한국압력기기공학회 논문집
제10권 제1호 2014년 7월 pp. 31-36

신규노형 원전의 발전정지유발기기 선정을 위한 고장모드영향분석

현진우† · 염동운*

Failure Mode Effective Analysis for selection of Single Point Vulnerability in New type Nuclear Power Plant

Jin Woo Hyun† and Dong Un Yeam*

(Received 9 May 2014, Revised 23 May 2014, Accepted 23 May 2014)

ABSTRACT

For decreasing an unexpected shutdown of Nuclear Power Plants, Korea Hydro & Nuclear Power co.(KHNP) has developed Single Point Vulnerability(SPV) of NPPs since 2008. SPV is the equipment that cause reactor shutdown & turbine trip or more than 50% power rundown due to its malfunction. New type Nuclear Power Plants need to develop the SPV list, so performed the SPV selection for about 1 year. To develop this, Failure Mode Effect Analysis(FMEA) methods are used. As results of FMEA analysis, about 700 equipment are selected as SPV. Thereafter those are going to be applied to new type Nuclear Power Plants to enhance equipment reliability.

Key Words : SPV(Single Point Vulnerability) (발전정지유발기기), FMEA(Failure Mode Effects Analysis) (고장모드영향분석), FTA(Fault Tree Analysis) (고장수목분석)

1. 서 론

국내 원자력발전소에서는 기기 고장으로 유발되는 발전소 불시정지 횟수를 줄이기 위하여 중요한 설비에 대해서 발전정지유발기기(SPV : Single Point Vulnerability)로 선정하여 관리하고 있다. 발전정지유발기기란 단일 고장으로 원자로, 터빈발전기 정지 또는 50% 이상 출력감발을 유발하는 기기를 말하며, 이러한 SPV 기기를 관리함으로서(관리 강화 및 설계변경, 예방정비 개선 등) 발전소 불시정지를 최소화할 수 있다[1]. 국내에서 최초로 건설되는 새로운 노형인 APR1400형 원전은 UAE에 수출되는 원전과 동일한 모델로서 안전성과 설비의 신뢰성을 대폭 향상시킨 국내 최신의 원전이라 할 수 있다. 설비신뢰성 향상을 위해서는 최신의 기술과 설비를 도입하는 것도 중요하지만 이와 더불어 최적의 설비 신뢰도를 유지하기 위한 정비활동도 매우 중요한 부분이다. 이를 위해서 중요한 설비, 특히 발전정지에 직접적인 영향을 줄 수 있는 발전정지유발기기를 체계적으로 관리하는 것이 필요하다고 할 수 있는데, 본 논문에서는 이러한 발전정지유발기기를 선정하기 위한 고장모드영향분석 방법과 수행내용을 설명하고 신규노형에서 분석된 결과를 토대로 기존노형과의 차이점을 분석하였다. 또한 이를 토대로 선정된 발전정지유발기기에 대한 계통별 특성에 대하여도 고찰하여 보았다.

† 책임저자, 회원, 한수원 중앙연구원 책임연구원
E-mail: hjwvip@khnp.co.kr
TEL: FAX:
* 한수원 중앙연구원 책임연구원

2. 고장모드영향분석 방법론

2.1 개요

고장모드영향분석(Failure Mode Effects Analysis:

FMEA)이란 분석대상 계통의 구성요소에 대한 고장모드를 식별하고 이러한 고장모드 발생 시 그 결과를 평가하는 체계적인 절차이다. 고장모드영향분석의 기본적인 기능은 각 계통의 주요 구성기기들이 어떻게 고장이 발생할 수 있으며(고장모드 식별) 고장으로 인한 계통상의 영향(고장영향 식별)이 어떠한가를 분석하여 계통의 신뢰도 향상을 위한 다양한 방안을 수립하기 위한 기초 자료로 활용하는 것이다.

고장모드영향분석은 계통의 신뢰도 향상을 위한 노력의 일환으로 다양한 목적을 가지고 수행될 수 있으며 초기 설계단계에서 높은 신뢰도와 안전성을 갖는 설계 대안을 선택하기 위해서나, 가능한 모든 고장모드와 계통 운전의 성공에 대한 기기고장영향을 고려하고 있는지를 확인하고, 기기고장을 나열하고 그들의 영향을 검토하기 위해서, 기기에 대한 시험계획과 시험 및 점검 체계의 설계에 대한 초기 설계기준 등을 제공하기 위해서 수행된다. 이번에 수행되는 고장모드영향분석의 목적은 신규노형 원전의 분석대상 계통의 구성기기별로 발생 가능한 고장모드를 식별하여, 원자로정지 또는 발전정지 유발 가능성을 평가하는 것이다. 이를 위해 일반적인 고장모드영향분석 방법론 및 절차를 검토하여 고장모드영향분석 수행 양식을 개발하였으며, 특히 고장모드 영향의 중요도를 평가하는 항목을 별도로 포함하여 후속 분석절차인 고장수목 분석결과와 연계하여 비교 및 검토가 가능하도록 하였다[2].

2.2 상세 수행절차

계통별 고장모드영향분석은 계통 선정 및 친숙화, 계통별 분석대상 기기 및 고장모드 식별, 기기 고장모드별 발전정지 가능성 평가 단계로 수행하였다.

2.2.1 계통 선정 및 친숙화

계통 선정 및 친숙화 단계에서는 고장모드영향분석 수행 대상이 되는 계통을 선정하고 선정된 계통에 대하여 아래의 사항들을 식별하여 분석대상 계통에 대한 분석을 수행하였다.

- 발전소 운전조건에 따른 계통 기능
- 주요기기, 기기별 기능, 기기별 연관관계 등을 포함한 계통의 전반적인 설계 정보
- 운전모드, 제어, 운전원 조치사항, 운전에 필요한 계통 및 타 계통과의 연관관계
- 운영기술지침서 요구사항 및 이로 인한 계통 이용불능과 발전정지에 미치는 영향

2.2.2 분석대상 기기 및 고장모드 식별

기기별로 발생 가능한 고장모드는 기기에 대한 기본적인 설계 및 운전 특성, 기기유형별 고장모드 자료를 제시하고 있는 다양한 기기 고장 데이터베이스를 참조하여 식별하였다. 본 분석은 발전소 정상출력 운전 기간 동안에 기기의 고장모드별로 원자로정지 또는 발전정지 측면에서의 영향을 식별하는 것이 주된 목적이기 때문에, 발전소 정상운전 상태가 아닌 특별한 발전소 운전 조건에서 발생 가능한 기기별 고장모드에 대한 분석은 포함하지 않았다. 예를 들면, 주전력 계통에서 발전기 보호와 관련된 계전기의 경우 오작동에 의하여 발전기를 트립시키는 고장모드는 고려하였으나, 계전기에 정상적인 정지신호가 전달되었으나 계전기가 닫힘 또는 열림 실패하는 고장모드는 본 작업의 수행목적에 해당하기 않기 때문에 분석대상 고장모드에서 제외하였다.

2.2.3 발전정지 가능성 평가

기기 고장모드별 발전정지 가능성 평가에서는 분석대상 기기의 고장모드별로 기기의 고장이 파급되어 나타나는 영향을 설계 및 운전 자료에 근거하여 평가한 후 Table 1에 따라 그 기기고장에 따른 발전정지 중요도(Trip Criticality: TC)의 등급을 정의하였다. 이러한

Table 1 Trip Criticality classification table

중요도	분류 기준
TC-1	• 단일기기 기능 상실에 의한 영향이 다음과 같을 때 : 원자로/발전정지, 50% 이상 출력감발
TC-2	• 단일기기 기능상실에 의한 영향이 다음과 같을 때 : 50% 미만 출력감발 • 2개 기기의 기능상실에 의한 영향이 다음과 같을 때 : 원자로/발전정지, 50% 이상 출력감발 • 단일 또는 다중기기 기능상실에 의한 영향으로 운영기술지침서 요건 불만족에 의한 운전제한조건 적용
TC-3	• 2개 기기의 기능상실에 의한 영향이 다음과 같을 때 : 50% 미만 출력감발 • 3개 이상 기기의 기능상실에 의한 영향이 다음과 같을 때 : 원자로/발전정지, 50% 이상 출력감발
NC	• 대상기기의 기능실패가 발전정지/출력감발을 유발하지 않음.

기기고장에 따른 발전정지 중요도는 고장수목 개발에서 대상 고장모드의 발생가능성과 함께 고려하여 분석 범위 결정에 활용된다. 발전정지 가능성 평가 단계에서 수행하는 분석항목 및 분석내용은 아래와 같다[2].

- 고장영향 : 고장모드영향분석 수행대상 기기로 식별된 각 기기에 대하여 고장모드별로 계통/발전소 수준에서의 고장에 따른 영향을 파악
- 발전정지 중요도 : 고장모드영향분석 수행대상 기기로 식별된 각 기기에 대하여 표1 발전정지 중요도 평가표에 따라 결정된 중요도 수준을 기술

2.3 분야별 주요 고려사항

2.3.1 기계계통

각 기계 계통의 배관파손에 의한 영향은 분석에서 제외하였다. 그 이유는 주 유로에 대한 기능 및 고장영향은 해당 유로에 위치한 주요 기기들의 분석으로 충분히 파악 가능하기 때문이다.

- 주 유로 직경의 1/3 이하인 우회유로 배관에 위치한 기기의 고장은 주유로의 기능 수행에 영향을 주지 않는 것으로 분석하였다. 그 이유는 우회배관을 통해 나가는 유량이 전체 유량의 10% 미만이기 때문이다.
- 발전소의 출력운전 기간 동안 기기의 배열상태가 변화하는 기기에 대해서는 각각의 배열상태에 따른 고장모드를 구분하여 분석하였다.
- 분석대상 유로 상에 위치한 유량계(Flow Element)의 “막힘”은 발생가능성이 매우 낮고 해당 유로에 위치한 주요 기기들의 분석 내용으로 충분히 파악 가능하기 때문에 분석에서 제외하였다.
- 펌프를 구동하는 펌프 모터 및 터빈은 펌프의 기기 경계에 포함하여 분석하였다.
- 분석대상 유로 상에 위치한 수동밸브의 “Transfer Closed”는 발생가능성이 매우 낮고 해당 유로에 위치한 주요 기기들의 분석 내용으로 충분히 파악 가능하기 때문에 분석에서 제외하였다.
- 주급수 격리밸브와 주증기격리밸브, 터빈우회밸브 제어용 솔레노이드밸브는 주기기와 별도로 기기고장영향을 분석하고 분석대상 기기로 포함하였다.

2.3.2 전기 계통

- 소내전력 계통의 모선 인입 전원이 2개 이상인 경우 정상 공급전원과 대체 공급전원으로 구분하여 고장모드를 선별하였으며, 정상 공급전원과 대체 공급전원이 동시에 상실되는 경우에 모선의 기능이 상실되는 것으로 분석하였다.

2.3.3 계측 및 제어 계통

- 현장 감지기로부터 차단기 계전기 또는 차단기의 제어코일과 연계되는 CCS(Component Control System) 출력 계전기까지의 제어회로 구성기기를 분석대상에 포함하였다.
- 원격정지제어 계통은 주조정실에서의 조종이 불가능할 때 원격 정지를 위해 특별히 설계된 계통이므로 계측 및 제어계통의 분석대상에 포함하지 않았다.
- 공기구동밸브의 기기경계는 밸브구동체와 솔레노이드 밸브를 포함하고 제어를 위한 기기는 별도로 분석하였다.
- 연동(Interlock) 신호 없이 ON/OFF 동작만 하는 밸브도 계측제어기기에 의한 오동작을 분석하였다.

2.4 분석 결과

신규노형 APR1400형 원전의 고장모드영향분석결과 발전정지유발기기는 호기별로 726개로 선정되었으며 분야별로 결과를 비교하여 보면 Table 2와 같다.

계측분야의 발전정지유발기기가 313개로 전체에서 40.6%를 차지하는 것으로 평가되었으며, 전기분야와 기계분야가 각각 32.2%, 21.4%를 차지하는 것으로 나타났다. Fig 1은 신규노형 원전의 분석대상 발전정지유발기기에 대해 계통별로 수량을 비교한 그림으로 제어봉 제어계통(계통번호 : 772)에서 가장 많은 278개의 발전정지유발기기가 도출되었으며 이는 전체 발전정지유발기기의 38.29%에 해당되는 것이다.

APR1400형 원전의 발전정지유발기기 분석에서 처음에는 총14개 계통기능군으로 분류하였으나, 분석과정에서 스위치야드 계통(SY)이 분리 추가되고, 발전소보호 기능을 수행하는 계통들을 별도의 발전소보호 계통기능군으로 추가하여 총16개 계통 기능군으로 최종 결정하였다. 각 계통 기능군별로 주요 발전정지유발기기 목록을 Table 3에 요약하였는데 주로 제어봉제어, 소내전력, 주전력, 터빈계통 기능군에 분포하는 것으로 나타났다.

Table 2 Results of SPV through FMEA

	기계	계측	전기	합계
SPV 대상설비수	165	313	248	726
백분율(%)	21.4 %	40.6 %	32.2 %	100%

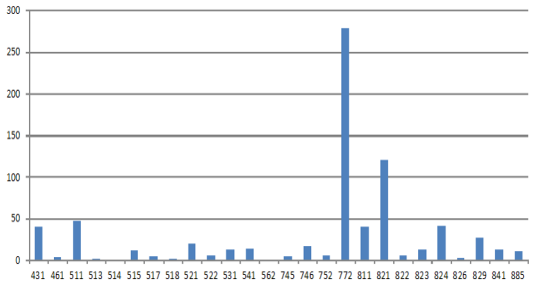

Fig. 1 Numbers of SPV by system

☞ 계통번호 400번대 : 원자로계통, 500번대 : 터빈계통, 700번대 : 계측계통, 800번대 : 전기계통

Table 3 SPV list by system group

계통기능군	주요 발전정지유발기기
원자로냉각재 계통	- 원자로냉각재펌프 및 관련 CCS 모듈 - 원자로냉각재펌프 냉각기 - 원자로냉각재펌프 고압냉각기 입/출구 격리밸브 - 원자로냉각재펌프 사이클론 필터 - 원자로냉각재펌프 제어유출수 밸브 - POSRV 및 POSRV 구동 밸브
주증기 계통	- 주증기안전밸브
터빈 계통	- 고압터빈/저압터빈 - 습분분리 재열기 - 터빈 정지밸브 및 조절밸브 - 수소냉각기 - 윤활유/밀봉유/제어유 탱크 - 고정자냉각수 온도조절밸브 및 유량조절밸브 - 전기적 비상정지 솔레노이드밸브 - 터빈 진동센서
복수 계통	- 복수기 - 복수기 진공파괴밸브및 관련 CCS 모듈 - 탈기기 및 탈기기저장탱크
주급수 계통	- 주급수 격리밸브 (541-V-0121/0122/0123/0124) - 주급수 제어밸브 (541-V-1112/1122) - 주급수 제어밸브 격리밸브 (541-V-0105/0106) - 주급수 제어밸브 격리밸브의 디지털 입, 출력 모듈 - 주급수 제어밸브 I/P 변환기 및 포지셔너 - 디지털 입력 모듈 746-J-LX53-A5 (LUBE OIL PRESSURE)
순환수 계통	- 복수기 출구밸브의 CCS 모듈
1차기기냉각수 계통	- 1차기기냉각수 완충탱크 TK01A - 원자로냉각재펌프 기기냉각수 공급 격리밸브 - 원자로냉각재펌프 기기냉각수 공급 격리밸브 디지털 출력 모듈 - 원자로냉각재펌프 기기냉각수 공급 격리밸브 COMPONENT INTERFACE MODULE - 원자로냉각재펌프 기기냉각수 회수 격리밸브 - 원자로냉각재펌프 기기냉각수 회수 격리밸브 디지털 출력 모듈 - 원자로냉각재펌프 기기냉각수 회수 격리밸브 COMPONENT INTERFACE MODULE - 원자로냉각재펌프 기기냉각수 회수 격리밸브 - 원자로냉각재펌프 기기냉각수 회수 격리밸브 COMPONENT INTERFACE MODULE
2차기기 냉각수 계통	- TGBCCW SURGE TANK TK01
계기용압축공기 계통	- 해당사항 없음
주전력 계통	- FIELD CIRCUIT BREAKER (AC) - FIELD CIRCUIT BREAKER (DC) - GENERATOR CIRCUIT BREAKER - CT FOR PROTECTION RELAY - MAIN, AUX TRANSFORMER - GEN ROTOR ASSY - ISOLATED PHASE BUS - EXCITATION CONTROL PNL. - MAIN XFMR - MAIN XFMR SIDE PT & SURGE ARRESTER CUBICLE - GENERATOR - GENERATOR NEUTRAL GROUNDING XFMR - EXCITATION TRANSFORMER - LOCK-OUT RELAY
소내전력 계통	- 비 안전 13.8kV SWGR 모선 SW01M, SW02M, SW01N, SW02N - 비 안전 13.8kV SWGR 모선 부하차단기 SW01M-E1/E2, SW02M-G2, SW01N-C1/C2, SW02N-B2 및 관련 보호계전기 - 비 안전 480V LOAD CENTER 모선 LC04M, LC04N - 비 안전 480V LOAD CENTER 모선 부하차단기 LC04M-A2/B3, LC04N-A2/B3 및 관련 보호계전기 - 비 안전 480V MCC 모선 MC30M, MC30N - 안전 125V DC 모선 MC01A, MC01B - 안전 125V DC 모선 부하차단기 MC01A-C2, MC01A-C1-PNL, MC01B-C2 MC01B-C1-PNL - 안전 125V DC 모선 부하차단기 MC01A-C2 의 관련 보호계전기

발전소보호 계통	- 해당사항 없음
발전소제어 계통(안전)	- 주기기의 해당 계통기능군에 포함
발전소제어 계통(비안전)	- 주기기의 해당 계통기능군에 포함
제어봉제어 계통	- CEDM(CONTROL ELEMENT DRIVE MECHANISM) - RSPT(REED SWITCH POSITION TRANSMITTER) - 논리 캐비닛 CCS 모듈 - RSPT 연동 캐비닛 CCS 모듈 - 전력 캐비닛 UG(UPPER GRIPPER) 관련 모듈, 퓨즈, 차단기
옥외전력 계통	- 765kV DISCONNECTING SWITCH 8222 - 765kV GIS #2 LCP - SWYD CTRL PNL - 765kV BREAKER FAILURE PROT PNL #2 PRI - 765kV BREAKER FAILURE PROT PNL #2 SEC - 765kV GIS MAIN BUS NO1 POTENTIAL TRANSFORMER - 765kV GIS MAIN BUS NO2 POTENTIAL TRANSFORMER - 765kV GIS #NO2 POTENTIAL TRANSFORMER - 765kV GIS #NO2 POTENTIAL TRANSFORMER - UNIT 3765kV GIB

2.4.1 기존노형과 결과비교

기존노형인 가동원전과 비교하여 전체적인 갯수에서는 226개의 발전정지유발기기가 감소한 것으로 나타났으며 각 계통 기능군별로 기존 가동원전과 신규노형 원전의 발전정지유발기기 목록을 계통별로 비교하여 주요차이점을 표4에 나타내었다.

Table 4 Compare of SPV between Old and New type Nuclear Power Plant.

계통명	기존노형	신규노형	주요차이(기존노형 대비)
원자로냉각재 계통	35	40	• SPV 추가 - POSRV 및 POSRV 구동 밸브 (설계차이) - FLOW ORIFICE
1차기기냉각수 계통	4	4	• 동일
터빈 & 보조 계통	47	47	• 동일
발전기 가스 계통	2	2	• 동일
주터빈 윤활유 계통	1	1	• 동일
터빈 제어유 계통	11	11	• 동일
발전기 고정자 계통	5	5	• 동일
발전기 축밀봉유 계통	2	2	• 동일
주증기 계통	16	20	• SPV 추가 - 주증기안전밸브
급수가열기 배수 계통	6	6	• 동일
주급수 펌프 터빈 계통	0	0	• 동일
복수 계통	6	12	• SPV 추가 - 진공 파괴 밸브 및 제어 모듈
주급수 계통	16	14	• SPV 제외 - FWCS 제어판넬 설계차이
2차기기냉각수 계통	1	1	• 동일
계기용압축공기 계통	0	0	• 동일
제어봉 제어 계통	428	278	• SPV 제외 - 제어봉제어 캐비닛 설계차이
보조 제어 패널	51	15	• SPV 제외 - 신고리 3,4호기에서 보호시스템 그룹(2/3 LOGIC)을 신설에 의한 설계차이
발전소제어 계통	27	20	• SPV 제외 - DIGITAL INPUT/OUPUT MODULE 설계차이 - COMPONENT INTERFACE MODULE 설계차이
주전력 계통	72	36	• SPV 제외 - 신고리 3,4호기에서 보호시스템 그룹(2/3 LOGIC)을 신설에 의한 설계차이
보조전력 계통	28	21	• SPV 제외 - 설계차이
13.8 kV 비 1E급 계통	132	120	• SPV 제외 - 설계차이
480V 부하반 비 1E급 계통	28	28	• 동일
480V 전동기제어반 비 1E급 계통	2	2	• 동일
직류 배전 계통	8	13	• SPV 추가 - 설계차이

스위치야드 전원 계통	0	10	• SPV 추가
4.16kV 비 1E급 계통	12	6	• SPV 제외 - 신고리 3,4호기에서 보호 시스템 그룹(2/3 LOGIC)을 신설에 의한 설계차이
4.16kV 부하반 1E급 계통	12	12	• 동일
합 계	952	726	226개 감소

3. 결 론

약 1년간의 분석 작업 수행 결과 한 호기 기준 총 726개의 발전정지유발기기를 선정하였으며 이는 기존 가동원전 대비 226개 정도 감소한 것으로 분석되었다. 주로 제어봉제어계통, 전력계통 설계변경 차이 등으로 감소 하였는데 제어봉제어계통의 경우 파워캐비넷내 각종 제어카드 디지털화로 설비 기능위치 수가 대폭 감소하였고 전력분야는 전기적보호계전기 3중화 설계개선으로 발전정지유발기기를 다수 감소시켰기 때문이다. 향후 '12발 제어봉 낙하 시 원자로 정지 방지' 관련 설계변경 시 더 많은 수의 발전정지유발기기가 줄어들 것으로 예상된다.

발전정지유발기기 선정을 위하여 체계적인 방법론을 적용하였는데 가장먼저 계통 친숙화를 위하여 자료조사와 분석을 통해 계통의 기능적 측면에서 이해를 도모하였으며 이를 기반으로 고장모드 영향분석을 수행하였다 본 논문에서는 언급하지 않았지만 상호 보완적인 검증차원에서 고장수목분석을 수행하였는데 이는 고장모드영향분석 결과를 가지고 논리수목도를 작성하여 계통간 상호 연관성을 검증하는 방법으로 이를 통해 최종적인 발전정지유발기기를 도출하였다.

본 작업에서 설비운영상 취약기기로 분석·도출된 발전정지유발기기는 새로 건설되어 운전되는 신규노형 원전에 제공될 것이며 발전소에서 대상기기별로 설계변경, 예방정비 개선 등 설비 신뢰도 향상 방안을 수립하여 발전소 불시정지를 최소화하기 위한 기본 자료로 사용될 예정이다. 또한 향후 SPV모니터 개발의 입력자료로 사용될 예정이며 UAE 수출원전의 발전정지유발기기 선정작업의 기초자료로도 활용 될 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국수력원자력(주) 재원으로 한수원 중앙연구원에서 APR1400형 원전 선진운영프로세스 구축과제의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. Eun Chan Lee, "A Single Point Vulnerability Outline," KHNP., pp. 1, 2010.
2. KHNP, 2013, "Development of Maintenance Process for APR1400", pp. 69~82