

### 제어봉 구동장치 제어시스템용 전력함 개발

이종무\*, 김춘경\*, 김석주\*, 천종민\*, 박민국\*, 정순현\*, 남정한\*\*  
 한국전기연구원\*, 두산중공업(주) 기술연구원\*\*

#### Development of A Control Rod Control System for Nuclear Power Plants

J.M. Lee\*, C.K. Kim\*, S.J. Kim\*, J.M. Cheon\*, M.K. Park\*, S.H. Jung\*, J.H. Nam\*\*  
 Korea Electrotechnology Research Institute\*, Doosan Heavy Industries & Construction Co.,Ltd.\*\*

**Abstract** - This paper deals with the design, implementation, and test of a CRCS for nuclear power plants. Although CRCS is still classified into non-safety class, much attention on its reliability issue has been given so far because of its importance for the stable operation of the reactor in the plant. In terms of technical aspects, our system adopts a full-duplex configuration to enhance reliability in contrast to the existing systems that are all simplex.

#### 1. 서 론

국내의 원자력 발전 역사는 1978년 고리 원자력을 효시로 현재 18기가 운용되고 있다. 제어봉 구동장치 제어기(CRCS : Control Rod Control System)는 원자로 내에서 일어나는 핵 반응을 제어하기 위한 것으로서 원자로 출력 조절기(RRS : Reactor Regulating System)로부터 이동 방향과 속도에 관한 제어신호를 입력 받아서 제어봉 구동장치(CRDM : Control Rod Drive Mechanism)를 제어하는 원전 계측제어 시스템 중 핵심적인 역할을 수행하는 장치이다. 본 논문에서는 위와 같이 중요한 기능을 수행하는 CRCS를 국산화 개발하기 위한 개발 환경 구축과 시스템 설계 개념 및 주요 특징에 대해 기술하고 기존 시스템과 비교하여 개선된 사항을 비교 설명하고 간단한 실험을 통하여 개발된 시스템의 일부 기능을 보여 주고자 한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 대상 플랜트 검토

서론에서 기술한 바와 같이 국내 가동원전의 수는 18기이다. 본 논문에서는 제어봉 구동장치가 정지, 이동 및 울림 코일로 구성되는 3 코일 형식에 적용할 수 있는 제어봉 구동장치 제어시스템을 대상으로 하고 있으며, 이러한 형식을 가지는 발전기는 현재 8기가 있으며 표1과 같다.

표 1. 대상 플랜트 검토

| 발전소명 | 호기명 | 용량 [Mwe] | 제어봉 수 | 상업 운전일    | 소요 전력함 수 |
|------|-----|----------|-------|-----------|----------|
| 고리   | 1호기 | 587      | 29    | '78. 4.29 | 3        |
|      | 2호기 | 650      | 33    | '83. 7.25 | 3        |
|      | 3호기 | 950      | 53    | '85. 9.30 | 5        |
|      | 4호기 | 950      | 53    | '86. 4.29 | 5        |
| 영광   | 1호기 | 950      | 53    | '86. 8.25 | 5        |
|      | 2호기 | 950      | 53    | '87. 6.10 | 5        |
| 울진   | 1호기 | 950      | 53    | '88. 9.10 | 5        |
|      | 2호기 | 950      | 53    | '89. 9.30 | 5        |

##### 2.2 시스템 구성

CRCS는 제어함(Controller Cabinet)과 전력함(Power Cabinet)으로 구성되며, RRS로부터 CRDM의 이동 방향과 속도에 관한 제어신호를 입력받아서 CRDM을 삽입 혹은 인출하여 핵 반응을 제어한다. 그림 1은 CRCS 시스템 구성을 나타낸다. 제어함에는 Hot-standby 형식의 PLC로 구성되는 주제어기(MCU : Main Control Unit)와 전력함 및 타 계통과의 입력력 신호 인터페이스를 위한 I/O Rack 및 유지보수용 장치인 LOM(Local Operator Module)이 있다. 전력함과의 제어에 사용되는 중요한 신호는 Hard-wired로 절연하여 연결하였고, 기타 사용자에게 편의를 제공하기 위한 정보들은 2중화된 통신으로 전달한다.

전력함은 발전기의 용량에 따라 필요한 면 수가 다르게 되고, 전력함 1면이 감당할 수 있는 CRDM의 수는 12개이다.

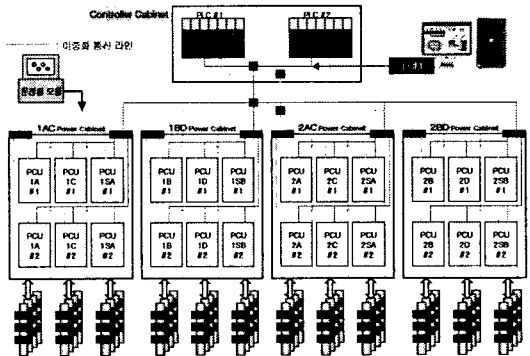


그림 1. CRCS 시스템 구성

##### 2.3 전력함

전력함은 제어함으로부터 명령을 전달 받아 CRDM의 정지, 이동 및 울림 코일에 안정적인 삽입 및 인출을 할 수 있도록 순차적인 전류를 공급하기 위한 전력변환기 회로와 전류를 피이드백 제어하기 위한 2중화된 전력제어기(PCU : Power Control Unit)가 핵심을 이룬다. 단일 고장에 의한 제어봉의 낙하를 방지하기 위하여 기존 시스템 보다 개선된 설계 개념을 적용하였고, 그 결과 기존 시스템에는 전력함내에 이동 코일용 전력변환기가 하나뿐이었으나 이를 3개로 분리 설치함으로써 이중동작(Double Hold) 모드를 쉽게 구현함으로써 전체 시스템의 신뢰성을 한층 강화하였을 뿐만 아니라 유지보수면에서도 DC Hold Power Supply Panel이 불필요한 부가적인 장점을 얻을 수 있었다. 또한 전력제어기를 최신 기술이 적용된 디지털 시스템으로 완전자동화 하므로서 다양한 감시진단 기능을 구현함으로써 사용자의 편의성을 극대화 하였다. 이하에 설계 개념과 전력제어기의 구성 및 개선 사항에 대하여 살펴 본다.

### 2.3.1 설계 개념

기본적인 설계 개념으로는 고신뢰성을 최우선으로 하여 감시진단 기능, 유지보수성 및 사용자 편의성 관점에서 설계를 하였다. 이하에 주제별로 설계된 기능을 살펴본다.

#### 1) 고신뢰성

- PCU는 DSP 프로세서로 구현
- PCU는 Master/Slave 형식으로 완전 2중화
- Thyristor Gate 신호의 광 전송(내 노이즈)
- 이상시 Double Hold(이중유지동작) 구현
- 통신망의 2중화
- Power Supply의 2중화

#### 2) 감시진단 기능

- PCU의 자기진단 및 감시
- PCU의 제어카드 제거 감시
- Thyristor Fault 감시
- Fuse Fault 감시
- Power Supply 감시
- Coil 건전성 감시

#### 3) 유지보수성

- 서랍형태의 전력변환기 모듈
- 정지 및 이동 전력변환기 모듈의 호환성
- Hold Bus Power Supply Panel의 제거
- Double Hold Mode 구현
- On-Line 유지보수
- PCU의 제어카드 단순화(5종)
- 동일한 소프트웨어 탑재
- Maintenance & Test Panel 설치(예정)

#### 4) 사용자 편의성

- 타 카드 삽입 방지 기능
- Coil Voltage & Current Monitoring
- 이상시 Coil Voltage & Current 저장
- Event Logging
- 제어함에 LOM 설치

이외에도 제어봉 이동 검출 기능 등을 구현하였다.

### 2.3.2 전력제어기 구성

전력제어기는 디지털 제어기로 완전 2중화 하였으며 Master/Slave 형식으로 운전된다. 그림 2는 2중화 전력제어기의 구성을 나타내며, 상하위에 동일한 하드웨어와 소프트웨어를 탑재하고 별도의 백플레인과 랙에 장착되어 있다. 전력제어기 별로 제어카드는 각각 DPC(DSP Processing Card) 1장, SCC(Signal Conditioning Card)는 3장으로서 각각 정지, 이동 및 올림 코일용 신호를 담당하고, DIC(Digital Input Card) 1장, DOC(Digital Output Card) 1장, PMC(Power Monitoring Card) 1장으로 구성되어 있다.

DPC 카드는 DSP 프로세서 320C32를 2개 탑재하고 있으며 하나는 제어 전용 프로세서이고 또 다른 하나는 통신 전용 프로세서로서 DPM(Dual Port Ram)으로 데이터를 주고 받는다.

SCC 카드는 전력변환기 모듈의 Thyristor Gating에 필요한 기준 Zero Cross 신호를 만들어 DPC 카드로 전달하고 또한 각 해당 코일들의 전압과 전류 신호를 필터링하여 DPC 카드로 전달한다.

PMC 카드는 전력함내의 전원공급장치의 2중화된 제어 전원을 회로별로 감시할 뿐만 아니라 전원장치의 입력전원 및 SCC 카드내의 필터를 위한 -5V 전원도 카드별로 감시를 한다. 2중화 전원 중 하나의 고장에는 DPC 카드로 Power Supply Alarm을 발생하고 양쪽 모두의 고장에는 Power Supply Fault를 발생한다.

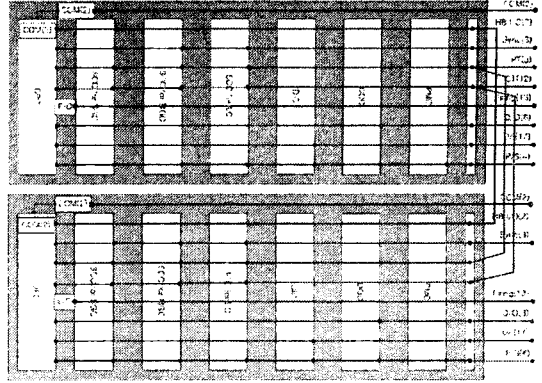


그림 2. 전력제어기 구성

### 2.3.3 개선 사항

표 2에는 웨스팅하우스에서 개발 공급한 가동원전과 개발 시스템의 기술을 항목별로 비교하여 나타낸다.

표 2. 가동원전과 개발기술의 비교

| 항목               | 국내 가동원전용 (W/H 형) | 개발기술                  |
|------------------|------------------|-----------------------|
| 시스템 형식           | 아날로그+논리회로        | 디지털 형식                |
| 제어기 구조           | 단일 구조            | 이중화 Fault-Tolerant 구조 |
| 정보표시 방법          | Lamp 표시          | 컴퓨터 화면 표시 형식          |
| 외부통신연계 기능        | 없음               | 있음                    |
| Event Logging 기능 | 단독 기능 없음         | 단독 기능 있음              |
| 이동검출 기능          | 없음               | 있음                    |
| Double Hold 기능   | 없음               | 있음                    |
| On-line 유지 보수    | 어려움              | 우수함                   |
| 자기진단 경보기능        | 없음               | 있음                    |

### 2.4 개발 환경 구축

원전에서 아주 중요한 역할을 수행하는 CRCS를 개발하기 위해서는 개발 환경을 구축할 필요가 있다. 개발 환경은 실제 원자력 발전소의 1, 2차 계통을 유사하게 모의하는 코드 시뮬레이터, CRDM Mockup 및 코드 시뮬레이터와 CRCS의 제어함과 인터페이스 시키기 위한 입출력 시뮬레이터로 구성되며, 이러한 개발 환경은 원자력 발전소용 CRCS의 인허가를 위한 Validation Tool로서도 활용될 예정이다.

#### 2.4.1 코드 시뮬레이터 개발

실제 원자력 발전소와 유사한 상황을 모의하는 시뮬레이션 코드에는 아래와 같은 계통들을 포함하고 있다.

- 1) 원자로 냉각수 계통
  - 원자로 용기
  - 노심 및 제어봉 구동장치
  - 원자로 냉각수 계통
- 2) 화학 및 체적제어 계통
  - 정상 유출 및 충전 계통
  - 밀봉수 계통
  - 비상 유출 계통
  - 원자로 보충수 계통
- 3) 잔열제거 계통 및 비상 노심 냉각 계통

- 4) 급수 계통
  - 복수 및 주급수 계통
  - 주급수 계통
  - 보조급수 계통
- 5) 증기 및 터빈 계통
- 6) 발전기 계통
- 7) 보조 계통
  - 원자로 기기 냉각수 계통
  - 기기냉각 해수 계통
  - 소내용 및 계기용 압축 공기 계통
- 8) 경보 및 보호 계통
  - 경보 계통
  - 원자로 보호 계통

### 2.4.2 CRDM Mockup 개발

표 3에는 정지, 이종 및 울림 코일로 구성되는 CRDM의 개발 사양을 나타낸다. 전력변환기 모듈의 용량을 시험하기 위해서는 최소한 1그룹을 구성할 수 있는 4개의 CRDM이 필요하다.

표 3. CRDM 개발 사양

| 항 목         |          | 값          | 비고     |
|-------------|----------|------------|--------|
| 가동부 총 중량    |          | kg 130     |        |
| 총 이동 Step   |          | 30         |        |
| 1 Step 이동거리 |          | mm 16.0    |        |
| 전 류         | LC       | lifting    | A 40.0 |
|             |          | profiled   | A 16.0 |
|             | MGC      |            | A 8.0  |
|             |          |            | A 8.0  |
| SGC         | latching | A 8.0      |        |
|             | profiled | A 4.4      |        |
| 최대속도        |          | mm/s 1,300 |        |

### 2.4.3 기타

전력함에 있는 전력변환기 모듈의 입력전원으로 공급하기 위한 3상 260V(선간)/150V(상) 3상 4선식을 공급하는 발전소에 있는 MG Set를 대체할 수 있는 전력용 변압기가 필요하다.

### 2.5 실험 결과

그림 3과 4에 개발된 전력함의 간단한 실험 결과 파형을 나타낸다. 그림 3은 상하위 전력제어기 사이에 Master 절체시 정지 코일의 전류 파형을 나타내고, 그림으로부터 정지 코일의 전류가 Bumpless 제어가 되고 있음을 알 수 있다.

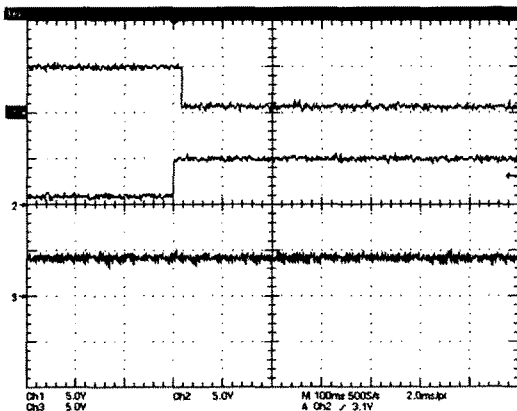


그림 3. Master 절체시 파형

그림 4는 이종유지 동작을 나타내며, 채널 2는 이동 코일의 전류, 채널 3은 정지 코일의 전류, 채널 4는 정지 코일의 전압을 나타낸다. 이종유지 동작은 정지 코일과 이동 코일에 전류를 공급하여 제어봉 구동장치를 이종으로 잡고 있는 동작 모드이다.

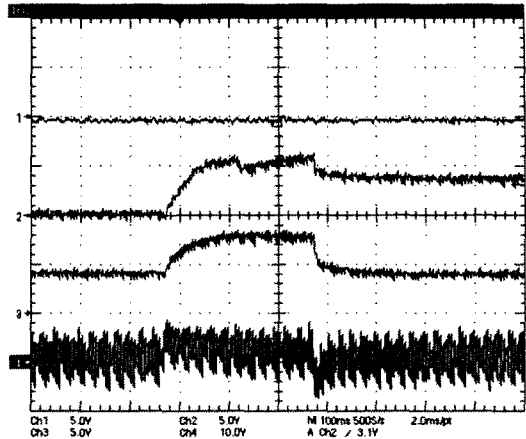


그림 4. 이종유지 동작시 파형

## 3. 결 론

이상에서 살펴 본 바와 같이 기존의 가동원전에서 운용되는 제어봉구동장치 제어시스템에 비하여 고신뢰성, 감시전단 기능, 유지보수성 및 사용자 편의성 등에서 월등히 향상된 기능을 가지는 전력함을 개발하였으며, 사진 1에 개발된 전력함의 외관을 보여 준다. 향후 현장 상황에 맞는 인터페이스를 실체에 반영하고 또한, 더욱더 Upgrade 된 전력함을 개발하여 환경시험과 전자파 적합성 시험 등을 필하고, 인허가를 획득하여 국내 원전 계측제어사업 국산화에 기여 하고자 한다.

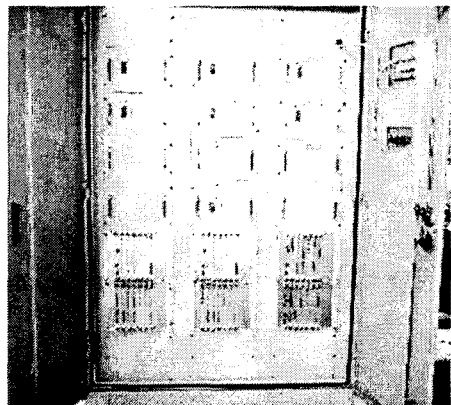


사진 1. 전력함 외관

### [참 고 문 헌]

- [1] Westinghouse, "RCS I&C Training Manual".
- [2] 한국전력공사, "제어봉의 제어계통", 1980
- [3] 한국전력공사, "제어봉 제어설비(I)", 1991.11
- [4] 한국전력공사, "제어봉 제어설비(II)", 1991.11
- [5] 한국전력공사, "제어봉 위치 지시 설비(I)", 1991.9.
- [6] 한국전력공사, "제어봉 위치 지시 설비(II)", 1991.9.
- [7] 한국원자력연구소, "Compact Nuclear Simulator", 1999.