

### 제어봉제어계통에서의 이동검출 알고리즘의 특성 비교

권순만, 이종무, 김춘경, 천종민  
한국전기연구원

## A Comparative Study on the Movement Detection Algorithm in Control Rod Control Systems

Soonman Kwon, Jongmoo Lee, Choon-Kyung Kim, and Jong-Min Cheon  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - 본 논문은 제어봉제어계통에서 활용되고 있는 두 가지의 이동검출 알고리즘을 비교 분석한 내용을 기술한다. 원자로의 핵반응을 제어하는 제어봉제어계통에서는 제어봉제어기구의 기계적인 이동을 검출하는 기법의 신뢰성이 아주 중요하다. 왜냐하면 이 검출에 오차가 생기면 결과적으로 제어계통의 오동작이 야기될 수 있으며 이에 따라 원자로가 불시 정지되는 사고가 생기게 될 수 있기 때문이다. 현재 이를 위한 검출방법으로는 미국의 CENP 등이 특허로써 보호하고 있는 기법이 널리 상용되고 있는데 이에 대응하는 기법이 국내에서 연구되어 상용화를 앞두고 있는 상황이다. 본 논문에서는 이 두 가지 알고리즘의 장단점을 비교하며 특히 잡음을 고려한 특성에 대해 조사한다.

성 관점에서의 특성을 비교해 보고자 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 이동 검출 개요

아래 그림 1은 실제 사용되고 있는 제어봉 구동장치 의 한 예를 나타낸다. 그림에서 8과 13번으로 표시된 부분이 Magnetic형식의 Jack들로서 내부에 있는 이동축(7번으로 표시)의 홈을 서로 교번하여 붙잡고 상하로 이동하여 축 하부에 달려 있는 제어봉을 상하로 이동시키게 된다. 이때 압력경계면 내부에 있는 이 Jack들의 걸림쇠 동작 및 상하이동 동작을 행하기 위해서는 압력 경계면 외부에 있는 코일(1,3,5번)에 순차적으로 특정한 Profile을 가진 전류 시퀀스를 가해 주어야 한다. 그림에서의 축에 형성되어 있는 한 스텝(즉, 홈과 그 이웃 홈 사이)을 이동하기 위해서는 6-7개의 시퀀스 동작이 이루어지는데 이 시퀀스 동작 중에서의 상하부 Jack의 상하 이동 동작 검출은 제어봉의 한 스텝 이동을 위한 전체 시퀀스의 성공적인 제어에 필수적인 중요한 요소이다.

### 1. 서 론

원자력 발전소의 제어봉 구동장치는 전자력을 이용하여 제어봉을 인출·삽입시킴으로써 원자로의 핵반응을 제어하여 결과적으로 원전의 전기적 출력을 조절하는 역할을 한다. 제어봉은 스텝단위(보통 16mm)로 인출·삽입되며 한 스텝을 이동하기 위해서는 보통 6-7개에 이르는 일련의 시퀀스 동작이 차례대로 정확히 이루어져야만 한다. 일련의 시퀀스 동작 중 어떤 한 동작이라도 기계적 또는 전기적으로 완전하게 이루어지지 못하면 제어봉은 이동을 못하거나 또는 자유 낙하하는 일이 발생할 수 있다. 이것은 원전의 국부 과열 등을 야기시켜 원자로를 손상시키는 원인이 될 수 있으므로 이 경우 실제 원전에서는 원자로를 완전히 정지시켜 사고를 예방한다. 이와 같이 제어봉의 정확한 위치 이동 및 검출은 원전의 안전 운전 및 핵연료의 효율적 이용에 관계되는 매우 중요한 사항이다.

원자로에서 제어봉의 동작상태를 정확히 검출하는 것은 간단하지가 않다. 왜냐하면 원자로 내부는 압력과 온도가 높은 냉각수가 가득 차 있어서 외부에서 쉽게 접근할 수 없도록 되어 있으므로 내부와는 철저히 차단된 압력 경계면 외부로부터 내부에서 일어나는 구동기구의 동작을 검출하여 판단해야 하므로 정밀한 검출이 어렵다. 따라서 제어봉 구동시의 시퀀스 동작 확인방법은 제어봉 제어기기 설계 및 구현에 있어서 가장 핵심적인 사항으로 가장 최근의 방법은 코일에 흐르는 전류의 파형을 신호 처리하여 그 미분값을 이용하여 판단하는 방법을 사용하고 있다[1],[2].

또 하나의 실용적인 검출기법은 제어봉 구동장치에 사용되는 전자석 코일의 인덕턴스가 고정자와 이동자간의 거리에 관한 함수라는 점에 착안하여 코일에 흐르는 전류와 전압으로 코일의 인덕턴스를 추정하여 거리를 알아냄으로써 이동자가 이동했는지 여부를 판단하는 방법이다[3]. 이 기법에서는 인덕턴스 계산을 위하여 적분 연산을 수행하므로 앞에서 설명한 방법과 대조적이다. 본 논문에서는 앞에서 소개한 두 가지 기법에 대해 신뢰

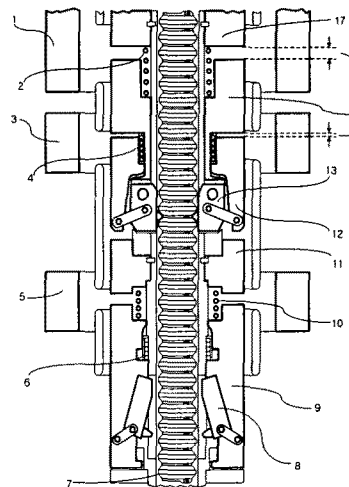


그림 1. 제어봉 구동장치

이러한 동작에 대한 간단한 전기적인 등가 모델은 다음 그림 2와 같이 나타낼 수 있는데 동작검출을 위하여 사용하는 방법은 1) 코일에 흐르는 전류의 모양을 검출하여 판정하는 방법과 2) 코일 전압 및 전류로부터 코일의 인덕턴스를 추정하여 고정자와 이동자 사이의 공극을

검출하여 판정하는 방법으로 나뉜다.

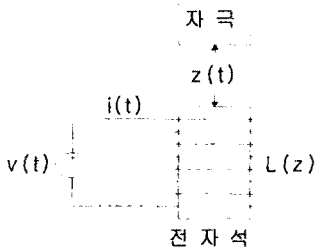


그림 2. 전자석 코일과 인덕턴스

### 2.1.1 전류 미분값 추정 기법

제어용 구동장치의 각 코일에 흐르는 다음 그림 3의 전압을 가하면 곡선으로 표시된 것과 같은 형태의 전류가 흐르게 된다.

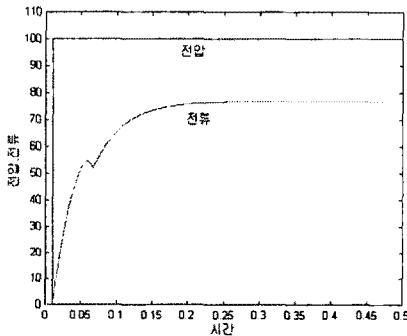


그림 3. 코일 전압 및 전류 파형 예

실제 이동에 따라 그림 2에서의 전자석이 이동하게 되면 그림 3에서와 같이 중간 부분에 Glitch가 발생하게 되는데 이 Glitch 발생 여부를 판단하여 이동을 검출할 수 있다. 이 Glitch를 검출하는 효율적인 방법은 전류의 미분값의 변화를 검출하는 것이다. 그림에서 초기 전류 미분값에 대해 전류 미분값은 지속적으로 감소하다가 Glitch를 지나면 다시 증가하게 된다. 이를 검출하기 위한 알고리즘은 다음 그림 4와 같이 표시할 수 있다. 어떤 시각  $t$ 에서의 전류 미분값  $M(t)$ 는

$$M(t) = \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

로 표시된다.

### 2.1.2 인덕턴스 추정 기법

인덕턴스 추정 기법은 그 원리는 비교적 간단하다. 즉, 그림 2에서의 인가전압  $v(t)$ 와 전류  $i(t)$ 로부터  $L$  값을 계산하여  $z$ 의 값을 찾아내는 것이다. 즉, 그림에서 코일(이동자)에 전류  $i(t)$ 를 흘리면 코일은 자석이 되며 위에 위치한 자극(고정자)과 서로 당기는 힘이 작용하여 거리( $z$ )가 줄어든다. 이때의 전기적인 방정식은 다음과 같다.

$$v = \frac{d(L \cdot i)}{dt} + R \cdot i \quad (2)$$

$$L(z) = \frac{K}{z(t)} \quad (3)$$

식(2)는 키르히호프의 전압방정식을 나타낸 것이고 식

(3)은 코일의 인덕턴스가 이동자와 고정자간의 거리에 반비례한다는 것을 나타내고 있다. 여기서  $R$ 은 코일의 저항이고,  $K$ 는 코일의 권선수 및 형상에 관계되는 상수이다. 식(2)를 인덕턴스  $L$ 에 관해서 다시 쓰면 다음과 같다.

$$L = \frac{1}{i} \int_0^t (v - Ri) dt \quad (4)$$

식(4)는 코일의 인덕턴스가 코일에 인가한 전압과 흐르는 전류로 계산할 수 있다는 것을 의미하며 앞에서 소개한 첫 번째 방법과는 달리 적분을 이용하여 계산됨을 알 수 있다.

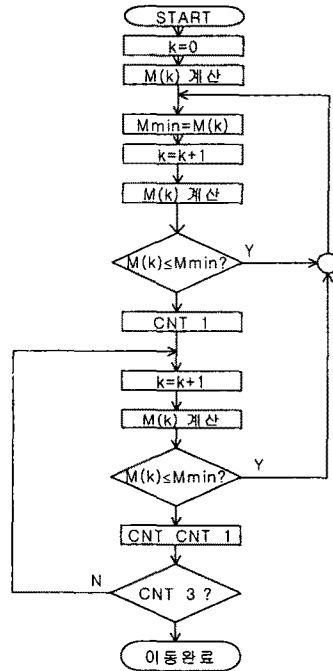


그림 4. 전류 미분값 검출 알고리즘

### 2.2 추정방법의 특성

앞에서 소개한 두 가지 방식에서의 가장 기본적인 차이점은 전류 미분값 추정 기법은 미분값의 정성적인 변화 특성만을 추정하기 때문에 제어봉이 이동을 하다가 원래위치로 되돌아가는 경우에도 실제 이동을 한 것으로 판정한다는 것이다. 그러나 두 번째 소개한 방식은 공극의 수치값을 직접 계산을 하기 때문에 이동도중 다시 원 위치 하더라도 그 상황을 정확히 판정해 낸다는 것이다. 즉, 이동시의 오동작에 따르는 특성은 후자가 월등히 우수하다고 볼 수 있다.

다음으로 추정의 확실적인 특성을 논의하기 위해서는 잡음 모델이 필요하다. 앞에서 소개한 두 가지 기법에서의 계측값은 전압과 전류이므로 이 두 가지 측정값에 대해 잡음이 백색 가우시안 분포인  $N(0, \sigma^2)$ 로 서로 같고 서로 통계적으로 독립(statistically independent)이라고 가정한다.

### 2.2.1 전류 미분값 추정 특성

디지털 신호처리 기법을 이용하는 경우 식(1)의 이산 시간 등가식은

$$M(k+1)T] = \frac{\bar{i}(k+1)T] - \bar{i}(kT)] + n[(k+1)T] - n[kT]}{T} \quad (5)$$

로 주어지며 이 값의 확률분포는

$$M(kT) \sim N\left(\frac{\bar{i}(k+1)T] - \bar{i}(kT)]}{T}, \frac{2\sigma^2}{T^2}\right) \quad (6)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서  $T$ 는 샘플링 간격,  $n[\cdot]$ 는 전류측정시의 가산 잡음을 나타낸다.

### 2.2.2 인덕턴스 추정 특성

식(3)과 (4)로부터 시차  $kT$ 에서의 공극  $z(kT)$ 는

$$z(kT) = \frac{K\bar{i}(kT) + n_2(kT)}{\int_{t_0}^{kT} [(\alpha t) - Ri(t)]dt + n_1[kT]} \quad (7)$$

로 표시할 수 있다. 여기서  $n_1[\cdot]$ ,  $n_2[\cdot]$ 는 분모, 분자 항의 측정에서의 가산 잡음을 표시한다.

이 경우  $z(kT)$ 의 분자 및 분모의 분포는

$$\begin{aligned} \text{분자} &\sim N(K\bar{i}(kT), \sigma^2) \\ \text{분모} &\sim N\left(\int_{t_0}^{kT} [(\alpha t) - Ri(t)]dt, \sigma^2\right) \end{aligned} \quad (8)$$

로 표시할 수 있고 따라서  $z(kT)$ 의 분포함수는 Cauchy 함수로 나타낼 수 있다[4].

### 2.3 시뮬레이션 및 고찰

식(6)과 (8)을 먼저 살펴보자.

식(6)에서 알 수 있는 바와 같이 전류미분 추정값은 분산값이  $T$ 의 제곱에 비례하여 줄어들기 때문에  $T$ 를 크게 하면 그 특성이 좋을 것 같지만 실제로는 평균값(mean)이  $T$ 에 반비례하므로 너무 크면 좋지 않다. 그러므로 최적의  $T$ 를 찾는 것이 쉽지 않다. 그러나 식(8)에서는 측정시간이 길어져도 분자나 분모의 분산은 변하지 않으나 평균값이 분모나 분자 모두가 커지므로 SNR이 커져 잡음에 대한 상대적인 추정특성이 좋아진다. 즉, 공극을 실측하여 최종 이동을 확인하는 두 번째 방법은 이동이 진행될수록 그 잡음특성이 좋아지는 특성을 가지고 있다. 실제 모델에서 이것을 확인하기 위하여 사용한 모델의 파라미터는 다음 표와 같다.

표 1. 시뮬레이션을 위한 모델 파라미터

인가전압	100 V	
인덕턴스	최대공극(16mm)	45mH
	최소공극(13mm)	60mH
저항	1.3 Ohm	
전자석 무게	130Kg	

표 1의 값에 대한 전압, 전류 곡선이 그림 3에 나타나져 있는데 이 값에 따른 인덕턴스값은 다음 그림 5로 나타난다.

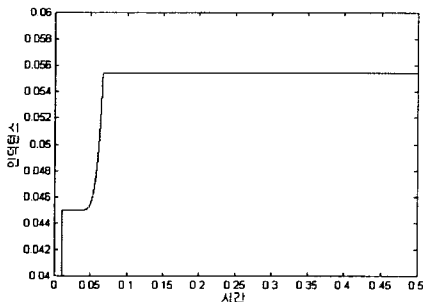


그림 5. 그림 3의 전압, 전류에 따른 인덕턴스 값

식(6)과 (8)에서의  $T$ 의 값에 따른 식(6)에서의  $M(\cdot)$ 의 평균값 및 분산과 적분시간을 고려한 식(8)에서의  $z(\cdot)$ 의 추정값 특성을 계산해보면 각각 다음 그림 6, 7과 같이 표시된다.

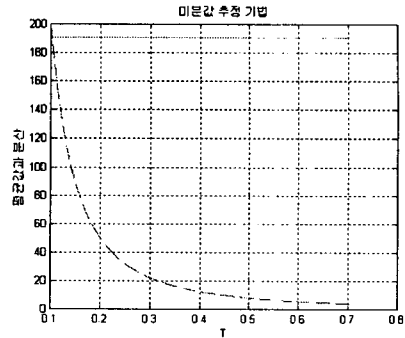


그림 6.  $T$ 에 따른 의  $M(\cdot)$  평균값과 분산 ( $\sigma^2=1$ )

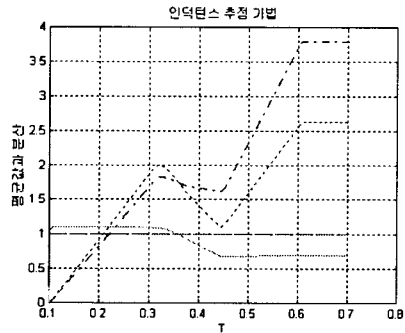


그림 7.  $z(\cdot)$  추정값의 적분시간 ( $kT$ )에 따른 식(7), (8)의 공극, 평균값과 분산 ( $\sigma^2=1, K=0.05$ )

### 3. 결 론

전류의 미분값을 추정하여 이동검출을 행하는 방식은 미분값의 정성적 변화를 판단기준으로 하기 때문에 고정도를 필요로 하지 않고 구현의 용이성도 우수하나 이동이 완료되지 않고 정지하여도 이동으로 판단하게 되는 문제점이 있는 반면에 공극을 계산하여 판정하는 방법은 이동이 완료되는 시점까지 공극을 계산하며 특히 이동이 진행될수록 그 추정값이 잡음에 강해지는 특성을 나타내고 있어 신뢰도 측면에서 우수함을 알 수 있다. 다만 실질적인 구현의 복잡성은 전자회로 및 디지털 기술의 결합으로 해결해야 할 하나의 문제로 된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] K. Scarola 외, "Automatic Controller for Magnetic Jack Type Control Rod Drive Mechanism", US Patent 4663576, 1987.
- [2] Brooks Jr. 외, "Drive Mechanism of Nuclear Reactor Control Rod", US Patent 4125432, 1978.
- [3] 김준경 외, "원자로 제어봉 구동장치의 스텝 동작 시퀀스 확인방법", 특허출원번호 10 2002 0047039, 2002.
- [4] J. B. Thomas, "An Introduction to Statistical Communication Theory", John Wiley & Sons, Inc., 1968.