

# 자기조직화적 퍼지제어기를 이용한 전력계통의 부하주파수제어

이준탁 · 정동일 · 안병철 · 주석민 · 정형환  
 동아대학교 전기공학과

Load Frequency Control of Power System  
 using Self Organizing Fuzzy Controller

J.T.Lee · D.I.Chung · B.C.An · S.M.Joo · H.H.Chung  
 Dong-A Univ. Electrical Eng.

## Abstract

This paper presents a design technique of self-organizing fuzzy controller using a learning method of fuzzy inference rule by a gradient method for load frequency control of power system. The membership functions in antecedent part and in consequent part of fuzzy inference rules are tuned by the gradient method.

The related simulation results show that the proposed fuzzy controller are more powerful than the conventional ones for reduction of undershoot and deviation of load frequency in steady-state, and for minimization of settling time.

## 1. 서론

전력계통의 부하주파수 제어는 계통 운용 및 제어에 있어서 주요한 과제중의 하나이다.<sup>1~4)</sup>

본 연구에서는 시스템의 선형성, 비선형성에 관계없이 전문가의 지식 및 경험에 기초한 제어규칙 및 최적제어기를 기반으로 구배법에 의해 퍼지제어기의 전건부 및 후건부의 파라미터를 조정하여, If-Then 형식의 언어적 최적퍼지 Rule을 자동 생성하는 자기조직화적 퍼지제어기를 구성하고, 이를 비선형 2지역 전력계통 모델의 부하주파수제어에 적용하여 Computer 시뮬레이션을 행하고, 제안한 기법에 의해 파라미터 조정을 한 경우가 조정하지 않은 경우보다 더 양호한 응답 특성이 얻어짐을 보이고 그 유용성을 검토하고자 한다.

## 2. 모델계통

전력계통은 일반적으로 다수의 발전소 및 다수의 부하수로 지점과 이들을 결합하는 송전선으로 구성되어 있으며 이 시스템구성은 복잡·다기화 되고 있다. 즉, N지역이 상호연계된 전력계통은 각 지역에 대한 일련의 1개 비선형 미분방정식으로 기술될 수 있다. i지역의 Sub-System에 대한 상태방정식은

$$\dot{X}_i = f_i(X_i, U_i, \Delta P_{di}) \quad (2.1)$$

로부터

$$X_i = A_i X_i + B_i U_i + C_i \Delta P_{di} + T_i \Delta P_{tieij} \quad (2.2)$$

로 표현된다.

단,  $X_i$  는 n개의 상태 vector,  $U_i$ 와  $\Delta P_{di}$ 는 스칼라 형태의 제어입력 및 외란이며, n은 각 지역에서의 상태변수의 수이고,  $\Delta P_{tieij}$ 는 j지역에서 i지역에 미치는 연계선 전력 편차량을 나타낸다.

그리고,  $x_{ij} \gg p_{ij}$  이면 모선 i에서 유입하는 전력은 식(2.3)로 주어진다.

$$P_{tieij} = \frac{|E_i||E_j|\sin(\delta_i - \delta_j)}{x_{ij}} \quad (2.3)$$

따라서, 평형치  $\delta_{ij}^*$  로부터  $\delta_{ij} = \delta_{ij}^* + \Delta \delta_{ij}$  만큼 섭동된 경우,  $P_{tieij}$  는  $\Delta P_{tieij}$  만큼 섭동되므로 i지역과 j지역의 연계선 조류편차,  $\Delta P_{tieij}$  는

$$\Delta P_{tieij} = \frac{|E_i||E_j|}{x_{ij}} (\sin(\delta_{ij}^* + \Delta \delta_{ij}) - \sin \delta_{ij}^*) \quad (2.4)$$

와 같은 비선형식에 의해 표현된다.

이 이론을 적용하기 위해 2 지역 전력계통의 모델인 그림 2-1과 같은 비선형 모델을 사용한다.

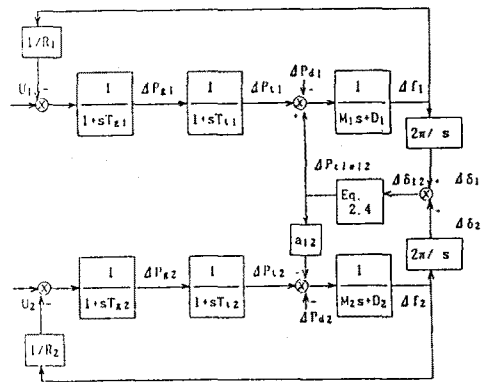


그림 2-1 2지역 비선형 전력계통의 블록선도  
 Fig. 2-1 Block-diagram of Power System with Nonlinearity

### 3. 퍼지추론법

퍼지제어규칙은 If - Then 형식으로, If 뒤에는 전제조건 또는 전건부인 사실과 Then 뒤에는 후건부 또는 조작부인 결론으로 구성된다. 이를 k지역에 대해 j번째 Rule을 정식화하면 식(3.1)과 같다. <sup>3.6.9)</sup>

$$\begin{array}{l|l} \text{If } X_{1k} \text{ is } A_{1jk} \text{ and } X_{2k} \text{ is } A_{2jk} & A_{1jk} \times A_{2jk} \rightarrow B_{jk} \\ \text{Then } Y_k \text{ is } B_{jk} & \\ \hline \text{Premise:} & \\ \text{If } X_{1k} \text{ is } A'_{1k} \text{ and } X_{2k} \text{ is } A'_{2k} & A'_{1k} \times A'_{2k} \\ \hline \text{Conclusion: Then } Y_k \text{ is } B'_{jk} & B'_{jk} \end{array} \quad (3.1)$$

단, 퍼지변수  $A_{1jk}, B_{jk}, A'_{1k}, B'_{jk}$ 는 전체 집합 E의 논의영개(Universe of Discourse) X, Y, X', Y'의 부분집합이고 '×'는 AND 연산자이다. 또한, i는 입력 변수의 수이며, j는 입력변수가 j번째의 Rule에 대해 취하는 퍼지변수이고, n은 Rule의 수, k는 지역을 나타낸다.

입력변수  $X_{1k}$ 와  $X_{2k}$ 에 대한 비퍼지값  $X_{10k}$ 와  $X_{20k}$ 가 주어질 때, 출력  $Y_k$ 의 최종 추론치  $Y^*_{k0}$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$Y^*_{k0} = \frac{\sum_{j=1}^n (\prod_{i=1}^2 A_{ijk}) \cdot Y_{jk}}{\sum_{j=1}^n (\prod_{i=1}^2 \mu_{A_{ijk}})} \quad (3.2)$$

단,  $\prod$ 는 '∧'연산을 의미하고,  $Y_{jk}$ 는 j번째 Rule에서의 적합도를 나타내는 멤버십 함수  $\mu_{B'_{jk}}(Y_k)$ 의 중심치이다.

### 4. 구배법에 의한 파라미터 조정

#### 4-1. 멤버십 함수의 정의

전건부 및 후건부에서 사용하는 퍼지변수  $A_{ijk}$  및  $B_{jk}$ 에 대한 각각의 멤버십 함수는 중심치  $a_{ijk}, c_{jk}$  및 폭  $b_{ijk}, d_{jk}$ 에 의해

$$\mu_{A_{ijk}}(X_{ik}) = 1 - \frac{2 \cdot \text{abs}(X_{ik} - a_{ijk})}{b_{ijk}} \quad (4.1)$$

$$\mu_{B_{jk}}(Y_k) = 1 - \frac{2 \cdot \text{abs}(Y_k - c_{jk})}{d_{jk}} \quad (4.2)$$

로 정의되고 이들을 도시하면 그림 4-1과 같다. <sup>8)</sup>

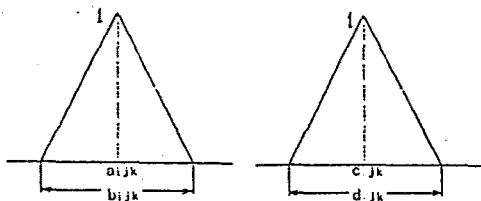


그림 4-1 멤버십 함수의 표현  
Fig. 4-1 Membership Function

#### 4-2. 파라미터 조정 알고리즘

퍼지추론을 제어분야에 적용하는 경우 여기서는 구배법을 이용한 퍼지 추론의 자동조정 수법으로 전건부 및 후건부의 파라미터를 동조시킨다. 최적제어로부터 얻은 입력 데이터쌍( $X^0_{1k}, Y^0_k$ )에 대한 추정결과

$$\mu_{B'_{jk}}(Y^0_k) = \max_{X_{1k}} \max_{X_{2k}} [\mu_{A_{1jk}}(X^0_{1k}) \wedge \mu_{A_{2jk}}(X^0_{2k}) \wedge \mu_{B_{jk}}(Y^0_k)] \quad (4.3)$$

$$Y^*_{k0} = \frac{\sum_{j=1}^n [\mu_{A_{1jk}}(X^0_{1k}) \wedge \mu_{A_{2jk}}(X^0_{2k})] \cdot Y_{jk}}{\sum_{j=1}^n [\mu_{A_{1jk}}(X^0_{1k}) \wedge \mu_{A_{2jk}}(X^0_{2k})]} \quad (4.4)$$

로 됨을 알 수 있다.

구배법에서는 입력 데이터  $X^0_{1k}$ 가 입력된 경우, 퍼지추론의 추론치  $Y^*_{k0}$ 와 최적제어기의 출력치  $Y^0_k$ 와의 추정오차 제곱인 식(4.5)의 E를 최소로 하도록 최적화한다. <sup>9)</sup>

$$E = \frac{1}{2} (Y^0_k - Y^*_{k0})^2 \quad (4.5)$$

즉, E의 값이 최대로 감소하는 방향을 나타내는 vector는 각 조정 파라미터에 대해

$$\left[ -\frac{\partial E}{\partial a_{ijk}}, -\frac{\partial E}{\partial b_{ijk}}, -\frac{\partial E}{\partial c_{jk}}, -\frac{\partial E}{\partial d_{jk}} \right] \text{로 되며,}$$

각 파라미터 조정 학습칙은 식(4.6)~(4.9)와 같다.

$$a_{ijk}(t+1) = a_{ijk}(t) - G_a \frac{\partial E}{\partial a_{ijk}} \quad (4.6)$$

$$b_{ijk}(t+1) = b_{ijk}(t) - G_b \frac{\partial E}{\partial b_{ijk}} \quad (4.7)$$

$$c_{jk}(t+1) = c_{jk}(t) - G_c \frac{\partial E}{\partial c_{jk}} \quad (4.8)$$

$$d_{jk}(t+1) = d_{jk}(t) - G_d \frac{\partial E}{\partial d_{jk}} \quad (4.9)$$

여기서,  $G_a, G_b, G_c, G_d$ 는 각 벡터량에 따라 정해지는 학습계수이다.

### 5. 시뮬레이션 결과 및 검토

진력계통의 부하주파수를 제어하는 퍼지제어기를 설계하기 위해 사용한 퍼지제어기의 제어 Rule은 식(5.1)과 같은 형태이다.

$$\text{If } e_i \text{ is } A_{ij} \text{ and } e_d \text{ is } A_{zj} \text{ Then } U_i \text{ is } B_j \quad (5.1)$$

여기서  $e_{ik}$  는 제어대상  $k$ 지역의 출력치와 목표치와의 편차이고,  $ed_{ik}$ 는 편차의 변화율이며  $U_{ik}$ 는 제어시스템의 제어량을 표시한다.

먼저, 주파수 편차  $e_i$ 와 편차 변화율  $ed_i$ 의 조합에 의해 이루어지는 모든 Rule을 사용하여 파라미터가 학습되기 전의 상태로 제한 전력계통의 응답특성은 그림 5-1과 같다.

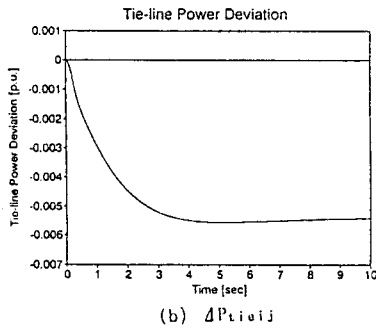
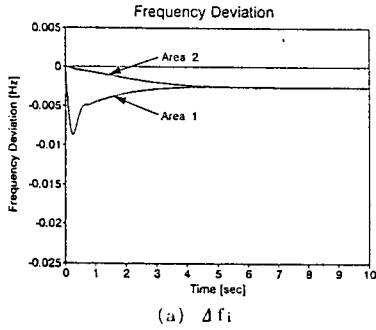


그림 5-1 퍼지 제어기의 응답특성  
Fig. 5-1 Responses of Power System with Fuzzy Controller

이것은 초기 과도시 주파수 편차량의 언더슈트를 상당히 감소시켰을 뿐만 아니라 진동적인 현상을 제거하였음을 볼 수 있다. 다음, 각 변수에 대해서 멤버십 함수를 초기 설정한다. 최적제어에서 얻은 데이터를 순차적으로 동정하여 퍼지 추론의 전건부 및 후건부의 중심치와 폭을 자동조정하여 제어한 결과는 그림 5-2와 같다.

이것은 파라미터를 조정하지 않았을 때 보다도 최대 언더슈트량도 감소 되었을 뿐만 아니라 지속적으로 존재하던 정상상태의 잔류편차를 제거할 수 있었다.

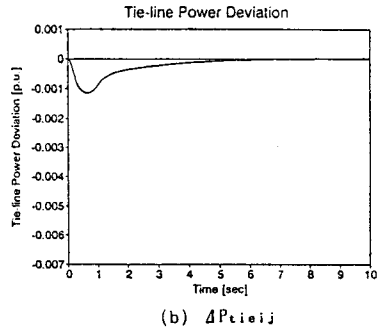
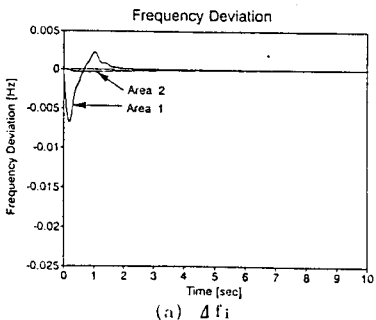


그림 5-2 제안한 기법에 의한 전력계통의 응답특성  
Fig. 5-2 Response of Power System by Proposed Technique

## 6. 결 론

본 논문에서는 제안된 학습 알고리즘인 구배법에 의해 퍼지 추론 Rule의 전건부 및 후건부의 중심치와 폭을 최적으로 조정할 수 있는 능력을 가진 자기조직화적 퍼지제어기를 구성하여 비선형 2지역 전력계통의 부하주파수 제어에 적용하였다. 그 결과, 전력계통 주파수 응답 특성 즉, 주파수 편차량 및 연계선 조류 편차량이 종래의 기법들에 비해 현저히 경감시켰을 뿐만 아니라 정정시간 및 도달시간도 최소화시킬 수 있음을 시뮬레이션을 통해서 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- 1) N. N. Bengiamin & W. C. Chan, "Multilevel Load-Frequency Control of Interconnected Power Systems" Proc. IEE, Vol. 125, No. 6, pp. 521-526, 1990
- 2) Y. Mizutani, "A Suboptimal Control for Load Frequency Control System Using a Area Decomposition Method", JIEE, Vol. 98, No. 12, pp. 971-978, 1978
- 3) 菅野道夫 原著: 퍼지제어시스템, 大英社, 1990
- 4) C. E. Fosha & O. I. Elgerd, "The Megawatt-Frequency Control Problem: A New Approach Via Optimal Control Theory", IEEE Trans, PAS-89, No. 4, pp. 563-557, 1970
- 5) Allen J. Wood & Bruce F. Wollenberg: "Power Generation, Operation and Control", John Wiley & Sons, 1984
- 6) 정형환, 이준탁, 김해재, 정동일, 주식민, "2지역 전력계통의 부하주파수 제어를 위한 퍼지추론 기법의 적용", 한국퍼지시스템학회 논문지, Vol. 2, No. 4, 1992
- 7) G. Shiral, "A Method of Load Frequency Control Coordinating with Conventional Tie-Line Bias Control", JIEE, Vol. 100, No. 12, pp. 723-730, 1980
- 8) 이준탁, "자기조직화적 Fuzzy 제어기를 이용한 다지역 전력계통의 부하주파수제어", 한국전력공사, 연구보고서, 1993