

월성 2호기 원자로 안전계통 설계 개선에 관한 고찰

김석남.김성.한희환.한상준.박석준

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동

요 약

발전소 비정상 상태시 원자로를 신속히 정지시키고 정지후 원자로 내의 열을 효율적으로 제거하며 또한 그러한 상태에서 발생할 수 있는 방사성 물질을 환경으로 누출되는 양을 제한하여 방사성 물질 방출로부터 공중을 보호하기 위한 계통으로, 월성 2호기는 새로운 인허가 요건 사항 변경, 적용 코드 및 기준(Code & Standard) 변경 및 요건 강화, 생산 및 제작 중단에 의한 변경, 기타 월성 1호기에서 운전중 불편하고 개선되어야 할 사항 등 총 84개의 설계 변경을 적용하여 월성 1호기 보다 진보, 개량된 발전소로 설계하여 2호기는 97년 상업 운전 목표로 시운전중에 있다.

1. 서 론

1.1 월성 2호기 원자로 안전계통 개요

원자로 설비는 모든 가상 사고에 대비하여 특수한 공학적 안전 설비를 갖추고 있어 각종 재해 및 인위적 사고에도 신속하고 안전하게 원자로를 정지시키도록 설계되어 있고 이러한 목적으로 설치된 4종의 특수 안전 계통은 상호 독립적으로 작용하여 천재 지변, 내외부 비행 물체등에 의한 충격에도 원자로의 안전성을 보장하며, 사보타지등과 같은 인위적 가해에도 사고가 확대될 수 없도록 설계되었음. 비록 심각한 사고에 의해 방사능이 유출되는 경우에도 이를 원자로 건물 내에 수용하여 공중에 대한 방사능 피해를 방지하도록 보장하고 있다.

1.2 설계 개념

- . 구성품 고장시 안전한 방향으로 동작(Fail Safe)
- . 다중화(Redundancy) 및 다양화(Diversity)
- . 물리적 상호 격리(Physical Separation)
- . 내진 및 내환경 검증 설계(Seismic & Environmental Qualification)
- . 시험 능력(Testability)

1.3 보호 계통의 안전 설계 현황

1.3.1 발전소 주제어실은 물론 제 2제어실(SCA)에서도 원자로를 안전하고 신속하게 정지시킬 수 있도록 설계됨.

1.3.2 그룹별 설치 위치 분리

2개 그룹에 속한 계통의 기기 설치 위치는 원자로 건물 주위에서 90도 이상의 거리에 설치.

1.3.3 채널의 다중화

계통별 트립 채널을 3개로 구분하고 이중 2개 이상의 채널로 부터 트립 신호 발생시 안전 계통이 동작됨.

1.3.4 채널 설비간 최소 이격 거리 확보

최소 이격거리를 1.5 m 이상으로 유지, 설치됨.

1.3.5 무정전 전원 공급

어떠한 경우에도 전원 공급이 중단되지 않도록 안전 계통의 주요 기능에 관련되는 설비에는 무정전 전원 및 비상 발전기로부터 전원이 공급됨.

1.3.6 채널의 전원 분리 및 다중화

채널별 전원은 크게 even, odd line으로 부터 공급함은 물론 3개 모선으로 나누어 공급됨.

1.3.7 Fail Safe

전원 및 제어용 공기 상실시 원자로를 안전한 정지 상태로 유도되도록 설계됨.

1.3.8 채널의 예비 전원 확보 및 자동 전환

주 전원 공급 장치의 기능 상실시 자동으로 예비 전원이 투입됨.

1.3.9 내진·내환경 설계

안전계통 설비는 지진 및 환경(방사선, 열, 습도등)에 의한 영향을 고려하여 설계됨.

2. 월성 2호기 원자로 안전계통 주요 설계 변경

2.1 개요

월성 2호기는 새로운 인허가 요건 변경, 적용 코드 및 기준(Code & Standard) 변경 및 요건 강화, 생산 및 제작중단에 의한 변경 그리고 기타 변경 요구에 의해 총 84개의 설계변경을 1호기 보다 진보, 개량된 발전소로 설계, 건설 중에 있으며, 원자로 안전계통과 관련한 주요 설계 변경(DC ; Design Change)항목 및 내용은 아래와 같다.

2.1.1 SDS1 & SDS2 low level steam generator trip instrument redundancy(DC #1)

월성 1호기는 각 원자로 안전계통에서 증기발생기 수위(총 4군데)를 각각 2 곳에서 측정하였으나 각 증기발생기 4대 모두에서 SDS1, SDS2 증기발생기 저수위 트립변수를 설정하여 감지.

2.1.2 SDS 2 On-line Poison Concentration Monitoring(DC #2)

월성1호기는 주기적(수동)으로 시료를 채취하여 소내 화학 실험실에서 개들리늄 농도를 측정하였지만 월성 2호기에서는 발전소 제어용 전산기(DCC)를 이용하여 연속적으로 Poison Tank내 전도도(conductivity)를 측정하여 질산 Gd. 농도를 온라인으로 모니터링하여 액체독물질 주입계통(LISS)의 신뢰도를 높임.

2.1.3 SDS 2 Trip for partial loss of flow(DC #3)

한 대의 열 수송 펌프(PHT P/P) 트립으로 인한 “partial loss of flow”를 검출하기 위하여 월성 1호기에서는 열수송계통의 출구 모관(outlet header) ROH #1, #5 두 군데에서 열 수송계통 고압력(PHT High Pr.)을 모니터링했으나 출구 모관 4군데(ROH 1,3,5,7) 모두에서 “PHT High Pressure“ 을 감지하여 결국 4군데 모두에서 High & Low 압력 신호를 감지.

2.1.4 SDS 2 Equipment Room(R-113) rearrangement(DC #4)

기존 원자로 제 2 정지 계통 관련 전송기가 설치되어 있는 기기실(R-113)이 복잡하고 설계 개선, 변경으로 인한 전송기가 추가되어 기존 두개의 전송기가 설치되어 있는 랙(rack)을 신설된 기기실인 S-031, S-031A에 기존 계측 설비와 함께 재 정렬하여 설치.

2.1.5 Shutdown System Software QA requirements(DC #5)

원자로 정지 계통 컴퓨터(PDC)에 대한 캐나다 원자력 규제 기관(AECB)의 소프트웨어 품질보증 요건 강화 및 새로운 하드웨어 선정에 따른 안전 계통 소프트웨어의 확인 및 검증 작업.

2.1.6 High moderator temperature trip on SDS1(DC #6)

기존 월성 1호기는 감속재 관련 변수로서 원자로 출력 연속 감발(Set-back)의 감속재 고온도, 출력 단계 감발(Step-back)의 감속재 고수위 변수를 설정하여 운용 중인데 이에 추가적으로 원자로 제 1정지 계통에 감속재 고온도 트립 변수를 설정하여 “loss of service water flow”를 대비.

2.1.7 Low power auto-conditioning for several trips on SDS1 and SDS2(DC #7)

기존 월성 1호기에서 발생할 가능성이 있는 원자로 저 출력시의 트립 해제 기능을 운전원이 수동으로 핸드 스위치에 의해서 이루어 졌는데 2,3,4호기에서는 PDC 프로그램에 의해서 자동으로 원자로 저 출력시 관련 트립 변수의 트립 기능 해제.

2.1.8 ECC Control Panel Modification(DC #11)

주 제어실 PL-3에 위치한 비상 노심 냉각 계통(ECCS)관련 패널의 공간 협소로 AECB 설계 요건인 Man/Machine Interface 사항을 만족하기 위하여 1개 패널에 설치되어 있는 관련 계측 지시기를 인간 공학적 측면을 고려한 2개 패널에 분산, 조정하여 재배치.

2.1.9 Additional ECC Heat Exchanger(DC #12)

ECC 계통의 이용률 향상을 위하여 100 % plate형 열교환기 1대 및 온도 감시회로를 추가

2.1.10 ECC Leakage Collection Improvement(DC #13)

냉각재 상실 사고(LOCA)시 비상 노심 냉각 계통 운전 중에 계통이 누설하여 Service 건물 접근 가능 및 종사자의 방사선 피폭의 위험도를 줄이기 위한 누설 회수 설비가 신설.

2.1.11 Improvements to ECCS Unavailability(DC #15)

ECC 계통의 전체적인 이용률(availability) 향상을 위하여 계통 주입 파이프의 체크 밸브를 시험 가능한 공기 구동 체크 밸브로 교체하고 ECC Water 탱크 저 수위시 고압 주입 밸브 “CLOSE” 신호 논리 회로의 이중화 및 후단 시험 밸브의 동시 “CLOSE”를 위한 논리 신호 제공, 증기 발생기 crash cool down 기능을 보충하기 위한 주증기 안전 밸브의 최소 개방 수량을 16개중 10개에

서 7개로 줄여, 살수 탱크 흡입 밸브와 관련한 ECC 펌프 연동 신호 제거 및 적절한 재 순환 유량 확보 등을 통해 계통의 신뢰도 증진.

2.1.12 Improve HTS Liquid Relief Valves Control Circuit(DC #69)

SDS1의 기존 "PHT Flow Low" test loop 의 안전 계통 정기 시험(SST)시에 사용하는 핸드 스위치인 HS-1D 혹은 HS-1F의 점점 접촉 불량으로 비정상적인 열수송 계통의 액체방출밸브(LRV)의 개방을 유도하고 있으므로 관련 제어 회로로부터 LRV 모니터링 회로 및 퓨즈 위치를 분리, 독립하고 필요시 경보를 알리는 LED를 SDS1 패널에 설치하여 관련 루프를 개선.

2.1.13 Display Local Error Message of PDC in MCR(DC #79)

현장(SCA, CER)에서 생성된 경보내용을 주 제어실에서 운전원이 볼 수 있게 한 것으로서, DCC Contact Scanner를 이용하여 25 " CRT 에 경보 내용이 생성되게 하여 현장에 가서 확인하지 아니하여도 용이하게 고장 및 이상 정보를 파악.

2.1.14 Shutdown System Loop Additional Isolation Valve(DC #81)

SDS1의 기존 "PHT Flow Low" test loop 의 안전 계통 정기 시험(SST)시 관련 루프의 공기 구동용 시험 밸브에서 침전물의 축적으로 인해 누설이 발생하여 공기 구동용 밸브 입력단에 필터를 설치, 침전물 축적 방지.

3. 원자로 안전계통 전산기 주요 설계변경

중수로의 원자로 안전계통은 12대의 Microcomputer에 의해 구성되고 이들 컴퓨터는 6대씩 1개 그룹이 되어 SDS1과 SDS2를 구성하고 이들 각 채널(SDS1은 D, E, F/ SDS2는 G, H, J)은 2대의 독립된 PDC(Programmable Digital Comparator)로 구성된다.

각 컴퓨터의 기능은 Process Trip Parameter 관련된 Process신호들을 감지하여 원자로 운전 조건에 따른 트립 설정치(Trip Setpoint)를 PROM(Programmable Read Only Memory)속에 실장된 프로그램에 의해 자동으로 계산하고 감지된 Process신호들과 자동으로 계산된 트립 설정치와 비교하여 이를 벗어나는 경우, 해당 원자로 정지 메커니즘(정지봉/질산개돌니늬)을 구동하기 위한 동작 신호를 트립 로직에 보내 원자로를 긴급히 정지시키는 것이다.

3.1 PDC 설계 특징

3.1.1 트립변수 추가설정

기기의 구성 및 기능 면에서는 월성 1호기와 유사하나 입력 신호의 수가 증가되었고 일부 변수의 트립 설정치 변경 및 트립 변수(SDS1의 감속재 고온도 변수) 설정

3.1.2 지연트립 기능 추가

"PHT High Pressure"(SDS1/SDS2) 및 "PHT ΔP Low"(SDS2) 트립 변수에 delayed trip 기능이 추가되었는데 SDS2 "PHT High Pressure"의 동작 과정을 기술하면 아래와 같음.

원자로출력이 70% 이상이고 계통 압력이 10.24 MPa(g) 에 도달했을 경우, 관련 루프 트립 에러 메시지 D/O(loop trip error message)가 개방되어 경보만 제공하고 delayed trip를 위한 시간 카운팅이 시작되어 5초(T_1) 동안 변수 트립용 D/O(parameter trip D/O)는 정상상태로 있으며 이후에도 계속 원자로 출력이 70 % 이상이면 변수 트립용 D/O(Digital Output)가 개방되어 트립상태로 1초 동안 계속 유지된다. 이 때 모든 루프에서 계통 압력 신호가 delay 트립 설정치 이하 혹은 원자로 출력이 70 % 이하로 떨어지면 트립 상태가 해제.

3.1.3 트립 조건용 원자로 출력값 보완

일부 트립 변수에서 원자로 출력이 저출력일때 트립 조건이 되더라도 트립이 되지 않게 하는 기능을 보완하였는데 이는 월성 1호기에서는 이온 전리함 대수형(ϕ_{LOG}) 출력 값만 고려하였는데 반하여 월성 2호기의 일부 변수는 이온전리함 대수형 출력 값에 중성자속 검출기 평균값(ϕ_{AVEC})을 함께 고려하여 적용함.

3.1.4 새로운 컴퓨터 하드웨어 기종 사용(DC #55)

월성 2호기에서는 월성 1호기 PDC제작자인 미국 Data General Corporation의 제작 중단 및 Safety System Software QA 요구 조건 강화로 SDS1및 SDS2의 Hardware, Software는 서로 다른 기종, 서로 다른 소프트웨어로 설계되어 체계적이고 계획적인 Software Engineering지침에 의해서 개발되어 확인(Verification) 및 검증(Validation) 절차를 거쳐 각종 시험(Test)단계를 거쳐 현장에 설치됨.

월성 2호기에서는 SDS1용으로 ABB Power Generation Ltd.의 PRO 03d, SDS2용으로 PEP Modular Computer Inc.의 VM-30으로 선정되었다.

3.1.5 경보 시스템 개선

운전원 및 보수원에게 각각 운전 정보, 보수 관련 정보를 제공한 LEM (Local Error Message) Display가 월성 1호기에서는 모두 현장(SDS1은 CER, SDS2은 SCA)에 각각 설치되어 운용되고 있지만, 월성 2호기에서는 현장에서 생성된 경보 내용을 현장 뿐만 아니라 주제어실에서도 운전원 및 보수원에게 볼 수 있게 한 것으로 주제어용 전산기(DCC)의 Contact Scanner를 이용하여 25" CRT에 경보 내용이 생성되게 하여 운전 및 보수 유지에 도움을 줄 것으로 판단된다.

3.1.6 소프트웨어 품질보증 요건 강화

캐나다 원자력 규제 기관(AECB)의 소프트웨어 품질보증 요건 강화 및 새로운 하드웨어 선정에 따른 안전 계통 소프트웨어의 확인 및 검증 작업 수행

3.1.7 비정상 아날로그 신호(Irrational Analog Signal) 처리 개선

일반적으로 비정상 경보(alarm) 설정치는 아날로그 입력 신호의 정상 동작(교정) 범위를 약간 벗어난 범위에서 설정되어 있다. 그래서 정상 동작 범위를 현저하게 초과하는 경우에 경보가 발하도록 되어 있고 과도 혹은 정지 상태에서 불필요한 경보 발생을 줄일 수 있다. 월성 2호기 정지 계통용 전산기에서는 50 mV 히스테리시스(Hysteresis)를 적용하여 떨림(dithering) 현상을 방지하였다.

3.1.8 입출력 자체 점검(I/O Selfcheck) 진단기능 강화

자체 점검용 A/O와 연결된 A/I를 통해 0-5.0 Volts 사이의 전압을 처음 보낸 전압과 서로 비교하는 것으로써, 점검은 전압 범위 0-5.0 Volts 에 걸쳐서 최소한 10개 지점에 대해서 수행한다. 이 때 상호 비교하여 차이값이 1 %(50 mV)이거나 그 이상이면 관련 메시지(Analog I/O self-check failure) 및 경보창(PDC self-check error) 구동 D/O가 개방되며 이 때 전산기 감시장치(Watchdog)은 계속 본연의 일을 수행하고 만약 상호 비교하여 차이 값이 20 %(1 Volt) 이거나 클 경우, 위에서 기술한 메시지와 경보창 경보가 지시되면서 전산기 감시장치(Watchdog)는 동작을 중단하게 된다. 디지털 입출력 자체 점검(Digital I/O Selfcheck) 기능은 기존 방식과 유사하여 매 30분마다 자체점검용 D/I를 통해 D/O에서 open-closed-open 신호를 받아들임으로써, 입출력 계통에 대한 자기점검 기능을 수행한다.

4. 결 론

이상과 같이 본 보고서에서는 기존 운전 중인 발전소 중에서 디지털화가 가장 많이된 중수로형 발전소의 원자로 보호(안전)계통을 개선한 월성 2호기 설계변경 사항을 고찰해 보았다. 우리나라에서도 원전 계측 제어 분야의 설계 개선의 필요성이 요구되는 시점에서 특히, 발전소 보호(안전)계통에 본 보고서에서 기술한 입증된 설계 개량 기술을 적극적으로 활용하여 원자로 보호계통을 보다 진보된 개량 디지털 보호 시스템을 구축해야 할 것이다. 특히 향후 중수로 후속기 도입에 대비하여 적용성 및 설계 개선 기술을 사전에 검토하여 관련 기술을 축적해야 한다. 이를 위하여 컴퓨터의 원자로 보호계통 적용에 대한 계통 설계, 그에 따른 하드웨어 개발 및 국내 인 허가 기준에 따른 소프트웨어 확인 및 검증기법 개발은 관련 제반 기술에 대한 연구와 개발의 병행 작업이 요청되고 특히 원자로 보호계통에 있어서의 컴퓨터의 역할은 매우 중요하므로 설계시 필요한 요구 및 기능 요건을 설정하고 확립하는 등 관련 기술을 축적해야 한다. 끝.

참고 문헌

1. Conceptual Design Description, CANDU Safety Presentation, Dec. 6 - 7, 1991
2. 86-68200-PFS-000, SDS1 PDC Program Functional Specification Rev. 2
3. 86-68300-PFS-000, SDS2 PDC Program Functional Specification Rev. 5
4. 59-68300-257-200 Rev. 2, PDC Program Functional Specification,
5. FSAR, Vol. 5, Wolsong NPP Unit No. 2/3/4
6. 86-68300-DM-003, SDS2 Trip Logic and Test Circuitry
7. 59-68200-258-100, PDC Program Description for SDS1