

## 고리1호기 공정제어 및 보호설비 개선

### Digital I&C Upgrade of Kori NPP Unit 1

김재학, 정시채, 최근호, 김항배  
한국전력기술주식회사  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요약

고리 1호기 공정제어 및 보호설비는 아날로그 신호처리 기반의 설비로써 부품의 제작중단(1989년)으로 인한 예비품 확보가 불가능하게 되어 노후된 설비의 신뢰성(Reliability)이 저하되고, 빈번한 고장이 발생하는 등 유지보수의 한계성이 나타났다. 따라서 주요 계측제어 장비를 교체하기 위한 타당성 검토를 수행하였고 그 결과 디지털 기술을 기반으로 하는 설비로 교체되었다. 이는 국내 가동원전 최초의 대규모 계측제어 설비의 개선사례로 국내 독자기술에 의해 타당성조사, 설계, 구매, 인허가 취득, 설치 및 시운전까지 성공적으로 수행된 것으로 평가되고 있다. 고리1호기는 계측제어 설비의 교체후 1998년 9월 12월 전출력운전에 도달하여 운전중이며 발전소 안전성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

#### Abstract

The KORI Nuclear Power Plant Unit 1 has upgraded the analog NSSS Control System and NSSS Protection System to the digital based systems. This upgrade was undertaken due to increased maintenance cost required on the existing instrumentation, hardware obsolescence, difficulty in obtaining spare parts, and overall aging of equipment. The scope of work consisted of basic engineering, procurement, detail engineering, licensing support, installation, startup support and total project management. This is the first digital I&C upgrade project in Korea and the plant reached full power operation successfully on September 12 1998.

#### 1. 개요

1978년 준공된 고리 1호기 계측제어설비는 설비의 노후화로 설비의 신뢰성(Reliability)이 저하되

고, 빈번한 고장에 따른 유지보수의 기간 및 회수가 증가되고 있으며 또한 제작사의 부품제작 중단(1989년)에 따른 예비품 확보가 불가능하게 됨에 따라 설비 교체의 필요성이 시급하게 요구되었다. 기존 설비는 60년대 개발된 아날로그방식으로 구성된 설비로 비표준 신호인 10-50mA의 전송기 입력신호를 사용하므로 공정제어 및 보호계통 캐비닛, 신호 전송기, 주제어반의 지시계, 조작스위치 등을 포함하는 광범위한 개조가 필요한 것으로 파악되었다.

## 2. 기존설비 진단

공정제어 및 보호설비를 구성하는 모듈은 60년대의 전자기술로 제작된 폭스보로사의 H-Line Series로 18년간의 상업운전에 사용된 것으로 모듈을 구성하는 주요소자가 열화되어 요구되는 선형성 및 정밀도를 제공하지 못하게 되어 신호가 불안정하게 되었다. 표 1과 같이 최근 3년간의 전자소자의 교체 요구는 증가되고 있으나 89년 3월부터 전 모듈의 생산중단으로 예비품의 확보가 불가능하게 되었으며, 빈번한 소자의 교체로 인하여 전자기판의 상태가 불량하였다. 계획예방정비 기간중 전자모듈의 육안 점검, 주기교체 계획에 따른 중요 전자소자 교체, 자체 개발한 전자모듈 기능시험기에 의한 정밀 기능시험 및 교정 등의 정비 기법을 활용하여 수행하였으나 설비의 노후로 한계성이 노출되었다.

전자소자		콘덴서	고정저항	가변저항	다이오드	트랜지스터	릴레이	휴즈홀더	휴즈	계
연도	교체모듈									
93 (13차)	184	241	106	20	20	0	0	0	0	387
94 (14차)	276	1035	134	217	240	122	4	397	397	2546
96 (15차)	382	1194	184	13	585	7	17	32	52	2084
계		2470	424	250	845	129	21	429	449	5017

\* 설비의 구성모듈 수량은 794개임.

표 1 연도별 전자소자 교체 현황

또한 고리 1호기는 비표준 신호체계인 10-50mA dc를 사용하고 있어 국제표준 신호인 4-20mA를 사용하는 후속기와는 달라 현장전송기를 포함하는 계측제어 기기를 구매함에 있어 특별한 주문사항이 요구되고 이러한 호환성 결여로 인하여 추가적인 구매비용이 소요되었다. 주제어실의 신호체계도 전류루프가 사용되어 선로저항의 정밀도가 루프 정밀도(지시계, 기록계, 운전원 지원 컴퓨터 등)에 영향을 주어 구성 기기 고장시 계통전체의 제어불능 현상을 유발할 수 있었다.

2차계통의 일부 제어시스템도 1차계통과 동일한 하드웨어로 구성되어 있어 개조대상에 포함되었다. 특히 2차계통은 터빈홀 등 외곽지역에 분산되어 있어 유지보수나 정비측면에서 많은 문제점을 내포하고 있었다. 따라서 주제어실로 집중화하는 방안을 고려하였다.

### 3. 공정제어 및 공정보호설비의 계통구성

계측제어시스템의 발전추세인 디지털계통을 적용하는 구성방안은 타당성이 있는 몇 가지 방안을 선정하여 평가하였다. 설비의 선정기준으로는 • 제어 및 보호계통의 동일한 hardware platform 적용 여부 • 소프트웨어에 의한 공통유형고장(Common Mode Failure) • 소프트웨어의 확인 및 검증(Verification and Validation) • 발전소 운전환경의 적합성(EMI, RFI, 온도, 전원 및 접지) • 국내발전소의 운전경력 • 상용등급품목의 안전계통 사용 인준 (Commercial Dedication) 등을 고려하여 폭스보로사의 SPEC 200 MICRO 시스템을 채택하였다.

공정제어계통(NSSS Control System, NCS)은 제어봉 제어계통, 증기발생기 수위 및 압력계통, 가압기 수위 및 압력계통 및 증기덤프 제어계통을 포함하는 NSSS 제어계통으로 10면의 제어 캐비닛에 배치하였다. 각 캐비닛의 기능은 원설계자인 웨스팅하우스사의 설계개념을 채택하여 기능 배치를 동일하게 유지하여 4개의 그룹으로 구성하였다.

4채널로 구성된 공정보호계통(NSSS Protection System, NPS)은 원자로 냉각수 온도 및 유량, 가압기 압력 및 수위, 증기발생기 수위, 증기발생기 유량 및 압력, 증기 압력 및 격납 건물 압력 등을 측정하여 설정치와 비교한 후 트립 신호를 제공한다.

2차제어계통(Secondary Process Control System, SPCS)의 계통기능을 5개 그룹(6면)으로 재구성하여 주제어실에 설치하기로 결정됨에 따라 12면(각 채널당 3면)으로 구성되었던 보호계통 캐비닛을 8면(각 채널당 2면)으로 구성하여 설치공간을 확보하고 2차계통의 주제어실 집중화를 구현하였다. (그림 1)

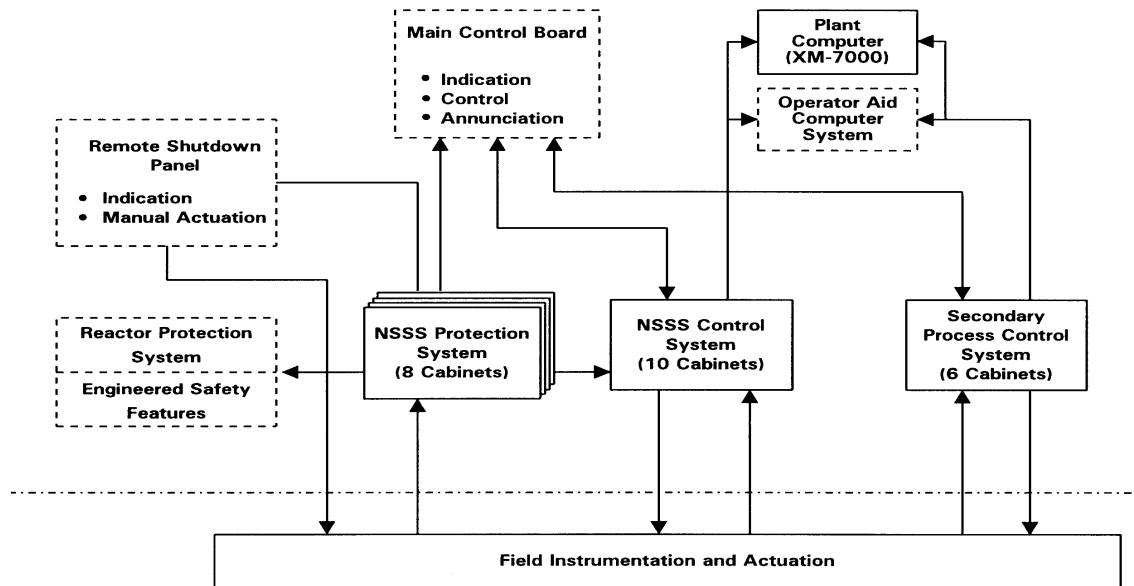


그림 1 공정제어 및 보호설비 구성

디지털 설비에서 고려해야 할 소프트웨어의 공통모드고장에 따른 영향을 평가하기 위하여 NUREG/CR-6303의 지침을 기반으로 다양성 및 심층방호 분석을 수행하였다. 분석 결과 취약점이

발견된 가압기 압력, 증기발생기 수위 및 격납건물 압력변수를 아날로그로 구성함으로써 공통모드 고장을 배제하였다.

고리1호기는 후속호기와는 달리 원자로제어에 사용되는 제어용 신호와 발전소 보호시스템의 작동을 위한 신호가 동일한 센서를 공유하여 설계되어 있어 Class 1E 품질등급요건을 만족하는 격리기를 이용하여 비안전계통과의 격리요건을 만족시켰다. 공정보호계통과 연계되는 공정제어계통, 소내감시설비 및 주제어실 지시계도 동일한 방법으로 신호를 격리하여 전기적 독립성을 유지시켰다.

계통간 연계신호의 흐름을 아래 그림 2에 표시하였다.

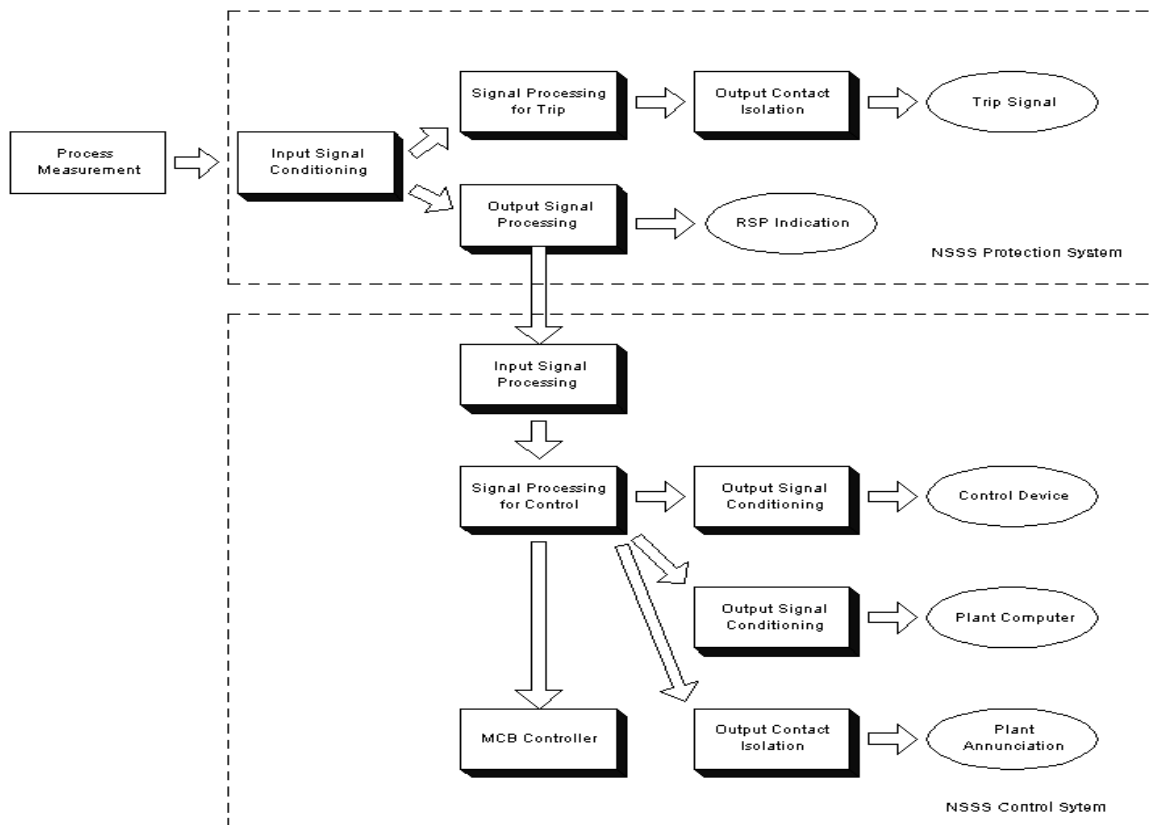


그림 2 계통간 연계신호 (예, 가압기 수위계열)

각 기기 들은 내환경 검증, 내진검증 및 내전자파 장애 검증을 통하여 기기를 검증하였다. 특히 내전자파 장애 검증을 위하여 설치 환경인 발전소 주제어실의 EMI/RFI 값을 측정하고, 제작된 캐비닛을 차폐시험실에서 시험을 수행하여 규제요건인 EPRI TR-102323, MIL-STD 461D 및 462D 를 만족함을 확인하였다.

또한 공장인수검사(FAT), 현장인수검사(SAT)를 실시한 후에도 루프시험, 교정시험 및 응답시험 등을 계통병입 전에 수행하여 교체된 설비의 건전성을 확인하였다.

#### 4. 설계개선 및 논의

디지털설비는 아날로그 제품 생산이 중단되고 노화에 따른 드리프트가 거의 없으며 기기의 유연성이 뛰어난 점 등의 장점 때문에 원자력발전소에서의 사용이 계속하여 증가되고 있다. 그러나 원자력 발전소의 계속제어 설비, 특히 가동중인 발전소의 보호계통에 디지털설비를 적용할 경우에는 선정된 기기의 기존 환경 적응능력(예를 들어 EMI, RFI, 온도영향, 전원 및 접지의 품질) 뿐만 아니라 설비의 디지털 개선범위, 운전원 연계사항(MMI)의 변경범위, 기존 시험절차의 영향, 그리고 정비, 보수 측면에서의 친숙도 등도 종합적으로 충분히 고려하여야 한다. 고리1호기 설비개선은 기본적으로 기존설비의 기능을 변경하지 않고 개조하는 원칙으로 추진되었으며 결과적으로 다음과 같은 개선 내용을 포함하고 있다.

- 디지털계통 적용으로 드리프트 감소 및 안정된 신호 제공
- 기존설계에서 미 적용된 사고후 감시계통(PAM)관련 루프의 안전등급 적용
- 2중화 전원계통 적용
- 자기진단 기능 추가 및 경보제공
- 2차계통의 주제어실 집중화로 정비 및 유지 부담 경감

개선전과 개선후의 성능비교는 표 2에 나타나 있다.

항목	개선전 (H-Line)	개선후 (SPEC200/200Micro)
캐비닛수	공정제어 : 10면 공정보호 : 12면	공정제어 : 10면 공정보호 : 8면
모듈형식	아날로그	아날로그/디지털
정밀도	0.5 %	SPEC 200 : 0.5% SPEC 200M : 0.1 %
안정도/년	자료없음	SPEC 200 : 0.5% SPEC 200M : 0.1 %
전원공급장치	단일 전원	2중화 전원
MTBF	자료없음	입력카드 : 63.3 YRS 200M 카드 : 12.6 YRS 출력카드 : 47.4 YRS
자기진단기능	없음	SPEC200M에 내장됨

표 2 설비개선에 따른 성능비교

## 5. 인허가

공정보호계통의 디지털설비 채택으로 가동중인 설비변경 지침인 10 CFR 50.59에 따라 철저한 인허가 절차를 수행하였다. 수행된 주요 인허가 항목으로는 최종안전성분석보고서(FSAR)의 수정, 다양성 및 심층방호 분석(Diversity & Defence in Depth Analysis, NUREG/CR-6303), 불확실도

및 설정치계산(Uncertainty & Setpoint Calculation, ISA-S67.04), EMI 및 RFI Qualification (EPRI TR-102323), 소프트웨어의 확인 및 검증(S/W Verification and Validation, RG 1.152) 그리고 제작사에 대한 인허가 실사(Licensing Audit) 등이 포함되었으며 현장설치 후에 성능검사시험(Surveillance Test)을 수행하였다.

## 6. 결론

고리1호기 공정제어 및 보호설비 개선은 국내 가동원전 최초의 전면적인 디지털설비개선 사업으로 짧은 기간에 성공적으로 교체공사를 완료하였다. 개선 범위가 공정제어설비, 공정보호설비, 신호전송기, 주제어반 지시계 및 제어기를 포함하는 광범위한 내용으로 유사 해외 개조사례에서는 제어계통과 보호계통의 개선을 여러 단계에 걸쳐 점진적으로 교체를 하였으나 본 사업에서는 동시에 수행하여 단계적인 교체시 필요한 추가적이고 불필요한 신호연계 기기 등을 제거할 수 있었다. 그 결과 개선비용 절감 뿐만 아니라 통합된 계통의 신뢰도를 높일 수 있었으며 디지털설비의 적용으로 향후 변경사항의 수용이 용이할 뿐만 아니라 발전소 운전의 안전성이 향상되었다. 또한 노후화되어 개조가 필요한 발전소의 개조가 순수 국내기술로 수행이 가능함을 입증하였고 사업추진 계획, 추진방법, 설계절차, 기기검증 등을 포함하는 인허가 획득의 경험 등은 향후 후속기의 유사한 사업 수행시 좋은 선례가 될 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- [1] 고리원자력발전소 1호기 계측제어 설비개선 사전기술검토 용역보고서, 한국전력기술주식회사, 1997.1
- [2] 고리1호기 공정제어, 보호 및 감시설비 개선공사 안전성분석보고서, 한국전력기술주식회사, 1998. 6
- [3] KINS/AR-562, 고리 1호기 공정제어 및 보호설비 개선공사에 따른 운영변경허가 심사 보고서, 한국원자력안전기술원, 1998. 6
- [4] NUREG/CR-6303, "Method for Performing Diversity and Defence-in-Depth Analyses of Reactor Protection Systems"
- [5] EPRI TR-102323, "Guidelines for Electromagnetic Interference Testing in Power Plants"
- [6] MIL STD 461D, "Electromagnetic Emission and Susceptibility Requirements for the Control of Electromagnetic Interference"
- [7] MIL STD 462D, "Measurement of Electromagnetic Interference Characteristics"
- [8] 10 CFR 50.59, "Changes, Test and Experiments"
- [9] ISA S67.04, "Setpoints for Nuclear Safety-Related Instrumentation Used in Nuclear Power Plants"
- [10] RG 1.152, "Criteria for Digital Computers in Safety Systems of Nuclear Power Plants"
- [11] H.B. Kim, et al., "Upgrading I&C and Computer Systems at KORI 1", Nuclear Engineering International, March 1999