

# 전력계통의 안정화를 위한 퍼지제어의 적용

정형환\* 이준탁\* 정동인\* 오주석민\* 김해재\*\* 이광우\*\*\*  
 \* 동아대학교      \*\* 계천전문대학      \*\*\* 부산외국어대학교  
 전기공학과      전기과      컴퓨터공학과

## Application of Fuzzy Control for Power System Stabilization

H. H. Chong\* J. T. Lee\* D. I. Chong\* S. M. Joo\* H. J. Kim\*\* K. W. Lee\*\*\*  
 \*Dong-A Univ. \*\*Kôje Junior College \*\*\*Pusan Univ. of Foreign Studies

### = Abstract =

This paper proposed a regulation technique of scale factors on fuzzy controller for power system stabilization.

These scale factors are regulated by a given exponential function with performance index variables.

Simulation results show that the proposed fuzzy control technique are more powerful than conventional ones in faces of usefulness and robustness.

### 1. 서론

본 논문에서는 퍼지 추론을 적용하여 전력계통을 안정화시킬 수 있는 퍼지 제어기의 한 설계 기법을 제안하고자 한다.

이를 위해 먼저, 퍼지 추론의 기본 이론을 고찰하고, 일반적인 단순한 삼각형 멤버십 함수를 조속기와 여자기에 동일하게 적용, 각속도 편차에 대한 의존성이 조속기와 여자기 특성상 서로 상반되는 성질을 이용하여 각 제어입력을 결정하는 퍼지제어기를 구성한다. 1) 제안한 평가지표가 변화함에 따라 오차와 오차 변화율 및 제어량의 스케일 팩터가 지수함수적으로 조정되도록 하여 부하변동에 따른 전력계통 동특성의 오비슈트량이나 정정시간, 정상상태의 잔류편차를 줄이고, 다양한 부하변동시에도 제어의 강인성이 있고, 제어 성능이 종래의 전력계통 안정화 장치(PSS)보다 우수함을 시뮬레이션을 통해 고찰해 보고자 한다.

### 2. 계통 방정식

동기 발전기 단자에서의 전압과 전류를 직축과 횡축 성분으로 표현하면 식(1)~(4)과 같이 표현할 수 있다. 단, 전자기 저항과 교류선로의 저항은 무시한다. 2)

$$V_d = \frac{x_q V_b}{x_o + x_q} \sin \delta \quad (1)$$

$$V_q = \frac{x_o}{x_o + x_d} E_q' + \frac{x_d' V_b}{x_o + x_d} \cos \delta \quad (2)$$

$$i_d = \frac{E_q' - V_b \cos \delta}{x_o + x_d} \quad (3)$$

$$i_q = \frac{V_b}{x_o + x_q} \sin \delta \quad (4)$$

여기서,

$\delta$  : 발전기의 회전각  
 $E_q'$  : 계차채교자속에 비례하는 전압  
 $V_b$  : 무한대 모선 전압

$x_d'$  : 과도리액턴스  
 $x_o$  : 선로리액턴스  
 $x_d, x_q$  : 동기리액턴스의 직축 및 횡축성분을 나타낸다.

### 3. 제어계통의 동적 모델

여자는 동기 발전기의 단자전압이 변동할때 여자를 증감시켜서 발전기의 단자전압이 항상 기준전압에서 운전하도록 제어하고, 조속기 또한 동기 발전기의 기계적 입력 토오크를 가감함으로써 회전자의 속도를 제어하여 교란시에도 계통의 안정도를 향상시키는 역할을 한다. 2), 3)

그림 1은 전력계통의 안정화를 위해 제안한 여자기 및 조속기 제어계통의 블록선도이다.

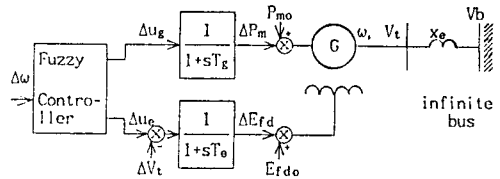


그림 1. 전력계통의 안정화를 위한 모델계통  
 Fig. 1. Model System for Stabilization

그림 1을 기초로 한 동특성 방정식은 식(5)와 같다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Delta\delta}{dt} &= \Delta\omega \\ M \frac{d\Delta\omega}{dt} + D \cdot \Delta\omega &= \Delta P_m - \Delta P_o \\ \frac{d\Delta E_q'}{dt} &= \frac{1}{T_{d0}} [\Delta E_{fd} - \Delta E_q' - (x_d - x_d') \Delta i_d] \\ \frac{d\Delta E_{fd}}{dt} &= -\frac{1}{T_o} \Delta E_{fd} - \frac{1}{T_o} \Delta V_t + \frac{1}{T_o} \Delta u_o \\ \frac{d\Delta P_m}{dt} &= -\frac{1}{T_g} \Delta P_m + \frac{1}{T_g} \Delta u_g \end{aligned} \right\} (5)$$

### 4. 퍼지 제어 기법

#### 4-1. 기본이론

전력계통의 안정화를 위해 퍼지추론 기법을 적용하는 경우, 정식화한 퍼지명제의 예는 식(6)과 같이 표현된다. 5)

|  |                   |                                  |
|--|-------------------|----------------------------------|
| ith Rule: If $x_1$ is $A_i$ and $x_2$ is $B_i$ | then $y$ is $C_i$ | $A_i \times B_i \rightarrow C_i$ |
| 전제 : $x_1$ is $A_i$ and $x_2$ is $B_i$         |                   | $A_i \times B_i$                 |
| 결론 : $y$ is $C_i$                              |                   | $C_i$                            |

단,  $A_i, A_i', B_i, B_i', C_i, C_i'$ 는 전체집합 E의 論議領域 (Universe of discourse)  $X, X', Y, Y'$ 의 부분집합으로 퍼지집합 개념에 따른다.

이때  $x_1, x_2$ 의 非퍼지값( $x_{10}, x_{20}$ )이 주어지면  $y$ 의 합성치는 Braae-Rutherford의 중심법에 의해  $y$ 의 추론치  $y_0$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n [\mu_{A_i}(x_{10}) \wedge \mu_{B_i}(x_{20})] \cdot \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^n [\mu_{A_i}(x_{10}) \wedge \mu_{B_i}(x_{20})]} \quad (6)$$

여기서,  $y_i(i=1, 2, \dots, n)$ 는 멤버십함수  $\mu_{C_i}(y)(i=1, 2, \dots, n)$ 가 최대치를 취할 때의 값이다.

#### 4-2. 전력계통의 적용

전력계통의 안정화를 위한 퍼지 제어를 설계하기 위해 먼저 일반적인 틀이 생성 되어야 한다. 본 시스템에서 사용한 퍼지 제어기의 구성도는 그림 2와 같다.

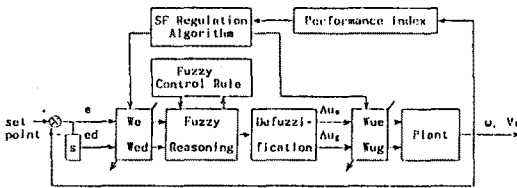


그림 2 제안한 퍼지 제어기의 블록선도  
Fig. 2 Block-diagram of Proposed Fuzzy Controller

여기에 적용되는 퍼지 제어 틀은 다음과 같은 형태이다.

If  $e$  is  $A_1$  and  $ed$  is  $A_2$   
Then  $\Delta u_e$  is  $B_1$  and  $\Delta u_g$  is  $B_2$  (8)

여기서,  $e$ :  $\Delta\omega$ 의 출력치와 목표치와의 편차  
 $ed$ :  $\Delta\omega$ 의 편차 변화율  
 $\Delta u_e$ : 여자기 제어입력  
 $\Delta u_g$ : 조속기 제어입력

을 표시한다.

전건부와 후건부의 언어적 변수는 오차와 오차변화율에 대해 각각 3개로 구성되며 전체적인 제어규칙은 표 1과 같다.

표 1. 제어규칙  
Table 1. Control Rules  
(a) Governor

|                |    |    |    |
|----------------|----|----|----|
| ed             | P  | ZO | N  |
| e $\Delta u_g$ | ZO | P  | P  |
| N              | ZO | P  | P  |
| ZO             | N  | ZO | P  |
| P              | N  | N  | ZO |

(b) Exciter

|                |    |    |    |
|----------------|----|----|----|
| ed             | P  | ZO | N  |
| e $\Delta u_e$ | ZO | N  | N  |
| N              | ZO | N  | N  |
| ZO             | P  | ZO | N  |
| P              | P  | P  | ZO |

P : Positive    ZO : Zero    N : Negative

제시된 제어규칙에 대한 멤버십 함수는 그림 3과 같다.

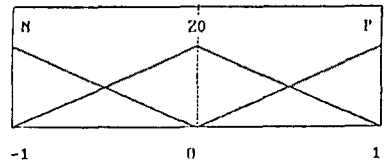


그림 3. 멤버십 함수  
Fig. 3. Membership Function

#### 4-3. 스케일 팩터 조정 기법

퍼지제어는 언어적 제어규칙만 적용함으로써 수학적 모델링이 불가능한 경우라도 제어가 가능하지만 부하 변동에 따른 강인성 또는 정상상태의 잔류편차 등이 발생하는 문제점이 있다. 이때, 여러가지 문제점을 보상해주는 방법으로 제어규칙 또는 스케일 팩터를 조절하는 방법이 있다. 이는 최적의 제어규칙이나 최적의 스케일 팩터일지라도 급격한 부하변동이 생겨 시스템이 변화하면 최적인 값이 되지 못한다. 또한 그 최적의 값을 찾는 것도 쉽지 않다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 제한한 평가지표를 지수함수의 변수로 사용하여 자동적으로 스케일 팩터가 조정되도록 하였다.

식(9)는 제한한 평가지표이며 식(10)~(13)은 평가지표에 따른 스케일 팩터 조정 알고리즘을 나타내는 식이다.

$$J = |(\Delta\delta + \Delta\omega + \Delta V_t)| \quad (9)$$

$$W_e = A * e^{-(a*J)} \quad (10)$$

$$W_{ed} = B * e^{-(b*J)} \quad (11)$$

$$W_{u_e} = C * e^{-(c*J)} \quad (12)$$

$$W_{u_g} = D * e^{-(d*J)} \quad (13)$$

여기서, J : 평가지표

$W_e$  : 오차의 스케일 팩터

$W_{ed}$  : 오차 변화율의 스케일 팩터

$W_{u_e}$  : 여자기 제어량의 스케일 팩터

$W_{u_g}$  : 조속기 제어량의 스케일 팩터

A, B, C, D: 고정된 스케일 팩터

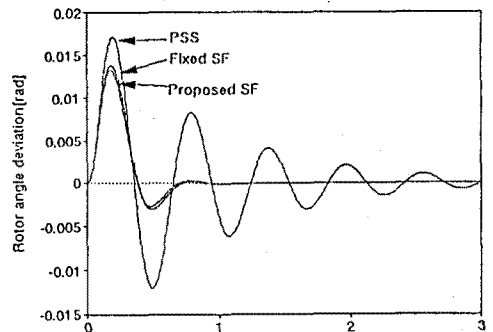
a, b, c, d: 지수함수의 기울기

#### 5. 시뮬레이션 결과 및 검토

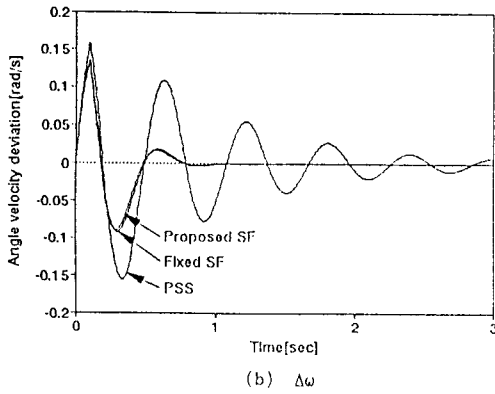
제어계통을 포함하는 상태변수는  $x = [\Delta\delta, \Delta\omega, \Delta E_a', \Delta E_{fd}, \Delta P_m]^T$ 이며,  $\Delta u = [\Delta u_e, \Delta u_g]^T$ 이다. 이때의 고정된 스케일 팩터는  $W_e=1.2, W_{ed}=0.6, W_{u_e}=1, W_{u_g}=1$ 로 두었다.

중래의 제어기법인 PSS와 스케일 팩터를 고정시킨 경우 및 평가지표에 따라 순시 변화하도록 한 응답특성을 각 부하 변화에 따라 비교·검토하였다.

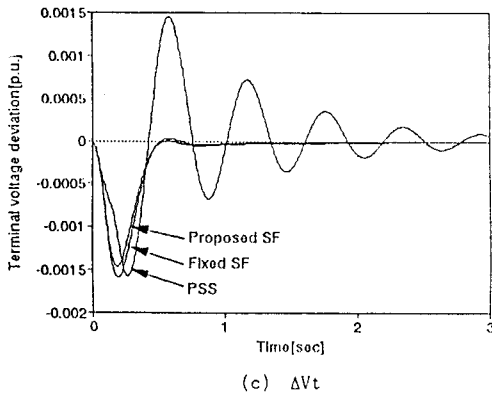
그림 4는  $-0.03P_{e0}$ 의 전력변동이 0.1초간 발생한 경우의 응답특성이다.



(a)  $\Delta\delta$



(b)  $\Delta\omega$



(c)  $\Delta V_t$

그림 4. 전력변동에 대한 응답  
(0.1초간 $0.03P_{e0}$ 의 변화)

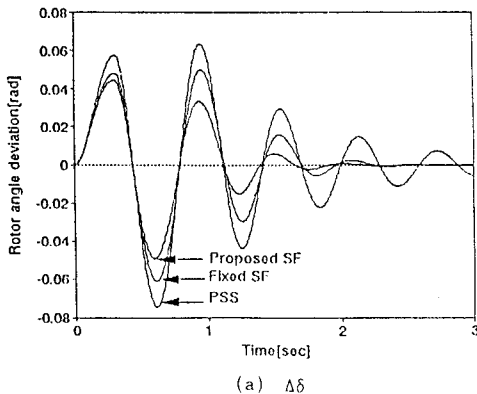
Fig. 4. Responses for Power Disturbance duration 0.1sec.

그림 5는 1[sec]동안에 전력의 변화가 식(14)와 같이 변화했을 때의 응답특성이다.

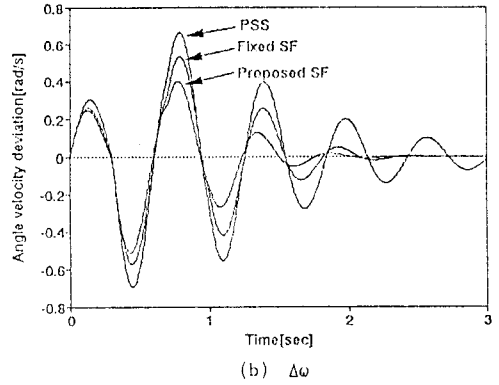
$$\Delta P_d = \begin{cases} -0.07P_{e0} & (0 < t \leq 0.3) \\ 0.03P_{e0} & (0.3 < t \leq 0.7) \\ -0.05P_{e0} & (0.7 < t \leq 1) \\ 0 & (t > 1) \end{cases} \quad (14)$$

이 경우에 있어서 제안한 제어기법이 편차량도 적고, 정정시간을 줄일 수 있었으며 수렴 특성이 종래의 기법보다 우수함을 나타내고 있다.

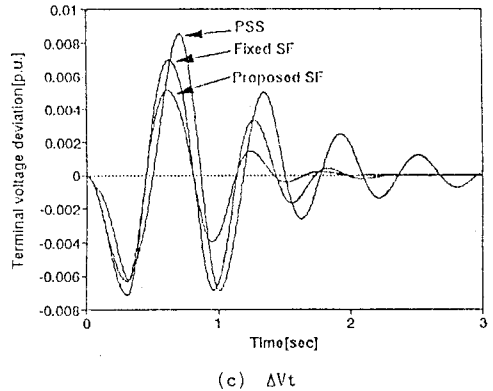
따라서, 여러가지 부하변동에도 강인성과 유용성이 있는 제어기법임을 알 수 있었다.



(a)  $\Delta\delta$



(b)  $\Delta\omega$



(c)  $\Delta V_t$

그림 5. 전력변동에 대한 응답  
Fig. 5. Responses for Power Disturbance

## 6. 결론

본 논문에서는 전력계통의 안정화를 위한 퍼지추론법 및 스케일 팩터 자동조정 기법을 제안하였다. 제안한 기법이 종래의 제어 기법과 비교하여 전력계통의 안정화에 대한 유용성을 검토하였다.

그 결과 전력계통의 안정화를 위한 퍼지제어가 종래의 제어기법보다 제어성능이 우수함을 보였으며, 특히, 스케일 팩터를 순서적으로 조정하여 제어한 경우에는 다양한 부하변화에 대해서도 유용성과 강인성이 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 동특성 편차량의 감소 및 진동폭 억제등의 개선이 현저하게 나타남을 시뮬레이션을 통해서 알 수 있었다.

## 참고 문헌

- (1) A.Ishigame, H.Kaizu et al, "Power System Stabilizing Control Based on Simplification of Constructing Fuzzy Control Rules", T. IEE J., Vol.113-B, No.1, 1993
- (2) F.P.Demello, C.Concordia, "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control", IEEE Trans. Power App. Syst. 1969
- (3) P.M.Anderson, A.A.Fouad, "Power System Control and Stability", The IOWA State University Press, 1977
- (4) Takashi, Hiyama, "Rule-Based Stabilizer for Multi-Machine Power System", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.5, No.2, 1990
- (5) 菅野道夫 原著, "퍼지제어시스템", 大英社, 1990