

자기조정 퍼지제어기에 의한 전력계통 안정화에 관한 연구

정형환* · 정동일* · 주석민* · 고희석**
 *동아대학교 전기공학과 **경남대학교 전기공학과

Power System Stabilization using Self Tuning Fuzzy Controller

H.H. Chung* · D.I. Chung* · S.M. Joo* · H.S. Koh**
 *Dong-A Univ. **Kyungnam Univ.

Abstract- In this paper, the optimal fuzzy controller of exciter and governor in synchronous generator improve the stability of power system with varying loads and disturbances in power system. Parameters of the proposed fuzzy controller were optimally self-tuned by the steepest descent method and were applied to power system stabilization.

The related simulation results show that the proposed control technique are more powerful than the conventional ones for reductions of undershoot and for minimization of settling time

1. 서론

최근 전력 계통은 전력 수요의 급증으로 계통이 복잡 대형화 되어감에 따라 기본적으로 요구되는 사항은 계통의 어떠한 변화에도 불구하고, 발전출력량과 그 품질에 대한 소비자의 욕구를 지속적으로 만족시켜야 한다는 것이다. 이같은 고신뢰, 양질의 전기에너지는 전압과 주파수를 허용 범위내로 수렴시킬 수 있는냐의 여부에 달려있다고 볼 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 최근 시스템의 선형, 비선형성을 불문하고 제어대상의 정확한 모델화 없이도 전문가의 지식 및 경험만을 기초로한 제어규칙으로 부터 퍼지추론을 행하여 제어 동작을 결정하는 퍼지제어를 전력계통에 적용하여 동특성 응답을 개선시킨 연구가 보고되고 있다[1~4]. 그러나, 일반적인 제어규칙에 의한 퍼지제어는 정상상태시 다소의 편차량이 잔존하는 문제점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 퍼지제어시 문제점인 정상상태의 잔류편차를 제거하고자 퍼지제어의 결과로 부터 얻어진 입출력 데이터 쌍(xj, y)을 입력으로 최급강하법(Steepest Descent Method)을 이용하여 퍼지추론 규칙의 각 퍼지변수 중심치 및 폭을 자기 조정하여 최적화된 퍼지규칙을 생성시켜 이를 전력계통의 전압 및 주파수 제어에 적용하여 종래의 PSS 및 퍼지제어보다 제어성능면에서 우수함을 시뮬레이션을 통해 고찰해 보았다.

2. 계통 방정식

동기 발전기 단자에서의 전압과 전류를 직축과 횡축성분으로 표현하면 식(1)~(6)과 같이 나타낼 수 있다. 단, 전기자 저항과 교류선로의 저항은 무시한다. [4~7]

$$V_d = \frac{x_q V_b}{x_e + x_q} \sin \delta \tag{1}$$

$$V_q = \frac{x_e}{x_e + x_d'} E_q' + \frac{x_d' V_b}{x_e + x_d'} \cos \delta \tag{2}$$

$$i_d = \frac{E_q' - V_b \cos \delta}{x_e + x_d'} \tag{3}$$

$$i_q = \frac{V_b}{x_e + x_q} \sin \delta \tag{4}$$

$$V_t^2 = V_d^2 + V_q^2 \tag{5}$$

$$i_t^2 = i_d^2 + i_q^2 \tag{6}$$

여기서 δ 는 발전기의 회전각, E_q' 는 계차왜교자속에 비례하는 전압, V_b 는 무한대 모선 전압, V_t 와 i_t 는 발전기 단자전압과 전류, x_d' 는 과도리액턴스, x_e 는 선로리액턴스, x_d 와 x_q 는 동기리액턴스의 직축 및 횡축성분을 나타낸다.

그림 1은 전력계통의 안정화를 위한 여자기와 조속기 제어모델 계통의 블록선도이다. [6, 7]

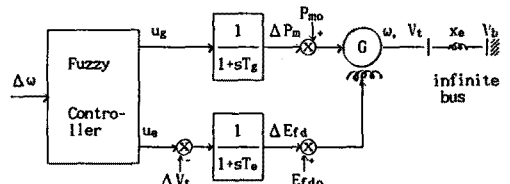


그림 1 전력계통의 안정화를 위한 모델계통
 Fig. 1 Model system for power system stabilization

그림 1를 기초로 한 여자기와 조속기계의 상태방정식은 식(7)과 같다. 여기서, u_e 와 u_g 는 여자기와 조속기의 제어 입력이다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Delta\delta}{dt} &= \Delta\omega \\ M \frac{d\Delta\omega}{dt} + D \Delta\omega &= \Delta P_m - \Delta P_e \\ \frac{d\Delta E_q'}{dt} &= \frac{1}{T_{do}} \left[\Delta E_{fd} - \Delta E_q' - (x_d - x_d') \Delta i_d \right] \\ \frac{d\Delta E_{fd}}{dt} &= -\frac{1}{T_e} \Delta E_{fd} - \frac{1}{T_e} \Delta V_t + \frac{1}{T_e} u_e \\ \frac{d\Delta P_m}{dt} &= -\frac{1}{T_g} \Delta P_m + \frac{1}{T_g} u_g \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

3. 자기조정 퍼지제어 기법

3-1. 퍼지추론

퍼지제어 시스템의 일반적인 구성은 그림 2와 같이 사실과 결론을 If-Then 형식으로 조작모델을 서술하는 퍼지제어 Rule부와 퍼지입력으로 부터 얻어진 결과를 합성하여 아나로그 출력을 연산하는 퍼지 추론부 및 피제어 프로세스로 크게 나눌 수 있다.[3.4.8.9]

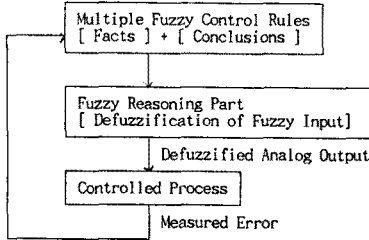


그림 2 퍼지제어 알고리즘의 블록선도
Fig. 2 Block-diagram of fuzzy control algorithm

입력 변수를 x_1, x_2, \dots, x_n , 출력 변수를 y 라고 하면 퍼지추론 룰은 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_p : \text{If } x_1 \text{ is } A_{p1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{p2} \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_{pn} \\ \text{Then } y \text{ is } B_p \quad (8)$$

여기서, B_p 는 p번째의 룰이고, $A_{p1}, A_{p2}, \dots, A_{pn}$ 은 입력변수의 퍼지변수, B_p 은 출력변수의 실수치를 나타낸다. 입력 데이터 쌍 $(x_j, y) = (x_1, x_2, \dots, x_n, y)$ 에 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. 본 논문에서 사용한 비퍼지화 방법으로는 일반적으로 많이 사용되는 Braae-Rutherford의 중력중심법(Center of Gravity Method)을 사용하였으며, 비퍼지화에 의한 최종 출력값 y^* 은 식(10)으로 나타내어진다.

$$y^* = \frac{\sum_{p=1}^r \mu_p \cdot B_p}{\sum_{p=1}^r \mu_p} \quad (10)$$

퍼지제어를 하기 위해서는 우선 퍼지화에 따른 멤버십 함수가 정의되어야 한다. 멤버십 함수는 삼각형, 사다리형, 종형 등이 있으며, 여기서는 일반적으로 많이 사용되고 계산하기에 편리한 삼각형의 멤버십 함수를 사용하였다.

그림 3은 멤버십 함수를 발생시키기 위한 모형이다.

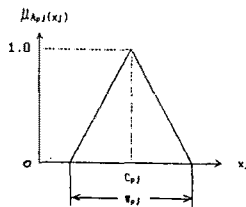


그림 3 멤버십 함수
Fig. 3 Membership function

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

삼각형 멤버십 함수의 파라미터 $\mu_{A_{pj}}(x_j)$ 의 결정은 식(11)에서 간단하게 계산된다.[2~4]

$$\mu_{A_{pj}}(x_j) = 1 - \frac{2 |x_j - C_{pj}|}{W_{pj}}, \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

3-2. 최급강하법에 의한 자기조정 알고리즘

퍼지제어의 결과로부터 얻어진 입-출력 데이터 쌍 (x_j, y) 즉, 각속도 편차 $\Delta\omega$ 와 그 미분치 $d\Delta\omega/dt$ 를 입력으로 한 퍼지제어의 출력 u_g, u_b 를 얻게 된다. 이들 얻어진 입출력 데이터 쌍을 이용하여 최급강하법을 이용한 퍼지추론의 자동동조 수법으로 전건부의 멤버십 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 식(13)과 같고, 식(14)~(16)과 같은 학습법칙으로 동조한다.

$$\left[-\frac{\partial E}{\partial C_{pj}} \quad -\frac{\partial E}{\partial W_{pj}} \quad -\frac{\partial E}{\partial B_p} \right] \quad (13)$$

$$C_{pj}(t+1) = C_{pj}(t) - G_{Cj} \cdot \frac{\partial E}{\partial C_{pj}} \quad (14)$$

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

$$B_p(t+1) = B_p(t) - G_B \cdot \frac{\partial E}{\partial B_p} \quad (16)$$

여기서 G_{Cj}, G_{Wj}, G_B 는 각 벡터량에 따라 정해지는 학습계수이다

4. 시뮬레이션 결과 및 검토

퍼지제어의 문제점인 정상상태 잔류편차를 제거하고자 퍼지규칙에 포함되는 각 퍼지변수의 중심치 및 폭을 최급 강하법에 의해 구하고, 이에 따른 응답 특성과 제안한 제어기법의 유용성을 살펴 보고자 한다.

전력계통의 안정화를 위한 퍼지 제어를 설계하기 위해서는 먼저 일반적인 룰이 생성되어야 한다. 여기에 적용되는 퍼지제어 룰은 식(17)과 같은 형태이다.

$$\text{If } e \text{ is } A_1 \text{ and } ed \text{ is } A_2 \text{ Then } u_e \text{ is } B_1 \text{ and } u_g \text{ is } B_2 \quad (17)$$

여기서, e 는 $\Delta\omega$ 의 출력치와 목표치와의 편차, ed 는 $\Delta\omega$ 의 편차 변화율 그리고 u_e, u_g 는 여자기 및 조속기의 제어입력을 표시한다.

제시된 제어규칙에 대한 여자기와 조속기의 전건부와 후건부의 초기상태 멤버십 함수의 중심치와 폭을 표 1에 나타내었다.

표 1 멤버십 함수의 초기값

Table 1 Initial values of membership functions

	error(e)		change of error(ed)		B_p
	C_{p1}	W_{p1}	C_{p2}	W_{p2}	
NB	-2.000E+00	2.000E+00	-2.000E+00	2.000E+00	-2.000E+00
NS	-1.000E+00	2.000E+00	-1.000E+00	2.000E+00	-1.000E+00
ZO	0.000E+00	2.000E+00	0.000E+00	2.000E+00	0.000E+00
PS	1.000E+00	2.000E+00	1.000E+00	2.000E+00	1.000E+00
PB	2.000E+00	2.000E+00	2.000E+00	2.000E+00	2.000E+00

먼저, 일반적인 퍼지제어의 결과로부터 얻어진 임-출력 데이터 쌍인 총 2000개의 데이터중 무작위로 200개만 취하여 반복 학습을 하였으며, 여기에 사용한 학습계수는 $G_{c1} = 0.02$, $G_{w1} = 0.15$, $G_{c2} = 0.007$, $G_{w2} = 0.054$, $G_B = 1.5$ 이다. 표 2은 조정된 멤버십 함수의 중심치와 폭을 나타낸것이다.

표 2 10회 학습후의 멤버십 함수값

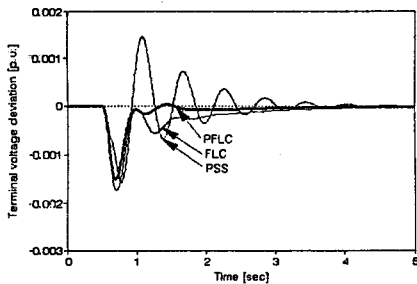
Table 2 Values of membership functions(after 10th Learning)

	error(e)		change of error(ed)		B_p
	C_{p1}	W_{p1}	C_{p2}	W_{p2}	
NB	-1.941E+00	1.885E+00	-2.002E+00	2.005E+00	-2.005E+00
NS	-5.327E-01	9.120E-01	-8.931E-01	1.734E+00	-1.039E+00
ZO	5.306E-02	1.108E+00	6.230E-06	1.664E+00	-2.907E-04
PS	1.007E+00	2.008E+00	1.008E+00	2.018E+00	1.013E+00
PB	2.184E+00	2.516E+00	2.036E+00	2.071E+00	2.000E+00

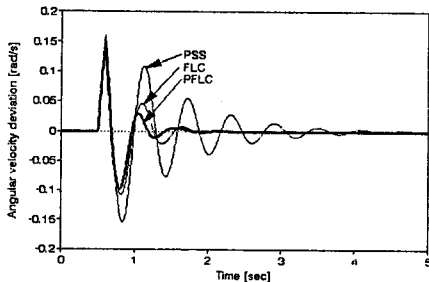
그림 4는 종래의 제어기법인 PSS와 퍼지제어 및 제안한 제어기법에 의한 단자전압, 각속도 및 회전자각 편차에 대한 응답특성이다. 이때 최급강하법의 학습 반복횟수는 10회일 때 이다.

먼저, 단자전압 특성은 PSS인 경우 언더슈트가 장시간 크게 진동을 발생시킨 반면 퍼지제어는 조금의 잔류편차가 있었지만 안정하게 수렴하였다. 반면에 제안한 기법은 언더슈트가 퍼지제어 보다 향상 되었을 뿐만아니라 잔류편차도 줄일 수 있었다. 또한 각속도 편차 특성 및 회전자각 편차 특성에서도 제안한 제어기법이 우수한 제어성능을 보였다.

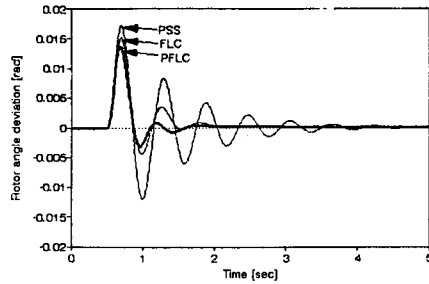
이상의 결과로부터 PSS인 경우 장시간의 진동으로 수렴특성이 좋지 못한다에 비해 퍼지제어는 과도시 응답 뿐만아니라 수렴특성에도 좋은 결과를 보였다. 그러나 정상상태에서 다소 잔류편차가 존재하였으므로 이를 개선하기 위해 퍼지규칙에 포함되는 각 퍼지변수에 대한 중심치 및 폭의 최적값을 최급 강하법에 의해 구하고, 이에 따른 응답 특성을 고찰한 결과, 과도응답 뿐만아니라 정상상태에서도 우수한 제어성능을 나타내 보였다.



(a) ΔV_t



(b) $\Delta \omega$



(c) $\Delta \delta$

그림 4 제어기법에 따른 응답특성

Fig. 4. Responses of control technique

5. 결 론

본 연구에서는 부하외란에 따른 전력계통의 안정도를 향상시키기 위해 동기발전기의 여자제어계 및 조속기제어계의 제어를 퍼지제어기로 구성하고, 최급강하법을 이용하여 퍼지변수의 전진부 및 후진부의 파라미터를 자기조정함으로써 더욱 개선된 제어성능을 보일 수 있음을 확인하였다. 연구 결과를 요약하면

첫째, 종래의 제어기법 PSS인 경우 부하외란에 대해 단자전압, 각속도 및 회전자각 편차의 특성에서 장시간의 진동으로 수렴 특성이 좋지 못한다에 비해 퍼지제어기는 각각의 최대 편차량, 정정 시간 등의 특성에서 우수함을 보였다. 그러나 정상상태에서 다소의 잔류편차가 잔존하고 있었다.

둘째, 최급강하법에 의해 퍼지변수의 중심치 및 폭을 반복 학습하여 최적의 퍼지변수를 구할 수 있었다. 이 과정에서 반복회수를 거듭할수록 최적인 값으로 수렴함을 볼 수 있었다.

셋째, 최급강하법을 이용하여 멤버십 함수의 폭과 중심치 조정으로 과도시 응답 뿐만아니라 정상상태에 있어서도 우수한 제어 효과를 나타내었다.

참 고 문 헌

- [1] A.Ishigame, et al., "Combination of Fuzzy and Optimal Controls for Stabilizing Power Systems", IEE J, Vol. 110, No. 10, 1990.
- [2] M.A.Iskandar, "Stabilizing control of power system using Fuzzy control", IEE J., Vol.112-B, No. 12, pp.1111-1120, 1992.
- [3] 정형환, 이준탁, 김해재, 정동일, 주석민, "2지역 전력계통의 부하주파수제어를 위한 퍼지추론 기법의 적용", 한국퍼지시스템학회 논문지, Vol.2, No.4, 1992.
- [4] 정형환, 이준탁, 정동일, 주석민, 김해재, 이광우, "전력계통의 안정화를 위한 퍼지제어의 적용", 대한전기학회회계학술대회 논문집(A), pp.109-111, 1993.
- [5] Yao-Nan Yu, "Electric Power System", pp. 65-94, Academic Press, 1983.
- [6] P.M.Anderson, A.A.Fouad, "Power System Control and Stability", The IOWA State University Press, 1977.
- [7] A.J.Wood, B.F. Wollenberg, "Power Generation, Operation and Control", John Wiley & Sons Inc., 1984.
- [8] Witold Pedrycz, "Fuzzy Control and Systems", John Wiley & Sons Inc., 1989.
- [9] A.Ishigame et al., "Power System Stabilizing Control Based on Simplification of Constructing Fuzzy Control Rules" IEE J, Vol.113-B, No.1, 1993.