H_∞ 필터를 이용한 원자력발전소 제어봉구동장치의 고장 검출

A Fault Detection Method for Control Rod Drive Mechanisms in Nuclear Power Plants via H_∞ Filtering

김 석 주 김 춘 경 이 종 무 권 순 만 박 민 국

한국전기연구원 계측제어그룹

Abstract : This paper proposes a detection method for mechanically stuck control rod drive mechanism (CRDM) faults. During the normal operation of a CRDM, disturbance voltage is induced due to the change of the airgap flux between the stator and the armature of a CRDM. This disturbance voltage is estimated by using H_∞ filtering method, and generalized plant is used in linear fractional transform (LFT) framework. H_∞ filtering is descrbied and solved in terms of linear matrix inequalities (LMIs). Simulation results are shown.

Keywords : CRDM, H_∞ Filtering, LMI

Ⅰ. 서론

원자력발전소의 제어봉구동장치(CRDM;Control Rod Drive Mechanism) 제어기기는 CRDM을 작동시켜 CRDM의 하부에 있는 제어봉(Contrl Rod)를 상하로 움직이는 기기이다. 중성자 흡수체가 부착된 제어봉이 노심으로부터 인출되면 노심의 핵반응도가 증가하여 원자로의 열출력이 증가하고 삽입되면 핵반응도가 감소하여 열출력이 줄어들게 된다. 따라서 원전의 출력을 직접 조절하는 CRDM 및 CRDM 제어기기는 원전의 많은 제어기기 가운데 가장 중요한 장치로 꼽히고 있다.[1]

CRDM은 코일에 의해서 발생되는 전자력을 이용하여 스텝 단위로 상하로 움직이도록 설계되어 있는 매우 정교한 기계장치이다. 이때 제어기기에서는 정해진 패턴의 전류를 코일에 흘려줌으로써 CRDM을 동작시키지만 실제 CRDM이 기계적으로 움직였는지의 여부를 판단하는 것은 쉽지 않다.

본 논문은 CRDM이 기계적으로 움직였는지 여부를 판단하는 알고리즘에 관한 것이다. 만약 CRDM이 전자력에 의해서 움직인다면 CRDM의 가동부와 고정부 사이의 자속이 변하게 되고 이에 따라 코일의 기전력이 변하게 된다. 만약 CRDM이 기계적으로 고착되어 움직이지 않았다면 단순한 저항-인덕터 회로의 특성만을 가질 것이므로 기계적으로 고착된 모델을 기준으로 판단한다면 CRDM이 동작할 때에는 CRDM 움직임에 따른 전압외란이 발생하는 것으로 볼 수 있다.

따라서 CRDM 코일에 전압을 인가하고 전류파형을 관측하여 전압외란의 크기를 추정함으로써 CRDM의 동작여부를 판단하는 방법을 제시하고자 한다.

이를 위해 먼저 CRDM을 모델링하고 선형화하여 H_∞ 필터링 모델을 구한다. H_∞ 필터링은 최근 많이 사용되고 있는 LMI를 이용해서 해를 구하고자 하며 [3] 시뮬레이션을 통하여 실제 계통에 적용할 수 있는지의 여부를 보이고자 한다.

Ⅱ. CRDM 모델링

CRDM에는 전자력을 발생시키는 코일이 3개 있다. 이들중 2개는 정지집게 코일과 이동집게 코일로 CRDM을 고정시키기 위한 것이고 나머지 1개는 올림 코일로 CRDM을 이동시키기 위한 코일이다. 원리적으로 이들은 모두 그림 1과 같이 코일을 감은 가동자와 자성체인 고정자로 구성되어 있다. 가동자의 코일에 전류를 흘리면 가동자에 전자력이 발생하고 발생된 흡인력에 의해서 가동자가 고정자로 이동하면서 걸쇠가 걸리거나 또는 CRDM이 움직이도록 되어 있다.

이제 그림 1과 같은 시스템의 수학적 모델을 알아보기 위하여 잘 알려진 다음의 2가지 사실을 이용하기로 한다.[2]

(i) 코일에 의해서 발생되는 전자력은 코일에 흐르는 전류의 제곱에 비례하고 공극의 제곱에 반비례한다. 즉, $F \propto \left(\frac{i}{z}\right)^2$

(ii) 코일의 인덕턴스는 공극에 반비례한다. 즉, $L \propto \frac{1}{z}$

이제 가동자의 운동방정식은 가동자에 가해지는 외란을 f_d라고 하면

$$M\ddot{z} = -K_f\left(\frac{i}{z}\right)^2 + Mg + f_d \tag{1}$$

같이 표현할 수 있다. 여기서,

M : 가동자의 질량

g : 중력가속도

z : 고정자와 가동자사이의 공극

i : 코일에 흐르는 전류

K_f : 전자력 관련 비례상수

이다. 또한 가동자 코일의 전압과 흐르는 전류는 다음과 같은 키르히호프의 법칙을 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} v &= Ri + \frac{d}{dt}(L \cdot i) \\ &= Ri + L_0\frac{di}{di} + d \end{aligned} \tag{2}$$

여기서

v : 코일양단의 전압

R : 코일 저항

L_0 : 코일 인덕턴스

d : 공극변화 속도에 따른 기전력

이다.

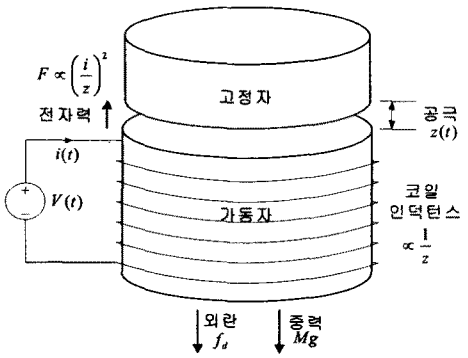

그림 1. CRDM 코일

CRDM 코일에 일정한 전류를 유지하기 위해서 비례-적분형 제어기를 다음과 같이 사용하는 것으로 한다.

$$v = K_p(r - i) + K_i\int_0^t (r - i)\,dt \tag{3}$$

여기서 r 은 목표전류이고 K_p, K_i는 각각 비례 및 적분 이득이다.

식(2)와 식(3)을 폐루프 형태의 상태공간으로 표현하기 위하여

$$x_1 = \int_0^5 (r - i)\,dt, \quad x_2 = i$$

로 놓으면 상태방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ \frac{K_i}{L_0} & -\frac{1}{L_0}(R + K_p) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L_0} \end{bmatrix} d + \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{K_p}{L_0} \end{bmatrix} r \tag{4}$$

식 (4)에서 외란 d를 추정하여 전류의 목표치가 변했음에도 불구하고 외란 d가 0이라면 CRDM이 움직이지 않은 것으로 볼 수 있다. 식 (4)를 시스템 방정식 형태로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m & B_d & B_u \\ C_m & 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_m \\ d \\ u_m \end{bmatrix} \tag{5}$$

III. H_∞ 필터 설계

H_∞ 필터도 일반화된 플랜트를 생각하면 H_∞ 제어기와 같은 방법으로 설계할 수 있기 때문에 먼저 LMI를 이용한 H_∞ 제어기를 설계하는 방법을 간략하게 서술한다. 그림 2와 같은 개념의 필터를 그림 3과 같이 일반화된 플랜트로 표현하면 일반적인 제어기 설계방법을 적용할 수 있다. 그림 3과 같은 일반화된 플랜트에서 필터 또는 제어기를 설계하기 위해서 그림 3을 상태공간으로 다음과 같이 표현하기로 한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ z \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ w \\ u \end{bmatrix} \tag{6}$$

여기서 $D_{22} = 0$으로 놓아도 일반성을 잃지 않는다. 이제 제어기 또는 필터를 다음과 같이 놓고

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_F \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_F & B_F \\ C_F & D_F \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_F \\ y \end{bmatrix} \tag{7}$$

폐루프 시스템을 다음과 같이 나타내면

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{cl} \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{cl} & B_{cl} \\ C_{cl} & D_{cl} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_{cl} \\ w \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$A_{cl} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & B_2 \\ I & 0 \end{bmatrix} K_F \begin{bmatrix} 0 & I \\ C_2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{cl} = \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & B_2 \\ I & 0 \end{bmatrix} K_F \begin{bmatrix} 0 \\ D_{21} \end{bmatrix}$$

$$C_{cl} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & D_{12} \end{bmatrix} K_F \begin{bmatrix} 0 & I \\ C_2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_{cl} = D_{11} + \begin{bmatrix} 0 & D_{12} \end{bmatrix} K_F \begin{bmatrix} 0 \\ D_{21} \end{bmatrix}$$

$$K_F = \begin{bmatrix} A_F & B_F \\ C_F & D_F \end{bmatrix}$$

이때 폐루프 시스템의 $\|T_{zw}\|_\infty \le \gamma$ 이기 위한 조건은 잘 알려진 바와 같이 다음의 Bounded Real Lemma를 만족해야 한다.

$$\begin{bmatrix} PA_{cl} + A_{cl}^T P & PB_{cl} & C_{cl}^T \\ B_{cl}^T P & -\gamma I & D_{cl}^T \\ C_{cl} & D_{cl} & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \tag{9}$$

제어기는 다음과 같은 소거정리를 이용한다.

$$M + RKS + (RKS)^T < 0$$

$$\leftrightarrow R^{\perp}MR^{\perp T} < 0, \quad S^{T^{\perp}}MS^{T^{\perp}T} < 0 \tag{10}$$

잘 알려진 바와 같이 Bounded real lemma를 만족하는 제어기는 소거정리를 이용하면 다음과 같은 대칭행렬 X, Y가 존재하는 것으로 귀결된다.[5]

$$\begin{bmatrix} C_2^T \\ D_{21}^T \\ 0 \end{bmatrix}^{\perp} \begin{bmatrix} XA + A^TX & XB_1 & C_1^T \\ B_1^TX & -\gamma I & D_{11}^T \\ C_1 & D_{11} & -rI \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_2^T \\ D_{21}^T \\ 0 \end{bmatrix}^{\perp T} < 0 \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} B_2 \\ D_{12} \\ 0 \end{bmatrix}^{\perp} \begin{bmatrix} YA^T + AY & YC_1^T & B_1 \\ C_1Y & -\gamma I & D_{11} \\ B_1^T & D_{11}^T & -rI \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_2 \\ D_{12} \\ 0 \end{bmatrix}^{\perp T} < 0 \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} X & I \\ I & Y \end{bmatrix} > 0$$

$$rank \begin{bmatrix} X & I \\ I & Y \end{bmatrix} < n + n_F$$

위 식의 대칭행렬 X, Y가 존재하면 제어기 K는 식 (10)을 만족하는 LMI의 해를 구하거나 또는 해석적인 방법으로 구할 수 있다.

이제 위식을 CRDM의 외란 추정에 적용해 보기로 한다.

$w = \begin{bmatrix} d \\ u_m \end{bmatrix}$, $z = d - \hat{d}$, $y = \begin{bmatrix} u_p \\ y_p \end{bmatrix}$, $u = \hat{d}$ 으로 놓고 그림 3의 일반화한 플랜트를 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ z \\ y_m \\ u_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m & B_d & B_m & 0 \\ 0 & I & 0 & -I \\ C_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ d \\ u_m \\ \hat{d} \end{bmatrix} \quad (13)$$

따라서 $B_2 = 0, C_1 = 0, D_{12} = -1$ 임을 알 수 있고 이를 식(11)과 식(12)에 적용하면

$$\begin{bmatrix} C_2^T \\ D_{21}^T \end{bmatrix}^{\perp} \begin{bmatrix} XA + A^TX & XB_1 \\ B_1^TX & D_{11}^TD_{11} - \gamma^2 I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_2^T \\ D_{21}^T \end{bmatrix}^{\perp T} < 0 \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} YA^T + AY & B_1 \\ B_1^T & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (15)$$

와 같이 된다. [4]

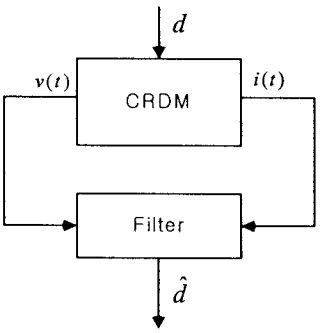

그림 2. CRDM 고장 검출 필터

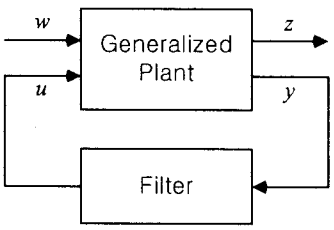

그림 3. LFT로 표현한 필터

Ⅳ. 시뮬레이션

본 논문에서 제시한 방법의 시뮬레이션을 위해서 다음 표 1과 같은 CRDM 모델을 사용하였다. 표 1의 모델은 CRDM의 올림 코일의 사양이다. CRDM 전류제어기의 입력 포화를 고려하기 위해서 CRDM 코일의 전압과 전류를 직접 측정하는 것으로 모델링하였다. 먼저 그림 4는 정상 동작시 CRDM 코일에 가한 전압과 전류를 나타내고 있다. 중간 부분에 CRDM 움직임에 따라 기전력이 발생하여 전류가 바뀌는 것을 알 수 있다. 그림 5는 이때 공극의 변화를 나타낸 것이다.

식 (3)의 LMI 해를 구하여 제어기를 구하면 다음과 같다.

$$\dot{x}_f = -3.8919e+003x_f - 5384v - 30.9i$$

$$\hat{d} = 0.8906x_f + v$$

표 1. CRDM 올림코일 사양

전압	100 V
인덕턴스	16mm 45mH
저항	1.3 Ohm
무게	130Kg

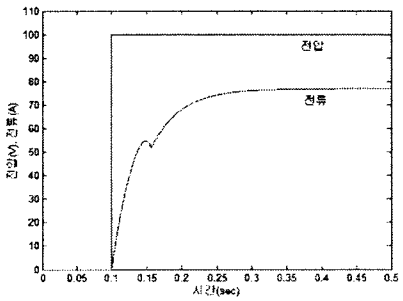

그림 4. CRDM 올림코일의 전류전압 파형(정상시)

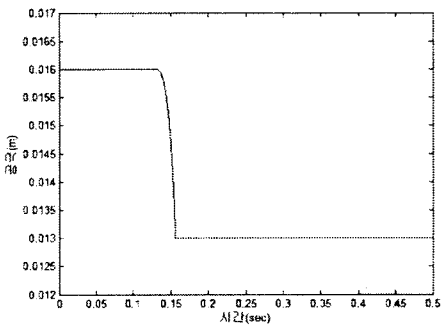

그림 5. CRDM 동작시의 공극

다음 그림 6은 CRDM 정상 동작시 필터를 사용하여 추정된 외란 파형이다. 만약 CRDM이 기계적으로 고착되었다면 그림 6에서 유기된 전압이 0으로 나올 것이다. 따라서 CRDM이 기계적으로 고착된 것을 알아낼 수 있다.

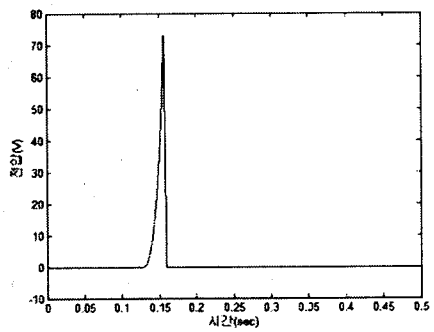

그림 6. 정상동작시 추정된 기전력

V. 결론

본 논문은 원자력발전소 CRDM이 기계적으로 고장이 나서 고착된 상태를 코일에 흐르는 전류와 전압을 측정함으로써 알아내는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 CRDM이 움직이는 동안 발생하는 기전력을 외란으로 간주하여 추정함으로써 CRDM의 움직임 여부를 알아내는 것이다.

외란을 추정하는 방법으로 H_∞ 필터를 이용하였으며 H_∞ 문제는 LMI를 이용하여 수치적으로 해를 구하였다. 시뮬레이션 결과 실제 시스템에 적용할 수 있는 가능성을 보였다.

향후에는 CRDM의 비선형성 부분과 매개변수의 불확실성 등에 관한 검토가 있어야 하겠다.

참고문헌

[1] "제어봉 제어계통", 한국전력공사, 1997.

[2] P. K. Shina, "Electromagnetic Suspension Dynamics & Control", Peter Peregrinus Ltd. 1987.

[3] S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan, "Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory", SIAM, 1994.

[4] E. Nobrega, M. Abdalla and K. Grigoriadis, "LMI based Filter Design for Fault Detection and Isolation", CDC 2000.

[5] P. Gahinet, P. Apkarian," *A Linear Matrix Inequality Approach to H_∞ control*," Int. J. of Robust and Nonlinear Cont., vol.4, p.421-448, 1994.