

보일러-터빈 제어시스템의 측정기 고장검출

류 석 환

대구대학교 전자전기공학부

A Sensor Fault Detection for Boiler-Turbine Control System

Yoo, Seog Hwan

School of Electronic Eng'g, Daegu University

<Abstract>

This paper deals with a design of observer based fault detection filter for a boiler-turbine control system. The goal is to present a method for rapid sensor fault detection in order to enhance the reliability of boiler-turbine operation in the thermal power plant. Our fault detection filter can be designed via solutions of linear matrix inequalities. In order to demonstrate the efficacy of our design method, numerical simulations are provided.

Key Words: fault detection, boiler-turbine, linear matrix inequality, multi-input multi-output nonlinear system, fault detection filter

1. 서 론

최근 제어이론과 컴퓨터의 발전으로 아주 복잡한 플랜트에 대해서도 페루프 제어시스템을 안정하게 할 뿐만 아니라 정밀한 제어성능을 줄 수 있는 제어시스템의 구성이 가능하였다. 동적시스템의 안정성과 우수한 제어성능에 대한 꾸준한 수요와 더불어 제어시스템의 신뢰성을 향상시키기 위한 제어시스템의 고장검출기법 관련 연구도 많이 수행되었다. 고장검출과 관련한 주된 기법으로는 관측기의 사용이 주류를 이루고 있다. Duanjin and Qi (2008)는 이산형시스템을 델타연산자로 모델링하여 고장검출 필터를 설계하였고 Wu and Ho (2009), Nguang et al. (2007)은 T-S (Takagi-Sugeno) 퍼지시스템에서 관측기 기반의 고장검출 필터를 설계하였다. Khosrowjerdi et al. (2004, 2005)는 선형 시불변 시스템에서 혼합 H_2/H_∞ 제어기법을 사용하여 고장검출 필터를 설계하였으며 Jiang et al. (2001)은 불확실한 비선형시스템에서 견실한 관측기 기반의 고장검출 필터를 설계하였다. Seliger and Koppen-Seliger (1995)는 원자력발전소의 증기발생기 수위제어시스템에 관측기 기반의 고장검출필터를 적

용하였다.

본 연구에서는 관측기 기반의 고장검출 필터 설계 기법을 화력발전소의 터빈-보일러 제어시스템에 적용하여 측정기에 고장이 발생할 경우 빠른 시간 내에 고장을 검출하고자한다. 화력발전소 터빈-보일러 제어시스템의 이상에 따른 운전정지는 낮은 전력예비율로 전력을 공급하는 현 실정에서 사회적, 경제적 비용이 아주 크다. 따라서 신뢰성있는 화력발전소의 운전을 위해 제어시스템을 구성하는 측정기의 고장을 빨리 검출하여 사고가 확대되는 것을 방지할 필요가 절실히 대두되고 있다. 화력발전소 터빈-보일러 시스템은 전형적으로 다입력-다출력 비선형시스템으로 모델링되어 지며 산업적인 면에서나 제어공학의 이론적인 측면에서도 페루프 제어시스템을 안정화하고 주어진 제어성능을 발휘하는 제어시스템의 설계는 Dimeo and Lee (1995), Tan et al. (2005), Khani and Yazdizadeh (2009)등 많은 연구자들에 의해서 수행되었다.

이 논문은 2절에서 보일러-터빈의 비선형 동적방정식을 기술하고 3절에서 고장검출 필터를 설계한다. 4절에서 컴퓨터 모의실험을 수행한 결과를 보여주고 5절에서 결론을 맺는다.

2. 보일러-터빈 모델

화력발전소의 보일러-터빈 모델은 다입력 다출력의 비선형 미분방정식으로 표현된다. 본 연구에서는 Khani and Yazdizadeh (2009)가 연구한 정격 160MW 급의 스웨덴에서 운전되고 있고 Bell과 Astrom이 확립한 모델을 사용하며 다음의 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -0.0018 u_2 x_1^{9/8} + 0.9u_1 - 0.15u_3 \\ \dot{x}_2 &= (0.073u_2 - 0.016)x_1^{9/8} - 0.1x_2 \\ \dot{x}_3 &= 1.659u_3 - (0.01294u_2 - 0.002235)x_1 \\ y_1 &= x_1 \\ y_2 &= x_2 \\ y_3 &= 0.05(0.13073x_3 + 100a_{cs} + \frac{q_e}{9} - 67.975) \end{aligned} \quad (1)$$

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_e 는 증기특성(steam quality)과 증발률(evaporation rate, kg/s)를 나타내고 다음의 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} a_{cs} &= \frac{(1 - 0.001538x_3)(0.8x_1 - 25.6)}{x_3(1.0394 - 0.0012304x_1)} \\ q_e &= (0.854u_2 - 0.147)x_1 + 45.59u_1 \\ &\quad - 2.514u_3 - 2.096 \end{aligned} \quad (2)$$

입력변수는 액츄에이터의 물리적인 제한 때문에 다음과 같은 제약조건을 갖는다.

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

터빈-보일러 제어시스템의 목표는 증기압력 y_1 과 보일러 수위레벨 y_3 를 적절한 값으로 유지하면서 수요자의 요구에 따라 변화하는 부하변동에 따라 전기적 출력 y_2 를 생산하도록 제약조건 (3)을 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 제어시스템이 소기의 제어목표를 달성하기가 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 측정기에서 고장이 발생할 경우 고장발생을 빠른 시간 내에 탐지할 수 있도록 고장검출 필터를 설계한다.

3. 고장검출 필터 설계

고장검출 필터를 설계하기 위하여 먼저 출력 y_3 를 Khani and Yazdizadeh (2009)에서와 같이 평형점 $x_{1eq} = 108, x_{2eq} = 66.65,$
 $x_{3eq} = 428, u_{1eq} = 0.34, u_{2eq} = 0.69,$
 $u_{3eq} = 0.433, y_{3eq} = 0$ 에 대해서 선형화하면

$$\begin{aligned} y_3 &= 0.00634(x_1 - x_{1eq}) + 0.00471(x_3 - x_{3eq}) \\ &\quad + 0.253(u_1 - u_{1eq}) + 0.512(u_2 - u_{2eq}) - \\ &\quad 0.014(u_3 - u_{3eq}) + w = 0.00634x_1 + 0.00471x_3 \\ &\quad + 0.253u_1 + 0.512u_2 - 0.014u_3 - y_b + w \end{aligned} \quad (4)$$

와 같이 된다. 여기에서 $y_b = 3.1328, w$ 는 선형화하여 발생한 오차로 불확실한 외란(disturbance)으로 간주한다.

(4)를 이용하여 보일러-터빈 시스템을 (5)와 같이 다시 나타낸다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(\theta)x + B(\theta)u \\ y &= Cx + D_1w + D_2u + D_3f \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서

$$\begin{aligned}
 x &= \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}, \quad A(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -0.016\theta_1 & -0.10 & 0 \\ 0.002235 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B(\theta) = \begin{bmatrix} 0.9 - 0.0018\theta_2 & -0.15 \\ 0 & 0.073\theta_2 & 0 \\ 0 & -0.01294\theta_3 & 1.659 \end{bmatrix}, \\
 \theta_1 &= x_1^{1/8}, \quad \theta_2 = x_1^{9/8}, \quad \theta_3 = x_1, \\
 y &= \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0.00634 & 0 & 0.00471 \end{bmatrix}, \quad D_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad D_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.253 & 0.512 & -0.014 \end{bmatrix}, \\
 f &= \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}, \quad D_3 = \begin{bmatrix} 100 \\ 010 \\ 001 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{6}$$

이다.

식 (5)는 x_1 이 측정기 y_1 으로 측정 가능하므로 비선형 시스템 (1)을 선형 파라미터 변화 시스템(Linear Parameter Varying System)으로 변환한 형태이다. 또한 f_1, f_2, f_3 는 측정기 y_1, y_2, y_3 에 발생한 고장신호를 나타낸다. 보일러-터빈 계통의 운전에서 보일러 드럼의 압력을 $75 \leq x_1 \leq 140$ 으로 가정할 때 시변 파라미터 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 는 다음과 같이 유계되었다.

$$\begin{aligned}
 1.72 \leq \theta_1 \leq 1.85, \quad 129 \leq \theta_2 \leq 260, \\
 75 \leq \theta_3 \leq 140
 \end{aligned} \tag{7}$$

고장검출 필터는 다음의 (8)과 같은 관측기 형태의 필터를 가정한다.

$$\begin{aligned}
 \dot{\hat{x}} &= A(\theta)\hat{x} + B(\theta)u + L(y - C\hat{x} - D_2u + y_b) \\
 &= (A(\theta) - LC)\hat{x} + (B(\theta) - LD_2)u + Ly + Ly_b \\
 \hat{y} &= C\hat{x} + D_2u - y_b \\
 z &= y - \hat{y} = y - C\hat{x} - D_2u + y_b
 \end{aligned} \tag{8}$$

여기에서 관측기 이득 L 은 관측오차의 동적시스템이 안정하고 불확실성에 견실하도록 결정되어질 행렬이며 $z = y - \hat{y}$ 는 실제출력과 고장검출 필터에서 예측한 출력과의 차이이다.

$e = x - \hat{x}$ 라 정의하면 관측오차의 동적방정식은 다음의 (9)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \dot{e} &= (A(\theta) - LC)e - LD_1w - LD_3f \\
 z &= Ce + D_1w + D_3f
 \end{aligned} \tag{9}$$

(9)로부터 외란 w 와 고장신호가 f 가 없다면 정상 상태에서 $z = 0$ 이 됨을 알 수 있다. 또한 외란 w 에 대한 z 의 민감도(sensitivity)를 적게 유지한다면 z 의 관측으로 고장신호 f 의 발생 유무를 확인할 수 있다. 관측기 이득 L 을 결정하기 위하여 다음의 설계조건을 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 에 대한 출력 z 의 연산자를 T_{zw} 라 할 때 주어진 가급적 작은 $\gamma > 0$ 에 대해서 $\|T_{zw}\|_\infty \leq \gamma$ 를 만족한다.

여기에서 $|e(t)| = (e(t)^T e(t))^{1/2}$ 이고 $\|\cdot\|_\infty$ 는 H_∞ 노름(norm)을 의미한다. 위의 설계조건 1)과 2)를 충족하는 L 은 Boyd et al. (1994)에서와 같이 다음의 선형행렬부등식(Linear Matrix Inequality)을 만족하는 정방행렬 M 과 양한정(positive definite) 대칭행렬 P 를 구한 후 $L = P^{-1}M$ 의 관계식을 이용하여 구한다.

$$\begin{aligned}
 PA_i - MC + A_i^T P - C^T M^T + 2\alpha P < 0, \\
 i = 1, 2
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{bmatrix} PA_i - MC + A_i^T P - C^T M^T - MD_1 & C^T \\ -D_1^T M^T & -\gamma I & D_1^T \\ C & D_1 & -\gamma I \end{bmatrix} < 0, \quad i = 1, 2 \tag{11}$$

여기에서 A_1 은 (6)에서 정의된 $A(\theta)$ 에서 $\theta_1 = 1.72$ 일 경우이고 A_2 는 $\theta_1 = 1.85$ 일 때이다. (10)의 선형행렬 부등식은 설계조건 1)을 만족하기 위해서이고 (11)의 선형행렬 부등식은 설계조건 2)를 만족하기 위해서 도입되었다. (10)과 (11)의 선형행렬부등식은 matlab lmi toolbox를 이용하여 쉽게 계산할 수 있다. 실제 $\alpha = 0.01$, $\gamma = 1.2$ 라 두고 다음과 같이 A_1 , A_2 에 대해서 관측기 이득행렬 L 을 얻었다.

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -0.0275 & -0.10 & 0 \\ 0.00224 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\
 A_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -0.0296 & -0.10 & 0 \\ 0.00224 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 L &= \begin{bmatrix} 0.456 & -0.0143 & 0.0 \\ -0.0143 & 0.355 & 0.0 \\ -0.668 & 0.00151 & 69.6 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{12}$$

4. 모의실험

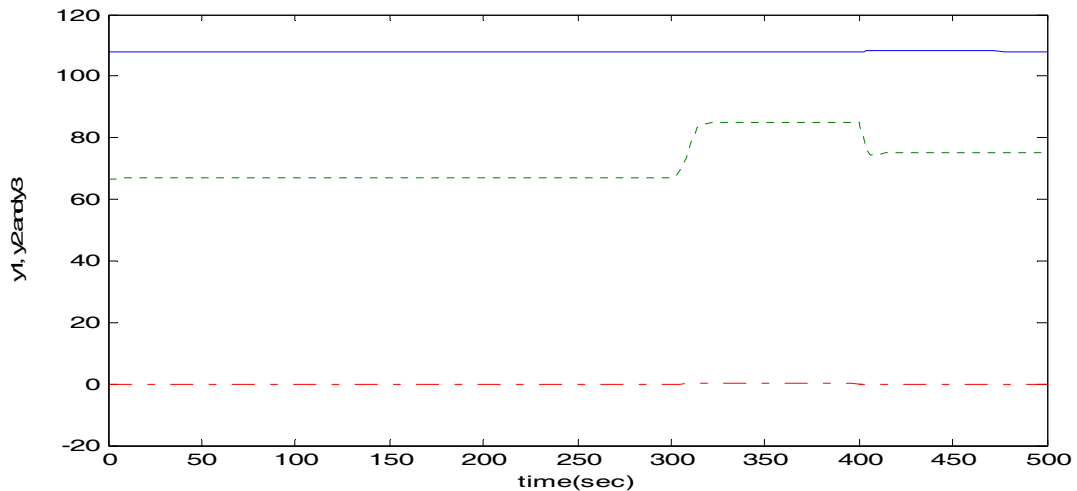
이 절에서는 앞 절에서 제시한 고장검출 필터가 여러 가지 형태의 측정기 고장을 검출할 수 있음을 보여 준다. 모의실험은 matlab simulink를 사용하였다. 운전 조건은 보일러 드림압력 y_1 은 $108kg/cm^2$, 보일러 수위 y_3 를 0으로 유지한 채 전기적 출력 y_2 를 $66.5MW$

로 발전하다가 300초 후에 $85MW$, 400초 후에는 $75MW$ 로 발전하는 것으로 가정하였다. 이 경우 측정기에 고장이 없을 경우 출력을 <그림 1>에 나타낸다. <그림 1>에서 실선은 드림압력, 점선은 전기적 출력, dash-dot는 보일러수위를 나타낸다. 전기적 출력의 변동에도 드림압력과 보일러수위는 설정치를 잘 유지하고 있다.

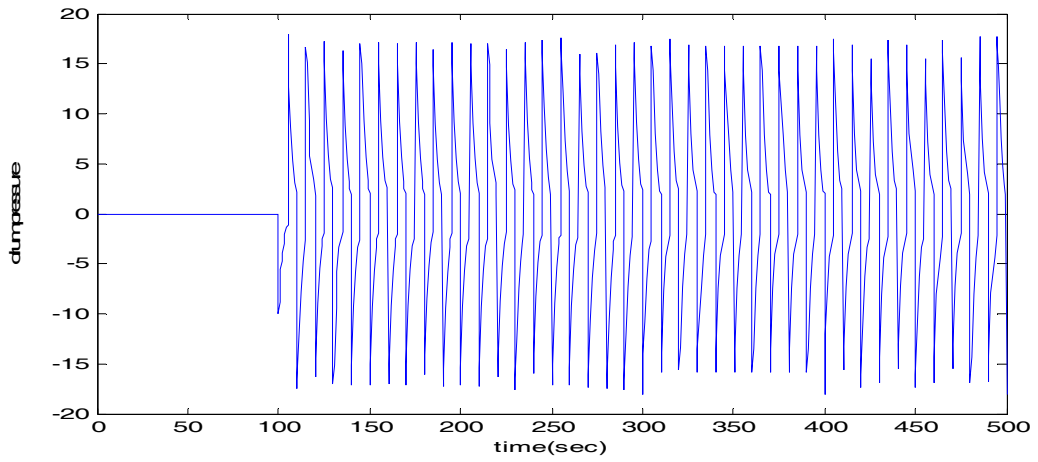
고장발생을 모의하기 위하여 다음의 3가지 시나리오를 가정한다.

- 시나리오 1 : 100초 후 측정기 y_1 에만 주파수 0.1Hz, 진폭 10의 구형파 고장신호를 첨가
- 시나리오 2 : 200초 후 측정기 y_2 에만 10MW의 계단입력 고장신호를 첨가
- 시나리오 3 : 300초 후 측정기 y_3 에만 크기가 0.3이하의 랜덤 신호를 고장신호로 첨가

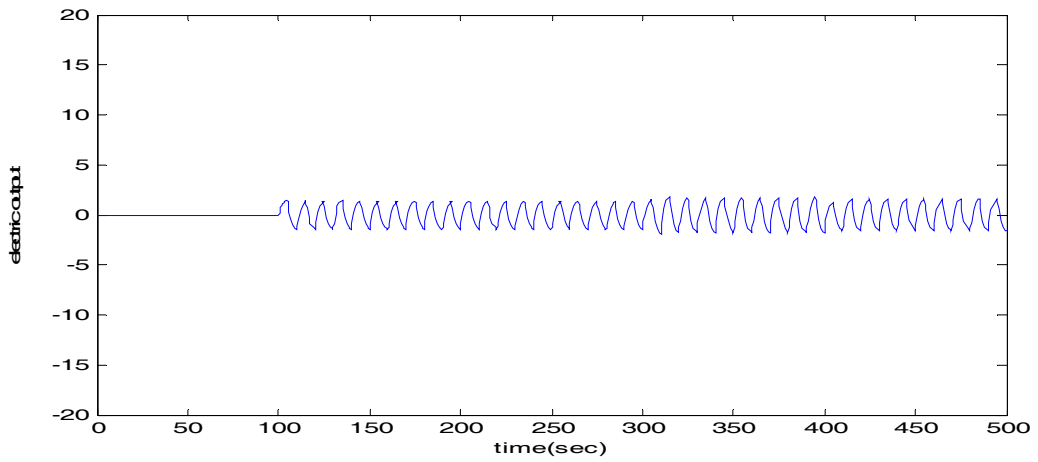
시나리오 1의 경우 고장검출 필터의 출력 $z = [z_1 \ z_2 \ z_3]^T$ 을 <그림 2>~<그림 4>에 나타낸다. z_1, z_2, z_3 는 각각 y_1, y_2, y_3 에 포함된 고장신호의 예측치이다. 시나리오 1에서는 측정기 y_1 에만 고장이 발생하였으나 측정기 y_2, y_3 에도 고장신호가 발생한 것으로 예측되었다. 그러나 y_2, y_3 에서의 고장신호의 크기는 y_1 에 포함된 고장신호의 예측치보다 아주 적은 것을 관찰할 수 있다. 또한 고장발생 시간인 100초 시



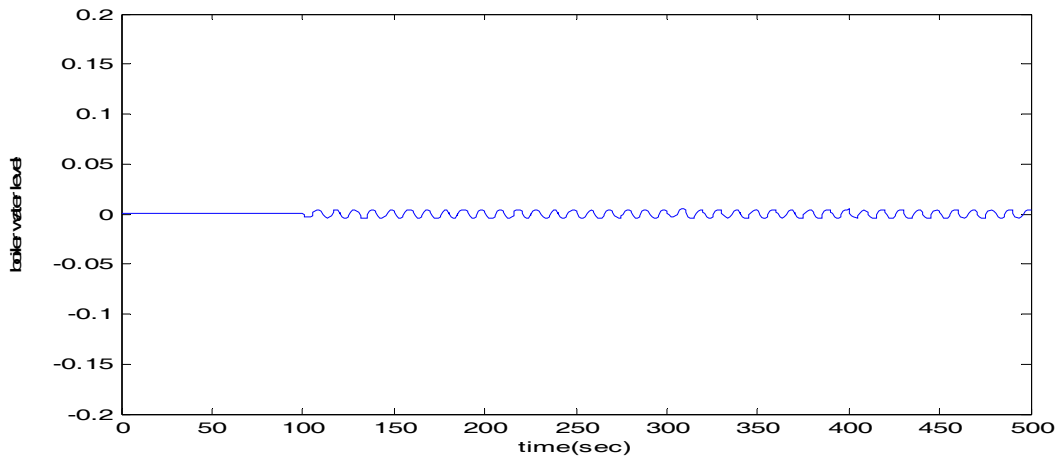
<그림 1> 고장이 없을 경우 출력



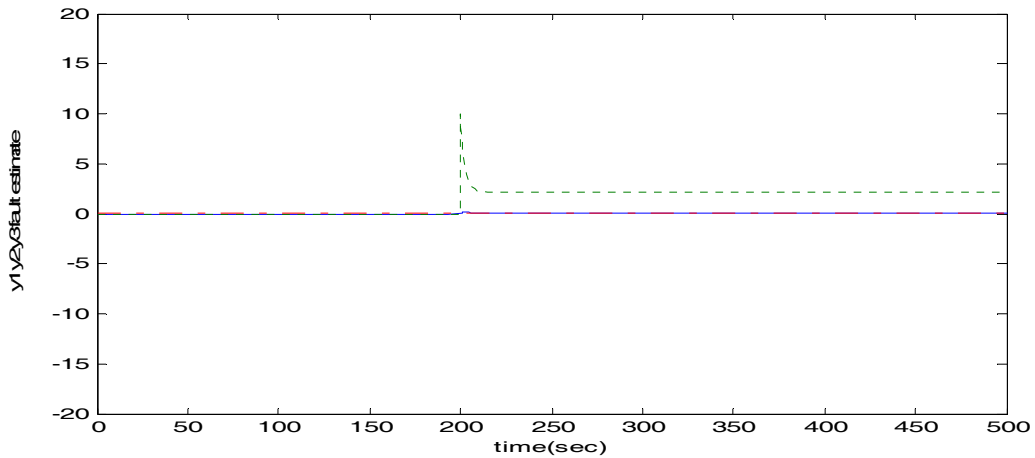
<그림 2> 시나리오 1에서 y_1 고장신호 예측치



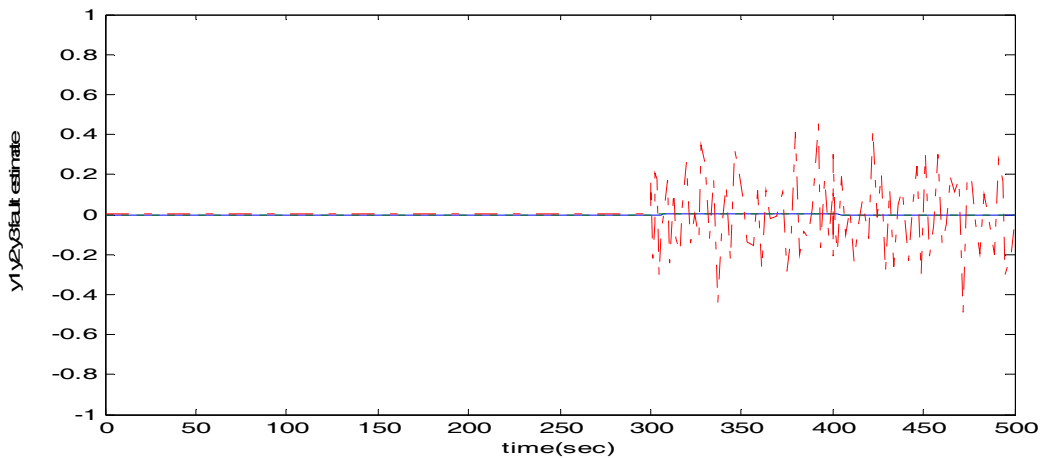
<그림 3> 시나리오 1에서 y_2 고장신호 예측치



<그림 4> 시나리오 1에서 y_3 고장신호 예측



<그림 5> 시나리오 2에서 고장신호 예측



<그림 6> 시나리오 3에서의 고장신호 예측

점에서 고장을 검출할 수 있었다. y_1 의 고장이 z_2, z_3 에 전파된 이유는 식 (8)로 주어지는 고장검출 필터가 시변 파라미터 θ 에 의존적이고 θ 는 y_1 에 의해서 결정되기 때문이다.

시나리오 2에서의 모의실험 결과를 <그림 5>에 나타낸다. z_1, z_2, z_3 는 각각 실선, 점선, dash-dot로 나타내었다. <그림 5>에서 y_2 의 고장에 의해서는 z_2 만 영향을 받고 z_1, z_3 에는 거의 영향을 주지 않았음을 알 수 있다. 또한 고장발생 시간이 200초에서 고장이 검출되고 있다.

마지막으로 시나리오 3에서의 모의실험 결과는 <그

림 6>과 같다. <그림 6>에서도 y_3 에서의 고장은 z_1, z_2 에는 거의 영향을 끼치지 않고 dash-dot로 나타난 z_3 에만 영향을 준다는 것을 볼 수 있다.

다른 형태의 고장파형에 대해서도 많은 실험을 수행하였으며 그 결과 고장검출은 고장발생 시점부터 가능했다. 또한 y_1 에서의 고장은 z_1 에 가장 큰 영향을 주고 z_2, z_3 에 약간의 영향을 주었으나 y_2, y_3 에서의 고장은 z_2, z_3 에만 영향을 주었다. 이러한 사실로부터 3절에서 제시한 방법은 고장검출 뿐만 아니라 고장발생 측정기까지 식별할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

화력발전소용 보일러-터빈 제어시스템에서 측정기의 고장을 탐지하기 위한 고장검출 필터를 설계하였다. 고장검출 필터를 설계하기 위하여 보일러-터빈의 비선형 동적방정식을 선형 파라미터 변화 시스템으로 변환하였다. 필터 이득은 상태변수 추정치의 오차 e 가 지수 감쇄하고 외란에 대한 고장검출 필터 출력의 민감도를 설계자가 설정한 값 이하가 되도록 결정하였다. 모의실험 결과 제시된 고장검출 필터는 고장검출 뿐만 아니라 고장난 측정기까지 식별 가능성을 보여 주었다.

참고문헌

- [1] Z. Duanjin and M. Qi. (2008), Sensor fault detection for the delta operator systems by detection filter approach, Control and Decision Conference, Yantai, Shandong, pp. 560-563
- [2] L. Wu and Ho D.W.C. (2009), Fuzzy Filter Design for Itô Stochastic Systems With Application to Sensor Fault Detection, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 17, No.1, pp.233-242
- [3] S.K. Nguang, P. Shi and S. Ding. (2007), Fault Detection for Uncertain Fuzzy Systems: An LMI Approach, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol.15, No.6, pp.1251-1262
- [4] M.J. Khosrowjerdi, R. Nikoukhah and N. Safari- Shad. (2005), Fault Detection in a Mixed H_2/H_∞ Setting, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.50, No.7, pp.1063-1068
- [5] M.J. Khosrowjerdi, R. Nikoukhah and N. Safari- Shad. (2004), A Mixed H_2/H_∞ Approach to Simultaneous Fault Detection and Control, Automatica, Vol.40, pp.261-267
- [6] B. Jiang, M. Staroswiecki and V. Cocquempot. (2001), Robust Observer Based Fault Diagnosis for a Class of Nonlinear Systems with Uncertainty, Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, FL, pp.161-166
- [7] R. Seliger and B. Koppen-Seliger. (1995), Robust Nonlinear Observer Based Fault Detection for an U-Tube Steam Generator, Proceedings of the American Control Conference, Seattle, Washington, pp.1134-1135
- [8] R.M. Dimeo and K.Y. Lee. (1995), Boiler-Turbine Control System Design Using A Genetic Algorithm, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.10, No.4, pp.752-759
- [9] W. Tan, H.J. Marquez and T. Chen. (2005), Analysis and Control of a Nonlinear Boiler-Turbine Unit : A Conceptual Solution, Automatica, Vol.15, pp.883-891
- [10] F. Khani and A. Yazdizadeh. (2009), Boiler-Turbine Unit Controller Design Based on the Extended State Observer, Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Control and Automation, Christchurch, New Zealand, Dec. 9-11, pp.2066-2071
- [11] S. Boyd, L. Ghaoui, E. Feron and V. Balakrishnan. (1994), Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory, SIAM Studies in Applied Mathematics