

원자로 출력제어계통용 전력함 설계 및 제작

이 종무*, 김 춘경*, 김 석주*, 천 종민*, 권 순만*, 남 정한**
한국전기연구원*, 두산중공업(주) 기술연구원**

Design and Manufacturing of Power Cabinet for Reactor Power Control System

J.M. Lee*, C.K. Kim*, S.J. Kim*, J.M. Cheon*, S.M. Kweon*, J.H. Nam**
Korea Electrotechnology Research Institute*, DOOSAN Heavy Industries and Construction Co., LTD.**

Abstract - This paper deals with the design and manufacturing of power cabinet for reactor power control system(PCS). The PCS provides the control signals and motive power to operate the CEDMs(Control Element Drive Mechanism). The CEDM is raise and lower the CEAs(Control Element Assemblies) in the reactor core. The CEAs are constructed with the Boron-10 isotope which has a high microscopic cross section of absorption for thermal neutrons. This characteristic causes the addition of negative reactivity when a CEA is inserted and positive reactivity when it is withdrawn from the reactor core.

1. 서 론

국내 원자력 발전의 역사는 1978년 고리 1호기 원전을 시작으로 현재 20기가 운용되고 있다. 이들 중 경수로형 원전은 16기로서 주로 초기에 도입된 8기는 중성자를 흡수하여 핵반응도를 제어하기 위한 제어봉 흡수체를 구동하는 Magnetic Jack 형태의 Actuator가 3 Coil형의 CRDM(Control Rod Drive Mechanism) 이고, 나중에 도입된 8기는 한국표준형 원전으로서 4 Coil형의 CEDM이 Actuator로 설치되어 있다. 또한 현재 건설 중이거나 향후 건설 예정인 차세대 원전인 APR-1400에도 4 Coil형의 CEDM이 Actuator로 설치될 예정이다. 본 논문에서는 한국 표준형 원전 및 차세대 원전에 공통으로 적용할 수 있는 4 Coil형의 CEDM을 구동하기 위한 전력함을 설계 및 제작하여 원자로 출력제어계통인 PCS의 국산화 개발에 기여하고자 한다.

2. 본 론

2.1 대상 플랜트 검토

국내의 가동 중인 경수로형 원전 중에 CEDM을 Actuator로 채용하고 있는 발전소와 전기적 출력 용량, CEDM 수 및 상업운전 개시일은 표 1과 같다.

〈표 1〉 대상 플랜트 검토

발전소명	호기명	용량[MWe]	CEDM 수	상업운전일
영광 원전	3호기	1,000	73	1995. 3.31
	4호기	1,000	73	1996. 1. 1
	5호기	1,000	73	2002. 5.21
	6호기	1,000	73	2002.12.24
울진 원전	3호기	1,000	73	1998. 8.11
	4호기	1,000	73	1999.12.31
	5호기	1,000	73	2004. 7.29
	6호기	1,000	73	2005. 4.22

2.2 원자로 출력제어계통이란 ?

원자로 출력제어계통이란 차세대 원전인 APR-1400에 처음 도입된 용어로서 그림 1에 나타난 바와 같이 표준형 원전에서의 CEDMCS 계통, RPCS(Reactor Power Cutback) 계통, AUX Cabinet 계통 및 RRS(Reactor Regulating System) 계통을 포함하는 것이다.

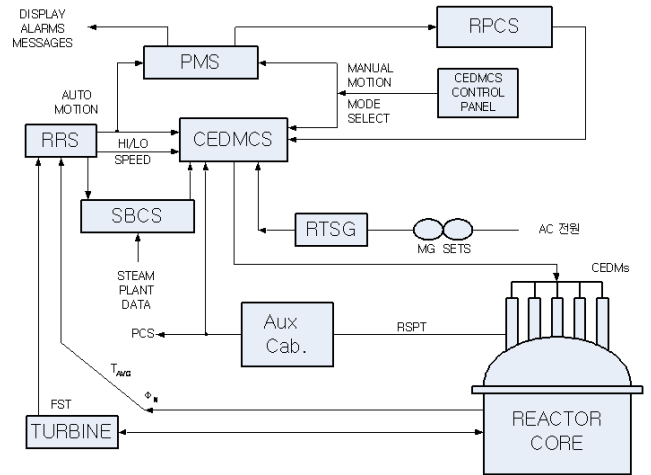
RRS 계통은 터빈 출력과 원자로 냉각수 온도를 비교하여 원자로 내의 핵반응도를 증감하기 위한 명령을 CEDMCS 계통으로 출력한다.

CEDMCS 계통은 RRS 계통 혹은 운전원으로부터 핵반응도 증감 방

향과 속도 명령을 받아서 CEDM을 구동하는 신호를 출력한다.

RPCS 계통은 터빈 부하의 Trip이나 급감발 시 원자로 내의 핵반응도를 급격히 줄여서 원자로 출력과 터빈 출력의 균형을 유지하기 위하여 미리 선택된 Regulating Group의 CEA들을 원자로 내로 낙하시키기 위한 계통이다.

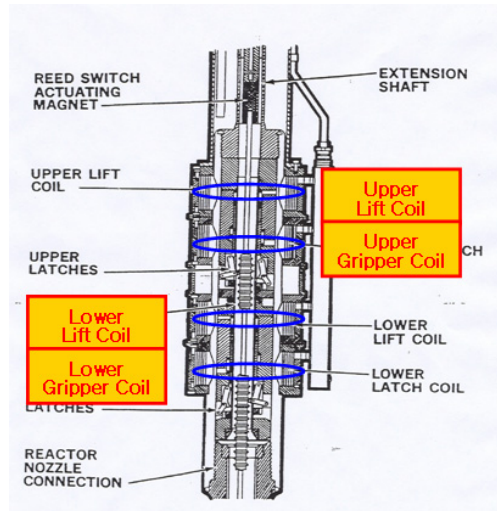
AUX Cabinet은 CEDM의 RSPT(Reed Switch Position Transmitter)와 관련된 신호들을 CEDMCS 계통에 전달하기 위한 캐비닛이다.



〈그림 1〉 원자로 출력제어계통 구성도

2.3 CEDM 구조 및 동작 원리

Magnetic Jack 형식의 CEDM 구조도를 그림 2에 나타낸다. CEDM은 크게 Upper Coil 부와 Lower Coil 부로 구성되어 있으며, 각각은 다시 Lift Coil부와 Gripper Coil 부로 구성되어 있다. CEDM의 일련의 동작에 의해서 제어봉 구동축을 한 스텝씩 위 또는 아래로 구동시킬 수 있으며, CEA는 구동축에 연결되어 있고, 구동축에는 한 스텝에 해당하는 3/4 인치 간격으로 홈이 만들어져 있다.

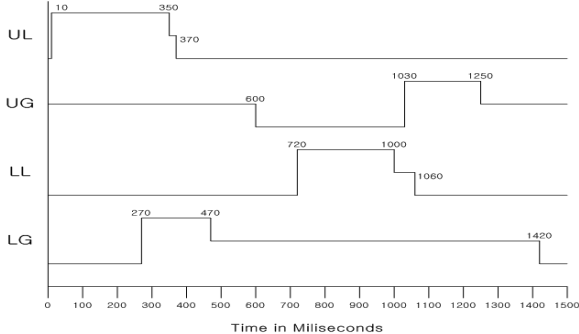


〈그림 2〉 CEDM 구조도

2.3.1 인출 시퀀스

제어봉 구동장치를 한 스텝 인출하기 위해서는 UL, UG, LL, LG 코일에 그림 3에 나타난 바와 같은 시퀀스로 전압 혹은 전류를 인가하면 된다. 그림에서 횡축은 시간을 나타내고 종축은 전압 혹은 전류의 크기를 나타낸다. 제어봉 구동장치가 한 스텝을 완료하는데 소요되는 시간은 1,500ms 이고, 제어봉의 구동 속도 조절은 각 스텝 동작 사이의 휴지시간으로 조절한다. CEDM에 인가하여야 할 전압 혹은 전류의 크기는 제어봉 구동장치의 전기 및 기구적인 사양과 밀접한 관련이 있다.

CEA WITHDRAWAL TIMING SEQUENCE

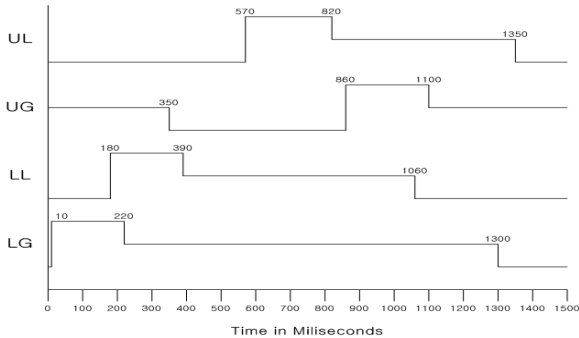


<그림 3> 인출 시퀀스 명령

2.3.2 삽입 시퀀스

제어봉 구동장치를 한 스텝 삽입하기 위해서는 UL, UG, LL, LG 코일에 그림 4에 나타난 바와 같은 시퀀스로 전압 혹은 전류를 인가하면 된다.

CEA INSERTION TIMING SEQUENCE



<그림 4> 삽입 시퀀스 명령

2.4 전력함 설계

2.4.1 전력함의 설계 방향

전력함의 기본적인 설계 방향은 다음과 같다.

- 1) 2 Bay 구조로 전력함 표준화(4 CEDMs/Bay)
- 2) 전류 피이드백 제어 방식 사용
- 3) 개별운전 및 Double Hold 가능
- 4) 코일 기능별로 전력변환장치 서랍을 분리
- 5) 전력변환장치 서랍의 표준화
- 6) 2상환 DC Chopper 방식의 전력변환 방식 사용
- 7) 제어함과의 실배선 최소화를 위해 통신망을 적극 사용
- 8) 고신뢰성을 위해 다중화 구조 채택
 - 전력제어기(PCU, Power Control Unit)의 2중화
 - 전원공급장치(PSU, Power Supply Unit)의 2중화
 - 제어통신망의 2중화
 - 정보통신망의 2중화

2.4.2 전력함의 감시진단 기능

전력함의 기본적인 감시진단 기능은 다음과 같다.

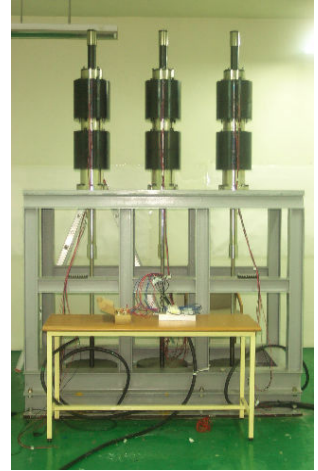
- 1) PCU 및 PSU의 자기 진단 및 감시 기능
 - Analog 및 Digital 출력의 Loopback Test 감시
 - 제어카드 제거 감시
 - Power Supply Alarm/Fault 감시
 - Master/Slave PCU 상호간 건전성 감시
- 2) IGBT Fault 감시
- 3) Fuse Fault 감시
- 4) CEDM 구동용 3상 전원의 Under Voltage 감시
- 5) 전류제어 실패 감시
- 6) 2상환 DC Chopper의 DC Link 전압 감시

2.5 전력함 시작품 제작

제작된 전력함의 시작품은 사진 1과 같으며, 전력함의 각종 기능 시험을 위한 CEDM Mockup은 사진 2와 같다.



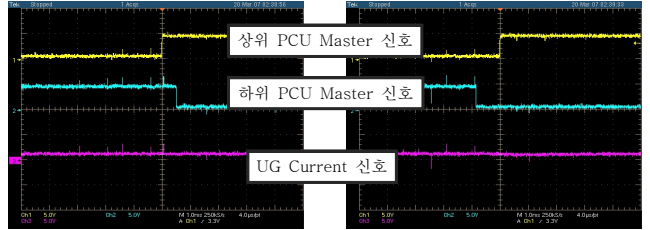
<사진 1> 전력함 시작품



<사진 2> CEDM Mockup

2.6 전력함 기능 시험

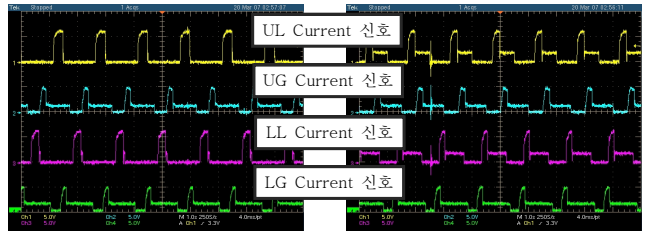
사진 3과 4는 각각 Master/Slave 절체시의 Bumpless 제어상태를 보여준다. 최상위 신호는 상위 전력제어기의 Master 출력 신호이고, 중간 신호는 하위 전력제어기의 Master 출력 신호이고, 최하위 신호는 UG의 출력전류 신호이다. Master/Slave 절체시에 UG의 출력전류 신호에 Bump가 없음을 알 수 있다.



<사진 3> Master P/B 누름

<사진 4> Reset P/B 누름

사진 5와 6은 CEDM을 최고속도인 1분당 40 스텝으로 구동시각각 인출 모드와 삽입 모드에서의 각 코일의 실제 전류 파형을 보여 준다. 최상위 신호부터 CEDM의 UL (Upper Lift), UG (Upper Gripper), LL (Lower Lift) 및 LG (Lower Gripper) Coil의 전류 파형이다.



<사진 5> 인출 모드 시 파형

<사진 6> 삽입 모드 시 파형

3. 결 론

본 논문에서는 한국 표준형 원전인 OPR-1000의 제어봉 제어시스템인 CEDMCS (CEDM Control System)와 차세대 원전인 APR-1400의 제어봉 제어시스템인 PCS에 공통으로 적용할 수 있는 전력함을 설계 및 제작하여 기본적인 기능시험을 수행하였다. 전력함은 원전에서의 중요성을 고려하여 신뢰성에 중점을 두고 설계를 하였으며, 주요 설계 내용은 전력제어기의 2중화 구조 채택, 전원공급장치의 2중화, 이중유지동작 모드 구현, 전류 피이드백 제어방식 채택, 통신망을 적극 활용한 실배선의 최소화, 유지보수성 향상을 위하여 코일 기능별로 전력변환장치 서랍의 분리/표준화/서랍화 및 각종 감시진단 기능의 강화 등이다.

향후, 표준원전 및 차세대 원전에 실적용할 수 있도록 하기 위하여 제어함과 연계하여 통합시험, 장시간 운전시험 및 기기검증 등을 통하여 신뢰성을 확보하고자 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] ABB Combustion Engineering Inc., "Technical Manual for Control Element Drive Mechanism", Volume 1, 1995