

부하주파수 제어를 위한 새로운 퍼지 PID 제어기에 관한 연구

정형현\* 주석민\* 정동일\* 이대기\*\*

\* 동아대학교 전기공학과 \*\* 동의대학교 전기공학과

A Study on New Fuzzy PID Controller for the Load Frequency Control

H.H.Chung\* S.M.Joo\* D.I.Chung\* T.G.Lee\*\*

\* Dept. of Electrical Engineering Dong-A University

\*\* Dept. of Electrical Engineering Dong-Fui University

**Abstract** - This paper presents a design technique of the FPID controller for the load frequency control of power system. parameters of FPID controller are self-tuned by the fuzzy inference algorithm. The computer simulation results show that the proposed controller are more excellent control characteristics than conventional in transient-state and steady-state response

1. 서론

전력의 신뢰도와 질의 향상을 모색하기 위한 방안으로 많은 연구가 이루어지고 있는 부하주파수 제어는 계통의 운용 및 제어에 있어서 주요한 과제 중의 하나이며 항상 발생하는 부하변동에 대해서 각 지역내의 주파수 및 연계선 조류 편차를 허용치 내로 수렴시키기 위하여 계통내의 조정용 발전소의 유효전력 출력을 조정하는 역할을 하고 있다.<sup>1-4)</sup>

따라서 본 논문에서는 전력계통의 부하주파수 제어를 위한 FPID(Fuzzy Proportional Integral Derivative) 제어기를 제안 하였다. 제안한 FPID 제어기는 제어대상의 특성이 변화되거나 부하외란에 대해 적응성을 갖도록 PID 제어기의 파라미터를 자동으로 조정이 가능한 제어기로서, 최근 선형성·비선형성을 불문하고 전문가의 지식 및 경험을 제어 규칙으로 퍼지추론에 의해 제어동작을 결정하는 퍼지추론 기법을 이용하여 PID 제어기의 파라미터를 제어대상의 변화에 따라 가변시켰다.

이상의 이론을 기초로 종래의 제어기법인 최적제어, PID 제어 및 퍼지제어와 비교하여 제어성능이 우수하며, 견실한 제어기임을 입증하고자 한다.

2. 부하주파수 제어 모델 계통 방정식

전력 계통은 일반적으로 다수의 발전소와 부하수요 지점 및 이들을 결합하는 송전선으로 구성되어 있을 뿐만 아니라 규모가 대형화되고, 구조 또한 복잡·다기화 되고 있다. 그림 2-1은 2개의 지역이 상호 연계된 전력 계통의 블록 선도이다.<sup>1,2)</sup>

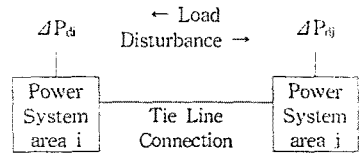


Fig. 2-1. Interconnection of control areas.

먼저, i 지역에서 주파수 제어계의 동특성 모델을 작성하기 위하여 이 지역 내에  $\Delta P_{di}$ [pu MW]의 부하 전력 변동이 발생되었다고 할 때, i 지역에 대한 전력 평형 방정식을 수학적인 형태로 나타내면 식 (2-1)과 같다.

$$\frac{2H_i}{f} \frac{d}{dt} \Delta f_i + D \cdot \Delta f_i + \Delta P_{tie\ i\ j} = \Delta P_{li} - \Delta P_{di} \quad (2-1)$$

그리고, j지역과 j지역의 연계선 조류 편차  $\Delta P_{tie\ i\ j}$ 는 식(2-2)와 같은 비선형식으로 표현된다.

$$\Delta P_{tie\ i\ j} = \frac{|E_i| |E_j|}{X_{ij}} (\sin(\delta_i^* + \Delta \delta_{ij}) - \sin \delta_j^*) \quad (2-2)$$

또한, 발전기-터어빈-조속기 계통에 있어 터어빈 발전기와 터어빈에 부속된 회전속도 조정을 위한 조속기의 관계는 식(2-3)과 (2-4)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \Delta P_{ti} = -\frac{1}{T_{ti}} \Delta P_{ti} + \frac{1}{T_{ti}} \Delta P_{gi} \quad (2-3)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta P_{gi} = -\frac{1}{T_{gi}} \Delta P_{gi} - \frac{1}{T_{gi}R} \Delta f_i + \frac{1}{T_{gi}} \Delta P_{di} \quad (2-4)$$

3. 제안하는 FPID 제어기

본 논문에서는 PID 제어기와 퍼지제어기의 장점을 이용한 FPID 제어기를 설계하였다. 이때 FPID 제어기는 제어 대상의 특성이 변화되거나 부하 외란에 대해 적응성이 있는 제어기이며, PID 파라미터의 자동 동조 기법으로는 제어 대상에 대한 정확한 모델화 없이 제어 규칙을 이용하여 온라인(on-line)으로 단시간에 제어 입력을 결정할 수 있는 퍼지추론 알고리즘을 기초로 하였다.

3.1. 퍼지 추론 기법<sup>5,6)</sup>

입력 변수를 X와 Y, 출력 변수를 Z라고 하면, 퍼지추론 규칙은 식(3-1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{array}{l}
 \text{Rule 1 : } A_1 \text{ and } B_1 \Rightarrow C_1 \\
 \dots \dots \dots \dots \dots \\
 \text{Rule n : } A_n \text{ and } B_n \Rightarrow C_n \\
 \text{Fact : } x_n \text{ and } y_n \\
 \hline
 \text{Conclusion : } C'
 \end{array} \quad (3-1)$$

여기서,  $A_i$ 는 집합  $X$ 에서의 퍼지집합,  $B_i$ 는  $Y$ 의 퍼지집합 이고,  $C_i$ 는 집합  $Z$ 의 퍼지집합 이다. 이때  $x_o \in X, y_o \in Y$ 이다.  $i$  번째의 퍼지 규칙은 「 $A_i$  and  $B_i \Rightarrow C_i$ 」이고 이 규칙은 식(3-2)와 같이 정의된다.

$$\mu_{A_i \text{ and } B_i \Rightarrow C_i}(x_o, y_o) = \mu_{A_i}(x_o) \wedge \mu_{B_i}(y_o) \wedge \mu_{C_i}(z) \quad (3-2)$$

여기서,  $\wedge$  는 min을 의미한다. 추론 결과인  $C_i$ 는 사실 「 $x_o$  and  $y_o$ 」에서 추론되며, 퍼지규칙 「 $A_i$  and  $B_i \Rightarrow C_i$ 」는 식(3-3)과 같이 나타내어진다.

$$\mu_{C_i}(z) = \mu_{A_i}(x_o) \wedge \mu_{B_i}(y_o) \wedge \mu_{C_i}(z_o) \quad (3-3)$$

식(3-1)의 최종 결론  $C_i$ '는 식(3-3)에서 구한  $C_1', C_2', \dots, C_n'$ 의 합집합이 된다. 즉,  $C' = C_1' \cup C_2' \cup \dots \cup C_n'$

이다. 이것은

$$\mu_{C'}(z) = \mu_{C_1'}(z) \vee \dots \vee \mu_{C_n'}(z) \quad (3-5)$$

가 된다. 여기서,  $\vee$ 는 max를 의미한다. 퍼지집합  $C'$ 에 대한 최종 출력값  $z_o^*$ 는 식(3-6)과 같은 무게중심법으로 구해진다.

$$z_o^* = \frac{\int z \cdot \mu_{C'}(z) dz}{\int \mu_{C'}(z) dz} \quad (3-6)$$

### 3.2. FPID 제어기의 설계

PID 제어기의 파라미터를 자동으로 조정하기 위한 제어 수법으로는 퍼지추론 알고리즘을 도입하였다. 먼저 PID 제어기의 파라미터 특성에 대해 고찰하고, 다음으로 파라미터 특성에 따른 퍼지추론 규칙을 생성하였다. 이상의 고찰을 통해 PID 제어기의 파라미터를 자동 조정되도록 하였다.

먼저, 그림 3-1의 스텝 응답에 대하여 PID 제어기의 파라미터 특성을 각 영역에 대해 살펴보면 다음과 같이 4가지 영역으로 나뉘어진다.

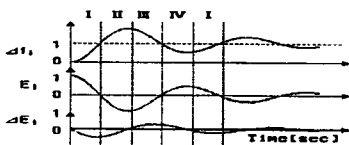


Fig. 3-1. Unit step responses

- I 영역 : 빠른 시간을 요구하므로 비례 이득과 적분 이득을 증가시킴으로써 상승 시간을 줄인다.
- II 영역 : 오버슈트가 발생하였으므로 비례 이득과

미분 이득을 감소시키고, 적분 이득을 증가시킴으로써 오버슈트를 줄인다.

III 영역 : 오차 변화의 기울기가 반대이고, 오차가 줄어들고 있으므로 B 영역과 부호만 반대로 한다.

IV 영역 : 이 영역은 설정치 보다 낮아지고 있는 언더슈트 상태이므로 적분 이득은 감소시키고, 미분 이득을 증가시켜 언더슈트를 줄인다.

이와 같이 PID 제어기의 파라미터 특성에 대한 내용을 근거로 하여, PID 제어기의 파라미터 선정은 각 영역에 대한 파라미터 특성을 이용하면 표 3-1와 같은 제어 규칙으로 결정된다. 이때 사용된 언어적 변수로는 전건부의  $E_i$ 와  $\Delta E_i$ 를 각각 5개로 NB, NS, ZO, PS, PB를 사용하였으며, 후건부의 각 파라미터에 대한 언어적 변수 또한 각각 5개를 사용했다.

Table 3-1. Fuzzy inference rules for  $K_P$ ,  $K_I$  and  $K_D$   
(a)  $K_P$

|              |    | $K_P$ |    | $E_i$ |    |    |    |    |
|--------------|----|-------|----|-------|----|----|----|----|
|              |    |       |    | NB    | NS | ZO | PS | PB |
| $\Delta E_i$ | PB | ZO    | PS | ZO    | PS | PB | PB |    |
|              | PS | NS    | ZO | PS    | PS | PS | PB |    |
|              | ZO | NS    | NS | ZO    | ZO | PS | PS |    |
|              | NS | NB    | NS | NS    | NS | ZO | PS |    |
|              | NB | NB    | NB | NS    | NS | NS | ZO |    |

(b)  $K_I$

|              |    | $K_I$ |    | $E_i$ |    |    |    |    |
|--------------|----|-------|----|-------|----|----|----|----|
|              |    |       |    | NB    | NS | ZO | PS | PB |
| $\Delta E_i$ | PB | ZO    | NB | NS    | NB | NB | NB |    |
|              | PS | ZO    | ZO | NS    | NS | NB | NB |    |
|              | ZO | PS    | PS | ZO    | NS | NS | NS |    |
|              | NS | PB    | PS | PS    | ZO | ZO | NB |    |
|              | NB | PB    | PB | PS    | ZO | ZO | ZO |    |

(c)  $K_D$

|              |    | $K_D$ |    | $E_i$ |    |    |    |    |
|--------------|----|-------|----|-------|----|----|----|----|
|              |    |       |    | NB    | NS | ZO | PS | PB |
| $\Delta E_i$ | PB | ZO    | PB | PS    | PB | PB | PB |    |
|              | PS | ZO    | ZO | PS    | PS | PS | PB |    |
|              | ZO | NS    | NS | ZO    | PS | PS | PS |    |
|              | NS | NB    | NS | NS    | ZO | ZO | PB |    |
|              | NB | NB    | NB | NS    | ZO | ZO | ZO |    |

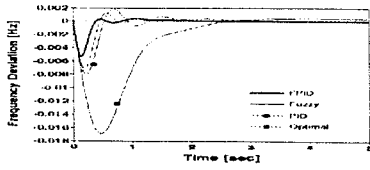
그리고, 입력변수와 파라미터들에 대한 1, 2 지역의 전건부와 후건부의 멤버십 함수는 삼각형을 사용하였다.

### 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

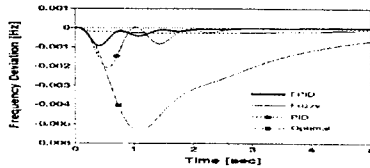
본 연구에서는 제어 대상의 특성이 변화되거나 부하 외란에 대해 적응성을 갖도록 동기 발전기에 대한 비례, 적분 및 미분 요소로 구성된 FPID 제어기를 설계하였다. 이때 FPID 제어기의 파라미터는 퍼지추론 알고리즘을 이용하여 자동 조정되도록 하였다.

사례 연구의 조건으로는 부하 외란 ( $\Delta P_{dl} = 0.01$ [p.u.])이 1 지역에만 지속적으로 주어졌을 때로 하였으며, 제안한 FPID 제어기를 검증하기 위해 종래의 제어기법인 최적제어, PID 제어 및 퍼지제어를 사용하였다.

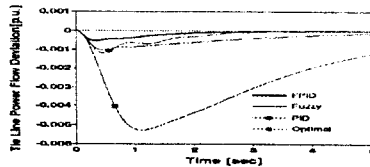
그림 4-1은 제안하는 FPID 제어기의 우수성을 검증하기 위해 종래의 제어 기법과 응답 특성을 비교한 것이다.



(a)  $\Delta f_1$



(b)  $\Delta f_2$



(c)  $\Delta P_{tie12}$

Fig. 4-1. Dynamic responses of power system by Optimal, PID, Fuzzy and FPID controller

그림 4-1은 제안한 FPID 제어기와 종래의 제어 기법에 대한 1, 2 지역의 주파수 편차와 연계선 조류 편차의 응답 특성을 나타내고 있다. 이때 그림 4-1 (a)의 1 지역에 대한 주파수의 최대 편차량을 비교해 보면 최적제어 기법은  $-16.8864 \times 10^{-3}$  [Hz], PID 제어는  $-79.8592 \times 10^{-4}$  [Hz]로 Ziegler-Nichols 동조법에 의한 PID 제어가 최적제어 보다 약 53%의 감소를 나타내었으며, 퍼지제어의 주파수 최대 편차량은  $-69.6848 \times 10^{-4}$  [Hz]로 최적 제어보다는 59%의 감소를 보였을 뿐만 아니라 PID 제어기보다도 양호한 응답 특성을 보여주고 있다.

또한, 제안한 FPID 제어기는  $-52.5558 \times 10^{-3}$  [Hz]로 최적제어보다 약 69%의 감소로 비교 대상의 제어 기법들보다는 주파수 최대 편차량을 매우 경감시킬 수 있었다. 또한 도달 시간 및 정정 시간을 비교해 보면 제안한 FPID 제어기의 도달 시간은 0.4[sec]로 종래의 제어 기법들 보다 초기 과도 상태에서 빠른 응답을 나타내었을 뿐만 아니라 정정 시간도 1.2[sec]로 빠른 수렴 특성을 나타내었다.

그림 4-1의 (b)는 2 지역의 주파수 편차량의 응답 특성을 나타내고 있다. 여기에서도 제안된 FPID 제어가 최적제어 및 PID 제어보다 주파수 최대 편차량을 경감시켰을 뿐만 아니라 도달 시간과 정정 시간도 줄일 수 있었다. 그러나, 퍼지제어와 비교해

보면 주파수 최대 편차량에 있어서는 퍼지제어의 경감 폭이 큰 반면, 정정 시간에 있어서는 제안한 FPID 제어가 더욱 빠른 속응성을 보였다.

또한, 그림 4-1의 (c)인 연계선 조류 편차량 역시 제안한 FPID 제어기의 응답 특성이 종래의 제어 기법보다 우수한 특성을 나타내었을 뿐만 아니라 도달 시간 및 정정 시간도 최소화됨을 알 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구는 전력 계통의 부하주파수 제어를 위한 FPID 제어기를 제안하였다. 제안한 FPID 제어기는 제어 대상의 특성이 변화되거나 부하 외란에 대해 적응성을 갖도록 퍼지추론 알고리즘을 이용하여 PID 제어기의 파라미터를 제어 대상의 변화에 따라 가변 시켰다.

이상의 이론을 기초로 제안한 FPID제어기와 종래의 제어 기법을 2 지역 계통의 부하주파수 제어에 적용시켜 비교·고찰한 결과는 다음과 같다.

- 1) 퍼지추론에 의해 동조된 FPID 제어기의 파라미터는 초기 과도시에 파라미터의 변화 폭이 컸으며, 오차가 감소됨에 따라 변화량이 감소되어 일정한 값을 유지하였다.
- 2) 제안한 FPID 제어기는 종래의 제어 기법들 보다 주파수와 연계선 조류 편차량을 큰 폭으로 경감시켰을 뿐만 아니라 도달 시간과 정정 시간도 최소화시켜 제어 성능이 우수함을 확인하였다.

## 참고 문헌

- 1) C. E. Fosha, Ollei I. Elgerd, "The megawatt-frequency control problem: A new approach via optimal control theory", IEEE Trans., Vol. PAS-80, No. 4, pp.553-577, 1970.
- 2) A. J. Wood, B. F. Wollenberg, "Power Generation, Operation and Control", John Wiley & Sons, 1984.
- 3) V. Avatchanakorn, Y. Mizutani, "Area decomposition type load frequency control considering power demand estimation and computation time delay", IEE J., Vol. 109, No. 1, pp. 9-16, 1989.
- 4) K. A. Lee, H. Yee, "Self tuning load frequency controller for inter connected power system including effects of nonlinearities", Automat. Contr. Conf., pp.276-281, 1990.
- 5) M. Yoshida, et al, "Gain tuning method for design of fuzzy control system", Proceeding of the International Conference on Fuzzy Logic & Neural networks, Japan, No. 7, pp.405-408, 1990.
- 6) M. Maeda, S. Murakami, "Self-tuning fuzzy controller", 計測自動制御學會論文集, Vol. 24, No. 2, pp.60-67, 1988.