

원자로 출력제어계통 개발

이 중무, 김 춘경, 천 종민, 김 홍주, 권 순만
한국전기연구원

Development of Power Control System for Nuclear Power Plants

J.M. Lee, C.K. Kim, J.M. Cheon, H.J. Kim, S.M. Kweon
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - This paper deals with the development of power control system(PCS) for nuclear power plants.. The PCS provides the control motive power to operate the CEDMs(Control Element Drive Mechanism) for reactivity control inside the reactor vessel. The CEDM is raise and lower the CEAs(Control Element Assemblies) inside 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characteristic causes the addition of negative reactivity when a CEA is inserted and positive reactivity when it is withdrawn from the reactor core.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 원자로 내의 중성자를 흡수하여 핵반응도를 제어하기 위한 제어봉 집합체를 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 원자로 출력제어계통인 PCS의 개발 방향과 특징에 대해서 기술하고자 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 ?

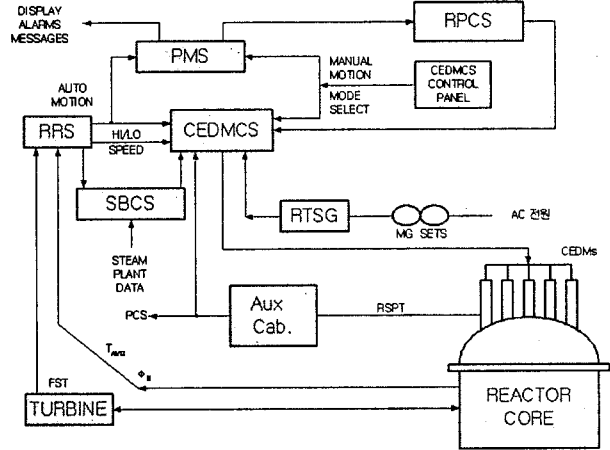
원자로 출력제어계통이란 차세대 원전인 APR-1400에 처음 도입된 용어로서 그림 1에 나타난 바와 같이 표준형 원전에서의 RRS (Reactor Regulating System) 계통, RPCS (Reactor Power Cutback) 계통, CEDMCS(CEDM Control System) 계통 및 AUX Cabinet 계통을 포함하는 것이다.

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

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

CEDMCS 계통은 RRS 계통 혹은 운전원으로부터 핵반응도 증감 방향과 속도 명령을 받아서 CEDM을 구동하는 신호를 출력한다.

AUX Cabinet은 CEDM의 RSP(T) (Reed Switch Position Transmitter)와 관련된 신호들을 CEDMCS 계통에 전달하기 위한 Cabinet 이다.



<그림 1> 원자로 출력제어계통 구성도

2.3 원자로 출력제어계통 개발

2.3.1 개발 방향

RRS, RPCS, CEDMCS 및 AUX Cabinet을 포함하는 원자로 출력제어계통의 개발 방향은 다음과 같다.

- APR-1400의 PCS 요건 만족
- 가동운전 중인 표준형 원전의 CEDMCS 교체 가능
- CEDMCS 운용경험에서 도출된 개선사항 반영
- 제어함의 제어기는 KNICS(Korea Nuclear Instrument & Control System) 사업에서 개발하는 DCS 적용
- 전력함의 제어기는 DSP 기반으로 개발하여 적용
- 신뢰성 향상을 위한 다중화 기법 적용
- 유지보수성 향상을 위한 MMI 적용

2.3.2 설계 방향 및 내용

상기의 개발 방향을 토대로 원자로 출력제어계통 개발에 적용한 설계 방향은 다음과 같다.

- 제어기의 2중화 및 통신망의 2중화
- 제어함에 MMI 화면 구현
- 전력함의 표준화
- 전력변환장치 서랍의 경량화
- 전류 피이드백 제어로 CEDM 구동
- CEDM Coil 보호용 Fuse 설치
- CEDM에 Double Hold Mode 구현
- Overhaul 시 조정 포인트 제거
- Hold Bus Power Supply 제거
- Inter-Cabinet 배선의 최소화
- CEDM Coil 전압/전류 Monitoring 및 고장 시 파형 저장
- Event Logging

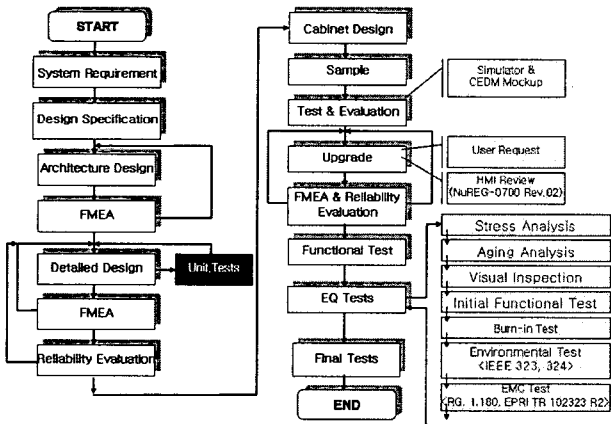
상기의 설계 방향을 토대로 원자로 출력제어계통 개발에 적용한 상세 설계 내용은 다음과 같다.

- 최신 디지털 기술 적용
 - * 제어함과 보조함(Aux Cabinet)의 제어기 : DCS 기반
 - * 전력함 제어기 : DSP 기반
- 신뢰성 향상
 - * 제어함과 보조함 제어기, 입력력 모듈 및 전원 2중화
 - * 전력함 전력제어기 및 전원 2중화
 - * 제어통신망, 정보통신망의 분리 및 2중화
 - * IGBT Gate 구동 신호의 Optical 전송

- 사용자 편의성 향상
 - * 제어함에 MMI 화면 구현
 - * 긴급고장 정보 시 코일 전압 및 전류 파형 저장
 - * Event Logging
- 유지보수성 향상
 - * 전력변환장치의 서랍화 및 경량화
 - * 전력함 전력제어기 카드 종류의 최소화(5종)
 - * 카드의 Hot Swap 및 타 카드 삽입 방지 기능
 - * Inter-Cabinet 배선의 최소화
 - * On-line 유지보수 기능 강화
- 자기진단 및 감시 기능 강화
 - * 제어함 DCS의 자기진단 및 감시 기능
 - * 전력함 전력제어기의 자기진단 및 감시 기능
 - * 전원, IGBT 및 Fuse 등의 감시 기능

2.3.3 개발 절차

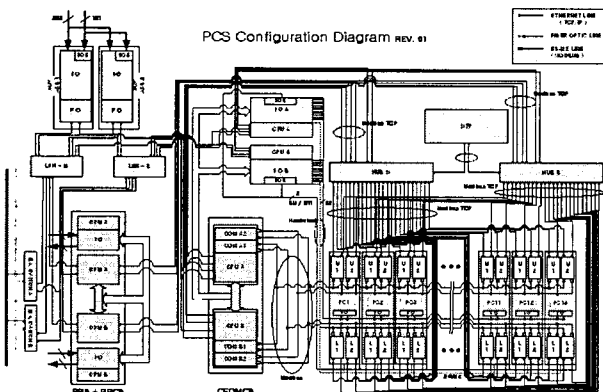
그림 2는 원자로 출력제어계통의 개발 절차를 도식화 한 것이다.



<그림 2> 원자로 출력제어계통 개발 절차

2.3.4 내부 구성도

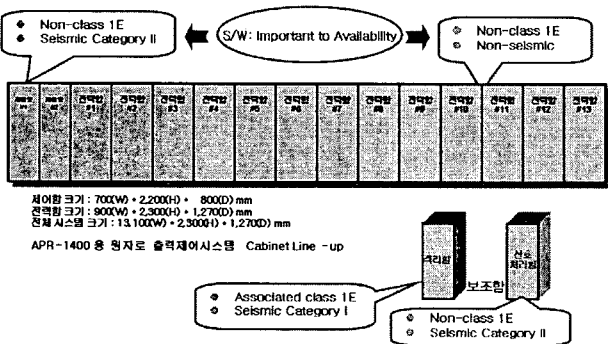
그림 3은 원자로 출력제어계통의 상세한 내부 구성도이다.



<그림 3> 원자로 출력제어계통 내부 구성도

2.3.5 개발품 Line-up

그림 4는 APR-1400용 원자로 출력제어계통의 Cabinet Line-up 이다.

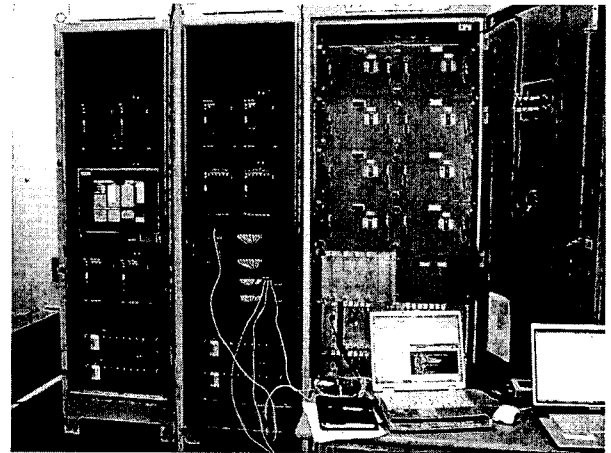


<그림 4> 원자로 출력제어계통 Cabinet Line-up

2.4 시제품 제작 및 기능 시험 결과

2.4.1 원자로 출력제어계통 시제품 제작

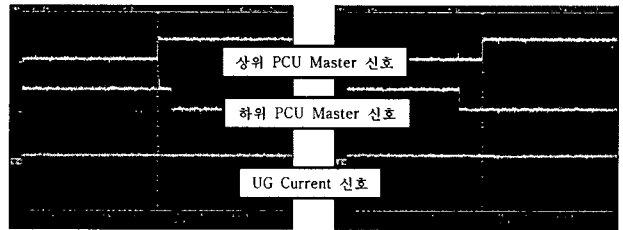
사진 1은 APR-1400용 원자로 출력제어계통을 적용 대상으로 개발된 제어함과 1면의 전력함 시제품을 보여 준다.



<사진 1> 원자로 출력제어계통 시제품

2.4.2 원자로 출력제어계통 기능 시험 결과

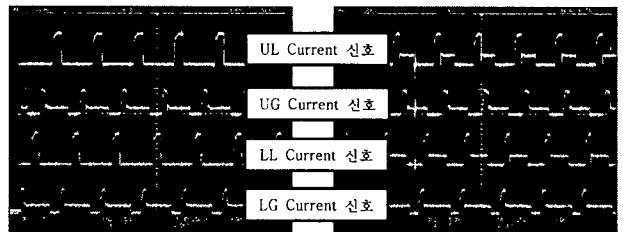
사진 2와 3은 각각 Master/Slave 절체시의 Bumpless 제어상태를 보여준다. 최상위 신호는 상위 전력제어기의 Master 출력 신호이고, 중간 신호는 하위 전력제어기의 Master 출력 신호이고, 최하위 신호는 UG의 출력전류 신호이다. Master/Slave 절체시에 UG의 출력전류 신호에 Bump가 없음을 알 수 있다.



<사진 2> Master P/B 누름

<사진 3> Reset P/B 누름

사진 4와 5는 CEDM을 최고속도인 1분당 40 스텝으로 구동시 각각 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 4> 인출 모드 시 파형

<사진 5> 삽입 모드 시 파형

3. 결론

본 논문에서는 차세대 원전인 APR-1400에 적용할 수 있는 원자로 출력제어계통의 시제품을 개발하여 기본적인 기능시험을 수행하였다. 원자로 출력제어계통은 원전에서의 중요성을 고려하여 신뢰성에 중점을 두고 설계했었으며, 주요 설계 내용은 제어기 및 입출력 모듈의 2중화, 제어 및 정보통신망의 분리 및 2중화, 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 기기검증 시험 및 장시간 운전시험 등을 통하여 개발품의 신뢰성을 확보하고자 한다.

[참고 문헌]

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