

# 원자로 제어봉구동장치의 안정적 제어봉 이중 유지 방법

## Stable Control-rod Double Hold Method of Control Rod Drive Mechanism

천종민, 김춘경, 이종무, 정순현, 김석주, 권순만

(Jong Min Cheon, Choon Kyung Kim, Jong Moo Lee, Soon Hyun Jung Seog-Ju Kim and Soonman Kwon)

한국전기연구원 계속제어연구그룹(전화:(055)280-1449, 팩스:(055)280-1476, E-mail : jmcheon@keri.re.kr)

**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. If a gripper with any problem is ordered to grip the drive rod, the gripper which cannot latch the rod stably will fail to take the rod. On the purpose of escaping this bad case, we order two grippers to hold the drive rod and enhance the reliability of holding control rods. This action is called the double hold. 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.

**Keywords :** Control Rod Control System, Control Rod Drive Mechanism, Double Hold, Movement Detection

### 1. 서론

원자력 발전소의 제어봉 구동장치 제어시스템(Control Rod Control System; CRCS)은 제어봉 집합체를 구동시키는 제어봉 구동장치(Control Rod Drive Mechanism; CRDM)들을 상부로부터의 명령을 만족하도록 제어하는 것이다. 중성자 흡수재로 만들어진 제어봉들이 원자로 내에서 상하 운동을 하면서 원자로 출력을 조절하므로 제어봉 구동장치에 대한 제어가 원자로 출력을 결정한다고 볼 수 있다. 비상시에는 CRCS가 CRDM에 공급되는 전력을 차단하여 제어봉들을 원자로 내부로 추락시켜서 원자로를 안전하게 정지시킨다[1,2,3]. 이번에 한국전기연구원과 (주)두산중공업이 원전계측제어시스템개발사업을 수행하면서 새로이 개발한 CRCS는 기존 원전 계속제어시스템의 노후 설비와 복잡한 아날로그 회로들을 개선할 목적으로 디지털 시스템을 도입하여 효율성이나 간편성에서 개선을 취하였다[4]. 개발된 시스템의 특징 중의 하나는 자체 감시, 진단 및 대처 기능을 강화한 것이다. 시스템에 이상이 발생하였을 때에 이를 즉시 검출하여 해당 이벤트의 종류를 판단하고 운전원이 잘 판별할 수 있도록 알려준다. 그리고 단일 고장으로 인해 전체 시스템 동작이 영향을 입지 않도록 CRCS의 주요 부분들을 이중화하였다.

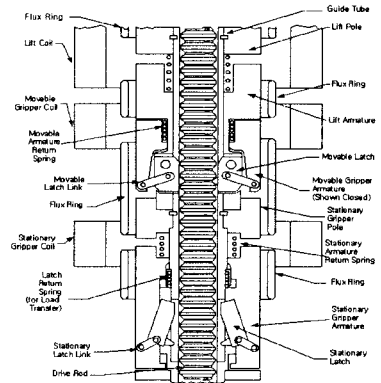
시스템 고장 시에는 제어봉의 운동을 정지시키고 유지, 보수에 들어가는데 이 때에 제어봉이 낙하되는 것을 막기 위하여 제어봉 집합체를 잡고 있는 CRDM 구동축을 하나 이상의 집게가 물고 있어야 한다. CRDM에 있는 두 개의 집게들이 모두 구동축을 무는 방법을 이중 유지(Double Hold)[5]라고 부르며 본 논문에서는

이중 유지가 기기에 무리를 주지 않고 보다 안정적으로 시행되도록 하는 방법을 고안하여 소개한다.

### II. 본론

#### 1. 제어봉 구동장치

제어봉 구동장치는 자기-잭(Electromagnetic-Jack) 타입으로 구동 코일에 전류를 흘려서 이를 통해 발생하는 자기력을 이용하여 집게들이 구동축을 잡거나 제어봉 집합체가 달린 구동축을 들어 올리게 된다. 제어봉 구동장치는 구동 코일 개수에 따라 3-코일 형식과 4-코일 형식으로 나누어 진다.



The Components of the CRDM (Westing House Type)

그림 1. 3-코일 타입 제어봉 구동장치의 구성  
Fig. 1. The Components of 3-coil CRDM.

이번에 개발된 CRCS는 3-코일 형식의 제어봉 구동 장치를 대상으로 하였다. 그림 1에서는 3-코일 형식의 제어봉 구동장치의 구성을 보여 주고 있다. 3-코일 형식의 제어봉 구동장치는 정지 집게 코일, 이동 집게 코일 그리고 올림 코일의 총 세 개의 코일들을 가지고 있다. 개발된 CRCS의 성능을 시험하기 위하여 실제 원전의 CRDM과 유사한 CRDM 모의 장치를 제작하였다.

표 1. 모의 CRDM 사양  
Table 1. The Spec. of CRDM-Mockup

| 항목           | 단위       | 값     |   |      |
|--------------|----------|-------|---|------|
| 가동부 총 중량     | kg       | 130   |   |      |
| 총 이동 Step    | 수        | 30    |   |      |
| 1 Step 이동 거리 | mm       | 16.0  |   |      |
| 전류           | 올림 코일    | 올림    | A | 40.0 |
|              |          | 유지    | A | 18.0 |
|              | 이동 집게 코일 | 이동    | A | 9.0  |
|              |          | 정지    | A | 8.0  |
|              | 정지 집게 코일 | 유지    | A | 4.4  |
| 최대 속도        | mm/sec   | 1,300 |   |      |

## 2. 이중 유지

CRCS의 전력함은 주어진 명령에 따라 제어봉 구동 장치에 알맞은 전력을 공급한다. 하나의 전력함에서는 총 3 그룹의 제어봉을 구동시킨다.(1 그룹 당 4개의 제어봉 집합체, 4개의 제어봉 구동장치) 기존 시스템과 다르게 이동 집게 코일 구동용 전력변환기를 정지 집게 코일과 같이 각 그룹 별로 설치하여 이동 집게 코일 역시 각 그룹 개별적으로 자유로이 동작할 수 있도록 하였다. 이런 설계 조건으로 구동축을 정지 집게와 이동 집게가 동시에 구동축을 무는 이중 유지가 용이하게 되었다. 또한 이렇게 전력함에서 이중 유지를 이용하게 됨에 따라 DC Hold Power Supply Panel을 별도로 설치할 필요가 없게 되었다[4].

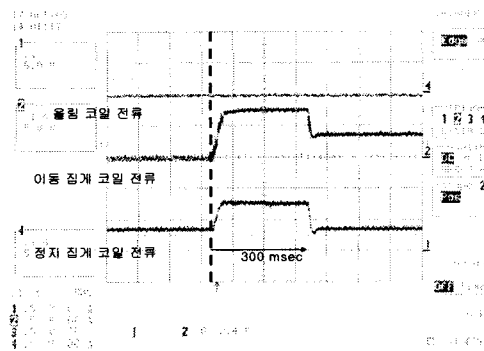


그림 2. 이중 유지 시 전류 파형  
Fig. 2. Current trends in Double Hold Mode.

자체 감시 중에 시스템에 이상을 발견하였을 때는 제어봉 운동을 즉시 정지시키고 이에 대한 보수에 들어가야 한다. 이 때 이중 유지를 이용하면 보다 확실하게 제어봉 정지를 유지시켜서 제어봉 추락 방지의 신뢰성을 더 높일 수 있다. 그림 2에서는 이중 유지 전류 명령에 대한 각 코일 별 전류 파형들을 보여 준다. 그림에서 보듯이 이중 유지에 들면 정지 집게 코일과 이동 집게 코일에 허용 최대 전류를 흘려서 정지 집게와 이동 집게가 동시에 구동축을 잡게 되고 올림 코일 전류를 0으로 줄여서 구동축 이동을 막는다. 이후로 계속해서 집게 코일들에 높은 전류가 흐르게 되면 코일에 손상을 줄 수 있으므로 일정 시간(300msec)이 지나면 중간 레벨의 전류(약 4.4 A)로 줄여서 유지하도록 한다[5]. 이중 유지가 시행되는 상황들은 다음과 같다.

- ① 긴급 고장 발생 시 (자동 이중 유지 투입)
- ② 이중화된 전력제어기의 상/하 제어기 모두에서 이상 발생 (자동 이중 유지 투입)
- ③ 전력함 전면의 수동 이중 유지 스위치 올림

그림 3에서는 긴급 고장 중의 하나인 사이리스터 고장이 제어봉 정지 시에 정지 집게 코일 측에 발생하였을 때 자동으로 이중 유지가 시행된 결과를 이벤트 기록(Event Log) 과정으로 저장된 데이터를 통해 보여 준다. 한 상이 빠뜨려져서 전압 공급이 제대로 되지 않아서 정지 집게 코일이 구동축을 제대로 잡지 못하더라도 이동 집게 코일이 대신 잡으므로 제어봉 추락을 확실히 막아주는 이중 유지의 장점을 확인할 수 있다.

위 상황들과 같이 자동 혹은 수동으로 이중 유지가 시행될 때 구동축의 이동이나 이동 집게의 동작에 상관 없이 집게들이 강제로 구동축을 물게 되면 걸쇠가 잘못된 홈으로 들어가서 구동축과 집게 양 측에 기계

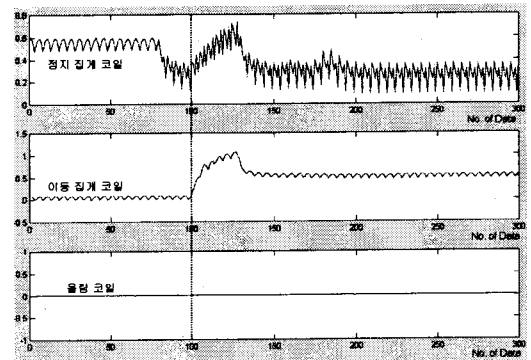


그림 3. 긴급 고장 발생 시 이중 유지  
Fig. 3. Double Hold mode caused by an urgent fault.

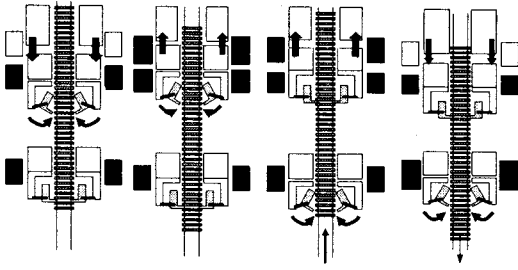


그림 4. 이중 유지 시에 기계적 파손이 가능한 상황  
Fig. 4. Possible states of mechanical breakdown in Double Hold Mode.

적 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 이동과 연관되어 있다. 따라서 올림 코일 이동자가 완전히 고정자로부터 분리된 이후에 이중 유지가 기동되는 것이 안전한 것을 알 수 있다. 그림 5에서는 이중 유지가 실제로 제어봉 운동 중에 시행된 결과를 보여 주고 있다. 가장 위로부터 올림 코일 전류, 이동 집게 코일 전류, 그리고 제일 아래에 정지 집게 코일 전류 파형들이다. 굵은 점선을 기준으로 우측이 이중 유지에 들어간 상태인데 여기서는 이중 유지 명령이 점선 이전에 발생하였다 하더라도 1 step 동작이 마무리되고 난 후에 이중 유지가 기동되고 있음을 알 수 있다. 이는 올림 코일 이동자가 고정자에서 완전히 분리된 상태에서 이중 유지가 시행되므로 안전하지만 이중 유지 명령 즉시 시행되지 못한다. 본 논문에서는 이중 유지 명령이 발생하는 즉시 이중 유지가 안정적으로 시행되는 방법을 찾고자 한다.

### 3. 올림 코일 이동자 이동 검출

올림 코일 이동자의 이동을 알려주는 정보를 가지고

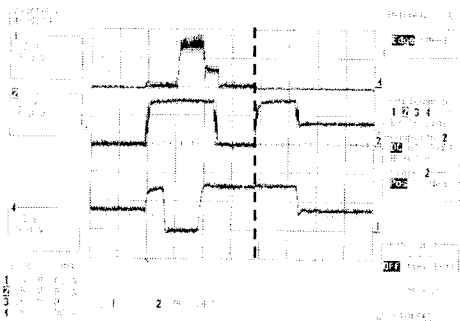


그림 5. 이중 유지 결과의 한 예  
Fig. 5. One example of the double hold result.

있다면 이를 이용하여 이중 유지 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 [6].

제어봉 구동장치에 사용되는 전자식 코일의 인덕턴스가 고정자와 이동자 간의 거리의 함수이므로 코일에 흐르는 전류와 전압을 이용하여 코일의 인덕턴스를 변화를 추정하여 이동자가 이동했는지 여부를 판단하는 방법을 이용한다[7]. 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.

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

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

올림 코일 이동자의 동작에 대한 정보로서 올림 코일 인덕턴스 변화값을 이용하고자 한다. 이중 유지 명령이 발생하는 즉시 올림 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.

### 3. 실험 결과

제어봉 인출 도중에 수동 이중 유지 스위치를 올려서 강제로 이중 유지 명령을 가하였다. 그림 7에서는 그 결과를 각 코일 전류를 통해 보여 주고 있다. 그림

### III. 결론

본 논문에서는 시스템 고장이나 보수 중에 제어봉 추락을 효과적으로 방지할 수 있는 이중 유지에 대하여 기기의 무리를 최소화할 수 있는 안정적 방법을 제시하였다. 올림 코일 인덕턴스 변화를 읽어서 이동자의 이동 검출을 확인하여 이동자의 이동 중에 집계가 구동축을 무는 상황을 회피하도록 하였다. 이런 방법을 통해 제어봉 동작 중 어디서나 이중 유지가 안정적으로 시행되는 것을 실험 결과를 통해 알 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] 정구관, "제어봉 제어설비", 한국수력원자력(주), 1991.
- [2] Westinghouse, "RCS I&C Training Manual".
- [3] "Rod Control System, System Training Guide," Univ. of California, Berkeley.
- [4] 이종무, 김춘경, 김석주, 천종민, 박민국, 정순현, 남정환, "제어봉 구동장치 제어시스템용 전력함 개발", 2003년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 제D권, pp. 2274-2276, 7. 2003.
- [5] "RCS Technical Description," Schneider Electric, 2001.
- [6] Combustion Engineering, Inc., "Automatic Controller For Magnetic Jack Type Control Rod Drive Mechanism," US-Patent 4,363,778, 1982.
- [7] 한국전기연구원, "부상 및 추진 제어기술 개발," 과학기술부, 1998.

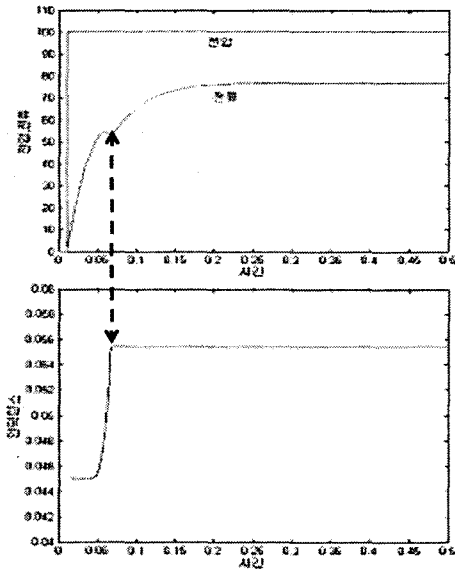


그림 6. 올림 코일 인덕턴스 검출 결과(시뮬레이션)  
Fig. 6. Result of the lift-coil inductance detection (simulation).

에서 보면 이중 유지 명령이 발생한 직후에 올림 코일 전류가 0이 되도록 전류 명령이 생기고 이에 따라 올림 코일 전류가 0으로 하강하면 올림 코일 이동자가 고정자에서 분리되면서 코일 인덕턴스가 감소한다. 인덕턴스 값이 45 mH가 되면 이동 집계 코일과 정지 집계 코일 양측에 허용 최대 전류를 흘려서 정지된 구동축을 동시에 잡고 (그림 7에서는 이동 집계가 구동축을 잡고 있던 상태이다.) 300msec 이후에 전류 레벨을 유지를 위한 중간 레벨로 줄이는 것을 볼 수 있다.

결과에서 볼 때 올림 코일 이동자의 복귀를 확인한 후에 이중 유지 명령을 발생하여 제어봉 1 step 동작 중에도 안정적으로 이중 유지를 시행할 수 있음을 확인할 수 있다.

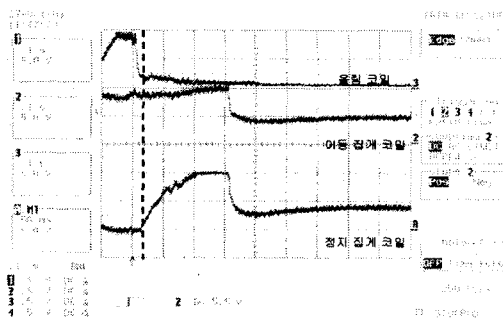


그림 7. 제안된 방법에 의한 이중 유지 결과  
Fig. 7. Results of the proposed double hold