

최소제곱법을 이용한 원자력발전소 제어봉구동장치의 동작 검출

김 석 주, 김 춘 경, 이 중 무, 권 순 만, 천 중 민  
한국전기연구원

Operation Detection of CRDMs in nuclear power plants  
by using the least square method

Kim Seog-Joo, Kim Chun-Kyung, Lee Jong-Moo, Kwon Soonman, Cheon Jong-Min  
Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

**Abstract** - This paper proposes a detection method for mechanically stuck control rod drive mechanisms (CRDMs) in the nuclear reactor. From an electrical viewpoint, a coil of an electro-mechanical CRDM is modelled as an R-L circuit with time-varying inductance. The inductance of the coil is estimated from the measured voltage and current by using the least square method. Numerical experiments are carried out to illustrate the proposed method.

1. 서 론

원자력발전소의 제어봉구동장치(Control Rod Drive Mechanism : CRDM) 제어기는 CRDM을 작동시켜 CRDM 하부에 부착되어 있는 제어봉(control rod)을 상하로 움직이는 기기이다. 중성자 흡수체가 장착된 제어봉이 노심으로부터 인출되면 노심의 핵 반응도가 증가하여 원자로의 열 출력이 증가하고 삽입되면 핵 반응도가 감소하여 열 출력이 줄어들게 된다. 따라서 원전의 출력을 직접 조절하는 CRDM 및 CRDM 제어기는 원전의 많은 제어기기 가운데 가장 중요한 설비로 인식되어 왔다[1].

CRDM은 코일에 의해서 발생하는 전자력을 이용하여 스텝단위로 삽입 또는 인출되도록 설계되어 있는 매우 정교한 기계 장치이다. 이때 CRDM 제어기기에서는 정해진 패턴의 전류를 원자로밖에 있는 코일에 흘려줌으로써 원자로 내부에 있는 CRDM을 스텝단위로 이동시키게 된다. 따라서 CRDM 제어기기가 원자로 내부에 있는 CRDM이 기계적으로 움직였는지 여부를 알아내는 것은 매우 어려운 일이다. 본 논문은 CRDM 제어기기에서 CRDM의 동작여부를 간접적으로 알아내는 방법에 관한 것이다.

CRDM의 전자석을 전기 회로적 모델로 보면 저항 인덕터 회로로 볼 수 있다. CRDM 코일에 전류가 흘러 CRDM이 움직이면 CRDM의 가동부와 고정부 사이의 공극이 변화에 반비례하여 CRDM 코일의 인덕턴스가 변하게 된다. 만약 CRDM이 기계적으로 고착되어 움직이지 않았다면 코일의 전류-전압 특성은 변하지 않는 저항-인덕터 회로의 특성을 나타낼 것이다. 따라서 CRDM 코일에 전압을 인가하고 전류파형을 관측하여 코일의 인덕턴스 값을 추정하는 방법으로 CRDM의 동작여부를 판단하고자 한다. CRDM의 동작 여부는 측정치로부터 매개변수를 추정하는 방법으로 가장 많이 사용하는 최소제곱법을 사용한다[3]. 또한 비순환형 및 망각인수를 사용하는 최소제곱법을 적용하여 비교검토도 수행하고자 하며 이를 위해 먼저 CRDM을 모델링한다. 또한 시뮬레이션을 통하여 제시된 방법의 효용성을 입증하고자 한다.

2. CRDM 모델링

CRDM에는 전자력을 발생시키는 코일이 3개 있다. 이

중 두개는 정지집게 코일과 이동집게 코일이라고 부르며 CRDM을 고정시키는데 사용한다. 나머지 한개의 코일은 올림코일로 CRDM을 한 스텝씩 이동시키기 위한 코일이다. 원리적으로 이들은 모두 그림 1과 같이 코일을 감은 가동자와 자성체인 고정자로 구성되어 있다. 가동자에 있는 코일에 전류를 흘리면 가동자에 전자력이 발생하고 발생된 흡인력에 의하여 가동자가 고정자로 이동하면서 걸쇠가 걸리거나 또는 CRDM이 한 스텝 움직이도록 되어있다.

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

- (i) 코일에 의해서 발생하는 전자력은 코일에 흐르는 전류의 제곱에 비례하고 공극의 제곱에 반비례한다. 즉,  $F \propto \left(\frac{i}{z}\right)^2$
- (ii) 코일의 인덕턴스는 공극에 반비례한다. 즉,  $L \propto \frac{1}{z}$

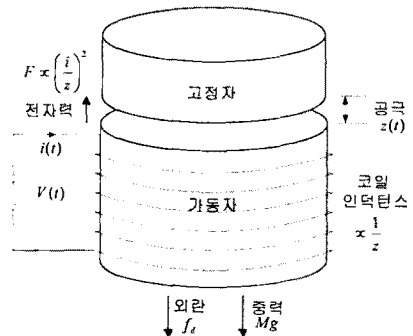


그림 1. CRDM 코일

따라서 가동자의 운동방정식은 가동자에 가해지는 외란을  $f_d$ 라 하면

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

와 같이 표현할 수 있다. 여기서,

- M : 가동자의 질량
- g : 중력가속도
- z : 고정자와 가동자 사이의 공극
- i : 코일에 흐르는 전류
- $K_f$  : 전자력 관련 비례 상수

이다. 또한 가동자의 코일에 인가된 전압과 흐르는 전류는 다음과 같은 키르히호프의 법칙을 만족해야 한다.

$$v = Ri + \frac{d}{dt}(L \cdot i) = Ri + L(t)\frac{di}{dt} + d \tag{2}$$

여기서,

$v$  : 코일 양단의 전압

$R$  : 코일 저항

$L(t)$  : 코일 인덕턴스

$d$  : 공극변화에 속도에 따른 기전력

이다. 식 (2)에서 전압  $v(t)$ 와 전류  $i(t)$ 를 측정하여  $L(t)$ 를 추정하고 이를 바탕으로 가동자의 움직임을 알아내는 것이 본 논문의 목적이며 다음 장에 서술한다.

### 3. 변수 추정을 위한 최소 제곱법

매개변수 추정을 위해서 사용되는 최소제곱법은 시스템이 가지는 성질에 따라서 매우 많은 종류가 있다[3].

우선 다음과 같이 출력차수  $n$ , 입력차수  $m$ , 지연이  $d$ 인 일반적인 시스템을 생각해 보자.

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k) + e(k) \quad (3)$$

여기서  $z^{-1}$ 은 한 스텝 지연 연산자이고  $A, B$ 는 각각

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n}$$

$$B(z^{-1}) = z^{-d}(b_d + b_1z^{-1} + \dots + b_mz^{-m})$$

이고  $e$ 은 모델링 오차를 나타낸다. 이때 식(3)을

$$y(k) = \varphi^T(k)\theta + e(k) \quad (4)$$

로 표시하면

$$\theta = [a_1 \dots a_n \ b_d \ b_1 \dots b_m]^T$$

$$\varphi(k) = [-y(k-1) \dots -y(k-n) \ u(k-d) \dots u(k-d-m)]^T$$

이 된다. 이때 순차적인  $N$ 개의 입출력 측정치가 있다고 할 때 비순환형 최소제곱법의 해는 다음과 같이 표시된다.

$$\hat{\theta} = (\Phi^T\Phi)^{-1}\Phi y \quad (5)$$

여기서,

$$y = [y(1) \dots y(N)]^T$$

$$\Phi = [\varphi(1) \dots \varphi(N)]^T$$

이다. 이제 식 (5)를 순환식 형태로 바꾸면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$K(k) = \frac{P(k-1)\varphi(k)}{1 + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)}$$

$$\epsilon(k) = y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1) \quad (6)$$

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)\epsilon(k)$$

$$P(k) = P(k-1) - K(k)\varphi^T(k)P(k-1)$$

식 (6)은 전형적인 순환형 최소제곱법을 나타내고 있다. 그러나 본 논문에서와 같이 추정하고자 하는 매개변수가 시변(time-varying)일때에는 보통 망각인수(forgetting factor)를 사용하여 추정하게 된다. 망각인수를  $\lambda$ 라 하면 망각인수를 사용하는 최소제곱법은

$$K(k) = \frac{P(k-1)\varphi(k)}{\lambda + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)}$$

$$\epsilon(k) = y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1) \quad (7)$$

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)\epsilon(k)$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} (P(k-1) - K(k)\varphi^T(k)P(k-1))$$

와 같다. 그림 2는 매개변수를 시스템의 입출력을 측정하여 추정하는 방법의 개념을 나타내고 있다.

이제 식 (5) 또는 식 (7)을 제어봉 구동장치의 동작을 검출하는데 사용하게 된다.

### 4. 시뮬레이션

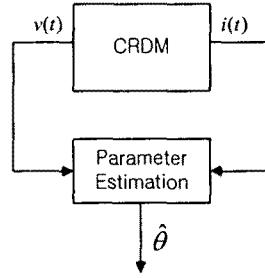


그림 2. CRDM의 매개변수 추정

본 논문에서 제시한 방법의 시뮬레이션을 위해서 다음 표 1과 같은 CRDM 모델을 사용하였다. 표 1의 모델은 CRDM에 있는 세 개의 코일중 올림코일의 사양이다. 먼저 그림 3은 정상 동작시 CRDM 코일에 가한 전압과 흐르는 전류를 나타내고 있다. 중간 부분에 CRDM이 움직임에 따라 코일의 인덕턴스 변화가 생겨서 전류의 패턴이 바뀌는 것을 알 수 있다. 여기서는 그림 편의상 전압을 직류로 가하는 것으로 표시되어 있지만 실제 시뮬레이션에서는 4KHz 직류 실효 신호가 인가되는 것으로 하였다.

표 1. CRDM 올림코일 사양

전압	100 V
인덕턴스	16mm(45mH) 13mm(55mH)
저항	1.3 Ohm
무게	130Kg

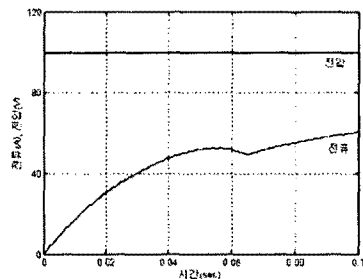


그림 3. CRDM 올림코일의 전류-전압 파형(정상시)

그림 4는 공극의 변화를 나타낸 것이고 그림 5는 이에 따른 코일의 인덕턴스 변화를 나타내고 있다.

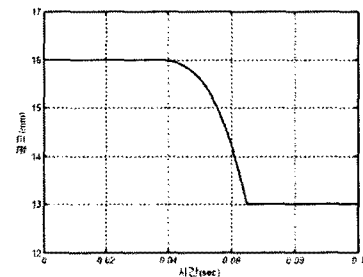


그림 4. CRDM 정상동작시의 공극

다음 식은 매개변수 추정을 위해서 이동코일의 이동자가 이동하지 않았을 때의 이산화된 입력력 관계식이다. 이때 이산화 방법은 ZOH(zero-order holder)를 사용하였다.

$$\frac{y(k)}{u(k)} = \frac{0.0219}{1 - 0.9715z^{-1}}$$

또한 다음 식은 이동자가 이동하여 고정자에 붙었을 때 이산화된 식이다.

$$\frac{y(k)}{u(k)} = \frac{0.01797}{1 - 0.9766z^{-1}}$$

위 두식에서 알 수 있는 바와 같이 이동자가 매우 작은 거리를 이동하기 때문에 매개변수의 변화도 적은 것을 알 수 있다.

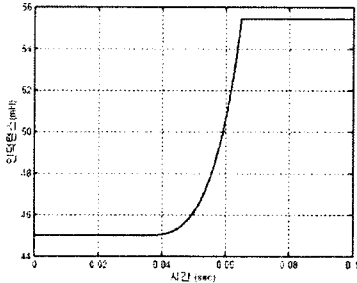


그림 5. CRDM 정상동작시 코일의 인덕턴스 변화

다음 그림은 망각인수가 1인 경우와 0.5일때 순환 최소 제곱법의 매개변수 추정 결과를 나타내고 있다.

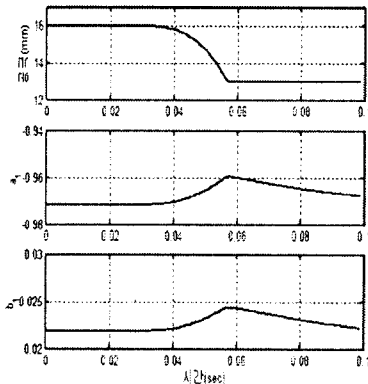


그림 6. 망각인수 1일때 매개변수 추정

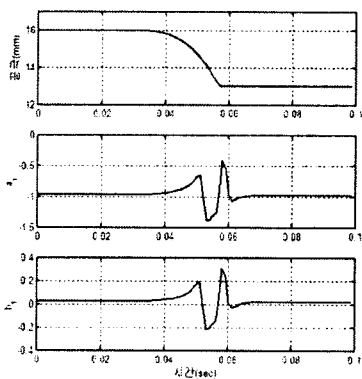


그림 7. 망각인수 0.5일때 매개변수 추정

그림에서 알 수 있듯이 망각인수가 1일때 보다 0.5일때가 시변 매개변수를 빨리 추정할 수 있는 것을 알 수 있다. 다음 그림 8은 CRDM에 기계적 고착이 생겨서 움직이지 않았을 때의 매개변수 추정을 나타낸 것이다.

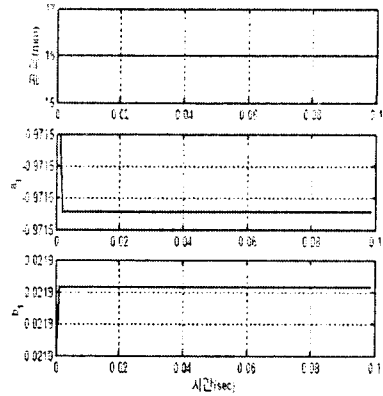


그림 8. CRDM이 동작하지 않았을 때 매개변수 추정

그림 7과 8에서 보면 CRDM의 동작여부는 추정된 매개변수의 최종 값보다 과도적으로 변하는 정도로도 쉽게 판정할 수 있음을 알 수 있다. 다음 그림 9는 식 (5)를 이용한 비순환형 최소제곱법을 적용한 결과이다.

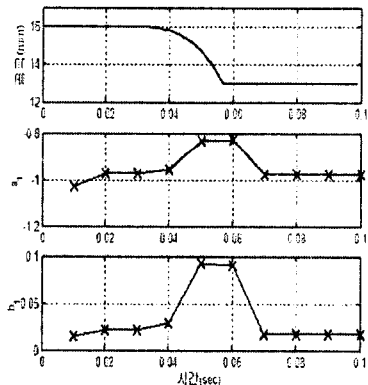


그림 9. 비순환형 최소제곱법 추정

그림에서 알 수 있는 바와 같이 비순환형 추정방식은 연산량은 조금 많지만 CRDM의 동작여부를 판단할 수 있는 변별력을 가지는 과도특성을 보였다. 결론적으로 망각인수를 사용하거나 비순환형 매개변수 추정법을 사용하면 비교적 정확하게 동작여부를 판단할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 원자력발전소의 출력조절을 담당하는 제어봉구동장치의 동작검출에 관해서 연구하였다.

CRDM 코일을 전기회로적으로 모델링하여 회로적 특성 파라메타인 코일의 인덕턴스를 추정함으로써 동작여부를 알아내는 방법을 제시하였다. 추정법은 최소제곱법을 사용하였으며 순환형과 비순환형, 망각인수의 영향 등을 함께 검토하였다. 시뮬레이션 결과 실제 플랜트에도 적용될 수 있는 가능성을 보였다.

## [참 고 문 헌]

- [1] "제어봉 제어계통", 한국전력공사, 1997.
- [2] P. K. Shina, "Electromagnetic suspension dynamics & control", Peter Peregrinus Ltd. 1987.
- [3] L. Ljung and T. Soderstrom, "Theory and practice of recursive identification", MIT Press, 1983.