

원자로 제어봉 구동장치 제어시스템용 전력제어기 개발

Development of Power Controller for Control Rod Drive Mechanism in Reactor

김 춘 경, 천 중 민, 이 중 무, 권 순 만

(Choon Kyung Kim, Jong Min Cheon, Jong Moo Lee and Soon Man Kwon)

한국전기연구원(전화:(055)280-1446, 팩스:(055)280-1476, E-mail : ckkim@keri.re.kr)

Abstract : In this paper, we describe a Duplex Power Controller for Control Rod Control System(CRCS). A Duplex Power Controller has the various functions for the reliable operations of Control Rod Drive Mechanism(CRDM). Also we have implemented the diverse functions by utilizing the developed Duplex Power Controller. Due to the developed Duplex Power Controller, we are assured that the commercial operation by this system be made before long.

Keywords : CRDM, CRDMCS, Duplex Power Controller, Power Cabinet, Logic Cabinet, Hot/Stand by type

I. 서론

제어봉 구동장치 제어시스템(CRCS; Control Rod Control Sytem)은 원자로 운전원이나 원자로 제어시스템(RRS; Reactor Regulation System)으로부터 동작 명령을 받아 제어봉 구동장치(CRDM; Control Rod Drive Mechanism)를 동작시킨다. 이러한 제어봉 구동장치 제어시스템은 크게 제어함과 전력함으로 구분되어지며, 제어함은 주로 상위 시스템으로부터의 명령을 받아 작동해야 할 제어봉을 구동시킬 수 있는 전력함으로 명령을 전달하게 된다. 고리 1호기의 경우는 29개의 제어봉을 동작시키기 위하여 1set의 제어함과 5set의 전력함이 갖추어져 있다. 29개의 제어봉을 동작시키기 위하여 제어시스템은 4개의 제어 bank와 4개의 정지 bank들로 나누어진다. 각 bank는 한 개 이상의 그룹으로 구성되어 있으며, 각 그룹은 동시에 한 step씩 움직이도록 전기적으로 병렬로 연결된 몇 개의 기구로 되어 있다. bank 내에 각 그룹은 교대로 동작하도록 하여 그룹들 사이에는 차이가 항상 한 step 이내에 있게 된다. 제어봉 구동장치 제어시스템은 3 종류의 운전 코일을 동작시켜 구동봉을 유지, 삽입, 인출하게 한다. 3종류의 운전코일은 정지 gripper 코일, 이동 gripper 코일, 올림 코일 등이고, 이러한 운전 코일에 요구되는 전류를 흘리고, 고장 발생시 긴급 경보나 응급 조치를 취하는 역할을 하는 장치가 전력제어기이다. 본 논문에서는 4개의 제어봉 구동장치 Mock-up을 구동시킬 수 있는 2중화된 전력제어기의 개발에 관하여 기술하며, 이러한 2중화된 전력제어기를 이용함으로써 제어봉 구동장치 제어시스템의 고장으로 인한 발전소의 불시 정지와 같은 긴급 상황을 최소화할 수 있을 것으로 사료된다.

II. 본론

1. CRCS용 전력함 및 전력제어기 구조

그림 1은 전력제어기를 포함한 최대 13개의 제어봉을 구동할 수 있는 전력함의 구조를 나타낸 것으로 그림으로부터 알 수 있듯이 1대의 전력함은 3개의 그룹, 즉 그룹 "A", 그룹 "B" 및 그룹 "C"로 구성된다.

전력 제어기는 각각의 그룹마다 상위 전력 제어기 및 하위 전력 제어기로 2중화 한다. 상위 및 하위 제어기는 별도의 랙에 장착되고 동일한 제어카드 및 Backplane으로 구성하여야 하며, 직류 제어전원도 2중화된 직류 전원 공급 장치의 공통 출력으로부터 퓨즈 회로로 분기된 전원을 각각 공급 받는다. 각각의 전력 제어기는 자기의 상태를 진단하고 이상이 없으면 Aux 신호를 출력하여 서로의 상태를 감시할 수 있도록 하고 또한, Watchdog Timer 기능에 해당하는 Heartbeat 신호를 펄스 형태로 출력하여 서로의 상태를 감시한다. 상위 및 하위 전력 제어기는 Master/Slave 형태로 운전되고, 현재 제어를 담당하고 있는 전력 제어기는 Master 신호를 제어함으로 제공하여 자기가 Master임을 알린다. 전력 제어기는 랙에 장착된 BPB(Backplane Board)에 제어카드들이 삽입되어 필요한 기능들을 수행하며, 랙에 장착된 Backplane에 제어카드가 삽입될 때 다른 종류의 제어카드가 오삽입 되는 것을 방지하기 위한 수단을 마련한다. 제어카드들의 종류로는 DPC(DSP Processing Card), SCC(Signal Conditioning Card), DIC(Digital Input Card), DOC(Digital Output Card) 및 PMC(Power Monitoring Card)가 있으며, SCC는 정지 집게 코일용과 이동 집게 코일용 및 올림 코일용으로 3개를 각각 설치하며 SCC에 입력되는 정지 집게 코일용 전력 변환기와 이동 집게 코일용 전력

변환기 및 울림 코일을 전력 변환기 출력 전압 검출용 PT 신호와 각 제어부 구동장치들의 코일에 흐르는 출력 전류 검출용 CT 신호는 공통으로 사용한다. 그림 2는 2중화된 전력 제어기의 구성을 나타낸 것이다.

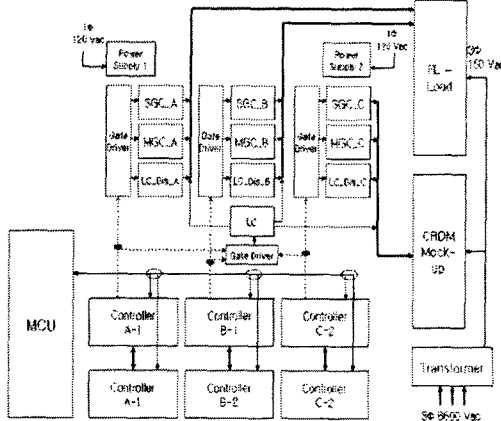


그림 1. 전력제어기를 포함한 전력함의 구조.
Fig. 1. Composition of Power Cabinet including duplex power controller.

그림 3은 DPC 보드의 구성을 나타낸 것으로, DPC 보드는 고속 부동소수점 연산 방식의 DSP인 TMS320C32(TI사)를 DUAL로 구성하여, 각각 제어 기능과 통신 기능을 전담하도록 하고 두 개의 DSP 사이의 데이터 전달은 DPRAM을 통해서만 행하여 지게 하여 통신 고장이 어떠한 경우에도 제어 기능에 영향을 주지 않도록 설계한다. 제어용 DSP에는 아날로그 입력을 디지털 값으로 변환하는 A/D Converter와 Digital I/O Interface가 있어서 각종 입력 신호를 제어하도록 하였다. 통신용 DSP에는 NS16C552인 Dual-Uart Serial Interface가 있어서 통신을 담당하도록 하였다.

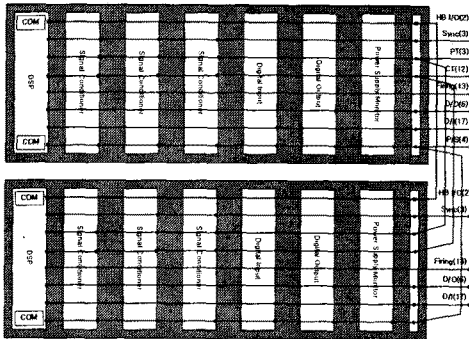


그림 2. 2중화 전력제어기의 구성도.
Fig. 2. Schematic diagram for duplex power controller.

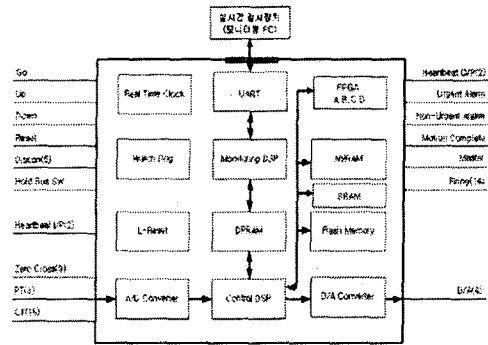


그림 3. 디지털 프로세서 카드의 구조도.
Fig. 3. Schematic diagram of Digital Processor Card.

2. 전력제어기의 기능

2.1 전류제어 기능

전력제어기의 전원이 켜지면 전력제어기는 초기화 루틴의 수행을 마치고, 제어봉을 홀드 모드(Hold Mode) 상태로 유지한다. 이 때는 정지 집게 코일에 4.4(A)의 전류가 흘러 제어봉을 정지 상태로 유지하게 된다. 제어봉을 작동시키는 경우, 즉, 그림3에서 제어함으로부터 Go신호와 방향신호가 전력제어기로 입력되면 전력제어기에서는 방향신호에 따라 요구되는 전류 명령을 발생하고 전류 센서(CT)로부터 읽어 들인 실제 전류값과의 비교를 통하여 전류 제어신호를 발생시킨다. 이렇게 발생된 전류제어신호는 3상 반파 정류기의 점호각으로 환산되어 요구되는 전류를 제어부 구동장치용 코일에 흘릴 수 있도록 한다. 전력제어기에서는 Go 명령과 방향신호에 따라 한 스텝 동작을 완료하면 동작완료 신호를 제어함으로 전송하고 새로운 명령을 받아들일 수 있도록 준비한다. 그림 4는 제어봉의 운전 Pattern을 나타내고 있는 시간 선도이며, 제어봉의 운전 속도를 결정짓는 것은 X1의 간격이 된다. 상위의 제어함으로부터 오는 Go 명령의 주기에 따라 전력제어기는 제어봉을 동작시키게 된다. 전력제어기로 Go 명령이 들어 오면 전력제어기는 780msec동안(X2) 1 step의 동작을 완료하고 정해진 시간 동안 동작 완료 신호(X4)를 제어함으로 전송하게 된다. 예를 들어 최대 속도(72 spm)의 경우, Go의 간격(X1)은 833.33msec이며, 1step동작을 마치고 다음 Go 명령이 올 때까지는 53.33msec(X3) 동안의 Hold Mode가 포함되게 된다. Go명령과 방향신호의 중첩 시간(X5)은 최소 1msec 이상이어야 제어봉이 안정하게 동작하게 된다.

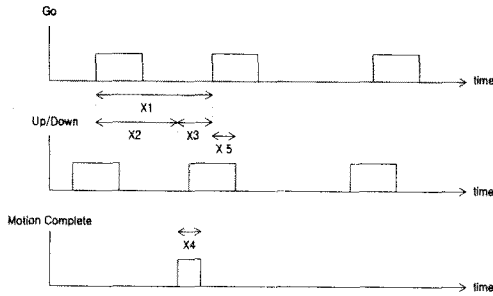


그림 4. 제어봉 운전 속도에 대한 시간 선도
Fig. 4. Timing Diagram for Speed of Control Rod

2.2 2중화 기능

그림 2에서와 같이 2중화된 한 쌍의 제어기가 제어봉 4개의 동작을 제어한다. Hot-Stand by 형태의 2중화된 제어기는 어느 것이나 Master 권한을 가질 수 있지만 2개의 제어기가 동시에 Master 권한을 가질 수는 없다. 하나의 제어기가 Master Mode를 선언하면 다른 제어기는 스스로 Slave Mode로 전환된다. Master Mode와 Slave Mode의 절체는 수동 및 자동으로 행해지며 다음과 같은 기능을 가진다.

- 수동 Master/Slave(M/S) Mode 절체
- 자동 M/S 절체
- 주기적인 Heart Beat 신호 발생
- 상대방 Heart Beat 전진성 여부 Check
- 상대방 Master Mode 선언 여부 Check
- 상대방 Alarm 발생 여부 Check
- 2대의 제어기 모두 Master 선언 금지
- M/S 절체시 전류에서 Bump가 없을 것

그림 5는 상대방 제어기에서 출력되는 Heart Beat를 이용하여 상대방 제어기의 정상 또는 비정상 상태를 판단하기 위한 방법을 나타낸 흐름도이다.

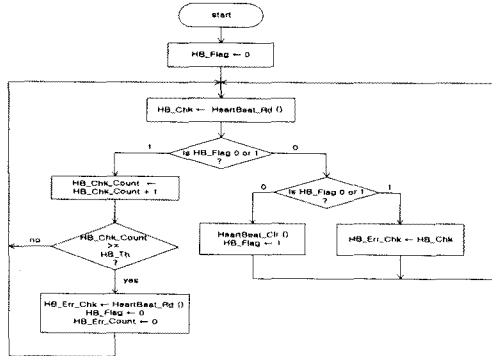


그림 5. Heart Beat Check Part에서의 흐름도
Fig. 5. Flow Chart for Heart Beat Check of the Other Controller

그림 6은 자동 또는 수동에 의한 Master/Slave 절체에 대한 흐름도를 나타낸 것이다.

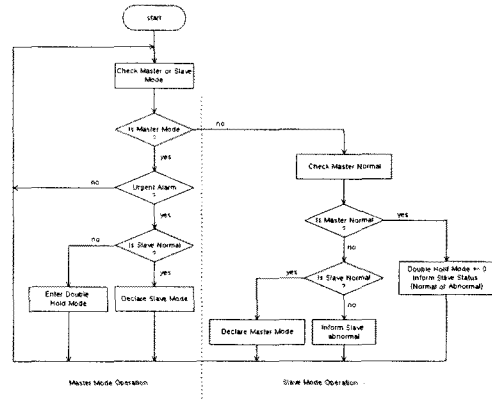


그림 6. Master/Slave Mode 절체 흐름도
Fig. 6. Flow Chart for Mode Change between 2 Power Controllers

2.3 2중 고정 기능

운전자의 의도가 없는 제어봉의 낙하를 최대한 방지하고 또한 제어봉 구동장치 제어기의 유지 보수 시 제어봉의 낙하 방지를 위하여 2중 고정 기능을 구현하도록 한다. 2중 고정이란 2중화된 제어기 모두 비정상 상태로 제어봉의 삽입/인출이 가능하지 않는 경우 정지 집게 코일과 이동 집게 코일에 정해진 Pattern의 전류를 동시에 흘려 제어봉을 보다 안정되게 유지시키는 것으로 제어봉의 낙하를 최대한 방지하는데 목적이 있다. 그림 7은 2중 유지시 3 코일에 가하는 전류 명령에 대한 하나의 예를 나타낸 것이다. 전력제어기는 자동 또는 수동 조작에 의한 2중 고정이 가능하도록 설계되어지며 2중 고정 유지 상태 정보는 제어함으로 송신되어 제어함에서 전력함으로 동작 명령이 송출되지 않게 하며, 만약 2중 고정 상태에서 전력함으로 동작 명령이 오면 전력함에서 그 명령에 반응하지 않도록 한다.

그림 6으로부터 알 수 있듯이 master mode로 동작하고 있는 제어기가 비정상이 되면 slave mode로 동작 중인 제어기의 정상 여부를 점검하고, 만약 slave mode인 제어기도 비정상이면 자동 이중고정 동작에 들어가도록 한다.

2중 고정을 위한 세부 사항은 다음과 같다.

- 수동 2중 고정 동작 기능; 외부 스위치를 이용한 수동 2중 고정 동작 수행 및 2중 고정 상태 현시
- 자동 2중 고정 동작 기능; 2개의 제어기 모두 제어봉을 동작시킬 수 없는 상태가 되면 자동으로 2중 고정 동작이 발생하게 되며 이러한 상태 정보를 현시하도록 한다.

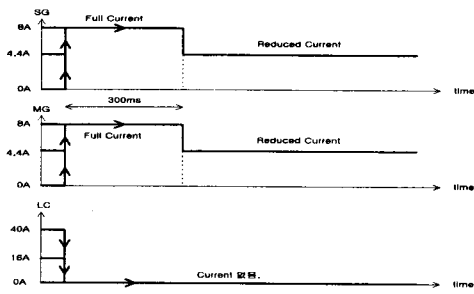


그림 7. 이중 유지시의 인가 전류 명령
Fig. 7. Current Command in Double Hold Mode

2.4 고장 검출 기능

제어봉 구동장치 제어기의 고장에 의한 제어봉 낙하를 방지하기 위해서는 제어봉 구동장치 제어기에서 발생할 수 있는 고장을 최대한 사전에 검출하여 운전원에게 알려 주는 것이 필요하다. 전력제어기의 고장 검출은 개별 전력제어기 단위로 행해지며, 검출 가능한 고장의 종류는 다음과 같으며, 사용자 및 운전자의 요구에 따라 추가되어 질 수도 있다. 전력제어기에서 고장 검출을 행하는 방식은 크게 두가지로 나누어지는데, 센서 신호로부터 얻어진 전압, 전류 신호를 이용하는 경우와 디지털 논리로 구현하는 두가지 방식이 사용된다.

- 2중화 관련 상대방 Heart Beat 전진성 Check
- 2중화 관련 상대방 정상 상태 Check
- 전력제어기용 2중화 전원 모두 고장(Power Fault)
- 전력제어기용 2중화 전원 중 1개 고장(Power Alarm)
- Zero Cross Signal 고장(3상)
- Dual Port RAM(DPRAM) 고장
- 전력제어기용 카드 탈착 여부 Check
- Fuse 고장
- 올림 코일 단속 스위치 고장
- 전류 조절 고장
- Thyristor 고장

그림 8은 싸이리스터 고장을 검출하기 위한 논리 흐름도를 나타낸 것이다.

2.5 고장 기록

제어봉 구동장치 제어기의 고장 기록을 통하여 고장 발생 시점의 제어기 상태에 관한 정보를 얻고자 고장 정보를 기록한다. 고장 기록 시 요구되는 사항은 고장 전/후의 상태 정보 및 3회 이상의 고장 정보 기록 유지 등이 있으며 이러한 사항은 사용자와 운전원의 요구에 따라 변경 가능하다. 고장 기록과 관련한 다음 사항이 요구되어진다.

- 기록 주기

- 기록 내용 발생시각, 고장 유형, 발생 전/후 파형 등
- 기록이 필요한 고장 정의
- 고장 기록 시간(Event 발생 전/후 기간)
- 고장 기록 횟수(유지해야 할 고장 기록 갯수)
- 하드웨어 제약(메모리 용량 등)에 따른 저장 시간 및 저장 신호 개수
- 기록이 필요한 고장 정의
- 고장 기록 시간(Event 발생 전/후 기간)
- 고장 기록 횟수(유지해야 할 고장 기록 갯수)
- 하드웨어 제약(메모리 용량 등)에 따른 저장 시간 및 저장 신호 개수

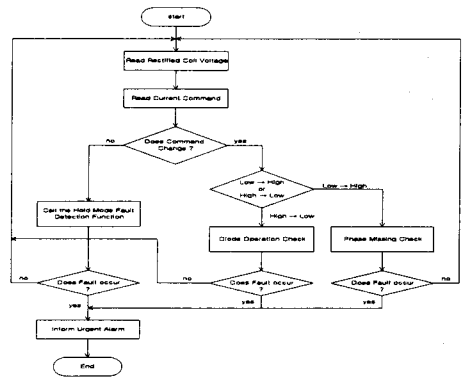


그림 8. Thyristor 고장 검출에 대한 흐름도
Fig. 8. Flow Chart for detecting the fault of thyristor

3. 실험결과

그림 9는 제어봉이 정지 상태에 있을 때 Master Mode에서 Slave Mode로 절체된 경우, 3 코일에서의 전류 파형을 나타낸 것으로 위에서부터 올림 코일, 이동집게 코일, 정지집게 코일의 전류 및 Master Out 신호를 나타낸 것이다. Master Out 신호는 2개의 전력제어기 중 Master Mode로 운전되고 있는 제어기에서 Slave Mode로 운전 중인 제어기로 보내어 지는데 그림 9의 Master Out 신호를 통하여 하나의 제어기가 Master Mode에서 Slave Mode로 절체되어 진 것을 알 수 있다. 이때 3 코일에서의 전류 신호에는 bump가 거의 없는 것을 볼 수 있다. 그림 10은 제어봉을 인출하고 있을 때 Master/Slave 절체 현상이 발생하여도 제어봉의 인출 동작이 정상적으로 행하여 지는 경우를 보여 주고 있다.

III. 결론

본 논문은 제어봉 구동장치 제어시스템용 전력제어기의 개발에 관한 것으로 전력제어기가 가져야 하는 여러 가지 기능과 기능 구현을 위해 필요한 하드웨어 및 소프트웨어에 대하여 기술하였다. 원자력 발전의 핵심 계측제어시스템인 제어봉 구동장치 제어시스템의 실용화는 기능 구현만으로 끝나는 것이 아니며 정해진 기준과 절차를 준수하여 설계/제작/시험하는 것이 신성 입증에 위해 무엇보다도 중요한 사항이므로 이에 대한 철저한 준비와 끊임없는 연구개발이 요구되어 진다.

참고문헌

- [1] 김춘경 외5, "제어봉 구동장치 제어기 prototype 개발," 2002 전기학회 하계학술회의 논문집, pp.2182-2184, 2002.7
- [2] 김춘경 외5, "다기능을 가진 제어봉 구동장치 전력제어기 개발," 2003 전기학회 하계학술회의 논문집, pp.2215-2217, 2003.7
- [3] 한국전력공사, "원자로제어 및 보호설비", 1989.10
- [4] 한국전력공사, "제어봉제어계통", 1997
- [5] 한국전력공사, "제어봉의 제어계통", 1980
- [6] 한국전력공사, "제어봉제어설비(I)", 1991.11
- [7] 한국전력공사, "제어봉 제어설비(II)", 1991.11

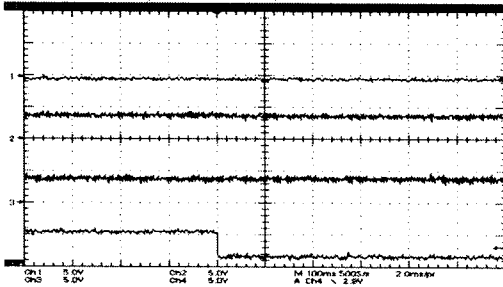


그림 9. Master/Slave 절체시의 3 코일의 전류 파형.
(정지 모드시)

Fig. 9. Current Signals in Master/Slave Exchange.
(Hold Mode)

그림 11은 event가 발생하였을 때 기록된 정보를 운전원 모니터링 화면에 표시한 것으로 event가 발생한 시각과 몇 번째로 발생한 event인지, 전압/전류 실제값 및 파형이 보여 지고 있다. 기록된 파형은 제어봉의 2중 유지 동작 event가 발생하였을 때의 저장 데이터이며 1sec를 중심으로 event 발생 전 1초와 발생 후 1.5초 동안의 정지집게 코일 전류와 이동집게 코일 전류를 나타낸 것이다.

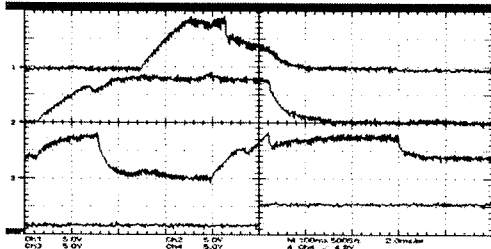


그림 10. Master/Slave 절체시의 3 코일의 전류 파형.
(제어봉 인출시)

Fig. 10. Current Signals in Master/Slave Exchange.
(Control Rod Withdrawal)

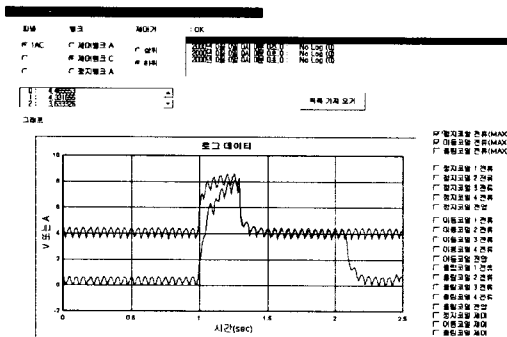


그림 11. Thyristor 고장 검출에 대한 흐름도
Fig. 11. Flow Chart for detecting the fault of thyristor