

SVC계통의 안정도 향상을 위한 파라미터 자기조정 퍼지제어기의 설계

(A Design of Parameter Self Tuning Fuzzy Controller to Improve
Power System Stabilization with SVC System)

주석민*

(Seok-Min Joo)

요 약

본 논문에서는 전력계통의 안정도를 향상시키기 위하여 동기 발전기와 정지형 무효전력 보상기에 대한 파라미터 자기조정 퍼지제어기의 설계 기법을 제시한다. 제안된 퍼지제어기의 파라미터 자기조정 알고리즘은 퍼지제어기의 추론값과 전력계통안정화 장치의 출력값들 사이의 오차를 감소시키는 두 개의 방향 벡터를 사용하는 최급강하법에 기초를 둔다. 전력계통안정화 장치로부터 얻어진 입·출력 데이터쌍을 사용하여, 퍼지추론 규칙의 전건부와 후건부에서의 파라미터들은 제안된 최급강하법에 의해 자동조정되고 학습되어진다. 시뮬레이션 결과, 제안된 퍼지제어기가 종래의 제어기보다 우수한 제어성능을 보임을 확인하였다.

Abstract

In this paper, it is suggested that the selection method of parameter of Power System Stabilizer(PSS) with robustness in low frequency oscillation for Static VAR Compensator(SVC) using a self tuning fuzzy controller for a synchronous generator excitation and SVC system. 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.

Key Words : Power System Stabilization, Static Var Compensator, Steepest Descent Method

1. 서 론

* 주저자 : 창원대학교 진동내구성평가센터 전담교수
Tel : 055-213-3879, Fax : 055-281-5545
E-mail : joosm@changwon.ac.kr
접수일자 : 2008년 12월 15일
1차심사 : 2008년 12월 18일
심사완료 : 2008년 12월 24일

정지형무효전력보상기(Static Var Compensator : SVC)는 모선전압의 제어가 기본적인 제어의 목적이며 부가적으로 과도안정도 향상, 전력동요억제, 저주파진동의 억제 등의 다양한 제어가 가능하다. 이리

SVC계통의 안정도 향상을 위한 파라미터 자기조정 퍼지제어기의 설계

한 SVC는 국내에서도 채택되어 대구지역의 전압강하 문제를 해결하기 위하여 설치 운전 중에 있다. 그러나 SVC는 전력수요 증가에 따른 저주파 진동 현상, 경부하 심야 운전 중의 전압 상승 등 시스템 안정도 문제를 완벽히 해결 할 수 없다[1-3]. 이와 같이 전력계통의 저주파 진동을 억제하고 계통의 안정도 특성을 향상시키기 위해서 발전기 제어장치인 전력계통안정화장치(Power System Stabilizer : PSS)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[3-4].

따라서 본 논문에서는 최근 시스템의 선형, 비선형성을 불문하고 제어대상의 정확한 모델화 없이도 전문가의 지식 및 경험만을 기초로 한 제어규칙으로부터 퍼지추론을 행하여 제어 동작을 결정하는 퍼지 제어를 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 이용하므로써 최적인 파라미터를 얻을 수 있었다. 이러한 제안된 방법의 강인성을 검증하기 위해 여러 가지 운전조건에 대해 전력계통 안정도를 해석하여 기존의 안정화 장치를 적용한 경우와 비교함으로써 유용성을 입증하였다.

2. 전력계통의 수학적 모델

2.1 전력계통 모델

SVC는 빠른 응답속도를 가지고 연속적으로 무효 전력을 보상함으로써, 제어 범위 내에서는 내부 인덕턴스를 가지는 전압원으로 동작하며 일정 전압을 유지하고, 제어 범위를 벗어나면 고정된 용량을 가지는 커패시터 또는 리액터로 표현되게 된다. 즉, 제어 범위 내에서 SVC는 우수한 동적 전압안정도 특성과 전압제어 특성을 나타낸다[2-3]. 본 연구에서 고찰하고자 하는 SVC를 포함한 1기 무한대 모선 계통 모델은 그림 1과 같다.

여기서 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[1-2].

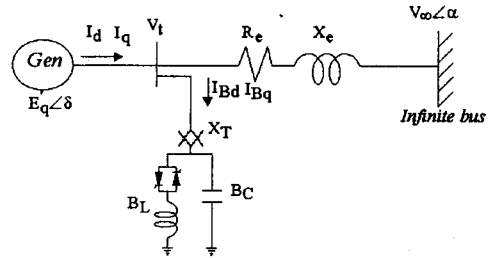


그림 1. SVC 시스템을 포함한 1기 무한 모선 계통
Fig. 1. Single machine-infinite bus with SVC system

또한, 본 논문에서는 동적 안정도 해석을 위한 전력계통의 선형화된 방정식을 유도하기 위하여 송전선로를 통하여 무한모선에 연결된 IEEE Type 1의 여자기를 가진 동기기로 구성된 전력계통 모델을 이용하였으며, 식 (1)~(6) 같은 선형화된 시스템 방정식을 유도할 수 있다.

$$\dot{\delta}_\Delta = \omega_r \omega_\Delta \quad (1)$$

$$\dot{\omega}_\Delta = -\frac{K_1}{M} \delta_\Delta - \frac{D}{M} \omega_\Delta - \frac{K_2}{M} E'_{q\Delta} + \frac{1}{M} T_{m\Delta} \quad (2)$$

$$\dot{E}'_{q\Delta} = -\frac{K_4}{T'_{d0}} \delta_\Delta - \frac{1}{K_3 T'_{d0}} E'_{q\Delta} + \frac{1}{T'_{d0}} E_{FD\Delta} \quad (3)$$

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

$$\dot{V}_{R\Delta} = -\frac{K_5 K_A}{T_A} \delta_\Delta - \frac{K_6 K_A}{T_A} E'_{q\Delta} - \frac{1}{T_A} V_{R\Delta} - \frac{K_A}{T_A} V_{E\Delta} + \frac{K_A}{T_A} U_c \quad (5)$$

$$\dot{V}_{E\Delta} = -\frac{K_F (S_E + K_E)}{T_E T_F} E_{FD\Delta} + \frac{K_F}{T_E T_F} V_{R\Delta} - \frac{1}{T_F} V_{E\Delta} \quad (6)$$

2.2 전력계통 안정화 장치의 구조

그림 2는 PSS의 한 모델이다[3]. 전달 함수 GEP(s)는 동기기의 회전자각이 일정할 때, 여자기 입력에 대한 전기적 토오크간의 전달 함수를 나타내고, 동기기와 여자기 특성에 의해 결정된다.

여기에서 $T_{ep\Delta}$ 는 PSS에 의해 발생하는 토오크 성분이고, 그 밖의 요소들에 의해 발생하는 토오크 성분은 $T_{e0\Delta}$ 이다.

이때 PSS신호에 의한 토오크 성분은 식 (7)과 같다.

$$\frac{T_{ep\Delta}}{\omega_{\Delta}} = \text{PSS}_{\omega}(s) \geq P(s) \quad (7)$$

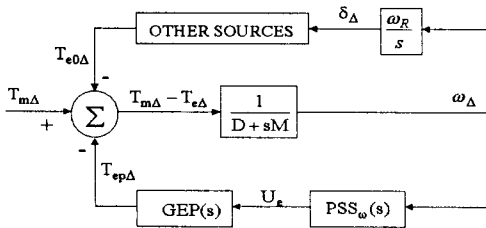


그림 2. 회전자 속도를 입력으로 하는 PSS
Fig. 2. Functional representation of PSS with rotor speed as input

3. 자기조정 퍼지제어 기법

3.1 퍼지추론

퍼지제어기(Fuzzy Logic Controller : FLC)의 일반적인 구성은 사실과 결론을 IF~Then 형식으로 조작 모델을 서술하는 퍼지제어규칙부와 퍼지입력으로부터 얻어진 결과를 합성하여 아날로그 출력을 연산하는 퍼지 추론부 및 퍼제어 프로세스부로 크게 나눌 수 있다[5-6].

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. 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. 그림 3은 삼각형 멤버십 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(center) 값으로 적합도가 최대가 되는 값이고, W_{pj} 는 멤버십 함수의 폭(width)을 나타낸다.

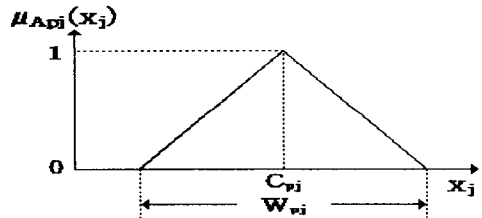


그림 3. 삼각형 멤버십 함수
Fig. 3. Symmetric triangular membership function

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

SVC계통의 안정도 향상을 위한 파라미터 자기조정 퍼지제어기의 설계

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. 최급강하법을 이용한 퍼지 추론의 자기조정 수법으로 전건부의 멤버쉽 함수의 폭과 중심치 및 후건부의 파라미터를 식 (12)의 E가 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 E가 최소로 되도록 최적화한다. 이때 각 조정 파라미터에 대해 E의 값이 최대로 감소하는 방향을 나타내는 벡터는 $[-\frac{\partial E}{\partial C_{pi}} - \frac{\partial E}{\partial W_{pi}} - \frac{\partial E}{\partial B_p}]$ 로 되고, 식 (13)~(15)와 같은 학습법칙으로 동조한다.

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

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

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

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

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

4. 결과 및 고찰

본 논문에서는 기존의 PSS 제어기를 포함한 SVC

시스템은 그림 4와 같다.

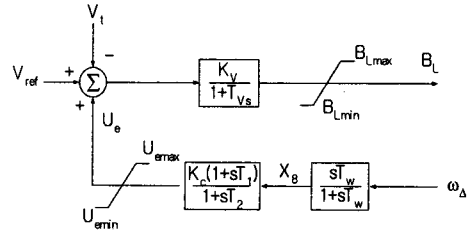


그림 4. PSS를 포함한 SVC 시스템
Fig. 4. Block diagram of SVC system with PSS

단자 전압과 기준 전압과의 오차 $V_{ref} - V_t$ 를 입력으로 하여 SVC의 서셉턴스 B_L 을 조절하여 단자전압을 제어하는 신호가 되는데, 제어기의 입력으로 보조안정화신호 U_e 를 추가하면 제어성능은 향상된다. 따라서 보조안정화 신호를 출력으로 하는 PSS를 구성하였고, PSS의 입력변수는 발전기 동기속도의 오차 $\omega \Delta$ 로 선정하였다. 본 논문에서 사용한 동기기, 여자기, 전송선로, SVC 및 종래의 PSS 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 시스템 파라미터(p.u.)
Table 1. System parameters(p.u.)

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

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

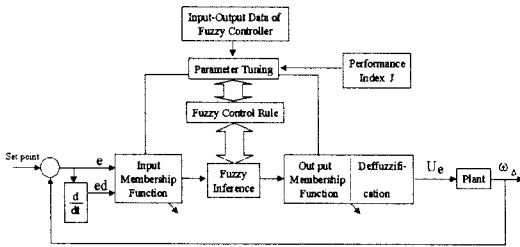


그림 5. 안정화를 위한 퍼지제어 시스템의 블록선도
Fig. 5. Block-diagram of fuzzy control system for stabilization

여기에 적용되는 퍼지제어 룰은 식 (17)과 같은 형태이다.

If e is A_1 and ed is A_2 Then ue is B (17)

여기서, e 는 ω_Δ 의 출력치와 목표치와의 오차, ed 는 ω_Δ 의 오차 변화를 그리고 ue 는 제어입력을 표시한다.

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

표 2. 제어규칙
Table 2. Control rules

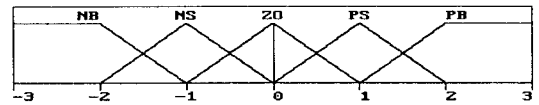
ue		e				
		NB	NS	ZO	PS	PB
ed	PB	ZO	PS	PB	PB	PB
	PS	NS	ZO	PS	PB	PB
	ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
	NS	NB	NB	NS	ZO	PS
	NB	NB	NB	NB	NS	ZO

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

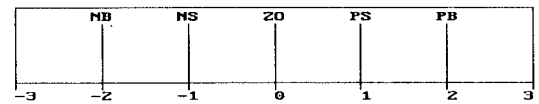
제시된 제어규칙에 대한 전건부와 후건부의 멤버십 함수는 그림 6과 같으며, 표 3은 초기상태 멤버십 함수에 있어서 각각의 중심치와 폭을 나타낸 것이다.

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



(a) Antecedent part

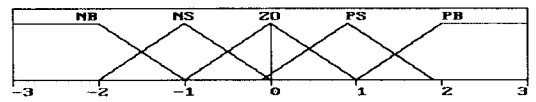


(b) Consequent part

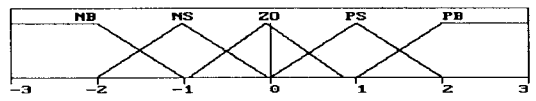
그림 6. 전건부와 후건부의 소속함수
Fig. 6. Membership functions of antecedent and consequent part

표 3. 멤버십 함수의 초기값
Table 3. Initial values of membership functions

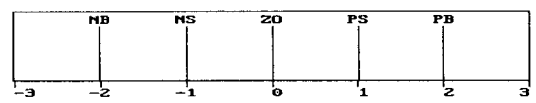
	e		ed		ue
	Cp1	Wp1	Cp2	Wp2	Bp
NB	-2.0000	2.0000	-2.0000	2.0000	-2.0000
NS	-1.0000	2.0000	-1.0000	2.0000	-1.0000
ZO	0.0000	2.0000	0.0000	2.0000	0.0000
PS	1.0000	2.0000	1.0000	2.0000	1.0000
PB	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000



(a) Antecedent part : e



(b) Antecedent part : ed



(c) Consequent part : ue

그림 7. 조정된 소속 함수
Fig. 7. Tuned membership functions

SVC계통의 안정도 향상을 위한 파라미터 자기조정 퍼지제어기의 설계

표 4. 조정된 소속 함수값

Table 4. Values of tuned membership functions

	e		ed		ue
	C _{p1}	W _{p1}	C _{p2}	W _{p2}	B _p
NB	-2.0000	2.0000	-2.0000	2.0000	-2.0112
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

사례 연구로는 초기전력을 100[ms]동안 3[%] 변동시켰을 때 경부하(Pe=0.7, Qe=0.595) 중부하(Pe=1.3, Qe=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 Cont-

roller : STF)를 적용한 경우에 대하여 비교·고찰하였다. 표 5는 식 (18)의 평가함수를 사용하여 각 제어기법에 따른 제어성능을 비교하였다.

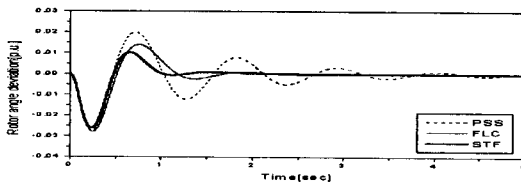
표 5. 부하 변화 시 평가함수

Table 5. Performance indices when decreasing power disturbance

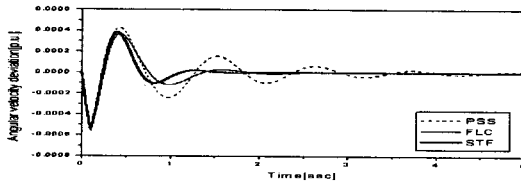
Performance Index (J)	PSS	FLC	STF
Light load	7.46×10^{-5}	5.22×10^{-5}	3.85×10^{-5}
Heavy load	2.55×10^{-5}	2.16×10^{-5}	1.83×10^{-5}

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

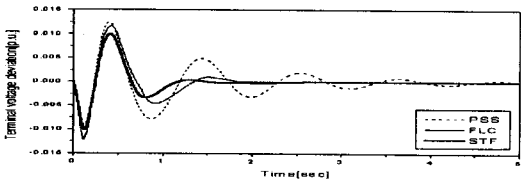
여기서 $\alpha=0.0016$, $\beta=1.0$ 및 $\gamma=0.005$ 이다.



(a) Rotor angle deviation

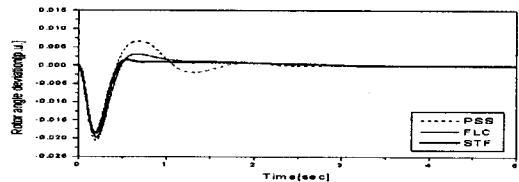


(b) Angular velocity deviation

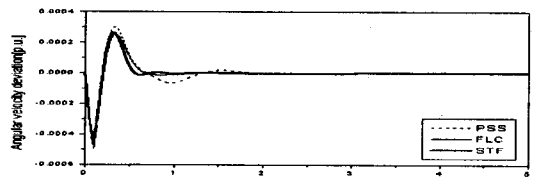


(c) Terminal voltage deviation

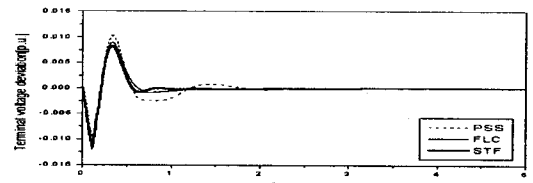
그림 8. 경부하시 초기전력을 100(ms) 동안 3[%]의 변동시 발전기의 응답
Fig. 8. Responses of generator when decreasing power 3[%] disturbance duration 100(ms) in light load



(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

그림 8과 9는 경부하시, 중부하시의 제어 기법에 따른 응답특성을 회전자 각, 각속도 및 단자전압 편차에 대한 응답을 나타낸 것이다. 제안한 제어기가 제어특성이 우수함을 보이고 있다. 뿐만 아니라 광범위하고 복잡한 계통에 대해서도 안정적이고 효율적인 제어성능을 유지함을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 전력시스템의 안정도를 향상시키기 위하여 동기발전기의 정지형 무효전력 보상기를 포함한 계통의 제어기를 퍼지제어기로 구성하고, 최급강화법을 이용하여 퍼지변수의 전전부 및 후전부의 파라미터를 자기조정함으로써 더욱 개선된 제어기를 구성하였다. 이를 확인하기 위한 대상으로는 종래의 제어기법인 PSS와 퍼지제어기를 제안한 제어기법인 파라미터 자기조정 제어기법과 비교하여 더욱 개선된 제어성능을 보일 수 있음을 확인하였다.

References

- [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] P. M. Anderson and A. A. Found, "Power System Control and Stability", IEEE Press, New York, 1993.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] A. Ishigame, T. Imoto, et al., "Combination of Fuzzy and Optimal Controls for Stabilizing Power System", IEE J., Vol. 110, No. 10, 1990.
- [6] M. A. Iskandar, "Stabilizing Control of Power system using Fuzzy Control", IEE J., Vol. 112, No. 12, pp. 1111-1120, 1992.

◆ 저자소개 ◆

주석민 (朱碩珉)

1965년 5월 11일생. 1992년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 창원대학교 진동내구성평가센터 전담교수.

관심분야 : 전력시스템제어, 전력시스템 품질