

A Fault Detection System Design for Boiler-Turbine Control System of Thermal Power Plant

류석환[†]
Seog-Hwan Yoo[†]

대구대학교 전자전기공학부
School of Electrical and Electronics Engineering, Daegu University

요 약

본 논문에서는 화력발전소 보일러-터빈 제어시스템의 고장검출 시스템을 설계한다. 이를 위하여 보일러-터빈의 비선형 동특성을 측정 가능한 시변 파라미터를 갖는 T-S 퍼지시스템으로 나타내고 관측기 기반의 고장검출 필터를 사용하여 오차발생기를 설계한다. 고장발생 측정기를 식별하기 위하여 고장검출 필터 출구에 근사적인 역시스템을 연결하였다. 제시한 방법의 효율성을 컴퓨터 모의실험을 통하여 입증한다.

키워드 : T-S 퍼지시스템, 보일러-터빈 제어시스템, 고장검출필터, 선형행렬 부등식

Abstract

This paper deals with a fault detection system design for a boiler-turbine control system of thermal power plant. We described the nonlinear properties of the boiler-turbine dynamics as a T-S fuzzy system with time varying measurable parameters. We design a residual generator using an observer based fault detection filter. In order to identify the faulted output sensor, an approximate inverse system is connected to the output of the fault detection filter. We demonstrate the efficiency of the suggested design method via computer simulations.

Key Words : T-S Fuzzy System, Boiler-Turbine Control System, Fault Detection Filter, Linear Matrix Inequality.

Received: Sep. 23, 2015

Revised : Oct. 14, 2015

Accepted: Nov. 9, 2015

[†]Corresponding author
shryu@daegu.ac.kr

1. 서 론

발전소, 제철소, 석유화학 플랜트 등의 대규모 공정제어 시스템은 안정적인 운전이 필수적이다. 이러한 공정제어 시스템에서 구성요소 중 한 개의 고장으로 인한 시스템 정지나 파손은 인적, 물적인 막대한 피해를 초래할 수가 있다. 따라서 이러한 제어시스템의 구성에 필수요소인 측정기의 고장이 발생할 경우 이를 조속히 검출하여 고장으로 인한 피해가 확산되는 것을 방지할 필요가 있다. 현대제어이론의 급속한 발전을 바탕으로 안전운전이 필수적인 자동제어시스템에서의 고장검출 시스템 설계에 관한 연구가 과거 십수년 동안 활발하게 진행되었다.

고장검출 시스템 설계는 주로 오차신호(residual signal)를 발생하여 오차신호의 크기로 부터 고장의 발생 유무를 판정하는 방법으로 연구가 진행되었다. 오차신호를 발생하기 위하여 적절한 필터를 사용하는데 J. Gertler[1]은 건설한 parity 방정식을 사용하여 R. Patton과 J. Chen[2]은 고유구조의 할당을 통해서 건설한 고장검출 필터를 설계하였다. J. Chen 등[3]은 불확실성에 건설한 고장검출 필터를 설계하기 위하여 미지입력 관측기를 제안하였으나 설계조건이 너무 보수적이다. 불확실성에 건설한 고장검출 필터를 설계하기 위해서 H_{∞} 최적추정기의 사용[4-7]이 제시되었다. 비선형시스템에 대한 고장검출 필터를 설계하기 위하여 기하학적 방법[8], T-S 퍼지시스템 접근방식[9] 등이 제시 되어있다.

이 논문은 2014학년도 대구대학교 연구비 지원에 의한 논문임.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

본 연구에서는 화력발전소의 보일러-터빈 제어시스템에서 사용 가능한 고장검출 필터를 설계한다. 화력발전소 보일러-터빈 제어시스템은 수학적으로는 다입력 다출력 비선형시스템으로 모델링되는 고신뢰성이 요구되는 아주 중요한 제어시스템이기 때문에 제어기 설계에 관한 많은 연구가 수행되어 왔다[10,11]. 본 연구에서는 화력발전소 보일러-터빈의 동특성을 여러 동작점에서 선형 파라미터 변화(Linear Parameter Varying)시스템으로 나타내고 퍼지 IF-THEN 규칙에 의하여 시스템을 표현한다. 따라서 선형 파라미터 변화 시스템에서 발전된 견실제어이론을 사용하여 고장검출 필터를 설계한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2절에서는 보일러-터빈계통을 T-S 퍼지시스템으로 표현하고 3절에서는 오차신호를 발생하는 고장검출필터를 선형행렬부등식(Linear Matrix Inequality)의 해를 사용하여 설계한다. 4절에서는 모의실험을 통하여 3절에서 설계한 고장검출 필터의 성능을 실험하고 마지막으로 5절에서 결론을 맺는다.

2. 보일러-터빈 모델

화력발전소의 보일러-터빈 모델은 다입력 다출력의 비선형 미분방정식으로 표현된다. 본 연구에서는 Khani와 Yazdizadeh[10]가 연구한 정격 160MW 급의 스웨덴에서 운전되고 있고 Bell과 Astrom이 확립한 모델을 사용하며 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -0.0018 u_2 x_1^{9/8} + 0.9u_1 - 0.15u_3 & (1) \\ x_2 &= (0.073u_2 - 0.016)x_1^{9/8} - 0.1x_2 \\ x_3 &= 1.66u_3 - (0.0129u_2 - 0.00224)x_1 \\ y_1 &= x_1 \\ y_2 &= x_2 \\ y_3 &= 0.05(0.131x_3 + 100a_{cs} + \frac{q_c}{9} - 68) \end{aligned}$$

여기에서 상태변수 x_1, x_2, x_3 는 각각 드럼 압력(drum pressure), 전기적 출력, 유체밀도를 나타내며 단위는 $kg/cm^2, MW, kg/m^3$ 이다. 입력변수 u_1, u_2, u_3 는 연료공급밸브, 증기제어밸브, 급수밸브의 위치이다. 출력변수 y_1, y_2, y_3 는 드럼압력, 전기적출력, 드럼수위(m)이며 a_{cs} 와 q_c 는 증기특성(steam quality)과 증발률(evaporation rate, kg/s)를 나타내고 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} a_{cs} &= \frac{(1 - 0.00154x_3)(0.8x_1 - 25.6)}{x_3(1.04 - 0.00123x_1)} & (2) \\ q_c &= (0.854u_2 - 0.147)x_1 + 45.6u_1 - 2.51u_3 - 2.1 \end{aligned}$$

입력변수는 액츄에이터의 물리적인 제한 때문에 다음과 같은 제약조건을 갖는다.

$$\begin{aligned} 0 &\leq u_i \leq 1, \quad i = 1, 2, 3 & (3) \\ -0.007 &\leq \dot{u}_1 \leq 0.007, \quad -2 \leq \dot{u}_2 \leq 0.02, \\ -0.05 &\leq \dot{u}_3 \leq 0.05 \end{aligned}$$

실제 드럼압력 x_1 의 동작범위는 $75 \leq x_1 \leq 140$ 이고 이 동작범위의 구간에서 식 (2)에서 정의된 a_{cs} 는 식 (4)와 같이 근사적으로 표현가능하다.

$$a_{cs} \approx \left(\frac{1}{x_3} - 0.00154\right)(0.973x_1 - 37.6) & (4)$$

따라서 식 (2)와 식 (4)를 식 (1)의 y_3 에 대입하면

$$\begin{aligned} y_3 &= \left(\frac{4.87}{x_3} - 0.00803\right)x_1 + 0.00654x_3 + 0.253u_1 & (5) \\ &+ 0.00474x_1u_2 - 0.014u_3 - \frac{188}{x_3} - 3.12 \end{aligned}$$

를 얻는다. $\theta_1(t) = x_1(t)^{1/8}, \theta_2(t) = x_1(t)^{9/8}, \theta_3(t) = x_1(t), \rho(t) = x_3(t)$ 라 정의하면 실제 동적모델인 식 (1)의 동작영역에서 $\theta_1(t), \theta_2(t), \theta_3(t), \rho(t)$ 는 다음과 같이 유계된다.

$$\begin{aligned} 1.72 &\leq \theta_1(t) \leq 1.85, \quad 129 \leq \theta_2(t) \leq 260, & (6) \\ 75 &\leq \theta_3(t) \leq 140, \quad 300 \leq \rho(t) \leq 556 \end{aligned}$$

비선형 동적모델인 식 (1)을 $\rho(t)$ 를 전제변수로 정의하여 다음과 같이 T-S 퍼지시스템으로 표현한다.

플랜트 규칙 $i (i = 1, 2, 3)$

IF $\rho(t)$ is $M_i(\rho)$,

THEN

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(\theta)x(t) + B(\theta)u(t) & (7) \\ y(t) &= C_i x(t) + D(\theta)u(t) + y_{bi} + D_{fs}(t) \end{aligned}$$

여기에서

$$\begin{aligned} x(t) &= \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \quad u(t) = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}, \quad y(t) = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix}, \\ A(\theta) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -0.016\theta_1 - 0.1 & 0 & 0 \\ 0.00224 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B(\theta) = \begin{bmatrix} 0.9 - 0.0018\theta_2 - 0.15 \\ 0 & 0.073\theta_2 & 0 \\ 0 & -0.0129\theta_3 & 1.66 \end{bmatrix} \\ C_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0.0082 & 0 & 0.00654 \end{bmatrix}, \quad C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0.00335 & 0 & 0.00654 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$C_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0.000727 & 0 & 0.00654 \end{bmatrix},$$

$$D(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.253 & 0.00474\theta_3 & -0.014 \end{bmatrix}, y_{b1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -3.75 \end{bmatrix},$$

$$y_{b2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -3.56 \end{bmatrix}, y_{b3} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -3.46 \end{bmatrix}, D_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, f_s(t) = \begin{bmatrix} f_{s1} \\ f_{s2} \\ f_{s3} \end{bmatrix}$$

이다. f_{s1}, f_{s2}, f_{s3} 는 출력 y_1, y_2, y_3 에 각각 해당하는 측정기의 가상적인 고장신호이다. $M_i(\rho)$ ($i=1,2,3$)는 퍼지집합이고 식 (8)과 같이 정의한다.

$$M_1(\rho) = \begin{cases} -\frac{1}{128}\rho(t) + \frac{428}{128} & 300 \leq \rho \leq 428 \\ 0 & \rho \geq 428 \end{cases},$$

$$M_2(\rho) = -\frac{1}{128} |\rho(t) - 428| + 1, \quad (8)$$

$$M_3(\rho) = \begin{cases} \frac{1}{128}\rho(t) - \frac{428}{128} & 428 \leq \rho \leq 556 \\ 0 & \rho \leq 428 \end{cases}$$

정규화된 소속함수(normalized membership function) $\mu_i = \mu_i(\rho)$ 는 식 (9)와 같이 주어진다.

$$\mu_i = \frac{M_i(\rho)}{\sum_{i=1}^3 M_i(\rho)}, \mu_i \geq 0, \sum_{i=1}^3 \mu_i = 1 \quad (9)$$

$C(\mu) = \sum_{i=1}^3 \mu_i C_i, y_b(\mu) = \sum_{i=1}^3 \mu_i y_{bi}$ 라 정의하고 식 (7)을 간단히 표현하면 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(\theta)x(t) + B(\theta)u(t) \\ y(t) &= C(\mu)x(t) + D(\theta)u(t) + y_b(\mu) + D_f f_s(t) \end{aligned} \quad (10)$$

터빈-보일러 제어시스템의 목표는 증기압력 y_1 과 보일러 수위레벨 y_3 를 적절한 값으로 유지하면서 부하변동에 따라 전기적 출력 y_2 를 생산하도록 식 (3)에 주어진 제약조건을 충족하는 제어입력 u_1, u_2, u_3 를 결정하는 것이다. 제어입력은 출력변수 y_1, y_2, y_3 를 이용하여 제어기에서 계산되는데 만약 측정기 y_1, y_2, y_3 중 어느 한 개에 고장이 발생하여 정확한 측정이 이루어 지지 않으면 소기의 제어목표를 달성하기가 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 측정기에서 고장이 발생할 경우 고장발생을 빠른 시간 내에 탐지할 수 있도록 고장검출 필터를 설계한다.

3. 고장검출필터 설계

이 절에서는 T-S 퍼지시스템으로 나타낸 식 (7)에서 고장

신호 $f_s(t)$ 가 발생하였을 경우 고장을 검출할 수 있는 관측기 기반의 필터를 설계한다. 플랜트 규칙의 전제변수인 $\rho(t) = x_3(t)$ 는 측정이 되지 않으므로 필터규칙에서는 관측기로부터 계산된 추정치 $\hat{\rho}(t) = \hat{x}_3(t)$ 를 전제변수로 선정한다.

필터 규칙 i ($i=1, 2, 3$)

IF $\hat{\rho}(t)$ is $M_i(\hat{\rho})$,

THEN

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A(\hat{\theta})\hat{x}(t) + B(\hat{\theta})u(t) + L_i(y(t) - \hat{y}(t)) \quad (11) \\ \hat{y}(t) &= C_i\hat{x}(t) + D(\hat{\theta})u(t) + y_{bi} \end{aligned}$$

여기에서 L_i 는 규칙 i 에서의 필터이득이고 $\hat{\theta}$ 는 측정값 y_1 으로 계산된 θ 값이다.

플랜트 T-S 퍼지모델에서와 같이 정규화된 소속함수 $\hat{\mu}_i$ 를 정의하고, $L(\hat{\mu}) = \sum_{i=1}^3 \hat{\mu}_i L_i, C(\hat{\mu}) = \sum_{i=1}^3 \hat{\mu}_i C_i,$

$y_b(\hat{\mu}) = \sum_{i=1}^3 \hat{\mu}_i y_{bi}$ 라 정의하면 식 (12)를 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A(\hat{\theta})\hat{x}(t) + B(\hat{\theta})u(t) + L(\hat{\mu})(y(t) - \hat{y}(t)) \quad (12) \\ \hat{y}(t) &= C(\hat{\mu})\hat{x}(t) + D(\hat{\theta})u(t) + y_b(\hat{\mu}) \end{aligned}$$

$e(t) = x(t) - \hat{x}(t), z(t) = y(t) - \hat{y}(t)$ 라 정의하면 식 (10)과 식 (12)로부터

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= (A(\theta) - L(\hat{\mu})C(\hat{\mu}))e(t) + w_{f1}(t) - L(\hat{\mu})w(t) \quad (13) \\ z(t) &= C(\hat{\mu})e(t) + w_{f2}(t) + w(t) \end{aligned}$$

여기에서 $w_{f1}(t), w_{f2}(t)$ 는 고장발생시 발생하는 신호이고 $w(t)$ 는 전제변수가 측정되지 않아 발생하는 신호이며 고장이 없어도 발생하는 신호이고 식 (14)와 같다.

$$\begin{aligned} w_{f1}(t) &= (A(\theta) - A(\hat{\theta}))\hat{x}(t) + (B(\theta) - B(\hat{\theta}))u(t) \\ &\quad - L(\hat{\mu})f_s(t) - L(\hat{\mu})(D(\theta) - D(\hat{\theta}))u(t) \quad (14) \\ w_{f2}(t) &= (D(\theta) - D(\hat{\theta}))u(t) + D_f f_s(t) \\ w(t) &= (C(\mu) - C(\hat{\mu}))x(t) + y_b(\mu) - y_b(\hat{\mu}) \end{aligned}$$

식 (13)에서 고장이 발생하지 않고 $w(t)$ 가 0이면 정상상태에서 $z(t) = 0$ 이 됨을 알 수 있다. 따라서 $w(t)$ 에 대한 $z(t)$ 의 민감도를 적게 유지한다면 $z(t)$ 의 크기를 관측하여 고장 발생 유무를 판정할 수 있다. 관측기 이득 $L(\hat{\mu})$ 를 결정하기 위해서 다음의 설계 조건을 가정한다.

1) 모든 허용 가능한 θ 의 범위 내에서 $|e(t)|$ 는 지수함수로 감소한다. 즉 주어진 $\alpha > 0$ 에 대해서 $|e(t)| \leq ke^{-\alpha t}e(0)$. 여기에서 k 는 적절한 상수이다.

2) 모든 허용 가능한 θ 의 범위 내에서 입력 $w(t)$ 에 대한

$z(t)$ 의 연산자를 T_{zw} 라 할 때 주어진 가급적 작은 $\gamma > 0$ 에 대해서 $\|T_{zw}\|_{\infty} < \gamma$ 를 만족한다.

여기에서 $|e(t)| = (e(t)^T e(t))^{1/2}$ 이고 $\|\cdot\|_{\infty}$ 는 H_{∞} 노름을 의미한다. 위의 설계조건 1)과 2)을 충족하는 필터가 존재하기 위한 충분조건은 모든 허용 가능한 θ 와 $\hat{\mu}$ 에 대해서 식 (15)와 식 (16)의 선형행렬 부등식을 만족하는 양한정 행렬 P 와 $L(\hat{\mu})$ 가 존재하면 된다.

$$P(A(\theta) - L(\hat{\mu})C(\hat{\mu})) + (A(\theta) - L(\hat{\mu})C(\hat{\mu}))^T P + 2\alpha P < 0 \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} (A(\theta) - L(\hat{\mu})C(\hat{\mu}))^T P + P(A(\theta) - L(\hat{\mu})C(\hat{\mu})) & * & * \\ -L(\hat{\mu})^T P & -\gamma I & * \\ C(\hat{\mu}) & I - \gamma I & \end{bmatrix} < 0 \quad (16)$$

따라서 설계조건 1)과 2)를 동시에 충족하는 필터가 존재할 충분조건은 다음과 같다.

$$A(\theta)^T P + PA(\theta) - C(\hat{\mu})^T M(\hat{\mu})^T - M(\hat{\mu})C(\hat{\mu}) + 2\alpha P < 0 \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} A(\theta)^T P + PA(\theta) - C(\hat{\mu})^T M(\hat{\mu})^T - M(\hat{\mu})C(\hat{\mu}) & * & * \\ -M(\hat{\mu})^T & -\gamma I & * \\ C(\hat{\mu}) & I - \gamma I & \end{bmatrix} < 0, \quad M(\hat{\mu}) = PL(\hat{\mu})$$

따라서 다음의 선형행렬 부등식 (18)을 만족하는 대칭 양한정 행렬 P 와 M_i 는 모든 허용가능한 θ 와 $\hat{\mu}$ 에 대해서 선형행렬 부등식 (17)을 만족한다.

$$\begin{aligned} \Psi_{iik} < 0, \quad \Phi_{iik} < 0, \quad i=1,2,3 \quad k=1,2 \\ \Psi_{ijk} + \Psi_{jik} < 0, \quad \Phi_{ijk} + \Phi_{jik} < 0, \quad i=1,2,3, \quad j > i, \quad k=1,2 \end{aligned} \quad (18)$$

여기에서

$$\begin{aligned} \Psi_{ijk} &= A_k^T P + PA_k - C_i^T M_j^T - M_j C_i + 2\alpha P \\ \Phi_{ijk} &= \begin{bmatrix} A_k^T P + PA_k - C_i^T M_j^T - M_j C_i & * & * \\ -M_j^T & -\gamma I & * \\ C_i & I - \gamma I & \end{bmatrix}, \quad M_i = PL_i \end{aligned} \quad (19)$$

이고 A_1 은 $A(\theta)$ 에서 $\theta_1 = 1.75$ 일 때이고 A_2 는 $\theta_1 = 1.85$ 일 때이다.

고장검출 시스템의 개념도를 그림 1에 나타낸다. 그림1에서 고장검출 필터는 식 (13)에서 주어진 바와 같이 제어입력과 플랜트 출력으로부터 오차신호 $z(t)$ 를 출력하고 고장식별기는 $z(t)$ 로부터 고장신호의 추정치 $\hat{f}_s(t)$ 를 출력하여 어느 추정기에서 고장이 발생했는지를 판정해주는 필터이다.

고장식별기는 고장검출 필터처럼 식 (20)의 T-S 퍼지시스템으로 구성한다.

고장식별기 규칙 i ($i=1, 2, 3$)

IF $\hat{\rho}(t)$ is $M_i(\hat{\rho})$,

THEN

$$\dot{\hat{x}}(t) = \overline{A}_i \hat{x}(t) + \overline{B}_i z(t), \quad \hat{f}_s(t) = \overline{C}_i \hat{x}(t) + \overline{D}_i z(t) \quad (20)$$

식 (20)에서 $(\overline{A}_i, \overline{B}_i, \overline{C}_i, \overline{D}_i)$ 는 $\overline{C}_i(sI - \overline{A}_i)^{-1} \overline{B}_i + \overline{D}_i = (-C_i(sI - A_{nom} + L_i C_i)^{-1} L_i + D_f)^{-1}$ 를 만족하도록 결정하며 A_{nom} 은 $A(\theta)$ 에서 θ_1 을 공칭값인 $\theta_1 = 1.8$ 으로 고정한 행렬이다. 식 (20)은 고장검출 필터 (13)의 입력 $f_s(t)$ 에 대한 출력 $z(t)$ 의 근사적인 역시스템(inverse system)이다.

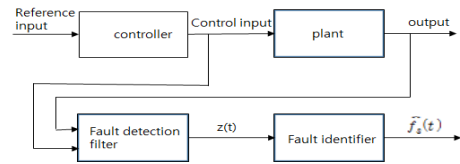


그림 1. 고장검출시스템 개념도

Fig. 1. Fault Detection System Outline

4. 모의실험

앞 절에서 설계한 고장검출 시스템의 성능을 matlab simulink를 사용한 모의실험을 통하여 검증한다. 이를 위하여 먼저 다음의 고장 시나리오를 가정한다.

시나리오 1 : t=200초에서 크기가 10이고 주파수가 0.05Hz인 톱니파의 고장신호를 측정기 y_1 에 인가한다.

시나리오 2 : t=200초에서 크기가 10이고 주파수가 0.05Hz인 구형파의 고장신호를 측정기 y_2 에 인가한다.

시나리오 3 : t=200초에 크기가 noise power가 0.3인 band limited white noise를 고장신호로 측정기 y_3 에 인가한다.

먼저 고장이 없는 정상운전시의 출력을 그림 2에 나타낸다. 드럼 압력 y_1 (점선)은 $108kg/cm^2$, 드럼수위(dash-dot) y_3 는 0m로 유지하면서 전기적 출력(실선) y_2 는 급전 명령에 따라 66.5MW로 운전하다가 300초에 90MW로 500초에 70MW로 운전하고 있다.

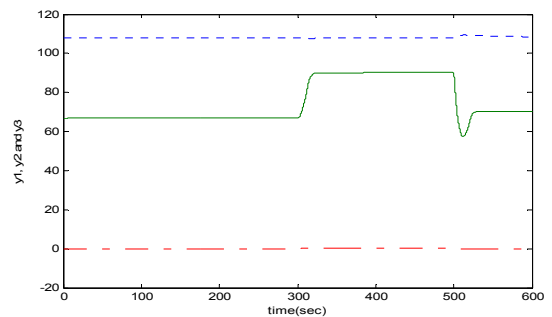


그림 2. 정상운전시의 출력

Fig. 2. Outputs in Normal Operation

드림압력 측정치 y_1 에 시나리오 1의 고장신호가 발생하였을 때 $\hat{f}_{s1}(t)$ 를 그림 3에 $\hat{f}_{s2}(t)$ 와 $\hat{f}_{s3}(t)$ 를 그림 4에 나타낸다. 그림 3에서 $t=200$ 초부터 크기가 10이고 주파수가 0.05Hz인 톱니파가 정확히 추정되었음을 보여준다. 그러나 그림 4에서 보면 $\hat{f}_{s2}(t) = \hat{f}_{s3}(t) = 0$ 이어야 하지만 $\hat{f}_{s2}(t)$ 는 -3과 4사이에서 진동하고 $\hat{f}_{s3}(t)$ 는 거의 0에 가까운 신호로 추정되고 있다. $\hat{f}_{s2}(t)$ 에서 이렇게 큰 오차가 발생한 이유는 y_1 에 고장신호가 발생하면 $\theta_1 \neq \hat{\theta}_1$ 이므로 $A(\theta) \neq A(\hat{\theta})$, $B(\theta) \neq B(\hat{\theta})$, $D(\theta) \neq D(\hat{\theta})$ 이고 따라서 (20)의 근사적인 역시스템은 많은 오차를 갖기 때문이다.

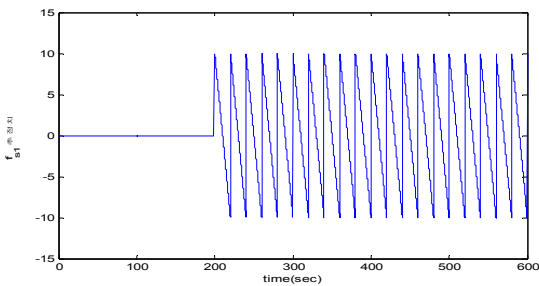


그림 3. 시나리오 1에서 $\hat{f}_{s1}(t)$
Fig. 3. $\hat{f}_{s1}(t)$ in the Fault Scenario 1

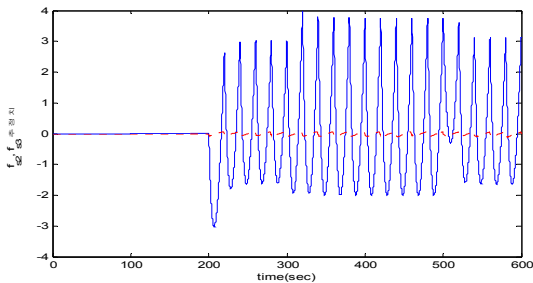


그림 4. 시나리오 10에서 $\hat{f}_{s2}(t)$, $\hat{f}_{s3}(t)$
Fig. 4. $\hat{f}_{s2}(t)$, $\hat{f}_{s3}(t)$ in the Fault Scenario 1

전기적 출력 y_2 에 시나리오 2의 고장상황을 가정하고 실험하여 그림 5의 결과를 얻었다. 그림 5에서 실선은 $\hat{f}_{s2}(t)$ 를 나타내며 $t=200$ 초에 크기가 10인 구형파를 정확히 추정하고 있다. 그림 5에서 $\hat{f}_{s1}(t)$, $\hat{f}_{s3}(t)$ 는 거의 0에 가까운 값을 보인다. 즉 이 경우에는 $\hat{f}_{s1}(t) \approx \hat{f}_{s3}(t) \approx 0$ 이고 $\hat{f}_{s2}(t)$ 만 0이 아닌 값을 주기 때문에 y_2 에 고장이 발생하였다고 판단한다.

시나리오 3의 고장상황에 대하여 실험한 결과를 그림 6에 나타낸다. 그림 6에서 $\hat{f}_{s1}(t) \approx \hat{f}_{s2}(t) \approx 0$ 이고 $\hat{f}_{s3}(t)$ 는 $t=200$ 초부터 -5에서 5 사이의 값을 갖는 신호를 보여준다. 따라서 그림 6으로부터 y_3 에 고장이 발생한 것을 유추할 수

있다.

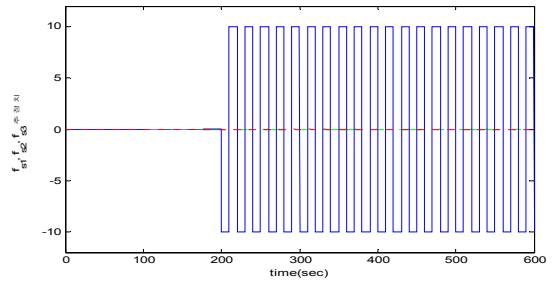


그림 5. 시나리오 2의 고장신호 추정치
Fig. 5. Fault Estimator in the Fault Scenario 2

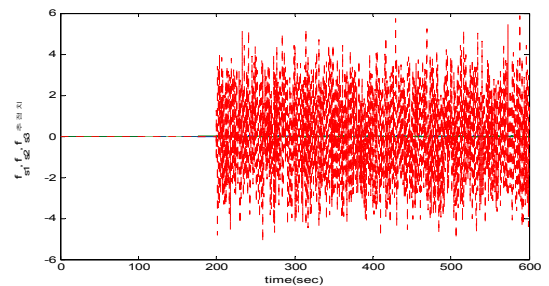


그림 6. 시나리오 3의 고장신호 추정치
Fig. 6. Fault Estimator in the Fault Scenario 3

5. 결론

본 연구에서는 화력발전소 보일러-터빈 제어시스템에서의 고장검출 시스템을 설계하였다. 보일러-터빈의 다입력 다출력 비선형 동특성을 T-S 퍼지시스템으로 표현하였으며 모든 규칙에서는 선형 파라미터 변화 시스템으로 나타내었다. 관측기 기반의 고장검출 필터의 이득은 선형행렬 부등식의 해를 사용하여 구하였다. 고장검출 필터의 출구에 근사적인 역시스템을 연결하여 고장이 발생한 측정기를 식별하였다. 컴퓨터 모의실험 결과 본 연구에서 제시한 고장검출 시스템은 측정기의 고장발생을 조속하게 판정 가능하게 하였다.

References

- [1] J. Gertler, "Analytical redundancy methods in fault detection and isolation", *In Proc. IFAC/IMACS Symp. SAFEPROCESS'91*, Baden-Baden 1991.
- [2] R. Patton and J. Chen, "Robust fault detection using eigenstructure assignment : A tutorial consideration and some new results", *In Proc. of the 30th CDC, England*, pp.2242-2247, 1991.
- [3] J. Chen, R. Patton and H. Zhang, "Design of unknown

input observers and robust fault detection filters”, *Int. J. Control*, vol.63, pp.85-105, 1996.

- [4] P. Frank and X. Ding, “Frequency domain approach to optimally robust residual generation and evaluation for model based fault diagnosis”, *Automatica*, vol.30, no.5, pp.789-804, 1994.
- [5] E. Collins and T. Song, “Multiplier based robust H_∞ estimation with application to robust fault detection”, *In Proc. of the American Control Conference*, pp.4408-4412, San Diego, California, June 1999.
- [6] M.J. Khosrowjerdi, R. Nikoukhah and N. Safari-Shad, “A Mixed H_2/H_∞ Approach to Simultaneous Fault Detection and Control”, *Automatica*, vol.40, pp.261-267, 2004.
- [7] M.J. Khosrowjerdi, R. Nikoukhah and N. Safari-Shad, “Fault Detection in a Mixed H_2/H_∞ Setting”, *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol.50, no.7, pp.1063-1068, July 2005.
- [8] B. Jiang, M. Staroswiecki and V. Cocquempot, “Robust Observer Based Fault Diagnosis for a Class of Nonlinear Systems with Uncertainty”, *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*, pp.161-166, Orlando, Florida, Dec. 2001.
- [9] S. K. Nguang, P. Shi and S. Ding, “Fault Detection for Uncertain Fuzzy Systems : An LMI Approach”, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol.15, no.6, pp.1251-1262, Dec. 2007.
- [10] F. Khani and A. Yazdizadeh, “Boiler-Turbine Unit Controller Design Based on the Extended State Observer”, *IEEE International Conference on Control and Automation*, pp. 2066-2071, Christchurch, New Zealand, Dec. 9-11, 2009.
- [11] X. Liu, P. Guan and C.W. Chan, “Nonlinear Multivariable Power Plant Coordinate Control by Constrained Predictive Scheme”, *IEEE Transactions on Control System Technology*, vol.18, no.5, pp.1116-1125, Sep. 2010.
- [12] S. Boyd, L. Ghaoui, E. Feron and V. Balakrishnan, “Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory”, *SIAM Studies in Applied Mechanics*, 1994.

저 자 소 개



류석환(Seog-Hwan Yoo)

1975년 : 서울대학교 전기공학과 공학사
1979년 : 서울대학교 전기공학과 공학석사
1989년 : U of Florida 전기공학과 공학박사
1991년~현재 : 대구대학교 전자전기공학부
교수

관심분야 : Robust Control, Singular Perturbation

Phone : +82-53-850-6621

E-mail : shryu@daegu.ac.kr