

시스템 안정도 개선을 위한 자기조정 퍼지제어기 적용

허동렬^{*}, 주석민^{**}, 김해재^{***}
 동아대학교^{*}, 창원대학교^{**}, 마산대학^{***}

Application of Self Tuning Fuzzy Controller for System Stability Improvement

Dong-Ryol Hur^{*}, Seok-Min Joo^{**}, Hai-Jai Kim^{***}
 Dong-A University^{*}, Chang-Won University^{**}, Masan College^{***}

Abstract - This paper presents a control approach for designing a self tuning fuzzy controller for SVC system. A SVC constructed by a Fixed Capacitor and a Thyristor Controlled Reactor is designed and implemented to improve the damping of a synchronous generator, as well as controlling the system voltage. The proposed parameter self tuning algorithm of fuzzy controller is based on the steepest decent method using two direction vectors which make error between inference values of fuzzy controller and output values of the specially selected PSS reduce steeply. The related simulation results show that the proposed fuzzy controller is more powerful than the conventional ones.

적용한 경우와 비교함으로써 유용성을 입증하였다..

1. 서 론

2. 전력시스템의 수학적 모델

기존 전력시스템의 송전용량을 최대 열적 한계용량까지 증가시키므로 전력수송 설비시설의 건설부담을 저감시킬 수 있는 새로운 개념의 전력전송 방식인 유연송전 시스템 중에서도 사이리스터 제어 리액터와 고정 커패시터에 의해 만들어진 무효전력 보상기(SVC)는 전력 산업체에서 널리 채용되었다. 또한 SVC는 모선전압의 제어가 기본적인 제어의 목적이며 부가적으로 과도안정도 향상, 전력동요억제, 저주파진동의 억제 등의 다양한 제어가 가능하다. 이러한 SVC는 국내에서도 채택되어 대구지역의 전압강하 문제를 해결하기 위하여 설치 운전 중에 있다[1-2]. 그러나 SVC 등과 같은 FACTS 기기만으로는 전력수요 증가에 따른 저주파 진동 현상, 경부하 심야 운전 중의 전압 상승 등 시스템 안정도 문제를 완벽히 해결 할 수 없다[3].

그림 1은 시스템의 개략적인 모델을 나타내고 있다. 전력시스템은 무한모선에서 고전압 송전선로를 경유하여 동기발전기에 연결되어, 발전기 단자에 정지형 무효전력 보상장치가 설치되어 있다. 이 동기발전기는 계자 전압상·하한치를 조절할 뿐만 아니라 고속 안정화 여자시스템으로 구성되어 있다. 또한 그림 2에서 나타낸 바와 같이 전압 조절 능력을 갖춘 IEEE type ST1 2차 여자기로 구성된 발전기 모델을 이용하였다.

이와 같이 전력계통의 저주파 진동을 억제하고 계통의 안정도 특성을 향상시키기 위해서 발전기 제어장치인 전력계통안정화장치(Power System Stabilizer : PSS)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[4-6]. 그러나 PSS는 그 구조가 다양하고 설계방법이 복잡하여 이의 사용에 고도의 전문성이 요구된다.

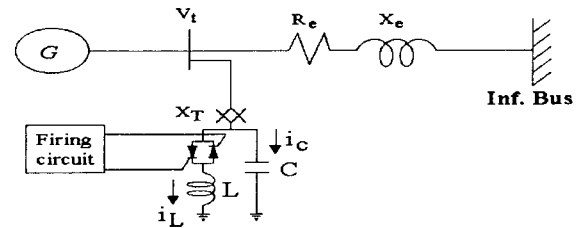


Fig. 1 Power System Configuration

따라서 본 논문에서는 최근 시스템의 선형, 비선형성을 불문하고 제어대상의 정확한 모델화 없이도 전문가의 지식 및 경험만을 기초로 한 제어규칙으로부터 퍼지추론을 행하여 제어 동작을 결정하는 퍼지제어를 이용하여 전력계통 안정화 장치를 설계하였다. 그러나 퍼지제어의 많은 장점에도 불구하고 부하변동에 따른 강인성 또는 정상상태의 잔류편차 등이 발생하는 문제점이 있다. 이러한 문제점의 해결 방법으로 소속함수의 각 퍼지변수의 중심치 및 폭을 최급강하법(Steepest Descent Method)으로 반복학습하여 자기조정하였다. 반복학습의 기준 학습 데이터는 PSS의 입·출력 쌍을 이용함으로써 최적인 파라미터를 얻을 수 있었다. 이러한 제안된 방법의 강인성을 검증하기 위해 여러 가지 운전조건에 대해 전력계통 안정도를 해석하여 기존의 안정화 장치를

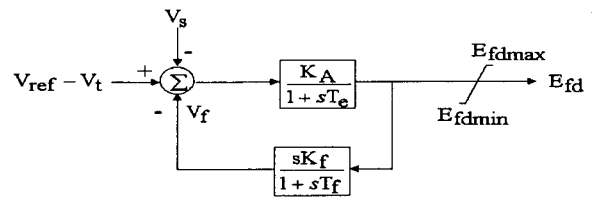


Fig. 2 IEEE ST1 excitation system

TCR-FC 정지형 무효전력 보상장치는 발전기 단자에 연결되어 있으며, thyristor 제어 리액터(TCR)과 고정 커패시터(FC)로 구성되어 있다. 리액터에 흐르는 전류는 다음 식(1)과 같다.

$$I_L = \left(\frac{V_t}{X_L} \right) \left\{ \left[\frac{2\alpha - \sin(2\alpha)}{\pi} \right] - 1 \right\} \quad (1)$$

식 (1)은 점호각에 의해 제어되는 가변 서셉턴스를 나타내는 리액터를 표현한다.

$$B(\alpha) = \frac{\{1 - C(\alpha)\}}{X_L} \quad (2)$$

여기서 $C(\alpha) = \left[\frac{2\alpha - \sin(2\alpha)}{\pi} \right] - 1$ 이다.

또한 TCR-FC 보상기는 다음 식(3)과 같이 X_γ 의 가변 커패시터로서 나타낼 수도 있다.

$$X_\gamma = \frac{\{1 - C(\alpha)\}}{X_L} - \left(\frac{1}{X_c} \right)$$

여기서 $C(\alpha) = \left[\frac{2\alpha - \sin(2\alpha)}{\pi} \right] - 1$ 이고, X_L , X_c , X_r 및 a 는 각각 유도성 리액턴스, 용량성 리액턴스, 보상기의 통합 리액턴스 및 보상기 사이리스터의 점호각이다.

전송선로와 정지형 무효전력 보상기의 등가 수식은 직류와 횡축성분으로 다음 식(4) ~ (7)과 같다.

$$V_{td} = V_b \sin \delta - \left(\frac{w}{w_0} \right) X_e (I_q - I_{Lq} - I_{cq}) \quad (4)$$

$$V_{tq} = V_b \cos \delta + \left(\frac{w}{w_0} \right) X_e (I_d - I_{Ld} - I_{cd}) \quad (5)$$

$$\text{여기서 } I_{Ld} = \left(\frac{w_0}{w} \right) \{1 - C(\alpha)\} \frac{V_{tq}}{X_L}, I_{cd} = - \left(\frac{w_0}{w} \right) \frac{V_{tq}}{X_c}$$

$$I_{Lq} = \left(\frac{w_0}{w} \right) \{1 - C(\alpha)\} \frac{V_{td}}{X_L}, I_{cq} = - \left(\frac{w_0}{w} \right) \frac{V_{td}}{X_c}$$

$$V_{td} = V_b \cdot \sin \delta - \left(\frac{w}{w_0} \right) X_e \cdot I_q \quad (6)$$

$$V_{tq} = V_b \cdot \cos \delta - \left(\frac{w}{w_0} \right) X_e \cdot I_d \quad (7)$$

$$\text{여기서 } V_b = \frac{V_b}{C \cdot (\alpha)}, X_e = \frac{X_e}{C \cdot (\alpha)}$$

$$C \cdot (\alpha) = 1 + \{1 - C(\alpha)\} \frac{X_e}{X_L} - \frac{X_e}{X_c}$$

3. 자기조정 퍼지제어 기법

3.1 퍼지추론

퍼지제어기(Fuzzy Logic Controller : FLC)에서 언어적인 형태로 기술된 퍼지제어의 규칙을 적용하기 위해서는 논리적인 실행 과정이 필요하다. 이를 퍼지추론이라 하며 몇 가지의 퍼지 명제에서 어느 한 명제를 도출하는 것으로, 이는 인간이 행하고 있는 추론법과 유사하다[7-8]. 퍼지제어 시스템의 일반적인 구성은 사실과 결론을 IF ~ Then 형식으로 조작모델을 서술하는 퍼지제어 규칙부와 퍼지입력으로부터 얻어진 결과를 합성하여 아날로그 출력을 연산하는 퍼지 추론부 및 퍼지제어 프로세스부로 크게 나눌 수 있다.

입력변수를 x_1, x_2, \dots, x_n , 출력변수를 y 라고 하면 퍼지추론 규칙은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_p : \text{If } x_1 \text{ is } A_{p1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{p2} \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_{pn} \\ \text{Then } y \text{ is } B_p \quad (p=1, 2, \dots, r) \quad (8)$$

여기서, R_p 는 p 번째의 룰이고, $A_{p1}, A_{p2}, \dots, A_{pn}$ 은 입력 변수의 퍼지변수, B_p 는 출력변수의 실수치를 나타낸다. 입력 데이터에 대해 식 (8)의 추론 결과는 식 (9)와 같다.

$$\mu_p = \prod_j = 1 n \mu_{A_{pj}}(x_j) \quad (9)$$

여기서, $\mu_{A_{pj}}(x_j)$ 은 퍼지변수 A_{pj} 의 멤버십 함수를 나타낸다. 비퍼지화 방법으로는 일반적으로 많이 사용되는 Braae-Rutherford의 중력중심법(Center of Gravity Method)을 사용하였으며, 비퍼지화에 의한 최종 출력값 y^* 은 식 (10)으로 나타내어진다.

$$y^* = \frac{\sum_{p=1}^r \mu_p \cdot B_p}{\sum_{p=1}^r \mu_p} \quad (10)$$

퍼지추론을 하기 위해서는 우선 퍼지화에 따른 멤버십 함수가 정의되어야 한다. 멤버십 함수는 삼각형, 사다리형, 중형 등이 있으며, 여기서는 일반적으로 많이 사용되고 계산하기에 편리한 삼각형을 사용하였다. 그림 3은 삼각형 멤버

십 함수를 발생시키기 위한 모형이며, 삼각형 멤버십 함수의 파라미터 $\mu_{A_{pj}}(x_j)$ 의 결정은 식 (11)에서 계산된다.

$$\mu_{A_{pj}}(x_j) = 1 - \frac{2 |x_j - C_{pj}|}{W_{pj}} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

여기서, C_{pj} 는 멤버십 함수의 중심 값으로 적합도가 최대가 되는 값이고, W_{pj} 는 멤버십 함수의 폭을 나타낸다.

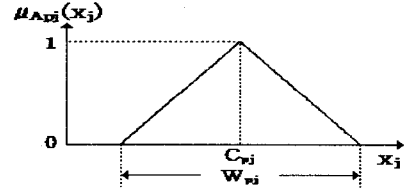


Fig. 3 Symmetric triangular membership function

3.2 최급강하법에 의한 자기조정 알고리즘

PSS의 결과로부터 얻어진 입·출력 데이터 쌍(x_j, y)

즉, 각속도 편차 w_Δ 와 그 미분치 $\frac{dw_\Delta}{dt}$ 를 입력으로 한 퍼지제어기의 출력 u_e 를 얻게 된다. 이들 얻어진 입·출력 데이터 쌍을 이용하여 추론규칙에 포함되는 전건부는 각 퍼지 변수의 중심치 및 폭을 최급강하법에 의해 자기조정시켜 얻고, 후건부는 실수로 퇴화시켜 조정되는 값을 취한다. 조합이 가능한 모든 초기 추론규칙으로부터 학습이 종료됨으로 자동동조된 각 퍼지변수의 중심치 및 폭을 갖는 최적화된 추론규칙이 생성된다. 퍼지추론을 제어분야에 적용할 경우, 후건부의 퍼지변수를 실수로 퇴화시킨 간략 퍼지추론이 많이 사용된다. 후건부를 실수로 정의함으로써 조정 파라미터의 수가 감소하고, 조정 알고리즘이 용이하게 되는 이점이 있다. 또한 실수로 퇴화시키더라도 추론치는 통상의 퍼지추론과 크게 차이가 없다. 그래서 여기서는 최급강하법을 이용한 퍼지추론의 자기조정 수법으로 전건부의 멤버십 함수의 폭과 중심치 및 후건부의 파라미터를 식(12)의 E 가 최소가 되도록 반복 학습하여 동조시킨다.

$$E = \frac{1}{2} (y - y^*)^2 \quad (12)$$

최급강하법에서는 입력 데이터 x_j 가 입력된 경우, 퍼지추론의 추론치 y^* 와 출력치 y 와의 추정오차의 제곱 E 가 최소로 되도록 최적화한다. 이때 각 조정 파라미터에 대해 E 의 값이 최대로 감소하는 방향을 나타내는 벡터는 $[-\frac{\partial E}{\partial C_{pj}} - \frac{\partial E}{\partial W_{pj}} - \frac{\partial E}{\partial B_p}]$ 로 되고, 식(13)~(15)와 같은 학습법칙으로 동조한다.

$$C_{pj}(t+1) = C_{pj}(t) - G_{Cj} \cdot \frac{\partial E}{\partial C_{pj}} \quad (13)$$

$$W_{pj}(t+1) = W_{pj}(t) - G_{Wj} \cdot \frac{\partial E}{\partial W_{pj}} \quad (14)$$

$$B_p(t+1) = B_p(t) - G_B \cdot \frac{\partial E}{\partial B_p} \quad (15)$$

$$\frac{\partial E}{\partial C_{pj}} = \frac{p}{\sum_{p=1}^r p} \cdot (y - y^*) \cdot (B_p - y)$$

$$\cdot \text{sgn}(x_j - C_{pj}) \cdot \frac{2}{W_{pj} A_{pj}(x_j)}$$

$$\frac{\partial E}{\partial W_{pj}} = \frac{p}{\sum_{p=1}^r p} \cdot (y - y^*) \cdot (B_p - y)$$

$$\cdot \frac{1 - A_{pj}(x_j)}{A_{pj}(x_j)} \cdot \frac{1}{W_{pj}}$$

$$\frac{\partial E}{\partial B_p} = \frac{p}{\sum_{p=1}^r p} \cdot (y - y^*)$$

여기서 G_{Cj} , G_{Wj} , G_B 는 각 벡터량에 따라 정해지는 학습계수이며, 식(13)~(15)는 충분한 학습횟수에 의해 수렴되는 것으로 하며, 부호함수는 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{sgn}(z) = 1 (z \geq 0), \text{sgn}(z) = -1 (z < 0) \quad (16)$$

4. 시뮬레이션 결과 및 검토

전력계통의 안정화를 위한 퍼지제어를 설계하기 위해서는 먼저 일반적인 룰이 생성되어야 한다. 본 시스템에서 사용한 퍼지제어의 구성도는 그림 4와 같다.

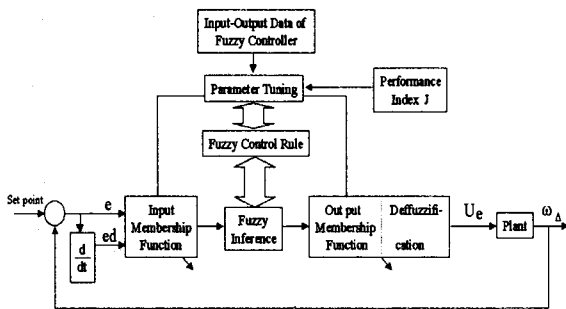


Fig. 4 Block-diagram of fuzzy control system

여기에 적용되는 퍼지제어 룰은 식(17)과 같은 형태이다.

$$\text{If } e \text{ is } A_1 \text{ and } ed \text{ is } A_2 \text{ Then } ue \text{ is } B \quad (17)$$

여기서, e 는 w_Δ 의 출력치와 목표치와의 오차, ed 는 w_Δ 의 오차 변화율 그리고 ue 는 제어입력을 표시한다.

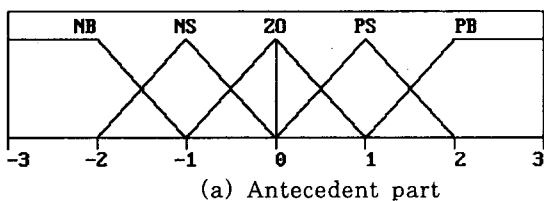
전진부와 후진부의 퍼지변수는 오차와 오차변화율에 대해 각각 5개로 구성하였으며, 전체적인 제어규칙은 표 1과 같이 선정하였다.

Table 1 Control rules

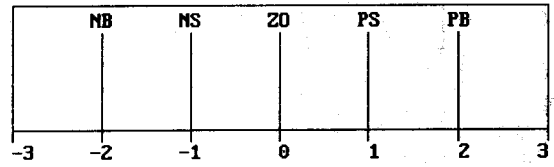
ue		e				
		NB	NS	ZO	PS	PB
ed	PB	ZO	PS	PB	PB	PB
	PS	NS	ZO	PS	PB	PB
	ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
	NS	NB	NB	NS	ZO	PS
	NB	NB	NB	NB	NS	ZO

PB : Positive Big PS : Positive Small
ZO : Zero
NS : Negative Small NB : Negative Big

제시된 제어규칙에 대한 전진부와 후진부의 멤버십 함수는 그림 5와 같으며, 표 2는 초기상태 멤버십 함수에 있어 각각의 중심치와 폭을 나타낸 것이다.



(a) Antecedent part



(b) Consequent part

Fig. 5 Membership functions of antecedent and consequent part.

Table 2 Initial values of membership functions

	e		ed		ue
	C_{p1}	W_{p1}	C_{p2}	W_{p2}	B_p
NB	-2.0000	2.0000	-2.0000	2.0000	-2.0000
NS	-1.0000	2.0000	-1.0000	2.0000	-1.0000
ZO	0.0000	2.0000	0.0000	2.0000	0.0000
PS	1.0000	2.0000	1.0000	2.0000	1.0000
PB	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000

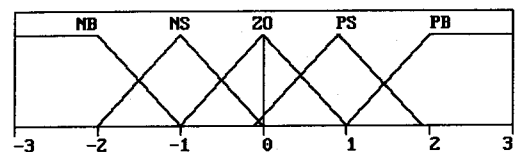
먼저, 일반적인 퍼지제어의 결과로부터 얻어진 입·출력 데이터 쌍인 총 2000개의 데이터 중 무작위로 200개만 취하여 반복 학습을 하였으며, 여기에 사용한 학습계수는 $G_{C1} = 0.0005$, $G_{W1} = 0.0005$, $G_{C2} = 0.0008$, $G_{W2} = 0.0008$, $G_B = 0.02$ 이다. 이때 각각의 중심치와 폭을 조정하는 학습 과정은 다음과 같다.

- 단계 1 : 전진부 및 후진부 파라미터와 학습계수의 초기치를 설정한다. (C_{pj} , W_{pj} , B_p , G_{Cj} , G_{Wj} , G_B), $j=1,2$
- 단계 2 : 학습용 입·출력 데이터 쌍(x_j , y) N 개를 얻는다.
- 단계 3 : 입력 데이터 x_j 에 대한 퍼지추론을 수행한다. 각 추론규칙의 적합도 p 와 추론 결과 y^* 를 구한다.
- 단계 4 : 후진부의 파라미터를 갱신한다.
- 단계 5 : 갱신한 후진부 파라미터를 가지고 퍼지추론을 수행한다.
- 단계 6 : 추론결과 y^* , 적합도 p , 출력 데이터 y , 갱신한 후진부 파라미터를 이용하여 전진부 파라미터를 갱신한다.
- 단계 7 : 오차 $E = \frac{1}{2} (y - y^*)^2$ 을 계산하고, N 개의 데이터를 학습할 때까지 단계 2로 되돌아간다.
- 단계 8 : 조정된 멤버십 함수 중 E 가 최소인 것을 선정한다.
- 단계 9 : 선정된 멤버십 함수가 식(18)을 만족하면 학습과정을 종료하고, 만족하지 못하면 단계 2로 되돌아간다.

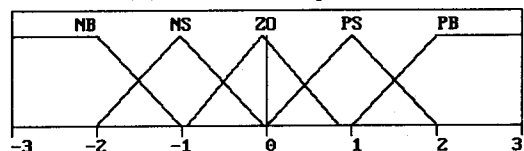
$$J = \int (\alpha V_{\Delta}(t)^2 + \beta w_{\Delta}(t)^2 + \gamma \delta_{\Delta}(t)^2) dt < \quad (18)$$

여기서 $\alpha=0.0016$, $\beta=1.0$ 및 $\gamma=0.005$ 이다.

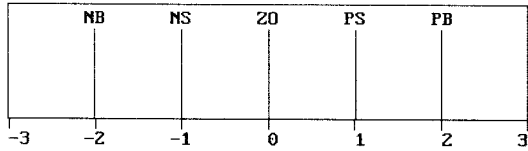
그림 6은 제시한 학습과정에 따라 학습 후 조정된 각각의 멤버십 함수이고, 표 3은 최적화된 멤버십 함수의 중심치와 폭을 나타낸 것이다.



(a) Antecedent part : e



(b) Antecedent part : ed



(c) Consequent part : u_e
Fig. 6 Tuned membership functions

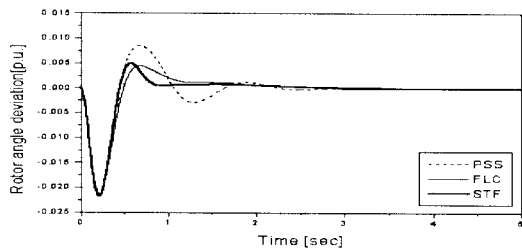
Table 3 Values of tuned membership functions

	e		ed		u_e
	C_{p1}	W_{p1}	C_{p2}	W_{p2}	B_p
NB	-2.0000	2.0000	-2.0000	2.0000	-2.0112
NS	-1.0000	2.0000	-1.0173	1.9924	-1.0011
ZO	-0.0005	2.0000	-0.0042	1.9992	0.0000
PS	0.8998	2.0008	1.0000	2.0000	1.0017
PB	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000

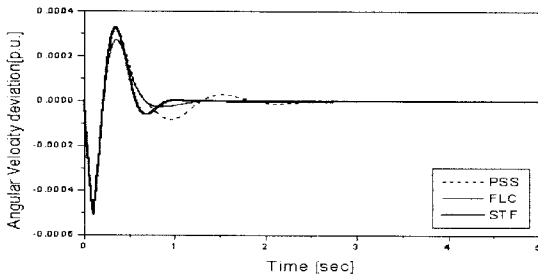
본 연구에서는 초기전력을 100(ms)동안 3[%] 변동 ($P_e=1.3$, $Q_e=0.595$) 조건 하에서 SVC를 포함한 시스템에 전력시스템 안정화장치(PSS)를 적용한 경우, 퍼지제어기(Fuzzy Logic Controller : FLC)를 적용한 경우 및 제안한 자기조정 퍼지제어기(Self-Tuning Fuzzy Controller : STF)를 적용한 경우에 대하여 비교·고찰하였다. 표 4는 식(18)의 평가함수를 사용하여 각 제어기법에 따른 제어성능을 비교 하였다.

Table 4 Performance index

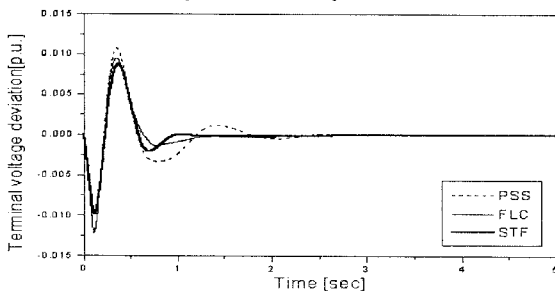
Performance Index	PSS	FLC	STF
J	3.02×10^{-5}	2.55×10^{-5}	2.41×10^{-5}



(a) Rotor angle deviation



(b) Angular velocity deviation



(c) Terminal voltage deviation

Fig. 7 Responses of generator when decreasing power 3% disturbance duration 100(ms)

그림 7은 제어 기법에 따른 응답특성을 회전자 각, 각속도 및 단자전압 편차에 대한 응답을 나타낸 것이다. 각각의 응답특성을 비교해보면 퍼지제어기가 전력시스템 안정화장치보다 각각의 응답에 대해 최대 편차량의 감소뿐만 아니라 정정 시간에서도 빠른 수렴 특성을 보이고 있다. 다음으로, 퍼지제어기와 제안한 자기조정 퍼지제어기의 비교 응답에서 퍼지제어기는 전력시스템 안정화장치보다 향상된 응답을 보이고 있지만, 제안한 자기조정 퍼지제어기와 비교에서는 다소의 진동과 잔류편차를 가지고 수렴하였다.

5. 결 론

전력시스템에서 기본적으로 요구되는 사항은 계통의 어떠한 변화에도 불구하고, 발전출력량과 그 품질에 대한 소비자의 욕구를 지속적으로 만족시켜야 한다는 것이다. 이 같은 고신뢰, 양질의 전기에너지는 전압과 주파수를 허용 범위 내로 수렴시킬 수 있는냐의 여부에 달려 있다.

따라서, 본 연구에서는 전력시스템의 안정도를 향상시키기 위하여 동기발전기의 SVC를 포함한 계통의 제어기를 퍼지제어기로 구성하고, 최적강화법을 이용하여 퍼지변수의 전건부 및 후건부의 파라미터를 자기조정 함으로써 더욱 개선된 제어성능을 보일 수 있음을 확인하였다. 이상 본 논문의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 종래의 제어기법 PSS인 경우 전력변화에 대해 단자전압, 각속도 및 회전자각 편차의 특성에서 장시간의 진동으로 수렴 특성이 좋지 못함대 비해 퍼지제어기(FLC)는 각각의 최대 편차량, 정정시간 등의 특성에서 우수함을 보였으나, 정상상태에서 다소의 잔류편차가 잔존하고 있었다. 따라서, 이러한 문제점을 보완하기 위해 최적강화법을 이용하여 퍼지변수의 중심치 및 폭을 반복 학습하여 최적의 퍼지변수를 구할 수 있었다.

둘째, 제안한 자기조정 퍼지제어기(STF)를 적용한 경우, 최적강화법을 이용하여 멤버쉽 함수의 폭과 중심치 조정으로 과도응답 뿐만 아니라 정상상태에 있어서도 우수한 제어효과를 나타내었다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEEE Special Stability Controls Working Group, "Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, pp. 229-240, 1994.
- [2] H. H. Chung, D. R. Hur, Y. P. Wang, G. M. Han, H. J. Kim, "A Design of Optimal PI Controller of SVC System using Genetic Algorithms", Trans. of KIEE, Vol. 49, No. 5, pp.212-219, 2000
- [3] 문경섭, 손광명, 이태기, 이송근, 박종근, "무효전력 보상여유를 고려한 SVC와 ULTC의 협조제어", 전기학회논문지, 제 48권, 제 4호, pp. 351-357, 1999
- [4] K. Bollinger et all, "Power System Stabilizer Design using Root-Locus Method", IEEE Trans. on PAS, Vol. 94, No. 5, pp. 1484-1488, 1975
- [5] P. Kundur, N. Klein, G. J. Rogers and M. S. Zywno, "Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability", IEEE Trans. on Power System, Vol. 4, No. 2, 1989
- [6] H. H. Chung, D. R. Hur, J. P. Lee, Y. P. Wang, "A Design of Power System Stabilization for SVC System Using a RVEGA", Trans. of KIEE, Vol. 50, No. 7, pp. 324-332, 2001
- [7] 주석민, 허동렬, 김상효, 정형환, "퍼지-PI 제어기를 이용하여 정지형 무효전력 보상기를 포함한 동기발전기의 안정도 개선에 관한 연구", 한국조명·설비학회논문지, 제 15권, 제 3호, pp. 57-66, 2001
- [8] M. A. Iskandar, "Stabilizing Control of Power system using Fuzzy Control", IEE J., Vol. 112, No. 12, pp. 1111-1120, 1992