1995年度 定期總會 및 秋季學術大會 論文集 1995.11.18

퍼지 PID제어기를 이용한 전력계통의 안정화장치에 관한 연구

정 형 환* · 정 동 일* · 주 석 민* · 고 희 석**
* 동아대학교 전기공학과 ** 경남대학교 전기공학과

A Study on Power System Stabilization using the Design of the Fuzzy PID Controller

Hyeng-Hwan Chung* · Dong-Il Chung* · Seok-Min Joo* · Hee-Seog Koh**
* Dept. Electrical Eng. Dong-A Univ. ** Dept. Electrical Eng. Kyungnam Univ.

Abstract - This paper presents a design technique of thefuzzy PID controller for power system stabilization. PID parameters of the fuzzy PID controller was self-tuned by the fuzzy inference algorithm. The proposed controller compare with conventional power system stabilizer(PSS) under various of initial value of rotor angle deviation and load condition. The related simulation results show that the proposed controller was more excellent control characteristics than conventional PSS in transient-state and steady-state response

1. 서 론

최근 전력계통은 전력수요의 급증으로 계통이 복잡, 대형화 되어감에 따라 기본적으로 요구되는 사항은 계통의 어떠한 변화에도 불구하고, 발전 출력량과 그 품질에 대한 소비자의 욕구를 지속적으로 만족 시켜야 한다는 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 1960년대 부터 전력계통의 안정화 장치 (Power System Stabilizer : PSS)에 관한 연구가 활발하게 이루어져 오고있다.[1~7]

따라서 본 논문에서는 전문가의 지식 및 경험을 제어규칙으로 추론에 의해 제어동작을 결정하는 퍼지추론 알고리즘을 이용하여 PID 제어기의 파라미터가 제어대상의 특성이 크게 변화되더라도 자동조정 되도록 하였다. 이를 전력계통의 안정화 장치에 적용하였으며, 회전자각 편차의 초기치를 변화 시켰을 경우와 부하조건의 변화로 무효전력과 유효전력을 변화 시켰을 경우에 있어서 회전자각 편차의 특성을 고찰 하였다. 또한, 종전의 안정화 장치와도 비교하여 퍼지 PID 제어기의 적용 가능성을 해석하였다.

2. 계통 방정식

동기 발전기와 여자기의 비선형 모델을 실질적인 동작점에서 선형화한 1기 무한모선의 모형은 그림 1과 같다.

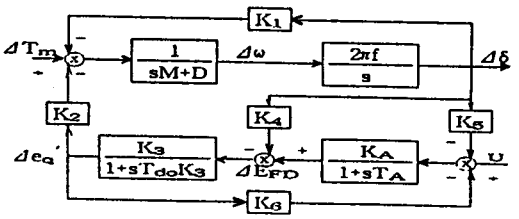

그림 1 선형화한 1기 무한모선 모형

그림 1을 기초로한 1기 무한모선은 식 (1)과 같은 상태 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt}X(t) = AX(t) + BU(t)$$
$$Y(t) = CX(t) \qquad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{D}{M} & -\frac{K_1}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 \\ 2\pi f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_4}{T_{do}} & -\frac{1}{T_{do}K_3} & -\frac{1}{T_{do}} \\ 0 & -\frac{K_A K_5}{T_A} & -\frac{K_A K_6}{T_A} & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix}^T, \quad C = [0\ 1\ 0\ 0]$$

$$X(t) = [\ \Delta\omega,\ \Delta\delta,\ \Delta e_q',\ \Delta E_{FD}\ ]^T$$

3. 퍼지 PID 제어기법

3.1 퍼지추론

퍼지제어 시스템의 일반적인 구성은 그림 2와 같이 사실과 결론을 If - Then 형식으로 조작모델을 서술하는 퍼지제어 룰부와 퍼지입력으로 부터 얻어진 결과를 합성하여 아날로그 출력을 연산하는 퍼지 추론부 및 피제어 프로세스로 크게 나눌 수 있다.[6~10]

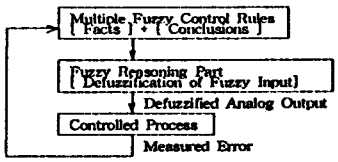

그림 2 퍼지추론 알고리즘의 블록선도

입력변수를 $x_1, x_2, \cdots, x_n$, 출력변수를 y라고 하면 퍼지추론 룰은 식(2)와 같이 나타 낼 수 있다.

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

여기서, R_p는 p번째의 룰이고, $A_{p1}, A_{p2}, \cdots, A_{pn}$은 입력변수의 퍼지변수, B_p는 출력변수의 실수치를 나타낸다. 입력 데이터에 대해 식(2)의 추론 결과는 식(3)과 같다.

$$\mu_p = \prod_{i=1}^{n} \mu_{A_{pi}}(x_i) \qquad (3)$$

여기서, $\mu_{A_{pi}}(x_i)$은 퍼지변수 A_{pi}의 멤버쉽 함수를 나타낸다.

비퍼지화 방법으로는 Braae-Rutherford의 중력중심법 (Center of Gravity Method)을 사용하였으며, 비퍼지화에 의한 최종 출력값 y^*은 식(4)로 나타내어진다.

$$y^* = \frac{\sum_{p=1}^{r} \mu_p \cdot B_p}{\sum_{p=1}^{r} \mu_p} \qquad (4)$$

퍼지추론을 하기 위해서는 우선 퍼지화에 따른 멤버쉽 함수가 정의되어야 한다. 그림 3은 삼각형 멤버쉽 함수를 발생시키기 위한 모형이며, 삼각형 멤버쉽 함수의 파라미터 $\mu_{A_{pi}}(x_i)$의

결정은 식(5)에서 계산된다[9].

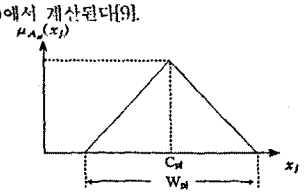

그림 3 삼각형 멤버쉽 함수

$$\mu_{A_N}(x_j) = 1 - \frac{2\,|\,x_j - C_N\,|}{W_N} \quad (j=1,2,\cdots,n) \tag{5}$$

여기서, C_N는 멤버쉽 함수의 중심값으로 적합도(grade)가 최대가 되는 값이고, W_N는 멤버쉽 함수의 폭을 나타낸다.

3.2 퍼지 PID 제어기 구성

PID 제어기의 파라미터를 선정하는데 있어서 제어대상의 상태를 어느정도 알고 있어야 하고, 제어대상의 특성이 크게 변화될 때 파라미터를 바꾸어야 하는등 제어환경에 대한 적응능력이 부족하다. 따라서 전문가의 지식, 경험을 제어규칙으로 추론에 의해 제어동작을 결정하는 퍼지추론 알고리즘을 이용하여 PID제어기의 파라미터를 자동으로 조정되게 하였다.

PID 제어기의 파라미터 선정은 표 1의 제어규칙으로 결정된다. 여기서, E는 각속도 편차의 오차이고, ΔE는 오차의 변화율, K_P, K_I, K_D는 PID 파라미터를 나타낸다. 언어적 변수는 각각 5개를 사용했다.

표 1 퍼지제어규칙

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	NS	NB	NB	NB
	PS	PS	ZO	NS	NB	NB
	ZO	PB	PS	ZO	NS	NB
	NS	PB	PB	PS	ZO	NS
	NB	PB	NB	PB	PS	ZO

K_D		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

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

이를 기초로한 퍼지 PID 제어기의 구성도는 그림 4와 같다.

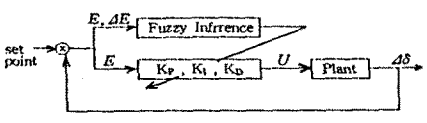

그림 4 퍼지 PID 제어기의 구성도

4. 시뮬레이션 결과 및 검토

본 논문에서는 퍼지 PID제어기를 검증하기 위한 모델로는 그림 1과 같은 1기 무한모선을 사용하였다. 검증에 사용한 예로는 먼저, 회전자각 편차의 초기치를 변화시켰을 경우와 부하조건을 변화시켰을 경우에 있어 기존의 안정화 장치인 PSS와 제안한 퍼지 PID제어기의 동작특성을 비교·검토하였다. 여기에서 사용한 계통정수와 초기설정값은 표 2와 같다.

표 2 계통정수 및 초기설정값

계 통 정 수	$M=9.26$	$x_d=0.973$
	$D\cong 0$	$x_q=0.19$
	$T'_{do}=7.76$	$x'_q=0.55$
	$K_A=50$	$T_A=0.05$
	$R=-0.034$	$X=0.997$
	$G=0.249$	$B=0.262$
초기설정값	$P_{e0}=1.0$	$Q_{e0}=0.015$
	$V_{t0}=1.05$	

먼저, 회전자각 편차의 초기치를 0.1[rad]로 두고 표 2의 조건인 경우에 있어 기존의 안정화 장치인 PSS와 퍼지 PID제어기의 제어성능을 비교하였다. 그림 5에 나타난 것과 같이 PSS가 있는 경우(Case 1), 퍼지 PID제어기(Case 2) 및 PSS가 없는 경우(Case 3)를 이용한 경우에 있어 회전자각 편차의 응답특성을 비교한 결과, 제안한 퍼지 PID제어기가 최대 편차량과 수렴특성에서 양호한 응답특성을 나타내었다.

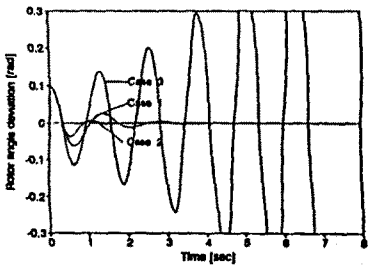

그림 5 Case 1, Case 2 및 Case 3의 응답특성

1) $\Delta\delta$의 초기치를 변화시켰을 경우

$\Delta\delta$의 초기치를 변화시켰을 경우($\Delta\delta=0.05$, 0.15)에 있어 응답특성을 비교 하였다. 그림 6a는 기존 PSS에 대한 회전자각 편차의 응답특성을 나타낸 것이며, 그림 6b는 제안한 퍼지 PID 제어기에 대한 응답특성이다. 이상 두가지 경우를 비교하면, 제안한 퍼지 PID제어기가 진동 폭을 감소 시켰을 뿐만아니라 수렴 특성도 양호함을 보이고 있다. 이때, 표 3은 ($K_1 \sim K_6$)의 파라미터와 PID 이득값을 나타내고 있다.

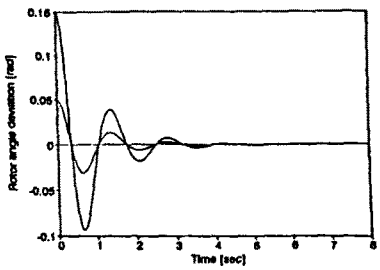

그림 6a PSS에 의한 응답특성

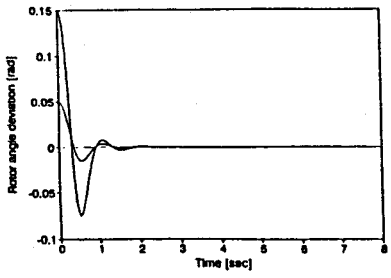

그림 6b 퍼지 PID 제어에 의한 응답특성

표 3 ($K_1 \sim K_6$)의 파라미터와 PID 이득값

	$\Delta\delta = 0.05$[rad]	$\Delta\delta = 0.15$[rad]
K_1	54.4268E-02	54.4268E-02
K_2	12.0675E-01	12.0675E-01
K_3	65.8445E-02	65.8445E-02
K_4	69.8197E-02	69.8197E-02
K_5	-95.5244E-03	-95.5244E-03
K_6	81.5930E-02	81.5930E-02
K_P	32.5969E+00	32.5642E+00
K_I	-15.5223E-02	-15.5067E-02
K_D	32.1312E-01	32.0990E-01

2) 부하조건을 변화시켰을 경우

회전자각 편차를 0.1[rad]로 고정시킨 후 부하조건의 변화로 유효전력과 무효전력을 변화시켜 주면 선로상태에 따른 선형화 모형 계수 ($K_1 \sim K_6$)가 변화하게 된다. 그림 7a는 기존 PSS에 대한 응답특성이며, 그림 7b는 제안한 퍼지 PID 제어기의 각 부하조건에 따른 응답특성이다. 이 경우에 있어서도 기존의 전력계통 안정화 장치인 PSS보다 퍼지 PID제어기가 제어효과와 강인성에서 좋은 제어성능을 보였다. 이때, 표 4는 ($K_1 \sim K_6$)의 파라미터와 PID 이득값을 나타내고 있다. Case 1 은 유효전력과 무효전력의 초기치를 각각 0.7[p.u.]과 0.4[p.u.]로 둘 때의 응답특성이며, Case 2 는 각각 1.3[p.u.]과 0.8[p.u.]인 경우의 응답특성이다.

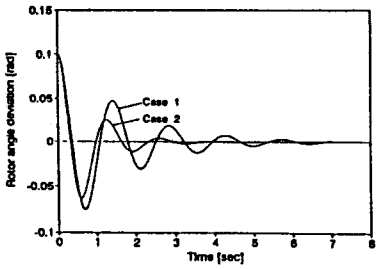

그림 7a PSS에 의한 응답특성

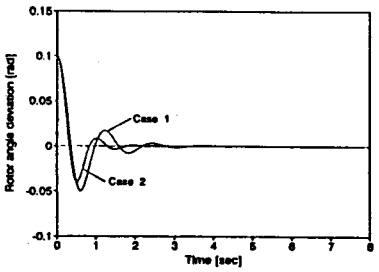

그림 7b 퍼지 PID 제어에 의한 응답특성

표 4 ($K_1 \sim K_6$)의 파라미터와 PID 이득값

	Case 1 Peo=0.7 [p.u.] Qeo=0.4 [p.u.]	Case 2 Peo=1.3 [p.u.] Qeo=0.8 [p.u.]
K_1	63.1276E-02	47.3929E-02
K_2	12.1048E-01	83.5977E-02
K_3	65.8445E-02	65.8445E-02
K_4	69.8197E-02	69.8197E-02
K_5	-10.0350E-02	-12.7203E-02
K_6	82.3043E-02	85.9806E-02
K_P	32.5772E+00	32.5737E+00
K_I	-15.5129E-02	-15.5113E-02
K_D	32.1118E-01	32.1083E-01

5. 결 론

본 논문에서는 PID 제어기를 전력계통의 안정화장치에 적용시켰다. 또한, 전문가의 지식 및 경험을 제어규칙으로 퍼지추론 애의해 제어동작을 결정하는 퍼지추론 알고리즘을 이용하여 제어대상이 변화되더라도 PID 제어기의 파라미터를 자동 조정되도록 제어기를 설계하였다. 이를 기존 PSS와 제안한 퍼지 PID제어기를 비교 · 검토한 결과 퍼지 PID제어기가 우수한 제어성능을 보였다. 또한, 제어기의 강인성을 검증하기 위해 회전자각 편차의 초기치를 변화 시킨 경우와 부하조건의 변화에 따른 응답특성을 검증한 경우에 있어서도 퍼지 PID 제어기가 기존 안정화 장치인 PSS 보다 우수한 제어특성을 나타내었다.

참 고 문 헌

[1] O. W. Hanson, C. J. Goodwin, P. L. Dandeno, "Influence of Excitation and Speed Control Parameters in Stabilizing Intersystem Oscillations", IEE Trans., Vol PAS-87, No. 5, pp. 1306~1311. 1968.

[2] F. P. Demello, C. Concordia, " Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Exitation Control", IEEE Trans., Vol. PAS-88, No. 4, pp. 189~202, 1969.

[3] R. J. Fleming, M. A. Mohan, K. Parvatisam, " Selection Parameters of Stabilizers in Multimachine Power System", IEEE Trans., Vol. PAS-100, No. 5, pp. 2329~2333, 1981.

[4] H. B. Gooi, E. F. Hill, M. A. Mobarak, D. H. Thorne, T. H. Lee, " Coordinate Multi-Machine Stabilizer Settings Without Eigenvalue Drift ", IEEE Trans., Vol. PAS-100, No. 8, pp. 3879~3887, 1981.

[5] Yao-Nan. Yu, " Electric Power System Dynamics ", pp. 65-94, Academic, Press 1983.

[6] A. Ishigame, T. Imoto, et al, " Conbination of Fuzzy and Optimal Controls for Stabilizing Power System ", IEE J., Vol. 110, No. 10, 1990.

[7] M. A. Iskandar, " Stabilizing Control of Power System using Fuzzy Control ", IEE J., Vol. 112-B, No. 12, pp. 1111~1120, 1992.

[8] 정형환, 외 4명, " 2 지역 전력계통의 부하주파수 제어를 위한 퍼지추론 기법의 적용 ", 한국퍼지시스템학회 논문지, Vol. 2, No. 4, pp. 67~73, 1992.

[9] A. Ishigame, H. Kaizu et al, " Power System Stabilizing Control Based on Simplification of Constructing Fuzzy Control Rules ", IEE J., Vol.113-B, No.1, 1993.

[10] 정형환 외 2명, " 자기조정 퍼지제어기에 의한 전력계통 안정화에 관한 연구 ", 한국퍼지 및 지능시스템학회 논문지, Vol. 5, No. 2, pp.58~69.1995.