

자기조정 퍼지제어기를 이용한 SVC계통의 안정화 장치의 설계

論 文
51P-2-2

A Design of Power System Stabilization for SVC System Using Self Tuning Fuzzy Controller

朱 碩 珉* · 許 東 烈** · 金 海 在***
(Seok-Min Joo · Dong-Ryol Hur · Hai-Jai Kim)

Abstract - This paper presents a control approach for designing a self tuning fuzzy controller for a synchronous generator excitation and SVC system. A combination of thyristor-controlled reactors and fixed capacitors (TCR-FC) type SVC is recognized as having the most flexible control and high speed response, which has been widely utilized in power systems, is considered and designed to improve the response 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. Using input-output data pair obtained from PSS, the parameters in antecedent part and in consequent part of fuzzy inference rules are learned and tuned automatically using the proposed steepest decent method. The related simulation results show that the proposed fuzzy controller is more powerful than the conventional ones.

Key Words : Self-Tuning Fuzzy Controller(STF), Fuzzy Logic Controller(FLC), Static Var Compensator(SVC), Steepest Decent Method, Power System Stabilization(PSS)

1. 서 론

전력시스템에 유연성과 제어 성능을 향상시킴으로써 운전 효율과 신뢰도를 극대화시키기 위한 방안으로써 유연 송전시스템(Flexible AC Transmission System : FACTS) 기술이 개발되어 이를 계통에 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다[1-2]. FACTS로 분류되는 여러 기기 중 기존의 전압제어 및 무효전력보상기들이 가지고 있는 비속응성과 불연속성 문제를 해결해줄 수 있는 정지형 무효전력보상기는 병렬 구조를 가지고 있으며, 모션전압의 변동을 감지하여 이에 대응하는 병렬 서셉턴스를 변화시킴으로써 모션전압을 빠르고 연속적으로 제어하는 기기로서 FACTS 기기 중 가장 먼저 개발되고 현장에 적용되어 그 효과가 널리 검증되었고, 현재는 완전 실용화 단계에 있다. 또한 SVC는 모션전압의 제어가 기본적인 제어의 목적이며 부가적으로 과도안정도 향상, 전력동요억제, 저주파진동의 억제 등의 다양한 제어가 가능하다. 이러한 SVC는 국내에서도 채택되어 대규지역의 전압강하 문제를 해결하기 위하여 설치 운전 중에 있다[3-5]. 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[6]. 이와 같이 전력계통의 저주파 진동을 억제하고 계통의 안정도 특성을 향상시키기 위해서 발전기 제어장치인 전력계통안정화장치(Power System Stabilizer : PSS)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. K. Bollinger[7] 등은 위상 보상 회로의 시정수에 따른 근궤적을 구하여 PSS의 계수를 구하는 방법, R. J. Fleming[8] 등은 동요 모드의 고유치를 지정하는 극배치 방법, O. H. Abdalla[9] 등은 고유치의 감도를 이용하는 방법 등을 제안하였다. 최근 P. Kundur[10] 등에 의한 미소 신호 안정도 해석과 위상 보상법의 개발은 PSS 설계에 중요한 전기를 제공하였으며, C. J. We[11] 등은 자기 동조 제어기법을 이용하여 각 동작점을 추적하는 방식을 제안하였다. 그러나 PSS는 그 구조가 다양하고 설계방법이 복잡하여 이의 사용에 고도의 전문성이 요구된다.

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 적용

* 正 會 員 : 昌原大 工大 메카트로닉스工學部 BK21 教授 · 工博

** 正 會 員 : 東亞大 情報技術研究所 特別研究員 · 工博

*** 正 會 員 : 馬山大學 컴퓨터電氣工學部 副教授 · 工博

接受日字 : 2002年 4月 25日

最終完了 : 2002年 5月 29日

한 경우와 비교함으로써 유용성을 입증하였다.

2. 전력 시스템의 수학적 모델

2.1 시스템 모델

본 논문에서는 동적 안정도 해석을 위한 전력계통의 선형화된 방정식을 유도하기 위하여 송전선로를 통하여 무한모선에 연결된 IEEE Type 1의 여자기를 가진 동기기로 구성된 전력계통 모델을 이용하였다[3,12-13]. 그림 1은 선형화된 모델의 블록 선도를 나타낸다.

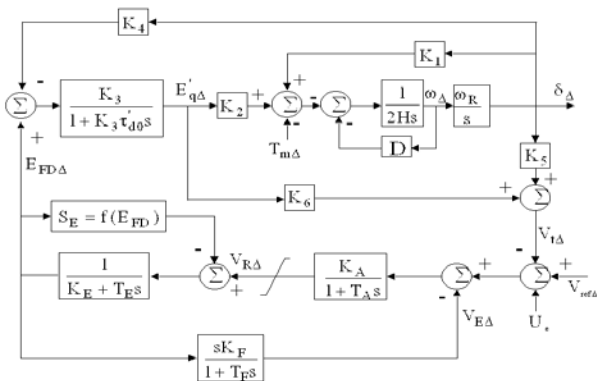


그림 1 선형화된 1기 무한모선 시스템
Fig. 1 Block diagram of single machine-infinite bus system

그림 1을 기초로 식 (1)~(2)와 같이 상태방정식으로 표현할 수 있다.

$$\dot{X} = AX + BU \quad (1)$$

$$Y = CX \quad (2)$$

$$X = [\delta_\Delta \quad \omega_\Delta \quad E_{q\Delta}' \quad E_{FD\Delta} \quad V_{R\Delta} \quad V_{E\Delta}]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-K_1}{M} & \frac{-D}{M} & \frac{-K_2}{M} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-K_4}{\tau_{d0}'} & 0 & \frac{-1}{K_3 \tau_{d0}'} & \frac{1}{\tau_{d0}'} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-K_E}{T_E} & \frac{1}{T_E} & 0 \\ \frac{-K_A K_5}{T_A} & 0 & \frac{-K_A K_6}{T_A} & 0 & \frac{-1}{T_A} & \frac{-K_A}{T_A} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-K_E K_F}{T_E T_F} & \frac{K_F}{T_E T_F} & \frac{-1}{T_F} \end{bmatrix}$$

$$B = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ K_A/T_A \ 0]^T, \quad C = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

여기서, X는 상태벡터, Y는 출력신호, U는 입력신호이다. 상태 변수 X와 선형화된 모델의 행렬 A, B 및 C의 요소는 다음과 같다.

2.2 SVC 모델

SVC는 빠른 응답속도를 가지고 연속적으로 무효전력을 보상함으로써, 제어 범위 내에서는 내부 인덕턴스를 가지는 전압원으로 동작하며 일정 전압을 유지하고, 제어 범위를 벗어나면 고정된 용량을 가지는 커패시터 또는 리액터로 표현

되게 된다. 즉, 제어 범위 내에서 SVC는 우수한 동적 전압안정도 특성과 전압제어 특성을 나타낸다[2-4,12-13]. 본 연구에서 고찰하고자 하는 SVC를 포함한 1기 무한대 모선 계통 모델은 그림 2와 같으며, SVC는 감압 변압기를 경유하여 전력계통에 병렬로 연결되어 무효전력을 흡수 또는 공급함으로써, 전압을 일정하게 유지하거나 원하는 제어동작을 수행하는 장치이다. 기존의 진상 무효전력 보상기인 전력용 콘덴서(Shunt Capacitor)와 지상 무효전력 보상기인 병렬 리액터(Shunt Reactor) 등과는 달리, SVC는 연속적인 제어를 수행함으로써, 동기조상기와 비슷한 제어특성을 가지게 된다. SVC는 목적에 따라 다양한 구성을 가지고 있으나, 가장 일반적인 구조는 그림 2에서와 같이, 고정된 용량의 커패시터(FC : Fixed Capacitor)와 사이리스터 제어에 의하여 용량이 가변되는 인덕터(TCR : Thyristor Controlled Reactor)가 병렬로 연결된 구조를 가지고 있으며, 전체적으로 사이리스터에 의하여 제어되는 가변 서셉턴스(B : Susceptance)로 볼 수 있다[1, 5-7, 18-20].

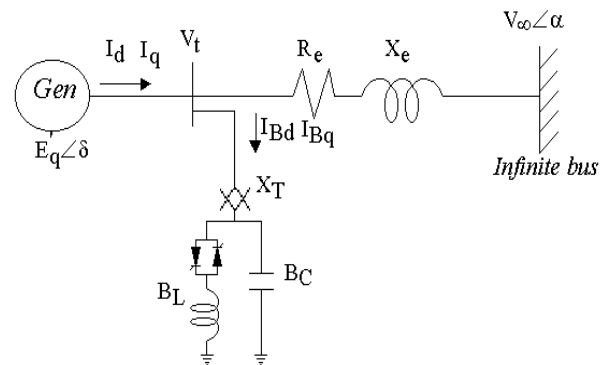


그림 2 SVC 시스템을 포함한 1기 무한 모선 계통
Fig. 2 Single machine-infinite bus with SVC system

3. 자기조정 퍼지제어 기법

3.1 퍼지 추론

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[14-16]. 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 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_p : \text{If } x_1 \text{ is } A_{p1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{p2} \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_{pn} \text{ Then } y \text{ is } B_p \quad (p=1, 2, \dots, r) \quad (3)$$

여기서, R_p 는 p번째의 물이고, $A_{p1}, A_{p2}, \dots, A_{pn}$ 은 입력 변수의 퍼지변수, B_p 는 출력변수의 실수치를 나타낸다. 입력 데

이터에 대해 식 (3)의 추론 결과는 식 (4)와 같다.

$$\mu_p = \prod_{j=1}^n \mu_{A_{pj}}(x_j) \quad (4)$$

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 (5)로 나타내어진다.

$$y^* = \frac{\sum_{p=1}^r \mu_p \cdot B_p}{\sum_{p=1}^r \mu_p} \quad (5)$$

퍼지추론을 하기 위해서는 우선 퍼지화에 따른 멤버십 함수가 정의되어야 한다. 멤버십 함수는 삼각형, 사다리형, 종형 등이 있으며, 여기서는 일반적으로 많이 사용되고 계산하기에 편리한 삼각형을 사용하였다. 그림 3은 삼각형 멤버십 함수를 발생시키기 위한 모형이며, 삼각형 멤버십 함수의 파라미터 $\mu_{A_{pj}}(x_j)$ 의 결정은 식 (6)에서 계산된다.

$$\mu_{A_{pj}}(x_j) = 1 - \frac{2|x_j - C_{pj}|}{W_{pj}} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

여기서, C_{pj} 는 멤버십 함수의 중심(center) 값으로 적합도가 최대가 되는 값이고, W_{pj} 는 멤버십 함수의 폭(width)을 나타낸다.

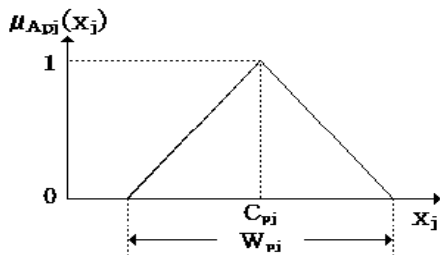


그림 3 삼각형 멤버십 함수
Fig. 3 Symmetric triangular membership function

3.2 최급강하법에 의한 자기조정 알고리즘

PSS의 결과로부터 얻어진 입·출력 데이터 쌍(x_j, y) 즉, 각속도 편차 ω_Δ 와 그 미분치 $\frac{d\omega_\Delta}{dt}$ 를 입력으로 한 퍼지 제어기의 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 (7)의 E가 최소가 되도록 반복 학습하여 동조시킨다.

$$E = \frac{1}{2} (y - y^*)^2 \quad (7)$$

최급 강하법에서는 입력 데이터 x_j 가 입력된 경우, 퍼지추론의 추론치 y^* 와 출력치 y 와의 추정오차의 제곱 E가 최소로 되도록 최적화한다. 이때 각 조정 파라미터에 대해 E의 값이 최대로 감소하는 방향을 나타내는 벡터는

$$\left[-\frac{\partial E}{\partial C_{pj}} \quad -\frac{\partial E}{\partial W_{pj}} \quad -\frac{\partial E}{\partial B_p} \right]$$

로 되고, 식 (8)~(10)과 같은 학습법칙으로 동조한다.

$$C_{pj}(t+1) = C_{pj}(t) - G_{Cj} \cdot \frac{\partial E}{\partial C_{pj}} \quad (8)$$

$$W_{pj}(t+1) = W_{pj}(t) - G_{Wj} \cdot \frac{\partial E}{\partial W_{pj}} \quad (9)$$

$$B_p(t+1) = B_p(t) - G_B \cdot \frac{\partial E}{\partial B_p} \quad (10)$$

$$\text{단, } \frac{\partial E}{\partial C_{pj}} = \frac{\mu_p}{\sum_{p=1}^r \mu_p} \cdot (y - y^*) \cdot (B_p - y) \cdot \text{sgn}(x_j - C_{pj}) \cdot \frac{2}{W_{pj} A_{pj}(x_j)}$$

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

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

여기서 G_{Cj} , G_{Wj} , G_B 는 각 벡터량에 따라 정해지는 학습계수이며, 식 (8)~(10)은 충분한 학습횟수에 의해 수렴되는 것으로 하며, 부호함수는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{sgn}(z) = 1(z \geq 0), \quad \text{sgn}(z) = -1(z < 0) \quad (11)$$

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 기존의 PSS 제어를 포함한 SVC 시스템은 그림 4와 같다. 단자 전압과 기준 전압과의 오차 $V_{ref} - V_t$ 를 입력으로 하여 SVC의 서셉턴스 B_L 을 조절하여 단자전압을 제어하는 신호가 되는데, 제어기의 입력으로 보조안정화 신호 U_e 를 추가하면 제어성능은 향상된다. 따라서 보조안정화 신호를 출력으로 하는 PSS를 구성하였고, PSS의 입력변수는 발전기 동기속도의 오차 ω_Δ 로 선정하였다. PSS의 입력 변수를 이와 같이 선정한 이유는 본 논문의 대상시스템인 IEEE Benchmark 모델에 발전기가 연결되어 있으며, 시스템 외란에 따라서 발전기 속도가 변동하기 때문이다. 이와 같이 PSS의 적용목적이 SVC의 서셉턴스를 제어하여 단자전압을 제어하는 것이다. 본 논문에서 사용한 동기기, 여자기, 전송선로, SVC 및 종래의 PSS 파라미터는 표 1과 같다.

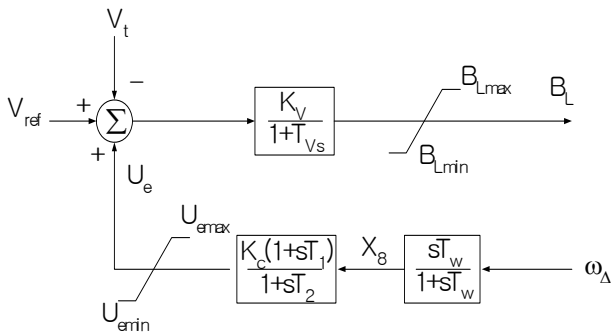


그림 4 PSS를 포함한 SVC 시스템
Fig. 4 Block diagram of SVC system with PSS

표 1 시스템 파라미터[p.u.]

Table 1 System parameters[p.u.]

Synchronous Machine	Excitation System and Transmission line	SVC system	PSS parameter
$x_d=1.7$ $x_q=1.64$ $x_d'=0.245$ $D=0.0$ $H=2.37$ $\tau_{d0}'=5.9$	$K_A=400, T_A=0.05$ $K_F=0.025, T_F=1.0$ $K_E=-0.17, T_E=0.95$ $V_{Rmax}=5.04$ $V_{Rmin}=-5.04$ $S_{Emax}=0.02$ $S_{Emin}=0.001$ $R_e=0.02$ $X_e=0.4$	$K_v=10.0$ $T_v=0.15$ $B_c=0.6$ $X_T=0.08$ $B_{L0}=-0.45$ $B_{Lmax}=-0.3$ $B_{Lmin}=-0.9$ $U_{emax}=0.12$ $U_{emin}=-0.12$	$K_c=7.09$ $T_w=0.3$ $T_1=0.685$ $T_2=0.1$

전력계통의 안정화를 위한 퍼지제어를 설계하기 위해서는 먼저 일반적인 룰이 생성되어야 한다. 본 시스템에서 사용한 퍼지제어의 구성도는 그림 5와 같다.

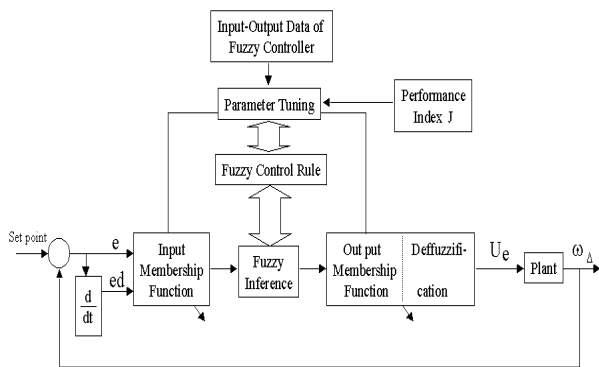


그림 5 안정화를 위한 퍼지제어 시스템
Fig. 5 fuzzy control system for stabilization

여기에 적용되는 퍼지제어 룰은 식 (12)와 같은 형태이다.

$$\text{If } e \text{ is } A_1 \text{ and } ed \text{ is } A_2 \text{ Then } u_e \text{ is } B \quad (12)$$

여기서, e 는 ω_Δ 의 출력치와 목표치와의 오차, ed 는 ω_Δ 의

오차 변화율 그리고 u_e 는 제어입력을 표시한다.

전건부와 후건부의 퍼지변수는 오차와 오차변화율에 대해 각각 5개로 구성하였으며, 전체적인 제어규칙은 표 2와 같이 선정하였다.

표 2 제어규칙

Table 2 Control rules

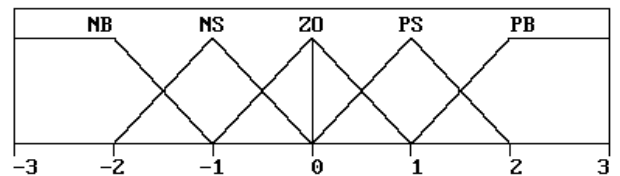
u_e	e				
	NB	NS	ZO	PS	PB
ed	PB	ZO	PS	PB	PB
	PS	NS	ZO	PS	PB
	ZO	NB	NS	ZO	PS
	NS	NB	NB	NS	ZO
	NB	NB	NB	NB	NS

PB : Positive Big PS : Positive Small

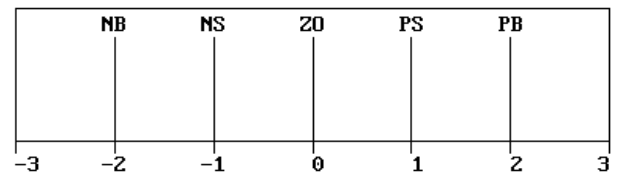
ZO : Zero

NS : Negative Small NB : Negative Big

제시된 제어규칙에 대한 전건부와 후건부의 멤버십 함수는 그림 6과 같으며, 표 3은 초기상태 멤버십 함수에 있어서 각각의 중심치와 폭을 나타낸 것이다.



(a) Antecedent part



(b) Consequent part

그림 6 전건부와 후건부의 소속함수

Fig. 6 Membership functions of antecedent and consequent part.

표 3 멤버십 함수의 초기값

Table 3 Initial values of membership functions

	e		ed		u_e
	C_{p1}	W_{p1}	C_{p2}	W_{p2}	B_p
N	-2.0000	2.0000	-2.0000	2.0000	-2.0000
NS	-1.0000	2.0000	-1.0000	2.0000	-1.0000
Ø	0.0000	2.0000	0.0000	2.0000	0.0000
B	1.0000	2.0000	1.0000	2.0000	1.0000
B	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 취하

여 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 입력·출력 데이터 쌍(x_j , y) N 개를 얻는다.

단계 3 : 입력 데이터 x_j 에 대한 퍼지추론을 수행한다. 각 추론규칙의 적합도 μ_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 μ_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 (13)을 만족하면 학습과정을 종료하고, 만족하지 못하면 단계 2로 되돌아간다.

$$J = \int (\alpha V_{t\Delta}(t)^2 + \beta \omega_{\Delta}(t)^2 + \gamma \delta_{\Delta}(t)^2) dt < \epsilon \quad (13)$$

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

그림 7은 제시한 학습과정에 따라 학습 후 조정된 각각의 멤버십 함수이고, 표 4는 최적화 된 멤버십 함수의 중심치와 폭을 나타낸 것이다.

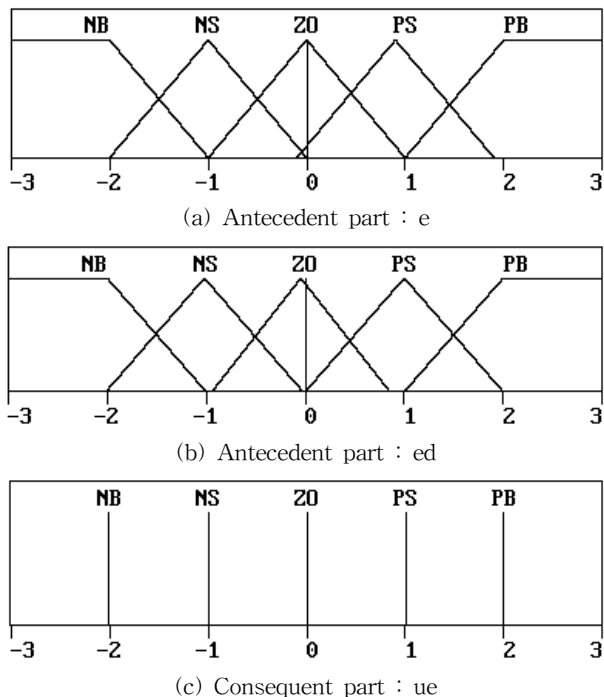


그림 7 조정된 소속 함수

Fig. 7 Tuned membership functions

표 4 조정된 소속 함수값

Table 4 Values of tuned membership functions

	e		ed		u_e
	C_{p1}	W_{p1}	C_{p2}	W_{p2}	B_p
N	-2.0000	2.0000	-2.0000	2.0000	-2.0112
S	-1.0000	2.0000	-1.0173	1.9924	-1.0011
Ø	-0.0005	2.0000	-0.0042	1.9992	0.0000
B	0.8998	2.0008	1.0000	2.0000	1.0017
B	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000

4.1 사례 연구 1 : 전력변환시

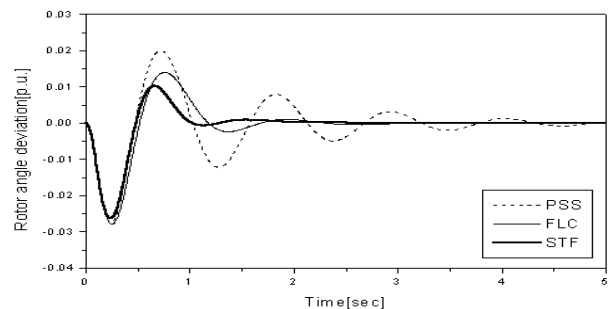
첫 번째 사례 연구로는 초기전력을 100[ms]동안 3[%] 변동시켰을 때 경부하($P_e=0.7$, $Q_e=0.595$) 중부하($P_e=1.3$, $Q_e=0.595$) 조건 하에서 SVC를 포함한 시스템에 전력시스템 안정화장치(Power System Stabilizer : PSS)를 적용한 경우, 퍼지제어기(Fuzzy Logic Controller : FLC)를 적용한 경우 및 제안한 자기조정 퍼지제어기(Self-Tuning Fuzzy Controller : STF)를 적용한 경우에 대하여 비교·고찰하였다. 표 5는 식 (13)의 평가함수를 사용하여 각 제어기법에 따른 제어성능을 비교하였다.

표 5 전력 변화 시 평가함수

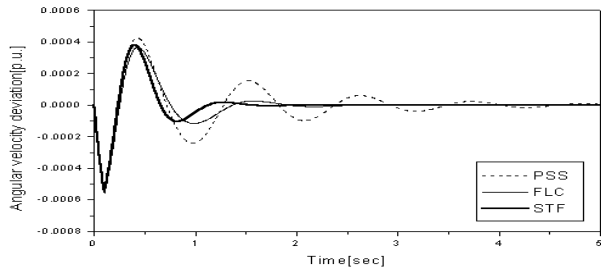
Table 5 Performance indices when decreasing power disturbance

Performance Index (J)	PSS	FLC	STF
Light load	7.46×10^{-5}	5.22×10^{-5}	3.85×10^{-5}
Heavy load	2.55×10^{-5}	2.16×10^{-5}	1.83×10^{-5}

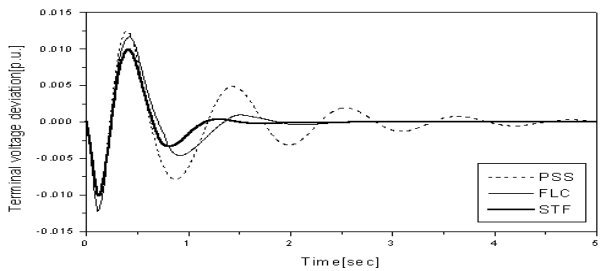
그림 8과 9는 경부하시, 중부하시의 제어 기법에 따른 응답특성을 회전자 각, 각속도 및 단자전압 편차에 대한 응답을 나타낸 것이다. 먼저, 각각의 응답특성을 비교해보면 퍼지제어기가 전력시스템 안정화장치보다 각각의 응답에 대해 최대 편차량의 감소뿐만 아니라 정정 시간에서도 빠른 수렴 특성을 보이고 있다. 다음으로, 퍼지제어기와 제안한 자기조정 퍼지제어기의 비교 응답에서 제안한 제어기가 제어특성이 우수함을 보이고 있다. 뿐만 아니라 광범위하고 복잡한 계통에 대해서도 안정적이고 효율적인 제어성능을 유지함을 알 수 있었다.



(a) Rotor angle deviation



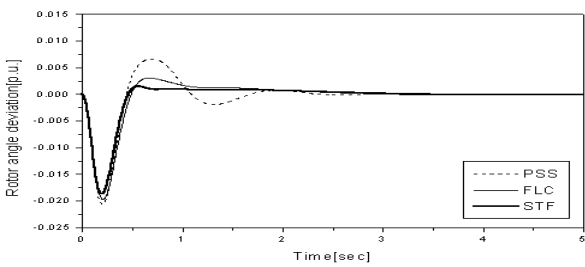
(b) Angular velocity deviation



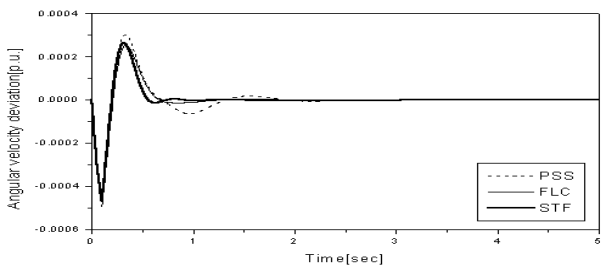
(c) Terminal voltage deviation

그림 8 경부하시 초기전력을 100[ms] 동안 3%의 변동시 발전기의 응답

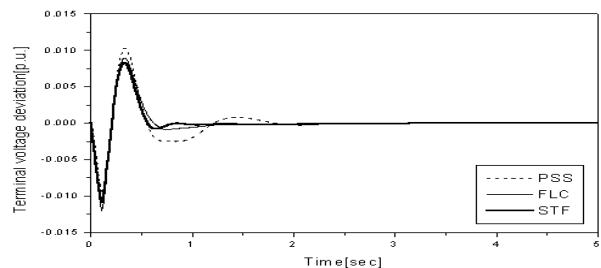
Fig. 8 Responses of generator when decreasing power 3% disturbance duration 100[ms] in light load



(a) Rotor angle deviation



(b) Angular velocity deviation



(c) Terminal voltage deviation

그림 9 중부하시 초기전력을 100[ms] 동안 3%의 변동시 발전기의 응답

Fig. 9 Responses of generator when decreasing power 3% disturbance duration 100[ms] in heavy load

4.2 사례 연구 2 : 회전자 각 변동시

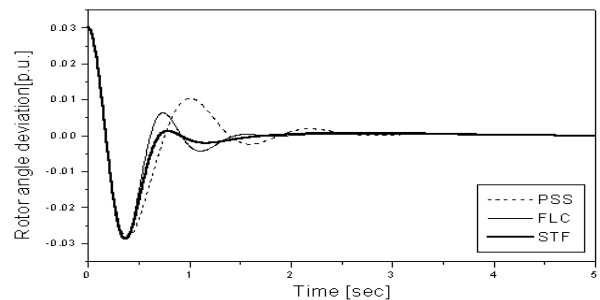
두 번째 사례 연구로는 초기 회전자 각을 $\delta_{\Delta}=0.03[p.u.]$ 로 주었을 때, SVC를 포함한 시스템에 대해 각각의 제어기법에 따른 평가함수를 표 6에 나타내었다. 이때 제안한 제어기법이 종래의 제어기법들 보다 제어능력이 우수함을 보이고 있다.

표 6 회전자 각의 변화 시 평가함수

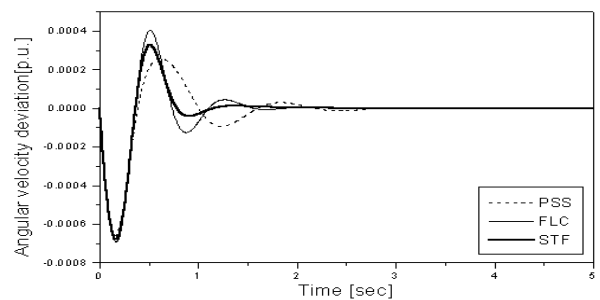
Table 6 Performance indices when increasing rotor angle deviation

Performance Index	PSS	FLC	STF
J	7.59×10^{-5}	5.88×10^{-5}	5.71×10^{-5}

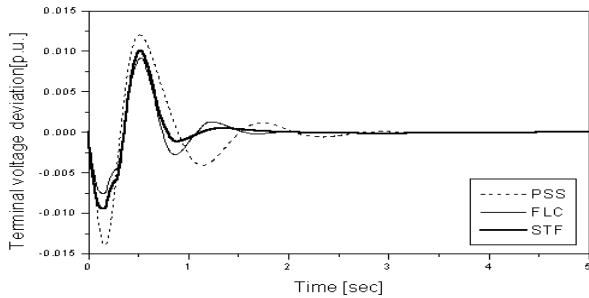
또한, 회전자 각, 각속도 및 단자전압 편차에 대한 응답을 그림 10과 같이 나타낸 것이다. 먼저, 회전자 각 편차에 있어서 PSS와 FLC의 비교에서는 PSS 응답특성이 큰 값을 가지고 장시간 진동하고 있으나 FLC에서는 진동없이 다소의 잔류편차를 가지고 수렴하였으며, 최대편차량도 약 50%의 감소를 보이고 있다. 반면에 STF는 최대편차량이 PSS보다 약 90%정도 감소 시켰을 뿐만 아니라 FLC보다 더 신속하게 정상상태로 수렴되고 잔류편차량도 최소화시킬 수 있었다. 또한 각속도 편차 및 단자전압 응답특성에서도 종래의 PSS 및 FLC 보다 STF가 최대편차량과 정정시간 등을 더욱 감소시킬 수 있음을 보여주고 있다. 이상의 결과로부터 PSS의 응답특성이 장시간의 진동으로 수렴특성이 좋지 못한데 비해 FLC는 과도시 응답 뿐만 아니라 수렴특성도 우수함을 볼 수 있었지만 잔류편차가 잔존하였다. 이러한 문제점의 해결 방법으로 최급강하법을 이용하여 제안한 STF제어기를 적용하므로써 이를 해소하고 수렴특성도 더욱 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.



(a) Rotor angle deviation



(b) Angular velocity deviation



(c) Terminal voltage deviation

그림 10 초기 회전자각 편차 변동시 발전기의 응답

Fig. 10 Responses of generator when increasing rotor angle deviation

6. 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 수립시킬 수 있는나의 여부에 달려 있다.

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

첫째, 종래의 제어기법 PSS인 경우 전력변화 및 초기 회전자 각의 변화에 대해 단자전압, 각속도 및 회전자각 편차의 특성에서 장시간의 진동으로 수립 특성이 좋지 못한데 비해 퍼지제어기(FLC)는 각각의 최대 편차량, 정지시간 등의 특성에서 우수함을 보였으나, 정상상태에서 다소의 잔류편차가 잔존하고 있었다. 따라서, 이러한 문제점을 보완하기 위해 최급강하법을 이용하여 퍼지변수의 중심치 및 폭을 반복 학습하여 최적의 퍼지변수를 구할 수 있었다.

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

참 고 문 헌

[1] A. E. Hammad, "Analysis of Power System Stability Enhancement by Static Var Compensators", IEEE Trans. PWRS, Vol. 1, No. 4, pp. 222-227, 1986.
 [2] 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.
 [3] C. H. Cheng and Y. Y. Hso, "Application of a Power System Stabilizer and a Static Var Controller to a

Multi-machine Power System", IEE Proc., Vol. 137, No. 1, pp. 8-12, 1990.
 [4] P. M. Anderson and A. A. Found, "Power System Control and Stability", IEEE Press. New York, 1993
 [5] 손광명, 김동현, 이태기, 장길수, 윤용범, 이진, "서대구 SVC 및 제어시스템 분석", 전기학회지, 제 50권, 제 7호, pp. 37-44, 2001
 [6] 문경섭, 손광명, 이태기, 이송근, 박종근, "무효전력 보상여유를 고려한 SVC와 ULTC의 협조제어", 전기학회논문지, 제 48권, 제 4호, pp. 351-357, 1999
 [7] K. Bollinger et al, "Power System Stabilizer Design using Root-Locus Method", IEEE Trans. on PAS, Vol. 94, No. 5, pp. 1484-1488, 1975
 [8] R. J. Fleming, M. A. Mohan and K. Parvatisam, "Selection of Parameters of Stabilizers in Multimachine Power System", IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, No. 5, pp. 2329-2333, 1981
 [9] O. H. Abdalla, et al, "Coordinated Stabilization of Multimachine Power System", IEEE Trans. on PAS, Vol. 103, No. 3, pp. 483-491, 1984
 [10] 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
 [11] C. J. We and Y. Y. Hsu, "Design of Self-Tuning PID Power System Stabilizer of Multimachine Power System", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 3, No. 3, 1988
 [12] C. S. Chen and C. T. Hsu, "The Simplified Linear Model Derivation of Power Systems with Static VAR Compensators to Improve System Damping", IEEE/KTH Stockholm Power Tech Conference, pp. 370-375, 1995
 [13] 주식민, 허동렬, 김상효, 정동일, 정형환, "퍼지-PI 제어기를 이용하여 정지형 무효전력 보상기를 포함한 동기발전기의 안정도 개선에 관한 연구", 한국조명·설비학회논문지, 제 15권, 제 3호, pp. 57-66, 2001
 [14] A. Ishigame, T. Imoto, et al., "Combination of Fuzzy and Optimal Controls for Stabilizing Power System", IEE J., Vol. 110, No. 10, 1990
 [15] M. A. Iskandar, "Stabilizing Control of Power system using Fuzzy Control", IEE J., Vol. 112, No. 12, pp. 1111-1120, 1992
 [16] 정형환, 주식민, 정동일, 김상효, 이정필, "새로운 FPID제어기를 이용한 2지역 전력계통의 부하주파수제어", 전기학회 논문지, 제 47권, 제 5호, pp. 541-548, 1998

저 자 소 개



주 석 민(朱碩珉)

1965년 5월 11일 생. 1992년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 창원대 메카트로닉스 공학부 BK21 교수

Tel : 055-279-8048

Fax : 055-267-5142

E-mail : joosm@sarim.changwon.ac.kr



허 동 렬(許東烈)

1969년 11월 10일 생. 1995년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 동 대학 정보기술연구소 특별연구원.

Tel : 051-200-6747

Fax : 051-200-7743

E-mail : drhur@donga.ac.kr



김 해 재(金海在)

1957년 5월 29일 생. 1980년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 마산대 컴퓨터전 기공학부 부교수

Tel : 055-230-1330

Fax : 055-231-3532

E-mail : hjkim@masan-c.ac.kr