

표준형 원전 원자로냉각재계통의 발전정지유발기기 분석

이은찬, 배연경, 김명수
한국수력원자력(주) 원자력발전기술원

Single Point Vulnerability Analysis of Reactor Coolant System in OPR-1000

Eun-Chan Lee, Yeon-Kyoung Bae, Myung-Su Kim
Korea Hydro & Nuclear Power Co., Nuclear Engineering & Technology Institute

Abstract - 본 연구의 목적은 발전소의 정상적인 출력운전을 위해 필요한 주요 계통의 기능에 영향을 미쳐 발전소 발전정지를 유발할 수 있는 핵심 기기, 즉, 발전정지유발기기의 설치 개소를 체계적인 방법을 통하여 정밀 분석하고, 해당 기기의 고장모드와 그 영향을 검토하여 이를 방지하기 위한 대책을 수립하도록 하는 것이다. 발전정지유발기기의 평가는 발전소 종사자로 하여금 가동 중 발전소에서 발생 가능한 발전정지 영향기기와 그들의 상호관계를 이해하고, 정량적 평가를 통해 해당 기기들의 발전소 발전정지 영향을 시각적으로 확인하여 발전정지를 예방할 수 있는 대응 논리를 인지할 수 있도록 하는데 그 목적이 있다.

원자로냉각재계통에 대한 발전정지유발기기(SPV, Single Point Vulnerability)를 분석하기 위해 고장모드영향분석(FMEA, Failure Mode Effect Analysis)을 수행하고 상세 고장수목을 개발하여 통합단위의 계통 분석을 수행하였다. 분석결과 원자로냉각재계통의 발전정지유발기기는 원자로냉각재 펌프와 가압기 주살수 밸브의 제어회로에 집중되어 있는 것으로 나타났다.

1. 서 론

원자로 냉각재 계통의 발전정지유발기기 분석을 위해 계통을 기능단위로 분해하고 신뢰도블럭선도(Reliability Block Diagram)를 작성하여 입출력 신호간, 보조계통간의 연관 관계를 검토하였고, 그 결과를 바탕으로 고장수목 분석을 수행하였다. 분석대상 주기기에 대해서는 표준형 원전 정지이력 분석결과에 기초하여[1] 원자로 냉각재 펌프와 가압기의 주살수 밸브에 대하여 상세 분석을 수행하였다.

고장모드영향분석은 원전 신뢰도 평가지침[2]에 의거하여 수행되었으며, 그 결과는 표 1과 같은 Table로 정리하여 기기 고장의 발전소 운전 영향 평가 검토에 활용하였다. 고장수목분석의 경우 발전소 정지관련 계통의 고장수목 모델링 지침[3]에 따라 수행하였다.

2. 본 론

2.1 기기 구성

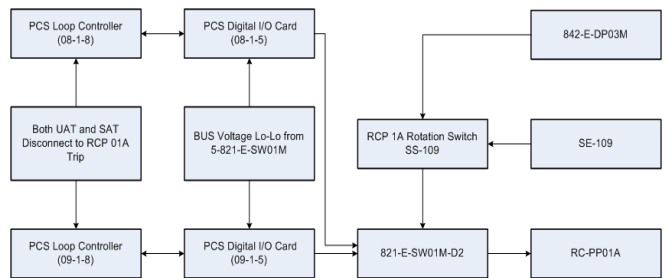
원자로냉각재계통은 2개의 열전달 회로를 가진 가압 경수로형으로 폐회로 내에서 냉각수를 순환시키며, 노심과 내부구조물로부터 열을 이차(중기발생기)계통으로 전달한다. 원자로 냉각재 압력은 가압기에 의해 제어되는데 가압기 체적은 전 출력 운전중 포화수와 포화증기로 나누어진다. 가압기내 침수형 전열기에 의한 증기 생성 및 가압기 살수에 의한 증기 응축을 통하여 발전소 상태에 따른 압력 제한치 및 운전 압력을 유지한다.

표준형원전의 원자로 냉각재 계통에는 4대의 원자로 냉각재 펌프가 설치되어 있고, 펌프케이싱, 확산판, 임펠러, 쉘 하우징, 추력 베어링 문치 및 전동기, 축밀봉 장치 등으로 구성되어 있다. 발전소 운전중 노심에서 생성된 열을 적절히 제거할 수 있도록 충분한 강제 순환유량을 제공하고, 원자로 냉각재 펌프의 최소 유량 제한치(설계유량)에 의해 핵연료 설계기준을 초과하지 않도록 하고 있다. 또한 발전소 가동시 원자로 냉각재 펌프 운전에 따른 첨가열을 이용하여 원자로 냉각재를 가열시킨다.

원자로 냉각재계통 가압기에 병렬로 설치되어 있는 2대의 가압기 주살수밸브는 1A와 1B 냉각재펌프 출구로부터 가압기 살수노즐로 공급되는 살수유량을 조정한다. 주 살수밸브는 다이어프램으로 작동되는 글로브밸브이며, 밸브 개방 구동력으로 계기용 공기를 사용하고 계기용 공기 상실시 밸브가 닫히도록 스프링이 설치되어 있다.

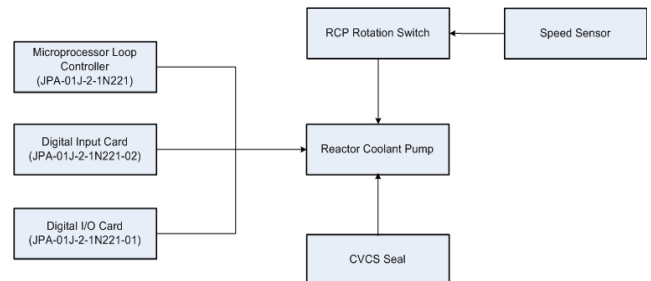
2.2 제어 회로

그림 1은 원자로 냉각재 펌프의 전원 공급부의 기능블럭도이다. 정상시에는 발전소 보조변압기(Unit Auxiliary Transformer)를 통해 펌프 구동 전원을 공급받게 되며 전원공급 상실시 순시절체에 의해 대체 전원인 대기용변압기(Standby Auxiliary Transformer) 전원을 공급받는다.



〈그림 1〉 원자로 냉각재 펌프 전원 공급부의 신뢰도 블럭선도

그림 2는 원자로 냉각재 펌프의 제어회로를 설명한다. 구동 및 정지 신호 입력 및 펌프 흡입구 압력, 펌프 속도 등의 현장 공정신호 등이 입력된다. 또한 밀봉수가 관련 제어밸브를 통해 펌프로 공급된다.

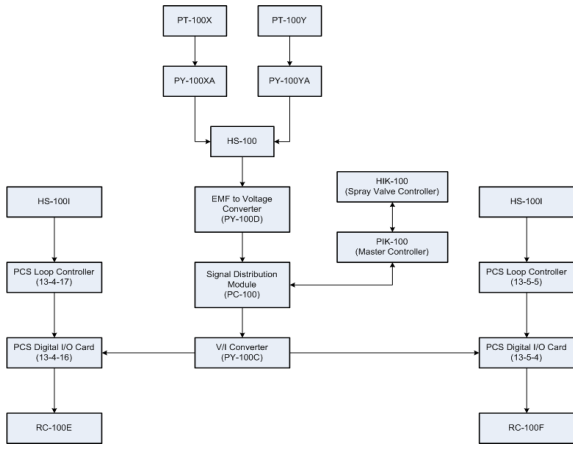


〈그림 2〉 원자로 냉각재 펌프(01PA) 제어부의 신뢰도 블럭선도

그림 3과 같이 가압기 주 살수밸브는 발전소 제어계통(Plant Control System)과 핵증기 공급 제어계통(NSSS Control System)으로부터 제어 신호를 받는다. 살수밸브의 동작 제어는 자동 및 수동제어가 가능한 가압기 압력제어기에서 이루어진다.

정상출력 운전중 가압기 살수밸브는 가압기 압력제어기에 의하여 허용범위 내에서 제어되며 2개의 가압기 압력채널 중에 1개의 채널이 자동 압력제어기에 입력신호를 보내도록 선택되어 있다. 자동 압력제어기는 실제 압력신호와 운전원이 선택한 설정치를 비교하여 두 신호의 차에 비례하는 출력 제어신호를 발생하여 가압기 살수밸브 제어기로 공급한다.

가압기 압력 채널(PT-100 X & Y) 제어계통은 입력에 2개의 협력(1,500~2,500Psia) 가압기 압력채널이 사용된다. 1개의 채널이 제어신호로 선택되고 다른 채널은 선택된 채널이 고장시에 보조신호로 사용된다. 두 채널은 또한 발전소 감시계통과 증기 우회제어계통에 입력신호를 제공한다. 어느 채널이 제어용으로 선택되는가에 관계없이 두 채널은 2,350Psia에서 “압력 높음” 경보를 발생하고 2,160Psia에서 “압력 낮음” 경보를 발생한다. 두 채널에서 출력신호는 계속적으로 비교되어 두 채널의 편차가 50Psia 이상이 되면 편차 경보신호를 발생한다.



〈그림 3〉 가압기 주 살수 밸브의 신뢰도 블록선도

2.3 고장모드영향분석

안정된 상태의 발전소 정상 출력 운전기간 동안 원자로 냉각재 펌프는 4대가 운전중인 상태이며, 가압기 주 살수밸브는 닫힘상태에서 가압기 압력제어기에 의해 요구시 동작한다. 본 연구에서 수행한 고장모드 영향분석은 계통별로 원자로 정지 및 출력감발에 직접적으로 기여하는 기기선별 및 관련 고장모드 식별을 주 목적으로 하고 있기 때문에 본 계통에 포함된 기기별 고장모드 영향분석은 발전소 출력운전 상태를 고려하여 평가하였다.

원자로 냉각재 계통에 대한 고장모드 영향분석을 수행한 결과 발전정지 유발기기에 해당하는 주요기기는 아래와 같이 식별되었다.

- 원자로 냉각재 펌프 및 관련 제어카드
- 원자로 냉각재 펌프 전원 차단기 보호계전기 CT
- 고압 밀봉냉각기 전/후단 밸브
- 원자로 냉각재 펌프 사이클론 여과기
- 밀봉유출수 차단 밸브
- 가압기 안전밸브

〈표 1〉 FMEA에 의한 원자로냉각재계통의 발전정지유발기기 예

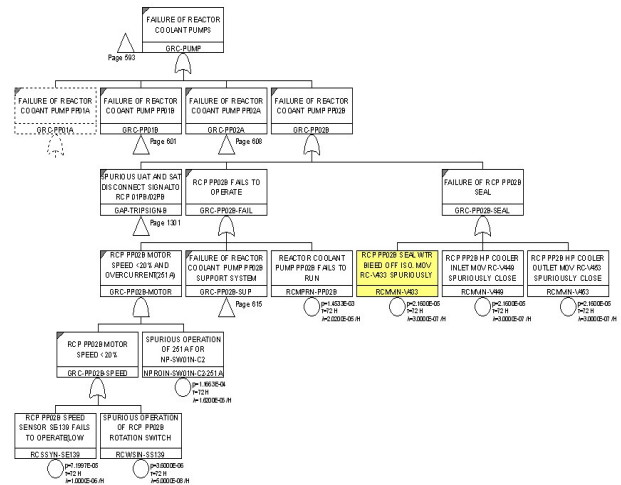
번호	기기이름	기기번호	고장모드	고장이 계통에 주는 영향
1	On-Off Loop Controller Module	301-01 (PA01-01-30 1-01)	오신호	오작동에 의해 정지신호 발생시 운전중 펌프인 431-RC-PP01A 작동 실패, 원자로 냉각재 펌프 운전 정지로 인한 원자로 정지
2	Termination Relay	301-01-KB (PA01-01-30 1-01)	오신호	오작동에 의해 정지신호 발생시 운전중 펌프인 RC-PP01A 작동 실패, 원자로 냉각재 펌프 운전 정지로 인한 원자로 정지
3	On-Off Loop Controller Module	303-01 (PA01-03-30 3-01)	오신호	오작동에 의해 정지신호 발생시 운전중 펌프인 431-RC-PP01A 작동 실패, 원자로 냉각재 펌프 운전 정지로 인한 원자로 정지
4	Termination Relay	303-01-KB (PA01-03-30 3-01)	오신호	오작동에 의해 정지신호 발생시 운전중 펌프인 RC-PP01A 작동 실패, 원자로 냉각재 펌프 운전 정지로 인한 원자로 정지
5	고압 밀봉냉각기 전단 밸브 (PP01A)	RC-V446	의사단협	고압 밀봉냉각기로 공급되는 밀봉수 공급실패로 밀봉유출수 유량의 감소를 초래해 RCP 펌프 정지로 인한 원자로 정지 유발

2.4 고장수목 분석

원자로 냉각재 계통의 고장수목 분석에서는 원자로 냉각재 펌프와 가압기 주 살수밸브에 포함되어 있는 기기 가운데 고장모드 영향분석을 통하여 원자로/발전 정지에 기여하는 것으로 식별된 모든 기기를 모델하여 개발하였다. 또한 발전소제어계통의 루프 제어기에는 각 기기를 제어하는 논리가 구현되어 있으므로 고장수목 분석 대상에 포함하였다.

4대의 원자로 냉각재 펌프는 안정된 상태의 발전소 정상 출력 운전기간 동안 항시 운전중인 기기로서 1대의 원자로 냉각재 펌프가 정지되면 원자로 정지를 유발할 수 있다. 2대의 가압기 주 살수밸브는 가압기 압력 강화와 밀접한 관계가 있는 밸브로, 오동작으로 인한 가압기 주 살수밸브의 열림시 운전원이 적절히 조치를 취하지 못할 경우 발전정지를 유발할 수 있는 것으로 분석하였다.

본 연구에서 수행한 고장수목 분석은 계통별로 원자로/발전 정지 및 출력감발에 직접적으로 기여하는 기기 고장모드 식별 및 중요도 분석을 주 목적으로 하고 있기 때문에 본 계통에 포함된 기기별 고장 사건을 모델링하는 고장모드는 기본적으로 위의 발전소 전출력 운전조건을 고려하여 평가하였다.



〈그림 4〉 원자로냉각재펌프 제어회로의 고장수목

원자로 냉각재 계통의 고장수목 개발과 관련하여 적용된 가정사항 및 특성은 아래와 같다.

- 상당수의 발전정지 유발기기는 고장시 이를 감지하고 원자로 정지를 방지할 수 있도록 자동적으로 대처하는 기능을 갖추고 있으나, 기기 자체의 기능 수행 실패뿐만 아니라 기능고장이 감지되지 않는 상태에서의 오작동 또는 오신호 발생으로 기기의 기능수행 실패를 야기할 수 있으므로 이를 분석에 반영하였다.
- 유량계 및 오리피스 등의 기기는 막힘등의 현상으로 인한 고장가능성이 있으나, 그 발생가능성이 지극히 낮고 발전소 정상운전 중 실패할 가능성이 낮기 때문에 모델링에 포함시키지 않았다.

고장수목 정량화 결과로 나타난 최소단절집합 및 중요도 분석에 의하면 원자로 냉각재 계통의 기기 가운데 원자로/발전 정지에 가장 크게 기여하고 있는 기기는 원자로 냉각재 펌프, 밀봉수계통의 사이클론 여과기, 1차기 냉각수 공급라인의 스트레이너, 가압기 안전방출밸브 등으로 나타났다. 이외에도 원자로냉각재계통 관련 전력계통, 발전소제어계통 기기들이 원자로/발전 정지에 기여하는 것으로 나타났다.

3. 결론

RCP 전원 공급계통의 급전 차단기 트립을 유발하는 CT(계기용 & 보호용), 과전류계전기(250/51A, 250B, 251A, 251M), 전동기보호용 차동계전기(287M) 및 지락전류 계전기(250GS)가 발전정지유발기기로 분석되었다. 제어회로에 대해서는 RCP의 제어루트는 이중화되어 있지만, 제어카드 및 신호 입출력카드의 오신호 발생으로 해당 펌프가 정지되는 고장모드는 설계의 이중화로도 방지할 수 없는 문제로 확인되었다. 가압기 주살수 밸브 및 관련 제어회로는 최근 설치된 비상 수동 차단용 밸브의 설치로 단일고장으로는 발전소 정지에 영향이 없는 것으로 검토되었다.

본 분석을 통해 확인된 발전정지유발기기에 대하여 오신호 발생에 의해 원자로냉각재 펌프의 정지를 유발할 수 있는 잠재적 가능성을 파악하여 해당 제어카드 및 입출력카드에 대한 오신호 작동방식 대책 수립이 필요한 것으로 판단된다. 분석결과는 발전소로 제공되어 신뢰도개선 방안 검토가 진행중에 있다.

[참고 문헌]

- [1] KHNP, 발전정지유발기기 감시프로그램 개발, 2010
- [2] IEEE 352, Guide for General Principles of Reliability Analysis of Nuclear Power Plants, 1987
- [3] EPRI, Generation Risk Assessment(GRA) Plant Implementation Guide, TR-1008121, 2004