

## 비선형 전력계통 시스템의 부하주파수 제어를 위한 강인한 디지털 퍼지 제어기의 설계

전상원, 주영훈, 이호재\*, 박진배\*  
 군산대 공대 전자 정보 공학부 \*연세대 공대 전기 및 컴퓨터 공학과

### Robust Digital Fuzzy Controller Design for Load-Frequency Control of Nonlinear Power System

Sang-Won Jeon, Young-Hoon Joo, Ho-Jae Lee\*, Jin-Bae Park\*

School of Electronics & Info. Eng., Kunsan Univ. \*Dept. of Electrical & Computer Eng., Yonsei Univ.

**Abstract** - A new robust digital fuzzy controller design methodology is proposed for load frequency of nonlinear power system with valve position limits of governor in the presence of parametric uncertainties. The Takagi-Sugeno (TS) fuzzy model is adopted for fuzzy modeling of the nonlinear power system. A sufficient condition of robust stability for robust fuzzy control with parametric uncertainties is presented in the sense of Lyapunov.

The controller that designed by proposed robust fuzzy controller design method is based compounding condition between continuous system and discrete system. The effectiveness of controller that designed by the proposed robust fuzzy controller design method is demonstrated through simulation example.

#### 1. 서 론

전력 계통의 부하 주파수 제어는 고품질의 전력 공급이라는 측면에서 매우 중요한 과제이고, 다양한 부하주파수 제어기법이 개발되었다. 그러나 실제 전력 계통이 비선형임에도 불구하고 대부분의 연구는 선형 시불변의 모델을 기반으로 연구되어져 왔다. 본 논문에서는 실제 전력 계통의 기계적 특성, 즉, 조속기의 밸브 위치 제한에 의해서 발생하는 비선형성을 포함한 전력 계통을 고려한다. 또한 전력 계통의 안정도 저해 요소인 시스템의 불확실성, 특히 전력 계통 정수의 불확실성을 고려한다.

비선형 전력 계통을 모델링하기 위하여 Takagi-Sugeno (TS) 퍼지 모델을 사용하고, 시스템 파라미터의 불확실성을 고려한 TS 퍼지 모델을 강인 안정화할 수 있는 퍼지 모델 기반 디지털 제어기의 설계기법을 제시할 것이다. 강인 디지털 퍼지 제어기는 지능형 디지털 재설계 기법을 이용하여 설계될 것이다. [1-3]

본 논문의 구성을 살펴보면 2.1절은 불확실 TS 퍼지 모델의 소개, 2.2절은 조속기 밸브 위치의 제한을 고려한 비선형 전력 계통의 TS 퍼지 모델 제안, 2.3절은 불확실 TS 퍼지 모델의 강인 안정화 조건 제시, 2.4절은 불확실 비선형 시스템의 디지털 재설계를 위한 지능형 디지털 재설계 기법 제시, 2.5절은 제어기 설계의 예를 들고, 모의실험결과 고찰, 마지막으로 3절에서 결론을 맺는다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 불확실 TS 퍼지 모델

일반적인 전력 계통 시스템은 다음과 같이 불확실성을 포함한 연속시간 비선형 동적 시스템으로 표현한다.

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) + \Delta f(x(t)) + (g(x(t)) + \Delta g(x(t)))u(t) + d. \quad (1)$$

여기서  $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 는 상태 벡터,  $u(t) \in \mathbb{R}^m$ 는 제어 입력 벡

터,  $f(x(t)) \in \mathbb{R}^n$ 와  $g(x(t)) \in \mathbb{R}^n$ 는 비선형 벡터 함수이다.  $\Delta f(x(t))$ 와  $\Delta g(x(t))$ 는 불확실한 벡터 함수이고,  $d \in \mathbb{R}^n$ 는 상태 바이어스 상수 행렬이다. 이런 비선형 불확실 시스템은 다음과 같은 TS 퍼지 모델로 표현할 수 있다.

Plant Rule  $i$  :

IF  $x_1(t)$  is  $\Gamma_i^1$  and ... and  $x_n(t)$  is  $\Gamma_i^n$

THEN  $\dot{x}(t) = (A_i + \Delta A_i)x(t) + (B_i + \Delta B_i)u(t) + d_i$   
 $i = 1, 2, \dots, q. \quad (2)$

여기에서  $\Gamma_i^j(x(t))$ 는 퍼지 집합,  $\Delta A_i$ 와  $\Delta B_i$ 는 비선형 시스템에서 파라미터의 불확실성을 나타내는 시변 행렬들이다. 그리고  $d_i \in \mathbb{R}^n$ 는  $i$ 번째 규칙에서 부 모델의 바이어스 상수 벡터이다.  $q$ 는 TS 퍼지 모델에서 규칙의 개수이다. (2)와 같은 규칙으로 구성되는 TS 퍼지 시스템의 비퍼지화 출력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^q \mu_i(x(t))((A_i + \Delta A_i)x(t) + (B_i + \Delta B_i)u(t) + d_i). \quad (3)$$

여기서

$$w_i(x(t)) = \prod_{j=1}^n \Gamma_j^i(x_j(t)), \quad \mu_i(x(t)) = \frac{w_i(x(t))}{\sum_{i=1}^q w_i(x(t))}.$$

이고,  $\Gamma_i^j(x_j(t))$ 는 상태변수  $x_j(t)$ 가 퍼지집합  $\Gamma_i^j$ 에서의 소속도를 나타낸다.

이제, TS 퍼지 모델로 표현된 시스템을 제어하기 위한 TS 퍼지 모델 기반 상태 피드백 제어기는 다음과 같이 정리된다.

Controller Rule  $i$  :

IF  $x_1(t)$  is  $\Gamma_i^1$  and ... and  $x_n(t)$  is  $\Gamma_i^n$

THEN  $u(t) = K_i x(t), \quad i = 1, 2, \dots, q. \quad (4)$

여기서  $K_i \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 는 설계해야 할 상수 제어 이득이다.

본 논문에서는 시변 불확실 행렬  $\Delta A_i, \Delta B_i$ 를 제거하여 제어 이득 행렬,  $K_i$ 를 용이하게 계산하기 위하여 다음과 같은 가정을 도입한다.

**가정 1** 파라미터의 불확실성에 대한 고려는 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$[\Delta A_i \ \Delta B_i] = D_i F_i(t) [E_{1i} \ E_{2i}]$$

여기서  $D_i, E_{1i}, E_{2i}$ 는 알려진 실수 행렬이고,  $F_i(t)$ 는  $F_i(t)^T F_i(t) \leq I$ 의 조건을 만족하는 Lebesgue 측정 가능한 행렬 함수이다. 또한,  $I$ 는 적절한 차수를 가지는 단위 행렬이다.

##### 2.2 조속기의 밸브 위치 제한을 고려한 비선형 전력 계통 시스템의 퍼지 모델링

본 논문에서는 실제 전력 계통 시스템과 유사한 조속기의 밸브 위치 제한을 고려한 비선형 전력시스템을 고려한다. 그림 1은 조속기의 밸브 위치를 고려한 일반적인

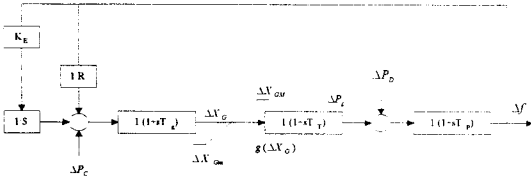


Figure 1: The nonlinear power system with valve position limits

전력계통 시스템의 블록선도 이고, 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_P} x_1(t) + \frac{K_P}{T_P} x_2(t) \\ -\frac{1}{T_T} x_2(t) + \frac{1}{T_P} \delta(x_3(t)) \\ -\frac{1}{RT_G} x_1(t) - \frac{1}{T_G} x_3(t) - \frac{1}{T_G} x_4(t) \\ K_E x_1(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{T_G} & 0 \end{bmatrix}^T u(t) + \begin{bmatrix} -\frac{K_P}{T_P} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \rho(t) \quad (5)$$

$x(t) = [\Delta f(t) \ \Delta P_G(t) \ \Delta X_G(t) \ \Delta E(t)]^T \in \mathbb{R}^4$ 는 시스템의 상태 벡터,  $u(t) = [\Delta P_D(t)] \in \mathbb{R}^1$ 는 제어 입력 벡터이고, 섭동 외란 벡터는  $\rho(t) = [\Delta P_D(t)] \in \mathbb{R}^1$ 로 표시된다. 전력 계통의 상태 변수  $\Delta f(t)$ ,  $\Delta P_G(t)$ ,  $\Delta X_G(t)$ ,  $\Delta E(t)$ 는 각각 전력 계통의 주파수 증분, 발전기의 유효 발전 전력 증분, 조속기 밸브 위치 증분, 적분 제어의 증분을 나타낸다.  $\Delta P_D(t)$ 는 실 부하 전력 증분을 나타내고,  $\Delta P_D(t)$ 를 0.1(p.u. MW)의 단위 계단 입력으로 가정한다.

실제 시스템의 기계적 구조에 의하여 발생하는 조속기 밸브 위치의 제한 조건을 다음과 같은 비선형 함수로 표현한다.

$$\delta(x_3(t)) = \begin{cases} \Delta X_{GM} & -\infty < x_3(t) < \Delta X_{GM} \\ x_3(t) & \Delta X_{GM} \leq x_3(t) \leq \Delta X_{GM} \\ \Delta X_{GM} & \Delta X_{GM} < x_3(t) < \infty \end{cases} \quad (6)$$

조속기의 밸브 위치의 비선형 특성을 고려한 전력 계통 시스템의 TS 퍼지 모델을 구하기 위해 비선형 함수(6)은 다음과 같이 상태변수  $x_3(t)$ 의 함수의 선형 함수로 표현할 수 있다.

$$\delta(x_3(t)) = \sum_{i=1}^2 \mu_i(x_3(t)) \lambda_i(x_3(t)) \quad (7)$$

여기서

$$\lambda_1(x_3(t)) = x_3(t), \quad \lambda_2(x_3(t)) = \alpha x_3(t),$$

$$w_1(x_3(t)) = \prod_{i=1}^2 \Gamma_i^1(x_3(t)), \quad \mu_i(x_3(t)) = \frac{w_i(x_3(t))}{\sum_{i=1}^2 w_i(x_3(t))}$$

$\Gamma_1(x_3(t))$ 과  $\Gamma_2(x_3(t))$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Gamma_1(x_3(t)) = \begin{cases} \frac{\Delta X_{GM} - \alpha x_3(t)}{1 - \alpha x_3(t)} & \Delta X_{GM} < x_3(t) < \Delta X_{GM} \\ 1 & \Delta X_{GM} \leq x_3(t) \leq \Delta X_{GM} \\ \frac{\Delta X_{GM} - \alpha x_3(t)}{1 - \alpha x_3(t)} & \Delta X_{GM} < x_3(t) < \frac{\Delta X_{GM}}{\alpha} \end{cases}$$

$$\Gamma_2(x_3(t)) = 1 - \Gamma_1(x_3(t)).$$

여기서  $\alpha$ 는 임의의 양의상수이다.

참고 1 소속함수  $\Gamma_1(x_3(t))$ ,  $\Gamma_2(x_3(t))$ 가 퍼지 의미에 부합되기 위해서는  $\Gamma_1(x_3(t))$ 와  $\Gamma_2(x_3(t))$ 은 구간  $[\Delta X_{GM}/\alpha, \Delta X_{GM}/\alpha]$ 의 모든  $x_3(t)$ 에 대하여 양의 반한정 이어야 한다. 따라서 제어기 설계 파라미터  $\alpha$ 는  $\Gamma_1(x_3(t))$ ,  $\Gamma_2(x_3(t))$ 가 아래의 구간의 모든  $x_3(t)$ 에 대하여 양의 반한정이 되도록 결정한다.

이제, 비선형 전력 계통(5)의 TS 퍼지 시스템을 다음과 같이 표현할 수 있다.

Plant Rules:

Rule 1: IF  $x_3(t)$  is about  $\Gamma_1(x_3(t))$

THEN  $\dot{x}(t) = A_1 x(t) + B_1 u(t) + d_1$ ,

Rule 2: IF  $x_3(t)$  is about  $\Gamma_2(x_3(t))$

THEN  $\dot{x}(t) = A_2 x(t) + B_2 u(t) + d_2$ .

여기서

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_P} & \frac{K_P}{T_P} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_T} & \frac{\alpha}{T_T} & 0 \\ -\frac{1}{RT_G} & 0 & -\frac{1}{T_G} & -\frac{1}{T_G} \\ K_E & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_P} & \frac{K_P}{T_P} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_T} & \frac{1}{T_T} & 0 \\ -\frac{1}{RT_G} & 0 & -\frac{1}{T_G} & -\frac{1}{T_G} \\ K_E & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{T_G} & 0 \end{bmatrix}^T, \quad d_1 = d_2 = \begin{bmatrix} -\frac{K_P}{10T_P} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

### 2.3 시스템 파라미터의 불확실성을 포함한 TS 퍼지 시스템의 강인 안정화

본 절은 불확실한 파라미터가 존재하는 TS 퍼지 모델의 강인 안정화를 위한 충분조건을 제시한다. 우선, 불확실한 파라미터를 가진 연속 TS 퍼지 시스템을 다음과 같은 식으로 설명하자.

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^m \mu_i(x(t)) ((A_i + \Delta A_i)x(t) + (B_i + \Delta B_i)u(t)) \quad (8)$$

참고 2 동적 시스템(8)은 비선형 전력 시스템의 TS 퍼지 시스템(3)에서 상수 바이어스 상수 행렬  $d_i$ 를 생략한 형태이다. 상수 행렬  $d_i$ 의 유계는 항상 존재하므로, 동적 시스템(8)이 점근적으로 안정하다면 시스템(3)의 유계도 항상 존재한다.

시스템(8)의 강인 안정화를 위해서 다음과 같은 TS 퍼지 모델 기반 상태 제환 제어기를 설계한다.

$$u(t) = \sum_{i=1}^m \mu_i(x(t)) K_i x(t) \quad (9)$$

불확실성을 포함하는 TS 퍼지 모델의 점근적 안정을 보장하는 충분조건은 다음과 같이 정리할 수 있다.

정리 1 다음 두 개의 선형 행렬부등식을 만족하는 양한정의 대칭행렬  $P$ 와 행렬  $K_i$ 와 적절한 양의 상수  $\varepsilon_{ij}$  ( $i, j = 1, \dots, q$ )가 존재한다면, TS 퍼지 시스템(8)은 TS 퍼지 모델 기반 상태 제환 제어기(9)에 의해서 점근 안정하다.

$$(a) \begin{bmatrix} \Psi_{ii} & * & * \\ E_{1i}Q + E_{2i}M_i & -\varepsilon_{ii}I & * \\ D_i^T & 0 & -\varepsilon_{ii}^{-1}I \end{bmatrix} < 0 \quad (1 \leq i \leq q), \quad (10)$$

$$(b) \begin{bmatrix} Y_{ij} & * & * & * \\ E_{1i}Q + E_{2i}M_j & -\varepsilon_{ij}I & * & * \\ E_{1j}Q + E_{2j}M_i & 0 & -\varepsilon_{ij}I & * \\ D_i^T & 0 & 0 & -\varepsilon_{ij}^{-1}I \\ D_j^T & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_{ij}^{-1}I \end{bmatrix} < 0 \quad (1 \leq i \leq j \leq q), \quad (11)$$

여기서,

$$\Psi_{ii} = QA_i^T + A_iQ + M_i^T B_i^T + B_i M_i,$$

$$Y_{ij} = QA_i^T + A_iQ + QA_j^T + A_jQ + M_i^T B_j^T + B_j M_i + M_j^T B_i^T + B_i M_j,$$

$Q = P^{-1}$ ,  $M_i = K_i P^{-1}$ 이고, \*는 전치 요소를 나타낸다.

증명 : 지면 제약으로 생략함.

참고 3 정리 1에서 임의로 정한  $D_i$ 와  $E_i$ 는 시스템 파라미터의 불확실성을 표현하기 위한 임의의 행렬들이지만, 이러한 요소들은 일반적으로 제어기의 성능에 영향을 미칠 수 있다.

### 2.4 연속시간 비선형 시스템의 제어를 위한 지능형 디지털 제어기의 설계

본 절에서는 지금까지 연속 시간상에서 설계된 TS 퍼지모델 제어를 이용하여 디지털 퍼지 제어기 설계 기법을 제안한다. 제안된 기법은 이산 시간 시스템의 정합 조건을 기반으로 설계되고, 본 기법을 이용하여 디지털 제어기 이득행렬을 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} K_i^d &\approx \frac{1}{T} K_i A_{C.L.}^{-1} (G_{C.L.i} - D) \\ &= \frac{1}{T} K_i (I + A_{C.L.i}^{-1} (I - \frac{1}{T} w_{C.L.i}) \Delta_i) A_{C.L.0.i}^{-1} (G_{C.L.0.i} - D) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서,  $G_{C.L.0.i} = \exp(A_{C.L.0.i} T)$ ,  $A_{C.L.0.i} = A_i + B_i K_i$ ,  $\Delta_i = \Delta A_i + \Delta B_i K_i$ ,  $w_{C.L.i} = (G_{C.L.0.i} - I) A_{C.L.0.i}^{-1}$ .

제어 입력 이득은 인터벌 대수를 사용하여 계산하므로  $K_i^d = [K_i^d, \bar{K}_i^d]$ 의 형태로써 얻어진다. 그러나 설계된 제어기를 구현하기 위해서는 고정된 제어입력 이득이 필요하다. 따라서 공칭값을  $K_i^d = \frac{1}{2}(K_i^d + \bar{K}_i^d)$ 로 정한다.

### 2.5 모의 실험

본 절에서는 조속기의 밸브 위치 제약을 고려한 비선형 전력 시스템의 디지털 제어기 설계의 예를 보인다. 제어의 목적은 부하 주파수 증분  $\Delta f(t)$ 를 0으로 유도하는 것이다. 참고 문헌 [4]로부터 공칭 파라미터를 차용하고,  $\Delta X_{GM}$ 과  $\Delta X_{Gm}$ 는 각각 0.11과 0으로 가정하고, 설계 파라미터  $\alpha$ 는 임의로 0.5를 선택한다. 또한 시스템 파라미터는 60%의 유계 내에서 불규칙하게 변화함을 가정한다. 가정 1을 이용하여 다음과 같이 제어기 이득행렬을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} K_1 &= [-257.4606 \quad -384.1145 \quad -48.4245 \quad -205.7265], \\ K_2 &= [-257.4242 \quad -384.0600 \quad -48.4182 \quad -205.6972]. \end{aligned}$$

제안된 기법에 의한 TS 퍼지 모델 기반 디지털 제어기를 설계하면 다음과 같은 제어 이득 행렬을 구할 수 있다. 샘플링 시간  $T$ 는 0.01이고, 시스템 상태 변수의 초기값은  $x(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 이다.

$$\begin{aligned} K_1^d &= [-15.0802 \quad -24.5656 \quad -5.8218 \quad -12.4786], \\ K_2^d &= [-16.7938 \quad -27.9606 \quad -5.8031 \quad -13.8689]. \end{aligned}$$

그림 2는 전력 계통의 연속시간 TS 퍼지 시스템을 디지털 재설계된 제어기로 제어한 결과이다. 시스템 파라미터가 불규칙하게 변동하지만  $\Delta f(t)$ 의 수렴 특성은 매우 우수하다. 또한  $\delta(x_3(t))$ 는 구간  $[\Delta X_{Gm}, \Delta X_{GM}]$ 에 존재함을 유추할 수 있다. 따라서 제안된 시스템의 모델링이 타당하며, 설계 파라미터를 0.5로 결정한 것이 적절하였음을 증명한다. 그림 3은 재설계된 디지털 제어 입력을 나타낸다. 모의 실험 결과에 의하여 본 논문에서 제안된 기법의 우수성이 입증되었고, 시간의 변화에 따른 파라미터의 변동에 대해서도 매우 강인한 제어 성능을 나타낼 수 있다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 조속기의 밸브 위치 제약을 고려한 비선형 전력 계통의 부하주파수 제어를 위한 디지털 제어기 설계 기법을 제안하였다. 불확실 비선형 전력 계통을

모델링하기 위해서 TS 퍼지 모델링 기법을 도입하였으며, 시스템 파라미터의 불확실성을 고려한 TS 퍼지 모델 기반 제어기 설계 기법을 제안하였다. 기존의 부하주파수 제어기 설계 기법은 조속기의 밸브위치 제약을 고려하였을 경우에 전력 계통의 완전한 안정성을 보장하지 못하였으나, 본 논문에서는 조속기의 밸브 위치 제약을 직접 시스템 모델링 단계에서부터 고려하였으므로 시스템의 안정성을 보장할 수 있다. 또한, 시스템의 파라미터가 시간에 따라 불규칙하게 변화하는 상황에서도 전력 계통의 안정성을 보장할 수 있다. 특히, 모의 실험 결과에 의하여 제안된 제어기법은 매우 우수한 성능을 입증하였다.

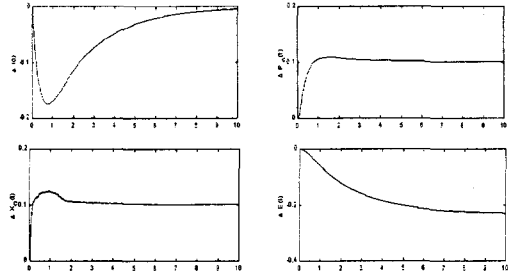


Figure 2: The response of digitally controlled power system

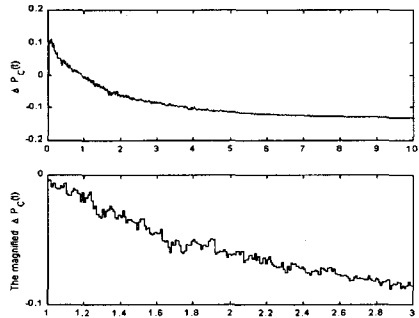


Figure 3: The digitally redesigned control input and its magnified figure

### 감사의 글

본 연구는 기초전력공학공동연구소의 지원(과제번호: 99-009)에 의하여 수행되었음.

### (참 고 문 헌)

- [1] Y. H. Joo, L. S. Shieh and G. Chen, "Hybrid state-space fuzzy model based controller with dual rate sampling for digital control of chaotic systems," *IEEE trans. on Fuzzy systems*, Vol. 7, No. 4, Aug., 1999.
- [2] W. Chang, J. B. Park, Y. H. Joo, and G. Chen, "Intelligent digital redesigned of fuzzy model based controllers for dynamic systems with uncertainties," *IEEE Tans. on Systems, Man, And Cybernetics, Part B*, 1999, submitted.
- [3] H. J. Lee, Y. H. Joo, J. B. Park, And L. S. Shieh, "Intelligent digitally redesigned PAM fuzzy controller for nonlinear system," *Proc. of IEEE Int. conf. fuzzy syst.*, Vol. 2, pp. 904-909, seoul, korea, Aug., 1999
- [4] O. I. Elgerd, *Electrical energy system theory an introduction*, McGraw-Hill, New Delhi, 1983.