1999년도 대한전기학회 정기총회 및 추계학술대회 논문집 1999. 11. 20

전력시스템의 부하주파수제어를 위한 강인한 FPID제어기의 설계와 제어특성

김영문 · 김해재 · 안인모 · °주석민
마산대학 전기공학계열

Design of Robust FPID Controller and Control Characteristics for Load Frequency Control in Power System

Young-Moon Kim · Hae-Jae Kim · In-Mo Ahn · Seok-Min Joo
Dept. of Electrical Eng., Masan College

Abstract - This paper proposes a robust FPID(Fuzzy Proportional Integral Derivative) controller for the LFC(load frequency control) of 2-area power system. The PID gain parameters of the proposed robust FPID controller are self-tuned by PSGM(Product Sum Gravity Method) which is very similiar to human's inference procedures. As the results of simulation, the proposed FPID controller against various load disturbances shows that it is superior to the conventional control techniques such as optimal, PID and fuzzy control in the response characteristics of frequency and tie line power flow.

1. 서 론

본 논문에서는 퍼지제어 이론이 갖는 장점을 이용하여 동기 발전기에 대한 비례, 적분 및 미분 요소로 구성된 FPID(Fuzzy Proportional Integral Derivative) 제어기를 설계하였으며, FPID 제어기의 각 파라미터들을 퍼지추론 알고리즘을 이용하여 자동 조정되도록 하였다. 퍼지추론 기법으로 인간의 사고와 직관에 근접한 새로운 추론법인 PSGM (Product -Sum Gravity Method)을 사용하였다[4-7]. 이를 부하주파수 제어 모델에 적용하여 제안한 FPID제어기가 다양한 부하 외란에 대해 각 지역의 부하주파수 편차 및 연계선 조류 편차의 응답 특성이 종래의 제어 기법인 최적제어, PID 제어 및 퍼지제어와 비교하여 제어 성능이 우수하며, 견실한 제어기임을 입증하고자 한다.

2. 모델 계통 방정식

부하주파수 제어는 계통 운용 및 제어에 있어서 주요한 과제중의 하나이며 항상 발생하는 부하 변동에 대해서 각 지역 내의 주파수 및 연계선 조류 편차를 허용치 내로 수렴시키기 위하여 계통내의 조정용 발전소의 유효전력 출력을 조정하는 역할을 하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 2개의 지역이 상호 연계된 전력 계통을 대상으로 하였다[8]. 먼저, i 지역에 대한 전력 평형 방정식을 수학적인 형태로 나타내면 식(1)과 같다.

$$\frac{2H_i}{f^*}\frac{d}{dt}\Delta f_i + D_i \cdot \Delta f_i + \Delta P_{tie\ ij} = \Delta P_{ti} - \Delta P_{di} \quad (1)$$

여기서, $H_i \triangleq \frac{W_{kin}}{P_{ri}}$ 는 관성 상수, P_{ri}은 i지역 정격전력, W_{kin}는 시스템의 운동에너지, f^*는 공칭주파수를 나타낸다.

연계선 전력조류에 대한 미분방정식은 식(2)와 같이 표현된다.

$$\frac{d}{dt}\Delta P_{tie\ ij} = T_{ij}^*(\Delta f_i - \Delta f_j) \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}\int \Delta P_{tie\ ij}dt = T_{ij}^*(\int \Delta f_i dt - \int \Delta f_j dt)$$

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

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

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

여기서, ΔP_{ti} 는 i 지역 터빈발전기의 발전량 증가분, ΔP_{gi} 는 i 지역 조속기의 발전량 증가분, R_i은 i 지역 발전기의 속도 조정률, ΔP_{ci} 는 i 지역 속도 변환 장치 위치의 증가분을 나타낸다.

3. 제안하는 강인한 FPID 제어기

본 논문에서 제안한 강인한 FPID 제어기는 PID 제어기와 퍼지제어기의 장점을 이용하여 설계하였으며, 그 구성도는 그림 1과 같다.

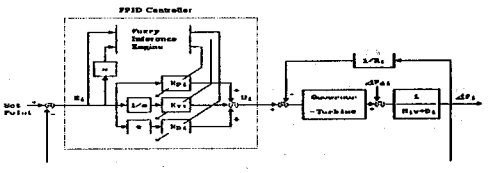


Fig. 1 Block-diagram of FPID controller for area i

강인한 FPID 제어기는 제어 대상의 특성이 변화되거나 부하 외란에 대해 적응성이 있는 제어기이다. PID 파라미터의 자동동조 기법으로는 제어 대상에 대한 정확한 모델화 없이 제어 규칙을 이용하여 온라인(on-line)으로 단시간에 제어 입력을 결정할 수 있는 퍼지추론 알고리즘을 기초로 하였다. 본 논문에서는 인간이 행하고 있는 추론법과 유사한 기법인 PSGM (Product-Sum Gravity Method)을 도입하였다. 또한, PID 제어기의 파라미터 특성을 고찰하여 PID 파라미터 특성에 따른 제어규칙을 생성하였다. 이를 2 지역 전력 계통의 부하주파수 제어

에 적용시켜 FPID 제어기의 우수성을 입증하고자 한다.

3.1 PSGM 추론 기법

입력 변수를 X와 Y, 출력 변수를 Z라고 하면, 퍼지추론 규칙은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{array}{l}\text{Rule 1 : } A_1 \text{ and } B_1 \Rightarrow C_1 \\ \text{Rule 2 : } A_2 \text{ and } B_2 \Rightarrow C_2 \\ \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \\ \text{Rule n : } A_n \text{ and } B_n \Rightarrow C_n \\ \text{Fact} \quad : \quad x_o \text{ and } y_o \\ \hline \text{Conclusion} \quad : \qquad C'\end{array} \tag{5}$$

여기서, A_i는 집합 X에서의 퍼지집합, B_i는 Y의 퍼지집합 이고, C_i는 집합 Z의 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(6)과 같이 정의된다.

$$\mu_{A_i \text{ and } B_i \Rightarrow C_i}(x,y,z) = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y) \cdot \mu_{C_i}(z) \tag{6}$$

여기서, "·" 는 product(산술곱)을 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(7)과 같이 나타내어진다.

$$\mu_{C_i'}(z) = \mu_{A_i}(x_o) \cdot \mu_{B_i}(y_o) \cdot \mu_{C_i}(z_o) \tag{7}$$

식(5)의 최종 결론 C'는 식(7)에서 구한 C_1', C_2', …, C_n'를 "+" sum(합) 연산자를 사용하여 식(8)과 같이 구할 수 있다.

$$\mu_{C'}(z) = \mu_{C_1'}(z) + \cdots + \mu_{C_n'}(z) \tag{8}$$

퍼지 집합 C'에 대한 최종 출력값 z_o는 먼저, 식(10)에서 C_i'의 무게중심을 z_i 로 두면 식(9)와 같이 된다. 이때 S_i는 C_i'의 면적을 나타낸다.

$$z_i = \frac{\int z \cdot \mu_{C_i'(z)} dz}{\int \mu_{C_i'(z)} dz} = \frac{\int z \cdot \mu_{C_i'(z)} dz}{S_i} \tag{9}$$

따라서, 식(8)의 마지막 결론 C'의 무게중심 z_o는 식(10)과 같이 주어진다. 이때, 무게중심 z_o는 C_i'의 면적인 Si와 C_i'의 무게중심인 z_i의 무게 평균으로 구해진다.

$$z_o = \frac{\int z \cdot \mu_{C'(z)}\, dz}{\int \mu_{C'(z)}\, dz} = \frac{S_1 z_1 + S_2 z_2 + \cdots + S_n z_n}{S_1 + S_2 + \cdots + S_n} \tag{10}$$

3.2 강인한 FPID 제어기의 설계

먼저, 그림 2의 스텝 응답에 대하여 PID 제어기의 파라미터 특성을 각 영역에 대해 살펴보면 다음과 같이 4가지 영역으로 나뉘어진다.

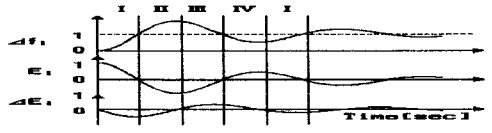


Fig. 2 Unit step responses

이때 I 영역은 빠른 시간을 요구하므로 비례 이득과 적분 이득을 증가시킴으로써 상승 시간을 줄여주며, II 영역은 오버슈트가 발생하였으므로 비례 이득과 미분 이득을 감소시키고, 적분 이득을 증가시킴으로써 오버슈트를 줄인다. III 영역은 오차 변화의 기울기가 반대이고, 오차가 줄어들고 있으므로 II 영역과 부호만 반대로 한다. 또한, IV 영역은 설정치 보다 낮아지고 있는 언더슈트 상태이므로 적분 이득은 감소시키고, 미분 이득을 증가시켜 언더슈트를 줄인다.

그림 2의 스텝응답을 기초로 제어 규칙을 결정하였다. 이때 사용된 언어적 변수로는 전건부의 E_i와 ΔE_i를 각각 5개로 NB, NS, ZO, PS, PB를 사용하였으며, 후건부의 각 파라미터에 대한 언어적 변수 또한 각각 5개를 사용했다. 그리고, 입력변수 및 파라미터들에 대한 1, 2 지역의 전건부와 후건부의 멤버쉽 함수는 그림 3와 같이 정의하였다.

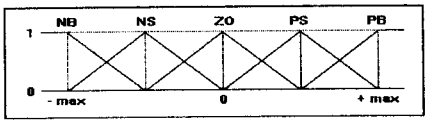
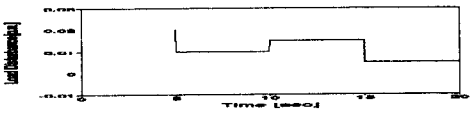


Fig. 3 Membership functions of antecedent and cosequent part

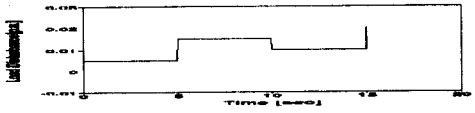
4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 연구에서는 다수의 제어 지역이 상호 연계된 전력 계통의 효율적인 주파수 제어 대책을 검토하기 위하여 C. E. Fosha[8] 등이 제안한 2 제어 지역의 모델 계통을 사용하였다.

사례 연구의 조건으로는 부하 외란을 다양하게 변화시켰을 때 제안한 FPID 제어기의 속응성과 강인성을 고찰하였으며, 제안한 제어 기법과 비교할 종래의 제어 기법으로는 참고문헌[8]]의 performance를 최적화하는 제어기법(optimal) , PID 제어[1] 및 퍼지제어[6]을 사용하였다.



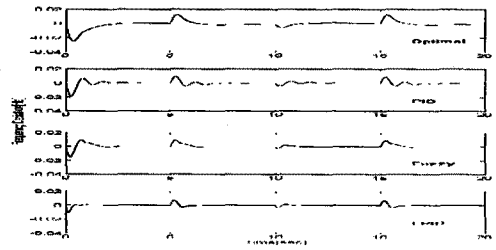
(a) area 1



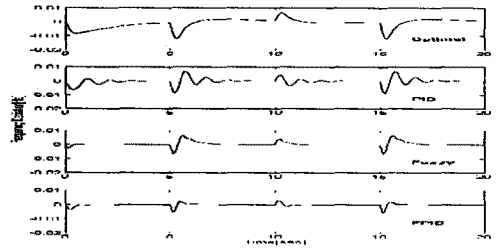
(b) area 2

Fig. 4 Load disturbance of area i (i=1,2)

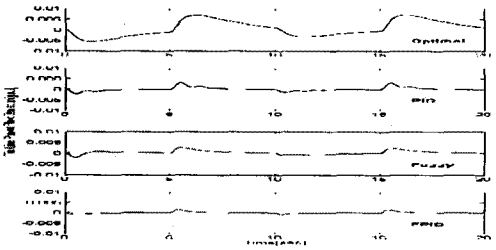
그림 5는 그림 4와 같이 부하변화가 다양하게 주어졌을 때 제안한 FPID 제어기의 우수성을 검증하기 위해 종래의 제어 기법인 최적제어, PID제어 및 퍼지제어에 대한 각 지역의 주파수 편차와 연계선 조류 편차의 응답특성을 나타내고 있다.



(a) Δf_1



(b) Δf_2



(c) ΔP_{tie12}

Fig. 7 Dynamic responses of 2-area power system

그림 5의 각 지역의 주파수편차량 및 연계선편차량의 응답특성에서 먼저, 그림 5 (a)와 (b)는 각 지역에 대한 주파수 편차량을 비교한 것이다. 여기에서 최적제어는 1, 2 지역 모두 다른 제어기법들 보다 주파수 최대편차량이 큰 폭을 나타내고 있지만, 진동없이 정상상태에 도달하는 특성을 보였다. 또한, Ziegler-Nichols에 의한 동조법인 PID제어의 응답특성을 살펴보면 초기 과도시 조금의 진동이 발생되었지만 최적제어보다는 빠른 상승시간을 보였으며, 정정시간도 최소화시킬 수 있었다. 그러나 초기 과도시 응답특성이 양호한 장점을 지닌 퍼지제어와 퍼지추론 알고리즘을 이용한 FPID제어 보다는 주파수 최대 편차량이 큰 폭으로 나타났다. 마지막으로 제안한 FPID 제어기의 주파수특성을 살펴보면 종래의 제어기법인 최적제어, PID제어 및 퍼지제어보다 제안한 FPID제어가 주파수 최대 편차량을 큰 폭으로 경감시켰을 뿐만 아니라 다양한 부하외란에 대해서도 적응성이 좋았다. 또한, 도달시간과 정정시간도 최소화시킴을 알 수 있었다.

그림 5의 (c)는 연계선 조류 편차량의 응답특성을 나타내고 있다. 이 때 부하외란의 발생은 주파수의 변동을 초래할 뿐만 아니라 계통간에 상호 연계된 조류도 변하게 되어 일정 전력을 유지할 수 없게 된다. 그러므로, 주파수가 일정하게 유지된다면 연계선 조류의 변화도 안정화되어서 계통의 연계운전을 원활하게 운영해 나갈 수 있다. 따라서, 각 지역에 대한 부하변동이 그림 4의 조건하에서 그림 5 (c)의 연계선 조류 편차량의 응답특성을 살펴보면 제안한 제어기법이 종래의 제어기법보다 최대 편차량을 경감시켰을 뿐만 아니라 도달시간 및 정정시간에 있어서도 최소화시킴을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구는 PID제어기와 퍼지제어기의 장점을 이용한 강인한 FPID 제어기를 제안하였다. 이를 2 지역 전력계통의 부하주파수 제어에 적용시켜 제어성능이 우수하며, 견실한 제어기임을 입증하였다. 이때 제안한 FPID 제어기는 제어대상의 특성이 변화되거나 부하 외란에 대해 적응성을 가지고 PID 제어기의 파라미터를 자동으로 조정이 가능한 제어기로서, 인간의 추론법과 유사한 PSGM을 이용하여 PID 제어기의 파라미터를 제어대상의 변화에 따라 가변 시켰다. 이상의 이론을 기초로 종래의 제어기법인 최적제어, PID 제어 및 퍼지제어와 동특성 응답을 비교하면 제안한 FPID 제어기는 종래의 기법 보다 주파수와 연계선 조류 편차량을 큰 폭으로 경감시켰을 뿐만 아니라 도달시간과 정정시간도 최소화시켜 제어성능이 우수함을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] F. Cameron et al, "A self-tuning controller with PID structure," Int. J. Control, Vol. 29, pp. 401-417, 1983.

[2] D. L. Melo et al, "On-line, closed-loop identification of multivariable systems," Ind. Eng. Chem. Res., vol. 31, pp. 274, 1992.

[3] S. W. Sung and I. Lee, "On-line Process identification method and automatic tuning of PID controllers." Ind. Eng. Chem. Res., 1995.

[4] M. A. Iskander, et al, "On combination of ΔP-type pss and $\Delta\omega$-type fuzzy control for power system stabilize r", 電學論B Vol. 112, No. 9, pp.840-841, 1990.

[5] Y. Terasawa, S. Iwamoto, "Optimal power flow solution using fuzzy mathematical programming", Electrical engineering in Japan, Vol. 108, No. 3, pp.46-54, 1990.

[6] H. Nomura, et al, " A learing method of inference rules by descent methods", IEEE, pp.203-210, 1992.

[7] A. Kandel, G. Langholz, Fuzzy Control Systems, CRC Press, pp.276-294, 1993.

[8] C. E. Fosha, et al, "The megawatt-frequency control problem : A new approach via optimal control theory", IEEE Trans. Vol. PAS-80, No. 4, pp.553-577, 1970