

지능형 디지털 재설계 기법을 이용한 비선형 전력 계통의 강인 퍼지 부하 주파수 제어

Robust Fuzzy Load-Frequency Control of Nonlinear Power Systems Using Intelligent Digital Redesign Technique

이남수, 이연우, 전상원, 주영훈

군산대학교 제어계측공학과

Tel: +82-654-469-4706; Fax: +82-654-466-2086;

E-MAIL: yhjoo@ks.kunsan.ac.kr

Abstract

A new robust load-frequency control (LFC) methodology is proposed for nonlinear power systems with the valve position limits of the 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 the robust stability is presented in the sense of Lyapunov for the TS fuzzy model with parametric uncertainties. The intelligent digital redesign technique for the uncertain nonlinear power system is also studied. The effectiveness of the proposed robust fuzzy LFC controller design method is demonstrated through a numerical simulation.

1 서론

전력 계통의 부하 주파수 제어는 고품질의 전력 공급이라는 측면에서 매우 중요한 연구 과제이며, 지난 30여년간 다양한 부하 주파수 제어 기법이 개발되었다. 그러나 실제 전력 계통은 비선형 시스템임에도 불구하고, 대부분의 연구 결과는 선형 시불변 시스템으로 모델링된 전력 계통을 기반으로 하여 수행되었다 [1-5]. 본 논문에서는 전력 계통의 기계적 특성, 즉, 조속기의 밸브 위치 제한에 의하여 발생하는 비선형성이 포함된 전력 계통을 고려한다. 또한, 전력 계통의 비선형성과 더불어 전력 계통의 안정도를 저해하는 요소인 시스템의 불확실성, 특히 전력 계통 정수의 불확실성을 고려한다.

본 논문에서는 비선형 전력 계통을 모델링하기 위하여 TS 퍼지 모델을 사용할 것이며 시스템 파라미터의 불확실성을 고려한 TS 퍼지 모델을 강인 안정화할 수 있는 퍼지모델 기반 디지털 제어를 설계기법을 제시할 것이다. 강인 디지털 퍼지 제어기는 지능형 디지털 재설계 기법을 이용하여 설계될 것이다 [7-9].

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2 절은 불확실 TS 퍼지 모델을 개괄적으로 설명한다. 3 절은 조속기의 밸브 위치의 제한을 고려한 비선형 전력 계통의 TS 퍼지 모델을 제안한다. 4 절에서 불확실 TS 퍼지 모델의 강인 안정화의 조건을 제시하며 5 절은 불확실 비선형 시스템의 디지털 재설계를 위한 지능형 디지털 재설계 기법을 제시한다. 6 절은 제어기 설계 예를 보이며, 마지막으로, 7 절에 결론을 맺는다.

2 TS 퍼지 모델

일반적인 전력 계통 시스템은 일반적으로 다음과 같이 불확실성

을 포함한 연속시간 비선형 동적 시스템으로 묘사될 수 있다.

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

여기서 $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 는 상태 변수 벡터, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ 는 제어 입력 벡터, $f(x(t)) \in \mathbb{R}^n$, $g(x(t)) \in \mathbb{R}^n$ 는 비선형 벡터 함수, $\Delta f(x(t))$, $\Delta g(x(t))$ 는 불확실 벡터 함수이며 $d \in \mathbb{R}^n$ 는 상수 바이어스 벡터이다. 이러한 형태의 비선형 불확실 시스템은 다음과 같은 형태의 TS 퍼지모델로 표현할 수 있다.

Plant Rule i :

$$\begin{aligned} &\text{IF } x_1(t) \text{ is } \Gamma_1^i \text{ and } \dots \text{ and } x_n(t) \text{ is } \Gamma_n^i \\ &\text{THEN } \dot{x}(t) = (A_i + \Delta A_i)x(t) + (B_i + \Delta B_i)u(t) + d_i, \\ & \quad \quad \quad i = 1, 2, \dots, q. \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 Γ_j^i 는 퍼지 집합을 나타내며, ΔA_i 와 ΔB_i 는 비선형 시스템의 파라미터 불확실성을 나타내는 시변 행렬이다. $d_i \in \mathbb{R}^n$ 는 i 번째 규칙의 부 모델의 바이어스 상수 벡터이다. q 는 TS 퍼지 모델의 규칙의 개수이다. (2) 와 같은 퍼지 규칙으로 구성되는 TS 퍼지 시스템의 비퍼지화된 출력은 다음과 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

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

$\Gamma_j^i(x_j(t))$ 는 상태 변수 $x_j(t)$ 가 퍼지 집합 Γ_j^i 에서의 소속도를 나타낸다.

이제, TS 퍼지 모델로 표현된 시스템을 제어하기 위하여 다음과 같은 퍼지 규칙으로 나타나는 TS 퍼지 모델 기반 상태 피드백 제어기를 고려하자.

Controller Rule i :

$$\begin{aligned} &\text{IF } x_1(t) \text{ is } \Gamma_1^i \text{ and } \dots \text{ and } x_n(t) \text{ is } \Gamma_n^i \text{ THEN } u(t) = K_i x(t), \\ & \quad \quad \quad i = 1, 2, \dots, q, \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $K_i \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 는 설계하여야 할 상수 제어 이득 행렬이다. 그러나 플랜트 규칙 (2) 는 시변 불확실 행렬을 포함한 형태이므로 제어 이득 행렬, K_i 를 구하는 것이 쉽지 않다. 본 논문에서는 시변 불확실 행렬 ΔA_i , ΔB_i 를 제거하여 제어 이득 행렬 K_i 를 용이하게 계산하기 위하여 다음과 같은 가정을 도입한다..

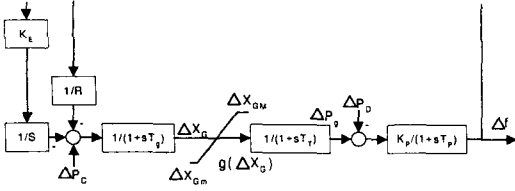


Figure 1: The nonlinear power system with valve position limits

가정 1 파라미터 불확실성을 표현하는 행렬 $\Delta A_i, \Delta B_i$ 은 다음과 같은 형태로 표현 할수 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 행렬이며 $F_i(t)$ 는 $F_i(t)^T F_i(t) \leq I$ 의 조건을 만족하는 Lebesgue 측정가능한 행렬함수이다. 또한 I 는 적절한 차원의 단위 행렬이다.

3 조속기의 밸브 위치 제한을 고려한 비선형 전력 계통 시스템의 퍼지 모델링

본 논문에서는 실제 전력 계통 시스템과 유사한 조속기의 밸브 위치를 고려한 비선형 전력 계통 시스템을 고려한다. 그림 1은 조속기의 밸브 위치를 고려한 일반적인 전력 계통 시스템의 블록 선도를 나타낸다. 그림 1에 나타난 비선형 전력 계통 시스템은 수식적으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_P}x_1(t) + \frac{K_P}{T_P}x_2(t) \\ -\frac{1}{T_T}x_2(t) + \frac{1}{T_T}\delta(x_3(t)) \\ -\frac{1}{RT_G}x_1(t) - \frac{1}{T_G}x_3(t) - \frac{1}{T_G}x_4(t) \\ KEx_1(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_G} \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} -\frac{K_P}{T_P} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rho(t), \quad (5)$$

여기서 시스템의 상태 벡터, 제어 입력 벡터는 각각 $x(t) = [\Delta f(t) \ \Delta P_G(t) \ \Delta X_G(t) \ \Delta E(t)]^T \in \mathbb{R}^4$, $u(t) = [\Delta P_D(t)] \in \mathbb{R}^1$ 이며, 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, 조속기의 밸브 위치 증분, 적분 제어의 증분을 나타내며 $\Delta P_D(t)$ 는 실 부하 전력 증분을 나타낸다. 본 논문에서는 $\Delta P_D(t)$ 를 0.1 (p.u. MW)의 단위 계단 입력으로 가정한다.

실제 발전 시스템의 기계적 구조에 의하여 발생하는 조속기의 밸브 위치의 제한 조건을 다음과 같이 표현되는 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 비선형 전력 계통 시스템의 TS 퍼지 모델을 구성하기 위해서는, 비선형 항 $\delta(x_3(t))$ 를 시스템의 상태 변수에 관한 선형 함수의 선형 합으로 표현해야 한다. 이를 위하여 비선형 함수 (6)은 다음과 같이 상태 변수 $x_3(t)$ 의 함수의 선형 합으로 표현될 수 있다.

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

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

$$\omega_i(x_3(t)) = \prod_{j=1}^2 \Gamma_j^i(x_3(t)), \quad \mu_i(x_3(t)) = \frac{\omega_i(x_i(t))}{\sum_{i=1}^2 \omega_i(x_i(t))}.$$

$\Gamma_1(x_3(t))$ 와 $\Gamma_2(x_3(t))$ 는 다음과 같이 정의한다:

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

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

여기서 α 는 임의의 양의 상수이다.

참고 1 가중치 함수 $\Gamma_1(x_3(t)), \Gamma_2(x_3(t))$ 가 퍼지 논리의 의미에 부합하기 위해서는 $\Gamma_1(x_3(t)), \Gamma_2(x_3(t))$ 는 구간 $[\frac{\Delta X_{Gm}}{\alpha}, \frac{\Delta X_{GM}}{\alpha}]$ 의 모든 $x_3(t)$ 에 대하여 양의 반한정이어야 한다. 제이거 설계 파라미터 α 는 가중치 함수 $\Gamma_1(x_3(t)), \Gamma_2(x_3(t))$ 가 구간 $[\frac{\Delta X_{Gm}}{\alpha}, \frac{\Delta X_{GM}}{\alpha}]$ 의 모든 $x_3(t)$ 에 대하여 양의 반한정이 되도록 결정한다.

이제, 비선형 전력 계통 (5)의 TS 퍼지 시스템을 다음과 같이 나타낼 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

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_P} & \frac{K_P}{T_P} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_T} & \frac{1}{T_T} & 0 \\ -\frac{1}{RT_G} & 0 & -\frac{1}{T_G} & -\frac{1}{T_G} \\ K_E & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_G} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad d_1 = \begin{bmatrix} -\frac{K_P}{10T_P} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_P} & \frac{K_P}{T_P} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_T} & \frac{\alpha}{T_T} & 0 \\ -\frac{1}{RT_G} & 0 & -\frac{1}{T_G} & -\frac{1}{T_G} \\ K_E & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_G} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad d_2 = \begin{bmatrix} -\frac{K_P}{10T_P} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

4 시스템 파라미터의 불확실성을 포함한 TS 퍼지 시스템의 강인 안정화

본 절은 시스템의 파라미터의 불확실성을 고려한 TS 퍼지 모델의 강인 안정화시킬수 있는 충분조건을 제시한다. 우선, 다음과 같은 불확실한 시스템의 파라미터를 포함하는 연속 시간 TS 퍼지 모델을 고려한다.

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

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

시스템 (8)를 안정화시키기 위하여 다음과 같은 형태의 TS 퍼지 모델 기반의 상태 궤환 제어를 설계한다.

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

시스템 파라미터의 불확실성을 포함하는 TS 퍼지 모델의 점근적 안정성을 보장하는 충분 조건은 다음과 같이 정리할 수 있다.

정리 1 다음 두 개의 선형 행렬 부등식을 만족하는 양한정의 대칭 행렬, P 와 행렬 K_i 와 적절한 양의 상수 ϵ_{ij} , ($i, j = 1, \dots, q$) 가 존재한다면, TS 퍼지 시스템 (8) 은 TS 퍼지 모델 기반 상태 제한 제어기 (9) 에 의하여 점근적으로 안정 가능하다.

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

$$(1 \leq i \leq q),$$

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

$$(1 \leq i < j \leq q),$$

여기서

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

$$\Upsilon_{ij} = QA_i^T + A_iQ + QA_j^T + A_jQ$$

$$+ M_j^T B_i^T + B_i M_j + M_i^T B_j^T + B_j M_i,$$

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

증명: 지면의 제약으로 생략함

참고 3 정리 1 에서, 시스템 파라미터의 불확실성을 표현하기 위한 행렬들, D_i 와 E_{ij} 는 임의로 정할 수 있으나, 이러한 요소들은 제어기의 성능에 영향을 미칠 수 있다.

5 지능형 디지털 재설계 기법을 이용한 디지털 제어기 설계

본 절에서는 연속 시간상에서 설계된 TS 퍼지 모델 기반 제어기를 이용하여 디지털 퍼지 제어기를 설계하는 기법을 제시한다. 본 절에서 제안한 기법에 의해 설계되는 디지털 제어기는 연속 시간 시스템과 이산 시간 시스템의 정합조건을 기반으로 설계된다. 우선, 다음과 같은 i 번째 규칙에 의한 페루프 시스템은 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = (A_i + \Delta A_i + (B_i + \Delta B_i)K_i)x(t). \quad (12)$$

이제 다음과 같은 연속 시간 부 시스템과 시간 $kT \leq t < kT + T$ 동안 구간적으로 고정된 값을 제어 입력으로 구성되는 페루프 시스템의 이산화된 시스템은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$z(kT + T) = (G_i + \Delta G_i + (H_i + \Delta H_i)K_i^d)z(kT). \quad (13)$$

여기서

$$G_i = \exp(A_i T), \quad \Delta G_i = \exp((A_i + \Delta A_i)T) - \exp(A_i T),$$

$$H_i = (G_i - I)A_i B_i,$$

$$\Delta H_i = (\exp((A_i + \Delta A_i)T) - I)(A_i + \Delta A_i)^{-1}(B_i + \Delta B_i) - H_i.$$

i 번째 페루프 부 시스템의 상태 $x(t)$ 와 식 (13) 의 상태 $z(t)$ 를 정합시키기 위하여, 시각 $t = kT + T$ 에서, 시스템 (12) 의 상태 $x(t) = x(kT + T)$ 를 식 (14) 로부터 구한다.

$$x(kT + T) = G_i + \Delta G_i + \int_{kT}^{kT+T} \exp((A_i + \Delta A_i)(kT + T - \lambda)) \times (B_i + \Delta B_i)K_i x(\lambda) d\lambda. \quad (14)$$

식 (12) 의 적분은 다음과 같이 정확히 계산할 수 있다.

$$\frac{1}{T} \int_{kT}^{kT+T} x(\lambda) d\lambda = (A_{C.L.i} T)^{-1}(x(kT + T) - x(kT)), \quad (15)$$

여기서 $A_{C.L.i} = (A_i + \Delta A_i + (B_i + \Delta B_i)K_i)$ 이다. 또한, 식 (13) 의 이산 시스템은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$x(kT + T) = G_{C.L.i} x(kT). \quad (16)$$

여기서 $G_{C.L.i} = \exp(A_{C.L.i} T)$ 이다. 식 (16) 을 (15) 에 대입한 후 그 결과식을 (14) 에 다시 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\int_{kT}^{kT+T} \exp(A_i + \Delta A_i)(kT + T - \lambda)(B_i + \Delta B_i)K_i x(\lambda) d\lambda$$

$$= (H_i + \Delta H_i)K_i (A_{C.L.i} T)^{-1}(G_{C.L.i} - I)x(kT). \quad (17)$$

여기서 $A_{C.L.i} = A_i + \Delta A_i + (B_i + \Delta B_i)K_i$, $G_{C.L.i} = \exp(A_{C.L.i} T)$ 이다. 식 (17) 과 (14) 를 결합하면

$$x(kT + T) \approx (G_i + \Delta G_i$$

$$+ (H_i + \Delta H_i)K_i (A_{C.L.i} T)^{-1}(G_{C.L.i} - I))x(kT).$$

$x(kT + T)$ 와 $x(kT)$ 를 각각, $z(kT + T)$, $z(kT)$ 와 일치한다고 가정하면 다음의 등식을 얻을 수 있다.

$$(G_i + \Delta G_i + (H_i + \Delta H_i)K_i^d$$

$$\approx (G_i + \Delta G_i + (H_i + \Delta H_i)K_i (A_{C.L.i} T)^{-1}(G_{C.L.i} - I)). \quad (18)$$

K_i^d 에 대하여 풀면,

$$K_i^d \approx \frac{1}{T} K_i A_{C.L.i}^{-1} (G_{C.L.i} - I)$$

$$= \frac{1}{T} K_i (I + A_{C.L.0.i}^{-1} (I - \frac{1}{T} w_{C.L.i}) \Delta_i)^{-1} A_{C.L.0.i}^{-1} (G_{C.L.0.i} - I) \quad (19)$$

여기서

$$G_{C.L.i} = \exp(A_{C.L.i} T), \quad G_{C.L.0.i} = \exp(A_{C.L.0.i} T),$$

$$A_{C.L.0.i} = A_i + B_i K_i, \quad \Delta_i = \Delta A_i + \Delta B_i K_i,$$

$$w_{C.L.i} = (G_{C.L.0.i} - I) A_{C.L.0.i}^{-1}.$$

제어 입력 이득은 인터벌 대수를 사용하여 계산하므로 $K_{di}^I = \begin{bmatrix} \underline{K}_i^d & \overline{K}_i^d \end{bmatrix}$ 형태로써 얻어진다. 그러나 설계된 제어기를 구현하기 위해서는 고정된 제어 입력 이득이 필요하다. 따라서 공칭 값을 $K_i^d = \frac{1}{2} (\underline{K}_i^d + \overline{K}_i^d)$ 로 정한다.

6 모의 실험

본 절에서는 조속기의 밸브 위치 제한을 고려한 비선형 전력 계통 시스템의 디지털 제어기 설계의 예를 보인다. 제어 목적은 부하 주파수 증분, $\Delta f(t)$ 를 0 으로 유도하는 것이다. 모의 실험을 위하여 참고문헌 [4] 로부터 공칭 시스템 파라미터를 차용한다. 조속기의 밸브 위치 증분의 상한, ΔX_{GM} 과 하한, ΔX_{Gm} 은 각각 0.11 과 0 으로 가정한다. 설계 파라미터 α 는 $x_3(t)$ 이 구간 $[\frac{\Delta X_{Gm}}{\alpha}, \frac{\Delta X_{GM}}{\alpha}]$ 에 존재하도록 0.5로 정한다. 모의 실험 과정에서 시스템 파라미터, $\frac{1}{T_p}$, $\frac{K_p}{T_p}$, $\frac{1}{T_G}$, $\frac{1}{RT_G}$ 는 공칭 값의 60% 의 유계내에서 불규칙하게 변화함을 가정하였다. 정리 1 을 이용하여 다음과 같은 제어기 이득 행렬을 구할 수 있다.

$$K_1 = [-256.0040 \quad -386.9059 \quad -47.6015 \quad -205.4038],$$

$$K_2 = [-244.3036 \quad -369.2192 \quad -45.4268 \quad -196.0163].$$

앞절에서 논의한 디지털 재설계 기법을 이용하여 TS 퍼지 모델 기반 디지털 제어기를 설계하면 다음과 같은 제어 이득 행렬을 구할 수 있다. 샘플링 시간 T 를 0.01 로 정한다.

$$K_1^d = [-15.1131 \quad -24.8152 \quad -5.8412 \quad -12.5511],$$

$$K_2^d = [-20.5298 \quad -34.2776 \quad -6.7203 \quad -16.9390].$$

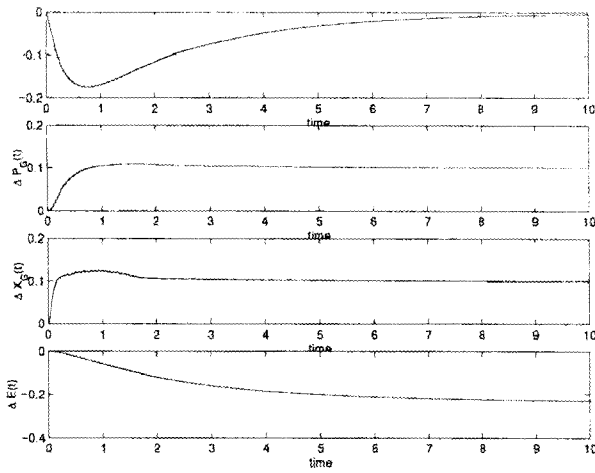


Figure 2: The response of the digitally controlled power system

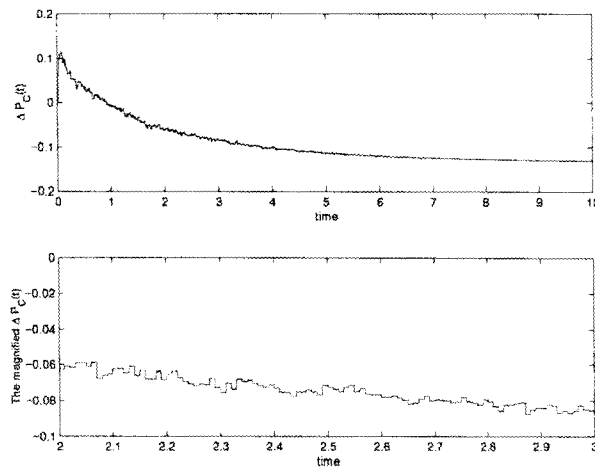


Figure 3: The digitally redesigned control input, and its magnified figure

시스템 상태 변수의 초기값은 $x(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 이다. 그림 2은 전력 계통의 연속 시간 TS 퍼지 시스템을 디지털 재설계된 제어기로서 제어한 결과이다. 모의 실험을 수행하는 동안 시스템 파라미터가 불규칙하게 변동하지만 부하 주파수 증분 $\Delta f(t)$ 의 수렴 특성은 매우 우수하다. 또한 $\delta(x_3(t))$ 는 구간 $[\Delta X_{GM}, X_{GM}]$ 에 존재함을 유추할 수 있다. 따라서 앞 절에서 제시한 조속기의 밸브 위치 제한을 고려한 시스템의 모델링이 타당하며, 설계 파라미터 α 를 0.5로 결정한 것이 적절하였음을 입증한다. 그림 3은 재설계된 디지털 제어 입력을 나타낸다. 모의 실험에 의한 비선형 전력 계통 시스템의 동특성 결과에 의하여 본 논문에서 제안된 기법의 우수성이 입증되었다. 또한 시간에 따라 변하는 파라미터에 대해서도 매우 강인한 제어 성능을 나타냄을 알 수 있다.

7 결론

본 논문은 조속기의 밸브 위치의 제한을 고려한 불확실 비선형 전력 계통의 부하 주파수 제어를 위한 디지털 제어기 설계 기법을 제한하였다. 불확실 비선형 전력 계통을 모델링하기 위하여 TS 퍼지 모델링 기법을 도입하였으며, 시스템 파라미터의 불확실성을 고려한 TS 퍼지 모델 제어기 설계 기법을 제안하였다. 기존의 부하 주파수 제어기 설계 기법은 조속기의 밸브 위치 제한을 고려하였을 경우에 전력 계통의 안정성을 보장하지 못하였으

나, 본 논문에서는 조속기의 밸브 위치 제한을 직접 시스템 모델링 단계에서 고려하였으므로 시스템의 안정성을 보장할 수 있다. 또한 시간에 따라 변화하는 시스템의 파라미터가 시간에 따라 불규칙하게 변화하는 상황에서도 전력 계통의 안정성을 보장할 수 있다. 특히, 모의 실험 결과에 의하여 제안된 제어 기법은 매우 우수한 성능을 나타냄을 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 기초전력공학연구소의 지원(과제번호: 99-009)에 의하여 수행되었습.

References

- [1] C. E. Fosha, Jr. and O. I. Elgerd, "The Megawatt-frequency Control Problem: A New Approach via Optimal Control Theory," *IEEE Trans. on Apparatus and Systems*, Vol. 89, No. 4, pp. 563-571, April, 1970.
- [2] K. Y. Lim, Y. Wang and R. Zhou, "Robust Decentralised Load-frequency Control of Multi-area Power Systems," *IEE Proc. C, Gen., Trans., & Distrib.*, Vol. 143, No. 5, pp. 377-386, Sep., 1993.
- [3] Y. Wang, R. Zhou and C. Wen, "Robust Load-frequency Controller Design for Power Systems," *IEE Proc. C, Gener., Transm., & Distrib.*, Vol. 140, No. 1, pp. 11-16, Jan., 1993.
- [4] O. I. Elgerd, *Electrical energy system theory—an introduction*, McGraw-Hill, New Delhi, 1983.
- [5] G. Ray, A. N. Prasad and G. D. Prasad, "A new approach to the design of robust load-frequency controller for large scale power systems," *Electric Power Systems Research*, Vol. 51, No. 1, July, pp. 13-22, 1999.
- [6] L. S. Shieh, W. M. Wang and J. S. H. Tsai, "Digital modelling and digital redesign of sampled data uncertain systems," *IEE Proc. D*, Vol. 142, No. 6, pp. 585-594, Nov., 1995.
- [7] 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.
- [8] W. Chang, J. B. Park, Y. H. Joo, and G. Chen, "Intelligent digital redesigned of fuzzy model-based controllers for dynamical systems with uncertainties," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, 1999, submitted.
- [9] H. J. Lee, Y. H. Joo, J. B. Park, and L. S. Shieh, "Intelligent digitally redesigned PAM fuzzy controller for nonlinear systems," *Proc. of IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst.*, Vol. 2, pp. 904-909, Seoul, Korea, Aug., 1999.