

2002 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

영광5호기 디지털보호계통의 CMF에 대비한 안전정지능력 실증시험 평가

Performance Test Evaluation for safety shutdown capability against CMF in digital plant protection system of YGN 5 nuclear power plant

고정수, 임장현, 오성현, 배구현, 부인형

한국원자력안전기술원

대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

디지털-기반 안전계통으로 설계되어 있는 발전소제어계통(PCS)에 대해서 소프트웨어 공통모드고장(CMF : Common Mode Failure) 가능성을 대비하여 설계되어 있는 PCS 우회 수동조작 Backup 패널 설계내용이 소프트웨어 공통모드고장시 발전소를 안전정지시킬 수 있는 능력을 갖고 있는지 확인하기 위한, 실증시험을 영광 원자력 5호기 고온기능시험과정 중 수행한 결과, 증기발생기 수위, RCS 압력 및 가압기 수위를 유지하면서 증기발생기의 증기 방출량 조절로 발전소 냉각이 가능함을 확인하였다. 본 논문에서는 PCS Backup Panel의 안전정지능력 확인을 위해 수행된 실증시험의 주요절차, 방법 및 안전성 평가결과를 기술하고 아울러, 실증시험 수행중 확인된 일부 현장 통신설비의 개선사항과 비정상 운전절차서의 개발 및 주기시험방법 등 안전성 향상에 필요한 사항들을 제시하였다.

Abstract

To meet safety requirement against CMF in the digital based protection system in YGN 5&6, hardwired backup panel to control safety related equipment to ensure hot shutdown of the plant was installed. This backup system is independent and diverse from the digital-based protection system. At the stage of Hot Functional Test for YGN 5&6 nuclear power plant, performance test for safety shutdown capability against CMF in digital plant protection system was additionally carried out to verify the PCS Backup Panel System. As a result, safety shutdown capability against CMF was demonstrated that the RCS and steam generator level can be stabilized and maintained by opening an MSADV and aux.feedwater pump. Based on the performance test, this paper describes main performance test procedures and evaluation results. We have also provided recommendations to enhance safety that are to establish periodic surveillance test and emergency operation procedure including upgrade local communication facilities.

1. 서 론

영광 5,6호기에는 공학적안전설비작동계통 보조릴레이케비넷 출력단에서부터 최종 구동장치에 이르기까지의 논리회로 처리계통인 발전소제어계통(Plant Control System)설계에서 디지털 설계기술인 마이크로프로세서가 응용되어 설계되어 있다. 디지털시스템은 일반적으로 아날로그시스템에 비해 데이터 전송과 처리능력이 월등하고 각종 공정장비들을 상당히 많이 공유함으로써 자원의 활용도를 크게 높일 수 있다. 그렇지만, 이 같은 공유는 다중성 장비에서 공통모드고장을 일으킬 수 있으며 소프트웨어 프로그래밍오류가 하드웨어로써 구현된 다중성을 파괴시킬 수 있다는 우려를 안고 있다. 이 같은 기술적인 현안문제를 해결하기 위한 가장 설득력 있는 방안은 철저한 품질보증과 심층방어 및 다양성 설계기법을 설계에 반영하는 것이다. 컴퓨터기반 디지털 시스템에 대한 안전성 평가는 최종설계가 완료된 후 수행되는 시스템 성능시험 등으로 그 성능을 확인하는 기존의 아날로그 시스템에 대한 안전성 평가 방법과는 상이한 안전성 평가방법을 요구하고 있다. 즉 디지털 시스템은 요구되는 기능이 소프트웨어 프로그램으로 구현되기 때문에 최종설계결과물 생성 단계에서 안전성을 확인하는 방법보다는 설계공정과정중의 품질보증 활동의 적합성 확인에 주안점을 두도록 관련 규제요건에서 규정하고 있으며 공통모드고장에 대비한 디지털 계측제어계통의 심층방어 및 다양성을 설계에 갖추도록 요구하고 있다[1].

이에 따라 PCS 계통에 대한 소프트웨어 공통모드고장(CMF : Common Mode Failure) 가능성을 대비하여 즉시 원자료를 정지시키고 고온정지 상태를 유지하는데 필요한 필수적인 기기 (영광 3,4호기 및 울진 3,4호기와 동일하게 원격 정지 제어반 'B' 트레인 대상기기)에 대해서 PCS를 우회하는 별도의 수동조작 Backup 패널을 설계하도록 PSAR 심사과정에서 요구하였다. PCS를 우회하는 별도의 수동조작 Backup패널은 영광 3,4호기 및 울진 3,4호기에서도 추가설계된 바 있으나 발전소에 미치는 과도현상 및 영향에 대한 우려 때문에 실증시험을 통한 성능확인 시험이 수행되지 못하고 간접적인 방법인 절차서 분석만으로 설계적합성이 확인되어 왔다. 영광 5,6호기에서는 PCS를 우회하는 별도의 수동조작 Backup 패널 설계내용이 소프트웨어 공통모드고장시 발전소를 안전정지 시킬 수 있는 능력을 확보하고 있는지 여부를 실증 시험을 통하여 직접 확인하기 위하여, 관련 운전 절차서를 개발하고 운전절차서 수행과정에서 문제점이 없이 원자료를 안전정지상태로 냉각·유지시킬 수 있음을 확인하도록 요구하였으며 실증시험이 추가적으로 수행되었다[2].

실증시험 준비 및 수행과정에서, 소프트웨어 기반 발전소 제어계통의 공통모드고장조건을 모의하여 실시하는 실증시험이 실제 발전소에 과도현상을 유발하거나 또는 악영향을 일으킬 수 있음을 고려하여, 관련 계통 및 운전분야 전문가에 의한 기술자문을 통해 실증시험의 유효성을 최대한 확보하여 실효성 있는 시험이 실시될 수 있도록 시험절차서가 개발되도록 유도하고, 다른 한편에서는 현실성 없는 무리한 운전절차에 의한 기기 조작은 가능한 배제될 수 있도록 절차서 개발과정에 기술적인 보완의견을 제시하였다. 또한, 실증시험결과에 대한 판정기준을 제시하고 최종 실증시험결과에 대한 분석결과, 일부 현장제어기 작동의 어려움 및 운전편의성을 고려하여 보조급수 및 대기덱프 제어기를 보조판넬에 추가 설계하도록 권고하였다.

2. 실증시험 방법

영광 5호기 공학적안전설비작동계통설계중 소프트웨어 기반 발전소 제어계통의 공통모드고장에 대비하여 추가적으로 실시된 “발전소안전정지능력 실증시험” 수행과정에서의 주요절차 및 방법은 아래와 같다[3].

2.1 개요

PCS Backup Panel는 소프트웨어 CMF시 모든 PCS가 운전 불가능한 경우에 사용되는 것으로서 실증시험 기간중 예기치 못한 발전소 과도현상에 대비하여 PCS는 운전상태로 유지하여 시험이 실시되며 PCS Backup Panel의 설계기능을 완전하게 확인하기 위해서는 정상운전 온도인 295℃에서 고온정지 177℃까지 냉각기능을 확인해야 한다. 발전소 냉각은 보조급수유량 조절을 통하여 증기발생기 수위를 유지하고 RCS 압력 및 가압기 수위를 유지하면서 증기발생기의 증기방출량을 조절하여 발전소 냉각을 유지하기 때문에 일부 기기의 반복적인 조작에 의해 발전소 냉각을 수행하게 된다. 따라서, 실증시험 범위를 1시간 이상, 최소 30℃ 이상으로 확인 할 경우에 PCS Backup Panel의 고온정지 능력의 적합성은 확인이 가능한 것으로 판단하였다.

실증시험 수행방법에서는 PCS 소프트웨어 CMF시 주제어실에 있는 PCS 관련 기기 및 계기는 운전 불가능하므로 PCS Backup Panel의 기기, PCS와 관련이 없는 주제어반 기기/계기 및 현장 설비 등을 이용하여 실증시험이 수행되었다.

2.2 실증시험 주요절차 및 내용

소프트웨어 기반 발전소 제어시스템의 공통모드고장에 대비하여 추가적으로 실시된 “발전소 안전정지능력 실증시험”의 주요절차는 아래 표-1과 같이 시험전회의, 운전 Data수집 및 초기조건형성, 발전소 냉각/감압 운전 및 실증시험종료 순서로 수행되었다. 대기덱프밸브의 현장수동제어 및 보조급수 차단밸브의 조작 등으로 순조로운 발전소 냉각 기능이 입증되고, 발전소 냉각은 동일기기의 반복조작에 의해 수행되기 때문에 1시간30분 동안 18℃까지 냉각 확인 후 실증 시험이 종료되었다.

-1. RCS & S/G 2

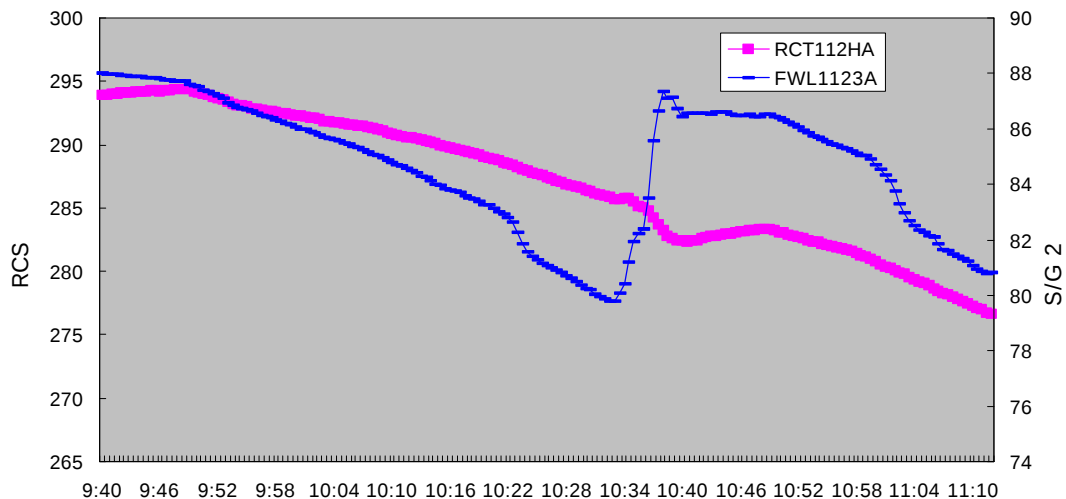


표 1. “발전소안전정지능력 실증시험”의 주요절차

항 목	주 요 내 용	비 고(절 차)
1) 시험 전 회의	(1) 실증시험 시나리오 설명 (2) 시험조 편성 및 역할 분담 및 시험 단계별 시나리오 작성 및 훈련 (3) 현장제어기 수동조작 방법 숙지 등 (4) 현장 대기덤프밸브 수동조작시 주의	- 과도상태시 즉시 시험중지 및 발전소 안정조치 - 자동제어기는 수동으로 전환하여 자동으로 제어되지 않도록 조치 - 실증시험 기간중 다른 시험 중지 - 통신상태 유지
2) 운전 Data수집 및 초기 조건형성	(1) 대기덤프밸브 운전 Data 수집	- 대기덤프밸브 열림 허용 신호 확인 및 현장 수동조작 등
	(2) 시험초기 형성 - 증기우회 제어계통 차단	- 자동 운전중인 증기덤프계통수동 전환 - 복수기 덤프밸브 차단
	- 증기발생기 급수공급 차단	- 기동용 급수펌프 정지 및 급수제어밸브 차단
	- RCP 2대 운전	- RCS에 열원을 제공하기 위하여 RCP 2대 운전 상태 유지 - RCP 운전에 따른 밀봉수 주입 및 회수배관 정상 배열상태 유지
	- 밸브 배열상태 점검 및 시험배열	- 충전펌프 흡입 유로 전환(CV-V534 개방) - 보조급수계통 정상 배열상태 확인 - 대기덤프 격리밸브 개방확인 등
3) 발전소 냉각/감압 운전	(1) 초기조건	- RCS 온도 : 294℃ - 가압기 수위 : 50%, 압력 : 158kg/cm ² - S/G 수위(광역수위) : 85%
	(2) 발전소 냉각 - 주증기 대기덤프 밸브 수동제어	- 밸브 개도 : 2% ~ 10% - 냉각율 : 8.8 ℃/hr ~ 20 ℃/hr(밸브개도에 따라 냉각율상이)
	- RCS 온도 : 294℃ ⇒ 276℃ (평균 냉각율 : 12 ℃/hr)	- RCS 온도와 S/G 2 수위 변동내용(위 그림 참조)을 확인한 결과, 대기덤프밸브 수동제어에 따라 RCS 냉각이 원하는 방향으로 제어가 되며, 현장에서 대기덤프밸브 수동제어도 적절히 수행됨을 확인(대기덤프밸브의 현장 수동제어 적합성 입증)
	(3) 증기발생기 충수 - 발전소 냉각이 진행됨에 따라 증기발생기 수위 감소(85%⇒80%)	- 보조급수펌프 기동(@ PCS Backup Panel)
	- 보조급수 차단밸브 개방(@ PCS Backup Panel)	- 보조급수펌프 운전 및 보조급수 차단밸브 조작으로 증기발생기수위유지 기능이 입증됨 - 증기발생기 수위 : 80% ⇒ 87% - RCS 냉각율 : 최대 33.5℃/hr
	(4) RCS 감압 운전 - 보조살수밸브개방 (@PCS Backup Panel)	- RCS 감압 : 157kg/cm ² → 147kg/cm ²
	- 보조살수밸브차단 (@PCS Backup Panel)	- 보조살수밸브 조작에 의해 RCS 압력 감압입증 - 보조살수밸브를 개방함에 따라 RCS 압력 감소

3. 실증시험 평가결과

영광 5호기 공학적안전설비작동계통 설계중 소프트웨어 기반 발전소 제어계통의 공통모드고장에 대비하여 추가적으로 실시된 “발전소안전정지능력 실증시험”에 대한 적합성 평가결과, 증기발생기 수위와 RCS 압력 및 가압기 수위를 정상범위내에서 유지하면서 증기발생기의 증기방출량 조절로 발전소 냉각이 가능함을 확인하였으며, 시험과정 및 평가결과 다음과 같은 내용이 보완조치되었다.

3.1 실증시험 방법 개선

PCS Backup Panel의 설계기능을 완전하게 확인하기 위해서는 정상운전온도인 295℃에서 고온정지온도인 177℃까지의 냉각기능을 확인하여야 하며 발전소 냉각은 증기발생기 수위(보조급수유량)와 RCS 압력/수위(충전유량 및 보조살수)를 유지하면서 증기발생기의 증기방출량 조절로 발전소 냉각을 수행하게 된다. 한수원(주)에서는 고온정지 능력확인을 위하여 실증시험용 임시운전절차서 초안을 제시하였는데 초안에서는 2차측 대기덤프밸브 제어를 현장에서 수동으로 제어하는데 어려움이 있고 계통에 미치는 악영향을 우려하여 2차측 대기덤프밸브 제어 및 보조급수유량제어를 PCS를 활용하여 자동제어하는 방식의 실증시험방법을 제시하였다.

초안에 대한 검토결과, 실증시험의 실효성을 확보하기 위해서 보조판넬 및 현장제어기를 활용하는 실증시험이 수행되어야 하며 현장제어에 어려움이 예상될 경우에는 보조판넬에 해당 계통을 추가 설계하여 적절한 실증시험이 수행되어야 한다는 검토의견을 제시하였으며 이를 통하여 실증시험 방법이 실제 상황(발전소제어계통의 고장상태)을 가정하여 수행되는 것으로 초안이 개정되었다. 또한, 개정된 실증시험 절차서 검토 결과, 실증시험의 유효성은 최대한 확보하여 실효성 있는 시험을 실시하는 동시에 현실성 없는 무리한 운전절차에 의한 기기 조작도 가능한 배제될 수 있도록 절차서 개발과정에 기술적인 보완의견을 아래 표-2 내용과 같이 제시하였다.

표 2. “발전소안전정지능력 검증을 위한 실증시험” 절차서 개발과정에서 보완된 기술사항

항 목	평 가 내 용
1) 판정기준	1) 냉각능력 확인 (30℃ 감온, 3시간정도 운전후 안정도 평가) 2) 냉각율(55℃/시간) 준수 3) 급수/방출의 동시조작 금지, PCS기기 운전금지 4) 과도현상 발생시(가압기 수위, 증기발생기 수위등 이상) 시험중지 5) 재시험 실시횟수를 3회로 제한
2) 실증시험절차서 개정 권고	1) 대기덤프밸브 개방에 따른 감온/감압 정도에 대한 사전 데이터베이스 취득·분석한후 체계적인 시험 실시 2) 운전원 및 시험참여자에 대한 교육실시 3) 1인 지휘체계에 의한 실증시험 실시 4) 통신설비 및 조명설비 확보 5) 과도현상시 시험중지 및 발전소 안정화 조치 6) 가능한 B/U 판넬의 기기를 조작

3.2 보조급수 및 대기덤프제어기 추가 설계

영광 5호기 PCS Backup Panel의 실증시험결과, 현장제어기 작동의 어려움 및 운전편의성을 고려하여 보조급수 및 대기덤프 제어기를 보조판넬에 추가 설계하도록 권고하였다.

3.3 현장 통신설비 개선

대기덤프밸브의 현장 수동제어시 주제어실과 원활한 통신을 위한 동 지역의 통신설비를 보완하도록 요구하였다.

3.4 비정상운전절차서 및 주기적 기능확인 방안 수립

PCS Backup Panel의 설계적합성 분석 및 설계적합성 입증시험 결과를 반영하여 정상 운전중에 PCS 소프트웨어 공통모드고장(CMF)시 발전소를 안전하게 정지할 수 있는 비정상절차서를 영광 5호기 상업운전 이전에 작성하여 운영토록 요구하고 기능확인을 위한 주기시험 방안을 수립하도록 요구하였다.

3.5 탄력적인 판정기준 적용

실증시험 진행중 발전소 냉각과정의 운전상황을 종합적으로 고려하여 당초 판정기준으로 제시되어 있던 냉각능력 확인사항(30℃ 감온, 3시간 운전)보다 다소 완화된 판정기준(1시간 30분 동안 18℃ 냉각)을 탄력적으로 현장에서 적용하여 실증시험을 종결하도록 함으로써, 불필요한 발전소 과도운전을 최소화하였다.

4. 결론

디지털-기반 계통으로 설계되어 있는 PCS 계통에 대해서 소프트웨어 공통모드고장 가능성을 대비하여 설계되어 있는 PCS 우회 수동조작 Backup 패널 설계내용이 소프트웨어 공통모드고장시 발전소를 안전정지시킬 수 있는 능력을 확보하고 있는지 여부를 확인하기 위하여 실증시험을 영광 원자력 5호기 고온기능시험과정 중 수행한 결과, 증기발생기 수위와 RCS 압력/수위를 정상상태로 유지하면서 증기발생기의 증기방출량 조절로 발전소 냉각이 가능함을 확인하였으므로 동 시험결과는 적합한 것으로 판단된다. 즉, 대기덤프밸브의 현장 수동조작에 의한 원활한 RCS 냉각을 제어능력이 입증되었으며, PCS Backup Panel에서의 보조급수펌프 및 격리밸브의 조작에 의한 증기발생기 수위유지 및 보조살수밸브 조작에 의한 RCS 압력 감소능력이 입증되었다.

따라서, PCS Backup Panel 기기조작, PCS와 무관한 주제어실 기기/계기 및 현장 기기조작 등으로 발전소를 안전하게 고온정지상태로 유지할 수 있음을 실증시험을 통하여 확인하였으므로 PCS를 우회하는 수동조작 보조패널은 발전소를 고온정지시킬 수 있는 능력을 갖추고 있는 것으로 평가한다. 아울러, 실증시험 수행중 확인된 일부 현장 통신설비(대기덤프밸브 현장 조작용)의 개선사항과 비정상 운전절차서의 개발 및 PCS 보조패널기기에 대한 주기적인 기능확인 등이 적절히 수행된다면 안전성을 보다 향상시킬 것으로 판단한다.

참고문헌

- [1] KINS-G-001, 경수로형 원전 안전심사지침서
- [2] 영광 5&6호기 최종안전성심사보고서
- [3] PCS Backup Panel 실증시험 절차서 및 보고서