

원자로 제어봉구동장치의 동작 검출을 통한 안전한 이중유지 방법

천종민, 김춘경, 이종무, 박민국, 권순만
한국전기연구원

The Method of safe double holding by detecting movements of Control Rod Drive Mechanism

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

Abstract - When a fault relating to the urgent alarm occurs, we must prevent control rods from dropping and make one of two grippers in Control Rod Drive Mechanism (CRDM) grip the drive rod taking a control rod assembly. To enhance the reliability of holding control rods, we order two grippers to hold the drive rod. This action is called the double holding. In the middle of the movement of the drive rod, the latching of the drive rod can cause friction between a gripper and the drive rod. This state may give damage to both the gripper and the drive rod. In this paper, we have devised the method which can have two grippers hold the drive rod more stably, without damaging the equipment.

1. 서 론

원자력 발전소의 제어봉구동장치제어시스템(Control Rod Control System; CRCS)은 제어봉 집합체를 구동시키는 제어봉구동장치(Control Rod Drive Mechanism; CRDM)들을 상부로부터의 명령에 만족되도록 제어한다 [1].

시스템 고장 시에는 제어봉의 이동을 정지시키고 유지, 보수에 들어가는데 이 때에 제어봉이 낙하되는 것을 막기 위하여 제어봉 집합체를 잡고 있는 CRDM 구동축을 하나 이상의 집계가 물고 있어야 한다. 3-코일 타입 CRDM에는 두 개의 집계가 있으며 이들은 정지된 상태에서 구동축을 잡는 정지 집계와 구동축을 잡고 이동하는 이동 집계들이다. 이들 두 집계가 모두 구동축을 잡는 방법을 이중유지(Double Holding)[2]라고 부른다.

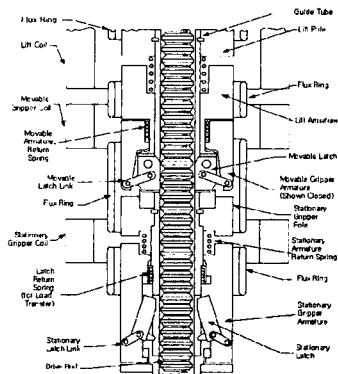
CRDM의 올림 코일 이동자가 고정자에서 분리되면서 구동축이 이동할 때 이중유지가 시행되어 집계가 구동축을 잡게 되면 집계와 구동축 사이의 마찰로 인하여 기기에 무리가 발생하므로 올림 코일 이동자가 고정자로부터 완전히 분리되어 구동축 동작이 완료된 이후에 이중유지가 시행되는 것이 바람직하다.

본 논문에서는 구동축 동작을 검출하여 이중유지 시행 시점을 결정하여 기기에 무리를 주지 않고 보다 안정적으로 이중유지가 시행되도록 하는 방법을 고안하여 소개한다.

2. 본 론

2.1 제어봉구동장치(CRDM)

제어봉구동장치는 자기-잭(Electromagnetic-Jack) 타입으로 구동 코일에 전류를 흘려서 이를 통해 발생하는 자기력을 이용하여 집계들이 구동축을 잡거나 제어봉 집합체가 달린 구동축을 들어 올리고 내리게 한다. 제어봉구동장치는 구동 코일 개수에 따라 3-코일 형식과 4코일 형식으로 나누어진다.



The Components of the CRDM (Westing House Type)

그림 1. 3-코일 타입 제어봉구동장치의 구성

2.2 이중유지(Double Holding)

CRCS의 전력함은 주어진 명령에 따라 제어봉구동장치에 알맞은 전력을 공급한다. 하나의 전력함에서는 총 3 그룹의 제어봉을 구동시킨다(1 그룹 당 4개의 제어봉 집합체, 4개의 제어봉 구동장치). 이동 집계 코일 구동용 전력변환기를 정지 집계 코일과 같이 각 그룹 별로 독립적으로 설치하여 이동 집계 코일 역시 각 그룹 개별적으로 자유로이 동작할 수 있도록 하면 구동축을 정지 집계와 이동 집계가 동시에 구동축을 잡는 이중유지가 가능하게 된다. 또한 이렇게 전력함에서 이중유지를 이용하게 됨에 따라 DC Hold Power Supply Panel을 별도로 설치할 필요가 없게 된다[3].

자체 감시 중에 시스템에 이상을 발견하였을 때는 제어봉 이동을 즉시 정지시키고 이에 대한 보수에 들어가야 한다. 이 때 이중유지 기능을 활용하면 보다 확실하게 제어봉 정지를 유지시켜서 제어봉 추락 방지에 대한 신뢰성을 더 높일 수 있다. 그림 2에서는 이중 유지 전류 명령에 대한 각 코일 별 전류 파형들을 보여 준다. 그림에서 보듯이 이중유지가 시작되면 정지 집계 코일과 이동 집계 코일에 허용 최대 전류(8 Amp)를 흘려서 정지 집계와 이동 집계가 동시에 구동축을 잡게 되고 올림 코일 전류를 0으로 줄여서 구동축 이동을 막는다. 이후로 계속해서 집계 코일들에 높은 전류가 흐르게 되면 코일에 손상을 줄 수 있으므로 일정 시간(300msec)이 지나면 중간 레벨의 전류(약 4.4 Amp)로 줄여서 유지하도록 한다[2].

그림 3에서는 제어봉 정지 시에 긴급 고장의 일종인 사이리스터 고장이 정지 집계 코일 측에 발생하였을 때 자동으로 이중 유지가 시행된 결과를 이벤트 기록(Event Log) 과정으로 저장된 데이터를 통해 보여 준다.

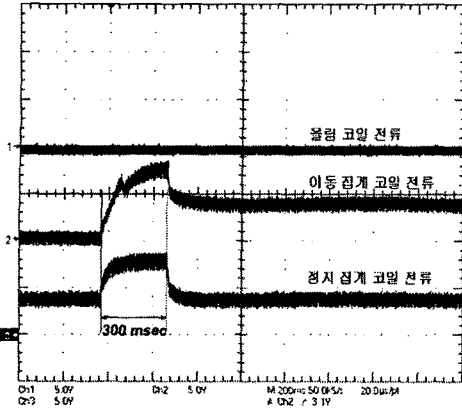


그림 2. 이중 유지 시 전류 파형

한 상이 빠뜨려져서 전압 공급이 제대로 되지 않아서 정지 집게 코일이 구동축을 제대로 잡지 못하더라도 이동 집게 코일이 대신 잡으므로 제어봉 낙하를 확실하게 막아주는 이중유지의 장점을 확인할 수 있다.

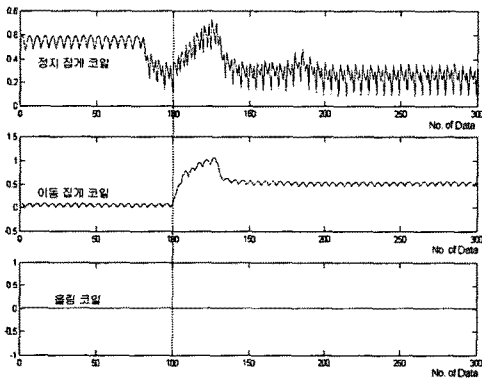


그림 3. 제어봉 정지 모드에서 긴급 고장 발생 시의 이중유지

그림 3과 같이 제어봉 정지 시에는 올림 코일 이동자의 이동이 없으므로 구동축과 집게 사이의 마찰 우려가 없지만 제어봉 이동 모드에서 자동 혹은 수동으로 이중유지가 시행될 때 구동축의 이동이나 이동 집게의 동작에 상관없이 집게들이 강제로 구동축을 잡게 되면 집게의 걸쇠가 잘못된 홈으로 들어가서 구동축과 집게 양측에 기계적 파손이 생길 수 있다. 그림 4는 제어봉의 인출이나 삽입 과정에서 이중 유지 기동 시에 기계적 파손이 생길 수 있는 상황의 예들을 보여 주고 있다. 여기서 볼 때 모든 상황들이 올림 코일 고정자에 대한 이동자의

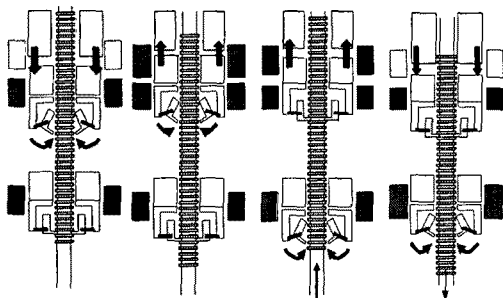


그림 4. 이중유지 시에 기계적 파손이 우려되는 상황

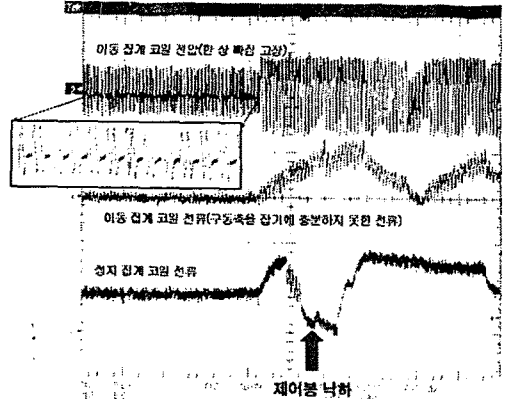


그림 5. 제어봉 동작 모드에서 긴급 고장 발생

이동과 연관되어 있다. 따라서 올림 코일 이동자가 완전히 고정자로부터 분리된 이후에 이중유지가 시작되는 것이 안전한 것을 알 수 있다.

제어봉 동작 모드에서는 올림 코일의 이동자가 이동하므로 구동축과 집게 사이의 돌 사이의 마찰을 방지하기 위하여 긴급 고장이 발생하여 이중 유지 명령이 지시되어도 1 step 이동이 완료되고 나서 시행되어 안전한 이중유지를 확보하는 방법이 있다. 하지만 그림 5에서와 같이 이동 집게 코일에 사이리스터 고장이 발생한 상태에서 다음 step 제어봉 이동을 시작하였을 때 고장이 검출되고 바로 이중유지를 시행하지 않으면 제어봉이 낙하하는 상황이 발생한다. 따라서 이중유지는 고장 검출 즉시 시행되어야 하는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 고장이 검출되어 이중유지 명령이 발생하는 즉시 이중유지가 안전하게 시행되는 방법을 제시한다.

2.3 올림 코일 이동자 이동 검출

올림 코일 이동자의 이동을 알려주는 정보를 가지고 있다면 이를 이용하여 이중유지 기동 시점을 결정할 수 있다. 코일 전류를 참고하여 구동장치 기기의 동작 여부를 판단하는 방법이 있으나 특성상 잡음에 매우 민감하여 보다 강건하고 신뢰성이 높은 방법을 찾는다[4].

제어봉구동장치에 사용되는 전자석 코일의 인덕턴스가 고정자와 이동자 간의 거리의 함수이므로 코일에 흐르는 전류와 전압을 이용하여 코일의 인덕턴스를 변화 추정하여 이동자가 이동했는지 여부를 판단하는 방법을 이용한다[5]. 이 방법은 적분연산으로 구성되어 있어서 외부 잡음에 매우 강하고 판정의 신뢰도가 높다.

이동자인 코일에 전류(i)를 흘리면 코일은 자석이 되며 상위의 자극(고정자)과 서로 당기는 힘이 작용하여 거리(z)가 줄어든다. 이때 전기적인 식은 다음과 같다.

$$v = \frac{d(L \cdot i)}{dt} + R \cdot i \quad (1)$$

$$L(z) = \frac{k}{z(t)} \quad (2)$$

식 (1)은 키르히호프 전압방정식이고 식 (2)는 코일의 인덕턴스가 이동자와 고정자간의 거리에 반비례한다는 것을 나타내고 있다. 여기서 v 는 인가 전압이고, i 는 코일에 흐르는 전류, R 은 코일의 저항이고, k 는 코일의 권선수 및 형상에 관계되는 상수이다. 식 (1)을 인덕턴스 L 에 관해서 다시 쓰면 다음과 같다.

$$L = \frac{1}{i} \int_{t_0}^t (v - Ri) dt \quad (3)$$

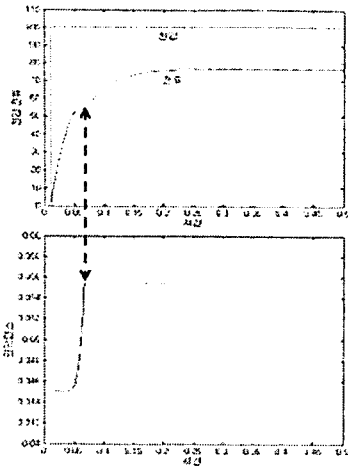


그림 6. 올림픽 코일 인덕턴스 검출 결과(시뮬레이션)

식 (3)은 코일의 인덕턴스가 코일에 인가한 전압과 흐르는 전류로 계산할 수 있다는 것을 의미한다. 그림 6은 위의 식들을 이용하여 올림픽 코일에 대하여 인덕턴스 변화 검출을 시뮬레이션한 결과를 보여 준다. 그림에서 보면, 이동자의 동작 완료를 의미하는 전류 왜곡(glitch) 시점에서 올림픽 코일 인덕턴스도 변하는 것을 알 수 있다. 올림픽 코일 이동자의 동작에 대한 정보로서 올림픽 코일 인덕턴스 변화값을 이용한다.

이중 유지 명령이 발생하는 즉시 올림픽 코일 전류를 0으로 줄이고 이로 인해 이동자가 고정자에서 분리되게 된다. 이동자가 분리되면 그림 6과는 반대로 인덕턴스 값이 약 45 mH로 다시 감소한다. 인덕턴스가 45 mH에 오면 이동자 분리가 완료된 것으로 판단하고 이중 유지가 시작되도록 한다.

2.4 실험 결과

제어봉 인출 도중에 수동 이중 유지 스위치를 올려서 강제로 이중유지 명령을 가하였다. 그림 7에서는 그 결과를 각 코일 전류를 통해 보여 주고 있다. 그림에서 보면 이중 유지 명령이 발생한 직후에 올림픽 코일 전류가 0이 되도록 전류 명령이 생기고 이에 따라 올림픽 코일 전류가 0으로 하강하면 올림픽 코일 이동자가 고정자에서 분리되면서 코일 인덕턴스가 감소한다. 인덕턴스 값이 45 mH가 되면 이동 집게 코일과 정지 집게 코일 양측에 허용 최대 전류를 흘려서 정지된 구동축을 동시에 잡고(그림 7에서는 이동 집게가 구동축을 잡고 있던 상태이다.) 300msec 이후에 전류 레벨을 유지할 위한 중간 레벨로 줄이는 것을 볼 수 있다.

결과에서 볼 때 올림픽 코일 이동자의 복귀를 확인한 후에 이중유지 명령을 발생하여 제어봉 1 step 동작 중에도 안전하게 이중유지를 시행할 수 있음을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 시스템 고장이나 보수 중에 제어봉 낙하를 보다 효과적으로 방지할 수 있는 이중유지에 대하여 기기의 무리를 최소화할 수 있는 안전한 방법을 제시하였다. 올림픽 코일 인덕턴스 변화를 읽어서 이동자의 이동 검출을 확인하여 이동자의 이동 중에 집게가 구동축을 잡는 상황을 회피하도록 하였다. 이런 방법을 통해 제어봉 동작 중 어디서나 이중유지가 안전하게 시행되는 것을 실험 결과를 통해 알 수 있었다.

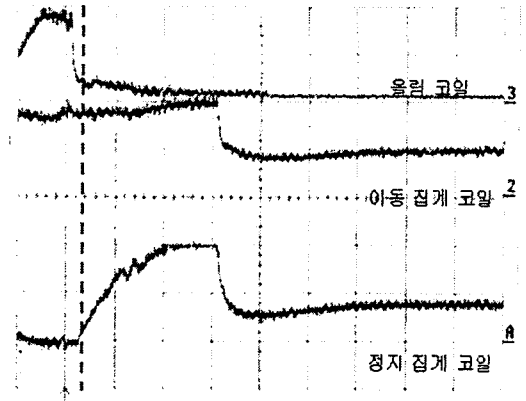


그림 7. 제안된 방법에 의한 이중 유지 결과

[참 고 문 헌]

- [1] 정구관, "제어봉제어설비", 한국수력원자력(주), 1991.
- [2] "RCS Technical Description," Schneider Electric, 2001.
- [3] 이종무, 김춘경, 김석주, 천종민, 박민국, 정순현, 남정환, "제어봉구동장치 제어시스템용 전력함 개발", 2003년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 제D권, pp. 2274-2276, 2003.
- [4] Combustion Engineering, Inc., "Automatic Controller For Magnetic Jack Type Control Rod Drive Mechanism," US-Patent 4,363,778, 1982.
- [5] 한국전기연구원, "부상 및 추진 제어기술 개발" 과학기술부, 1998.