

원전 증기발생기의 수위제어를 위한 지능형 퍼지 모델링 및 강인한 디지털 퍼지 제어기 설계

Intelligent Fuzzy Modeling and Robust Digital Fuzzy Control for Level Control in the Steam Generator of a Nuclear Power Plant

주영훈* · 조광래* · 김주원** · 박진배**

Young Hoon Joo, Kwang Lae Cho, Joo Won Kim, and Jin Bae Park

* 군산대학교 공과대학 전자정보공학부

** 연세대학교 공과대학 전기전자공학과

요 약

원자력 발전소 증기 발생기의 강한 비선형성은 수위 제어에 어려움을 가중시킨다. 또한 증기 발생기의 파라미터의 불확실성은 제어성능뿐 아니라 원자력 발전소의 안정성을 위협하는 요소이다. 또한 제어시스템의 디지털화의 효율은 이미 널리 알려진 바이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문은 전력에 따라 모델의 파라미터가 불안정한 특성을 포함하는 원자력 발전소의 증기 발생기를 위한 강인 디지털 퍼지 제어기 설계기법을 제안한다. Takagi-Sugeno (TS) 퍼지 모델을 도입하여 불확실 비선형 증기 발생기의 퍼지 모델을 구성한다. 시스템의 불확실성의 영향을 억제하기 위하여 강인 퍼지 모델 기반 제어기의 설계 기법을 제시한다. 설계된 등가의 아날로그 퍼지 제어기의 성능을 보장하는 동시에 효율적인 디지털 제어기를 설계하기 위하여 지능형 디지털 재설계 기법을 제안한다. 증기 발생기 수위제어의 컴퓨터 시뮬레이션 결과로부터 제안된 강인 디지털 퍼지 제어기 설계기법의 효용성을 입증한다.

Abstract

Difficulties of the level control in the steam generator are increased due to their nonlinear characteristics. Furthermore, parameter uncertainties of the steam generator is related with control performance and stability. The efficiency of digital conversion in control systems is proved in many recent researches. In order to solve this problem, this paper suggests robust digital fuzzy controller design methodologies of the steam generator which have unstable parameters. Takagi-Sugeno (TS) fuzzy model is used to construct a fuzzy model which has uncertainties in the steam generator. In designing procedure, intelligent digital redesign method is used to control the nonlinear system. This digital controller keeps the performance of the analog controller. Simulation examples are included for ensuring the proposed control method.

Key Words : steam generator, linear matrix inequality, water level control, TS fuzzy model

1. 서 론

원자력 발전은 에너지수급의 측면에서 매우 경제적인 발전기법이다. 그러나, 그 이면에는 엄청난 위험성이 내재되어 있어, 발전공정의 세밀한 운전 및 제어가 절실히 요구된다. 특히 증기발생기는 원전의 핵심적인 요소로서 원전의 저출력에서 고출력에 이르기까지 적절한 수위 제어는 원전의 안전운전에 필수적이다. 그러나 증기발생기의 내부의 열역학의 복잡성 및 비선형성에 의해 저출력에서의 수위 제어는 매우 어려운 문제로 알려져 있다. 저출력에서의 잘못된 제어는 원전의 강제정지를 유발하며 이는 곧 시스템의 안정성 및 전력 산업의 경제성 문제와 직결된다. 또한, 증기 발생기 내부 수증기의 수축

(shrink) 과 팽창 (swell) 현상은 증기발생기 내부 수위의 정확한 측정을 어렵게 한다. 더불어, 수위 제어시 고려되어야 할 사항은 증기유량이나 급수유량, 온도 등의 외란의 영향을 최소화하는 강인성이다. 원전 증기 발생기의 수위제어는 고려사항이 매우 많다. 컴퓨터를 활용한 시스템의 자동화가 절실히 요구되며 이는 수위제어기의 디지털화를 의미한다. 그러나 불확실 비선형 시스템의 강인 디지털 제어기는 현재까지 광범위하게 연구되지 않은 상태이다.

최근 20여년간 원자력 발전기의 증기 발생기의 모델링 및 제어기법에 대하여 많은 연구들이 진행되었다. Irving은 파라미터 가변 모델을 사용함으로써 급수량과 증기량의 변화, 그리고, 수위와의 관계로부터 시스템의 수학적인 모델을 제시하였다 [1]. 이후, 많은 학자들이 Irving의 모델을 대상으로 하여 여러 가지 제어 기법을 제시하였다 [2-3]. 본 논문에서는 제어 목적에 널리 사용되는 Irving의 모델을 기반으로 강인 디지털 퍼지 제어기를 설계한다[4]. 이를 위하여 증기 발생 계통의 비선형 동특성을 정확하게 나타낼 수 있는 Takagi-Sugeno 퍼지

접수일자 : 2001년 10월 26일

완료일자 : 2002년 5월 2일

본 연구(관리번호 01-011)는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음.

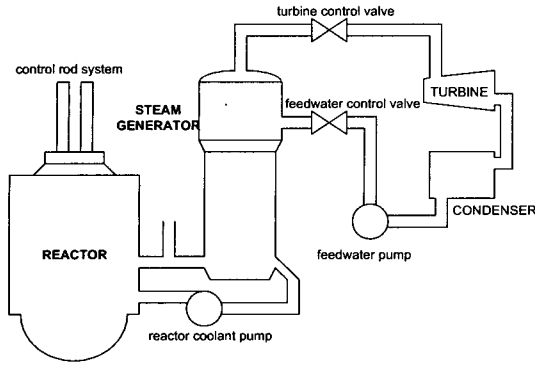


그림 1. 원자력 발전소 증기발생기의 구조

Fig. 1. Structure of the steam generator in a nuclear power plant

모델링 기법을 사용한다[5]. 증기발생기에서 동작점의 범위는 그 부하출력에 따라서 매우 광범위하다. 그러므로, 기존의 제어 기법은 넓은 동작점에서 만족스러운 성능을 발휘하기 어렵다. TS 퍼지모델기반 제어기법은 전문가의 지식을 명시적으로 나타낼 수 있을 뿐 아니라, 여타 다른 제어기법에 비하여 그 자유도가 매우 높으며, 이는 넓은 동작영역에서 요구되는 다양한 제약조건을 만족시킬 수 있음을 의미한다. 따라서 TS 퍼지 모델기반은 증기발생기의 수위제어에 매우 적합하다. 본 논문에서 제안된 TS 퍼지 모델로 표현된 비선형 증기발생계통 모델은 모델링 오차와 더불어 시스템 자체의 불확실성을 포함하며 이러한 불확실성에 강인한 제어 성능을 보장할 수 있는 퍼지 모델 기반 제어가 설계 기법을 제안한다.

한편, 급속한 컴퓨터의 보급에 힘입어 산업전반의 자동화가 이루어지는 현실은 공정제어 및 운용의 디지털화를 의미한다. 비선형 시스템의 디지털 제어기 설계는 현재 활발히 연구중인 분야이나 그 설계절차가 까다롭다. 일반적으로 기존의 설계된 제어기를 단순히 이산화시킨 후 0차 A/D 및 D/A 변환을 사용하여 디지털제어기를 구현한다. 그러나 이러한 방법은 매우 짧은 샘플링 주기를 보장해야 하며, 그 성능또한 보장할 수 없다. 따라서, 아날로그 제어기의 성능을 유지하는 동시에 효율적인 디지털 제어기의 설계기법을 개발해야 한다[6]. 이러한 조건을 만족시키는 제어기의 설계는 매우 어려운 일이다. 지능형 디지털 재설계 기법은 비선형 시스템을 위한 디지털 제어기를 효율적으로 설계할 수 있는 기법으로서, 연속 시간 시스템과 이산 시간 시스템의 응답 특성을 정합함으로써 미리 설계된 연속 시간 제어기를 이산 시간 제어기로 변환하는 효율적인 기법이다. 본 논문에서는 지능형 디지털 재설계 기법을 이용하여 증기 발생기 수위 제어용 디지털 제어기를 설계한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 증기 발생기의 퍼지 모델링에 대해서 제 2 장에서 언급하며, 제 3 장에서는 TS 퍼지 모델을 이용한 강인 제어기의 설계방법과 지능형 디지털 재설계 기법을 이용하여 증기 발생기의 수위 제어를 위한 디지털 제어기를 설계할 것이다. 또한, 제 4 장에서 컴퓨터 시뮬레이션으로 제안된 방법의 우수함을 확인한다.

2. 증기 발생기의 퍼지 모델링

2.1 Irving의 증기 발생기 모델

Irving이 제안한 증기 발생기 모델의 상태 방정식은 다음과 같다[1]. 여기서 $y(t)$ 는 증기 발생기 수위, $q_e(t)$ 공급수 흐름, $q_v(t)$ 는 초기값으로부터 벗어난 증기 발생기의 흐름이다. 이 때, G_1, G_2, G_3 는 동작 전력에 따라 가변하는 파라미터이며, T 는 진동 주기, τ 는 제동(damping) 시상수이다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= G_1(p)(q_e(t) - q_v(t)) \\ \dot{x}_2(t) &= \tau_2^{-1}(p)x_2(t) - \frac{G_2(p)}{\tau_2(p)}(q_e(t) - q_v(t)) \\ \dot{x}_3(t) &= 2\tau^{-1}(p)x_3(t) + x_4(t) + G_3(p)q_e(t) \\ \dot{x}_4(t) &= -(\tau_2^{-2}(p) + 4\pi T^{-2}(p))x_3(t) \\ y(t) &= x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) \end{aligned} \quad (1)$$

Irving의 실험에서 도출한 각 파라미터의 몇몇의 동작전력에서의 수치를 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 동작전력에 따른 증기 발생기 파라미터의 동특성
Table 1. Dynamics of parameters for steam generator according to operating power

$q_v(t)$ (kg/s)	57.4	180.8	381.7	660	1435
p (%)	5	15	30	50	100
$G_1(p)$	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058
$G_2(p)$	9.63	4.46	1.83	1.05	0.47
$\tau_2(p)$	48.4	21.5	4.5	3.6	3.4
$\tau(p)$	41.9	26.3	43.4	34.8	28.6
$T(p)$	119.6	60.5	17.7	14.2	11.7
$G_3(p)$	0.181	0.226	0.310	0.215	0.105

2.2 증기 발생기의 TS 퍼지 모델링

개루프에서의 공급수 밸브의 동특성은 시상수가 -1인 1차 시스템 형태로 모델링 된다[2]. 상태 공간 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_5(t) &= -x_5(t) + u(t) \\ q_e(t) &= x_5(t) \end{aligned} \quad (2)$$

전체 시스템은 동작 전력, p 에 따라 변화하는 시스템이므로, 동작 전력이 각각 $p=5, 15, 30, 50, 100\%$ 에서의 선형 시스템을 유도한다. 따라서, 전체 시스템의 동특성은 다음과 같은 상태 공간 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(p)x(t) + B_1(p)q_v(t) + B_2(p)u \\ q_e(t) &= x_5(t) \end{aligned} \quad (3)$$

이때, $x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ x_4(t) \ x_5(t)]^T$, u 는 제어입력을 나타내며, 이 때,

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & a_{15} \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & a_{25} \\ 0 & 0 & a_{33} & 1 & a_{35} \\ 0 & 0 & a_{43} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{12} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \\ C &= [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0] \end{aligned}$$

$$a_{15} = G_1(p), a_{22} = -\tau_2^{-1}, a_{25} = -G_2(p)/\tau_2(p),$$

$$a_{33} = -2\tau^{-1}(p), a_{35} = G_3(p), a_{43} = -\tau^{-2}(p) - 4\pi^2 T^{-2}(p),$$

$$a_{55} = -1, b_{11} = -c_1(p), b_{12} = G_2(p)/\tau_2(p)$$

위 모델을 제어하기 위해, 우리가 실험적으로 알고있는 데이터를 통한 몇몇의 전력 수치에 따른 동작점에서 파라미터들을 결정하여 하위 시스템을 구성하였다. 5개의 동작점에 의해 5개의 하위 시스템으로 세분화 하면, 다음과 같다.

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.058 \\ 0 & -0.0207 & 0 & 0 & -0.199 \\ 0 & 0 & -0.0477 & 1 & 0.181 \\ 0 & 0 & -0.0006 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, B_{11} = \begin{bmatrix} -0.058 \\ 0.199 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.058 \\ 0 & -0.0465 & 0 & 0 & -0.2074 \\ 0 & 0 & -0.076 & 1 & 0.226 \\ 0 & 0 & -0.012 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, B_{12} = \begin{bmatrix} -0.058 \\ 0.2074 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.058 \\ 0 & -0.222 & 0 & 0 & -0.4067 \\ 0 & 0 & -0.0461 & 1 & 0.310 \\ 0 & 0 & -0.127 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix},$$

$$B_{13} = \begin{bmatrix} -0.058 \\ 0.4067 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.058 \\ 0 & -0.2778 & 0 & 0 & -0.2917 \\ 0 & 0 & -0.0575 & 1 & 0.215 \\ 0 & 0 & -0.191 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix},$$

$$B_{14} = \begin{bmatrix} -0.058 \\ 0.2917 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.058 \\ 0 & -0.2941 & 0 & 0 & -0.1382 \\ 0 & 0 & -0.0699 & 1 & 0.105 \\ 0 & 0 & -0.287 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix},$$

$$B_{15} = \begin{bmatrix} -0.058 \\ 0.1382 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, B_{2i} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$$

이때, 각각의 퍼지 규칙은 다음과 같다.

Plant Rule :

- IF p is about 5, THEN $\dot{x} = A_1x + B_{21}u + B_{11}q_v(t)$
- IF p is about 15, THEN $\dot{x} = A_2x + B_{22}u + B_{12}q_v(t)$
- IF p is about 30, THEN $\dot{x} = A_3x + B_{23}u + B_{13}q_v(t)$
- IF p is about 50, THEN $\dot{x} = A_4x + B_{24}u + B_{14}q_v(t)$
- IF p is about 100, THEN $\dot{x} = A_5x + B_{25}u + B_{15}q_v(t)$

제어의 목적은 계획된 전력의 변화에 따라 feedwater flow q_e 를 안정화 시키고, 수위 $y(t)$ 를 평형점 0에 도달하게 하는 것이다. 설정된 동작점 이외의 영역에서는 퍼

지추론 기법을 사용하여 보강된 시스템으로 정의된다. 그림 2와 같은 규칙 5개의 삼각소속함수를 사용하여 추론된 시스템은 다음과 같다

$$\dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^5 \mu_i(p(t)) (A_i x(t) + B_{2i} u(t) + B_{1i} q_v(t))}{\sum_{i=1}^5 \mu_i(p(t))} \quad (4)$$

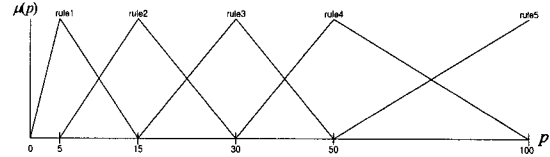


그림 2. 동작 전력의 변화에 따른 소속함수
Fig. 2. Membership functions according to the change of operating power

3. 지능형 디지털 재설계 기법기반 디지털 퍼지 제어기의 설계

본 절에서는 TS 퍼지 모델을 이용한 강인 제어기의 설계법과 지능형 디지털 재설계 기법을 논한다.

3.1 TS 퍼지 모델을 이용한 강인 제어기의 설계

본 논문에서는 $q_v(t)$ 는 우리가 확실히 알 수 없으나 일정한 범위내에 존재함을 가정한다. 그러나, $q_v(t)$ 의 영향은 퍼지 제어 시스템의 제어 성능을 저하시킬 것이다. 그러므로, 얼마나 $q_v(t)$ 의 영향을 줄일수 있는가가 제어의 관건이 된다. H_∞ 제어가 이러한 영향을 효율적으로 제거하는데 가장 중요한 기법이 될 수 있다[3-4]. 다음과 같은 H_∞ 제어 성능지수를 고려한다.

$$\frac{\int_0^{t_f} x^T(t) Q x(t) dt}{\int_0^{t_f} q_v^T(t) q_v(t) dt} < \rho^2 \quad (5)$$

이 때, t_f 는 제어 최종 시간, ρ 는 외란에 대한 최악의 경우를 나타내는 값, 그리고, Q 는 양한정 가중치 행렬이다. 식 (5)에서 초기값이 고려된다면 다음과 같이 수정될 수 있다.

$$\int_0^{t_f} x^T(t) Q x(t) dt < x^T(0) P x(0) + \rho^2 \int_0^{t_f} q_v^T(t) q_v(t) dt \quad (6)$$

이 때, P 는 양의 대칭 한정행렬이다. 또한, 다음과 같은 퍼지제어기를 고려한다.

$$u(t) = \frac{\sum_{i=1}^5 \mu_i(p(t)) (K_i x(t))}{\sum_{i=1}^5 \mu_i(p(t))} \quad (7)$$

Lyapunov 함수를 $V(x) = x^T(t) P x(t)$ 와 같이 두면 Lyapunov 안정도이론에 의해 다음과 같은 정리를 얻을 수 있다.

아래와 같은 부등식을 만족시키는 양의 한정행렬 P 가 존재하면 페루프 시스템은 어떤 영역 내에 존재하고 제어 성능 ρ^2 를 보장한다[3].

$$A_i^T P + P A_i + P B_{2i} K_i + K_i^T B_{2i}^T P + \left(2 + \frac{1}{\rho^2}\right) P P + Q < 0 \quad (8)$$

또한, 외란 $q_v(t)$ 가 존재하지 않는 경우, 만약 제어가 페루프 비선형 시스템에 사용되고 위의 부등식을 만족하는 양의 한정행렬 P 가 존재하면 페루프 시스템은 점근적으로 안정하다. 식 (8)을 Schur complement를 이용하여 LMI 형태로 나타내면 아래와 같다[5].

$$\begin{bmatrix} T A_i^T + A_i T + B_{2i} Y_j + Y_j^T B_{2i}^T + \left(2 + \frac{1}{\rho^2}\right) I & T \\ T & -Q^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (9)$$

여기서, $T = P^{-1}$, 그리고, $Y_j = K_j T$ 이다.

3.2 지능형 디지털 재설계 기법에 의한 강인 디지털 퍼지 제어기의 설계

본 절에서는 지능형 디지털 재설계 기법과 본 방법에 기인한 디지털 제어기 설계기법을 논한다.

다음과 같은 연속 시간 페루프 TS 퍼지 시스템을 고려하자.

$$\dot{x}_d(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \mu_i(p(t)) \mu_j(p(t)) (A_i + B_i K_j^i) x_d(t) \quad (10)$$

또한 다음과 같은 디지털 TS 퍼지 시스템을 고려하자.

$$x_d(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(p(t)) (A_i x_d(t) + B_i u_d(t)) \quad (11)$$

여기서 $u_d(t)$ 는 구간에서 일정한 디지털 제어 입력이다.

선형 시불변 시스템을 이산화 하는 방법에는 몇 가지가 있으나, TS 퍼지 시스템의 비퍼지화된 출력은 선형 시불변이 아니라 시변이므로, 이 방법들은 연속 시간 TS 퍼지 시스템에 직접적으로 적용될 수 없다. 따라서, 연속 TS 퍼지 시스템의 이산화를 위해 다음과 같은 가정을 도입한다.

가정 1. 다음과 같이 샘플 주기 kT 로 근사화 되는 시간 $t \in [kT, kT+T)$ 동안의 $\mu_i(p(t))$ 를 가정하자.

$$\mu_i(p(t)) \approx \mu_i(p(kT))$$

이 때, 비선형 요소 $\sum_{i=1}^r \mu_i(p(t)) A_i$ 와 $\sum_{i=1}^r \mu_i(p(t)) B_i$ 는 시구간 내의 모든 영역에서 상수값 $\sum_{i=1}^r \mu_i(p(kT)) A_i$, $\sum_{i=1}^r \mu_i(p(kT)) B_i$ 로 근사화 될 수 있다. 이것은 샘플링 주기가 매우 작다면 신뢰할 수 있는 가정이다.

정리 1. TS 퍼지 시스템 (11)의 동특성은 다음과 같이 간략화 될 수 있다.

$$x_d(kT+T) \approx \sum_{i=1}^r \mu_i(p(kT)) (G_i x_d(kT) + H_i u_d(kT)) \quad (12)$$

이 때, $G_i = \exp(A_i T)$, $H_i = (G_i - I) A_i^{-1} B_i$ 이다.

증명 : 식 (11)의 $x_d(t)$ 의 일반해는 초기치 $x_d(t_0)$ 에 대

해 구간 $t \in [kT, kT+T)$ 에서 다음과 같다.

$$x_d(t) = \Phi(t, t_0) x_d(t_0) + \left(\int_{t_0}^t \Phi(t, \tau) \left(\sum_{i=1}^r \mu_i(p(\tau)) B_i \right) d\tau \right) u_d(kT)$$

이 때, $\Phi(\cdot, \cdot)$ 는 상태 천이 행렬이다. 이제 식 (11)의 해는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_d(kT+T) = \Psi(kT) x_d(kT) + \Omega(kT) u_d(kT)$$

이 때, $\Psi(kT) = \Phi(kT+T, kT)$,

$$\Omega(kT) = \int_{kT}^{kT+T} \Phi(kT+T, \tau) \left(\sum_{i=1}^r \mu_i(p(\tau)) B_i \right) d\tau$$

또한, 가정 1에 의해

$$\begin{aligned} \Phi(kT) &= \exp\left(\sum_{i=1}^r \mu_i(p(kT)) A_i T\right) \\ &= I + \sum_{i=1}^r \mu_i(p(kT)) A_i T + \mathcal{E}(T^2) \\ &\approx \sum_{i=1}^r \mu_i(p(kT)) (I + A_i T) \approx \sum_{i=1}^r \exp(A_i T) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Omega(kT) &= \int_{kT}^{kT+T} \exp\left(\sum_{i=1}^r \mu_i(p(kT)) A_i (kT+T-\tau)\right) \left(\sum_{i=1}^r \mu_i(p(kT)) B_i\right) d\tau \\ &= \left(\exp\left(\sum_{i=1}^r \mu_i(p(kT)) A_i T\right) - I\right) \left(\sum_{i=1}^r \mu_i(p(kT)) A_i\right)^{-1} \left(\sum_{i=1}^r \mu_i(p(kT)) B_i\right) \\ &= \left(\sum_{i=1}^r \mu_i(p(kT)) A_i T + \mathcal{E}(T^2)\right) \left(\sum_{i=1}^r \mu_i(p(kT)) A_i\right)^{-1} \left(\sum_{i=1}^r \mu_i(p(kT)) B_i\right) \\ &\approx \sum_{i=1}^r \mu_i(p(kT)) B_i T \approx \sum_{i=1}^r \mu_i(p(kT)) H_i \end{aligned}$$

이 때, $G_i = \exp(A_i T)$,

$$H_i = B_i T \approx \int_{kT}^{kT+T} \exp(A_i (kT+T+\tau)) B_i d\tau = (G_i - I) A_i^{-1} B_i$$

이산화된 TS 퍼지 시스템 (12)는 $\mathcal{E}(T^2)$ 의 값에 의해 이산화 오차가 존재하며, 샘플링 주기가 0에 수렴함에 따라 이산화 오차도 0에 수렴한다. □

정리 1에 의해 직접적으로 다음과 같은 보조 정리를 이끌어낼 수 있다.

보조 정리 1. 연속 시간 페루프 TS 퍼지 시스템 (10)의 동특성은 다음과 같이 근사적으로 이산화 될 수 있다.

$$x_c(kT+T) \approx \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \mu_i(p(kT)) \mu_j(p(kT)) \Phi_{ij} x_c(kT) \quad (13)$$

이 때, $\Phi_{ij} = \exp((A_i + B_i K_j^i) T)$

제어의 목적은 기존에 설계된 아날로그 퍼지 모델 기반 제어를 지니는 페루프 TS 퍼지 시스템의 전역적인 동특성을 가지는 디지털 재설계 기법을 개발하고, 그것에 의해 제어된 TS 퍼지 시스템의 안정도를 보장하는 것이다. 이를 위해 다음과 같은 두 가지의 포괄적인 지능형 디지털 재설계 문제를 생각할 수 있다.

- (I) 이미 설계된 아날로그 퍼지 모델 제어기 제어 이득 행렬 K_c^i 에 대해, 다음과 같은 중요한 목적을 만족시키는 이득 행렬 K_d^j 를 재설계한다.
 - i) 식 (12)의 이산화된 상태는 연속 시간 페루프 TS 퍼지 시스템 (13)의 상태와 전체적으로 모든 샘플링 주기 $t = kT, k = 1, 2, \dots$ 에서 거의 일치하도록 정합된다.
 - ii) 디지털 제어입력 u_d 에 의해 제어된 식 (11)은 전역에서 점근적으로 안정하다.
- (II) 마찬가지로 다음과 같은 제약을 만족하는 K_d^j 행렬

을 찾는다.

- i) $\|\Phi_{ij} - G_i - H_i K_d^j\| < \gamma, i, j = 1, 2, \dots, q$ 에서 γ 를 최소화 한다.
- ii) Lyapunov 정리 관점에서 이산화된 페루프 시스템 (12)는 전체 영역에서 점근적으로 안정하다.

조건 II는 분명히 전형적인 convex optimization 문제이다. 따라서, LMI에 의해 수치적으로 풀 수 있다. 그러므로 다음과 같은 정리를 얻을 수 있다.

정리 2. 만약 다음과 같은 부등식을 만족시키는 대칭 양의 한정행렬 Q , 반한정행렬 O , 상수 행렬 F_i 와, GEVP(generalized eigenvalue problem)를 만족시키는 매우 작은 양의 상수 γ 가 존재한다고 하면, 디지털 재설계 방법에 의해 설계된 퍼지 모델 기반 제어기에 의해 제어된 TS 퍼지 시스템 (11)의 이산화된 식 (12)의 상태 $x_d(kT)$ 는 아날로그식으로 제어된 이산화된 식 (13)의 상태 $x_c(kT)$ 에 가깝게 정합된다. 또한, 이산화된 TS 퍼지 시스템 (12)는 Lyapunov 정리 관점에서 전체 영역에서 점근적으로 안정하다.

Minimize γ subject to
 Q, O, F_i

$$\begin{bmatrix} -\gamma Q & * \\ \Phi_{ij}Q - G_iQ - H_iF_j & -\gamma I \end{bmatrix} < 0, \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} -Q + (q-1)O & * \\ G_iQ + H_iF_i & -Q \end{bmatrix} < 0, \quad i, j = 1, 2, \dots, q \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} -Q - O & * \\ \frac{G_iQ + H_iF_i + G_jQ + H_jF_j}{2} & -Q \end{bmatrix} < 0, \quad (16)$$

$i = 1, \dots, q-1, j = i+1, \dots, q.$

이 때, *는 행렬의 대각선 대칭 요소이다.

증명 : 최대 열 차수를 가지는 행렬 Θ 를 고려해 보자. 그러면 우리는 다음과 같은 부등식을 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \|\Phi_{ij} - G_i - H_i K_d^j\|_2 &< \hat{\gamma} \\ &= \hat{\gamma} \frac{1}{\|\Theta^T\|_2} \cdot \|\Theta^T\|_2 \\ &= \gamma \|\Theta^T\|_2, \quad i, j = 1, \dots, q \end{aligned}$$

이 때, $\gamma = \frac{\hat{\gamma}}{\|\Theta^T\|_2}$ 는 양의 스칼라이다. $\Theta^T\Theta$ 대신에 식 (14)에 의해 경계를 가지기 때문에 한정행렬 P 를 둘 수 있다. 노옴의 정의에 의해 다음과 같은 부등식을 유도한다.

$$(\Phi_{ij} - G_i - H_i K_d^j)^T (\Phi_{ij} - G_i - H_i K_d^j) < \gamma^2 P$$

Schur complement를 사용하여 다음과 같은 LMI 식으로 변환이 가능하다.

$$\begin{bmatrix} -\gamma P & * \\ \Phi_{ij} - G_i - H_i K_d^j & -\gamma I \end{bmatrix} < 0,$$

양쪽으로 P^{-1} 을 곱하면 정리 2의 첫 번째 LMI가 유도된다. 이 때, $F_i = K_d^i P^{-1}$. 나머지 2, 3번째 LMI는 Lyapunov 안정도이론에서 유도할 수 있다. \square

4. 실험 및 고찰

이 장에서는 Irving의 증기발생기 모델의 제어를 위해 3장에서 언급한 디지털 제어기 설계 기법을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 검증을 한다. 시스템 행렬은 2장에서 언급한 근사화 모델을 사용하였다. 퍼지 규칙 수는 5개이며, 제어기는 (7)과 같은 상태궤환 제어기를 사용한다. 그림 3은 본 논문에서 제안한 지능형 디지털 재설계 기법을 도시한 그림이다.

먼저, 3.1절에서 언급한 아날로그 퍼지 제어기의 설계에서는 LMI 식 (9)를 만족하는 제어기의 이득행렬 K_c^i 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_c^1 &= [-1.2061 \ 2.3650 \ -0.5464 \ 0.0531 \ -0.3207], \\ K_c^2 &= [-1.3239 \ 2.6075 \ -0.6323 \ 0.0882 \ -0.4570], \\ K_c^3 &= [-2.1988 \ 4.4485 \ -0.9801 \ 0.3363 \ -1.3848], \\ K_c^4 &= [-1.6518 \ 3.3029 \ -0.7234 \ 0.1798 \ -0.7933], \\ K_c^5 &= [-1.3394 \ 2.6551 \ -0.5299 \ 0.0884 \ -0.4419]. \end{aligned}$$

또한, 3.2 절의 지능형 디지털 재설계 기법에 의한 이득 행렬 K_d^i 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_d^1 &= [-1.1570 \ 2.9547 \ -0.9968 \ -0.0991 \ -0.5751], \\ K_d^2 &= [-1.2127 \ 3.0356 \ -0.9819 \ -0.0727 \ -0.6727], \\ K_d^3 &= [-1.5045 \ 4.0472 \ -1.1006 \ 0.1394 \ -1.2862], \\ K_d^4 &= [-1.5760 \ 3.3374 \ -1.1142 \ 0.0556 \ -0.9011], \\ K_d^5 &= [-1.2494 \ 2.3626 \ -0.4938 \ 0.0026 \ -0.4186]. \end{aligned}$$

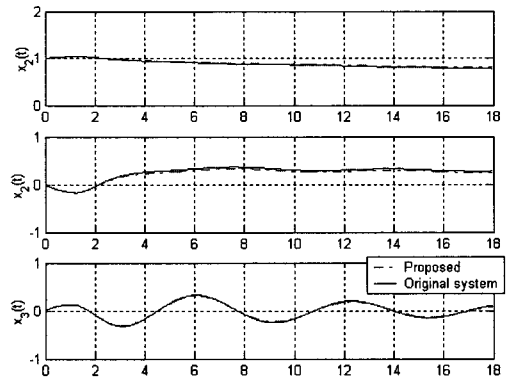


그림 3. 상태 x_1, x_2, x_3 의 변화

Fig. 3. Changes in states $x_1, x_2,$ and x_3

시뮬레이션 과정에서 총실험시간은 $T_f = 18 \text{ sec}$ 이며, 샘플링주기는 $T_s = 0.2 \text{ sec}$ 로 주었다. 또한 초기치 상태 벡터는 $x_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$ 로 가정하고, 외란에 의한 최악의 경우를 가정하는 사전값 $\rho = 0.6$ 과 가중 행렬 $Q = 0.01I$ 로 부여하였다. 제어입력을 $T = 1.2 \text{ sec}$ 에서부터 가해준 결과는 그림 3과 4에서와 같이 나타난다. 제안된 방법에 의해 제어된 시스템(점선)은 원래 시스템(실선)을 근사적으로 따라감을 알 수 있다.

5. 결 론

원자력 발전소 증기발생기의 수위제어는 그 내부구조의 복잡성 및 비선형적인 동특성으로 인해 그것의 제어에 큰 어려움을 가중시킨다. 본 논문에서는 퍼지논리를 이용한 지능형 디지털 재설계 기법을 이용하여 증기발생기 모델을 제어하였다. 설계된 제어기는 아날로그 제어기의 성능을 보장하면서 안정도를 만족시키는 디지털 제어기이다. 실제 현장에서는 컴퓨터 및 여러 가지 기계에 의한 제어가 시행되므로 제안된 방법은 여러모로 쓰임새가 있다고 할 수 있다. 또한, 초기값으로 벗어난 증기발생기의 흐름을 고려하여 외부적인 외란으로부터 플랜트를 안정화 시키는 강인 제어 이론을 첨가함으로써 본 논문의 효용성을 더욱 증가시켰다.

본 논문에서는 Irving의 원자력 발전소 증기발생기 모델을 사용하여, TS퍼지모델을 제안하였다. 본 이론의 보다 광범위한 적용을 위해서는 소속함수의 결정과정에서 비선형 요소를 고려하여 더욱 실제 모델에 부합되는 제어기의 설계과정이 연구되어야 할 것이다.

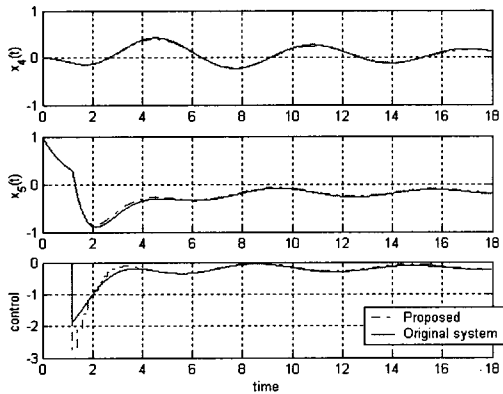


그림 4 상태 x_4 , x_5 및 제어입력의 변화

Fig. 4. Changes in states x_4 , x_5 and control input

참 고 문 헌

[1] E. Irving, C. Miossec, J. Tassart. "Towards Efficient Full Automatic Operation of PWR S/W with Water Level Adaptive Control," *Boiler Dynamics and Control in Nuclear Power Station 2*, British Nuclear energy Society, 1980

[2] M. K. Kim, M. H. Shin and M. J. Chung, "A gain-scheduled L_2 control to nuclear steam generator water level," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 26, pp. 905-916, 1999.

[3] B. S. Chen, C. S. Tseng and H. J. Uang, "Robustness Design of Nonlinear Dynamic Systems via Fuzzy Linear Control," *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, Vol.7, No. 5, pp. 571-585, Oct. 1999.

[4] W. Chang, J. B. Park, Y. H. Joo, and G. Chen, "Design of robust fuzzy-model-based controller with sliding mode control for SISO nonlinear systems", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 125, pp.

1-22, 2002, 1.

[5] H. J. Lee, J. B. Park and G. Chen, Robust fuzzy control of nonlinear systems with parametric uncertainties, *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, Vol. 9, No. 2, pp.369-379, Apr., 2001.

[6] Z. Li, J. B. Park, and Y. H. Joo Chaotifying continuous-time TS fuzzy systems via discretization, *IEEE Trans. on Circ. and Syst. I*, Vol. 48, No. 10, pp. 1237-1243, 2001.

[7] B. C. Kuo, "Digital control systems", Holt, Rinehart and Winston, 1980.

저 자 소 개



주영훈(Young-Hoon Joo)

제 12권 제 1호(2002년 2월호) 참조



조광래(Kwang-Lae Cho)

2002년 : 군산대 제어계측공학과 졸업.
2002년~현재 : 동 대학원 전자정보공학과 석사과정

관심분야 : 퍼지 제어, 지능제어, 퍼지 시스템 모델링, 로봇 제어, 유전알고리즘

E-mail : ckl1116@hanmail.net

Tel. : +82-2-2123-2773



김주원(Joo-Won Kim)

제 12권 제 1호(2002년 2월호) 참조



박진배(Jin-Bae Park)

제 12권 제 1호(2002년 2월호) 참조