

고분자 전해질 연료전지 시스템의 퍼지 출력 궤환 제어기 설계: 공통 입력을 갖는 이산시간 비선형 상호결합 시스템 접근

Fuzzy Output-Feedback Controller Design for PEMFC: Discrete-time Nonlinear Interconnected Systems with Common Inputs Approach

구근범, 박진배*, 주영훈
(Geun Bum Koo¹, Jin Bae Park¹, and Young Hoon Joo²)

¹Yonsei University

²Kunsan National University

Abstract: In this paper, the fuzzy output-feedback controller is addressed for a discrete-time nonlinear interconnected systems with common input. The nonlinear interconnected system is represented by a T-S (Takagi-Sugeno) fuzzy model. Based on T-S fuzzy interconnected system, the fuzzy output-feedback controller is designed with common input. The stability condition of the closed-loop system is represented to the LMI (Linear Matrix Inequality) form. PEMFC model is given to show the verification of the controller discussed throughout the paper.

Keywords: nonlinear interconnected system, fuzzy output-feedback controller, common input, T-S (Takagi-Sugeno) fuzzy model, LMI (Linear Matrix Inequality)

I. 서론

최근 들어 전력 시스템이나 경제 모델, 통신 네트워크 등에서 시스템의 복잡성이 증가하고 있다. 특히나 각각의 시스템들이 다른 시스템에 영향을 형태가 많이 나타나고 있다. 이러한 서로의 시스템이 서로 영향을 주는 시스템을 상호결합 시스템이라 한다. 상호결합 시스템은 높은 차원을 가지고, 제어기의 구조적 제약을 가지게 된다. 이러한 상호결합 시스템의 제어를 위해서는 기존의 집중(centralized) 제어가 아닌 분산(decentralized) 제어가 필수적이다.

최근 각광을 받고 있는 고분자 전해질 연료전지(PEMFC) 역시 캐소드와 애노드 모델로 구성된 상호결합 시스템의 형태를 갖고 있다. 이러한 PEMFC의 제어를 위해서는 캐소드와 애노드에서 발생하는 가스 유속 제어가 필수적이다. 하지만 PEMFC는 복잡한 비선형성을 포함하고 있을 뿐만 아니라 공통 입력을 가진다는 문제도 포함하고 있다. 즉, PEMFC의 제어를 위해서는 공통 입력 문제를 해결할 수 있는 지능형 분산 제어 연구가 필요하다.

이러한 상호결합 시스템의 분산 제어에 관한 연구는 많이 이뤄지고 있다[1-10,16,17]. Tseng [1]은 비선형 상호결합 시스템에 대하여 퍼지를 이용한 분산 제어를 연구하였

다. Wang [7]은 시간 지연을 가지는 비선형 상호결합 시스템에 대한 분산 제어기법을 연구하였다. 그리고 Hsiao [9]은 시간 지연을 갖는 비선형 상호결합 시스템에 대한 T-S (Takagi-Sugeno) 퍼지 제어기를 개발하였다. Park [10]은 상호결합 시스템에 대한 동적 출력 궤환 제어기를 설계하였다. 하지만 현재까지 진행된 연구들 중에서는 공통 입력을 가지는 이산시간 비선형 상호결합 시스템에 대한 퍼지 출력 궤환 제어기 설계에 관한 연구는 진행된 바가 없다.

이에 본 논문에서는 공통 입력을 갖는 이산시간 비선형 상호결합 시스템의 퍼지 출력 궤환 제어기를 제안한다. 이를 위해 먼저 비선형 상호결합 시스템에 대한 T-S 퍼지 모델을 제시한다. 그리고 퍼지 시스템의 제어를 위해 퍼지 출력 궤환 제어기를 설계한다. 설계된 제어기를 포함한 폐루프 시스템의 안정도 조건을 선형 행렬 부등식 (LMI)으로 나타내고, 이를 통해 제어기의 이득값을 구한다. 최종적으로 모의실험을 통해 설계된 제어기의 성능을 판단한다.

II. 이산시간 비선형 상호결합 시스템의 T-S 퍼지 모델링

다음과 같은 q 개의 하위 시스템을 갖는 이산 시간 비선형 상호결합 시스템을 고려한다.

$$x(t+1) = f_k(x_k(t)) + g_k(u_k(t)) + \sum_{\substack{l=1, \\ l \neq k}}^q f_{kl}(x_l(t)) \quad (1)$$
$$y_k(t) = C^k x_k(t)$$

여기서 $x_k(t) \in R^{n_k}$ 는 상태변수, $u_k(t) \in R^{m_k}$ 는 입력변수, $y_k(t) \in R^{l_k}$ 는 출력변수를 나타낸다. 또한 출력 함수는 선형이라 가정한다. 식 (1)을 T-S 퍼지 시스템으로 모델링하기

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 4. 18., 수정: 2011. 7. 6., 채택확정: 2011. 7. 20.

구근범, 박진배: 연세대학교 전기전자공학부

(milbam@yonsei.ac.kr/jbpark@yonsei.ac.kr)

주영훈: 군산대학교 제어로봇공학과(yhjoo@kunsan.ac.kr)

※ 이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구임(NRF-2010-0024352).

※ 본 논문은 2011 제26회 ICROS 학술대회에서 초안이 발표되었음.

위한 번째 퍼지 규칙은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned}
 & \textit{kth Plant Rule i:} \\
 & \textit{IF } z_1^k \textit{ is } \Gamma_{i1}^k, \dots, \textit{ and } z_p^k \textit{ is } \Gamma_{ip}^k, \\
 & \textit{THEN } \begin{cases} x_k(t+1) = A_i^k x_k(t) + B_i^k u_k(t) + \sum_{\substack{l=1, \\ l \neq k}}^q A_i^{kl} x_l(t), \\ y_k(t) = C^k x_k(t) \end{cases}
 \end{aligned}$$

여기서 $\Gamma_{iq}^k (q \in I_p, i \in I_r)$ 는 퍼지 집합, r 은 퍼지 규칙수를 나타낸다. 또한 A_i^k, B_i^k, A_i^{kl} 는 적절한 크기를 가지는 선형 행렬이다.

위의 퍼지 규칙은 디퍼지화를 통해 다음과 같은 T-S 퍼지 시스템으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 x_k(t+1) &= \sum_{i=1}^r h_i^k(z_k(t)) \\
 & \times \left(A_i^k x_k(t) + B_i^k u_k(t) + \sum_{\substack{l=1, \\ l \neq k}}^q A_i^{kl} x_l(t) \right) \quad (2) \\
 y_k(t) &= C^k x_k(t)
 \end{aligned}$$

여기서

$$h_i^k(z_k(t)) = \frac{\prod_{q=1}^p \Gamma_{iq}^k(z_q^k(t))}{\sum_{i=1}^r \left(\prod_{q=1}^p \Gamma_{iq}^k(z_q^k(t)) \right)}$$

이고, $\Gamma_q^i(z_q(k))$ 는 소속함수의 소속정도를 나타낸다.

제시된 퍼지 시스템의 제어를 위한 공통 입력을 가지는 출력 궤환 제어기는 다음과 같은 형태를 나타내게 된다.

$$u_k(t) = u(t) = \sum_{k=1}^r \sum_{i=1}^r h_i^k(z_k(t)) K_i^k y_k(t) \quad (3)$$

위의 제어기 (3)에서 볼 수 있듯이 각 하위 시스템에 포함되는 입력 $u_k(t)$ 은 하나의 입력 $u(t)$ 로 통일된다. 퍼지 출력 궤환 제어기 (3)를 상호결합 시스템 (2)에 대입하면 다음과 같은 폐루프 시스템을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 x_k(t+1) &= \sum_{i=1}^r h_i^k(z_k(t)) (A_i^k x_k(t) \\
 & + B_i^k \sum_{k=1}^r \sum_{j=1}^r h_j^k(z_k(t)) K_j^k y_k(t) + \sum_{\substack{l=1, \\ l \neq k}}^q A_i^{kl} x_l(t)) \quad (4)
 \end{aligned}$$

본 논문의 목적은 폐루프 시스템 (4)을 안정화 시키는 충분조건을 제시하고 이를 통해 이득 행렬 K_i^k 를 구하는 것이다.

III. 폐루프 시스템의 안정도 조건

이 장에서는 공통 입력을 갖는 이산 시간 비선형 상호결합 시스템의 퍼지 출력 궤환 제어기의 이득값을 구하기 위한 선형 행렬 부등식(LMI)을 유도한다. 이를 위해서는 다음의 가정과 보조 정리들이 필요하다.

가정 1: 입력행렬에 해당하는 C^k 는 항상 선행계수를 만족한다.

보조 정리 1: 적합한 차원의 어떤 양한정 행렬 P^k 와 양

수 α 가 주어졌을 때 다음의 방정식은 항상 성립한다.

$$\sum_{k=1}^q \sum_{\substack{l=1, \\ l \neq k}}^q \alpha \chi_l(t)^T P^l \chi_l(t) = \sum_{k=1}^q \sum_{\substack{l=1, \\ l \neq k}}^q \alpha \chi_k(t)^T P^k \chi_k(t)$$

위의 보조 정리를 이용하여 폐루프 상호결합 시스템의 안정도 조건을 구하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

보조 정리 2 [11]: 적합한 차원의 어떤 상수 대칭 행렬 N, O, L 이 주어졌을 때 다음의 두 개의 부등식은 서로 필요충분조건이 된다:

$$\begin{aligned}
 & O > 0, \quad N + L^T O L < 0 \\
 & \begin{bmatrix} N & L^T \\ L & -O^{-1} \end{bmatrix} < 0 \text{ or } \begin{bmatrix} -O^{-1} & L \\ L^T & N \end{bmatrix} < 0.
 \end{aligned}$$

보조 정리 3 [12]: 적합한 차원의 어떤 상수 행렬 X_{ij}, Y_{ij} 가 주어지고, 양한정 행렬 S 가 주어졌을 때 다음의 부등식이 성립하게 된다:

$$\begin{aligned}
 & 2 \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r \sum_{l=1}^r h_i h_j h_k h_l X_{ij}^T S Y_{kl} \\
 & \leq \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j (X_{ij}^T S X_{ij} + Y_{ij}^T S Y_{ij})
 \end{aligned}$$

여기서 h_i 는 $h_i \geq 0$ 와 $\sum_{i=1}^r h_i = 1$ 을 만족한다.

위의 가정과 보조 정리들을 이용하여 폐루프 시스템 (4)의 안정도 조건을 구하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

정리 1: 만약 다음의 선형 행렬 부등식들과 특정한 조건을 만족하는 양한정 행렬 Q^k 와 임의의 행렬 M_i^k 가 존재하게 된다면, 출력 궤환 퍼지 제어기를 가지는 이산시간 비선형 상호결합 시스템 (4)은 안정하게 된다.

$$\begin{bmatrix} -(4-\alpha)Q^k & * & * \\ 0 & -\alpha Q^l & * \\ \Phi_{ii}^k & \Phi_{ii}^{kl} & -\frac{1}{4(q-1)}Q^k \end{bmatrix} < 0, \quad (5)$$

(1 \leq i \leq r)

$$\begin{bmatrix} -(4-\alpha)Q^k & * & * \\ 0 & -\alpha Q^l & * \\ \Phi_{ij}^k + \Phi_{ji}^k & \Phi_{ij}^{kl} + \Phi_{ji}^{kl} & -\frac{1}{(q-1)}Q^k \end{bmatrix} < 0, \quad (6)$$

(1 \leq i < j \leq r)

그리고

$$C^k Q^k = N^k C^k \quad (7)$$

여기서

$$\begin{aligned}
 \Phi_{ij}^k &= \frac{1}{q-1} (A_i^k Q^k + B_i^k M_j^k C^k), \\
 \Phi_{ij}^{kl} &= A_i^{kl} Q^k + B_i^k M_j^l C^l
 \end{aligned}$$

이고, *는 행렬에서의 전칭요소를 의미한다. 구해진 값을 통해 제어기 이득값은 다음을 통해 구한다.

$$K_i^k = M_i^k \{ C^k Q^k (C^k (C^k)^T)^{-1} \}^{-1}$$

증명: 공간 제약으로 생략한다. ■

참조 1: 비선형 상호결합 시스템에서 출력행렬 C^k 의 경우 역행렬을 가지고 있을 필요는 없다. 하지만, 선형계수는 항상 만족해야 한다. 즉, 선형계수라는 가정을 통해 $C^k(C^k)^T$ 의 역행렬은 항상 존재해야 한다.

참조 2: 정리 1에서 α 값은 임의의 양수값이다. 하지만 선형 행렬 부등식이 만족하기 위해서는 $0 \leq \alpha \leq 4$ 의 조건을 같이 만족해야 한다.

IV. PEMFC 제어 모의실험

PEMFC는 캐소드 모델과 애노드 모델로 구성되어 있고, 각각의 동적 방정식은 다음과 같다[15].

cathode flow model:

$$\begin{aligned} \frac{dp_{air}}{dt} &= -\frac{R_{air}T_{ca}}{V_{ca}}M_{O_2}\frac{n}{4F}I_{st} \\ &\quad -\frac{R_{air}T_{ca}}{V_{ca}}\left(\frac{k_{ca,in}}{1+\omega_{ca,in}}+\frac{k_{ca,out}}{1+\omega_{ca,out}}\right)(p_{air}+p_{v,ca}) \\ \frac{dp_{v,ca}}{dt} &= \frac{R_{v,ca}T_{ca}}{V_{ca}}\frac{M_v n(1+2A_{fc}n_d)}{2F}I_{st} \\ &\quad -\frac{R_{v,ca}T_{ca}}{V_{ca}}\frac{M_v A_{fc} n D_\omega}{t_m}(f(p_{v,ca})p_{v,ca}-f(p_{v,an})p_{v,an}) \\ &\quad -\frac{R_{v,ca}T_{ca}}{V_{ca}}\left(\frac{\omega_{ca,in}k_{ca,in}}{1+\omega_{ca,in}}+\frac{\omega_{ca,out}k_{ca,out}}{1+\omega_{ca,out}}\right)(p_{air}+p_{v,ca}) \end{aligned}$$

anode flow model:

$$\begin{aligned} \frac{dp_{H_2}}{dt} &= -\left(\frac{k_1}{1+\omega_{an,in}}+k_{H_2,out}\right)\frac{R_H T_{an}}{V_{an}}p_{H_2} \\ &\quad -\left(\frac{k_1}{1+\omega_{an,in}}+k_{H_2,out}\right)\frac{R_H T_{an}}{V_{an}}p_{v,an} \\ &\quad +k_{H_2,out}\frac{R_H T_{an}}{V_{an}}(p_{air}+p_{v,ca}) \\ &\quad -\frac{R_H T_{an}}{V_{an}}M_{H_2}\frac{n}{2F}I_{st} \\ \frac{dp_{v,an}}{dt} &= -\left(\frac{\omega_{an,in}k_1}{1+\omega_{an,in}}+k_{v,an,out}\right)\frac{R_{v,an}T_{an}}{V_{an}}p_{v,an} \\ &\quad -\left(\frac{\omega_{an,in}k_1}{1+\omega_{an,in}}+k_{v,an,out}\right)\frac{R_{v,an}T_{an}}{V_{an}}p_{H_2} \\ &\quad +k_{v,an,out}\frac{R_{v,an}T_{an}}{V_{an}}(p_{air}+p_{v,ca}) \\ &\quad +\frac{R_{v,an}T_{an}}{V_{an}}\frac{M_v A_{fc} n D_\omega}{t_m}(f(p_{v,ca})p_{v,ca}-f(p_{v,an})p_{v,an}) \\ &\quad -\frac{R_{v,an}T_{an}}{V_{an}}\frac{M_v A_{fc} n n_d}{F}I_{st} \end{aligned}$$

여기서 p_{air} 는 공기의 압력, $p_{v,ca}$ 는 캐소드의 증기 압력, p_{H_2} 는 수소 압력, $p_{v,an}$ 는 애노드의 증기 압력, I_{st} 는 stack current를 의미한다. 그리고 비선형 함수인 $f(p_{v,an})$ 와 $f(p_{v,ca})$ 는 다음과 같다.

$$f(p_{v,i}) = \frac{\rho_{m,dry}}{M_{m,dry}} \frac{1}{p_{sat,i}} \left(17.81 - 39.85 \frac{p_{v,i}}{p_{sat,i}} + 36 \left(\frac{p_{v,i}}{p_{sat,i}} \right)^2 \right)$$

여기서 $p_{v,i}/p_{sat,i}$ 는 0에서 1사이의 값을 가진다. 위의 비선형 함수를 T-S 퍼지 시스템으로 모델링하기 위해서 다음 두 개의 방정식을 고려한다.

$$\begin{aligned} f(p_{v,i}) &= \Gamma_i^1(p_{v,i})\alpha_i p_{v,i} + \Gamma_i^2(p_{v,i})\beta_i p_{v,i} \\ 1 &= \Gamma_i^1(p_{v,i}) + \Gamma_i^2(p_{v,i}) \end{aligned}$$

여기서 α_i 는 $(39.85^2 - 4 \cdot 17.81 \cdot 36)/(4 \cdot 36)$ 이고 β_i 는 $\max(f(0), f(1))$ 이다. 위의 연립 방정식을 풀면 다음의 값을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \Gamma_i^1(p_{v,i}) &= \frac{\alpha_i - (36(p_{v,i})^2 - 39.85p_{v,i} + 17.81)}{\alpha_i - \beta_i} \\ \Gamma_i^2(p_{v,i}) &= 1 - \Gamma_i^1(p_{v,i}) \end{aligned}$$

위의 두 방정식을 이용하여 다음의 T-S 퍼지 규칙을 정할 수 있다.

Rule i of subsystem k

R_{ij}^k : IF $p_{v,ca}$ is $\Gamma_{v,ca}^i$ and $p_{v,an}$ is $\Gamma_{v,an}^i$

$$THEN \dot{x}_k(t) = A_i^k x_k(t) + B_i^k u(t) + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^q A_i^{kl} x_l(t)$$

여기서

$$\begin{aligned} A_1^1 &= A_3^1 = \begin{bmatrix} -a_1 a_2 & -a_1 a_2 \\ -a_1 a_6 & -a_1 a_6 - a_1 a_5 a_{11} \alpha_{ca} \end{bmatrix}, \\ A_2^1 &= A_4^2 = \begin{bmatrix} -a_1 a_2 & -a_1 a_2 \\ -a_1 a_6 & -a_1 a_6 - a_1 a_5 a_{11} \beta_{ca} \end{bmatrix}, \\ A_1^{12} &= A_3^{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & r a_1 a_5 a_{11} \alpha_{an} \end{bmatrix}, \\ A_2^{12} &= A_4^{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & r a_1 a_5 a_{11} \beta_{an} \end{bmatrix}, \\ A_1^2 &= A_3^2 = \begin{bmatrix} -a_8 a_7 & -a_8 a_7 \\ -a_{10} a_7 & -a_{10} a_7 - r a_7 a_5 a_{11} \alpha_{an} \end{bmatrix}, \\ A_2^2 &= A_4^2 = \begin{bmatrix} -a_8 a_7 & -a_8 a_7 \\ -a_{10} a_7 & -a_{10} a_7 - r a_7 a_5 a_{11} \beta_{an} \end{bmatrix}, \\ A_1^{21} &= A_3^{21} = \begin{bmatrix} k_{H_2,out} a_7 & k_{H_2,out} a_7 \\ k_{H_2,out} a_7 & k_{H_2,out} a_7 + r a_7 a_5 a_{11} \alpha_{ca} \end{bmatrix}, \\ A_2^{21} &= A_3^{21} = \begin{bmatrix} k_{H_2,out} a_7 & k_{H_2,out} a_7 \\ k_{H_2,out} a_7 & k_{H_2,out} a_7 + r a_7 a_5 a_{11} \beta_{ca} \end{bmatrix}, \\ B_i^1 &= \begin{bmatrix} -a_1 a_3 \\ a_1 a_4 \end{bmatrix}, \quad B_i^2 = \begin{bmatrix} -a_7 a_9 \\ -a_7 a_{12} \end{bmatrix}, \\ a_1 &= \frac{R_{air} T_{ca}}{V_{ca}} = \frac{R_{v,ca} T_{ca}}{V_{ca}}, \quad a_2 = \frac{k_{ca,in}}{1+\omega_{ca,in}} + \frac{k_{ca,out}}{1+\omega_{ca,out}}, \\ a_3 &= M_{O_2} \frac{n}{4F}, \quad a_4 = \frac{M_v n(1+2A_{fc}n_d)}{2F}, \\ a_5 &= \frac{M_v A_{fc} n D_\omega}{t_m}, \quad a_6 = \frac{\omega_{ca,in} k_{ca,in}}{1+\omega_{ca,in}} + \frac{\omega_{ca,out} k_{ca,out}}{1+\omega_{ca,out}}, \\ a_7 &= \frac{R_H T_{an}}{V_{an}} = \frac{R_{v,an} T_{an}}{V_{an}}, \quad a_8 = \frac{k_1}{1+\omega_{an,in}} + k_{H_2,out}, \\ a_9 &= M_{H_2} \frac{n}{2F}, \quad a_{10} = \frac{\omega_{an,in} k_1}{1+\omega_{an,in}} + k_{v,an,out}, \end{aligned}$$

$$a_{11} = \frac{\rho_{m,dry}}{M_{m,dry}} \frac{1}{p_{sat,i}}, \quad a_{12} = \frac{M_w A_f c n n_d}{F}$$

이고, $r = 0.01$, $h_{H_2,out} = 0.2 \times 10^{-7}$ 이다. $i \in I_1$ 는 퍼지 규칙 수를 나타내고, $k \in I_2$ 는 하위 시스템의 수를 나타낸다. 고분자 연료전지 시스템의 경우는 cathode와 anode로 두 개의 하위 시스템으로 구성되어 있다. 각 시스템 출력 행렬은 $C^1 = C^2 = [1 \ 0]$ 으로 선형이라 가정한다. 각 파라미터의 값은 표 1에 나타나 있다.

위의 연속시간 PEMFC의 퍼지 모델은 다음의 세 개의 식을 이용해서 이산화한다.

$$\begin{aligned} G_i^k &= \exp(A_i^k T) \\ H_i^k &= (G_i^k - I)(A_i^k)^{-1} B_i^k \\ G_i^{kl} &= (G_i^k - I)(A_i^k)^{-1} A_i^{kl} \end{aligned}$$

샘플링 시간 $T = 0.02$ 라고 가정하고 위의 식을 이용해서 PEMFC의 이산화 퍼지 모델을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_k(t+1) &= \sum_{i=1}^4 h_i^k(z_k(t)) \\ &\times \left(G_i^k x_k(t) + H_i^k u_k(t) + \sum_{\substack{l=1, \\ l \neq k}}^2 G_i^{kl} x_l(t) \right) \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} G_1^1 &= G_3^1 = \begin{bmatrix} 0.985 & -0.0043 \\ -0.0043 & 0.0336 \end{bmatrix}, \\ G_2^1 &= G_4^1 = \begin{bmatrix} 0.985 & -0.0017 \\ -0.0017 & 0.0001 \end{bmatrix}, \\ G_1^{12} &= G_3^{12} = \begin{bmatrix} 0 & -0.0001 \\ 0 & 0.0096 \end{bmatrix}, \quad G_2^{12} = G_4^{12} = \begin{bmatrix} 0 & -0.0001 \\ 0 & 0.01 \end{bmatrix}, \\ G_1^2 &= G_3^2 = \begin{bmatrix} 0.9766 & -0.0034 \\ -0.0034 & 0.0011 \end{bmatrix}, \\ G_2^2 &= G_4^2 = \begin{bmatrix} 0.9766 & -0.0013 \\ -0.0013 & 0 \end{bmatrix}, \\ G_1^{21} &= G_3^{21} = \begin{bmatrix} 0.0002 & 0 \\ 0 & 0.01 \end{bmatrix}, \quad G_2^{21} = G_4^{21} = \begin{bmatrix} 0.0002 & 0 \\ 0 & 0.01 \end{bmatrix}, \\ H_1^1 &= H_3^1 = \begin{bmatrix} -0.6562 \\ 42.248 \end{bmatrix}, \quad H_2^1 = H_4^1 = \begin{bmatrix} -0.4076 \\ 16.69 \end{bmatrix}, \\ H_1^2 &= H_3^2 = \begin{bmatrix} 0.8287 \\ -43.6471 \end{bmatrix}, \quad H_2^2 = H_4^2 = \begin{bmatrix} 0.3232 \\ -16.6753 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

이산화된 모델을 정리 1에서 구한 선형 행렬 부등식을 이용하여 고분자 전해질 연료전지 시스템 분산 퍼지 제어

표 1. PEMFC의 파라미터들의 값.

Table 1. Parameters of PEMFC.

parameter	value	parameter	value
a_1	2.935×10^5	a_2	9.076×10^{-7}
a_3	3.159×10^{-5}	a_4	2.135×10^{-6}
a_5	4.669×10^{-1}	a_6	2.589×10^{-6}
a_7	5.870×10^5	a_8	2.02×10^{-6}
a_9	3.949×10^{-5}	a_{10}	2.02×10^{-6}
a_{11}	1.818×10^{-4}	a_{12}	2.524×10^{-2}

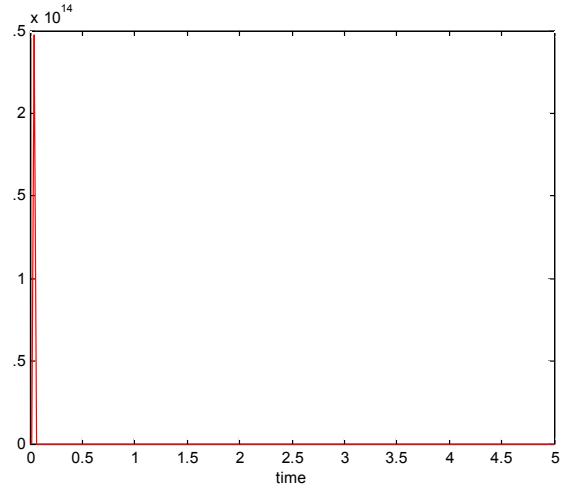


그림 1. 캐소드 모델의 공기 압력 값.

Fig. 1. Air pressure value of cathode flow model.

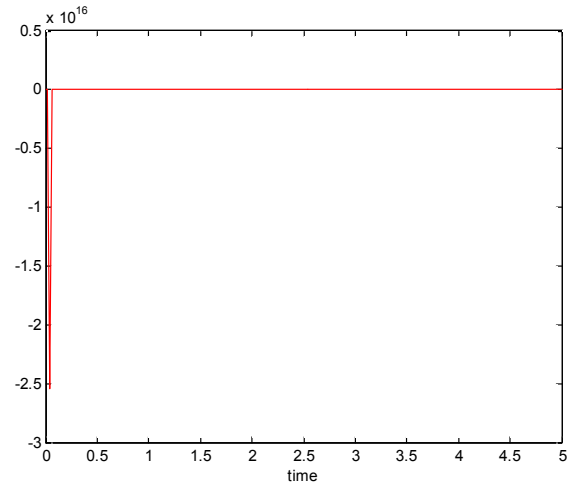


그림 2. 캐소드 모델의 증기 압력 값.

Fig. 2. Vapor pressure value of cathode flow model.

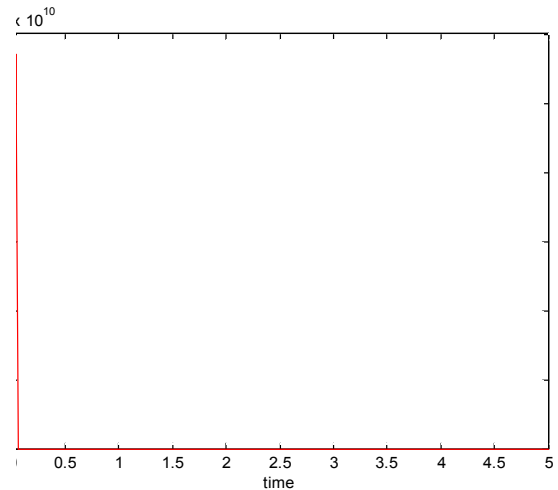


그림 3. 애노드 모델의 수소 압력 값.

Fig. 3. Hydrogen pressure value of anode flow model.

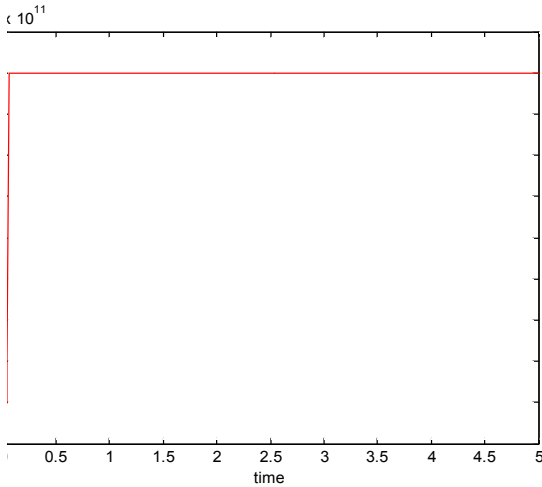


그림 4. 애노드 모델의 증기 압력 값.

Fig. 4. Vapor pressure value of anode flow model.

기를 설계한다. LMI를 통해 제어기의 이득값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_1^1 = 0.22374, K_2^1 = 0.34032, \\ K_1^2 = -0.12571, K_2^2 = -0.19307$$

시스템의 초기값은 $x_1(0) = [1 \ 3.5]^T$, $x_2(0) = [1 \ 2.5]^T$ 로 설정한다. 그림 1, 2, 3, 4는 모의실험의 결과로 시스템의 각각의 상태변수를 나타내는 것으로 시스템이 안정화되었다는 것을 알 수 있다. 이를 통해, 우리는 공통 입력을 갖는 비선형 상호결합 시스템의 분산 퍼지 제어기를 설계하였으며, 제어기를 통하여 PEMFC가 안정화되었다는 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 공통 입력을 갖는 이산시간 비선형 상호결합 시스템의 퍼지 출력 제한 제어기를 소개하였다. 제어기 설계 문제는 제약 조건이 있는 선형 행렬 부등식의 해를 통하여 퍼지 출력 제한 제어기의 이득값을 구하였고, 이득값에 따라 비선형 상호결합 시스템이 안정화됨을 증명하였다. 그리고 PEMFC 모델이 비선형 상호결합 시스템의 형태임을 보였고, 이산화를 통해 모의실험을 실행하였다. 그리고 그 결과를 통해 제어기의 우수성을 증명하였다.

참고문헌

- [1] C. S. Tseng, " H_∞ decentralized fuzzy model reference tracking control design for nonlinear interconnected systems," *IEEE Transactions on fuzzy Systems*, vol. 9, no. 6, pp. 795-809, 2001.
- [2] S. S. Stankovi, "Decentralized dynamic output feedback for robust stabilization of a class of nonlinear interconnected systems," *Automatica*, vol. 43, pp. 861-867, 2007.
- [3] D. D. Šiljak, "Design of robust static output feedback for large-scale systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 49, pp. 2040-2044, 2004.
- [4] C. W. Chen, "Stability analysis of T-S fuzzy models for nonlinear multiple time-delay interconnected systems," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 66, pp. 523-537, 2004.
- [5] X. G. Yan, "Decentralised robust sliding mode for a class of nonlinear interconnected systems by static output feedback," *Automatica*, vol. 40, pp. 613-620, 2004.
- [6] X. G. Yan, "Decentralized control of nonlinear large-scale systems using dynamic output feedback," *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 104, no. 2, pp. 459-475, 2000.
- [7] R. J. Wang, "Nonlinear decentralized state feedback controller for uncertain fuzzy time-delay interconnected system," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 151, pp. 191-204, 2005.
- [8] M. Benyakhlef, "Decentralised nonlinear adaptive fuzzy control for a class of large-scale interconnected systems," *International Journal of Computational Cognition*, vol. 4, no. 2, pp. 14-19, 2006.
- [9] F. H. Hsiao, C. W. Chen, Y. W. Liang, S. D. Xu, and W. L. Chiang, "T-S fuzzy controllers for nonlinear interconnected systems with multiple time delays," *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 52, no. 9, pp. 1883-1893, 2005.
- [10] J. H. Park, H. Y. Jung, J. I. Park, and S. G. Lee, "Decentralized dynamic output feedback controller design for guaranteed cost stabilization of large-scale discrete-delay systems," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 156, pp. 307-320, 2004.
- [11] L. Xie, "Output feedback control of systems with parameter uncertainties," *International Journal Control*, vol. 63, no. 4, pp. 741-750, 1996.
- [12] X. P. Guan and C. L. Chen, "Delay-dependent guaranteed cost control for T-S fuzzy systems with time delay," *IEEE Tran. on Fuzzy Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 236-249, 2004.
- [13] L. Xie, "Output feedback control of systems with parameter uncertainties," *International Journal Control*, vol. 63, no. 4, pp. 741-750, 1996.
- [14] G. B. Koo, Y. H. Joo, and J. B. Park, "Fuzzy output-feedback controller for discrete-time nonlinear interconnected systems with common inputs," *Proc. of 2011 26th ICROS Annual Conference (in Korean), Gwangju, Korea*, pp. 371-374, 2011.
- [15] J. T. Pukrushpan, H. Peng, and A. G. Stefanopoulou, "Control-oriented modeling and analysis for automotive fuel cell systems," *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 126, pp. 14-25, 2004.

- [16] S. J. Yoo and J. B. Park, "Decentralized adaptive control for nonlinear systems with time-delay interconnections: intelligent approach," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 4, pp. 413-419, 2009.

- [17] S. J. Park and H. L. Choi, "Time-coobservability in the decentralized supervisory control of timed discrete event systems," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 4, pp. 396-399, 2009.



구근범

2007년 연세대학교 전기전자공학과 졸업. 2007년~현재 동 대학교 전기전자공학과 석박사통합과정. 관심분야는 퍼지 시스템, 비선형 제어, 디지털 제어.



박진배

1977년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1985년~1990년 Kansas State University 전기 및 컴퓨터 공학과 박사. 1990년~1991년 Kansas State University 전기 및 컴퓨터 공학과 조교수. 현재 연세대학교 전기전자공학과 정교수.



주영훈

1997년, 1984년, 1995년 연세대학교 전기공학과 졸업(공학사, 공학석사, 공학박사). 1986년~1995년 삼성전자 (주) 생산기술센터 팀장. 1995년~현재 군산대학교 제어로봇공학과 정교수. 1998년~1999년 미국 휴스턴대학 박사후박사. 2009년 한국지능시스템학회 회장.