

제어봉 구동장치 제어시스템용 이중화 전력제어기에서의 고장검출 방법

김춘경, 신종렬, 천종민, 이종우, 권순만
한국전기연구원

Fault Detection Methods in a Dual Redundant Power Controller for CRCS

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

Abstract - In this paper we describe the fault detection methods in a Dual-Redundant Power Controller(DRPC) for Control Rod Control System(CRCS). The DRPC has the function of fault detection for controller itself and power modules. And in this paper we have described the some complex items out of fault detection methods for CRCS. By utilizing the suggested methods, we are convinced that these methods are applied to commercial use 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. 제어봉 구동장치 제어시스템의 운전 모드는 정지 모드, 이동 모드(인출/삽입) 및 이중유지 모드의 3가지 종류가 있으며, 본 논문에서는 이러한 3가지 운전 모드에서 발생할 수 있는 모든 종류의 고장과 고장 검출 방법에 대하여 기술하고자 한다. 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. 제어봉 구동장치 제어시스템의 고장에 의한 제어봉 낙하를 방지하기 위해서는 제어봉 구동장치 제어시스템에서 발생할 수 있는 고장을 최대한 신속하게 검출하여 운전원에게 알려 주는 것이 필요하다. 전력제어기의 고장 검출은 개별 전력제어기 단위로 행해지며, 검출 가능한 고장의 종류는 본론에서 다루어지며, 현장 적용을 위하여 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.

2. 본 론

2.1 CRCS용 전력제어기의 구성

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. 전력함과 관련된 고장 종류에는 전력제어기 내의 부품 고장(메모리류, 아나로그/디지털 변환기, FPGA 등), 전력모듈(Gate Drive, 싸이리스터), 센서류(PT/CT) 및 보호 관련 부품(퓨즈 등) 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. 또한 개별 전력제어기는 개별 그룹에서 발생하는 각종 고장에 대한 검출을 담당하고 결과를 제어함(MCU)으로 송신한다.

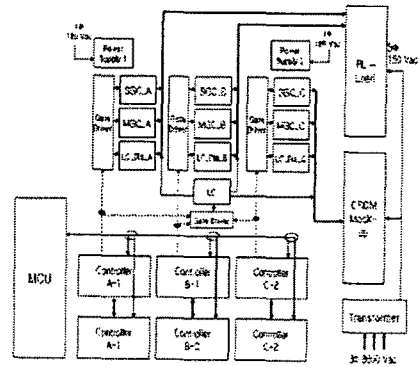


그림 1. 전력제어기를 포함한 전력함의 구조.

2.2 CRCS용 전력제어기의 고장 검출 종류

전력제어기에서 발생할 수 있는 고장의 종류는 아래에 기술한 것들이 있고, 이러한 고장 검출은 개별 전력제어기 단위로 행해지며, 필요에 따라 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.

- 1)센서 신호를 이용한 고장 검출
 - PT/CT 이상 유무 검출
 - AD/DA 변환기 정상 유무 Check
 - 전류 조절 고장

- Thyristor 고장
- 올림 코일 단속 스위치 고장
- 제어봉 이동검출 확인

- 2) 디지털 논리(FPGA)를 이용한 고장 검출
- 이중화 관련 상대방 Heart Beat 건전성 Check
 - 이중화 관련 상대방 정상 상태 Check
 - Zero Cross Signal 고장(3상)
 - 전력제어기용 이중화 전원 모두 고장(Power Fault)
 - 전력제어기용 이중화 전원 중 1개 고장(Power Alarm)
 - Dual Port RAM(DPRAM) 고장
 - 전력제어기용 카드 탈착 여부 Check
 - Fuse 고장

2.2.1 Thyristor 고장 검출

그림 2는 싸이리스터 고장을 검출하기 위한 논리 흐름도를 나타낸 것이다. 정지모드에 있는 제어봉 집합체의 정지 집게 코일에 전류를 공급하는 3상 반파 정류기에서 고장이 발생하면 제어봉 추락의 우려가 있으므로 정지모드에서의 전력 모듈의 고장 검출은 제어봉 제어기기의 필수적인 요구사항이라고 할 수 있다. 또한 정지모드(Hold Mode)에서 이동 집게 코일용 전력 모듈의 고장 검출을 위하여 FFT 방식을 사용하여도 전력 모듈의 고장 검출은 가능하지 않다. 가령, 이동집게 코일용 전력 변환 모듈에서의 고장이 검출되지 않은 상태(정상상태로 인식)에서 동작모드(Go Mode) 명령이 발생되면 1 Step 삽입/인출 동작 중 정지집게 코일의 전류가 0이고 동시에 이동집게 코일의 전류가 최대가 되어야 하는 구간에서 이동집게 코일의 전류가 부족하여 제어봉이 낙하하는 경우가 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 정지 모드에서도 이동 집게 코일용 전력 변환 모듈의 고장 검출이 가능하도록 기존 방법을 개선하였다. 그림 1의 전력모듈 고장 검출 흐름도에서 먼저 코일 전압 신호에 대한 초기화 루틴(1)을 끝내고 나면 전력제어기는 상위 제어함으로부터 동작 명령이 발생되었는지를 확인한다.(2) 만약 제어봉 동작 명령이 수신되면 전력제어기는 코일 전압에 포함된 리플의 크기를 검출하여(3) 리플의 크기가 정해진 값보다 크게 되면(4) 고장이 발생한 것으로 판단하고 긴급 고장 경보를 발생시킨다.(10) 만약 리플의 크기가 정해진 값보다 작으면 전력제어기는 고장이 발생하지 않은 것으로 판단하여 반복 검출 모드 상태로 돌아간다. 전력제어기에 이상이 발생하여 이중유지 모드로 들어가면 정지 집게 코일과 이동 집게 코일에는 정해진 패턴의 전류가 인가되고 이때는 2개의 코일 전압에 대하여 각각 이산 푸리에 변환(DFT) 방식을 사용하여 전력 모듈에 고장이 발생하였는지를 판단한다.(6) 만약 특정 주파수(60Hz)에서의 파워 스펙트럼의 크기가 정해진 값보다 크면(7) 전력제어기는 전력 모듈에서 고장이 발생한 것으로 판단하고 긴급 고장 경보를 발생시킨다.(10) 제어봉이 정지 모드에 있는 경우 이동 집게 코일은 영전류 제어를 행하게 되고 이때 전력모듈 한상에서 고장이 발생하여도 DFT 방식으로는 고장 검출이 되지 않는다. 이 때에는 각 상(180Hz)에 대한 RMS 값을 구하고 이 값이 정해진 값보다 작으면 이동 집게 코일용 전력 모듈에서 고장이 발생한 것으로 판단한다. 정지 집게 코일용 이중유지시와 마찬가지로 DFT 방식으로 고장 검출이 가능하다. 싸이리스터가 정상적인 경우 이동 집게 코일에서의 코일 전압, 전류, 전압 RMS 계산값 및 전압 파형에 대한 FFT 결과를 기준으로 전력모듈의 고장시에 이들 신호의 변화를 관찰하고자 한다. 그림 3은 제어봉이 정지 모드 상태에 있을 때 정지 집게 코일에만 전류가 인가되는 경우 이동 집게 코일에서 상기 각 신호를 나타내며, 그림에서 위로부터 코일 전압, 전류, RMS 계산값 및 FFT 결과(그림 3.4)를 보여 주고 있다. 전압에 대한 FFT 결과에서 알 수 있듯

이 3상이 모두 정상적인 경우 전압 신호에서는 180Hz에서 가장 큰 power spectrum이 나타나고 있음을 알 수 있다. 싸이리스터를 이용한 3상 반파 정류기를 사용하여 코일 전류를 인가하는 경우, 어떤 원인으로 3상 중 한상이 동작되지 않으면 그림 4와 같은 파형이 관찰된다. 그림 4의 RMS 계산값으로부터 알 수 있듯이 60Hz 주기로 RMS 값이 거의 영까지 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 경우 RMS 계산값은 정해진 RMS Threshold(그림 2의 V_{rth})보다 작게 되어 전력 모듈의 한상에 이상이 생긴 것으로 판단할 수 있다. 그림 5는 그림 4의 상태가 전력제어기에 의해 검출된 후 전력제어기가 긴급 고장 상태임을 판단하고 자동 이중유지 모드 상태로 들어간 경우 이동 집게 코일에 저전류 명령이 인가되었을 때 나타나는 신호들을 보여 주고 있다. 그림 5의 FFT 결과에서 알 수 있듯이 이 경우에는 60Hz 주파수에서 가장 큰 power spectrum이 만들어지고, 이것으로부터 전력모듈 한상의 고장이 발생하였다는 것을 알아낼 수 있다. 따라서 상기 고장 검출을 위해 제어봉의 동작시(운전 모드), 정지시(홀드 모드) 및 이중유지시(더블 홀드 모드시)로 분리하여 싸이리스터의 고장 검출을 행하게 되었다.

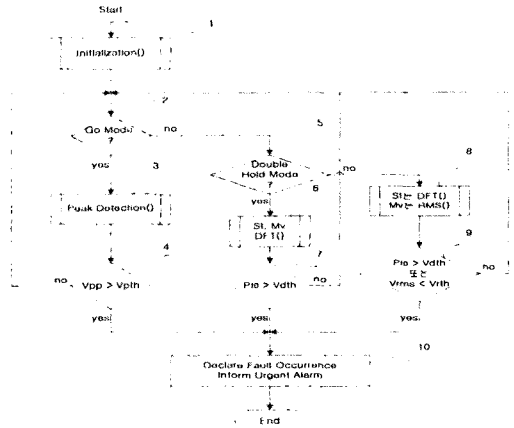


그림 2. 상시 싸이리스터 고장검출을 위한 흐름도

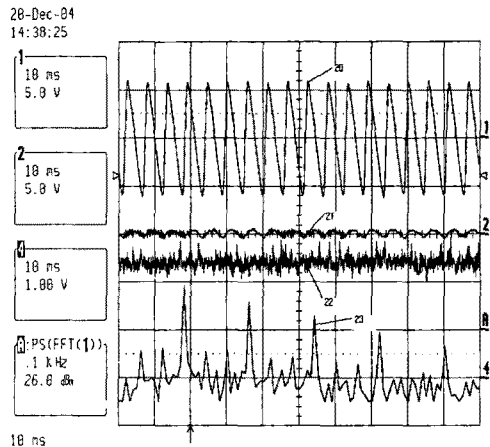


그림 3. 정상상태(코일 전압, 전류, 전압 RMS 및 FFT)

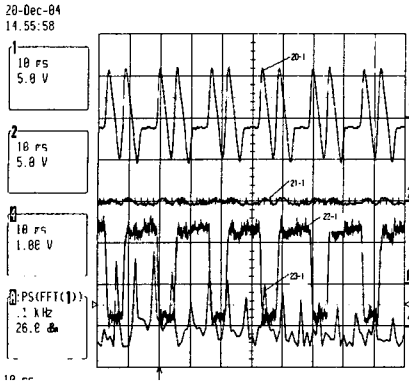


그림 4. 한상 고장시(고정 모드)

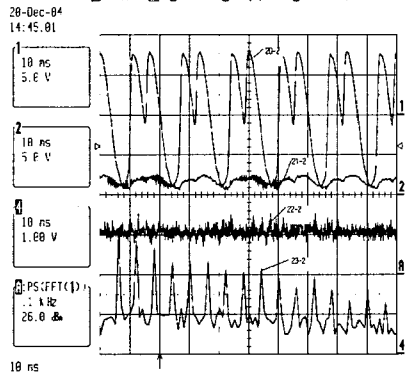


그림 5. 한상 고장시(이중유지 모드)

2.2.2 상대방 Heart Beat 고장 검출

이중화된 두개의 전력제어기는 서로서로 상대방의 프로세서가 건전하다는 정보를 교환하고 있어야 한다. 상대방의 건전성 여부는 상대방으로부터 보내오는 PWM신호를 이용하여 판단하도록 한다. 개별 프로세서는 Watch Dog 형태로 상대방으로부터 입력되는 900Hz의 PWM신호를 체크하고 있다가 이 신호가 일정시간 동안 입력되지 않으면 상대방 프로세서가 이상이 발생한 것으로 판단한다. 이러한 이상을 검출하는 로직의 구성을 살펴보면, 내부적으로 한 개의 업 카운터를 구성하여 상승 Edge가 발생하면 카운터는 0에서부터 증가하는데 다음 상승 Edge가 발생하면 다시 0에서부터 증가를 하지만 상승 Edge가 발생하지 않았을 때에는 카운터 값에 의해서 에러를 발생시킨다. 설계 방법과 설계의 확인을 위해 상용 Tool인 Libero(Actel사)를 이용하였다. 설계된 로직의 확인을 위하여 상대방의 Heart Beat신호를 입력으로 하여 게이트의 조합을 거쳐 상승 edge를 구성하고 업 카운터를 구성하여 카운트를 증가-> 상승 edge가 업 카운터를 주기적으로 reset -> 상대방의 제어기가 이상하면 상승 edge가 발생되지 않음으로써 reset을 시키지 못함 -> 카운터가 증가하여 Heart Beat error신호를 발생시키게 한다. 그림 6은 로직에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다.

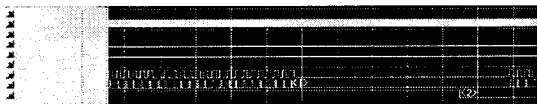


그림 6. Heart Beat error 검출 결과(Simulation)

- (1) rising edge가 발생하지 않음
- (2) 카운터 값이 증가하여 heart beat error 신호 발생 (high -> low)

2.2.3 Zero Cross 고장 검출

3상반파 정류기를 이용한 코일 전류 인가시 싸이리스터의 점화각 결정을 위한 기준 신호로써 3상 전원을 사용하게 되며 이에 대한 고장 검출 역시 필수 요구 사항에 해당된다. 3상 입력 신호의 정상 여부를 점검하기 위하여 3상 PT를 설치하고 그것의 출력 신호를 Zero-Cross Check 회로로 입력시킨다. Zero-Cross Check 로직의 입력은 zero-cross A, B, C상(60Hz), CLK(20kHz) 그리고 RES(Reset) 신호이고, 이러한 신호를 입력받아 180Hz 마다 rising edge를 검출하여 카운터를 초기화 시킨 후 카운터를 증가하는데 정상상태 일 경우 기준 값(160)에 도달하기 전 rising edge에 의해 카운터가 초기화된다. 그러나 A, B, C상 중 한 상이라도 빠지게 되면 rising edge가 발생되지 않아서 카운터를 초기화 시키지 못하므로 카운터는 계속 증가하여 기준 값에 도달하게 되면 Zero-Cross Error 신호(TRG)를 발생하게 된다. 그림 7은 Zero-Cross 고장 검출 로직에 대한 시뮬레이션 결과를 보여 주고 있다.



그림 7. Zero-Cross Error 검출 결과(Simulation)

- (1) b신호의 상이 빠짐
- (2) 출력(Q)신호가 High에서 Low가 되어 Zero-Cross error가 발생했다는 신호를 출력함

3. 결 론

본 논문에서는 제어봉 구동장치 제어 시스템용 이중화 전력제어기에서 수행하는 각종 고장 검출 종류와 방법에 관하여 기술하였다. 전력제어기에서 검출할 수 있는 고장의 종류는 전력제어기 내의 부품 고장(메모리류, 아나로그/디지털 변환기, FPGA 등), 전력모듈 고장(Gate Drive, 싸이리스터), 센서류(PT/CT) 및 보호 관련 부품 고장(퓨즈 등) 등이 있지만, 이러한 고장 유형 중 고장 검출 방법이 다소 복잡한 것들에 대해 자세히 설명하였다. 본 논문에서 제시한 바와 같이 제어봉 구동장치 제어시스템에서의 고장을 신속히 검출하여 조치함으로써 운전자의 의도적인 제어봉 낙하를 제외하고 제어봉이 결코 낙하되지 않도록 함으로써 발전소의 가동을 향상이나 유지보수의 용이성 향상에 많은 도움을 줄 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, 2003.11
- [3] 김춘경 외4, "제어봉 구동장치 제어시스템용 이중화 전력제어기 설계," 2004 전기학회 하계학술회의 논문집, 2004.7
- [4] 한국전력공사, "제어봉제어제동", 1997
- [5] 한국전력공사, "제어봉의 제어제동", 1980
- [6] 한국전력공사, "제어봉제어설비(I)", 1991.11
- [7] 한국전력공사, "제어봉 제어설비(II)", 1991.11