

원전 증기발생기 수위제어계통의 고장검출 시스템 설계

A Fault Detection System Design for Nuclear Steam Generator Level Control System

류석환* · 최병재*

Seog-Hwan Yoo and Byung-Jae Choi

* 대구대학교 전자공학부

요 약

본 논문에서는 원전 증기발생기 수위제어계통을 위한 고장검출 시스템을 설계한다. 이를 위하여 증기발생기 수위제어계통의 비선형 동적방정식을 미지의 매개변수를 갖는 T-S 퍼지시스템으로 모델링하고 좌 소인수 분해를 이용하여 오차발생기를 설계한다. 고장검출의 성능을 향상시키기 위하여 고장검출 필터의 설계법을 제안한다. 제시한 방법의 효용성을 컴퓨터 모의실험을 통하여 입증한다.

Abstract

This paper deals with a fault detection system design for nuclear steam generator water level control system. We expressed the nonlinear properties of the steam generator level system as a T-S fuzzy system with time varying uncertain parameters. We design a residual generator using a left coprime factorization of the T-S fuzzy model and a fault detection filter in order to improve the fault detection performance. We demonstrate the efficiency of the suggested design method via many computer simulations.

Key words : T-S 퍼지시스템, 원전 증기발생기, 고장검출 시스템, 좌소인수분해, 선형행렬부등식

1. 서 론

제어시스템에서의 고장이란 제어시스템을 구성하는 기기들의 오작동을 의미하며 이러한 오작동은 전체 시스템의 전반적인 제어능을 악화시킬 뿐만 아니라 안전성에 치명적인 결과를 초래하여 막대한 인적, 재산적인 피해를 입힐 수 있다. 제어시스템의 정상 운전 중에 이러한 시스템 구성요소의 오작동을 조기에 발견하여 제어시스템이 극한적인 상황으로 발전되지 않도록 하기위하여 고장검출 시스템의 설치는 아주 중요하다. 이러한 이유로 최근 현대제어이론의 급속한 발달과 더불어 안전운전이 필수적인 자동제어 시스템에서의 고장검출 시스템의 설계에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 원자력발전소 증기발생기 수위제어계통에서 고장검출 시스템의 설치에 제어시스템의 오작동으로 인한 운전정지를 예방하여 전력의 안정적인 공급뿐만 아니라 방사능 오염의 예방이라는 원전 안전성의 측면에서도 크게 기여할 수 있다.

고장검출 시스템 설계는 주로 오차신호(residual signal)를 발생하여 오차신호의 크기로부터 고장의 유무를 판정하는 방법으로 연구가 되었다. 오차발생기(residual generator)를 설계하기 위하여 견실한 parity 방정식의 사용[1], 고유구조의 할당[2], 미지입력 관측기[3], H_{∞} 최적 추정기의 사용[4,5] 등의 많은 연구가 진행되었으나 이러한 연구결과는 주로 선형 시스템에 국한되어 발전되었다. 따라서 이러한 결과는 발전

전력의 크기에 따라 동작점이 크게 변화하는 비선형 시스템으로 모델링되는 원전 수위제어 계통에서는 직접 적용하기가 어렵다.

최근 비선형시스템의 제어를 위한 한 가지 방법으로 퍼지 제어 방식의 도입에 대한 연구가 많이 이루어졌다. 특히 비선형 시스템을 T-S(Takagi-Sugeno) 퍼지시스템으로 모델링한 후 제어시스템을 설계하고 해석하는 여러 가지 기법이 많이 제안되었다[6-8]. T-S 퍼지시스템은 비선형 시스템의 전역적인 특성을 나타내기 위하여 여러 동작점에서 선형시스템으로 나타내고 퍼지 IF-THEN 규칙에 의하여 시스템을 표현한다. T-S 퍼지시스템으로 비선형시스템을 모델링할 경우의 장점은 선형시스템에서 발전된 많은 제어이론, 특히 시변 불확실한 매개변수를 갖는 선형시스템의 견실제어이론을 쉽게 확장하여 비선형시스템의 제어에 활용할 수 있다. 본 연구에서도 비선형 시스템인 원전 수위제어계통을 T-S 퍼지시스템으로 모델링하고 견실제어이론을 사용하여 고장검출 시스템을 설계하고자한다.

가압경수로는 우리나라에 운전 중인 원자력 발전소의 90% 이상을 차지하고 있는 원자력 발전소의 한 종류이다. 가압경수로는 크게 1차계통과 2차계통으로 분리된 순환계통을 가지고 있다. 1차계통은 농축된 우라늄을 핵연료로 사용하여 원자로에서 발생된 핵분열 에너지를 원자로 냉각재(reactor coolant)에 전달하고, 가압된 원자로 냉각재가 증기발생기의 u-tube 내를 흐르게 하는 계통이다. 2차계통은 u-tube 내의 원자로냉각재로부터 열전달에 의해 증기발생기에서 증기를 만들고 이 증기를 이용하여 터빈 발전기를 구동한 후 응축기에서 증기를 응축하여 다시 증기발생기로 되돌려 보내는 순환 시스템이다. 증기발생기는 원자력 발전소의 1차계통과 2차계통을 분리하여 방사능에 오염될 가능성이

접수일자 : 2005년 9월 29일

완료일자 : 2006년 3월 27일

감사의 글 : 본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R2005-B-132)주관으로 수행된 과제임.

많은 원자로 냉각재의 외부 유출을 차단하는 중요한 기기이다. 증기발생기의 수위가 설정치보다 높으면 증기에 습분이 많아 터빈 날개에 손상을 가하기가 쉬우며 수위가 설정치보다 낮으면 증기발생기의 u-tube가 녹아서 1차계통의 원자로 냉각재가 터빈계통으로 유입될 확률이 높아 냉각재 상실사고의 위험을 초래한다. 따라서 증기발생기 수위제어계통은 원자력 발전소의 안전운전을 위해 엄밀히 제어되어야 하는 아주 중요한 제어계통이다.

본 연구에서는 원전 증기발생기 수위제어계통을 위한 고장검출 시스템을 설계하고자한다. 고장검출 시스템의 설계에서 간략화를 위해 다음과 같이 제한된 경우만 고려한다. 1) 통상 고장검출 시스템에서 검출하고자하는 고장신호는 액추에이터 고장과 출력 측정기 고장이지만, 원전 증기발생기 수위제어계통에서는 입력량인 급수량(feedwater flowrate)이 측정되기 때문에 제어기에서 계산된 급수량 명령치와 급수량 측정치를 비교하면 액추에이터 고장이 쉽게 검출되므로 검출할 고장신호의 대상을 수위측정기의 고장신호로 국한한다. 2) 고장검출 시스템은 제어시스템이 정상적인 운전 중에 발생 가능한 고장을 검출하는 것이 목적이므로 원전이 초기 기동상태를 지나 정상적인 운전(정격 발전량의 50%이상 발전)중에서 발생하는 고장을 검출한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2절에서는 수위제어계통을 T-S 퍼지시스템으로 모델링하고, 3절에서 좌 소인수 분해(left coprime factorization)를 이용하여 오차발생기를 설계하고 고장검출을 용이하게 하도록 하는 고장검출 필터의 설계법을 제안한다. 4절에서는 컴퓨터 모의실험을 통해 3절에서 설계한 고장검출 시스템의 성능을 분석하고 마지막으로 5절에서 결론을 맺는다.

본 논문의 표기법은 통상의 표기법을 따른다. 굵은 글씨체는 시스템을 의미하며 $M(u)$ 는 퍼지시스템을 $W(s)$ 는 전달함수로 표현된 선형시불변 시스템을 나타낸다. $\|\cdot\|_\infty$ 는 시스템의 H_∞ 노름을 의미하고 $\|\cdot\|_2$ 는 연속신호의 L_2 노름을 의미한다. 행렬 A 에 대해서 A^T 는 A 의 전치행렬을 나타내고 $A > 0$ 는 A 가 양한정 행렬임을 의미한다. 블록 대칭행렬에서 (i, j) 블록에서의 *는 (j, i) 블록행렬의 전치행렬을 나타낸다.

2. 증기발생기 수위제어 계통

원전 증기발생기 수위계통의 동적방정식은 급수량, 증기량(steam flowrate), 증기발생기 수위로 나타낼 수 있다. Irving[9]은 급수량과 증기량의 계단입력에 대한 수위의 응답으로부터 다음의 4차로 표현되는 전달함수 모델을 얻었다.

$$\begin{aligned}
 y(s) &= \frac{g_1}{s}(u(s) - d(s)) - \frac{g_2}{1 + \tau_2 s}(u(s) - d(s)) \\
 &+ \frac{g_3 s}{\tau_1^{-2} + 4\pi^2 T^{-2} + 2\tau_1^{-1}s + s^2} u(s) \quad (1) \\
 &= \frac{g_1}{s}(u(s) - d(s)) - \frac{a_4}{s + a_1}(u(s) - d(s)) \\
 &+ \frac{a_5 s}{s^2 + 2a_3 s + a_2} u(s)
 \end{aligned}$$

여기에서 τ_1 과 τ_2 는 계통 시정수이고 T 는 기계적 진동 주기, g_1 은 mass capacity 효과의 크기, g_2 는 급수량과 증기량에 의한 팽창 혹은 수축을 나타내는 크기, g_3 는 기계적

진동의 크기를 나타낸다. $a_1 = 1/\tau_2$, $a_2 = \tau_1^{-2} + 4\pi^2 T^{-2}$, $a_3 = 1/\tau_1$, $a_4 = g_2/\tau_2$, $a_5 = g_3$ 은 공칭 매개변수로 표1로부터 계산되며 전력량에 따라 변화하는 량이다.

증기발생기 수위계통의 동적방정식 (1)은 단일입력(급수량 $u(s)$), 단일출력(수위 $y(s)$)을 가지는 단일입출력 시스템이고 증기량 $d(s)$ 는 측정 가능한 외란으로 간주한다.

표 1 수위제어시스템 공칭모델

전력량 (%)	τ_1	τ_2	g_1	g_2	g_3	T
50	34.8	3.6	0.058	1.05	0.215	14.2
100	28.6	3.4	0.058	0.47	0.105	11.7

공칭 매개변수 a_1, a_2, \dots, a_5 의 실제량 $\overline{a_1}, \overline{a_2}, \dots, \overline{a_5}$ 는 공칭값과 $\pm 10\%$ 이내의 오차범위에 있다고 가정한다. 즉, $\overline{a_i} = (1 + 0.1\theta_i)a_i$, ($i=1, \dots, 5$)이고 $|\theta_i| \leq 1$ 이다. 전달함수 모델 (1)에서 다음의 T-S 퍼지모델을 얻는다.

플랜트 규칙 i ($i=1, 2$)

만약 $p(t)$ 가 M_i 이면

$$\begin{aligned}
 \dot{x}(t) &= A_i x(t) + Fp(t) + B_i u_a(t) \quad (2) \\
 q(t) &= H_i x(t) + J_i u_a(t) \\
 y(t) &= Cx(t) \\
 p(t) &= \Theta(t)q(t)
 \end{aligned}$$

여기에서 $p(t)$ 는 전제변수이며 전력량(%)을 의미하고, 퍼지집합 M_1, M_2 는 $M_1 = -\frac{1}{50}p(t) + 2$, $M_2 = \frac{1}{50}p(t) - 1$ 이라 정의한다. $x(t)$ 는 상태변수, $y(t)$ 는 수위이며, $p(t)$ 와 $q(t)$ 는 매개변수 불확실성과 관련된 변수이다. $\Theta(t)$ 는 불확실한 시변 매개변수 행렬이고 $\Theta(t) = \text{diag}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_5)$ 로 정의되며 $\Theta^T(t)\Theta(t) \leq I$ 를 만족하며, $u_a(t) = \begin{bmatrix} u(t) \\ d(t) \end{bmatrix}$ 이다. A_1, A_2, \dots, C 는 상수행렬로 다음과 같다.

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.2778 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -0.1966 & -0.0575 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0.2917 & -0.2917 \\ 0 & 0 \\ 0.2150 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.2941 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -0.2896 & -0.0699 \end{bmatrix},$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0.1382 & -0.1382 \\ 0 & 0 \\ 0.1050 & 0 \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = [0.058 \quad -1 \quad 0 \quad 1]$$

$$J_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0.0292 & -0.0292 \\ 0.0215 & 0 \end{bmatrix}, \quad J_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0.0138 & -0.0138 \\ 0.0105 & 0 \end{bmatrix}$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.0278 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0197 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0029 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, H_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.0294 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0290 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0035 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

정규화된 소속함수 μ_i , ($i=1,2$)를 다음과 같이 정의한다.

$$\mu_i = \frac{M_i}{M_1 + M_2} = M_i \quad (3)$$

(3)에서 정의된 μ_i 를 이용하여 퍼지 시스템 (2)를 (4) 혹은 행렬을 이용하여 (5)와같이 표현한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^2 \mu_i (A_i x(t) + F p(t) + B_i u_a(t)) \\ &= A_\mu x(t) + F p(t) + B_\mu u_a(t) \\ q(t) &= \sum_{i=1}^2 \mu_i (H_i x(t) + J_i u_a(t)) \\ &= H_\mu x(t) + J_\mu u_a(t) \\ y(t) &= C x(t) \\ p(t) &= \Theta(t) q(t) \end{aligned} \quad (4)$$

$$G(\mu) = \left[\begin{array}{c|c|c} A_\mu & F & B_\mu \\ \hline H_\mu & 0 & J_\mu \\ \hline C & 0 & 0 \end{array} \right] \quad (5)$$

3. 고장검출 시스템 설계

3.1 오차발생기의 설계

이절에서는 퍼지시스템 (5)에서 소인수분해를 이용하여 오차발생기를 설계하고자한다. L_μ 를 $A_\mu + L_\mu C$ 가 2차 안정한(quadratically stable) 출력 주입행렬(output injection matrix)이라 정의한다. 그러면 $G(\mu) = \mathcal{M}(\mu)^{-1} \mathcal{N}(\mu)$ 로 나타낼 수 있다. 여기에서 $\mathcal{M}(\mu)$, $\mathcal{N}(\mu)$ 는 $G(\mu)$ 의 좌 소인수(left coprime factor)라 부르며 다음과 같다.

$$\left[\begin{array}{c|c|c} \tilde{M}(\mu) & \tilde{N}(\mu) \\ \hline A_\mu + L_\mu C & F & L_\mu & B_\mu \\ \hline H_\mu & 0 & 0 & J_\mu \\ \hline C & 0 & I & 0 \end{array} \right] \quad (6)$$

$\mathcal{M}_0(\mu)$, $\mathcal{N}_0(\mu)$ 를 $\mathcal{M}(\mu)$, $\mathcal{N}(\mu)$ 의 공칭시스템이라 정의한다. 즉,

$$\left[\begin{array}{c|c|c} \tilde{M}_0(\mu) & \tilde{N}_0(\mu) \\ \hline A_\mu + L_\mu C & L_\mu & B_\mu \\ \hline C & I & 0 \end{array} \right] \quad (7)$$

공칭 좌 소인수 $\mathcal{M}_0(\mu)$, $\mathcal{N}_0(\mu)$ 를 이용하여 다음과 같이 오차발생기를 구성한다.

$$e(t) = Q(\mu) (\mathcal{M}_0(\mu) y_m(t) - \mathcal{N}_0(\mu) u_a(t)) \quad (8)$$

여기에서 $Q(\mu)$ 는 고장검출 성능을 향상시키기 위하여 도입될 고장검출 필터이고 $y_m(t)$ 는 수위센서의 측정값이며 실제 수위 $y(t)$ 와 수위센서의 고장신호 $y_f(t)$ 의 합 즉,

$y_m(t) = y(t) + y_f(t)$ 로 나타낼 수 있다.

좌 소인수 분해의 정의로부터

$$0 = \tilde{\mathcal{M}}(\mu) y(t) - \tilde{\mathcal{M}}(\mu) u_a(t) \quad (9)$$

의 관계가 성립한다. (9)를 이용하여 (8)을 정리하면 오차신호는 다음과 같이 표현된다.

$$e(t) = Q(\mu) (e_d(t) + e_f(t)) \quad (10)$$

여기에서

$$\begin{aligned} e_d(t) &= (\tilde{\mathcal{M}}(\mu) - \tilde{\mathcal{N}}_0(\mu)) u_a(t) - (\tilde{\mathcal{M}}(\mu) - \tilde{\mathcal{M}}_0(\mu)) y_m(t), \\ e_f(t) &= \tilde{\mathcal{M}}(\mu) y_f(t) \end{aligned}$$

(10)에서 $e_d(t)$ 는 시스템의 모델 불확실성으로 기인한 오차신호의 성분이고 $e_f(t)$ 는 고장신호에 의한 오차신호의 성분이다. 즉, 고장이 발생하지 않더라도 오차신호는 모델 불확실성 때문에 0이 되지 않는다.

3.2 고장검출 필터의 설계

오차신호로부터 고장을 효과적으로 검출하기 위해서 고장검출 필터 $Q(\mu)$ 를 사용한다. 고장검출 필터는 오차신호가 모델 불확실성에 대해서는 가급적 영향을 받지 않게 하고 고장신호에 대해서는 민감하게 영향을 받을 수 있도록 설계한다. 필터를 설계하기 위하여 먼저 소인수 불확실성을 다음과 같이 LFT(Lower Fractional Transformation)의 형태로 표시한다.

$$\left[\begin{array}{c|c} \mathcal{M}(\mu) - \mathcal{M}_0(\mu) & \mathcal{N}(\mu) - \mathcal{N}_0(\mu) \\ \hline P_{21}(\mu)\Theta(t) & (I - P_{11}(\mu)\Theta(t))^{-1} P_{12}(\mu) \end{array} \right] = \quad (11)$$

여기에서

$$\left[\begin{array}{c|c} P_{11}(\mu) & P_{12}(\mu) \\ \hline P_{21}(\mu) & P_{22}(\mu) \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c|c} A_\mu + L_\mu C & 0 & F & L_\mu & B_\mu \\ \hline 0 & A_\mu + L_\mu C & 0 & L_\mu & B_\mu \\ \hline H_\mu & 0 & 0 & 0 & J_\mu \\ \hline C & -C & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \quad (12)$$

(11)을 이용하면 오차신호 (10)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$e(t) = Q(\mu) (P_{21}(\mu) w_e(t) + \tilde{\mathcal{M}}(\mu) y_f(t)) = Q(\mu) r(t) \quad (13)$$

여기에서 $w_e(t) = \Delta P_{12}(\mu) \begin{bmatrix} -y_m(t) \\ u_a(t) \end{bmatrix}$,

$\Delta = \Theta(t)(I - P_{11}(\mu)\Theta(t))^{-1}$ 이다.

(13)에서 $e(t)$ 가 고장신호 $y_f(t)$ 에 민감하고 모델 불확실성에 기인한 $w_e(t)$ 의 영향을 적게 받도록 하기위하여 그림1의 시스템을 생각한다.

그림1에서 $W_r(s)$ 는 $e(t)$ 가 $y_f(t)$ 에 민감하게 반응을 하도록 설계자가 선정할 기준 시스템으로 통상 저역통과 필터의 특성을 갖는 선형시불변 시스템으로 선정한다. 따라서 필터는 적절한 γ_1 과 γ_2 에 대해서 $e(t)$ 가 $w_e(t)$ 에 민감하게 반응하지 않도록 $\|Q(\mu)P_{21}(\mu)\|_\infty < \gamma_2$, $e(t)$ 가 고장신호 $y_f(t)$ 에 민감하게 반응하도록 $\|W_r(s) - Q(\mu)\tilde{\mathcal{M}}(\mu)\|_\infty < \gamma_1$ 이 되도록 $Q(\mu)$ 를 설계한다.

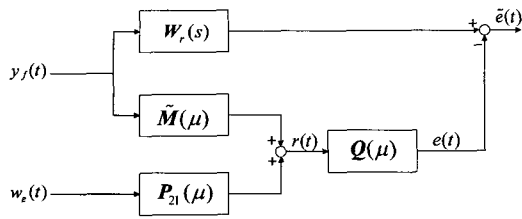


그림 1. 고장검출 필터 설계용 일반화 플랜트

$W_r(s)$ 의 상태공간 구현을 $(A_w, B_w, C_w, 0)$ 이라 하면 그림1에서 $W_r(s)$ 를 포함한 일반화된 플랜트는 (6)과 (12)를 이용하면 다음과 같이 상태공간에서 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_{a,\mu}x(t) + F_a p(t) + B_{1a}w_e(t) + B_{2a,\mu}y_f(t) \\ q(t) &= H_{a,\mu}x(t) \\ y_f(t) &= L_a x(t) \\ r(t) &= C_{a,\mu}x(t) + D_a y_f(t) \\ p(t) &= \Theta(t)q(t) \end{aligned} \quad (14)$$

여기에서

$$\begin{aligned} A_{a,\mu} &= \begin{bmatrix} A_{\mu} + L_{\mu}C & 0 & 0 \\ 0 & A_{\mu} + L_{\mu}C & 0 \\ 0 & 0 & A_w \end{bmatrix}, \quad F_a = \begin{bmatrix} F \\ 0 \end{bmatrix}, \\ B_{1a} &= \begin{bmatrix} 0 \\ F \end{bmatrix}, \quad B_{2a,\mu} = \begin{bmatrix} L_{\mu} \\ 0 \\ B_w \end{bmatrix}, \\ H_{a,\mu} &= [H_{\mu} \ 0 \ 0], \quad L_a = [0 \ 0 \ C_w], \\ C_{a,\mu} &= [C \ C \ 0], \quad D_a = I \end{aligned}$$

본 연구에서는 퍼지필터 $Q(\mu)$ 를 다음과 같은 형태의 상태공간 구현을 갖도록 설계하고자한다.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_F(t) &= A_{F,\mu} \tilde{x}_F(t) + B_{F,\mu} r(t) \\ e(t) &= C_{F,\mu} \tilde{x}_F(t) \end{aligned} \quad (15)$$

여기에서 퍼지필터 상태변수 x_F 의 차원은 (14)의 일반화 플랜트의 상태변수 x 와 차원이 동일하다. (14)와 (15)를 결합한 오차시스템은

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_c(t) &= A_{c,\mu} \tilde{x}_c(t) + F_c p(t) + B_{1c}w_e(t) + B_{2c,\mu}y_f(t) \\ q(t) &= H_{c,\mu} \tilde{x}_c(t) \\ \tilde{e}(t) &= C_{1c,\mu} \tilde{x}_c(t) \\ e(t) &= C_{2c,\mu} \tilde{x}_c(t) \\ p(t) &= \Theta(t)q(t) \end{aligned} \quad (16)$$

여기에서

$$\begin{aligned} \tilde{x}_c(t) &= \begin{bmatrix} x(t) \\ x_F(t) \end{bmatrix}, \quad A_{c,\mu} = \begin{bmatrix} A_{a,\mu} & 0 \\ B_{F,\mu}C_a & A_{F,\mu} \end{bmatrix}, \quad F_c = \begin{bmatrix} F_a \\ 0 \end{bmatrix}, \\ B_{1c} &= \begin{bmatrix} B_{1a} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_{2c,\mu} = \begin{bmatrix} B_{2a,\mu} \\ B_{F,\mu}D_a \end{bmatrix}, \\ H_{c,\mu} &= [H_{a,\mu} \ 0], \quad C_{1c,\mu} = [L_a \ -C_{F,\mu}], \\ C_{2c,\mu} &= [0 \ C_{F,\mu}] \end{aligned}$$

이다.

정리 1 : 모든 가능한 μ 에 대해서 선형행렬 부등식 (17)과 (18)을 만족하는 양한정 행렬 $P=P^T>0$, $S=S^T>0$, $R=R^T>0$ 이 존재하면 오차시스템 (16)에서 $\|T_{-ey}\|_{\infty} < \gamma_1$, $\|T_{ew_e}\|_{\infty} < \gamma_2$ 를 만족한다. 여기에서 $S\Theta(t) = \Theta(t)S$,

$R\Theta(t) = \Theta(t)R$ 이고 $T_{ew_e} = Q(\mu)P_{21}(\mu)$, $T_{-ey} = W_r(s) - Q(\mu)M(\mu)$ 이다.

$$\Phi(\mu) = \begin{bmatrix} A_{c,\mu}^T P + PA_{c,\mu} & * & * & * & * \\ B_{2c,\mu}^T P & -\gamma_1 I & * & * & * \\ C_{1c,\mu} & 0 & -\gamma_1 I & * & * \\ F_c^T P & 0 & 0 & -S & * \\ SH_{c,\mu} & 0 & 0 & 0 & -S \end{bmatrix} < 0 \quad (17)$$

$$\Psi(\mu) = \begin{bmatrix} A_{c,\mu}^T P + PA_{c,\mu} & * & * & * & * \\ B_{1c}^T P & -\gamma_2 I & * & * & * \\ C_{2c,\mu} & 0 & -\gamma_2 I & * & * \\ F_c^T P & 0 & 0 & -R & * \\ RH_{c,\mu} & 0 & 0 & 0 & -R \end{bmatrix} < 0 \quad (18)$$

(증명) 먼저 선형행렬 부등식 (17)을 만족하면 $\|T_{-ey}\|_{\infty} < \gamma_1$ 임을 증명한다. 오차시스템 (16)에서 $w_e(t) \equiv 0$ 라 둔다. 리아푸노프 후보함수 $V(x_c) = x_c(t)^T P x_c(t)$ 를 정의하고 미분하면 다음의 관계식이 성립한다.

$$\begin{aligned} & \int_0^{\infty} (\gamma_1^{-1} \tilde{e}(t)^T \tilde{e}(t) - \gamma_1 y_f(t)^T y_f(t)) dt \\ &= \int_0^{\infty} (\gamma_1^{-1} \tilde{e}(t)^T \tilde{e}(t) - \gamma_1 y_f(t)^T y_f(t) + V(x_c)) dt \\ & \quad + V(x_c(0)) - \lim_{t \rightarrow \infty} V(x_c(t)) \\ & \leq \int_0^{\infty} (\gamma_1^{-1} \tilde{e}(t)^T \tilde{e}(t) - \gamma_1 y_f(t)^T y_f(t) + V(x_c) \\ & \quad + q(t)^T S q(t) - p(t)^T S p(t)) dt \\ &= \int_0^{\infty} \zeta(t)^T L(\mu) \zeta(t) dt \end{aligned} \quad (19)$$

여기에서

$$\begin{aligned} \zeta(t)^T &= [x_c(t)^T \ y_f(t)^T \ p(t)^T], \\ L(\mu) &= \begin{bmatrix} \gamma_1^{-1} C_{1c,\mu}^T C_{1c,\mu} + A_{c,\mu}^T P + PA_{c,\mu} + H_{c,\mu}^T S H_{c,\mu} & * & * \\ B_{2c,\mu}^T P & -\gamma_1 I & * \\ F_c^T P & 0 & -S \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Schur complement에 의해 $\Phi(\mu) < 0$ 와 $L(\mu) < 0$ 는 동치이므로 $\|T_{-ey}\|_{\infty} < \gamma_1$ 이다. 마찬가지로 방법으로 $\Psi(\mu) < 0$ 를 만족하면 $\|T_{ew_e}\|_{\infty} < \gamma_2$ 를 증명할 수 있다.

지금까지 정리1에서 퍼지필터 설계 요구조건인 $\|T_{-ey}\|_{\infty} < \gamma_1$, $\|T_{ew_e}\|_{\infty} < \gamma_2$ 를 충족하는 충분조건을 제시하였다. 선형행렬 부등식 (17)과 (18)로부터 퍼지필터를 합성하는 방법을 정리2에 기술한다.

정리2 : 다음의 선형행렬 부등식 (20)-(22)를 만족하는 $Y=Y^T>0$, $Z=Z^T>0$, $S=S^T>0$, $R=R^T>0$, \widehat{A}_{fi} , \widehat{B}_{fi} , \widehat{C}_{fi} ($i=1,2$)가 존재하면 $\|T_{ey}\|_{\infty} < \gamma_1$, $\|T_{ew_e}\|_{\infty} < \gamma_2$ 를 만족하는 필터가 존재한다. 여기에서 $S\Theta(t) = \Theta(t)S$, $R\Theta(t) = \Theta(t)R$ 이다.

$$Y - Z > 0 \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} A_{a,i}^T Y + YA_{a,i} + \widehat{B}_{F,i} C_a + C_a^T \widehat{B}_{F,i}^T & * \\ A_{a,i}^T Y + C_a^T \widehat{B}_{F,i}^T + \widehat{A}_{F,i}^T + ZA_{a,i} & A_{a,i}^T Z + ZA_{a,i} \\ B_{2a,i}^T Y + D_a^T \widehat{B}_{F,i}^T & B_{2a,i}^T Z \\ L_a & L_a - \widehat{C}_{F,i} \\ F_a^T Y & F_a^T Z \\ SH_{a,i} & SH_{a,i} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} * & * & * & * \\ * & * & * & * \\ -\gamma_1 I & * & * & * \\ 0 & -\gamma_1 I & * & * \\ 0 & 0 & -S & * \\ 0 & 0 & 0 & -S \end{bmatrix} < 0, \quad i=1,2,$$

$$\begin{bmatrix} A_{a,i}^T Y + YA_{a,i} + \widehat{B}_{F,i} C_a + C_a^T \widehat{B}_{F,i}^T & * \\ A_{a,i}^T Y + C_a^T \widehat{B}_{F,i}^T + \widehat{A}_{F,i}^T + ZA_{a,i} & A_{a,i}^T Z + ZA_{a,i} \\ B_{1a}^T Y & B_{1a}^T Z \\ 0 & \widehat{C}_{F,i} \\ F_a^T Y & F_a^T Z \\ RH_{a,i} & RH_{a,i} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} * & * & * & * \\ * & * & * & * \\ -\gamma_2 I & * & * & * \\ 0 & -\gamma_2 I & * & * \\ 0 & 0 & -R & * \\ 0 & 0 & 0 & -R \end{bmatrix} < 0, \quad i=1,2,$$

(증명) 선형행렬 부등식 (17)과 (18)은 다음과 같이 표현 된다.

$$\Phi(\mu) = \sum_{i=1}^2 \mu_i \Phi_i, \quad \Psi(\mu) = \sum_{i=1}^2 \mu_i \Psi_i \quad (23)$$

여기에서

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} A_{c,i}^T P + PA_{c,i} & * & * & * & * \\ B_{2c,i}^T P & -\gamma_1 I & * & * & * \\ C_{1c,i} & 0 & -\gamma_1 I & * & * \\ F_c^T P & 0 & 0 & -S & * \\ SH_{c,i} & 0 & 0 & 0 & -S \end{bmatrix},$$

$$\Psi_i = \begin{bmatrix} A_{c,i}^T P + PA_{c,i} & * & * & * & * \\ B_{1c}^T P & -\gamma_2 I & * & * & * \\ C_{2c,i} & 0 & -\gamma_2 I & * & * \\ F_c^T P & 0 & 0 & -R & * \\ RH_{c,i} & 0 & 0 & 0 & -R \end{bmatrix}$$

선형행렬 부등식 (17)과 (18)의 해 P 를 다음과 같이 정의 한다.

$$P = \begin{bmatrix} Y & N \\ N^T & \overline{Y} \end{bmatrix}, \quad P^{-1} = \begin{bmatrix} X & M \\ M^T & \overline{X} \end{bmatrix} \quad (24)$$

변환행렬 L_Π 와 Π 를 (25)와 같이 정의하고 $\Pi^T P \Pi > 0$, $L_\Pi^T \Phi_i L_\Pi < 0$, $L_\Pi^T \Psi_i L_\Pi < 0$ 로부터 선형행렬 부등식 (20)-(22)를 얻는다.

$$L_\Pi = \text{diag}(\Pi, I, I, I, D), \quad \Pi = \begin{bmatrix} I & I \\ 0 & M^T Z \end{bmatrix}, \quad Z = X^{-1}. \quad (25)$$

여기에서

$$\widehat{B}_{F,i} = NB_{F,i}, \quad \widehat{C}_{F,i} = C_{F,i} M^T Z, \quad \widehat{A}_{F,i} = NA_{F,i} M^T Z. \quad (26)$$

$Y > Z$ 이므로 $MN^T = I - XY = I - Z^{-1}Y > 0$ 이 성립한다. 따라서 $MN^T = I - Z^{-1}Y$ 를 만족하는 비특이 행렬 M 과 N 을 구하여 (26)으로부터 $A_{F,i}$, $B_{F,i}$, $C_{F,i}$ 를 계산한다. 증명 끝.

3.3 고장발생 판정기준

이 절에서는 고장발생의 여부를 판정하기 위한 기준을 제시한다. 오차신호 (13)에서 고장이 발생하지 않았을 경우에는

$$\|e(t)\|_2 = \|\mathbf{Q}(\mu)P_{21}(\mu)w_e(t)\|_2 \leq \|\mathbf{Q}(\mu)P_{21}(\mu)\|_\infty \|\Delta\|_\infty \|\overline{w}_e(t)\|_2 \quad (27)$$

의 관계가 성립한다. 여기에서 $\overline{w}_e(t) = P_{12}(\mu) \begin{bmatrix} -y_m(t) \\ u_a(t) \end{bmatrix}$

이다.

따라서 유한한 $T > 0$ 에 대해서 다음의 조건을 만족할 때 고장정보 신호를 작동한다.

$$J = \left(\int_{t-T}^t e^T(t)e(t)dt \right)^{1/2} > J_{th} \quad (28)$$

여기에서

$$J_{th} = \|\mathbf{Q}(\mu)P_{21}(\mu)\|_\infty \|\Delta\|_\infty \left(\int_{t-T}^t \overline{w}_e(t)^T \overline{w}_e(t)dt \right)^{1/2}$$

이다.

(28)에서 $\overline{w}_e(t)$ 는 $P_{12}(\mu)$ 가 (12)에서 정의된 기지의 시스템이므로 $y_m(t)$, $u_a(t)$ 로부터 계산가능하다. $\|\mathbf{Q}(\mu)P_{21}(\mu)\|_\infty$ 는 고장검출 필터의 설계조건으로부터 $\|\mathbf{Q}(\mu)P_{21}(\mu)\|_\infty < \gamma_2$ 이다. 그러나 필터의 설계과정에서 2가지의 목적($\|T_{ev}\|_\infty < \gamma_1$ 과 $\|T_{ew}\|_\infty < \gamma_2$)을 동시에 달성하기 위하여 선형행렬 부등식 (17)과 (18)을 동시에 만족하는 해를 구하였으므로 γ_2 는 필요이상으로 보수적이다. 그러므로 비보수적인 고장검출을 위해서 선형행렬 부등식 (18)만 만족하는 해중에서 최소의 $\gamma_2 > 0$ 를 구하여 J_{th} 를 계산하는데 사용한다. Δ 는 (13)에서 $\Delta = \Theta(t)(I - P_{11}(\mu))\Theta(t)^{-1}$ 로 정의된 시변매개변수 $\Theta(t)$ 와 $P_{11}(\mu)$ 의 피드백 연결로 이루어진 불확실한 시스템으로 유실정리(bounded real lemma)를 사용하여 $\|\Delta\|_\infty$ 를 계산한다. 즉, Δ 는 상 태공간에서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A_\mu + L_\mu C)x(t) + Fp(t) \\ y(t) &= p(t) \\ q(t) &= H_\mu x(t) + u(t) \\ p(t) &= \Theta(t)q(t) \end{aligned} \quad (29)$$

따라서 $\|\Delta\|_\infty$ 는 $P = P^T > 0$, $S = S^T > 0$, $S\Theta(t) = \Theta(t)S$ 에 대해서 선형행렬 부등식 (30)을 만족하는 최소의 $\gamma > 0$ 를 구하여 계산한다.

$$L_{\Delta,i} = \begin{pmatrix} (A_i + L_i C)^T P + P(A_i + L_i C) & * & * & * & * \\ 0 & -\gamma I & * & * & * \\ 0 & 0 & -\gamma I & * & * \\ F^T P & 0 & I & -S & * \\ SH_i & S & 0 & 0 & -S \end{pmatrix} < 0 \quad (i=1,2) \quad (30)$$

참고1 : 불확실성을 갖는 불안정한 시스템에 대해서 참고문헌 [10]의 기법을 사용하여 고장검출 필터를 설계하기에는 제약이 있다. 본 연구에서의 접근방법은 불확실하고 불안정한 원전 수위제어시스템 $G(\mu)$ 를 좌 소인수분해하여 $G(\mu) = \overline{M}(\mu)^{-1} \overline{N}(\mu)$ 를 얻고 안정한 시스템 $\overline{M}(\mu), \overline{N}(\mu)$ 를 기반으로 하여 multi-objective를 갖는 고장검출 필터를 설계하였다.

참고2 : 본 연구에서 제안한 고장검출 기법은 제어시스템에서 사용하는 제어기에 대한 정보를 필요로 하지 않는다.

4. 컴퓨터 모의실험

3절에서 기술한 고장검출 시스템 설계를 컴퓨터 모의실험하기 위하여 $W_r(s) = \frac{0.1}{s+0.1}$ 이라 선정하고 $\gamma_1 = 0.5, \gamma_2 = 2$ 라 두고 고장검출 필터를 설계하였으며 고장발생을 검출하기 위해서 (28)에서 $T=200$ 이라 두었다. 고장검출 성능을 조사하기 위하여 matlab simulink를 사용하여 컴퓨터 모의실험을 수행하였다. 모의실험을 위해 다음의 2가지 시나리오를 가정한다.

시나리오 1 : 정격 발전량의 70% 전력에서 $t=100$ 초에서 증기발생기 수위 설정치가 변화하고 $t=500$ 초 이후부터 정격치의 5%에 해당하는 증기량(외란)이 방출된다. $t=1000$ 초부터 수위 측정기에 50%에 해당하는 고장신호를 발생시킨다. 즉, 수위 측정기의 측정값을 $y_m(t)$, 수위의 실제값을 $y_a(t)$ 라 할 때 $y_m(t)$ 는 다음과 같다.

$$y_m(t) = \begin{cases} y_a(t) & t < 1000 \\ 1.5y_a(t) & t \geq 1000 \end{cases}$$

시나리오 2 : 시나리오 1과 동일한 조건에서 수위측정기의 drift 고장을 모의하기 위하여 $t=1000$ 초부터 수위측정기에 1분당 -5%에 해당하는 ramp 형태의 고장신호를 발생시킨다. 즉,

$$y_m(t) = \begin{cases} y_a(t) & t < 1000 \\ \left(1 - \frac{0.05(t-1000)}{60}\right) y_a(t) & t \geq 1000 \end{cases}$$

시나리오 1의 경우 매 적분 스텝마다 J 와 J_{th} 를 계산하여 그 결과를 그림2에 나타내었다. 그림2에서 실선은 J 를 점선은 J_{th} 를 나타낸다. 그림2에서 J 가 고장발생 직후인 1000초부터 급격히 증가하여 20초 이내에 J 가 문턱치 J_{th} 보다 커져 고장발생을 경보할 수 있었다. $t=500$ 초 이후에 J_{th} 가 증가한 이유는 $t=500$ 초에 외란(증기량)이 발생하였고 외란의 발생에 따라 수위를 설정치로 유지하기 위하여 급수량이 또한 증가하였기 때문이다. 50%에 해당하는 비교적 큰 고장신호에 대해서는 모델 불확실성과 외란의 존재에도 불구하고

고장신호를 조속히 검출할 수 있음을 모의실험을 통하여 보여주고 있다.

시나리오 2의 경우에 대한 실험결과를 그림3에 나타내었다. 그림3에서도 실선은 J 를 점선은 J_{th} 를 나타낸다. 이 경우에는 고장발생 약 220초 후에 고장을 검출하였다. 1분당 -5%의 ramp 형태의 고장신호를 발생시켰으므로 약 -18%의 고장신호가 수위 측정기에서 발생하였을 때 고장이 감지되었다.

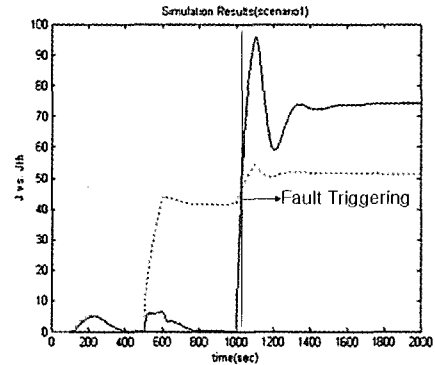


그림 2. 모의실험결과(시나리오 1)

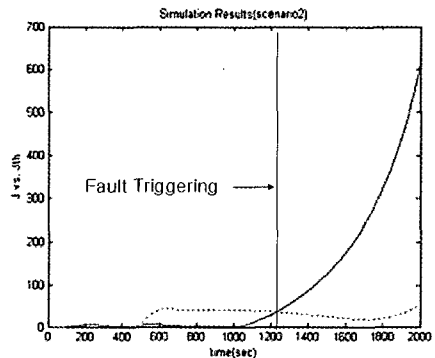


그림 3. 모의실험결과(시나리오 2)

5. 결 론

본 연구에서는 원전 증기발생기 수위제어 계통에서 사용 가능한 고장검출 시스템을 설계하였다. 증기발생기 수위제어 계통은 발생 전력량에 따라 동작점이 변화하는 비선형 시스템으로 T-S 퍼지 접근법을 이용하여 수위제어계통을 모델링하였다. 고장발생의 유무를 판정하기 위하여 좌 소인수분해를 하여 오차발생기를 설계하였다. 고장검출 성능을 향상시키기 위하여 오차가 고장에는 민감한 반면 모델 불확실성에는 둔감하게 하는 고장검출 필터의 설계법을 제시하였다. 컴퓨터 모의실험 결과 이 논문에서 제시한 고장검출 시스템은 모델 불확실성과 외란에도 불구하고 조속한 시간 내에 고장발생을 검출할 수 있었다.

참 고 문 헌

[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] K. Tanaka, T. Ikeda and H. Wang, “Robust stabilization of a class of uncertain nonlinear systems via fuzzy control : Quadratic stabilizability, control theory, and linear matrix inequalities”, IEEE Trans. Fuzzy Systems, vol.4, no.1, Feb., pp.1-13, 1996.
- [7] S.K.Nguang, P.Shi, “Fuzzy output feedback control design for nonlinear systems : an LMI approach”, IEEE Trans. Fuzzy Systems, vol.11, no.3, June pp.331-340, 2003
- [8] H.D. Tuan, P. Apkarian, T. Narikiyo and Y. Yamamoto, “Parameterized linear matrix inequality techniques in fuzzy control system design”, IEEE Trans. Fuzzy Systems, vol.9, no.2, April, pp.324-332, 2001.
- [9] E. Irving, C. Miossec and J. Tassart, “Toward efficient full automatic operation of the pwr steam generator with water level adaptive control”. In 2nd Int. Conf. Boiler Dynamics and Control in Nuclear Power Stations, Bournemouth, U.K., Oct. pp.309-329, 1979.
- [10] E.G. Nobrega, M.O.Abdalla and K.M.Grigoriadis, “LMI Based Filter Design for Fault Detection and Isolation”, Proceedings of the 39th IEEE on CDC, pp.4329-4334, Sydney, Australia, Dec. 2000.

저 자 소 개

류석환(Seog-Hwan Yoo)

한국퍼지및지능시스템학회 논문지 제14권 제3호 p.323 참조

최병재(Byung-Jae Choi)

한국퍼지및지능시스템학회 논문지 제14권 제3호 p.323 참조