

제어봉 구동장치 제어 시스템용 이중화 전력제어기 설계

김춘경, 천종민, 김석주, 이종무, 권순만
한국전기연구원

Design of a Dual-Redundant Power Controller for CRDMCS

C.K.Kim, J.M.Cheon, S.J.Kim, J.M.Lee, S.M.Kweon
Korea Electrotechnology Research Institute(K.E.R.I.)

Abstract - In this paper we describe the design of a Dual-Redundant Power Controller(DRPC) for Control Rod Control System(CRCS). The CRCS also provides information regarding rod motion, rod position, and status of the Rod Control System. It has Hot/Stand-by type, and also has the function of fault detection for controller itself and power modules. We have implemented the various functions with the dual-redundant Power Controller. Due to the developed DRPC, we are assured that the commercial use by this controller be made before long.

1. 서 론

제어봉 구동장치 제어시스템은 원자로 운전원이나 원자로 제어시스템으로부터 제어 신호를 받아 제어봉 구동장치(CRDM; Control Rod Drive Mechanism)를 동작시킨다. 제어봉 구동장치 제어시스템은 3 종류의 코일에 정해진 순서에 따라 전류를 흘려 구동봉을 유지, 삽입, 인출하게 한다. 3종류의 코일은 정지 집게 코일, 이동 집게 코일, 올림 코일이다. 본 논문에서는 1개의 그룹(5개 제어봉 기준) 운전이 가능한 제어봉 구동장치 제어기용 이중화 전력제어기 설계에 대하여 소개하고 이를 이용한 제어봉의 정상운전 중 마스터 절체 및 각종 고장 검출 등에 대하여 기술한다. 제어봉 구동장치 제어시스템의 일반적인 구성은 발전소 상위 계통과의 연계를 통해 하위로 운전 명령 신호를 발생시키는 제어함(Control Cabinet)과 제어함에서 온 명령에 따라 제어봉 구동장치의 작동에 필요한 전류를 발생시키는 전력함(Power Cabinet)으로 대별된다. 본 논문에서 제시하는 제어봉 구동장치 제어 시스템에서 제어함에 PLC를 이용하고 전력함에는 DSP based 디지털 제어기를 사용하여 구성하였다.

2. 본 론

2.1 전력제어기의 기본 기능

제어봉 구동장치 제어시스템은 크게 제어함과 전력함으로 구분되며 발전소의 외부 계측제어 계통으로부터 오는 신호와의 연계는 주로 제어함이 담당하고 전력함은 제어함으로부터 인가되는 신호에 반응하여 제어봉의 동작을 조절하도록 하고 있다. 전력함 내에서 이러한 기능을 수행하는 것은 전력제어기이며 제어봉 동작의 안정성과 신뢰성을 높이기 위한 여러 가지 기능을 수행하게 된다.

전력제어기의 기본 기능에는 제어봉을 구동시키기 위한 3종류의 코일 전류를 제어하고 전력제어기 자체뿐만 아니라 전력함에서 발생된 이상 현상을 검출하여 운전원에게 알려주는 기능 등이 있다.

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"를 동작시킬 수 있도록

구성된다.

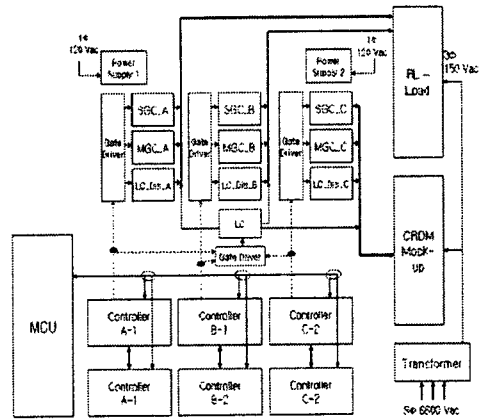


그림 1. 전력제어기를 포함한 전력함의 구조.

2.1.1 자동 옴셋 제거 기능

센서를 거쳐 AD 변환기로 들어오는 코일 전압과 전류 신호는 기본적으로 옴셋을 포함하고 있다. 제어 알고리즘의 초기화시 자동으로 이러한 옴셋값을 구하고 실제 전류량만을 전류 제어용 순시값으로 사용하도록 한다. 자동 옴셋 제거 방식을 사용하는 경우 주의해야 할 점은 이중화된 제어기 중 하나의 제어기가 보수를 끝내고 스탠바이 모드로 들어갈 때 정상 운전 중인 제어기에 의한 유지 코일 전류값을 고려하여 스탠바이 제어기의 옴셋값을 결정해야 한다는 것이다.

2.1.2 전류제어 기능

안정적인 제어봉 동작(유지,삽입,인출)을 보장하기 위해 3종류 코일에는 시퀀스한 일련의 전류가 흐르도록 해야한다. 제어봉의 한 스텝 동작은 미리 정한 전류 패턴을 780msec 동안 순서에 따라 3종류 코일에 인가함으로써 행하여 진다. 제어봉 구동 장치의 기계적인 파라미터를 고려하여 전류 제어시 전류 패턴의 응답시간을 가능한 빠르게 해야 한다. 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, 제어함으로부터 Go신호와 방향신호가 전력제어기로 입력되면 전력제어기에서는 방향신호에 따라 요구되는 전류 명령을 발생시키고 전류 센서(CT)로부터 읽어 들인 실제 전류값과의 비교를 통하여 전류 제어신호를 발생시킨다. 이렇게 발생된 전류제어신호는 3상 반파 정류기의 접촉각으로 환산되어 요구되는 전류를 제어봉 구동장치용 코일에 흘릴 수 있도록 한다.

그림 2는 제어봉 삽입시의 3종류의 코일에 흐르는 전류

파형과 정지 집게 코일의 전류 명령을 나타낸 것으로 전류의 응답 시간이 100ms 이내인 것을 볼 수 있다.

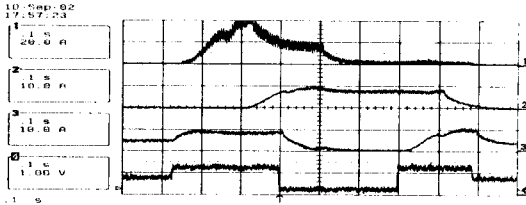


그림 2. 3종류 코일에서의 전류신호(제어봉 삽입시)

2.1.3 운전 속도 조절 기능

전력제어기에서는 Go 명령과 방향신호에 따라 한 스텝 동작을 완료하면 동작완료 신호를 제어함으로 전송하고 새로운 명령을 받아 들일 수 있도록 준비한다. 그림 3은 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 1msec이상이 되어야 제어봉이 안정하게 동작하게 된다.

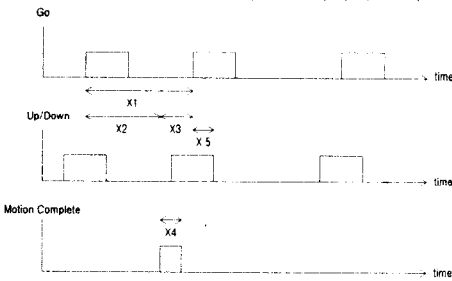


그림 3. 제어봉 운전 속도에 대한 시간 선도

2.1.4 고장 검출 기능

제어봉 구동장치 제어시스템의 고장에 의한 제어봉 낙하를 방지하기 위해서는 제어봉 구동장치 제어시스템에서 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.

- AD/DA 변환기 정상 유무 Check
- 이중화 관련 상대방 Heart Beat 건전성 Check
- 이중화 관련 상대방 정상 상태 Check
- 전력제어기용 이중화 전원 모두 고장(Power Fault)
- 전력제어기용 이중화 전원 중 1개 고장(Power Alarm)
- Zero Cross Signal 고장(3상)
- Dual Port RAM(DPRAM) 고장
- 전력제어기용 카드 탈착 여부 Check
- Fuse 고장
- 울림 코일 단속 스위치 고장

- 전류 조절 고장
- Thyristor 고장

그림 4는 사이리스터 고장을 검출하기 위한 논리 흐름도를 나타낸 것이다.

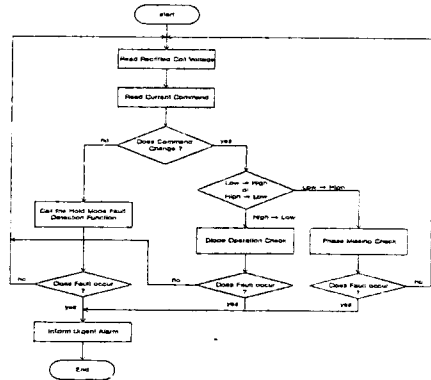


그림 4. Thyristor 고장 검출에 대한 흐름도

2.2 이중화 전력제어기의 구성

그림 5에서 나타낸 것과 같이 개발된 제어기는 2중화로 설계, 제작되어 운전 중에도 문제가 생긴 구성품을 교체할 수 있어 유지, 보수가 쉽고 각종 고장 정보를 Local Monitoring System에 현시할 수 있어 고장 종류를 쉽게 알아낼 수 있다. 전력 제어기는 각각의 그룹마다 상위 전력 제어기 및 하위 전력 제어기로 이중화한다. 상위 및 하위 제어기는 별도의 랙에 장착되고 동일한 제어카드 및 Backplane으로 구성하여야 하며, 지류 제어전원도 이중화된 지류 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 울림 코일용으로 3개를 각각 설치하며 SCC에 입력되는 정지 집게 코일용 전력 변환기와 이동 집게 코일용 전력 변환기 및 울림 코일용 전력 변환기 출력 전압 검출용 PT 신호와 각 제어봉 구동장치들의 코일에 흐르는 출력 전류 검출용 CT 신호는 공통으로 사용한다. 그림 5는 2중화된 전력 제어기의 구성을 나타낸 것이다.

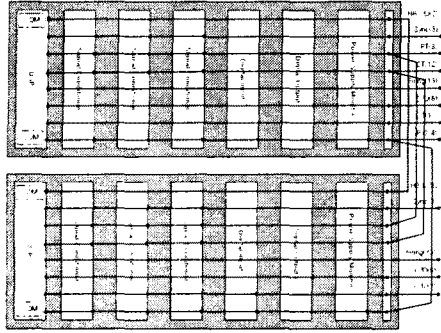


그림 5. 이중화 전력제어기의 구성도

2.3 이중화 전력제어기의 기능

2.3.1 Hot-Stand By(Master/Slave)

그림 5와 같은 이중화된 한 쌍의 제어기가 제어봉 5개의 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
제어기의 앞 판넬에 버튼을 설치하여 운전자가 임의로 마스터 제어기를 선택할 수 있도록 한다.
- 자동 M/S 절체
자동 마스터 절체는 다음과 같은 조건에서 발생한다.
 - 마스터 모드 제어기의 Heart Beat 신호 이상
 - 마스터 모드 제어기의 이상 현상 발생시 위의 두가지 마스터 절체 조건은 슬레이브 모드로 운전 중인 제어기가 정상인 경우에만 해당된다.
- 2대의 제어기 모두 Master 선언 금지
- M/S 절체시 전류에서 Bump가 없을 것
슬레이브 모드로 운전 중인 제어기는 계속적으로 마스터 모드 제어기의 전류 제어 정보를 추종하고 있다가 마스터 절체가 발생하면 최초의 제어 정보로 추종한 값을 사용하도록 한다.

그림 7는 상대방 제어기에서 출력되는 Heart Beat를 이용하여 상대방 제어기의 정상 또는 비정상 상태를 판단하기 위한 방법을 나타낸 흐름도이다.

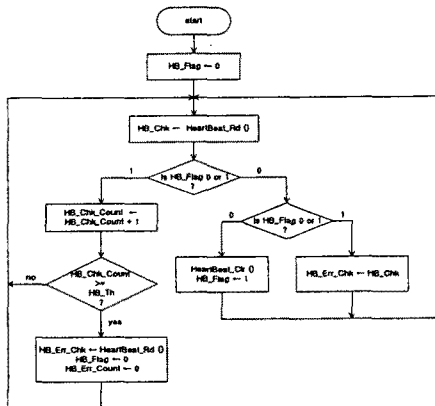


그림 7. Heart Beat Check Part에서의 흐름도

그림 8은 자동 또는 수동에 의한 Master/Slave 절체에 대한 흐름도를 나타낸 것이다.

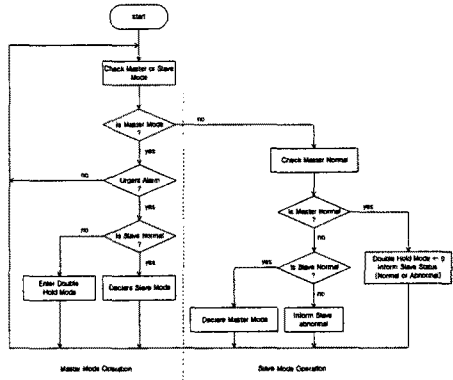


그림 8. Master/Slave Mode 절체 흐름도

2.3.2 이중 고정 기능

운전자의 의도가 없는 제어봉의 낙하를 최대한 방지하고 또한 제어봉 구동장치 제어기의 유지 보수 시 제어봉의 낙하 방지를 위하여 이중 고정 기능을 구현하도록 한다. 이중 고정이란 이중화된 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 9는 이중 유지시 3 코일에 가하는 전류 명령에 대한 하나의 예를 나타낸 것이다. 전력제어기는 자동 또는 수동 조작에 의한 이중 고정이 가능하도록 설계되어지며 이중 고정 유지 상태 정보는 제어함으로 송신되어 제어함에서 전력함으로 동작 명령이 송출되지 않게 하며, 만약 이중 고정 상태에서 전력함으로 동작 명령이 오면 전력함에서 그 명령에 반응하지 않도록 한다.

그림 8로부터 알 수 있듯이 master mode로 동작하고 있는 제어기가 비정상 상태가 되면 slave mode로 동작 중인 제어기의 정상 여부를 점검하고, 만약 slave mode인 제어기도 비정상이면 자동 이중고정 동작에 들어가도록 한다.

이중 고정을 위한 세부 사항은 다음과 같다.

- 수동 이중 고정 동작 기능; 외부 스위치를 이용한 수동 이중 고정 동작 수행
- 자동 이중 고정 동작 기능; 2개의 제어기 모두 제어봉을 동작시킬 수 없는 상태가 되면 자동으로 이중 고정 동작이 발생하게 된다.

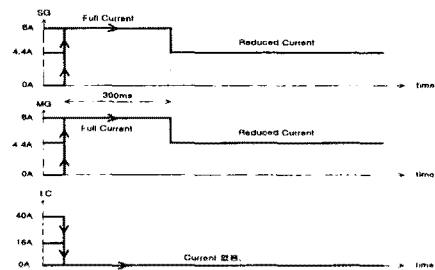


그림 9. 이중 유지시의 인가 전류 명령

2.4 이중화 전력제어기의 성능 시험 및 결과

그림 10은 제어봉이 정지 상태에 있을 때 Master Mode에서 Slave Mode로 절체된 경우, 3 코일에서의 전류 파형을 나타낸 것으로 위에서부터 올림 코일, 이동 집게 코일, 정지집게 코일의 전류 및 Master Out 신호를 나타낸 것이다. Master Out 신호는 2개의 전력제어

기 중 Master Mode로 운전되고 있는 제어기에서 Slave Mode로 운전 중인 제어기로 보내어 지는데 그림 10의 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 11은 제어봉을 인출하고 있을 때 Master/Slave 절체 현상이 발생하여도 제어봉의 인출 동작이 정상적으로 행하여 지는 경우를 보여 주고 있다.

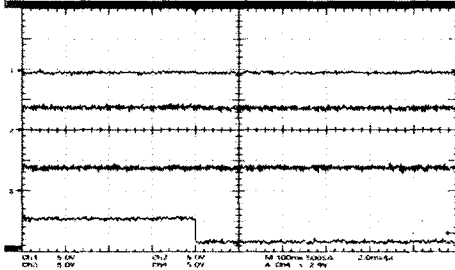


그림 10. Master/Slave 절체시의 3 코일의 전류 파형.
(정지 모드시)

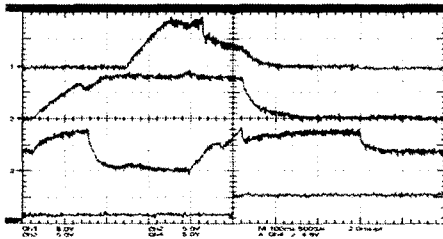


그림 11. Master/Slave 절체시의 3 코일의 전류 파형.
(제어봉 인출시)

3. 결 론

본 논문에서는 제어봉 구동장치 제어 시스템용 이중화 전력제어기의 설계/제작/시험을 통하여 개발된 이중화 전력제어기의 신뢰성을 확인하고자 하였다. 운전자의 의도적인 제어봉 낙하를 제외하고 제어봉이 결코 낙하되지 않도록 하는 것은 발전소의 가동을 항상 측면에서 매우 중요한 일이다. 또한 각종 고장 검출 기능을 구비하여 제어시스템의 유지, 보수 시간을 최대한 줄일 수 있도록 하였다. 본 논문에서 제시한 제어봉 구동장치용 이중화 전력제어기는 약간의 현장 맞춤 후에는 실적용이 가능할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김춘경 외5, "제어봉 구동장치 제어기 prototype 개발," 2002 전기학회 하계학술회의 논문집, pp.2182-2184, 2002.7
- [2] 김춘경 외3, "원자로 제어봉 구동장치 제어시스템용 전력제어기 개발," 2003 정보제어공학회 추계학술회의 논문집, pp.2182-2184, 2003.11
- [3] 한국전력공사, "원자로 제어 및 보호설비", 1989.10
- [4] 한국전력공사, "제어봉 제어계통", 1997
- [5] 한국전력공사, "제어봉의 제어계통", 1980
- [6] 한국전력공사, "제어봉 제어설비(I)", 1991.11
- [7] 한국전력공사, "제어봉 제어설비(II)", 1991.11