

# 閘控相移器在多機組電力系統暫態穩定度控制之應用

王孟輝 陳鴻誠 趙貴祥 郭應標 卜文正

國立勤益技術學院電機工程系

## 摘要

本論文旨在研究閘控相移器 (thyristor-controlled phase shifter, 簡稱 TCPS)在多機組電力系統暫態穩定度控制之應用,由於多機組電力系統之數學模型為高維非線性動態系統,且實際電力系統具參數不確定之特性。因此,本研究設計了一個自我組織類神經模糊控制器發展閘控相移器之控制系統,由於模糊類神經控制器具自我學習和強健之特性,符合實際多機組電力系統控制之需求。最後,本文以台電系統為模擬之對象,測試結果獲致令人滿意的控制效果。

**關鍵詞：**彈性交流輸電系統、模糊控制、類神經網路、閘控相移器、暫態穩定度。

## 一、前言

台灣的電力系統是一個獨立且長形的電力系統,由於區域經濟發展造成北部嚴重缺電,須大量依靠中南部的電力支援。1999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83%的用戶斷電,導致工商業高達上百億元以上的損失。同年921震災因中寮變電所倒塌,所造成之大停電現象顯示,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穩定度控制不良,為維持系統供電的可靠度,台電公司除在北部擴增發電廠外,南北超高壓輸電線亦列入國家重大工程。此外,如何在既有的發變電設備下,增加供電的輸電能力和穩定度、或建立彈性交流輸電系統(flexible AC transmission system, 簡稱 FACTS)[1],已經是台電公司未來電力建設的重點項目之一。

彈性交流輸電系統(FACTS)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性,以期提昇系統輸電能力和穩定度[1-6]。有關彈性交流輸電系統之研究,美國電力研究所(Electric Power Research Institute, 簡稱 EPRI)[5],自1990年起已著手為期七年的彈性交流輸電系統研究計畫,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,EPRI 預期在西元二千年以後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。

目前 FACTS 的研究重點可分為兩項[6-15],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、閘控相移器、綜合電力潮流控制和閘控同步調相電容等裝置。另一項研究重點則為控制策略探討、控制器設計及最佳擺設位置，目前已發表的文獻中大部份仍以簡單的邏輯控制策略或傳統控制理論設計控制器。這些方法僅適用於簡化模型下之系統模擬，當面臨實際多機電力系統所呈現的高維模型和參數不確定性等問題時，這些控制方法將受到極大的限制。因此，有必要發展新的控制方法及硬體架構以解決實際應用時的需求，故本文設計了一自我組織類神經模糊控制器，並將其應用於多機組電力系統之閘控相移器控制中。由於類神經模糊控制器具強健之特性[16,17]，符合實際電力系統之需求。最後，本研究以台電系統為模擬之對象，測試台電 345KV 超高壓輸電系統在北、中、南發生三相短路故障時，閘控相移器對核二和核三兩大發電廠的控制效果，模擬結果證實閘控相移器可大幅改善電力系統之暫態穩定度，對系統電壓亦具有穩定效果。

## 二、閘控相移器控制系統之設計

### 2.1 多機組電力系統數學模型

多機組電力系統的數學模型是一組相當複雜的非線性控制系統，本文在電腦模擬時，每一部發電機以四階雙軸非線性微分方程表示，激磁機若採三階模型[18]，閘控相移器控制量直接以送出之電功率表示[15]，則一部發電機組含閘控相移器之動態行為可利用下列七階微分方程表示：

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

$$\dot{\tilde{\omega}}_i = \frac{1}{M_i} (P_{mi} - P_{ei} - P_{psi}) - \frac{1}{M_T} P_{COI} \quad (2)$$

$$\dot{E}_{qi} = \frac{1}{T'_{doi}} (E_{fdi} - E'_{qi}) + \frac{I_{di}}{T'_{doi}} (X_{di} - X'_{di}) \quad (3)$$

$$\dot{E}'_{di} = -\frac{1}{T'_{qoi}} E'_{di} - \frac{1}{T'_{qoi}} (X_{qi} - X'_{qi}) I_{qi} \quad (4)$$

$$\dot{V}_{ri} = \frac{K_{ai}}{T_{ai}} V_{ei} - \frac{1}{T_{ai}} V_{ri} \quad (5)$$

$$\dot{V}_{fi} = \frac{K_{fi}}{T_{fi} T_{ei}} [V_{rli} - (S_{ei} + K_{ei}) E_{fdi}] - \frac{1}{T_{fi}} V_{fi} \quad (6)$$

$$\dot{E}_{fdi} = \frac{1}{T_{ei}} V_{rli} - \frac{E_{fdi}}{T_{ei}} (S_{ei} + K_{ei}) \quad (7)$$

for  $i=1, 2, \dots, n$

### 2.2 控制系統架構

圖一為本文所提出之閘控相移控制系統架構。整個系統之主要組件及功能說明如下：

A. 性能指標表(performance index table, 簡稱 PIT)：其主要功能是評估控制器每次的控制效果，並

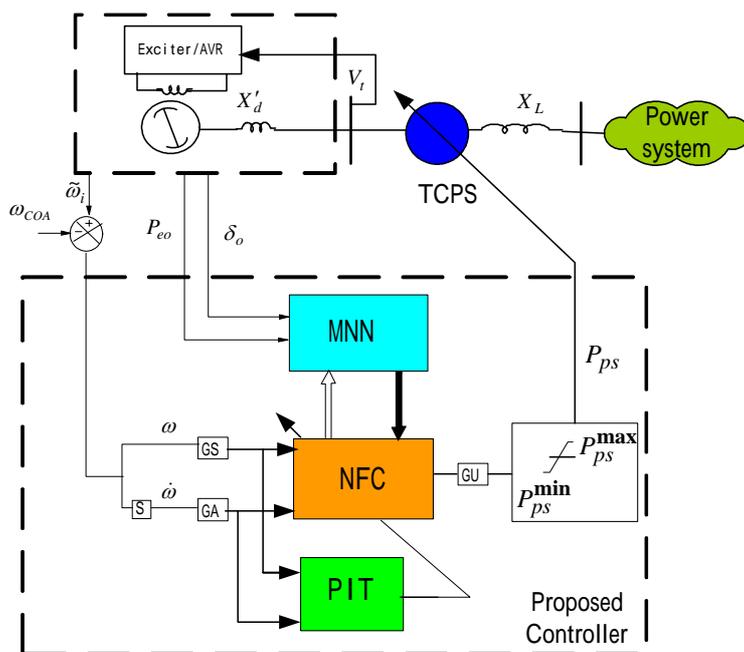
根據內存的性能指標，以模糊推理之方式送出一個調整因數，以引導類神經模糊控制器調整內部參數至理想的控制性能，其以模糊形式表示之變數中心點對照如圖四所示。性能指標表的設計是希望發電機的軌跡能延著控制切換線(switching line) 進入中心平衡點。而其他的區域則分別代表控制器應修正的控制值。

- B. 類神經模糊控制器(NFC)：是整個控制系統之核心，其內部為一以類神經網路為基礎的模糊控制器，其內部之輸入/輸出歸屬函數(membership functions)和模糊控制法則之參數，可根據性能指標表所送出之調整因數，進行調整。
- C. 多層類神經網路(MNN):其主要功能是學習不同運轉點和類神經模糊控制器最佳控制參數之關係，這些參數包括各輸入/輸出歸屬函數之中心點和寬度，以及各模糊控制法則對應之權重。當其學習完成後，即可提供任何運轉點下控制器之理想參數，使控制器具強健之特性。
- D. 輸入/輸出正規化因數: GS,GA 及 GU 的主要功能是調整性能指標表和輸入/輸出值至合理的範圍內，在本文中其值分別設為 1, 0.1 和 1。
- E. 限制器(limiter)：在實際的電力系統中，控制量通常會受到裝置容量之限制。因此，控制器之輸出須經限制器，以滿足控制量之上下限。

通常在發電機控制系統中，典型的輸入信號可採用發電機之轉子角度、速度差及加速度...等。因為暫態穩定度控制，其面臨對象屬重大擾動之系統，故擾動後，轉子角度的穩定點不易掌握。另一方面，因系統穩定時，每部發電機速度差和加速度必須為零。因此，本文中以每一部發電機之速度差和加速度差為控制器之輸入信號。在實際應用時，控制器僅須量取發電機之速度即可，而加速度則可經由下式近似計算求得：

$$\dot{\omega}(t) = (\omega(t) - \omega(t-1)) / \Delta t \tag{8}$$

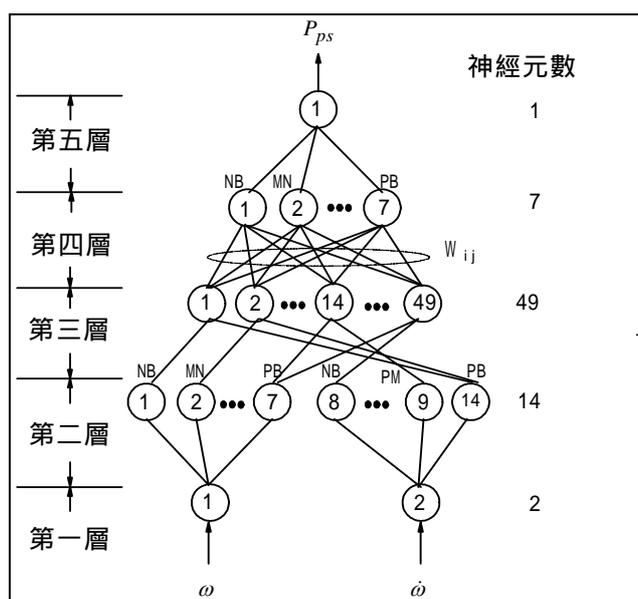
式中  $\Delta t$  為取樣間隔，典型的值為 0.01 秒。



圖一 本文提出之多機組開控相移控制系統

### 2.3 類神經模糊控制器之架構

類神經模糊控制器之基本的架構如圖二所示，和多層類神經網路相似。整個網路可區分為五層，第一和第五層分別代表輸入和輸出層，第二及第四層可視為模糊控制器的歸屬函數，第三層為模糊控制法則。由於本文中所設計的開控相移控制系統，有二個輸入信號及一個輸出信號。因此，第一層及第五層分別有二個和一個神經元，輸入及輸出的歸屬函數，均使用吊鐘型函數 (bell-shaped function)，其初始參數可依經驗事先設計。使用這種歸屬函數的優點是其外形較易調整。在本文中輸入和輸出的歸屬函數使用七個等級，其定義為：正大(PB),正中(PM),正小(PS),零(ZE),負小(NS),負中(NM),負大(NB)。因此，在第二及第四層中，分別有 14 個及 7 個神經元。第三層則構成模糊控制法則，每一個神經元表示一個控制法則，總共有 49 個神經元或控制法則構成。第三層和第四層的連接方式，是根據每一個法則的輸入條件和輸出結果而定。每一個神經元有二個固定的輸入信號(狀況)，及 7 種輸出狀況可選擇，而第四層上的權重值表示每個控制法則和輸出控制量之間的關係強度。換言之，權重值越大表示關係越密切；反之，則越不相關。故本文中所提的類神經模糊控制器可在第二及第四層中調整輸入/輸出的歸屬函數，而模糊法則可經由第四層的權重調整。每一層的功能和運算功能如下：



圖二 類神經模糊控制器之架構

A. 第一層：這一層的神經元，只是把輸入信號直接傳送到下一層，其輸入和輸出之關係為：

$$O_1^L = \omega \quad (9)$$

$$O_2^L = \dot{\omega} \quad (10)$$

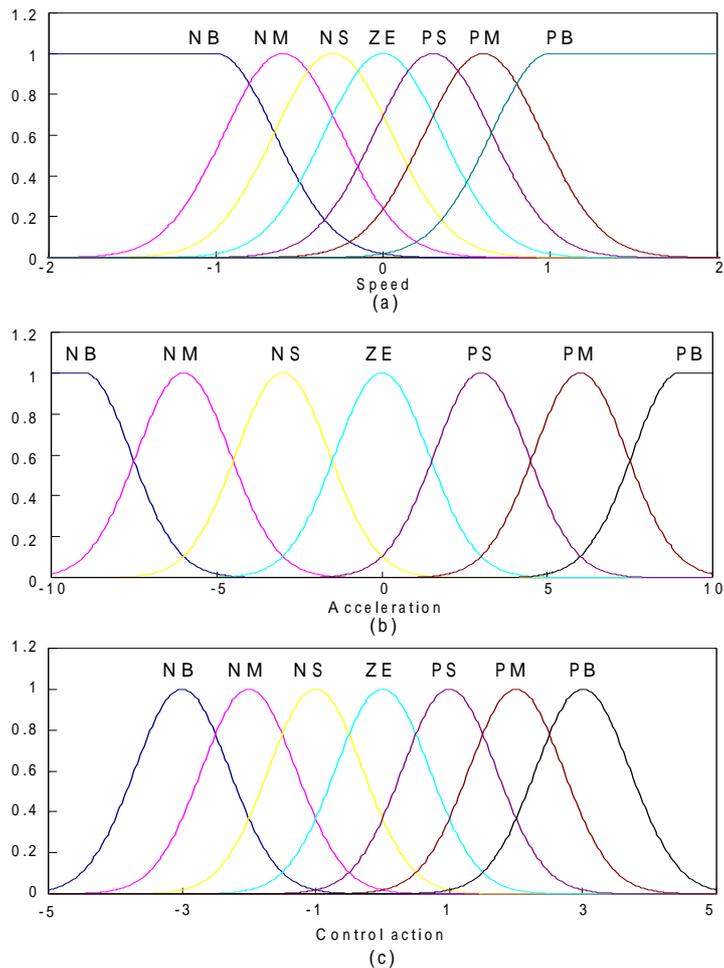
B. 第二層：本層之主要功能相當於模糊控制中之模糊化界面，每一個神經元，代表輸入變數的歸屬函數，圖三為初始設定之輸出和輸入變數歸屬函數，若使用吊鐘形函數且  $m$  和  $\sigma$  為其

中心點和寬度，則其輸入和輸出之關係為：

$$NET_i^{L2} = \begin{cases} O_i^{L1} & , \text{for } i = 1, 2, \dots, 7 \\ O_2^{L1} & , \text{for } i = 8, 9, \dots, 14 \end{cases} \quad (11)$$

$$O_i^{L2} = e^{-\left[ \frac{NET_i^{L2} - m_i^{L2}}{\sigma_i^{L2}} \right]^2} , \text{for } i = 1, 2, \dots, 14 \quad (12)$$

本層中所有的權重均固定為 1。此外，若使用其他形狀的歸屬函數，本層也可以單獨使用多層類神經網路組成所需要的歸屬函數。



圖三 初始之輸出和輸入歸屬函數

- C. 第三層：本層的主要功能是匹配適當的輸入變數，以構成所需的控制法則。每一神經元有兩個輸入信號，分別來自第二層的神經元，並決定控制法則的強度，若使用梅德尼(Mamdani)的推理方式[19]，則輸入和輸出之關係如下：

$$NET_i^{L3} = \min(O_j^{L2}, O_k^{L2}) , i = 7(j-1) + (k-7) \quad (13)$$

$$O_i^{L3} = NET_i^{L3} , \quad (14)$$

$$i = 1, 2, \dots, 49 ; j = 1, 2, \dots, 7 ; k = 8, 9, \dots, 14$$

因此本層中的權重值皆為 1。

D. **第四層**：本層的主要功能是決定每個控制法則與輸出控制量之間的強度。神經鍵的權重可依對系統的瞭解程度預先設定，本文中初始的模糊控制法則如圖四所示。各神經鍵初始權重值可依下列兩個原則設定：(1).已確定的控制法則之權重設為 1；(2).不確定的控制法則之權重先設為 0。這一層輸入和輸出之間的關係如下：

$$NET_i^{L4} = \sum_{j=1}^{49} W_{ij} O_j^{L3} \tag{15}$$

$$O_i^{L4} = \min(1, NET_i^{L4}), \text{ for } i=1,2,\dots,7. \tag{16}$$

權重  $W_{ij}$  代表第  $j$  個控制法則與第  $i$  個控制量之間的密切程度。在學習過程中，調整權重值可適當的調整控制法則。

		$\hat{\Omega}$						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
$\hat{\Omega}$	PB	1	2	3	4	5	6	7
	PM	8			PM			
	PS				PS			
	ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
	NS				NS			
	NM				NM			
	NB	43			NB			49

圖四 類神經模糊控制器初始的控制法則庫

E. **第五層**：本層的主要功能相當於模糊控制器中的解模糊化介面，它將每個推理出的模糊控制量，解模糊成實際的控制值。若採用重心法(COA)為解模糊之方法[19]，則輸入和輸出之關係如下：

$$NET_i^{L5} = \sum_{j=1}^7 m_j^{L4} \sigma_j^{L4} O_j^{L4} \tag{17}$$

$$O_i^{L5} = \frac{NET_i^{L5}}{\sum_{j=1}^7 \sigma_j^{L4} O_j^{L4}} \tag{18}$$

式中  $m$  和  $\sigma$  為輸出歸屬函數的中心點和寬度，而本層之權重可設為  $m_j^{L4} \sigma_j^{L4}$ 。

## 2.4 自我組織學習法則之推導

類神經模糊控制器之初始架構完成後，接著進行自我組織學習。在每個運轉點下，類神經模糊控制器可利用自我組織學習法則調整內部的歸屬函數和控制法則至最佳組合[17]。控制器的學習方式是依據圖五的性能指標表引導。透過性能指標表的引導，控制器每一次的控制動作均可得到適當的修正。例如，在第 k 次的控制中，控制器的修正量可用下式求得：

$$\Delta P_{ps}(k) = \lambda \cdot PI[\omega(k), \dot{\omega}(k)] \tag{19}$$

		$\omega'$						
		-3.	-2.	-1.	0.	1.	2.	3.
$\dot{\omega}'$	0.6	0.	0.3	0.3	0.6	0.6	1.	1.
	0.4	-0.3	0.	0.3	0.3	0.6	1.	1.
	0.2	-0.3	-0.3	0.	0.3	0.3	0.6	0.6
	0.	-0.6	-0.3	-0.3	0.	0.3	0.3	0.6
	-0.2	-0.6	-0.6	-0.3	-0.3	0.	0.3	0.3
	-0.4	-1.	-1.	-0.6	-0.3	-0.3	0.	0.3
	-0.6	-1.	-1.	-0.6	-0.6	-0.3	-0.3	0.

圖五 模糊性能指標對照表

式中  $PI[i,j]$  表示由性能指標表中計算的輸出值， $\lambda$  表示修正比例常數， $\lambda$  的數值會影響學習的效果，通常若設太大，控制系統的學習效果會振盪；相反地，若選的太小會使學習時間增長。在本文的研究中， $\lambda$  選 0.005 可得到相當好的學習效果。利用 (20) 式則類神經模糊控制器希望的控制量為：

$$P_{ps}^d(k) = P_{ps}(k) + \Delta P_{ps}(k) \tag{20}$$

當想要的控制量得到後，整個學習的方式，就可利用誤差逆傳遞學習法則的觀念，調整類神經模糊控制器內部的歸屬函數及控制法則之權重。同理其能量函數或誤差函數，亦可定義為：

$$E = \frac{1}{2} (P_{ps}^d(k) - P_{ps}(k))^2 \tag{21}$$

由 (20) 和 (21) 式得知，若能在學習過程中把能量函數的值降低，將可引導控制器的參數延著想要的性能方向調整。因此，整個學習的方法和誤差逆傳遞學習法則的精神是一致的。類神經模糊控制器內部參數的調整可由下面的通式表示：

$$X_i(K+1) = X_i(k) + \eta \left( -\frac{\partial E}{\partial X_i} \right) + \alpha \Delta X_i(k) \quad (22)$$

式中  $X_i$  為第  $i$  個調整的參數， $\eta$  和  $\alpha$  分別為學習率(learning rate)和慣量項(momentum term)的增益。依本研究之經驗其值分別為 0.1 和 0.8 可得相當好的學習效果。每一層中每個神經元之誤差信號  $\delta_i^l$  計算如下：

$$\delta_i^{L_i}(k) = -\frac{\partial E}{\partial NET_i^{L_i}} \quad (23)$$

利用(22) 和 (23)式，則每一層之參數修正方式推導如下

**A.第五層：** 輸出層誤差信號之計算如下：

$$\delta_1^{L5} = (P_{ps}^d(k) - P_{ps}(k)) \quad (24)$$

$$\delta_1^{L5} = (d(k) - \theta(k)) \quad (25)$$

**B.第四層：**

(1).每一神經元之誤差信號

$$\delta_i^{L4} = \delta_i^{L5} \frac{m_i^{L4} \sigma_i^{L4} (\sum_{j=1}^7 \sigma_j^{L4} O_j^{L4}) - \sigma_i^{L4} (\sum_{j=1}^7 m_j^{L4} \sigma_j^{L4} O_j^{L4})}{(\sum_{j=1}^7 \sigma_j^{L4} O_j^{L4})^2} \quad (26)$$

for  $i=1,2,\dots,7$

(2).歸屬函數之中心點和寬度調整如下：

$$m_i^{L4}(k+1) = m_i^{L4}(k) + \eta \delta_i^{L5} \frac{\sigma_i^{L4} O_i^{L4}}{\sum_{j=1}^7 \sigma_j^{L4} O_j^{L4}} + \alpha \Delta m_i^{L4}(k) \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \sigma_i^{L4}(k+1) &= \sigma_i^{L4}(k) \\ &+ \eta \delta_i^{L5} \frac{m_i^{L4} O_i^{L4} (\sum_{j=1}^7 \sigma_j^{L4} O_j^{L4}) - \sigma_i^{L4} (\sum_{j=1}^7 m_j^{L4} \sigma_j^{L4} O_j^{L4})}{(\sum_{j=1}^7 \sigma_j^{L4} O_j^{L4})^2} \\ &+ \alpha \Delta \sigma_i^{L4}(k) \end{aligned} \quad (28)$$

for  $i=1,2\dots 7$

(3)本層中之權重調整如下:

$$W_{ij}(k+1) = W_{ij}(k) + \eta \delta_i^{L4} O_j^{L3} + \alpha \Delta W_{ij}(k) \quad (29)$$

for  $i=1,2,\dots,7; j=1,2,\dots,49$

**C.第三層：** 本層無需調整參數，僅需後送誤差訊號，其計算如下：

$$\delta_i^{L3} = \sum_{j=1}^7 W_{ij} \delta_j^{L4} \quad (30)$$

**D.第二層：** 輸入歸屬函數之中心點和寬度調整如下:

$$m_i^{L2}(k+1) = m_i^{L2}(k) - \eta \frac{\partial E}{\partial O_i^{L2}} O_i^{L2} \frac{2(O_j^{L1} - m_i^{L2})}{(\sigma_i^{L2})^2} + \alpha \Delta m_i^{L2}(k) \quad (31)$$

$$\sigma_i^{L2}(k+1) = \sigma_i^{L2}(k) - \eta \frac{\partial E}{\partial O_i^{L2}} O_i^{L2} \frac{2(O_j^{L1} - m_i^{L2})^2}{(\sigma_i^{L2})^3} + \alpha \Delta \sigma_i^{L2}(k) \quad (32)$$

for  $i=1,2,\dots,7; j=1,2$

**E. 第一層：** 本層僅負責傳送信號，其權重在學習中無需調整。

由上述之推導，則整個控制系統的學習法則可依下列步驟進行:

- 步驟 1: 電力系統可能的運轉範圍之功率以 0.5(pu)為間隔分成數組訓練資料,
- 步驟 2: 從最低的運轉點開始取  $P_{eo}$ ,
- 步驟 3: 計算相對之系統穩定平衡點,
- 步驟 4: 設計如圖五之初始模糊控制法則及控制參數,
- 步驟 5: 依據本文所提之自我學習法則調整控制器的參數值,
- 步驟 6: 若訓練後之性能指標已低於預設值或收斂, 則至步驟 7; 否則繼續訓練,
- 步驟 7: 儲存訓練後之最佳控制參數,
- 步驟 8: 設  $P_{eo} = P_{eo} + 0.05$  (pu),
- 步驟 9: 若  $P_{eo}$  大於最大運轉範圍至步驟 10; 否則至步驟 3,
- 步驟 10: 利用各  $P_{eo}, \delta_o$  及所對應之最佳控制參數組成訓練矩陣, 利用圖二中之多層類神經網路學習其關係,
- 步驟 11: 若多層類神經網路學習已收斂, 則訓練結束, 控制器可直接對系統進行控制; 否則至步驟 10 繼續訓練。

### 三、模擬結果與討論

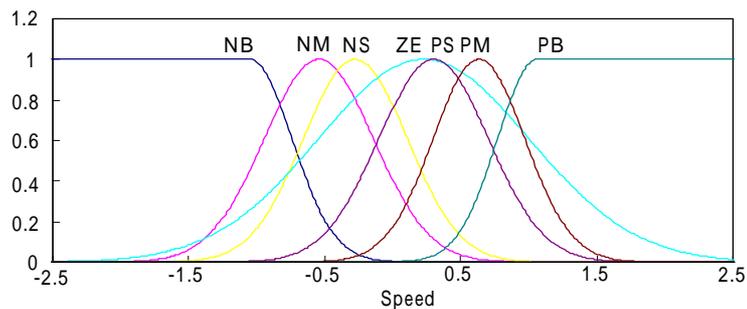
本研究以台電系統1986年8月間尖峰負載時之數據，當時整個系統由191個匯流排，34部發電機和234條傳輸線構成。每部發電機之控制模型以七階非線性狀態方程表示。模擬故障狀況為三相短路發生於北中南345kV匯流排上，測試核三和核二發電機組在不同故障時間下之動態響應。圖六為本文所提類神經模糊控制器經學習十次後之輸入和輸出變數之歸屬函數，圖中顯示控制器具自我學習之能力，並可將控制系統參數調整至性能較佳之狀態。為驗證閘控相移器控制對台電系統之控制效果，本研究模擬核三廠裝設本文所提之閘控相移控制器，並分別在北、中、南345kV匯流排發生不同故障狀況，核三廠在未控制(NC)和受控制(PC)時，發電機組轉速和端電壓之動態響應如圖七至十二，圖中顯示本文所提之控制系統，可在系統遭受不同故障狀況時，能維持系統之暫態穩定度，同時對發電機組端電壓亦具有穩定效果。圖十三和十四為中部#30匯流排發生三相短路0.1秒，核二(G2)和核三(G32)廠發電機組在未控制(NC)和受控制(PC)時，發電機組轉速和端電壓之動態響應，圖中顯示本控制器具強健之特性，能在不同的故障狀況下，仍能使系統快速穩定。模擬結果亦證實，台電系統發生故障時，若南北兩大發電廠裝上閘控相移器，可促使南北頻率快速回復同步，可避免系統崩潰，同時可讓發電機組之端電壓快速穩定。

### 四、結論

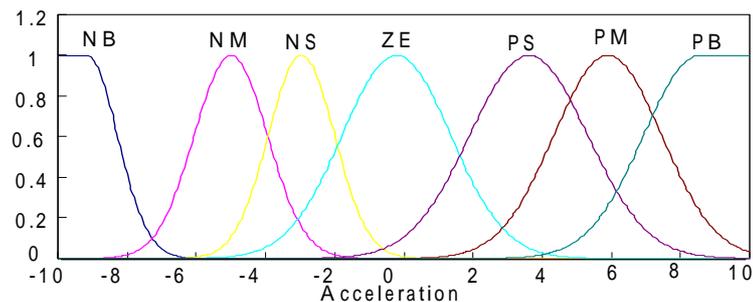
彈性交流輸電系統能在既有的發電和輸電設備下，提高電力系統供電之能力；而閘控相移器之主要功能是快速調整送電和受電兩端之相位，達到調整兩端功率潮流之目的，進而增進系統之穩定度，達到增加系統調度邊限之功效。對於短時間內無法擴增發電廠或輸電容量的電力公司而言，閘控相移器是一項可以考量的投資項目之一。另外，本文所設計之閘控相移控制系統，經由台電系統之模擬結果證實，可在不同故障狀況下，均能使系統之頻率和電壓快速回復穩定狀態，深具實用價值。

### 五、誌謝

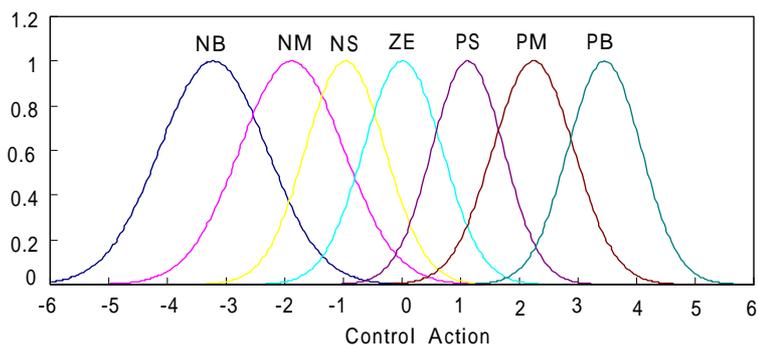
本研究承蒙行政院國家科學委員會經費贊助(專題研究計畫編號: NSC 90-2218-E-167-005),特此誌謝。



(a)

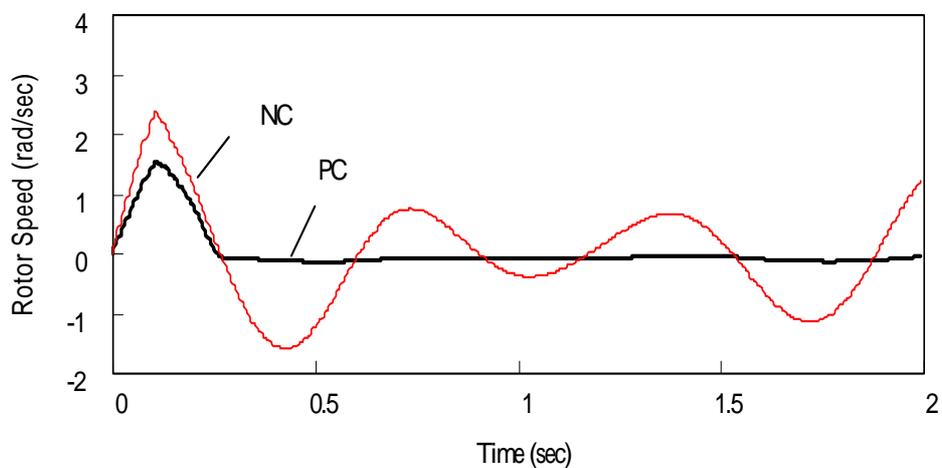


(b)

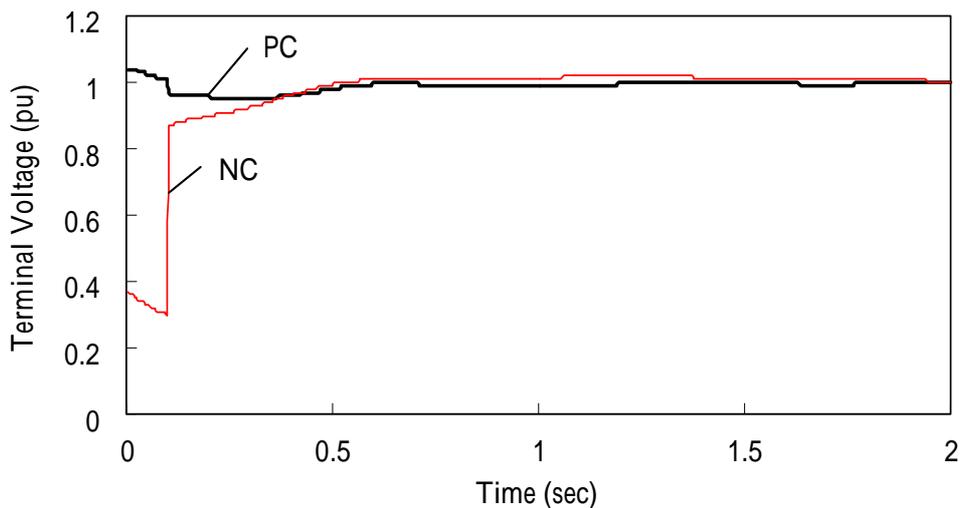


(c)

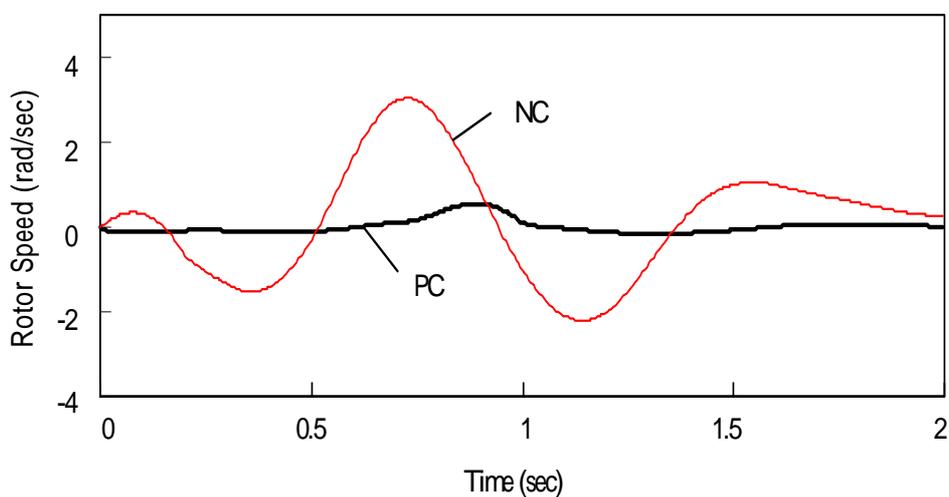
圖六 類神經模糊控制器經學習十次後之輸入和輸出變數之歸屬函數



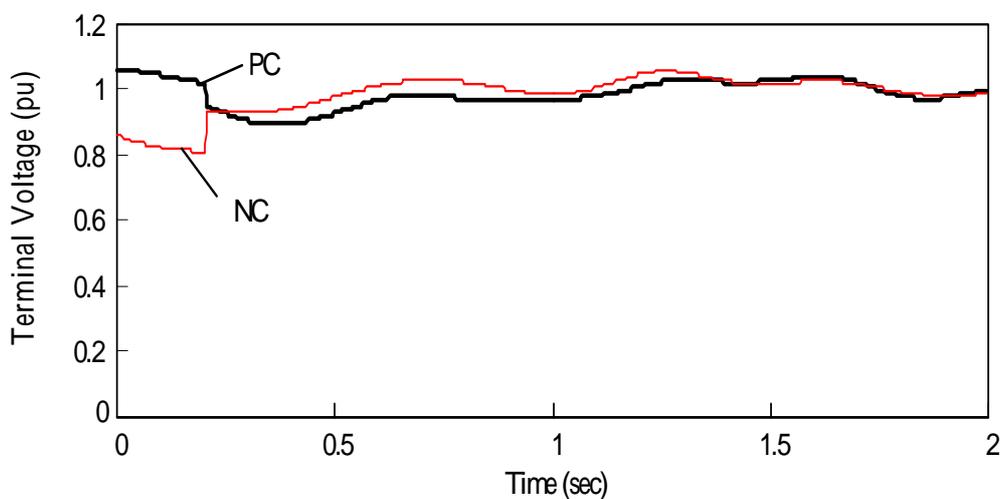
圖七 南部#22 匯流排故障 0.1 秒時核三廠發電機組轉速之動態響應



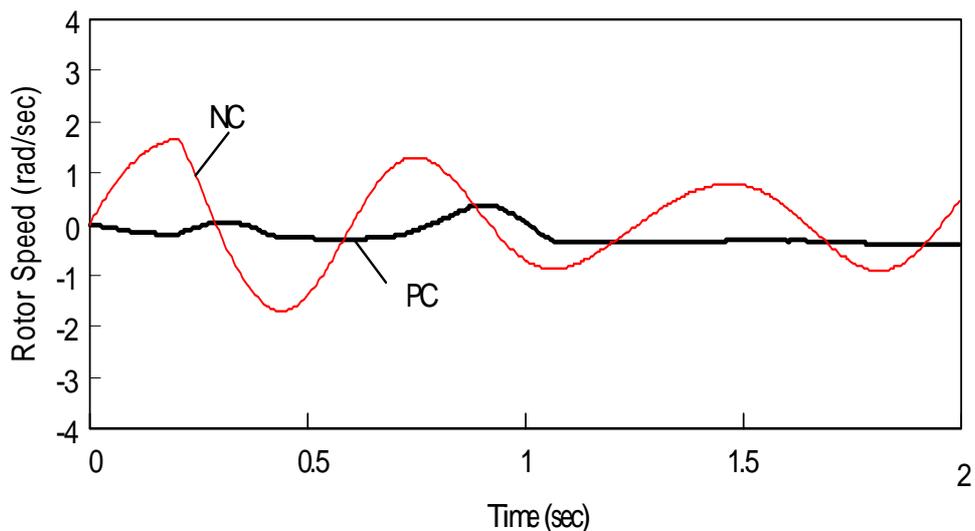
圖八 南部#22 匯流排故障 0.1 秒時核三廠發電機組端電壓之動態響應



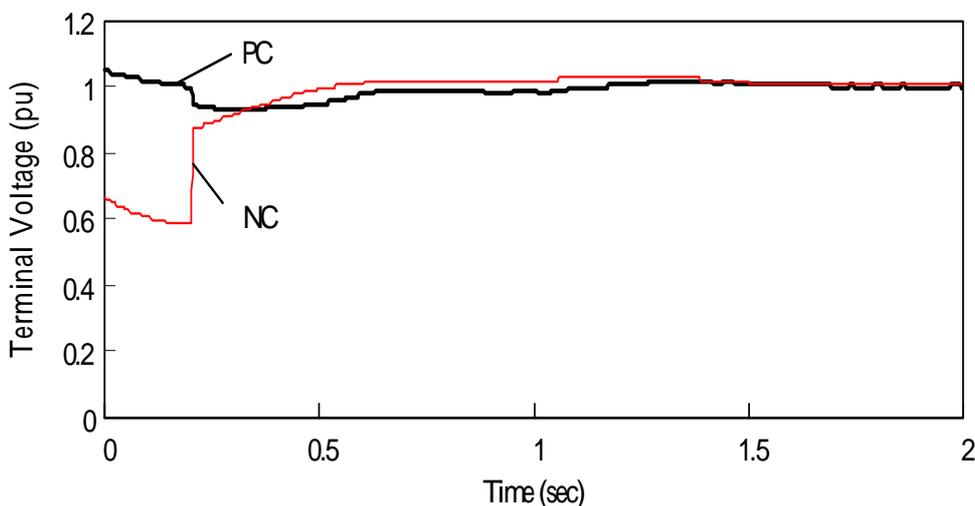
圖九 北部#26 匯流排故障 0.2 秒時核三廠發電機組轉速之動態響應



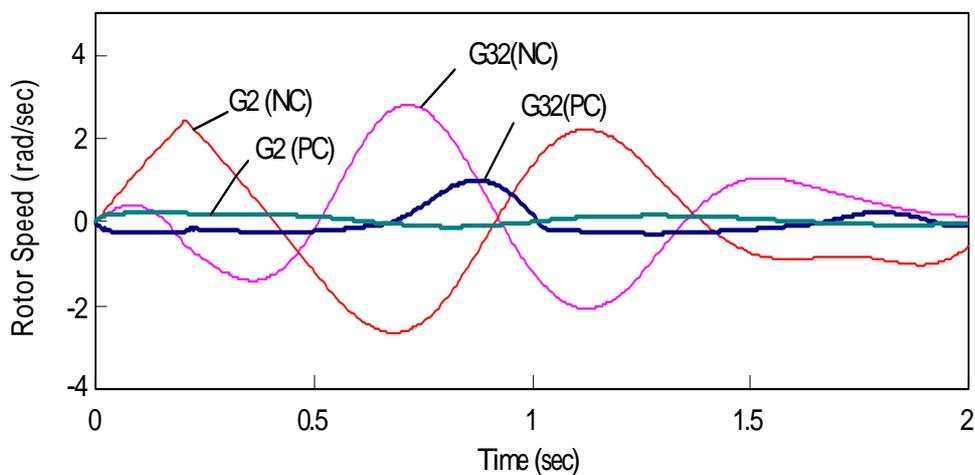
圖十 北部#26 匯流排故障 0.2 秒時核三廠發電機組端電壓之動態響應



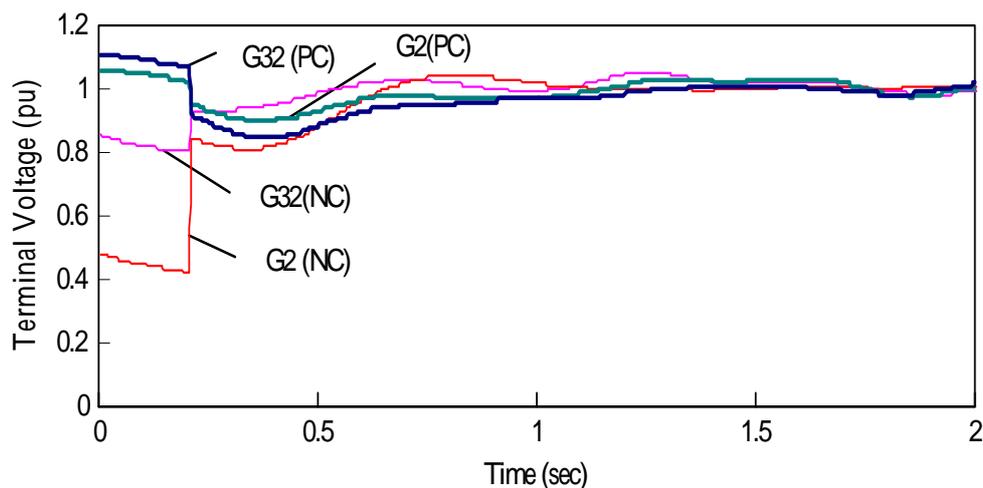
圖十一 中部#53-54 匯流排故障 0.2 秒時核三廠發電機組轉速之動態響應



圖十二 中部#53-54匯流排故障0.2秒時核三廠發電機組轉速之動態響應



圖十三 中部#30 匯流排故障 0.1 秒時核二和核三廠發電機組轉速之動態響應



圖十四 中部#30 匯流排故障 0.1 秒時核二和核三廠發電機組端電壓之動態響應

## 六、參考文獻

- [1] N. G. Hingorani, "High Power Electronics and Flexible AC Transmission Systems," IEEE Power Engineering Review, pp. 3-4, July 1998.
- [2] C. C. Liu, J. Jung, G. T. Heydt, V. Vittal, and A. G. Phadke, "The Strategic Power Infrastructure Defense (SPID) System," IEEE Control Systems Magazine, pp. 40-52, August 2000.
- [3] D. W. Park, "Impact of New Technology on the Korean Electricity Industry," IEEE Power Engineering Review, Vol. 21, No. 7, pp. 15-18, July 2001.
- [4] T. Hayashi, "Power System Growth and Use of New Technologies in Japan," IEEE Power Engineering Review, Vol. 21, No. 7, pp. 12-14, July 2001.
- [5] D. Maratukulam, (editor), FACTS Conference I-The Future in High-Voltage Transmission, Proc. TR-100504, EPRI, March, 1992.
- [6] Z. T. Faur and C. A. Canizares, "Effects of FACTS Devices on System Load Stability," Proc. North American Power Symposium, Bozeman, Montana, pp. 520-524, October 1995.
- [7] E.V. Larsen, J. J. Sanchez-gaseca, and J.H. Chow, "Concept for Design of FACTS Controller to Damp Power System Swing," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 10, No. 2, pp. 948-956, 1995.
- [8] A. H. M. A. Rahim and A. L. J. Al-Sammak, "Optimal Switching of Dynamic Braking Resistor, Reactor or Capacitor for Transient Stability of Power Systems," IEE Proc. C, Vol. 138, No. 1, pp. 89-93, 1991.
- [9] Abdel-Aty Edris, "Enhancement of First Swing Stability Using a High-Speed Phase Shifter," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, No. 3, pp. 1113-1118, 1991.
- [10] S. A. Nirenberg, D. A. Mciunis, and K. D. Sparks, "Fast Acting Load Shedding," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 2, pp. 873-877, 1992.

- [11] D. L. Lubkemen and G. T. Heydt, "The Application of Dynamic Programming in a Discrete Supplementary Control for Transient Enhancement of Multimachine Power Systems," IEEE Trans. on Power Apparatus and systems, Vol. 104, No. 9, pp. 2342-2348, 1985.
- [12] H. F. Wang, "Selection of Robust Installing Location and Feedback Signals of FACTS- based Stabilizers in Multi-machine Power Systems," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 14, No. 2, pp. 569-574, May 1999.
- [13] Y. Wang, R. R. Mohler, R. Spee, and W. Mittelstat, "Variable-Structure FACTS Controllers for Power System Transient Stability," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 1, pp. 307-313, 1992.
- [14] X. R. Chen, N. C. P. Waththa, U. D., Annzkage, and C. S. Kumble, "Output Feedback TCSC Controllers to Improve Damping of Meshed Multi-Machine Power Systems," IEE Proc., Gener. Transm. Distrib., Vol.144, No. 3, 1997.
- [15] Y. Mitani, T. Uranaka, K. Tsuji, "Power System Stabilization by Superconducting Magnetic Energy storage with Solid-State Phase Shifter," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, No. 3, Aug. 1995.
- [16] C. T. Lin and C. S. George Lee, "Neural-Network Based Fuzzy Logic Control and Decision System," IEEE Trans. on Computers, Vol. 40, No.12, pp. 1320-1336, 1991.
- [17] H. C. Chang and M. H. Wang, "Neural Network-Based Self-Organizing Fuzzy Controller for Transient Stability of Multimachine Power Systems," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 10, No. 2, pp. 339-346, June 1995.
- [18] IEEE Committee Report, "Computer Representation of Excitation System," IEEE Trans. on Power Apparatus and systems, Vol. 87, pp. 1460-1464, 1968.
- [19] T. J. Ross, "Fuzzy Logic with Engineering Applications," McGraw-Hill, Inc., 2000.

