

화력발전소 과열기의 증기온도 제어를 위한 퍼지 제어기 설계

(Fuzzy Controller Design for Steam Temperature Control of Power Plant Superheater)

이돈구* · 이상혁 · 김주식 · 유정웅

(Done - Gu Lee · Sang - Hyuk Lee · Ju - Sik Kim · Jeong - Woong Ryu)

요 약

본 논문에서는 쌍선형 시스템으로 표현되는 화력발전소 과열기에 대한 퍼지 제어기법을 제안한다. 증기온도를 제어하기 위하여 쌍선형 관측기로부터 얻어진 추정값과 기준값의 오차면적과 시간 변화율을 고려하여 입력변수를 구성하고, T. Takagi와 M. Sugeno의 퍼지모델을 기반으로 제어규칙을 추론하였다. 제안된 방법의 유용성은 컴퓨터 시뮬레이션 결과에 의해서 검증하였다.

Abstract

In this paper, we present a method of fuzzy controller design for the power plant superheater in the form of bilinear system. For the steam temperature control, the input variables are constructed by the area of difference between the profiles estimated from bilinear observer and reference profiles, and the time rate of change. We estimate the control rules by T. Takagi and M. Sugeno's fuzzy model. The feasibilities of the suggested method are illustrated via the computer simulation results.

Key Words : fuzzy control, superheater system, bilinear system, bilinear observer

1. 서 론

화력발전소에서 과열기는 드럼으로부터 유입되는 포화증기의 수분을 증발시켜 과열증기를 만든다. 이 과정에서 증기온도는 열응력에 의한 터빈의 균열을 막기 위해서 일정범위 내로 유지되어야 하며, 발전소에서는 과열기의 입구 또는 출구 측에 과열 저감기(desuperheater)를 설치하여 운용하고 있다. 이 과열

저감기를 이용하여 출구의 증기온도를 제어하는 과열기는 쌍선형 시스템으로 표현된다[1].

쌍선형 시스템에 대한 제어기의 설계문제는 시스템이 갖는 특성 때문에 꾸준히 연구되어 왔으나, 상태변수와 입력변수가 곱해진 항 때문에 시스템을 제어하기가 용이하지 않다[2-4]. 쌍선형 시스템을 비선형 시스템으로 간주하여 제어기를 설계하여도 적절한 제어성능을 얻기 어려우며, 근사화된 선형 시스템으로부터 최적해를 구하기 위해 반복적 방법을 이용한 최적제어기법이 제안되었지만, 제안된 시스템에 대해서만 적용이 가능하고, 많은 연산을 수반하는 문제점이 존재한다[5-7].

* 주저자 : 충북대학교 전기공학과
Tel : 043-261-3330, Fax : 043-261-3280
E-mail : hongwon@vod.chungbuk.ac.kr
접수일자 : 2002년 8월20일
1차심사 : 2002년 8월21일
심사완료 : 2002년 9월17일

본 논문에서는 쌍선형 시스템으로 표현되는 과열기의 비선형성에 대한 적당한 보상을 위해 퍼지 제어 기법을 도입함으로써 시스템의 모델링 및 연산에 대한 부담을 줄이고, 쌍선형 시스템의 제어문제를 해결하였다. 여기서, 제안된 퍼지 제어기를 구성하기 위한 입력변수는 증기의 기준온도 프로파일과 관측기를 통하여 구성된 증기온도의 프로파일의 차이면적과 그 차이면적의 시간 변화율이며, T. Takagi와 M. Sugeno의 퍼지모델[8]을 기반으로 수행하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 제어대상인 과열기에 대한 모델링을 기술하였다. 모델링 과정에서 무한차원의 편미분 방정식으로 표현된 모델을 유한차분법을 이용하여 유한차원의 상미분 방정식으로 변환하였다. 3장에서는 쌍선형 시스템에 대한 관측기와 퍼지 제어기를 제안하였고, 제안된 방법을 이용한 시뮬레이션 결과로부터 유용성을 검증하였다. 그리고 4장에서 결론을 맺는다.

2. 과열기 시스템

일반적으로 열교환기는 그림 1과 같은 구조를 가지며, 본 장에서 과열 저감기가 설치된 과열기의 모델링에 사용된 파라미터는 표 1과 같다[1,7].

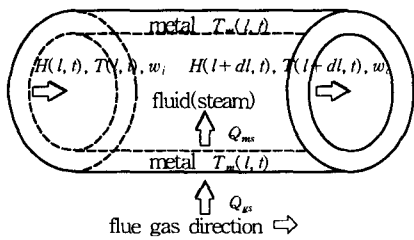


그림 1. 열교환기 모델
Fig. 1. Heat exchanger model

열교환기의 편미분 방정식으로부터 엔탈피 변화는

$$dH = C_p A_1 dT dl / v_1 \quad (1)$$

이고, 체적에 대한 스팀온도는 다음 식을 만족하며,

$$dT = \frac{\partial T(l, t)}{\partial l} dl + \frac{\partial T(l, t)}{\partial t} dt \quad (2)$$

금속으로부터 스팀으로의 열 유입은 다음과 같다.

$$dQ = \alpha_{ms} U_2 [T_m(l, t) - T(l, t)] dt dl \quad (3)$$

그러면 식 (1)과 (3)으로부터 다음 편미분 방정식을 얻을 수 있고,

$$\left[\frac{\partial T(l, t)}{\partial t} + \omega_1 \frac{\partial T(l, t)}{\partial l} \right] \frac{C_p A_1}{\alpha_{ms} U_2 v_1} = T_m(l, t) - T(l, t) \quad (4)$$

금속에 대한 열평형 편미분 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T_m(l, t)}{\partial t} = \frac{\alpha_{gm} S_1}{M_m C_m} [T_g(l, t) - T_m(l, t)] - \frac{\alpha_{ms} S_2}{M_m C_m} [T_m(l, t) - T(l, t)] \quad (5)$$

유한차분법을 이용하면 식 (4)는

$$C_p A_1 \frac{T(l, t+dt) - T(l, t)}{dt} = \frac{\omega_1 C_p A_1}{dl} [T(l, t) - T(l+dl, t)] + \alpha_{ms} U_2 v_1 [T_m(l, t) - T(l, t)] \quad (6)$$

이며, 식 (6)의 양변에 dl 을 곱하고, v_1 으로 나누면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_f \rho C_p \frac{T(l, t+dt) - T(l, t)}{dt} = C_p w [T(l, t) - T(l+dl, t)] + \alpha_{ms} S_2 [T_m(l, t) - T(l, t)] \quad (7)$$

여기서, $V_f \rho = \frac{A_1 dl}{v_1}$, $w = \frac{\omega_1 A_1}{v_1}$, $S_2 = U_2 dl$ 이다.

그리고 식 (7)과 (5)를 상미분 방정식의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$V_f \rho C_p \frac{dT(l, t)}{dt} = C_p w [T(l, t) - T(l+dl, t)] + \alpha_{ms} S_2 [T_m(l, t) - T(l, t)] \quad (8)$$

화력발전소 과열기의 증기온도 제어를 위한 퍼지 제어기 설계

$$M_m C_m \frac{dT_m(l, t)}{dt} = \alpha_{gm} S_1 [T_g(l, t) - T_m(l, t)] - \alpha_{ms} S_2 [T_m(l, t) - T(l, t)] \quad (9)$$

여기서, 대류가 과열기에 대한 유일한 열 전달이라고 가정하면, Q_{ms} 와 Q_{gm} 는

$$Q_{ms} = \alpha_{ms} S_2 [T_m(l, t) - T(l, t)]$$

$$Q_{gm} = \alpha_{gm} S_1 [T_g(l, t) - T_m(l, t)] \quad (10)$$

이고, α_{gm} 와 α_{ms} 가 일정하다고 가정하면, 식 (8)과 (9)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_f \rho C_p \frac{dT}{dt} = C_p w_i T_i - C_p w_o T_o + \alpha_{ms} S_2 (T_m - T) \quad (11)$$

$$M_m C_m \frac{dT_m}{dt} = \alpha_{gm} S_1 (T_g - T_m) - \alpha_{ms} S_2 (T_m - T) \quad (12)$$

열교환기를 유한차분법에 의하여 그림 2와 같이 n 개의 부분으로 분할하면, 식 (11)과 (12)로부터 과열 저장기를 포함하는 첫 번째 부분은

$$V_s \rho C_p \frac{dx_1}{dt} = -C_p (w_i + w_d) x_1 + \alpha_{ms} S_2 (z_1 - x_1) + C_p T_i w_i + C_{pd} T_d w_d \quad (13)$$

$$M_m C_m \frac{dz_1}{dt} = \alpha_{gm} S_1 (T_{g1} - z_1) - \alpha_{ms} S_2 (z_1 - x_1) \quad (14)$$

이고, k 번째는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s \rho C_p \frac{dx_k}{dt} = C_p (w_i + w_d) (x_{k-1} - x_k) + \alpha_{ms} S_2 (z_k - x_k) \quad (15)$$

$$M_m C_m \frac{dz_k}{dt} = \alpha_{gm} S_2 (T_{gk} - z_k) - \alpha_{ms} S_1 (z_k - x_k) \quad (16)$$

여기서, $x_k = T_k$, $z_k = T_{mk}$ 이다.

표 1. 파라미터
Table 1. Parameters

symbol	parameter
T_m	metal temperature [°C]
T	steam temperature [°C]
T_g	flue gas temperature [°C]
T_i	inlet steam temperature [°C]
T_o	outlet steam temperature [°C]
T_d	spray water temperature [°C]
H_i	inlet steam enthalpy [kcal/kg]
H_o	outlet steam enthalpy [kcal/kg]
w_i	inlet steam mass flow rate [kg/s]
w_o	outlet steam mass flow rate [kg/s]
w_d	spray water mass rate [kg/s]
Q_{gm}	heat input rate from flue gas to metal [kcal/s]
Q_{ms}	heat input rate from metal to steam [kcal/s]
V_s	volume of each segment [m ³]
V_f	steam volume [m ³]
ρ	steam density [kg/m ³]
C_p	superheated steam heat capacitance [kcal/kg °C]
C_{pd}	spray water heat capacitance [kcal/kg °C]
C_m	superheater tube heat capacitance [kcal/kg °C]
α_{ms}	heat transfer rate from metal to steam [kcal/m ² °C]
α_{gm}	heat transfer rate from gas to metal [kcal/m ² °C]
M_m	mass of superheater tube [kg]
S_1	external heating surface [m ²]
S_2	internal heating surface [m ²]
A_1	internal cross sectional area [m ²]
v_1	specific volume of fluid [m ³ /kg]
U_2	total circumference of inside tube [m]
w_1	velocity of fluid [m/s]

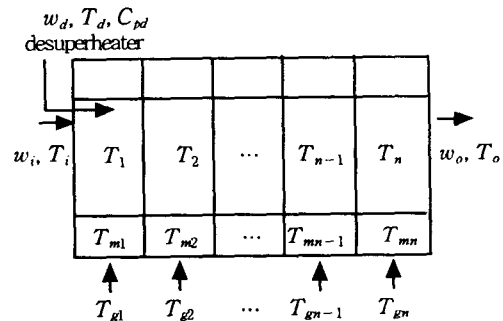


그림 2. 과열기 분할
Fig. 2. Partition of a superheater

그리고 식 (13)~(16)으로부터 다음과 같은 쌍선형 시스템의 상태방정식을 얻을 수 있다[7,9].

$$\dot{x}(t) = [A_0 + \sum_{i \in I} p_i(t) A_i] x(t) + [B_0 + \sum_{j \in J} q_j(t) B_j] u(t) + Dv(t) \quad (17)$$

$$w(t) = Cx(t) \quad (18)$$

여기서, $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^p$, $w(t) \in R^m$ 그리고 $v(t) \in R^q$ 는 각각 상태, 입력, 출력 그리고 미지의 입력을 나타내고, $A_0 \in R^{n \times n}$, $A_i \in R^{n \times n}$, $B_0 \in R^{n \times p}$, $D \in R^{n \times q}$, $C \in R^{m \times n}$ 을 만족하며, $p_i(t)$ 와 $q_j(t)$ 는 입력 또는 상태변수이다.

3. 퍼지 제어기법을 이용한 과열기 시스템의 증기온도 제어

식 (17)과 (18)의 형태로 표현되는 쌍선형 시스템에 대한 기존의 제어기 설계방식들은 매우 복잡한 연산 과정을 수반하는 문제점을 갖고 있다. 따라서 간단하면서도 적절한 제어성능을 나타내는 설계방식의 도입이 필요하다. 본 장에서는 퍼지 제어규칙을 얻기 위한 과열기 시스템의 증기온도를 추정하기 위해서 쌍선형 관측기를 기술하고, 연산의 부담을 해결하기 위한 퍼지 제어기를 제안한다.

3.1 쌍선형 관측기의 설계

식 (17)과 (18)의 시스템에 대한 쌍선형 관측기는 다음과 같은 형태로 구성할 수 있다[9].

$$\dot{z}(t) = [F_0 + \sum_{i \in I} p_i(t) F_i] z(t) + [G_0 + \sum_{j \in J} q_j(t) G_j] u(t) + [L_0 + \sum_{i \in I} p_i(t) L_i] w(t) \quad (19)$$

$$x_e(t) = z(t) - Ew(t) \quad (20)$$

여기서, $F_0 \in R^{n \times n}$, $F_i \in R^{n \times n}$, $G_0 \in R^{n \times p}$, $G_j \in R^{n \times p}$, $L_0 \in R^{n \times m}$, $L_i \in R^{n \times m}$, $E \in R^{n \times m}$ 이고, $z(t) \in R^n$, $x_e(t) \in R^n$ 이다. 그리고 관측기의 구성행렬은 다음 식들을 만족한다.

$$F_0 - PA_0 + (L_0 + F_0 E)C = 0 \quad (21)$$

$$F_i - PA_i + (L_i + F_i E)C = 0 \quad (22)$$

$$G_0 - PB_0 = 0 \quad (23)$$

$$G_j - PB_j = 0 \quad (24)$$

$$(EC + I)D = 0 \quad (25)$$

여기서, $P = EC + I$ 이다.

3.2 퍼지 제어기의 설계

과열기 시스템은 평형류와 역류에 대하여 그림 3과 같은 온도분포를 갖는다. 입구로부터 출구까지 과열 증기의 온도는 3.1절의 쌍선형 관측기로부터 추정할 수 있으며, 추정한 온도값을 이용한 과열증기의 온도 경향은 보간법을 사용하여 구성된다. 또한 내부온도가 급격하게 변하지 않는다고 가정하면, 과열증기의 온도분포는 그림 4와 같은 형태를 유지하기 때문에 추정한 과열증기의 온도경향이 기준값을 추종하도록 온도를 조절해주어야 한다. 즉, 두 면적의 오차에 비례하는 제어입력이 요구된다.

먼저 오차 $e(x, t)$ 를 다음과 같이 정의하면,

$$e(x, t) = \hat{f}(x, t) - f(x, t) \quad (26)$$

여기서, $f(x, t)$ 와 $\hat{f}(x, t)$ 는 거리에 따른 기준값과 추정값에 의한 면적이다.

오차의 시간변화를 $\Delta e(x, nt)$ 는 다음과 같다.

$$\Delta e(x, nt) = e(x, nt) - e(x, (n-1)t) \quad (27)$$

여기서, $e(x, t)$ 가 양의 값으로 증가하면 과열증기의 온도가 기준온도 보다 높고, $\Delta e(x, nt)$ 가 양으로 증가할 경우는 과열증기의 온도가 기준온도 보다 점점 높게 증가함을 의미한다.

화력발전소 과열기의 증기온도 제어를 위한 퍼지 제어기 설계

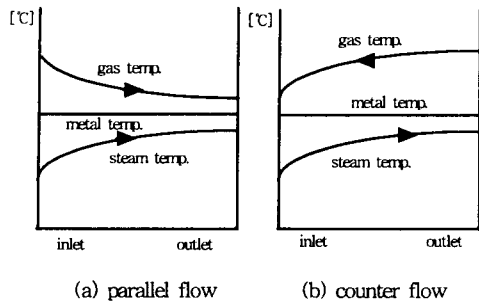


그림 3. 과열기의 온도분포
Fig. 3. Temperature distribution of superheater

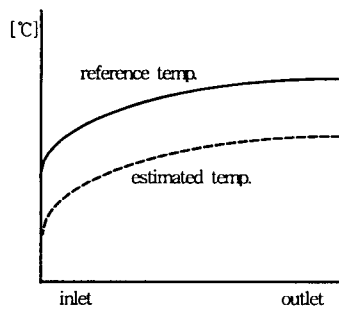
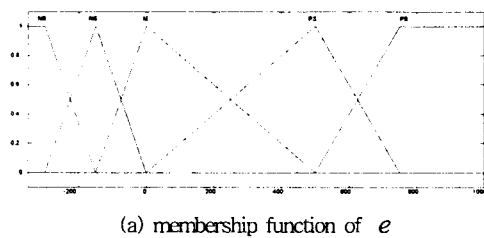


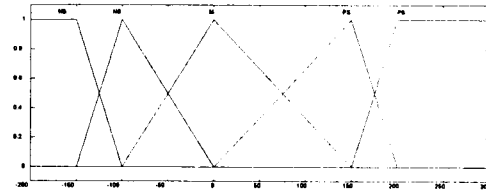
그림 4. 과열증기의 온도분포
Fig 4. Temperature distribution of steam

본 논문에서는 $e(x, t)$ 와 $\Delta e(x, nt)$ 의 값의 변화 추이에 따른 과열기 시스템의 제어입력 즉, 냉각수의 흐름률 $w_d(t)$ 를 조절하기 위한 퍼지 제어기법을 제안한다. 그림 5는 $e(x, t)$ 와 $\Delta e(x, nt)$ 에 대한 소속 함수를 나타낸다. $e(x, t)$ 의 값이 PB로 증가하게 되면 기준온도 보다 현재 과열증기의 온도가 높게 되어 제어입력을 증가시켜야 한다. 또한 $\Delta e(x, nt)$ 의 값이 PB로 증가할 경우 과열증기의 온도가 기준온도 보다 높게 되기 때문에 이 경우 역시 제어입력을 증가시켜

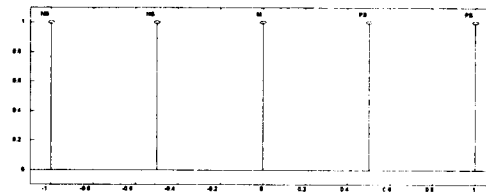


(a) membership function of e

야 한다. $e(x, t)$ 와 $\Delta e(x, nt)$ 의 값이 동시에 증가할 경우 제어입력의 양을 가장 많이 설정해야 원하는 형태의 결과를 얻을 수 있다.



(b) membership function of Δe



(c) membership function of w_d^*

그림 5. 소속함수
Fig. 5. Membership function

과열기 시스템의 증기온도 제어기의 퍼지규칙은 다음과 같다.

$$R^i: \text{If } e \text{ is } A_i \text{ and } \Delta e \text{ is } B_i \text{ then } w_d^* \text{ is } C_i$$

여기서, R^i 는 i 번째의 제어규칙이고, $\{A_i, B_i\}$ 는 퍼지 언어변수를 나타내며, $k=1, 2, \dots, 25$ 이다. 그리고 C_i 를 그림 5(c)와 같이 퍼지 싱글톤을 사용하면, 다음과 같이 결론부가 상수인 간략화된 T. Takagi와 M. Sugeno의 퍼지모델 형태로 변환된다.

$$R^i: \text{If } e \text{ is } A_i \text{ and } \Delta e \text{ is } B_i \text{ then } w_d^* \text{ is } f_i$$

여기서, f_i 는 상수이고, 제어규칙은 표 2와 같이 주어지며, 제어입력은 다음과 같다.

$$w_d(t) = \frac{\sum_{i=1}^{25} u_i f_i}{\sum_{i=1}^{25} u_i} \quad (28)$$

여기서, $u_i = \mu_{A_i}(e) \mu_{B_i}(\Delta e)$ 다.

표 2. 퍼지규칙
Table 2. Fuzzy rule

$\Delta e \backslash e$	NB	NS	M	PS	PB
NB	NB	NB	NS	M	PS
NS	NB	NS	M	PS	PS
M	NS	M	PS	PS	PS
PS	M	PS	PS	PS	PB
PB	PS	PS	PS	PB	PB

3.3 시뮬레이션 결과

3.1절의 관측기로부터 매순간 과열증기의 온도를 추정하기 위하여 과열기 금속을 전체 길이에 대하여 5등분한 후 관측기 모델을 구성하였고, 실제 시스템을 묘사하기 위한 과열기 모델은 20등분하였다.

입력증기의 흐름률은 420[kg/s] 이하로 한정하였으며, 제어입력의 정상상태 동작값은 20[kg/s]이다. 시뮬레이션에서의 샘플시간은 0.1[s]이다. 과열기 시스템은 평형류의 경우에 대해 모델링하였으며, 과열기의 길이는 32.8[m]로 근사화하였다[7,9].

기준온도와의 오차와 시간변화율은 식 (26)과 (27)로부터 구해지며, 오차는 영일 때를 기준으로 -350~1000[m·°C]의 범위에 존재하고, 시간변화율은 -200~300[m·°C]의 범위에서 존재한다. 출력변수 구성을 위한 소속함수는 그림 5(c)와 같이 -1~1의 범위에서 표준화하였고, 시뮬레이션에서 $w_d(t)$ 의 값은 실제적인 계량에 준한 값에 위치하도록 스케일링하였다.

그림 6은 외부입력인 연소가스의 입구와 출구의 온도변화를 나타낸 것이다. 그림 7은 제안된 관측기에 의한 스팀의 온도와 추정값이며, 과열기 길이에 대하여 균등하게 나눈 각 지점에서 한 부분을 나타낸 것이다. 이외의 외부입력은 입력증기온도이며, 그림 8과 같다.

화력발전소의 실제적인 계량[1,9]에 준하여 $w_d(t)$ 의 상한값은 50[kg/s]로 한정하여 제안된 방법을 적용한 결과, 제어입력의 양을 그림 9에 나타내었으며, 그림 10은 과열기 시스템의 출구온도를 나타낸다. 이 그림으로부터 목표값인 540[°C]를 유지함을 확인할 수 있다.

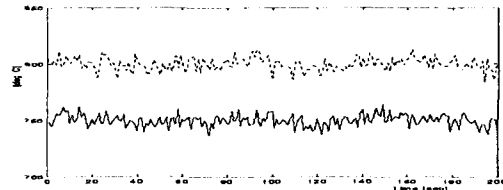


그림 6. 연소가스의 온도(입구:·····,출구:—)
Fig. 6. Inlet and outlet flue gas temperature

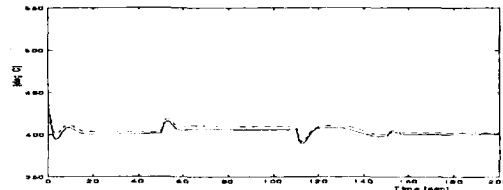


그림 7. 스팀의 온도(·····)와 추정값(—)
Fig. 7. Steam temperature and estimated value

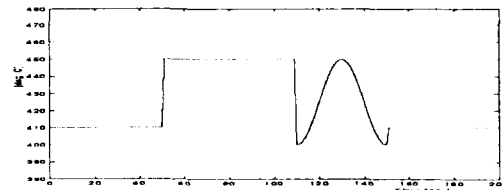


그림 8. 입력증기온도
Fig. 8. Inlet steam temperature

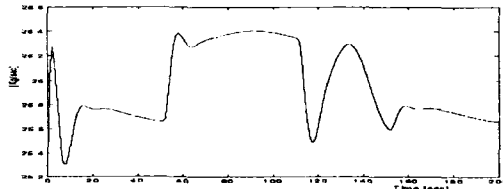


그림 9. 냉각수의 양
Fig. 9. Spray water mass rate

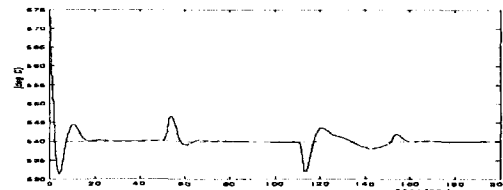


그림 10. 출구온도
Fig. 10. Outlet steam temperature

4. 결 론

본 논문에서는 쌍선형 시스템으로 표현되는 과열기의 증기온도제어를 위한 퍼지 제어기의 설계방법을 제안하였다. 제안된 방식은 쌍선형 관측기로부터 얻은 추정값과 기준값의 오차면적과 그 시간 변화율을 고려하여 입력변수를 구성하였으며, T. Takagi와 M. Sugeno의 퍼지모델을 기반으로 수행하였다. 그리고 비선형인 쌍선형 시스템의 제어기 설계에서 나타나는 많은 연산의 부담을 제안된 퍼지 제어기를 통하여 해결하였고, 과열기의 증기온도제어에 대한 시뮬레이션 결과로부터 원하는 제어성능을 얻었다. 그러나 비선형 특성을 가진 과열기 시스템에 대한 모델을 퍼지화하여 제어기를 구성하는 연구가 지속되어야 할 것이다.

References

- [1] 한국전력공사, 보일러 계수 추정에 의한 최적 보일러 제어기 개발, 한국전력공사 기술연구원, 1993.
- [2] W. A. Cebuhar and V. Costanza, "Approximation Procedures for the Optimal Control of Bilinear and Nonlinear Systems", Journal of Optimization Theory and Applications, vol. 43, no. 4, pp 615-627, 1984.
- [3] E. P. Ryan, "Optimal Feedback Control of Bilinear Systems, Journal of Optimization Theory and Applications, vol. 44, no. 2, pp. 333-362, 1984.
- [4] R. R. Mohler, Nonlinear Systems Application to Bilinear Control, Prentice-Hall, 1991.
- [5] E. P. Hofer and B. Tibken, "An Iterative Method for the Finite-Time Bilinear-Quadratic Control Problem", Journal of Optimization Theory and Applications, vol. 57, no. 3, pp. 411-427, 1988.
- [6] Z. Aganovic and Z. Gajic, "The Successive Approximation Procedure for Finite-Time Optimal Control of Bilinear Systems", IEEE Trans. Auto. Control, vol. 39, no. 9, pp. 1932-1935, 1994.
- [7] 이상혁, 김주식, "반복적 방법을 이용한 화력발전소 과열기 시스템의 온도제어", 한국조명·전기설비학회 논문지, 제13권, 제4호, pp. 47-55, 1999.
- [8] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control", IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. 15, no. 1, pp. 116-132, 1985.
- [9] S. H. Lee, J.S. Kong, and J.H. Seo, "Observer for Bilinear Systems with Unknown Inputs and Application to Superheater Temperature Control", Journal of IFAC, Control Engineering Practice, vol. 5, no. 4, pp. 493-506, 1997.

- [10] Y. Funahashi, "Stable State Estimator for Bilinear Systems", Int. J. Control, vol. 29, no. 2, pp. 181-188, 1979.
- [11] F. L. Lewis, Optimal Control, John Wiley & Sons, 1986.
- [12] V. Svoronos, G. Stephanopoulos, and R. Aris, "On Bilinear Estimation and Control", Int. J. Control, vol. 34, no. 4, pp. 651-684, 1981.

◇ 저자소개 ◇

이 돈 구 (李敦求)

1991년 충북대학교 전기공학과 졸업, 1993년 동대학원 졸업(석사), 1993년~1995년 (주)한라중공업 연구소, 1995년~현재 동대학원 박사과정.

이 상 혁 (李相赫)

1988년 충북대학교 전기공학과 졸업, 1991년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1998년 동대학원 졸업(박사), 1996년~1999년 (주)하우 기업부설연구소, 1999년~2000년 (주)지엔티씨, 2000년~현재 부산대학교 전자전기정보컴퓨터공학부 기금교수.

김 주 식 (金周植)

1992년 충북대학교 전기공학과 졸업, 1994년 동대학원 졸업(석사), 1998년 동대학원 졸업(박사), 1999년~2001년 (주)지엔티씨, 2001년~현재 충북대학교 전기전자및컴퓨터공학부 초빙전임강사.

유 정 용 (柳正雄)

1965년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1976년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1987년 동대학원 전자공학과 졸업(박사), 1979년~현재 충북대학교 전기전자및컴퓨터공학부 교수.