

대규모 T-S 퍼지 시스템의 \mathcal{H}_∞ 고장검출을 위한 관측기 설계

Observer Design for \mathcal{H}_∞ Fault Detection of Large Scale T-S Fuzzy Systems

지성철* · 이호재* · 주영훈** · 김도완***

Sung Chul Jee*, Ho Jae Lee*, Young Hoon Joo** and Do Wan Kim***

* 인하대학교 전자공학부

** 군산대학교 제어로봇시스템공학과

*** 연세대학교 산업기술연구소

요 약

본 논문은 대규모 연속시간 T-S (Takagi-Sugeno) 퍼지 시스템의 고장검출을 위한 관측기 설계 문제를 논의한다. 관측기의 출력신호로부터 고장 여부를 판단하기 위해서 관측기는 고장신호에 가능한 민감해야하며 이를 위해 \mathcal{H}_∞ 성능지수를 도입한다. 설계 조건은 선형행렬부등식으로 표현되며 수치적 예제로부터 그 효용성을 확인한다.

키워드 : 고장검출, 대규모 퍼지 시스템, 관측기, \mathcal{H}_∞ 성능지수

Abstract

In this paper, we discuss a decentralized observer design problem for the fault detection in the large-scale continuous-time T-S (Takagi-Sugeno) fuzzy system. Since the fault detection residual is desired to be as sensitive as possible, on the fault, we use \mathcal{H}_∞ index performance criterion. Sufficient conditions for the existence of such an observer is presented in terms of linear matrix inequalities. Simulation results show the effectiveness of the proposed method.

Key Words : fault detection, large scale fuzzy system, observer, \mathcal{H}_∞ performance index.

1. 서 론

현대의 제어시스템은 인간이 접근하기 힘든 다양한 환경에서 주어진 제어임무를 수행하고 있으며, 이는 시스템 구조를 복잡하게 한다. 따라서 사용자가 시스템의 모든 구조를 파악하고 동작을 감시하는 작업은 매우 어려우며 큰 비용이 발생한다. 더욱이 대규모 시스템에 오동작이 발생할 경우, 정확한 원인 분석 및 문제 해결에는 많은 시간이 소요된다. 시스템 오동작의 주요 원인은 고장이다. 이로부터 발생할 피해의 확산을 방지하기 위해 고장의 진단과 분석이 가능해야 하며 고장발생 즉시 발견하고 조기에 문제를 해결하여 시간과 비용을 절약함은 물론 시스템에 끼칠 수 있는 악영향을 최소화해야 한다.

사회기간시설인 전력, 원자로, 항공 우주, 유비쿼터스 센서 네트워크(ubiquitous sensor network) 시스템들은 대규모 시스템으로 모델링 된다 [1]. 대규모 시스템은 하부 시스

템의 상호 연결 관계로 표현되는 복잡한 구조이다 [1-5]. 따라서 고장이 발생할 가능성이 높고 고장 발생 시 파악하기가 어렵다. 대규모 시스템의 증가는 고장검출 시스템의 필요성을 대두시켰으며 시스템의 고장검출은 현대 공학 시스템에서 중요한 문제로 다루어지고 있다.

기존 연구결과들은 선형 시스템에 대한 고장검출에 집중하였으나, 최근에는 비선형 시스템의 고장검출에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [6-11]. 대다수의 대규모 시스템은 본질적으로 비선형이므로 실제 환경에서 고장검출을 위한 시스템의 비선형성은 반드시 고려되어야 한다.

본 논문에서는 비선형 시스템을 표현하기 위해 T-S (Takagi-Sugeno) 퍼지 모델을 도입한다. 비선형 시스템을 효과적으로 표현할 수 있는 방법으로 잘 알려져있는 T-S 퍼지 모델은 시스템의 국부적 선형 입출력 관계로 표현되는 방정식들을 IF-THEN 규칙들의 비선형 결합으로 시스템의 전역 동특성을 나타내는 방법이다.

본 논문에서는 대규모 T-S 퍼지 시스템의 고장검출을 위한 분산형 관측기 설계를 논의한다. 고장신호는 고장검출의 여분에 가능한 명확하게 반영되는 것이 바람직하다 [7, 12-15]. 즉 관측기는 고장신호에서 고장검출의 여분까지 가능한 민감하여야 한다. 이를 위하여 \mathcal{H}_∞ 지수 성능을 도입하여 분산형 고장검출 관측기 설계조건을 제안한다. 관측기 설계조건은 선형행렬부등식으로 표현된다.

접수일자 : 2009년 9월 24일

완료일자 : 2010년 1월 10일

감사의 글 : 이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호: R01-2008-000-20844-0)

다음절에서 대규모 시스템을 간단히 살펴본다. 3. 절에서 연속시간 시스템을 위한 \mathcal{H}_∞ 고장검출 관측기 설계를 논의한다. 4. 절에서 전산모의예제를 보인다.

본 논문은 표준적인 표기법을 따른다. 부등식 $A \prec (\leq) 0$ 은 (반)음한정임을 뜻한다. $\|x\|$ 은 유클리디안 놈을 의미한다. 또한 대칭 행렬 표기에 대하여 다음과 같은 생략법을 사용한다.

$$K \begin{bmatrix} \text{He}\{S\} & * \\ M & Q \end{bmatrix} * := K \begin{bmatrix} S+S^T & M^T \\ M & QQ^T \end{bmatrix} K^T. \quad (1)$$

2. 대규모 시스템

다음은 s 개의 하부 시스템으로 구성된 대규모 시스템의 i 번째 규칙으로 표현되는 퍼지 시스템이다.

$$R^i: \text{IF } z_1 \text{ is } \Gamma_1^i \text{ and } \dots \text{ and } z_h \text{ is } \Gamma_h^i \\ \text{THEN } \begin{cases} \dot{x}_p = A_p x_p + \sum_{q \neq p}^s A_{pq} x_q \\ y_p = C_p x_p + D_p f_p \end{cases} \quad (2)$$

여기서 $\Gamma_g^i, i \in \mathcal{I}_R := \{1, 2, \dots, r\}, g \in \mathcal{I}_H := \{1, 2, \dots, h\}$ 는 i 번째 규칙에서 g 번째 전반부 변수의 퍼지집합이고 아래 첨자(subscript) $p, q \in \mathcal{I}_S := \{1, \dots, s\}$ 는 p 번째 하부 시스템과 q 번째 상호 연결된 시스템을 나타내기 위해 사용한다. $x_p \in \mathbb{R}^n$ 는 상태, $y_p \in \mathbb{R}^m$ 는 출력, $f_p \in \mathbb{R}^l$ 는 미지의 고장 신호이다. 출력 측정센서에 고장이 발생한 경우에만 $f_p \neq 0$ 이며 $f_p \equiv 0$ 인 경우 시스템은 고장이 발생하지 않음을 의미한다.

논의의 편의를 위하여 임의의 행렬함수 $X_p(\theta)$ 에 대하여

$$X_p(\theta) := \sum_{i=1}^r \theta_i X_{p_i} \quad (3)$$

로 정의한다. 여기서

$$\theta_i = \frac{\prod_{g=1}^h \Gamma_g^i(z_g)}{\sum_{i=1}^r \left(\prod_{g=1}^h \Gamma_g^i(z_g) \right)} \quad (4)$$

이며 $\Gamma_g^i(z_g)$ 는 g 번째 전반부 변수 z_g 의 퍼지집합 Γ_g^i 에 대한 소속도를 나타낸다.

시스템 (2)의 전역 동특성은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_p &= A_p(\theta)x_p + \sum_{q \neq p}^s A_{pq}(\theta)x_q \\ y_p &= C_p x_p + D_p f_p \end{aligned} \quad (5)$$

p 번째 하부 시스템의 고장검출을 위한 관측기는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_p &= A_p(\theta)\hat{x}_p + \sum_{q \neq p}^s A_{pq}(\theta)\hat{x}_q \\ &\quad - L_p(\theta)(y_p - C_p \hat{x}_p) \\ \hat{y}_p &= C_p \hat{x}_p \\ r_p &= H_p(y_p - C_p \hat{x}_p) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $\hat{x}_p \in \mathbb{R}^n$ 는 추정된 상태, $\hat{y}_p \in \mathbb{R}^m$ 는 관측기의 출력, $r_p \in \mathbb{R}^l$ 는 잔여오차(residual error)이다. 행렬 $L_p(\theta)$ 은 설계되어야 할 관측기 이득이며, H_p 는 비특이 가중치 행렬이다.

논의의 편의를 위해 시스템은 초기 정지 상태를 가정한다. 따라서 $x_p(0) = \hat{x}_p(0) = 0, V_p(e_p(0)) = 0$ 이다. 관측오차를 $e_p := x_p - \hat{x}_p$ 라 정의하면 잔여오차 동역학은 다음과 같이 구성된다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_p &= (A_p(\theta) + L_p(\theta)C_p)e_p + \sum_{q \neq p}^s A_{qp}(\theta)e_q \\ &\quad + L_p(\theta)D_p f_p \\ r_p &= H_p C_p e_p + H_p D_p f_p \end{aligned} \quad (7)$$

3. 주요 결과

관측기 (6)이 고장검출기의 역할을 적절히 수행하기 위해서는 잔여오차에 고장신호가 가능한 한 명확히 반영되어야 한다. 이를 위해 다음과 같은 정의가 필요하다.

정의 1 ([12]): 주어진 $\gamma \in \mathbb{R}_{>0}$ 에 대하여 다음 부등식을 만족한다면 관측기 (6)은 γ - \mathcal{H}_∞ 검출성능을 만족한다.

$$\|r_p\|_{\mathcal{L}_2} > \gamma \|f_p\|_{\mathcal{L}_2} \quad (8)$$

여기서

$$\|\cdot\|_{\mathcal{L}_2} = \left\{ \int_0^T \|\cdot\|^2 d\tau \right\}^{1/2} \quad (9)$$

이다.

이와는 별도로 관측기 자체가 점근적으로 안정(asymptotically stable)해야 한다. 이 두 가지 조건이 고장검출을 위한 관측기의 기본설계조건이 되며 다음과 같이 정식화 된다.

문제 1 (\mathcal{H}_∞ 고장검출을 위한 관측기 설계): 시스템 (5)와 관측기 (6)을 고려하자. $\gamma \in \mathbb{R}_{>0}$ 가 주어졌을 때 다음의 조건들을 만족하는 이득행렬들 L_p, H_p 를 설계하라:

$f_p \equiv 0$ 인 경우 관측기는 점근적으로 안정해야 한다.

고장 f_p 에서 잔여오차 r_p 까지의 명확한 반영을 위해 정의 1을 만족해야 한다.

논의의 편의를 위하여 정의된 벡터와 행렬과 임의의 정방행렬 Q_{pq} 에 대하여

$$\begin{aligned} e_{-p} &:= \text{col}\{e_1, \dots, e_{p-1}, e_{p+1}, \dots, e_s\} \\ A_{-p_i} &:= [A_{p1_i}, \dots, A_{p,p-1_i}, A_{p,p+1_i}, \dots, A_{ps_i}] \\ Q_{-p} &:= \text{diag}\{Q_{p1}, \dots, Q_{p,p-1}, Q_{p,p+1}, \dots, Q_{ps}\} \end{aligned} \quad (10)$$

로 정의하자.

정리 1 (\mathcal{H}_- 고장검출 관측기 설계): 주어진 $\gamma \in \mathbb{R}_{>0}$ 에 대하여 다음의 선형행렬부등식을 만족하는 적절한 차원의 행렬들 $P_p = P_p^T > 0$, $Q_{pq} = Q_{pq}^T > 0$, M_{p_i} , $W_p = W_p^T > 0$, $p, q \in \mathcal{S}$, $i \in \mathcal{S}_R$ 이 존재한다면, 고장검출 관측기 (6)은 점근적으로 안정하며, 미지의 고장신호에 대하여 γ - \mathcal{H}_- 검출 성능을 만족한다.

$$\begin{bmatrix} \text{He}\{P_p A_{p_i} + M_{p_i} C_p\} + \sum_{q \neq p} Q_{qp} & \star \\ A_{-p_i}^T P_p & -Q_{-p} \end{bmatrix} < 0 \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} C_p^T W_p C_p - \text{He}\{P_p A_{p_i} + M_{p_i} C_p\} - \sum_{q \neq p} Q_{qp} & \star \\ -A_{-p_i} P_p & \star \\ D_p^T W_p C_p + D_p^T M_{p_i}^T & \star \\ \star & \star \\ Q_{-p} & \star \\ 0 & D_p^T W_p D_p - \gamma^2 I \end{bmatrix} > 0 \quad (12)$$

증명 우선 $f_p \equiv 0$ 인 경우, 관측기의 점근적 안정성을 조사하자. 임의의 (양한정) 행렬들 Q_{pq} 에 대하여 다음의 등식이 성립함은 쉽게 알 수 있다.

$$\sum_{p=1}^s \left(\sum_{q \neq p} e_q^T Q_{pq} e_q \right) = \sum_{p=1}^s e_p^T \left(\sum_{q \neq p} Q_{qp} \right) e_p \quad (13)$$

오차동역학 (7)에 대하여 다음과 같은 형태의 양한정 함수를 고려하자.

$$V := \sum_{p=1}^s V_p = \sum_{p=1}^s e_p^T P_p e_p \quad (14)$$

리아푸노프 안정도 이론에 의하여 V 가 (15)를 만족한다면 오차동역학 (7), 혹은 관측기 (6)은 점근적으로 안정하다.

$$\frac{dV}{dt} < 0 \text{ for all } \text{col}\{e_p, e_{-p}\} \in \mathbb{R}^{2n} \setminus \{0\} \quad (15)$$

$$\Leftrightarrow \sum_{p=1}^s \left(\begin{bmatrix} e_p \\ e_{-p} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \text{He}\{P_p(A_p(\theta) + L_p(\theta)C_p)\} + \sum_{q \neq p} Q_{qp} & \star \\ A_{-p}^T(\theta)P_p & -Q_{-p} \end{bmatrix} \star \right) < 0 \quad (16)$$

for all $\text{col}\{e_p, e_{-p}\} \in \mathbb{R}^{2n} \setminus \{0\}$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} \text{He}\{P_p(A_p(\theta) + L_p(\theta)C_p)\} + \sum_{q \neq p} Q_{qp} & \star \\ A_{-p}^T(\theta)P_p & -Q_{-p} \end{bmatrix} < 0$$

$$= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \theta_i \theta_j \begin{bmatrix} \text{He}\{P_p(A_{p_i} + L_{p_i}C_p)\} + \sum_{q \neq p} Q_{qp} & \star \\ A_{-p_i}^T P_p & -Q_{-p} \end{bmatrix} < 0 \quad (17)$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} \left(\text{He}\{P_p(A_{p_i} + L_{p_i}C_p)\} + \sum_{q \neq p} Q_{qp} \right) & \star \\ A_{-p_i}^T P_p & -Q_{-p} \end{bmatrix} < 0 \quad (18)$$

$\Leftrightarrow (11)$

여기서, 첫 번째 등치관계에서 식 (13)을 사용하였다. 이제 $P_p L_{p_i} = M_{p_i}$ 로 치환하면 선형행렬부등식 (11)을 얻는다. 이제 문제 1의 조건 2를 고려하자. 정의 1로부터 다음의 등치관계를 유추할 수 있다.

$$(8) \Leftrightarrow \int_0^T \sum_{p=1}^s \|r_p\|^2 d\tau - \int_0^T \gamma^2 \sum_{p=1}^s \|f_p\|^2 d\tau > 0 \quad (19)$$

위 식은 오차시스템 (7)의 해의 궤적을 따라 만족해야 한다. 다음과 같은 등치관계를 유도할 수 있다.

$$\sum_{p=1}^s \int_0^T (\|r_p\|^2 - \gamma^2 \|f_p\|^2) d\tau$$

$$= \sum_{p=1}^s \left(\int_0^T \left(\|r_p\|^2 - \gamma^2 \|f_p\|^2 - \frac{dV_p}{d\tau} \right) d\tau + V_p(e_p(T)) \right) \quad (20)$$

$$= \sum_{p=1}^s \left(\int_0^T \left(\begin{bmatrix} e_p \\ e_{-p} \\ f_p \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} (H_p C_p(\theta))^T \star \\ -\text{He}\{P_p(A_p(\theta) + L_p(\theta)C_p)\} - \sum_{q \neq p} Q_{qp} \\ -A_{-p}^T(\theta)P_p \\ (H_p D_p)^T H_p C_p \\ +(L_p(\theta)D_p)^T P_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \star \\ \star \\ Q_{-p} \\ 0 \end{bmatrix} \right. \right.$$

$$\left. \left. \left((H_p D_p(\theta))^T \star \right) \star \right) d\tau + V(e_p(T)) \right)$$

$$> 0 \text{ for all } \text{col}\{e_p, e_{-p}, f_p\} \in \mathbb{R}^{2n+l} \quad (21)$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} (H_p C_p)^T \star \\ -\text{He}\{P_p(A_p(\theta) + L_p(\theta)C_p)\} - \sum_{q \neq p} Q_{qp} \\ -A_{-p}^T(\theta)P_p \\ (H_p D_p)^T H_p C_p \\ +(L_p(\theta)D_p)^T P_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \star \\ \star \\ Q_{-p} \\ 0 \\ (H_p D_p)^T \star - \gamma^2 I \end{bmatrix}$$

$$= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \theta_i \theta_j \begin{bmatrix} \left(\begin{array}{c} (H_p C_p)^T H_p C_p \\ -\text{He}\{P_p(A_{p_i} + L_{p_i} C_p)\} \\ -\sum_{q \neq p} Q_{qp} \\ -A_{-p_i}^T P_p \\ \left((H_p D_p)^T H_p C_p \right. \\ \left. + (L_{p_i} D_p)^T P_p \right) \end{array} \right) \\ \begin{array}{cc} * & * \\ Q_{-p} & (H_p D_p)^T H_p D_p - \gamma^2 I \end{array} \end{bmatrix} \succ 0 \quad (22)$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} \left(\begin{array}{c} (H_p C_p)^T H_p C_p \\ -\text{He}\{P_p(A_{p_i} + L_{p_i} C_p)\} - \sum_{q \neq p} Q_{qp} \\ -A_{-p_i}^T P_p \\ (H_p D_p)^T H_p C_p + (L_{p_i} D_p)^T P_p \end{array} \right) \\ \begin{array}{cc} * & * \\ Q_{-p} & (H_p D_p)^T H_p D_p - \gamma^2 I \end{array} \end{bmatrix} \succ 0 \quad (23)$$

$\Leftrightarrow (12)$

$H_p^T H_p = W_p$, $P_p L_{p_i} = M_{p_i}$ 로 치환하면 선형행렬부등식 (12)를 얻는다. \square

4. 모의실험

다음과 같은 퍼지 규칙으로 표현되는 대규모 전력시스템을 고려하자 [5].

$$R^1 : \text{IF } x_{1_1} \text{ is about } -\frac{\pi}{2} \text{ and } x_{2_1} \text{ is about } -\frac{\pi}{2}$$

$$\text{THEN } \begin{cases} \dot{x}_p = A_{p_1} x_p + \sum_{q=1, q \neq p}^2 A_{pq_1} x_q \\ y_p = C_p x_p + D_p f_p \end{cases}$$

$$R^2 : \text{IF } x_{1_1} \text{ is about } -\frac{\pi}{2} \text{ and } x_{2_1} \text{ is about } 0$$

$$\text{THEN } \begin{cases} \dot{x}_p = A_{p_2} x_p + \sum_{q=1, q \neq p}^2 A_{pq_2} x_q \\ y_p = C_p x_p + D_p f_p \end{cases}$$

$$R^3 : \text{IF } x_{1_1} \text{ is about } -\frac{\pi}{2} \text{ and } x_{2_1} \text{ is about } \frac{\pi}{2}$$

$$\text{THEN } \begin{cases} \dot{x}_p = A_{p_3} x_p + \sum_{q=1, q \neq p}^2 A_{pq_3} x_q \\ y_p = C_p x_p + D_p f_p \end{cases}$$

$$R^4 : \text{IF } x_{1_1} \text{ is about } 0 \text{ and } x_{2_1} \text{ is about } -\frac{\pi}{2}$$

$$\text{THEN } \begin{cases} \dot{x}_p = A_{p_4} x_p + \sum_{q=1, q \neq p}^2 A_{pq_4} x_q \\ y_p = C_p x_p + D_p f_p \end{cases}$$

$$R^5 : \text{IF } x_{1_1} \text{ is about } 0 \text{ and } x_{2_1} \text{ is about } 0$$

$$\text{THEN } \begin{cases} \dot{x}_p = A_{p_5} x_p + \sum_{q=1, q \neq p}^2 A_{pq_5} x_q \\ y_p = C_p x_p + D_p f_p \end{cases}$$

$$R^6 : \text{IF } x_{1_1} \text{ is about } 0 \text{ and } x_{2_1} \text{ is about } \frac{\pi}{2}$$

$$\text{THEN } \begin{cases} \dot{x}_p = A_{p_6} x_p + \sum_{q=1, q \neq p}^2 A_{pq_6} x_q \\ y_p = C_p x_p + D_p f_p \end{cases}$$

$$R^7 : \text{IF } x_{1_1} \text{ is about } \frac{\pi}{2} \text{ and } x_{2_1} \text{ is about } -\frac{\pi}{2}$$

$$\text{THEN } \begin{cases} \dot{x}_p = A_{p_7} x_p + \sum_{q=1, q \neq p}^2 A_{pq_7} x_q \\ y_p = C_p x_p + D_p f_p \end{cases}$$

$$R^8 : \text{IF } x_{1_1} \text{ is about } \frac{\pi}{2} \text{ and } x_{2_1} \text{ is about } 0$$

$$\text{THEN } \begin{cases} \dot{x}_p = A_{p_8} x_p + \sum_{q=1, q \neq p}^2 A_{pq_8} x_q \\ y_p = C_p x_p + D_p f_p \end{cases}$$

$$R^9 : \text{IF } x_{1_1} \text{ is about } \frac{\pi}{2} \text{ and } x_{2_1} \text{ is about } \frac{\pi}{2}$$

$$\text{THEN } \begin{cases} \dot{x}_p = A_{p_9} x_p + \sum_{q=1, q \neq p}^2 A_{pq_9} x_q \\ y_p = C_p x_p + D_p f_p \end{cases}$$

여기서 $p, q = 1, 2$ 는 상호 연결된 하부 시스템을 의미하며

$$A_{1_1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -137.3 & -66.7 \end{bmatrix}, A_{1_2} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -137.8 & -66.7 \end{bmatrix}$$

$$A_{1_3} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -137.8 & -66.6 \end{bmatrix}, A_{1_4} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -136.2 & -66.9 \end{bmatrix}$$

$$A_{1_5} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -137.1 & -66.7 \end{bmatrix}, A_{1_6} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -137.8 & -66.6 \end{bmatrix}$$

$$A_{1_7} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -136.1 & -66.9 \end{bmatrix}, A_{1_8} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -136.3 & -66.9 \end{bmatrix}$$

$$A_{1_9} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -137.1 & -66.7 \end{bmatrix}, A_{2_1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -146.9 & -69.3 \end{bmatrix}$$

$$A_{2_2} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -147.7 & -69.3 \end{bmatrix}, A_{2_3} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -147.9 & -69.3 \end{bmatrix}$$

$$A_{2_4} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -146.2 & -69.4 \end{bmatrix}, A_{2_5} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -146.9 & -69.3 \end{bmatrix}$$

$$A_{2_6} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -147.9 & -69.3 \end{bmatrix}, A_{2_7} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -146.2 & -69.4 \end{bmatrix}$$

$$A_{28} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -146.2 & -69.4 \end{bmatrix}, A_{29} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -147.8 & -69.3 \end{bmatrix}$$

$$L_{22} = \begin{bmatrix} -9.6 & 8.5 \\ 37.7 & -1282.4 \end{bmatrix}, L_{23} = \begin{bmatrix} -9.6 & 8.5 \\ 37.8 & -1282.4 \end{bmatrix}$$

$$A_{121} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.51 & 0 \end{bmatrix}, A_{122} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1.55 & 0 \end{bmatrix}$$

$$L_{24} = \begin{bmatrix} -9.6 & 8.5 \\ 37.0 & -1282.4 \end{bmatrix}, L_{25} = \begin{bmatrix} -9.6 & 8.5 \\ 37.4 & -1282.4 \end{bmatrix}$$

$$A_{123} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1.46 & 0 \end{bmatrix}, A_{124} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -0.77 & 0 \end{bmatrix}$$

$$L_{26} = \begin{bmatrix} -9.6 & 8.5 \\ 37.8 & -1282.4 \end{bmatrix}, L_{27} = \begin{bmatrix} -9.6 & 8.5 \\ 37.0 & -1282.4 \end{bmatrix}$$

$$A_{125} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -0.52 & 0 \end{bmatrix}, A_{126} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1.48 & 0 \end{bmatrix}$$

$$L_{28} = \begin{bmatrix} -9.6 & 8.5 \\ 37.0 & -1282.4 \end{bmatrix}, L_{29} = \begin{bmatrix} -9.6 & 8.5 \\ 37.7 & -1282.4 \end{bmatrix}$$

$$A_{127} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1.13 & 0 \end{bmatrix}, A_{128} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1.05 & 0 \end{bmatrix}$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} 479.3 & -6.4 \\ 0 & 483.8 \end{bmatrix}, H_2 = \begin{bmatrix} 479.1 & -5.5 \\ 0 & 483.1 \end{bmatrix}$$

$$A_{129} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.70 & 0 \end{bmatrix}, A_{211} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -0.44 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{212} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.94 & 0 \end{bmatrix}, A_{213} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.93 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{214} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1.22 & 0 \end{bmatrix}, A_{215} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -0.29 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{216} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.65 & 0 \end{bmatrix}, A_{217} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1.21 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{218} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1.27 & 0 \end{bmatrix}, A_{219} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -0.35 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = C_2 = D_1 = D_2 = I_{2 \times 2}$$

이다. 여기서 A_{p_i} 는 참고문헌 [5]의 이득 행렬 K_{p_i} 를 포함한 $A_{p_i} + B_{p_i}K_{p_i}$ 를 의미한다. 정리 1에 의해 (6) 형태의 고장 검출 관측기 설계를 위한 이득 행렬들을 다음과 같이 구할 수 있다.

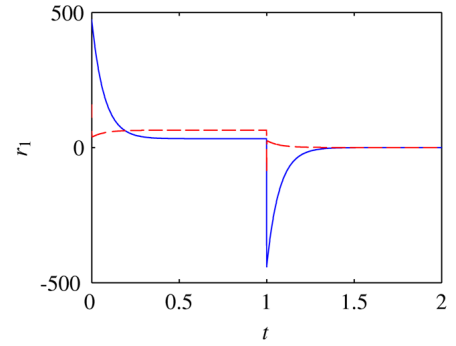
$$L_{11} = \begin{bmatrix} -13.3 & 13.5 \\ 50.8 & -1435.8 \end{bmatrix}, L_{12} = \begin{bmatrix} -13.3 & 13.5 \\ 51.0 & -1435.8 \end{bmatrix}$$

$$L_{13} = \begin{bmatrix} -13.3 & 13.5 \\ 50.9 & -1435.9 \end{bmatrix}, L_{14} = \begin{bmatrix} -13.3 & 13.5 \\ 50.5 & -1435.6 \end{bmatrix}$$

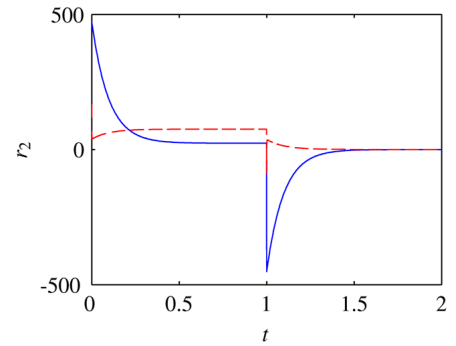
$$L_{15} = \begin{bmatrix} -13.3 & 13.5 \\ 50.8 & -1435.8 \end{bmatrix}, L_{16} = \begin{bmatrix} -13.3 & 13.5 \\ 51.0 & -1435.9 \end{bmatrix}$$

$$L_{17} = \begin{bmatrix} -13.3 & 13.5 \\ 50.4 & -1435.6 \end{bmatrix}, L_{18} = \begin{bmatrix} -13.3 & 13.5 \\ 50.5 & -1435.6 \end{bmatrix}$$

$$L_{19} = \begin{bmatrix} -13.3 & 13.5 \\ 50.8 & -1435.8 \end{bmatrix}, L_{21} = \begin{bmatrix} -9.6 & 8.5 \\ 37.4 & -1282.4 \end{bmatrix}$$



(a) r_{11} (실선), r_{12} (폐선)



(b) r_{21} (실선), r_{22} (폐선)

그림 1. 잔여오차.

Fig. 1. Residual error.

초기값 $x_1(0) = (0, 0)$, $x_2(0) = (0, 0)$ 을 선정하여 시간 구간 $t \in [0, 2]$ 에서 모의 실험을 실시하였다. 시간 구간 $t \in [0, 1]$ 에서 고장이 발생하여 고장신호 $f_1, f_2 = (1, 1)$ 이며 나머지 구간에서 $f_1, f_2 = (0, 0)$ 임을 가정하자. 정리 1을 만족하는 관측기를 설계하여 시스템에 적용한 결과 그림 1로부터 고장 발생 구간에서 고장신호가 잔여오차에 잘 반영되었음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 대규모 T-S 퍼지 시스템의 \mathcal{H}_2 고장검출 관측기 설계를 논의하였다. 리아푸노프 안정도 이론에 의해 점근적으로 안정한 관측기를 설계하고 고장의 명확한 검출을 위하여 γ - \mathcal{H}_2 지수성능을 도입하였다. 관측기 설계조건은 선형행렬부등식으로 나타났으며 대규모 전력 시스템의 모의실험을 통하여 관측기의 성능을 입증하였다.

참 고 문 헌

- [1] R.-J. Wang, "Nonlinear decentralized state feedback controller for uncertain fuzzy time-delay interconnected systems," *Fuzzy Sets Systems*, vol. 151, pp. 191-204, 2005.
- [2] S. S. Stanković and D. D. Šiljak, "Robust stabilization of nonlinear interconnected systems by decentralized dynamic output feedback," *Systems & Control Letters*, vol. 58, pp. 271-275, 2009.
- [3] Y.-Y. Cao, Y.-X. Sun, and W.-J. Mao, "Output feedback decentralized stabilization: ILMI approach," *Systems & Control Letters*, vol. 35, pp. 183-194, 1998.
- [4] S. Dhbaibi, A. S. Tlili, S. Elloumi, and N. B. Braiek, " \mathcal{H}_∞ decentralized observation and control of nonlinear interconnected systems," *ISA Transactions*, vol. 48, pp. 458-467, 2009.
- [5] C.-S. Tseng and B.-S. Chen, " \mathcal{H}_∞ decentralized fuzzy model reference tracking control design for nonlinear interconnected systems," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 9, pp. 795-809, 2001.
- [6] L. Bai, Z. Tian, and S. Shi, "Robust fault detection for a class of nonlinear time-delay systems," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 344, pp. 873-888, 2007.
- [7] A. Xu and Q. Zhang, "Nonlinear system fault diagnosis based on adaptive estimation," *Automatica*, vol. 40, pp. 1181-1193, 2004.
- [8] L. Li and D. Zhou, "Fast and robust fault diagnosis for a class of nonlinear systems: detectability analysis," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 28, pp. 2635-2646, 2004.
- [9] M. Mattei, G. Paviglianiti, and V. Scordamaglia, "Nonlinear observers with \mathcal{H}_∞ performance for sensor fault detection and isolation: a linear matrix inequality design procedure," *Control Engineering Practice*, vol. 13, pp. 1271-1281, 2005.
- [10] C. D. Persis and A. Isidori, "A geometric approach to nonlinear fault detection and isolation," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 46, pp. 853-865, 2001.
- [11] B. Yan, Z. Tian, S. Shi, and Z. Weng, "Fault diagnosis for a class of nonlinear systems via ESO,"

ISA Transactions, vol. 47, pp. 386-394, 2008.

- [12] J. L. Wang, G.-H. Yang, and J. Liu, "An LMI approach to \mathcal{H}_2 index and mixed $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ fault detection observer design," *Automatica*, vol. 43, pp. 1656-1665, 2007.
- [13] J. Liu, J. L. Wang, and G.-H. Yang, "An LMI approach to minimum sensitivity analysis with application to fault detection," *Automatica*, vol. 41, pp. 1995-2004, 2005.
- [14] I. M. Jaimoukha, Z. Li, and V. Papakos, "A matrix factorization solution to the $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ fault detection problem," *Automatica*, vol. 42, pp. 1907-1912, 2006.
- [15] J. Guo, X. Huang, and Y. Cui, "Design and analysis of robust fault detection filter using LMI tools," *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 57, pp. 1743-1747, 2009.

저 자 소 개



지성철(Sung Chul Jee)
2009년 제 19권 제 4호 참조



이호재(Ho Jae Lee)
2009년 제 19권 제 4호 참조



주영훈(Young Hoon Joo)
2009년 제 19권 제 4호 참조



김도완(Do Wan Kim)
현재 : 연세대학교 전기전자공학과 연구교수