

제어봉구동장치제어계통의 개선된 제어 알고리즘 개발

김병문, 이영렬, 한재복, 유준*

한국원자력연구소, 충남대학교*

Improved Control Algorithm Development for Control Element Drive Mechanism Control System

Byeong Moon Kim, Young Ryul Lee, Jae Bok Han, Joon You*

Korea Atomic Energy Research Institute, Chungnam National University*

Abstract

The old Timing Controller for Control Element Drive Mechanism (CEDM) is designed as an open loop control system because it is difficult to mount sensors within the Control Element Drive Mechanism(CEDM) which is operating under the pressure boundary of the reactor vessel. In this work new method which can be used to detect the CEDM operational conditions without mounting sensors within the CEDM housing is developed in order to resolve problems of the old Timing Controller. By using the developed new method, the new Timing Controller for the CEDM is designed as a closed loop controller which has features of the control rod drop prevention, fine position control and the coil life time extension. The algorithm developed under closed loop control concept resolves most problems occurred in the old Timing Controller and improves the performance and reliability of the system. During designing and testing of the Timing Controller algorithm, the real time CEDM simulator developed here was used. And all functions of the developed algorithm were verified using CEDM simulator with the real data collected from the site. The results show that the Timing Controller performs its intended functions properly.

요약

원자력발전소의 제어봉구동장치는 원자로의 압력경계 안에 설치되고 밀봉되므로 센서의 설치가 곤란하여 기존의 제어기는 개루프 형태의 제어기를 사용하고 있다. 본 논문에서는 기존 타이밍모듈의 문제점을 해결하기 위하여 제어봉구동장치 내부에 센서를 설치하지 않고

도 제어봉구동장치의 작동 상황을 감시할 수 있는 방법을 개발하였다. 이 방법을 이용하여 제어봉 낙하방지, 정밀한 위치제어, 코일 수명연장의 특성이 있는 제어봉구동장치 타이밍 제어기를 페루프 제어계통으로 설계하였다. 페루프 제어개념에 의하여 개발된 알고리즘은 기존의 문제를 대부분 해결하였으며 계통의 성능 및 신뢰도가 향상되었다. 알고리즘 개발 및 시험 시, 여기서 설계한 실시간 제어봉구동장치 시뮬레이터를 사용하였고 현장에서 취득한 실제의 데이터와 함께 이 시뮬레이터를 이용하여 개발한 모든 알고리즘의 검증시험을 하였다. 검증결과 이 타이밍 제어기는 본래의 기능을 잘 수행하는 것으로 나타났다.

1. 서론

제어봉구동장치 제어계통은 제어봉을 노심 내로 삽입, 인출하여 원자로 출력을 제어하고 원자로보호계통 신호에 의하여 원자로를 안전하게 정지시키는 중요한 역할을 수행하고 있다. 그러나 기존의 제어봉구동장치 제어계통은 아날로그, 개루프 제어 방식으로 설계되어 있어서 다음과 같은 문제점을 가지고 있다. 1) 제어봉 인출, 삽입 명령 횟수를 계수하여 제어봉의 위치를 감지하므로 정확한 제어봉 위치 지시를 내릴 수 없고, 단일 제어봉의 스텝핑(Stepping)이 실패 시 제어봉 사이에 면차가 발생하여 정상운전에 영향을 줄 가능성이 있다. 2) 발전소 정상운전 시, 정지코일 전류 공급 회로의 고장이 발생하면 관련 제어봉이 낙하하여 발전 불시 정지를 일으키고 있다. 3) 계통의 고장으로 인한 정지 코일 고전류 시, 코일의 소손을 초래하거나 코일의 수명을 단축시킨다.[1]

본 논문에서는 센서를 설치하지 않고도 제어봉구동장치의 동작상태를 감시할 수 있는 방법을 제안하였으며, 현행 제어봉구동장치 제어계통이 안고 있는 문제점을 해결할 수 있도록 제어봉구동장치 타이밍 모듈의 단순한 순차제어 방식을 개선하고 지지점에 전환 알고리즘, 제어봉 리스트핑 알고리즘, 전류 파형 감지 알고리즘 등을 개발하여 페루프 제어봉제어기 을 개발하였다.

2. 모델링

국내 원전에 사용되는 영광 3,4호기 및 울진 3,4호기 제어봉구동장치는 상부이동, 상부집개, 하부 이동 및 하부집개의 4개의 코일로, 고리 1,2호기는 윤립, 집개, 정지의 3개의 코일로 구성되어 있다. 타이밍 제어기는 제어봉구동장치의 각 코일에 가해지는 전류의 크기를 순차적으로 제어함으로써 제어봉을 삽입, 인출 및 정지시킬 수 있다. 제어봉구동장치 제어계통의 소프트웨어 개발은 정상동작 및 오동작 출력파형 시뮬레이션이 가능한 시뮬레이터가 필요하다. 이러한 시뮬레이터 구현을 위하여 모델링을 수행하였고 이를 개인용 컴퓨터를 사용하여 구현하였다. 제어봉구동장치의 전기적인 동작 회로는 간단한 R-L 회로와 구동장치 기계적 동작 중 유기되는 역기전력의 조합으로 나타낼 수 있다. [2]

제어봉구동장치의 전기적 특성은 역기전력을 고려하지 않으면 식(1)과 같이 나타낼 수 있고 역기전력을 고려하면 식(2)와 같이 나타낼 수 있다. 역기전력에 대한 항은 실제 측정한 발전소 전류파형 데이터로부터 추정하였고 실제 저항값을 계산하기 위하여 동작 중 측정한 전류 대 온도 특성 표로부터 시정수를 구하였다. [7][8]

$$I_c(S) = E_{cl}(S) \frac{1}{\tau_r S + 1} \quad (1)$$

$$I_c(S) = \frac{E_{cl}(S) - E_{c2}(S)}{\tau_r S + 1} \quad (2)$$

여기서 $I_c(s)$: Coil에 흐르는 전류

$E_{cl}(s)$: Coil에 가해진 입력 전압

$E_{c2}(s)$: Coil에 발생한 역기전력

τ_r : 회로의 시정수

$E_c(s) : E_{cl}(s) - E_{c2}(s)$

이 식은 디지털 전달함수로 식(3)와 같이 표현할 수 있고, 시간 영역으로 표시하면 식(4),(5)와 같다.

$$H(Z) = \frac{A_0 + A_1 Z^{-1}}{1 + B_1 Z^{-1}} = \frac{I(Z)M(Z)}{M(Z)E(Z)} \quad (3)$$

$$E(Z)/M(Z) = 1 + B_1 Z^{-1}$$

$$M(Z) = E(Z) + B_1 Z^{-1} M(Z)$$

$$I(Z)/M(Z) = A_0 + A_1 Z^{-1}$$

$$I(Z) = A_0 M(Z) + A_1 Z^{-1} M(Z)$$

$$M(n) = E(n) - B_1 M(n-1)$$

$$I(n) = A_0 M(n) + A_1 M(n-1)$$

$$M(n) = E(n) + Tem1 \quad (4)$$

$$I(n) = A_0 M(n) + Tem2 \quad (5)$$

여기서,

$$Tem1 = -B_1 M(n-1), \quad Tem2 = A_1 M(n-1)$$

이를 구현하기 위한 구성도는 그림 1과 같다. 그림 1의 점선 안은 코일 모델링 모듈을 나타낸다.[4][5]

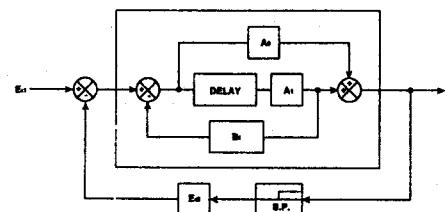


그림 1. 시뮬레이터 소프트웨어 구현을 위한 다이어그램

3. 타이밍모듈 알고리즘

제어봉구동장치가 센서를 설치하기 불가능한 장소에 위치하므로 기존의 제어봉구동장치 제어계통은 개루프 형태의 제어계통으로 설계되어 있다.[1][3] 그러나 제어봉 구동 코일에 흐르는 전류의 파형을 감시하고 이를 분석함으로써 센서를 설치하지 않고 폐루프 제어계통을 설계할 수 있다.

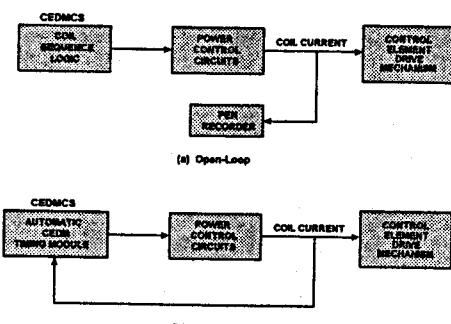


그림 2. 제어봉구동장치 제어계통의 제어 투프 비교

3.1 전류 파형 감시 알고리즘

제어봉구동장치 코일에 흐르는 전류의 파형은 그림 3과 같이 특유의 형태를 나타낸다. 따라서 전류가 최대치까지 상승하는 과정에서의 파형을 분석하여 굴곡 발생 여부를 감지하면 센서를 설치하지 않고도 제어봉구동장치의 동작 상태를 정확히 알 수 있다.

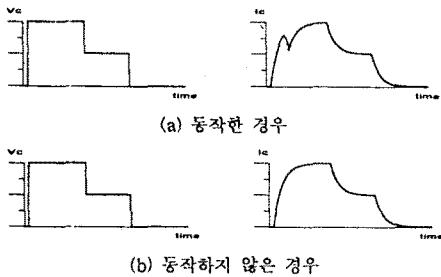


그림 3 제어봉구동장치 코일의 전압, 전류 파형

o 전류 파형의 변화율에 의한 감지 방법

제어봉구동장치 타이밍 모듈의 제어 신호가 고전압 신호이고 측정된 신호가 2~4.5 Vdc일 때 평균값들 간의 변화율을 구하고 이 구간에서 음(-)의 변화율이 3회 이상 연속적으로 감지되면 굴곡이 발생한 것으로 정상동작으로 간주한다. 측정신호와 평균값의 변화율은 그림 4와 같이 나타낼 수 있으며 그림에서 점선은 측정값, 실선은 평균값을 나타낸다. 측정신호 상의 평균값들을 x, y 좌표로 나타내면 변화율은식(5), 주기가 T인 이산식은 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Vel = \frac{dy}{dx} \quad (5)$$

$$Vel(n) = \frac{dY(n)}{dX(n)} = \frac{y(n) - y(n-1)}{T} \quad (6)$$

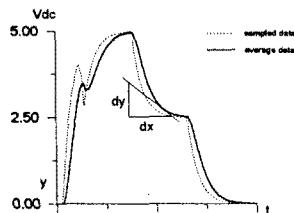


그림 4 전류 파형 변화율의 산출

그림 5의 (a),(a')는 정상동작 시의 구동 코일 전류 파형 및 파형의 변화율을 나타내고 있고 (b),(b')는 오동작 시의 구동 코일 전류 파형 및 파형의 변화율을 나타내고 있으며 (a'),(b')에서 점선으로 표시된 타원의 내부에 음의 변화율 존재 유무에 따라 정상동작 및 오동작이 감지된다.

3.2 전류 최적화 알고리즘

기존의 순차제어 방식은 코일의 과열 방지 및 코일 수명 연장을 위하여 일정 시간 동안 고전압을 가한 후 제어봉의 무게를 지지할 정도의 지진압으로 전환되도록 설계되어 있다. 그러나 이 경우 구동장치가 동작한 후에도 미리 설정한 시간

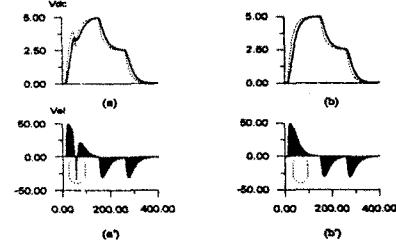


그림 5 측정 신호의 변화율

동안 고전압이 필요 이상으로 가해지게 되므로 이를 개선하여 구동장치의 동작이 감지되면 고전압 명령 신호를 즉시 저전압으로 전환하는 알고리즘을 개발하였다.

3.3 제어봉 속도제어 알고리즘

제어봉 속도조절 방법은 시퀀스 주기와 제어봉의 불감 시간을 조절하여 입력신호에 따라 연속적인 속도제어가 가능하도록 설계하였다.

3.4 자지점개 전환 알고리즘

자지점개 코일에 흐르는 전류를 계속 감시하여 전류가 정상 기준치 이상으로 많이 흐를 경우 코일의 손상을 방지하고, 기준치 이하로 작을 경우 제어봉이 낙하를 방지하기 위하여 즉시 경보를 울리고 이동점개 코일로 임무를 전환시키는 알고리즘을 개발하였다.

3.5 구동장치의 기계적 마찰에 대한 영향 고려

점개 전환 시, 기계적 마찰에 의한 오동작을 방지하기 위하여 전환되는 점개 코일에 전압을 공급하고 작동이 감지된 후에 기동작 중인 점개의 전압을 차단함으로써 확실한 점개 전환이 이루어지도록 설계하였다.

3.6 제어봉 리스템핑 알고리즘

제어봉을 삽입, 혹은 인출할 때 오동작이 발생하였을 경우에는 3번까지 반복하여 제 시도를 하고, 만약 3번의 반복 후에도 동작하지 않았을 경우에는 제어봉구동장치가 고착된 것으로 판단하고 즉시 자지점개 코일에 전압을 순차적으로 다시 공급하여 제어봉의 낙하를 방지하고 동시에 경보를 발생하도록 알고리즘을 개발하였다.

3.7 자기진단 알고리즘

일정한 주기로 하드웨어의 전전성을 점검하는 자기진단 기능을 수행한다. 자기진단은 실시간으로 처리되며 그 기능은 다음과 같다. 1) 회로의 공급 전원과 기준 전압 비교, 2) 메모리 전전상태 확인, 3) A/D 변환기 전전성을 확인, 4) 일

정한 주기의 지지코일 전류 감시.

류 시 코일을 노호하고 저 전류시는 제어봉 낙하를 방지한다.

4. 검증 시험 및 결과

개발된 시뮬레이터를 사용하여 오동작 및 정상동작 출력 파형을 발생시킬 수 있으며 이 시뮬레이터를 개발한 타이밍 제어기 알고리즘 입증시험 시 이용할 수 있었다. 다음과 같이 타이밍 제어기 알고리즘의 소프트웨어 기능 검증 시험을 수행하였다.

4.1 제어봉 인출 및 삽입 기능 검증

제어봉을 30 inch/min의 속도로 인출 및 삽입 명령을 주고 타이밍 모듈과 제어봉구동장치 시뮬레이터의 출력 파형을 관찰한 결과 1.5 초의 구동 시간이 소요되었으며 이는 30 inch/min의 속도에 해당하는 주기와 일치한다.

4.2 제어봉 구동 코일 전류 최적화 기능 검증

코일 전류 최적화 알고리즘에 의하여 그림 6의 빗금친 부분의 고전압 명령이 저전압 명령으로 전환되었다.

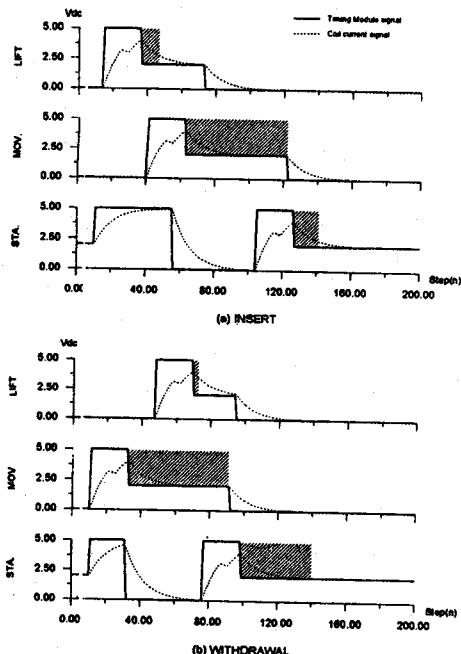


그림 6 전류 최적화 알고리즘

4.3 지지집게 전환 기능을 검증

정지 코일의 전류가 기준치 이상 증가하거나 감소할 경우 그림 7 (a),(b)와 같이 지지집게 전환이 수행되었다. 이는 고전

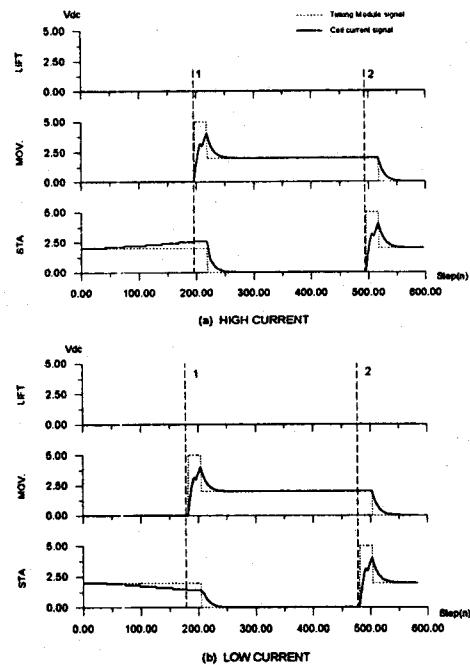


그림 7 정지집게 전환 알고리즘 (1.Actuation, 2.Reset)

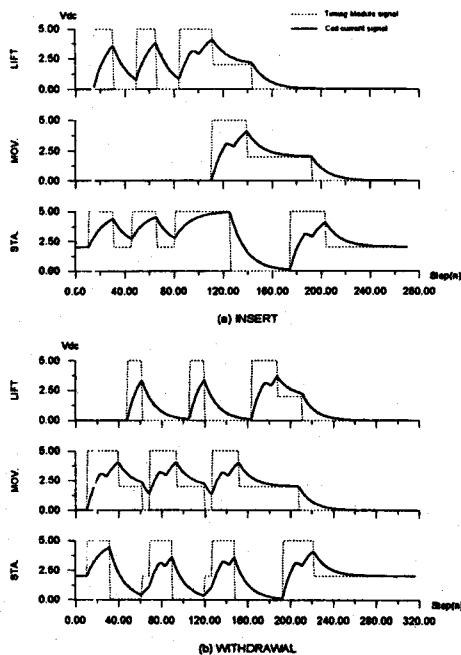


그림 8 제어봉 리스텝핑(Restepping) 알고리즘

4.4 제어봉 리스텝핑(Restepping) 알고리즘 기능 검증

그림 8은 제이봉 구동장치가 기계적인 문제로 인하여 구동되지 않을 경우 제이봉 리스텝핑 알고리즘에 의하여 재시도되어 3 번째 시도에서 제이봉이 구동되는 타이밍 모듈입, 출력 과정을 나타낸다.

5. 결 론

본 논문에서는 현재 원자력 발전소의 제이봉구동장치 제어계통의 문제점을 해결하는 방안으로 제이봉구동장치 알고리즘 개발하고 검증 시험을 수행하였다. 개발된 알고리즘을 이용하여 제이봉구동장치 타이밍 제어기능을 설계함으로써 본 논문에서 다음과 같이 제이봉구동장치 제어기능을 개선할 수 있었다. (1) 전류 과정 감지 알고리즘을 개발하여 구동장치 내에 센서를 설치하지 않고도 제이봉구동장치 제어계통을 폐루프 제어 방식으로 설계함으로써 제이봉들 사이의 편차를 방지할 수 있다. (2) 제이봉구동장치를 폐루프로 제어함으로써 주기적으로 설치의 제이봉 위치를 측정하여 보정하는 작업의 필요성이 없어졌다. (3) 지지점에 전환 알고리즘은 정지 코일의 전류 공급 회로 고장 시, 제이봉의 자유낙하로 인한 발전 불시 정지를 방지할 수 있다. (4) 지지점에 전환 알고리즘은 제동의 고장으로 인한 정지 코일 고전류 시, 정지 코일의 손상을 방지할 수 있다. (5) 제이봉에 흐르는 전류를 최적화 함으로써 코일의 과열을 방지하고 코일의 수명을 연장할 수 있다. 이와 같은 알고리즘 개발은 신뢰성 있는 제이봉구동장치 제어계통을 구축, 제이봉 낙하 방지, 정밀한 위치 제어 및 코일 수명 연장 등이 가능하게 되며 이에 따른 발전소 이용률 증대, 유지 보수비용 절감의 효과를 기대할 수 있다.

본 논문에서 개발한 제이봉구동장치 타이밍 제어기 알고리즘은 기존 원자력 발전소의 제이봉구동장치 제어계통의 개선 작업에 일차적으로 적용할 수 있을 뿐만 아니라 앞으로 건설하는 한국형 원자력 발전소의 설계에도 적용할 수 있을 것으로 기대된다

참 고 문 헌

- [1] “제이봉 제어계통”, 고리1호기 원자력 발전 교재, 한국전력공사, 1980.
- [2] “Magnetic Jack Control Element Drive Mechanism”, ABB-CE, 1986.
- [3] “Design Specification for CEDMCS for Drive Mechanism Control System for YGN 3&4”, N0291-IC-DS620, B.M. Kim, 1989.
- [4] “Theory and Design of Adaptive Filters”, New York Wiley, Treichler, 1987.
- [5] “Electric Machines and Electromechanics”, McGraw-Hill Book Company, Fitzgerald / Kingsley / Umans, 1981.
- [6] “C++ Primer Plus”, The Waite Group, Inc., Stephen Prate, 1991.
- [7] “원자력발전소를 위한 디지털공정제어계통 설계”, 한국원자력 연구소, 김병문, 1990.
- [8] “Interfacing to the IBM Personal Computer”, Howard W. Sams & Co. Inc, Eggebrecht, Lewis C., 1983.