

## 퍼지-PI 제어를 이용하여 정지형 무효전력 보상기를 포함한 동기 발전기의 안정도 개선에 관한 연구

(A Study on Damping Improvement of a Synchronous Generator with Static VAR  
Compensator using a Fuzzy-PI Controller)

주석민\* · 허동렬\*\* · 김상효\* · 정동일\* · 정형환\*\*\*

(Seok-Min Joo · Dong-Ryol Hur · Sang-Hyo Kim · Dong-Il Chung · Hyeng-Hwan Chung)

### 요 약

본 논문에서는 전력계통의 안정도를 향상시키기 위하여 동기 발전기와 정지형 무효전력 보상기에 대한 퍼지-PI 제어를 설계하기 위한 제어 기법을 설명하였다. 정지형 무효전력 보상기는 고정된 용량의 커패시터와 사이리스터 제어에 의하여 용량이 가변되는 인덕터가 병렬로 연결된 구조를 가지고 있으며, 시스템 전압을 제어할 뿐만 아니라 동기 발전기의 제동을 개선하기 위해 설계되었다. 본 논문에서 제안한 SVC 계통의 퍼지-PI 제어기의 파라미터는 퍼지 추론 기법에 의해 자동 동조되어진다. 퍼지 추론 기법은 일반적인 기법과는 달리 인간의 경험과 전문가의 지식을 제어 규칙으로 제어 동작을 결정하였다. 그리하여 인간의 추론 과정과 매우 유사한 MMGM을 이용하여 PI 이득의 퍼지 추론 기법을 SVC 계통에 적용하여 설명하였다. 제안된 방법의 강인성을 입증하기 위해 중부하시, 정상부하시 및 경부하시에 초기 전력을 변동시킨 경우에 대하여 시스템의 회전자각, 각속도 편차 특성 및 단자전압의 동특성을 고찰하여 기존의 전력시스템안정화장치보다 응답특성이 우수함을 보였다.

### Abstract

This paper presents a control approach for designing a fuzzy-PI 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.

A Fuzzy-PI controller for SVC system was proposed in this paper. The PI gain parameters of the proposed Fuzzy-PI controller which is a special type of PI ones are self-tuned by fuzzy inference technique. It is natural that the fuzzy inference technique should be based on humans intuitions and empirical knowledge. Nonetheless, the conventional ones were not so.

Therefore, In this paper, the fuzzy inference technique of PI gains using MMGM(Min Max Gravity Method) which is very similar to humans inference procedures, was presented and applied to the SVC system. The system dynamic responses are examined after applying all small disturbance condition.

\* 정회원 : 동아대 정보기술연구소 특별연구원 · 공박

\*\* 정회원 : 동아대 대학원 전기공학과 박사과정

\*\*\* 정회원 : 동아대 전기·전자·컴퓨터공학부 교수 · 공박

접수일자 : 2001년 2월 7일

## 1. 서 론

최근 전력계통에 유연성과 제어 성능을 향상시킴으로써 운전 효율과 신뢰도를 극대화 하기 위한 방안으로써 FACTS(Flexible AC Transmission System) 기술이 개발되어 이를 계통에 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적인 FACTS 기기로는 SVC (Static VAR Compensator), TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator), STAT COM(Static Synchronous Compensator), UPFC (Unified Power Flow Controller) 등이 있다[1-3].

FACTS로 분류되는 여러 기기중 기존의 전압제어 및 무효전력보상기들이 가지고 있는 비속응성과 불연속성 문제를 해결해줄 수 있는 정지형 무효전력보상기는, 모선전압의 변동을 감지하여 이에 대응하는 병렬 서셉턴스를 변화시킴으로써 모선전압을 빠르고 연속적으로 제어하는 기기로서, FACTS 기기중 가장 먼저 개발되고 현장에 적용되어 그 효과가 널리 검증되었고, 현재는 완전 실용화 단계에까지 도달하였다. 또한 SVC는 모선전압의 제어가 기본적인 제어의 목적이며 부가적으로 과도안정도 향상, 전력동요억제, 저주파진동의 억제 등의 다양한 제어가 가능하다. 따라서, 그 목적상 주로 부하측 모선에 설치되어 운전되어지며, 기존의 전압제어 기기들과 상호작용이 이루어진다. 이러한 SVC는 국내에서도 채택되어, 대구 지역의 전압강하 문제를 해결하기 위하여 설치 운전 중에 있다[4-7].

따라서, 본 논문에서는 SVC를 포함한 전력계통의 안정도 향상을 위해 퍼지추론 이론이 가지고 있는 장점 즉, 제어대상에 대한 정확한 모델화 없이 추론에 의해 제어동작을 결정하는 퍼지추론 알고리즘(Fuzzy Inference Algorithm)을 기초로 하였으며 [8-10], 다음으로는 산업공정 제어에 가장 많이 활용되고 있는 제어기로서 구조가 간단하지만 좋은 제어 성능을 제공하는 것으로 알려져 있는 PI 제어기 특성을 이용하여, 동기발전기에 대한 비례(P)-적분(I) 요소로 구성된 퍼지-PI 제어기를 설계하였다. 이때 PI 제어기의 각 파라미터는 인간의 경험과 전문가의 지식을 제어 규칙으로 제어동작을 결정하고 인간의 추론과정과 매우 유사한 MMGM (Min Max Gravity Method)을 이용하여 PI 이득을 구하는 기법 즉, 퍼지추론 알고리즘을 이용하여 온라인으로 자동조정

되도록 하였다. 제안된 방법의 강인성을 입증하기 위해 중부하시, 정상부하시 및 경부하시에 초기에 전력이 변동한 경우에 있어서 회전자각 편차의 특성, 각속도 편차의 특성 및 단자전압의 편차 특성을 고찰하였다. 또한 종래의 안정화 장치와도 비교하여 퍼지-PI 제어기의 우수성을 입증하였다.

## 2. 전력 시스템의 수학적 모델

SVC는 빠른 응답속도를 가지고 연속적으로 무효전력을 보상함으로써, 제어 범위내에서는 내부 인덕턴스를 가지는 전압원으로 동작하며 일정 전압을 유지하고, 제어 범위를 벗어나면 고정된 용량을 가지는 커패시터 또는 리액터로 표현되게 된다. 즉, 제어 범위내에서 SVC는 우수한 동적 전압안정도 특성과 전압제어 특성을 나타내고 있으며, 본 연구에서 고찰하고자 하는 SVC를 포함한 1기 무한대 모선 계통 모델은 그림 1과 같다. 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 1에서와 같이, 고정된 용량의 커패시터( $B_C$ )와 사이리스터 제어에 의하여 용량이 가변되는 인덕터( $B_L$ )가 병렬로 연결된 구조를 가지고 있으며, 전체적으로 사이리스터에 의하여 제어되는 가변 서셉턴스(Susceptance,  $B$ )로 볼 수 있다[11-13].

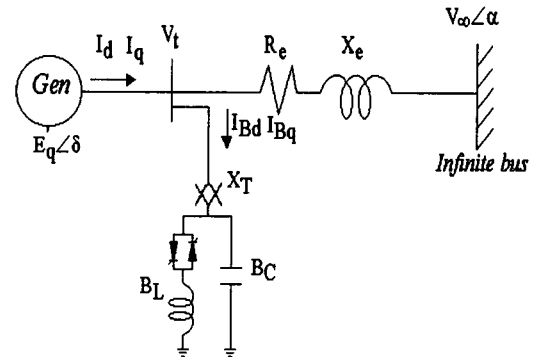


그림 1. SVC 시스템을 포함한 1기 무한 모선 계통  
Fig. 1. Single machine-infinite bus with SVC system

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, 다음과 같은 선형화된 시스템 방정식을 유도할 수 있다.

$$\dot{\delta}_d = \omega_R \omega_d \quad (1)$$

$$\dot{\omega}_d = -\frac{K_1}{2H} \delta_d - \frac{D}{2H} \omega_d - \frac{K_2}{2H} E'_{qd} + \frac{1}{2H} T_{m,d} \quad (2)$$

$$\dot{E}'_{qd} = -\frac{K_4}{\tau'_{d0}} \delta_d - \frac{1}{K_3 \tau'_{d0}} E'_{qd} + \frac{1}{\tau'_{d0}} E_{FD,d} \quad (3)$$

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

$$\dot{V}_{R,d} = -\frac{K_5 K_A}{T_A} \delta_d - \frac{K_6 K_A}{T_A} E'_{qd} - \frac{1}{T_A} V_{R,d} - \frac{K_A}{T_A} V_{E,d} + \frac{K_A}{T_A} U_e \quad (5)$$

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

식 (1)~(6)에 의해서 상태공간 표현 형태의 식(7), (8)로 유도할 수 있다.

$$\dot{X} = AX + BU \quad (7)$$

$$Y = CX \quad (8)$$

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

$$X = [\delta_d \ \omega_d \ E'_{qd} \ E_{FD,d} \ V_{R,d} \ V_{E,d}]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{2H} & -\frac{D}{2H} & -\frac{K_2}{2H} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_4}{\tau'_{d0}} & 0 & \frac{-1}{K_3 \tau'_{d0}} & \frac{1}{\tau'_{d0}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_E}{T_E} & \frac{1}{T_E} & 0 \\ -\frac{K_A K_5}{T_A} & 0 & -\frac{K_A K_6}{T_A} & 0 & \frac{-1}{T_A} & -\frac{K_A}{T_A} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_E K_F}{T_E T_F} & \frac{K_F}{T_E T_F} & -\frac{1}{T_F} \end{bmatrix}$$

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

여기서, 기호 “d”는 초기 동작점으로부터 미소변위를 의미하고,  $K_1$ 과  $K_2$ 는 전기적인 회전력(torque)에서,  $K_3$ 와  $K_4$ 는 계자 전압방정식에서,  $K_5$ 와  $K_6$ 은 단자전압크기에서 계산된 선형화된 정수값 들이며, M은 관성계수, D는 제동계수,  $\tau'_{d0}$ 는 과도 시정수,  $K_F$  및  $T_F$ 는 여자기 진동방지회로의 상수 및 시정수,  $S_E$ 는 포화정수,  $K_E$  및  $T_E$ 는 여자기 상수 및 시정수,  $K_A$  및  $T_A$ 는 여자 증폭기 상수 및 시정수,  $\omega_R$ 는 기준 각속도,  $\delta$ 는 부하각,  $V_t$ 는 단자전압,  $V_{ref}$ 는 발전  $E_{FD}$ 기 기준전압,  $E'_q$ 는 계자쇄교자속에 비례하는 전압,는 발전기 여자전압,  $V_E$ 는 조정기 안정화 회로 전압,  $V_R$ 는 조정기 증폭기 전압,  $T_m$ 는 기계적 입력 토크,  $x_d$ 는 동기 리액턴스의 직축 성분,  $x_q$ 는 동기 리액턴스의 횡축 성분,  $x'_d$ 는 과도 리액턴스,  $R_e$ 는 선로 저항,  $X_e$ 는 선로 리액턴스이다. 본 논문에서 사용한 동기기, 여자기 및 전송선로의 파라미터는 표 1에 나타내었다.

표 1. 시스템 파라미터  
Table 1. System parameters

Synchronous Machine(p.u.)	Excitation System(p.u.) and Transmission line(p.u.)
$x_d=1.7$	$K_A=400, T_A=0.05$
$x_q=1.64$	$K_F=0.025, T_F=1.0$
$x'_d=0.245$	$K_E=-0.17, T_E=0.95$
$D=0.0$	$V_{Rmax}=5.04, V_{Rmin}=-5.04$
$H=2.37$	$S_{Emax}=0.02, S_{Emin}=0.001$
$\tau'_{d0}=5.9$	$R_e=0.02, X_e=0.4$

종래의 전력시스템 안정화장치(PSS)의 구조는 그림 2와 같이 회전자 각속도 편차를 입력으로 사용하였으며, 전달 함수는 식 (9)와 같다.

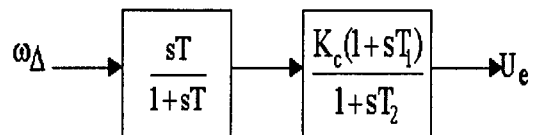


그림 2. PSS의 블록선도  
Fig. 2. Block diagram of conventional PSS

퍼지-PI 제어를 이용하여 정지형 무효전력 보상기를 포함한 동기 발전기의 안정도 개선에 관한 연구

$$PSS_o(s) = K_c \frac{sT}{1+sT} \frac{1+sT_1}{1+sT_2} \quad (9)$$

여기서,  $K_c$ 는 PSS의 이득이고,  $T$ 는 washout 시정수,  $T_1 \sim T_2$ 는 PSS의 특성을 결정하는 시정수이다.

### 3. 퍼지-PI 제어기 설계

#### 3.1 퍼지추론

퍼지제어기(Fuzzy Logic Controller : FLC)에서 언어적인 형태로 기술된 퍼지제어의 규칙을 적용하기 위해서는 논리적인 실행 과정이 필요하다. 이를 퍼지추론이라 하며 몇가지의 퍼지 명제에서 어느 한 명제를 도출하는 것으로, 이는 인간이 행하고 있는 추론법과 유사하다. 퍼지제어 시스템의 일반적인 구성은 그림 3과 같이 사실과 결론을 IF ~ Then 형식으로 조작모델을 서술하는 퍼지제어 규칙부와 퍼지 입력으로부터 얻어진 결과를 합성하여 아날로그 출력을 연산하는 퍼지 추론부 및 피제어 프로세스부 크게 나눌 수 있다[14-16].

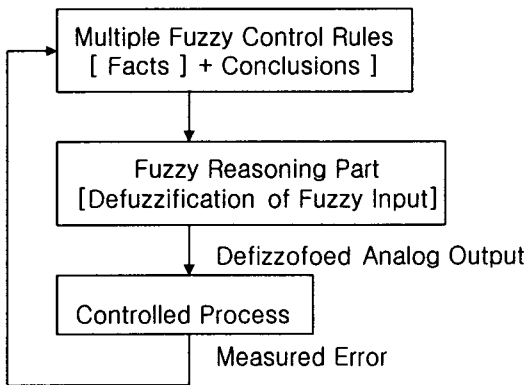


그림 3. 퍼지추론 알고리즘의 블록선도  
Fig. 3. Block-diagram of fuzzy inference algorithm

입력변수를  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 출력변수를  $y$ 라고 하면 퍼지추론 규칙은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_p : \text{If } x_1 \text{ is } A_{p1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{p2} \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_{pn} \\ \text{Then } y \text{ is } B_p \quad (p=1, 2, \dots, r) \quad (10)$$

여기서,  $R_p$ 는  $p$ 번째의 룰이고,  $A_{p1}, A_{p2}, \dots, A_{pn}$ 은 입력 변수의 퍼지변수,  $B_p$ 는 출력변수의 실수치를 나

타낸다. 입력 데이터에 대해 식 (10)의 추론 결과는 식 (11)과 같다.

$$\mu_p = \prod_{j=1}^n \mu_{A_{pj}}(x_j) \quad (11)$$

여기서,  $\mu_{A_{pj}}(x_j)$ 은 퍼지 변수  $A_{pj}$ 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 (12)로 나타내어진다.

$$y^* = \frac{\sum_{p=1}^r \mu_p \cdot B_p}{\sum_{p=1}^r \mu_p} \quad (12)$$

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 4는 삼각형 멤버십 함수를 발생시키기 위한 모형이며, 삼각형 멤버십 함수의 파라미터  $\mu_{A_{pj}}(x_j)$ 의 결정은 식 (13)에서 계산된다.

$$\mu_{A_{pj}}(x_j) = 1 - \frac{2|x_j - C_{pj}|}{W_{pj}} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

여기서,  $C_{pj}$ 는 멤버십 함수의 중심값으로 적합도(grade)가 최대가 되는 값이고,  $W_{pj}$ 는 멤버십 함수의 폭을 나타낸다.

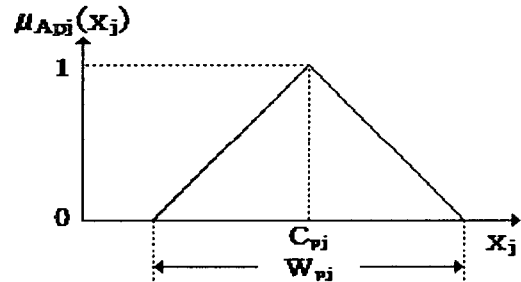


그림 4. 삼각형 멤버십 함수  
Fig. 4. Symmetric triangular membership function

### 3.2 퍼지-Pi 제어기 설계

PI(Proportional Integral) 제어기는 일반적으로 구조가 간단하여 실현하기가 용이한 반면, 파라미터를 선정하는데 있어서 제어대상의 상태를 어느 정도 알고 있어야 하고 제어대상의 특성이 크게 변화될 때 파라미터를 바꾸어야 하는 등 변화하는 제어환경에 대한 적응능력이 부족하다. 따라서, 이를 해결하기 위해 제어대상의 특성이 변화되거나 부하외란에 대해 적응성을 갖도록 PI 제어기의 파라미터를 자동으로 조정이 가능한 퍼지-Pi 제어기를 설계하였다. 먼저, PI 제어기의 특성을 그림 5의 각 영역에 대해 살펴보면 아래와 같다.

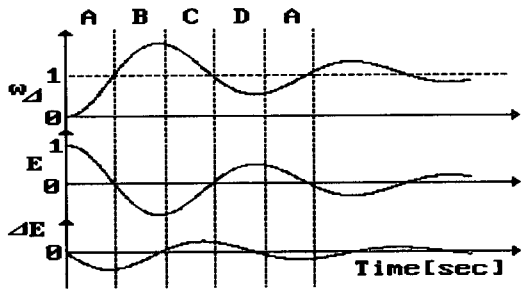


그림 5. 시간응답  
Fig. 5. Time response of the unit step

A 영역 : 빠른 시간을 요구하므로 비례이득과 적분이득을 증가시킴으로써 상승시간을 줄인다.

B 영역 : 오버슈트가 발생하였으므로 비례이득을 감소시키고, 적분이득을 증가시킴으로써 오버슈트를 줄인다.

C 영역 : 오차변화의 기울기가 반대이고, 오차가 줄어들고 있으므로 B 영역과 부호만 반대로 한다.

D 영역 : 이 영역은 설정치 보다 낮아지고 있는 언더슈트 상태이므로 적분이득은 감소시키고, 비례이득을 증가시켜 언더슈트를 줄인다.

앞에서 언급한 PI 제어기의 특성에 대한 내용을 근거로 하여 각 영역에 대해 표 2의 제어규칙으로 결정된다. 각 파라미터에 대한 언어적 변수는 NB(Negative Big), NS (Negative Small), ZO(Zero), PS(Positive Small), PB(Positive Big)로 각각 5개를 사용했다.

표 2. 퍼지 제어규칙  
Table 2. Fuzzy control rules

$K_P$		E				
		NB	NS	ZO	PS	PB
$\Delta E$	PB	PS	PB	PB	PB	PB
	PS	ZO	PS	PB	PB	PB
	ZO	NS	ZO	PS	PB	PB
	NS	NB	NS	ZO	PS	PB
	NB	NB	NB	NS	ZO	PS

$K_I$		E				
		NB	NS	ZO	PS	PB
$\Delta E$	PB	ZO	NB	NB	NB	NB
	PS	PS	ZO	NS	NB	NB
	ZO	PB	PS	ZO	NS	NB
	NS	PB	PB	PS	ZO	NS
	NB	PB	PB	PB	PS	ZO

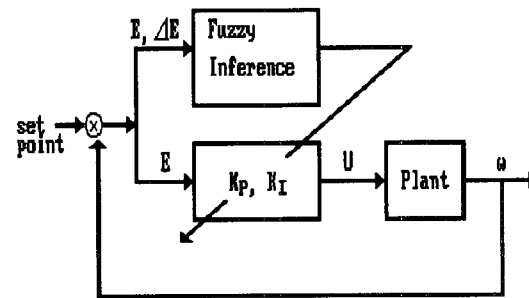


그림 6. 퍼지-Pi 제어기의 구성도  
Fig. 6. Block diagram of Fuzzy-Pi controller

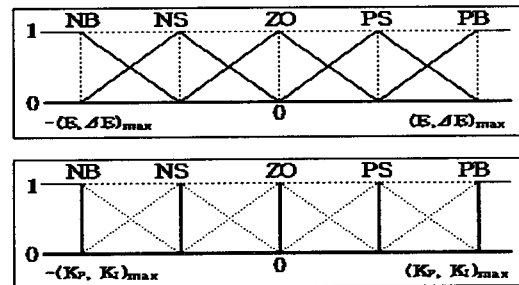


그림 7. (E, ΔE)와 (Kp, Ki)의 멤버십 함수  
Fig. 7. Membership function of (E, ΔE) and (Kp, Ki)

퍼지-PI 제어를 이용하여 정지형 무효전력 보상기를 포함한 동기 발전기의 안정도 개선에 관한 연구

이를 기초로 한 퍼지-PI 제어기의 구성도는 그림 6과 같으며, 전진부와 후진부의 멤버십 함수는 그림 7과 같이 두었다. 여기에서 입력변수는 삼각형 퍼지 변수를 사용하였으며, 출력변수는 실수치를 사용하였다. 이때 'max'는 각 입·출력 변수의 최대치를 나타내며, 멤버십 함수의 중심값 및 폭은 표 3에 나타내었다.

표 3. 멤버십 함수의 폭과 중심값  
Table 3. Center and width values of membership function

구 분	E		$\Delta E$		U
	C	W	C	W	C
NB	-2.0	2.0	-2.0	2.0	-2.0
NS	-1.0	2.0	-1.0	2.0	-1.0
ZO	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0
PS	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0
PB	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

#### 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

제안한 퍼지-PI 제어를 검증하기 위한 시뮬레이션 모델은 그림 1과 같은 SVC를 포함한 1기 무한모선을 이용하였으며, 중부하시(사례연구 1), 정상부하시(사례연구 2) 및 경부하시(사례연구 3)의 경우에 초기 전력을 3[%] 변동한 경우에 SVC를 포함한 시스템에 퍼지-PI 제어를 적용한 경우(Case 1), SVC를 포함한 시스템에 기존의 PSS를 적용한 경우(Case 2), SVC를 포함한 시스템에 제어가 없는 경우(Case 3)와 SVC 없는 본래의 시스템인 경우(Case 4)에 대하여 발전기 응답을 각각 비교·고찰하였다. PI 제어기 파라미터는 퍼지추론 알고리즘에 의해 온라인으로 자동조정되어지며, 최종 수립된 파라미터는  $K_p = 37.79992$ ,  $K_i = -3.769993$ 이다.

또한, 각 부하에 대한 선형화 계수  $K_1 \sim K_6$ 의 파라미터 값은 다음 표 4와 같으며, 각 부하에 대한 시스템의 고유치 분포는 그림 8~그림 10과 같다. 그림 8에서와 같이 주요 진동 모드의 고유치가 시스템에 상당한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 중부하시 그림 8에서와 같이, 본래의 시스템에서 주요 전기적 진동 모드의 제동비는 0.893[%]으로 약한 제동비를 가지

표 4.  $K_1 \sim K_6$ 의 파라미터  
Table 4. Parameters of  $K_1 \sim K_6$

구 분	중부하시	정상부하시	경부하시
$K_1$	1.2145	1.0746	0.9086
$K_2$	1.3545	1.2578	1.1063
$K_3$	0.3072	0.3072	0.3072
$K_4$	1.7109	1.7116	1.7116
$K_5$	-0.0237	-0.0477	-0.0841
$K_6$	0.4739	0.4971	0.5291

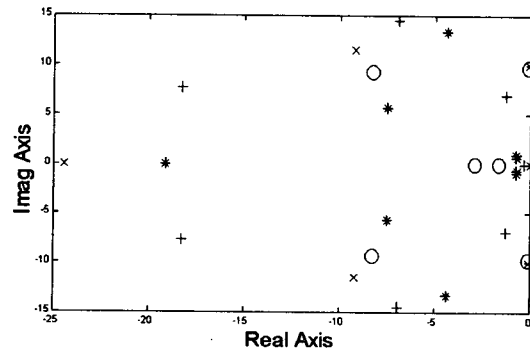


그림 8. 중부하시의 시스템 고유치  
Fig. 8. System eigenvalues in heavy load.  
(\* → Case 1, + → Case 2, x → Case 3, O → Case 4)

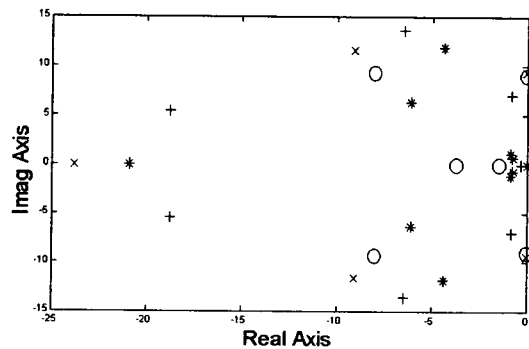


그림 9. 정상부하시의 시스템 고유치  
Fig. 9. System eigenvalues in normal load  
(\* → Case 1, + → Case 2, x → Case 3, O → Case 4)

므로 시스템 응답은 장시간 진동한다는 것을 알 수 있고, SVC를 포함한 시스템에서 제어가 없는 경우

에서는 전기적 진동 모드의 제동비가 1.47[%]로 본래의 시스템보다는 개선된 제동비를 가지나 역시 장시간 진동한다는 것을 알 수 있다. 하지만 SVC를 포함한 시스템에 종래의 제어기를 적용한 경우에는 전기적 진동 모드의 제동비가 18.10[%]이고, 본 논문에서 제안한 Fuzzy-PI 제어기를 가진 경우에는 전기적 진동 모드의 제동비가 31.27[%]로 상당히 개선되어 시스템 응답이 빠른 시간에 수렴한다는 것을 알 수 있다. 또한 정상부하시(그림 9)와 경부하시(그림 10)의 주요 전기적 진동 모드의 제동비가 제안한 Fuzzy-PI 제어기를 포함한 시스템이 우수하게 개선되어 시스템 응답이 빠른 시간에 수렴한다는 것을 알 수 있다.

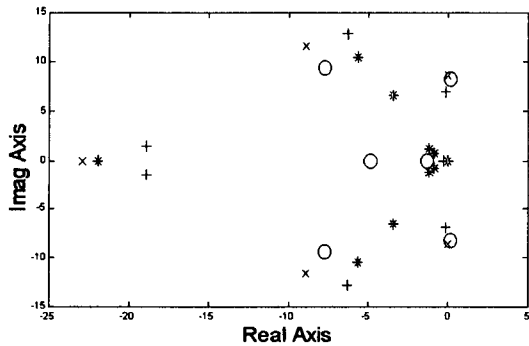
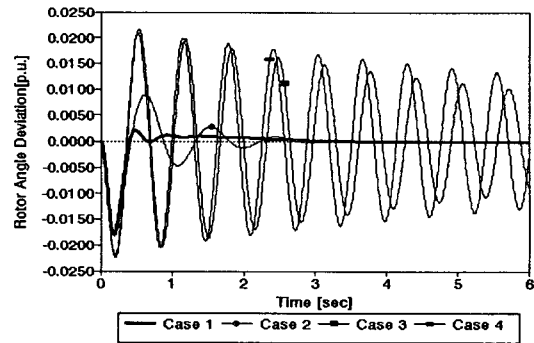


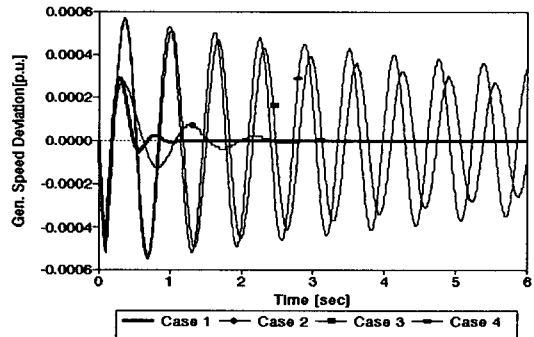
그림 10. 경부하시의 시스템 고유치  
 Fig. 10. System eigenvalues in light load  
 (\* → Case 1, + → Case 2, × → Case 3, O → Case 4)

#### 4.1 중부하시(사례연구 1)

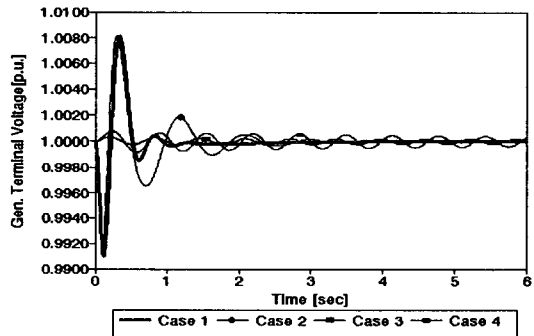
첫 번째 사례연구로는 중부하시( $P_e=1.3, Q_e=0.595$ ) 초기 전력을 100[ms] 동안 3[%] 변동한 경우(그림 11)에 SVC를 포함한 시스템에 퍼지-PI 제어기를 적용한 경우(Case 1), SVC를 포함한 시스템에 PSS 제어기를 적용한 경우(Case 2), SVC를 포함한 시스템에 제어기가 없는 경우(Case 3)와 본래의 시스템(Case 4)에 대하여 각각 비교·고찰하였다. 그림 11의 (a)에서 회전자각 편차 응답 특성이 Case 3의 경우와 Case 4의 경우에는 장시간 진동하고 있으나 Case 2의 경우는 정정시간이 약 3.15[sec]이고 Case 1의 경우는 정정시간이 약 2.96[sec]로 우수한 응답특성을 보이고 있다.



(a) Rotor angle  $\delta_d$



(b) Angular velocity  $\omega_d$



(c) Terminal voltage  $V_t$

그림 11. 중부하시 초기 전력을 100 [ms] 동안 3 [%] 변동한 경우의 발전기 응답 ( $P_e=1.3, Q_e=0.595$ )

Fig. 11. Response of generator when decreasing power 3 [%] disturbance duration 100 [ms] in heavy load ( $P_e=1.3, Q_e=0.595$ )

퍼지-PI 제어를 이용하여 정지형 무효전력 보상기를 포함한 동기 발전기의 안정도 개선에 관한 연구

그림 11의 (b)에서도 역시 각속도 편차 응답특성이 Case 1의 경우가 고전적인 PSS 제어기(Case 2) 및 다른 시스템 보다 우수한 응답특성을 보이고 있다. 그림 11의 (c)에서는 단자 전압 응답특성이 Case 4보다 Case 3의 경우가 약 50[%] 개선된 응답 특성을 보이고 있지만 역시 장시간 진동함을 알 수 있다. 그러나 Case 1의 경우에는 정정시간이 약 1.27[sec]로 Case 2의 경우 정정시간 약 2.65[sec] 보다 우수한 응답특성을 보이고 있다.

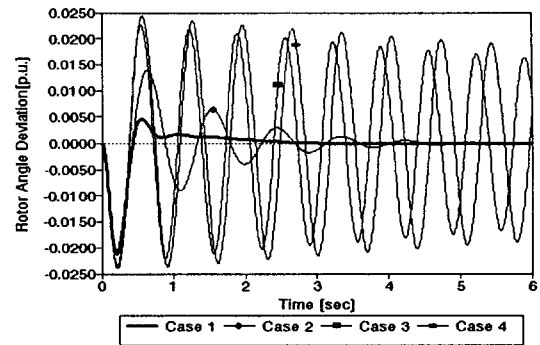
#### 4.2 정상부하시(사례 연구 2)

두 번째 사례연구로는 정상부하시( $P_e=1.0, Q_e=0.595$ ) 초기 전력을 100[ms] 동안 3[%] 변동한 경우(그림 12)에 SVC를 포함한 시스템에 퍼지-PI 제어를 적용한 경우(Case 1), SVC를 포함한 시스템에 PSS 제어기를 적용한 경우(Case 2), SVC를 포함한 시스템에 제어기가 없는 경우(Case 3)와 본래의 시스템(Case 4)에 대하여 각각 비교·고찰하였다. 시스템의 고유 진동 모드의 제동비가 34.76[%](Case 1), 11.45[%](Case 2), 0.64[%](Case 3) 및 0.52[%](Case 4)로 Case 1이 우수하게 나타났으며, 그림 12의 (a)에서 회전자각 편차 응답 특성이 Case 3의 경우와 Case 4의 경우에는 장시간 진동하고 있으나 Case 2의 경우는 정정시간이 약 5.14[sec]이고 Case 1의 경우는 정정시간이 약 3.03[sec]로 다른 시스템 보다 우수한 응답특성을 보이고 있다.

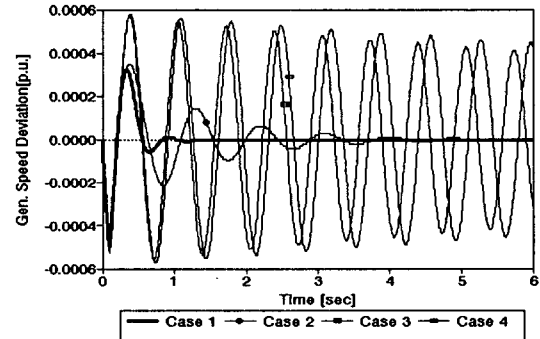
그림 12의 (b)에서도 역시 각속도 편차 응답특성이 Case 1의 경우가 고전적인 PSS 제어기(Case 2) 및 다른 시스템 보다 우수한 응답특성을 보이고 있다. 그림 12의 (c)에서는 단자 전압 응답특성이 Case 4보다 Case 3의 경우가 약 50[%] 개선된 응답 특성을 보이고 있지만 역시 장시간 진동함을 알 수 있다. 그러나 Case 1의 경우에는 정정시간이 약 1.92[sec]로 Case 2의 경우 정정시간 약 5.06[sec] 보다 우수한 응답특성을 보이고 있다.

#### 4.3 경부하시(사례 연구 3)

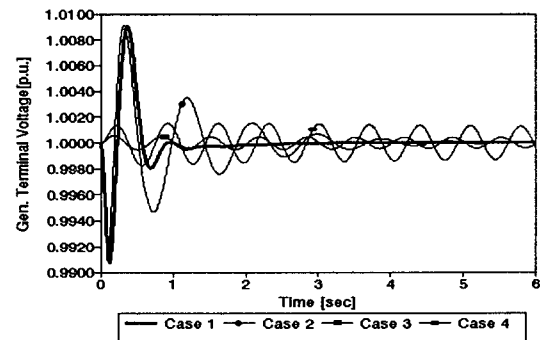
세 번째 사례연구로는 경부하시( $P_e=0.7, Q_e=0.595$ ) 초기 전력을 100[ms] 동안 3[%] 변동한 경우(그림 13)에 Case 1, Case 2, Case 3와 Case 4에 대하여 각각 비교·고찰하였다. 시스템 고유치 분포에서와 같이 고



(a) Rotor angle  $\delta_d$



(b) Angular velocity  $\omega_d$



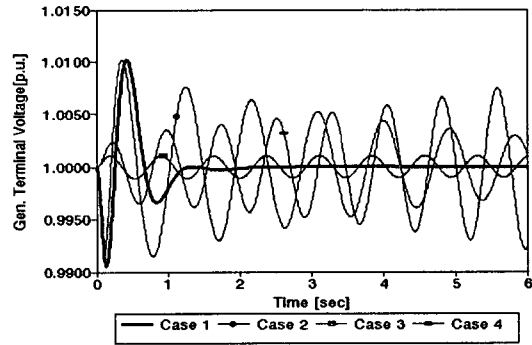
(c) Terminal voltage  $V_t$

그림 12. 정상부하시 초기 전력을 100[ms] 동안 3[%] 변동한 경우의 발전기 응답 ( $P_e=1.0, Q_e=0.595$ )

Fig. 12. Response of generator when decreasing power 3[%] disturbance duration 100[ms] in normal load ( $P_e=1.0, Q_e=0.595$ )



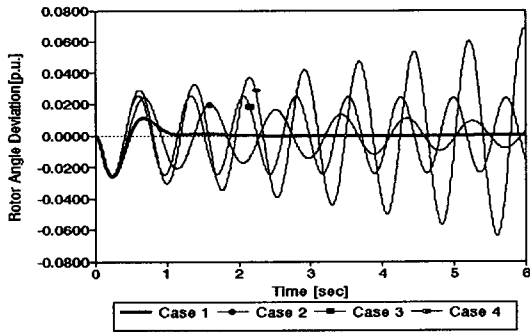
유 진동 모드의 제동비가 각각 0.15%(Case 3), -1.94%(Case 4)로 역시 그림 13의 (a)에서 회전자 각 편차 응답 특성이 Case 3의 경우와 Case 4의 경우에는 장시간 진동 및 발산하였다. Case 2의 경우에는 시스템의 고유 진동 모드의 제동비가 2.26%로 개선되었지만, 장시간 진동하면서 수렴한다는 것을 알 수 있으며, Case 1은 고유 진동 모드의 제동비가 46.49%로 상당히 개선되어 정정시간이 약 2.01[sec]로 다른 시스템 보다 우수한 응답특성을 보이고 있다. 그림 13의 (b)에서도 역시 각속도 편차 응답특성이 Case 1의 경우가 고전적인 PSS 제어기(Case 2) 및 다른 시스템 보다 우수한 응답특성을 보이고 있다. 그림 13의 (c)에서는, 단자 전압 응답특성이 Case 4에서는 진동 발산하지만 Case 3의 경우는 약 50[%] 개선된 응답 특성을 보이고 있지만 역시 장시간 진동함을 알 수 있다. 그러나 Case 2의 경우에는 장시간 진동하면서 수렴하는 것을 볼 수 있으며, Case 1의 경우에는 정정시간이 약 2.22[sec]로 우수한 응답특성을 보이고 있다.



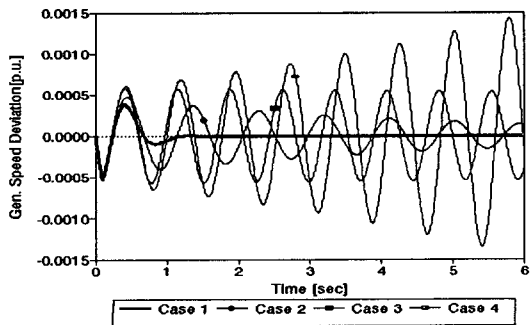
(c) Terminal voltage  $V_t$

그림 13. 경부하시 초기 전력을 100 (ms) 동안 3 (%) 변동한 경우의 발전기 응답 ( $P_e=0.7, Q_e=0.595$ )

Fig. 13. Response of generator when decreasing power 3 (%) disturbance duration 100 (ms) in normal load ( $P_e=0.7, Q_e=0.595$ )



(a) Rotor angle  $\delta_d$



(b) Angular velocity  $\omega_d$

## 6. 결론

본 논문에서는 빠른 응답속도를 이용하여 과도상태의 유효전력을 제어함으로써 전력계통의 다양한 문제를 해결하기 위하여 활용되고 있는 정지형 무효전력 보상기를 포함한 전력계통에 시스템 안정도를 향상시키기 위해, 일반적인 기법과는 달리 인간의 경험과 전문가의 지식을 제어 규칙으로 제어 동작을 결정하는 퍼지 추론 기법을 이용하여 퍼지-PID 제어를 적용하였다. 제안된 방법의 강인성을 검증하기 위해 중부하시 및 정상부하시에 고유치 해석과 시뮬레이션을 통하여 제어성능을 검토하고, 우수한 제어성능을 가지는 제어기를 퍼지 추론 기법에 의하여 설계할 수 있음을 확인하였다.

중요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) SVC를 포함한 시스템이 SVC를 포함하지 않은 시스템 보다 효과적으로 전압을 제어하였다.
- (2) 제안한 퍼지-PID 제어기의 파라미터 선정이 매우 효과적임을 알 수 있었다.
- (3) 제안한 퍼지-PID 제어기를 이용한 시스템의 주요 진동 모드의 고유치 및 제동비가 매우 강인하게 개선되었음을 알 수 있었다.
- (4) SVC를 포함한 시스템에 종래의 안정화 장치

퍼지-PI 제어를 이용하여 정지형 무효전력 보상기를 포함한 동기 발전기의 안정도 개선에 관한 연구

(PSS)를 적용한 경우, SVC를 포함한 시스템에 제어기 없는 경우 및 본래의 시스템 보다 제안한 퍼지-PI 제어기가 중부하시, 정상부하시 및 경부하시에 우수한 제어특성을 나타냄을 확인하였다.

향후 SVC를 포함한 다기계통과 다양한 제어기법을 통한 연구가 계속 되어야 할 것으로 사료된다.

### 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] "FACTS 기본기술 개발에 관한 연구", 과학기술처(한국전기연구소), 1996.
- [3] 김학만, 오태규, 신명철, 손광명, "다기계통에서의 GA를 이용한 TCSC 적용 LQ 제어기의 최적 가중행렬 선정 및 제어기 설계", 전기학회논문지, 제 47권, 제 11호, pp. 1845-1852, 1998.
- [4] CIGRE Working Group 38-01; Task Force No. 2 on Static Var Compensators, Static Var Compensators, 1986.
- [5] C. J. Wu and Y. S. Lee, "Damping of Synchronous Generator by Static Reactive Power Compensator with Digital Controller", IEE Proc., Vol. 138, No. 5, pp. 427-432, 1991.
- [6] 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.
- [7] P. Kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [8] A. Ishigame, T. Imoto, et al., "Combination of Fuzzy and Optimal Controls for Stabilizing Power System", IEE J., Vol. 110, No. 10, 1990.
- [9] M. A. Iskandar, "Stabilizing Control of Power system using Fuzzy Control", IEE J., Vol. 112, No. 12, pp. 1111-1120, 1992.
- [10] 이홍재, et al., "퍼지형 안정화 제어기의 비선형 특성에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, Vol. 42, No. 11, pp. 61-66, 1993.
- [11] 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.
- [12] K. R. Padiyar, "Power System Dynamics : Stability and Control", John Wiley & Sons(Asia) Pte Ltd., pp. 255-297, 1996.
- [13] 문경섭, 손광명, 이태기, 이승근, 박종근, "무효전력 보상여유를 고려한 SVC와 ULTC의 협조제어", 전기학회 논문지, 제 48권, 제 4호, pp.351-357, 1999.
- [14] A. Ishigame, H. Kaizu et al., "Power System Stabilizing Control Based on Simplification of Constructing Fuzzy Control Rules", IEE J., Vol. 113, No. 1, 1993.
- [15] Witold Pedrycz, "Fuzzy Control and Fuzzy System, second edition", JOHN WILEY & SONS, 1993.
- [16] 박영문, et al., "자동학습 퍼지제어기를 이용한 전력계통 안정화 장치에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, Vol. 44, No. 6, pp. 698-704, 1995.

### ◇ 저자소개 ◇

#### 주 석 민 (朱碩珉)

1965년 5월 11일생. 1992년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 동아대 정보기술연구소 특별연구원.

#### 허 등 렬 (許東烈)

1969년 11월 10일생. 1995년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

#### 김 상 효 (金相孝)

1965년 8월 29일생. 1992년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 동아대 정보기술연구소 특별연구원.

#### 정 등 일 (鄭東一)

1960년 8월 6일생. 1984년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년~1990년 (주)금성사 창원전기연구소 연구원. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 동아대 정보기술연구소 특별연구원.

#### 정 형 환 (鄭亨煥)

1941년 1월 19일생. 1964년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 동아대 공대 전기전자컴퓨터공학부 교수.