

SVC를 포함한 전력시스템의 안정도 향상을 위한 최적 퍼지-PI 제어기의 설계

論 文

53P-3-4

A Design of Optimal Fuzzy-PI Controller to Improve System Stability of Power System with Static VAR Compensator

金 海 在^{*} · 朱 碩 珉^{*}
(Hai-Jai Kim · Seok-Min Joo)

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.

Key words : Power system Stabilizer(PSS), Static VAR Compensator(SVC), Fuzzy-PI controller

1. 서 론

대전력 반도체 소자 기술의 발달에 힘입어 고전압 및 대전류의 전력 변환 기기의 구현이 용이해짐에 따라 기존의 교류 송전 방식에서 고정되어 있는 선로의 임피던스와 계통의 조건에 의해 결정되어 지는 모선의 위상각 등을 전력 전자 기술을 이용해 연속적으로 실시간 제어하여 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[1-4].

FACTS로 분류되는 여러 기기 중 기존의 전압제어 및 무효전력보상기들이 가지고 있는 비속응성과 불연속성 문제를 해결해줄 수 있는 정지형 무효전력보상기는, 모선전압의 변동을 감지하여 이에 대응하는 병렬 서셉터를 변화시킴으로서 모선전압을 빠르고 연속적으로 제어하는 기기로서, FACTS 기기 중 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, 대구지역의 전압강하 문제를 해결하기 위하여 설치 운전 중에 있다[5-8].

한편, 전력시스템의 안정도 문제를 해결하기 위하여 활용되고 있는 SVC를 포함한 전력시스템에 PI 제어기를 이용한 연구가 계속되어 왔다[9-11]. 이 방법은 극 배치 방법에 의한 방법으로서 복잡한 수식과 고유치 해석을 통하여 설계하기 때문에 시간이 많이 소모된다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 최근 시스템의 선형, 비선형성을 불문하고 제어 대상의 정확한 모델화 없이도 전문가의 지식 및 경험만을 기초로 한 제어규칙으로부터 퍼지추론을 행하여 제어 동작을 결정하는 퍼지추론 알고리즘(Fuzzy Inference Algorithm)을 이용한 퍼지-PI 제어기를 설계하였다[12-14]. 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 자동조정 되도록 하였다. 제안된 방법의 강인성을 입증하기 위해 정상부하 시, 경부하 시 및 중부하 시에 초기에 전력이 변동한 경우에 있어서 각속도 편차의 특성 및 단자전압의 편차 특성을 종래의 안정화 장치와 비교 고찰하였다. 이러한 과정을 통하여 SVC를 포함한 1기 무한대 모선 계통의 안정도 향상을 위하여 퍼지 알고리즘을

^{*} 교신저자, 正會員 : 馬山大 컴퓨터電氣工學部 副教授 · 工學博士
E-mail : hjkim@masan.ac.kr

^{*} 正會員 : 東亞大 情報技術研究所 特別研究員 · 工學博士
接受日子 : 2004年 4月 16日
最終完了 : 2004年 6月 25日

이용한 최적 PI 제어기 설계의 타당성을 확인하였다.

2. 전력 시스템의 수학적 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 표현되게 된다. 즉, 제어 범위 내에서 SVC는 우수한 동적 전압 안정도 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(BC)와 싸이리스터 제어에 의하여 용량이 가변되는 인덕터(BL)가 병렬로 연결된 구조를 가지고 있으며, 전체적으로 싸이리스터에 의하여 제어되는 가변 서셉턴스(Susceptance, B)로 볼 수 있다[15-16].

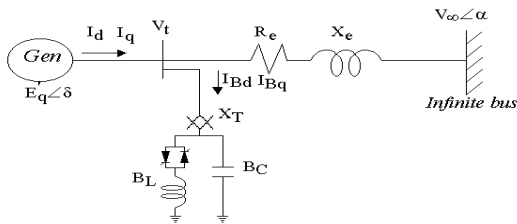


그림 1 SVC 시스템을 포함한 1기 무한 모선 계통
Fig. 1 Single machine-infinite bus with SVC system

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 이용하였다. 그림 2는 선형화된 모델의 블록선도를 나타낸다[7].

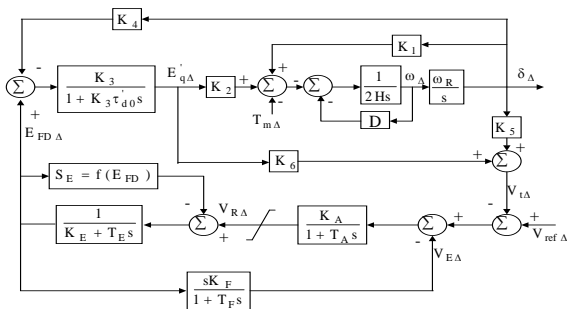


그림 2 1기 무한 모선 계통의 선형화 모델
Fig. 2 Block diagram of the simplified linear model of a single machine-infinite bus system

그림 2를 기초로 아래와 같은 선형화된 시스템 방정식을

유도할 수 있다.

$$\delta_{\Delta} = \omega_R \omega_{\Delta} \tag{1}$$

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

$$\dot{E}'_{q\Delta} = -\frac{K_4}{\tau'_{d0}} \delta_{\Delta} - \frac{1}{K_3 \tau'_{d0}} E'_{q\Delta} + \frac{1}{\tau'_{d0}} E_{FD\Delta} \tag{3}$$

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

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

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

여기서, 기호 “Δ”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, τ'_{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 시정수이다.

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

$$\dot{X} = AX + BU \tag{7}$$

$$Y = CX \tag{8}$$

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

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

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

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

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 몇가

지의 퍼지 명제에서 어느 한 명제를 도출하는 것으로, 이는 인간이 행하고 있는 추론법과 유사하다. 퍼지제어 시스템의 일반적인 구성은 사실과 결론을 IF ~ Then 형식으로 조작 모델을 서술하는 퍼지제어 규칙부와 퍼지입력으로부터 얻어진 결과를 합성하여 아날로그 출력을 연산하는 퍼지 추론부 및 퍼제어 프로세스부로 크게 나눌 수 있다[9-11].

입력변수를 x_1, x_2, \dots, x_n , 출력변수를 y 라고 하면 퍼지추론 규칙은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_p : \text{If } x_1 \text{ is } A_{p1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{p2} \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_{pn} \\ \text{Then } y \text{ is } B_p \quad (p=1, 2, \dots, r) \quad (9)$$

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 (9)의 추론 결과는 식 (10)과 같다.

$$\mu_p = \prod_{j=1}^n \mu_{A_{pj}}(x_j) \quad (10)$$

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 (11)로 나타내어진다.

$$y^* = \frac{\sum_{p=1}^r \mu_p \cdot B_p}{\sum_{p=1}^r \mu_p} \quad (11)$$

퍼지추론을 하기 위해서는 우선 퍼지화에 따른 멤버십 함수가 정의되어야 한다. 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 (12)에서 계산된다.

$$\mu_{A_{pj}}(x_j) = 1 - \frac{2|x_j - C_{pj}|}{W_{pj}} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

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

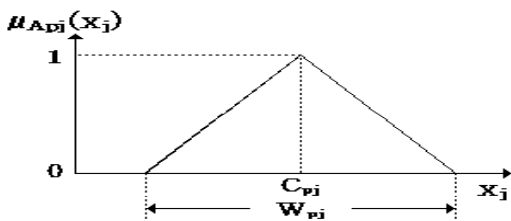


그림 3 삼각형 멤버십 함수
Fig. 3 Symmetric triangular membership function

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 부하 외란에 대해 적응성을 갖도록 PI 제어기의 파라미터를 자동으로 조정이 가능한 퍼지-PI 제어기를 설계하였다. 먼저, PI 제어기의 특성을 그림 4의 각 영역에 대해 살펴보면 아래와 같다.

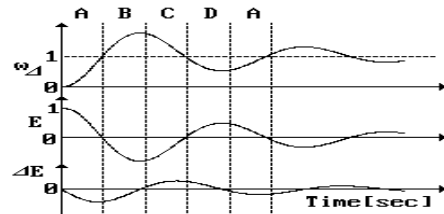


그림 4 시간응답
Fig. 4 Time response of the unit step

- A 영역 : 빠른 시간을 요구하므로 비레이득과 적분이득을 증가시킴으로써 상승시간을 줄인다.
- B 영역 : 오버슈트가 발생하였으므로 비레이득을 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, 비레이득을 증가시켜 언더슈트를 줄인다.

앞에서 언급한 PI 제어기의 특성에 대한 내용을 근거로 하여 각 영역에 대해 표 1의 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 1 퍼지 제어규칙

Table 1 Fuzzy control rules

K _P		E				
		NB	NS	ZO	PS	PB
ΔE	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
ΔE	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

이를 기초로 한 퍼지-PI 제어기의 구성도는 그림 5와 같으며, 전건부와 후건부의 멤버십 함수는 그림 6과 같이 두었다. 여기에서 입력변수는 삼각형 퍼지변수를 사용하였으며, 출력변수는 실수치를 사용하였다. 이때 'max'는 각 입·출력 변수의 최대치를 나타내며, 멤버십 함수의 중심값 및 폭은 표 2에 나타내었다.

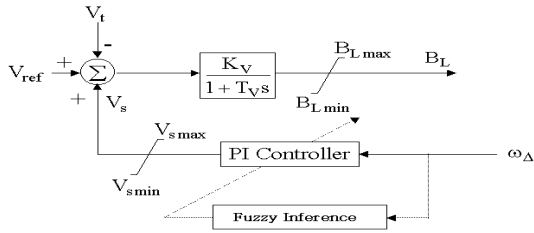


그림 5 SVC 계통의 퍼지-PI 제어기
Fig. 5 Block diagram of Fuzzy-PI controller for SVC system

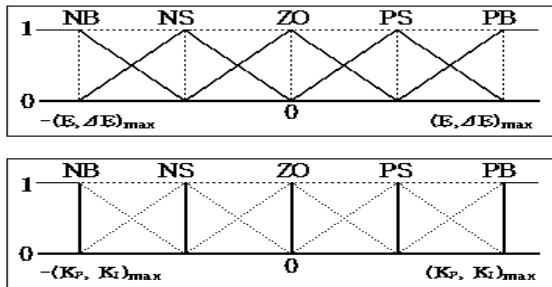


그림 6 (E, ΔE)와 (K_P, K_I)의 멤버십 함수
Fig. 6 Membership function of (E, ΔE) and (K_P, K_I)

표 2 멤버십 함수의 폭과 중심값
Table 2 Center and width values of membership function

	E		ΔE		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

실제의 전력 시스템은 부하의 변동에 따라 선형화 계수가 변하는 비선형 시스템이기 때문에, 상태가 변함에 따라 비선형 시뮬레이션을 수행하여야 하지만, 본 논문에서는 시스템 파라미터가 주어졌을 때, 각 부하에 대하여 100[ms] 동안에 전력이 3[%] 변동한 경우에 대한 계통 운용조건을 설정하고, 각 운전점에서 선형화된 모델을 이용하여 그림 7과 같은 Y_u의 보상기 설계 이론[7]에 의한 파라미터 선정 방법(Case 1)과 퍼지-PI제어기(Case 2)를 사용하였을 때를 비교하여 동특성을 검토하였다.

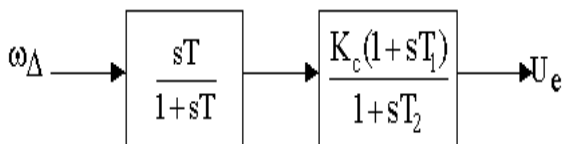


그림 7 PSS의 블록선도
Fig. 7 Block diagram of conventional PSS

여기서, K_c는 PSS의 이득이고, T는 washout 시정수, T₁~T₂는 PSS의 특성을 결정하는 시정수이다. 이 때 퍼지추론 알고리즘에 의해 자동생성된 PI이득값을

그림8과 같이 나타내었으며, 선형화한 K₁~K₆은 시스템 조건에 따라 변하는 정수이기 때문에 시스템 조건에 따라 각각 계산하여 표 3에 나타내었으며, 시스템 파라미터는 표 4와 같다.

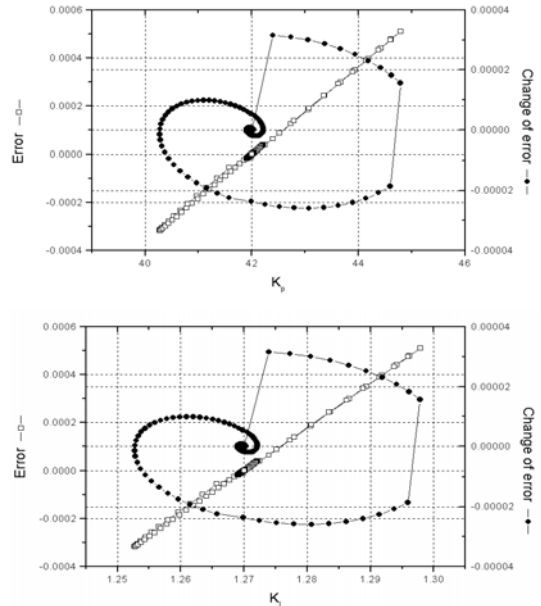


그림 8 K_P와 K_I의 응답
Fig. 8 Response of K_P and K_I

표 3 K₁ ~ K₆의 파라미터
Table 3 Parameters of K₁ ~ K₆

	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆
정상부하시	1.0746	1.2578	0.3072	1.7116	-0.0477	0.4971
경부하시	0.9086	1.1063	0.3072	1.7116	-0.0841	0.5291
중부하시	1.2145	1.3545	0.3072	1.7109	-0.0237	0.4739

표 4 시스템 파라미터
Table 4 System parameters

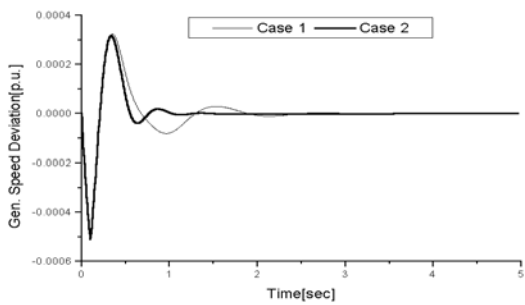
Synchronous Machine(p.u.)	Excitation System(p.u.) and Transmission line(p.u.)
x _d =1.7 x _q =1.64 x _d '=0.245 D=0.0 H=2.37 τ _{d0} '=5.9	K _A =400, T _A =0.05 K _F =0.025, T _F =1.0 K _E =-0.17, T _E =0.95 V _{Rmax} =5.04, V _{Rmin} =-5.04 S _{Emax} =0.02, S _{Emin} =0.001 R _e =0.02, X _e =0.4

4.1 정상부하시

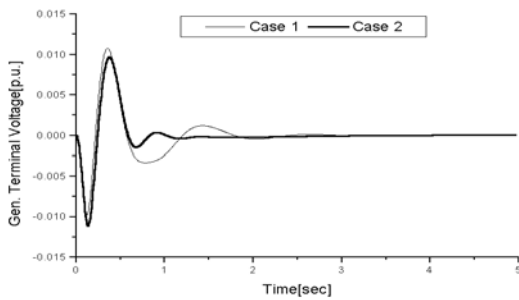
제한된 퍼지-PI 제어기의 강인성을 평가하기 위해 그림 9와 같이 정상부하시(P_e=1.0, Q_e=0.595)에 초기 전력을 100[ms] 동안 3[%] 변동한 경우, Y_u의 보상기 설계 이론에 의한 파라미터 선정 방법(Case 1)과 퍼지-PI제어기(Case 2)에 대해 발전기 응답특성을 보였다. 그림 9의 (a)에서는 각 속도 편차 특성이 종래의 제어기를 적용한 시스템의 정정시

간이 약 2.2[sec]이고, 퍼지-PI 제어를 적용한 시스템의 정정시간이 약 1.05[sec]로 우수한 응답 특성을 보이고 있다. 마찬가지로, 그림 9의 (b)에서는 발전기 단자전압 특성 역시 종래의 제어를 적용한 시스템은 정정시간이 약 2.3[sec]이고 퍼지-PI 제어를 적용한 시스템은 정정시간이 약 1.09[sec]로 우수한 응답 특성을 보이고 있다.

그림 10은 정상부하시 3상 고장이 100[ms] 동안에 지속되다가 계통구성 변경 없이 제어되었을 경우, Case 1과 Case 2의 발전기 응답 특성을 각각 비교·고찰하였다. 그림 10의 (a)에서 Case 1의 정정시간이 약 2.3[sec]이고, Case 2의 경우는 정정시간이 약 1.57[sec]로 우수한 응답을 보였다. 그림 10의 (b)에서는 Case 1의 응답은 장시간 진동하며, 정정시간이 약 4.26[sec]이고, Case 2의 응답은 정정시간이 약 1.93[sec]로 우수한 응답 특성을 나타내고 있다



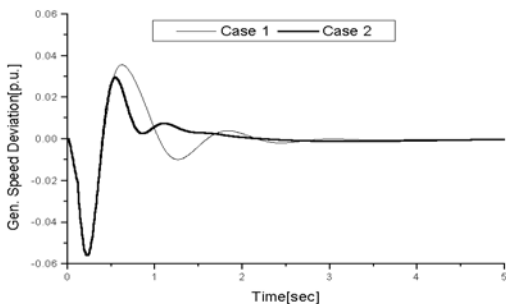
(a) Generator speed deviation ω_{Δ}



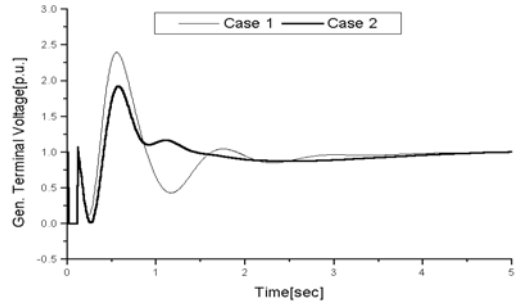
(b) Generator Terminal voltage V_t

그림 9 정상부하시 초기 전력을 100[ms] 동안 3[%] 변동한 경우의 발전기 응답 ($P_e=1.0, Q_e=0.595$)

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



(a) Generator speed deviation ω_{Δ}



(b) Generator Terminal voltage V_t

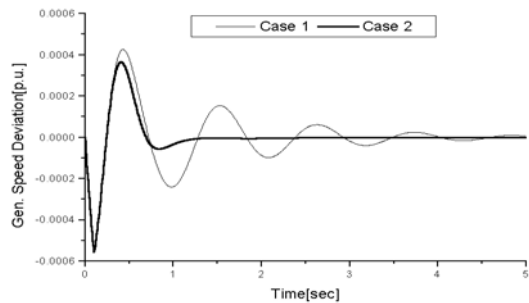
그림 10 정상부하시 3상 고장이 발생했을 경우의 발전기 응답 ($P_e=1.0, Q_e=0.595$)

Fig. 10 Response of generator when three-phase fault was generated in normal load

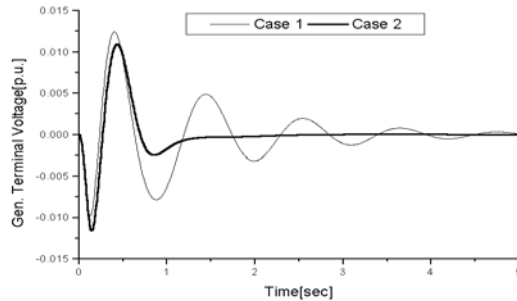
4.2 경부하시

경부하시($P_e=0.7, Q_e=0.595$) 초기 전력을 100[ms] 동안 3[%] 변동한 경우, 그림 11의 (a)에서 발전기 각속도 편차 응답 특성이 Case 1의 경우에는 장시간 진동하고 있으나, Case 2의 경우에는 정정시간이 약 1.25[sec]로 아주 우수한 응답 특성을 보이고 있다. 그림 11의 (b)에서는 발전기 단자전압 응답 특성이 Case 1의 경우가 역시 장시간 진동함을 알 수 있으나, Case 2의 경우에는 정정시간이 약 1.4[sec]로 아주 우수한 응답 특성을 보이고 있다.

마찬가지로, 그림 12와 같이 3상 고장 발생시 발전기 각속도 편차 및 단자전압의 응답 특성이 Case 1보다 Case 2의 경우가 우수한 응답 특성을 보이고 있다.



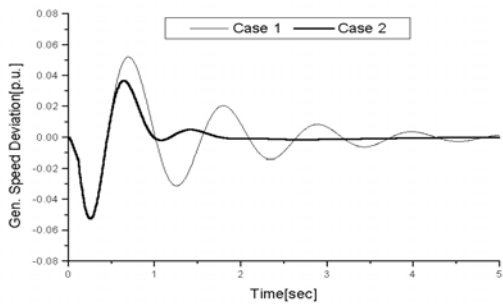
(a) Generator speed deviation ω_{Δ}



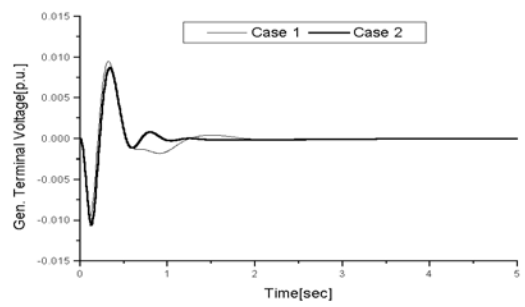
(b) Generator Terminal voltage V_t

그림 11 경부하시 초기 전력을 100[ms] 동안 3[%] 변동한 경우의 발전기 응답 ($P_e=0.7, Q_e=0.595$)

Fig. 11 Response of generator when decreasing power 3[%] disturbance duration 100[ms] in light load



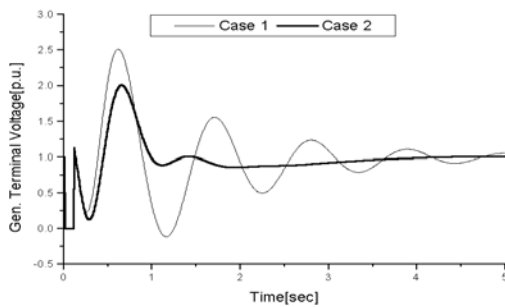
(a) Generator speed deviation ω_{Δ}



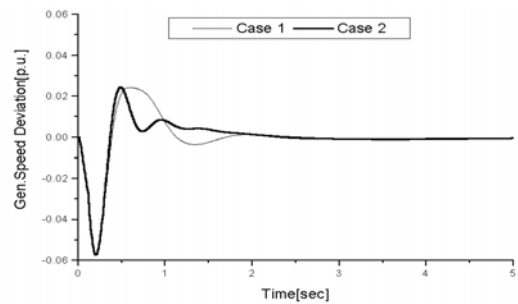
(b) Generator Terminal voltage V_t

그림 13 중부하 시 초기 전력을 100[ms] 동안 3[%] 변동한 경우의 발전기 응답($P_e=1.3, Q_e=0.595$)

Fig. 13 Response of generator when decreasing power 3[%] disturbance duration 100[ms] in heavy load



(a) Generator speed deviation ω_{Δ}



(b) Generator Terminal voltage V_t

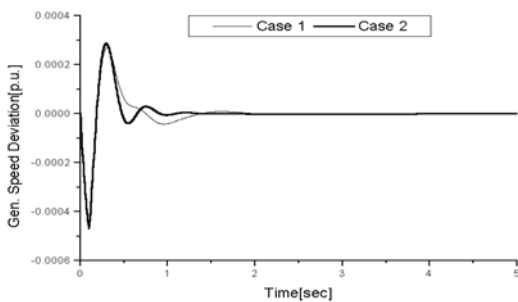
그림 12 경부하 시 3상 고장이 발생했을 경우의 발전기 응답($P_e=0.7, Q_e=0.595$)

Fig. 12 Response of generator when three-phase fault was generated in light load

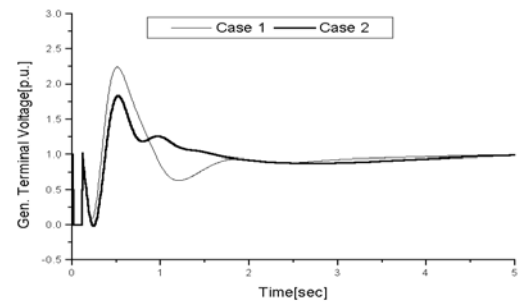
4.3 중부하시

그림 13은 중부하시($P_e=1.3, Q_e=0.595$) 초기 전력을 100[ms] 동안 3[%] 변동한 경우 SVC를 포함한 시스템에 종래의 제어를 사용한 경우(Case 1)와 SVC를 포함한 시스템에 퍼지-PI 제어를 적용한 경우(Case 2)에 대하여 각각 비교·고찰한 것으로서 퍼지-PI 제어를 적용한 경우가 빠른 응답특성을 보임을 알 수 있었다.

또한, 그림 14의 3상 고장이 100[ms] 동안에 지속되다가 계통 구성 변경없이 제거되었을 경우 역시 SVC를 포함한 시스템에 종래의 제어를 사용한 경우(Case 1)보다 SVC를 포함한 시스템에 퍼지-PI 제어를 적용한 경우(Case 2)가 빠른 응답특성을 보였을 뿐만 아니라 우수한 제어특성을 나타내었다.



(a) Generator speed deviation ω_{Δ}



(b) Generator Terminal voltage V_t

그림 14 중부하 시 3상 고장이 발생했을 경우의 발전기 응답($P_e=1.3, Q_e=0.595$)

Fig. 14 Response of generator when three-phase fault was generated in heavy load

5. 결론

본 논문에서는 시스템 안정도 향상시키기 위해 퍼지추론 알고리즘을 이용한 퍼지-PI제어를 설계한 후 모선전압의 제어가 기본적인 제어의 목적이며 빠른 응답속도와 연속적인 제어로 제어범위 내에서는 전압을 효과적으로 제어할 뿐만 아니라, 빠른 응답속도를 이용하여 과도상태의 유효전력을 제어함으로써 전력 시스템의 다양한 문제를 해결하기 위하여 활용되고 있는 정지형 무효전력 보상기를 포함한 전력 시스템에 적용하여 안정도를 해석하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

- (1) 제안한 퍼지-PI 제어기의 파라미터 선정이 매우 효과적임을 알 수 있었다.
- (2) 제안한 제어기법을 이용한 전력시스템의 안정도 해석 결과 각속도 편차 및 발전기 단자 전압 특성 응답이 종래의 안정화 장치(PSS) 보다 우수한 제어특성을 나타냄을 확인하였다.
- (3) 제안한 제어기법을 이용하여 설계한 전력시스템은 광범위하고 복잡한 계통에 대해서도 안정적이고 효율적인 제어성능을 유지함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 2003 마산대학 학술조성연구비 지원에 의해 수행한 연구과제임.

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] "FACTS 기본기술 개발에 관한 연구", 과학기술처(한국전기연구소), 1996

[4] 김학만, 오태규, 신명철, 손광명, "다기계통에서의 GA를 이용한 TCSC 적용 LQ 제어기의 최적 가중행렬 선정 및 제어기 설계", 대한전기학회논문지, 제 47권, 제 11호, pp. 1845-1852, 1998

[5] Hsu. Y. Y. and Cheng. C. H., "Design of a Static VAR Compensator Using Model Reference Adaptive Control", Electric Power System Research, No. 13, pp.129-138, 1987

[6] 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.

[7] P. M. Anderson and A. A. Found, "Power System Control and Stability", IEEE Press. New York, 1993

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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

[11] A. A. El-Emary and M. A. El-Shibina, "Application of Static Var Compensation for Load Frequency Control", Electric Machines and Power Systems, Vol. 25, pp. 1009-1022, 1997

[12] 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

[13] Witold Pedrycz, "Fuzzy Control and Fuzzy System, second edition", JOHN WILEY & SONS, 1993

[14] 박영문, et al., "자동학습 퍼지제어기를 이용한 전력계통 안정화 장치에 관한 연구", 대한전기학회논문지, Vol. 44, No. 6, pp. 698-704, 1995

[15] 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

[16] K. R. Padiyar, "Power System Dynamics : Stability and Control", John Wiley & Sons(Asia) Pte Ltd., pp. 255-297, 1996.

저 자 소 개



김 해 재 (金海在)

1957년 5월 29일 생. 1980년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 마산대 컴퓨터전기공학

부 부교수, 당학회 정회원

Tel : 055-230-1330

E-mail : hjkim@masan.ac.kr



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(공학박). 현재 동아대 정보기술연구소 특별연

구원

Tel : 051-200-6944

E-mail : joosm@orgio.net