

지능형 디지털 재설계 기법을 이용한
원자력 발전소 증기발생기의 강인 제어기 설계

Design of Robust Controller for the Steam Generator in the Nuclear Power Plant Using Intelligent Digital Redesign

김 주원* · 박 진배* · 조 광래** · 주 영훈**

* 연세대 전기전자공학과,

** 군산대 전자정보공학부

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

* Dept. of Electrical and Electronic Eng., Yonsei Univ. Seoul, Korea

** School of Electrical and Information Eng., Kunsan National Univ. Kunsan, Chonbuk Korea

Abstract

This paper describes fuzzy control methodologies of the steam generator which have nonlinear characteristics in the nuclear power plant. Actually, the steam generator part of the power generator has a problem to control water level because it has complex components and nonlinear characteristics. In order to control nonlinear terms of the model, Takagi-Sugeno (TS) fuzzy system is used to design a controller. 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 전력의 진출력 과정을 자동화하는 제어 시스템이 필요하다. 따라서, 저전력부터 고전력에 이르기까지의 진출력 과정을 제어하는 프로세스의 제어가 요구된다. 특히, 발전기의 증기발생기의 수위 제어는 안전 운전상 적정 수위를 유지하는 것이 절대적으로 필요하다. 증기발생기는 그 내부 역학의 복잡함과 비선형성으로 인해 저출력에서의 수위 조절에 어려움을 가지고 있다. 이는 안정성과 경제성 문제에 직결되어 순간적인 동작의 강제정지 등을 유발하게 된다. 또한, 수축과 팽창 현상이 발생하여 쉽게 제어하기가 힘이 든다. 더불어, 제어 시 고려되어야 할 사항으로, 증기 유량이나 급수 유량, 온도 등의 외란에 무관하게 항상 그 수위를 일정하게 유지하도록 하는 것이 필요하다. 이로 인해 발전기의 제어에 중대한 영향을 미치는 증기 발생기 모델에 대한 많은 연구들이 진행되었다. Irving은 급수유량과 증기유량의 변화, 그리고, 수위와의 관계를 가지고 플랜트를 설계하였다[1]. 여기서는 각각의 출력에 따라 모델의 파라미터가 변하는 파라미터 가변 모델을 사용하였다. Irving의 모델이 제시된 이후에 많은 학자들이 이 모델을 대상으로 하여 여러 가지 제어 기법을 제시하였다[2-3].

본 논문에서는 제어 목적에 널리 사용되는 Irving의 모델을 기초로 하여 제어기를 설계한다. 또한, 비선형 시스템의 제어에 매우 효과적인 제어기 설계기법중의 하나인 퍼지모델기반 제어기법을 도입할 것이다[4]. 이를 위하여 증기 발생 계통의 동특성을 정확하게 나타낼 수 있는 Takagi-Sugeno 퍼지 모델링 기법을 사용한다[5]. 증기발생기의 동작점의 범위는 그 부하출력에 따라서 매우 광범위하다. 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

높다. 이것은 어느정도의 시스템의 불확실성에 강인한 성능을 발휘할 뿐 아니라 넓은 동작 영역에서 균일한 제어 성능을 보인다. 따라서 TS 퍼지 모델기반 제어기법은 증기발생기의 수위제어에 매우 적합하다. 특히, TS 퍼지 모델로 표현된 비선형 증기발생계통 모델은 모델링 오차와 더불어 시스템 자체의 불확실성을 포함할 수 있으므로 이러한 불확실성에 강인한 안정성을 확보하도록 제어 입력 이득을 선정하여야 한다. 본 연구는 불확실성을 포함한 TS 퍼지 모델에 강인한 제어 성능을 보장할 수 있는 퍼지 모델 기반 제어기 설계 기법을 제안한다.

더불어, 컴퓨터에 의한 공장 자동화가 이루어지는 현실에서 주요 시스템의 디지털화가 필요하다. 따라서, 아날로그 제어기의 성능을 유지하는 디지털 제어기의 설계가 이루어져야 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 기법이다. 본 논문에서는 지능형 디지털 재설계 기법을 이용하여 증기 발생기 수위 제어용 디지털 제어기를 설계한다.

2. 증기 발생기의 퍼지 모델링

2.1 Irving의 증기 발생기 모델

Irving이 제안한 증기 발생기 모델의 상태 방정식은 다음과 같다.

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

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

표 1 동작전력에 따른 증기 발생기 파라미터의 동특성

$q_v(t)$ (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 동특성[2]은 시상수가 -1인 1차 시스템 형태로 모델링 된다. 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.

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

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

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

이 때,

$$\begin{aligned} a_{15} &= G_1(p), a_{22} = -\tau_2^{-1}, a_{25} = -G_2(p)/\tau_2(p), \\ a_{33} &= -2\tau^{-1}(p), a_{35} = G_3(p), a_{43} = -\tau^{-2}(p) - 4\pi^2 T^{-2}(p), \\ a_{55} &= -1, b_{11} = -G_1(p), b_{12} = G_2(p)/\tau_2(p) \end{aligned}$$

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.

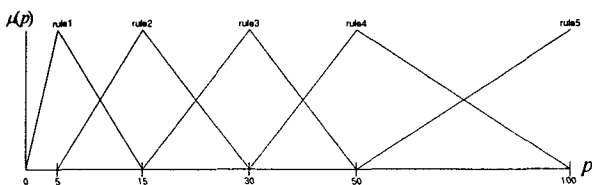


그림 1 전력에 따른 소속함수

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.058 \\ 0 & -0.0207 & 0 & 0 & -0.199 \\ 0 & 0 & -0.0477 & 1 & 0.181 \\ 0 & 0 & -0.0006 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, B_{11} = \begin{bmatrix} -0.058 \\ 0.199 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ A_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.058 \\ 0 & -0.0465 & 0 & 0 & -0.2074 \\ 0 & 0 & -0.076 & 1 & 0.226 \\ 0 & 0 & -0.012 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, B_{12} = \begin{bmatrix} -0.058 \\ 0.2074 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ A_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.058 \\ 0 & -0.222 & 0 & 0 & -0.4067 \\ 0 & 0 & -0.0461 & 1 & 0.310 \\ 0 & 0 & -0.127 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, B_{13} = \begin{bmatrix} -0.058 \\ 0.4067 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ A_4 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.058 \\ 0 & -0.2778 & 0 & 0 & -0.2917 \\ 0 & 0 & -0.0575 & 1 & 0.215 \\ 0 & 0 & -0.191 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, B_{14} = \begin{bmatrix} -0.058 \\ 0.2917 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ A_5 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.058 \\ 0 & -0.2941 & 0 & 0 & -0.1382 \\ 0 & 0 & -0.0699 & 1 & 0.105 \\ 0 & 0 & -0.287 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, B_{15} = \begin{bmatrix} -0.058 \\ 0.1382 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ B_{2i} &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \end{aligned}$$

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 퍼지 추론 기법을 사용하여 보강된 시스템으로 정의된다. 규칙 5개에 의해 삼각소속함수를 사용하여 추론된 시스템은 다음과 같다.

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

3. TS 퍼지 모델을 이용한 강인 제어기의 설계

$q_v(t)$ 는 우리가 확실히 알 수 없으나 일정한 범위내에 있다고 추정이 가능하다고 가정해보자. 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 performance를 고려한다.

$$\frac{\int_0^{t_f} x^T(t) Q x(t) dt}{\int_0^{t_f} \{B_{1i} q_v\}^T(t) B_{1i} q_v(t) dt} < \rho^2 \quad (5)$$

이 때, t_f 는 제어 최종 시간, ρ 는 외란에 대한 최악의 경우를 나타내는 값, 그리고, Q 는 weighting 양의 한정행렬이다. 이 부등식은 초기값이 고려된다면 다음과 같이 수정될 수 있다.

$$\int_0^{t_f} x^T(t) Q x(t) dt < x^T(0) P x(0) + \rho^2 \int_0^{t_f} \{B_{1i} q_v\}^T(t) B_{1i} q_v(t) dt \quad (6)$$

이 때, P 는 양의 대칭 한정행렬이다. 전체 제어기는 다음과 같은 퍼지 제어기를 고려한다.

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

Lyapunov 함수를 $V(x) = x^T(t)Px(t)$ 와 같이 두면 Lyapunov 정리에 의해 우리는 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다. 아래와 같은 부등식을 만족시키는 양의 한정행렬 P 가 존재하면 페루프 시스템은 어떤 영역 내에 존재하고 제어 성능 ρ^2 를 보장한다.

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

또한, 외란 $q_u(t)$ 가 존재하지 않는 경우, 만약 제어기가 페루프 비선형 시스템에 사용되고 위의 부등식을 만족시키는 양의 한정행렬 P 가 존재하면 페루프 시스템은 점근적으로 안정하다.

위 부등식을 Schur complement를 이용하여 LMI 형태로 나타내면 아래와 같다.

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

여기서, $T = P^{-1}$, 그리고, $Y_i = K_i T$ 이다.

4. 지능형 디지털 재설계 기법에 의한 강인 디지털 제어기의 설계

이 장에서는 디지털 재설계 기법과 본 방법에 기인한 디지털 제어기 설계방법에 대하여 기술한다.

다음과 같은 연속 시간 페루프 TS 퍼지 시스템을 고려하자

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

또한 다음과 같은 디지털 TS 퍼지 시스템을 고려하자.

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

여기서 $u_d(t)$ 는 구간적으로 일정한 디지털 제어 입력이다.

선형 시불변 시스템을 이산화 하는 방법에는 몇 가지가 있다. 그러나, TS 퍼지 시스템의 비퍼지화된 출력은 선형 시불변이 아니라 시간에 따라 변화하므로, 이 방법들은 연속 시간 TS 퍼지 시스템에 직접적으로 적용될 수 없다. 따라서, 우리는 연속 TS 퍼지 시스템의 이산화를 위해 다음과 같은 수학적 기반을 필요로 한다.

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 $\sum_{i=1}^q \mu_i(p(t))A_i$ 와 $\sum_{i=1}^q \mu_i(p(t))B_i$ 는 시구간 내의 모든 영역에서 상수값 $\sum_{i=1}^q \mu_i(p(kT))A_i$, $\sum_{i=1}^q \mu_i(p(kT))B_i$ 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.

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

이 때, $G_i = \exp(A_i T)$, $H_i = (G_i - I)A_i^{-1}B_i$ 이다[6,7].

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

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

여기서, $\Phi_{ij} = \exp((A_i + B_i K_j^i)T)$ 이다.

제어의 목적은 기존에 설계된 아날로그 퍼지 모델 기반 제어기를 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_i^j 에 대해, 다음과 같은 중요한 목적을 만족시키는 이득 행렬 K_i^j 를 재설계한다.

i) 식 (12)의 이산화된 상태(state)는 연속 시간 페루프 TS 퍼지 시스템 (13)의 상태와 전체적으로 모든 샘플링 주기 $t = kT, k = 1, 2, \dots$, 에서 거의 일치하도록 대응된다.

ii) 디지털 제어입력 u_d 에 의해 제어된 식 (11)은 전역에서 점근적으로 안정하다.

(II) 마찬가지로 다음과 같은 제약을 만족하는 K_i^j 행렬을 찾는다.

i) $\|\Phi_{ij} - G_i - H_i K_j^i\| < \gamma, i, j = 1, 2, \dots, q$ 에서 γ 를 최소화한다.

ii) Lyapunov 정리 관점에서 이산화된 페루프 시스템 (12)는 전체 영역에서 점근적으로 안정하다.

조건 II는 분명히 전형적인 convex optimization 문제이다. 따라서, 선형행렬부등식(LMI)에 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 K_i^j 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 $x_c(kT)$ 는 아날로그식으로 제어된 이산화된 식 (13)의 상태 $x_c(kT)$ 에 가깝게 대응된다. 또한, 이산화된 TS 퍼지 시스템 (12)는 Lyapunov 정리 관점에서 전체 영역에서 점근적으로 안정하다.

Minimize γ subject to Q, O, K_i

$$\begin{bmatrix} -\gamma Q & * \\ \Phi_{ij} Q - G_i Q - H_i K_j^i & -\gamma I \end{bmatrix} < 0, \quad (14)$$

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

$$\begin{bmatrix} -Q - O & * \\ \frac{G_i Q + H_i K_j^i + G_j Q + H_j K_i^j}{2} & -Q \end{bmatrix} < 0, \quad (16)$$

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

이 때, *는 행렬의 대각선 대칭 요소이다.

증명 : 증명은 지면관계상 생략함.

5. 실험 및 고찰

4장에서 언급한 디지털 제어기 설계 기법을 이용하여 Irving의 증기발전기 모델의 제어를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하여 본다. 시스템 행렬은 2장에서 언급한 근사화 모델을 사용하였다.

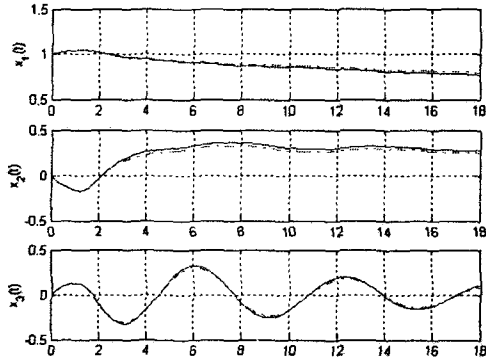


그림 2 상태 x_1, x_2, x_3 의 변화 비교

먼저, 3장에서 언급한 아날로그 퍼지 제어기의 설계에
서는 LMI 식 (9)를 만족하는 제어기의 이득행렬 K_c^i 는

$$K_c^1 = [-1.2061 \ 2.3650 \ -0.5464 \ 0.0531 \ -0.3207],$$

$$K_c^2 = [-1.3239 \ 2.6075 \ -0.6323 \ 0.0882 \ -0.4570]$$

$$K_c^3 = [-2.1988 \ 4.4485 \ -0.9801 \ 0.3363 \ -1.3848]$$

$$K_c^4 = [-1.6518 \ 3.3029 \ -0.7234 \ 0.1798 \ -0.7933]$$

$$K_c^5 = [-1.3394 \ 2.6551 \ -0.5299 \ 0.0884 \ -0.4419]$$

와 같다.

또한, 4장의 지능형 디지털 재설계 기법에 의한 이득
행렬 K_d^i 는 다음과 같다.

$$K_d^1 = [-1.1570 \ 2.9547 \ -0.9968 \ -0.0991 \ -0.5751],$$

$$K_d^2 = [-1.2127 \ 3.0356 \ -0.9819 \ -0.0727 \ -0.6727]$$

$$K_d^3 = [-1.5045 \ 4.0472 \ -1.1006 \ 0.1394 \ -1.2862]$$

$$K_d^4 = [-1.5760 \ 3.3374 \ -1.1142 \ 0.0556 \ -0.9011]$$

$$K_d^5 = [-1.2494 \ 2.3626 \ -0.4938 \ 0.0026 \ -0.4186]$$

시뮬레이션 과정에서 총실험시간은 $T_f = 18 \text{ sec}$ 이며, 샘플
플링주기는 $T_s = 0.2 \text{ sec}$ 로 주었다. 또한 초기치 상태 벡
터는 $x_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$ 로 가정하고, 외란에 의한 최악의
경우를 가정하는 사전값 $\rho = 0.6$ 과 가중 행렬 Q 는 $0.01I$
로 부여하였다. 제어입력을 $T = 1.2 \text{ sec}$ 에서부터 가해준
결과는 그림 2와 3에서와 같이 나타난다. 제안된 방법에
의해 제어된 시스템(점선)은 원래 시스템(실선)을 근사적
으로 따라감을 알 수 있다.

6. 결 론

원자력 발전소의 증기발생기의 수위제어는 그 내부구조
의 복잡성 및 비선형적인 동특성을 지닌다. 본 논문에서
는 퍼지논리를 이용한 지능형 디지털 재설계 기법을 이
용하여 증기발생기의 수위를 제어하였다. 설계된 제어기
는 아날로그 제어기의 성능을 보장하면서 안정도를 만족
시키는 디지털 제어기이다.

실제 현장에서는 컴퓨터 및 여러 가지 기계에 의한 제어
가 시행되므로 제안된 방법은 여러모로 쓰임새가 있다고
할 수 있다. 또한, 초기값으로 벗어난 증기발생기의 흐름
을 고려하여 외부적인 외란으로부터 플랜트를 안정화 시
키는 강인 제어 이론을 첨가함으로써 본 논문의 효용성
을 더욱 증가시켰다.

본 논문에서는 Irving의 원자력 발전소 증기발생기 모
델을 사용함으로써, 모델의 근사화를 시도하였으나, 시스
템의 비선형 요소를 더욱 더 근사화시킨 모델에서의 본
이론의 적용과 소속함수의 결정과정에서 이 비선형 요소
를 고려하여 더욱 실제 모델에 부합되는 제어기의 설계
과정이 연구되어야 할 것이다.

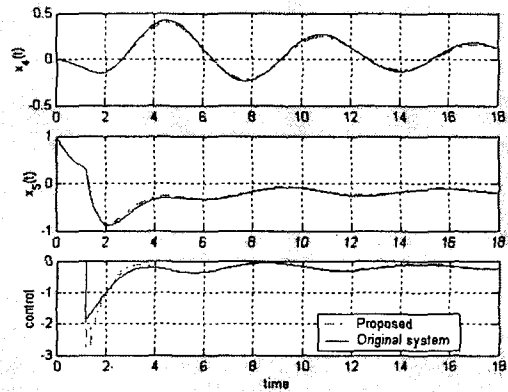


그림 3 상태 x_4, x_5 및 제어입력의 변화

본 연구(관리번호 01-011)는 한국전력공사의 지원에 의
하여 기초전력공학공동연구소 지원으로 되었음.

7. 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] Bor-Sen Chen, Chung-Shi Tseng and Huey-Jian 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*, to appear, 2001.
- [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.