

관측기를 이용한 비선형 HVAC 시스템의 적응 퍼지 제어

백재호¹, 황은주¹, 김은태¹, 박민용¹
¹연세대학교 일반대학원 전기전자공학과
 E-mail : jhbaek97@yeics.yonsei.ac.kr

Adaptive Fuzzy Control Based on Observer for Nonlinear HVAC System

Jaeho Baek¹, Eun-ju Hwang¹, Euntai Kim¹, Mignon Park¹
¹Graduate School of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University

Abstract

This paper presents adaptive fuzzy control based on observer for nonlinear HVAC system whose states are not available. Fuzzy systems are employed to approximate the unknown nonlinear functions of the HVAC system and the state observer is designed for estimating the states of the HVAC system. An adaptive fuzzy controller is firstly constructed without the controller singularity problem. The obtained control system shows robustness and effectiveness compared with classical feedback controller. Simulation results are provided to illustrate the control performance.

I. 서 론

HVAC 시스템은 주거 및 산업에서 보편적으로 50% 이상 사용되는 온습도 제어 시스템이다. 이 시스템은 에너지 효율을 높이기 위해서 많은 제어 기법이 개발되었으나 복잡한 비선형적 특성을 가지고 있어 고전적 PID 제어나 직접적 디지털 제어 방법이 현장에 많이 이용되고 있다. 이 기법은 오랜 기간 사용 시 에너지 효율이 많이 떨어진다 [1].

본 논문에서는 기존에 개발된 제어방식에서 사용할 수 없는 상태값을 퍼지 시스템을 이용한 관측기를 통해 MIMO 퍼지 시스템을 설계하여 설정 온습도에 tracking 할 수 있는 적응 퍼지 제어를 제안한다. 제안된 제어기는 기존 제어기와 비교 분석하여 에너지 효율을 높일 수 있는지를 성능 평가한다.

II. 본 론

II-1. 비선형 HVAC 시스템

본 논문에서는 단일 지역 HVAC 시스템을 분석하여 에너지 보존 법칙, 밸브 운동방정식을 이용하여 다음과 같은 HVAC 시스템의 상태방정식 모델을 이용한다 [1].

$$z = f(z) + g_1(z)\phi_1 + g_2(z)\phi_2 = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 + \frac{k_1 z_2}{\tau_1} \\ a_5 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_2}{\tau_2} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix}$$

$$a_1(z) = [\alpha_1(z_3 - z_1) - \alpha_2(W_s - z_2)]u_1 + \alpha_3(Q_0 - h_{fg}M_0)$$

$$a_2(z) = \alpha_1(W_s - z_2)u_1 + \alpha_4M_0$$

$$a_3(z) = [\beta_1(z_1 - z_3) - (1 - \mu)\beta_1(T_0 - z_1)]u_1 + [-\beta_3((1 - \mu)W_0 + \mu z_2 - W_s)]u_1 - 6000\beta_2u_2$$

$$a_4(z) = -u_1/\tau_1, a_5(z) = -u_2/\tau_2$$

이 모델은 선형화 과정 중 특이성으로 인한 문제점을 dynamic extension 알고리즘을 적용하여 relative degree $r = \{3, 3\}$ 로 한다. 제안된 적응 퍼지 제어를 적용할 선형화된 시스템은 다음과 같다.

$$x = Ax + B \left(\begin{bmatrix} L_f^3 x_1 \\ L_f^3 x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^2 x_1 & L_{g_2} L_f^2 x_1 \\ L_{g_1} L_f^2 x_2 & L_{g_2} L_f^2 x_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} \right)$$

$$A = \text{diag} \left(\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right), B = \text{diag} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right)$$

$$C = \text{diag} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \right)$$

여기서 $y = [x_1 \ x_2]^T$ 는 출력이며, 설정 온습도를 y_{1m} 과 y_{2m} 이라고 하고 에러 $e = y_m - y$ 이라 한다.

II-2. 상태 관측기를 사용한 적응 퍼지 제어기 설계

Singleton fuzzifier, Product inference와 Center average defuzzifier로 이루어진 일반적인 퍼지 시스템은 다음과 같이 설계한다.

$$f(x) = \sum_{l=1}^4 y^l \left(\prod_{i=1}^4 u_{A_i^l}(x) \right) / \sum_{l=1}^4 \left(\prod_{i=1}^4 u_{A_i^l}(x) \right)$$

IF-THEN은 $R^l : \text{If } z_1 \text{ is } F_1^l \text{ and } z_2 \text{ is } F_2^l, \text{ then } y \text{ is } G^l$ 을 이용한다.

관측기를 사용한 MIMO 퍼지 시스템은 다음과 같다.

$$\hat{F}(\hat{x}|\theta_1) = \Phi(\hat{x})\theta_1, \hat{G}(\hat{x}|\theta_2) = \Phi(\hat{x})\theta_2$$

또한, 사용할 수 없는 상태값을 측정하기 위한 관측기는 다음과 같이 설계한다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + B[\hat{F}(\hat{x}|\theta_1) + \hat{G}(\hat{x}|\theta_2)\phi - u_a - u_b - u_s] + K_0(y - C^T\hat{x}) \\ \hat{y} &= C^T\hat{x} \end{aligned}$$

관측 에러를 $\tilde{e} = e - \hat{e}$ 와 $\tilde{y} = y - \hat{y}$, 에리 관측기를 $\hat{e} = y_m - \hat{x}$ 라고 나타낸다. 이 때 적응 퍼지 제어기는

$$\phi = \hat{G}(\hat{x}|\theta_2)^+ [-\hat{F}(\hat{x}|\theta_1) + y_m^{(3)} + K_c^T\tilde{e} + u_a + u_b + u_s]$$

와 같이 설계한다 [2]. 여기서,

$\hat{G}(\hat{x}|\theta_2)^+ = \hat{G}(\hat{x}|\theta_2)^T[\epsilon I + \hat{G}(\hat{x}|\theta_2)\hat{G}(\hat{x}|\theta_2)^T]^{-1}$, $\epsilon > 0$ 는 특이성을 해결할 수 있는 정규적인 역이다.

제어 규칙은

$$u_a = -\frac{1}{2}R^{-1}B^TP_2\tilde{e}, u_b = -K_0^TP_1\hat{e}, u_s = -ksgn(B^TP_2\tilde{e})$$

$k > 0$ 이다 [2].

파라미터의 적응 규칙은

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_1 &= -\gamma_1\Phi(\hat{x})^T(B^TP_2\tilde{e}), \gamma_1 > 0 \\ \dot{\theta}_2 &= -\gamma_2\Phi(\hat{x})^T(B^TP_2\tilde{e}\phi), \gamma_2 > 0 \end{aligned}$$

이다.

III. 시뮬레이션

HVAC 시스템을 위한 제어 게인과 관측 게인은

$$\begin{aligned} K_c &= \text{diag}([100 \ 1000 \ 10]^T, [10 \ 1000 \ 100]^T), \\ K_o^T &= \text{diag}([500000 \ 15 \ 7], [450000 \ 10 \ 9]) \end{aligned}$$

로 하고, 초기 변수는 $x(0)=[85 \ 0.021 \ 40 \ 4250 \ 30 \ 4250]$, $\hat{x}(0)=[85 \ 0 \ 0 \ 0.016 \ 0 \ 0]$, $\theta_1(0)=0$, $\theta_2(0)=I_{2 \times 2}$ 이다. 적응인자는 $\gamma_1 = 0.0001$ 과 $\gamma_2 = 0.0001$ 로 한다. 주어진 $Q_1 = Q_2 = \text{diag}[I_{3 \times 3}, I_{3 \times 3}]$ 에 대해서 Lyapunov Equation과 Riccati Equation에 따라 P_1 과 P_2 는 다음과 같다 [2].

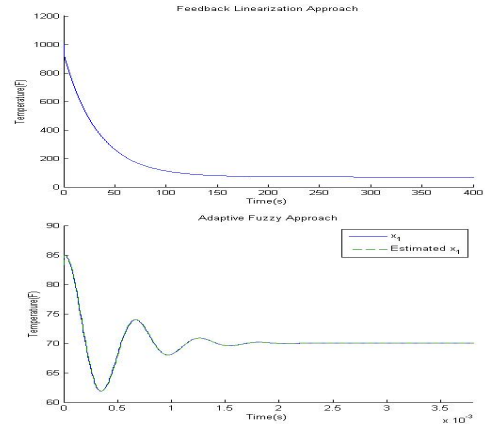
$$\begin{aligned} P_1 &= \text{diag} \left(\begin{bmatrix} 5.0056 & -0.5 & -0.1061 \\ -0.5 & 0.1061 & -0.5 \\ -0.1061 & -0.5 & 51.1111 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 50.5501 & -0.5 & -0.0004 \\ -0.5 & 0.06 & -0.5 \\ -0.06 & -0.5 & 5.011 \end{bmatrix} \right) \\ P_2 &= \text{diag} \left(\begin{bmatrix} 0 & -0.0001 & -0.0003 \\ -0.0001 & 3.0795 & 4.2421 \\ -0.0003 & 4.2421 & 13.0658 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & -0.0002 & -0.0004 \\ -0.0002 & 3.0795 & 4.2420 \\ -0.0004 & 4.2420 & 13.0657 \end{bmatrix} \right) \end{aligned}$$

이러한 조건에서 설정 온습도를 $70^\circ F$ 와 0.0088 lb/lb 로 하여 시뮬레이션 한다. 그림 1과 같이 피드백 제어보다 제안된 적응퍼지제어인 경우 응답속도가 빠르게 설정 온습도에 도달하는 것으로 나타나고 오버슈트에 대해서 강인함을 보이고 있어 에너지 절감에 효율을 높일 수 있다.

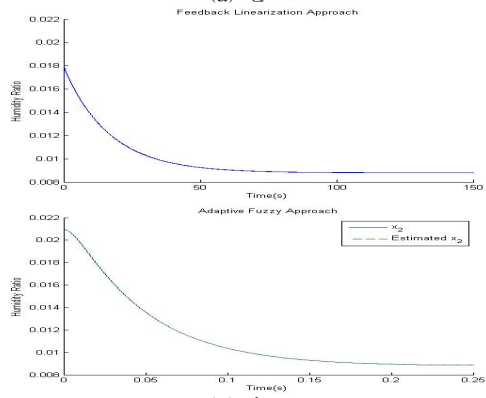
IV. 결론 및 향후 연구 방향

본 연구에서는 비선형 HVAC 시스템에서의 높은 에너지 효율을 가질 수 있는 관측기를 이용한 적응퍼지제어

를 제안하여 기존의 피드백 제어와 비교하여 성능 평가하였다. 그 결과 과소비 에너지를 절감할 수 있을 것으로 보인다. 향후 불확실한 파라미터를 가지는 비선형 HVAC 시스템에 대한 강인한 제어기 연구가 필요하다.



(a) 온도



(b) 습도

그림 1. HVAC 시스템의 응답
(왼쪽 : 피드백 제어, 오른쪽 : 제안된 적응퍼지제어)

감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단도시개발사업의 연구비지원 (06건설핵심B02)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

[1] Betzaida Argüello Serrano and Miguel Vélez Reyes, "Nonlinear Control of a Heating, Ventilating, and Air Conditioning System with Thermal Load Estimation", IEEE Trans. Control Systems Technology, Vol. 7, No. 1, pp. 56-63, Jan. 1999.
 [2] Tong Shaocheng, Chen Bin and Wang Yongfu, "Fuzzy adaptive output feedback control for MIMO nonlinear systems", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 156, pp. 285-299, 2005.
 [3] Ming-Li Chiang and Li-Chen Fu, "Adaptive and Robust Control for Nonlinear HVAC System", the 2006 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2006.