원전 적용을 위한 제어봉 구동장치 제어시스템 설계 및 제작

이종무*, 김춘경*, 김석주*, 천종민*, 신종렬*, 권순만*, 남정한**
한국전기연구원*, 두산중공업(주) 기술연구원**

Design and Manufacturing of Control Rod Control System for Nuclear Power System

J.M. Lee*, C.K. Kim*, S.J. Kim*, J.M. Cheon*, J.R. Shin, S.M. Kweon*, J.H. Nam**
Korea Electrotechnology Research Institute*, Doosan Heavy Industries & Construction

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 원전을 효시로 현재 18기가 운용되고 있다. 제어봉 구동장치 제어기(CRCS : Control Rod Control System)는 원자로 내에서 일어나는 핵 반응도를 제어하기 위한 것으로서 원자로 출력 조절기(RCU : Reactor Control Unit)로 부터 제어봉의 이동 방향과 속도에 관한 제어신호를 입력 받아서 제어봉 구동장치(CRDM : Control Rod Drive Mechanism)를 제어하는 원전 계측제어 시스템 중 핵심적인 역할을 수행하는 장치 중의 하나이다. 본 논문에서는 위와 같이 중요한 기능을 수행하는 제어함(Control Cabinet)과 전력함(Power Cabinet)으로 구성되는 CRCS 중 전력함을 중심으로 국산화 개발하기 위한 1차 시제품 및 Upgrade 제품의 시스템 설계 개념 및 주요 특징에 대해 기술하고자 한다.

2. 본 론

2.1 제어봉 구동장치 제어시스템 이란 ?

제어봉 구동장치 제어시스템은 그림 1에 나타낸 바와 같이 원자로 용기 상부에 설치된 CRDM을 구동시키는 시스템이다.

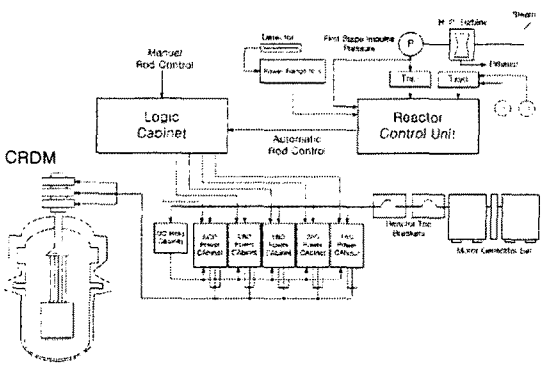

그림 1. 원자로 출력 제어시스템 구성도

제어봉 구동장치 제어시스템은 CRDM을 구동하여 제어봉을 상하로 움직이게 되며, 핵반응도를 증가시키기 위해서는 제어봉을 상부로 인출하고, 핵반응도를 감소시키기 위해서는 제어봉을 하부로 삽입한다. 한편, CRDM을 구동시키기 위한 전력은 2중화 된 Motor Generator Set로부터 공급을 받는다.

제어봉의 이동방향과 속도는 자동모드일 경우에는 Reactor Control Unit으로부터 받고, 수동모드인 경우에는 운전원의 조작에 따른다.

2.2 시스템 구성

제어봉 구동장치 제어시스템은 크게 제어함과 전력함으로 구성되며, RCU로부터 CRDM의 이동 방향과 속도에 관한 제어신호를 입력받아서 CRDM을 삽입 혹은 인출하여 핵 반응도를 제어한다.

제어함에는 Hot-standby 형식의 PLC로 구성되는 2중화된 주제어기(MCU : Main Controller Unit)와 유지보수용 편의 장치인 LOM(Local Operator Module)이 있으며, 전력함에는 자체 개발한 전력제어기(PCU : Power Controller Unit)가 2중화 되어 있다. 제어함과 전력함 사이의 제어 및 중요한 정보에 사용되는 신호들은 Hard-wired로 절연하여 연결되고, 기타 사용자에게 유지보수용 편의를 제공하기 위한 정보들은 2중화된 통신으로 전달한다.

전력함은 발전기의 용량에 따라 필요한 면 수가 다르게 되고, 통상적으로 전력함 1면이 감당할 수 있는 CRDM의 수는 12개이나, 원자로 중심에 설치된 CRDM을 추가로 구동할 수 있도록 설계되어 있으므로 전력함 1면이 13개의 CRDM을 구동할 수 있는 능력을 갖추고 있다.

2.3 전력함 1차 시제품 설계

전력함은 제어함으로부터 명령을 전달 받아 CRDM의 안정적인 삽입 및 인출을 할 수 있도록 정지, 이동 및 올림 코일에 순차적인 전류를 공급하기 위한 전력변환기 회로와 전류를 피이드백 제어하기 위한 2중화된 전력제어기(PCU : Power Control Unit)가 핵심을 이루고 있으며, 그림 2에 1차 시제품용 전력함의 구성도를 나타낸다.

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 설치하므로서 이중유지동작(Double Hold) 모드를 쉽게 구현하므로서 전체 시스템의 신뢰성을 한층 강화하였을 뿐만 아니라 유지보수면에서도 DC Hold Power Supply Panel이 불필요한 부가적인 장점을 얻을수 있었다.

또한 전력제어기를 최신 기술이 접목된 디지털 시스템으로 완전 2중화 하므로서 다양한 감시진단 기능을 구현하므로서 사용자의 편의성을 극대화 하였다.

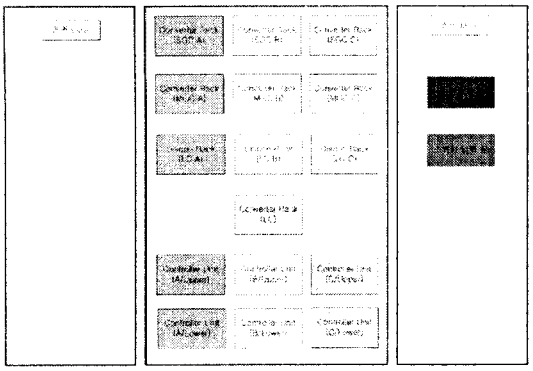

그림 2. 1차 시제품용 전력함 구성도

2.3.1 설계 개념

기본적인 설계 개념으로는 고신뢰성을 최우선으로 하여 감시진단 기능, 유지보수성 및 사용자 편의성 양상 관점에서 아래와 같이 설계를 하였다.

가) 고신뢰성
- PCU는 DSP 프로세서로 구현
- PCU는 Master/Slave 형식으로 완전 2중화
- Thyristor Gate 신호의 광 전송
- 이상시 Double Hold(이중유지동작) 구현
- 통신망의 2중화
- Power Supply의 2중화(전력함 전체 공급)

나) 감시진단 기능
- PCU의 자기진단 및 감시
- PCU의 제어카드 제거 감시
- Thyristor Fault 감시
- Fuse Fault 감시
- Power Supply 감시
- Coil 건전성 감시

다) 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
- 동일한 소프트웨어 탑재

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

2.3.2 전력제어기 구성

전력제어기는 디지털 제어기로 완전 2중화 하였으며 Master/Slave 형식으로 운전된다. 그림 3은 상하위로 2중화된 전력제어기 중 하나의 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 및 PMC1(Power Monitoring Card 1) 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 필터링하고 증폭하여 DPC 카드로 전달한다.

PMC1 카드는 전력함의 2중화된 제어전원을 회로별로 감시할 뿐만 아니라 SCC 카드내의 필터를 위한 ±5V 전원도 카드별로 감시를 한다.

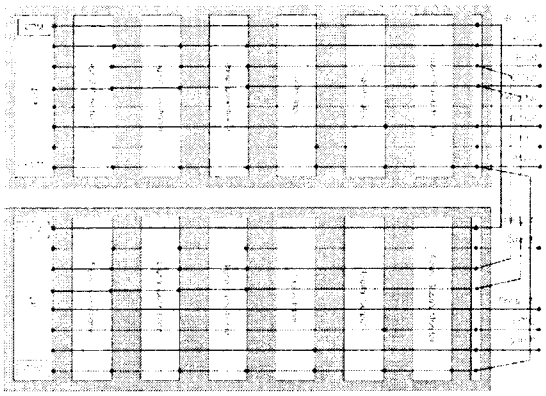

그림 3. 1차 시제품용 전력제어기 구성

2.3.3 전원공급장치의 2중화 설계

전력함의 제어전원은 전력함 및 전력제어기에 필요한 +5V 및 ±12V를 그림 4와 같이 2중화하여 공급하도록 설계되어 있다.

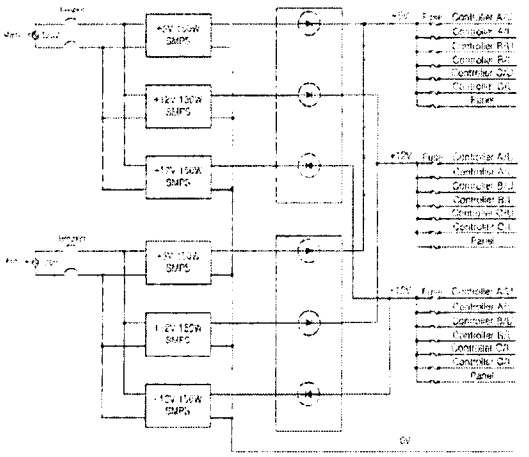

그림 4. 1차 시제품용 전원공급장치 2중화 구성

2.4 전력함 Upgrade 설계

1차 시제품의 설계 및 제작을 통해 나타난 여러 가지 문제점들을 보완하기 위하여 Upgrade 설계를 하였다. 대표적인 문제점으로서는 첫 번째로 전력함 전체에 2중화된 전원공급장치를 가지고 있으므로 해서 전력제어기와의 배선 거리에 따르는 전압강하가 다르게 되어 DPC 카드에 인가되는 전압에 차이가 발생하였다. 두 번째로 특수한 경우에 하나의 그룹에서 최대 5개의 CRDM을 구동하는 경우가 있는데 이를 반영하지 않았다. 세 번째로 인간공학적인 측면에서 Double Hold Switch와 같은 조작 스위치류는 전력함 내부에 두어 제3자의 접근을 방지해야 한다. 네 번째로 유지보수를 위한 전력함 내부의 공간 확보가 되어 있지 않았다.

위에 열거한 대표적인 문제점들을 해결하기 위하여 전력함의 기구 설계가 변경되었으며 전면의 기구배치도 그림 5와 같이 Upgrade 설계가 이루어 졌다.

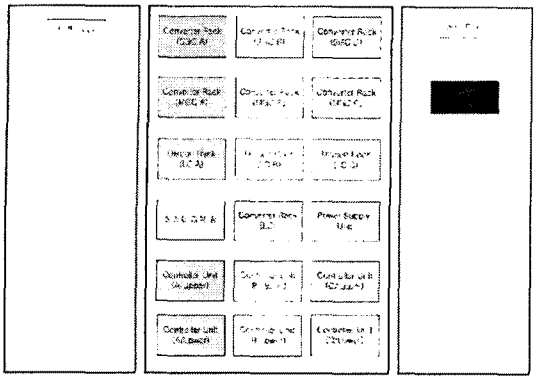

그림 5. Upgrade 전력함 구성도

2.4.1 Upgrade 설계

상기의 문제점등을 해결함과 동시에 고신뢰성을 최우선으로 하여 감시진단 기능 강화, 유지보수성 및 사용자 편의성 향상 관점에서 아래와 같은 항목을 추가로 Upgrade하여 설계를 하였다.

가) 고신뢰성
- Power Supply Unit의 2중화(전력함 용)
- 전력제어기 별로 제어전원을 분리

나) 감시진단 기능
- Analog Output의 Loop Back Test
- Digital Output의 Loop Back Test

다) 유지보수성
- Power Supply의 제어카드화
- Hot Swap 기능 부여
- 유지보수용 공간 확보

라) 사용자 편의성
- 전력제어기 Local Monitoring용 통신 설치

2.4.2 Upgrade 전력제어기 구성

전력제어기의 제어전원을 분리함에 따라 PSC1 (Power Supply Card 1)이 추가되었으며, 그림 6에 Upgrade 설계된 2중화 전력제어기의 구성을 나타낸다.

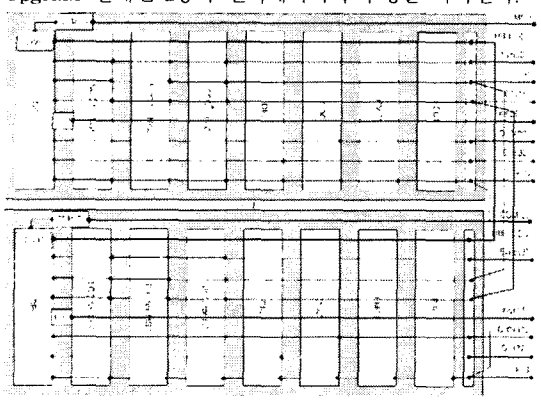

그림 6. Upgrade 전력제어기 구성

2.4.3 전원공급장치의 Upgrade 설계

전력함에 필요한 제어전원을 공급하기 위한 전원공급장치가 그림 7과 같이 2중화 되었으며 제어전원은 각각 +5V , ±12V 및 +24V를 공급하도록 설계되어 있다.

또한 전력제어기의 내부 상태를 감시하기 위한 Local Monitoring용 RS232 포트가 전원공급장치 유닛에 설치되어 사용자의 접근이 용이하게 되도록 Upgrade 설계를 하였다.

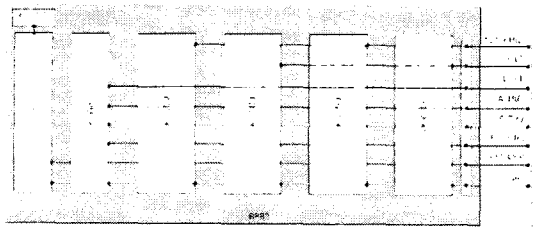

그림 7. Upgrade 전원공급장치 구성

3. 결 론

이상에서 살펴 본 바와 같이 기존의 가동원전에서 운용되는 제어봉 구동장치 제어시스템에 비하여 고신뢰성, 감시진단 기능, 유지보수성 및 사용자 편의성 등에서 월등히 향상된 기능을 가지는 전력함을 개발하였으며, 사진 1에 Upgrade 개발된 전력함의 외관을 보여 준다. 향후 개발된 제어봉 구동장치 제어시스템의 기기검증시험을 거쳐서 국내 원전계측제어사업 국산화에 기여 하고자 한다.

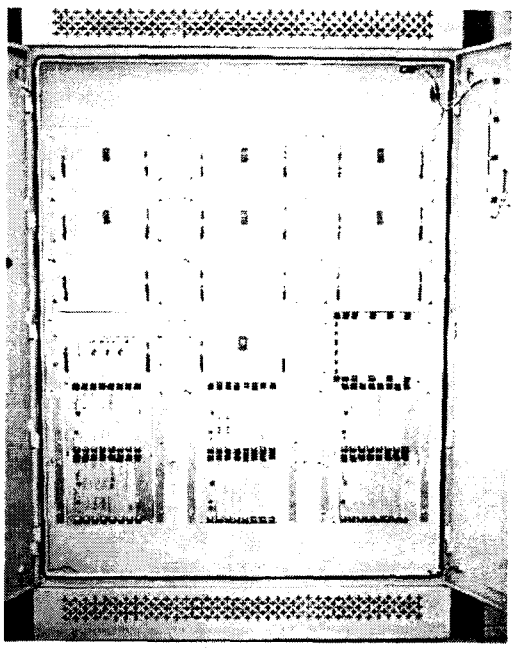

사진 1. 전력함 외관

[참 고 문 헌]

[1] Westinghouse, "RCS I&C Training Manual".

[2] 이종무 외, "원전용 제어봉 구동장치 원형 설계", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, B권, 638~640P, 2002

[3] 이종무 외, "제어봉 구동장치 제어기기의 시험 환경 구축", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, D권, 2295~2297P, 2002

[4] 남정한 외, "제어봉 구동장치 제어시스템용 전력함 설계", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, D권, 2271~2273P, 2003

[5] 이종무 외, "제어봉 구동장치 제어시스템용 전력함 개발", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, D권, 2274~2276P, 2003