

제어봉구동장치 시뮬레이터 개발

김병문, 이병주, 이영렬, 한재복

한국원자력연구소

유 준

충남대학교

요 약

기존의 아날로그로 구성된 제어봉구동장치 제어계를 디지털로 설계개선하기 위한 선행 작업의 일환으로 제어봉구동장치의 출력 신호를 모사하기 위한 제어봉구동장치 시뮬레이터가 개발 되었다. 개발된 시뮬레이터는 제어봉구동장치의 인출 및 삽입시에 마그네틱 코일로부터 검출되는 전류파형을 모사 할뿐만 아니라 제어봉구동장치가 비정상적으로 움직이는 기계적인 이상 상태를 모사 할 수 있도록 모델링 하였다. 시뮬레이터의 성능 검증에 위하여 영광 3,4호기 현장에서 수집한 제어봉구동장치 출력 신호와 비교해 본 결과 제어봉구동장치의 거동을 잘 모사 함을 알 수 있었다. 이 시뮬레이터는 디지털 제어봉구동장치 제어계 개발시에 소프트웨어의 기능을 검증할 수 있고, 제어봉구동장치 제어계를 설계개선할 경우 설계 도구로 사용할 수 있다.

1. 서 론

현재 우리나라에서 가동 중인 모든 원자력 발전소의 제어봉구동 장치 제어계통은 일부 기능을 제외하고는 20~30년 전의 설계 기술을 이용하여 제작되었기 때문에 계통의 하드웨어 고장시에 부품을 확보하기가 어려운 실정이다. 고리 1,2호기의 경우 지난 2~3년간 제어봉구동장치 제어계통의 고장으로 인하여 불시 원자로 정지가 빈번히 발생하였는데 원인은 제어봉구동장치 제어계통 내의 인쇄회로기판 상에 있는 전자 부품의 노화로 인한 결함 때문으로 판명되었으나 앞에서 언급한 대로 예비 부품 확보에 어려움이 계속되고 있으며 시간이 갈수록 어려움이 증가될 것으로 예상된다. 이러한 문제

점을 해결하기 위해서는 기존의 하드웨어로 구성된 아날로그 제어로직을 소프트웨어를 이용한 디지털 로직으로 설계를 개선시킬 수밖에 없으나 설계개선이 지연된 이유는 원자력발전소의 안전이 강조되어 기술적으로 가동 경험이 없는 즉 기술적으로 입증되지 않은 장치 사용을 꺼려 왔기 때문이다. 그러나 현 시점에서는 아날로그 계통을 디지털 계통으로 설계개선시키는 것을 더이상 늦출 수 없으며 원자력 분야의 선진국들도 개발을 서두르거나 개발을 완료하여 실제 발전소에 디지털 제어봉구동장치 제어계통을 적용하고 있는 중이다. 디지털 제어봉구동장치 제어계통의 설계시에 고려되어야 할 중요한 요소 중의 하나는 기존의 하드웨어 로직이 소프트웨어로 대체됨으로 인한 제어 기능의 이상 유무 확인이다. 디지털 제어봉구동장치 제어계통의 소프트웨어 알고리즘이 제대로 설계되었는지를 확인하기 위해서는 제어봉구동장치의 기계적인 움직임에 해당하는 전기적인 출력 신호를 모사할 수 있는 모의장치가 필요하다. 제어봉구동 모의장치는 기계적인 규모가 매우크기 때문에 실험실에 설치하기가 곤란하며 고전류가 사용되므로 추가적인 냉각기가 필요되는등 유지 보수에 어려움이 있다. 본 논문에서는 제어봉구동장치가 움직일 때 마그네틱 코일에서 발생하는 전류의 파형 및 비정상적인 움직임을 나타내는 코일 전류의 특징을 모델링하여 디지털 시스템으로 구현하여 실제 발전소 현장에서 측정될 수 있는 상황이 모사 되도록 하였다.

2. 본 문

2.1 제어봉구동장치 구성

제어봉구동장치는 자기-잭 (Magnetic Jack) 유형의 구동장치로서 제어봉 집합체를 노심 내에서 수직 이동 및 정지토록 하는 데 사용되며 각 구동장치는 작동 신호에 따라 153" 노심 길이 범위 내의 어떠한 위치에서도 인출, 삽입, 정지 및 낙하시킬 수 있다. 제어봉구동장치는 상하부 제어봉구동장치 압력하우징, 전동기 멍치, 코일스택 (Coil Stack) 멍치, 위치 지시 스위치 멍치, 연장축 멍치 등으로 구성되고, 제어봉구동장치 하우징을 둘러싼 코일스택 멍치에 의해 구동된다. 전동기 하우징 속에 장착된 전동기는 제어봉 집합체를 수직으로 이동시키는 역할을 하며 래치(Latch)안내관과 상하부

래치들로 구성된다. 상하부 래치는 제어봉구동장치를 단계별로 작동시키는 데 사용되고 제어봉 집합체를 이동시킬 필요가 없는 경우에는 상부 래치가 현위치를 유지시킨다. 상하부 래치 이동은 수직으로 7/16" 와 6/16" 이며, 한 주기당 제어봉 집합체의 이동은 3/4" 이다^[1,2]. 전동기 하우징 외부에 설치된 코일스택 뭉치는 4개의 큰 직류 자기 코일로 구성되며 이 코일들이 제어봉 집합체 연장축에 접속되어 전동기 래치들에게 자기력을 공급한다. 자기 코일에 공급되는 전원은 두 대의 전동기 발전기(Motor-Generator Set)로 부터 오며, 제어봉구동장치 제어시스템의 삽입, 인출 방향 및 순차적 작동을 지시함으로써 제어봉구동장치가 원하는 위치로 이동하게 된다. 영광 3,4호기 및 울진 3,4호기 제어봉구동장치는 상부 이동(upper lift), 상부 집게(upper gripper), 하부 이동(lower lift) 및 하부 집게(lower gripper)의 4개의 코일로 구성되어 있으며 제어봉구동장치 제어시스템에서 4개의 코일에 가해지는 전류의 크기를 순차적으로 제어함으로써 전동기 내의 해당되는 래치들을 여자 혹은 비여자 시킴으로써 제어봉구동장치의 삽입, 인출 및 동작을 정지시킬 수 있다^[3,4].

2.2 제어봉구동장치 모델링

제어봉구동장치가 근접한 코일에 의한 자속의 영향을 고려하지 않은 경우 전기적 인 등가 회로는 R-L회로로 나타낼 수 있으며 여기에 역기전력에 의한 영향을 고려하여 모델링 하였다. 코일에 흐르는 전류가 증가하면 회로 내의 자속이 증가하고 이로 인하여 어느 일정한 값에 도달하면 제어봉이 움직이기 시작한다. 이때의 동작 전류는 제어봉의 무게에 의하여 결정된다. 일단 제어봉이 움직이면 이로 인하여 발생한 자속의 변화 때문에 회로에 흐르는 전류는 특유의 형태로 변형되며 이는 회로 내에 역기전력으로 존재하게 된다. 이 역기전력은 회로의 인덕턴스(L), 상호 인덕턴스(M), 저항(R) 그리고 전류(I)의 함수로 표시할 수 있으며 오직 제어봉이 움직이는 동안에만 발생된다. 본 시뮬레이터는 정상 동작 중 코일 온도에 의한 영향도 반영하여 출력이 실제에 근접하도록 설계하였다. 제어봉구동장치에 대한 전기적 특성은 제어봉이 움직일 때 발생하는 역기전력을 고려하지 않으면 다음과 같이 식(1)로 표현할 수 있다. E_c^2 는 역기전력에 의한 영향을 고려하기 위하여 첨가된 항이다. 제어봉이 움직이는 순간에만 역기전력이 발생하므로 이를 모두 고려한 식은 비선형이므로 전체를 선형으로 표시할 수는

없다. 다만 실제로 운전할 때의 여러 조건들을 고려하여 실제와 유사하도록 설계하였으며, 역기전력에 대한 항은 실제 측정된 발전소 데이터로부터 추정하였다. 제어봉구동장치는 상온보다 매우 높은 온도에서 동작하므로 동작 중의 실제 저항값을 계산하기 위하여 동작 중 측정된 전류 대 온도 특성 표로부터 시정수를 구하였다.

$$I_C(s) = E^1_C(s) \times (1 / (\tau_T s + 1)) \quad (1)$$

$$I^1_C(s) = (E^1_C(s) - E^2_C(s)) \times (1 / (\tau_T s + 1)) \quad (2)$$

- 여기서 $I^1_C(s)$: Coil에 흐르는 전류
- $E^1_C(s)$: Coil에 가해진 입력 전압
- $E^2_C(s)$: Coil에 발생한 역기전력
- τ_T : 회로의 시정수
- $E_C(s)$: $E^1_C(s) - E^2_C(s)$

이식을 디지털 전달함수로 나타내면 다음과 같다.

$$H(z) = (A_0 + A_1 Z^{-1}) / (1 + B_1 Z^{-1}) \quad (3)$$

이를 구현하기 위한 구성도는 그림 1과 같다. 그림 1의 점선 안은 코일 모델링 모듈을 나타낸다. 입력 $E(n)$ 에 대한 출력 $Y(n)$ 을 빠르게 얻기 위하여 다음과 같은 과정으로 처리하였다.

$$\begin{aligned} H(z) &= (A_0 + A_1 Z^{-1}) / (1 + B_1 Z^{-1}) \\ &= (I(z) M(z)) / (M(z) E(z)) \\ M(z) / E(z) &= 1 + B_1 Z^{-1} \\ M(z) &= E(z) + B_1 Z^{-1} M(z) \\ I(z) / M(z) &= A_0 + A_1 Z^{-1} \\ I(z) &= A_0 M(z) + A_1 Z^{-1} M(z) \end{aligned} \quad (4)$$

이들을 시간 영역에서 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M(n) &= E(n) + B_1 M(n-1) \\ I(n) &= A_0 M(n) + A_1 M(n-1) \\ M(n) &= E(n) + T_{em1} \end{aligned}$$

$$I(n) = A0 M(n) + Tem2 \quad (5)$$

E(n) 이 인가되면 M(n)이 계산되고 바로 I(n)도 계산된다. 그 다음 M(n) 이 M(n-1)이 되게 지연시켜 Tem1 과 Tem2 를 구한 후 E(n+1) 을 인가해서 M(n+1) 을 얻으면 I(n+1) 이 계산된다. 이와 같은 과정이 반복되어 수행된다. Fig.1 은 소프트웨어 구현을 위한 블록다이어그램 이다.

2.3 소프트웨어 설계

본 시뮬레이터는 발전소에서 사용하는 코일의 저항과 인덕턴스, 그리고 제어봉의 무게를 입력시키면 자동적으로 전달함수를 구하고 시뮬레이션에 필요한 정보를 생성하도록 되어 있다. 한번 생성된 정보는 파일로 저장되므로 반복적으로 계속해서 사용할 수 있다. 입력 신호로 DC 전압을 받을 수도 있고 전압에 대한 정보만을 이산 신호로 받을 수도 있다. 이 경우 입력된 정보로부터 해당하는 전압을 자체 생성하여 모델링 모듈에 가하게 된다. 모델링 모듈은 출력을 아날로그 형태로 내보낸다. 이는 발전소에서 전류파형을 감시하기 위하여 설치한 측정항 양단에 흐르는 전류값에 비례하는 전압 신호와 크기가 일치한다. 제어봉이 움직이기 시작하는 동작점은 제어봉의 무게로부터 계산해 낸다. 본 시뮬레이터는 4-코일 형태의 영광3,4호기는 물론 3-코일 형태의 다른 발전소에도 적용 가능하도록 설계하였다. 운전원과의 연계는 개인용 컴퓨터의 키보드를 통하거나 모니터 화면의 메뉴에서 조작 가능하다.

3. 검증시험 및 결과

제어봉구동장치 시뮬레이터는 MATLAB을 사용하여 프로그램하였다. 입출력장치 구현을 위하여 MATLAB용 드라이버를 설계하고 Intel 486 PC에 입출력 카드를 장착하여 외부 장치에 연결시켰다. 먼저 시뮬레이터의 기능을 검증하고 이 시뮬레이터를 이용하여 타이밍모듈 기능 측정 장비의 기능중 시퀀스 기능을 검증하였다. Fig. 2 는 시운전 시험중 영광3,4호기의 현장에서 취득한 제어봉 삽입시 제어봉작동 파형을 나타낸다. Fig. 3 은 시뮬레이터의 제어봉삽입시 출력파형을 나타낸다.

4. 결 론

제어봉구동장치(CEDM) 제어시스템의 정상상태 출력파형 및 기계적인 이상시에 발생될 수 있는 전기적인 출력특성을 모사할 수 있는 시뮬레이터가 개발되었다. 설계, 제작한 시뮬레이터는 제어봉구동장치 제어시스템의 알고리즘 개발이나 타이밍 논리회로를 분석하는 데 매우 유용하게 사용할 수 있음이 확인되었다. 또한 개발한 장비를 시험할 때 혹은 미세 조정 등 현장에 장비를 설치하기전 기능시험을 하는 데도 유용하게 사용할 수 있을 것으로 기대한다. 개발된 시뮬레이터는 각 제어봉의 파라메터만 변경하면 국내에서 가동 중인 모든 제어봉구동장치의 출력파형 모사도 가능하기 때문에 현재 원자로불시정지의 원인이 되고 있는 구동장치 제어시스템의 하드웨어를 변경 혹은 교체시에 검증장비로 사용될 수 있다. 개발된 장비를 이용하여 현재 발전소 시운전에 수행 중인 시스템의 성능시험을 설계 및 제작단계에서 수행할 수 있으므로 제어봉구동장치 시운전 시험기간을 단축시킬 수 있을 것으로 기대한다. 현재 이 시뮬레이터는 원자력연구소에서 원전기술개발과제로 수행중인 디지털제어봉구동장치제어시스템개발에 유용하게 사용중이다.

참고문헌

- 【 1】 원전2호기 제어봉낙하사고원인의 평가, 한국에너지연구소, KAERI/NSC /232/83, 1987. 3.
- 【 2】 Magnetic Jack Type Control Element Drive Mechanism Technical Manual, ABB-CE
- 【 3】 Design Specification for CEDM Drive Mechanism Control System for YGN3&4, 10487-IC-DS630, 1989.
- 【 4】 CEDM Control System Design Requirements for YGN3&4, 10487-IC-SR630, 1990.

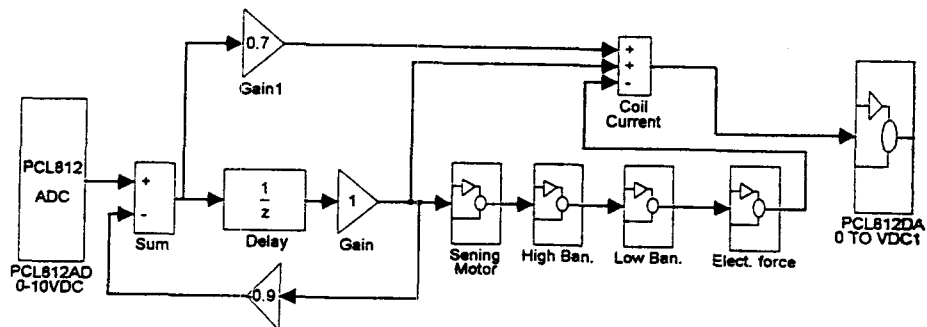


Fig. 1. Blockdiagram for software implementation.



Fig. 2. Current shape of YGN3&4 during insertion of control rod

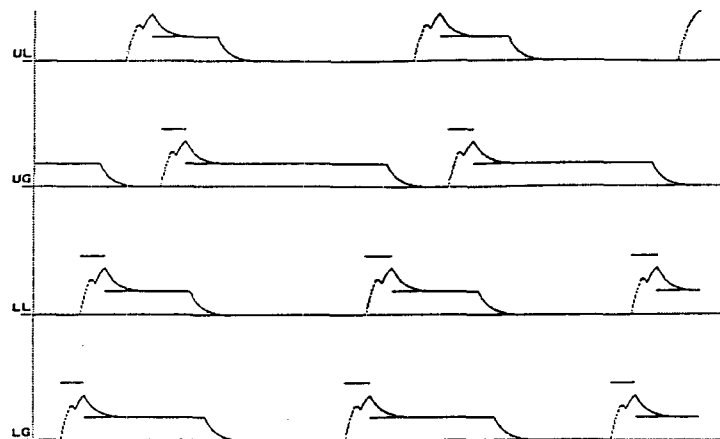


Fig. 3. Current shape of simulator during insertion of control rod