

電力系統負載頻率模糊控制器之設計

趙貴祥

國立勤益工商專電機科

摘要

本文旨在提出一電力系統負載頻率之模糊控制器的設計方法。本方法在設計模糊控制器(Fuzzy Controller)時，只需要受控體之輸出參數，不須將受控體之模式從事數學推導，而是應用對受控體之經驗定義一些直覺的語意式控到法則而完成。由於設計上不須用到受控體之模式控，所以設計之控制器簡單方便且直接，而且允許系統之不確定性及參數變動，故具有某種程度之適應性。將所設計之模糊控制器應用到單區域電力系統負載頻率控制，由電腦模擬的結果顯示其有良好的控制性能，而且其控制性能受到系統參數變動之影響不大。尤其當考慮電力系統發電機之發電率限制(Generation Rate Constraint)GRC時，亦可達到同樣的效果。

關鍵詞：負載頻率控制，模糊控制器，發電率限制(GRC)

一、前言

負載頻率控制(LFC)或稱自動發電控制(AGC)在電力系統運轉及控制上是很重要的課題。爲了達到較佳之運轉性能，過去有很多的控制法則被提出。由於電力系統各組件之非線性特性，一些在工作點附近作線性化之線性模型被採用來作控制器之設計[1-3]。然而由於負載本身變動之特性，可能使電力系統之工作點變化很大。結果，在某工作點下所設計之最佳控制器，在其它工作點下則不再適用。基於此，有許多學者提出可變結構(Variable-structure)及強健控制(Robust Control)[4,5]，使控制器受系統參數變動影響降低。然而，這些方法需要回授系統之狀態，而通常有些狀態是無法取得的。除此之外，近幾年來各種適應控制(Adaptive Control)技術亦被提出來解決大參數變動的問題[6-13]。但其可能需要作線上識別而對參數作調整，所以實際應用在自動發電控制上是相當困難的。

在本論文中，提出一模糊控制器作電力系統之負載頻率控制，此模糊控制器之設計只需受控電力系統的輸出，而不需作線上即時參數識別或電力系統之其它狀態變數的回授。而模糊控制器一般具有兩個特性：(1)它的控制法則是建立在對受控體(Plant)之直覺及經驗知識上；(2)它擁有適應之能力。爲了能將對受控體所了解之經驗變成語言控制法則，首先須對受控電力系統作動態信號分析，再設計模糊控制器。由電腦模擬結果，來驗證所提之模糊控制器能達到良好之控制性能，即使在電力系統參數變動及考慮發電率限制下，亦有同樣的效果。

二、系統模式描述

有發電率限制下線性化的單區域電力系統之方塊圖如圖1所示。其動態方程式可寫成如下

[5]:

$$\dot{\Delta f(t)} = -\frac{1}{T_p}\Delta f(t) + \frac{K_p}{T_p}\Delta P_g(t) - \frac{K_p}{T_p}\Delta P_d(t) \quad (1)$$

$$\dot{\Delta P_g(t)} = -\frac{1}{T_t}\Delta P_g(t) + \frac{1}{T_t}t\Delta X_g(t) \quad (2)$$

$$\dot{\Delta X_g(t)} = -\frac{1}{RT_g}\Delta f(t) - \frac{1}{T_g}\Delta X_g(t) - \frac{1}{T_g}\Delta E(t) + \frac{1}{T_g}U(t) \quad (3)$$

$$\dot{\Delta E(t)} = Ke\Delta f(t) \quad (4)$$

其中

$\Delta f(t)$: 頻率偏移增量(Hz);

$\Delta P_g(t)$: 發電機輸出增量(P.U. MW);

$\Delta X_g(t)$: 調速機(Governor)閥位置增量(P.U. MW);

$\Delta E(t)$: 積分控制之增量;

$\Delta P_d(t)$: 負載增量(P.U. MW);

T_g : 調速機時間常數(S);

T_t : 渦輪機時間常數(S);

T_p : 電力系統時間常數(S);

K_p : 電力系統增益;

R : 調整常數(Hz-P.U./MW)

(1)~(4)式亦可寫成

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) + F\Delta P_d(t) \quad (5)$$

$$y(t) = \Delta f(t) = CX(t) \quad (6)$$

其中

$$X(t) = [\Delta f(t), \Delta P_g(t), \Delta X_g(t), \Delta E(t)]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} -1/T_p & K_p/T_p & 0 & 0 \\ 0 & -1/T_t & 1/T_t & 0 \\ -1/RT_g & 0 & -1/T_g & -1/T_g \\ Ke & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = [0, 0, 1/T_g, 0]^T$$

$$F = [-K_p/T_p, 0, 0, 0]^T$$

$$C = [1, 0, 0, 0]$$

三、所提之模糊控制器

與傳統之控制器不同的是模糊控制器之設計，不須將受控體之模式從事數學推導，而是應用對受控系統之經驗，定義一些直覺的語意式控制法則而完成。由於設計上不需用到受控體之模式，所以方便且直接，又具有某種程度之適應性。在過去數年間，許多型式之模糊控制器已經廣泛被開發並應用於各種不同場合。通常一高性能之電力系統負載頻率控制器之要求為：(1)由於負載步級增加，所造成之頻率最大下降值及其回復時間，必須儘可能維持最小；(2)負載調整響應之穩態誤差為零；(3)控制性能受系統參數變動之影響必須小。欲達到以上所述效果，本文提出如圖2所示之控制架構。為了讓輸出頻率偏離最小，選擇一頻率偏離量為零之參考模式(Reference Model)，讓實際輸出之頻率偏離量和所選之參考模式間的誤差去驅動模糊控制器，圖2中與模糊控制器並行加上積分器的目的是為了使穩態誤差為零。

3.1 動態信號分析(Dynamic Signal Analysis)

在設計模糊控制器之前，建立一些有關受控體之知識庫及經驗是相當重要的[14,15]。為了達到這個目的，首先就系統之輸出頻率增量響應作動態分析。本控制器所希望之輸出頻率偏離量的步級負載響應及其參考模式如圖3所示。在圖3中誤差量 e 及誤差變化量 Δe 定義成：

$$e(K) = \Delta f^*(K) - \Delta f(K) \quad (7)$$

$$\Delta e(K) = e(K) - e(K-1) \quad (8)$$

其中

$\Delta f^*(K)$ = 在第 K 個取樣時間參考模式的值；

$\Delta f(K)$ = 在第 K 個取樣時間系統輸出頻率偏離量的值；

$e(K)$ = 在第 K 個取樣時間信號的誤差值；

$\Delta e(K)$ = 在第 K 個取樣時間信號的誤差變化值；

另外，在圖3中所標示之

$c_1, c_2, c_3, \dots, c_7$ = 參考之交接點

$m_1, m_2, m_3, \dots, m_6$ = 參考之極點

$A_1, A_2, A_3, \dots, A_{12}$ = 參考區域

為了分析方便，每一區域中之 e 和 Δe 的極性亦標示在圖中。由此吾人觀察到這些點及區域有底下之性質：

$$c_1: (e < 0 \rightarrow e > 0) \text{ 且 } \Delta e > > > 0; \quad c_4: (e > 0 \rightarrow e < 0) \text{ 且 } \Delta e < < < 0$$

$$c_2: (e > 0 \rightarrow e < 0) \text{ 且 } \Delta e < < < 0; \quad c_5: (e < 0 \rightarrow e > 0) \text{ 且 } \Delta e > 0$$

$$c_3: (e < 0 \rightarrow e > 0) \text{ 且 } \Delta e > > 0; \quad c_6: (e > 0 \rightarrow e < 0) \text{ 且 } \Delta e < 0$$

$$m_1: \Delta e \approx 0 \text{ 且 } e > > > 0; \quad m_2: \Delta e \approx 0 \text{ 且 } e < < < 0$$

$$m_3: \Delta e \approx 0 \text{ 且 } e > > 0; \quad m_4: \Delta e \approx 0 \text{ 且 } e < < 0$$

$$m_5: \Delta e \approx 0 \text{ 且 } e > 0; \quad m_6: \Delta e \approx 0 \text{ 且 } e < 0 \quad (9)$$

區域 A_1, A_5, A_9 : $e = "+"$ 且 $\Delta e = "+"$ ，誤差是正的，且在加大

區域 A_2, A_6, A_{10} : $e = "+"$ 且 $\Delta e = "-"$ ，誤差是正的，且在減小

區域 A_3, A_7, A_{11} : $e = "-"$ 且 $\Delta e = "-"$ ，誤差是負的，且在加大

區域 A_4, A_8, A_{12} : $e = "-"$ 且 $\Delta e = "+"$ ，誤差是負的，且在減小

(10)

由(9)，(10)式中所描述各區域之 e 及 Δe 的行為，綜合表示於表1所示之狀態表中，以便一目瞭然。表中口語化模糊變數集合之定義如下：

{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB}

其中 NB: Negative Big; NB: Negative Medium; NS: Negative Small; ZE: Zero

PB: Positive Big; PM: Positive Medium; PS: Positive Small

3.2 口語化之控制法則

根據由動態分析所得表1中 e 及 Δe 之行為，可容易且直接地定義出模糊口語化控制法則，如表2所示。舉其中第2列第4行法則說明如下：

If $e(K)$ is ZE and $\Delta e(K)$ is NB Then $CI(K)$ is NM (11)

(11)式口語化控制法則之涵意為，當負載頻率偏移量誤差為零，且其誤差變化量為NB時，則此時控制力輸入 CI 應該為NM，則可得較佳之負載頻率偏移量調整特性。

3.3 歸屬函數(Membership Function)及決策表(Decision Lookup Table)

常用之歸屬函數通常有鐘形，梯形及三角形等形狀，一般之選用均依設計者之喜好而定，難有一定準則。本論文採用如圖4所示之梯形歸屬函數，其可用數學式表示成：

$$NB: f = \begin{cases} 0 & 6 \geq x > -4 \\ -2/3(x+5.5)+1 & -4 \geq x > -5.5 \\ 1 & -5.5 \geq x > -6 \end{cases}$$

$$NM: f = \begin{cases} 0 & 6 \geq x > -2 \\ -2/3(x+3.5)+1 & -2 \geq x > -3.5 \\ 1 & -3.5 \geq x > -4.5 \\ 2/3(x+4.5)+1 & -4.5 \geq x > -6 \end{cases}$$

$$NS: f = \begin{cases} 0 & -6 \geq x > 0 \\ -2/3(x+1.5)+1 & 0 \geq x > -1.5 \\ 1 & -1.5 \geq x > -2.5 \\ 2/3(x+2.5)+1 & -2.5 \geq x > -4 \\ 0 & -4 \geq x > -6 \end{cases}$$

$$ZE: f = \begin{cases} 0 & 6 \geq x > 2 \\ -2/3(x-0.5)+1 & 2 \geq x > 0.5 \\ 1 & 0.5 \geq x > -0.5 \\ 2/3(x+0.5)+1 & -0.5 \geq x > -2 \\ 0 & -2 \geq x > -6 \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 \text{PS: } f = & \begin{cases} 0 & 6 \geq x > 4 \\ -2/3(x-2.5)+1 & 4 \geq x > 2.5 \\ 1 & -1.5 \geq x > -2.5 \\ 2/3(x-1.5)+1 & 2.5 \geq x > 1.5 \\ 0 & 1.5 \geq x > 0 \end{cases} \\
 \text{PM: } f = & \begin{cases} -2/3(x-4.5)+1 & 6 \geq x > 4.5 \\ 1 & 4.5 \geq x > 3.5 \\ 2/3(x-3.5)+1 & 3.5 \geq x > 2 \\ 0 & 2 \geq x > -6 \end{cases} \\
 \text{PB: } f = & \begin{cases} 1 & 6 \geq x > 5.5 \\ -2/3(x-5.5)+1 & 5.5 \geq x > 4 \\ 0 & 4 \geq x > -6 \end{cases} \quad (12)
 \end{aligned}$$

由表2所定之口語化控制法則及圖4之歸屬函數，依據 e 及 Δe 各量化值，利用重心法(Center of Gravity)可合成模糊控制器如表3所示之決策表。

3.4 模糊控制器之設計

根據上述方法所設計之電力系統負載頻率模糊控制器之方塊圖如圖5所示。於此直接利用實際負載頻率偏移量和頻率偏移量為零之參考模式相減得 $e(K)$ ，將 $e(K)$ 及 $\Delta e(K)$ 信號乘以適當增益常數 g_e 及 g_{de} ，以調整誤差量及誤差變化量之靈敏度。在每個取樣時間，將放大後之 $e(K)$ 及 $\Delta e(K)$ 信號量化輸入後去查決策表。由決策表輸出之值乘以輸出增益常數 K_d 後，得到該取樣時間之控制輸入量 u_a ，以確保負載頻率變動量在最小值附近，而並行所加之積分器可使其穩態誤差為零。由於增益常數之選擇對負載頻率響應影響很大，故本控制器根據對系統之知識及經驗其各增益常數之選擇如下：

$$\begin{aligned}
 g_e = & \begin{cases} 15 & |\Delta \dot{P}_g| \leq 0.0004 \\ 20 & |\Delta \dot{P}_g| > 0.0004 \end{cases} ; & g_{de} = & \begin{cases} 180 & |\Delta \dot{P}_g| \leq 0.0004 \\ 300 & |\Delta \dot{P}_g| > 0.0004 \end{cases} \\
 K_f = & \begin{cases} 15-14*(|e|-0.001)/0.03 & 0.001 \leq |e| \leq 0.0004 \\ 1 & |e| > 0.004 \end{cases} \\
 K_d = K_1 |e|, & \text{其中 } K_1 = & \begin{cases} 120 & |e| \leq 0.0004 \\ 6 & |e| > 0.0004 \end{cases}
 \end{aligned}$$

在完成模糊控制器設計後，將在下節中，以單區域電力系統為例，說明所提控制器之實際效果。

四、模擬結果

考慮圖1之電力系統，假設其參數典型值如下：

$$T_p=20 \text{ sec.} ; K_p=120\text{Hz-P.U./MW}; T_t=0.3 \text{ sec.} ; R=2.4\text{Hz-P.U./MW}$$

$$T_g=0.08 \text{ sec.} ; K_e=0.6$$

而實際電力系統均存在著發電功率變化率有最大值之限制。由於發電率限制將對電力系統的動態響應有很大的影響，故當考慮發電率限制時，系統將會有較大的超越量且有較長的安定時間。在本節中將驗證所提之模糊控制器作電力系統負載頻率控制且考慮發電率限制下之效果。發電率限制選擇每分鐘0.1標么，即發電率限制為 $\Delta \dot{P}_g \leq \delta = 0.0017 \text{ P.U.MW/S}$ 。

爲了觀察所提控制器之效果，假設系統突然有一0.01標么之步級負載變動，其和強健控制器在沒有發電率限制及有發電率限制下，模擬結果 Δf 及 ΔP_g 之比較分別如圖6(A)及(B)所示。而系統參數變動對 Δf 及 ΔP_g 響應之影響，亦可分別就考慮有無發電率限制情況下討論，其模擬結果如圖7及圖8所示。最後，圖9爲在時間 $t=1$ 秒及 $t=5$ 秒時，系統參數突然變動時 Δf 之響應情形。由模擬結果得知本文所提之控制器不論在有無考慮發電率限制時，負載頻率偏離量及其回復時間均較強健控制器之結果佳。同時，不論系統參數在任何時間變動，對控制性能之影響不大。

五、結 論

本文提出一電力系統負載頻率模糊控制器，以改善電力系統之性能提高供電品質。在控制器上之設計，僅需要輸出頻率增量信號，不需要其它狀態信號，同時亦不須作線上參數識別，因此，本控制器可以很容易且簡單的實施。由模擬結果亦証明了藉由所提之模糊控制器，可以得到良好的控制性能，而且對參數變動之影響不大。當考慮發電率限制時，所提之控制器仍能提供良好的控制性能。

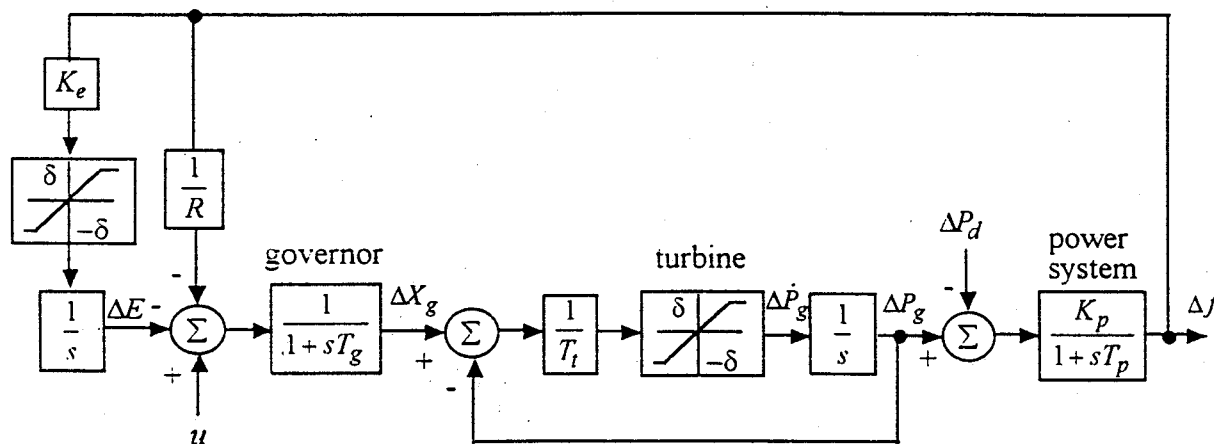


圖1. 單區域電力系統方塊圖

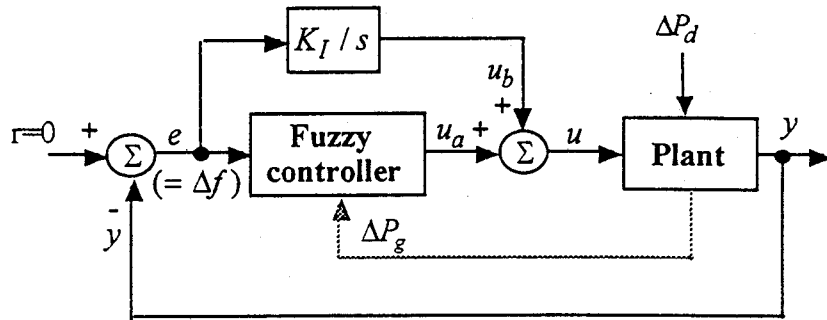


圖 2. 所提控制器之控制架構圖

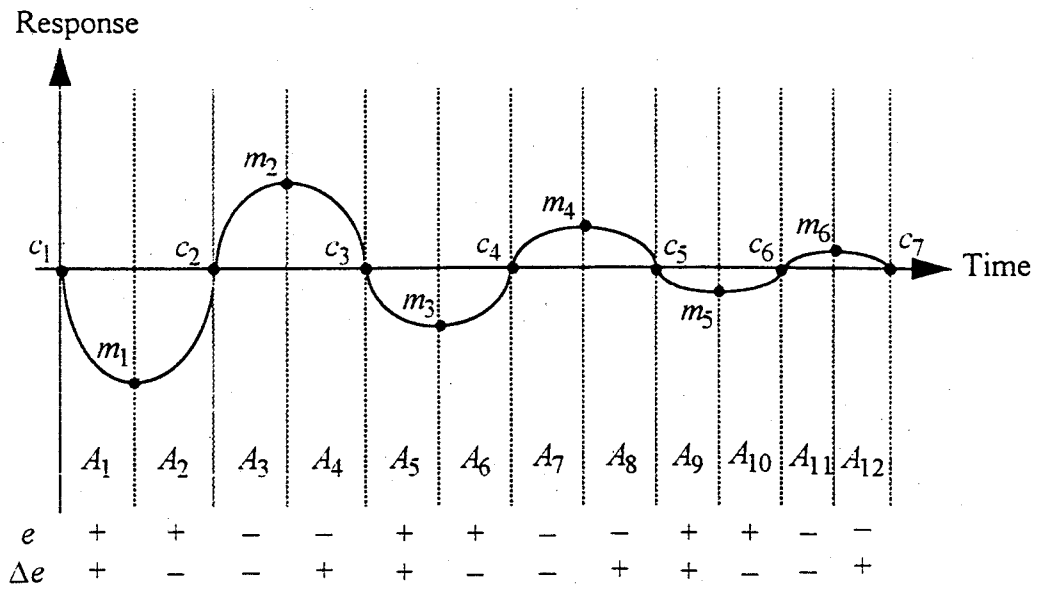


圖 3. 步級負載擾動響應之動態信號分析

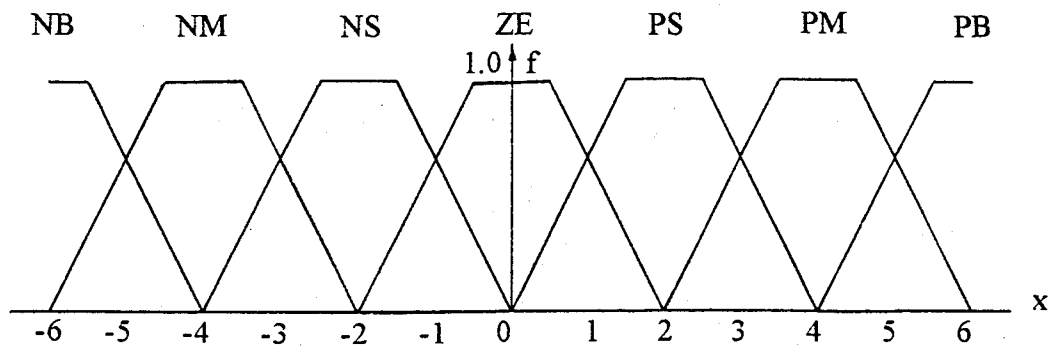


圖 4. 梯形歸屬函數圖

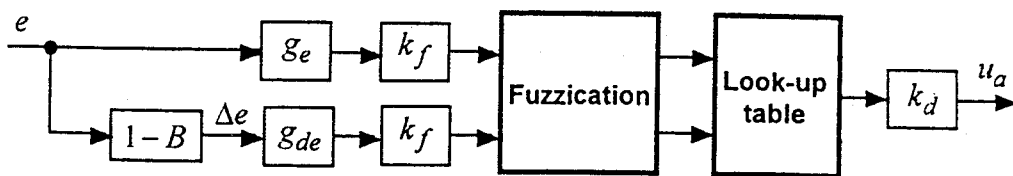


圖 5. 模糊控制器方塊圖

表1. 負載頻率變化狀態表

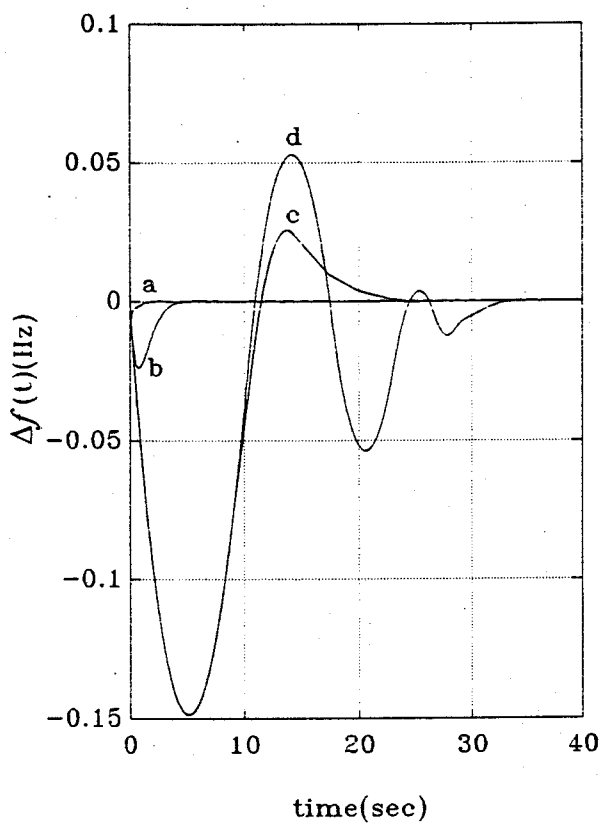
Δe \ e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB A ₃ , A ₇ , A ₁₁			C ₂ A ₂ , A ₆ , A ₁₀		
NM				C ₄			
NS				C ₆			
ZE	m ₂	m ₄	m ₆	ZE	m ₅	m ₃	m ₁
PS A ₄ , A ₈ , A ₁₂			C ₅ A ₁ , A ₅ , A ₉		
PM				C ₃			
PB				C ₁			

表2. 負載頻率變化之口語化控制法則

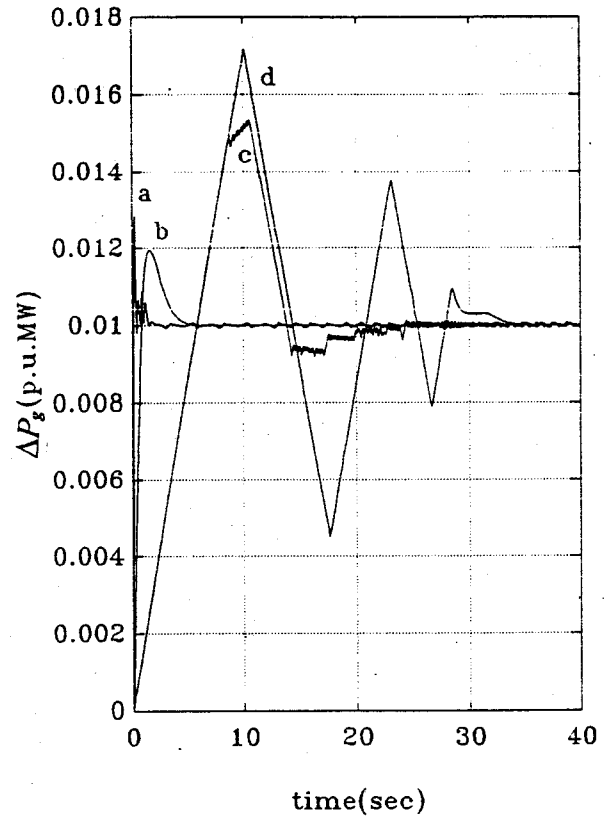
Δe \ e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	NS	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

表3. 決策表

Δe	e													
	C_I	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6		-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
-5		-6	-6	-6	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1
-4		-6	-6	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2
-3		-6	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
-2		-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-1		-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
0		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
1		-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	6
2		-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	6	6
3		-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	6	6	6
4		-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	6	6	6	6
5		-1	0	1	2	3	4	5	6	6	6	6	6	6
6		0	1	2	3	4	5	6	6	6	6	6	6	6



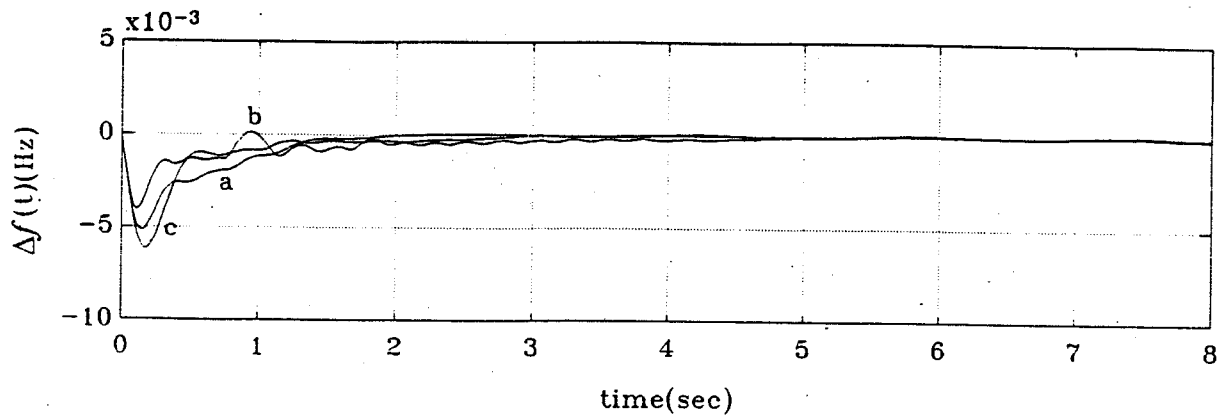
(A)



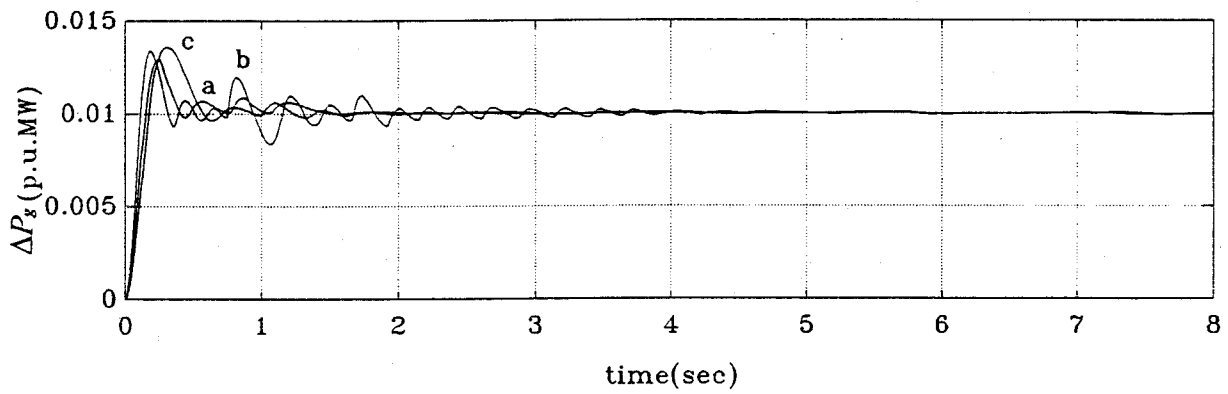
(B)

圖 6. 負載變動 0.01 標么，參數為典型值時 Δf 及 ΔP_g 之響應

- a: 模糊控制器沒有發電率限制時
- b: 強健控制器沒有發電率限制時
- c: 模糊控制器有發電率限制 GRC $\delta = 0.0017$ 時
- d: 強健控制器有發電率限制 GRC $\delta = 0.0017$ 時



(A)



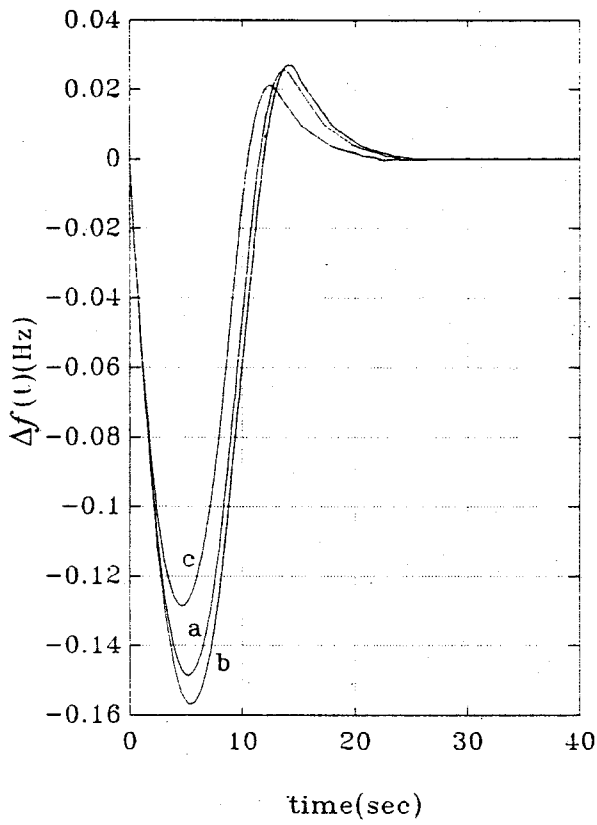
(B)

圖7. 所提控制器在不同參數變動下，且沒有發電率限制時 Δf 及 ΔP_g 響應

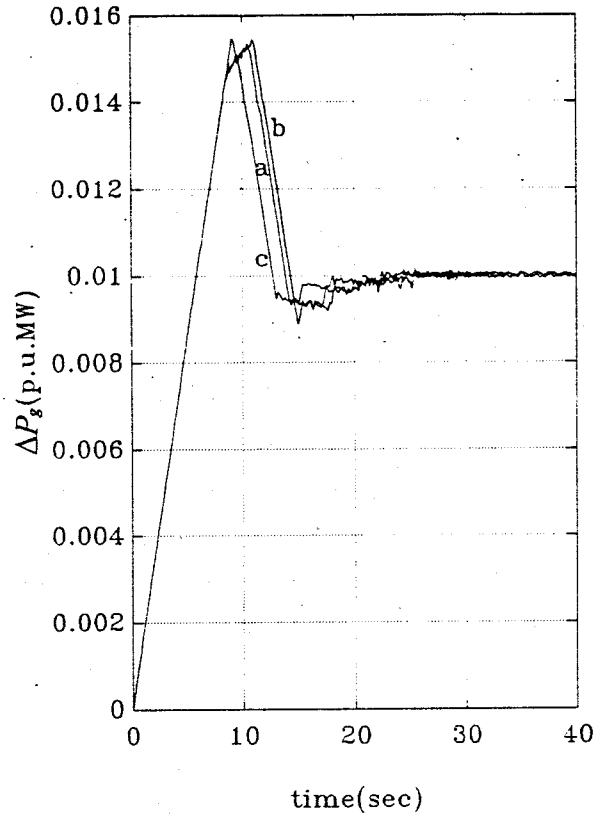
a : 典型值

b : T_p & K_p 增加 50% ; T_g, T_t & R 增加 20%

c : T_p & K_p 減少 50% ; T_g, T_t & R 減少 20%



(A)



(B)

圖 8. 所提控制器在不同參數變動下且有發電率限制

GRC $\delta = 0.0017$ 時 Δf 及 ΔP_g 之響應

a : 典型值

b : T_p & K_p 增加 50% ; T_g, T_t & R 增加 20%

c : T_p & K_p 減少 50% ; T_g, T_t & R 減少 20%

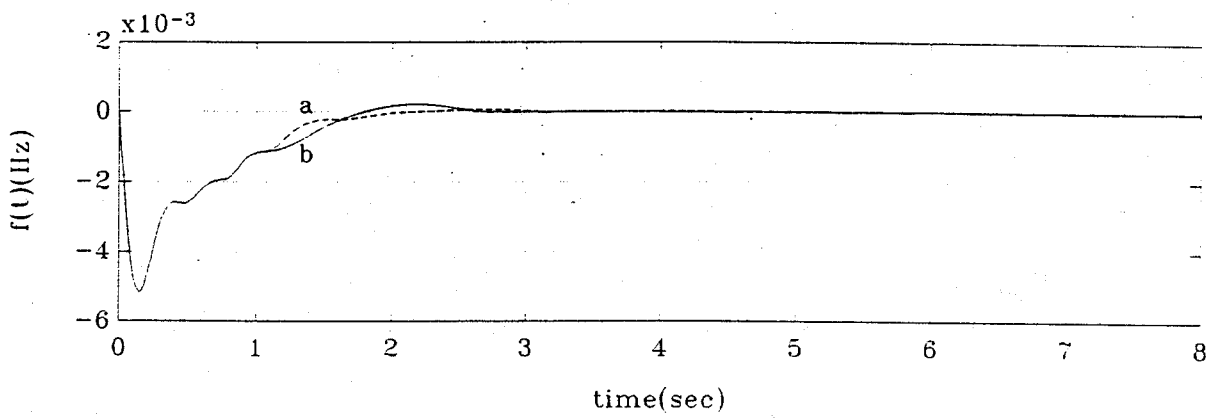


圖9.所提控制器在負載變動0.01標么後回復時間內

參數變動時 Δf 之響應

a：負載變動5秒後

b：負載變動1秒後

參考文獻

- [1] J. Nanda, and B. L. Kaul, "Automatic generation control of an interconnected power system," Proc. IEE, Vol. 125, No. 5, pp. 385-390, May 1978.
- [2] R.K. Cavin, M.C. Budge, and P. Rasmussen, "An optimal linear system approach to load-frequency control," IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. PAS-90, pp. 2472-2482, Nov./Dec. 1971.
- [3] N.N. Bengiamin, and W.C. Chan, "Multilevel load-frequency control of interconnected power systems," Proc. IEE, Vol. 125, pp. 521-526, June 1978.
- [4] A. Y. Sivaramakrishana, M. V. Hariharan, and M.C. Srisailam, "Design of variable structure load-frequency controller using pole assignment technique," Int. J. Control, Vol. 40, No. 3, pp. 478-498, 1984.
- [5] Y. Wang, R. Zhou, and C. Wen, "Robust load-frequency controller design for power systems," Proc. IEE, pt. C. Vol. 140 No. 1, pp. 11-16, January 1993.
- [6] I. Valk, M. Vajta, L. Keviczky, R. Haber, J. Hetthessy, and K. Kovacs, "Adaptive load-frequency control of Hungarian power system," Automatica, Vol. 21, No. 2, pp. 129-137, 1985.
- [7] K. Sobel, H. Kaufman, and L. Mabijs, "Implicit adaptive control for a class of MIMO system," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-18, No. 5, pp. 576-589, Sept. 1982.
- [8] J. Kanniah, S. C. Tripathy, O.P. Malik, and G. S. Hope, "Microprocessor-based adaptive load-frequency control," Proc. IEE, pt. C, Generation Transmission and Distribution, Vol. 131, No. 4, pp. 121-128, July 1984.
- [9] I. D. Landau, and B. Courtiol, "Design of multivariable adaptive model following control systems," Automatica, Vol. 10, pp. 483-494, 1974.
- [10] E. Irving, J. P. Barret, C. Charcossey, J.P. Merville, "Improving power network stability and unit stress with adaptive generator control," Automatica, Vol. 15, No. 1, pp. 31-46, 1979.
- [11] I. D. Landau, Adaptive control: the model reference approach, New York: Marcel Dekker Inc., 1982.
- [12] C.W. Chan, and Y.Y. Hsu, "Automatic generation control of interconnected power systems using variable-structure controller," Proc. IEE pt. C. pp. 269-279, 1981.
- [13] C.T. Pan, and C.M. Liaw, "An adaptive controller for power system load-frequency control," IEEE Trans., PWR-4, pp. 121-128, 1989.
- [14] C. C. Lee, "Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller-part I and part II," IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 20, No. 2, pp. 404-436, 1990.
- [15] Spyros Tzafestas, and Nikolaos P. Papanikolopoulos, "Incremental fuzzy expert PID control," IEEE Trans. on Industrial Application, Vol. 37, No. 5, pp. 365-371, 1990.