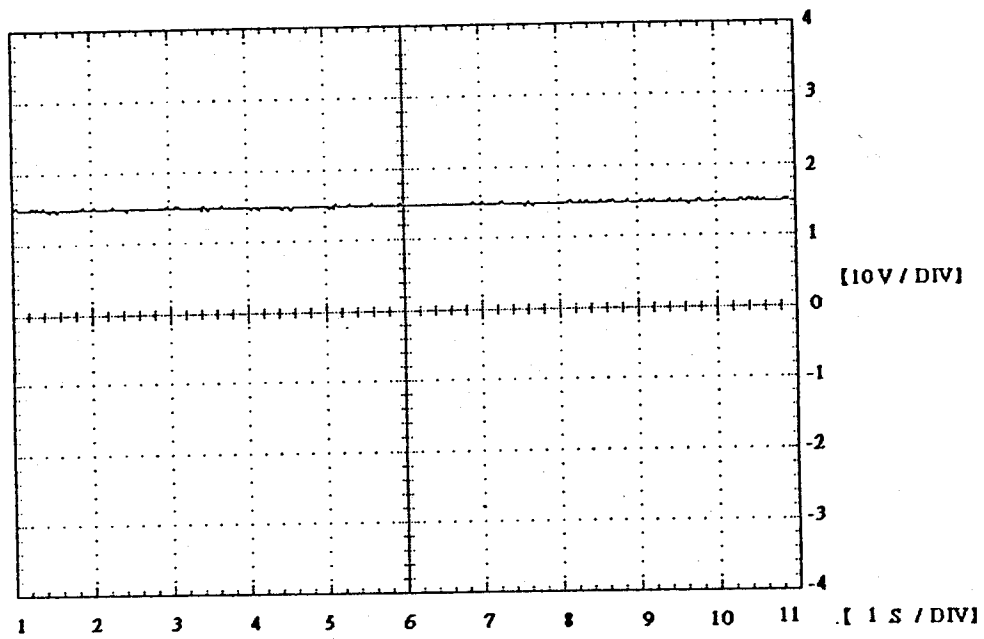
為比較增加動態制動電阻控制量時對諧波之影響，本研究將動態制動電阻之電導值增加一倍，即最大控制量增加一倍後，負載兩端各諧波成份如所示。比較表一和表二之結果，顯示最大控制量增加時，雖可降低系統回復穩定時間；但相對地，其第五次諧波量也大量增加達到11.8%。假如諧波量增加過大，將有可能影響負載正常運作。因此，在加入動態制動電阻控制時，諧波的抑制亦是一項相當重要的考量因素之一。

表二 動態制動電阻增加一倍時負載端電壓之諧波成份

諧波成份	基本波	二次諧波	三次諧波	四次諧波	五次諧波
諧波因數(%)	100%	0.05%	0.11%	0.03%	11.8%
電壓值(V)	162.5	0.09	0.19	0.05	19.17



(a) IGBT 之觸發信號



(b) 動態制動電阻兩端之電壓

圖四 動態制動電阻動作時 IGBT 之觸發信號和制動電阻兩端之電壓

(三)、測試結果討論：

由於經費問題，本研究所使用之發電機組及部份零件均為次級品。因此實驗結果較不精確，但已充份了解動態制動電阻對系統之影響，此次之實驗結果得到下列結論：

1. 動態制動電阻可有效的抑制系統振盪，使系統遭受重大擾動時，能快速回復穩定狀態
2. 動態制動電阻動作時，會造成系統之高次諧波增加，其中以第三次和第五次諧波較嚴重。
3. 動態制動電阻之最大控制量增加時，會使第五次諧波之成份大量增加，有可能會影響系統之電力品質。因此，加入動態制動控制時諧波的抑制亦是一項重要的工作。
4. 系統負載切離時，發電機頻率上升速度相當快速，約0.5秒即失去穩定，因此控制器和硬體的反應速度要夠快，方能使系統恢復穩定狀態。這正是動態制動電阻優於其它控制裝置的特點之一。

四、結 論

彈性交流輸電系統能在既有的發電和輸電設備下，提供電力系統供電之能力；而動態制動電阻之主要功能則在於提高電力系統暫態穩定度，或增加系統電力調度之安全範圍。對無法在短時間內擴增發電廠或輸電容量的電力公司而言，動態制動電阻將是一項可以考量的投資項目之一。由於國內尚無相關實測結果可供參考，希望藉由本文之提出，能達到拋磚引玉之效果，使國內專家學者或企業界投入相關設備開發和設計，則類似729全台大停電之事故或許可以避免再次發生。下列各項將是未來可投入研究主題：

- (一)、結合智慧型控制理論（如模糊控制）和微電腦技術，發展能應用於多機系統且具強健特性之控制系統。
- (二)、彈性交流輸電系統中，各種控制設備對系統電力品質之影響評估。
- (三)、動態制動電阻在考量溫升、諧波及設置成本下，最佳之結構和裝置量之研究。
- (四)、多機電力系統中，在有限裝置設備購置成本下，各種彈性交流控制設備最佳擺設位置之選定。

五、誌 謝

本文研究經費承蒙行政院國家科學委員會專題研究計畫案編號: NSC 88-2213-E-167-007支持，特此銘謝。

六、參考文獻

- [1] 王塗發，"大斷電，誰該負責？"，自由時報，第15版，Aug. 19, 1999.
- [2] Hingorani, N., (1992), "FACTS-Flexible AC Transmission System, Proceedings: FACTS Conference 1-The Future in High-Voltage Transmission," EPRI TR-100504.
- [3] Christ, N. et. al., (1992), "Advanced Series Compensation (ASC) With Thyristor Controlled Impedance," CIGRE Paper 14/37/38-05.

- [4] Croft, W. H., and Hartley, R. H., (1962), "Improving Transient Stability by Use of Dynamic Braking," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-59, pp. 17-26.
- [5] Hingorani, N. G., (1993), "Flexible AC Transmission," IEEE Spectrum, vol. 30, no. 4, pp. 40-45.
- [6] Shelton, M. L., Winkelman, P. F., (1975), "Bonneville Power Administration 1400-WM Braking Resistor," IEEE Trans. vol. PAS-94, pp. 602-609.
- [7] Huang, C. Y. et al., (1994), "The Analysis of Thyristor Controlled Series Capacitors Applying to Taipower Transmission System," Proceedings of the 15th Symp. on Electrical Power Engineering, pp. 496-501.
- [8] Edris, A. A., (1991), "Enhancement of First Swing Stability Using a High-Speed Phase Shifter," Presentation at the IEEE/PES 1991 Winter Meeting, New York.
- [9] Rahim, A. H. M. A, and Al-Sammak, A. L. J., (1991), "Optimal Switching of Dynamic Braking Resistor, Reactor or Capacitor for Transient stability of Power Systems," IEE Proc. C, 1991, vol. 138, no. 1, pp. 89-93.
- [10] Wang, Y. et al., (1992), "Variable Structure FACTS Controllers for Power System Transient Stability," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 7, pp. 307-313.
- [11] Wang, Y. et al., (1994), "Variable-Structure Braking Resistor Control in a Multimachine Power System," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 9, no. 3, pp. 1557-1562.
- [12] IEEE Committee Report, (1987), "Bibliography on the Application of Discrete Supplementary Controls to Improve Power System Stability," IEEE Trans. on Power System, vol. 2, no. 2.
- [13] Rajkumar, V. and Mohler, R. R., (1994), "Bilinear Generalized Predictive Control Using the Thyristor-Controlled Series Capacitor," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 9, no. 4, pp. 1987-1993.
- [14] Miniesy, S. and Bohn, E. V., (1971), "Optimum Network Switching in Power Systems", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 90, pp. 2118-2123.
- [15] Rao, C. S. and Nag-Sarkar, T. K., (1984), "Half Wave Thyristor Controlled Dynamic Brake to Improve Transient Stability," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 103, no. 5, pp. 1077-1083.
- [16] Rajkumar, V. et al., (1986), "A Bilinear Self-Tuning Controller for Multimachine Transient Stability," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 9, no. 3.
- [17] Taranto, G. N. and Chow, J. H., (1995), "A Robust Frequency Domain Optimization Technique for Tuning Series Compensation Damping Controllers," IEEE Trans. on Power Systems, vol.10, no. 3, pp. 1219-1225.
- [18] Chang, H. C. and Wang, M. H., (1995), "Neural Network-Based Self- Organizing Fuzzy Controller for Transient Stability of Multimachine Power Systems," IEEE Trans. on Energy Conversions, vol. 10, no. 2. pp.339-346.
- [19] IEEE Committee Report, (1968), "Computer Representation of Excitation System," IEEE Trans., vol. PAS-87, pp. 1460-1464.
- [20] Wang, M. H., (1994), "Design of a Neural Fuzzy Controller for Dynamic Braking Resistor of Power Systems," Chin-Yi Journal, vol. 12, pp. 311-190.
- [21] Chang, H. C. and Wang, M. H., (1994), "Application of a Fuzzy Logic Control Controller to Enhance the Transient Stability of Multimachine Power Systems," Journal of the Chinese Institute of Electrical Engineering, vol. 1, no. 3, pp. 169-179.